

Polyhedron について

Ryo Kawai

2022 年 12 月 20 日

前書き (memo)

TeX の環境をいじって色々試しているため, とても奇妙な PDF になってしまっている. 環境としては, エディタとして VScode(LaTeX Workshop, LaTeX Utilities), TeX として TeXLive2021 を使用している.

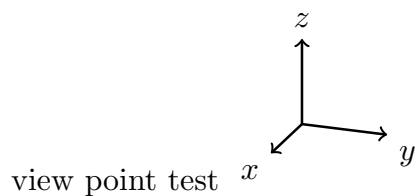
基本的に, 呼び名が複数あるものは最初に表記してある方で統一する.

.....

往々にしてルー大柴さんのようになるが許して欲しい.

abs があるか macro:-j “protect “abs

図に関しては, 現在 tikz3dtools を使おうと試みている途中であるため, もう少し後で挿入する.



目次

1	多面体のモチベーションと定義	4
1.1	モチベーション	4
1.2	定義について	4
1.3	分類	5
1.4	さまざまな多面体	6
2	多面体の基本的な性質	7
2.1	定義	7
2.2	性質	9
2.3	いろいろ	12
2.4	分類	12
2.5	regular polyhedron	14
3	多面体グラフ	15
3.1	凸多面体	15
3.2	regular	16
4	多面体の面について	18
4.1	regular	18
5	ガウス曲率が一定な多面体	19
5.1	一般のガウス曲率	19
5.2	多面体のガウス曲率	19
5.3	ガウス曲率が一定である多面体	20

この PDF で出てきている疑問点や TODO など

1. 定義周り
 - 1.1. (P, d_n) に限定するのではなく, $(P, \phi), \phi: P \rightarrow \mathbb{R}$ とした方がいいか.
 - 1.2. § 2.1 の抽象多面体は F として辺の集合として扱った方が良くはないか.
 - 1.3. § 2.3 に書いてあること.
2. K_5 を骨格に持つ多面体は自己交差を除くと存在しないのか (凸だと存在しないことが言えている).
3. 正六角形で構成される多面体 (穿孔多面体) は存在するのか. おそらく存在しないと考えているが, 証明はあるのか.
4. m 角形が n 個で構成される多面体について, (m, n) がどのような時であれば存在するのか. 凸多面体はわかっているため, 凹および穿孔多面体での存在について.
5. 全ての頂点のガウス曲率が負の一定値であるような多面体について (構成はできたが, 他にどのようなものがあるか. 現在は各点のガウス曲率が $-\pi/6$ のものだが, これをもっと小さくできないかなど).
6. 全ての頂点のガウス曲率が 0 であるような立体の最小頂点数は, 現在知られているものは 10 頂点だが, それ以下はないのか (ない気がする).

1 多面体のモチベーションと定義

1.1 モチベーション

四角形の面が7つで構成される凸多面体は存在するのであろうか。これは私が高校生の時に疑問に思ったことである。当時自分は存在しないと予想したが、綺麗な証明は行えなかった。その後、大学でグラフ理論とその周辺を学び、Steinitz's の定理などを知り多面体グラフからのアプローチに興味を持った。この PDF では、自分が興味を持った多面体についての事実や、知られていることをまとめることとする。

1.2 定義について

私が今回扱いたい対象である多面体について、まずは定義から確認していきたい。しかし実は多面体の定義は、まるでグラフ理論におけるグラフの定義のように、様々な分野や場面において異なる定義がされていることが多く、一般的なもの定まっていない。そこでまず、そのようなさまざまな多面体の定義について観察してみる。

例えば広辞苑を引くと、多面体については以下のように書かれている。

四つ以上の平面多角形で囲まれた立体。平面の数によって四面体・五面体などという。

しかし、これは数学的に扱うには曖昧すぎる (?)。

図形的な世界での一つの定義として「空間内で複数の多角形を辺で連結させた立体」というものがある [3]。この定義はとても直感的に分かりやすく、よく表している。この定義に基づくと、2枚だけの多角形でできていても多面体と捉えることができるため、その点が問題である。また、「立体」は3次元上での集合という意味で捉えているが、これも曖昧である。

空間を切り取るといった表現が使われているものもある。また例えば、田村トポロジーでは単体複体の実現を多面体とよんでいる。

一例として [3] の定義を見てみよう。ここでは「空間内で複数の多角形を辺で連結させた立体」を「開いた多面体」、「4枚以上の多角形が集まって空間を切り取る立体」を「閉じた多面体」と定義している。また、分類について無限面体や面 (多角形) の内部自己交差も許容している。凸多面体に限れば、広く知れ渡った定義がある。

一つ一つ例を見ていこう。(ここで詳細に定義を考える) (中略)

以上を整理すると、私が扱いたい多面体は、以下のような性質を満たしてほしいことがわかる。(他に細々としたものがあるが...)

1. オイラーの公式 ($V + F - E = 2 * (1 - S)$) を満たす。
2. (頂点の数は有限個である)。
3. 辺に接する面の数は必ず2つである。(閉曲面である)

4. 頂点に接する辺および面の数は3つ以上である.
5. 自己交差をしない. (要検討)

(文章が良くないので, 校正の必要あり) なので, 多面体を以下のように定める.

定義 1.2.1

polyhedron(多面体) とは, 立体の中で

1. 頂点の数は有限個であり, 連結である.
2. 各面が多角形 (平面) である.
3. 辺に接する面の数は必ず2つである. (閉曲面である)
4. 頂点に接する辺および面の数は3つ以上である.
5. 自己交差をしない. (要検討)

を満たすものとする.

1.3 分類

定義 1.2.1 に該当する立体は数多く存在するが, その中でも大きく

1. 凸多面体
2. 凹多面体
3. 穿孔多面体

に分類できる.

定義 1.3.1 | $\langle \text{convex polyhedron(凸多面体)} \rangle$

多面体の中で, 二面角が π 未満かつ自己交差をしないものとして定義することができるらしい.

定義 1.3.2 | $\langle \text{concave polyhedron(凹多面体)} \rangle$

種数0の多面体の中で凸多面体でないものを **concave polyhedron(凹多面体)** または **nonconvex polyhedron** という.

凸多面体と凹多面体をまとめて多面体ということもある. すなわち球面と同相なものを多面体ということがあるが, 本 PDF では使い分ける.

定義 1.3.3 | $\langle \text{toroidal polyhedron(穿孔多面体)} \rangle$

多面体の中で, 種数が1以上であるもの.

1.4 さまざまな多面体

さまざまな多面体について, とりあえずリスト形式でまとめておこう.

1. 凸多面体
2. 凹多面体
3. 穿孔多面体
4. poset から作られる多面体 http://pantodon.jp/index.rb?body=polytope_from_poset
5. 有限距離空間から定義される多面体 http://pantodon.jp/index.rb?body=fundamental_polytope
6. グラフからできる多面体 http://pantodon.jp/index.rb?body=graph_polytopes

2 多面体の基本的な性質

2.1 定義

多面体の定義をしよう

まず最初に構造のみを抜き出した、抽象的な多面体を考える.

定義 2.1.1 | $\langle \text{abstract polyhedron}(\text{抽象多面体}) \rangle$

$\text{abstract polyhedron}(\text{抽象多面体})$ とは, $\text{vertex}(\text{頂点})$ と呼ばれる object の集合 V と, V の異なる 2 元からなる部分集合である $\text{edge}(\text{辺})$ の集合 E と, V の異なる 3 つ以上の元からなる部分集合である $\text{face}(\text{面})$ の集合 F の組 $P = (V, E, F)$ で, 以下を満たすものである.

1. 各面は多角形である. すなわち,

$$\forall f = \{v_0, v_1, \dots, v_n\} \in F, 0 \leq \forall i \neq j \leq n, \begin{cases} \{v_i, v_j\} \in E, & |i - j| = 1 \text{ or } n \\ \{v_i, v_j\} \notin E, & 2 \leq |i - j| \leq n - 1 \end{cases}$$

2. 任意の辺は必ず二つの頂点及び面に接している. すなわち, $\forall e \in E, |\{f \in F \mid e \subset f\}| = 2$
3. 各頂点には必ず 3 つ以上の辺が隣接している. すなわち, $\forall v \in V, |\{e \in E \mid v \in e\}| \geq 3$
4. 各頂点の近傍は連結である. すなわち,

$$\forall v \in V, \{v_0, v_1, \dots, v_n\} = \{v' \in V \mid \{v, v'\} \in E\}, 0 \leq \forall i \neq j \leq n, \begin{cases} \{v_i, v_j\} \subset F, & |i - j| = 1 \text{ or } n \\ \{v_i, v_j\} \not\subset F, & 2 \leq |i - j| \leq n - 1 \end{cases}$$

5. 有限であり連結である. すなわち, $|V| < \infty, \forall v, v' \in V, \exists v - v' \text{ Path}$

すなわち, $V, E, F : \text{set}$ は

$$E \subseteq \binom{V}{2}, F \subseteq \bigcup_{3 \leq k \leq |V|} \binom{V}{k}^{*1}$$

である. また, 表記上の曖昧さを回避するために $V \cap E = V \cap F = E \cap F = \emptyset$ とする^{*2}.

注意すべきは, この定義の多面体には各面が平面であるという情報が載っていないということである. もしかしたら 1 の条件は $\forall f = \{v_0, v_1, \dots, v_n\} \in F, |\{e \in E \mid e \subset f\}| = n + 1$ とかでいいかもしれない.

表記 2.1.2

$E \ni e \subset f \in F$ であるとき, $e \prec f$ と書く.

多面体 P の頂点, 辺, 面の集合をそれぞれ $V(P), E(P), F(P)$ で表したりもする.

^{*1} $\binom{A}{k} = \{X \subset A \mid |X| = k\}$

^{*2} 感覚的には頂点の集合と辺の集合は共通部分を持たないで欲しいので, 明記しておく. 例えば公理的集合論では $2 = \{0, 1\}$ であるから $V = \{0, 1, 2\}, E = \{\{0, 1\}\}$ とすると $V \cap E \neq \emptyset$ となってしまうような事態が発生する.

定義 2.1.3 | $\langle d_n \text{ polyhedron} \rangle$

抽象多面体 $P = (V, E, F)$ と, その頂点間で定義される以下の関数 d_n の組 $P_{d_n} = (P, d_n)$ を d_n **polyhedron**(d_n 多面体) という.

$$d_0 : \{(v, v') \in V \times V \mid \{v, v'\} \in E \vee v = v'\} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$$

$$d_1 : \{(v, v') \in V \times V \mid \{v, v'\} \subset f \in F\} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$$

$$d_2 : V \times V \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$$

ただし d_n は以下を満たす.

1. $\forall x, y \in V, d_n(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
2. $\forall x, y \in V, d_n(x, y) = d_n(y, x)$
3. $\forall x, y, z \in V, (x, y), (y, z), (z, x) \in \text{dom } d_n \Rightarrow d_n(x, z) \leq d_n(x, y) + d_n(y, z)$

このように定めると, 定義域を適切に制限することで, d_2 多面体は d_1 多面体とみることができることがわかる. しかし, これらの多面体は私が考えたい 3 次元空間で実現できるものばかりとは限らない. むしろ 3 次元空間では実現できないものがほとんどであろう. そこで, まず「3 次元空間で実現できる」という言葉をしっかりと定義したい. 具体的には距離空間の埋め込みと同じようなことをする.

定義 2.1.4

抽象多面体 $P = (P, \emptyset)$ または d_n 多面体 (P, d_n) に対して, 以下を満たすような 3 次元ユークリッド空間 (\mathbb{R}^3, d) への写像 $\varphi : V(P) \rightarrow \mathbb{R}^3$ が存在するとき, φ を P の **realization**(実現) という.

1. $\forall (v, v') \in \text{dom } d_n, d_n(v, v') = d(\varphi(v), \varphi(v'))$
2. $\forall f = \{v_0, v_1, \dots, v_k\} \in F(P), \text{rank} \begin{pmatrix} \varphi(v_0) & \varphi(v_1) & \cdots & \varphi(v_k) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} = 3$

実現は一意であるとは限らない. また, 実現が存在するとも限らない. 実現が存在する場合, その像 $\text{Im } \varphi$ を $|\varphi|$ で表す.

例えば有限距離空間で有名な三脚は任意のユークリッド空間に埋め込めないため, それを上で定義の d_2 多面体で構成してみよう.

例 2.1.5

$V = \{o, x, y, z\}, E = \binom{V}{2}, F = \{\{o, x, y\}, \{o, y, z\}, \{o, z, x\}, \{x, y, z\}\}, d(o, x) = d(o, y) = d(o, z) = 1, d(x, y) = d(y, z) = d(z, x) = 2$ である d_2 多面体 $((V, E, F), d)$ は, 実現が存在しない.

よって, 上記の多面体の中でも, さらに実現可能なクラスに対しての議論をしたりすることになる. 次に多面体について以下の同型の概念を定義する.

定義 2.1.6 | $\langle \text{polyhedron isomorphism} \rangle$

2つの抽象多面体 P, P' に対して, その間の写像 $\varphi: V(P) \rightarrow V(P')$ を $\varphi: P \rightarrow P'$ と表す. 2つの抽象多面体 $P = (V, E, F), P' = (V', E', F')$ に対して, $\varphi: P \rightarrow P'$ が

$$\{x, y\} \in E \Rightarrow \{\varphi(x), \varphi(y)\} \in E', \{v_0, v_1, \dots, v_n\} \in F \Rightarrow \{\varphi(v_0), \varphi(v_1), \dots, \varphi(v_n)\} \in F'$$

を満たすとき, φ を **polyhedron homomorphism**(多面体準同型写像) であるという. φ が全単射であり φ^{-1} も多面体準同型写像であるとき, φ を **polyhedron isomorphism**(多面体同型写像) という. またこのとき, P と P' は **polyhedron isomorphic**(多面体同型) であるといい, $P \simeq P'$ と書き表す.

定義 2.1.7 | $\langle d_n \text{ polyhedron isomorphism} \rangle$

2つの d_n 多面体 $(P, d), (P', d')$ に対して多面体準同型写像 $\varphi: P \rightarrow P'$ が存在し,

$$\forall (v, v') \in \text{dom } d, d(v, v') = d'(\varphi(v), \varphi(v'))$$

を満たすとき, φ をそれぞれ **d_n polyhedron homomorphism**(d_n 多面体準同型写像) であるという. φ が全単射であり φ^{-1} も d_n 多面体準同型写像であるとき, φ を **d_n polyhedron isomorphism**(d_n 多面体同型写像) という. またこのとき, P と P' は **d_n polyhedron isomorphic**(d_n 多面体同型) であるといい, $P \stackrel{d_n}{\simeq} P'$ ^{*3} と書き表す.

表記 2.1.8

2つの多面体の実現 P, P' のそのドメイン同士がほにゃらら同型である時, 単に P と P' がほにゃらら同型であるという. また, $\text{dom } P \simeq \text{dom } P'$ などを単に $P \simeq P'$ や $|P| \simeq |P'|$ と書いたりする.

系 2.1.9

2つの多面体の実現 P, P' に対して,

$$P \stackrel{d_2}{\simeq} P' \Rightarrow P \stackrel{d_1}{\simeq} P'$$

$$P \stackrel{d_2}{\simeq} P' \Rightarrow P \stackrel{d_0}{\simeq} P'$$

$$P \stackrel{d_1}{\simeq} P' \Rightarrow P \stackrel{d_0}{\simeq} P'$$

$$P \stackrel{d_n}{\simeq} P' \Rightarrow P \simeq P'$$

2.2 性質

多面体を持つ性質や値について考えてみよう. 一般に多面体には以下のような性質や特徴量がある.

1. オイラー標数 ($V - E + F$)
2. 種数 (穴の数)

^{*3} 索引なし

3. ガウス曲率または不足角 ($2 * \pi$ -頂点周りの角度の合計)
4. 凸性 (convex hull と一致する)
5. 二面角 (辺を共有する面同士の角度)
6. 立体角 (多面体を球で切った時の面積 (Spherical Excess))

また, これらについて以下のような性質が成り立つ.

1. オイラー標数 $= 2 - 2 * \text{種数}$
2. 全ての不足角の和 $= 2\pi * \text{オイラー標数}$
3. 全ての立体角の和 $= 2 * (\text{全ての二面角の和} + (V - E)\pi)$
4. 凸であるならば, 各点でガウス曲率は正

重要なのは, 不足角は辺を細分した場合にも影響しないということである. 立体角は辺を細分した際に影響が出てしまう. 不足角は 2 次元での多角形における「外角」を 3 次元に拡張したような概念になっている. また, 立体角と不足角は球面三角法によって関係付けることができるが, 綺麗な関係式になるのかはとても疑問である (手計算の範囲では綺麗にできなかった).

これらを前述の定義に沿って書き換えてみる.

定義 2.2.1

抽象多面体 $P = (V, E, F)$ に対して, $\chi(P) = |V| - |E| + |F|$ を多面体 P の **Euler characteristic** (オイラー標数) という. 一般に使用されるオイラー標数と何ら変わらない.

命題 2.2.2

オイラー標数は偶数となる.

この主張はおそらく正しい (が, 定義のみで導出できるかが謎). 上記主張が正しい場合, **genus** (種数) を $1 - \chi(P)/2$ で定めたい.

次にガウス曲率 (不足角) を定義していきたい. 実現における不足角を定義するにはまず各面での角度を求めなければならない. 角度は d_0 では定まらないため, d_1 ぐらいが欲しい.

定義 2.2.3 | $\langle \text{face angle} \rangle$

d_1 多面体 P の各頂点 $v \in V(P)$ と, v を含む面 $f \in F(P)$ に対して定まる以下の量 a を **face angle** (面角) という.

$$a(v, f) = \arccos \left(\frac{d(v, x)^2 + d(v, y)^2 - d(x, y)^2}{2 * d(v, x) * d(v, y)} \right) (\{v, x\}, \{v, y\} \prec f)$$

ただし, **arccos は値が一意に定まりはしない**. ここで私たちは凸性を考えていないため, **arccos** の値域を制限することができない. もちろん, d_1 ほどの情報があれば定めることができるはずではあるが, f 全体を見ないと決定できないのが難点である. そこで, 逆にガウス曲率を与える方が良いのではと考えた.

定義 2.2.4 | $\langle \text{face angle} \rangle$

抽象多面体 P の各頂点 $v \in V(P)$ と, v を含む面 $f \in F(P)$ に対して定まる以下の量 a を **face angle**(面角) という.

$$a : \{(v, f) \in V \times F \mid v \in f\} \rightarrow (0, 2\pi) \subset \mathbb{R}$$

ただし a は以下を満たす.

$$\forall f \in F(P), \sum_{v \in f} a(v, f) = \pi * (|f| - 2)$$

d_0 多面体に a の情報を付与したものは, 一般に d_1 にはならない気がするが, 実現がある場合は定数倍を除いて一致しそうである (a の情報の実現をどう対応させるかによりそうだが). 上記のように多面体に面角の情報が加わると, 不足角が定義することができる.

定義 2.2.5 | $\langle \text{Gaussian curvature} \rangle$

面角が定まっている多面体 (i.e. a が存在する多面体) P から定まる以下の量 $G : V(P) \rightarrow \mathbb{R}$ を **Gaussian curvature**(ガウス曲率) または **angular defect**(不足角) という.

$$G(v) = \sum_{\{f \in F(P) \mid v \in f\}} a(v, f)$$

凸性は d_2 ぐらいが必要であると考えている. 凸の定義をしたい.

定義 2.2.6

実現が存在する d_2 多面体の実現が凸であるとき, d_2 多面体は凸であるという.

何にもいい定義が思いつかない.

同じく二面角も d_2 ぐらいがあれば定まらと思う.

定義 2.2.7 | $\langle \text{dihedral angle} \rangle$

d_2 多面体 P の各辺 $e \in E(P)$ に対して定まる以下の量 b を **dihedral angle**(二面角) という.

$$b(v, f) = \arccos$$

ただし, \arccos は値が一意に定まりはしない. ここで私たちは凸性を考えていないため, \arccos の値域を制限することができない. もちろん, d_2 ほどの情報があれば定めることができるはずではあるが, P 全体を見ないと決定できないのが難点である. そこで, 逆にガウス曲率を与える方が良いのではと考えた.

定義 2.2.8 | $\langle \text{dihedral angle} \rangle$

抽象多面体 P の各辺 $e \in E(P)$ に対して定まる以下の量 b を **dihedral angle**(二面角) という.

$$b : E(P) \rightarrow (0, 2\pi) \subset \mathbb{R}$$

d_1 多面体に b の情報を付与したものは, 一般に d_2 にはならない気がするが, 実現がある場合は定数倍を除いて一致しそうである (b の情報の実現をどう対応させるかによりそうだが).

2.3 いろいろ

抽象多面体については, ほとんど最小の条件のみを入れてあるため, 普段私たちが扱っている多面体は全て抽象多面体であると言えると思う. しかし, 逆に**抽象多面体であれば必ず実現が存在するかはわからない**. おそらく必ず存在するのではないかと考えている. また, face angle や dihedral angle については, 実現の方から持ってきた概念であるため導出ができるはずだが, 付け加えて比較するのも良いのではないかと考えている. 角度という概念を入れて考えると, 今までの先人がなぜ convex に限って議論していたかがとてもよくわかる. どれほどまでに convex という条件は角度に対して強力である.

以下, おそらくこうであるという予想

予想 2.3.1

2 つの多面体の実現 P, P' に対して,

1. $P : \text{凸}, P \stackrel{d_2}{\simeq} P' \Rightarrow P' : \text{凸}$
2. $P \stackrel{d_1}{\simeq} P' \Rightarrow \exists \varphi : d_1 \text{ 多面体同型写像}, \forall v \in V, \kappa(v) = \kappa(\varphi(v))$

また, **定理 3.1.1** は以下のように言い換えることができる.

定理 2.3.2

多面体の実現全体 \mathbb{P} を多面体同型 \simeq で分類した \mathbb{P}/\simeq に対して,

$$\exists p : \text{凸} \in P \in \mathbb{P}/\simeq \Leftrightarrow P \text{ の骨格 : 3-連結単純平面グラフ}$$

2.4 分類

多面体間に同型という概念を導入したが, 他の概念でも分類することができる. よく知られているのは以下の通り

1. 組み合わせ同型 ($=\simeq$)
2. アフィン同型
3. 等角
4. 相似
5. 合同 ($=\stackrel{d_2}{\simeq}$?)

もしや実現が存在する d_n 多面体同型で定数倍の拡大と縮小を許してやると, アフィン同型あたりが d_0 ぐらいにならないかなと考えたりしている. 上の概念についても整理して分類に使うと良いかもし

実現は、凸に限れば素晴らしい結果はたくさんある。例えばスターは $\text{convex} + a \Rightarrow b$ を示した。また、カーチャーは $\text{convex} + a + \text{外接球} \Rightarrow R$ を示した。また、ミンコフスキーは「面積 + 面の法線」から一意な多面体を生成できることを示した。

The diagram illustrates a hierarchy of mathematical concepts. At the top is *convex*, which points to *positiveG*. *positiveG* points to *3-connectplaner* (labeled "シュタイニッツ") and *abstract*. *3-connectplaner* points to *abstract*. *abstract* points to *a*, *R*, *d₀*, and *b*. *a* points to *d₀ + a* and *a + R*. *R* points to *a + R* and *d₀ + R*. *d₀* points to *d₀ + R* and *d₁*. *b* points to *a + convex* and *abstract*. *a + convex* points to *b*. *d₀ + a* points to *d₀ + a + R*. *a + R* points to *d₀ + a + R* and *d₁ + R*. *d₀ + R* points to *d₁ + R*. *d₁* points to *d₁ + R*. *d₁ + R* points to *d₂ + R* and *d₂*. *d₂ + R* points to *d₂*. *d₀ + a + R* points to *d₁ + R* (labeled "合同?"). *d₁ + R* points to *d₂ + R* (labeled "相似?").

2.5 regular polyhedron

各頂点に接する面のパターン (?) が同一であり, 各面が同一の **regular polygon**(正多角形) で構成されている多面体は, 凸のものに限れば **regular polyhedron**(正多面体) と呼ばれ, 5 種類と完全に決定されている. また, 同一に限らず, 二種類以上の正多角形で構成された多面体は無限に存在し, その中でも特徴的な立体には様々な名前がついている. この辺は余裕があればこの章に追加する.

ここで素朴には, 上の正多面体の条件を緩めるとどうなるかという疑問がある. 例えば, 「同一の正多角形で構成された多面体」とすると, 正三角形・正四角形・正五角形の場合は正多面体を貼り付けることでほぼ無限に作ることができる, 当然のことながら無限にある. この場合, 正六角形で構成される多面体はどうだろうか. これは非自明な気がするが, どこかに調べられていたら教えていただきたい. また, 各頂点を共有する面のパターン (ここでは面の数としよう) が一定な多面体は, 凸に限ればおそらく容易にわかる. この場合, 凸に限らなければどれぐらい知られているのだろうか. これも非自明な気がする.

3 多面体グラフ

これ以降はグラフに関する言葉は定義などを割愛する。全て <https://ryokawai-github.github.io/website/PDF/Graph.pdf> に書いてあるようにする。

多面体グラフとは、多面体の頂点とその辺によって表現されるグラフである。詳しい定義は以下の通りである。

定義 3.0.1

多面体グラフの定義をここに書く。

3.1 凸多面体

凸多面体の多面体グラフについては、以下の有名な定理がある。

定理 3.1.1 | 〈Steinitz's theorem〉

凸多面体の多面体グラフは単純で平面的な 3-connected なグラフであり、またその時に限る。すなわち、

また、平面的なグラフに関しては以下の定理がある。

定理 3.1.2 | 〈Kuratowski's theorem〉

グラフが平面的である必要十分条件は、部分グラフとして $K_5, K_{3,3}$ の構造を含まないことである。

また、グラフが平面的であるかは Boyer のアルゴリズムで線形時間で判定できるようなのである [4]。

3-connected に関しては以下の定理がある。

定理 3.1.3

G が 3-連結グラフ (ただし K_3 は除く) であるための必要十分条件は、以下を満たすようなグラフの列 G_0, \dots, G_n が存在することである。

1. $G_0 = K_4 \wedge G_n = G$.
2. $\forall i < n, \exists xy \in E(G_{i+1}), (d(x), d(y) \geq 3 \wedge G_i = G_{i+1}/xy)$.

また、凸多面体の多面体グラフについてはよく調べられている。例えば [1] ではグラフの同型を除いた凸多面体の多面体グラフの個数が、頂点数 10 まで調べられている。現在はもっと調べられており、以下の表までわかっている。 <https://oeis.org/A000944> また、 <https://mathworld.wolfram.com/PolyhedralGraph.html> に 7 までのものは載っていた。

表 1 多面体グラフの個数

頂点の数	グラフの同型を除いた凸多面体の多面体グラフの個数
4	1
5	2
6	7
7	34
8	257
9	2606
10	32300
11	440564
12	6384634
13	96262938
14	1496225352
15	23833988129
16	387591510244
17	6415851530241
18	107854282197058

3.2 regular

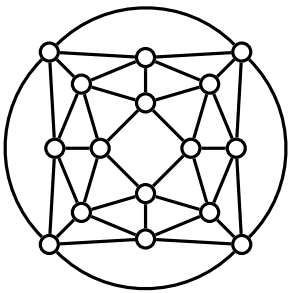
面の種類の角形数が全て等しい多面体について考えてみる．まずは凸多面体に限って考えてみる．全ての面が三角形で構成される凸多面体は、面のが $2n(n \geq 2)$ の時に存在することが容易にわかる．全ての面が四角形で構成される凸多面体は、面のが $n = 6$ or $n \geq 8$ の時に存在することがわかる．全ての面が五角形で構成される凸多面体は、面のが $n = 12$ or $2n(n \geq 8)$ の時に存在することがわかっている [2]．実際はもっと調べられているらしく、<https://oeis.org/A308489> には [2] よりも載っている．全ての面が六角形で構成される凸多面体は存在しないことが容易にわかる．まとめると以下のようなになる．

表 2 n 角形が m 個で構成される凸多面体の存在

$n \backslash m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	...
3	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	...
4	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	...
5	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	○	×	○	...
6	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	...

例 3.2.1

5-regular planar graph with 16 vertices.



4 多面体の面について

頂点の数が $f_1, f_2, \dots, f_n (i < j \Rightarrow f_i > f_j)$ である多角形で構成される多面体 P を $P = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ で表すこととする. この時, (f_1, f_2, \dots, f_n) がどのようなであれば存在するのかを調べたい. [https://www.southalabama.edu/mathstat/personal_pages/nmishra/mypapers/JCMCCpaper%20\(planargraphs\).pdf](https://www.southalabama.edu/mathstat/personal_pages/nmishra/mypapers/JCMCCpaper%20(planargraphs).pdf) に近い内容が調べられていそうだ.

4.1 regular

まず簡単に $f_1 = f_2 = \dots = f_n = m$ のときを考える. § 3.2 で述べたとおり, この場合は凸多面体では存在条件が知られている. また凹多面体を含めても, 存在条件は同じになると予想している. しかし, 穿孔多面体を含めた多面体で考えると, この条件は大きく変化する.

まずは種数が 1 である場合のみを考えてみよう. 有名なもので, シラッシの多面体が六角形が 7 つで構成される. また, 六角形が $8k (k \geq 1)$ の多面体や六角形が 9 つの多面体も構成することができる. 現在自分が把握できている範囲では以下のようになっている.

表 3 n 角形が m 個で構成される種数 1 の穿孔多面体の存在

$n \backslash m$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	...
3	?	?	?	×	?	×	?	×	?	×	○	×	○	×	○	×	○	...
4	?	?	?	?	?	○	?	?	○	○	?	○	○	○	○	○	○	...
5	?	?	?	×	?	×	?	×	?	×	?	×	?	×	?	×	?	...
6	?	?	?	○	○	○	?	?	?	?	?	?	○	?	?	?	?	...
7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	...

シラッシさんの論文 <https://www.math.unm.edu/~vageli/papers/FLEX/Szilassi.pdf> をみると, いろいろ載っていると思われるが, 未だ読めていない.

また, 種数が 1 以上のときに多面体の面の数が最低幾つであるかは知られているのだろうか. 頂点の数の最小数は 7 で決定したらしい. (6 以下をコンピュータで潰したらしいが, 詳しくはわからない.) なお, 頂点数 7 の種数が 1 の多面体はチャーサールの多面体 (シラッシの多面体の双対多面体) が存在する. これはトーラスに K_7 を埋め込んだものと見ることができる.

5 ガウス曲率が一定な多面体

5.1 一般のガウス曲率

一般にガウス曲率とは、なめらかな曲面について定義されるものである。曲面の各点に対して、その点での法線ベクトルを含む平面と曲面の共通部分が成す曲線の曲率の最大値と最小値を掛け合わせたものをガウス曲率と定義する。この定義については、ガウスの驚愕定理やガウス・ボネの定理などの重要な性質が知られている [ここをもっと詳しく]。さらに、ブラウワーの不動点定理を使うと「任意の点でガウス曲率が負であるような閉曲面」が存在しないことが言えたような気がする (おそらく 1 年前に鍛冶先生の講義でやった) のだが、すっかり忘れてしまって証明が思い出せない。

5.2 多面体のガウス曲率

一般のガウス曲率は曲率で定義されていたが、多面体の場合は辺や頂点でガウス曲率を定義することが出来ない。そこで、多面体のガウス曲率を以下のように定める。

定義 5.2.1 | 〈 ガウス曲率, 不足角 〉

各頂点において、 2π から接している面のその頂点での角度の和を引いた角度を **Gaussian curvature**(ガウス曲率) または **Angular defect**(不足角) という。すなわち、頂点 x でのガウス曲率は、

$$2\pi - \sum_{F \in \{x \text{ に接する面}\}} \{F \text{ の } x \text{ での角度}\}$$

で与える。

このガウス曲率に対して、以下の定理がなりたつ。

定理 5.2.2 | 〈 Descartes' theorem on total angular defect 〉

球面と位相同型 (穴の空いていない) 多面体において、ガウス曲率の総和は 4π である。

より一般に上記の定理を拡張して、一般のガウス曲率についてのガウス・ボネの定理のような定理が成り立つ。

定理 5.2.3

種数 n の多面体のガウス曲率の総和は $2\pi * 2(1 - n)$

よって、種数 0 の立体ではガウス曲率の総和は 4π 、種数 1 の立体ではガウス曲率の総和は 0、種数 2 の立体ではガウス曲率の総和は -4π である。

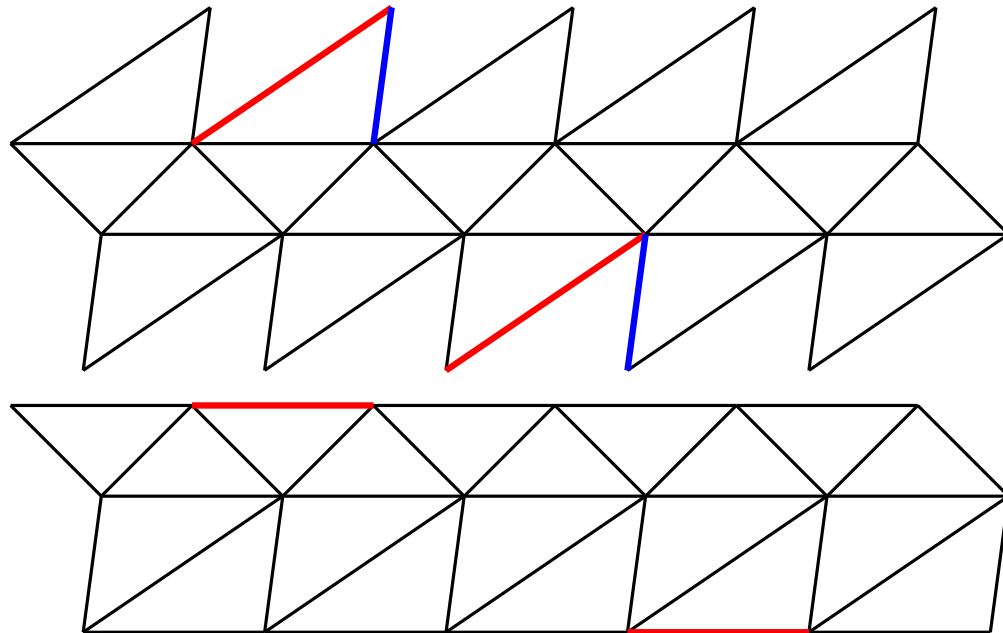
5.3 ガウス曲率が一定である多面体

ガウス曲率が一定である多面体について考えていこう。

まず穴が空いていない多面体について考えると、**定理 5.2.3** より全体のガウス曲率の和は 4π になり、各頂点でのガウス曲率は正である。このような多面体は、正多面体などを代表に半正多面体など対称性の高い様々な多面体を挙げることができる。

次に穴が一つある穿孔多面体について考えてみよう。**定理 5.2.3** より全体のガウス曲率の和は 0 になり、各頂点でのガウス曲率は 0 である。<https://im.icerm.brown.edu/portfolio/paper-flat-tori/> には 12 頂点のものが書かれている。このような立体に関して、頂点数が 10 のものが坪井先生によって作成されており、知られている。展開図は以下の形をしている

例 5.3.1



ここで注目したいのは、各頂点のガウス曲率が 0 であるということは、展開した際に平坦にすることが可能であるということである。例えば、折り紙を折って面の重複がないように閉曲面を構成した場合、その多面体は必ず各頂点のガウス曲率が 0 になる。逆に言えば、ガウス曲率が各頂点で 0 である多面体は、折り紙で作成できることや平面充填可能であることが示唆される。このような多面体を実現する最小の頂点数はどのぐらいなのかについてはまだわかっていないが、自分の中ではあっても 9 頂点であると考えている。また各頂点周りの形が等しいと仮定すると、おそらく平面敷き詰めおよび実現の存在についての問題に持ち込めるのではと考えている。https://colab.research.google.com/drive/1DCwIJ4lUge_jUUiaW_B2r8df20HHYWv9?usp=sharing に実験したデータをまとめているため、参考にされたい。また、google colab 上で立体の可視化および stl での保存が簡単にできることがわかったため、今後は mathematica に加えてこちらも活用していきたい。

最後に穴が二つ以上ある穿孔多面体について考えてみよう. **定理 5.2.3** より全体のガウス曲率の和は $-4\pi * (\text{穴の数} - 1)$ になり, 各頂点でのガウス曲率は負である. 一般のガウス曲率 (?) では各点でガウス曲率が負の一定値になるような立体を構成することはできない (<https://math.stackexchange.com/questions/1337246/a-closed-surface-in-mathbb-r3-has-an-elliptic-point>) のに対し, 対象を離散的な多面体にすると全ての頂点でガウス曲率が負であるものを構成することができる. https://www.researchgate.net/publication/266885256_Two_Counterexamples_of_Global_Differential_Geometry_for_Polyhedra (Title: Two Counterexamples of Global Differential Geometry for Polyhedra) に書かれているが, ここではその存在性についてのみ言及しており, 具体的には数値計算による近似解しか与えていない. 私はそれらについて, 実際に具体的な構成を与えた. 実際の立体を作成するコードおよび立体のデータは以下の場所に置いてある (まだ置いていない) <https://github.com/RyoKawai-github/Polyhedron-with-Strictly-Negative-Curvature>. これ

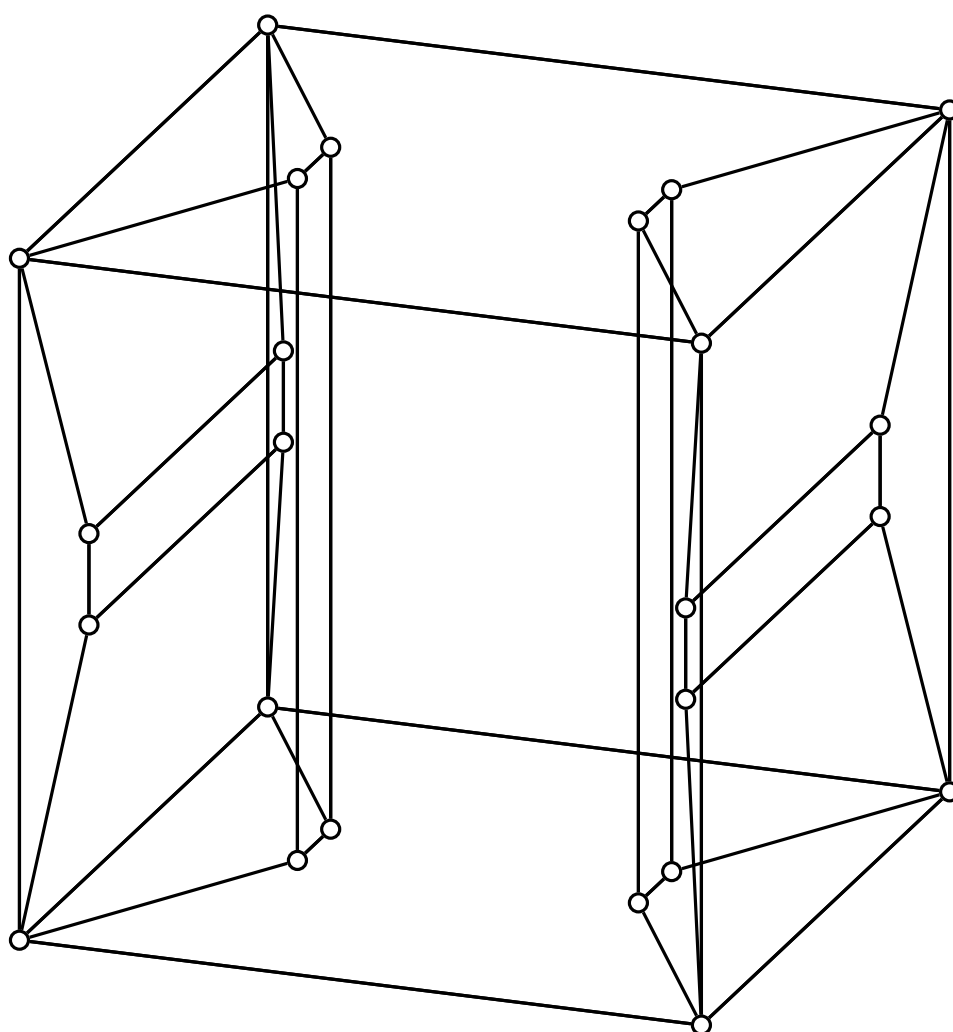


図1 穴が二つ空いている, 各頂点のガウス曲率が一定である穿孔多面体

らは全て各頂点でのガウス曲率が $-\pi/6$ となっている. この立体の優れているところは, 各点の座標が求まり, かつ各面における頂点の角度の \cos, \sin の値が二次方程式の解の形でかくことができる点

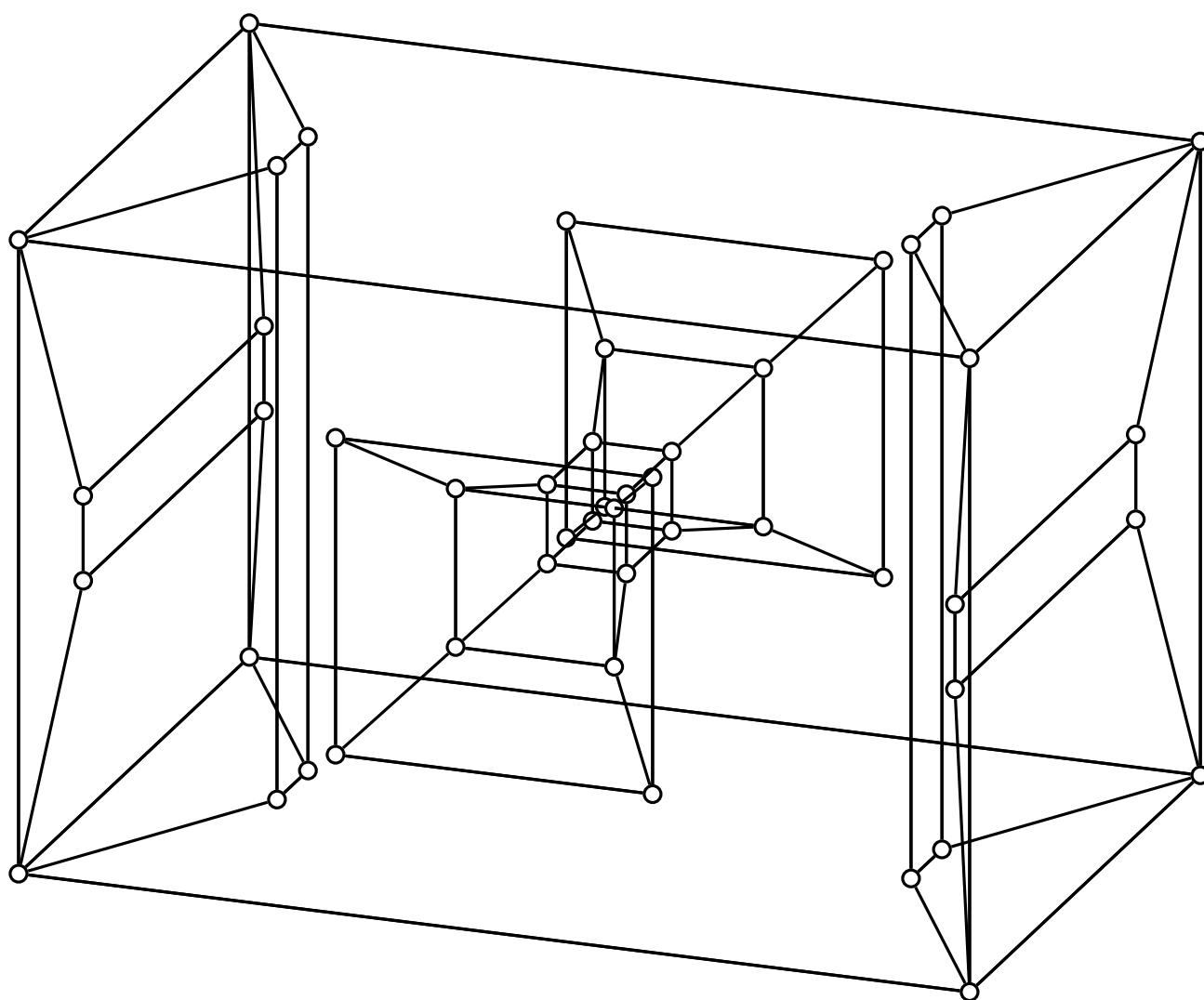


図2 穴が三つ空いている, 各頂点のガウス曲率が一定である穿孔多面体

である. すなわち, 各面の全ての頂点角において, その \cos, \sin の値が $1/2$ 乗の形で書くことができるのである. 故に複数枚による折り紙でこの立体を作成することができるはずなので, 思いついたら作ってみたいと思う.

また, このような全ての頂点のガウス曲率が一定値である立体について, 実現可能な最小頂点数を調べることはとても興味がある. 手始めにチャーサールの多面体を模した, 各頂点でのガウス曲率が $-\pi/3$ となる立体 (12 頂点) の構成を試みたが, 失敗した. 現在は $-\pi/4$ (16 頂点) の構成を試みている. また, 対称性が高い (要定義) 多面体でガウス曲率が一定である立体についての性質について調べてみるのはとても興味深いと感じている.

索引

d_n polyhedron(d_n 多面体), 8
 d_n polyhedron homomorphism(d_n 多面体準同型写像), 9
 d_n polyhedron isomorphic(d_n 多面体同型), 9
 d_n polyhedron isomorphism(d_n 多面体同型写像), 9
abstract polyhedron(抽象多面体), 7
Angular defect(不足角), 19
angular defect(不足角), 11
concave polyhedron(凹多面体), 5
dihedral angle(二面角), 11
edge(辺), 7
Euler characteristic(オイラー標数), 10
face(面), 7
face angle(面角), 10, 11
Gaussian curvature(ガウス曲率), 11, 19
genus(種数), 10
nonconvex polyhedron, 5
polyhedron(多面体), 5
polyhedron homomorphism(多面体準同型写像), 9
polyhedron isomorphic(多面体同型), 9
polyhedron isomorphism(多面体同型写像), 9
realization(実現), 8
regular polygon(正多角形), 14
regular polyhedron(正多面体), 14
vertex(頂点), 7

$P \simeq P'$, 9
 $|\varphi|$, 8
 $\varphi : P \rightarrow P'$, 9

参考文献

- [1] A. J. W. Duijvestijn and P. J. Federico. The number of polyhedral (3-connected planar) graphs. *Mathematics of Computation*, Vol. 37, No. 156, pp. 523–532, 1981.
- [2] Mahdieh Hasheminezhad, Brendan D. McKay, and Tristan Reeves. Recursive generation of 5-regular planar graphs. In Sandip Das and Ryuhei Uehara, editors, *WALCOM: Algorithms and Computation*, pp. 129–140, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg.
- [3] 宮崎興二. 『多面体百科』. 丸善出版, 2016 年 10 月 31 日.
- [4] John M. Boyer and Wendy J. Myrvold. On the Cutting Edge: Simplified $O(n)$ Planarity by Edge Addition. *Journal of Graph Algorithms and Applications*, Vol. 8, No. 3, pp. 241–273, 2004.