

組合せ論的ホッジ理論セミナー草稿

2025 年 8 月 3 日 23 時 48 分更新



むろぺえじ版

目 次

1	有限集合のバーグマン扇	4
2	マトロイドのバーグマン扇	7
3	区分的線型関数	13
3.1	区分的線型関数の凸性	14
3.2	数値的非負錐と豊富錐	17
4	バーグマン扇上の凸区分的線型関数	20
5	ホモロジーとコホモロジー	28
5.1	ホモロジー	28
5.2	コホモロジー	30
5.3	バーグマン扇の次数写像	33
6	マトロイドのポアンカレ双対	36
6.1	マトロイドフリップの引き戻し準同型とギシン準同型	39
6.2	マトロイドフリップの分解定理：全射性	41
6.3	命題 6.11 の応用	46
6.4	ポアンカレ双対の証明	47

参考文献

- [AHK18] Karim Adiprasito, June Huh, and Eric Katz. “Hodge theory for combinatorial geometries”. In: **Ann. of Math. (2)** **188.2** (2018), pp. 381–452.
- [CLS11] David A. Cox, John B. Little, and Henry K. Schenck. **Toric varieties. 124.** Graduate Studies in Mathematics. American Mathematical Society, Providence, RI, 2011, pp. xxiv+841.
- [Ful93] William Fulton. **Introduction to toric varieties. 131.** Annals of Mathematics Studies. The William H. Roever Lectures in Geometry. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1993, pp. xii+157.

1 有限集合のバーグマン扇

この節では n を非負整数とし E を $n+1$ 元からなる有限集合とする。

記法 1.1 ([AHK18, Sec. 2.1 と Sec. 2.2])

1. \mathbb{Z}^E で E を基底とする自由アーベル群を表す。
2. \mathbf{e}_i で元 $i \in E$ に対応する \mathbb{Z}^E の基底ベクトルを表す。また勝手な E の部分集合 I に対し \mathbf{e}_I を $\sum_{i \in I} \mathbf{e}_i$ と置く。
3. \mathbf{N}_E を商格子 $\mathbb{Z}^E / \langle \mathbf{e}_E \rangle$ と置く。ここで $\langle \mathbf{e}_E$ は \mathbf{e}_E が生成する \mathbb{Z}^E の部分群を表す。
4. $\mathbf{N}_E \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{R}$ を $\mathbf{N}_{E, \mathbb{R}}$ と置く。
5. 半順序集合 $(2^E \setminus \{\emptyset, E\}, \subset)$ を $\mathcal{P}(E)$ と置くことにする。
6. $\mathcal{P}(E)$ の全順序部分集合を**非空狭義部分集合の旗**, あるいは簡潔に $\mathcal{P}(E)$ の**旗**と呼ぶ。記号 \mathcal{F} , \mathcal{G} , \mathcal{H} などを非空狭義部分集合の旗を表すものとして用いる。

定義 1.2 ([AHK18, Sec. 2.2 と Def. 2.1 と Def. 2.2]) \mathcal{F} を非空狭義部分集合の旗とする。

- (i) E を全体集合とする交叉 $\bigcap \mathcal{F}$ を $\min \mathcal{F}$ と置く。つまり

$$\min \mathcal{F} = \begin{cases} F_1 & (\mathcal{F} \neq \emptyset \text{ で } \mathcal{F} = \{F_1 \subsetneq F_2 \subsetneq \cdots \subsetneq F_r\} \text{ と表すとき}) \\ E & (\mathcal{F} = \emptyset \text{ のとき}) \end{cases}$$

で定める。

- (ii) E の狭義部分集合 I が \mathcal{F} と**適合する**とは $I \subsetneq \min \mathcal{F}$ が成立するときをいい, $I < \mathcal{F}$ と表してこれを**適合対**と呼ぶ。
- (iii) 適合対 $I < \mathcal{F}$ に対し, $\mathbf{N}_{E, \mathbb{R}}$ 内のユニモジュラ錐 $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ を

$$\text{cone}(\{\mathbf{e}_i \mid i \in I\} \cup \{\mathbf{e}_F \mid F \in \mathcal{F}\})$$

として定める。

注意 1.3 $\mathcal{F} = \emptyset$ の場合, 定義より E の任意の狭義部分集合が \mathcal{F} と適合する。同様に \emptyset は, すべての非空狭義部分集合の旗と適合する。よって

$$\sigma_{I < \mathcal{F}} = \sigma_{I < \emptyset} + \sigma_{\emptyset < \mathcal{F}}$$

のように和に分けることができる。また対応 $I < \mathcal{F} \mapsto \sigma_{I < \mathcal{F}}$ は一対一ではない。実際 E が二元以上からなるとき, 元 i に対して $\sigma_{\{i\} < \emptyset} = \sigma_{\emptyset < \{\{i\}\}}$ が成立するからである。

定義 1.4 ([AHK18, Sec. 2.3]) $\mathcal{P}(E)$ の半順序部分集合 \mathcal{P} が**順序フィルター**であるとは, $F \subset G$ を満たす $\mathcal{P}(E)$ の勝手な二元 F と G に対し, $F \in \mathcal{P}$ ならば $G \in \mathcal{P}$ が成立するときをいう。

定義 1.5 ([AHK18, Def. 2.3]) \mathcal{P} を順序フィルターとする。

1. 適合対 $I < \mathcal{F}$ が \mathcal{P} の**バーグマン扇条件**を満たすとは, $I \notin \mathcal{P}$ かつ $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}$ が成立するときをいう。
2. \mathcal{P} の**バーグマン扇**とは錐の族

$$\{\sigma_{I < \mathcal{F}} \mid I < \mathcal{F} \text{ は } \mathcal{P} \text{ のバーグマン扇条件を満たす適合対である}\}$$

といい, $\Sigma_{\mathcal{P}}$ で表す。

例 1.6 $\mathcal{P} = \emptyset$ のとき

$$\begin{aligned} \Sigma_{\emptyset} &= \{\sigma_{I < \emptyset} \mid I \text{ は } E \text{ の狭義部分集合である}\} \\ &= \{\text{cone}(\{\mathbf{e}_i \mid i \in I\}) \mid I \text{ は } E \text{ の狭義部分集合である}\} \end{aligned}$$

であるので, Σ_{\emptyset} は射影空間の扇であることがわかる。

例 1.7 $\mathcal{P} = \mathcal{P}(E)$ のとき

$$\begin{aligned} \Sigma_{\mathcal{P}(E)} &= \{\sigma_{\emptyset < \mathcal{F}} \mid \mathcal{F} \text{ は非空狭義部分集合の旗である}\} \\ &= \{\text{cone}(\{\mathbf{e}_F \mid F \in \mathcal{F}\}) \mid \mathcal{F} \text{ は } \mathcal{P}(E) \text{ の旗である}\} \end{aligned}$$

であるので, これは置換多面体の法扇である。

例 1.8 $E = \{0, 1, 2\}$ とし $\mathcal{P} = \{\{1, 2\}\}$ とする。このとき $\Sigma_{\mathcal{P}}$ の錐は図 1 のように表すことができる。

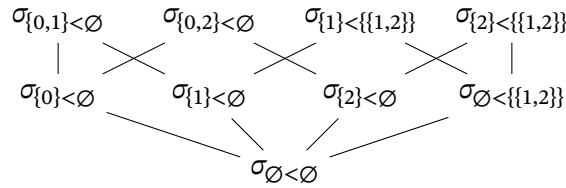


図 1 $\Sigma_{\mathcal{P}}$ の錐とその包含関係

これは, ちょうど Σ_{\emptyset} の錐 $\sigma_{\{1,2\} < \emptyset}$ を, 射線 $\sigma_{\emptyset < \{1,2\}}$ に沿って $\sigma_{1} < \{1,2\}$ と $\sigma_{2} < \{1,2\}$ に分割した扇である。

次の命題が本節の主命題である。

命題 1.9 ([AHK18, Prop. 2.4]) 順序フィルター \mathcal{P} に対し, $\Sigma_{\mathcal{P}}$ は扇である。

以降で命題 1.9 を示す。

補題 1.10 適合対 $I < \mathcal{F}$ と E の狭義部分集合 Z に対し, $\mathbf{e}_Z \in \sigma_{I < \mathcal{F}}$ が成立することは, $Z \subset I$ または $Z \in \mathcal{F}$ が成立することと同値である。

証明 $Z \subset I$ または $Z \in \mathcal{F}$ が成立するとき, $\mathbf{e}_Z \in \sigma_{I < \mathcal{F}}$ が成立することは明らかである。
 $\mathbf{e}_Z \in \sigma_{I < \mathcal{F}}$ が成立するとする。 \mathbb{R}^E の元として

$$(1.1) \quad \left(\sum_{i \in I} \lambda_i \mathbf{e}_i + \sum_{F \in \mathcal{F}} \lambda_F \mathbf{e}_F \right) - \mathbf{e}_Z \in \langle \mathbf{e}_E \rangle$$

が成立するような正数 λ_i と λ_F が存在する。(1.1) の第一項目のベクトルは Z 上の座標で最大値を取るが, このようなことが起こるのは $Z \subset Z$ のときか $Z \in \mathcal{F}$ のときのいずれかである。 証明終

補題 1.11 \mathcal{P} を順序フィルターとする。このとき \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす二つの適合対 $I < \mathcal{F}$ と $J < \mathcal{G}$ に対し, $\sigma_{I < \mathcal{F}} \subset \sigma_{J < \mathcal{G}}$ となるのは, $I \subset J$ かつ $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$ となるとき, かつそのときに限る。

証明 $I \subset J$ かつ $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$ のときに $\sigma_{I < \mathcal{F}} \subset \sigma_{J < \mathcal{G}}$ となることは定義から直ちに従う。逆に $\sigma_{I < \mathcal{F}} \subset \sigma_{J < \mathcal{G}}$ が成立するときを考える。すると i の勝手な元 i に対し, $\mathbf{e}_i \in \sigma_{J < \mathcal{G}}$ が成立するので, 補題 1.10 より $i \in J$ または $\{i\} \in \mathcal{G}$ が成立する。 $\{i\} \in \mathcal{G}$ だったとすると, \mathcal{P} が順序フィルターであるので, $I \in \mathcal{P}$ となり矛盾が生じる。ゆえに $i \in J$ が成立し, $I \subset J$ であることが従う。また \mathcal{F} の勝手な元 F に対し, $\mathbf{e}_F \in \sigma_{J < \mathcal{G}}$ が成立するので, 補題 1.10 より $F \subset J$ または $F \in \mathcal{G}$ が成立する。 $F \subset J$ だったとすると, \mathcal{P} が順序フィルターであるので, $J \in \mathcal{P}$ となり矛盾する。ゆえに $F \in \mathcal{G}$ が成立し, $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$ が従う。 証明終

定義 1.12 ([CLS11]) Σ を格子 \mathbf{N} における扇¹⁾ とし, \mathbf{v} を $|\Sigma| \cap \mathbf{N}$ に属す格子点とする。 Σ の \mathbf{v} に沿う星状細分 $\Sigma^*(\mathbf{v})$ とは

$$\{\sigma \in \Sigma \mid \mathbf{v} \notin \sigma\} \cup \{\text{cone}(\{\mathbf{v}\} \cup \tau) \mid \tau \text{ は } \mathbf{v} \text{ を含む } \Sigma \text{ の錐の面であり, } \mathbf{v} \text{ を含まない}\}$$

のことである。星状細分は扇である。

補題 1.13 $\mathcal{P}_+ = \mathcal{P}_-$ を満たす順序フィルター \mathcal{P}_+ と \mathcal{P}_- を考える。このとき $\Sigma_{\mathcal{P}_+} = \Sigma_{\mathcal{P}_-}^*(\mathbf{e}_Z)$ が成立する。

証明 \mathcal{P}_- のバーグマン扇条件を満たす適合対 $I < \mathcal{F}$ に対し, 補題 1.10 より $\mathbf{e}_Z \in \sigma_{I < \mathcal{F}}$ であることが $Z \subset I$ であることと同値であるが, Z は $\mathcal{P}(E) \setminus \mathcal{P}_-$ の極大元であるから, $Z = I$ であることと同値である。ゆえに $\Sigma_{\mathcal{P}_-}$ に属し \mathbf{e}_Z を含まない錐は, Z が適合する \mathcal{P}_- の旗 \mathcal{F} を用いて, $\sigma_{Z < \mathcal{F}}$ と表すことができる。 $\sigma_{Z < \mathcal{F}}$ の面のうち \mathbf{e}_Z を含まないものは, Z

1) $\mathbf{N} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{R}$ 内の有理強凸錐の多面集合複体のこと

の狭義部分集合 J と \mathcal{F} の任意の部分旗 \mathcal{G} を用いて $\sigma_{J<\mathcal{G}}$ と表される。 $\Sigma_{\mathcal{P}_-}$ の \mathbf{e}_Z に沿う星状細分により $\sigma_{Z<\mathcal{F}}$ は $\text{cone}(\{\mathbf{e}_Z\}) + \sigma_{J<\mathcal{G}} = \sigma_{J<\{Z\}\cup\mathcal{G}}$ の形の錐に置き変わる。 $J < \{Z\} \cup \mathcal{G}$ は \mathcal{P}_+ のバークマン扇条件を満たすので、 $\Sigma_{\mathcal{P}_-}^*(\mathbf{e}_Z) \subset \Sigma_{\mathcal{P}_+}$ であることが従う。逆に \mathcal{P}_+ のバークマン扇条件を満たす適合対 $I < \mathcal{F}$ を考えると、 $Z \in \mathcal{F}$ のとき $Z < (\mathcal{F} \setminus \{Z\})$ かつ $(\mathcal{F} \setminus \{Z\}) \subset \mathcal{P}_-$ が成立するので、 $\sigma_{I<\mathcal{F}}$ は星状細分の操作で追加される錐である。 $Z \notin \mathcal{F}$ のとき $I \neq Z$ かつ $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}_-$ であるから、 $\sigma_{I<\mathcal{F}}$ は星状細分の操作で変化しない錐である。ゆえに $\Sigma_{\mathcal{P}_+} \subset \Sigma_{\mathcal{P}_-}^*(\mathbf{e}_Z)$ が成立する。 証明終

命題 1.9 の証明 \mathcal{R}_0 を空順序フィルター \emptyset として、 i 番目の順序フィルター \mathcal{R}_i に $\mathcal{P} \setminus \mathcal{R}_i$ の極大元を一つ加えて $i+1$ 番目の順序フィルター \mathcal{R}_{i+1} を定めることで、順序フィルターの有限列

$$(\emptyset = \mathcal{R}_0 \subsetneq \mathcal{R}_1 \subsetneq \cdots \subsetneq \mathcal{R}_m = \mathcal{P})$$

を構成する。列 $(\mathcal{R}_i)_{i=0}^m$ に関する帰納法で示す。 $i = 0$ の時に関しては Σ_{\emptyset} が n 次元単体の法錐であることから従う。 $i > 0$ として、 \mathcal{P}_- を \mathcal{R}_{i-1} 、 \mathcal{P}_+ を \mathcal{R}_i と置いて $\mathcal{P}_+ = \mathcal{P}_- \cup \{Z\}$ と書くことにすると、 $\Sigma_{\mathcal{P}_-}$ は帰納法の仮定により扇であるから、補題 1.13 により $\Sigma_{\mathcal{P}_+} = \Sigma_{\mathcal{P}_-}^*(\mathbf{e}_Z)$ であり、 $\Sigma_{\mathcal{P}_+}$ は特に扇である。よって帰納法により題意は示された。 証明終

注意 1.14 一般論として、最大次元多面体の法扇を星状細分がまた最大次元多面体の法扇であることが知られている。よって命題 1.9 の証明は、実は $\Sigma_{\mathcal{P}}$ が n 次元多面体の法扇であることも示している。 $(i = 0$ の場合 Σ_{\emptyset} が n 次元単体の複体であることを用いる。)

系 1.15 \mathcal{P} を順序フィルターとする。このとき $\Sigma_{\mathcal{P}}$ のバークマン扇条件を満たす勝手な適合対 $I < \mathcal{F}$ と $J < \mathcal{G}$ に対し、 $\sigma_{I<\mathcal{F}} \cap \sigma_{J<\mathcal{G}} = \sigma_{(I \cap J) < (\mathcal{F} \cap \mathcal{G})}$ が成立する。

証明 定義から直ちに、右辺が左辺に含まれることが従うので、左辺が右辺に含まれることを示す。命題 1.9 から $\Sigma_{\mathcal{P}}$ は扇であるから、 $\sigma_{I<\mathcal{F}} \cap \sigma_{J<\mathcal{G}}$ は $\sigma_{I<\mathcal{F}}$ の面である。ゆえに $\sigma_{I<\mathcal{F}} \cap \sigma_{J<\mathcal{G}} = \sigma_{K<\mathcal{H}}$ かつ $K \subset I$ かつ $\mathcal{H} \subset \mathcal{F}$ を満たす K と \mathcal{H} が存在する。さらに補題 1.11 から $K \subset J$ かつ $\mathcal{H} \subset \mathcal{G}$ も成立するので、 $K \subset I \cap J$ かつ $\mathcal{H} \subset \mathcal{F} \cap \mathcal{G}$ が成立し、目的の包含が成立することが従う。 証明終

2 マトロイドのバークマン扇

この節では、 n と r を非負整数、 E を $n+1$ 元からなる有限集合、 M を E 上の階数 $r+1$ のループなしマトロイドとする。

記法 2.1

1. M の非空狭義フラット全体の族が定める半順序集合を $\mathcal{P}(M)$ で表す。
2. $\mathcal{P}(M)$ の全順序部分集合を**非空狭義フラットの旗**, あるいは簡潔に $\mathcal{P}(M)$ の **旗** と呼ぶ。記号 \mathcal{F} , \mathcal{G} , \mathcal{H} などを非空狭義フラットの旗を表すものとして用いる。

定義 2.2 ([AHK18, Def. 3.1]) \mathcal{F} を非空狭義フラットの旗とし, 適合対 $I <_M \mathcal{F}$ を考える。 I が M において \mathcal{F} と**適合する**とは, $\#I < \text{rk}_M(\min \mathcal{F})$ が成立するときといい, $I <_M \mathcal{F}$ と書く。

注意 2.3 M における適合対 $I <_M \mathcal{F}$ に対し, $\#\mathcal{F} \leq r+1 - \text{rk}_M(\mathcal{F}) < r+1 - \#I$ が成立するので, $\sigma_{I <_M \mathcal{F}}$ の次元は r 以下である。

定義 2.4 ([AHK18, Def. 3.2])

1. $\mathcal{P}(M)$ の部分半順序集合 \mathcal{P} が**順序フィルター**であるとは, $F \subset G$ を満たす $\mathcal{P}(M)$ の勝手な二元 F と G に対し, $F \in \mathcal{P}$ ならば $G \in \mathcal{P}$ が成立するときをいう。
2. $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター \mathcal{P} に対し, $\hat{\mathcal{P}}$ を $\mathcal{P} \cup \{E\}$ と置く。
3. $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター \mathcal{P} と適合対 $I < \mathcal{F}$ に対し, $I < \mathcal{P}$ が \mathcal{P} の**バーグマン扇条件**を満たすとは, $\text{cl}_M(I) \notin \hat{\mathcal{P}}$ かつ $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}$ が成立するときをいう。
4. 順序フィルター \mathcal{P} に対しその**バーグマン扇**を

$$\{\sigma_{I < \mathcal{F}} \mid I < \mathcal{F} \text{ が } \mathcal{P} \text{ のバーグマン扇条件を満たす}\}$$

として定め, $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ で表す。

5. 順序フィルター \mathcal{P} に対しその**被約バーグマン扇**を

$$\{\sigma_{I <_M \mathcal{F}} \mid I <_M \mathcal{F} \text{ が } \mathcal{P} \text{ のバーグマン扇条件を満たす}\}$$

として定め, $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}}$ で表す。

補題 1.10 を用いることで, 補題 1.11 と同様の主張が成立することが示される。

命題 2.5 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。このとき \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす二つの適合対 $I < \mathcal{F}$ と $J < \mathcal{G}$ に対し, $\sigma_{I < \mathcal{F}} \subset \sigma_{J < \mathcal{G}}$ となるのは, $I \subset J$ かつ $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$ となるとき, かつそのときに限る。

証明 補題 1.11 の証明と同様であるから, 省略する。

証明終

後の命題で被約バーグマン扇が純 r 次元の扇であることを示すが, 対してバーグマン扇は一般に純次元ではない。

例 2.6 (純次元でないバーグマン扇の例) K を標数が 2 でない体とし, K^3 のベクトル $f_0 = (1, 0, 0)$, $f_1 = (0, 1, 0)$, $f_2 = (0, 0, 1)$, $f_3 = (0, 0, -1)$ を用いて定まる $E = \{0, 1, 2, 3\}$ 上のマトロイド M を考える。図 2 に M のフラットの束を表す。

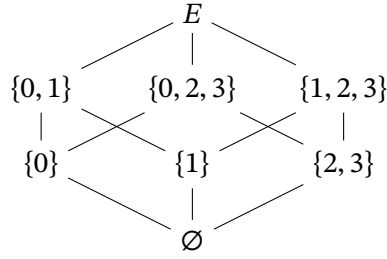


図2 M のフラットの束

このとき $\mathcal{P} = \{\{0, 2, 3\}\}$ は順序フィルターであり, $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の錐の包含関係は図3のようになり, $\sigma_{\{0, 1\} < \emptyset}$ と $\sigma_{\{0\} < \{\{0, 2, 3\}\}}$ は次元2の極大錐, $\sigma_{\{1, 2, 3\} < \emptyset}$ と $\sigma_{\{2, 3\} < \{\{0, 2, 3\}\}}$ は次元3の極大錐であるので, $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ は純次元ではない。

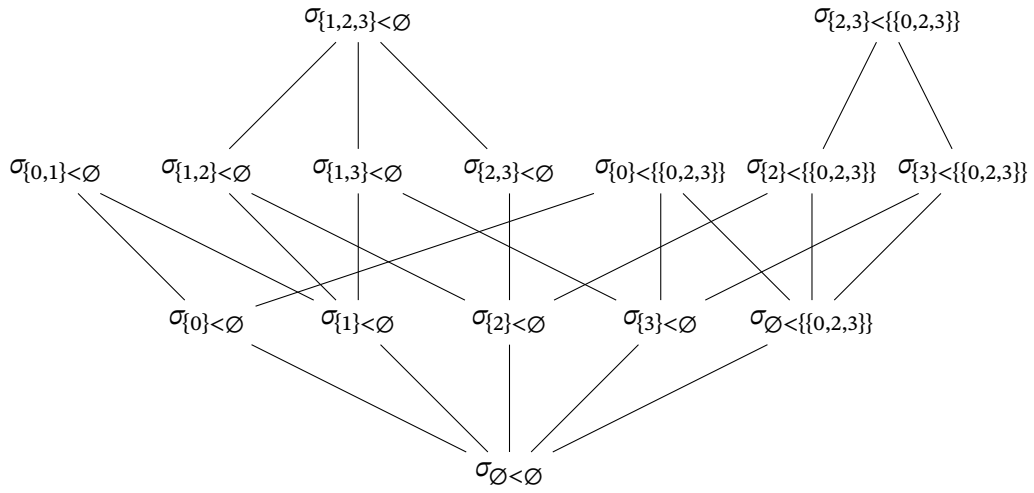


図3 $\Sigma_{\mathcal{P}}$ の錐の包含関係

一方被約バークマン扇 $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}}$ では, 図3の $\sigma_{\{1, 2, 3\} < \emptyset}$ と $\sigma_{\{2, 3\} < \{\{0, 2, 3\}\}}$ が除かれるので, 図3のようになり, $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}}$ が純2次元であることがわかる。



図 4 $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}}$ の錐の包含関係

次が本節の主命題である。

命題 2.7 ([AHK18, Prop. 3.3]) \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。このとき $\mathcal{P}(E)$ のある順序フィルター $\tilde{\mathcal{P}}$ があって、 $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ は $\Sigma_{\tilde{\mathcal{P}}}$ の部分扇である。

命題 2.7 を示すための補題を述べる。

補題 2.8 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。このとき $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の勝手な錐 $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ に対し、その面もすべて $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ に属す。

証明 \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たすように $I < \mathcal{F}$ を取っておく。一般論から $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ の面は I の部分集合 J と \mathcal{F} の部分旗 \mathcal{G} を用いて $\sigma_{J < \mathcal{G}}$ という形をしているので、 $\text{cl}_M(J) \notin \mathcal{P}$ であることをいえば良い。 $\text{cl}_M(J) \in \mathcal{P}$ であったとすると、 $\text{cl}_M(J) \subset \text{cl}_M(I)$ であるから $\text{cl}_M(I) \in \mathcal{P}$ となり、 \mathcal{P} のバークマン扇条件に反する。ゆえに $\text{cl}_M(J) \notin \mathcal{P}$ であり、 $\sigma_{J < \mathcal{G}} \in \Sigma_{M, \mathcal{P}}$ であることが従う。 証明終

命題 2.7 の証明 補題 2.8 より $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ を含む扇が存在すれば、 $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ はその部分扇になる。 $\tilde{\mathcal{P}}$ を

$$\{F \in \mathcal{P}(E) \mid F \text{ は } \mathcal{P} \text{ のフラットを少なくとも一つ含む}\}$$

と置くと、これは $\mathcal{P}(E)$ の順序フィルターであり、命題 1.9 より $\Sigma_{\tilde{\mathcal{P}}}$ は扇である。 $\Sigma_{M, \mathcal{P}} \subset \Sigma_{\tilde{\mathcal{P}}}$ であることを示したい。 $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の錐 $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ を取ると、 $\mathcal{F} \subset \tilde{\mathcal{P}}$ であるから $I \notin \tilde{\mathcal{P}}$ を示せば良いが、 $\text{cl}_M(I) \notin \mathcal{P}$ であることと \mathcal{P} が順序フィルターであることから、 $\text{cl}_M(I)$ が \mathcal{P} のフラットを含むことはない。つまり $I \notin \tilde{\mathcal{P}}$ である。 証明終

系 2.9 $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター \mathcal{P} に対し、 $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}}$ は $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の部分扇である。

証明 $\tilde{\Sigma}_{\mathcal{P}}$ が $\Sigma_{\mathcal{P}}$ の部分集合であり、補題 2.8 と同様の主張が $\tilde{\Sigma}_{\mathcal{P}}$ に対しても成立するので、 $\tilde{\Sigma}_{\mathcal{P}}$ は $\Sigma_{\mathcal{P}}$ の部分扇である。 証明終

ここで被約バークマン扇が純次元であることをも示しておく。

命題 2.10 ([AHK18, Prop. 3.4]) $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター \mathcal{P} に対し, $\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}$ は純 r 次元である。

証明 勝手な $\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}$ の勝手な錐 $\sigma_{I <_M \mathcal{F}}$ に対し, $\sigma_{I <_M \mathcal{F}} \subset \sigma_{I' <_M \mathcal{F}'}$ かつ $\#I' + \#\mathcal{F}' = r$ を満たす $\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}$ の錐 $\sigma_{I' <_M \mathcal{F}'}$ が存在することを示せば良い。 I が M において適合し \mathcal{F} を含むような \mathcal{P} の旗の中で極大なものを一つ取り \mathcal{F}' と置く。 $\text{crk}_M(\min \mathcal{F}') = \#\mathcal{F}'$ である。続けて I を含み $\min \mathcal{F}'$ に狭義に含まれる M のフラットの中で極大なものを一つ取り F と置く。 $\text{rk}_M(F) + 1 = \text{rk}_M(\min \mathcal{F}')$ である。すると

$$\#I \leq \text{rk}_M(\min \mathcal{F}') - 1 = r - \text{crk}_M(\min \mathcal{F}') = r - \#\mathcal{F}' = \text{rk}_M(F) \leq \#F$$

となるので, $\#I' = r - \#\mathcal{F}$ かつ $I \subset I' \subset F$ を満たす部分集合 I' を取ることができ, $I' <_M \mathcal{F}'$ である。あとは $\text{cl}_M(I') \notin \mathcal{P}$ であることを示せば, $I' <_M \mathcal{F}'$ が \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たし, 証明が終わる。 $\text{cl}_M(I') \in \mathcal{P}$ であったとすると, \mathcal{P} が順序フィルターであることから $F \in \mathcal{P}$ である。 $I < (\{F\} \cup \mathcal{P})$ であることに加え, \mathcal{F}' の極大性から $I \not<_M (\{F\} \cup \mathcal{F}')$ であるので, $\#I = \text{rk}_M(F) = r - \text{rk}_M(\min \mathcal{F}')$ が成立し, $I = I'$ である。ところが $\text{cl}_M(I) = \text{cl}_M(I') \in \mathcal{P}$ となり, $I < \mathcal{F}$ が \mathcal{P} がバークマン扇条件を満たすことに反する。ゆえに $\sigma_{I' <_M \mathcal{F}'}$ が目的の錐である。 証明終

ここで, バークマン扇の星が高々二つの扇に分解できることを見ておく。この性質は主定理 [AHK18, Thm. 8.8] の証明において重要である。

定義 2.11 Σ を $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ 内の扇とし, Σ の錐 σ を一つ取る。 Σ の σ における**星**とは, $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}/\langle \sigma \rangle$ 内の扇

$$\{\bar{\tau} \mid \tau \text{ は } \sigma \text{ を含む } \Sigma \text{ の錐で, } \bar{\tau} \text{ は } \mathbf{N}_{\mathbb{R}}/\langle \sigma \rangle \text{ への } \tau \text{ の像である}\}$$

のことをいい, $\text{star}(\sigma, \Sigma)$ で表す。また Σ に属す射線 σ の最初の格子点 \mathbf{e} に対して $\text{star}(\sigma, \Sigma)$ を $\text{star}(\mathbf{e}, \Sigma)$ と書くこともある。

定義 2.12 M のフラット F を一つ取る。

(i) M の F への**制限**とは, フラット全体の族が

$$\{G \mid G \text{ は } F \text{ に含まれる } M \text{ のフラットである}\}$$

として与えられる F 上のマトロイドのことをいい, M^F で表される。 M^F の階数は $\text{rk}_M(F)$ である。

(ii) M の F への**縮約**とは, フラット全体の族が

$$\{G \setminus F \mid G \text{ は } F \text{ を含む } M \text{ のフラットである}\}$$

として与えられる $E \setminus F$ 上のマトロイドのことをいい, M_F で表される。 M_F の階数は $\text{crk}_M(F)$ である。

命題 2.13 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとし, F を M のフラットとする。

- (1) $\mathcal{P} \cap \mathcal{P}(M^F)$ を \mathcal{P}^F と置く。このとき \mathcal{P}^F は $\mathcal{P}(M^F)$ の順序フィルターである。
- (2) $\{G \in \mathcal{P}(M_F) \mid G \cup F \in \mathcal{P}\}$ を \mathcal{P}_F と置く。このとき \mathcal{P}_F は $\mathcal{P}(M_F)$ の順序フィルターである。

証明 省略する。

証明終

命題 2.14 F を M のフラット, i を E の元とする。

- (1) 対応 $\sum_{j \in E} \lambda_j \mathbf{e}_j \mapsto \left(\sum_{j \in F} \lambda_j \mathbf{e}_j, \sum_{j \in E \setminus F} \lambda_j \mathbf{e}_j \right)$ は群同型 $\phi: \mathbf{N}_E / \langle \mathbf{e}_F \rangle \simeq \mathbf{N}_F \oplus \mathbf{N}_{E \setminus F}$ を誘導する。
- (2) 対応 $\sum_{j \in E} \lambda_j \mathbf{e}_j \mapsto \sum_{j \in E \setminus \{i\}} \lambda_j \mathbf{e}_j$ は群同型 $\psi: \mathbf{N}_E / \langle \mathbf{e}_i \rangle \simeq \mathbf{N}_{E \setminus \{i\}}$ を誘導する。

証明 省略する。

証明終

命題 2.15 ([AHK18, Prop. 3.5]) \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。

- (1) \mathcal{P} に属すフラット F に対し, 命題 2.14(1) の ϕ は $\text{star}(\mathbf{e}_F, \Sigma_{M, \mathcal{P}})$ から $\Sigma_{M^F, \mathcal{P}^F} \times \Sigma_{M_F}$ への全単射を誘導する。
- (2) $\{i\}$ が M のフラットであるような E の元 i に対し, 命題 2.14(2) の ψ は $\text{star}(\mathbf{e}_i, \Sigma_{M, \mathcal{P}})$ から $\Sigma_{M \setminus \{i\}, \mathcal{P} \setminus \{i\}}$ への全単射を誘導する。

(1) の証明 まず $\phi(\text{star}(\mathbf{e}_F, \Sigma_{M, \mathcal{P}})) \subset \Sigma_{M^F, \mathcal{P}^F} \times \Sigma_{M_F}$ が成り立つこと, つまり $\text{star}(\mathbf{e}_F, \Sigma_{M, \mathcal{P}})$ の勝手な錐 $\bar{\sigma}_{I < \mathcal{F}}$ に対し, $\phi(\bar{\sigma}_{I < \mathcal{F}})$ が $\Sigma_{M^F, \mathcal{P}^F} \times \Sigma_{M_F}$ に属することを示す。ここで $I < \mathcal{F}$ は \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たす適合対で, $F \in \mathcal{F}$ であるものとする。 $\mathcal{F} = \{F_1 \subsetneq F_2 \subsetneq \cdots F_k\}$ と書き, $F_1 = F$ とする。このとき $\{F_1 \subsetneq \cdots \subsetneq F_{l-1}\}$ を \mathcal{G} とすると, $I < \mathcal{G}$ は \mathcal{P}^F のバークマン扇条件を満たす適合対であり, $\{F_{l+1} \setminus F \subsetneq \cdots \subsetneq F_k \setminus F\}$ を \mathcal{H} とすると, \mathcal{H} は $\mathcal{P}(M_F)$ の旗である。 I の勝手な元 i に対して $\phi(\mathbf{e}_i) = (\mathbf{e}_i, 0)$ であり, 勝手な番号 j に対し

$$\phi(\mathbf{e}_{F_j}) = \begin{cases} (\mathbf{e}_{F_j}, 0) & (j < l \text{ のとき}) \\ (0, \mathbf{e}_{F_j \setminus F}) & (j \geq l \text{ のとき}) \end{cases}$$

が成立するので, $\phi(\bar{\sigma}_{I < \mathcal{F}}) = \sigma_{I < \mathcal{G}} \times \sigma_{\emptyset < \mathcal{H}}$ であり, 右辺が $\Sigma_{M^F, \mathcal{P}^F} \times \Sigma_{M_F}$ に属す。 $\phi: \text{star}(\mathbf{e}_F, \Sigma_{M, \mathcal{P}}) \rightarrow \Sigma_{M^F, \mathcal{P}^F} \times \Sigma_{M_F}$ の単射性は $\phi: \mathbf{N}_E / \langle \mathbf{e}_F \rangle \simeq \mathbf{N}_F \oplus \mathbf{N}_{E \setminus F}$ の単射性から従うので, 全射性を示す。 \mathcal{P}^F のバークマン扇条件を満たす適合対 $I < \mathcal{G}$

と $\mathcal{P}(M_F)$ の旗 \mathcal{H} を取り, 錐 $\sigma_{I < \mathcal{G}} \times \sigma_{\emptyset < \mathcal{H}}$ を考える。 $\mathcal{G} = \{F_1 \subsetneq F_2 \subsetneq \cdots \subsetneq F_{l-1}\}$ と書き, $\mathcal{H} = \{F_{l+1} \setminus F \subsetneq F_{l+2} \setminus F \subsetneq \cdots \subsetneq F_k \setminus F\}$ と書くと, $F \in \mathcal{P}$ であるので, $\{F_1 \subsetneq \cdots \subsetneq F_{l-1} \subsetneq F \subsetneq F_{l+1} \subsetneq \cdots \subsetneq F_k\}$ は \mathcal{P} の旗である。この旗を \mathcal{F} と置くと, I が \mathcal{F} に適合し, $\phi(\sigma_{I < \mathcal{F}}) = \sigma_{I < \mathcal{G}} \times \sigma_{\emptyset < \mathcal{H}}$ が成立する。ゆえに $\phi: \text{star}(\mathbf{e}_F, \Sigma_{M, \mathcal{P}}) \rightarrow \Sigma_{M^F, \mathcal{P}^F} \times \Sigma_{M_F}$ は全射である。 証明終

(2) の証明 $\{i\} < \emptyset$ が \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たすのは, $\{i\} \notin \mathcal{P}$ であるときかつそのときに限るので, $\{i\} \in \mathcal{P}$ であるかそうでないかで場合分けが生じる。

$\{i\} \notin \mathcal{P}$ である場合。写像の well-defined 性 $\psi(\text{star}(\mathbf{e}_i, \Sigma_{M, \mathcal{P}})) \subset \Sigma_{M_{\{i\}}, \mathcal{P}_{\{i\}}}$ が成り立つことのみを示し, 全単射性は省略する。 $\{i\} < \emptyset$ が \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たすので, 命題 2.5 より $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の錐 $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ ($I < \mathcal{F}$ は \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たす) が \mathbf{e}_i を含むことは, $i \in I$ であることと同値である。よって $\mathcal{P}_{\{i\}}$ の旗 $\{F \setminus \{i\} \mid F \in \mathcal{F}\}$ を \mathcal{G} と置くと, $\psi(\sigma_{I < \mathcal{F}}) = \sigma_{(I \setminus \{i\}) < \mathcal{G}}$ であり, 後者は $\Sigma_{M_{\{i\}}, \mathcal{P}_{\{i\}}}$ に属す。

$\{i\} \in \mathcal{P}$ である場合。写像の well-defined 性 $\psi(\text{star}(\mathbf{e}_i, \Sigma_{M, \mathcal{P}})) \subset \Sigma_{M_{\{i\}}, \mathcal{P}_{\{i\}}}$ が成り立つことのみを示し, 全単射性は省略する。 \mathcal{P} が順序フィルターであることから, $\{i\}$ を含む $\mathcal{P}(M)$ のフラットはすべて \mathcal{P} に属す。ゆえに $\mathcal{P}_{\{i\}} = \mathcal{P}(M_{\{i\}})$ が成り立つ (つまり $\mathcal{P}_{\{i\}}$ はすべての $M_{\{i\}}$ の非空狭義フラットからなる)。また $\emptyset < \{i\}$ が \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たすので, 命題 2.5 より $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の錐 $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ が \mathbf{e}_i を含むことは, $\{i\} \in \mathcal{F}$ であることと同値であり, 後者は $\min \mathcal{F} = \{i\}$ であることと同値である。またこのとき $I = \emptyset$ である。 $\mathcal{P}_{\{i\}}$ の旗 $\{F \setminus \{i\} \mid F \in \mathcal{F} \setminus \{\{i\}\}\}$ を \mathcal{G} と置くと, $\psi(\sigma_{\emptyset < \mathcal{F}}) = \sigma_{\emptyset < \mathcal{G}}$ が成立し, 後者は扇 $\Sigma_{M_{\{i\}}, \mathcal{P}_{\{i\}}} = \Sigma_{M_{\{i\}}}$ に属す。 証明終

3 区分的線型関数

この節では \mathbf{N} と \mathbf{M} を有限階数の自由アーベル群とし, $\langle -, - \rangle: \mathbf{N} \times \mathbf{M} \rightarrow \mathbb{Z}$ を完全対²⁾とする。 $\mathbf{N} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{R}$ と $\mathbf{M} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{R}$ をそれぞれまた $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ と $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ と置くことに, \mathbf{N} と \mathbf{M} の完全対を $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ と $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の完全対に拡張したものも $\langle -, - \rangle$ と書くことにする。 Σ を \mathbf{N} 内のユニモジュラ扇とし, Σ に属す射線の最初の格子点すべてからなる集合を \mathbf{V}_{Σ} と置くことにする。

定義 3.1 ([AHK18, Sec. 4.1])

- (i) 関数 $\ell: |\Sigma| \rightarrow \mathbb{R}$ が Σ 上の**区分的線型関数**であるとは, 連続かつ Σ の各錐 σ に対し, $\ell|_{\sigma} = \langle -, \mathbf{m} \rangle|_{\sigma}$ が成立するような $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元が存在するときをいう。
- (ii) $\ell(|\Sigma| \cap \mathbf{N}) \subset \mathbb{Z}$ が成立するとき, 区分的線型関数 ℓ が**整**であるという。

2) $\langle -, - \rangle$ が \mathbb{Z} 双線型写像で, 対応 $x \mapsto \langle x, - \rangle$ と対応 $y \mapsto \langle -, y \rangle$ がそれぞれ \mathbf{N} から $\text{hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbf{M}, \mathbb{Z})$ への同型と \mathbf{M} から $\text{hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbf{N}, \mathbb{Z})$ への同型を誘導するものをいう。

(iii) Σ 上の整区分的線型関数すべてからなる集合を $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ で表すことにする。 $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ には各点和で加法を定めることでアーベル群の構造を持つ。

(iv) Σ 上の区分的線型関数すべてからなる集合を $\text{PL}_{\mathbb{R}}(\Sigma)$ で表すことにする。 $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ には各点和で加法を定め、各点のスカラー倍を考えることで \mathbb{R} 線型空間の構造を持つ。

Σ が特に単体的であるから、区分的線型関数は V_{Σ} における値により一意に定まり、したがって $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ は次で定めるクーラン関数を基底とする自由生成アーベル群であることがわかる。

定義 3.2 V_{Σ} に属す格子点 \mathbf{e} のクーラン関数 $x_{\mathbf{e}}$ とは、 V_{Σ} の各元 \mathbf{f} に対し

$$x_{\mathbf{e}}(\mathbf{f}) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{f} = \mathbf{e} \text{ のとき}) \\ 0 & (\mathbf{f} \neq \mathbf{e} \text{ のとき}) \end{cases}$$

で定められる整区分的線型関数のことをいう。

命題 3.3 $\text{PL}(\Sigma)$ は内部直和 $\bigoplus_{\mathbf{e} \in V_{\Sigma}} \mathbb{Z}x_{\mathbf{e}}$ と等しい。また Σ 上の区分的線型関数すべてがなす群 $\text{PL}_{\mathbb{R}}(\Sigma)$ は内部直和 $\bigoplus_{\mathbf{e} \in V_{\Sigma}} \mathbb{R}x_{\mathbf{e}}$ と等しい。

$\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ 上の整線型関数が誘導する Σ 上の区分的線型関数はクーラン関数の表現として次のように解釈できる。

定義 3.4 対応 $\mathbf{m} \mapsto \langle -, \mathbf{m} \rangle|_{|\Sigma|}$ で定まる \mathbf{M} から $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ への群準同型を res_{Σ} で表す。また同様の対応で定まる $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ から $\text{PL}_{\mathbb{R}}(\Sigma)$ への線型写像も res_{Σ} で表すことにする。

注意 3.5 V_{Σ} の格子点 \mathbf{e} に対し、 $\text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m})(\mathbf{e}) = \langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle$ が成立するので、 $\text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m})(\mathbf{e}) = \sum_{\mathbf{e} \in V_{\Sigma}} \langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle x_{\mathbf{e}}$ が成立する。

定義 3.6

- (i) $\text{res}_{\Sigma} : \mathbf{M} \rightarrow \text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ の余核を $A^1(\Sigma)$ と書く。 Σ 上の二つの区分的整線型関数 ℓ と ℓ' が \mathbb{Z} 上線型同値であるとは、 $A^1(\Sigma)$ における像が等しいときをいう。
- (ii) $\text{res}_{\Sigma} : \mathbf{M}_{\mathbb{R}} \rightarrow \text{PL}_{\mathbb{R}}(\Sigma)$ の余核を $A^1(\Sigma)_{\mathbb{R}}$ と書く。 Σ 上の二つの区分的線型関数 ℓ と ℓ' が線型同値であるとは、 $A^1(\Sigma)_{\mathbb{R}}$ における像が等しいときをいう。

3.1 区分的線型関数の凸性

定義 3.7 Σ 上の区分的線形関数 ℓ と Σ の錐 σ を考える。

- (i) Σ における σ の接続とは、

$$\{\tau \in \Sigma \mid \sigma \text{ と } \tau \text{ を包含する } \Sigma \text{ の錐が存在し、かつ } \sigma \cap \tau = \{0\} \text{ である}\}$$

のことをいい、 $\text{link}(\sigma, \Sigma)$ で表す。

- (ii) ℓ が σ の周りで凸であるとは、 σ 上で零かつ $\text{link}(\sigma, \Sigma)$ に属す射線上で非負であるような Σ 上の区分的線形関数と ℓ が線型同値であるとき、あるいはより明示的に、 σ

上で $\ell = \langle -, \mathbf{m} \rangle$ かつ $\text{link}(\sigma, \Sigma)$ に属す射線上で $\ell \geq \langle -, \mathbf{m} \rangle$ を満たす $\mathbb{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m} が存在するときをいう。

(iii) ℓ が σ の周りで**強凸**であるとは、 σ 上で零かつ $\text{link}(\sigma, \Sigma)$ に属す射線上で正であるような Σ 上の区分的線形関数と ℓ が線型同値であるとき、あるいはより明示的に、 σ 上で $\ell = \langle -, \mathbf{m} \rangle$ かつ $\text{link}(\sigma, \Sigma)$ に属す射線上で $\ell > \langle -, \mathbf{m} \rangle$ を満たす $\mathbb{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m} が存在するときをいう。

(iv) ℓ が**凸**であるとは、 Σ に属すすべての錐の周りで凸であるときをいう。

(v) ℓ が**強凸**であるとは、 Σ に属すすべての錐の周りで強凸であるときをいう。

[Ful93, Sec. 3.4] の文脈で下に凸な区分的線型関数は、定義 3.7 の意味で凸である。

命題 3.8 Σ が完備であるとし、 Σ 上の区分的線型関数 ℓ を考える。

(1) Σ の勝手な極大錐 σ に対し、 σ 上で零かつ $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で非負であるような区分的線型関数と ℓ が線型同値であるとする。このとき ℓ は凸である。

(2) Σ の勝手な極大錐 σ に対し、 σ 上で零かつ $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で正であるような区分的線型関数と ℓ が線型同値であるとする。このとき ℓ は強凸である。

(1) の証明 Σ の勝手な錐 τ に対して、 τ を含む極大錐 σ を取り、 $\ell - \text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m})$ が σ 上で零かつ $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で非負となるように、 $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m} を取れば、 $\ell - \text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m})$ が特に $\text{link}(\tau, \Sigma)$ に属す射線上で非負であるから、 ℓ は τ の周りで凸である。 証明終

(2) の証明 Σ の錐 τ を勝手に取り、 τ を含む Σ の極大錐 σ を一つ取ると、仮定より $\ell - \text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m})$ が $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で正かつ σ 上で零となるような $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m} が存在する。 $\ell - \text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m})$ は特に τ 上で零である。 σ を生成する \mathbf{N} の基底を $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n$ とし、そのうち $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_m$ が τ を生成するように並べ替えておく。ここで正実数 ϵ に対し、

$$\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle = 0, \dots, \langle \mathbf{e}_m, \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle = 0, \langle \mathbf{e}_{m+1}, \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle = -\epsilon, \dots, \langle \mathbf{e}_n, \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle = -\epsilon$$

で定まる $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m}_{ϵ} を考える。すると $\ell - \text{res}_{\Sigma}(\mathbf{m} + \mathbf{m}_{\epsilon})$ は τ 上で零かつ $\sigma - \tau$ 上で正である。 $\text{cone}(\{\mathbf{e}_i\}) \in \text{link}(\tau, \Sigma)$ を満たす V_{Σ} の格子点 \mathbf{e} のうち、 $\mathbf{e}_{m+1}, \dots, \mathbf{e}_n$ でないものを考える。 \mathbf{m} の取り方から $\langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle < \ell(\mathbf{e})$ であり、また $\langle \mathbf{e}, \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle$ が $\lim_{\epsilon \rightarrow +0} \langle \mathbf{e}, \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle = 0$ となる $(0, \infty)$ 上の連続関数であるので、 $\langle \mathbf{e}, \mathbf{m} + \mathbf{m}_{\epsilon} \rangle < \ell(\mathbf{e})$ が勝手な \mathbf{e} に対して成立する ϵ が存在する。ゆえに ℓ は τ の周りで強凸である。 証明終

系 3.9 Σ が $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の最大次元多面体 P の法扇であるとき、 Σ 上の強凸区分的線型関数が存在する。

証明 P が有界閉集合であることに注意して、 $\ell(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{v} \in P} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle$ によって $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ 上の関数 ℓ を定める。 Σ が P の法扇であることから、 Σ の各錐 σ は、 P の一意的な面 S を用いて

$\sigma = \{\mathbf{u} \in \mathbf{N}_{\mathbb{R}} \mid P \text{ 上の関数 } \langle \mathbf{u}, - \rangle \text{ が } S \text{ 上で最大値を取る}\}$ と表されるので、 S の元 \mathbf{v}_{σ} を一つ取れば、 σ 上で ℓ と $\langle -, \mathbf{v}_{\sigma} \rangle$ が等しく、 ℓ は特に σ 上で線型である。また \mathbf{v}_{σ} として S の頂点を取ることで、

$$\ell(\mathbf{u}) = \max\{\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle \mid \mathbf{v} \text{ は } P \text{ の頂点である}\}$$

と表すことができ、 $\langle -, \mathbf{v} \rangle$ が連続関数であることから ℓ も連続関数である。 ℓ が強凸であることを見るため、 Σ の極大錐 σ を考える。 σ に対応する P の面 S は 0 次元、すなわち一点 \mathbf{v}_{σ} である。ゆえに σ に属さない点 \mathbf{u} に対し、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_{\sigma} \rangle < \langle \mathbf{u}, \mathbf{w} \rangle$ となるような P の点 \mathbf{w} が存在するので、 $\text{res}_{\Sigma}(\mathbf{v}_{\sigma})(\mathbf{u}) < \ell(\mathbf{u})$ が成立する。したがって命題 3.8(2) により ℓ が強凸であることが従う。 証明終

この部分節の最後に命題 3.8 の逆も成立することを見ておく。

命題 3.10 Σ が完備であるとし、 Σ 上の区分的線型関数 ℓ を考える。

- (1) ℓ が凸であるとき、 Σ の勝手な極大錐 σ に対し、 σ 上で零かつ $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で非負であるような区分的線型関数と ℓ が線型同値である。
- (2) ℓ が強凸であるとき、 Σ の勝手な極大錐 σ に対し、 σ 上で零かつ $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で正であるような区分的線型関数と ℓ が線型同値である。

この命題を示すための重要な補題を述べる。極大錐 σ に対し、 σ 上で ℓ と一致する線型関数が一意的に定まるので、これに対応する $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元を \mathbf{m}_{σ} で表すことにする。

補題 3.11 ℓ が凸であるとする。共通の面 $\sigma \cap \sigma'$ が余次元 1 であるような相異なる極大錐 σ と σ' に対し、部分空間 $\langle \sigma \cap \sigma' \rangle$ が分ける半空間を考える。このとき σ' と同じ側の半空間の点 \mathbf{u} に対し、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma} \rangle \leq \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle$ が成立する。また ℓ が強凸かつ $\mathbf{u} \notin \sigma$ であるなら、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma} \rangle < \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle$ が成立する。

証明 σ を生成する \mathbf{N} の基底を $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ とし、 σ' を生成する \mathbf{N} の基底を $\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ とする。 σ と σ' の内部が交わらないので、 $\mathbf{e}'_1 = \lambda_1 \mathbf{e}_1 + \dots + \lambda_n \mathbf{e}_n$ と表したとき、 $\lambda_1 < 0$ である。次に、 ℓ が $\sigma \cap \sigma'$ の周りで凸であるから、

$$\langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m} \rangle = \ell(\mathbf{e}_2), \langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m} \rangle = \ell(\mathbf{e}_2) \dots, \langle \mathbf{e}_n, \mathbf{m} \rangle = \ell(\mathbf{e}_n), \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m} \rangle \leq \ell(\mathbf{e}_1), \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m} \rangle \leq \ell(\mathbf{e}_1)$$

を満たす $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m} が存在する。 $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{m}' を

$$\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m}' \rangle = \ell(\mathbf{e}_1) - \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m} \rangle, \langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m}' \rangle = \dots = \langle \mathbf{e}_n, \mathbf{m}' \rangle = 0$$

で定まるものとする、 $\mathbf{m} + \mathbf{m}' = \mathbf{m}_{\sigma}$ である。すると

$$(3.1) \quad \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m}_{\sigma} \rangle = \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m} \rangle + \lambda_1 \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m}' \rangle \leq \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m} \rangle \leq \ell(\mathbf{e}'_1) = \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle$$

と計算できる。さて $\langle \sigma \cap \sigma' \rangle$ が分ける半空間のうち、 σ' と同じ側の半空間に属す点 \mathbf{u} は、非負実数 μ と実数 μ_2, \dots, μ_n を用いて

$$\mathbf{u} = \mu \mathbf{e}'_1 + \lambda_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \lambda_n \mathbf{e}_n$$

と表すことができるので、 $\langle -, \mathbf{m}_\sigma \rangle$ と $\langle -, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle$ が $\sigma \cap \sigma'$ 上で一致することに注意して、

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_\sigma \rangle &= \mu \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m}_\sigma \rangle + \lambda_2 \langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m}_\sigma \rangle + \dots + \lambda_n \langle \mathbf{e}_n, \mathbf{m}_\sigma \rangle \\ (3.2) \quad &\leq \mu \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle + \lambda_2 \langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle + \dots + \lambda_n \langle \mathbf{e}_n, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle \\ &= \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma'} \rangle \end{aligned}$$

と計算でき、題意が従う。また ℓ が強凸かつ $\mathbf{u} \notin \sigma$ であるとき、 $\mu < 0$ なので (3.1) の等号が不成立で、(3.2) の不等号も不成立になる。証明終

(1) の証明 極大錐 σ を固定する。 \mathbf{N}_σ 上で $\langle -, \mathbf{m}_\sigma \rangle \leq \ell$ であることを示せばよい。 \mathbf{N}_σ の点 \mathbf{u} を取り、 σ の内部の点 \mathbf{v} を結ぶ開線分 (\mathbf{u}, \mathbf{v}) を考える。 Σ の余次元 1 の錐すべてを τ_1, \dots, τ_m とし、部分空間 $\langle \tau_i \rangle$ が (\mathbf{u}, \mathbf{v}) と交わるようなものすべてを τ_1, \dots, τ_k とする。 \mathbf{v} を極大錐 σ の内部として取っているので、 (\mathbf{u}, \mathbf{v}) 上の点が高々一つの $\langle \tau_i \rangle$ と交わるようにすることができる。 \mathbf{u} から \mathbf{v} へ進むときに τ_1, \dots, τ_k の順番で交わるとする。各 τ_i はちょうど二つの極大錐に含まれるので、それら極大錐を \mathbf{u} に近い順に $\sigma_1, \dots, \sigma_{k+1}$ とする。 σ_1 は \mathbf{u} を含み、かつ $\sigma_{k+1} = \sigma$ である。補題 3.11 より

$$\ell(\mathbf{u}) = \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma_1} \rangle \geq \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma_2} \rangle \geq \dots \geq \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma_{k+1}} \rangle = \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_\sigma \rangle$$

と計算でき、題意が従う。証明終

(2) の証明 極大錐 σ を固定し、 $\mathbf{N}_\mathbb{R} \setminus \sigma$ の点 \mathbf{u} に対して、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_\sigma \rangle < \ell(\mathbf{u})$ が成立することを示せば良い。(1) の証明の記法を引き継ぐと、部分空間が (\mathbf{u}, \mathbf{v}) と交わるような余次元 1 の錐が少なくとも一つ存在するので、補題 3.11 より

$$\ell(\mathbf{u}) = \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma_1} \rangle > \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma_2} \rangle > \dots > \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_{\sigma_{k+1}} \rangle = \langle \mathbf{u}, \mathbf{m}_\sigma \rangle$$

となり題意が従う。証明終

3.2 数値的非負錐と豊富錐

定義 3.12

- (i) 凸区分的線型関数の線型同値類すべてからなる $A^1(\Sigma)$ の部分集合を数値的非負錐といい、 \mathcal{N}_Σ で表される。 \mathcal{N}_Σ は閉凸錐である。

(ii) 強凸区分的線型関数の線型同値類すべてからなる $A^1(\Sigma)$ の部分集合を**豊富錐**といい、 \mathcal{K}_Σ で表される。 \mathcal{K}_Σ は開凸錐である。

以下で数値的非負錐と豊富錐の開核と閉包の関係について調べる。

命題 3.13 \mathcal{K}_Σ が空でなければ、 \mathcal{K}_Σ の閉包 $\bar{\mathcal{K}}_\Sigma$ と \mathcal{N}_Σ は等しい。

証明 $\mathcal{K}_\Sigma \subset \mathcal{N}_\Sigma$ かつ \mathcal{N}_Σ であることから、 $\bar{\mathcal{K}}_\Sigma \subset \mathcal{N}_\Sigma$ が従う。逆に、 ℓ を凸区分的線型関数とし、 ℓ' を強凸区分的線型関数とする。すると、勝手な正実数 ϵ に対し、 $\ell + \epsilon\ell'$ が強凸区分的線型関数であるから、 $A^1(\Sigma)$ の元として ℓ は \mathcal{K}_Σ の触点である。ゆえに $\mathcal{N}_\Sigma \subset \bar{\mathcal{K}}_\Sigma$ が成立する。 証明終

命題 3.14 \mathcal{K}_Σ が空でなければ、 \mathcal{N}_Σ の開核 \mathcal{N}_Σ° と \mathcal{K}_Σ は等しい。

この命題は、凸開集合の閉包の開核が自身と一致することから示されるので、その証明を述べておく。

補題 3.15 X を $\mathbf{N}_\mathbb{R}$ 内の凸開集合とする。 $(-)^{\circ}$ を開核作用素、 $(-)^{-}$ を閉包作用素とするとき、 $X = ((X)^{-})^{\circ}$ が成立する。

証明 X が空集合であるときは明らかであるから、 X は空集合でないとする。 X が開集合であることから、 $X \subset ((X)^{-})^{\circ}$ は成り立つ。逆に $((X)^{-})^{\circ}$ の点 \mathbf{x} を取り、 X の点 \mathbf{y} を一つ固定しておく。 \mathbf{x} が \bar{X} の内点であるから、 $\bar{B}_\epsilon(\mathbf{x}) \subset \bar{X}$ が成立するような正実数 ϵ が存在する。同様に、 X が開集合であるから、 $\bar{B}_\delta(\mathbf{y}) \subset X$ となるような正実数 δ が存在する。ここで、 $\mathbf{N}_\mathbb{R}$ のノルム $|\cdot|$ を固定し、 $\bar{B}_\epsilon(\mathbf{x})$ が \mathbf{x} を中心とする半径 ϵ の閉球を表すとする。 \mathbf{e} を $\mathbf{x} - \mathbf{y}$ 方向の単位ベクトルとし、 $\frac{1}{1+\epsilon/|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}$ を λ と置くととき、

$$\mathbf{x} = \lambda(\mathbf{x} + \epsilon\mathbf{e}) + (1 - \lambda)\mathbf{y}$$

が成立する。また $\mathbf{x} + \epsilon\mathbf{e} \in \bar{B}_\epsilon(\mathbf{x})$ であるから、この点は特に \bar{X} に属す。ゆえに $\bar{B}_{\frac{(1-\lambda)\delta}{\lambda}}(\mathbf{x} + \epsilon\mathbf{e})$ と X は交わるので、そのような点 \mathbf{z} を取る。またこのとき $B_{\frac{(1-\lambda)\delta}{\lambda}}(\mathbf{x} + \epsilon\mathbf{e})$ の点 \mathbf{u} を用いて $\mathbf{z} = (\mathbf{x} + \epsilon\mathbf{e}) + \mathbf{u}$ と表すことができる。ここまでの準備により、

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \lambda(\mathbf{x} + \epsilon\mathbf{e}) + (1 - \lambda)\mathbf{y} \\ &= \lambda(\mathbf{z} - \mathbf{u}) + (1 - \lambda)\mathbf{y} \\ &= \lambda\mathbf{z} + (1 - \lambda)\left(\mathbf{y} - \frac{\lambda}{1 - \lambda}\mathbf{u}\right) \end{aligned}$$

となり、 $\left|\frac{\lambda}{1 - \lambda}\mathbf{u}\right| \leq \delta$ であるから、 $\mathbf{y} - \frac{\lambda}{1 - \lambda}\mathbf{u} \in X$ である。 X が凸であるので、 $\mathbf{x} \in X$ である。ゆえに $((X)^{-})^{\circ} \subset X$ が成立する。 証明終

命題 3.14 の証明 $\mathcal{K}_\Sigma \neq \emptyset$ なので命題 3.16 より $\mathcal{N}_\Sigma = \bar{\mathcal{K}}_\Sigma$ であるから、 $\mathcal{K}_\Sigma = ((\mathcal{K}_\Sigma)^{-})^{\circ} = \mathcal{N}_\Sigma^\circ$ が成立する。 証明終

付録

この付録では、 $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の最大次元多面体の法扇の特徴づけを行う。

命題 3.16 P を $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ 内の最大次元多面体³⁾ とし、 $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ 上の関数 φ_P を $\varphi_P(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{v} \in P} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle$ で定める。このとき φ_P が強凸区分的線型関数となるような扇 $\mathcal{N}(P)$ が一意的に存在する。

まずいくつかの補題を用意する。

補題 3.17 P の頂点すべてを $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m$ とするとき、 $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ の勝手な点 \mathbf{u} に対し

$$\ell(\mathbf{u}) = \max_{i=1, \dots, m} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle, \dots, \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_m \rangle$$

が成立する。

証明 $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ の点 \mathbf{u} を勝手に固定し、必要なら並べ替えを行うことで、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle \geq \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_2 \rangle, \dots, \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_m \rangle$ が成り立つようにしておく。 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m$ が P の頂点すべてであるから、

$$P = \left\{ \lambda_1 \mathbf{v}_1 + \dots + \lambda_m \mathbf{v}_m \mid \lambda_1, \dots, \lambda_m \text{ は } \sum_{i=1}^m \lambda_i \leq 1 \text{ を満たす非負実数である} \right\}$$

と書くことができるので、 P の勝手な点 \mathbf{v} に対し、

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle &= \lambda_1 \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle + \lambda_2 \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_2 \rangle + \dots + \lambda_m \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_m \rangle \\ &\leq \lambda_1 \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle + \lambda_2 \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle + \dots + \lambda_m \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle && (\lambda_i \text{ が非負実数なので}) \\ &= \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle && \left(\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \text{ なので} \right) \end{aligned}$$

と計算できる。ゆえに $\varphi_P(\mathbf{u}) = \max_{\mathbf{v} \in P} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_1 \rangle$ となり、大意が従う。 証明終

補題 3.18 各番号 i に対し、

$$\{\mathbf{u} \in \mathbf{N}_{\mathbb{R}} \mid \text{すべての番号 } j \text{ に対し、} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_i \rangle \geq \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_j \rangle \text{ が成立する}\}$$

を σ_i と置く。 σ_i は凸錐であり、多面集合である（有限個の不等式で定義されるので）ことに注意する。このとき σ_i は最大次元である。

証明 \mathbf{v}_i が P の頂点であるから、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_i \rangle = b$ かつ $P \setminus \{\mathbf{v}_i\}$ の勝手な点 \mathbf{v} に対し $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle < b$ が成立するような $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ の元 \mathbf{u} と実数 b が存在する（ $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ 内の超平面 $\langle \mathbf{u}, - \rangle = b$ を用いて、 P から \mathbf{v}_i を切り取ることができる）。ゆえに i と異なる番号 j に対して、 $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_i \rangle > \langle \mathbf{u}, \mathbf{v}_j \rangle$ が成立し、 \mathbf{u} が σ_i の内点であることがわかる。ゆえに σ_i は最大次元多面凸錐である。 証明終

3) 多面体には有界性を課す。有界性を課さないものは多面集合と呼ぶ。

注意 3.19 σ_i と σ_j に対し, $\sigma_i \cap \sigma_j$ はその共通の面であるから, $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ の面すべての集合を $\mathcal{N}(P)$ で表すとき, $\mathcal{N}(P)$ は扇で, さらに完備である。

命題 3.16 の証明 まずはじめに φ_P が強凸区分的線型関数となるような扇の存在することを示す。

存在性 注意 3.19 で定めた $\mathcal{N}(P)$ が目的の性質を満たす。定義より φ_P は $\mathcal{N}(P)$ の錐上で線型であるから, 強凸性を確かめれば良い。 $\mathcal{N}(P)$ の極大錐は $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ のいずれかである。 σ_i の定義より, σ_i 上で $\varphi_P = \langle -, \mathbf{v}_i \rangle$ かつ, $\mathbf{N}_{\mathbb{R}} \setminus \sigma$ 上で $\varphi_P > \langle -, \mathbf{v}_i \rangle$ であるので, φ_P は強凸である。

一意性 $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ 内の完備扇 Σ を取り, φ_P が Σ 上の強凸区分的線型関数であるとする。 σ を Σ の極大錐とすると, $\sigma \subset \bigcup_{i=1}^m \sigma_i$ であり, σ も $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ も最大次元であるから, 必要なら番号を取り替えることで, $\sigma^\circ \cap \sigma_1^\circ \neq \emptyset$ となる。ここで $(-)^{\circ}$ が開核作用素を表すものとする。 σ_1 上で φ_P と一致する線型写像を定める $\mathbf{M}_{\mathbb{R}}$ の元を \mathbf{m}_{σ} で表すとき, 非空開集合 $\sigma^\circ \cap \sigma_1^\circ$ 上で $\langle -, \mathbf{m}_{\sigma} \rangle = \langle -, \mathbf{v}_1 \rangle$ が成立するので, $\mathbf{m}_{\sigma} = \mathbf{v}_1$ でなければならない。ゆえに補題 3.17 と σ_1 の構成より $\sigma \subset \sigma_1$ が従う。さてこのとき $\sigma = \sigma_1$ であることを主張する。そうでなかったとすると, $\sigma_1^\circ \setminus \sigma$ の点 \mathbf{u} をとることができるので, \mathbf{u} を内点としてもつ Σ の極大錐を σ' と置くことにする。すると $(\sigma')^\circ \cap \sigma_1^\circ \neq \emptyset$ であるから, 上の議論から $\sigma' \subset \sigma_1$ であることがわかるが, φ_P が強凸であることから $\mathbf{m}_{\sigma} \neq \mathbf{m}_{\sigma'}$ である一方, $\mathbf{m}_{\sigma} = \mathbf{v}_1 = \mathbf{m}_{\sigma'}$ となり矛盾が生じる。ゆえに $\sigma = \sigma_1$ である。したがって Σ の極大錐がすべて $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ のいずれかであるので, $\Sigma = \mathcal{N}(P)$ でなければならない。証明終

4 バーグマン扇上の凸区分的線型関数

M を $n+1$ 元集合 E 上の階数 $r+1$ のマトロイドとする。 \mathbb{Z}^E に対して基底 $\{\mathbf{e}_i \mid i \in E\}$ に関する標準内積 $\langle -, - \rangle: \mathbb{Z}^E \times \mathbb{Z}^E \rightarrow \mathbb{Z}$ を与える。このとき, 格子 $\{\mathbf{u} \in \mathbb{Z}^E \mid \langle \mathbf{u}, \mathbf{e}_E \rangle\}$ を \mathbf{M}_E ⁴⁾ とすれば, $\langle -, - \rangle$ は完全対 $\langle -, - \rangle: \mathbf{N}_E \times \mathbf{M}_E \rightarrow \mathbb{Z}$ を誘導する。

命題 4.1 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとし, $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の数値的非負錐を $\mathcal{N}_{M, \mathcal{P}}$, $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ の豊富錐を $\mathcal{K}_{M, \mathcal{P}}$ で表す。このとき次が成立する。

- (1) $\mathcal{K}_{M, \mathcal{P}} \neq \emptyset$ である。
- (2) $\mathcal{N}_{M, \mathcal{P}} = \tilde{\mathcal{K}}_{M, \mathcal{P}}$ である。
- (3) $\mathcal{K}_{M, \mathcal{P}} = \mathcal{N}_{M, \mathcal{P}}^\circ$ である。

命題 4.1(1) の証明 $\Sigma_{M, \mathcal{P}} \subset \Sigma_{\mathcal{P}}$ であり, $\Sigma_{\mathcal{P}}$ 上の強凸区分的線型関数 ℓ が系 3.9 より存在

4) E の元 i を固定すれば, $\mathbf{M}_E = \bigoplus_{j \in E \setminus \{i\}} \mathbb{Z}(\mathbf{e}_j - \mathbf{e}_i)$ である。

する。すると $\ell|_{\Sigma_{M,\mathcal{P}}}$ が $\Sigma_{M,\mathcal{P}}$ 上の強凸区分的線型関数であるから、 $A^1(\Sigma_{M,\mathcal{P}})$ 豊富類を定める。 証明終

命題 4.1(2) と (3) の証明 $\mathcal{K}_{M,\mathcal{P}} \neq \emptyset$ であるので、命題 3.16 と命題 3.14 から示される。 証明終

M のマトロイド構造の観点からすると E に余分な元が存在するときがあるので、そのような元を潰すことを考える。

定義 4.2 M の階数 1 のフラットすべてからなる集合を \bar{E} とする。 M のフラット F に対し、 $\{A \in \bar{E} \mid A \subset F\}$ を \bar{F} と置くと、 $\{\bar{F} \in 2^{\bar{E}} \mid F \text{ は } M \text{ のフラットである}\}$ は \bar{E} 上のフラットの族を与える。こうして定まるマトロイドを \bar{M} で表し、 M の組合せ論的構造と呼ぶ。 \bar{M} は単純、すなわち一元のサーキットも二元のサーキットも持たない。

注意 4.3 M と \bar{M} はマトロイドとして同型ではないが、 $\mathcal{P}(M)$ と $\mathcal{P}(\bar{M})$ は $F \mapsto \bar{F}$ により半順序集合として同型である。

この節の目標は、 $\mathcal{N}_{M,\mathcal{P}}$ と $\mathcal{K}_{M,\mathcal{P}}$ が、それぞれ $\mathcal{N}_{\bar{M},\mathcal{P}}$ と $\mathcal{K}_{\bar{M},\mathcal{P}}$ と同等であることを示すことにある。これ以降で、自然な全射写像 $\pi: E \rightarrow \bar{E}$ ⁵⁾ の切断 $\iota: \bar{E} \rightarrow E$ を一つ固定する。ここで $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{M,\mathcal{P}})$ と $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{\bar{M},\mathcal{P}})$ の基底について言及しておく。

命題 4.4 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとし、 $\bar{\mathcal{P}}$ を対応する $\mathcal{P}(\bar{M})$ の順序フィルターとする。 $\Sigma_{M,\mathcal{P}}$ に属す射線の最初の格子点すべてからなる集合を $V_{M,\mathcal{P}}$ 、 $\Sigma_{\bar{M},\mathcal{P}}$ に属す射線の最初の格子点すべてからなる集合を $V_{\bar{M},\mathcal{P}}$ で表すことにする。このとき

$$V_{M,\mathcal{P}} = \{\mathbf{e}_i \mid i \text{ は } \text{cl}_M(\{i\}) \notin \mathcal{P} \text{ を満たす } E \text{ の元である}\} \cup \{\mathbf{e}_F \mid F \in \mathcal{P}\}$$

$$V_{\bar{M},\mathcal{P}} = \{\mathbf{e}_A \mid A \text{ は } A \notin \bar{\mathcal{P}} \text{ を満たす } \bar{E} \text{ の元である}\} \cup \{\mathbf{e}_{\bar{F}} \mid \bar{F} \in \bar{\mathcal{P}}\}$$

が成立する。

証明 省略する。 証明終

記法 4.5 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。 $\text{cl}_M(\{i\})$ を満たす元 i に対し、 \mathbf{e}_i のクーラン関数を x_i で表す。同様に、 \mathcal{P} に属すフラット F に対し、 \mathbf{e}_F のクーラン関数を x_F で表すことにする。

まず最初に、 π と ι が $A^1(\Sigma_{M,\mathcal{P}})$ と $A^1(\Sigma_{\bar{M},\mathcal{P}})$ の間の同型を誘導することを示す。

命題 4.6 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。

- (1) 対応 $\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j \mapsto \mathbf{e}_{\pi(i)} - \mathbf{e}_{\pi(j)}$ は群準同型 $\pi_M: \mathbf{M}_E \mapsto \mathbf{M}_{\bar{E}}$ を誘導する。
- (2) 対応 $\mathbf{e}_A - \mathbf{e}_B \mapsto \mathbf{e}_{\iota(A)} - \mathbf{e}_{\iota(B)}$ は群準同型 $\iota_M: \mathbf{M}_{\bar{E}} \mapsto \mathbf{M}_E$ を誘導する。
- (3) 対応 $x_i \mapsto x_{\pi(i)}$ と $x_F \mapsto x_{\bar{F}}$ は群準同型 $\pi_{\text{PL}}: \text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{M,\mathcal{P}}) \rightarrow \text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{\bar{M},\mathcal{P}})$ を誘導する。

5) $\pi(i) = \text{cl}_M(\{i\})$ である。

(4) 対応 $x_A \mapsto x_{t(A)}$ と $x_F \mapsto x_F$ は群準同型 $l_{\text{PL}}: \text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{\bar{M}, \mathcal{P}}) \rightarrow \text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{M, \mathcal{P}})$ を誘導する。

証明 省略する。(1) と (2) で定める写像は固定する元の選び方（つまり基底の選び方）に依存しないことに注意する。 証明終

命題 4.7 図式

$$\begin{array}{ccc}
 \text{PL}(\Sigma_{M, \mathcal{P}}) & \xrightleftharpoons[l_{\text{PL}}]{\pi_{\text{PL}}} & \text{PL}(\Sigma_{\bar{E}, \mathcal{P}}) \\
 \uparrow \text{res} & & \uparrow \text{res} \\
 \mathbf{M}_E & \xrightleftharpoons[l_{\mathbf{M}}]{\pi_{\mathbf{M}}} & \mathbf{M}_{\bar{E}}
 \end{array}$$

において次の四つが成立する。

$$(4.1) \quad \pi_{\text{PL}} \circ \text{res} = \text{res} \circ \pi_{\mathbf{M}}$$

$$(4.2) \quad l_{\text{PL}} \circ \text{res} = \text{res} \circ l_{\mathbf{M}}$$

$$(4.3) \quad \pi_{\mathbf{M}} \circ l_{\mathbf{M}} = \text{id}$$

$$(4.4) \quad \pi_{\text{PL}} \circ l_{\text{PL}} = \text{id}$$

が成立する。

(4.3) と (4.4) は定義よりすぐに従うので省略する。まず (4.1) が成立することを確認する。

補題 4.8 M のフラット F と \mathbf{M}_E の元 \mathbf{m} に対し、 $\langle \mathbf{e}_F, \mathbf{m} \rangle = \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle$ が成立する。

証明 $F = E$ のときは $\mathbf{e}_F = 0$ かつ $\mathbf{e}_{\bar{F}} = 0$ であるから主張が正しい。 $F \neq E$ とし、 $E \setminus F$ の元 j を一つ固定する。 $E \setminus \{j\}$ の各元 i に対して、 $i \in F$ が成立することと $\pi(i) \in F$ が成立することは同値であり、後者は $\pi(i) \in \bar{F}$ が成立することと同値である。また $\pi(i) \neq \pi(j)$ であるから、

$$\begin{aligned}
 \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j \rangle &= \begin{cases} 1 & (i \in F \text{ のとき}) \\ 0 & (i \notin F \text{ のとき}) \end{cases} & (i \neq j \text{ かつ } j \notin F \text{ なので}) \\
 &= \begin{cases} 1 & (\pi(i) \in \bar{F} \text{ のとき}) \\ 0 & (\pi(i) \notin \bar{F} \text{ のとき}) \end{cases} \\
 &= \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{e}_{\pi(i)} - \mathbf{e}_{\pi(j)} \rangle & (\pi(i) \neq \pi(j) \text{ なので}) \\
 &= \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) \rangle
 \end{aligned}$$

が成立する。ゆえに

$$\begin{aligned}
\langle \mathbf{e}_F, \mathbf{m} \rangle &= \left\langle \mathbf{e}_F, \sum_{i \in E \setminus \{j\}} \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{m} \rangle (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) \right\rangle \\
&= \sum_{i \in E \setminus \{j\}} \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{m} \rangle \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j \rangle \\
&= \sum_{i \in E \setminus \{j\}} \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{m} \rangle \langle \mathbf{e}_F, \pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) \rangle \\
&= \left\langle \mathbf{e}_F, \pi_{\mathbf{M}} \left(\sum_{i \in E \setminus \{j\}} \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{m} \rangle \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j \right) \right\rangle \\
&= \langle \mathbf{e}_F, \pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle
\end{aligned}$$

と計算できる。

証明終

(4.1) が成立することの証明 \mathbf{M}_E の元 \mathbf{m} を一つ取る。補題 4.8 を用いると

$$\begin{aligned}
\pi_{\text{PL}}(\text{res}(\mathbf{m})) &= \pi_{\text{PL}} \left(\sum_{\substack{i \in E: \\ \pi(i) \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{m} \rangle x_i + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{m} \rangle x_F \right) \\
&= \sum_{\substack{i \in E: \\ \pi(i) \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_i, \mathbf{m} \rangle x_{\pi(i)} + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{m} \rangle x_{\bar{F}} \\
&= \sum_{\substack{A \in \bar{E}: \\ A \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle x_A + \sum_{\bar{F} \in \bar{\mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{m} \rangle x_{\bar{F}} \\
&= \sum_{\substack{A \in \bar{E}: \\ A \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_A, \pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_A + \sum_{\bar{F} \in \bar{\mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_{\bar{F}} \quad (\text{補題 4.8 を用いる}) \\
&= \text{res}(\pi_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}))
\end{aligned}$$

と計算でき、題意が従う。

証明終

次に (4.2) を示すための補題を用意する。

補題 4.9 $\mathbf{M}_{\bar{E}}$ のフラット \bar{F} と $\mathbf{M}_{\bar{E}}$ の元 \mathbf{m} に対し、 $\langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{m} \rangle = \langle \mathbf{e}_F, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle = \langle \mathbf{e}_{\iota(F)}, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle$ が成立する。

証明 一般に、 $E \setminus \iota(\bar{E})$ の元 i と \bar{E} の二元 A と B に対し、 $\langle \mathbf{e}_i, \mathbf{e}_{\iota(A)} - \mathbf{e}_{\iota(B)} \rangle = 0$ が成立するので、 $\langle \mathbf{e}_F, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle = \langle \mathbf{e}_{\iota(F)}, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle$ が成立する。また $\bar{F} = \bar{E}$ のとき、 $\mathbf{e}_{\bar{F}} = 0$ かつ $\mathbf{e}_F = 0$ であるから、主張の等式が明らかである。 $\bar{F} \neq \bar{E}$ とし、 $\bar{E} \setminus \bar{F}$ の元 B を一つ固定する。このとき $\bar{E} \setminus \{B\}$ の元 A に対し、 $A \in \bar{F}$ が成立することと $\iota(A) \in F$ が成立することは同値であ

る。また $\iota_{\mathbf{M}}(A) \neq \iota_{\mathbf{M}}(B)$ であることから

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{e}_A - \mathbf{e}_B \rangle &= \begin{cases} 1 & (A \in \bar{F} \text{ のとき}) \\ 0 & (A \notin \bar{F} \text{ のとき}) \end{cases} \\ &= \begin{cases} 1 & (\iota(A) \in F \text{ のとき}) \\ 0 & (\iota(A) \notin F \text{ のとき}) \end{cases} \\ &= \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{e}_{\iota(A)} - \mathbf{e}_{\iota(B)} \rangle\end{aligned}$$

が成立する。ゆえに

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{m} \rangle &= \left\langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \sum_{A \in \bar{E} \setminus \{B\}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle (\mathbf{e}_A - \mathbf{e}_B) \right\rangle \\ &= \sum_{A \in \bar{E} \setminus \{B\}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{e}_A - \mathbf{e}_B \rangle \\ &= \sum_{A \in \bar{E} \setminus \{B\}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{e}_{\iota(A)} - \mathbf{e}_{\iota(B)} \rangle \\ &= \left\langle \mathbf{e}_F, \sum_{A \in \bar{E} \setminus \{B\}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle (\mathbf{e}_{\iota(A)} - \mathbf{e}_{\iota(B)}) \right\rangle \\ &= \langle \mathbf{e}_F, \mathbf{m} \rangle\end{aligned}$$

と計算でき、題意が従う。

証明終

(4.2) が成立することの証明 $\mathbf{M}_{\bar{E}}$ の元 \mathbf{m} を勝手に固定する。補題 4.9 を用いると

$$\begin{aligned}\iota_{\text{PL}}(\text{res}(\mathbf{m})) &= \iota_{\mathbf{M}} \left(\sum_{\substack{A \in \bar{E}: \\ \{A\} \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle x_A + \sum_{\bar{F} \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{m} \rangle x_{\bar{F}} \right) \\ &= \sum_{\substack{A \in \bar{E}: \\ \{A\} \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle x_{\iota(A)} + \sum_{\bar{F} \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_{\bar{F}}, \mathbf{m} \rangle x_F \\ &= \sum_{\substack{A \in \bar{E}: \\ \{A\} \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_A, \mathbf{m} \rangle x_{\iota(A)} + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_F, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_F && \left(\begin{array}{l} \text{第二項目に対し,} \\ \text{補題 4.9 を用いる} \end{array} \right) \\ &= \sum_{\substack{A \in \bar{E}: \\ \{A\} \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_{\iota(A)}, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_{\iota(A)} + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_F, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_F && \left(\begin{array}{l} \text{第一項目に対し,} \\ \text{補題 4.9 を用いる} \end{array} \right) \\ &= \sum_{\substack{i \in E \cap \iota(\bar{E}): \\ \pi(i) \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_i, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_i + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_F, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_F \\ &\stackrel{\oplus}{=} \sum_{\substack{i \in E: \\ \pi(i) \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_i, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_i + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle \mathbf{e}_F, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle x_F\end{aligned}$$

$$= \text{res}(\iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}))$$

と計算できる。 \wp の計算については、補題 4.9 を用いると、 $E \setminus \iota(\bar{E})$ の元 i に対して $\langle \mathbf{e}_i, \iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}) \rangle = 0$ が成立することから従う。 証明終

系 4.10 π_{PL} は群準同型 $\pi_{\text{PL}}: A^1(\Sigma_{M, \mathcal{P}}) \rightarrow A^1(\Sigma_{\bar{M}, \mathcal{P}})$ を誘導する。同様に、 ι_{PL} は群準同型 $\iota_{\text{PL}}: A^1(\Sigma_{\bar{M}, \mathcal{P}}) \rightarrow A^1(\Sigma_{M, \mathcal{P}})$ を誘導する。

証明 π_{PL} が誘導されることは (4.1) から、 ι_{PL} が誘導されることは (4.2) から従う。 証明終

さらに、 π_{PL} と ι_{PL} は互いに逆写像である。 $\pi_{\text{PL}} \circ \iota_{\text{PL}} = \text{id}$ であることは、(4.4) から従う。

補題 4.11 $A \notin \mathcal{P}$ を満たす \bar{E} の元 A を考える。このとき A の勝手な二元 i と j に対し、 $x_i = x_j$ が成立する。

証明 仮定より、 \mathcal{P} のフラット F に対し、 $i \in F$ であるのは、 $j \in F$ のときかつそのときに限る。このことに注意すると、 $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma_{M, \mathcal{P}})$ の元として

$$\begin{aligned} \text{res}(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) &= \sum_{\substack{k \in E: \\ \text{cl}_M(\{k\}) \notin \mathcal{P}}} \langle \mathbf{e}_k, \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j \rangle x_k + \sum_{F \in \mathcal{P}} \langle x_F, \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j \rangle x_F \\ &= x_i - x_j \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} \text{第二項目の総和は上の} \\ \text{注意より零であるので。} \end{array} \right)$$

と計算できるので、題意が従う。 証明終

命題 4.12 $\iota_{\text{PL}} \circ \pi_{\text{PL}} = \text{id}$ が成立する。

証明 \mathcal{P} のフラット F に対して $\iota_{\text{PL}} \circ \pi_{\text{PL}}(x_F) = x_F$ が成立することは定義から直ちに従う。あとは、 $\pi(i) \notin \mathcal{P}$ を満たす E の元 i に対し、 $\iota_{\text{PL}} \circ \pi_{\text{PL}}(x_i) = x_i$ が成立することを示せば証明が終わる。このことは、 $\text{cl}_M(\{i\}) \notin \mathcal{P}$ であることと、 $i \in \text{cl}_M(\{i\})$ かつ $\iota(\pi(\{i\})) \in \text{cl}_M(\{i\})$ が成り立つことから、補題 4.11 から従う。 証明終

系 4.13 π_{PL} は群同型である。また ι_{PL} は切断 ι の選び方に依存しない。

証明 (4.4) と命題 4.12 から π_{PL} と ι_{PL} は互いに逆写像である。ゆえに π_{PL} は群同型である。また π_{PL} は切断 ι の取り方に依存していないので、その逆写像である ι_{PL} も ι の取り方に依存しない。 証明終

注意 4.14 以上の議論は $V_{M, \mathcal{P}}$ のみに依存するものであるから、以下のことが従う。

- (1) 対応 $x_i \mapsto x_i$ と $x_F \mapsto x_F$ は群同型 $A^1(\Sigma_{M, \mathcal{P}}) \cong A^1(\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}})$ を誘導する。
- (2) π と ι は互いに逆射であるような $A^1(\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}})$ と $A^1(\tilde{\Sigma}_{\bar{M}, \mathcal{P}})$ の間の群同型 π_{PL} と ι_{PL} を誘導する。

さて $\mathcal{H}_{M, \mathcal{P}}$ の π_{PL} における像が $\mathcal{H}_{\bar{M}, \bar{\mathcal{P}}}$ が π_{PL} であることを示すことが目標である。

補題 4.15 E の部分集合 I に対し, $\iota^{-1}(I) \subset \pi(I)$ が成立する。また \bar{E} の部分集合 \mathcal{F} に対し, $\iota(\mathcal{F}) \subset \pi^{-1}(\mathcal{F})$ が成立する。

証明 $\iota^{-1}(I)$ の元 A に対し, $\iota(A) \in I$ であり, $A = \pi(\iota(A))$ も成立するので $A \in \pi(I)$ が従う。ゆえに $\iota^{-1}(I) \subset \pi(I)$ である。

$\iota(\mathcal{F})$ の元 i に対し, $\iota(A) = i$ となる \mathcal{F} の元 A が存在するので, $\pi(i) = \pi(\iota(A)) = A \in \mathcal{F}$ が成立し, $i \in \pi^{-1}(\mathcal{F})$ が従う。ゆえに $\iota(\mathcal{F}) \subset \pi^{-1}(\mathcal{F})$ である。 証明終

次の補題のうち (1) と (2) が上述べた目標に必要なものであるが, (3) と (4) は付加的なものである。

補題 4.16 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。

- (1) \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす適合対 $I < \mathcal{F}$ に対し, $\pi(I) < \bar{\mathcal{F}}$ と $\iota^{-1}(I) < \bar{\mathcal{F}}$ は $\bar{\mathcal{P}}$ のバーグマン扇条件を満たす適合対である。
- (2) $\bar{\mathcal{P}}$ のバーグマン扇条件を満たす適合対 $\mathcal{F} < \bar{\mathcal{F}}$ に対し, $\iota(\mathcal{F}) < \mathcal{F}$ と $\pi^{-1}(\mathcal{F}) < \mathcal{F}$ は \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす適合対である。
- (3) \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす M における適合対 $I <_M \mathcal{F}$ に対し, $\pi(I) <_{\bar{M}} \bar{\mathcal{F}}$ と $\iota^{-1}(I) <_{\bar{M}} \bar{\mathcal{F}}$ は $\bar{\mathcal{P}}$ のバーグマン扇条件を満たす M における適合対である。
- (4) $\bar{\mathcal{P}}$ のバーグマン扇条件を満たす M における適合対 $\mathcal{F} <_{\bar{M}} \bar{\mathcal{F}}$ に対し, $\iota(\mathcal{F}) <_M \mathcal{F}$ は \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす M における適合対である。

(1) と (3) の証明 $\iota^{-1}(I) \subset \pi(I)$ であるから, $\pi(I) < \bar{\mathcal{F}}$ が $\bar{\mathcal{P}}$ のバーグマン扇条件を満たす適合対であることを示せば良く, それは

$$\text{cl}_{\bar{M}}(\pi(I)) = (\text{cl}_M(I))^- \subsetneq (\min \mathcal{F})^- = \min \bar{\mathcal{F}}$$

であることから従う。また $\#\pi(I) \leq \#I$ かつ $\text{rk}(\min \mathcal{F}) = \text{rk}(\min \bar{\mathcal{F}})$ が成立するので, $I <_M \mathcal{F}$ であるならば, $\pi(I) <_{\bar{M}} \bar{\mathcal{F}}$ が成立する。 証明終

(2) と (4) の証明 $\iota(\mathcal{F}) \subset \pi^{-1}(\mathcal{F})$ であるから, $\pi^{-1}(\mathcal{F}) < \mathcal{F}$ が \mathcal{P} のバーグマン扇条件を満たす適合対であることを示せば良い。 $\pi^{-1}(\mathcal{F})$ が \mathcal{F} と適合することは,

$$\text{cl}_M(\pi^{-1}(\mathcal{F})) = \bigcup \text{cl}_M(\mathcal{F}) \subsetneq \bigcup \bar{\mathcal{F}} = \min \mathcal{F}$$

であることから従う。また $\#\iota(\mathcal{F}) = \#\mathcal{F}$ かつ $\text{rk}_M(\min \mathcal{F}) = \text{rk}_{\bar{M}}(\min \bar{\mathcal{F}})$ であることから, $\mathcal{F} <_{\bar{M}} \bar{\mathcal{F}}$ が成立するならば, $\iota(\mathcal{F}) <_M \mathcal{F}$ が成立する。 証明終

命題 4.17 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。

- (1) $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ 上の凸区分的線型関数 $\bar{\ell}$ に対し, $\iota_{\text{PL}}(\bar{\ell})$ は $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ 上の凸区分的線型関数である。

(2) $\Sigma_{M,\mathcal{P}}$ 上の凸区分的線型関数 ℓ に対し, $\pi_{\text{PL}}(\ell)$ は $\Sigma_{\tilde{M},\mathcal{P}}$ 上の凸区分的線型関数である。

(1) の証明 $I < \mathcal{F}$ を \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たす適合対とする。補題 4.16 (1) より $\pi(I) < \mathcal{F}$ が \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たす適合対であるから, $\bar{\ell}$ の凸性より $\bar{\ell} - \text{res}(\mathbf{m})$ が $\sigma_{\pi(I) < \mathcal{F}}$ 上で零かつ $\text{link}(\sigma_{\pi(I) < \mathcal{F}}, \Sigma_{\tilde{M},\mathcal{P}})$ に属す射線上で非負となるような \mathbf{M}_E の元 \mathbf{m} が存在する。 $\iota(\bar{E} \setminus \pi(I)) \cap I = \emptyset$ であるから, $\iota_{\text{PL}}(\bar{\ell} - \text{res}(\mathbf{m}))$ は $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ 上で零である。 $\text{link}(\sigma_{I < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ の射線が $\sigma_{\{i\} < \emptyset}$ の形をしていれば, $\sigma_{\pi(\{i\} \cup I) < \mathcal{F}} \in \Sigma_{\tilde{M},\mathcal{P}}$ であるから $\sigma_{\pi(\{i\}) < \emptyset} \in \text{link}(\sigma_{\pi(I) < \mathcal{F}}, \Sigma_{\tilde{M},\mathcal{P}})$ である。同様の議論より $\text{link}(\sigma_{I < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ の射線が $\sigma_{\emptyset < F}$ の形をしていれば, $\sigma_{\emptyset < \{F\}} \in \text{link}(\sigma_{\pi(I) < \mathcal{F}}, \Sigma_{\tilde{M},\mathcal{P}})$ である。ゆえに $\iota_{\text{PL}}(\bar{\ell} - \text{res}(\mathbf{m}))$ は $\text{link}(\sigma_{I < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ の射線上非負である。(4.2) より $\iota_{\text{PL}}(\bar{\ell} - \text{res}(\mathbf{m})) = \iota_{\text{PL}}(\bar{\ell}) - \text{res}(\iota_{\mathbf{M}}(\mathbf{m}))$ であるから $\iota_{\text{PL}}(\bar{\ell})$ が $\sigma_{I < \mathcal{F}}$ の周りで凸であることが示された。証明終

注意 4.18 補題 4.16 (3) を用いれば, 上と同様の証明を行えるので, $\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}$ 上の凸区分的線型関数 $\bar{\ell}$ に対し, $\iota_{\text{PL}}(\bar{\ell})$ が $\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}$ 上の凸区分的線型関数であることが従う。

(2) の証明 $\mathcal{F} < \mathcal{F}$ を \mathcal{P} のバークマン扇条件を満たす適合対とする。補題 4.16 (2) と ℓ の凸性より $\ell - \text{res}(\mathbf{m})$ が $\sigma_{\pi^{-1}(\mathcal{F}) < \mathcal{F}}$ 上で零かつ $\text{link}(\sigma_{\pi^{-1}(\mathcal{F}) < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ に属す射線上で非負であるような \mathbf{M}_E の元 \mathbf{m} が存在する。 $\pi(E \setminus \pi^{-1}(\mathcal{F})) \cap \mathcal{F} = \emptyset$ であるから, $\pi_{\text{PL}}(\ell - \text{res}(\mathbf{m}))$ は $\sigma_{\mathcal{F} < \mathcal{F}}$ 上で零である。 $\text{link}(\sigma_{\mathcal{F} < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ の射線が $\sigma_{\{A\} < \emptyset}$ の形をしていれば, $\sigma_{\pi^{-1}(\{A\}) < \emptyset}$ である。同様に, $\text{link}(\sigma_{\mathcal{F} < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ の射線が $\sigma_{\emptyset < \{F\}}$ の形をしていれば, $\sigma_{\emptyset < \{F\}}$ である。ゆえに $\pi_{\text{PL}}(\ell - \text{res}(\mathbf{m}))$ は $\text{link}(\sigma_{\mathcal{F} < \mathcal{F}}, \Sigma_{M,\mathcal{P}})$ の射線上で非負である。(4.2) より $\pi_{\text{PL}}(\ell - \text{res}(\mathbf{m})) = \pi_{\text{PL}}(\ell) - \text{res}(\pi_{\text{PL}}(\mathbf{m}))$ であるから, $\pi_{\text{PL}}(\ell)$ は $\sigma_{\mathcal{F} < \mathcal{F}}$ の周りで凸であることが従う。証明終

注意 4.19 $\pi^{-1}(\mathcal{F}) < \mathcal{F}$ は一般に M における適合対でないので, 上の証明を被約バークマン扇の場合に焼き直すことができない。

系 4.20 $\bar{\pi}_{\text{PL}}: A^1(\Sigma_{M,\mathcal{P}}) \rightarrow A^1(\Sigma_{\tilde{M},\mathcal{P}})$ は $\mathcal{N}_{M,\mathcal{P}}$ と $\mathcal{N}_{\tilde{M},\mathcal{P}}$ の間の全単射と $\mathcal{K}_{M,\mathcal{P}}$ と $\mathcal{K}_{\tilde{M},\mathcal{P}}$ の間の全単射写像を誘導する。また $\bar{\iota}_{\text{PL}}: A^1(\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}) \rightarrow A^1(\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}})$ は $\tilde{\mathcal{N}}_{M,\mathcal{P}}$ から $\tilde{\mathcal{N}}_{M,\mathcal{P}}$ への単射写像と $\tilde{\mathcal{K}}_{M,\mathcal{P}}$ から $\tilde{\mathcal{K}}_{M,\mathcal{P}}$ への単射写像を誘導する。ここで $\tilde{\mathcal{N}}_{M,\mathcal{P}}$ と $\tilde{\mathcal{K}}_{M,\mathcal{P}}$ はそれぞれ $\tilde{\Sigma}_{M,\mathcal{P}}$ の数値的非負推と豊富錐を表す。

最後に豊富錐の包含関係を図示しておく (図 5)。

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{K}_{M,\mathcal{P}} & = & \mathcal{K}_{\tilde{M},\mathcal{P}} \\ \cap & & \cap \\ \tilde{\mathcal{K}}_{M,\mathcal{P}} & \supset & \tilde{\mathcal{K}}_{\tilde{M},\mathcal{P}} \end{array}$$

図 5 バークマン扇の豊富錐の包含関係

5 ホモロジーとコホモロジー

\mathbf{N} と \mathbf{M} を階数 n の自由アーベル群として、これらを双対にする双線形形式 $\langle -, - \rangle: \mathbf{N} \times \mathbf{M} \rightarrow \mathbb{Z}$ を固定し、 $\mathbf{N}_{\mathbb{R}}$ 内のユニモジュラ扇 Σ を考える。 Σ が純次元であることや最大次元であることは仮定しない。

5.1 ホモロジー

記法 5.1 σ を Σ の錐、 τ を σ の壁面⁶⁾ とする。このとき $(\sigma \setminus \tau) \cap \mathbb{K}_{\Sigma}$ は一元集合であるので、その元を $\mathbf{e}_{\sigma/\tau}$ で表すことにする。

定義 5.2 整数 k に対し、 Σ_k を次元 k の Σ の錐すべてからなる集合とする。関数 $\omega: \Sigma_k \rightarrow \mathbb{Z}$ が次元 k のミンコフスキー荷重であるとは、次元 $k-1$ の Σ の勝手な錐 τ に対し、釣り合い条件

$$(5.1) \quad \sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \omega(\sigma) \mathbf{e}_{\sigma/\tau} \in \text{span}_{\mathbb{R}}(\tau)$$

が成立するときをいう。次元 k のミンコフスキー荷重すべてからなる \mathbb{Z}^{Σ_k} の部分集合を $\text{MW}_k(\Sigma)$ で表す。外部直和 $\bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} \text{MW}_k(\Sigma)$ を $\text{MW}_*(\Sigma)$ と置く。各元和を考えることで $\text{MW}_*(\Sigma)$ にアーベル群の構造が入る。 $\text{MW}_*(\Sigma)$ を Σ 上のミンコフスキー荷重の群と呼ぶ。

定義から直ちに従うミンコフスキー荷重の斉次部分 $\text{MW}_k(\Sigma)$ について述べる。

(1) $k=0$ の場合 \mathbb{Z}^{Σ_0} の関数すべてが、次元零の錐 $\{\mathbf{0}\}$ で釣り合い条件 (5.1) を満たす。

ゆえに $\text{MW}_0(\Sigma) = \mathbb{Z}^{\Sigma_0} \cong \mathbb{Z}$ である。

(2) $k=1$ の場合 $\text{PL}_{\mathbb{Z}}(\Sigma)$ と \mathbb{Z}^{Σ_1} を、対応 $\ell \mapsto (\rho \mapsto \ell(\mathbf{e}_{\rho/\{\mathbf{0}\}}))$ により同一視し、 \mathbb{Z}^{Σ_1} に標準内積を与える。すると \mathbb{Z}^{Σ_1} の元 ω と \mathbf{M} の元 \mathbf{m} に対し、

$$\sum_{\rho \in \Sigma_1} \omega(\rho) \langle \mathbf{e}_{\rho/\{\mathbf{0}\}}, \mathbf{m} \rangle = \left\langle \sum_{\rho \in \Sigma_1} \omega(\rho) \mathbf{e}_{\rho/\{\mathbf{0}\}}, \mathbf{m} \right\rangle$$

となるので、 $\text{MW}_1(\Sigma) = \text{im}(\text{res}_{\Sigma})^{\perp}$ であることがわかる。

(3) k が負あるは Σ の次元⁷⁾ より大きいとき、 $\Sigma_k = \emptyset$ であるから $\text{MW}_k(\Sigma) = 0$ である。

例えば、 Σ が完備であるならば $\text{MW}_n(\Sigma)$ は定数関数のみからなる。

命題 5.3 (最大次数ミンコフスキー荷重の例) Σ が完備である (したがって純 n 次元) とき、

$$\text{MW}_n(\Sigma) = \left\{ \omega \in \mathbb{Z}^{\Sigma_n} \mid \omega \text{ が定数関数である} \right\}$$

6) 凸多面集合 X の壁面とは、 X の面のうち次元がちょうど $\dim X - 1$ であるものをいう。

7) $\dim \Sigma = \max\{\dim \sigma \mid \sigma \in \Sigma\}$ である。

が成立する。

証明 Σ が余次元 1 で連結⁸⁾ なので、壁面 τ を共有する Σ の n 次元錐 σ と σ' に対し、 $\omega(\sigma) = \omega(\sigma')$ が成立することを示せば十分である。 σ を生成する \mathbf{N} の基底を $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ 、 σ' を生成する \mathbf{N} の基底を $\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ とする。このとき

$$(5.2) \quad (\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \cdots \ \mathbf{e}_n) = (\mathbf{e}'_1 \ \mathbf{e}_2 \ \cdots \ \mathbf{e}_n) \begin{pmatrix} a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_2 & 1 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ a_n & 0 & & 1 \end{pmatrix}$$

と表すことができ、(5.2) に表現行列は \mathbb{Z} 上の行列として可逆である。ゆえに $a_1 = \pm 1$ である。 $a_1 = 1$ であったとすると、 $a_i + b_i > 0$ を満たす正実数 b_i を取ることで

$$\sigma^\circ \ni \mathbf{e}_1 + b_2 \mathbf{e}_2 + \cdots + b_n \mathbf{e}_n = \mathbf{e}'_1 + (a_2 + b_2) \mathbf{e}_2 + \cdots + (a_n + b_n) \mathbf{e}_n \in \sigma'^\circ$$

が成立し、 Σ が扇であることに反する。ゆえに $a_1 = -1$ であり、 $\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}'_1 \in \text{span}_{\mathbb{R}}(\tau)$ が成立する。他方 τ における釣り合い条件から $\omega(\mathbf{e}_1)\mathbf{e}_1 + \omega(\mathbf{e}'_1)\mathbf{e}'_1 \in \text{span}_{\mathbb{R}}(\tau)$ が成立するので、 $\omega(\mathbf{e}_1) = \omega(\mathbf{e}'_1)$ が成立することが従う。 証明終

さて、 $n+1$ 元集合 E 上の階数 $r+1$ のループなしマトロイド M に対し、そのバークマン扇 $\Sigma_M (= \Sigma_{M, \mathcal{P}(M)})$ も $\text{MW}_r(\Sigma_M)$ が定数関数のみからなることを示そう。

補題 5.4 Σ_M は余次元 1 で連結である。

証明 余次元 1 で連結であるということは、 Σ_M が純次元かつ、勝手な二つの極大錐 σ と σ' に対し、壁面を共有する極大錐の列 $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2, \dots, \sigma_l = \sigma'$ が存在するということである。この性質をマトロイドの言葉で言い換えれば、純次元性は $\mathcal{P}(M)$ の極大旗がすべて同じ長さであることと同値であり、後者の条件は、二つの $\mathcal{P}(M)$ の極大旗 \mathcal{F} と \mathcal{G} に対し、 \mathcal{F} のフラットを一つずつ取り替えることで \mathcal{G} にできることと同値である。純次元性はマトロイドの一般論から従う（あるいは、 $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}}$ が純次元であること（命題 2.5）と $\tilde{\Sigma}_{M, \mathcal{P}} = \Sigma_M$ であることから従う）ので、後者の条件を r に関する帰納法で示そう。

$r=0$ のとき Σ_M が純 1 次元であるから、余次元 1 で連結であることは明らかである（すべての射線は原点を通して繋がっている）。 $r > 0$ として、二つの極大旗 \mathcal{F} と \mathcal{G} を取る。 $\min \mathcal{F} = \min \mathcal{G}$ であれば、 \mathcal{F} と \mathcal{G} が $\min \mathcal{F}$ に縮約したマトロイド $M_{\min \mathcal{F}}$ の極大旗と対応し、 $\text{rk}(M_{\min \mathcal{F}}) < r+1$ であるから、帰納法の仮定より \mathcal{F} から一つずつフラットを取り替えて \mathcal{G} にできる。 $\min \mathcal{F} \neq \min \mathcal{G}$ のとき、 $\min \mathcal{F} \cup \min \mathcal{G} \subsetneq \mathcal{H}$ を満たす旗のうち極大なも

8) Σ が純次元であり、勝手な二つの極大錐 σ と σ' に対し、壁面を共有する極大錐の列 $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2, \dots, \sigma_l = \sigma'$ が存在するときをいう。

のを取ると、 $\text{cl}_M(\min \mathcal{F} \cup \min \mathcal{G})$ が階数 2 のフラットであるので、 $\{\min \mathcal{F}\} \cup \mathcal{H}$ が $M_{\min \mathcal{F}}$ の極大旗と対応する。帰納法の仮定から \mathcal{F} からフラットを一つずつ取り替えることで $\{\min \mathcal{F}\} \cup \mathcal{H}$ にできる。同様に $M_{\min \mathcal{G}}$ に対する帰納法の仮定より、 \mathcal{G} からフラットを一つずつ取り替えることで $\{\min \mathcal{G}\} \cup \mathcal{H}$ にできる。ゆえに \mathcal{F} からフラットを一つずつ取り替えることで \mathcal{G} にできる。したがって帰納法により一般の r に対して Σ_M が余次元 1 で連結であることが示された。 証明終

命題 5.5 $\text{MW}_r(\Sigma_M) = \{\omega \in \mathbb{Z}^{\Sigma_r} \mid \omega \text{ は定数関数である}\}$ が成立する。

証明を行う前に、フラットの公理の一つであるフラット分割公理を思い出しておく。

フラット分割公理 M の勝手なフラット F に対し、 F を被覆するフラットすべてを G_1, \dots, G_l とすると、 $F, G_1 \setminus F, \dots, G_l \setminus F$ が E の分割を与える。

命題 5.5 の証明 $\mathcal{G} = \{G_1 \subsetneq G_2 \subsetneq \dots \subsetneq G_{r-1}\}$ を $r-1$ 個のフラットからなる旗とし、 $r-1$ 次元の錐 $\sigma_{\emptyset < \mathcal{G}}$ を考える。 $\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_k$ を \mathcal{G} を部分旗として含む極大旗すべてとし、 $\mathcal{F}_i \setminus \mathcal{G} = \{F_i\}$ と表すことにすると、 $\mathbf{e}_{(\sigma_{\emptyset < \mathcal{F}_i})/(\sigma_{\emptyset < \mathcal{G}})} = \mathbf{e}_{F_i}$ である。 M が階数 $r+1$ であるから、すべての番号 i に対し、 $G_l \subsetneq F_i \subsetneq G_{l+1}$ となる番号 l が存在し、このとき F_i は G_l を被覆する。ここでフラット分割公理より $\mathbf{e}_{F_1} + \dots + \mathbf{e}_{F_k} = -(k+1)\mathbf{e}_{G_l} \in \text{span}_{\mathbb{R}}(\sigma_{\emptyset < \mathcal{G}})$ である。ゆえに定数関数は $\sigma_{\emptyset < \mathcal{G}}$ において釣り合い条件を満たし、 $\text{MW}_r(\Sigma_M)$ に属す。逆に、関数 ω が $\sigma_{\emptyset < \mathcal{G}}$ において釣り合い条件を満たすとき、フラット分割公理から $\omega(\sigma_{\emptyset < \mathcal{F}_i})$ すべて一致しなければならない。さらに補題 5.4 から Σ_M が余次元 1 で連結であるから、 ω が定数関数であることが従う。ゆえに題意が示された。 証明終

5.2 コホモロジー

記法 5.6

- (i) V_{Σ} の元で変数を添字付けた多項式環 $\mathbb{Z}[x_{\mathbf{e}}]_{\mathbf{e} \in V_{\Sigma}}$ を S_{Σ} で表す。
- (ii) Σ に属す錐 σ に対し、積 $\prod_{\mathbf{e} \in V_{\Sigma} \cap \sigma} x_{\mathbf{e}}$ を x_{σ} で表す。
- (iii) S_{Σ} の内部直和 $\bigoplus_{\sigma \in \Sigma_k} \mathbb{Z}x_{\sigma}$ を $Z^k(\Sigma)$ で表す。また内部直和 $\bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} Z^k(\Sigma)$ を $Z^*(\Sigma)$ で表す。

定義 5.7

- (i) S_{Σ} のイデアル I_{Σ} を

$$\{m \in S_{\Sigma} \mid m \text{ は } Z^*(\Sigma) \text{ に属さない無平方因子単項式である}\}$$

で生成されるものとする。

(ii) S_Σ のイデアル J_Σ を

$$\left\{ \sum_{\mathbf{e} \in V_\Sigma} \langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle x_{\mathbf{e}} \mid \mathbf{m} \in \mathbf{M} \right\}$$

で生成されるものとする。

(iii) 商環 $S_\Sigma/(I_\Sigma + J_\Sigma)$ を $A^*(\Sigma)$ で表し、マトロイド M のチャウ環と呼ぶ。

命題 5.8 各整数 k に対し、 $A^k(\Sigma)$ は $Z^k(\Sigma)$ の像と等しい。

証明 k が負であるときは $A^k(\Sigma)$ も $Z^k(\Sigma)$ も共に零であるので、 k を非負と仮定する。 m を次数 k の S_Σ の単項式とする。もし m の無平方部分⁹⁾ が $Z^*(\Sigma)$ に属さないなら、イデアル I_Σ の関係式により $A^1(\Sigma)$ における m の像は零である。よって m の無平方部分が $Z^*(\Sigma)$ に属する場合を考える。 m の無平方部分を定める Σ の錐を σ と置き、 σ を生成する \mathbf{N} の基底の一部を $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_l$ とする。必要なら番号付けを変えることで $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_l$ を満たす正整数 k_1, \dots, k_l を用いて $m = x_{\mathbf{e}_1}^{k_1} x_{\mathbf{e}_2}^{k_2} \dots x_{\mathbf{e}_l}^{k_l}$ と表すことにする。 $A^1(\Sigma)$ における m の像が $Z^*(\Sigma)$ の像に属することを、 $\dim(\sigma)$ に関する減少向きの帰納法で示す。

$\dim(\sigma) = k$ のとき $m = x_\sigma$ であり、主張は自明に従う。 $\dim(\sigma) < k$ のときを考える。 $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_l$ が \mathbf{N} の基底の一部であるから、

$$\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m} \rangle = -1, \langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m} \rangle = 0, \dots, \langle \mathbf{e}_l, \mathbf{m} \rangle = 0$$

を満たすような \mathbf{M} の元 \mathbf{m} が存在する。いま $k_1 \geq 2$ であることに注意すると、 $A^*(\Sigma)$ の上で

$$\begin{aligned} m &= x_{\mathbf{e}_1}^{k_1-1} x_{\mathbf{e}_2}^{k_2} \dots x_{\mathbf{e}_l}^{k_l} \sum_{\mathbf{e} \in V_\Sigma \setminus \{\mathbf{e}_1\}} \langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle x_{\mathbf{e}} && (\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{m} \rangle = -1 \text{ なので。}) \\ &= \sum_{\substack{\mathbf{e} \in V_\Sigma \setminus \{\mathbf{e}_1\}: \\ \text{cone}(\{\mathbf{e}\} \cup \sigma) \in \Sigma}} \langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle x_{\mathbf{e}_1}^{k_1-1} x_{\mathbf{e}_2}^{k_2} \dots x_{\mathbf{e}_l}^{k_l} x_{\mathbf{e}} && (I_\Sigma \text{ の関係式より。}) \\ &= \sum_{\substack{\mathbf{e} \in V_\Sigma \setminus \{\mathbf{e}_1\}: \\ \text{cone}(\{\mathbf{e}\} \cup \sigma) \in \Sigma, \\ \text{cone}(\{\mathbf{e}\} \cup \sigma) \neq \sigma}} \langle \mathbf{e}, \mathbf{m} \rangle x_{\mathbf{e}_1}^{k_1-1} x_{\mathbf{e}_2}^{k_2} \dots x_{\mathbf{e}_l}^{k_l} x_{\mathbf{e}} && (\langle \mathbf{e}_2, \mathbf{m} \rangle = \dots = \langle \mathbf{e}_l, \mathbf{m} \rangle = 0 \text{ なので。}) \end{aligned}$$

と計算でき、帰納法の仮定により最後の総和は $Z^k(\Sigma)$ の像に属す。ゆえに m の $A^*(\Sigma)$ における像も $Z^k(\Sigma)$ の像に属し、帰納法により題意は示された。 証明終

系 5.9 整数 k が負あるいは $\dim \Sigma$ より大きいとき、 $A^k(\Sigma)$ は零群である。

証明 $Z^k(\Sigma)$ が零群であることと、命題 5.8 から従う。 証明終

9) m を割り切る最大の無平方単項式のこと。

さて、ホモロジー群 $MW_*(\Sigma)$ とコホモロジー環 $A^*(\Sigma)$ の関係について調べていこう。

定義 5.10 整数 k に対して、対応 $\omega \mapsto (x_\sigma \mapsto \omega(\sigma))$ が定める度群同型 $t_\Sigma: \mathbb{Z}^{\Sigma_k} \rightarrow \text{hom}_{\mathbb{Z}}(Z^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ を同語反復的同型と呼ぶ。

命題 5.8 から列

$$0 \rightarrow (I_\Sigma + J_\Sigma) \cap Z^k(\Sigma) \rightarrow Z^k(\Sigma) \rightarrow A^k(\Sigma) \rightarrow 0$$

が完全であるから、 $\text{hom}_{\mathbb{Z}}(A^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ を $\text{hom}_{\mathbb{Z}}(Z^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ の部分群

$$\{f \in \text{hom}_{\mathbb{Z}}(Z^k(\Sigma), \mathbb{Z}) \mid f \text{ は } (I_\Sigma + J_\Sigma) \cap Z^k(\Sigma) \text{ 上で零である}\}$$

として埋め込むことができる。

命題 5.11 各整数 k について、 $MW_k(\Sigma)$ への t_Σ の制限が群同型 $MW_k(\Sigma) \simeq \text{hom}_{\mathbb{Z}}(A^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ を誘導する。

この命題を証明するために次の補題を用意する。

補題 5.12 各整数 k について、 $(I_\Sigma + J_\Sigma) \cap Z^k(\Sigma)$ は、 $k-1$ 次元の Σ の錐 τ と $\text{span}_{\mathbb{R}}(\tau)^\perp$ の元 \mathbf{m} を用いて

$$\sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \langle \mathbf{e}_{\sigma/\tau}, \mathbf{m} \rangle x_\sigma$$

の形をしている元で生成される。

証明 紙数を要するので省略する。

証明終

命題 5.11 の証明 $(I_\Sigma + J_\Sigma) \cap Z^k(\Sigma)$ 上で零となるような $\text{hom}_{\mathbb{Z}}(Z^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ の元がなす部分群と $\text{hom}_{\mathbb{Z}}(A^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ を同一視する。 \mathbb{Z}^{V_Σ} の元 ω について $t_\Sigma(\omega) \in (I_\Sigma + J_\Sigma) \cap Z^k(\Sigma)$ が成立することと、次元 $k-1$ の Σ の勝手な錐 τ と $\text{span}_{\mathbb{R}}(\tau)^\perp$ の元 \mathbf{m} に対し

$$(5.3) \quad t_\Sigma(\omega) \left(\sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \langle \mathbf{e}_{\sigma/\tau}, \mathbf{m} \rangle x_\sigma \right) = 0$$

が成立することが補題 5.12 から同値である。(5.3) の左辺を

$$\begin{aligned} t_\Sigma(\omega) \left(\sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \langle \mathbf{e}_{\sigma/\tau}, \mathbf{m} \rangle x_\sigma \right) &= \sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \langle \mathbf{e}_{\sigma/\tau}, \mathbf{m} \rangle \omega(\sigma) \\ &= \left\langle \sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \mathbf{e}_{\sigma/\tau}, \mathbf{m} \right\rangle \end{aligned}$$

と変形できるため、 $t_\Sigma(\omega) \in \text{hom}_\mathbb{Z}(A^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ であることと、 Σ_{k-1} の勝手な錐 τ に対して $\sum_{\substack{\sigma \in \Sigma_k: \\ \sigma \supset \tau}} \mathbf{e}_{\sigma/\tau} \in \text{span}_\mathbb{R}(\tau)^{\perp\perp}$ が成立することが同値である。 $\text{span}_\mathbb{R}(\tau) = \text{span}_\mathbb{R}(\tau)^{\perp\perp}$ であるから、 $\omega \in \text{MW}_k(\Sigma)$ であることと $t_\Sigma(\omega) \in \text{hom}_\mathbb{Z}(A^k(\Sigma), \mathbb{Z})$ であることが同値である。

証明終

定義 5.13 整数 l と k に対してキャップ積 $\frown: A^l(\Sigma) \times \text{MW}_k(\Sigma) \rightarrow \text{MW}_{k-l}(\Sigma)$ を $(\xi \frown \omega)(\sigma) = t_\Sigma(\omega)(\xi \cdot x_\sigma)$ で定める。 \frown により $\text{MW}_*(\Sigma)$ は次数付き $A^*(\Sigma)$ 加群の構造が定まる。

注意 5.14 群準同型の合成 $A^{k-l}(\Sigma) \xrightarrow{\xi \cdot (-)} A^k(\Sigma) \xrightarrow{\omega} \mathbb{Z}$ と $t_\Sigma(\xi \frown \omega)$ が等しいので、命題 5.11 より関数 $\xi \frown \omega$ は次元 $k-l$ のミンコフスキー荷重である。

5.3 バーグマン扇の次数写像

n と r を非負整数とし、 M を $n+1$ 元集合 E 上の階数 $r+1$ のループなしマトロイドとする。ユニモジュラ扇として $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター $\mathcal{P}(M)$ で定めるバーグマン扇 Σ_M を考える。このときチャウ環 $A^*(\Sigma_M)$ は次に定める商環と自然に同型である。

定義 5.15

- (i) $\mathcal{P}(M)$ のフラットで変数を添字付けた多項式環 $\mathbb{Z}[x_F]_{F \in \mathcal{P}(E)}$ を S_M と置くことにする。
- (ii) S_M のイデアル I_M を

$$\{x_F x_G \mid F \text{ と } G \text{ は互いに包含関係のない } \mathcal{P}(M) \text{ のフラットである}\}$$

で生成されるものとする。

- (iii) S_M のイデアル J_M を

$$\left\{ \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \in F}} x_F - \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ j \in F}} x_F \mid i \text{ と } j \text{ は } E \text{ の元である} \right\}$$

で生成されるものとする。

- (iv) 商環 $S_M/(I_M + J_M)$ を $A^*(M)$ で表し、 M のチャウ環と呼ぶ。

命題 5.16 対応 $x_{\mathbf{e}_F} \mapsto x_F$ で定められる環同型 $\varphi: S_\Sigma \simeq S_M$ は $A^*(\Sigma_M)$ と $A^*(M)$ の間の同型を誘導する。

証明 φ における $I_{\Sigma_M} + J_{\Sigma_M}$ の像が $I_M + J_M$ であることを示せばよい。

$\varphi(I_{\Sigma_M}) = I_M$ が成立することを示す。 $Z^*(\Sigma_M)$ に属さない無平方単項式 $x_{\mathbf{e}_{F_1}} x_{\mathbf{e}_{F_2}} \cdots x_{\mathbf{e}_{F_k}}$ を一つ取る。 $x_{\mathbf{e}_{F_1}} x_{\mathbf{e}_{F_2}} \cdots x_{\mathbf{e}_{F_k}}$ が $Z^*(\Sigma)$ に属さないということは、 $\{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ が全順序部分

集合でないであることを意味し、ある番号 i と j に対し F_i と F_j の間に包含関係が存在しない。つまり $x_{F_i}x_{F_j}$ が I_M の生成元であり、 $x_{F_1} \cdots x_{F_k}$ が I_M に属することが従う。ゆえに $\varphi(I_{\Sigma_M}) \subset I_M$ である。また互いの包含関係のないフラット F と G について、 $x_{e_F}x_{e_G} \in I_{\Sigma_M}$ であるので、 I_M の生成元がすべて $\varphi(I_{\Sigma_M})$ に属し、 $\varphi(I_{\Sigma_M}) = I_M$ である。

次に $\varphi(J_{\Sigma_M}) = J_M$ が成立することを示す。 J_{Σ_M} の生成元は、二つの E の元 i と j を用いて

$$\sum_{F \in \mathcal{P}(M)} \langle e_F, e_i - e_j \rangle x_{e_F}$$

と表されるものであり、このような元は双線型写像の定め方より

$$\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \in F}} x_{e_F} - \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ j \in F}} x_{e_F}$$

と書き直すことができる。ゆえに φ によって J_{Σ_M} の生成元と J_M の生成元が対応し、 $\varphi(J_{\Sigma_M}) = J_M$ である。 証明終

ここでマトロイドのチャウ環にとって最も重要な元 α_M と β_M を述べる。

定義 5.17 E の元 i に対して S_M の元 $\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \in F}} x_F$ を $\alpha_{M,i}$ と置き、 S_M の元 $\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \notin F}} x_F$ を $\beta_{M,i}$ と置く。 J_M の関係式より、 $\alpha_{M,i}$ が定める $A^1(\Sigma)$ の類が元 i の取り方に依らないので、この類を α と書くことにする。 $\alpha_{M,i} + \beta_{M,i} = \sum_{F \in \mathcal{P}(M)} x_F$ であるから、 $\beta_{M,i}$ が定める $A^1(\Sigma)$ の類も元 i の取り方に依らないので、この類を β と書くことにする。

命題 5.18 k を 1 以上 r 以下の整数とし、 $\mathcal{P}(M)$ の旗 $\mathcal{F} = \{F_1 \subsetneq F_2 \subsetneq \cdots \subsetneq F_k\}$ を考える。 $x_{F_1}x_{F_2} \cdots x_{F_k}$ を $x_{\mathcal{F}}$ と置くことにする。このとき次の二つが成立する。

- (1) $\text{rk}_M(F_k) \neq k$ のとき $x_{\mathcal{F}}\alpha_M^{r-k} = 0$ が成立する。
- (2) $\text{rk}_M(F_k) = k$ のとき $x_{\mathcal{F}}\alpha_M^{r-k} = \alpha_M^r$ が成立する。

(1) の証明 まず一般に次の命題が成立することに注意する。非空狭義フラット F と $E \setminus F$ の元 i に対し、 $x_F\alpha_M = x_F \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}(M): \\ i \in G, \\ F \subset G}} x_G$ が成り立つ。特に $\text{rk}_M(F) = r$ のとき $x_F\alpha_M = 0$ である。(1) の主張を減少する k に関する帰納法で示す。 $k = r - 1$ のとき仮定から $\text{rk}_M(F_k) = r$ でなければならいので、上で述べたことにより $x_{\mathcal{F}}\alpha_M^{r-(r-1)} = 0$ である。

$k < r - 1$ のときを考える。このとき $E \setminus F_k$ の元 i を固定することで

$$\begin{aligned} x_{\mathcal{F}}\alpha_M^{r-k} &= x_{\mathcal{F}}\alpha_M^{r-k+1} \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}(M): \\ i \in G, \\ F_k \subset G}} x_G \\ &= \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}(M): \\ i \in G, \\ F_k \subset G}} x_{\mathcal{F}}x_G\alpha_M^{r-k+1} \end{aligned}$$

と計算でき、最右辺は帰納法の仮定により零である。ゆえに $x_{\mathcal{F}}\alpha_M^{r-k} = 0$ であり、帰納法により題意が示された。 証明終

(2) の証明 増加する k に関する帰納法で示す。 $k = 1$ のとき F_1 の元 i を取ると、

$$\begin{aligned}\alpha_M^r &= \alpha_M^{r-1} \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}(M): \\ i \in G}} x_G \\ &= \alpha_M^{r-1} x_{\text{cl}_M(\{i\})} && (\text{命題 5.18(1) を用いる。}) \\ &= \alpha_M^{r-1} x_{F_1} && (F_1 \text{ の階数が } 1 \text{ であるので。})\end{aligned}$$

と計算でき主張が正しい。

$k > 1$ のときを考える。このとき $F_k \setminus F_{k-1}$ の元 i を取ると、

$$\begin{aligned}\alpha_M^r &= x_{F_1} x_{F_2} \cdots x_{F_{k-1}} \alpha_M^{r-k+1} && (\text{帰納法の仮定を用いる。}) \\ &= x_{F_1} \cdots x_{F_{k-1}} \alpha_M^{r-k} \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}(M): \\ i \in G}} x_G \\ &= x_{F_1} \cdots x_{F_{k-1}} x_{F_k} \alpha_M^{r-k} && (I_{\Sigma} \text{ の関係式より。})\end{aligned}$$

と計算でき主張が正しい。したがって帰納法により題意が示された。 証明終

系 5.19 $A^r(M)$ は巡回群である。

証明 命題 5.8 から $A^r(M)$ が極大旗 \mathcal{F} に対応する単項式 $x_{\mathcal{F}}$ で生成されることに加え、命題 5.18(2) よりこれら単項式がすべて α_M^r に等しい。ゆえに $A^r(M)$ は α_M^r で生成される群である。 証明終

ここで $A^*(M)$ の次数写像を定める。

定義 5.20 値をすべて 1 に取る $(\Sigma_M)_r$ 上の関数を 1_M と置く。命題 5.5 より 1_M は次元 r のミンコフスキー荷重である。 M の**次数写像**とは対応 $\xi \mapsto (\xi \frown 1_M)(\{\mathbf{0}\})$ で定まる群準同型 $\deg: A^r(M) \rightarrow \mathbb{Z}$ のことをいう。

命題 5.21 $\deg: A^r(\Sigma_M) \rightarrow \mathbb{Z}$ は群同型である。

証明 \mathcal{F} を $\mathcal{P}(M)$ の極大旗とするとき

$$\begin{aligned}\deg(\alpha_M) &= (\alpha_M \frown 1_M)(\{\mathbf{0}\}) \\ &= t_{\Sigma}(1_M)(\alpha_M \cdot 1) && (\text{空積であるので。}) \\ &= t_{\Sigma}(1_M)(x_{\mathcal{F}}) && (\text{命題 5.18(2) を用いる。}) \\ &= 1\end{aligned}$$

と計算できるので、 M の次数写像は全射である。ゆえに $A^r(M)$ が無限集合でなければならず、系 5.19 から $A^r(M)$ が巡回群であるので、 M の次数写像は単射であることが従う。

証明終

6 マトロイドのポアンカレ双対

バーグマン扇 $\Sigma_{M,\mathcal{P}}$ のチャウ環をフラットを用いて特徴づけることから始める。これまでと同様に、 n と r を非負整数として $n+1$ 元集合 E 上の階数 $r+1$ のマトロイド M を考える。

定義 6.1 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。

(i) $E \cup \mathcal{P}$ で変数を添字つけた整数係数多項式環 $\mathbb{Z}[x_i, x_F]_{i \in E, F \in \mathcal{P}}$ を $S_{E \cup \mathcal{P}}$ と置く。

(ii) $S_{E \cup \mathcal{P}}$ のイデアル \mathcal{I}_1 を

$$\{x_F x_G \mid F \text{ と } G \text{ は互いに包含関係のない } \mathcal{P} \text{ のフラットである}\}$$

で生成されるものとする。

(iii) $S_{E \cup \mathcal{P}}$ のイデアル \mathcal{I}_2 を

$$\{x_i x_F \mid F \text{ は } \mathcal{P} \text{ のフラットであり, } i \text{ は } E \setminus F \text{ の元である}\}$$

で生成されるものとする。

(iv) $S_{E \cup \mathcal{P}}$ のイデアル \mathcal{I}_3 を

$$\left\{ \prod_{i \in I} x_i \mid I \text{ は } \text{cl}_M(I) \in \mathcal{P} \cup \{E\} \text{ を満たす } M \text{ の独立集合である} \right\}$$

で生成されるものとする。

(v) $S_{E \cup \mathcal{P}}$ のイデアル \mathcal{I}_4 を

$$\left\{ \left(x_i + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}: \\ i \in F}} x_F \right) - \left(x_j + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}: \\ j \in F}} x_F \right) \mid i \text{ と } j \text{ は相異なる } E \text{ の元である} \right\}$$

で生成されるものとする。

イデアル $\mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2 + \mathcal{I}_3 + \mathcal{I}_4$ による $S_{E \cup \mathcal{P}}$ の商環を $A^*(M, \mathcal{P})$ で表し対 (M, \mathcal{P}) のチャウ環と呼ぶ。

まず極端な場合について述べておこう。

命題 6.2 $A^*(M, \emptyset)$ と $\mathbb{Z}[x]/(x^{r+1})$ は同型である。

証明 \mathcal{P} を空集合として考えているので, \mathcal{F}_1 と \mathcal{F}_2 は零イデアルである。また \mathcal{F}_4 の生成元が $x_i - x_j$ という形をしているので, $S_{E \cup \emptyset} / (\mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_4) \cong \mathbb{Z}[x]$ である。 M の階数が $r + 1$ であるから, \mathcal{F}_3 の $\mathbb{Z}[x]$ における像は (x^{r+1}) である。ゆえに $A^*(M, \emptyset) \cong \mathbb{Z}/(x^{r+1})$ である。 証明終

次に $A^*(M, \mathcal{P})$ がバグマン扇 $\Sigma_{M, \mathcal{P}}$ のチャウ環 $A^*(\Sigma_{M, \mathcal{P}})$ と同型であることを見ておく。

命題 6.3 \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルターとする。このとき対応 $x_i \mapsto x_{\mathbf{e}_i}$ と $x_F \mapsto x_{\mathbf{e}_F}$ は同型 $A^*(M, \mathcal{P}) \simeq A^*(\Sigma_{M, \mathcal{P}})$ を誘導する。

証明 互いに逆写像となるような環準同型を構成することで示す。対応

$$x_i \mapsto \begin{cases} x_{\mathbf{e}_i} & (\text{cl}_M(\{i\}) \notin \mathcal{P} \cup \{E\} \text{ のとき}) \\ 0 & (\text{cl}_M(\{i\}) \in \mathcal{P} \cup \{E\} \text{ のとき}) \end{cases}$$

と $x_F \mapsto x_{\mathbf{e}_F}$ によって, \mathcal{F}_1 と \mathcal{F}_2 と \mathcal{F}_3 の生成元が $Z^*(\Sigma_M)$ に属さない無平方単項式に移る。また \mathcal{F}_4 の生成元が $J_{\Sigma_{M, \mathcal{P}}}$ の生成元に移るので, $\mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_3 + \mathcal{F}_4$ の像が $I_{\Sigma_{M, \mathcal{P}}} + J_{\Sigma_{M, \mathcal{P}}}$ に包含され, 環準同型 $f: A^*(M, \mathcal{P}) \rightarrow A^*(\Sigma_{M, \mathcal{P}})$ を得られる。逆に対応 $x_{\mathbf{e}_i} \mapsto x_i$ と $x_{\mathbf{e}_F} \mapsto x_F$ における I_M の像が $\mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_3$ に包含され, J_M の像が \mathcal{F}_4 に包含されるので, 環準同型 $g: A^*(\Sigma_{M, \mathcal{P}}) \rightarrow A^*(M, \mathcal{P})$ を得られる。これらが互いに逆写像であることを示そう。

$f \circ g = \text{id}$ であることは定義から直ちに従うので $g \circ f = \text{id}$ が成立することを示す。 \mathcal{P} のフラット F に対して $(f \circ g)(x_{\mathbf{e}_F}) = x_{\mathbf{e}_F}$ かつ $(g \circ f)(x_F) = x_F$ であることは定義から従う。 E の元 i について $\text{cl}_M(\{i\}) \in \mathcal{P} \cup \{E\}$ であるならば, $x_i = 0$ であるので, $(g \circ f)(x_i) = g(0) = 0 = x_i$ である。 $\text{cl}_M(\{i\}) \notin \mathcal{P} \cup \{E\}$ であるならば, $(g \circ f)(x_i) = g(x_{\mathbf{e}_i}) = x_i$ である。ゆえに $g \circ f = \text{id}$ である。 証明終

順序フィルター \mathcal{P} の取り方によらず $A^*(M, \mathcal{P})$ の元の次数が高々 r であることを示す。

命題 6.4 ([AHK18, Prop. 6.2]) \mathcal{P} を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター, F を \mathcal{P} のフラット, I を E の部分集合とする。このとき次が成立する。

- (1) 少なくとも $\text{rk}_M(F)$ 個の元から I がなるとき, $A^*(M, \mathcal{P})$ の元として $(\prod_{i \in I} x_i) x_F = 0$ が成立する。
- (2) $r + 1$ 個の元から I がなるとき, $A^*(M, \mathcal{P})$ の元として $\prod_{i \in I} x_i = 0$ が成立する。

(1) の証明 \mathcal{F}_2 の関係式より $I \not\subset F$ のとき主張が直ちに従うので, $I \subset F$ のときを $\text{rk}_M(F) - \text{rk}_M(I)$ に関する帰納法で示す。 $\text{rk}_M(F) - \text{rk}_M(I) = 0$ のとき $\text{cl}_M(I) = F$ であるから \mathcal{F}_3 の関係式より $\prod_{i \in I} x_i = 0$ となり主張が従う。 $\text{rk}_M(F) - \text{rk}_M(I) > 0$ のときを考える。このとき $\#I > \text{rk}_M(I)$ であるから $\text{rk}_M(I \setminus \{i\}) = \text{rk}_M(I)$ を満たす I の元 i を取れる。また

$F \setminus \text{cl}_M(I)$ の元 j を取れるので, $(I \setminus \{i\}) \cup \{j\}$ を J と置くと $\text{rk}_M(J) = \text{rk}_M(I) + 1$ である。 \mathcal{F}_4 の関係式より

$$(6.1) \quad x_i + \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}: \\ i \in G, j \notin G}} x_G = x_j + \sum_{\substack{G \in \mathcal{P}: \\ j \in G, i \notin G}} x_G$$

が成立する。(6.1) の両辺に $(\prod_{k \in I \cap J} x_k) x_F$ を掛けることを考える。すると

$$\begin{aligned} \left(\sum_{\substack{G \in \mathcal{P}: \\ i \in G, j \notin G}} x_G \right) \left(\prod_{k \in I \cap J} x_k \right) x_F &= \left(\sum_{\substack{G \in \mathcal{P}: \\ i \in G, \\ j \notin G, I \cap J \subset G \subsetneq F}} x_G \right) \left(\prod_{k \in I \cap J} x_k \right) x_F \quad (\mathcal{F}_1 \text{ と } \mathcal{F}_2 \text{ の関係式より。}) \\ &= \left(\sum_{\substack{G \in \mathcal{P}: \\ i \in G, \\ j \notin G, I \cap J \subset G \subsetneq F}} \left(\prod_{k \in I \cap J} x_k \right) x_G \right) x_F \\ &= 0 \quad \left(\left(\prod_{k \in I \cap J} x_k \right) x_G \text{ に対して} \right. \\ &\quad \left. \text{帰納法の仮定を用いる。} \right) \end{aligned}$$

と計算できる。同様の議論を行うことで $\left(\sum_{\substack{G \in \mathcal{P}: \\ j \in G, i \notin G}} x_G \right) \left(\prod_{k \in I \cap J} x_k \right) x_F = 0$ であることがわかる。ゆえに $(\prod_{k \in I} x_k) x_F = (\prod_{k \in J} x_k) x_F$ であり, 帰納法の仮定より右辺が零であるので, 帰納法により題意が従う。 証明終

(2) の証明 減少する $\text{rk}_M(I)$ に関する帰納法で示す。 $\text{rk}_M(I) = r + 1$ のとき $\text{cl}_M(I) = E$ であるから \mathcal{F}_3 の関係式より $\prod_{i \in I} x_i = 0$ である。 $\text{rk}_M(I) < r + 1$ のとき $E \setminus \text{cl}_M(I)$ の元 j が取れ, また $\text{cl}_M(I \setminus \{i\}) = \text{cl}_M(I)$ となる I の元 i も取れるので, $(I \setminus \{i\}) \cup \{j\}$ を J と置くことにする。このとき

$$(6.2) \quad x_i + \left(\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}: \\ i \in F}} x_F \right) = x_j + \left(\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}: \\ j \in F}} x_F \right)$$

が \mathcal{F}_4 の関係式により成立する。(6.2) の両辺に $\prod_{k \in I \cap J} x_k$ を掛けることを考える。すると $\#I \cap J = r$ であるから (1) の結果より $\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}: \\ i \in F}} (x_F \prod_{k \in I \cap J} x_k) = 0$ かつ $\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}: \\ j \in F}} (x_F \prod_{k \in I \cap J} x_k) = 0$ である。ゆえに $\prod_{k \in I} x_k = \prod_{k \in J} x_k$ であり右辺が帰納法の仮定により零である。よって帰納法により題意が従う。 証明終

系 6.5 r より大きい整数 k に対し $A^k(M, \mathcal{P}) = 0$ である。

証明 $(A^*(M, \mathcal{P}) \simeq) A^*(\Sigma_M, \mathcal{P}) \rightarrow A^*(\tilde{\Sigma}_M, \mathcal{P})$ の核が $I \not\prec_M \mathcal{F}$ を満たす $x_{\sigma_{I < \mathcal{F}}}$ で生成されるが, 命題 6.4 よりこれらがすべて零である。ゆえに $A^*(A, \mathcal{P}) \cong A^*(\tilde{\Sigma}_M, \mathcal{P})$ であり, $\tilde{\Sigma}_M, \mathcal{P}$ が純 r 次元であるので, $k > r$ に対し $A^k(M, \mathcal{P}) = 0$ である。 証明終

一般の順序フィルター \mathcal{P} に対するチャウ環 $A^*(M, \mathcal{P})$ を調べるためには次に述べるマトロイドフリップが基本となる。

定義 6.6 \mathcal{P}_- を $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター, Z を $\mathcal{P}(M) \setminus \mathcal{P}_-$ の極大元の一つとして, 順序フィルター $\mathcal{P}_- \cup \{Z\}$ を \mathcal{P}_+ と置くことにする。このとき対 $(\Sigma_{M, \mathcal{P}_-}, \Sigma_{M, \mathcal{P}_+})$ を**マトロイドフリップ**といい $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ で表す。また Z を $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ の**中心**と呼ぶ。

例 6.7 E を $\{0, 1, 2\}$ として, $\{\emptyset, \{0\}, \{1, 2\}, E\}$ をフラットとして定められる E 上のマトロイド M を考える。 \emptyset を \mathcal{P}_- , $\{\{1, 2\}\}$ を \mathcal{P}_+ とすると, $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ が $\{1, 2\}$ を中心とするマトロイドフリップである。 \mathbf{e}_1 と \mathbf{e}_2 を基底とした平面に $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-}$ と $\Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ を図示したものが図 6 である。

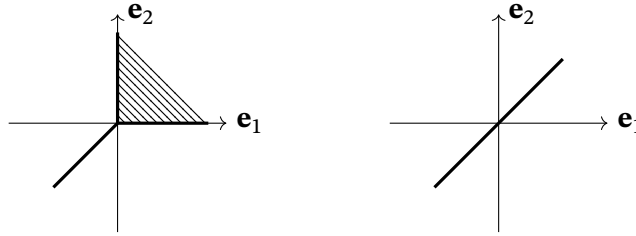


図 6 $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-}$ (左図) と $\Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ (右図)。射線を太線で表した。

6.1 マトロイドフリップの引き戻し準同型とギシン準同型

$\mathcal{P}(M)$ のフラット Z を中心とするマトロイドフリップ $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ を考える。

命題 6.8 ([AHK18, Prop. 6.6]) フラットに対する対応 $x_F \mapsto x_F$ と, E の元に対する対応

$$x_i \mapsto \begin{cases} x_i + x_Z & (i \in Z \text{ のとき}) \\ x_i & (i \notin Z \text{ のとき}) \end{cases}$$

は次数付き環の準同型 $\Phi_Z: A^*(M, \mathcal{P}_-) \rightarrow A^*(M, \mathcal{P}_+)$ を誘導する。 Φ_Z を $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ に関連する**引き戻し準同型**と呼ぶ。

証明 上の対応で定まる多項式環の準同型 $\phi_Z: S_{EU\mathcal{P}_-} \rightarrow S_{EU\mathcal{P}_+}$ を考える。このとき次の四つが成立する。(a) $\phi_Z(\mathcal{F}_1) \subset \mathcal{F}_1$ であること, (b) $\phi_Z(\mathcal{F}_2) \subset \mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2$ であること, (c) $\phi_Z(\mathcal{F}_3) \subset \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_3$ であること, (d) $\phi_Z(\mathcal{F}_4) \subset \mathcal{F}_4$ であること。(a) の成立は自明である。(d), (b), (c) の順に示していく。

(d) の成立について。 E の元 i に対して

$$\phi_Z \left(x_i + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_-: \\ i \in F}} x_F \right) = \begin{cases} x_i + x_Z \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_-: \\ i \in F}} x_F + x_F & (i \in Z \text{ のとき}) \\ x_i + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_-: \\ i \in F}} x_F & (i \notin Z \text{ のとき}) \end{cases}$$

でありどちらも $x_i + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ \\ i \in F}} x_F$ と等しい。ゆえに $S_{EU\mathcal{P}_-}$ のイデアル \mathcal{F}_4 の生成元は $S_{EU\mathcal{P}_+}$ のイデアル \mathcal{F}_4 の生成元に ϕ_Z によって移り $\phi_Z(\mathcal{F}_4) \subset \mathcal{F}_4$ であることが示された。

(b) の成立について。 F を \mathcal{P}_- のフラット, i を $E \setminus F$ の元として, $S_{EU\mathcal{P}_-}$ の \mathcal{F}_2 を生成する元の一つ $x_i x_F$ を考える。このとき $i \notin Z$ であるならば $\phi_Z(x_i x_F) = x_i x_F$ で \mathcal{F}_2 に属す。 $i \in Z$ であるならば $\phi_Z(x_i x_F) = x_i x_F + x_Z x_F$ である。 i が $Z \setminus F$ の元であるから $Z \not\subset F$ であり, Z が \mathcal{P}_+ の極小元なので $Z \not\subset F$ でもある。ゆえにこの場合 $\phi_Z(x_i x_F) \in \mathcal{F}_1 + \mathcal{F}_2$ であり, (b) の成立が証明された。

(c) の成立について。閉包が \mathcal{P}_- に属するような独立集合 I を考える。 \mathcal{P}_- が順序フィルターであることから $I \not\subset Z$ であり $I \setminus Z$ の元 i を取れる。このとき

$$\begin{aligned} \phi_Z \left(\prod_{j \in I} x_j \right) &= \prod_{j \in I \setminus Z} x_j \prod_{j \in I \cap Z} (x_j + x_Z) \\ &= \prod_{j \in I} x_j + \prod_{j \in I \setminus Z} x_j \left(\sum_{\substack{J: \\ \emptyset \subsetneq J \subset I \cap Z}} x_Z^{\#I(\cap Z) - \#J} \prod_{j \in J} x_j \right) \\ &= \prod_{j \in I} x_j + x_Z \prod_{j \in I \setminus Z} x_j \left(\sum_{\substack{J: \\ \emptyset \subsetneq J \subset I \cap Z}} x_Z^{\#I(\cap Z) - \#J - 1} \prod_{j \in J} x_j \right) \end{aligned}$$

であり第一項目が \mathcal{F}_3 の元, 第二項目が \mathcal{F}_2 の元である。ゆえに $\phi_Z(\mathcal{F}_3) \subset \mathcal{F}_2 + \mathcal{F}_3$ が成立する。

以上 (a), (b), (c), (d) が成立するので, ϕ_Z は次数付き環準同型 $\Phi_Z: A^*(M, \mathcal{P}_-) \rightarrow A^*(M, \mathcal{P}_+)$ を誘導する。 証明終

以降 Z に縮約して誘導されるマトロイド M_Z のフラットを Z を含むフラットと同一視する。

命題 6.9 ([AHK18, Prop. 6.8]) 正整数 p と q に対に対応 $x_{\mathcal{F}} \mapsto x_Z^p x_{\mathcal{F}}$ は群準同型 $\Psi_Z^{p,q}: A^{q-p}(M_Z) \rightarrow A^q(M, \mathcal{P}_+)$ を誘導する。 $\Psi_Z^{p,q}$ を, $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ に関連する (p, q) 型のギシン準同型と呼ぶ。

証明 件の対応で与えられる群準同型 $\psi_Z^{p,q}: S_{M_Z}^{q-p} \rightarrow S_{EU\mathcal{P}_+}$ を考える。このとき (a) $\psi_Z^{p,q}(I_{M_Z}^{p-q}) \subset \mathcal{F}_1^q$ であること, (b) $\psi_Z^{p,q}(J_{M_Z}^{p-q}) \subset \mathcal{F}_1^q + \mathcal{F}_2^q + \mathcal{F}_4^q$ であることが成立する。

(a) の成立について。 $I_{M_Z}^{q-p}$ は, 互いに包含関係のないフラット F_1 と F_2 と $q - p - 2$ 次の単項式 m を用いて $m x_{F_1} x_{F_2}$ と表される形の単項式で生成される。このとき $\psi_Z^{p,q}(m x_{F_1} x_{F_2}) = x_Z^p m x_{F_1} x_{F_2}$ であり右辺が \mathcal{F}_1 に属す。ゆえに (a) が成立する。

(b) の成立について。 $J_{M_Z}^{q-p}$ は, 相異なる $E \setminus Z$ の元 i と j と $q - p - 1$ 次の単項式 m を用

いて

$$m \left(\sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): i \in F} x_F - \sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): j \in F} x_F \right)$$

と表される多項式で生成される。このとき

$$\begin{aligned} \psi_Z^{p,q} \left(m \left(\sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): i \in F} x_F - \sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): j \in F} x_F \right) \right) &= x_Z^p m \left(\sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): i \in F} x_F - \sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): j \in F} x_F \right) \\ &= m x_Z^p \left(x_i + \sum_{F \in \mathcal{P}_+: i \in F} x_F - \left(x_j + \sum_{F \in \mathcal{P}_+: j \in F} x_F \right) \right) \\ &\quad - m x_Z^p (x_i - x_j) \\ &\quad - m x_Z^p \left(\sum_{F \in \mathcal{P}_+: i \in F, Z \notin F, Z \not\supset F} x_F - \sum_{F \in \mathcal{P}_+: j \in F, Z \notin F, Z \not\supset F} x_F \right) \end{aligned}$$

と計算でき、最右辺の第一項目が \mathcal{J}_1^q の元、第二項目が \mathcal{J}_2 の元、第三項目が \mathcal{J}_4 の元である。ゆえに (b) が成立する。

以上 (a) と (b) が成立するので $\psi_Z^{p,q}$ は群準同型 $\Psi_Z^{p,q}: A^{q-p}(M_Z) \rightarrow A^q(M, \mathcal{P}_+)$ を誘導する。

証明終

系 6.10 正整数 k を勝手に固定する。このとき $E \setminus Z$ の元 i に対して定まる $A^*(M, \mathcal{P}_+)$ の元 $x_Z \left(\sum_{F \in \mathcal{P}(M_Z): i \notin F} x_F \right)^k$ は i の取り方に依らない。この元を $x_Z \beta_{M_Z}^k$ で表す。

証明 件の元は $\Psi_Z^{1,k+1}(\beta_{M_Z,i}^k)$ と等しく、 $\beta_{M_Z,i}$ が i の取り方に依らないので主張が従う。

証明終

6.2 マトロイドフリップの分解定理：全射性

次の命題を証明することがこの小節の目標である。

命題 6.11 ([AHK18, Prop. 6.10]) q を正整数とする。このとき群準同型

$$\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^{\text{rk}_M(Z)-1} \Psi_Z^{p,q}: A^q(M, \mathcal{P}_-) \oplus \bigoplus_{p=1}^{\text{rk}_M(Z)-1} A^{q-p}(M_Z) \rightarrow A^q(M, \mathcal{P}_+)$$

は全射である。

補題 6.12 ([AHK18, Lem. 6.12]) Z の元 i に対して $A^*(M, \mathcal{P}_+)$ の元として

$$(6.3) \quad x_i x_Z + x_Z^2 + x_Z \beta_{M_Z} = 0$$

が成立する。

証明 $E \setminus Z$ の元 j を一つ取り \mathcal{I}_4 の元

$$\left(x_i + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ i \in F, j \notin F}} x_F \right) - \left(x_j + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ j \in F, i \notin F}} x_F \right)$$

に対して x_Z を掛けることを考える。

$$x_Z \left(\left(x_i + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ i \in F, j \notin F}} x_F \right) - \left(x_j + \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ j \in F, i \notin F}} x_F \right) \right) = x_i x_Z + x_Z \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ i \in F, j \notin F}} x_F - x_j x_Z - x_Z \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ j \in F, i \notin F}} x_F$$

右辺の第三項目は \mathcal{I}_2 の元, 第四項目は \mathcal{I}_1 の元である。第二項目について

$$x_Z \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ i \in F, j \notin F}} x_F = x_Z^2 + x_Z \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M_Z) : \\ j \notin F}} x_F + x_Z \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}_+ : \\ i \in F, j \notin F, \\ Z \not\subset F, Z \not\supset F}} x_F$$

と計算でき右辺の第二項目は $x_Z \beta_{M_Z, j}$ であり第三項目は \mathcal{I}_1 の元であるから

$$x_i x_Z + x_Z^2 + x_Z \beta_{M_Z, i} \in \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2 + \mathcal{I}_4$$

であることがわかる。

証明終

補題 6.13 ([AHK18, Lem. 6.14])

$$(6.4) \quad \sum_{p \in \mathbb{Z}_{>0}} \sum_{q \in \mathbb{Z}_{>0}} \text{im } \Psi_Z^{p,q} = A^*(M, \mathcal{P}_+) x_Z$$

が成立する。

証明 (6.4) の左辺が右辺に包含されることはギシン準同型の定義から明らかである。 $A^*(M, \mathcal{P}_+) x_Z$ に属す次数 q の単項式は, $I \subset Z \subset \mathcal{F}$ を満たす E の部分集合 I と \mathcal{P}_- の旗 \mathcal{F} を用いて, $x_Z^k \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I} x_i^{k_i}$ と表される。ここで k が正整数であるから系 6.10 の結果に注意して (6.3) を用いると

$$x_Z^k \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I} x_i^{k_i} = x_Z^k (-x_Z - \beta_{M_Z})^l \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \quad (\sum_{i \in I} k_i \text{ を } l \text{ と置いた。})$$

$$\begin{aligned}
&= (-1)^l x_Z^k \left(\sum_{j=0}^l x_Z^j \beta_{M_Z}^{l-j} \right) \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \\
&= \sum_{j=0}^l \Psi_Z^{k+j} \left((-1)^l \beta_{M_Z}^{l-j} \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \right)
\end{aligned}$$

と計算でき最右辺が $\in \text{im } \Psi_Z^{k,q} + \text{im } \Psi_Z^{k+1,q} + \dots + \text{im } \Psi_Z^{k+l,q}$ の元である。ゆえに (6.4) の右辺は左辺に包含される。 証明終

補題 6.14 ([AHK18, Lem. 6.15]) 正整数 p と q 及び、狭義に Z を含むフラット F に対し次の四つが成立する。

- (1) $x_Z \text{im } \Phi_Z^q \subset \text{im } \Psi_Z^{1,q+1}$ が成立する。
- (2) $x_Z \text{im } \Psi_Z^{p,q} = \text{im } \Psi_Z^{p+1,q+1}$ が成立する。
- (3) $x_F \text{im } \Phi_Z^q \subset \text{im } \Phi_Z^{q+1}$ が成立する。
- (4) $x_F \text{im } \Psi_Z^{p,q} \subset \text{im } \Psi_Z^{p,q+1}$ が成立する。

証明 (2) から (4) は定義から自明であるので、(1) の包含が成立することを示す。(1) の左辺は、 E の狭義部分集合 I と \mathcal{P}_- の旗 \mathcal{F} を用いて

$$x_Z \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I \setminus Z} x_i^{k_i} \prod_{i \in I \cap Z} (x_i + x_Z)^{k_i}$$

と表される $q+1$ 次単項式で生成される群である。このような元は $I \subset Z$ のとき系 6.10 の結果に注意して (6.3) を用いると

$$x_Z (-\beta_{M_Z})^{\sum_{i \in I} k_i} \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} = \Psi_Z^{1,q} \left((-\beta_{M_Z})^{\sum_{i \in I} k_i} \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \right)$$

と書き直すことができ、右辺が特に $\text{im } \Psi_Z^{1,q+1}$ の元である。また $I \not\subset Z$ のとき $I \setminus Z$ の元 i を取れるので \mathcal{F}_2 の関係式により件の単項式は零である。ゆえに (1) の包含関係が示された。 証明終

補題 6.15 ([AHK18, Lem. 6.16]) $k \geq \text{rk}_M(Z)$ を満たす整数 k と $q \geq k$ を満たす整数 q に対して

$$(6.5) \quad \text{im } \Psi_Z^{k,q} \subset \text{im } \Phi_Z^q + \sum_{p=1}^{k-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q}$$

が成立する。

証明 三段階に分けて証明する。

一段階目 $k = q = \text{rk}_M(Z)$ のとき。 Z の基底 I を一つ取り, $\prod_{i \in I} x_i$ の Φ_Z^k における像 $\prod_{i \in I} (x_i + x_Z)$ を展開することを考える。

$$\begin{aligned}
\prod_{i \in I} (x_i + x_Z) &= \sum_{J: J \subset I} \left(x_Z^{k-\#J} \prod_{j \in J} x_j \right) \\
&= \sum_{J: J \subsetneq I} \left(x_Z^{k-\#J} \prod_{j \in J} x_j \right) && (\prod_{i \in I} x_i = 0 \text{ であるから。}) \\
&= \sum_{J: J \subsetneq I} (x_Z^{k-\#J} (-x_Z - \beta_{M_Z})^{\#J}) && ((6.3) \text{ を用いる。}) \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k}{j} x_Z^{k-j} (-x_Z - \beta_{M_Z})^j \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \binom{k}{j} x_Z^{k-j} \left(\sum_{l=0}^j x_Z^{j-l} \beta_{M_Z}^l \right) \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=0}^j \Psi_Z^{k-l,k} \left((-1)^j \binom{k}{j} \beta_{M_Z}^l \right) \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=1}^j \Psi_Z^{k-l,k} \left((-1)^j \binom{k}{j} \beta_{M_Z}^l \right) + \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k}{j} x_Z^k \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=1}^j \Psi_Z^{k-l,k} \left((-1)^j \binom{k}{j} \beta_{M_Z}^l \right) - x_Z^k
\end{aligned}$$

と計算でき $x_Z^k \in \text{im } \Phi_Z^k + \text{im } \Psi_Z^{1,k} + \text{im } \Psi_Z^{2,k} + \dots + \text{im } \Psi_Z^{k-1,k}$ であることがわかる。
 $\text{im } \Psi_Z^{k,k} = \langle x_Z^k \rangle$ であるから, $k = q = \text{rk}_M(Z)$ のとき目的の包含の成立が示された。

第二段階 $k = q > \text{rk}_M(Z)$ のとき。第一段階の結果補題 6.14 を用いると

$$\begin{aligned}
\text{im } \Psi_Z^{k,k} &= x_Z \text{im } \Psi_Z^{k-1,k-1} \\
&= \dots \\
&= x_Z^{k-\text{rk}_M(Z)} \text{im } \Psi_Z^{\text{rk}_M(Z), \text{rk}_M(Z)} \\
&\subset x_Z^{k-\text{rk}_M(Z)} \left(\text{im } \Phi_Z^{\text{rk}_M(Z)} + \sum_{p=1}^{\text{rk}_M(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p, \text{rk}_M(Z)} \right) && (\text{第一段階の結果を用いる。}) \\
&\subset x_Z^{k-\text{rk}_M(Z)-1} \left(\text{im } \Psi_Z^{1, \text{rk}_M(Z)+1} + \sum_{p=2}^{\text{rk}_M(Z)} \text{im } \Psi_Z^{p, \text{rk}_M(Z)+1} \right) && (\text{補題 6.14 を用いる。}) \\
&= x_Z^{k-\text{rk}_M(Z)-1} \sum_{p=1}^{\text{rk}_M(Z)} \text{im } \Psi_Z^{p, \text{rk}_M(Z)+1} \\
&= \sum_{p=k-\text{rk}_M(Z)}^{k-1} \text{im } \Psi_Z^{p,k} && (\text{補題 6.14 を用いる。})
\end{aligned}$$

と計算でき、 $k = q > \text{rk}_M(Z)$ のとき目的の包含の成立が示された。

第三段階目 一般の場合。 \mathcal{F} を $q - k$ 個のフラットからなる $\mathcal{P}(M_Z)$ の旗として $\mathcal{F} = \{F_1 \subsetneq \cdots \subsetneq F_{q-k}\}$ と表す。このとき

$$\begin{aligned}
\Psi_Z^{k,q}(x_{\mathcal{F}}) &= x_Z^k x_{F_1} \cdots x_{F_{q-k}} \\
&= x_{F_1} \cdots x_{F_{q-k}} \Psi_Z^{k,k}(1) \\
&\in x_{F_1} \cdots x_{F_{q-k}} \text{im } \Psi_Z^{k,k} \\
&\subset x_{F_1} \cdots x_{F_{q-k}} \left(\text{im } \Phi_Z^k + \sum_{p=1}^{k-1} \text{im } \Psi_Z^{p,k} \right) \quad (\text{二段階目の結果を用いる。}) \\
&\subset x_{F_1} \cdots x_{F_{q-k}} \left(\text{im } \Phi_Z^{k+1} + \sum_{p=1}^{k-1} \text{im } \Psi_Z^{p,k+1} \right) \quad (\text{補題 6.14 を用いる。}) \\
&\subset \cdots \\
&\subset \text{im } \Phi_Z^q + \sum_{p=1}^{k-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q}
\end{aligned}$$

と計算でき目的の包含の成立が一般の場合でも示された。

証明終

命題 6.11 の証明 $q \leq \text{rk}_M(Z) - 1$ のとき $\text{im}(\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^q \Psi_Z^{p,q}) \subset \text{im}(\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^{\text{rk}_M(Z)-1} \Psi_Z^{p,q})$ であり、 $q > \text{rk}_M(Z) - 1$ のとき (6.5) を用いると

$$\begin{aligned}
\text{im} \left(\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^q \Psi_Z^{p,q} \right) &\subset \text{im} \left(\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^{q-1} \Psi_Z^{p,q} \right) \\
&\subset \cdots \\
&\subset \text{im} \left(\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^{\text{rk}_M(Z)-1} \Psi_Z^{p,q} \right)
\end{aligned}$$

であるから $\text{im}(\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^q \Psi_Z^{p,q})$ が全射であることを示せば十分である。(6.4) から $\text{im}(\bigoplus_{p=1}^q \Psi_Z^{p,q}) = A^q(M, \mathcal{P}_+)x_Z$ である。 $A^q(M, \mathcal{P}_+)x_Z$ に属さない次数 q の単項式は \mathcal{P}_- の旗 \mathcal{F} と E の部分集合 I を用いて $\prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I} x_i^{k_i}$ という形をしている。このとき

$$\begin{aligned}
\Phi_Z^q \left(\prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I} x_i^{k_i} \right) &= \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I \setminus Z} x_i^{k_i} \prod_{i \in I \cap Z} (x_i + x_Z)^{k_i} \\
&= \prod_{F \in \mathcal{F}} x_F^{k_F} \prod_{i \in I} x_i^{k_i} + (A^q(M, \mathcal{P}_+)x_Z \text{ の元})
\end{aligned}$$

と計算できる。これは件の準同型が全射であることを意味する。

証明終

6.3 命題 6.11 の応用

命題 6.16 Z を中心とするマトロイドフリップ $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ に対し, $\Phi_Z^r: A^r(M, \mathcal{P}_-) \rightarrow A^r(M, \mathcal{P}_+)$ は群同型である。

証明 M_Z の階数は $\text{crk}_M(Z)(= r + 1 - \text{rk}_M(Z))$ と等しいので, 正整数 p に対して $r - p > \text{rk}_M(Z) - 1$ が成立することが, $p \leq \text{rk}_M(Z) - 1$ が成立することと同値である。ゆえに $1 \leq p \leq \text{rk}_M(Z) - 1$ を満たす整数 p に対して $\Psi_Z^{p,r}$ が零写像であり, 命題 6.11 は Φ_Z^r が全射であることを意味する。

マトロイドフリップの列

$$\Sigma_{M, \emptyset} \rightsquigarrow \cdots \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+} \rightsquigarrow \cdots \rightsquigarrow \Sigma_M$$

を一つ取り, 引き戻し準同型

$$A^r(M, \emptyset) \xrightarrow{\Phi_{\mathcal{P}_-}^r} A^r(M, \mathcal{P}_-) \xrightarrow{\Phi_Z^r} A^r(M, \mathcal{P}_+) \xrightarrow{\Phi_{\mathcal{P}_+}^r} A^r(M)$$

を考える。上の議論より $\Phi_{\mathcal{P}_-}^r, \Phi_Z^r, \Phi_{\mathcal{P}_+}^r$ がすべて全射であり, また命題 6.2 より $A^r(M, \emptyset) \cong \mathbb{Z}$, 命題 5.21 より $A^r(M) \cong \mathbb{Z}$ であるので, $\Phi_{\mathcal{P}_+}^r \circ \Phi_Z^r \circ \Phi_{\mathcal{P}_-}^r$ は同型である。すると $\Phi_{\mathcal{P}_-}^r$ が同型であるから $\Phi_{\mathcal{P}_+}^r \circ \Phi_Z^r$ が同型になり, Φ_Z^r が同型であることが従う。

証明終

命題 6.16 と類似の主張がギシン準同型に対しても成立する。

命題 6.17 $\Psi_Z^{\text{rk}(Z), r}: A^{\text{crk}_M(Z)-1}(M_Z) \rightarrow A^r(M, \mathcal{P}_+)$ は群同型である。

この命題を示すためにはいくらか準備が必要である。以降 M^Z のフラットと Z を狭義に包含する $\mathcal{P}(M)$ のフラットを同一視することにする。

命題 6.18 正整数 p と q に対対応 $x_{\mathcal{F}} \mapsto x_Z^p x_{\mathcal{F}}$ は群準同型 $\Gamma_Z^{p,q}: A^{q-p}(M^Z) \rightarrow A^q(M)$ を誘導する。

証明 命題 6.9 (ギシン準同型の定義が矛盾なく定義されることの命題) と同様に示される。与えられた対応で定まる群準同型 $\gamma_Z^{p,q}: S_{M_Z}^{q-p} \rightarrow S_M^q$ を考える。 $\gamma_Z^{p,q}(I_{M_Z}) \subset I_M$ の成立は自明であるから $\gamma_Z^{p,q}(J_{M_Z}) \subset I_M + J_M$ であることを示す。相異なる $E \setminus Z$ の元 i と j と, 次数 $q - p - 1$ の単項式 m を考えると,

$$x_Z^p m \left(\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M^Z): \\ i \in F}} x_F - \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M^Z): \\ j \in F}} x_F \right) = x_Z^p m \left(\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \in F}} x_F - \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ j \in F}} x_F \right)$$

$$-x_Z^p m \left(\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \in F, F \not\subset Z}} x_F - \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ j \in F, F \not\subset Z}} x_F \right)$$

と計算でき右辺の第一項目が I_M の元, 第二項目が J_M の元である。ゆえに $\gamma_Z^{p,q}(J_{M_Z}) \subset I_M + J_M$ が成立する。 証明終

系 6.19 正整数 k を勝手に固定する。このとき $E \setminus Z$ の元 i に対して定まる $A^*(M)$ の元 $x_Z \left(\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M^Z): \\ i \in F}} x_F \right)^k$ は i の取り方に依らない。この元を $x_Z \alpha_{M^Z}^k$ で表す。
この記号の下補題 6.12 と類似した主張が成立する。

命題 6.20 Z が $\mathcal{P}(M)$ の極大元であるとき $x_Z(x_Z + \alpha_{M^Z}) = 0$ が成立する。

証明 Z の元 i と $E \setminus Z$ の元 j を取り, 線形関係 $\sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ i \in F}} x_F = \sum_{\substack{F \in \mathcal{P}(M): \\ j \in F}} x_F$ の両辺に x_Z を掛けることを考える。右辺は I_M の関係式により零, 左辺は $x_Z^2 + x_Z \alpha_{M^Z}$ と等しい。 証明終

命題 6.17 の証明 群準同型の合成

$$A^{\text{crk}_M(Z)-1}(M_Z) \xrightarrow{\Psi_Z^{\text{rk}(Z),r}} A^r(M, \mathcal{P}_+) \xrightarrow{\Phi_{\mathcal{P}_+^c}^r} A^r(M)$$

を考える。 $\Phi_{\mathcal{P}_+^c}^r$ が命題 6.16 により同型であるから, この合成が同型であることを示せば証明が終わる。 $A^{\text{crk}_M(Z)-1}(M_Z)$ と $A^r(M)$ が共に \mathbb{Z} と群同型であるので, 生成元が生成元に写ることを示せばよく, それは次に述べる等式により従う。 \mathfrak{z}_1 を $\mathcal{P}(M_Z)$ の極大旗, \mathfrak{z}_2 を $\mathcal{P}(M^Z)$ の極大旗とすると

$$(-1)^{\text{rk}(Z)-1} x_Z^{\text{rk}(Z)} x_{\mathfrak{z}_2} = x_{\mathfrak{z}_1} x_Z x_{\mathfrak{z}_2}$$

が成立する。なんとなれば命題 5.18(2) による $A^*(M^Z)$ 上の式 $x_{\mathfrak{z}_2} = \alpha_{M^Z}^{\text{rk}(Z)-1}$ の両辺を $\Gamma_Z^{1,\text{rk}(Z)}$ で写して $x_{\mathfrak{z}_1}$ を掛けると,

$$x_{\mathfrak{z}_1} x_Z x_{\mathfrak{z}_2} = x_{\mathfrak{z}_1} x_Z \alpha_{M^Z}^{\text{rk}(Z)-1}$$

が成立し, 命題 6.20 より右辺は $(-1)^{\text{rk}(Z)-1} x_{\mathfrak{z}_1} x_Z^{\text{rk}(Z)}$ と等しく目的の等式が得られる。ゆえに $\Psi_Z^{\text{rk}(Z),r}$ は群同型である。 証明終

6.4 ポアンカレ双対の証明

定理 6.21 (分解定理) マトロイドフリップ $\Sigma_{M,\mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M,\mathcal{P}_+}$ と, 勝手な正整数 q に対し $\Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \Psi_Z^{p,q}$ は群同型である。あるいは同じことだが $\Phi_Z^q, \Psi_Z^{1,q}, \dots, \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-1,q}$ がすべ

て単射で

$$A^q(M, \mathcal{P}_+) = \text{im } \Phi_Z^q \oplus \bigoplus_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q}$$

が成立する。

定理 6.22 (ポアンカレ双対) $\mathcal{P}(M)$ の順序フィルター \mathcal{P} と r 以下の非負整数 q に対し乗算写像

$$A^q(M, \mathcal{P}) \times A^{r-q}(M, \mathcal{P}) \rightarrow A^r(M, \mathcal{P})$$

は対応 $\xi \mapsto (-) \cdot \xi$ により群同型

$$A^{r-q}(M, \mathcal{P}) \simeq \text{hom}_Z(A^q(M, \mathcal{P}), A^r(M, \mathcal{P}))$$

を誘導する。

定理 6.21 と定理 6.22 を同時並行で証明する。まず次の補題から始める。

補題 6.23 q を正整数とする。

- (1) $A^*(M, \mathcal{P}_-)$ に対してポアンカレ双対が成り立つならば, Φ_Z^q は単射で $\text{im } \Phi_Z^q$ と $\sum_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q}$ の和が内部直和である。
- (2) $A^*(M_Z)$ に対してポアンカレ双対が成り立つならば, $\text{rk}(Z) - 1$ 以下の勝手な正整数 p に対し $\Psi_Z^{p,q}$ が単射で, 和 $\sum_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q}$ が内部直和である。

(1) の証明 Φ_Z^q の単射性について。 ξ を $A^q(M, \mathcal{P}_-)$ の非零元とすると, $A^*(M, \mathcal{P}_-)$ のポアンカレ双対性より $\xi \cdot \eta \neq 0$ を満たす $A^{r-q}(M, \mathcal{P}_-)$ の元 η が存在する。命題 6.16 より Φ_Z^r が同型であるから, $\Phi_Z^q(\xi) \cdot \Phi_Z^{r-q}(\eta) \neq 0$ であり $\Phi_Z^q(\xi)$ が特に零でない。ゆえに Φ_Z^q は単射である。

内部直和性について。補題 6.14 を用いると

$$\begin{aligned} \left(\sum_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q} \right) \cdot \text{im } \Phi_Z^{r-q} &\subset \sum_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p,r} \quad (\text{補題 6.14 より。}) \\ &= 0 \quad \left(\begin{array}{l} \text{rk}(Z) - 1 \text{ 以下の正整数 } p \text{ に対し} \\ A^{r-p}(M_Z) = 0 \text{ であるので。} \end{array} \right) \end{aligned}$$

であるから, 前段落の計算より $\text{im } \Phi_Z^q$ と $\sum_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \text{im } \Psi_Z^{p,q}$ の共通部分は $\{0\}$ でなければならない。 証明終

(2) の証明 $\Psi_Z^{p,q}$ の単射性について。 ξ を $A^{q-p}(M_Z)$ の非零元とすると, $A^*(M_Z)$ のポアンカレ双対性より $\xi \cdot \eta \neq 0$ を満たす次数 $(\text{crk}(Z) - 1) - (q - p) = r - q - (\text{rk}(Z) - p)$ の元 η

が存在する。命題 6.17 より $\Psi_Z^{\text{rk}(Z),r}$ が同型であるから、 $\Psi_Z^{p,q}(\xi) \cdot \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-p,r-q}(\eta) \neq 0$ であり $\Psi_Z^{p,q}(\xi)$ が特に零でない。

内部直和性について、 p_1 と p_2 を相異なる $\text{rk}(Z) - 1$ 以下の正整数とする。 $p_1 < p_2$ と仮定しても一般性が失われない。このとき

$$\begin{aligned} \text{im } \Psi_Z^{p_1,q} \cdot \text{im } \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-p_2,r-q} &= \text{im } \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-(p_2-p_1),r} \\ &= 0 \quad (\Psi_Z^{\text{rk}(Z)-(p_2-p_1),r} \text{ の定義域が零であるから。}) \end{aligned}$$

であるから、前段落の計算より $\text{im } \Psi_Z^{p_1,q}$ と $\text{im } \Psi_Z^{p_2,q}$ の共通部分は $\{0\}$ でなければならない。

証明終

定理 6.21 と定理 6.22 の証明 定理 6.22 を M の階数 $r+1$ に関する帰納法を用いて示す。 M の階数が 1 であるとき $\mathcal{P}(M) = \emptyset$ であり、 $A^*(M) \cong \mathbb{Z}[x]/(x^2)$ であるからポアンカレ双対が成立することが明らかである。

M の階数が 2 以上であるとし、階数が $\text{rk}(M)$ 未満のマトロイド N に対し $A^*(N)$ がポアンカレ双対を満たすとする。 $A^*(M, \mathcal{P})$ がポアンカレ双対を満たすことを、 \mathcal{P} の元の個数に関する帰納法で示す。 \mathcal{P} が空であるとき $A^*(M, \mathcal{P}) \cong \mathbb{Z}[x]/(x^{r+1})$ であるからポアンカレ双対が明らかに満たされる。よって $\mathcal{P}_+ = \mathcal{P}$ を満たすマトロイドフリップ $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ を取り、 $A^*(M, \mathcal{P}_-)$ がポアンカレ双対を満たす仮定する。 Z を $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ の中心とすると $A^*(M_Z)$ も帰納法の仮定よりポアンカレ双対を満たすので、補題 6.23 から $\Sigma_{M, \mathcal{P}_-} \rightsquigarrow \Sigma_{M, \mathcal{P}_+}$ に対して分解定理が成立する。 q を r 以下の正整数とし

$$\begin{aligned} A^q(M, \mathcal{P}_+) &= \text{im } \Phi_Z^q \oplus \text{im } \Psi_Z^{1,q} \oplus \text{im } \Psi_Z^{2,q} \oplus \cdots \oplus \text{im } \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-1,q} \\ A^{r-q}(M, \mathcal{P}_+) &= \text{im } \Phi_Z^{r-q} \oplus \text{im } \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-1,r-q} \oplus \text{im } \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-2,r-q} \oplus \cdots \oplus \text{im } \Psi_Z^{1,q} \end{aligned}$$

と直和分解する。このとき $A^*(M, \mathcal{P}_-)$ がポアンカレ双対性を満たすので補題 6.23 の単射性より $\text{im } \Phi_Z^q$ と $\text{im } \Phi_Z^{r-q}$ は同じ階数の有限階数自由アーベル群である。同様に $A^*(M_Z)$ のポアンカレ双対性より $1 \leq p \leq \text{rk}(Z) - 1$ を満たす整数 p について $\text{im } \Psi_Z^{p,q}$ と $\text{im } \Psi_Z^{\text{rk}(Z)-p,q}$ は同じ階数の有限階数自由アーベル群である。これら直和因子の基底を固定し、次数写像により同型 $A^r(M, \mathcal{P}_+), A^r(M, \mathcal{P}_-), A^{\text{crk}(Z)-1}(M_Z) \simeq \mathbb{Z}$ を取り、 $A^q(M, \mathcal{P}_+) \times A^{r-q}(M, \mathcal{P}_+) \rightarrow \mathbb{Z}$ が定める対称行列を \mathcal{M}_+ 、 $A^q(M, \mathcal{P}_-) \times A^{r-q}(M, \mathcal{P}_+) \rightarrow \mathbb{Z}$ が定める対称行列を \mathcal{M}_- 、 $A^{q-p}(M_Z) \times A^{\text{crk}(Z)-p}(M_Z) \rightarrow \mathbb{Z}$ が定める対称行列を \mathcal{M}_p とする。すると補題 6.23 の証明内の計算より \mathcal{M}_+ と $\mathcal{M}_- \oplus \mathcal{M}_1 \oplus \mathcal{M}_2 \oplus \cdots \oplus \mathcal{M}_{\text{rk}(Z)-1}$ は各直和因子の符号を除いて等しい。ゆえに $\det \mathcal{M}_+ = \pm \det \mathcal{M}_- \prod_{p=1}^{\text{rk}(Z)-1} \det \mathcal{M}_p = \pm 1$ で \mathcal{M}_+ が非退化であり、 $A^q(M, \mathcal{P}_+) \times A^{r-q}(M, \mathcal{P}_+) \rightarrow A^r(M, \mathcal{P}_+)$ はポアンカレ双対性を満たす。

$A^0(M, \mathcal{P}_+) \times A^r(M, \mathcal{P}_+) \rightarrow A^r(M, \mathcal{P}_+)$ と $A^r(M, \mathcal{P}_+) \times A^0(M, \mathcal{P}_+) \rightarrow A^r(M, \mathcal{P}_+)$ がポアンカレ双対性を満たすことは明らかなので, $A^*(M, \mathcal{P}_+)$ がポアンカレ双対性を満たすことが従う。以上から, 帰納法により M 上の勝手なマトロイドに対し分解定理が成立し, かつすべての順序フィルター \mathcal{P} に対して $A^*(M, \mathcal{P})$ がポアンカレ双対性を満たすことが示された。

証明終