

目次

第 1 章	集合代数の構造	5
1.1	歴史的構造	5
1.1.1	Riemann 積分の問題点	6
1.1.2	Riemann 積分の拡張としての Lebesgue 積分	6
1.1.3	Fourier 係数による関数の構成	7
1.1.4	関数の極限構成	7
1.2	基礎論的構造	7
1.2.1	Riemann が辿り着けなかった集合	7
1.2.2	Cantor 集合	8
1.2.3	Lebesgue 可測集合の全体	9
1.3	Boole 代数の構造	9
1.3.1	束と Heyting 代数と Boole 代数	9
1.3.2	余談：分配則について	11
1.3.3	完備性	12
1.3.4	半束	12
1.4	「代数」の語について	12
1.5	順序構造	14
1.6	$P(\mathbb{R}^n)$ の代表元	15
1.6.1	区間	15
1.6.2	矩形	16
1.6.3	Lebesgue 測度論	16
1.6.4	Jordan 測度というミニチュア	17
第 2 章	測度論	18
2.1	σ -代数	18
2.1.1	集合環	18
2.1.2	σ -代数と例	19
2.1.3	代数の素直な性質	20
2.1.4	σ -代数の生成	20
2.2	σ -代数の生成	20
2.2.1	単調族	20
2.2.2	Dynkin 族	22
2.2.3	乗法族	22
2.2.4	イデアル	23
2.2.5	代数の完備性	23
2.3	可測関数	24
2.3.1	定義と特徴付け	24
2.3.2	可測関数に許された構成	25
2.3.3	単関数近似	26

2.4	測度	27
2.4.1	種々の集合関数	27
2.4.2	測度の定義と性質	28
2.4.3	前測度	29
2.5	完備可測空間	29
2.5.1	零集合	30
2.5.2	可測関数の概収束	30
2.5.3	Lebesgue 式拡張による完備化	31
2.5.4	完備化空間上の可測関数	31
2.6	外測度による測度の構成	32
2.6.1	定義とその例	32
2.6.2	外測度による測度の構成	33
2.6.3	計量的外測度	35
2.7	有限加法的測度の Hopf 拡張による測度の構成	35
2.7.1	Hahn-Kolmogorov の拡張定理	35
2.7.2	Lebesgue 式完備化との算譜合成	37
2.8	Lebesgue 測度の構成	38
2.8.1	構成	38
2.8.2	特徴付け	40
2.8.3	定義と一般化	42
2.8.4	Lebesgue 測度の性質	43
2.9	Lebesgue 可測関数	43
2.9.1	例	43
2.9.2	Borel 可測関数による近似	44
2.9.3	標準的構成	45
2.10	直積測度	46
2.10.1	直積 σ -代数の定義と特徴付け	46
2.10.2	直積測度の定義	47
2.10.3	完備性伝播の失敗	49
第 3 章	積分論	50
3.1	積分の定義	50
3.1.1	可積分性の特徴付け	50
3.1.2	不定積分の性質	52
3.1.3	定積分の性質	54
3.1.4	変数変換	55
3.2	収束定理	55
3.2.1	単調収束定理	55
3.2.2	Fatou の補題	56
3.2.3	Lebesgue の優収束定理	57
3.2.4	Beppo-Levi の定理	58
3.2.5	定積分の近似	58
3.2.6	Vitali の収束定理	58
3.2.7	微分と積分の可換性	59
3.3	Fubini の定理	60
3.3.1	Fubini の定理	60
3.3.2	Fubini-Tonelli の定理	62
3.3.3	完備測度の場合	62

3.4	Lebesgue 積分の性質	63
3.5	Lebesgue 積分と Riemann 積分	63
3.5.1	コンパクト集合上の Riemann 積分は Lebesgue 積分	63
3.5.2	Lebesgue 積分の Riemann 積分による近似	64
3.5.3	連続関数の場合	64
第 4 章	実数上の微分論	66
4.1	\mathbb{R} 上の微分	66
4.1.1	Dini の導来数	66
4.1.2	病的な連続関数	67
4.2	単調増加関数の微分	67
4.2.1	Vitali の被覆定理	67
4.2.2	単調増加関数の微分	67
4.3	項別微分定理	68
4.3.1	項別微分定理	68
4.4	有界変動関数の微分	68
4.4.1	有界変動関数の定義	68
4.4.2	有界変動関数の微分	69
4.4.3	変動関数の連続性	69
4.5	微積分学の基本定理	69
4.5.1	単調増加関数論：微分は積分の切断	69
4.5.2	不定積分論	69
4.5.3	有界変動関数論：積分は微分の切断	69
4.6	絶対連続性	70
4.6.1	不定積分の絶対連続性	70
4.6.2	\mathbb{R} 上の不定積分の特徴付け	70
4.6.3	絶対連続性の十分条件	70
4.6.4	絶対連続性の必要条件	71
4.7	有界変動関数の Lebesgue 分解	71
4.8	部分積分と置換積分	71
4.9	曲線の長さ	71
4.10	Denjoy 積分	71
4.11	完全加法的集合関数の値域	71
第 5 章	完全加法的集合関数	72
5.1	加法的集合関数とその変動	72
5.1.1	完全加法性の必要条件	72
5.1.2	変動と測度の Jordan 分解	73
5.1.3	Hahn の分解定理：符号付測度の定める分解	76
5.1.4	全変動の特徴付け	76
5.1.5	有界変動関数について	77
5.2	絶対連続集合関数と特異集合関数	77
5.2.1	定義と特徴付け	77
5.2.2	Lebesgue の分解	78
5.2.3	不定積分の特徴付けとしての Radon-Nikodym の定理	79
5.3	完全加法的集合関数の各点収束極限	81
5.4	完全加法的集合関数の微分についての Lebesgue の定理	81
5.5	直線上の絶対連続関数	81

5.5.1	絶対連続性	81
第 6 章	関数空間	82
6.1	測度空間上の関数空間： L^p	82
6.2	測度空間上の関数空間： M, S	82
6.3	Euclid 空間上の関数空間	82
6.3.1	合成積	82
第 7 章	Hausdorff 測度と fractal	84
第 8 章	参考文献	85
参考文献		86

モダンな解析学は Hilbert が初めて Bourbaki が完成させた公理化によって発展した．統一的な理解と数学内での相互作用が進み，代数幾何学を筆頭に荘厳な理論が完成した．が，偏微分方程式論や微分幾何学などでは，非線形的な対象など，公理化が難しい分野は発展しないという副作用もあった．そこで，今一度，個別具体的な対象に戻る機運が迫っている．このあとは，確率論による再統一が待っているのであろうか？

面積，体積，確率，スペクトル，フラクタル．これらはいずれも数学的形式としては全く等価で， σ -代数の射である．積分とは有界線型汎函数である．この見地に到達する 1 つの構成法が Lebesgue のもので， L^p 空間やソボレフ空間を完備とする．例えば，可積分性や，微積分の基本公式は， $L^1(X)$ という空間上で与えられる，という描像がはっきりした．このように，あまりに複雑なだけで，解析学に代数的なアプローチを可能にした基盤が，Lebesgue 積分論である．次に読みたい本には，Jürgen Jost. (1995). *Riemannian Geometry and Geometric Analysis* などがある．

第 1 章

集合代数の構造

集合代数 $P(X)$ は、「事象」などの意味論を持つ形式である。これはあまりに構造が豊かで、見通しが悪い。 $P(X)$ は次のような構造を持つ。

(1) 包含射による $2 = \text{TV}$ 上の豊穡圏である。

(2) 完備な Boole 代数である。

(3) 順序集合である (poset category)。

(1),(2) により、集合という形式は論理を完全に内包する。集合演算についての命題は 2 上の豊穡圏に翻訳され、Boole 代数の議論に帰着する。(2),(3) の構造を $[0, \infty], \mathbb{R}, \mathbb{C}$ などの構造に写す射が測度であり、殆どの人類の認知形態はこの形式に沿う。

このように、函数解析などの、解析学に代数的なアプローチを導入する下地を作ったのが Lebesgue 積分論であるが、集合に関係するレベルでは未だに基礎論的な困難が深い。そこで、まずこの章ではこの問題を扱う。

1.1 歴史的構造

関数の問題が、現在の函数解析の世界観を生んだ。Lebesgue 積分論または測度論は、そのための構成論にあたる、ごく 1 ピースに過ぎない。

歴史 1.1.1 (年表)。

1854. Riemann による定積分の定義「三角級数によって表現できる関数について」

1872. Weierstrass による至ところ微分不可能な関数の構成。

1878. Darboux の定理。

1881. Jordan による有界変動関数の導入と、1887 年の長さ有限性との関連。

1883. Cantor の 3 進集合。

1890. Peano による空間を埋め尽くす曲線の構成。

1898. Borel の可測集合。

1902. Lebesgue による測度と積分の理論。

1905. Vitali による非可測集合の構成。

1906. Fatou による Rebesgue の理論の複素関数論への応用 (博士論文, Poisson integral of an arbitrary measure on the unit circle について)。初の Rebesgue の理論の実用である。^{†1}

歴史 1.1.2 (Bourbaki による近代解析学)。Fourier 1768-1830 が数学を 19 世紀化したとすれば、数学の 20 世紀化は、解析学の概念的枠組みを 1870 年ごろから急速に現代化した。Fourier の夢を原動力として進むと、数々の反例と問題が登場して、ナイーブな関数の取り扱いは全て破れ、代わりにより幾何学的で抽象的な枠組みが鍛造されていった。Riemann 1826-66 による積分の定義と、Poincaré 1854-1911 が数学を 20 世紀化したと見れるだろう。

^{†1} Fatou は複素力学系の開拓者となった。足助先生と繋がる。

1.1.1 Riemann 積分の問題点

Riemann 可積分性を特徴付けたのも Lebesgue の仕事であるが、それは du Bois-Reymond の定理を継承して、高度に位相論的な議論であった。

定義 1.1.3 (Riemann integrability). 上 Riemann 積分と下 Riemann 積分がいずれも有限で、値が一致するとき、Riemann 積分可能という。

系 1.1.4 (Darboux の定理 (1878) の系). 有界関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ について、次の 2 条件は同値。

- (1) f は Riemann 可積分である。
- (2) $\forall \epsilon > 0 \exists n \in \mathbb{N} \exists \Delta = \{a = x_0 < \dots < x_n = b\} \subset [a, b] \sum_{i=0}^{n-1} (M_i - m_i)(x_{i+1} - x_i) \leq \epsilon$.

定義 1.1.5 (oscillation). 関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ の点 $x_0 \in [a, b]$ における連続度とは、

$$\omega_f(x_0) = \omega(x_0; f) := \lim_{n \rightarrow \infty} \omega(J_n; f), \quad \omega(J_n; f) = \sup_{x \in J_n} f(x) - \inf_{x \in J_n} f(x) \quad (J_n := [x_0 - 1/2n, x_0 + 1/2n] \cap [a, b]).$$

$\omega_f(x_0) = 0$ は、 f が x_0 にて連続であることに同値。

定理 1.1.6 (du Bois-Reymond (1882)). 有界関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ について、次の 2 条件は同値。

- (1) f は Riemann 可積分である。
- (2) $\forall \eta > 0 \forall \epsilon > 0 E(\eta) := \{x_0 \in [a, b] \mid \omega_f(x_0) \geq \eta\}$ は、Lebesgue 測度が ϵ より小さいような「有限個の一点でない閉区間の和」に含まれる、

定理 1.1.7 (Lebesgue (1902)). 有界関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ について、次の 2 条件は同値。

- (1) f は Riemann 可積分である。
- (2) f の不連続点は Lebesgue 零集合である（長さの総和がいくらでも小さいような、高々可算個の開集合の和で被覆できる）。

こうすると、Dirichlet 関数は Riemann 可積分でないが、 $L^1(\mathbb{R})$ の完備性のためには、これは可積分で積分 0 にしたい。

1.1.2 Riemann 積分の拡張としての Lebesgue 積分

すると、選択公理を認めないならば、全ての関数について Lebesgue 和 $\bar{S} \in [0, \infty]$ が定まる。Riemann 和のように、無限大に発散することに加えて「存在しない」ということがない。これが $E[X] < \infty$ などという書き方の真意である！

記法 1.1.8. $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}_+$ を有界とは限らない非負関数とする。

- (1) $y_0 = 0, y_n \rightarrow \infty$ を満たす単調増加列 $\{y_n\} \subset \mathbb{R}_+$ を y 軸の分割 Δ という。
- (2) これに対して、 $E_n := f^{-1}([y_n, y_{n+1}))$ とおくと、これは $[a, b]$ の分割である。
- (3) $\underline{S} := \sum_{n \in \mathbb{N}} y_n \cdot m(E_n), \bar{S} := \sum_{n \in \mathbb{N}} y_{n+1} \cdot m(E_n)$ を、Lebesgue の和という。

定理 1.1.9. 非負関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}_+$ について、 $\{\bar{S}^\Delta\}_{\Delta \in \mathbb{R}_+^{\mathbb{N}}} \subset \mathbb{R}_+$ が有界ならば、 $0 \leq \underline{S} = \bar{S}$ 。

Lebesgue 和の場合は、 $\bar{S} = \underline{S}$ が既に成り立っている。この点こそ、関数 f に即して $[a, b]$ を分割した Lebesgue の着想の適切性を示している。とは言っても、のちに判明するように、 \mathbb{R} 上には「点列」「分割」では迫れないものがあって、ということである。

1.1.3 Fourier 係数による関数の構成

確率過程も、関数も、適切な基底をとって係数から構成したい。Riemann 積分の至らない点は、 $\mathcal{R}^1(\mathbb{R})$ が完備でないということであるが、これの対応物が見つからない点で現れる。実はこの問題の逆、Fourier 係数を求めたいということが、歴史上初めて積分の厳密な定義を要請した原動力であった。

問 1.1.10 (Fourier 係数を指定して得る関数はどのような関数か?). Fourier による熱方程式の解法 (1810s) は、本質的に、初期温度分布 $u(0, x) = f(x)$ の Fourier 級数を求めよ、という問題に帰着する、という理論であった。Riemann 積分可能な関数全体からなる集合 $\mathcal{R} \subset \mathcal{L}^1([-\pi, \pi]; \mathbb{C})$ は Fourier 展開可能であるから、写像 $\mathcal{R} \rightarrow l^2(\mathbb{Z})$ が定まる。正確には、次の通り：

f_1, f_2 を周期 2π を持つ $(-\pi, \pi)$ 上 Riemann 可積分な関数とする。いま、ある $x_0 \in (-\pi, \pi)$ の近傍において $f_1 = f_2$ が成り立つならば、 x_0 における Fourier 級数の収束・発散のモード、そして極限值は一致する。[4]

しかし、この逆は定まらない。特に、 $l^2(\mathbb{Z})$ は完備であるが、 \mathcal{R} はそうではない。そこで、任意の二乗総和可能な数列 $(a_n) \in l^2(\mathbb{Z})$ に対して、これを Fourier 係数とする関数はどのようなものか考えたい。

この解決は次である。

定理 1.1.11 (Carleson, L. (1966)). 任意の $f \in L^2((0, 2\pi))$ の Fourier 級数 $S[f]$ は、殆ど至る所 f に収束する。

1.1.4 関数の極限構成

問 1.1.12 (連続関数の極限はどんな関数か?). 関数列 $(f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C})$ に対して、 $f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ と定める。 (f_n) が一様連続ならば f も連続である。

$$\int_0^1 f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^1 f_n(x) dx$$

が自然に成立する積分の枠組みも欲しい。

問 1.1.13 (曲線の長さとは?). 曲線 Γ が長さ有限であるためには、 $x(t), y(t)$ がどうあれば良いか。どのように測れば良いか? これは、有界変動という概念で明確に捉えられ、長さを測るのに適切なパラメータの付け方のクラスが特定できる。また、曲線の長さが面積的な意味を持ち得る。正方形を埋め尽くす平面上の連続曲線が存在する。

1.2 基礎論的構造

Lebesgue 非可測集合を構成するには、選択公理が必要である。この意味で、我々の観念体系・知識の限界を表現するのが、Lebesgue 可測性とその射としての測度である。これは、 $P(X)$ の構造よりも貧しい。我々の知識は、 X 上の σ -代数のフィルターションとして表現するほかないのだ。このことは、認識論的な成果でもあると思う。そこで、統計的実験とは、数学的には組 $(\mathcal{G}, \mathcal{A}, \mathcal{P})$ を言うのである。

1.2.1 Riemann が辿り着けなかった集合

定理 1.2.1 (Solovay, R. (1970).). ZF 公理系に、 $\text{Map}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}) = \mathcal{L}(\mathbb{R}^n)$ なる主張を加えても無矛盾である。

定理 1.2.2 (Lebesgue 非可測集合). 選択公理の下で、Lebesgue 非可測集合は存在する。

[証明]. $d = 1$ の場合について示す。一般の場合はこれについて直積集合を作れば良い。

構成 $x, y \in (0, 1]$ に対して、 $x \sim y \Leftrightarrow x - y \in \mathbb{Q}$ とすると、これは同値関係を定める。その商集合を $(0, 1]/\sim =: \{A_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ と表す。選択公理を認めると、 $E := \{x_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda} \in \prod_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$ が取れる。

証明 この E が可測と仮定して、矛盾を導く. すると、0 より大きく 1 以下の有理数 $\{r_n\}_{n \in \mathbb{N}} := \mathbb{Q} \cap (0, 1]$ に対して、

$$E_n := ((E + r_n) \cap (0, 1]) \cup ((E + r_n) \cap (1, 2] - 1)$$

と定めると、この E_n も可測であり、かつ互いに素であり、 $m(E) = m(E_n)$, $(0, 1] = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ を満たす (Lebesgue 測度の平行移動に対する不変性 2.8.21). したがって、 $1 = \sum_{n=1}^{\infty} m(E_n) = \sum_{n=1}^{\infty} m(E)$ が必要だが、これを満たす $m(E) \in [0, \infty]$ は存在しない. よって矛盾.

要諦 1.2.3. Lebesgue 可測集合は、有理数などの可算部分集合に注目して、平行移動などの互いに素な集合を生む変換を考える. 値を持つとするならば、この代数演算についても閉じている必要があるが、これを満たす実数 $[0, \infty]$ は存在しなくなる.

区間の有理数による同値類 \mathbb{R}/\mathbb{Q} を可測とすると、集合演算 $A + a$ について、未定義動作を起こしてしまう. r_n だけ平行移動した集合 $E + r_n$ は、 $\text{mod } \mathbb{Q}$ の世界では E と同じなので測度が等しいが、各 $r_n \in \mathbb{Q} \cap (0, 1]$ について別の集合を生んでしまう. この代数法則を満たして測度を 1 とするような測度の付値は存在しない.

この深度が Lebesgue 積分の成功の本質である. Riemann のアプローチは直感的であるが、全ての関数に対して「積分」と呼ぶべき値を定めるならば、ここまでの深度が必要で、これは Riemann のような、点列が定める分割を考えただけでは辿り着かない. 開集合の生成する σ -代数まで考えなければいけない.

1.2.2 Cantor 集合

連続体濃度の Lebesgue 零集合

可算回の操作の極限として、不思議な集合を定義できる. このような操作を議論する枠組みを作るのが測度論の真髄である. Cantor 集合は幾何学的に (位相空間論的に) 議論出来るが、形式的には 3 進数展開に出現する数字に制限を定めているだけである. これは非可算な零集合の例となる.

定義 1.2.4 (Cantor space). 閉区間 $C_0 := [0, 1]$ から、开区間の列 $(J_{k,n})_k := \left(\left(\frac{k}{3^n}, \frac{k+1}{3^n} \right) \right)_{k=1,3,\dots,3^n-1}$ を除いて行くことで定まる互いに素な閉区間の列 $C_n := C_{n-1} \setminus \bigcup_{k=1}^{3^n-1} J_{k,n}$ は、降数列 $[0, 1] = C_0 \supset C_1 \supset C_2 \supset \dots \supset C_k \supset \dots$ を定める. これら全体の共通部分 $C := \bigcap_{k=0}^{\infty} C_k = [0, 1] \setminus \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=1}^{3^n-1} J_{n,k} \right)$ は有界な閉集合であるから可測で、**Cantor 集合**といい、 P_C で表す.

補題 1.2.5 (三進数展開としての特徴付け). C は、実数 $x \in [0, 1]$ の三進数展開 $x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{3^k}$ ($a_k \in \{0, 1, 2\}$) について、 $\forall_{k \in \mathbb{N}} a_k \neq 1$ を満たす点全体からなる集合と一致する.

命題 1.2.6 (Cantor 空間の位相). $2 := \{0, 1\}$ を離散空間とすると、 $C \simeq 2^{\mathbb{N}}$ である. 特に、完全不連結であり、かつ、完全である (孤立点を持たない). これが P_C の記法の所以である.

[証明]. 全単射

$$\begin{array}{ccc} 2^{\mathbb{N}} & \xrightarrow{\quad} & C \\ \downarrow \Psi & & \downarrow \Psi \\ (a_n)_{n \in \mathbb{N}} & \mapsto & \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2a_i}{3^i} \end{array}$$

は位相同型である.

命題 1.2.7 (サイズと長さとの概念の違い). Lebesgue 測度は 0 であるが連続体濃度である.

[証明].

Lebesgue 測度 C_n の構成で取り除いた区間 $\bigcup_{k=1}^{3^n-1} J_{k,n}$ の長さは $\frac{1}{3^n} \times 2^{3^n-1}$ であるから、 $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{2^{k-1}}{3^k} = 1$.

連続体濃度 $b_k := \begin{cases} 0, & a_k = 0, \\ 1, & a_k = 2. \end{cases}$ として $C \ni x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{3^k}$ ($a_k \in \{0, 1, 2\}$) を 2 進数展開 $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{2^k}$ へ対応させると、対応 $\varphi: C \rightarrow [0, 1]$ は全単射となる。

■

1.2.3 Lebesgue 可測集合の全体

系 1.2.8. \mathbb{R}^1 の Lebesgue 可測集合の全体 $\mathcal{M}(\mathbb{R}^1) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^1)$ の濃度は連続体濃度である。

1.3 Boole 代数の構造

解析学で最も大事な構造：完備 Boole 代数

$P(X)$ の結び半束としての対称な構造、特に \neg の果たす役割は関数解析まで通底して重要である。値域としては $[0, \infty]$ を考えれば良いこと、 $BV[a, b]$ としては単調増加関数を考えれば良いこと、単調収束定理、 σ -代数は Boole 代数の単調閉包を考えれば良いこと、全ては、 $BV[a, b]_+$ を 2 つ、上下逆に組み合わせることで全体を復元できることに因る。

1.3.1 束と Heyting 代数と Boole 代数

定義 1.3.1 (lattice, complete lattice).

- (1) 基本的に $P(X)$ は順序に関して束の構造を持つ。束とは、有限の交わりと有限の結び^{t2}を持つ半順序集合であるが、順序も代数として見ることができ、したがって純代数的には次を満たす代数系 $(L, \wedge, \vee, \top, \perp)$ をいう。
 - (a) $\wedge, \vee: L \times L \rightarrow L$ は幂等で、結合的で、交換的である。
 - (b) 吸収律 $a \vee (a \wedge b) = a, a \wedge (a \vee b) = a$ が成り立つ。^{t3}
 - (c) \top, \perp は \wedge, \vee の中立元である。
 2 つの表現は $a \leq b \Leftrightarrow a \wedge b = a, b \leq a \Leftrightarrow a \vee b = a$ で対応する。^{t4t5}
- (2) 束が任意の交わりと結びについて閉じているとき、これを完備という。^{t6} 圏 CompLat をなす。結びのみについて閉じている場合を frame という。^{t7}
- (3) 束の射は、 $f(a \wedge b) = f(a) \wedge f(b), f(a \vee b) = f(a) \vee f(b)$ という 2 つの semi-lattice 構造を保つものをいう。特に f は単調写像である必要があるが、十分ではない。この圏を Lat などと表す。

例 1.3.2 (束と束準同型の例)。

- (1) 部分群の束を定め、結びは NH 、交わりは $N \cap H$ となる。
- (2) 位相 \mathcal{O} は完備束をなすが、無限共通部分は \cap 演算とは一致しないことに注意。あくまで順序構造が完備束をなす。
- (3) \mathbb{R} は束であるが完備ではない。局所コンパクト空間 \mathbb{R} の端点コンパクト化 $\overline{\mathbb{R}}$ は top と bottom を備え、完備束となる。 $[0, \infty]$ も同様。積分 $\mathcal{B} \rightarrow [0, \infty]$ は束準同型ともみれる。

定義 1.3.3 (set operation). $P(X)$ について、

- (1) (任意個数の) 共通部分と合併 $\cap, \cup: P(X) \times P(X) \rightarrow P(X)$ がある種の極限に思える。すると、 $(P(X), \cap, \cup, \emptyset, X)$ は完備束となる。また任意濃度の分配則が成り立ち、これを de Morgan 則という。

^{t2} poset as a $(0, 1)$ -category としては、それぞれ直積と直和 (coproduct) と見れる。

^{t3} それぞれ、結び、交わりという「直近の交差点」を通じてアクセス可能だという順序構造を代数的に表しているとみれる。

^{t4} この 2 つの対応は、順序表現が鳥瞰図、代数表現がその Hasse 図の上を動くパックマンの気持ちのようである。

^{t5} この対応は同値な条件を 2 つ述べている。これは、束とは、「同じ順序関係を定める 2 つの半束を備えた代数系が束である」という特徴づけの消息が映り込んでいる。

^{t6} 圏が完備であることは任意の極限を保つことを言う。こゝろ辺が本質である。

^{t7} が、adjoint functor theorem から示せる基本的な事実として、双対的に任意の結びももち、したがって結局完備である！

- (2) 写像 f は一般に $f(\cup_{i \in I} A_i) = \cup_{i \in I} f(A_i)$. f が単射ならば、空でない族 $(A_i)_{i \in I} \quad I \neq \emptyset$ について、 $f(\cap_{i \in I} A_i) = \cap_{i \in I} f(A_i)$. すなわち、単射 f が引き起こす全射 f_* は完備束の射である (σ -加法性も保つ).
- (3) 一般の写像 f が定める反変関手 f^* は完備束の射である.

定義 1.3.4 (mapping).

- (1) $f(A) \subset B \Leftrightarrow A \subset f^{-1}(B)$ は、包含射 $i: X \hookrightarrow Y$ が存在するという 2 上の豊穡圏での「内積」を $\langle -, - \rangle: P(X) \times P(X) \rightarrow 2$ と表すならば、写像 f が冪集合上に定める関手を用いて、 $\langle f_*(A), B \rangle = \langle A, f^*(B) \rangle$ となるから、これらは互いに随伴である.

定義 1.3.5 (Heyting algebra, Boolean algebra). 束は明らかに、双対的な 2 つの代数系 (半束) を組み合わせたものである.^{†8} ここに bicategory 的な消息があるのは自然なことである (Heyting 代数は bicartesian closed category のことに他ならない^{†9}). bicategory に特徴的なものは随伴・内積・currying・exponent である. f_*, f^* の互いに逆な関手が 2 つ生まれることはこの消息である.

- (1) 次の普遍性 (\wedge との右随伴性, \vee との左随伴性) を満たす bicunctor (実は internal hom) $\Rightarrow: L^{\text{op}} \times L \rightarrow L$ を備える束 L を **Heyting 代数** という: $(x \wedge a) \leq b \Leftrightarrow x \leq (a \Rightarrow b)$.^{†10}
- (2) Heyting 代数には、2 つの半束を行き来する $\neg: L^{\text{op}} \rightarrow L$ が、 $\neg x := (x \Rightarrow 0)$ として自然に定義できる. これが involution である時、**Boole 代数** といい、命題論理のモデルとなる. これがなす圏を BoolAlg と表す.^{†11}
- (3) ブール代数は環として理解できる. 単位的な環が Boolean であるとは、任意の元 $x \in R$ について $x^2 = x$ を満たすことを言う. これは通常の環準同型について圏 BooRng をなす. これは Boole 代数の圏と圏同値になり、1 つの集合 R に入る Boole 代数の構造と Boole 環の構造とは標準的な全単射が存在する.

注 1.3.6. Boole 代数と Boole 環とは $0 = \perp, 1 = \top$ という対応であり、その違いは、 σ -代数と σ -体の違いに等しい. 環とは Ab 内の idempotent semigroup を意味し、体または代数とは Ab 内の idempotent monoid を意味する.^{†12} これは現代的な環・体・代数の定義とは異なる. σ -環 $\mathcal{G} \subset P(X)$ と言ったとき、 $P(X) \in \mathcal{G}$ とは限らないことに対応する (定義 2.1.3). いずれの場合も、和の Abel 群 $(P(X), \cap, \cup)$ の方が大事で (群とはいいいにくい、自然には可逆でない)、その上に \cap の構造がどう乗るかを考え、 σ -と言った時は加法に注目する. この観点からは「集合体」という表現にも一理ある.

注 1.3.7. Boole 代数 2 は、2 つの semilattice が結合した代数系として一番退化した形である. そもそも忘却しても $P(X) \simeq \text{Hom}_{\text{Set}}(X, 2)$ なのであった. Boole 代数としてはウルトラフィルターが表現される: $\text{Ult}(X) \simeq \text{Hom}_{\text{BoolAlg}}(X, 2)$.

例 1.3.8 (完備 Heyting 代数と Boole 代数の例).

- (1) 完備 Heyting 代数のことを frame という. が、frame と言った時、射は suplattice の射を採用し、完備 Heyting 代数の射は採用しない.
- (2) 位相は完備束である 1.3.2 ことに加え、位相は完備 Heyting 代数である. と言っても、順序については $\perp = \emptyset$ が存在するのでそうであるが、 $\wedge = \cap$ ではないので、普段の位相の議論の文脈では違うと言いたい.
- (3) $P(X)$ は完備 Heyting 代数である上に、 $\complement: P(X) \rightarrow P(X)$ は involution なので、**完備 Boole 代数** である. 実は、 $P(X)$ は atomic 性によって同型を除いて一意に定まる.^{†13} したがって、関手 $P: \text{Set}^{\text{op}} \rightarrow \text{CompBoolAlg}$ は充満忠実である. この本質的な像は CABA (complete atomic Boolean algebra) と表す. まず Boole 代数の元 $a \in A$ が atom であるとは、 a が $A \setminus \{\perp\}$ の極小元であることを言う. Boole 代数 A が atomic であるとは、任意の $b \in A$ に対して、 $\text{atom } a_i$ のみからなる合併 $b = \bigvee_{i \in I} a_i$ を持つことを言う. このような構造を持つ Boole 代数は、必ず何かしらの集合の冪集合である.

測度論と積分論では、位相の frame には対称性を加え Boole 代数にまで上げ、しかし完備 Boole 代数よりは条件を弱めて、可算個の結びと交わりについてのみの閉性を要求する σ -代数 2.1.3 というクラスに注目する.

^{†8} 2 つのフィルター／イデアルをひっくり返してくっつけて、全体として束 (のあの特徴的な Hesse 図) になる、という感じ.

^{†9} bicartesian closed category とは、有限 coproduct も有限 product も (モノイド構造として) 備えた closed category であり、2 つの構造 \wedge と internal hom \Rightarrow の間に随伴関係 = currying がある poset category のことを言う.

^{†10} そうか、必要十分条件がわからないというけど、これは \wedge, \vee との随伴の中に生きているのか. $- \wedge a$ と $a \Rightarrow -$ が随伴ね. この随伴は、一般的にはモノイド圏で捉えられるモノイド構造と指数対象 = cartesian monoidal category に関する internal hom との随伴性の例になっている.

^{†11} 任意の束の射は $\neg: L \rightarrow L^{\text{op}}$ を保つ.

^{†12} 半束も idempotent monoid のことであると理解できる.

^{†13} 排中律を認めた場合

keywords

2 上の豊穡圏、束準同型としての積分の代数的定義が Lebesgue 積分であること、作用素的な世界観、mathematics based on human cognition は「射的なもの」へと漸近していく。集合の共通部分も合併も、束の交わりも結びも、下限・上限として極限的な存在である。だから最大と最小よりも普遍的な存在なのである。これを代数化したのが束（さらに双壁的な消息を捉えると Heyting 代数）だと思える。ただ完全にこの言葉で書かないのは、集合の言葉の方が構造は豊かで、また直感的だからであるが、frame による位相空間論の使いやすさを見ると、ここは新たな研究領域としても良いだろう。すると集合列の極限も圏は違えど全く同様に議論できて、上限 \limsup と下限 \liminf が見つかる。

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{CompBoolAlg} & \subset & \sigma\text{-Alg} & \subset & \text{BoolRng} & \sim & \text{BoolAlg} & \subset & \text{HeytAlg} & \subset & \text{Lat} & \subset & \text{Pos} \\
 \uparrow P & & & & & & & & \cup & & \cup & & \\
 \text{Set}^{\text{op}} & & & & & & \text{Frm} & \simeq & \text{CompHeytAlg} & & \text{CompLat} & &
 \end{array}$$

1.3.2 余談：分配則について

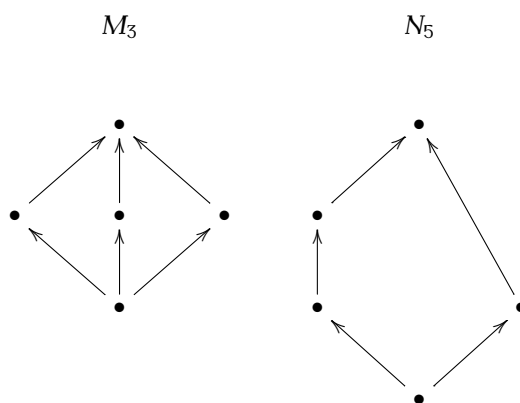
分配性は極めて美しい圏論的特徴づけがある。したがって、self-duality も成り立つ。

定義 1.3.9.

- (1) $x \vee (y \wedge z) = (x \vee y) \wedge (x \vee z)$ かつ $x \wedge (y \vee z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z)$ を満たす束を**分配則**という。実は2つの条件は同値で、片方を満たせば十分であるが、このようなことは無限分配束については起こらない。これは束の半束からの self-dual な構成が背景にある。
- (2) 分配則は圏 DistLat をなす。

定理 1.3.10 (分配則の特徴付け：Birkhoff). 束 L について、次の2条件は同値。

- (1) L は分配的である。
- (2) 埋め込み $N_3 \hookrightarrow L, M_5 \hookrightarrow L$ はいずれも存在しない。



例 1.3.11.

- (1) 任意の Heyting 代数（したがって Boole 代数）は分配的である。
- (2) 任意の線型順序は分配的である。

よって、 $P(X) \rightarrow [0, \infty]$ は分配則の準同型と見れる。

1.3.3 完備性

完備束上で、単調列は収束する部分列を持つか？完備 Boole 代数 $P(X)$ 上では、補題 1.5.3 のように、収束の上下極限による特徴づけからも議論できる。

1.3.4 半束

σ -代数 \mathcal{G} の基底にある束の構造に注目すれば、これは半束＝木の組み合わせであり、加法的集合関数 $\mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ はこれを保つ。その消息が Jordan 分解 5.1.10 であり、Hahn 分解 5.1.12 である。半束という模様を抽出した時点で、ただの冪等な可換モノイドであるが、極めて豊かな構造を持つ。

定義 1.3.12 (join-semilattice, lattice). 結び半束には、次の4つの同値な定義がある。

- (1) 任意の有限集合に上限が存在するような半順序集合である。
- (2) 任意の2元に上限が存在するような、最小元 \perp をもつ半順序集合である。
- (3) 任意の有限極限を持つ poset category である。
- (4) 任意の有限余積を持つ poset category である。
- (5) 可換で冪等なモノイド (A, \vee, \perp) である。ただし、二項関係を $a \leq b : \Leftrightarrow a \vee b = b$ とする。

交わり半束とはその反対圏である。したがって、純代数的には、構造に違いはなく、いずれも可換冪等モノイドである。違いは形式的には記号のみである。可換冪等モノイドの射を半束の射という^{†14}。これらがなす圏を SemiLat と表す。すると、SemiLat は可換冪等モノイドの圏として一つだが、埋め込み方 $i: \text{SemiLat} \hookrightarrow \text{Pos}$ が二通りある。

poset が結び半束であり、かつ交わり半束であるとき、これを束という。

注 1.3.13. 伝統的には、可換冪等半群を半束とよび、中立元／最小元を持つとき有界であると言ったが、これでは poset に使う有界性の概念と齟齬が生じる。

定義 1.3.14 (suplattice). 任意の部分集合に上限が存在するような半順序集合を上限束という。

補題 1.3.15. 上限束は下限束でもある。したがって、完備束であることに同値。

1.4 「代数」の語について

Terence Tao の § 2.3 of *An epsilon of room, Vol. I* に詳述がある。

議論 1.4.1 (algebra). algebra という用語法はおそらく field から離陸したのだろう。今回、Boole 代数と σ -代数が繋がったことと、何かしらの準同型 $P(X) \rightarrow \mathbb{R}$ が大事であることから、スッキリ理解できた。[2] でも集合体／有限加法族は Boole 代数として導入されている。となると、函数解析学でも代数は極めて重要であり、位相という形でも、線形代数という形でも、極限構成という形でも、種々の代数が入り乱れる場となる。 \mathcal{G} は束＝2つの半束の合体である。束とは木である。この2つの木を分離するのが完全加法集合関数 $\mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ である。根は根に対応させ、そこから世界を2つの世界樹に分け、 $P(X)$ をどちらかが取る。

議論 1.4.2 (Stone representation theorem, Loomis-Sikorski representation). 全ての具体的な Boole 代数＝有限加法的測度空間 (X, \mathcal{G}) は、抽象的な意味でも Boole 代数である。この逆を保証するのが Stone の表現定理で、"So, up to (abstract) isomorphism, there is really no difference between a concrete Boolean algebra and an abstract one." [2] そして具体的な σ -代数を測度空間と呼ぶ。この場合は抽象的な σ -代数が具体的な Boole 代数として表現されるとは限らない。しかし失敗する場合は特定されていて、null set のなすイデアルで商を取れば良い。

^{†14} モノイドの射が自然に群の者になるように、モノイドの射は自然に冪等性と可換性を保つ。

定義 1.4.3 (morphism of Boolean algebra, Stone space).

- (1) 抽象 Boole 代数の射とは, $\emptyset, \cup, \cap, \complement, \subset$ を保つ写像とする. 可測関数 $f: X \rightarrow Y$ は, 逆向きの Boole 代数の射 $\mathcal{B}_Y \rightarrow \mathcal{B}_X$ を定めるのは, frame と locale の関係に似てる.
- (2) 完全不連結なコンパクトハウスドルフ空間 (X, F) を **ストーン空間**という. Stone 空間の位相 F は, clopen set の具体 Boole 代数 $\text{Cl}(X)$ を定め, これは F の開基となっている.

補題 1.4.4.

- (1) Stone 空間 X の位相 F は, $\text{Cl}(X)$ によって生成される. すなわち, $\text{Cl}(X)$ は F の開基である.
- (2) 2つの Stone 空間 X, Y について, $X \simeq Y \Leftrightarrow \text{Cl}(X) \simeq \text{Cl}(Y)$ である.

定理 1.4.5 (Stone 表現定理). 任意の Boole 代数 A に対して, ある Stone 空間 X が存在して, $A \simeq \text{Cl}(X)$ を満たす.

要諦 1.4.6. この対応

$$\begin{array}{ccc} \text{BoolAlg} & \longrightarrow & \text{Stone}^{\text{op}} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \mathcal{B} & \longmapsto & \text{Hom}(\mathcal{B}, 2) \\ X & \longmapsto & \text{Cl}(X) \end{array}$$

は圏同値を与える. Frame と Locale の関係に極めて似ている.

It is the model example of the more general Stone duality between certain partially ordered sets and certain topological spaces. The idea of dualising a space X by considering the space of its morphisms to a fundamental space (in this case, $\{0, 1\}$) is a common one in mathematics; for instance, Pontryagin duality in the context of Fourier analysis on locally compact abelian groups provides another example (with the fundamental space in this case being the unit circle \mathbb{R}/\mathbb{Z}); see Section 1.12. Other examples include the Gelfand representation of C^* algebras (here the fundamental space is the complex numbers \mathbb{C} ; see Section 1.10.4) and the ideal-variety correspondence that provides the duality between algebraic geometry and commutative algebra (here the fundamental space is the base field k). In fact there are various connections between all of the dualities mentioned above.

補題 1.4.7 (Birkhoff 表現定理). 任意の有限 Boole 代数 B に対して, ある集合 X が存在して, $B \simeq_{\text{BoolAlg}} P(X)$ が成り立つ.

議論 1.4.8 (sequence and its limit). 測度論とは基本的に $[0, \infty]$ と同じ構造を集合代数の中を作る理論である. $\bigcup_{n=1}^{\infty}$ について閉じていることを要請するために, この閉性を議論するときによく $[0, \infty]$ 上の数列に写して考える. これで初項 $\frac{1}{2}$ 公比 $\frac{1}{2}$ の等比数列がよく登場することとなる. このときに附番を使う. 可算和と可算濃度というのが測度の概念としての本質になってくる. これは, ϵ に抑え続けることができることに相当して, ϵ - δ 論法の中で使われる. ここまで戻らなきゃいけないのは少し鈍臭いというか, もう少し代数学の霊性を使えないのか.

- 可測関数は単関数列で各点収束させられる. これについて定理を持ち上げる (Lusin の定理 2.9.3 など).
- σ -有限性が満たされるとき, $\mu(A) < \infty$ の場合のみを考えれば良い (Radon-Nykodim の定理 5.2.12 など).
- 有界な集合の列で全体に至ることが出来るとき, $A_n := E \cap (B(0, n) \setminus B(0, n-1))$ ($n = 1, 2, \dots$) というように開球で階段を作って補題 2.8.10 を使う (Lebesgue 非可測集合の構成 1.2.2 や Lebesgue 可測集合の正則性についての補題 2.8.2 など).

議論 1.4.9 (ϵ - δ). ϵ - δ 論法で定理のステートメントが記述され, \inf, \sum もその土俵にまで解体して議論する. しかしその証明は高度にアルゴリズム的で, 集合論の複雑さが大いに発揮されている. これを自動化できないものか. 少し馬鹿馬鹿しく感じる. 逆に言えば測度論の証明は全てこれである. あまりに代数的な分野なのにそう見えないのは本来的ではないではないか.

1.5 順序構造

積分論とは、集合の列による極限構成を基本言語とする理論である

測度が定まるものによる近似を考えるとするなら、一番基本的な道具はなんだろうか。宇宙 $P(X)$ の構造を考えると、これは poset category であり、特に完備で bicartesian closed である。^aつまり、好きに極限を扱える。これを hack するのが新たな積分論である。この上での filtration を考えたり、数の集合への Pos-射を考える理論が測度論であり、 $P(X)$ から出る Pos の関手の関手性を劣加法性という。つまり包含射 = 2 上の射が不等号 \leq の本質である。この関手性の極限的な理想形（演算 \cup が \sqcup または $+$ となるとき）を σ -加法性という。単に additivity と言ったらこれを指す。

そこで圏 $P(X)$ の列の極限を考える。これによって種々の集合の構成を行う理論である。これは X の列 = 点列の拡張となっており、ニューラルネットワークっぽい。点列では集積点の集合が定まり、 \sup, \inf によりその集合の上限と下限が取り出せるが、集合列では「集積集合」なる束が定まり、その順序関係は包含射としたものとなり、 \sup を極大集合、 \inf を極小な集合と読める。すると単調列が収束することが極めて自然に理解できる。

^a 完備とは任意の極限を持つこと、bicartesian closed poset とは Heyting 代数のことで、直積と直和が備わり、指数対象 = cartesian closed category における internal hom も備わり、これらが currying と呼ばれる随伴関係を持つこと。

記法 1.5.1 (symmetric difference).

- (1) 直和という極限構成を $A + B := A \cup B$ ($A \cap B = \emptyset$) で表す。これは \mathbb{R} などでの直和が Abel 群の標準的な演算子 $+$ で表されるためである。
- (2) 対称差を $A \dot{-} B := (A \setminus B) + (B \setminus A)$ と表す。

定義 1.5.2. $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を集合の列とする。

- (1) $\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n := \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{v=n}^{\infty} A_v$ を最大極限集合または上極限集合といい、列 (A_n) の元のうち、十分遠くでは必ず現れる = 無限回現れる (i.o.) 元からなる集合を表す。
- (2) $\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n := \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcap_{v=n}^{\infty} A_v$ を最小極限集合または下極限集合といい、列 (A_n) の元のうち、手前の有限個を除いて全ての A_n で現れる (f.e.) 元からなる集合を表す。
- (3) $a \in A_n$ ($n \geq \exists N$) である元は、任意の $n \in \mathbb{N}$ について $a \in \bigcup_{v=n}^{\infty} A_v$ であるから、一般に $\liminf A_n \subset \limsup A_n$ である。この逆も成り立って 2 つの集合が一致するとき、集合列 (A_n) は収束するといい、 $\lim_{n \rightarrow \infty} A_n$ を極限集合という。

補題 1.5.3 (有界な単調列は収束する). $P(X)$ とは有界な束である。そこでの単調列 (A_n) は収束する。

[証明]. $\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n \supset \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$ を示せば良い。単調増加列では $\exists N \in \mathbb{N} \ a \in A_N$ ならば、 $\forall n \geq N \ a \in A_n$ より、無限回登場するものは、初登場以降登場し続ける。単調減少列では $a \in A_n \Rightarrow a \in A_1$ より、無限回登場するものは、実は初回から登場し続けている。 ■

補題 1.5.4 (極限集合の特性関数). 列 (A_n) について、

- (1) $\chi_{\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n}(x) = \limsup_{n \rightarrow \infty} (\chi_{A_n})$.
- (2) $\chi_{\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n}(x) = \liminf_{n \rightarrow \infty} (\chi_{A_n})$.

要諦 1.5.5. interval category $2 = \{0 \rightarrow 1\} \in \text{Pos}$ への関手が、極限を保つことを言っている。あまりに綺麗に圏論の言葉で特徴付けられるので笑ってしまった。

$P(X)$ 上での極限

単調列は収束することを、上下極限の特徴付け (Darboux の方法みたい) で示せる。これは暗黙に位相を考えているはずで、非常に気持ちが悪い。

1.6 $P(\mathbb{R}^n)$ の代表元

\mathbb{R}^n 上の Lebesgue 測度の基本は、 $\sigma(\mathcal{R}^d = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$ という観察による。これより、Riemann 可積分関数の不連続点を捉えるにあたって直感的に閉集合を用いていた du Bois-Reymond (1882) を超克した。

1.6.1 区間

定義 1.6.1 (extended real number, set function).

- (1) 拡張実数 $\overline{\mathbb{R}} := \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ には、線型順序を入れ、算法は $(\pm\infty) + (\mp\infty), (\pm\infty) - (\pm\infty), 0 \cdot (\pm\infty)$ 以外を定める。なお、後者は 0 に収束する非零数列 (a_n) を考えると、 $(0a_n)$ は空な列 $\mathbb{N} \rightarrow 1$ であるから、 $0(\pm\infty) = 0$ と約束することが多く、事実いくつかの議論が簡単になる。

族 $\mathcal{F} \subset P(X)$ について、 F で定義された \mathcal{F} -集合関数とは、 $\Phi: P(F) \cap \mathcal{F} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ をいう。

定義 1.6.2 (interval, rectangle, figure).

- (1) $a < b \in \overline{\mathbb{R}}$ について、 $(a, b] := \{x \in \overline{\mathbb{R}} \mid a < x \leq b\}$ を区間という。ただし $b = \infty$ のときに限って、 $(a, b] := (a, \infty)$ とする。空集合も区間とする。^{†15} $(a, b), [a, b]$ は开区間、閉区間と呼び分ける。
- (2) $R_d = (a_1, b_1] \times (a_2, b_2] \times \cdots \times (a_d, b_d] \subset \mathbb{R}^d$ を矩形または区間といい、 $R = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \cdots \times [a_d, b_d] \subset \mathbb{R}^d$ を閉矩形と呼び分ける。^{†16} 区間全体の集合を $\mathcal{I}_N \subset \mathbb{R}^N$ で表す。
- (3) $b_1 - a_1 = b_2 - a_2 = \cdots = b_d - a_d$ を満たす矩形を立方体という。
- (4) 矩形 R の体積を $|R| := (b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \cdots (b_d - a_d)$ で表す。
- (5) 矩形の和集合がほとんど互いに素であるとは、矩形の内部の和集合が互いに素であることをいう。
- (6) 有限個の矩形の直和（あるいは内点を共有しない閉矩形の有限直和）で表される集合を区間塊と言い、その全体を $\mathcal{F}_N \subset \mathbb{R}^N$ で表す。^{†17}

命題 1.6.3. 任意の開集合 $U \subset \mathbb{R}$ は、互いに素な开区間の可算個の和集合としてただ一通りに表せる。

例 1.6.4 (区間塊上の集合関数).

- (1) $f: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ を \mathbb{R}^N 上での積分が絶対収束する連続関数とする。区間塊上での Riemann 積分が定める写像 $\Phi: \mathcal{F}_N \rightarrow \mathbb{R}$ は \mathcal{F}_N 集合関数である。
- (2) 矩形の体積の拡張 $\Psi: \mathcal{I}_N \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ を定める。定数でない単調増加な関数 $f_1, \dots, f_N: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ に対して、

$$\Psi(I) := \begin{cases} 0, & I = \emptyset, \\ \prod_{v=1}^N (f_v(b_v) - f_v(a_v)), & I \text{ は有界}, \\ \sup\{\Psi(J) \in \mathbb{R} \mid J \subset I \text{ は有界な区間}\}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定めると、各 f_1, \dots, f_N が恒等関数であるとき、これは矩形の体積となる。 f_1, \dots, f_N を有界な関数とすると、 Ψ も有界となる。

- (3) すると、 Φ の自然な区間塊への延長 $\mu: \mathcal{F}_N \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ が定まる。これが well-defined であることは、区間塊の区間への直和分割は任意に細分して結び（共通分割）を取れることから従う。

^{†15} $a > b$ のときも許す、みたいな定義は区間の長さを定義するときに齟齬を起こす。

^{†16} Lebesgue-Stieltjes 積分の流儀による。

^{†17} [2] では、区間の積は box、その有限直和を elementary set と呼んでいる。

1.6.2 矩形

伊藤記法

特に区間／矩形と呼ばれるクラスの集合に注目する．これは任意に細分できて下がないことを特徴にもち，これが矩形の体積 1.6.4 の well-definedness の基盤となる．矩形の言葉で，開集合の性質も特徴付けられる．数直線上の開集合の互いに素な开区間への分解は，高次元化に耐えない． \mathbb{R}^d 上の開集合のほとんど互いに素な立方体への分解は，一意性が成り立たない．

伊藤 [1] では区間は $(a, b]$ とし，空集合も区間とする． N 次元区間も区間といい，区間の有限直和を区間塊と呼ぶ．区間の全体を \mathcal{I}_N ，区間塊の全体を \mathcal{J}_N とする．また， $+$, \sum は直和を表すというのは兄弟で共通のようだ．

補題 1.6.5 (区間塊は δ -環である).

- (1) 区間の有限共通部分は区間である．
- (2) 区間塊の有限共通部分は区間塊である．
- (3) 区間の補集合は区間塊である．
- (4) 区間塊の有限合併は区間塊である．

定義 1.6.6 (limit / accumulation point, perfect).

- (1) $x \in E$ が極限点／触点であるとは，任意の $r > 0$ に対して $(B_r(x) \cap E) \setminus \{x\} \neq \emptyset$ であることをいう．
- (2) 閉集合 E が完全であるとは， E が孤立点を持たないことをいう．

補題 1.6.7 .

- (1) 矩形 R がほとんど互いに素な有限個の矩形 $(R_k)_{k \in [N]}$ の和集合で表されるとする．この時 $|R| = \sum_{k=1}^N |R_k|$ である．
- (2) $R \subset \cup_{k=1}^N R_k$ のとき， $|R| \leq \sum_{k=1}^N |R_k|$.

命題 1.6.8 . 任意の開集合 $U \subset \mathbb{R}^d$ ($d \geq 1$) は，ほとんど互いに素な可算個の開立方体の和集合として表される： $U = \sum_{i \in \mathbb{N}} I_i$. このとき， $\sum_{i=1}^{\infty} |I_i|$ の値は，分割の仕方に依らない．

系 1.6.9 . $\sigma(\mathcal{R}_d) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ である．

定義 1.6.10 . $|G| := \sum_{i=1}^{\infty} |I_i|$ の値を，開集合 G の **Lebesgue 測度** という．

1.6.3 Lebesgue 測度論

開集合が矩形によって近似計算できるのと同様に，開集合によって近似計算可能な集合を**可測**とした．これはまさに，小学校式の「面積」の観念そのものである．

Lebesgue 可測集合は完備であることもあって，区間塊は任意合併について閉じている 4.2.3.

定義 1.6.11 .

- (1) $N \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^n)$ が $N \in \mathcal{N}(\mathbb{R}^n)$ であるとは， $\forall \epsilon > 0 \exists G_\epsilon \in \mathcal{O}(\mathbb{R}^n) N \subset G_\epsilon \wedge |G_\epsilon| < \epsilon$ を満たすことをいう．
- (2) $M \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^n)$ が $M \in \mathcal{M}(\mathbb{R}^n)$ であるとは， $\forall \epsilon > 0 \exists G, O \in \mathcal{O}(\mathbb{R}^n) M \subset G \wedge G \setminus M \subset O \wedge |O| < \epsilon$.
- (3) $m(M) := \inf \{|G| \in [0, \infty] \mid M \subset G \in \mathcal{O}(\mathbb{R}^n)\}$ を **Lebesgue 測度** という．

1.6.4 Jordan 測度というミニチュア

有限加法族上の有限加法的測度

内測度と外測度は、矩形の有限族を用いるとうまく飼ひ慣らせる。可算個の演算についても克服するための指針も見えてくる：可算集合の測度は加法中立元である 0 になるべき。^aでないと、可算集合の可算和は再び可算集合であるから、和を発散させることができ、well-defined でなくなる。これは null sets が δ -ideal をなすことと関係している。なぜなら、その双対が full sets の δ -filter だからである。開集合のように、null set の補集合は、filter を成している。^b

^a 可算和は濃度について閉じていることがここで実数代数への射を取るときに効いてくるとは！

^b 台集合を取り去る measurable algebra の研究では、 δ -ideal は quotient algebra として定式化できる。

補題 1.6.12. 矩形の有限族に対して、互いに交わらないようにする細分を校正する算譜がある。

定義 1.6.13 (Jordan measure, outer measure, inner measure). $\Omega \subset \mathbb{R}^N$ を有界集合とする。

- (1) (Jordan 外測度) Ω を被覆する矩形からなる互いに素な有限族 \mathbb{R}^* を用いて、 $m^*(\Omega) := \inf_{\mathbb{R}^*} \sum_{R_l \in \mathbb{R}^*} |R_l|$ と定める。
- (2) (Jordan 内測度) Ω に被覆される矩形からなる互いに素な有限族 \mathbb{R}_* を用いて、 $m_*(\Omega) := \sup_{\mathbb{R}_*} \sum_{R_l \in \mathbb{R}_*} |R_l|$ と定める。このようないない \mathbb{R}_* が存在しないとき、 $m_*(\Omega) = 0$ とする。
- (3) $m^*(\Omega) = m_*(\Omega)$ を満たすとき、集合 Ω を Jordan 可測という。

例 1.6.14.

- (1) $\Omega := \mathbb{Q} \cap (0, 1)$ は $m^*(\Omega) = 1, m_*(\Omega) = 0$ となる。
- (2) 点 $(n, 0)$ を中心とする面積 $1/n$ の矩形の列も、Jordan 可測ではない。
- (3) こういうものも可測にするには、すなわち σ -加法性の代数構造を持たせたいならば、可算集合の測度は 0 にする必要がある。そして $\mathbb{Q} \setminus [0, 1]$ の測度が 1 になるべきである。そういう理論を作るべきである。

命題 1.6.15 (有限加法族である). 空でない集合 X 内の Jordan 可測集合の全体は、集合体（有限加法族）をなす。

定理 1.6.16. 有界集合 $\Omega \subset \mathbb{R}^N$ が滑らかな境界を持つならば、Jordan 可測である。

第 2 章

測度論

測度論は Lebesgue 積分と Kolmogorov の確率論の成功から端を発した集合を用いた形式科学である。Measure theory is very much having a central role in studying so called ergodic theory of dynamical system.

ここでは理論の枠組みで、実際の構成はしない。つまり、「集合の族」という対象の代数的構造を抽出して公理を立て、そこでの圏論的構成などの代数的議論を展開する。実際にその例を構成して個別論を展開する前に先行する一般論を展開する。

集合代数に仮託して喋るので、極限構成に極めて強く、理論的な強度が桁違いになる。こうして圧倒的な応用性を獲得するのである。完備空間の理論も、零集合はあくまで代数法則によって抽出する。

単関数近似も、極限構成の職人である。almost sure の議論も、条件と集合が交差し、その代数構造も交差し、議論は構成的で技巧的で職人的であり、そこに乗る意味論は莫大。なんだか、凸解析などの応用分野の数学と似た感触を感じる。これが解析学であろうか。

2.1 σ -代数

集合代数の構造のうち、真に注目すべき代数的構造が σ -代数

σ -代数には 2 つの重要な特徴付けがある。まず、単調族でもある代数は σ -代数である。つまり、可算演算は単調収束極限として捉えられるものに限る。

次に、乗法族かつ Dynkin 族ならば σ -代数である。乗法 \cap についての単位的半群 (\mathcal{A}, \cap, X) を乗法族という。乗法族には、Dynkin 生成と σ -生成が等価になる (Dynkin 族定理) ことと、一致の定理とが成り立つため、重要なクラスになる。このように、 σ -代数とそれ以外の観点は密接に関連するが、極めて混沌とした世界が広がっている。

2.1.1 集合環

集合代数 $P(X)$ を考察すると、まず和 \cup 、積 \cap と、和の中立元＝零元 \emptyset による環の構造が見つかる。これに加えて、可算和ができる環を σ -環 (Summe)、可算積ができる環を δ -環 (Durchschnitt) という。任意濃度の演算ができることを完備といい、 $P(X)$ は完備 Boole 代数である。積の中立元も加えた構造を、体または代数という。代数の語は、 $-$ の演算にも注目して言う (2 つの半束が $-$ で結びついている感じ)。

定義 2.1.1 (ring, δ -ring, σ -ring). X を集合とする。 $\mathcal{M} \subset P(X)$ が

(1) 次の 3 条件を満たすとき、これを X 上の環という。^{†1}

$$1 \quad \emptyset \in \mathcal{M}.$$

$$2 \quad \forall S, T \in \mathcal{M} \quad S \cup T \in \mathcal{M}.$$

$$3 \quad \forall S, T \in \mathcal{M} \quad S \setminus T \in \mathcal{M}.$$

(2) X 上の環であって、さらに可算個の共通部分についても閉じている時、これを X 上の δ -環という。^{†2}

^{†1} The term ‘ring’ dates from the days when a ring in algebra was not assumed to be unital; so a ring on X is simply a subring (in this sense) of the Boolean ring $\mathcal{P}X$.

^{†2} The symbol ‘ δ ’ here is from German ‘Durchschnitt’, meaning intersection; it may be used in many contexts to refer to intersections of

(3) X 上の環であって、さらに可算個の合併についても閉じている時、これを X 上の σ -環という。¹³ これは δ -環である。

例 2.1.2.

- (1) 可測空間 $(\mathcal{X}, \mathcal{A}, \mu)$ の体積確定集合の全体 $\mathcal{M}^1 := \{A \in \mathcal{A} \mid \mu(A) < \infty\}$ は δ -環をなす。
- (2) 可測空間 $(\mathcal{X}, \mathcal{A}, \mu)$ の σ -有限な可測集合の全体 $\mathcal{M}^2 := \left\{A \in \mathcal{A} \mid \exists \{A_n\} \subset \mathcal{M}^1, A = \lim_{n \rightarrow \infty} A_n\right\}$ は σ -環をなす。

2.1.2 σ -代数と例

定義 2.1.3 ((Boolean) algebra / field, σ -algebra / σ -field). X を集合とする。 $\mathcal{M} \subset P(X)$ が

- (1) 次の3条件を満たすとき、これを X 上の **(Boole) 代数**／**体**または有限加法族という。¹⁴ これは、「全体集合 X を含む環」として特徴付けられる。

$$1 \quad \emptyset, X \in \mathcal{M}.$$

$$2 \quad \forall S, T \in \mathcal{M}, S \cup T \in \mathcal{M}.$$

$$3 \quad \forall S, T \in \mathcal{M}, S \setminus T \in \mathcal{M}.$$

この時条件2は $X \in \mathcal{M}$ の参加により、3から導かれる。 $X \in \mathcal{M}$ の参加と条件3より、(絶対)補集合について閉じる。¹⁵

- (2) X 上の σ -環であって Boole 代数でもあるとき、これを X 上の **σ -代数**という。 δ -代数は σ -代数である。これを別の同値な公理化をすると

$$1 \quad \emptyset \in \mathcal{M}.$$

$$2 \quad \forall S \in \mathcal{M}, \neg S \in \mathcal{M}.$$

$$3 \quad \forall S_1, S_2, \dots \in \mathcal{M}, \cup_{i \in \mathbb{N}} S_i \in \mathcal{M}.$$

\mathcal{M} の元を \mathcal{M} -可測集合という。

注 2.1.4. δ, σ はそれぞれ積と和の可算演算への閉性 (完備性への漸近) を表し、何も付かない場合は通常の有限項演算を表す。環とは $1, \top, P(X)$ を必ずしも満たさないもの、体／代数とはこの積中立元も含むものを指す。現代的には環と言ったら積構造は単位的である代数系を指すが、この違いは集合の代数的性質が調べられた時代において、Boole 環と Boole 代数の使い分けに対応する。

ベクトル値の測度を使いたい場合は、ring を使ったほうがうまくいくことも多い。 σ -や δ -をつけると、位相空間論や一様空間論のように基底と準基の理論が建てられなくなる。Kolmogorov used algebras (at least at first), and Halmos used σ -rings.

環と代数の混用は作用素環論に至るまでずっと本質的である。代数的場の量子論は作用素環論による基礎付けである。

例 2.1.5 (Borel class).

- (1) 任意の集合 X について $P(X)$ は、任意の集合演算に閉じているので、もちろん σ -代数である。 $(X, P(X))$ を離散可測集合という。
- (2) 集合族の代数といえば開集合系である。位相空間 (X, \mathcal{O}) に対して、開集合系 \mathcal{O} から生成される σ -集合体を、**ボレル σ -集合体**または**ボレルクラス**といい、 $\mathfrak{B}(X, \mathcal{O})$ で表す。
- (3) 特に $X = \mathbb{R}^d$ で Euclid 位相を考えると、これを $\mathfrak{B}(\mathbb{R}^d)$ で表し、その元を **d 次元ボレル可測集合**という。
- (4) 開集合系が生成する σ -代数は、Borel class に一致する。

例 2.1.6 (trivial algebra, discrete algebra).

- (1) 自明な代数 $\{\emptyset, X\}$ は σ -代数である。
- (2) 離散代数 2^X も σ -代数であり、完備 Boole 代数である。
- (3) 区間塊と余区間塊からなる集合は Boole 代数である。
- (4) null set と full set の集合は (完備?) Boole 代数である。

countable families.

¹³ The symbol ' σ ' here is from German 'Summe', meaning union; it may be used in many contexts to refer to unions of countable families.

¹⁴ [2] では (concrete) Boolean algebra と呼んでいる

¹⁵ The term 'field' here is even more archaic than the term 'ring' above; indeed the only field in this sense which is a field (in the usual sense) under symmetric difference and intersection is the field $\{, X\}$ (for an inhabited set X).

2.1.3 代数の素直な性質

代数ならば、積空間の定義は簡単であった。σ-代数の場合は、位相空間の場合と同様、「生成」を考える必要があり、σ-代数の場合は「単調族」の言葉で特徴づける事もできる（位相空間の基と準基に当たる議論）。

命題 2.1.7. $Z := X \times Y$ において、 X, Y の有限加法族 \mathcal{G}, \mathcal{Y} について、 $\exists E \in \mathcal{G} \exists F \in \mathcal{Y} K = E \times F \Rightarrow K \in \mathcal{Z}$ として $\mathcal{Z} \subset P(Z)$ を定めると、これは集合体をなす。

2.1.4 σ-代数の生成

The question of how to generate a σ-algebra is the beginning of an entire field of mathematics, descriptive set theory. 結果は General nonsense しか容易には得られない。^a ϵ が $\mathcal{A}(\epsilon)$ の「準基」になるかということそんな簡単に理論を作らせてくれない。この生成の抽象論は Moore 閉包と monad につながる。^b

^a <https://ncatlab.org/nlab/show/sigma-algebra>

^b <https://ncatlab.org/nlab/show/Moore+closure>

定理 2.1.8 (generate: general nonsense). 集合 X に対して、 $\epsilon \subset P(X)$ を任意の部分集合族とする。

- (1) ϵ を含む最小の集合体 $\mathcal{A}(\epsilon)$ が存在する。
- (2) ϵ を含む最小の σ-集合体 $\sigma(\epsilon)$ が存在する。

[証明].

- (1) $\mathcal{U} := \{A \subset P(X) \mid A \text{ は } \epsilon \text{ を部分代数としてもつ集合体}\}$ と定めると、 $P(X) \in \mathcal{U} \neq \emptyset$ である。このとき、 $\mathcal{A}(\epsilon) := \bigcap_{\mathcal{A} \in \mathcal{U}} \mathcal{A}$ と定めれば良い。最小性はわかるから、これが集合体であることを示す。 $A, B \in \bigcap_{\mathcal{A} \in \mathcal{U}} \mathcal{A}$ や族 $(A_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \text{Map}(\mathbb{N}, \bigcap_{\mathcal{A} \in \mathcal{U}} \mathcal{A})$ を取ると、任意の集合体 $\mathcal{A} \in \mathcal{U}$ に対して $A, B \in \mathcal{A}$ や族 $(A_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \text{Map}(\mathbb{N}, \mathcal{A})$ となるから、 \mathcal{A} の代数法則より従う。
- (2) 同様。

■

2.2 σ-代数の生成

位相と最も違う点は、生成される代数を明示的に表示する命題が立たない点である。「位相の基底」に当たる概念は直接は考えられないが、次のような Dynkin 族定理が成り立つ。乗法族とは、 $X \in \mathcal{A}$ を満たす「基底」をいう。すなわち、有限積について閉じている。これが、残りの2つの演算、すなわち、差 $A \subset B \Rightarrow B \setminus A \in \mathcal{A}$ と、単調増大列の極限とについて閉じているとき、これは σ-代数である。

2.2.1 単調族

単調族でもある代数は σ-代数である

σ-代数となる条件を考える際には、集合列をうまくとってそれについての条件を調べるだけで十分になる。そこでまず、単調列というクラスが自然に浮かび上がる。例えば有限加法的測度の σ-加法性を特徴付ける 2.4.4. これについての道具を整備する。生成の言葉が使えない今、直積測度などの難しい構成を行う際の足掛かりになる。生成元が集合体である時、単調族についての生成を行えば σ-代数を得る。

定理 2.2.1 (σ-加法性の特徴付け). 集合体 \mathcal{A} について、次の3条件は同値である。

- (1) \mathcal{A} は σ -集合体である.
- (2) \mathcal{A} の任意の単調増加列 $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ に対して, $\cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$.
- (3) 互いに素な \mathcal{A} の元からなる任意の \mathcal{A} -列 $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ に対して, $\cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$.

[証明]. (2) \Rightarrow (1) と (3) \Rightarrow (1) を示せば良い.

- (2) \Rightarrow (1) 任意の列 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を取る. これに対して, $A_n := \cup_{k=1}^n B_k$ と取ると, $\forall i \in \mathbb{N} \ A_i \subset A_{i+1} = A_i \cup B_{i+1}$ が成り立つから, これは単調増加列である. よって, $\cup_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{A}$. $\exists n \in \mathbb{N} \ a \in A_n \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N} \ a \in B_n$ となるように定めたから, $\cup_{i \in \mathbb{N}} A_i = \cup_{i \in \mathbb{N}} B_i$ と併せて, $\cup_{i \in \mathbb{N}} B_i \in \mathcal{A}$.
- (3) \Rightarrow (1) 任意の列 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を取る. これに対して, $A_n := B_n \setminus \cup_{k=1}^{n-1} B_k$ と取ると, $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は互いに素である. 実際, ある $i < j$ について $A_i \cap A_j \neq \emptyset$ だった場合, $\exists a \in X \ a \in B_i \setminus \cup_{k=1}^{i-1} B_k \wedge a \in B_j \setminus \cup_{k=1}^{j-1} B_k$ であるが, これは $a \in \cup_{k=1}^{j-1} B_k$ に矛盾. そこで, $\exists n \in \mathbb{N} \ a \in A_n \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N} \ a \in B_n$ となるように定めたから $\cup_{n=1}^{\infty} A_n = \cup_{n=1}^{\infty} B_n$ より, $\cup_{n=1}^{\infty} B_n = \cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$.

■

定義 2.2.2 (monotone class). 集合族 $\mathcal{M} \subset P(X)$ が次の2条件を満たすとき, これを単調族という.

- (1) \mathcal{M} の任意の単調増加列 $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ に対して, $\cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{M}$.
- (2) \mathcal{M} の任意の単調減少列 $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ に対して, $\cap_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{M}$.

要諦 2.2.3. σ -代数の定義に併せて, complement についての双対性が映り込んでいるのが見える. これが単調族定理を導く.

命題 2.2.4. 集合族 $\epsilon \subset P(X)$ に対して, これを含む最小の単調族 $\mathcal{M}(\epsilon)$ が存在する.

観察 2.2.5. σ -集合体は単調族であり, 単調族が体の構造を持つならば σ -加法性も満たす (σ -加法性の特徴付け定理 2.2.1) ことは見た. つまり $\mathcal{M}(\epsilon) \subset \sigma(\epsilon)$ である. この逆も成り立ち, いかなる時に単調族で完全に代用可能であるかを考えたい.

定理 2.2.6 (monotone class theorem). \mathcal{A} を集合体とする. $\mathcal{M}(\mathcal{A}) = \sigma(\mathcal{A})$ である.

[証明].

方針 $\mathcal{M}(\mathcal{A})$ が集合体と示せば良い. $\mathcal{M}(\mathcal{A})$ が集合体であるならば, σ -加法性の特徴付け定理 2.2.1 より σ -集合体でもあり, $\sigma(\mathcal{A}) \subset \mathcal{M}(\mathcal{A})$ が成り立つ. 一方で全ての σ -加法族は単調族だから $\mathcal{M}(\mathcal{A}) \subset \sigma(\mathcal{A})$ でもある. よって, $\mathcal{M}(\mathcal{A}) = \sigma(\mathcal{A})$ を得る.

(I) $\emptyset \in \mathcal{M}(\mathcal{A})$ \mathcal{A} は集合体だから $\emptyset \in \mathcal{A} \subset \mathcal{M}(\mathcal{A})$.

(II) $A \in \mathcal{M}(\mathcal{A}) \Rightarrow A^c \in \mathcal{M}(\mathcal{A})$ $\mathcal{M} := \mathcal{M}(\mathcal{A})$ のうち補集合演算について閉じている部分集合体を $\overline{\mathcal{M}} := \{A \in \mathcal{M} \mid A^c \in \mathcal{M}\}$ とすると, $\overline{\mathcal{M}} \subset \mathcal{M}$ である. これが \mathcal{A} を含む単調族であることを証明し, $\mathcal{M} \subset \overline{\mathcal{M}}$ を導けば良い.

\mathcal{A} を含む 任意の \mathcal{A} の元 $A \in \mathcal{A}$ について $A^c \in \mathcal{A}$ であるから, $\mathcal{A} \subset \mathcal{M}(\mathcal{A})$ である.

単調族の公理 (I) 任意に $\overline{\mathcal{M}}$ の単調増加列 $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を取ると, $\cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{M}(\mathcal{A})$ である. 実はこの時, 双対な列 $(A_n^c)_{n \in \mathbb{N}}$ は単調減少列であるから, $(\cup_{n=1}^{\infty} A_n)^c = \cap_{n=1}^{\infty} A_n^c \in \mathcal{M}$ でもある. よって, $\cup_{n=1}^{\infty} A_n \in \overline{\mathcal{M}}$.

単調族の公理 (II) 全く双対的な証明が成り立つ.

(III) $A, B \in \mathcal{M}(\mathcal{A}) \Rightarrow A \cup B \in \mathcal{M}(\mathcal{A})$ 2段階に分けて, 任意の元 $B \in \mathcal{M}$ について, これと和について閉じている部分集合 \mathcal{M}_B は全体に一致すること: $\mathcal{M}_B = \mathcal{M}(\mathcal{A})$ を示す.

\mathcal{A} の元と和について閉じるなら σ -代数である 任意に $B \in \mathcal{A}$ をとった時, この B との合併について閉じる部分集合 $\mathcal{M}_B := \{A \in \mathcal{M} \mid A \cup B \in \mathcal{M}\}$ は \mathcal{A} を含む単調族になるから, $\mathcal{M}_B = \mathcal{M}$ を得る. 実際,

(1) $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を \mathcal{M}_B の単調列とすると, $\cup_{i=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{M}$ であり, また $B \cup \cup_{i=1}^{\infty} A_n = \cup_{i=1}^{\infty} B \cup A_n \in \mathcal{M}$ でもある. よって, $\cup_{i=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{M}_B$ である.

(2) 任意の $A \in \mathcal{A}$ は, $B \in \mathcal{A}$ に対して $A \cup B \in \mathcal{A}$ を満たす (\mathcal{A} は集合体) から, $A \in \mathcal{M}_B$ である.

任意の元と和について閉じるなら σ -代数である 任意に $B \in \mathcal{M}(\mathcal{A})$ を取ると, (1) と同様の議論が成り立ち, (2) については, 任意の $A \in \mathcal{A}$ に対して, $B \in \mathcal{M}(\mathcal{A}) = \mathcal{M}_A$ であるから, $A \cup B \in \mathcal{M}_B$ である. よって, $\mathcal{A} \subset \mathcal{M}_B$.

■

要諦 2.2.7. 追加の条件を満たす部分代数を考え、これの単調性を示すことで、全体集合 $\mathcal{M} = \mathcal{M}(\mathcal{A})$ の最小性に帰する証明手法. (II) では補集合性は単項関係であるが、(III) は二項関係であるから、currying によって示す. しかしこれは2段階になる. $\cap: \mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ を考えたのちに、 $\cap: \mathcal{M}(\mathcal{A}) \times \mathcal{M}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{M}(\mathcal{A})$ を考えると、良い.

2.2.2 Dynkin 族

σ -代数を、2つの要素に分解する.

続いては、特殊な演算である可算直和と固有差についての族を考える. 極めて確率論と相性が良い. 確率の概念が自然に定義できるのが Dynkin 族で、ここからの生成が焦点となる.

定義 2.2.8 (Dynkin family / λ -system). 集合族 $\mathcal{G} \subset P(X)$ が **Dynkin 族** または **λ -系** であるとは、^{f6} 次の3条件を満たすことをいう.

- (1) $X \in \mathcal{G}$.
- (2) $\forall A, B \in \mathcal{G} \ A \subset B \Rightarrow B \setminus A \in \mathcal{G}$.
- (3) $\forall (A_i)_{i \in \mathbb{N}}: \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{G} \ [\forall i \neq j \in \mathbb{N} \ A_i \cap A_j = \emptyset] \Rightarrow \sum_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{G}$. この条件は、(2) の下で $\mathcal{G} \supset \{A_n\} \nearrow A \Rightarrow A \in \mathcal{G}$ と同値.

補題 2.2.9 (生成).

- (1) 任意の集合 X 上の Dynkin 族の族 $(A_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、 $\cap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$ も Dynkin 族である.
- (2) 任意の集合族 $\mathcal{A} \subset P(X)$ について、これを含む最小の Dynkin 族 $\mathcal{D}(\mathcal{A})$ が存在する.

[証明].

- (1) 任意の $\lambda \in \Lambda$ について $X \in A_\lambda$ より、 $X \in \cap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$. $A \subset B$ を満たす $A, B \in \cap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$ と $\cap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$ の族 $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ を任意にとると、任意の $\lambda \in \Lambda$ について $B \setminus A \in A_\lambda$ かつ $\sum_{i \in \mathbb{N}} A_i \in A_\lambda$. よって、 $B \setminus A, \sum_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \cap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$.
- (2) $\overline{\mathcal{A}} := \{\mathcal{B} \subset P(X) \mid A \subset \mathcal{B}, \mathcal{B} \text{ は Dynkin 族}\}$ とすると、 $P(X) \in \overline{\mathcal{A}}$ である. $\mathcal{D}(\mathcal{A}) := \cap_{\mathcal{B} \in \overline{\mathcal{A}}} \mathcal{B}$ とすると、これは (1) より Dynkin 族である. 最小であることを示す. $\mathcal{A} \subset \mathcal{B}$ を任意の Dynkin 族とすると、 $\mathcal{B} \in \overline{\mathcal{A}}$ である. よって、 $\mathcal{D}(\mathcal{A}) = \cap_{\mathcal{B} \in \overline{\mathcal{A}}} \mathcal{B} \subset \mathcal{B}$.

■

2.2.3 乗法族

乗法族には、Dynkin 生成と σ -生成が等価になる (Dynkin 族定理) ことと、確率測度の一致の定理とが成り立つため、重要なクラスになる.

定義 2.2.10 (multiplicative class / π -system). 集合族 \mathcal{A} が $X \in \mathcal{A}$ かつ有限共通部分について閉じているとき、これを**乗法族** または **π -系** という.

定理 2.2.11 (Dynkin 族定理). \mathcal{A} を乗法族とする. $\mathcal{D}(\mathcal{A}) = \sigma(\mathcal{A})$ である.

定理 2.2.12 (一致の定理). \mathcal{P} を π -系とする. このとき、 $\sigma(\mathcal{P})$ 上の2つの確率測度 μ_1, μ_2 が \mathcal{P} 上で一致するならば、 $\sigma(\mathcal{P})$ 上でも一致する.

^{f6} Dynkin 自身は λ -系と呼んだ

2.2.4 イデアル

$P(X)$ にはフィルターの構造も考え得る．これに可算演算への閉性を加えて， σ -イデアルと呼ぼう．零集合は σ -代数 \mathcal{G} の中で σ -イデアルをなし，その双対概念は full set で， δ -フィルターをなす．"small"と"large"という概念の代数的形式化に当たる．null set の構成を一般化すると，任意の σ -イデアルに対して，それを null set の定義としてその上の完備化を考えることができる．局所化可能測度空間．

定義 2.2.13 (σ -ideal). $\mathcal{N} \subset P(X)$ が σ -イデアルであるとは，次の3条件を満たすことをいう．

- (1) $\emptyset \in \mathcal{N}$.
- (2) $\forall A \in P(X), B \in \mathcal{N} \quad A \subset B \Rightarrow A \in \mathcal{N}$.
- (3) $\forall \{A_n\} \subset \mathcal{N} \quad \cup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{N}$.

定義 2.2.14 (σ -ideal, δ -filter).

- (1) $\mathcal{F} \subset P(X)$ が σ -イデアルであるとは，次の3条件を満たすことをいう．
 - (i) (downwardly closed) $\forall B \in \mathcal{F} \quad A \subset B \Rightarrow A \in \mathcal{F}$.
 - (ii) (σ -closed) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{F} \quad \exists B \in \mathcal{F} \quad \cup_{i \in \mathbb{N}} A_i \subset B$.^{†7}
 - (iii) (empty set) $\mathcal{F} \neq \emptyset$.^{†8}
 (ii),(iii) を満たす $\mathcal{F}' \subset P(X)$ を **基**といい，任意の X の部分集合を **準基**という．
- (2) $\mathcal{F} \subset P(X)$ が δ -フィルターであるとは，次の3条件を満たすことをいう．
 - (i) $\forall A \in \mathcal{F} \quad A \subset B \Rightarrow B \in \mathcal{F}$.
 - (ii) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{F} \quad \exists B \in \mathcal{F} \quad B \subset \cap_{i \in \mathbb{N}} A_i$.^{†9}
 - (iii) $\mathcal{F} \neq \emptyset$.^{†10}
- (3) de-Morgan の双対性の下で， $\mathcal{F} = \neg \mathcal{F}$ の関係がある．

例 2.2.15. 測度 μ について， μ -零集合の全体は σ -イデアルをなす．

定義 2.2.16 (quotient σ -algebra). σ -代数 \mathcal{G} の商 σ -代数とは， σ -イデアル \mathcal{N} の定める同値関係 $A \sim B : \Leftrightarrow A \Delta B \in \mathcal{N}$ についての商集合 \mathcal{G}/\mathcal{N} をいう．これは抽象的には σ -代数になるが，集合の上に具体的に表現できるとは限らない．

例 2.2.17. \mathcal{G} を $[0, 1]$ 上の Borel σ -代数， \mathcal{N} を Lebesgue 零集合とする． σ -代数 \mathcal{G}/\mathcal{N} は，どの具体的な σ -代数とも同型ではない．

定理 2.2.18 (Loomis-Sikorski representation theorem). \mathcal{G} を抽象 σ -代数とする．このとき，集合 A とその上の σ -代数 \mathcal{A} と σ -イデアル $\mathcal{N} \subset \mathcal{A}$ が存在して， $\mathcal{G} \simeq \mathcal{A}/\mathcal{N}$ を満たす．

系 2.2.19. 任意の抽象的な測度空間 (σ -代数) は，完備化した後の具体的な測度空間に同型である．

2.2.5 代数の完備性

σ -代数の完備化とは，完備 Boole 代数に近づけるように，可能な演算の濃度を上げる行為であることは間違いない．

full set の代数法則である吸収律 $\forall S \in \mathcal{G} \quad \mu(S) = \mu(S \cap F)$ は束に似ていて，「完備化」の意味も測度空間と束では似ている．冪等律がある種の completeness を表している，なぜなら完備測度空間の完備化はそのままであるから．忘却関手が充満忠実であるとき，忘却するのは性質で，本質的に全射で忠実であるとき，忘却するのは構造であるという．距離空間の完備性は位相からは定義されない「性質である」から完備化と呼ぶが，そうでない場合は「自由」という．いずれも忘却関手の随伴として捉えられる．こ

^{†7} (i) と併せると， $\cup_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{F}$ が必要．これが σ -性である．

^{†8} (i) と併せると $\emptyset \in \mathcal{F}$ が必要．

^{†9} (i) と併せると， $\cap_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{F}$ が必要．これが δ -性である．

^{†10} (i) と併せると $X \in \mathcal{F}$ が必要．

れは「チャートが定める微分構造」みたいな概念だ。

2.3 可測関数

Lebesgue 積分を定義可能な関数とは、 y 軸を分割したときに出てくる E_x が Lebesgue 可測であるものである。これが、可測関数の定義を誘導する。

可測関数は σ -代数の射となる。 σ -代数が完備であるとき、 \mathbb{R}, \mathbb{R}_+ も Boole 代数の意味で完備であるように、 $\overline{\mathbb{R}} := [-\infty, \infty], [0, \infty]$ を考える。すると、任意の上限・下限が存在する完備束となる。

記法 2.3.1.

- (1) 可測空間 (E, \mathcal{G}) の部分集合を $E(f > c) = \{f > c\} := f^{-1}((c, \infty]) = \{x \in E \mid f(x) > c\}$ などと表す。 E を左作用と見ると、集合 $\{f > c\}$ に作用する集合関数 $\mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$ に思えるからである。 (\cdot) 内部は可測関数によって記述された条件式・事象と思える。
- (2) $(\pm\infty)0 = 0$ とする。すると、零関数の積分は常に零である。これ以外の非自明な演算は定義しない。

2.3.1 定義と特徴付け

Borel class $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ の基底と呼べるものが、区間 $((c, \infty])_{c \in \mathbb{R}}$ となっている。おそらく補集合演算が生成において許されているので、開集合の場合よりも、より少ない集合族で基底になる。

定義 2.3.2 (measurable function). \mathbb{R} -値関数 $f : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ が \mathcal{G} -可測であるとは、次を満たすことをいう：

$$\forall c \in \mathbb{R} \quad \{f > c\} := f^{-1}((c, \infty]) \in \mathcal{G}.$$

要諦 2.3.3. コンパクト化 $\overline{\mathbb{R}}$ はその上の集合代数がよくなるが、代数法則が整合的に定まらず、不定形が発生するが、これは積分論で部分的な解消を見る。非有界関数を扱えるのは、端的に集合代数という形式の祈りの高さによる。

補題 2.3.4 (拡張実可測関数の特徴付け). \mathbb{R} -値関数 $f : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ について、以下の4条件は同値である。

- (1) f は \mathcal{G} -可測。
- (2) $\forall c \in \mathbb{R} \quad \{f \geq c\} \in \mathcal{G}.$
- (3) $\forall c \in \mathbb{R} \quad \{f < c\} \in \mathcal{G}.$
- (4) $\forall c \in \mathbb{R} \quad \{f \leq c\} \in \mathcal{G}.$

[証明].

- (1) \Rightarrow (2) 任意の $c \in \mathbb{R}$ について、 $\{x \in X \mid f(x) \geq c\} = \bigcap_{n=1}^{\infty} \left\{x \in X \mid f(x) > c - \frac{1}{n}\right\} \in \mathcal{G}.$
- (2) \Rightarrow (3) 任意の $c \in \mathbb{R}$ について、 $\{x \in X \mid f(x) < c\} = \{x \in X \mid f(x) \geq c\}^c \in \mathcal{G}.$
- (3) \Rightarrow (4) (1) \Rightarrow (2) の議論で不等号の向きを逆にして、 $-\frac{1}{n}$ を $\frac{1}{n}$ に変えた議論により従う。
- (4) \Rightarrow (1) (2) \Rightarrow (3) の不等号を逆にした議論が成り立つ。

■

定理 2.3.5 (像代数が拡張 Borel class に含まれることと同値). \mathbb{R} -値関数 $f : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ について、以下の2条件は同値である。

- (1) f は \mathcal{G} -可測。
- (2) (a) $f^{-1}(\infty), f^{-1}(-\infty) \in \mathcal{G}.$
(b) $\forall B \in \mathcal{B}(\mathbb{R}) \quad f^{-1}(B) \in \mathcal{G}.$

[証明].

(2)⇒(1) 任意の区間 $(c, \infty] = (c, \infty) \cup \{\infty\}$ は, (c, ∞) を表す開集合の可算和と $\{\infty\}$ との合併で表せるから, $f^{-1}((c, \infty]) \in \mathcal{G}$ が従う.

(1)⇒(2) (a) f は可測だから,

$$\begin{aligned}\{x \in X \mid f(x) = \infty\} &= \cap_{n \in \mathbb{N}} \{x \in X \mid f(x) > n\} \in \mathcal{G} \\ \{x \in X \mid f(x) = -\infty\} &= \cap_{n \in \mathbb{N}} \{x \in X \mid f(x) < -n\} \in \mathcal{G}\end{aligned}$$

(b) まず, 任意の開区間 (a, b) ($-\infty < a < b < \infty$) について, $f^{-1}((a, b)) = \{x \in X \mid f(x) > a\} \cap \{x \in X \mid f(x) < b\} \in \mathcal{G}$ であるから, 任意の開集合 $I \subset \mathbb{R}$ について, $I \cap \mathbb{Q} = \{r_j\}_{j \in \mathbb{N}}$ とし, $\delta_j := d(r, \partial I)$ と定めると, $I = \cup_{j \in \mathbb{N}} U_{\delta_j}(r_j) \in \mathcal{G}$. これより, $\epsilon := (f^*)^{-1}\mathcal{G} = \{B \in P(\mathbb{R}) \mid f^{-1}(B) \in \mathcal{G}\}$ と置くと, $\text{Op}(\mathbb{R}) \subset \epsilon$ であるから, $\sigma(\text{Op}(\mathbb{R})) = \mathcal{G}(\mathbb{R}) \subset \epsilon$ が従う.

■

要諦 2.3.6. 可測関数の定義は, Lebesgue 積分という特殊化された目標の下でもはっきり理解できた. しかしこれが Borel class への測度の射として一般化の道が開けるとは, ということだろう.

2.3.2 可測関数に許された構成

$\mathcal{L}(X)$ は代数をなし, 可算な束演算についても閉じている. 証明の技法としては, 可測関数の縦線集合の逆像も, 集合の有理数についての σ -加法に還元して議論する. なお, 合成による構成は許されない [2.8.14](#).

命題 2.3.7 ($\mathcal{L}(X)$ は関数束をなす). $f, g : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ を \mathcal{G} -可測とする. $\max_{x \in X} \{f(x), g(x)\}, \min_{x \in X} \{f(x), g(x)\}$ も可測である.

[証明]. 任意の $c \in \mathbb{R}$ について,

$$\begin{aligned}\{x \in X \mid \max_{x \in X} \{f(x), g(x)\} > c\} &= \{x \in X \mid f(x) > c\} \cup \{x \in X \mid g(x) > c\} \\ \{x \in X \mid \min_{x \in X} \{f(x), g(x)\} > c\} &= \{x \in X \mid f(x) > c\} \cap \{x \in X \mid g(x) > c\}.\end{aligned}$$

■

命題 2.3.8 (斉次性). $f : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ を \mathcal{G} -可測, $a, \gamma \in \mathbb{R}, \gamma \neq 0$ とする^{†11}. $af, |f|^\gamma$ は \mathcal{G} -可測である. ただし, $a = 0$ のとき f の値に依らず $af = 0$, $\gamma < 0 \wedge f(x) = 0$ のとき $|f(x)|^\gamma = +\infty$ とした.

[証明].

af 任意の $c \in \mathbb{R}$ について,

(1) $a = 0$ のとき, $af = 0$ は可測.

(2) $a > 0$ のとき, $\{x \in X \mid af(x) > c\} = \left\{x \in X \mid f(x) > \frac{c}{a}\right\} \in \mathcal{G}$.

(3) $a < 0$ のとき, $\{x \in X \mid af(x) > c\} = \left\{x \in X \mid f(x) < \frac{c}{a}\right\} \in \mathcal{G}$ (補題 2.3.4).

$(f)^\gamma$ $c < 0$ のとき, $\{x \in X \mid |f(x)|^\gamma > c\} = X \in \mathcal{G}$. 以降, $c \geq 0$ とする.

$\gamma > 0$ のとき $\{x \in X \mid |f(x)|^\gamma > c\} = \{x \in X \mid |f(x)| > c^{1/\gamma}\} = \{x \in X \mid f(x) > c^{1/\gamma}\} \cup \{x \in X \mid f(x) < -c^{1/\gamma}\} \in \mathcal{G}$.

$\gamma < 0$ のとき $c = 0$ のとき, $f(x) = 0$ のとき $|f(x)|^\gamma > 0$ ($\gamma < 0$) であるから, $\{x \in X \mid |f(x)|^\gamma > c\} = X \in \mathcal{G}$. $c > 0$ のとき,

$$\begin{aligned}\left\{x \in X \mid |f(x)|^{-\gamma} < \frac{1}{c}\right\} &= \left\{x \in X \mid |f(x)| < \left(\frac{1}{c}\right)^{-1/\gamma}\right\} \\ &= \left\{x \in X \mid f(x) < \left(\frac{1}{c}\right)^{-1/\gamma}\right\} \cap \left\{x \in X \mid f(x) > -\left(\frac{1}{c}\right)^{-1/\gamma}\right\} \in \mathcal{G}\end{aligned}$$

^{†11} $|f|^0$ の場合は, f が $\{\pm\infty\}$ に値を取るとき, 定義できなくなる.

命題 2.3.9 (和と積). $f, g: X \rightarrow (-\infty, \infty)$ を有界な \mathcal{G} -可測とする. $f + g, fg$ は \mathcal{G} -可測である. ただし, $\infty - \infty, 0 \times \infty$ がない場合は, 有界性の仮定を外しても成り立つ.^{†12}

[証明].

$f + g$ について $\{x \in X \mid f(x) + g(x) > c\} = \{x \in X \mid f(x) > c - g(x)\}$ と見ると, 有理数の稠密性より, 任意の $x \in X$, $f(x) > c - g(x)$ について $f(x) > \sigma > c - g(x)$ を満たす σ が存在し, これが存在するとき元の不等式も成り立つから,
 $\{x \in X \mid f(x) > c - g(x)\} = \cup_{\sigma \in \mathbb{Q}} (\{x \in X \mid f(x) > \sigma\} \cap \{x \in X \mid \sigma > c - g(x)\}) \in \mathcal{G}$.
 fg について $fg = \frac{1}{4}((f+g)^2 - (f-g)^2)$ より, (1) と命題 2.3.8(2) と (1) とをこの順番で適用することで従う.

要諦 2.3.10 (可測関数で挟んだ領域の逆像も可算). $f + g$ の証明は, $g := c - g$ と見れば, $E(f > g)$ が可測であることの証明に一致する. しかしまず, 暗黙のうちにその結果を使ったことは多いが, 集合の等式 $\{x \in X \mid f(x) > c - g(x)\} = \cup_{\sigma \in \mathbb{Q}} (\{x \in X \mid f(x) > \sigma\} \cap \{x \in X \mid \sigma > c - g(x)\})$ を初めて見た. それにしても, 加算を一体どこに帰着させているのか.

命題 2.3.11 (極限構成). (f_n) を \mathcal{G} -可測関数 $X \rightarrow [-\infty, \infty]$ の列とする.

- (1) $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n(x), \inf_{n \in \mathbb{N}} f_n(x)$ は \mathcal{G} -可測である.
- (2) $\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n(x), \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ は \mathcal{G} -可測である. 特に, 集積点がただ一つである場合, すなわち $\forall x \in X \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \in [-\infty, \infty]$ のとき, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ は \mathcal{G} -可測である.

[証明].

- (1) 任意の $x \in X$ について, $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n(x) > c \Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N} f_n(x) > c$ であるから,

$$\left\{x \in X \mid \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n(x) > c\right\} = \cup_{n \in \mathbb{N}} \{x \in X \mid f_n(x) > c\} \in \mathcal{G}.$$

これと命題 2.3.8 より, $\inf_{n \in \mathbb{N}} f_n(x) = -\sup_{n \in \mathbb{N}} (-f_n(x))$ も \mathcal{G} -可測.

- (2) $\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \inf_{n \rightarrow \infty} \sup_{v \geq n} f_v(x)$ は可測関数の (単調減少) 列 $(\sup_{v \geq n} f_v(x))_{n \in \mathbb{N}}$ の下限より, \mathcal{G} -可測である. $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = -\limsup_{n \rightarrow \infty} (-f_n(x))$ も同様.

要諦 2.3.12 (この結果には, 値域をコンパクトしたことがどれくらい効いているのだろうか?). 点列コンパクトであるから, 収束する部分列は必ず存在するため, 上極限と下極限は必ず定まり, そこに可測性は遺伝する. 集積点がただ一つであるのは特別な点列の場合である.

2.3.3 単関数近似

単関数の集合 $\mathcal{S}(X)$ は $\mathcal{L}(X)$ 上各点収束の意味で稠密である.
 A_i が可測であることと χ_{A_i} が可測であることは同値である.

定義 2.3.13 (simple function). 可測関数 f が単関数であるとは, $|\text{Im } f| < \infty$ であることをいう.

補題 2.3.14.

- (1) f が単関数であることと, $\exists \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R} \setminus \{0\} \exists \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G}$ with $A_i \cap A_j = \emptyset (i \neq j)$ s.t. $f = \sum_{i=1}^n a_i \chi_{A_i}$ が成り立つことは同値.

^{†12} これらの仮定が, 可積分関数についての理論では, null set の議論から, 外すことができる.

(2) f, g が単関数であるとき, $af + bg, |f|, fg, \max\{f, g\}$ も単関数である.

[証明].

- (1) 有限族 $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ としては, $(f^{-1}(a))_{a \in \text{Im } f}$ を取ればこれは互いに素で, $f = \sum_{i=1}^n f(a_i) \chi_{f^{-1}(a_i)}$ と表せる. 逆は自明.
- (2) いずれの関数も像が有限集合である.

■

定理 2.3.15 (単関数近似). $f: X \rightarrow [0, \infty]$ を可測関数とする. このとき, 非負単関数の単調増加列 $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が存在して, 任意の点 $x \in X$ で f に各点収束する: $\forall x \in X, f_n(x) \nearrow f(x)$. f が有界であるとき, 一様収束するように取れる.

[証明]. 区間 $[0, n]$ を $n2^n$ 等分すると, 各 $[0, n] = \bigcup_{k=0}^{n2^n-1} \left[\frac{k}{2^n}, \frac{k+1}{2^n} \right)$ について, $A_k := f^{-1} \left(\left[\frac{k}{2^n}, \frac{k+1}{2^n} \right) \right)$ は可測である (補題 2.3.4). よって, $A_{n2^n} := f^{-1}([n, \infty])$ とすると,

$$f_n := \sum_{k=0}^{n2^n-1} \frac{k}{2^n} \chi_{A_k}$$

とおけば, これは単関数で, 区間 $[0, n+1]$ の $(n+1)2^{n+1}$ 等分は区間 $[0, n]$ の $n2^n$ 等分の細分だから, 各 $x \in X$ について $(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ は単調増加である. また, $f(x) = \infty$ なる $x \in X$ については, $f_n(x) = n$ だから $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \infty$ であり, $f(x) \in \mathbb{R}$ なる $x \in X$ については, $f(x) < n$ を満たす全ての n について $|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{1}{2^n}$ を満たすから, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ である. ■

要諦 2.3.16. 値域 $[0, \infty]$ へ至る階段を, 閉区間の列 $([0, n])_{n \in \mathbb{N}}$ で作る. 2^n 分割することによって, $n+1$ の場合は n の場合の細分となっているから, 確かに (f_n) は単調増加である.

2.4 測度

測度の公理はただ1つ

測度とは, 可算集合直和を可算実数之和に移すモノイドの射である. モノイドや圏論同様, あまりに単純であるため, 多くの応用先を持つ.

これは一般の集合和は対称性が敗れた形で保存し, 包含による順序構造も保存し, 固有差も保存する. 後ろ2つが, 単調列への注目の根拠である. すると, 単調列の極限も保存する. これらは再帰的だが, 積分の性質の系としても理解できる. また実は確率の法則でもある.

2.4.1 種々の集合関数

定義 2.4.1 ((positive) measure, complex measure, signed measure / real measure). \mathcal{A} を σ -代数とする.

- (1) σ -代数 \mathcal{M} の上で定義された σ -加法的関数 $\mu: \mathcal{M} \rightarrow [0, \infty]$ を (正) 測度という.
- (2) σ -代数 \mathcal{M} の上で定義された σ -加法的関数 $\mu: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{C}$ を複素測度という.
- (3) 値域が \mathbb{R} に含まれる複素測度を符号付測度または実測度という.

定義 2.4.2 (finitely additive measure / Jordan measure). 有限加法的測度とは, 代数 $\mathcal{A} \subset P(X)$ 上の関数 $\mu: \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ で, 有限加法性を持つものをいう:

- (1) (null set) $\mu(\emptyset) = 0$.
- (2) (finite additivity) $\forall A, B \in \mathcal{A}, A \cap B = \emptyset \Rightarrow \mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$.

要諦 2.4.3 (単に結び半束の射ではなさそう. 極限を保つ束の関手と言った方が良いか). 結び半束 $(L, \vee, 1)$ とは, 任意の2元 $a, b \in L$ について $\{a, b\}$ が L 上に上限を持つ順序集合をいう. 集合代数 (有限加法族) \mathcal{B} の結び半束の構造に注目して, これを

$[0, \infty]$ に埋め込むことを考える。^{†13}これが面積や確率などの観念のモデルとなり得る。

可測空間 (X, \mathcal{G}) 上の集合関数 $\mu : \mathcal{G} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ のうち、結び半束の射 $\mathcal{G} \rightarrow [0, \infty]$ となるものを有限加法的測度、 σ -完備な結び半束の射となるものを測度という。^{†14}frame は分配的な suplattice^{†15}なのであった。

補題 2.4.4 (有限加法的測度の σ -加法性の単調族による特徴付け). 有限加法的測度 $\mu_0 : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ について、次の2条件は同値。

- (1) μ_0 は \mathcal{A} 上 σ -加法的である。
- (2) (A_n) を $A \in \mathcal{A}$ に収束する \mathcal{A} の単調増加列とすると、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_0(A_n) = \mu_0(A)$ 。

[証明].

- (1) \Rightarrow (2) 単調増加列 (A_n) が定める互いに素な列 $(B_n := A_n \setminus (\cup_{i=1}^{n-1} A_i))$ について、 σ -加法性より、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_0(A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \mu_0(B_i) = \mu_0(\sum_{i=1}^{\infty} B_i) = \mu_0(A)$ 。
- (2) \Rightarrow (1) 任意の互いに素な集合列 (B_n) に対して、これが定める単調増加列 $(A_n := \cup_{i=1}^n B_i)$ も収束先は同じだから、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \mu_0(B_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_0(A_n) = \mu_0(A) = \mu_0(\sum_{i=1}^{\infty} B_i)$ (1つ目の等号で $A_n = \sum_{k=1}^n B_k$ についての μ の有限加法性を用いた)。

■

2.4.2 測度の定義と性質

測度は加法的な関数 $\mathcal{G} \rightarrow [0, \infty]$ である。これはある種の極限 (ω -余積) についての条件で、すると加法中立元を保ち、極限も保つことが従う。もっと一般的な関手性は劣加法性とその極限として理解される。

単調な場合とそうでない場合の差は、束のうち線型順序な部分に対する poset の関手だと μ を見る場合と、そうでない場合は結びとして上限を取るとして束を見て、極限を保つ関手だと μ を見る場合とに対応すると思える。測度の性質 2.4.6 の上下極限集合に対する劣加法性 (6), (7) は、 $\mu(\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n)$ がその真の始対象で、 $\mu(\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n)$ がその真の終対象であることを言っているように思える。

定義 2.4.5 (measure space). 組 (X, \mathcal{G}, μ) が測度空間であるとは、次の2条件を満たすことをいう：

- (1) (null set) $\mu(\emptyset) = 0$.^{†16}
- (2) (additivity) 互いに素な \mathcal{G} の列 $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ について、 $\mu\left(\sum_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) = \sum_{i \in \mathbb{N}} \mu(A_i)$ 。

補題 2.4.6 (測度の性質). 組 (X, \mathcal{G}, μ) を測度空間とする。

- (1) (単調性) $\forall A, B \in \mathcal{G} \ A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$ 。
- (2) (固有差) $\forall A, B \in \mathcal{G} \ [(A \subset B) \wedge (\mu(A) < \infty) \Rightarrow \mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)]$ 。
- (3) (劣加法性) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G} \ \mu(\cup_{i \in \mathbb{N}} A_i) \leq \sum_{i \in \mathbb{N}} \mu(A_i)$ 。
- (4) (単調増加列の極限) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G} \ A_i \nearrow A \Rightarrow \mu(A_i) \nearrow \mu(A)$ 。
- (5) (単調減少列の極限) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G} \ (A_i \searrow A) \wedge (\mu(A_1) < \infty) \Rightarrow \mu(A_i) \searrow \mu(A)$ 。
- (6) (劣加法性) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G} \ \mu\left(\liminf_{i \rightarrow \infty} A_i\right) \leq \liminf_{i \rightarrow \infty} \mu(A_i)$ 。
- (7) (劣加法性) $\forall \{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G} \ \mu(\cup_{i \in \mathbb{N}} A_i) < \infty \Rightarrow \mu\left(\limsup_{i \rightarrow \infty} A_i\right) \geq \limsup_{i \rightarrow \infty} \mu(A_i)$ 。

^{†13} coproduct を保つ関手と言ってもいい。極限を極限に移すから、 $\mu(A + B) = \mu(A) + \mu(B)$ であり、 $A \cup B \hookrightarrow A + B$ は $\mu(A \cup B) \hookrightarrow \mu(A + B)$ に写される。これが劣加法性である。

^{†14} 一般に単調で、上限は上限に写す： $\mu(A + B) = \mu(A) + \mu(B)$ 。最小元も対応させる $\mu(\emptyset) = 0$ 。

^{†15} 任意の結びについて閉じた半束を suplattice (上限束) という。なお frame が分配的と言っても有限交わりが任意の結びに分配することのみが公理で、多分逆は成り立たず、また frame の射と言った時は任意合併と有限共通部分を保つことを言う。

^{†16} (2) の $\mu(\emptyset + \emptyset) = \mu(\emptyset) + \mu(\emptyset)$ より、 \emptyset は加法中立元に対応させる必要があることが従う。

[証明].

- (1) $B = A \cup (B \setminus A)$ と見ると, $A \cap (B \setminus A) = \emptyset$ であるから, 測度 μ の加法性 (2) より, $\mu(B) = \mu(A) + \mu(B \setminus A) \geq \mu(A)$. 最後で (1) を用いた.
- (2) (1) の途中式から, $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$ である.
- (3) $B_j := A_j \setminus \left(\bigcup_{i=1}^j A_i \right)$ という階差列 $(B_j)_{j \in \mathbb{N}}$ を定めると, $\bigcup_{j=1}^{\infty} A_j = \bigcup_{j=1}^{\infty} B_j$ で, 任意の $j \in \mathbb{N}$ について $B_j \subset A_j$ かつ, (B_j) は互いに素. よって, σ -加法性 (2) より,

$$\mu \left(\bigcup_{j=1}^{\infty} A_j \right) = \mu \left(\bigcup_{j=1}^{\infty} B_j \right) = \sum_{j=1}^{\infty} \mu(B_j) \leq \sum_{j=1}^{\infty} \mu(A_j).$$

- (4) $B_j := A_j \setminus \left(\bigcup_{i=1}^j A_i \right)$ という階差列 $(B_j)_{j \in \mathbb{N}}$ を考える. ただし, $A_0 = \emptyset$ とした. これは収束先が一致し $A = \bigcup_{j=1}^{\infty} A_j = \bigcup_{j=1}^{\infty} B_j$, $\bigcup_{j=1}^k A_k = \bigcup_{j=1}^k B_k$ でもある. よって,

$$\mu(A) = \sum_{j=1}^{\infty} \mu(B_j) = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^k \mu(B_j) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mu(A_k).$$

- (5) 双対命題だが, 有界性の扱いに注意. $B_j := A_1 \setminus A_j$ とおくと, (B_j) は単調増大列で, $B_j \nearrow A_1 \setminus A$. よって, (4) より, $\mu(A \setminus A_j) = \mu(B_j) \nearrow \mu(A_1 \setminus A)$. $A_1 < \infty$ より (2) から $\mu(A_1 \setminus A_j) = \mu(A_1) - \mu(A_j)$, $\mu(A_1 \setminus A) = \mu(A_1) - \mu(A)$ であるから, これと併せて, $\mu(A_j) \searrow \mu(A)$ を得る.
- (6) 列 $(\bigcap_{j=1}^{\infty} A_j)_{j \in \mathbb{N}}$ は単調増大列であるから, (4) より

$$\mu \left(\liminf_{i \rightarrow \infty} A_i \right) = \mu \left(\bigcup_{j=1}^{\infty} \bigcap_{i=j}^{\infty} A_i \right) = \liminf_{j \rightarrow \infty} \mu \left(\bigcap_{i=j}^{\infty} A_i \right) \leq \liminf_{j \rightarrow \infty} \mu(A_j)$$

最後の不等式は, $\bigcap_{i=j}^{\infty} A_i \subset A_j$ による.

■

要諦 2.4.7.

- (4),(5) 単調列は階差列に注目すると互いに素な列を得るので, 加法性を使える.
- (6),(7) μ は集合の極限を保つということだろう. これは適切な位相構造を入れれば, μ は連続ということだろうか. まあ Pos の関手と考えているので十分だろうが.

2.4.3 前測度

Boole 代数 \mathcal{G}_0 上の前測度は, 測度 $\mathcal{G} \rightarrow [0, \infty]$ に拡張できる.

定義 2.4.8 (pre-measure). Boole 代数 \mathcal{G}_0 上の前測度 $\mu_0 : \mathcal{G}_0 \rightarrow [0, \infty]$ とは, 測度のことである. すなわち,

- (1) (null set) $\mu_0(\emptyset) = 0$.
- (2) (additivity) 互いに素な \mathcal{G}_0 の列 $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ について, $\mu_0 \left(\sum_{i \in \mathbb{N}} A_i \right) = \sum_{i \in \mathbb{N}} \mu_0(A_i)$.

2.5 完備可測空間

σ -代数 \mathcal{M} の完備化とは, null set と full set のなす完備 Boole 代数 \mathcal{N} とを含むような拡張 $\mathcal{M} \cup \mathcal{N} \subset \overline{\mathcal{M}}$ をいう. Lebesgue 可測集合 $\overline{\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)}$ は完備であるが, 区間塊は任意合併について閉じている 4.2.3.

距離空間には完備化があるべき、測度空間にも完備化が標準的に取れるべき。これをあくまでも代数構造から抽出する。

null set の双対概念 (補集合) は full set となり, $\forall S \in \mathcal{G} \mu(S) = \mu(S \cap F)$ という代数法則を満たす。吸収律的で、ここでも束の構造が出現するために、full set も好まれる。a.e. とは真理集合が full set であることをいう。完備とは全ての full set が可測であることをいう (全ての null set が 0 とわかるなら、その補集合も値が定まる)。測度が同値とは等化子が full set であることをいう。そこで気づいたが、測度空間が完備であるとは、束・代数が完備であるということである。

2.5.1 零集合

この「だいたい」「概」の言葉の使い方は、代数構造に支えられた数学的強度を持つ概念である上に、豊富な意味論を持つ。この概念の数学的安定性は、 $\mathcal{L}^p(X)$ のこれに関する同値類として得る空間 $L^p(X)$ の良い性質を見れば明らかである。

定義 2.5.1 (null set, μ -a.e.). 測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) について、

- (1) $N \in \mathcal{G}$ が $\mu(N) = 0$ を満たすとき、 N を μ -零集合という。
- (2) 命題 $P(x)$ が $\mu(X \setminus P(x)) = 0$ を満たすとき、 μ に関してほとんど全ての x について命題 $P(x)$ が成り立つという。

歴史 2.5.2. 「殆ど至る所」は、Riemann 可積分関数を特徴づけるために Lebesgue が発明した表現であり、初出は 1904 年 [8].

補題 2.5.3. 測度空間 $(\mathcal{X}, \mathcal{A}, \mu)$ について、 $\mathcal{N} := \{N \in \mathcal{A} \mid \mu(N) = 0\}$ とする。このとき、次の 2 条件を満たす：

- (1) $\forall A \in \mathcal{P}(X), B \in \mathcal{N} \ A \setminus B \in \mathcal{N}, A \cap B \in \mathcal{N}$.
- (2) $\forall \{A_n\} \subset \mathcal{N} \ \cup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{N}$.

定義 2.2.13 と見比べれば、完備測度空間の \mathcal{N} は σ -イデアルをなすことがわかる。

2.5.2 可測関数の概収束

概収束するならば、任意に測度の小さい集合を除いて一様収束する。

定理 2.5.4 (Egorov (1911)). (X, \mathcal{G}, μ) を有限な測度空間とする： $\mu(X) < \infty$ 。実可測関数列 (f_n) が実可測関数 $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ に概収束するならば、 $\forall \delta > 0 \ \exists A \in \mathcal{G} \ \mu(A) < \delta$ かつ (f_n) は $X \setminus A$ 上 f に一様収束する。

[証明].

$$Z := \bigcap_{p=1}^{\infty} \bigcup_{q=1}^{\infty} \bigcap_{n=q}^{\infty} \{z \in X \mid |f_n(z) - f(z)| < \frac{1}{p}\}$$

と定めると、 $x \in X$ について

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) \Leftrightarrow \forall p \in \mathbb{N} \ \exists q \in \mathbb{N} \ \forall n \geq q \ |f_n(x) - f(x)| < \frac{1}{p} \Leftrightarrow x \in Z$$

より、 (f_n) が概収束するという仮定は $\mu(Z^c) = 0$ に同値。

ここで、

$$Z^c = \bigcup_{p=1}^{\infty} \underbrace{\bigcap_{q=1}^{\infty} \bigcup_{n=q}^{\infty} \{z \in X \mid |f_n(z) - f(z)| \geq \frac{1}{p}\}}_{=: B_{p,q}}$$

と定めると、 $(B_{p,q})_{q \in \mathbb{N}}$ は単調減少列で、 $\mu(X) < \infty$ より、 $q \rightarrow \infty$ のとき $\mu(B_{p,q}) \searrow \mu(\cap_{q=1}^{\infty} B_{p,q})$ で (補題 2.4.6(5)), $\mu(\cap_{q=1}^{\infty} B_{p,q}) \leq \mu(Z^c) = 0$ 。

よって、列 $(B_{p,q})_{q \in \mathbb{N}}$ は測度 0 の集合に収束するから、任意の $\delta > 0$ に対して、 $\mu(B_{p,q_p}) < \frac{\delta}{2^p}$ を満たす列 $(q_p)_{p \in \mathbb{N}}$ が取れる。これは番号 q を p に依って一斉にとっている。こうして構成した $B := \cup_{p=1}^{\infty} B_{p,q_p}$ は条件を満たす。

$$(1) \ \mu(B) = \sum_{p=1}^{\infty} \mu(B_{p,q_p}) < \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\delta}{2^p} = \delta.$$

- (2) $B^c = \cap_{p=1}^{\infty} B_{p,q_p}^c = \cap_{p=1}^{\infty} \cap_{n=q_p}^{\infty} \left\{ z \in X \mid |f_n(x) - f(x)| < \frac{1}{p} \right\}$. となるが, これは任意の $p \in \mathbb{N}_+$ に対して q_p が一様に取りえていることを意味する.

要諦 2.5.5. いとも簡単に論理の糸を辿って見せた……。まず, $B_{p,q}$ を「 q 番目以降にも, $1/p$ 以上外れる $n \in \mathbb{N}$ をもつ点 $x \in X$ からなる集合」と定めると, 概収束するとは, この測度を任意に小さくできるということである. この小さくする際に, B を定める際に q_p を定めるアルゴリズムをあらかじめ決めておくことができるから, 一様に収束するような場 B^c が作れる.

2.5.3 Lebesgue 式拡張による完備化

Borel 集合族と Lebesgue 可測集合の違いは, 零集合 (の部分集合) の分の差である. つまり, σ -集合体 \mathcal{G} の完備化とは, \mathcal{G} を含む σ -集合体で, 測度が 0 の集合が σ -イデアルをなすような最小の σ -集合体のことを指す. これを克服すれば良い. 「上下から同じ測度で挟める」ということは, 対称差の代数法則で回収して議論するのが良い. この算譜を Lebesgue 式拡張による完備化という.

定義 2.5.6 (complete). 測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) は,

$$\forall A \in \mathcal{G} \quad \forall B \in P(X) \quad [(\mu(A) = 0 \wedge B \subset A) \Rightarrow (B \in \mathcal{G} \wedge \mu(B) = 0)]$$

を満たすとき完備であるという.

補題 2.5.7 (目標の対称差による特徴付け). $B \subset X$ を一般の部分集合とする. このとき, 次の 2 条件は同値.

- (1) $\exists A \in \mathcal{G} \quad \exists N \in \mathcal{G} \quad A \Delta B \subset N \wedge \mu(N) = 0.$
- (2) $\exists A_1, A_2 \in \mathcal{G} \quad A_1 \subset B \subset A_2 \wedge \mu(A_2 \setminus A_1) = 0.$

[証明].

- (1) \Rightarrow (2) $A_1 := A \setminus N, A_2 := A \cup N$ とすると, $A_1 \subset B \subset A_2$ を満たし, $A_2 \setminus A_1 = N$ より, $\mu(A_2 \setminus A_1) = 0.$
 (2) \Rightarrow (1) $A := A_1, N := A_2 \setminus A_1$ とすると, $A \Delta B = B \setminus A_1 \subset A_2 \setminus A_1 = N$ より $\mu(B \setminus A_1) = 0$ である.

定理 2.5.8 (completion by Lebesgue extension). 測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) に対して,

$$\overline{\mathcal{G}} := \{B \in P(X) \mid \exists A, N \in \mathcal{G} \text{ s.t. } A \Delta B \subset N, \mu(N) = 0\}$$

とし, $B \in \overline{\mathcal{G}}$ に対して $\bar{\mu}(B) := \mu(A)$ で $\bar{\mu}: \overline{\mathcal{G}} \rightarrow \mathbb{R}$ を定める.

- (1) $\overline{\mathcal{G}}$ も σ -集合体になる.
- (2) $\bar{\mu}$ は A に依らずに一意に定まり, $\overline{\mathcal{G}}$ 上の完備測度となる.

測度空間 $(X, \overline{\mathcal{G}}, \bar{\mu})$ を完備化という.

2.5.4 完備化空間上の可測関数

命題 2.5.9 (完備化可測性の特徴付け). 次の 3 条件は同値である.

- (1) f は $\overline{\mathcal{G}}$ 可測である.
- (2) \mathcal{G} 可測関数 $g: X \rightarrow \mathbb{R}$ が存在して, $f(x) = g(x) \bar{\mu}$ -a.e. x .
- (3) \mathcal{G} 可測関数 $g_1, g_2: X \rightarrow \mathbb{R}$ が存在して, $\forall_{x \in X} g_1(x) \leq f(x) \leq g_2(x)$ かつ $g_1(x) = g_2(x) \bar{\mu}$ -a.e. x .

[証明].

- (2) \Rightarrow (1) 任意の $B \in \mathcal{G}(\overline{\mathbb{R}})$ をとる. 条件より, 零集合 $N \in \overline{\mathcal{G}}$ が存在して $g^{-1}(B) \in \mathcal{G}$ を用いて $f^{-1}(B) \triangle g^{-1}(B) \subset N$ を満たすから, $f^{-1}(B) \in \overline{\mathcal{G}}$ である.
- (3) \Leftrightarrow (2) 任意の $B \in \mathcal{G}(\overline{\mathbb{R}})$ について, g_1, g_2 の逆像が可測であることと g の逆像が可測であることは同値 (補題 2.5.7).
- (1) \Rightarrow (3) (1) $\exists_{B \in \overline{\mathcal{G}}} f = \chi_B$ の場合を考える. $B \in \overline{\mathcal{G}}$ と補題 2.5.7 より, $A_1, A_2 \in \mathcal{G}$ が存在して $A_1 \subset B \subset A_2, \mu(A_2 \setminus A_1) = 0$ を満たす. よって, $g_1 := \chi_{A_1}, g_2 := \chi_{A_2}$ とおけば良い.
- (2) f が非負の単関数である場合, すなわち, 有限集合 $\{a_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset (0, \infty)$ と互いに素な有限族 $\{B_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \overline{\mathcal{G}}$ が存在して $f = \sum_{k=1}^N a_k \chi_{B_k}$ と表せる場合を考える. それぞれの $k \in [N]$ について, $A_{1,k}, A_{2,k} \in \mathcal{G}$ が存在して, $A_{1,k} \subset B_k \subset A_{2,k}, \mu(A_{2,k} \setminus A_{1,k}) = 0$ を満たすものが存在する. ここで, $g_1(x) := \sum_{k=1}^N a_k \chi_{A_{1,k}}, g_2(x) := \sum_{k=1}^N a_k \chi_{A_{2,k}}$ とおくと, 各 a_k は非負なので $\forall_{x \in X} g_1(x) \leq g_2(x)$ を満たす. さらに, $\{x \in X \mid g_1(x) \neq g_2(x)\} \subset \bigcup_{k=1}^N (A_{2,k} \setminus A_{1,k})$ より, $\mu(\{x \in X \mid g_1(x) \neq g_2(x)\}) = 0$.
- (3) f が一般の非負可測関数である場合, 単関数の列 (f_n) が存在して $f_n \nearrow f$ を満たす (単関数近似 2.3.15). (2) より, 各 $n \in \mathbb{N}$ に対して $g_{n,1}, g_{n,2}$ という \mathcal{G} -可測関数が存在して,
- (a) $\forall_{x \in X} g_{n,1}(x) \leq f_n(x) \leq g_{n,2}(x)$.
- (b) $g_{n,1}(x) = g_{n,2}(x) \mu - \text{a.e. } x$.
- これに対して, $g_1(x) := \liminf_{n \rightarrow \infty} g_{n,1}(x), g_2(x) := \liminf_{n \rightarrow \infty} g_{n,2}(x)$ とおくと,
- (a) $\forall_{x \in X} g_1(x) \leq f(x) \leq g_2(x)$.
- (b) $g_1(x) = g_2(x) \mu - \text{a.e. } x$.
- を満たすことを示せば良い. (1) は極限が不等号を保つことより, (2) は $\{x \in X \mid g_1(x) \neq g_2(x)\} \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{x \in X \mid g_{n,1}(x) \neq g_{n,2}(x)\}$ より従う.
- (4) 一般の $\overline{\mathcal{G}}$ -可測関数 $f: X \rightarrow [-\infty, \infty]$ については, $f^\pm := \max \pm f, 0$ と定めると, 2つの非負可測関数 $f^\pm: X \rightarrow [0, \infty]$ を用いて $f = f^+ - f^-$ と表せる.

■

2.6 外測度による測度の構成

Carathéodory (1918) [6] による測度論が, Lebesgue による \mathbb{R}^n 上の理論を, 一般の集合上に拡張した. 「矩形から開集合を挟んで任意の集合の面積を近似し, 完備な測度空間を得る」という手続きは, 数学的には外測度の構成という発想にほかならない.^a

^a Lebesgue 1902 は Lebesgue 可測集合を確定させるに当たって位相を利用した議論をしているが, その部分を抜いたのである.

2.6.1 定義とその例

外測度：測度の面積への応用の王道＝被覆による面積近似

目標である σ -加法性は $P(X)$ 全域では定義できないが, 関連する代数法則である σ -加法性と単調性は容易に構成できる. 例えば, 小学校で習う面積の定義である, 上下からの矩形での近似である. このように, 測度とは違うが, 外測度と呼ばれる集合関数のクラスはより直感的である. そこで, ここから測度を構成する標準的方法を整備する.

* 双対概念は内測度で, これは $\mu^*(\cdot)$ と補集合を噛ませれば良い.

定義 2.6.1 ((Carathéodory) outer / exterior measure (1918)). 関数 $\mu^*: P(X) \rightarrow [0, \infty]$ が次の 3 条件を満たすとき, (Carathéodory の) 外測度という.^{†17}

^{†17} 非可測集合の上にも定義される. 可測集合のクラスに限定すれば, σ -加法族をえる.

- (1) (非負性) $\text{Im } \mu \subset [0, \infty]$ かつ $\mu(\emptyset) = 0$.^{†18}
 (2) (単調性) $A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$.
 (3) (σ -劣加法性) $\mu(\cup_{n=1}^{\infty} A_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n)$.

例 2.6.2 (Lebesgue outer measure). 矩形の面積が定める集合関数 $m_d : l_d \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (1.6.4) について, 区間塊への延長ではなく, 一般の集合への延長 $m^* : P(X) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ を

$$m^*(A) := \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} m(R_k) \in \overline{\mathbb{R}} \mid A \subset \cup_{k=1}^{\infty} R_k, \{R_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset l_d \right\}$$

と定めると, これは外測度となる. これは Jordan 外測度の発想の可算化に当たる.^{†19}

例 2.6.3 (Lebesgue-Stieltjes 外測度). この構成は, 一般の単調増加関数 $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ について, $F((a, b]) := F(b) - F(a)$ として構成しても外測度となる. Lebesgue 測度は $F = \text{id}_{\mathbb{R}}$ の場合に当たる.

2.6.2 外測度による測度の構成

外測度 $\mu^* : P(X) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ が得られれば, μ^* -可測集合 \mathcal{M}^* に定義域を制限することで, 完備な測度空間 $(X, \mathcal{M}^*, \mu^*|_{\mathcal{M}^*})$ を得る.

定義 2.6.4 (外測度による可測性 (Carathéodory measurability)). 外測度 $\mu^* : P(X) \rightarrow [0, \infty]$ に対して, $B \in P(X)$ が μ^* -可測であるとは, 次を満たすことをいう:

$$\forall A \in P(X) \quad \mu^*(A) = \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c).$$

^{†20}

記法 2.6.5.

- (1) μ^* -可測集合全体の集合を

$$\mathcal{G}^* := \{B \in P(X) \mid \forall A \in P(X) \quad \mu^*(A) = \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c)\}$$

と表す.

- (2) $\mu^* : P(X) \rightarrow [0, \infty]$ の \mathcal{G}^* 上への制限を μ と表す: $\mu := \mu^*|_{\mathcal{G}^*}$.

定理 2.6.6 (μ^* -可測集合の性質: Carathéodory の基本定理). μ^* -可測集合全体の集合 \mathcal{G}^* について, 次が成り立つ:

- (1) $\emptyset \in \mathcal{G}^*$.
 (2) $A \in \mathcal{G}^* \Leftrightarrow A^c \in \mathcal{G}^*$.
 (3) $\forall A, B \in \mathcal{G}^* \quad A \cap B \in \mathcal{G}^*$.
 (4) $\forall \{A_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G}^* \quad \cup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{G}^* \wedge \cap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{G}^*$.
 (5) 互いに素な \mathcal{G}^* の列 (A_n) に対して, $A := \sum_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{G}^*$ かつ $\mu(A) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n)$.

特に, \mathcal{G}^* は σ -代数であり, μ はその上に測度を定める.

[証明].

- (1) \mathcal{G}^* は集合体である まず, \mathcal{G}^* が集合体をなすことを示す.

- (i) $\emptyset \in \mathcal{G}^*$ を示す. 外測度の性質 (1) $\mu^*(\emptyset) = 0$ より, $\forall A \in P(X) \quad \mu^*(A) = \mu^*(A \cap \emptyset) + \mu^*(A \cap \emptyset^c)$ は成り立つ.
 (ii) $B \in \mathcal{G}^*$ のとき, $B^c \in \mathcal{G}^*$ である. μ^* -可測性の条件をそもそも対称的に定義したためである.

^{†18} 測度の公理のままだと, $[-\infty, 0]$ で理論展開することがあり得るのか.

^{†19} 曲線の長さの定義に似ている. やはり極限ばかりだ.

^{†20} 劣加法性から, $\mu^*(A) \leq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c)$ 方向は自明.

(iii) $B_1, B_2 \in \mathcal{G}^*$ とする. このとき,

$$\begin{aligned}
 \mu^*(A) &= \mu^*(A \cap B_1) + \mu^*(A \cap B_1^c) && \because B_1 \in \mathcal{G}^* \\
 &= \mu^*(A \cap B_1 \cap B_2) + \mu^*(A \cap B_1 \cap B_2^c) \\
 &\quad + \mu^*(A \cap B_1^c \cap B_2) + \mu^*(A \cap B_1^c \cap B_2^c) && \because B_2 \in \mathcal{G}^* \\
 &\geq \mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2)) + \mu^*(A \cap (B_1 \cup B_2)^c) && \because \text{外測度の劣加法性 (3)}
 \end{aligned}$$

より, 外測度の劣加法性 (3) による逆向きの不等号と併せて, $B_1 \cup B_2 \in \mathcal{G}^*$.

議論の一般化 同様の, 少し変形した等式を, 一般の自然数 $N \in \mathbb{N}$ について示す: 互いに素な \mathcal{G}^* の族 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ について,

$$\forall A \in P(X) \quad \forall N \in \mathbb{N} \quad \mu^*(A) = \sum_{n=1}^N \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^N B_n)^c). \quad N=1 \text{ のときは } B_1 \in \mathcal{G}^* \text{ の定義. } N+1 > 1 \text{ について,}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1}^{N+1} \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^{N+1} B_n)^c) &= \sum_{n=1}^N \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(\underbrace{A \cap B_{N+1}}_{A \cap (\cup_{n=1}^N B_n)^c \cap B_{N+1}}) \\
 &\quad + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^N B_n)^c \cap B_{N+1}^c) && \because B_{N+1} \subset (\cup_{n=1}^N B_n)^c \\
 &= \sum_{n=1}^N \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^N B_n)^c) && \because B_{N+1} \in \mathcal{G}^* = \mu^*(A).
 \end{aligned}$$

σ -性の証明 互いに素な \mathcal{G}^* の族 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を取る. $(\cup_{n=1}^\infty B_n)^c \subset (\cup_{n=1}^N B_n)^c$ に注意して, 任意の $N \in \mathbb{N}$ について,

$$\begin{aligned}
 \mu^*(A) &= \sum_{n=1}^N \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^N B_n)^c) \\
 &\geq \sum_{n=1}^N \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^\infty B_n)^c) && \because \text{外測度の単調性 (2)}
 \end{aligned}$$

より, $N \rightarrow \infty$ を考えて,

$$\begin{aligned}
 \mu^*(A) &\geq \sum_{n=1}^\infty \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^\infty B_n)^c) \\
 &\geq \mu^*(A \cap \cup_{n=1}^\infty B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^\infty B_n)^c) && \because \text{外測度の劣加法性 (3)} \\
 &\geq \mu^*(A) && \because \text{外測度の劣加法性 (3)}
 \end{aligned}$$

より, $\cup_{n=1}^\infty B_n \in \mathcal{G}^*$. 一般の \mathcal{G}^* の族 (B_n) についても, 分割を取り直せば良い.

(2) μ^* は測度である 直前の議論の等式 $\forall A \in P(X) \quad \sum_{n=1}^\infty \mu^*(A \cap B_n) + \mu^*(A \cap (\cup_{n=1}^\infty B_n)^c)$ の, $A = \cup_{n=1}^\infty B_n$ の場合として, μ^* の σ -加法性は従うから, 確かに $\mu^*: \mathcal{G}^* \rightarrow [0, \infty]$ は測度である. ■

定理 2.6.7 (完備性). 外測度 $\mu^*: P(X) \rightarrow [0, \infty]$ に対して,

- (1) (X, \mathcal{G}^*, μ) は完備な測度空間となる.
- (2) \mathcal{G}^* の増大列 (A_n) について, $\mu(A_\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$.
- (3) \mathcal{G}^* の非自明な減少列 (A_n) について, $\mu(A_\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$.

[証明]. 任意に $\mu^*(N) = 0$ を満たす $N \in P(X)$ について, $N \in \mathcal{G}^*$ を示せば良い. 任意の $A \subset P(X)$ に対して, 外測度の劣加法性と単調性より, $\mu^*(A) \leq \underbrace{\mu^*(A \cap N)}_{=0} + \mu^*(A \cap N^c) \leq \mu^*(A)$ が従う. ■

2.6.3 計量的外測度

距離と両立する外測度を計量外測度という．このような外測度の構成は，Hausdorff 測度の構成に応用がある．

2.7 有限加法的測度の Hopf 拡張による測度の構成

Carathéodory の理論は外測度は所与のものとして完備測度空間を構成したが，有限加法的測度から実際に完備測度を構成するまでを定理としてまとめる．有限加法的測度には標準的な構成法があり，例えば累積分布関数と呼ばれるが，これが定める測度を Lebesgue-Stieltjes 測度という．

2.7.1 Hahn-Kolmogorov の拡張定理

Hahn-Kolmogorov の拡張定理

前節では外測度から完備測度を構成する方法を与えた．さらにそこへの道として，有限加法的測度から外測度を通じて完備測度空間を構成する標準的な方法を考える．まず，有限加法的測度 μ_0 は可算被覆の測度の下限として外測度 μ^* を定める．このとき， μ_0 が \mathcal{A} 上 σ -加法的である場合に限り，制限 $\mu^* : \sigma(\mathcal{A}) \rightarrow [0, \infty]$ は測度である．さらに， (X, \mathcal{A}, μ_0) が σ -有限である場合に限り， $\sigma(\mathcal{A}) = \mathcal{B}^*$ で，延長 $(X, \sigma(\mathcal{A}), \mu^*)$ は完備である．

補題 2.7.1．有限加法的測度空間 (X, \mathcal{A}, μ_0) について，集合関数 $\mu^* : P(X) \rightarrow [0, \infty]$ を

$$\mu^*(A) := \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \mu_0(A_k) \in [0, \infty] \mid \{A_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}, A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \right\}$$

と定めると，次が成り立つ．

- (1) $\mu^* : P(X) \rightarrow [0, \infty]$ は外測度である．
- (2) μ^* -可測な集合全体の集合 \mathcal{B}^* に対して， $\sigma(\mathcal{A}) \subset \mathcal{B}^*$ が成り立つ（したがって， $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{A})}$ は測度を定める 2.6.6）．
- (3) μ_0 が \mathcal{A} 上 σ -加法的ならば， $\forall A \in \mathcal{A} \mu^*(A) = \mu_0(A)$ が成り立つ．すなわち， μ^* は μ_0 の $\sigma(\mathcal{A})$ への延長である．
- (4) さらに (X, \mathcal{A}, μ_0) は σ -有限： $\exists \{A_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A} \mu_0(A_k) < \infty \wedge X = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ であるとき， μ_0 の $\sigma(\mathcal{A})$ 上への延長は一意的である．

[証明]．

- (1) $\mu^* : P(X) \rightarrow [0, \infty]$ が外測度の公理を満たすことを確認する．

(i) $\mu^*(\emptyset) = 0$ かつ $\text{Im } \mu^* \subset [0, \infty]$ ．

(ii) 単調になる．

- (iii) 任意の $P(X)$ の族 (A_n) に対し， $\mu^*(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu^*(A_n)$ を示す．任意の $\epsilon > 0$ について， $A_n \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_{n,k}$ ， $\sum_{k=1}^{\infty} \mu_0(A_{n,k}) \leq \mu^*(A_n) + \frac{\epsilon}{2^n}$ を満たす族 $(A_{n,k})$ が各 $n \in \mathbb{N}$ に対して存在する．これを用いて，

$$\begin{aligned} \mu^*(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) &\leq \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \mu_0(A_{n,k}) \\ &\leq \sum_{n=1}^{\infty} \left(\mu^*(A_n) + \frac{\epsilon}{2^n} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu^*(A_n) + \epsilon. \end{aligned}$$

したがって， $\mu^*(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu^*(A_n)$ ．

- (2) 任意の $B \in \mathcal{A}$ に対して $\mu^*(A) \geq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c)$ を示せば良い. 任意の $\epsilon > 0$ に対して, $A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k, \mu_0(\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k) \leq \mu^*(A) + \epsilon$ を満たす \mathcal{A} の族 (A_k) が存在するから, これを用いて,

$$\begin{aligned} \mu^*(A) + \epsilon &\geq \mu_0(\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} (\mu_0(A_k \cap B) + \mu_0(A_k \cap B^c)) && \mu_0 \text{ の有限加法性} \\ &\geq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c) && \mu^* \text{ の劣加法性と単調性.} \end{aligned}$$

- (3) 任意の $A \in \mathcal{A}$ について, $\mu^*(A) \geq \mu_0(A)$ を示せば良い. 任意の $\epsilon > 0$ に対して $\mu^*(A) + \epsilon \geq \sum_{k=1}^{\infty} \mu_0(A_k), A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k$ を満たす \mathcal{A} の族 (A_k) が存在する. A に収束する単調増加列 $(\bigcup_{k=1}^n (A \cap A_k))_{n \in \mathbb{N}}$ に注目して, 有限加法的測度の σ -加法性の特徴付け 2.4.4 より,

$$\begin{aligned} \mu^*(A) + \epsilon &\geq \sum_{k=1}^{\infty} \mu_0(A_k) \\ &\geq \sum_{k=1}^{\infty} \mu_0(A \cap A_k) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \mu_0(A \cap A_k) \\ &\geq \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_0(\bigcup_{k=1}^n (A \cap A_k)) = \mu_0(A). \end{aligned}$$

- (4) σ -有限性より, $\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k = X$ を満たす測度有限な集合の列 (A_k) が存在する. 特に, $\bigcup_{i=1}^k A_i =: A_k$ と定め直すことで, (A_k) は単調増大列として良い. $\mu: \sigma(\mathcal{A}) \rightarrow [0, \infty]$ を μ_0 の $\sigma(\mathcal{A})$ 上への任意の延長となる測度とし,

$$\mathcal{M}_k := \{B \in \sigma(\mathcal{A}) \mid \mu(B \cap A_k) = \mu^*(B \cap A_k)\}$$

と定めると, $\mathcal{A} \subset \mathcal{M}_k \subset \sigma(\mathcal{A})$ である. あとは, 任意の $k \in \mathbb{N}$ について, $\sigma(\mathcal{A}) = \mathcal{M}(\mathcal{A}) \subset \mathcal{M}_k$ を示せば良い (単調族定理 2.2.6).

そこで, \mathcal{M}_k が単調族であることを示す. また, 測度 μ, μ^* が定める集合関数 $\mu(- \cap A_k), \mu^*(- \cap A_k): \sigma(\mathcal{A}) \rightarrow [0, \infty]$ は有限な測度となるから, 任意の \mathcal{M}_k の B に収束する単調列 (B_n) に対して, $\mu^*(B \cap A_k) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n \cap A_k) = \mu(B \cap A_k)$ (測度の性質 2.4.6(4),(5)). ただし, 単調減少列について, $\mu(B_1 \cap A_k) \leq \mu(A_k) < \infty$ の仮定を用いた.

$k \rightarrow \infty$ を考えることより, $\mu_0 = \mu^*$ on \mathcal{A} を満たす $\sigma(\mathcal{A})$ 上の測度は一意であることがわかる. ■

要諦 2.7.2. μ^* を \inf として定義するから, この定義から抽出しやすい主張が $\epsilon > 0$ を使うものであるため, 不等式 $\mu^*(A) \geq \mu_0(A)$ を $\forall \epsilon > 0 \mu^*(A) + \epsilon \geq \mu_0(A)$ に読み替えて示す.

定理 2.7.3 (Hopf (1937) [7]). 集合体 \mathcal{A} 上の有限加法的測度 $\mu_0: \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ について, 次の2条件は同値.

- (1) $\sigma(\mathcal{A})$ 上の測度に延長できる.
- (2) μ_0 は \mathcal{A} 上 σ -加法的である.

特に, (X, \mathcal{A}, μ_0) が σ -有限であるとき, 拡張は一意である.

例 2.7.4 (Lebesgue-Stieltjes 測度). 任意の広義単調増加関数 $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ は左連続であるとする. このとき,

$$\lambda_g \left(\sum_{i=1}^n (a_i, b_i] \right) := \sum_{i=1}^n (g(b_i) - g(a_i))$$

と定めると, λ_g は \mathbb{R} 上の区間のなす集合代数上で σ -加法的である. これが $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ 上にもつ一意な延長を, **Lebesgue-Stieltjes 測度**という.

2.7.2 Lebesgue 式完備化との算譜合成

Hahn-Kolmogorov 流の \inf による有限測度からの拡張の完備化と、有限測度が定める外測度の μ^* -可測集合への制限で得る完備測度とが、一致する。

記法 2.7.5. 集合族 $\mathcal{B} \subset P(X)$ に対して、 \mathcal{B}_δ を可算積についての閉包、 \mathcal{B}_σ を可算和についての閉包とする。集合体 \mathcal{A} に対して、 $\mathcal{A} \subset \mathcal{A}_{\delta\sigma} \subset \sigma(\mathcal{A})$ というクラスに注目する。 σ -代数は δ -代数でもあることに注意。

補題 2.7.6. (X, \mathcal{A}, μ_0) を σ -有限な有限加法的測度空間で、 μ_0 は \mathcal{A} 上 σ -加法的であるとする、一意な延長 $\mu : \sigma(\mathcal{A}) \rightarrow [0, \infty]$ が存在する。また、 μ_0 が定める外測度を $(X, \mathcal{B}^*, \mu^*)$ とする。

$$(1) \forall B \in P(X) \exists A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma} B \subset A \wedge \mu^*(B) = \mu(A).$$

$$(2) \text{ 任意の部分集合 } B \in P(X) \text{ について、} B \text{ が } \mu^*\text{-可測であることと次は同値：} \exists A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma} \exists N, \mu^* \text{-null } B \subset A \wedge A \setminus B \subset N. \quad \text{†21}$$

[証明].

(1) **構成** 任意の $B \in P(X)$ を取る。これに対して、外測度 μ^* の定め方から、任意の $n \in \mathbb{N}_+$ に対して、

$$B \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} B_{n,k}, \mu^*(B) + \frac{1}{n} \geq \sum_{k=1}^{\infty} \mu(B_{n,k}) (\geq \mu(\bigcup_{k=1}^{\infty} B_{n,k})) \quad (\because \text{測度 } \mu \text{ の劣加法的性})$$

を満たす \mathcal{A} の列 $(B_{n,k})_{k \in \mathbb{N}}$ が存在する。これを用いて、

$$A := \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=1}^{\infty} B_{n,k} \in \mathcal{A}_{\delta\sigma} \subset \sigma(\mathcal{A})$$

と定めれば良い。 σ -代数は δ -代数でもあることに注意。

証明 この $A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma}$ が条件を満たすことを確認する。まず $B \subset A$ を満たし、 $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{A})} = \mu$ と外測度 μ^* の劣加法的性より、

$$\mu^*(B) \leq \mu^*(A) = \mu(A) \text{ である。続いて、構成より、} \mu^*(B) + \frac{1}{n} \geq \mu(\bigcup_{k=1}^{\infty} B_{n,k}) \geq \mu(A) \text{ } (\forall n \in \mathbb{N}_+) \text{ である。}$$

(2) \Leftarrow \mathcal{B}^* が完備より $A \setminus B \in \mathcal{B}^*$ 、 $A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma} \subset \sigma(\mathcal{A}) \subset \mathcal{B}^*$ の時、 $B \in \mathcal{B}^*$ は従う。実際、

$$\begin{aligned} \mu^*(A) &\leq \mu^*(A \cap B) + \mu^*(A \cap B^c) && \because \mu^* \text{ の劣加法的性} \\ &= \mu^*(B) + \mu^*(A \setminus B) && \because B \subset A \\ &\leq \mu^*(A) + \mu^*(N) = \mu^*(A) && \because \mu^* \text{ の単調性} \end{aligned}$$

\Rightarrow $B \in \mathcal{B}^*$ を任意に取る。まずは、 B と μ^* -零集合分しか大きくない $A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma}$ を構成する。

(a) σ -有限性を用いて、 B に収束する測度有限な \mathcal{A} -単調増大列 (A_k) を取る。これは、 $X_k \nearrow X$ を満たす測度有限な \mathcal{A} -単調増大列 (X_k) に対して、 $(A_k := B \cap X_k)_{k \in \mathbb{N}}$ と定めれば良い、

(b) 各 A_k は測度有限だから、 \mathcal{A} -列で任意精度近似ができる。 $\mu^*(A_k) \leq \mu^*(X_k) = \mu_0(X_k) < \infty$ より、 μ^* の定義から、任意の $q \in \mathbb{N}_+$ に対して、

$$A_k \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n}, \quad \mu^*(A_k) + \frac{1}{2^k q} \geq \sum_{n=1}^{\infty} \mu_0(A_{k,q,n}) (\geq \mu^*(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n}))$$

を満たす \mathcal{A} の族 $(A_{k,q,n})_{n \in \mathbb{N}}$ が取れる。

(c) これについて合併を取ることで $A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma}$ を構成する。いま、

$$B = \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n} \in \mathcal{A}_\sigma \quad (\forall q \in \mathbb{N}_+)$$

より、

$$A := \bigcap_{q=1}^{\infty} \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n} \in \mathcal{A}_{\delta\sigma}$$

^{†21} ちょっと N がイデアルっぽいかもしれない。これに「完備化」を行うと、 $\overline{\sigma(\mathcal{A})} = \mathcal{B}^*$ というわけだ。いや、これは対称差が外測度・内測度双対に関して対称性が破れた形か（補題 2.5.7）。

と定めれば良い.

すると, $B \subset A$ を満たし,

$$\begin{aligned}
 \mu^*(A \setminus B) &\leq \mu^*(\cup_{k=1}^{\infty} \cup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n} \setminus B) \\
 &= \mu^*(\cup_{k=1}^{\infty} \cup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n} \setminus \cup_{k=1}^{\infty} A_k) \\
 &\leq \mu^*(\cup_{k=1}^{\infty} \cup_{n=1}^{\infty} (A_{k,q,n} \setminus A_k)) \\
 &\leq \sum_{k=1}^{\infty} \mu^*(\cup_{n=1}^{\infty} (A_{k,q,n} \setminus A_k)) \\
 &= \sum_{k=1}^{\infty} \mu^*(\cup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n} \setminus A_k) \\
 &= \sum_{k=1}^{\infty} (\mu^*(\cup_{n=1}^{\infty} A_{k,q,n}) - \mu^*(A_k)) \quad \because \mu^* \text{ の } \sigma(\mathcal{A}) \text{ 上での完全加法的性} \\
 &\leq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k q} = \frac{1}{q}
 \end{aligned}$$

と任意の $q \in \mathbb{N}_+$ について評価できるから, $\mu^*(A \setminus B) = 0$.

■

要諦 2.7.7.

- (1) $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{A})} = \mu$ であるが, μ は「十分に多くの集合を測れる」ことを言っている. これは任意の $B \in P(X)$ に対して, 任意精度 ($1/n$ 以下) で被覆する列 $(B_{n,k})_{k \in \mathbb{N}}$ が取れることをいう.
- (2) $\mathcal{A}_{\delta\sigma}$ の元は μ^* -可測であるが, それと零集合の分しか変わらない集合は μ^* -可測である.

定理 2.7.8 (完備化). (X, \mathcal{A}, μ_0) を σ -有限な有限加法的測度空間で, μ_0 は \mathcal{A} 上 σ -加法的であるとする, 一意的な延長 $\mu : \sigma(\mathcal{A}) \rightarrow [0, \infty]$ が存在する. また, μ_0 が定める外測度を $(X, \mathcal{G}^*, \mu^*)$ とする. このとき, $(X, \overline{\sigma(\mathcal{A})}, \bar{\mu}) = (X, \mathcal{G}^*, \mu^*)$.

[証明].

$\overline{\sigma(\mathcal{A})} \subset \mathcal{G}^*$ $\sigma(\mathcal{A}) \subset \mathcal{G}^*$ で, \mathcal{G}^* は μ^* -完備であるから, $\overline{\sigma(\mathcal{A})} \subset \mathcal{G}^*$ が従う. $\overline{\sigma(\mathcal{A})}$ は $\sigma(\mathcal{A})$ を含む μ -完備な σ -集合体のうち最小のものであるため.

$\overline{\sigma(\mathcal{A})} \supset \mathcal{G}^*$ 任意に $B \in \mathcal{G}^*$ を取り, これが $\sigma(\mathcal{A})$ の元との対称差が μ -零集合であることを示せば良い. 補題 (2) より, $\exists A \in \mathcal{A}_{\delta\sigma} B \subset A \wedge \mu^*(A \setminus B) = 0$. よって, $A \setminus B \in \mathcal{G}^*$ について補題 (1) より, $\exists N \in \mathcal{A}_{\delta\sigma} A \setminus B \subset N \wedge \mu(N) = \mu^*(A \setminus B) = 0$. ゆえに, $A \triangle B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A) = A \setminus B \subset N$.

\mathcal{G}^* 上の完備測度の一意性 2.5.8 より, $(X, \overline{\sigma(\mathcal{A})}, \bar{\mu}) = (X, \mathcal{G}^*, \mu^*)$ が従う.

■

2.8 Lebesgue 測度の構成

Carathéodory の方法の \mathbb{R}^n に関する各論が Lebesgue 測度論とみなせる. この方法で完備測度空間 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{M}^*, m_d)$ を得るが, 基礎論的な弊を避けるために通常 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{G}(\mathbb{R}^d), m_d)$ を考えることになる.

2.8.1 構成

Lebesgue 可測集合とは, Borel 可測集合との対称差が零集合であるような集合である.

記法 2.8.1 (矩形/区間, 矩形塊).

- (1) 矩形を $I_d := \{(a_1, b_1] \times \cdots \times (a_d, b_d] \in P(\mathbb{R}^d) \mid -\infty \leq a_i \leq b_i \leq \infty\}$ とおく. ただし, $(a, \infty] = (a, \infty)$, $(a, a] = \emptyset$ とみなす.

- (2) 矩形塊 (= 矩形の有限直和) $\mathcal{R}_d := \left\{ \sum_{i=1}^n l_i \in P(\mathbb{R}^d) \mid l_i \in l_d \right\}$ とおくと, \mathcal{R}_d は集合体である.
- (3) 矩形の面積が定める集合関数 $m_d : l_d \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ (1.6.4) は \mathcal{R}_d 上に明らかな方法で延長し, 有限加法的測度を定める.
- (4) $P(\mathbb{R}^d)$ 上にも明らかな方法で延長し, これを Lebesgue 外測度 m_d^* という 2.6.2.

補題 2.8.2 (Lebesgue 測度の存在と一意性).

- (1) 矩形の面積が定める集合関数 $m_d : l_d \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ は矩形塊のなす代数 \mathcal{R}_d 上に延長し, この上で σ -加法性を満たす.
- (2) 測度空間 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{R}_d, m_d)$ は σ -有限である.

よって, Hahn-Kolmogorov の拡張定理 2.7.1 により, 一意な延長が存在し, これについて $(\mathbb{R}^d, \sigma(\mathcal{R}_d), m_d)$ は測度空間となる.

[証明].

- (1) 準備 (a) 任意の $\alpha \geq 0$ について, $m(I) > \alpha$ を満たす矩形 $I \in \downarrow_d$ に対して, 有界な矩形 $J \in \downarrow_d$ が存在して, $\bar{J} \subset I, m(I) > \alpha$ を満たす. 実際, $I = [a, b)$ ($-\infty \leq a < b \leq \infty$) と表せるから, $m(I) - \alpha > 0$ に併せてこれを狭めた区間を J とすれば良い.
- (b) 同様の事実が, 矩形塊 $E \in \mathcal{R}_d$ についても成り立つ. $m(E) > \alpha$ ならば, 有界な矩形塊 $F \in \mathcal{R}_d$ が存在して, $\bar{F} \subset E$ かつ $m(F) > \alpha$ が成り立つ. 実際, $E = \sum_{i=1}^n I_i$ ($I_i \in \downarrow_d$) と表せるのであるから, 各 I_i について $J_i \in \downarrow_d$ を取り, $F := \cup_{i=1}^n J_i$ と定めれば良い.

補題: 大雑把な σ -劣加法性 まず, 区間塊 $E \in \mathcal{R}_d$ に対して, $E \subset \cup_{n=1}^{\infty} I_n \Rightarrow m(E) \leq \sum_{n=1}^{\infty} m(I_n) \quad \forall \{I_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \downarrow_d$ を示す. 各 I_n は $I_n = (a_{n1}, b_{n1}] \times \cdots \times (a_{nd}, b_{nd}]$ と表せるので, $m : \downarrow_d \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ の連続性より, 任意の $\epsilon > 0$ に対して, $\delta_n > 0$ を上手く取れば, $J_n := (a_{n1}, b_{n1} + \delta_n) \times \cdots \times (a_{nd}, b_{nd} + \delta_n)$ が $m(J_n) \leq m(I_n) + \frac{\epsilon}{2^n}$ を満たす. いま, $m(E) = 0$ ならば主張は自明に成り立つから, $m(E) > 0$ として良い. $m(E) > \alpha$ を満たす $\alpha \geq 0$ を任意に取る. すると, (b) より, 有界な区間塊 $F \in \mathcal{R}_d$ が存在して, $\bar{F} \subset E, m(F) > \alpha$ を満たす. ここで, J_n に対して, $G_n := (a_{n1}, b_{n1} + \delta_n) \times \cdots \times (a_{nd}, b_{nd} + \delta_n)$ と定めると, $\bar{F} \subset E \subset \cup_{n=1}^{\infty} I_n \subset \cup_{n=1}^{\infty} G_n$ が成り立つから, 有界閉集合 \bar{F} のコンパクト性より, $n_0 \in \mathbb{N}$ が存在して, $F \subset \bar{F} \subset \cup_{n=1}^{n_0} G_n \subset \cup_{n=1}^{n_0} J_n$ が成り立つ. よって, $m : \downarrow_d \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ の単調性と有限劣加法性より,

$$\begin{aligned} \alpha < m(F) &\leq m(\cup_{n=1}^{n_0} J_n) \\ &\leq \sum_{n=1}^{n_0} m(J_n) \\ &\leq \sum_{n=1}^{\infty} \left(m(I_n) + \frac{\epsilon}{2^n} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} m(I_n) + \epsilon. \end{aligned}$$

$\epsilon \searrow 0, \alpha \nearrow m(E)$ を考えると, $m(E) \leq \sum_{n=1}^{\infty} m(I_n)$ が従う.

完全加法性 $E = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \in \mathcal{R}_d$ を任意に取る. 各 $E_n \in \mathcal{R}_d$ より, $E_n = \sum_{k=1}^{k_n} I_{n,k}$ と表せるから, $E = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} I_{n,k}$ となる. 直

前の議論より, $m(E) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_n} m(I_{n,k}) \leq \sum_{n=1}^{\infty} m(E_n)$ を得る. 逆は, 任意の $k \in \mathbb{N}$ について $\sum_{n=1}^k E_n \subset E$ であるから, 有限加法性と単調性より $m\left(\sum_{n=1}^k E_n\right) = \sum_{n=1}^k m(E_n) < m(E)$. $k \rightarrow \infty$ について, $\sum_{n=1}^{\infty} m(E_n) \leq m(E)$ を得る.

■

要諦 2.8.3. 証明は簡潔だが, ギミックが多すぎてもつれた糸をはぐせない精緻な完成品のようだ.

命題 2.8.4 (Lebesgue 可測集合の例). Lebesgue 外測度 $m^* : P(X) \rightarrow [0, \infty]$ について,

- (1) \mathbb{R}^d の矩形 l_d は m^* -可測である.

(2) \mathbb{R}^d の開集合の可算共通部分で表される集合 (G_δ 集合) は m^* -可測である.

(3) \mathbb{R}^d の閉集合の可算和で表される集合 (F_σ 集合) は m^* -可測である.

このときの Caratheodory の意味での m^* -測度を, 集合の **Lebesgue 測度** と呼ぶ.

注 2.8.5. 閉集合をフランス語で *ensemble fermé*, 開集合をドイツ語で *Gebiete* といったため.

2.8.2 特徴付け

G_δ, F_σ 集合は Lebesgue 可測であることがわかったが, Lebesgue 可測集合が $\mathcal{G}(\mathbb{R}^d) \subset \mathcal{M}^*(\mathbb{R}^d)$ を満たすことを示すには, さらに位相との関係を考察する必要がある. これを通じて, 壮麗な Radon 測度に関する一般論に到達する.

定理 2.8.6 (Lebesgue 測度の特徴付け: 外部正則性). 任意の部分集合 $A \subset \mathbb{R}^d$ に対して,

$$m^*(A) = \inf \{m(G) \in \mathbb{R} \mid A \subset G \text{ かつ } G \text{ は開集合}\}.$$

[証明]. 任意に $\epsilon > 0$ を取り, $m(G) \leq m^*(A) + 2\epsilon$ を満たす開集合 $(A \subset) G$ を構成すれば良い. $m^*(A)$ は A の \downarrow_d -可算被覆の測度の和の下限として定めたから, この ϵ に対して, 矩形の族 $\{I_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \downarrow_d$ が存在して,

$$A \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n, \quad \sum_{n=1}^{\infty} m(I_n) \leq m^*(A) + \epsilon$$

を満たす. ここで, $I_n = (a_{n,1}, b_{n,1}] \times \cdots \times (a_{n,d}, b_{n,d}]$ に対して, $\delta_n > 0$ を十分小さく取ることによって $J_n = (a_{n,1}, b_{n,1} + \delta_n) \times \cdots \times (a_{n,d}, b_{n,d} + \delta_n)$ であって, $m(J_n) \leq m(I_n) + \frac{\epsilon}{2^n}$ を満たすように取れる (変数 δ_n に関する連続性). このとき, $G := \bigcup_{n=1}^{\infty} J_n$ は開集合で, $A \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n \subset G$ を満たし, さらに

$$\begin{aligned} m(G) &\leq \sum_{n=1}^{\infty} m(J_n) \\ &\leq \sum_{n=1}^{\infty} \left(m(I_n) + \frac{\epsilon}{2^n} \right) \\ &\leq m^*(A) + 2\epsilon \end{aligned}$$

も満たす. ■

要諦 2.8.7. δ_n に関する連続性と, Lebesgue 外測度の定義 (\downarrow_d -可算被覆の測度の和の下限) とを用いて, ϵ - δ 論法から証明する. これは補題 2.8.2 での Lebesgue 測度の σ -劣加法性の証明と全く同じ証明.

3.4 について, A が有界でない場合は, σ -有限性と同じ処理をする. しかし閉集合の議論においては, それだけでなく, 補題 2.8.10 が使えるように, 各 A_n が $B(0, n)$ の外側に逃げていくように取る. これはより強い有限性条件で, $\bigcup_{n=1}^{\infty} F_n$ が再び閉になることを示すことができる. また, $m(A) < \infty$ の場合は全く別のルートがある.

定理 2.8.8 (Lebesgue 可測集合の特徴付け). m_d^* -可測集合の全体を \mathcal{M} とすると, $M \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$ について次の 4 条件は同値:

- (1) $M \in \mathcal{M}$.
- (2) $\forall \epsilon > 0$ 閉集合 $F \subset M$ と開集合 $M \setminus F \subset G$ とが存在して, $|G| < \epsilon$ を満たす.
- (3) M に含まれる閉集合の列 (F_k) が存在して, $M \setminus \bigcup_{k \in \mathbb{N}} F_k$ は零集合である.
- (4) M を含む開集合の列 (G_k) が存在して, $\bigcap_{k \in \mathbb{N}} G_k \setminus M$ は零集合である.

一般に, このような位相の言葉による特徴づけが成り立つことを**測度の正則性**という.

[証明].

(1) \Rightarrow (2) (1) \Rightarrow (3), (1) \Rightarrow (4) より従う.

(2) \Rightarrow (1) Lebesgue 可測集合全体は, Borel 可測集合 $\mathcal{G}(\mathbb{R}^d)$ を完備化したものであるから, 完備化の定理 2.5.8 にある条件: 差集合が零集合である Borel 可測集合で上下から評価すれば良い. 任意の $n \in \mathbb{N}_+$ に対して, $F_n \subset A \subset G_n$ かつ $m(G_n \setminus F_n) < \frac{1}{n}$

を満たす閉集合 F_n と開集合 G_n の列が取れる. それぞれは Lebesgue 可測だから, $\cup_{n=1}^{\infty} F_n, \cap_{n=1}^{\infty} G_n \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ で, $\cup_{n=1}^{\infty} F_n \subset A \subset \cap_{n=1}^{\infty} G_n$ を満たす. また, $m(\cap_{n=1}^{\infty} G_n \setminus \cup_{n=1}^{\infty} F_n) = m(\cap_{n=1}^{\infty} (G_n \setminus F_n)) = 0$.

(1)⇒(3) 任意に $\epsilon > 0$ を取る. A が有界であるかどうかで場合分けをする.

- (a) A が有界ならば, Lebesgue 外測度の開集合による特徴付け 2.8.6 より, $m(G) < m(A) + \epsilon$ を満たす開集合 $A \subset G$ が存在するから, $m(A) < \infty$ のとき, この G に対して $m(G \setminus A) = m(G) - m(A) < \epsilon$ を満たす.
- (b) A が有界でない場合は, σ -有限性と同様の処理をする. $A_n := A \cap B(0, n)$ ($n = 1, 2, \dots$) と定めると, $A_n \in \mathcal{L}_d$ であり, A_n は有界であるから, (a) より $m(G_n \setminus A_n) < \frac{\epsilon}{2^n}$ を満たす開集合 $A_n \subset G_n$ が存在する. これに対して $G := \cup_{n=1}^{\infty} G_n$ とおけば, $A \subset \cup_{n=1}^{\infty} A_n \subset G$ を満たし,

$$\begin{aligned} m(G \setminus A) &\leq m(\cup_{n=1}^{\infty} (G_n \setminus A_n)) \\ &\leq \sum_{n=1}^{\infty} m(G_n \setminus A_n) < \epsilon \end{aligned}$$

が成り立つ.

(1)⇒(4) 任意に $\epsilon > 0$ を取る. A が有界であるかどうかで場合分けをする.

- (a) A が有界のとき, $\exists_{n \in \mathbb{N}} A \subset B(0, n)$ である. このとき, $B := \overline{B(0, n)} \setminus A$ は閉集合だから可測. よって (1) より, ϵ に対して開集合 $B \subset G$ が存在して, $m(G \setminus B) < \epsilon$ を満たす. これに対して, $F := \overline{B(0, n)} \setminus G$ と定めると, これは有界閉集合で, $B \subset G$ より

$$F = \overline{B(0, n)} \setminus G \subset \overline{B(0, n)} \setminus B = A$$

を満たす. さらに, $A = \overline{B(0, n)} \setminus B, F = \overline{B(0, n)} \setminus G$ より,

$$\begin{aligned} m(A \setminus F) &= m(A) - m(F) \\ &\leq m(\overline{B(0, n)}) - m(B) - m(\overline{B(0, n)}) + m(G) \\ &= m(G) - m(B) = m(G \setminus B) < \epsilon. \end{aligned}$$

- (b) A が有界でないならば, 列 $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を $A_n := \begin{cases} A \cap B(0, 1), & n = 1, \\ A \cap (B(0, n) \setminus B(0, n-1)), & n \geq 2. \end{cases}$ と定める. このとき, 各 A_n は有

界だから (a) より, 有界閉集合 $F_n \subset A_n$ が存在して, $m(A_n \setminus F_n) < \frac{\epsilon}{2^n}$ を満たす. よって, $F := \cup_{n=1}^{\infty} F_n$ とおくと, 補題 2.8.10 よりこれは閉集合で, $F \subset \cup_{n=1}^{\infty} A_n = A$ を満たし,

$$\begin{aligned} m(A \setminus F) &\leq m(\cup_{n=1}^{\infty} (A_n \setminus F_n)) \\ &\leq \sum_{n=1}^{\infty} m(A_n \setminus F_n) < \epsilon. \end{aligned}$$

- (c) $m(A) < \infty$ と仮定して, この F が有界に取れることを示す. 集合列 $(A \cap B(0, n))_{n \in \mathbb{N}}$ は A に収束する単調増大列だから, $\lim_{n \rightarrow \infty} m(A \cap B(0, n)) = m(A) < \infty$ (単調減少列の極限 2.4.6(5), ここで仮定 $m(A) < \infty$ を使った). よって, $\exists_{n \in \mathbb{N}} m(A \cap B(0, n)) < \frac{\epsilon}{2}$. このとき, $A \cap B(0, n)$ は有界だから, (a) より, $F \subset A \cap B(0, n)$ かつ $m(A \cap B(0, n) \setminus F) < \frac{\epsilon}{2}$ を満たす有界閉集合 F が取れる. この F が条件を満たす.

■

要諦 2.8.9. A が有界でない場合は, σ -有限性と同一処理をする. しかし閉集合の議論においては, それだけでなく, 補題 2.8.10 が使えるように, 各 A_n が $B(0, n)$ の外側に逃げていくように取る. これはより強い有限性条件で, $\cup_{n=1}^{\infty} F_n$ が再び閉になることを示すことができる. また, $m(A) < \infty$ の場合は全く別のルートがある.

補題 2.8.10 (位相空間論の補足). 閉集合の族 $(F_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が, $\forall_{n \in \mathbb{N}} F_n \subset B(0, n)^c$ を満たすならば, $\cup_{n=1}^{\infty} F_n$ は閉集合である.

[証明]. $\bar{F} \subset F$ を示せば良い. 任意に $x \in \bar{F}$ を取ると, $\forall_{\epsilon > 0} U(x, \epsilon) \cap F \neq \emptyset$ を満たす. $U(x, \epsilon)$ は有界より, $\exists_{m \in \mathbb{N}} U(x, \epsilon) \subset B(0, m)$ だから, $U(x, \epsilon) \cap B(0, m)^c = \emptyset$. したがって, $\forall_{\epsilon > 0} U(x, \epsilon) \cap (\cup_{n=1}^{m-1} F_n) \neq \emptyset$ が必要. これは $x \in \overline{\cup_{n=1}^{m-1} F_n}$ を意味するが, $\overline{\cup_{n=1}^{m-1} F_n} = \cup_{n=1}^{m-1} F_n$. 特に, $x \in F$.

■

要諦 2.8.11 (σ -有限性というクラスへの注目). これが σ -有限性に似た現象に通底する消息となる. この構成によって, 開集合と閉集合に拘らず, $m(A) < \infty$ の場合を考察の対象に限れば十分である. Lusin の定理 2.9.3 や Radon-Nykodym の定理 5.2.12 など.

2.8.3 定義と一般化

以上の議論では、Lebesgue 可測集合を Lebesgue 外測度に関する Caratheodory 可測集合として定義したが、この全体は「開集合で任意精度で近似できる集合」として特徴づけられることがわかった。よって $\sigma(\mathcal{R}_d) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d) \subset \mathcal{M}^*(\mathbb{R}^d)$ であることから、Lebesgue 測度空間 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), m_d)$ が一意に定義できた。実は、 $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d) \subsetneq \mathcal{M}^*(\mathbb{R}^d)$ である。このような構成が一般化できる特徴を正則性と呼び、このときの測度を Radon 測度という。

定義 2.8.12 (Lebesgue measure).

- (1) 有限加法的測度空間 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{R}_d, m_d)$ で、 $m_d : \mathcal{R}_d \rightarrow [0, \infty]$ は σ -加法的だから、延長 $m : \sigma(\mathcal{R}_d) \rightarrow [0, \infty]$ が存在し、また σ -有限性より、この延長は一意的である (Hopf の拡張定理 2.7.1)。こうして有限加法的測度空間 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{R}_d, m_d)$ から、一意に測度空間 $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), m_d)$ を得る (系 1.6.9)。
- (2) 測度空間 $(\mathbb{R}^d, \sigma(\mathcal{R}_d), m)$ の完備化も一意的で、Lebesgue 外測度 $m^* : P(\mathbb{R}^d) \rightarrow [0, \infty]$ と Lebesgue 可測集合 \mathcal{M}^d について、 $(\mathbb{R}^d, \overline{\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)}, \overline{m}) = (\mathbb{R}^d, \mathcal{M}^d, m^*)$ が成り立つ (拡張と完備化との関係 2.7.8).^{†22}
- (3) $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d) \subsetneq \mathcal{M}(\mathbb{R}^d) = \overline{\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)}$ が成り立つ 1.6.9。実際、任意の $B \subset \mathbb{R}^d$ に対して、 $A \in (\mathcal{R}_d)_{\sigma\delta} \subset \sigma(\mathcal{R}_d) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ であって、 $B \subset A$ かつ $m^*(B) = m(A)$ を満たすものが存在する。したがって、Lebesgue 可測集合とは、Borel 可測集合との対称差が零集合であるような集合である。

定理 2.8.13 .

- (1) $\mathcal{B}(\mathbb{R}) \subsetneq \mathcal{M}(\mathbb{R})$ である。
- (2) 任意の $M \in \mathcal{M}(\mathbb{R}^n)$ に対して、 $B_1, B_2 \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$ が存在して、 $B_1 \subset M \subset B_2$ かつ $m(M \setminus B_1) = m(B_2 \setminus M) = 0$ を満たす。

系 2.8.14 .

- (1) 可測関数の合成は可測とは限らない。
- (2) $\mathcal{M}(\mathbb{R}^d) = \{B \cup Z \in P(\mathbb{R}^d) \mid B \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), Z \in \mathcal{N}(\mathbb{R}^d)\}$ 。

定義 2.8.15 (regular measure, Borel measure, Radon measure).

- (1) 一般の位相空間 (X, \mathcal{O}) とその上の測度空間 $(X, \sigma(\mathcal{O}), \mu)$ について、測度 μ が**正則**であるとは、

$$A \in \sigma(\mathcal{O}) \Rightarrow \forall \epsilon > 0 \exists F: \text{closed}, G: \text{open} \quad F \subset A \subset G \wedge \mu(G \setminus F) < \epsilon$$

が成り立つことをいう。^{†23}

- (2) このような、位相が生成する σ -代数 $\sigma(\mathcal{O})$ 上の測度を一般に **Borel 測度**という。
- (3) \mathbb{R}^d 上の Borel 測度であって、コンパクト集合上では有限値を取るものを **Radon 測度**という。

例 2.8.16.

- (1) Lebesgue 測度は正則測度である。Lebesgue 可測性の特徴付け??の (1) \Rightarrow (2) を正則性定理 (regularity theorem) という。
- (2) 任意の距離空間上の任意の Borel 確率測度は正則である。
- (3) Lebesgue 測度は、コンパクト集合上では有限値を取る Borel 測度だから、Radon 正則測度の例である。

定義 2.8.17 (Borel meaasure, inner regular, Radon measure, outer regular, essential measure).

- (1) Borel 測度とは、Borel σ -代数 \mathcal{B} を含む σ -代数上に定まる測度をいう。
- (2) Borel 測度が $\mu(A) = \sup \left\{ \mu(K) \in [0, \infty] \mid K \overset{\text{cpt}}{\subset} A \right\}$ を満たすとき、**内部正則**または**緊密**であるという。
- (3) 内部正則な Borel 測度で、**局所有限性** $\forall_{K \overset{\text{cpt}}{\subset} X} \mu(K) < \infty$ を満たすものを、**Radon 測度**という??。
- (4) Borel 測度が**外部正則**であるとは、 $\forall_{A \in \mathcal{B}} \mu(A) = \inf \left\{ \mu(B) \in [0, \infty] \mid A \subset B \overset{\text{open}}{\subset} X \right\}$ を満たすことをいう。

^{†22} 特に、Lebesgue 可測集合と $\sigma(\mathcal{R}_d) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ の元との差は零集合になる。

^{†23} 「全ての可測集合は近似的に開かつ近似的に閉」と言える測度空間のことを正則という。

- (5) Borel 測度 m が M に付随する本質的測度であるとは、 M によって近似された測度が m であるという関係が成り立つことをいう：

$$m(B) = \sup \{M(B') \in [0, \infty] \mid B' \subset B, B' \in \mathcal{B}(X), M(B') < \infty\}.$$

例 2.8.18. \mathbb{R}^n 上の Lebesgue 測度は、Radon 測度 (=内部正則かつ局所有限) である。実際、外部正則でもあるが、これは余計である。

定理 2.8.19 (Radon 測度の特徴付け). Borel 測度 $\mu: \mathcal{B} \rightarrow \mathbb{F}$ について、次の2条件は同値。

- (1) μ は Radon 測度である。
- (2) μ は、 X の任意の開集合上において、内部正則かつ局所有限である上に、外部正則でもある。
- (3) μ は、次を満たす2つの Borel 測度 m, M が \mathcal{M}^1 の元上にとる同一の値を取る： m は M に付随する本質的測度であり、 M は局所有限かつ \mathcal{B} 上外部正則かつ内部正則で、 B が開集合または体積確定 $B \in \mathcal{M}^1$ ならば $m(B) = M(B)$ である。

位空間 X が局所コンパクトハウスドルフ空間であるとき、次も同値。

- (4) μ は $C_c(X, \mathbb{R})$ 上の正な線型汎関数である。

注 2.8.20. (3) の方法が、Lebesgue が \mathbb{R}^n について行った議論の直接の抽象化になっている。

2.8.4 Lebesgue 測度の性質

Haar 測度としての性質を備える。

補題 2.8.21 (Lebesgue 測度の線形性). 任意の Lebesgue 可測集合 $A \in \mathcal{M}(\mathbb{R}^d)$ と $a \in \mathbb{R}^d, p \in \mathbb{R}_+$ について、

- (1) $m_d(A + a) = m_d(A)$.
- (2) $m_d(pM) = p \cdot m_d(M)$.

ただし、 $A + a$ とは Abel 群 \mathbb{R}^d の部分群 $A + a = \{a' + a \in \mathbb{R}^d \mid a' \in A\}$ とした。

[証明].

- (1) $A + a \in \mathcal{L}_d$ は Lebesgue 可測性の特徴付け??からわかる。 \mathbb{R}^d の位相の様子はこの点でも等質である。
- (2) $m(A + a) = m(A)$ は、矩形 $I \in \mathcal{I}_d$ について $m(I + a) = m(I)$ であることと Lebesgue 外測度の定義 2.6.2 からわかる。

■

定理 2.8.22 . 任意の零でない可測集合 $M \in \mathcal{M}(\mathbb{R}^1), m_1(M) > 0$ について、

$$M^* := MM^{-1} = \{x - y \in \mathbb{R} \mid x \in M, y \in M\}$$

なる集合は $(-\alpha, \alpha)$ なる形の空でない开区間を含む。

2.9 Lebesgue 可測関数

Borel 測度の完備化である Lebesgue 測度という具体的対象に対して、これまで議論してきた測度論の結果を特殊化してまとめ直す。

2.9.1 例

命題 2.9.1 (Lebesgue 可測関数と位相).

- (1) Lebesgue 可測集合 $E \in \overline{\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)}$ 上の連続関数は、Lebesgue 可測である。

(2) \mathbb{R} 上の右連続な関数は Borel 可測, したがって Lebesgue 可測である.

[証明].

(1) $E \in \overline{\mathcal{G}(\mathbb{R}^d)}$ 上の連続関数 $f: E \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ について, 逆像 $f^{-1}((-\infty, \alpha))$ は E の開集合で, $E \subset \mathbb{R}^d$ には \mathbb{R}^d の相対位相を考えるから, $\forall \alpha \in \mathbb{R} \exists G_\alpha \in \mathcal{O}_p(\mathbb{R}^d) E(f < \alpha) = E \cap G_\alpha$ が成り立つ. $E \cap G_\alpha \in \overline{\mathcal{G}(\mathbb{R}^d)}$ と併せると, f は Lebesgue 可測である.

(2)

■

2.9.2 Borel 可測関数による近似

Lebesgue 可測集合 A 上の連続関数は可測である (任意の逆像が A と開集合の共通部分で表せるため 2.9.1) が, 逆に Lebesgue 可測関数は, ほとんど至る所連続である.

定理 2.9.2. Borel 集合 $E \in \mathcal{G}(\mathbb{R}^d)$ 上の Lebesgue 可測関数 $f: E \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ について, E 上殆ど至る所一致する Borel 可測関数 $g, h: E \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ で, $\forall x \in E |g(x)| \leq |f(x)| \leq |h(x)|$ を満たすものが存在する.

[証明]. Lebesgue 測度は Borel 測度の完備化であるから, 完備化された測度空間上の関数の可測性の特徴付け 2.5.9 より従う. ■

定理 2.9.3 (Lusin (1912)). 体積確定な Lebesgue 可測集合 $A \in \mathcal{M}^1(\mathbb{R}^d)$ 上の実関数 $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ について, 次の2条件は同値.

- (1) f は Lebesgue 可測である.
- (2) 任意の $\epsilon > 0$ に対して, $m(A \setminus F) < \epsilon$ を満たすような閉集合 $F \subset A$ が存在し, $f|_F$ は連続である.

(1) \Rightarrow (2) を Lusin の定理という.

[証明]. $f \geq 0$ の場合について証明すれば, 一般の関数は $f = f^+ - |f^-|$ と捉えられ, 連続関数の和は連続であるから従う. $m(A)$ が有限かどうかで場合分けをする.

(1) $m(A) < \infty$ のときを考える.

f が非負値単関数の場合 $f = \sum_{j=1}^N a_j \chi_{E_j}$ ($a_j \in [0, \infty)$, $\sum_{j=1}^N E_j = E$) とおく. 任意に $\epsilon > 0$ を取る. 各 E_j に対して, 閉集合 $F_j \subset E_j$ であって, $m(E_j \setminus F_j) < \frac{\epsilon}{N}$ を満たすものが取れる (補題 2.8.2). これに対して $F := \cup_{j=1}^N F_j$ とすればこれは閉集合であり, f は各 F_j 上定数であるから連続^{†24}, したがって F 上連続で,

$$\begin{aligned} m(A \setminus F) &\leq m\left(\cup_{j=1}^N (E_j \setminus F_j)\right) \\ &\leq \sum_{j=1}^N m(E_j \setminus F_j) \stackrel{\dagger 25}{<} \epsilon. \end{aligned}$$

一般の非負値可測関数の場合 非負値単関数の列 $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ であって, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ を満たすものが存在する 2.3.15.

- (a) 上の議論より, 各単関数 f_n について, 閉集合 $F_n \subset A$ であって, $m(A \setminus F_n) < \frac{\epsilon}{2^n}$ を満たし, f_n が各 F_n 上連続になるものが取れるから, これに対して $F_0 := \cap_{n=1}^{\infty} F_n$ と定めれば, 任意の $n \in \mathbb{N}$ について f_n は F_0 上連続で, 劣加法性より

$$m(A \setminus F_0) \leq m\left(\cup_{n=1}^{\infty} A \setminus F_n\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} m(A \setminus F_n) < \epsilon$$

が成り立つ. あとは, 各点収束先極限である f も連続であるように F_0 を持っていけば良い.

- (b) 仮定 $m(A) < \infty$ より $m(F_0) \leq m(A) < \infty$ で, (f_n) は F_0 上 f に各点収束するから, Egoroff の定理 2.5.4 より, ある集合 $F \subset F_0$ が存在して, (f_n) は F 上 f に一様収束し, $m(F_0 \setminus F) < \epsilon$ を満たす. 特に Lebesgue 測度の位相的正則性^{??}より, F は閉集合に取れる. よって, f は閉集合 F 上で連続であり,

$$m(A \setminus F) \leq m(A \setminus F_0) + m(F_0 \setminus F) < 2\epsilon$$

^{†24} F_j 上連続という定義は, $U(x, \epsilon) \cap F_j$ を考えるから, F_j の境界点に $\mathbb{R}^d \setminus F_j$ から近づく場合などは考えない.

が従う。

- (2) $m(A) = \infty$ のとき, $A_n := E \cap (B(0, n) \setminus B(0, n-1))$ ($n = 1, 2, \dots$) と定めると, $\forall n \in \mathbb{N} \ m(A_n) < \infty$ で, 各 $n \in \mathbb{N}$ について, 閉集合 F_n であって $m(E_n \setminus F_n) < \frac{\epsilon}{2^n}$ かつ f は各 F_n 上で連続になるものが存在する. すると $F := \bigcup_{n=1}^{\infty} F_n$ は閉集合で (補題 2.8.10), f は F 上連続であり, $\mu(E \setminus F) < \epsilon$ を満たす.

■

要諦 2.9.4 (測度論の議論の仕方の特徴がよく出ている). 非負値単関数は有限性 $|\operatorname{Im} f| < \infty$ があるので問題ないが, 一般の可測関数は単関数の列の極限として定義できるからこの列の附番について $\frac{\epsilon}{2^n}$ を考え, そもそも証明の全体的な構造として, 列 $A_n := E \cap (B(0, n) \setminus B(0, n-1))$ ($n = 1, 2, \dots$) を考えれば全体 A に至るので $m(A) < \infty$ と仮定して良いことになる.

2.9.3 標準的構成

命題 2.9.5 (Lebesgue 可測関数の平行移動).

- (1) $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ を Borel 可測関数とする. $f(x+y), f(x-y): \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ も Borel 可測である.
 (2) $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ を Lebesgue 可測関数とする. $f(x+y), f(x-y): \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ も Lebesgue 可測である.

[証明].

- (1)
 (2) **方針** $f \geq 0$ の場合に証明すれば, 可測関数の和は可測である 2.3.9 ことより $f = f^+ - f^-$ も Lebesgue 可測だとわかる. このとき, Lebesgue 測度は Borel 測度の完備化だから, $(0 \leq) g(x) \leq f(x) \leq h(x)$ かつ $g(x) = f(x) = h(x)$ a.e. を満たす Borel 可測関数 $g, h: E \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ が存在する 2.9.2.

変数を増やす よって (1) より, 変数を増やした関数についても \mathbb{R}^{2d} 上で $g(x+y) \leq f(x+y) \leq h(x+y)$ が成り立ち, g, h はいずれも Borel 可測. また, Fubini の定理 3.3.1 より一変数ずつ考えると, Lebesgue 積分は平行移動について不変 3.4.1 であるから,

$$\begin{aligned} \iint_{\mathbb{R}^{2d}} |h(x+y) - g(x+y)| dx dy &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}^d} |h(x+y) - g(x+y)| dx \right) dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}^d} |h(x) - g(x)| dx \right) dy = 0 \end{aligned}$$

が従う. よって, $h(x+y) = f(x+y) = g(x+y)$ a.e. $(x, y) \in \mathbb{R}^{2d}$ を得るから, 完備空間上の関数の可測性の特徴付け 2.5.9 より, $f(x+y): \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ も Lebesgue 可測である.

■

要諦 2.9.6. (1) から (2) を導くには Fubini の定理 2.10.10 が必要であるのが面白い.

定理 2.9.7 (直積の普遍性の破れ). (X, \mathcal{B}_X) を任意の可測空間とし, $Z := X \times \mathbb{R}^d$ において直積 σ -加法族 $\mathcal{B}_Z := \mathcal{B}_X \times \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ を考える. 関数 $f: Z \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ が次を満たすとき, \mathcal{B}_Z -可測である.

- (1) $f(-, y): X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ は \mathcal{B}_X -可測.
 (2) $f(x, -): \mathbb{R}^d \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ は連続.

2.10 直積測度

直積測度を積分形で捉える

直積測度の構成は、 σ -有限性の過程の下では極めて自然なものが一意的に存在する。 σ -有限性がないと存在はするが一意性は崩れる。

証明においては、各 $x \in X$ についての切り口という妙義 (x, y の pr_1, pr_2 についてのファイバーの Y, X での像) を用いて、底空間 $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ という足場を上手に使うことが肝要になる。すると、

$$\mu_Z(E) = \int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y$$

と表現できる ($x \in X$ で切っても $y \in Y$ で切っても当然同じになるべき) から、積分論の結果 (収束定理) が流用できる。

2.10.1 直積 σ -代数の定義と特徴付け

定義 2.10.1 (rectable, 直積 σ -加法族). 2つの測度空間 $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ に対して、直積空間 $Z := X \times Y$ を考える。

- (1) $K = E \times F$ ($E \in \mathcal{B}_X, F \in \mathcal{B}_Y$) の形で表される集合を可測な矩形集合または可測長方形という。矩形集合全体からなる集合を

$$\mathcal{G} := \{A \times B \subset Z \mid A \in \mathcal{B}_X, B \in \mathcal{B}_Y\}$$

で表す。

- (2) 可測長方形の全体 \mathcal{G} の生成する σ -代数 $\sigma(\mathcal{G})$ を \mathcal{B}_Z または $\mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$ と表し、直積 σ -集合体という。^{†26}

補題 2.10.2 (直積 σ -代数の単調族としての特徴付け elementary set). 可測長方形全体の集合 \mathcal{G} の生成する集合代数 $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ は、互いに素な長方形の有限直和 (このような集合を基本集合ともいう [3])

$$\left\{ \sum_{i=1}^n C_i \subset Z \mid C_i \in \mathcal{G}, n \in \mathbb{N} \right\} = \mathcal{A}(\mathcal{G})$$

に等しい。従って、 $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ が生成する単調族が $\mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$ に他ならない： $\mathcal{M}(\mathcal{A}(\mathcal{G})) = \sigma(\mathcal{G})$ 。

[証明].

- (1) 方針 (i) $E, F \in \mathcal{G} \Rightarrow E \cap F \in \mathcal{G}$.
(ii) $E \in \mathcal{G} \Rightarrow E^c (= Z \setminus E) \in \mathcal{G}$.

の2つを証明すれば、任意の $A := \sum_{i=1}^n C_i \in \mathcal{A}(\mathcal{G})$ について、 $A^c = \cap_{i=1}^n C_i^c$ より (i), (ii) から $A^c \in \mathcal{G}$, $A, B \in \mathcal{A}(\mathcal{G})$ ならば

$A \cup B = A + (B \cap A^c) \in \mathcal{A}(\mathcal{G})$ が (i), (ii) より従い、 $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ は \mathcal{G} を含んだ最小の集合体であることが分かる。

証明 (i) $E, F \in \mathcal{G}$ より、 $A, C \in \mathcal{B}_X, B, D \in \mathcal{B}_Y$ が存在して、 $E = A \times B, F = C \times D$ と表せるから、 $E \cap F = (A \times B) \cap (C \times D) = (A \cap C) \times (B \cap D) \in \mathcal{G}$.

- (ii) $E \in \mathcal{G}$ より、 $A \in \mathcal{B}_X, B \in \mathcal{B}_Y$ が存在して、 $E = A \times B$ と表せる。 $(x, y) \in E^c \Leftrightarrow x \notin A \vee y \notin B$ なので、

$$\begin{aligned} E^c &= (A \times B)^c \\ &= (A^c \times Y) \cup (X \times B^c) \\ &= (A^c \times (B \cup B^c)) \cup ((A \cup A^c) \times B^c) \\ &= (A^c \times B) \sqcup (A^c \times B^c) \sqcup (A \times B^c) \in \mathcal{G}. \end{aligned}$$

- (2) 方針

$$\mathcal{D} := \{E \in \mathcal{B}_Z \mid \forall x \in X, y \in Y \ E_x \in \mathcal{B}_Y, E_y \in \mathcal{B}_X\}$$

と定めて、 $\mathcal{D} = \mathcal{B}_Z = \sigma(\mathcal{G})$ を導く。 \mathcal{D} が \mathcal{G} を含む σ -集合体であることが示せれば、 $\mathcal{B}_Z = \sigma(\mathcal{G}) \subset \mathcal{D} \subset \mathcal{B}_Z$ より、 $\mathcal{D} = \mathcal{B}_Z$ が従う。

^{†26} 逆像 σ -集合代数 (pullback σ -algebra) の合併 $\text{pr}_1^*(\mathcal{B}_X) \cup \text{pr}_2^*(\mathcal{B}_Y)$ が生成する σ -集合代数と考えると良い。

$\mathcal{G} \subset \mathcal{D}$ 任意の $A \times B \in \mathcal{G}$ に対して,

$$(A \times B)_x = \begin{cases} B, & x \in A, \\ \emptyset, & x \notin A, \end{cases} \quad (A \times B)_y = \begin{cases} A, & y \in B, \\ \emptyset, & y \notin B, \end{cases}$$

であるから, $\emptyset \in \mathcal{B}_X, \mathcal{B}_Y, B \in \mathcal{B}_Y, A \in \mathcal{B}_X$ より, $A \times B \in \mathcal{D}$.

\mathcal{D} は σ -集合体である

- (i) 任意に $E \in \mathcal{D}$ を取る. $(X \times Y \setminus E)_x = Y \setminus E_x \in \mathcal{B}_Y$ ($\because E \in \mathcal{D}$ より $E_x \in \mathcal{B}_Y$) かつ $(X \times Y \setminus E)_y = X \setminus E_y \in \mathcal{B}_X$ より, $E^c \in \mathcal{D}$.
- (ii) 任意の互いに素な列 $\{E_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{D}$ について, $\mathcal{B}_X, \mathcal{B}_Y$ が σ -集合体であることより,

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n \right)_x = \sum_{n=1}^{\infty} (E_n)_x \in \mathcal{B}_Y, \quad \left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n \right)_y = \sum_{n=1}^{\infty} (E_n)_y \in \mathcal{B}_X,$$

が成り立つから, $\sum_{n=1}^{\infty} E_n \in \mathcal{D}$.

■

補題 2.10.3 (section of set / function). 部分集合 $E \subset X \times Y$ と, 関数 $f: X \times Y \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ について,

- (1) $E \in \mathcal{B}_Z$ ならば, その x -切断も可測: $\forall x \in X \ E_x := \{y \in Y \mid (x, y) \in E\} = \text{pr}_2(\text{pr}_1^{-1}(x)) \in \mathcal{B}_Y$.
- (2) $E \in \mathcal{B}_Z$ ならば, その y -切断も可測: $\forall y \in Y \ E^y := \{x \in X \mid (x, y) \in E\} = \text{pr}_1(\text{pr}_2^{-1}(y)) \in \mathcal{B}_X$.
- (3) したがって, 各変数を止めた関数 $f_x := f(x, -): Y \rightarrow \overline{\mathbb{R}}, f^y := f(-, y): X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ はいずれも可測関数である.

系 2.10.4. 長方形 $E \times F \subset X \times Y$ について, 次の2条件は同値:

- (1) $E \times F$ は $\mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$ -可測でない: $E \times F \notin \mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$.
- (2) $E \notin \mathcal{B}_X$ かつ $F \neq \emptyset$ であるか, または, $F \notin \mathcal{B}_Y$ かつ $E \neq \emptyset$ である.

2.10.2 直積測度の定義

直積測度は, 測度のテンソル積 (の延長) として **well-defined** に定義出来るが, 一意性は σ -有限な場合にしか保証されない.

定義 2.10.5 (product measure). 補題 2.10.2 より, 有限加法族 $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ の任意の元は長方形の有限直和 $\sum_{k=1}^N A_k \times B_k$ ($A_k \in \mathcal{B}_X, B_k \in \mathcal{B}_Y$) の形で表せるから, $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ 上の関数 $\mu_Z: \mathcal{A}(\mathcal{G}) \rightarrow [0, \infty]$ を

$$\mu_Z(E) := \sum_{k=1}^N \mu_X(A_k) \mu_Y(B_k) \quad (E = \cup_{k=1}^N A_k \times B_k \in \mathcal{A}(\mathcal{G}))$$

で定めると, $\mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$ 上に延長が存在し, X, Y がいずれも σ -有限であるときにこの延長は一意である.

補題 2.10.6 (well-defined 性). 対応 $\mu_Z: \mathcal{A}(\mathcal{G}) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ について,

- (1) μ_Z の値は直和の取り方に依らず一意的に定まり, 有限加法的測度を定める.
- (2) (特性関数に関する Fubini の定理) 任意の $E \in \mathcal{A}(\mathcal{G})$ について, これが定める各切片の測度 $\mu_Y(E_-): X \rightarrow [0, \infty]; x \mapsto \mu_Y(E_x)$ は \mathcal{B}_X -可測関数, $\mu_X(E_-): Y \rightarrow [0, \infty]; y \mapsto \mu_X(E_y)$ は \mathcal{B}_Y -可測関数で,

$$\mu_Z(E) = \int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y.$$

[証明].

- (1) (2) の表現より, 積分 $\int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \sum_{k=1}^N \mu_Y(B_k) \mu_X(A_k), \int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y$ は E の直和分割の取り方に依らないことから well-definedness は従う. 有限加法性は (3) に含意される.

(2) 任意の $E \in \mathcal{A}(\mathcal{G})$ について, $A_k \in \mathcal{B}_X, B_k \in \mathcal{B}_Y$ が存在して $E = \sum_{k=1}^N A_k \times B_k$ と表せる. このとき, 任意の $x \in X$ について,

$$E_x = \sum_{k=1}^N (A_k \times B_k)_x = \bigcup_{k \in [N], x \in A_k} B_k$$

が成り立つから, $\mu_Y(E_x) = \sum_{k=1}^N \mu_Y(B_k) \chi_{A_k}(x)$ と表せる (E_x の μ_Z -測度は, $x \in A_k$ を満たす度に $\mu_Y(B_k)$ であり, $x \notin A_k$ が起こらないなら 0 である). この x についての関数は明らかに可測である.

これを積分すると,

$$\int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \sum_{k=1}^N \mu_Y(B_k) \mu_X(A_k) = \sum_{k=1}^N \mu_Y(B_k) \mu_X(A_k)$$

を得る. $\int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y = \sum_{k=1}^N \mu_X(A_k) \mu_Y(B_k)$ も同様にして従う.

(3) 有限加法的測度についての σ -加法性の特徴付け 2.4.4 より, $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ の E に収束する任意の単調増大列 (E_n) について, $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_Z(E_n) = \mu(E)$ を示せば良い.

切り口も空間 X において単調増大列 $(E_n)_x \nearrow E_x$ を定めるから, 測度 μ_Y の性質 2.4.6(4) より, $\mu_Y((E_n)_x) \nearrow \mu_Y(E_x)$. ここで, $(\mu_Y((E_n)_x))_{n \in \mathbb{N}}$ は非負値な \mathcal{B}_X -可測関数の単調増加列であるから, 単調収束定理 3.2.1 と (2) より,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu_Z(E_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \mu_Y((E_n)_x) d\mu_X = \int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \mu_Z(E).$$

(4)

$$X = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n, A_n \in \mathcal{B}_X, \mu_X(A_n) < \infty,$$

$$Y = \bigcup_{n=1}^{\infty} B_n, B_n \in \mathcal{B}_Y, \mu_Y(B_n) < \infty,$$

を満たす単調増加列 $(A_n), (B_n)$ を取る. これに対して, $E_n := A_n \times B_n$ とおけば,

$$Z = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n \quad \mu_Z(E_n) = \mu_X(A_n) \mu_Y(B_n) < \infty$$

を満たす.

■

要諦 2.10.7. こうして, 対応 $\mu_Z : \mathcal{A}(\mathcal{G}) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ はたしかに定まり, これによって $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ の元の測度も well-defined に確定する. この仕組みが $\mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$ 上にも通用することを示すには, μ_Z の $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ 上での σ -加法性を示せば良い.

補題 2.10.8 (直積測度の存在と一意性). 対応 $\mu_Z : \mathcal{A}(\mathcal{G}) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ について,

- (1) μ_Z は $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ 上 σ -加法的でもある. 従って, Hopf-Kolmogorov の定理より, 測度 $\mu_Z : \mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ が存在する.
- (2) $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ が σ -有限ならば, $(Z, \mathcal{A}(\mathcal{G}), \mu_Z)$ も σ -有限である. したがって, 直積測度は一意に定まる

注 2.10.9. 完備測度空間の直積は完備とは限らない.

こうして実は, 次の定理が示せたことになる.

定理 2.10.10 (Fubini I : 単関数). $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ を σ -有限な測度空間とする. このとき, 任意の $E \in \mathcal{B}_X \times \mathcal{B}_Y$ に対して,

- (1) $\mu_Y(E_x) : X \rightarrow [0, \infty]; x \mapsto \mu_Y(E_x)$ は \mathcal{B}_X -可測関数である.
- (2) $\mu_X(E_y) : Y \rightarrow [0, \infty]; y \mapsto \mu_X(E_y)$ は \mathcal{B}_Y -可測関数である.
- (3) μ_X, μ_Y の直積測度 μ_Z に対して, 次が成り立つ:

$$\mu_Z(E) = \int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y.$$

したがって特に, $\mu(E) < \infty$ ならば $\mu_Y(E_X) < \infty$ μ_X -a.e. x , かつ μ_Y -a.e. y に対して $\mu_X(E_y) < \infty$ である.^{†27} また双対的に, $\mu(E) > 0$ ならば, 零でない $E_X \in \mathcal{G}_X$ が存在して $\mu_Y(E_X) > 0$ ($\forall x \in E_X$), かつ, 零でない $E_Y \in \mathcal{G}_Y$ が存在して $\mu_X(E_Y) > 0$ ($\forall y \in E_Y$) が成り立つ.

[証明].

方針 σ -有限性より, 列

$$\{A_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G}_X, A_k \nearrow X \quad \forall_{k \in \mathbb{N}} \mu_X(A_k) < \infty, \quad \{B_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G}_Y, B_k \nearrow Y \quad \forall_{k \in \mathbb{N}} \mu_Y(B_k) < \infty,$$

が取れる. ここで, $F_k := A_k \times B_k$ とおき, 任意の $k \in \mathbb{N}$ に対して

$$\mathcal{D}_k := \{E \in \mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y \mid E \cap F_k \text{ が (1), (2), (3) を満たす}\}$$

とおいて, 単調族定理 2.2.6 により $\mathcal{D}_k = \mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y$ を示す. というのも, 補題 2.10.6 より $\mathcal{A}(\mathcal{G})$ の元は (1),(2),(3) をすでに満たすから $\mathcal{A}(\mathcal{G}) \subset \mathcal{D}_k$ であることより, \mathcal{D}_k が単調族であることを示せば,

$$\mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y = \sigma(\mathcal{A}(\mathcal{G})) \stackrel{\text{単調族定理}}{=} \mathcal{M}(\mathcal{A}(\mathcal{G})) \subset \mathcal{M}(\mathcal{D}_k) = \mathcal{D}_k \subset \mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y$$

より, $\mathcal{D}_k = \mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y$ が従う.

すると, $F_k \nearrow Z$ より, 任意の $E \in \mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y$ に対して $\exists_{k \in \mathbb{N}} E \subset F_k$ だから, $E \in \mathcal{G}_X \times \mathcal{G}_Y = \mathcal{D}_k$ は E が (1),(2),(3) を満たすことを含意する.

単調増加列についての閉性 任意の単調増加列 $\{E_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{D}_k, E_n \nearrow E$ について, $E \cap F_k \in \mathcal{D}_k$ を示す. このとき, 任意の $x \in X, y \in Y$ に対して, $n \rightarrow \infty$ のとき

$$(E_n \cap F_k)_x \nearrow (E \cap F_k)_x, \quad (E_n \cap F_k)_y \nearrow (E \cap F_k)_y,$$

より, 測度の性質 2.4.6(4) より, 可測関数の単調増加列 $(\mu_Y((E_n \cap F_k)_x))_{n \in \mathbb{N}}$ も, 任意の $x \in X$ について,

$$\mu_Y((E_n \cap F_k)_x) \nearrow \mu_Y((E \cap F_k)_x), \quad \mu_X((E_n \cap F_k)_y) \nearrow \mu_X((E \cap F_k)_y),$$

を満たす. すると, 可測関数の性質 2.3.11 より $\mu_Y((E \cap F_k)_-) : X \rightarrow [0, \infty]$ も可測で, $\mu_X((E \cap F_k)_-) : Y \rightarrow [0, \infty]$ も可測だから, $E \cap F_k$ も (1),(2) を満たす. また単調収束定理 3.2.1 より,

$$\mu_Z(E \cap F) \stackrel{\text{可測関数の性質 2.3.11}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_Z(E_n \cap F) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \mu_Y((E_n \cap F)_x) d\mu_X \stackrel{\text{単調収束定理}}{=} \int_X \mu_Y((E \cap F)_x) d\mu_X.$$

よって, $E \cap F_k$ は (3) も満たすから, $E \cap F_k \in \mathcal{D}_k$.

単調減少列についての閉性 単調減少列 $\{E_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{D}_k, E_n \searrow E$ についても, $E \cap F_k$ は $\mu_Y(B_k), \mu_X(A_k) < \infty$ より, 測度の性質 2.4.6(5) から, 各 $x \in X$ について $\infty > \mu_Y(B_k) \geq \mu_Y((E_n \cap F_k)_x) \searrow \mu_Y((E \cap F_k)_x)$ ($n \rightarrow \infty$) より, (1),(2) を満たす. また Lebesgue の優収束定理 3.2.7 より, 全く同じ等式が成り立ち, (3) も満たす.

■

2.10.3 完備性伝播の失敗

$(\mathbb{R}, \mathcal{M}, m)$ が完備だからといって, 直積空間 $(\mathbb{R}^2, \mathcal{M} \otimes \mathcal{M}, m \otimes m)$ はそのままでは完備ではなく, Lebesgue 式拡張を考える必要がある.

記法 2.10.11. $(X \times Y, \overline{\mathcal{G}_X \otimes \mathcal{G}_Y}, \overline{\mu_X \otimes \mu_Y})$ を完備化とする.

定理 2.10.12. X, Y を σ -有限な完備測度空間とする. このとき, 任意の $\mu_X \otimes \mu_Y$ -零集合 N の任意の部分集合 $Z \subset N$ について, 次が成り立つ.

- (1) 殆ど至る所の $y \in Y$ に関して, 切片は零集合: $\mu_X(Z^y) = 0$.
- (2) 殆ど至る所の $x \in X$ に関して, 切片は零集合: $\mu_Y(Z_x) = 0$.

^{†27} さらに特別な場合として, $\mu_Z(Z) < \infty$ ならば $\mu_X(X) < \infty, \mu_Y(Y) < \infty$ も含む.

第 3 章

積分論

測度空間の 2-射の理論を構築する.

3.1 積分の定義

任意の非負可測関数に対して, Lebesgue 積分が定義できる: $\mu: \mathcal{L}(X)_+ \rightarrow [0, \infty]$.

3.1.1 可積分性の特徴付け

任意の Radon 測度は積分 $\mu: \mathcal{L}(X)_+ \rightarrow [0, \infty]$ を定める. 可積分関数 $\mathcal{L}^1(X)$ は完備なセミノルム空間をなし, $L^1(X) := \mathcal{L}^1(X)/\mathcal{N}(X)$ は Banach 空間をなす.

記法 3.1.1. $\int_E f(x) d\mu(x)$ または $\int_E f(x) \mu(dx)$ と表す. (x) は省略し得る.

定義 3.1.2 (integrable). 測度空間 (X, \mathcal{B}, μ) について. 積分 $\mathcal{L}(X) \rightarrow [-\infty, \infty]$ を次のように定義する.^{†1}

- (1) f が非負値単関数の場合, 自明な方法で定義する. これはたしかに $[0, \infty]$ に値を定め, また単関数 f の表し方に依らない.
- (2) f が非負値可測関数の場合, f に収束する非負値単関数の単調増加列 (f_n) の積分の極限とする. これはたしかに $[0, \infty]$ に値を定め, また非負値単関数の単調列 (f_n) の取り方に依らない.
- (3) f が可測関数の場合, $f^\pm := \max\{\pm f, 0\}$ について, $\int_X f d\mu := \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu$ と定める.
- (4) この値が定義されるとき, f は**定積分を持つ**といい, 値が実数である時に, f を μ -**可積分**という.

[証明].

- (1) $f = \sum_{k=0}^m b_k \chi_{B_k}$ と表せるとする. すると, X の 2 つの分割 $(A_j), (B_k)$ の共通細分を考えることで,

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_j \mu(A_j) &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^m a_j \mu(A_j \cap B_k) && \text{各 } A_j \text{ を } (A_j \cap B_k)_{k \in m+1} \text{ に細分} \\ &= \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m b_k \mu(A_j \cap B_k) && A_j \cap B_0 = \emptyset \ (j \geq 1), A_0 \cap B_k = \emptyset \ (k \geq 1) \\ &= \sum_{k=1}^m b_k \mu(B_k) \end{aligned}$$

より well-definedness がわかる.

^{†1} $\int_E f(x) d\mu(x)$ とし, $\int_E f(x) \mu(dx)$ と書く.

(2) (g_k) を非負値単関数の増大列で f に収束するとする. すると任意の $k \in \mathbb{N}$ について, これが定める積分の増大列について

$$\int_X f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \geq \int_X g_k d\mu$$

が成り立つから, 補題 3.1.4 の (3) より,

$$\int_X f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \geq \lim_{k \rightarrow \infty} \int_X g_k d\mu$$

が従う. まったく逆の結果も同様に成り立つ. よって, well-definedness がわかる.

■

歴史 3.1.3. Riemann 積分に対する Darboux の理論のように, これは Lebesgue 積分に対する Saks の方法である [9]. Lebesgue 自身は, Riemann に似たやり方を採用していた.

補題 3.1.4 (非負値単関数の紡ぐ論理: 極限への不等式関係の持ち上げ). $f, g: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}$ を非負値単関数とする.

$$(1) \int_X (f + g) d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu.$$

$$(2) \forall x \in X \ f(x) \leq g(x) \Rightarrow \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu.$$

$$(3) \text{非負値単関数の単調増加列}^{t2}(f_n) \text{が, 非負値単関数 } g: X \rightarrow \mathbb{R} \text{ に対して } \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \geq g(x) \text{ を満たすとき, } \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \geq \int_X g d\mu.$$

[証明].

(1) 仮定より, $f + g = \sum_{j,k} (a_j + b_k) \chi_{A_j \cap B_k}$ と表せる. A_j, B_k に測度が有限でないものがあるとき, 関係は $\infty = \infty$ となり成り立つ. 測度が有限のとき,

$$\begin{aligned} \sum_{j,k} (a_j + b_k) \chi_{A_j \cap B_k} &= \sum_j a_j \sum_k \chi_{A_j \cap B_k} + \sum_k b_k \sum_j \chi_{A_j \cap B_k} \\ &= \sum_j a_j \sum_k \chi_{A_j} + \sum_k b_k \sum_j \chi_{B_k}. \end{aligned}$$

(2) $\sum_{j=1}^n a_j \chi_{A_j} \leq \sum_{k=1}^m b_k \chi_{B_k}$ のとき, 細分 $(A_j \cap B_k)_{(j,k) \in n+1 \times m+1}$ 上で考えて, $a_{j,k} = a_j, b_{j,k} = b_k$ と定めると,

$$\int_X f d\mu = \sum_{k,j} a_j \chi_{A_j \cap B_j} \leq \sum_{k,j} b_k \chi_{A_j \cap B_j} = \int_X g d\mu$$

を得る.

(3) 単関数 g の台を $A := \{x \in X \mid g(x) > 0\}$ とする. (f_n) は非負値だから, $A = \emptyset$ なら結論は従う. $A \neq \emptyset$ とすると, 非負値 $\alpha := \min_{x \in A} g(x), \beta := \max_{x \in A} g(x)$ が定まる. よって,

$$A_n(k) := \left\{ x \in X \mid f_n(x) \geq g(x) - \frac{1}{k} \right\}$$

と定めると, 各 $(A_n(k))_{k=1,2,\dots}$ は単調増大列で A に収束する. ここで, A の測度によって評価の仕方が変わる.

$\mu(A) = \infty$ のとき 任意の n, k について,

$$\begin{aligned} \int_X f_n d\mu &\geq \int_X f_n \chi_{A \cap A_n(k)} d\mu && 1 \geq \chi_{A \cap A_n(k)} \text{ と (2) より} \\ &\geq \left(\alpha - \frac{1}{k} \right) \mu(A \cap A_n(k)) && A_n(k) \text{ 上では } f_n \text{ は下から抑えられる} \end{aligned}$$

n は十分大きくできるから, $\int_X f_n d\mu = \infty$ を得る.

^{t2} (2) より, 有界な単調列の各項積分も有界な単調列となり, 極限は $[0, \infty]$ 上各点収束する.

$\mu(A) < \infty$ のとき 任意の n, k について,

$$\begin{aligned} \int_X f_n d\mu &\geq \int_X f_n \chi_{A \cap A_n(k)} d\mu & 1 \geq \chi_{A \cap A_n(k)} \text{ と (2) より} \\ &\geq \int_X \left(g - \frac{1}{k}\right) \chi_{A \cap A_n(k)} d\mu + \left(\int_X g \chi_{A \setminus A_n(k)} d\mu - \int_X g \chi_{A \setminus A_n(k)} d\mu\right) \\ &\geq \int_X g d\mu - \frac{1}{k} \mu(A \cap A_n(k)) - \beta \mu(A \setminus A_n(k)) \end{aligned}$$

と下から抑えられる. まず n を十分大きく取ると 3 項目が消え, 第 2 項は $-\frac{1}{k} \mu(A)$ となり, k も十分大きく取れるから, $\int_X f d\mu \geq \int_X g d\mu$ がわかる. ■

要諦 3.1.5. (3) の消息は極めて技巧的である. 天才的な不等式評価.

補題 3.1.6 (非負値可測関数の紡ぐ論理). f, g を非負値可測関数とする.

$$\begin{aligned} (1) \quad &\int_X (f + g) d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu. \\ (2) \quad &\forall x \in X \quad f(x) \leq g(x) \Rightarrow \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu. \end{aligned}$$

定理 3.1.7 (可積分性の特徴付け). (X, \mathcal{B}, μ) 上の可測関数 $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ または $f: X \rightarrow \mathbb{C}$ について, 次の 3 条件は同値.

- (1) f は可積分.
- (2) f^+, f^- が可積分.
- (3) $|f|$ が可積分.

注 3.1.8 (Lebesgue 可積分性と広義 Riemann 積分).

- (1) $\int_0^\infty \frac{\sin x}{x} dx$ は $(0, \infty)$ 広義 Riemann 積分可能だが, $\int_0^\infty |f(x)| dx$ は調和級数を含み Lebesgue 可積分ではない.
- (2) $\int_0^1 \int_0^\infty \frac{\sin x}{x} dx dy$ は広義 Riemann の意味でも Lebesgue の意味でも積分可能でないが, 累次積分は可能である.

3.1.2 不定積分の性質

積分 $\int \cdot d\mu: \mathcal{B} \times \text{Meas}(X, \overline{\mathbb{R}}) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ は, \mathcal{B} 上の集合の直和と $\text{Meas}(X, \overline{\mathbb{R}})$ 上の関数の和とそれぞれのスカラー倍について, \mathbb{R} -双線型写像である. これは積分を $g(x)$ と $d\mu(x)$ との掛け算 (ただし掛け算はあくまでも, 無限に細分可能かもしれないが, 可測集合の上で行われる) として作ったことが成功したことを意味する. 名実ともに, 積分は局所的データの足し上げとなり, 微分形式の積分としてコホモロジーへと受け継がれる.^a こうして, 加法的集合関数の例が構成できた.

^a The integration of differential forms induces a more general notion of integration, namely integration in differential cohomology and hence integration in generalized cohomology. Here the choice of a measure is replaced by a choice of orientation in generalized cohomology. <https://ncatlab.org/nlab/show/integral>

定理 3.1.9. $f, g: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ を可測関数とする.

- (1) $\mu(A) = 0 \Rightarrow \int_A f d\mu = 0$.
- (2) f が可積分であるならば, $\left| \int_X f d\mu \right| \leq \int_X |f| d\mu$.
- (3) (Chebyshev) 任意の $a, p > 0$ について, $\mu(\{|f| \geq a\}) \leq \frac{1}{a^p} \int_X |f|^p d\mu$.
- (4) f, g は可積分とする. $f \leq g$ a.e. $\Rightarrow \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu$. 特に, $f = g$ a.e. $\Rightarrow \int_X f d\mu = \int_X g d\mu$.
- (5) $\forall A \in \mathcal{B} \quad \int_A f d\mu = 0 \Leftrightarrow f = 0$ a.e.

- (6) $\int_X |f| d\mu = 0 \Leftrightarrow f = 0 \text{ a.e.}$
 (7) $|f| \leq g \text{ a.e.}$ かつ g が可積分ならば, f も可積分である.
 (8) f が可積分ならば, $|f| < \infty \text{ a.e.}$
 (9) $a \in \mathbb{R}$ とする. f, g が可積分ならば, $af, f + g$ も可積分であり,

$$\int_X af d\mu = a \int_X f d\mu, \quad \int_X (f + g) d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu.$$

[証明].

- (1) 単関数 $f = \sum_{j=1}^n a_j \chi_{A_j}$ の場合について $\int_A f d\mu$ を示せば, 単調単関数列の収束先である非負値可測関数も, その差である可測関数も, 積分が零であるとわかる. $\int_A f d\mu = \sum_{j=1}^n a_j \chi_{A \cap A_j} = 0.$

- (2) 拡張実数 $\overline{\mathbb{R}}$ 上の三角不等式より,

$$\left| \int_X f d\mu \right| \leq \left| \int_X f^+ d\mu \right| + \left| \int_X f^- d\mu \right| = \int_X |f| d\mu.$$

- (3) 意味は明確である. ある値 $y = a$ で切って, そこで短冊形に下方集合を取ると, その面積は f^p の定める面積よりも小さい. 式で表すと,

$$\int_X |f|^p d\mu \geq \int_X a^p \chi_{\{|f| \geq a\}} d\mu = a^p \mu(\{|f| \geq a\})$$

- (4) f, g が非負値の場合について示せば良い.

$$\begin{aligned} f &= f \chi_{\{f \leq g\}} + f \chi_{\{f > g\}} \\ &\leq g \chi_{\{f \leq g\}} + f \chi_{\{f > g\}} \end{aligned}$$

より, (1) から測度 0 の集合上での積分は 0 だから,

$$\int_X f d\mu \leq \int_X g \chi_{\{f \leq g\}} d\mu + \int_X f \chi_{\{f > g\}} d\mu \leq \int_X g d\mu.$$

- (5) \Leftarrow は,

$$\begin{aligned} \int_A f d\mu &= \int_A f \chi_{\{f \neq 0\}} d\mu + \int_A f \chi_{\{f = 0\}} d\mu \\ &= 0 + 0 = 0 \end{aligned}$$

と, 第 1 項は集合の測度が 0, 第 2 項は関数の値が 0 であるという, 2 つの 0 の和に分解できる. \Rightarrow を示す. 分解 $\{|f| > 0\} = \bigcup_{n=1}^{\infty} \left\{ |f| \geq \frac{1}{n} \right\}$ を用いる. Chebyshev の不等式より, それぞれの測度は

$$\mu(\{|f| > 0\}) \leq n \int_X |f| d\mu$$

と評価できる. この右辺は, 可測集合上の積分に分解して仮定を使うと,

$$\begin{aligned} \int_X |f| d\mu &= \int_X f^+ d\mu + \int_X f^- d\mu \\ &= \int_{\{f > 0\}} f d\mu - \int_{\{f < 0\}} f d\mu = 0 \end{aligned}$$

より, 測度が 0 とわかる. 測度 0 の集合の可算和は, 測度の劣加法性より 0 である.

- (6) \Leftarrow は $f = 0 \text{ a.e.}$ のとき, $|f| = 0 \text{ a.e.}$ であるから, (5) の \Leftarrow の $A = X$ の場合である. \Rightarrow は, $\forall A \in \mathcal{G} \int_A f d\mu = 0$ が従うことからわかる. 実際, 任意の $A \in \mathcal{G}$ に対して, (2) も使って,

$$\left| \iint_A f d\mu \right| \leq \int_A |f| d\mu \leq \int_X |f| d\mu = 0.$$

(7)

$$\begin{aligned}\int_X |f| d\mu &= \int_X |f| \chi_{\{|f| \leq g\}} d\mu \\ &\leq \int_X g \chi_{\{|f| \leq g\}} d\mu = \int_X g d\mu\end{aligned}$$

であるから、可積分性の特徴付け 3.1.7 より.

(8) 任意の $n \in \mathbb{N}_+$ に対して、Chebyshev の不等式の精緻化より次の議論が成り立つ.

$$\begin{aligned}\mu(\{|f| = \pm\infty\}) &\leq \mu(\{|f| \geq n\}) \\ &\leq \frac{1}{n} \int_{\{|f| \geq n\}} |f| d\mu \leq \frac{1}{n} \int_X |f| d\mu\end{aligned}$$

n は任意に大きく取れるから、 $\{\pm\infty\}$ を取る点は測度 0.

(9) $f + g, af$ は

$$\int_X |f + g| d\mu \leq \int_X (|f| + |g|) d\mu < \infty$$

より可積分. また, $f + g$ は $(f + g)^+ - (f + g)^-$ と $(f^+ - f^-) + (g^+ - g^-)$ との 2 通りで, 非負値可測関数の和に分解できるから, 積分の線形性 3.1.6 より,

$$\int_X (f + g)^+ d\mu - \int_X (f + g)^- d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu.$$

■

要諦 3.1.10. (2) の積分についての三角不等式が, 測度論に議論を外在化したために, 単なる三角不等式に本当に帰着している.

3.1.3 定積分の性質

$\Phi(-) := \mu[1_-|f|]$ を定積分とすると, $\mathcal{M} \rightarrow [0, \infty]$ は完全加法的集合関数となる. これは絶対連続である (微積分学の基本定理の前夜).

定理 3.1.11 (定積分の σ -加法性). f を可測関数, (M_n) を互いに素な可測集合の列とする.

$$\int_{\sum_{n \in \mathbb{N}} M_n} f d\mu = \sum_{n \in \mathbb{N}} \int_{M_n} f d\mu.$$

定理 3.1.12 (不定積分は絶対連続な加法的集合関数である). f を可積分とし, 完全加法的集合関数 $\Phi(-) := \int_- |f| d\mu : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ を不定積分とする. $\mu(A) \rightarrow 0$ のとき, 不定積分の値も ($A \in \mathcal{G}$ の取り方に依らず) 一様に 0 に収束する:

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall A \in \mathcal{G} \mu(A) < \delta \Rightarrow \int_A |f| d\mu < \epsilon.$$

[証明]. $\mu(\{f > 0\}) = 0$ とすると不定積分は零関数で, 絶対連続性を自明に満たす. よって $\mu(\{f > 0\}) = 0$, すなわち $\int_X |f| d\mu = 0 \Leftrightarrow f = 0$ a.e. と併せて (積分の性質 3.1.9), $0 < \int_X |f| d\mu$ とする.

$\epsilon > 0$ と, $|f|$ に収束する非負値単関数の増加列 (f_n) を任意にとると, ある $n_0 \in \mathbb{N}$ が存在して, $\int_X f_{n_0} d\mu > 0$ かつ $\int_X (|f| - f_{n_0}) d\mu < \frac{\epsilon}{2}$ を満たす. あとはこれに対して $\delta > 0$ をうまく取れば良い. これには, 非負値単関数 $f_{n_0} = \sum_{k=1}^N \alpha_k \chi_{A_k}$ について, $\delta < \frac{\epsilon}{2} \left(\max_{1 \leq k \leq N} \alpha_k \right)^{-1}$ を満たすように取る. すると, $\mu(A) < \delta$ を満たす $A \in \mathcal{G}$ について,

$$\int_A |f| d\mu = \int_A (|f| - f_{n_0}) d\mu + \int_A f_{n_0} d\mu$$

$$\begin{aligned} &\leq \frac{\epsilon}{2} + \int_A \max_{1 \leq k \leq N} a_k d\mu \\ &< \frac{\epsilon}{2} + \max_{1 \leq k \leq N} a_k \cdot \mu(A) < \epsilon \end{aligned}$$

と評価できる. ■

要諦 3.1.13. 不定積分の絶対連続性とは、積分域 $A \in \mathcal{G}$ を十分小さくすればいくらでも絶対値を 0 に近づけられることをいう。この性質を持つ関数のみが、可逆に微分可能である。

3.1.4 変数変換

定義 3.1.14. $(X, \mathcal{G}), (Y, \mathcal{G})$ を可測空間とする。可測空間の射 $\varphi: X \rightarrow Y$ を $\forall C \in \mathcal{G} \ \varphi^{-1}(C) \in \mathcal{G}$ を満たす写像として定める。これを \mathcal{G}/\mathbb{C} -可測ともいう。

定理 3.1.15 (変数変換). 測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) と測度空間の射 $\varphi: X \rightarrow Y$ について、像測度 $\nu := \varphi_*\mu$ を $\nu(C) := \mu(\varphi^{-1}(C))$ ($C \in \mathcal{G}$) で定める。このとき、次が成り立つ。

(1) $f \circ \varphi$ が μ -可積分であることと、 f が ν -可積分であることは同値。

$$(2) \int_X f(\varphi(x)) d\mu(x) = \int_Y f(y) d\nu(y).$$

3.2 収束定理

積分 $\mu: \mathcal{L}(X)_+ \rightarrow [0, \infty]$ は、 $\mathcal{L}(X)_+$ の各点収束の位相について、単調列については連続である。これは Fatou の補題を経て、Lebesgue の優収束定理につながる。

3.2.1 単調収束定理

積分を非負値単関数単調列の極限として定めたが、これは一般の非負値関数の単調列の極限を保つ。

定理 3.2.1 (monotone convergence theorem). 非負値の a.e.-単調増加列 $\{f_n\} \subset \mathcal{L}(X; \mathbb{R}_+)^{\dagger 3}$ ，すなわち、 $\forall n \in \mathbb{N} \ 0 \leq f_n \leq f_{n+1}$ a.e. $\wedge f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f$ a.e. を満たすならば、

$$\begin{array}{ccc} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu & = & \int_X \lim_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu. \\ \begin{array}{ccc} (f_n) & \xrightarrow{\int_X \cdot d\mu} & \left(\int_X f_n d\mu \right) \\ \downarrow \lim_{n \rightarrow \infty} & & \downarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \\ f & \xrightarrow{\int_X \cdot d\mu} & \int_X f d\mu \end{array} \end{array}$$

[証明].

有限化算譜 $\mu(f_n^{-1}(\infty)) > 0$ となる $n \in \mathbb{N}$ が存在するとき、等式は $\infty = \infty$ として成立する。よって、任意の $n \in \mathbb{N}$ について $\mu(f_n^{-1}(\infty)) = 0$ と仮定すると、 $\mu(\cup_{n=1}^{\infty} f_n^{-1}(\infty)) = 0$ であるから、初めから X 上で f_n は有限と仮定して良い。

零集合算譜 単調性、収束性が失敗する集合を

$$N_n := \{x \in X \mid f_n > f_{n+1}\},$$

$$N_{\infty} := \left\{x \in X \mid \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \neq f(x)\right\}$$

^{†3} 可測関数列の極限は可測である 2.3.11. 関数の単調増加列は収束する、各点について考えれば良い。

と定めると、いずれも測度は0より、 $N := N_\infty \cup \bigcup_{n \in \mathbb{N}} N_n$ の測度も0. これについて、

$$\tilde{f}_n(x) := \begin{cases} f_n(x), & x \notin N, \\ 0, & x \in N. \end{cases}, \quad \tilde{f}(x) := \begin{cases} f(x), & x \notin N, \\ 0, & x \in N. \end{cases}$$

と定めると、 (\tilde{f}_n) は \tilde{f} に収束する単調増加列で、

$$\int_X f_n d\mu = \int_X \tilde{f}_n d\mu, \quad \int_X f d\mu = \int_X \tilde{f} d\mu,$$

が成り立つから、初めから a.e. の条件は除いて考えて良い.

対角線構成 各 f_n に収束する非負値単関数の単調列を $(f_{n,k})_{k \in \mathbb{N}}$ とし、 $g_k := \max_{1 \leq n \leq k} f_{n,k}$ とおくと、 $\lim_{k \rightarrow \infty} g_k = f$ である. 実際、 $\forall_{k \in \mathbb{N}} \forall_{n=1, \dots, k} f_{n,k} \leq g_k$ であるが、これの $k \rightarrow \infty$ の極限を考えると、任意の $n \in \mathbb{N}$ について $f_n = \lim_{k \rightarrow \infty} f_{n,k} \leq \lim_{k \rightarrow \infty} g_k \leq f$. 次に $n \rightarrow \infty$ を考えて、 $\lim_{k \rightarrow \infty} g_k = f$.

結論 よって、非負値単関数の増加列 (g_k) を用いて $\int_X f d\mu = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_X g_k d\mu$ と表せるが、 $g_k = \max_{1 \leq n \leq k} f_{n,k} \leq \max_{1 \leq n \leq k} f_n = f_k$ より、 $\int_X g_k d\mu \leq \int_X f_k d\mu$ と併せて、 $\int_X f d\mu \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \int_X f_k d\mu$ を得る. 逆向きの不等号は $f_k \leq f$ より $\int_X f_k d\mu \leq \int_X f d\mu$ であり 3.1.9(4)、この左辺の $k \rightarrow \infty$ の極限を取ることによって解る.

■

注 3.2.2. X が一点集合で μ がその上で有限のとき、これは単調列 (f_n) が上界 $f \in \mathbb{R}$ を持つならば収束することを含意している.

系 3.2.3. ほとんど至るところ非負な可測関数列 (f_n) について、

$$\sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n d\mu = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_X \sum_{n=1}^k f_n d\mu = \int_X \sum_{n=1}^{\infty} f_n d\mu.$$

[証明]. 単調増加列 $\left(\sum_{n=1}^k f_n \right)_{k \in \mathbb{N}}$ についての単調収束定理より.

■

注 3.2.4. [1] ではこちらを先に証明している. 確かに、単関数近似定理 2.3.15 を、任意の非負可測関数 f について、 $\int_E f d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_E g_n d\mu$ を満たす単関数表示 $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} g_n(x)$ が存在する、と書き直すと、

定理 3.2.5 (Levi の項別積分定理 (Levy)). $M \in \mathcal{M}$ 上広義単調増加な可測関数列 $\{f_n\} \subset \mathcal{L}(X)$ について、 $\mu[1_M f_1] > -\infty$ ならば、

$$\int_M \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n \right) d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_M f_n d\mu.$$

3.2.2 Fatou の補題

測度の劣加法性 $\forall_{\{A_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{G}} \mu \left(\liminf_{i \rightarrow \infty} A_i \right) \leq \liminf_{i \rightarrow \infty} \mu(A_i)$ と同様、極限の像が、 \mathbb{R} 内の真の始対象となる. 下極限が必ず存在する理由は単調列になるからであるから、証明は単調収束定理を自然に経由する.

定理 3.2.6 (Fatou (1906)). 殆ど至る所非負な可測関数の列 $\{f_n\}$ について、

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \geq \int_X \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu.$$

[証明]. $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n = \sup_{n \geq 1} \left(\inf_{k \geq n} f_k \right) =: \sup_{n \geq 1} g_n$ とおくと、

(1) $f_n \geq g_n$ a.e. と言える. よって、 $\liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \geq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X g_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X g_n d\mu$ (積分の性質 3.1.9(4)). 単調増加列 $\left(\int_X g_n d\mu \right)_{n \in \mathbb{N}}$ には $[0, \infty]$ 上極限が存在することに注意.

(2) (g_n) は $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n$ に収束する単調増加列であるから, $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X g_n d\mu = \int_X \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n$.

3.2.3 Lebesgue の優収束定理

可積分な優関数 (殆ど至る所で十分) が取れる場合, 概収束と積分は交換する. 積分についての反例は調和級数の閾値である $\alpha = -1$ のとき, すなわち $\frac{1}{x}$ を考えるとたくさん作れる.

定理 3.2.7 (Lebesgue convergence theorem). 可測関数列 (f_n) について, (1) \Rightarrow (2) が成り立つ.

(1) 非負値の可積分関数 h が存在して, 各 f_n が殆ど至る所で抑えられる: $\forall n \in \mathbb{N} \quad |f_n| \leq h$ a.e.

(2) $\liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \geq \int_X \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu$ かつ $\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \leq \int_X \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu$.

特に, (f_n) が f に概収束するとき,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu = \int_X f d\mu.$$

[証明]. 条件 (1) は次のように (1) \Rightarrow (2) となる.

(1) $|f_n| \leq h$ a.e. とは, 殆ど至る所 $h + f_n \geq 0 \vee h - f_n \geq 0$ が成り立つことに同値.

(2) このとき, Fatou の補題より, 殆ど至る所で

$$\begin{aligned} \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X (h + f_n) d\mu &\geq \int_X (h + f) d\mu \\ \Leftrightarrow \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu &\geq \int_X f d\mu. \end{aligned}$$

が成り立ち, かつ,

$$\begin{aligned} \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X (h - f_n) d\mu &\geq \int_X (h - f) d\mu \\ \Leftrightarrow \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu &\leq \int_X f d\mu. \end{aligned}$$

が成り立つ. $\liminf_{n \rightarrow \infty} (-f_n) = -\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ に注意.

注 3.2.8 (優関数が取れない場合は定理が成立することもしないこともある). $X = (0, 1]$ とし, Lebesgue 測度を考える.

成り立たない例

$$f_n(x) := \begin{cases} \frac{1}{x}, & x \in \left[\frac{1}{2n}, \frac{1}{n}\right], \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

とすると, $\forall n \in \mathbb{N} \quad |f_n| \leq h$ を満たす h は $\forall x \in X \quad \frac{1}{x} < h(x)$ が必要だから, 可積分ではない: $\int_X h dx = \infty$. しかし,

$X \cap \left[\frac{1}{2n}, \frac{1}{n}\right] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \emptyset$ より, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = 0$ となるから, $\int_X f dx = 0$ だが, $\int_X f_n dx = \log 2$.

成り立つ例

$$f_n(x) := \begin{cases} \frac{1}{x}, & x \in \left[\frac{1}{2n}, \frac{1}{n}\right], \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

とすると, 同様に優関数は存在しない. しかし, $\int_X f_n d\mu = \log \left(1 + \frac{1}{n}\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 = \int_X f dx$.

注 3.2.9 (微分と積分との交換に向けて). Lebesgue の優収束定理は連続な族 $(f_t)_{t > t_0}$ に拡張できる.

系 3.2.10 (一様収束する可積分関数列の積分は収束する). μ を有限とする: $\mu(X) < \infty$. 可積分関数の列 (f_n) が一様に f に概収束するならば, f も可積分で,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu = \int_X f d\mu.$$

[証明]. 一様に概収束することより, $\exists N \in \mathbb{N} \forall n \geq N \forall x \in X |f_n(x) - f_N(x)| < 1$ a.e. よって, 特に, 殆ど至る所で $|f_n(x)| < |f_N(x)| + 1$ が成り立つ.^{†4} よって, $h := |f_N(x)| + 1$ と定数関数を優関数に取れば, これは $\mu(X) < \infty$ より可積分である. ■

注 3.2.11 (測度が有限でない場合の反例). $\mu(X) = \infty$ のときの反例は, 例えば $X = (0, \infty)$ で $\frac{1}{x}$ を考えれば良い.

$$f_n(x) := \begin{cases} \frac{1}{x}, & x \in [n, 2n], \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

とすると, これは $\forall n \in \mathbb{N} |f_n(x)| \leq 1$ が成り立つから有界であり, また $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = 0$ に一様収束するが, $\int_X f_n dx = \log 2$.

3.2.4 Beppo-Levi の定理

定理 3.2.12. $\{f_n\} \subset L^1(X)$ は一様有界とする: $\sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n d\mu < \infty$. このとき, ある可積分関数 $f \in L^1(X)$ に対して $f_n \nearrow f$ ならば,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu = \int f d\mu.$$

3.2.5 定積分の近似

必ずしも単関数を用いずとも, 定積分の値は計算できる. x 軸, y 軸のどちらをカットオフしても良い.

定理 3.2.13. σ -有限な測度空間 (X, \mathcal{M}, μ) 上の可積分関数 $f \in \mathcal{L}^1(X; \mathbb{R})$ について, 任意の $\epsilon > 0$ に対して, 体積確定集合 $M_\epsilon \in \mathcal{M}^1$ と自然数 $n_\epsilon \in \mathbb{N}$ とが存在して, $1_{M_\epsilon} f$ の値域を $[-n_\epsilon, n_\epsilon]$ でカットオフした関数を f_{n_ϵ} とすれば,

$$\forall M \in \mathcal{M} \quad \left| \int_M f d\mu - \int_M f_{n_\epsilon} d\mu \right| \leq \int_X |f - f_{n_\epsilon}| d\mu < \epsilon$$

が成り立つ.

3.2.6 Vitali の収束定理

Lebesgue の優収束定理の描像と精緻化

(f_n) が f に概収束するとき, Egorov の定理 2.5.4 より, 一様収束でない部分 A の測度は任意に小さく取れる. すなわち, 殆どの部分 A^c 上では一様収束するから積分と極限が交換可能で, A 上で生じる剰余項が飼い慣らせれば良い. そのための十分条件が, 至る所で抑えられる可積分な優関数の存在であり, あるいはもっと緩めると Vitali の収束定理を得る.

議論 3.2.14 (Lebesgue の優収束定理の再検討). 測度の有界性 $\mu(X) < \infty$ を仮定すると, Lebesgue の優収束定理は次のようにも証明できる. このとき, 優関数 h の存在は条件としては強く, これを緩めることを考えることができる (Vitali の収束定理). まず, 積分の性質 3.1.9(7) より優関数の存在する f_n, f は可積分であるから, $N := \bigcup_{n=1}^{\infty} \{ |f_n| = \infty \} \cup \{ |f| = \infty \}$ は零集合であり, f_n, f はこの上で零であると仮定して良い. この設定の下で, h で至る所抑えることができる列 (f_n) が f に概収束するとき, $\forall \epsilon > 0 \exists N > 0 \forall n \geq N \left| \int_X (f - f_n) d\mu \right| < \epsilon$ を示せば良い.

任意に $\epsilon > 0$ を取ると, 積分の絶対連続性 3.1.12 より, $\delta > 0$ が存在して, $\forall A \in \mathcal{B} \mu(A) < \delta \Rightarrow \int_A h d\mu < \epsilon$. また Egorov の定理 2.5.4 より, $\mu(A) < \delta$ を満たす $A \in \mathcal{B}$ であって, (f_n) が A^c 上一様収束するものが取れる: $\exists N > 0 \forall n \geq N \sup_{x \in A^c} |f_n(x) - f(x)| < \epsilon$.

^{†4} 三角不等式より, $|f_n(x)| = |f_N(x) + (f_n(x) - f_N(x))| \leq |f_N(x)| + |f_n(x) - f_N(x)| < |f_N(x)| + 1$

よって、これらの事実より、

$$\begin{aligned}
 \left| \int_X (f - f_n) d\mu \right| &\leq \left| \int_{A^c} (f - f_n) d\mu \right| + \left| \int_A (f - f_n) d\mu \right| \\
 &\leq \int_{A^c} |f - f_n| d\mu + \int_A |f - f_n| d\mu \\
 &\leq \epsilon \mu(A^c) + 2\epsilon.
 \end{aligned}
 \quad \because \int_A |f - f_n| d\mu \leq \int_A (|h| + |h|) d\mu.$$

と評価できるから、 $\mu(A^c) \leq \mu(X) < \infty$ ならば、 $\int_X f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu$ が従う。第二項の評価は、わざわざ優関数 h を経由する必要はない。

定義 3.2.15 (uniformly integrable, have uniformly absolutely continuous integrals). 可積分関数の族 $\mathcal{F} \subset L^1(X, \mathcal{A}, \mu)$ について、^{†5}

- (1) \mathcal{F} が一様可積分であるとは、 $\lim_{M \rightarrow \infty} \sup_{f \in \mathcal{F}} \int_{\{|f| > M\}} |f| d\mu = 0$ が成り立つことをいう。
- (2) \mathcal{F} が一様に絶対連続積分を持つとは、 $\lim_{\mu(A) \rightarrow 0} \sup_{f \in \mathcal{F}} \int_A |f| d\mu = 0$ が成り立つことをいう。

定理 3.2.16 (Vitali). 有限測度空間 (X, \mathcal{B}, μ) , $\mu(X) < \infty$ 上の (f_n) が一様可積分かつ $f_n \rightarrow f$ a.e. かつ $|f(x)| < \infty$ a.e. ならば、 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X |f_n - f| d\mu = 0$.

3.2.7 微分と積分の可換性

可測関数 f の微分とは、 $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x, \alpha + h) - f(x, \alpha)}{h}$ と可測関数の（連続）極限として定義されているので、結局可測関数の極限と積分の交換の問題である。なお、積分も極限として定義されているから、極限構成の可換性に他ならない。

定理 3.2.17. 関数 $f : X \times (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ がそれぞれの引数について次の条件を満たすとする。

- (1) f は X 上可積分である： $\forall \alpha \in (a, b) \quad \int_X f(x, \alpha) d\mu(x) \in \mathbb{R}$.
- (2) f は (a, b) 上可微分であり、その偏導関数について可積分な優関数 $\varphi : X \rightarrow \mathbb{R}$ が存在する： $\forall (x, \alpha) \in X \times (a, b) \quad \left| \frac{\partial}{\partial \alpha} f(x, \alpha) \right| \leq \varphi(x)$.

このとき、積分 $\int_X f(x, \alpha) d\mu(x)$ も α -可微分で、

$$\frac{d}{d\alpha} \int_X f(x, \alpha) d\mu(x) = \int_X \frac{\partial}{\partial \alpha} f(x, \alpha) d\mu(x).$$

[証明].

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{d\alpha} \int_X f(x, \alpha) d\mu(x) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left(\int_X f(x, \alpha + h) d\mu - \int_X f(x, \alpha) d\mu \right) \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \int_X \frac{1}{h} (f(x, \alpha + h) - f(x, \alpha)) d\mu \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} \int_X \frac{\partial}{\partial \alpha} f(x, \alpha + \theta h) d\mu \quad \exists \theta \in (0, 1)
 \end{aligned}$$

より、結局 $\lim_{h \rightarrow 0}$ と積分の交換の問題である。Lebesgue の優収束定理と仮定 (2) より結論が従う。 ■

^{†5} https://en.wikipedia.org/wiki/Vitali_convergence_theorem

3.3 Fubini の定理

積分の可換性

Fubini の定理とは、「直積空間での積分は、 $x \in X$ から切って考えても $y \in Y$ から切って考えても同じ」ことを表す定理である。補題 2.10.6 より、長方形の有限直和で表される元 $\mathcal{A}(\mathcal{G}) \subset \mathcal{G}_Z$ については成立を確認したが、これが生成する σ -加法族上でも成り立つことを確認する必要がある。これは単調族定理 2.2.6 など上手に活用する。

- (1) Fubini の定理の根本は、 $E \in \mathcal{G}_Z$ の測度は $x \in X$ から切って足し上げても、 $y \in Y$ から切って足し上げても変わらない **well-defined** 性を意味する。
- (2) 積分論の議論と平行で、可測関数 $f : Z \rightarrow [0, \infty]$ をその上で足し上げても可測。したがって、(無限大の場合も含めて) 積分の値も **well-defined**。
- (3) Z 上の可積分関数 $f : Z \rightarrow [-\infty, \infty]$ は、各 $x \in X, y \in Y$ で見ると殆ど至る所可積分であるから、零集合上の値の違いを無視すれば、この積分の値もやはり **well-defined** である。

3.3.1 Fubini の定理

- 非負値可測関数については、可積分性に関係なく積分の交換ができる（値が発散する場合も含めて）。しかし一般に符号が変わる場合は、可積分性を仮定しない限りは可換でないことがある。
- 命題 E の真理集合が零でないならば、ある零でない集合 $E_X \in \mathcal{G}_X$ 上で、その切り口 E_x ($x \in E_X$) の μ_Y 測度が常に正である。

定理 3.3.1 (Fubini II : 非負値可測関数). X, Y を σ -有限な測度空間、 $f : X \times Y \rightarrow [0, \infty]$ を非負値可測関数とする。

- (1) $f(x, -) : Y \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{G}_Y -可測で、 $\int_Y f(-, y) d\mu_Y : X \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{G}_X -可測。
- (2) $f(-, y) : X \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{G}_X -可測で、 $\int_X f(x, -) d\mu_X : Y \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{G}_Y -可測。
- (3) 2つの関数の間に次の関係がある：

$$\int_Z f(z) d\mu_Z = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\mu_Y \right) d\mu_X = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu_X \right) d\mu_Y.$$

各項は ∞ を取り得ることに注意。

[証明].

f が非負値単関数の場合 $\exists E \in \mathcal{G}_Z$ $f = \chi_E$ のとき、 $\chi_E(x, -) : Y \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{G}_Y -可測で、 $\int_Y \chi_E(-, y) d\mu_Y = \mu_Y(E_-) : X \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{G}_X -可測（切り口についての Fubini の定理 2.10.10）。また、切り口についての Fubini の定理 2.10.10(3) より、

$$\begin{aligned} \int_Z f d\mu_Z &= \mu_Z(E) = \int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X = \int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y \\ &= \int_X \left(\int_Y \chi_E(-, y) d\mu_Y \right) d\mu_X = \int_Y \left(\int_X \chi_E(x, -) d\mu_X \right) d\mu_Y. \end{aligned}$$

f が非負値可測関数の場合 非負値単関数の増加列 (f_n) が存在して、 $f_n \nearrow f$ が成り立つので、(1),(2) は可測関数の極限は可測 2.3.11 であることより、(3) は単調収束定理 3.2.1 より従う。

■

定理 3.3.2 (Fubini III : 一般の可積分関数 (1907)). X, Y を σ -有限な測度空間、 $f \in L^1(Z; \mathbb{R})$ を μ_Z -可積分関数とする。

- (1) $f(x, -) : Y \rightarrow [-\infty, \infty]$ は \mathcal{G}_Y -可測で、かつ、 X 上殆ど至る所 μ_Y -可積分である。
- (2) $f(-, y) : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ は \mathcal{G}_X -可測で、かつ、 Y 上殆ど至る所 μ_X -可積分である。

(3) $f(x, -), f(-, y)$ が可積分性を失う零集合上で、値を 0 と変更することにより、次が成り立つ：

$$\int_Z f d\mu_Z = \int_X g d\mu_X = \int_Y h d\mu_Y.$$

[証明].

方針 (1) について示す. $f =: f^+ - f^-$ ($f^+, f^- : Z \rightarrow [0, \infty]$) と定めれば, Fubini の定理 II.3.3.1 より, $f(x, -)$ は可測関数の和なので可測. よって, 可積分性について議論する. 可積分性が崩れる集合を

$$E := \left\{ x \in X \mid \int_Y f^+(x, y) d\mu_Y = +\infty \text{ または } \int_Y f^-(x, y) d\mu_Y = -\infty \right\}$$

と定めて, $\mu_X(E) = 0$ と示せば良い.

可積分性 任意の $n \in \mathbb{N}$ について

$$E \subset \left\{ x \in X \mid \int_Y |f(x, y)| d\mu_Y \geq n \right\}$$

が成り立つ. Fubini の定理 II.3.3.1 より, 非負値関数 $|f(x, -)|$ の積分 $\int_Y f(-, y) d\mu_Y$ は可測だから, 積分が ∞ に発散する場合も含めて次のように評価できる：

$$\begin{aligned} \mu_X(E) &\leq \mu_X \left(\left\{ x \in X \mid \int_Y |f(x, y)| d\mu_Y \geq n \right\} \right) \\ &\leq \frac{1}{n} \int_X \left(\int_Y |f(x, y)| d\mu_Y \right) d\mu_X \\ &= \frac{1}{n} \int_X |f(z)| d\mu_Z \end{aligned}$$

f は可積分としたから積分 $\int_X |f(z)| d\mu_Z$ は有限である. したがって, $n = 1, 2, \dots$ は任意としたから, $\mu_X(E) = 0$ を得る. よって, $f(x, -) : Y \rightarrow [-\infty, \infty]$ は殆ど至る所可積分.

g は定め方から, $\int_X |g(x)| d\mu_X < \infty$ より ($\mu_X(X) < \infty$ は f の可積分性に含意されている), 可積分である (可積分性の特徴付け 3.1.7).

積分の交換

$$\begin{aligned} \int_Z f d\mu_Z &\stackrel{\text{def}}{=} \int_Z f^+ d\mu_Z - \int_Z f^- d\mu_Z \\ &\stackrel{\text{Fubini III}}{=} \int_X \left(\int_Y f^+ d\mu_Y \right) d\mu_X - \int_X \left(\int_Y f^- d\mu_Y \right) d\mu_X \\ &= \int_{X \setminus E} \left(\int_Y f^+ d\mu_Y \right) d\mu_X - \int_{X \setminus E} \left(\int_Y f^- d\mu_Y \right) d\mu_X \\ &= \int_{X \setminus E} \left(\int_Y f d\mu_Y \right) d\mu_X = \int_X g d\mu_X. \end{aligned}$$

系 3.3.3 (Fubini の定理の論理的解釈). $E \in \mathcal{G}_Z$ を Z 上の命題とする.

- (1) $\mu_Z(E) > 0$ ならば, $\exists_{E_X \in \mathcal{G}_X} \mu_X(E_X) > 0 \wedge [\forall_{x \in E_X} \mu_Y(E_x) > 0]$.
- (2) $[\exists_{A \in \mathcal{G}_X, B \in \mathcal{G}_Y} \mu_X(A) > 0 \wedge \mu_Y(B) > 0 \wedge (\forall_{\mu_X\text{-a.e. } x \in A} \mu_Y(E_x) = \mu_Y(Y))] \Rightarrow [\forall_{\mu_Y\text{-a.e. } y \in B} \mu_X(E_y) = \mu_X(X)]$.

直積の普遍性についての考察

- 直積空間上の可測 (可積分) 関数は, 成分毎に見ても可測 (可積分) である (そして値が一致する) とは, Fubini の定理の主張である.
- f が各成分毎に可測でも, $Z = X \times Y$ 上の関数として可測であるとは限らない. 実際, 可測性どころか 2 段階の可積分性が満たされて, $\int_X d\mu_X \int_Y f d\mu_Y$ も $\int_Y d\mu_Y \int_X f d\mu_X$ も存在する場合でも, Z 上 (Lebesgue) 可測でない f の例が, 超限帰納法によって構成できる.

3.3.2 Fubini-Tonelli の定理

どれか1つでも計算できたなら、全ての値が一致する。

定理 3.3.4 (Fubini-Tonelli (1909)). $f: X \times Y \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ を $\mathcal{B}_X \otimes \mathcal{B}_Y$ -可測とする。次の3つの積分値のいずれか1つでも有限であれば、他の2つも有限で値が一致する。特に、 f は $X \times Y$ 上可積分である。

$$\int_{X \times Y} |f(x, y)| (\mu \times \nu)(dx dy), \quad \int_X \int_Y |f(x, y)| \nu(dy) \mu(dx), \quad \int_Y \int_X |f(x, y)| \mu(dx) \nu(dy).$$

[証明]. 非負値可測関数に関する Fubini の定理から、 ∞ の場合も含めて3つの積分の値は必ず一致する。そのうち1つが有限であるときも同様。したがってこのとき、特に f は $X \times Y$ 上可積分になる。 ■

3.3.3 完備測度の場合

形式的には結果に a.e. が新たに挿入され、証明が1段階複雑になるだけで内容は全く同じ。したがって、完備化の1段階が挿入されても、Fubini-Tonelli と同様な結果が成り立つ。

定理 3.3.5 (Fubini I : 完備測度空間上の単関数). $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ を σ -有限な完備測度空間とし、 $(Z, \mathcal{B}_Z, \mu_Z)$ をこれらの直積測度空間の完備化とする。任意の $E \in \mathcal{B}_Z$ について、

- (1) μ_1 -a.e. $x \in X$ に対して $E_x \in \mathcal{B}_Y$, μ_2 -a.e. $y \in Y$ に対して $E_y \in \mathcal{B}_X$.
- (2) $\mu_2(E_-): X \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{B}_X -可測であり、 $\mu_1(E_-): Y \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{B}_Y -可測。
- (3)

$$\int_X \mu_Y(E_x) d\mu_X(x) = \int_Y \mu_X(E_y) d\mu_Y(y) = \mu_Z(E)$$

定理 3.3.6 (Fubini II : 完備測度空間上の非負値可測関数). $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ を σ -有限な完備測度空間とし、 $(Z, \mathcal{B}_Z, \mu_Z)$ をこれらの直積測度空間の完備化とする。非負値 \mathcal{B}_Z -可測関数 $f: Z \rightarrow [0, \infty]$ について、次が成り立つ：

- (1) 殆ど至る所の $x \in X$ に対して、 $f(x, -): Y \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{B}_Y -可測であり、したがって積分 $\int_Y f(x, y) d\mu_Y: X \rightarrow [0, \infty]$ が定まる。ここで、

$$g(x) := \begin{cases} \int_Y f(x, y) d\mu_Y, & f(x, -) \text{ が } \mathcal{B}_Y \text{-可測のとき,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定めると、 g は \mathcal{B}_X -可測。

- (2) 殆ど至る所の $y \in Y$ に対して、 $f(-, y): X \rightarrow [0, \infty]$ は \mathcal{B}_X -可測であり、したがって積分 $\int_X f(x, y) d\mu_X: Y \rightarrow [0, \infty]$ が定まる。ここで、

$$h(y) := \begin{cases} \int_X f(x, y) d\mu_X, & f(-, y) \text{ が } \mathcal{B}_X \text{-可測のとき,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定めると、 h は \mathcal{B}_Y -可測。

- (3)

$$\int_Z f(z) d\mu_Z = \int_X g(x) d\mu_X = \int_Y h(y) d\mu_Y.$$

定理 3.3.7 (Fubini III : 完備測度空間上の可積分関数). $(X, \mathcal{B}_X, \mu_X), (Y, \mathcal{B}_Y, \mu_Y)$ を σ -有限な完備測度空間とし、 $(Z, \mathcal{B}_Z, \mu_Z)$ をこれらの直積測度空間の完備化とする。 μ_Z -可積分関数 $f: Z \rightarrow [-\infty, \infty]$ について、次が成り立つ：

- (1) 殆ど至る所の $x \in X$ について、 $f(x, -): Y \rightarrow [-\infty, \infty]$ は \mathcal{B}_Y -可測であり、 μ_Y -可積分である。ここで、

$$g(x) := \begin{cases} \int_Y f(x, y) d\mu_Y, & f(x, -) \text{ が } \mathcal{B}_Y \text{-可測のとき,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定めると, g は \mathcal{B}_X -可測かつ μ_X -可積分.

(2) 殆ど至る所の $y \in Y$ について, $f(-, y) : X \rightarrow [-\infty, \infty]$ は \mathcal{B}_X -可測であり, μ_X -可積分である. ここで,

$$h(y) := \begin{cases} \int_X f(x, y) d\mu_X, & f(-, y) \text{ が } \mathcal{B}_X \text{ 可測のとき,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定めると, h は \mathcal{B}_Y -可測かつ μ_Y -可積分.

(3)

$$\int_Z f(z) d\mu_Z = \int_X g(x) d\mu_X = \int_Y h(y) d\mu_Y.$$

3.4 Lebesgue 積分の性質

定理 3.4.1 (平行移動不変性). Lebesgue 可測関数 $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ が, 定積分 $\int_{\mathbb{R}^d} f dx$ を持つならば, これが任意の $y \in \mathbb{R}^d$ に対して定める関数 $f(x+y) : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ と $f(-x) : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ も定積分をもち,

$$\int_{\mathbb{R}^d} f(x+y) dx = \int_{\mathbb{R}^d} f(-x) dx = \int_{\mathbb{R}^d} f(x) dx.$$

定理 3.4.2. $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ が Lebesgue 積分可能な関数ならば,

$$\lim_{|y| \rightarrow 0} \int_{\mathbb{R}^d} |f(x+y) - f(x)| dx = 0.$$

3.5 Lebesgue 積分と Riemann 積分

狭義 Riemann 積分可能ならば Lebesgue 積分可能である. 値が一致するためには, 狭義 Riemann 積分可能であるか, 開区間 (a, b) 上の任意閉区間上で狭義 Riemann 積分可能で, $|f|$ も Riemann 積分可能である必要がある [3.1.8](#).

3.5.1 コンパクト集合上の Riemann 積分は Lebesgue 積分

コンパクト集合上の Riemann 可積分関数は必ず Lebesgue 可積分で, 値が一致する.

定理 3.5.1 (コンパクト集合上の Riemann 積分). d 次元有界閉矩形 $R = [a_1, b_1] \times \cdots \times [a_d, b_d]$ ($-\infty < a_i < b_i < \infty$) 上の有界関数 $f : R \rightarrow \mathbb{R}$ について, 次の2条件は同値.

- (1) f は R 上 Riemann 可積分である.
- (2) f は R 上殆ど至る所連続である.

特に, 殆ど至る所連続ならば, 有界閉矩形上 Lebesgue 可積分であること [2.9.1](#), そして値が一致すること [3.5.5](#) に注意.

[証明]. 補題 (3) より, 殆ど至る所の $x \in R$ で $\lim_{n \rightarrow \infty} M_{\Delta_n}(x) = U(x)$, $\lim_{n \rightarrow \infty} m_{\Delta_n}(x) = L(x)$ である. $M_{\Delta_n}, m_{\Delta_n}$ には Borel 可測で有界な関数 (すなわち Lebesgue 可積分な関数)

$$|M_{\Delta_n}(x)|, |m_{\Delta_n}(x)| \leq 2 \sup_{x \in I} |f(x)|$$

が存在するから, Lebesgue の優収束定理 [3.2.7](#) より,

$$S[f] \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} S_{\Delta_n}[f] = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_I M_n(x) dm = \int_I U(x) dm.$$

同様にして, $s[f] = \int_I L(x) dm$. したがって,

$$f \text{ が } I \text{ 上 Riemann 可積分} \Leftrightarrow S[f] = s[f]$$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \int_I (U - L) dm = 0 \\ &\Leftrightarrow U - L = 0 \text{ } m\text{-a.e. } x \quad \because U - L \geq 0 \text{ より 3.1.9(6) から} \end{aligned}$$

■

注 3.5.2. (1) と (2) の同値性自体は、(無限でも良い) 开区間上の広義 Riemann 積分についても成り立つ。

3.5.2 Lebesgue 積分の Riemann 積分による近似

一般の集合上の Lebesgue 積分は Riemann 積分で近似可能である。

定理 3.5.3. 一般の区間 $I \subset \mathbb{R}$ 上の Lebesgue 可積分関数 $f \in \mathcal{L}^1(I)$ と正定数 $\epsilon > 0$ とに対して、任意のコンパクト台を持つ連続関数 $f_\epsilon \in C_c(I)$ が存在して、

$$\left| \int_I f(x) dm - \int_a^b f_\epsilon dx \right| \leq \int_I |f - f_\epsilon| dm < \epsilon$$

が成り立つ。ただしここでは dm を Lebesgue 積分, dx を Riemann 積分とした。

系 3.5.4.

$$\lim_{t \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x+t) - f(x)| dx = 0.$$

3.5.3 連続関数の場合

広義 Riemann 積分可能な符号変化する开区間上の関数は、Lebesgue 積分可能でない可能性がある： $f : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}; x \mapsto \frac{\sin x}{x}$ など。

定理 3.5.5 (連続関数の積分).

- (1) コンパクト集合 $K \subset \mathbb{R}^d$ 上の連続関数 $f : K \rightarrow \mathbb{R}$ について、Lebesgue 積分と Riemann 積分とは等しい。
- (2) 開矩形 (無限でも良い区間の積) $J \subset \mathbb{R}^d$ 上の非負値連続関数 $f : J \rightarrow [0, \infty]$ について、Lebesgue 積分は、値が発散する場合も含め、広義 Riemann 積分に等しい。

[証明].

- (1) 方針 コンパクト集合上の連続関数は有界なので、(2) と違って、 $f \geq 0$ の場合について示して、 $f = f^+ - f^-$ を考えると、一般の場合についても結論を得る。

Riemann 積分と Lebesgue 積分との関係 区間 K を全ての n 方向に 2^n 等分して、そのマス目による分割 $K = K_{n1} + \cdots + K_{nk_n}$ ($k_n = 2^{nN}$) を考える。各ブロック K_{nj} の中の任意の一点 $x_{nj} \in K_{nj}$ をとって $\alpha_{nj} := f(x_{nj})$, $\beta_{nj} := \inf \{f(x) \in \mathbb{R}_{\geq 0} \mid x \in K_{nj}\}$ と定める。すると、Riemann 積分の意味での各小区間 K_{nj} の体積は、Lebesgue 測度 $\mu(K_{nj})$ だから、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^{k_n} \alpha_{nj} \mu(K_{nj}) =: \int f dx$$

と定まる。一方で、 $f_n(x) := \sum_{j=1}^{k_n} \beta_{nj} \chi_{K_{nj}}(x)$, $\delta_n := \max_{1 \leq j \leq k_n} |\alpha_{nj} - \beta_{nj}|$ とおくと、 (f_n) は単調増加な単関数列で、 f の単関数近似になっているから、 f の Lebesgue 積分は

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu =: \int f d\mu$$

と定まる。

両者の一致 ここで, (f_n) は単調増加であり, f の K 上の一様連続性 (Heine-Cantor の定理) より, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ は一様収束で, $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = 0$ だから,

$$\left| \sum_{j=1}^{k_n} \alpha_{nj} \mu(K_{nj}) - \int f_n d\mu \right| \leq \sum_{j=1}^{k_n} |\alpha_{nj} - \beta_{nj}| \mu(K_{nj}) \leq \delta_n \mu(K) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

よって, 両者は一致する.

(2) **方針** σ -有限性と同じ発想で, J に収束するコンパクト集合の単調増加列 (K_n) をとって考える.

積分の定義 広義 Riemann 積分は $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{K_n} f dx = \int_J f dx$ と定義されるのであった. 一方で, 各コンパクト集合 K_n に対して,

この上に台を持つ非負値単関数の単調増加列 (f_n) を $f_n := \sum_{j=1}^{k_n} \alpha_{nj} \chi_{K_{nj}}(x)$ (ただし $\sum_{j=1}^{k_n} K_{nj} = K_n$) と作れるから,

Lebesgue 積分の定義は $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_J f_n d\mu = \int_J f d\mu$ と表せる.

結論 (1) より, コンパクト集合上で Riemann 積分と Lebesgue 積分とは一致するから,

$$\int_J f_n d\mu = \int_{K_n} f_n dx \leq \int_{K_n} f dx = \int_{K_n} f d\mu \leq \int_J f d\mu.$$

$n \rightarrow \infty$ を考えると, 結論を得る.

■

要諦 3.5.6. Riemann 積分では分割区間をいじり, 広義 Riemann 積分では区間で極限を取る. 一方で Lebesgue 積分は単関数列をいじり, 関数列の極限を考える.

第 4 章

実数上の微分論

Riemann 積分が、有界関数に限っていたこと、各点微分可能な関数に議論を限っていたことが不自然であった。関数が積分可能であるための必要十分条件は有界変動性で、積分の逆としての微分概念として適切なものは絶対連続関数（殆ど至る所微分可能な関数）である。

任意の各点可微分な F について、 F' の不定積分が存在するわけではない。すなわち、Lebesgue 積分 $m : L^1(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{L}(\mathbb{R})$ に対して、「殆ど至る所の微分」は引き戻しではあるが、切断ではない。同型を取るためには、 $\mathcal{L}(\mathbb{R})$ を $AC(\mathbb{R})$ に制限する必要がある（絶対連続でない関数は微分は出来ても Lebesgue 積分によって戻ってくることはできない）。

微分の定義が先行した Riemann 積分論とは逆で、Lebesgue 積分論は積分の定義が先にあり、微分は Radon-Nikodym の方法で定義されるので、 $L^1(\mathbb{R})$ への写像として適切な観念は同値類で割ったところの「殆ど至る所の微分」であり、適切な定義域は絶対連続な関数である。そして定理として、 $f \in L^1(\mathbb{R})$ は、ある絶対連続関数 F が存在して、 $F' = f$ a.e. が成り立つことが同値で、 F は定数分の差を除いて一意に取れる。

これにより、微分の描像が明瞭になった。Lebesgue の優収束定理に関する精緻化された描像 3.2.6 が極めて興味深い。一般の空間上での微分論は、定積分の抽象化概念である σ -加法的集合関数論となる。

4.1 \mathbb{R} 上の微分

まず、導関数も \mathbb{R} 値に拡張する。

定理 4.1.1.

$$\forall x \in [a, b] \quad F(x) = \int_a^x f(t) dt \Leftrightarrow F'(x) = f(x)$$

なる条件は、

- (1) Riemann 積分と各点微分に関しては、 $f \in C([a, b]), F \in C^1([a, b])$ について成り立つ。
- (2) Lebesgue 積分と殆ど至る所の微分に関しては、 $f \in L^1([a, b]), F$ は絶対連続な関数に関して成り立つ。

要諦 4.1.2. $f \in L^1([a, b]) \Rightarrow F(x)$ は殆ど至る所可微分で、 f に同値だが、任意の可微分な F に関して逆が成り立つ訳では無い。ここで「可微分関数」なる概念の見直しも必要になる。これが絶対連続性 3.1.12 である。

4.1.1 Dini の導来数

Darboux から Lebesgue に継承された方法は、微分にも適用可能である。

定義 4.1.3 (Dini derivatives). 関数 $f : [a - \delta, a + \delta] \rightarrow \mathbb{R}$ について、4 つの拡張実数

$$\begin{aligned} D^+ f(a) &= \limsup_{h \searrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}, & D_+ f(a) &= \liminf_{h \searrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}, \\ D^- f(a) &= \limsup_{h \nearrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}, & D_- f(a) &= \liminf_{h \nearrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}. \end{aligned}$$

を **Dini の導来数**と呼ぶ.

- (1) $D^+f(a) = D_+f(a)$ のとき, **右導来数を持つ**といい, $f'_+(a)$ で表す.
- (2) $D^-f(a) = D_-f(a)$ のとき, **左導来数を持つ**といい, $f'_-(a)$ で表す.
- (3) $f'_+(a) = f'_-(a)$ のとき, **可微分である**といい, $f'(a)$ で表す.

例 4.1.4. $f(x) = x^{1/3}$ は $x = 0$ にて微分可能で微分係数 $f'(0) = +\infty$ を持つ.

定理 4.1.5 (Dini, U.). 連続関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ の導来数の少なくとも 1 つが $[a, b]$ の殆ど至る所で非負ならば, $f(b) \geq f(a)$ である.

4.1.2 病的な連続関数

命題 4.1.6 (Weierstrass, K. (1875)).

$$f(x) = \sum_{n \in \mathbb{N}} b^n \cos(a^n \pi x) \quad \left(0 < b < 1, a = \text{正奇数}, ab > 1 + \frac{3}{2}\pi \right)$$

は \mathbb{R} 上連続で, すべての点で有限な微分係数 $f'(x)$ を持たない.

命題 4.1.7 (Takagi, T. (1903)).

- (1) $f_n(x) := \min_{n=0,1,\dots,2^n} \left| x - \frac{m}{2^n} \right|$ によって定まる $f_n : [0, 1] \rightarrow [0, 2^{-n-1}]$ は連続関数である.
- (2) $f := \sum_{n=1}^{\infty} f_n$ は一様収束極限だから $[0, 1]$ 上連続である. 任意の $x \in (0, 1)$ 上で有限な微分係数を持たない.

定理 4.1.8. 任意の零集合 $N \subset [0, 1]$ と $\epsilon > 0$ に対して, 非負可積分関数 φ_N が存在し, 不定積分 $\Phi_N(x) := \int_0^x \varphi_N(t) dt$ が $0 \leq \Phi_N(1) - \Phi_N(0) \leq \epsilon$ であり, かつ, 任意の点 $x \in N$ で $\Phi_N'(x) = \infty$ となるようにできる.

系 4.1.9 (一般化された Dini の定理). 連続関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ の導来数 D^+f が $[a, b]$ の殆ど至る所で非負であり, かつ, $[a, b]$ でいたるところ $D^+f \neq -\infty$ ならば, f は広義単調増加である.

4.2 単調増加関数の微分

4.2.1 Vitali の被覆定理

有界変動関数の微分を論ずる鍵となる事実が, 区間塊の任意合併も実は Lebesgue 可測である.

定義 4.2.1.

- (1) $C = \prod_{i \in [n]} [a_i, b_i]$ ($a_i < b_i$) を非自明な閉矩形という.
- (2) 閉矩形族 $\{C_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ が $A \in P(\mathbb{R}^n)$ を **Vitali の意味で被覆する**とは,

$$\forall x \in A \quad \forall \epsilon > 0 \quad \exists \alpha \in \Lambda \quad \text{diam}(C_\alpha) < \epsilon.$$

定理 4.2.2 (Vitali (1907)). (C_α) は A を Vitali の意味で被覆しているとする. このとき, (C_α) から互いに素な非自明な閉立方体を高々可算子選んで,

$$m^* \left(A \cap \left(\sum_{i \in \mathbb{N}} C_i \right)^c \right) = m_n^* \left(A \cap \left(\sum_{i \in \mathbb{N}} C_i \right)^c \right) = 0.$$

系 4.2.3. \mathbb{R}^n における非自明な閉矩形の任意合併は Lebesgue 可測である.

4.2.2 単調増加関数の微分

定理 4.2.4 (Lebesgue). $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ が広義単調増加ならば, f は (a, b) で殆ど至る所有有限な微分係数を持つ.

歴史 4.2.5. Lebesgue 1904 [8] に, f が連続な場合の議論が記載されており, 現代では Vitali の被覆定理を用いる方法が標準.

4.3 項別微分定理

4.3.1 項別微分定理

単調増加関数の微分については, 項別微分が可能である.

定理 4.3.1 (Fubini の項別微分定理 (1915)). $[a, b]$ 上の単調非減少関数列 $\{f_n\}$ が定める級数 $s := \sum_{n \in \mathbb{N}} f_n$ は収束するとする. このとき, (a, b) 上の殆ど至る所で,

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} f'_n = s'.$$

定理 4.3.2 (Lebesgue の密度定理 (1904)). 有界集合 $E \subset \mathbb{R}$ について, ある $a < \inf E$ を用いて, $f(x) := m^*(E \cap (a, x))$ と定める. このとき, 次の2条件が成り立つ:

- (1) E 上殆ど至る所で $f'(x) = 1$. このような点を密度点 (density point) という.
- (2) $E \in \overline{\mathcal{B}(\mathbb{R})}$ ならば, E^c 上殆ど至る所で $f'(x) = 0$.

4.4 有界変動関数の微分

4.4.1 有界変動関数の定義

連続とは限らない関数が, トータルでどれくらい上に動いたか, 下に動いたかを追跡して, 関数を研究することを考える. すると Lebesgue 可積分関数同様, $BV[a, b]_+$ すなわち単調関数のみに注目すれば良い.

定義 4.4.1 (function of bounded variation). 関数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ について,

- (1) $P_f[a, b] := \sup_{\Delta \subset [a, b], |\Delta| < \infty} \sum_{x_i \in \Delta} (f(x_i) - f(x_{i-1}))^+$ を正変動という.
- (2) $N_f[a, b] := \sup_{\Delta \subset [a, b], |\Delta| < \infty} \sum_{x_i \in \Delta} (f(x_i) - f(x_{i-1}))^-$ を負変動という.
- (3) $T_f[a, b] := \sup_{\Delta \subset [a, b], |\Delta| < \infty} \sum_{x_i \in \Delta} |f(x_i) - f(x_{i-1})|$ を全変動という.
- (4) 全変動が有限な関数を, 有界変動であるといい, その全体を $BV[a, b]$ で表す.

命題 4.4.2. $f \in BV[a, b]$ について,

- (1) $f(b) - f(a) = P_f[a, b] - N_f[a, b]$.
- (2) $T_f[a, b] = P_f[a, b] + N_f[a, b]$.

命題 4.4.3. 実数 $a < c < b$ について,

- (1) $P_f[a, b] = P_f[a, c] + P_f[c, b]$.
- (2) $N_f[a, b] = N_f[a, c] + N_f[c, b]$.
- (3) $T_f[a, b] = T_f[a, c] + T_f[c, b]$.

系 4.4.4 (有界変動関数の特徴付け). $f \in \text{Map}([a, b]; \mathbb{R})$ について, 次の2条件は同値.

- (1) $f \in BV[a, b]$.
- (2) f は有界な広義単調増加関数の差として表せる.

系 4.4.5. $f \in BV[a, b]$ は, 単調増加関数 g, h を用いて $f = g - h$ と表せるとする. このとき,

$$T_g[a, x] \geq P_f[a, x], \quad T_h[a, x] \geq N_f[a, b].$$

4.4.2 有界変動関数の微分

定理 4.4.6 (Lebesgue). $f \in BV[a, b]$ ならば, f は (a, b) 上殆ど至る所で有限な微分係数を持つ.

定義 4.4.7 (saltus). $\delta f(x) := \inf_{h>0} f(x+h) - \sup_{h>0} f(x-h)$ を, $x \in (a, b)$ における跳躍量という,

定理 4.4.8. $f \in BV[a, b]$ ならば, $[a, b]$ 上の不連続点は高々可算個である.

4.4.3 変動関数の連続性

定理 4.4.9. $f \in BV[a, b]$ が連続ならば, $P_f[a, x], N_f[a, x], T_f[a, x]$ も連続.

4.5 微積分学の基本定理

4.5.1 単調増加関数論：微分は積分の切断

まず, $D: BV[a, b] \rightarrow L^1([a, b])$ を示す.

定理 4.5.1 (Lebesgue). 単調増加関数 $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ については,

$$\int_a^b f'(x) dx \leq f(b) - f(a)$$

が成り立つ.

例 4.5.2 (真の不等号が成り立つとき (Lebesgue 1904)). Cantor 集合 P_C 上だけで増加する関数を構成すると, 等号は不成立.

系 4.5.3. $f \in BV[a, b]$ の導関数 f' は可積分.

4.5.2 不定積分論

定理 4.5.4 (Lebesgue (1904)). 可積分関数 $f \in \mathcal{L}^1([a, b]; \mathbb{R})$ について, $F(x) := \int_a^x f(t) dt$ は殆ど至る所微分可能で, $F'(x) = f(x)$.

4.5.3 有界変動関数論：積分は微分の切断

微分 $BV[a, b] \rightarrow L^1([a, b])$ は, 始域と終域を $C([a, b])$ 上に限れば全単射である.

定理 4.5.5 (Lebesgue (1902)). 連続関数 $f \in C([a, b])$ は, (a, b) 上殆ど至る所で有限な微分係数を持つとする. このとき, 次の2条件は同値.

- (1) $f' \in \mathcal{L}^1([a, b])$.
- (2) $f \in BV[a, b]$.

このとき, 次が成り立つ:

$$f(x) = f(a) + \int_a^x f'(t) dt.$$

4.6 絶対連続性

不定積分を特徴付けることを考える

前節で、殆ど至る所微分可能な $f \in C([a, b])$ が不定積分であるための必要十分条件を有界変動性で特徴付けたが、一般の関数 $f \in \text{Map}([a, b], \mathbb{R})$ に迫りたい。絶対連続性は Vitali (1904) が導入した概念である。集合関数 Φ の絶対連続性は、実数上の関数 $F(x) := \Phi((-\infty, x])$ を含意する。こうして定まる、実数上の関数の絶対連続性には、

$$C^1([a, b]) \subset \text{Lip}[a, b] \subset \text{Lip}^\alpha[a, b] \subset UC([a, b]) \subset C([a, b])$$

なる関係と

$$\text{Lip}[a, b] \subset \text{AC}[a, b] \subset \text{BV}[a, b] \subset \{f \text{ は殆ど至る所微分可能} \}$$

なる関係がある。

4.6.1 不定積分の絶対連続性

ここでの絶対連続性は Lebesgue 測度に対する絶対連続性である。 σ -加法的集合関数の間の2項関係に一般化されたものを広義と呼び分ける。元々の Lebesgue (1904) の仕事は、 $F(x) := \Phi((-\infty, x])$ の絶対連続性を定義したことになる。

定義 4.6.1 (集合関数の絶対連続性). (X, \mathcal{M}, μ) 上の実数値集合関数 $F: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ が μ -絶対連続であるとは、次が成り立つことをいう：

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall E \in \mathcal{M} \mu(E) < \delta \Rightarrow |F(E)| < \epsilon.$$

定理 4.6.2. $f \in L^1(X, \mathcal{M}, \mu; \mathbb{R})$ の不定積分 $F: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}; E \mapsto F(E) := \int_E f d\mu$ ($E \in \mathcal{M}$) は、 μ -絶対連続である。

4.6.2 \mathbb{R} 上の不定積分の特徴付け

不定積分であるとは絶対連続であるということである

\mathbb{R} 上では逆に「絶対連続ならば殆ど至る所微分可能」が言える。一般に、任意の σ -有限な測度空間では逆が成り立ち、これを Radon-Nikodym の定理という。

定義 4.6.3 (実数上の関数の絶対連続性). 関数 $F: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ が絶対連続であるとは、次を満たすことをいう：

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall \{x_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subset [a, b] \sum_{i=1}^{\infty} (x_{i+1} - x_i) < \delta \Rightarrow \sum_{i=1}^{\infty} |F(x_{i+1}) - F(x_i)| < \epsilon.$$

定理 4.6.4 (\mathbb{R} 上の不定積分の特徴付け Lebesgue (1904)). 関数 $F: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ について、次の2条件は同値：

- (1) ある $f \in L^1([a, b])$ が存在して、 $F(x) = \int_a^x f(t) dt$ が成り立つ。
- (2) $F \in \text{AC}[a, b]$.

このとき、次が成り立つ：

$$F(x) = F(a) + \int_a^x F'(t) dt.$$

歴史 4.6.5. 不定積分の x の関数としての絶対連続性は、Lebesgue (1904) の脚注に述べられているが、同じ概念を独立に発見して「絶対連続性」という名称と共に導入したのが Vitali (1904) であることが、Lebesgue の第二版 (1928) に述べられている。

4.6.3 絶対連続性の十分条件

命題 4.6.6. Lipschitz 連続ならば絶対連続である。

4.6.4 絶対連続性の必要条件

4.7 有界変動関数の Lebesgue 分解

一般に不定積分は定数分の不定性がある。定数とは、絶対連続かつ特異な関数である。この性質を、Lebesgue 積分の観点で見ると「絶対連続部分と特異部分への Lebesgue 分解は、定数分の不定性を除いて一意」という。

定義 4.7.1 (singular function). 有界変動関数 $s \in BV[a, b]$ が (a, b) 上殆ど至る所で $s'(x) = 0$ を満たすとき、**特異関数**である。 $[a, b]$ 上で絶対連続かつ特異な関数は恒等的に定数である。

例 4.7.2 (特異関数の例 Lebesgue (1928)).

系 4.7.3 (Lebesgue decomposition). $F \in BV[a, b]$ に対して、特異関数 $s \in BV[a, b]$ が存在して、

$$F(x) = \int_a^x F'(t)dt + s(x)$$

が成り立つ。

要諦 4.7.4. これは定理 4.5.5 の一般化である。

4.8 部分積分と置換積分

定理 4.8.1 (部分積分). $f, g \in L^1([a, b]; \mathbb{R})$ について、その不定積分を $F(x), G(x) \in AC[a, b]$ とする。このとき、次が成り立つ：

$$\int_a^b F(x)g(x)dx = [F(x)G(x)]_{x=a}^{x=b} - \int_a^b f(x)G(x)dx.$$

定理 4.8.2 (置換積分). $f, g \in L^1([a, b]; \mathbb{R})$ は $g \geq 0$ a.e. を満たすとする。このとき、 g の不定積分 $G \in AC[a, b]$ が $G(a) = a, G(b) = b$ を満たすならば：

$$\int_a^b f(t)dt = \int_a^b f(G(x))g(x)dx.$$

4.9 曲線の長さ

\mathbb{R}^n の曲線が長さ確定であることは、各成分が実数値関数として有界変動であることに同値 (Jordan)。

4.10 Denjoy 積分

Lebesgue 可積分関数は、「絶対連続関数が存在して $F' = f$ を満たす」とこと同値であることを見てきた。この「絶対」連続性の語源は積分の「絶対」収束である。したがって、一般の関数に対して $\exists F \in C([a, b]) F' = f$, ただし $F' = f$ とは導来数の 1 つが f の値と一致することとした、として可積分関数の範囲を拡大することが出来る。これが Denjoy (1916) のアイデアである。

4.11 完全加法的集合関数の値域

定積分を一般の測度空間上で考えることは、完全加法的集合関数を考えることに等しい。微分論はここまで抽象化される。

第 5 章

完全加法的集合関数

一般の測度空間上の微分論を展開することを考える。そのために、不定積分の σ -加法的な集合関数としての側面に注目して理論を開始する。すると、不定積分とは、有限な σ -加法的な集合関数のうち、絶対連続なものとして特徴付けられる。

5.1 加法的集合関数とその変動

定義 5.1.1 ((positive) measure, complex measure, signed measure / real measure). \mathcal{A} を σ -代数とする。

- (1) σ -代数 \mathcal{M} の上で定義された σ -加法的関数 $\mu: \mathcal{M} \rightarrow [0, \infty]$ を (正) 測度という。値域が \mathbb{R}_+ に含まれるとき有限であるという。^a
- (2) σ -代数 \mathcal{M} の上で定義された σ -加法的関数 $\mu: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{C}$ を複素測度という。
- (3) 値域が \mathbb{R} に含まれる複素測度を符号付測度または実測度という。

^a σ -有限の語に併せるためにこうしたが、有界と言っても良いだろう。しかしおそらく、有界の語は変動について使う。そしてこの 2 つは基本的には同値である。

5.1.1 完全加法性の必要条件

加法的集合関数の終域を $\overline{\mathbb{R}}$ とし、公理に $\exists B \in \mathcal{G} \ \Phi(B) < \infty$ を加えて定義することもある [3].

定義 5.1.2 (σ -additive set function / (finite) signed measure / charge). 可測空間 (X, \mathcal{G}) 上の実集合関数 $\Phi: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ が、

- (1) 完全加法性 $\Phi\left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi(E_n)$ を満たす時、これを加法的集合関数または符号付き測度という。
- (2) $\text{Im } \Phi \subset \mathbb{R}_{\geq 0}$ のとき単調増加といい、 $\text{Im } \Phi \subset \mathbb{R}_{\leq 0}$ である時を単調減少という。

例 5.1.3 (加法的集合関数の表現).

- (1) 有界な測度 $\mu: \mathcal{G} \rightarrow [0, \infty)$ について、ある直和分解 $X = X_1 + X_2, a, b \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ に対して、 $\Phi(-) = a\mu(- \cap X_1) - b\mu(- \cap X_2)$ とおくと、これは再び完全加法性を満たす。これは $a = 0$ または X_1 が零集合である時単調減少となり、 $b = 0$ または X_2 が零集合である時単調増加となる。次の補題より、 $\mu(\emptyset) = 0$ であるから、
- (2) (集合関数と見たときの積分) 測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) と X 上の μ -可積分な関数 $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ について、 $\Phi(-) = \int_{-} f(x) d\mu(x)$ は加法的集合関数である。
- (3) (Dirac 測度) $\delta(E) = \begin{cases} 1, & 0 \in E, \\ 0, & 0 \notin E. \end{cases}$

補題 5.1.4.

- (1) (単位元の保存) 加法的な集合関数は $\Phi(\emptyset) = 0$ を満たす。

(2) (well-definedness) 単調増加な加法的集合関数は $\forall_{E_1, E_2 \in \mathcal{G}} E_1 \subset E_2 \Rightarrow \Phi(E_1) \leq \Phi(E_2)$.

[証明].

- (1) $\emptyset + \emptyset = \emptyset^{\dagger 1}$ であるから、加法性より $\Phi(\emptyset) = \Phi(\emptyset) + \Phi(\emptyset)$.
 (2) $\text{Im } \Phi \subset \mathbb{R}_{\geq 0}$ のとき、任意の $E_1 \subset E_2$ について、 $\Phi(E_2) = \Phi(E_1) + \Phi(E_2 \setminus E_1) \geq \Phi(E_1)$ を満たし、単調減少であるときも同様である.

命題 5.1.5 (極限の保存). $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ を加法的集合関数、 (A_n) を \mathcal{G} -列とする.

- (1) (A_n) が単調であるとき、 $\Phi(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n)$.
 (2) Φ が単調増加ならば、 $\Phi(\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n) \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n)$, $\Phi(\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n)$. したがって特に、 (A_n) が収束するならば $\Phi(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n)$ である.
 (3) しかし実は一般に、 (A_n) が収束するとき、 $\Phi(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n)$ である.

[証明].

- (1) 単調増加列 (A_n) の定める互いに素な集合の列 $(A_n \setminus A_{n-1})_{n \in \mathbb{N}} =: (B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ と単調減少列の定める互いに素な列 $(A_{n-1} \setminus A_n)_{n \in \mathbb{N}} =: (B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ にそれぞれ注目して加法性を用いる.

単調増加列 $\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n B_i$ より、

$$\Phi\left(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n\right) = \Phi\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n B_i\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi\left(\sum_{i=1}^n B_i\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n)$$

が成り立つ. 最右辺は実数上の有界な単調列であるから確かに収束する. 最左辺は集合の単調列は極限集合と持つこと 1.5.3 より.

単調減少列 補集合が定める単調増加列 $(A_1 \setminus A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ に注目すれば良い:

$$\Phi(A_1) - \Phi\left(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n\right) = \Phi\left(\lim_{n \rightarrow \infty} (A_1 \setminus A_n)\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_1 \setminus A_n) = \Phi(A_1) - \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n).$$

- (2) 単調増加な加法的集合関数とは、有限な測度のことに他ならない. したがって、測度の性質 2.4.6(6),(7) より.
 (3) Jordan 分解 $\Phi = \bar{V} - |V|$ を考えると、それぞれは測度であるから、極限を保存する. したがって任意の加法的集合関数は極限を保存する.

要諦 5.1.6 (この極限を保つという性質、ある種の連続性なのでは?). (1) は測度の性質 2.4.6(4),(5) の結果と同値である. この証明には、符号付測度にはない測度特有の性質である $\Phi \geq 0$ を使っていないため、そのまま拡張できる. 違いは、符号付測度は有界だから (5) の単調減少列に必要な有界性条件 $\mu(A_1) < \infty$ は自明に満たす. (2) で (1) を特別な場合として含んでいることに注意.

5.1.2 変動と測度の Jordan 分解

集合関数の上限は任意の集合で定まり、変動という. これは測度になり、加法的集合関数は2つの測度の差として表現される.

Φ が定める集合関数 $V : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ が考えられる. この対応 $V_- : \text{Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R}) \rightarrow \text{Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R})$ は完備化というか、単調化というか、そういう操作である. これは、極限構成 $\bar{V} := \sup \Phi, V := \inf \Phi$ と、0 を挟んで双対を結合 $V := \bar{V} - V$ することで定める. すると、これも有界な符号付測度となる. これは変分・変動という意味も持つ. これは一様ノルムに他ならない? これが、積分論における長さ積分や、コンパクト集合上の最大値などと同じ使い方ができる. だが裏を返すと、 Φ の式を適

^{†1} $\emptyset \cup \emptyset = \emptyset$ かつ $\emptyset \cap \emptyset = \emptyset$ という主張.

切なタイミングで V を用いて抑える工程が証明の難所となるし、この不等式評価は本質的に極限が定める射なのであるから、その背後の圏論的構造が見えにくくなる。非常に不思議である、任意に取った $\Phi \in \sigma\text{-Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R})$ が、標準的に取れる同じ空間の元 $V_\Phi \in \sigma\text{-Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R})$ によって評価が進むのである。これは \mathcal{G} に入っている豊かな構造から由来しているはずだが、他で見たことのない奇妙な数理構造である。Jordan 分解の証明の、普遍性を用いた証明で思いついたのだが、これはおそらく圏 $\sigma\text{-Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R})$ の中で直和対象 $\bar{V} + \underline{V}$ か Φ かは知らないが、同型を除いて一意ということの証明である。全く同じような消息が表現定理・分解定理と呼ばれるものなのかもしれない。いや、そもそも Jordan 分解は表現である (例 5.1.3)。

定義 5.1.7 (upper variation, lower variation, total variation).

- (1) $\bar{V}(\Phi, E) = \bar{V}_\Phi(E) := \sup\{\Phi(A) \in \mathbb{R} \mid A \subset E \text{ かつ } A \in \mathcal{G}\}$ を上変動という。
- (2) $\underline{V}(\Phi, E) = \underline{V}_\Phi(E) := \inf\{\Phi(A) \in \mathbb{R} \mid A \subset E \text{ かつ } A \in \mathcal{G}\}$ を下変動という。
- (3) このとき $\Phi(\emptyset) = 0$ より、 $\underline{V}_\Phi(E) \leq 0 \leq \bar{V}_\Phi(E)$ である。 $V(\Phi, E) = V_\Phi(E) := |\bar{V}(\Phi, E)| + |\underline{V}(\Phi, E)|$ を全変動または絶対変動という。

補題 5.1.8 (変動は有界である). 加法的集合関数 $\Phi: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ の変動 Φ を考える。

- (1) $V(X) = \infty$ ならば、次を満たす集合列 (X_n) が存在する: $X_{n+1} \subset X_n, V(X_n) = \infty, |\Phi(X_n)| \geq n$.
- (2) $\underline{V}, \bar{V}, V: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ が定まる (値が全て有限である).^{†2}
- (3) $\Phi: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ は (有限であるだけでなく) 有界である。
- (4) したがって V も有界である。

[証明].

- (1) $n = 0$ のときは $X_0 := X$ と定めれば良い。仮定より、この上での変動は $V(X_0) = V(X) = \infty$ で、 $\Phi(X)$ の値は知らないが $|\Phi(X_0)| \geq 0$ ではある。 $n > 0$ として、 $V(X_n) = \infty, |\Phi(X_n)| \geq n$ とする。このとき、 $\bar{V}_\Phi(X_n) = \infty$ または $\underline{V}_\Phi(X_n) = -\infty$ である。つまり、 $\sup_{A \subset X_n} |\Phi(A)| = \infty$ 。

ここで単に $|\Phi(E)| \geq n+1$ を満たす $E \subset X_n$ をとって、 $V(E) = \infty$ の性質が引き継がれない。そこで、 $|\Phi(E)| \geq |\Phi(X_n)| + (n+1)$ を満たす $E \subset X_n$ を取る。一般に、任意の $A, E \subset X_n$ について、加法性より

$$\Phi(A) = \Phi(A \cap E) + \Phi(A \cap (X_n \setminus E))$$

だから、 $|\Phi(A)|$ の値は

$$|\Phi(A)| \leq |\Phi(A \cap E)| + |\Phi(A \cap (X_n \setminus E))| \leq |V(E)| + |V(X_n \setminus E)|$$

と評価できる。 $A \in \mathcal{G} \cap P(X_n)$ を変数とみたとき、最左辺の上限は ∞ であるから、最右辺の上限も ∞ である。したがって、 $V(E) = \infty$ または $V(X_n \setminus E) = \infty$ 。

ここまで一般論であり、以降 $E \subset X_n$ の構成がうまくいっていることをみる。前者の時は、 $X_{n+1} := E$ と定めると、 $|\Phi(E)| \geq |\Phi(X_n)| + (n+1) \geq 2n+1 \geq n+1$ 。後者の時は、 $X_{n+1} := X_n \setminus E$ と定めると、 E での値を十分大きく取っているので、 $|\Phi(X_{n+1})| = |\Phi(X_n) - \Phi(E)| = |\Phi(E)| - |\Phi(X_n)| \geq n+1$ 。

- (2) $V: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ が有界と示せば、 \bar{V}, \underline{V} が有界であることが必要。仮に有界でないとすると、(1) を満たす単調減少列 (X_n) が取れる。これは収束するから、この極限集合 $E := \lim_{n \rightarrow \infty} X_n$ について、 $\Phi(E) = \infty$ である。よって、 $\Phi: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ が有界であることに矛盾。
- (3) 関数 $|\Phi|: \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ の像は半径 $|V(X)| \in \mathbb{R}$ の閉円板に収まる。
- (4) (3) より \bar{V}, \underline{V} も有界。したがって V も有界。

■

要諦 5.1.9 (有界な符号付測度の全変動は有界である). (1) が一番の消息を洗い出している、こちら辺で Hahn の分解定理の音が聞こえてくる。 X_n 上の変分 $V(X_n)$ が無限大だと、うまく選べばその無限の泉を含んだままの降下列 $X_{n+1} \subset X_n$ を作る算譜が存在する。しかしその算譜がまさに深淵で、まさにどこから拾ってきたのか分からない不等式評価を集合関数で展開している。

^{†2} 構成 $V_-: \text{Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R}) \rightarrow \text{Map}(\mathcal{G}, \mathbb{R})$ が全射であることをいう。

定理 5.1.10 (変動も加法的である：Jordan decomposition).

- (1) 符号付測度 $\Phi: \mathfrak{G} \rightarrow \mathbb{R}$ の定める変動 $\bar{V}, \underline{V}, V: \mathfrak{G} \rightarrow \mathbb{R}$ も再び符号付測度である。
 (2) $\Phi = \bar{V} + \underline{V}$ を満たす。

[証明].

- (1) \bar{V} の加法性を導く. $E = \sum_{n=1}^{\infty} E_n$ を任意にとる.

$$\bar{V}\left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \bar{V}(E_n) \quad \text{任意の } A \subset E \text{ について, } A \text{ に } (E_n) \text{ が定める分割を入れると, 各 } \bar{V}(E_n) \text{ はそこでの } \Phi(A \cap E_n) \text{ の値の上限であるから, } \Phi(A) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi(A \cap E_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \bar{V}(E_n). \text{ 最左辺の値の上限が } \bar{V}\left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n\right) \text{ である.}$$

$$\bar{V}\left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n\right) \geq \sum_{n=1}^{\infty} \bar{V}(E_n) \quad (E_n) \text{ の部分集合列 } (A_n) \text{ を, } \Phi(A_n) > \bar{V}(E_n) - \frac{\epsilon}{2^n} \text{ を満たすようにとる (このような } A \text{ が存在する). すると, } \Phi \text{ の加法性より, } \bar{V}(E) \geq \Phi\left(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(A_n) > \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{V}(E_n) - \epsilon.$$

- (2) Jordan 分解を導く. 任意の $E \in \mathfrak{G}$ をとる. 任意の $A \subset E$ に対して, $\Phi(E) = \Phi(A) + \Phi(E \setminus A)$ である.^{†3}これに対して,

$$\Phi(A) = \Phi(E) - \Phi(E \setminus A) \begin{cases} \geq \Phi(E) - \bar{V}(E) \\ \leq \Phi(E) - \underline{V}(E) \end{cases}$$

と評価できる. 最左辺の上限を考えると $\bar{V}(E) + \underline{V}(E) \leq \Phi(E)$ を得て, 下限を考えると $\bar{V}(E) + \underline{V}(E) \geq \Phi(E)$ を得る.^{†4}

- (3) $\underline{V} := \Phi - \bar{V}$ の完全加法性は, 右辺から従う.

■

要諦 5.1.11 (普遍性を用いた証明?). この (1) と各変動の値域を考え合わせると, $\bar{V}, |\underline{V}|, V$ は有限な測度 $\mathfrak{G} \rightarrow [0, \infty)$ となる. すると, 性質 2.4.6 にあるような, 単調性, 劣加法性などが一気に出てくる. すると, (2) は, 符号付測度 Φ は上下変動と呼ばれる測度 $\bar{V}, |\underline{V}|$ を (ある種の極限構成で) 定め, それらの和で表せる: $\Phi = \bar{V} - |\underline{V}|$. 上に単調なやつと下に単調なやつの 2 独立成分があったから, 全体では単調とは限らないのである. 直感的には Jordan 分解とは, $\Phi(E)$ の値は, Φ の制限の上限値と下限値を探索してきて, 足し合わせれば良い. それにしても (2) の証明はどこから思いつくんだと思うのだが, これが普遍性を利用した証明に似ていないか? 片方ずつ射を構築して同型であることを導いているのである.

Jordan 分解の風景

加法的集合関数 $\mathfrak{G} \rightarrow \mathbb{R}$ とは, \mathfrak{G} は可算和については完備な Boole 代数 (多分, 少なくとも束) であり, \mathbb{R} は線型順序であるが, 加法性の要求として \mathfrak{G} の root は原点 0 に対応する. すると \mathfrak{G} の一層目の歩み出しは完全に 2 つの方向に別れるはずであり, 片方は $\mathbb{R}_{\geq 0}$ へ, 片方は $\mathbb{R}_{\leq 0}$ へ写される. するとそのあとの葉は, 加法性により写される値は決定する.^aこれが完全に加法的集合関数 $\mathfrak{G} \rightarrow \mathbb{R}$ の振る舞いを定めるだろう. では, それぞれの世界では測度の消息 (単調・劣加法) を持つか? ということが自然な疑問となる. Jordan 分解はこの疑問への肯定的な答えである.

^a CABA としての $P(X)$ の特徴付けが思い出される. complete atomic でないとこの議論はできない.

^{†3} 私の自然な方針としては, A が Φ の上限を出すときの $A \subset E$ であるとき, $E \setminus A$ は Φ の下限を取ることを示す方針である. すると簡単な論理パズルとなる.

^{†4} まじでこんな証明どこから思いつくんだと思うのだが, これが普遍性を利用した証明に似ていないか? 片方ずつ射を構築して同型であることを導いているのである.

5.1.3 Hahn の分解定理：符号付測度の定める分解

軌道分解みたいな．というか本当に軌道分解の双対じゃないのか．いや，「定める同値関係」の類か？

Φ は束 \mathcal{G} を 2 つの半束に分ける．まさか完全加法性だけからこんな大樹が咲くとは思わなかった．まず根が対応する．

この事実にかまけて，複素数値加法的集合関数 $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{C}$ については，全変動を $V_\Phi(E) := \sup \sum_{j=1}^n |\Phi(E_j)|$ と定め，ここから完全加法性を証明する．

定理 5.1.12 (Hahn decomposition theorem (1921)). X の加法的集合関数 $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ に対して， X の直和分割 $A + (X \setminus A)$ であって， $\underline{V}(A) = \overline{V}(X \setminus A) = 0$ を満たすものが存在する．

[証明].

方針 この A は， $A := \arg \max_{A \subset X} \overline{V}(X)$ と定めれば良い．が，直接ではなく，列 (A_n) の極限として構成する．

(A_n) の準備 $\overline{V}(X) = \sup_{A \subset X} \Phi(A)$ であったから，各 $n \in \mathbb{N}$ に対して， $(\overline{V}(A_n) + \underline{V}(A_n) =) \Phi(A_n) \geq \overline{V}(X) - \frac{1}{2^n}$ なる $A_n \in \mathcal{G}$ が取

れる．すると $(0 \leq) \overline{V}(X \setminus A_n) \leq \frac{1}{2^n}$ かつ $(0 \geq) \underline{V}(A_n) \geq -\frac{1}{2^n}$ であることを示す．

(a) $\overline{V}(A_n) \geq \Phi(A_n) \geq \overline{V} - \frac{1}{2^n} = \overline{V}(A_n) + \overline{V}(X \setminus A_n) - \frac{1}{2^n}$ より， $\frac{1}{2^n} \geq \overline{V}(X \setminus A_n)$ ．

(b) $\underline{V}(A_n) = \overline{V}(X) - \overline{V}(A_n) - \frac{1}{2^n} \geq -\frac{1}{2^n}$ ．

構成の成功 ここで， $A := \liminf_{n \rightarrow \infty} A_n$ とおけば，これが定理の条件を満たす．実際，

(a) $X \setminus A = \limsup_{v \rightarrow \infty} \cap_{n=1}^{\infty} \cup_{v=n}^{\infty} (X \setminus A_v) \subset \cup_{v=n}^{\infty} (X \setminus A_v)$ より，有限な測度 \overline{V} の劣加法性から， $\overline{V}(X \setminus A) \leq \sum_{v=n}^{\infty} \overline{V}(X \setminus A_v) = \frac{1}{2^{n-1}}$ ． n は任意より， $\overline{V}(X \setminus A) = 0$ ．

(b) $|\underline{V}|$ も有限な測度だから， $|\underline{V}(A)| \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} |\underline{V}(A_n)| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n} = 0$ ．

■

要諦 5.1.13 (Hahn 分解とは， X の Φ が最大値を取る点と最小値を取る点とへの分解になっている)．構成の方針は $A := \arg \max \overline{V}(X)$ である． $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ は，束 \mathcal{G} を下から辿ると，1 歩目で正か負かに踏み出す（踏み出さない場合，すなわち $\Phi(\{a\}) = 0$ なる $a \in A$ が存在する場合は A の取り方の一意性が崩れるが，いずれにしろ本質的に一意である)．このような $\{a\}$ の全体 A は，完全加法性より， $A := \arg \max \overline{V}(X)$ となる部分集合 $A \in \mathcal{G}$ を探せば良い．これは $\forall E \in \mathcal{M} \quad \Phi(E \cap A) \geq 0$ を満たし，このような集合を**正值集合**という．

例 5.1.14. Φ が関数 $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ が定める定積分とする．このとき，Hahn 分解は $P = \{f \geq 0\}$ によって与えられる．

定理 5.1.15 (Hahn 分解の一意性). $X = P_1 + P_1^c = P_2 + P_2^c$ を， X の Φ に関する 2 つの Hahn 分解とする．このとき， $P_1 \triangle P_2, P_1^c \triangle P_2^c$ は Φ に関して正值かつ負値である．

$$\forall E \in \mathcal{M} \quad \Phi(E \cap (P_1 \triangle P_2)) = 0 \wedge \Phi(E \cap (P_1^c \triangle P_2^c)) = 0.$$

5.1.4 全変動の特徴付け

集合関数ではなく，一般の関数にも使える表現となる．集合関数には Hahn の分解定理が成り立ち，全変動とは，最大値を取る集合 P での値と P^c での値との差として特徴付けられてしまうので，冗長な表現に見える．

系 5.1.16 (全変動の特徴付け). $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ を加法的集合関数とする．集合 $E \subset X$ のあらゆる有限分割 $E = \sum_{i=1}^n E_i$ を考えるとき，

$$V(E) = \sup \sum_{j=1}^n |\Phi(E_j)| \text{ と表現できる.}$$

[証明].

方針 一般に $V(E_j) \geq |\Phi(E_j)|$ より, $V(E) = \sum_{j=1}^n V(E_j) \geq \sum_{j=1}^n |\Phi(E_j)|$ である. あとは, ある分割が存在して, 等号が成立することを示せば良い.

正しい分解 等号を成立させる分解は, Hahn の分解 5.1.12 による $X = A + B$ である: $\underline{V}(A) = 0, \bar{V}(B) = 0$. $E_1 := E \cap A, E_2 := E \cap B$ とすれば,

$$\begin{aligned} V(E) &= V(E_1) + V(E_2) = \bar{V}(E_1) + |\underline{V}(E_1)| + \bar{V}(E_2) + |\underline{V}(E_2)| \\ &= \bar{V}(E_1) + |\underline{V}(E_2)| = \Phi(E_1) + |\Phi(E_2)|. \end{aligned}$$

■

要諦 5.1.17. このような, 集合の分割の構造に仮託した表現が測度論・積分論の本質だろう. これを暴き出すのが加法的集合関数論. だがこの定理はどうも気に入らない, 任意の有限分割というよりも, 本質は Hahn の分解である.

5.1.5 有界変動関数について

符号付き測度は必ず有界変動であった. よって, 定積分を定める密度関数は有界変動である必要がある. そして完全加法的集合関数が2つの単調関数の和で表せることから, その密度関数についても同様の結果が成り立つ. これが有界変動関数の理論である.

5.2 絶対連続集合関数と特異集合関数

加法的集合関数は2つの有限測度の差 (Jordan 分解) で表現されること, Hahn の分離を定めることを見た. このような加法的集合関数のうち, 絶対連続なクラスに注目すると必ず積分の形で表現され, 全ての加法的集合関数は絶対連続な部分と特異な部分の和として理解できる (Radon-Nikodym の定理).

5.2.1 定義と特徴付け

不定積分は加法的集合関数 5.1.3 の中でも特に, 絶対連続なクラスに一致する. 絶対連続とは, μ -零集合での値は0であること. 対偶を取れば, 0でない値を取るならばその集合の測度は0でない. 特異とは, 台が μ -零集合であること.

定義 5.2.1 (absolutely continuous). 測度空間 (X, \mathcal{B}, μ) 上の加法的集合関数 $\Phi: \mathcal{B} \rightarrow \mathbb{R}$ について,

- (1) Φ が一般の加法的集合関数 Ψ について**絶対連続**とは, $\forall E \in \mathcal{B} \quad |\mu|(E) \Rightarrow \nu(E) = 0$ が成り立つことをいう.
- (2) Φ が μ に関して**絶対連続**とは, $\forall E \in \mathcal{B} \quad \mu(E) = 0 \Rightarrow \Phi(E) = 0$ が成り立つことをいう.
- (3) Φ が一般の加法的集合関数 Ψ について**特異**とは, $\exists N_0 \in \mathcal{M} \quad |\Phi|(N_0) = |\Psi|(N_0^c) = 0$ がなりたつことをいう.
- (4) Φ が μ に関して**特異**とは, $\exists E_0 \in \mathcal{B} \quad \mu(E_0) = 0 \wedge [\forall E \subset X \setminus E_0 \quad \Phi(E) = 0]$ が成り立つことをいう. すなわち, $\exists E_0 \in \mathcal{B} \quad \forall E \in \mathcal{B} \quad \Phi(E) = \Phi(E \cap E_0)$ である.
- (5) Φ が**連続**であるとは, $X = \mathbb{R}^d$ の一点集合 (したがって高々可算な集合) E について $\Phi(E) = 0$ を満たすことをいう. 一方で, 高々可算な集合 $A \in \mathcal{B}$ が存在して $\Phi(\mathbb{R}^d \setminus A) = 0$ を満たすものを**純粋不連続**であるという.

絶対連続かつ特異な集合関数は零関数 $\Phi = 0$ に限る.

例 5.2.2. 加法的集合関数 Φ について, 正変動と負変動とは互いに特異である: $\Phi^+ \perp \Phi^-$.

定理 5.2.3 (絶対連続性・特異性の変動による特徴付け).

- (1) Φ が絶対連続であることと, $\bar{V}_\Phi, \underline{V}_\Phi$ がいずれも絶対連続であることは同値.

(2) Φ が特異であることと, $\bar{V}_\Phi, \underline{V}_\Phi$ がいずれも特異であることは同値.

[証明].

- (1) \Rightarrow Φ を絶対連続とする. 任意に μ -零集合を取った時に, $\bar{E} = \underline{E} = 0$ を示せば良い. いま, $\forall_{A \subset E} \mu(A) = 0$ だから $\Phi(A) = 0$ で, $\bar{V}(E) \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{A \subset E} \Phi(A) = 0$.
- \Leftarrow 任意に μ -零集合を取った時に $\bar{E} = \underline{E} = 0$ を仮定すると, Jordan 分解 5.1.10 より, $\Phi(E) = \bar{V} - |\underline{V}| = 0 - 0 = 0$.
- (2) \Rightarrow Φ を特異とすると, μ -零集合 $E_0 \in \mathcal{G}$ が存在して, $\forall_{E \subset E_0^c} \Phi(E) = 0$. この時, 任意の $E \subset E_0^c$ について, $(0 \leq) \bar{V}(E) \leq \bar{V}(E_0^c) = \sup_{E \subset E_0^c} \Phi(E) = 0$.
- \Leftarrow \bar{V}, \underline{V} を特異とすると, μ -零集合 $E_1, E_2 \in \mathcal{G}$ が存在して, $\forall_{E \subset E_1^c} \bar{V}(E) = 0$ かつ $\forall_{E \subset E_2^c} \underline{V}(E) = 0$. $E_0 := E_1 \cup E_2 \in \mathcal{G}$ と定めると, 任意の $E \subset E_0^c = E_1^c \cap E_2^c$ について, $\Phi(E) = \bar{V}(E) - |\underline{V}(E)| = 0 - 0 = 0$.

■

系 5.2.4 (絶対連続性・特異性の線型伝播). Φ, Ψ をともに絶対連続とし, $a, b \in \mathbb{R}$ とする. $F := a\Phi + b\Psi$ も絶対連続である.

定理 5.2.5 (絶対連続性の ϵ - δ 論法による特徴付け). 任意の広義実数値加法的集合関数 $\Phi: \mathcal{G} \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ について, (2) \Rightarrow (1) が成り立つ. Φ が有限であるとき, (1) \Rightarrow (2) も成り立つ.

- (1) Φ は絶対連続である.
- (2) $\forall_{\epsilon > 0} \exists_{\delta > 0} \forall_{E \in \mathcal{G}} \mu(E) < \delta \Rightarrow |\Phi(E)| < \epsilon$.

(2) の条件を, 狭義に絶対連続ともいう [3].

[証明].

- (2) \Rightarrow (1) 任意の μ -零集合 N について, $\Phi(N) = 0$ を示せば良い. すると, 任意の $\delta > 0$ について $\mu(N) < \delta$ であるから, 任意の $\epsilon > 0$ について $|\Phi(N)| < \delta$ が必要. したがって, $\Phi(N) = 0$ が従う.^{†5}
- (1) \Rightarrow (2) Φ は絶対連続であるが, $\exists_{\epsilon > 0} \forall_{\delta > 0} \exists_{E \in \mathcal{G}} \mu(E) < \delta \wedge |\Phi(E)| \geq \epsilon$ と仮定し矛盾を導く. この $\epsilon > 0$ と $\frac{1}{n} > 0$ に対して, $\mu(E_n) < \frac{1}{2^n}, \Phi(E_n) \geq \epsilon$ を満たす \mathcal{G} の列 (E_n) が取れる. これに対して, $E_0 := \limsup_{n \rightarrow \infty} E_n \stackrel{\text{def}}{=} \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{v=n}^{\infty} E_v$ とおくと $E_0 \in \mathcal{G}$ で, 任意の $n \in \mathbb{N}$ に対して $\mu(E_0) \leq \sum_{v=n}^{\infty} \mu(E_v) \leq \sum_{v=n}^{\infty} \frac{1}{2^n} = \frac{1}{2^{n-1}}$ を満たすから $\mu(E_0) = 0$ である. しかし, いま単調増加集合関数=有限測度 \bar{V} について $\bar{V}(E_0) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \bar{V}(E_n) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \Phi(E_n) \geq \epsilon$ より 5.1.5, 矛盾.

■

要諦 5.2.6. 確かに絶対連続性は, 連続性 (Lebesgue 測度に関する絶対連続性) の一般化となっている. が, この連続性が, 零集合上の Lebesgue 積分の値が 0 になることと同値であるとは驚いた. この証明の (1) \Rightarrow (2) で E_0 を $\limsup_{n \rightarrow \infty} E_n$ として構成しているのは, 絶対連続性の変動による特徴付けにおいて $E_0 := E_1 \cup E_2$ とした議論の可算個への拡張になっている.

定理 5.2.7 (特異性の ϵ - δ 論法による特徴付け). 次の 2 条件は同値である.

- (1) Φ は μ -特異である.
- (2) $\forall_{\epsilon > 0} \exists_{E \in \mathcal{G}} \mu(E) < \epsilon \wedge V_\Phi(X \setminus E) < \epsilon$.
- (3) Jordan 分解について, $\Phi^+ \perp \mu^+$ かつ $\Phi^+ \perp \mu^-$ かつ $\Phi^- \perp \mu^+$ かつ $\Phi^- \perp \mu^-$.

5.2.2 Lebesgue の分解

定理 5.2.8. 可測空間 (S, \mathcal{M}) 上の 2 つの広義実数値の完全加法的集合関数 $\mu, \nu: \mathcal{M} \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ について, ν が有限ならば, 次のような分解が一意的に存在する:

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 \quad (\nu_1 \ll \mu \wedge \nu_2 \perp \mu).$$

^{†5} 対偶を考えれば明らか. 実際, $[\exists_{N \in \mathcal{G}} \mu(N) = 0 \wedge \Phi(N) \neq 0] \Rightarrow [\exists_{\epsilon > 0} \forall_{\delta > 0} \mu(E) < \delta \wedge |\Phi(E)| > \epsilon]$ は, $E = N$ とすれば従う.

5.2.3 不定積分の特徴付けとしての Radon-Nikodym の定理

加法的集合関数は測度 μ に対して絶対連続部分と特異部分に分解でき、絶対連続な部分は何かしらの関数の不定積分??としての表現を持つ。すなわち、不定積分 $L^1 \rightarrow \sigma\text{-Map}(X, \mathbb{R})$ は全射である。しかしこれが成り立つ前提には、空間 X にある種の有限性が必要になる。これは測度が有限であることを少し緩めた、 σ -有限性である。

定義 5.2.9 (σ -finite). 測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) について、

- (1) μ が有限な測度であるとは、 $\text{Im } \mu \subset \mathbb{R}$ であることをいう。 $A \in \mathcal{G}$ が有限測度であるとは、 $\mu(A) < \infty$ であることをいう。
- (2) 測度 μ が σ -有限であるとは、 $X = \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n, \mu(X_n) < \infty$ を満たす列 (X_n) が存在することをいう。
- (3) $A \in \mathcal{G}$ が σ -有限な測度を持つとは、 $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n, \mu(X_n) < \infty$ を満たす列 (X_n) が存在することをいう。

補題 5.2.10 (σ -有限性の特徴). (X, \mathcal{G}, μ) は σ -有限とする： $X = \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n, \mu(X_n) < \infty$ を満たす列 (X_n) が存在する。

- (1) Φ が任意の X_n 上で絶対連続／特異ならば、 X 上で絶対連続／特異である。
- (2) 特に μ は有限で、 Φ は零関数ではなく、単調増加とする： $\text{Im } \Phi \subset \mathbb{R}_{\geq 0}$ 。この Φ が特異でないならば、 $\exists_{n \in \mathbb{N}} \exists_{E_n \in \mathcal{G}} (\mu(E_n) > 0) \wedge \left(\forall_{E \subset E_n} \Phi(E) \geq \frac{1}{n} \mu(E) \right)$ 。

[証明].

- (1) $X_n := X_n \setminus (\bigcup_{v=1}^{n-1} X_v)$ と定め直すことで、列 (X_n) は互いに素に取れる。 N を任意の μ -零集合とし、 $N_n := N \cap X_n$ と定めると、 (N_n) も互いに素で、 $\mu(N_n) \leq \mu(N) = 0$ より $\mu(N_n) = 0$ 。各 $(N_n \subset) X_n$ 上で Φ は絶対連続だから、 $\Phi(N_n) = 0$ である。よって、 σ -加法性より、 $\Phi(N) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi(N_n) = 0$ 。

- (2) 方針 $\mu(X) < \infty$ だから、 $\Phi_n(E) := \Phi(E) - \frac{1}{n} \mu(E)$ は各 $n \in \mathbb{N}$ について加法的集合関数を定める。これについて Hahn の分解定理 5.1.12 より、集合 $E_n \in \mathcal{G}$ が存在して、

$$\forall_{E \subset E_n} \Phi(E) \geq \frac{1}{n} \mu(E), \quad \forall_{E \subset E_n^c} \Phi(E) \leq \frac{1}{n} \mu(E),$$

が成り立つ。この列 (E_n) について、 $\exists_{n \in \mathbb{N}} \mu(E_n) > 0$ を示せば良い。

成功 $\forall_{n \in \mathbb{N}} \mu(E_n) = 0$ と仮定して矛盾を導く。 $E_0 := \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ も零集合となり、また $\forall_{E \subset E_0^c} \forall_{n \in \mathbb{N}} (0 \leq) \Phi(E) \leq \frac{1}{n} \mu(E) \leq \frac{1}{n} \mu(X)$ より、 $\forall_{E \subset E_0^c} \Phi(E) = 0$ である。すなわち、 Φ は特異であることが従うが、これは条件に矛盾。

要諦 5.2.11. (3) のステートメントは証明しやすいように書かれているために状況が理解しにくいだが、 Φ が3つの仮定を満たす時 (特に特異でない時)、ある零でない集合 $B \in \mathcal{G}$ と $n \in \mathbb{N}_+$ が存在して、 Φ を測度 μ を用いて B 上で下から抑えることが出来る： $\forall_{E \subset B} \Phi(E) \geq \frac{1}{n} \mu(E)$ 。 $\frac{1}{n}$ ではなく、一般の $\epsilon > 0$ で評価しようとする、列が作れないので最初の議論が失敗する。

定理 5.2.12 (Radon-Nikodym, Lebesgue decomposition, density function / Radon-Nikodym derivative). σ -有限な測度空間 (X, \mathcal{G}, μ) 上の任意の有限な加法的集合関数 $\Phi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ について、

- (1) 絶対連続で加法的集合関数 $F : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ と特異な加法的集合関数 $\Psi : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ が存在して、 $\Phi = F + \Psi$ と表せる。
- (2) この分解は一意的である。
- (3) この加法的集合関数 F について、 X 上の μ -a.e. で一意的に定義された可積分関数 $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ が存在して、 $F(-) = \int_{-} f(x) d\mu(x)$ と表せる。この f を密度関数という。^{†6}

[証明]. Hahn 分解 5.1.12 より、ある分割 $X = A + B$ について、 Φ は A 上 $\bar{V} + 0$ 、 B 上 $0 + \underline{V}$ に等しいから、集合関数 0 は絶対連続かつ特異であることに注意して、 Φ が単調増加 (=有限測度) であるときについて示せば十分である 5.2.4： $\Phi \geq 0$ 。^{†7} また、 σ -

^{†6} 特に確率論の文脈では確率密度関数という。

^{†7} 実際、Lebesgue 分解 $\bar{V} = \bar{F} + \bar{\Phi}, \underline{V} = \underline{F} + \underline{\Phi}$ について、 $\Phi = (\bar{F} - \underline{F}) + (\bar{\Phi} - \underline{\Phi})$ としても良い。はず。

有限性の仮定と補題 5.2.10(1) より, $\mu(X) < \infty$ の仮定の下で証明すれば十分である.

(1) 証明の方針 非負値可測関数からなる集合 \mathcal{F} を

$$\mathcal{F} := \left\{ \varphi \in \text{Hom}_{\text{Meas}}(X, [0, \infty]) \left| \begin{array}{l} \varphi \text{ は } \mu\text{-可積分で, その不定積分 } F_\varphi \text{ が} \\ \forall E \in \mathcal{G} \quad F_\varphi(E) = \int_E \varphi d\mu \leq \Phi(E) \text{ を満たす} \end{array} \right. \right\}$$

と定めると, $0 \in \mathcal{F}$ より $\mathcal{F} \neq \emptyset$. 基本的な構成としては, \mathcal{F} の元である関数 $\varphi: X \rightarrow [0, \infty]$ が定める絶対連続な加法的集合関数 F_φ が X で取る値=最大値の上限を $(0 \leq) \alpha := \sup_{\varphi \in \mathcal{F}} F_\varphi(X) \leq \Phi(X) < \infty$ とし, これを実現する密度関数 $f: X \rightarrow [0, \infty] \in \mathcal{F}$ を1つ上手く構成し, $F := F_f$ とする. これは $\forall E \in \mathcal{G} \quad F(E) \leq \Phi(E)$ を満たし, 実は $F_f(X) = \alpha$ も満たす. こうして構成した F に対して $\Psi := \Phi - F (\geq 0)$ と定めると, これは特異になることを証明する.

絶対連続部分 F と密度関数 f の構成 ある \mathcal{F} の列 (φ_n) が存在して, $\lim_{n \rightarrow \infty} F_{\varphi_n}(X) = \alpha$ を満たすものが取れる. ここで, $f(x) := \sup_{n \geq 1} \varphi_n(x)$ と定めるとこれは $f \in \mathcal{F}$ を満たす非負値可測関数である (可測関数の極限は可測 2.3.11) こと, すなわち $\forall E \in \mathcal{G} \quad F_f(E) \leq \Phi(E)$ を示す. これは $F_f(X) = \alpha$ を含意することを示す.

(a) $f_n := \max_{1 \leq i \leq n} \varphi_i(x)$ と置くと, 任意の $E \in \mathcal{G}$ に対して $E = \bigcup_{v=1}^n E(f_n = \varphi_v)$ が成り立つ. $E_v \subset E(f_n = \varphi_n)$ を満たす細分 (E_v) であって, $E = \sum_{v=1}^n E_v$ を満たすものが取れる.^{†8}これについて,

$$\begin{aligned} \int_E f_n(x) d\mu(x) &= \sum_{v=1}^n \int_{E_v} f_n(x) d\mu(x) \\ &= \sum_{v=1}^n \int_{E_v} \varphi_n(x) d\mu(x) \\ &= \sum_{v=1}^n F_{\varphi_n}(E_v) \leq \sum_{v=1}^n \Phi(E_v) = \Phi(E). \end{aligned}$$

列 $(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ は単調増加で, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \sup_{n \geq 1} \varphi_n(x) = f(x)$ であるから, 単調収束定理 3.2.1 と積分の性質 3.1.9(4) $f_n \geq f_{n+1} \Rightarrow \int_E f_n d\mu \leq \int_E f_{n+1} d\mu$ より,

$$F_f(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n(x) d\mu(x) \leq \Phi(E).$$

よって, $f \in \mathcal{F}$ である.

(b) また, 同様に単調収束定理 3.2.1 と積分の性質 3.1.9(4) $f_n \geq \varphi_n \Rightarrow \int_E f_n d\mu \geq \int_E \varphi_n d\mu$ より,

$$\alpha \geq F_f(X) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n(x) d\mu(x) \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \varphi_n(x) d\mu(x) = \alpha.$$

特異部分 Ψ の構成 次に $\Psi := \Phi - F_f$ と定めると, F_f は不定積分で特に加法的集合関数だから, Ψ も単調増加な加法的集合関数 (=有限な測度) である. $\Psi = 0$ のときは特異で, $\Phi = F_f$ が Jordan 分解を定めるから, $\Psi \neq 0$ と仮定し, Ψ が特異であることを示せば良い. 特異でないと仮定して矛盾を導く. $\mu(X) < \infty$ で Ψ は特異で $\Psi \neq 0$ としたから, ある自然数 $n \geq 1$ と測度が正な集合 $E_n \in \mathcal{G}$ が存在して, $\forall E \subset E_n \quad \Psi(E) \geq \frac{1}{n} \nu(E)$ が成り立つ 5.2.10(2). よって, これに対して単関数を $g := \frac{1}{n} \chi_{E_n}$ と定めると, $f + g$ はやはり X 上非負値の可積分関数で (可積分関数の和は可積 3.1.9(9)), 任意の $E \in \mathcal{G}$ に対して,

$$\begin{aligned} F_{f+g}(E) &= \int_E f(x) d\mu(x) + \int_E g(x) d\mu(x) \\ &= F_f + \frac{1}{n} \mu(E \cap E_n) \\ &\leq F_f(E) + \Psi(E \cap E_n) \\ &\leq F_f(E) + \Psi(E \cap E_n) + \Psi(E \cap E_n^c) \quad \Psi \geq 0 \end{aligned}$$

^{†8} $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ が $x \in E$ で同じ値を取るかもしれない. これを適当に配分して互いに交わらないようにする.

$$\leq F_f(E) + \Psi(E) = \Phi(E)$$

より, $f + g \in \mathcal{F}$ である. しかし, 同様の評価で $\mu(E_n) > 0$ より

$$F_{f+g}(X) = F_f(X) + \frac{1}{n}\mu(E_n) > F_f(X) = \alpha$$

が従ってしまい, これは α の定義に矛盾する.

(2) 絶対連続な加法的集合関数 F_1, F_2 と特異な加法的集合関数 Ψ_1, Ψ_2 について, $\Phi = F_1 + \Psi_1 = F_2 + \Psi_2$ と表せたとする. すると $F_1 - F_2 = \Psi_2 - \Psi_1$ であるが, この両辺は絶対連続かつ特異だから, 恒等的に 0 である. 従って, $F_1 = F_2, \Psi_1 = \Psi_2$.

(3) 積分の性質 $f_1 = f_2$ a.e. $\Rightarrow \int_E f_1 d\mu = \int_E f_2 d\mu$ (3.1.9(4)) より, f は μ -a.e. x に対して確定する.

■

要諦 5.2.13 (列を巧みに用いた構成).

任意の可測集合 $E \subset X$ 上での積分 $\int_E f d\mu$ が $\Phi(E)$ を超えない中で, 最大にする密度関数 f が, Radon-Nykodym の密度関数 (Φ との差がただか特異な加法的集合関数) である. $F_\varphi(X)$ を最小上界にする $\varphi \in \mathcal{F}$ に収束する点列 (φ_n) が取れるから, これに対して $f(x) := \sup_{n \in \mathbb{N}} \varphi_n(x)$ とすると, これは単調増加列 $(\max_{1 \leq i \leq n} \varphi_i(x))_{n \in \mathbb{N}}$ の極限でもあるから, 単調収束定理により積分と極限が交換するし, その極限でも $F_f(E) \leq \Phi(E)$ の性質は保たれる. この f について $F_f(X)$ が最小上界を取る元であること, すなわち結局最大値 $\max_{\varphi \in \mathcal{F}} \varphi(X)$ であったことにより, Ψ は特異になる.

反例 5.2.14. (X, \mathcal{B}, μ) が σ -有限でない場合は, 次の反例がある.

歴史 5.2.15. 有限閉区間上の実数値関数が不定積分で与えられる必要十分条件が絶対連続性であることを定立したのが Lebesgue であったが, 一般の \mathbb{R}^n 上に拡張したのが Radon (1913) で, さらに一般の測度空間として, 絶対連続性の定義を集合関数に対して付与しなおしたのが Nikodym (1930) である.

5.3 完全加法的集合関数の各点収束極限

定理 5.3.1 (Saks (1933)). (S, \mathcal{M}, μ) を σ -有限な測度空間, $\{f_n\} \subset L^1(S)$ を可積分関数列とする. 不定積分の列 $\{F_n(E) := \mu[1_E f_n]\}_{n \in \mathbb{N}}$ が \mathcal{M} 上で各点収束するならば, 次の 2 条件が成り立つ.

- (1) $\{F_n\}$ は n に関して一様に狭義絶対連続である: $\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \mu(E) < \delta \Rightarrow |F_n(E)| < \epsilon$.
- (2) 極限関数 $F: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ は絶対連続で, μ に関するある可積分関数 f の不定積分である.

系 5.3.2. (S, \mathcal{M}) を可測空間, $\{\Phi_n\} \subset \text{Map}(\mathcal{M}, \mathbb{R})$ を加法的集合関数の列とする. これが \mathcal{M} 上で各点収束するならば, 極限関数 $\Phi: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ も完全加法的集合関数である.

5.4 完全加法的集合関数の微分についての Lebesgue の定理

5.5 直線上の絶対連続関数

5.5.1 絶対連続性

定義 5.5.1 (absolutely continuous, functions of bounded variation). $F: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ を有界な関数とする.

- (1) F が絶対連続であるとは, 次が成り立つことをいう: $\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall \{(a_i, b_i)\}_{i=1}^n$: 互いに素な $[a, b]$ 内の有限区間列 $\sum_{i=1}^n (b_i - a_i) < \delta \Rightarrow$

$$\sum_{i=1}^n |F(b_i) - F(a_i)| < \epsilon. \quad \text{†9}$$

- (2) F が有界変動であるとは, 次が成り立つことをいう: $\exists M > 0 \forall \Delta: [a, b]$ の有限分割 $\sum_{i=1}^n |F(x_i) - F(x_{i-1})| \leq M$.

†9 特に, 絶対連続ならば連続.

第 6 章

関数空間

6.1 測度空間上の関数空間： L^p

6.2 測度空間上の関数空間： M, S

6.3 Euclid 空間上の関数空間

6.3.1 合成積

合成積は解析では \mathbb{R}^d の加法群の上に定められるが，一般的には群上の環値関数について定義される．半直積のようなものである．微分はこの積について Leibniz 則を満たし，Fourier 解析はこの積について関手性を持つ．圏論化が Day 合成積というものになる．

定義 6.3.1 (convolution). Lebesgue 可積分関数 $f, g, h : \mathbb{R}^d \rightarrow [-\infty, \infty]$ に対して，

- (1) $f(x - \cdot)g(\cdot) : \mathbb{R}^d \rightarrow [-\infty, \infty]$ は殆ど至る所 Lebesgue 可積分である．
 (2) $f \star g(x) := \int_{\mathbb{R}^d} f(x - y)g(y)dm(y)$ で定まる関数 $f \star g : \mathbb{R}^d \rightarrow [-\infty, \infty]$ は殆ど至る所 Lebesgue 可積分であり，
 $\|f \star g\|_1 \leq \|f\|_1 \|g\|_1$ が成り立つ．すなわち：

$$\int_{\mathbb{R}^d} |f \star g(x)|dm \leq \int_{\mathbb{R}^d} |f(x)|dm \int_{\mathbb{R}^d} |g(x)|dm.$$

- (3) (可換) 殆ど至る所で $f \star g = g \star f$ が成り立つ．すなわち：

$$f \star g(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f(x - y)g(y)dy = \int_{\mathbb{R}^d} g(x - y)f(y)dy.$$

- (4) (結合的) 殆ど至る所で $f \star (g \star h) = (f \star g) \star h$ が成り立つ．

[証明].

- (1) $f(x - y)g(y) : \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ の Lebesgue 可測性 定理 2.9.5 より従う．すると， $|f(x - y)g(y)|$ も可測である ($h = h^+ - h^-$ に対して $|h| = h^+ + h^-$ であるため)．

$f(x - y)g(y) : \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ の Lebesgue 可積分性 完備空間についての Fubini の定理 3.3.6 より，非負値 Lebesgue 可測関数 $|f(x - y)g(y)|$ について，一変数化 $|f(x - \cdot)g(\cdot)| : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, \infty]; y \mapsto |f(x - y)||g(y)|$ は殆ど至る所 Lebesgue 可測であり， $\int_{\mathbb{R}^d} |f(x - y)||g(y)|dm(y)$ が定まり， $x \in \mathbb{R}^d$ 上殆ど至る所 Lebesgue 可測である．さらに，

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^{2d}} |f(x - y)||g(y)|dm(z) &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}^d} |f(x - y)||g(y)|dm(y) \right) dm(x) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}^d} |f(x - y)||g(y)|dm(x) \right) dm(y) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} |g(y)| \left(\int_{\mathbb{R}^d} |f(x - y)|dm(x) \right) dm(y) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} |g(y)|dm(y) \int_{\mathbb{R}^d} |f(x)|dm(x) < \infty \end{aligned}$$

\therefore 平行移動不変性 2.9.5

より, $f(x-y)g(y)$ は \mathbb{R}^{2d} 上可積分である. したがって, 可積分関数についての Fubini の定理 3.3.7 より, 一変数化 $y \mapsto f(x-y)g(y)$ も殆ど至る所の $x \in \mathbb{R}^d$ について可積分である. $|f(x-y)g(y)| : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, \infty]$ は y の関数として Lebesgue 可積分である.

(2) $f(x-y)g(y)$ は \mathbb{R}^{2d} 上可積分であるから, 可積分関数についての Fubini の定理 3.3.7 より, 一変数化 $y \mapsto f(x-y)g(y)$ も殆ど至る所の $x \in \mathbb{R}^d$ について可積分である上に, その積分は殆ど至る所の $x \in \mathbb{R}^d$ について可積分である.

(3) $t := x - y$ とおく変数変換より,

$$\begin{aligned} (f \star g)(x) &= \int_{\mathbb{R}^d} f(x-y)g(y)dy \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} f(t)g(x-t)dt \\ &= (g \star f)(x) \end{aligned}$$

■

第 7 章

Hausdorff 測度と fractal

第 8 章

参考文献

参考文献

- [1] 伊藤清三『ルベーグ積分入門』
- [2] Terence Tao ["Introduction to Measure Theory"](#)
- [3] 吉田耕作「測度と積分」(『現代解析入門』)
- [4] 藤田宏「現代解析入門」(『現代解析入門』)
- [5] Jürgen Jost. (1997). *Postmodern Analysis*. Springer.
- [6] Carathéodory, C. (1918). *Vorlesungen über reelle Funktionen*, Teubner
- [7] Hopf, E. (1937). *Ergodentheorie*. Springer.
- [8] Lebesgue, H. (1904). Leçons sur l'intégration et la recherche des fonctions primitives. Gauthier-Villars.
- [9] Saks, S. (1937). *Theory of the Integral*. Warszawa.