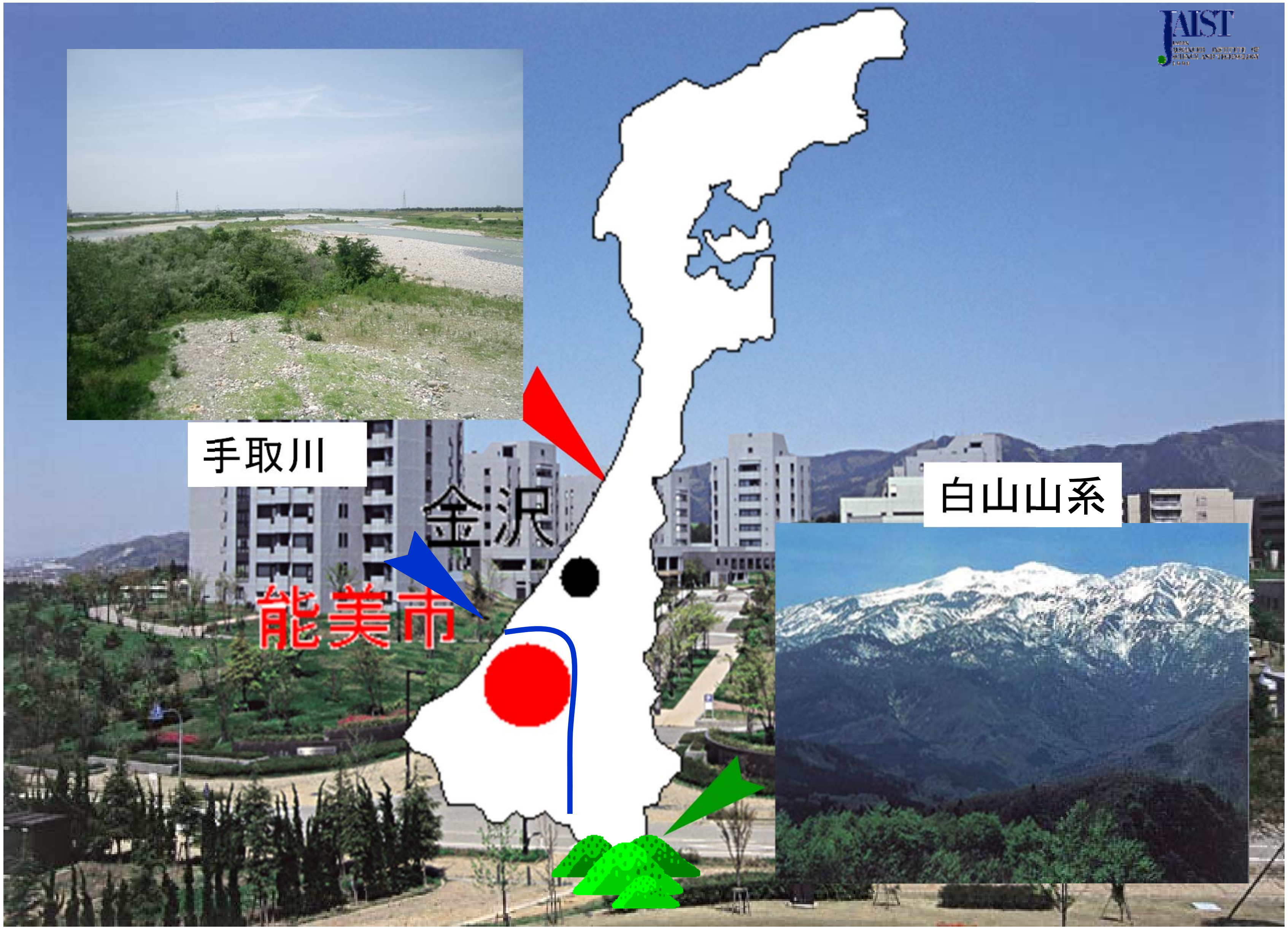
# 計算幾何学特論：計算折り紙入門

上原　隆平
北陸先端科学技術大学院大学
情報科学系　教授
uehara@jaist.ac.jp

| 12月05日（月） | 12月06日（火） |
|---|---|
| 10:30-12:00 | 10:30-12:00 |
| 13:00-14:30 | 13:00-14:30 |
| 14:50-16:20 | 14:50-16:20 |


手取川
金沢
能美市
白山山系

# JAISTの特徴（上原私見）

大学院大学なので、学部がない

- 研究に強い大学院（教員が研究をする時間が比較的ある）
  スパコンが４台あって自由に使える
  ネットワークが**太い**
  図書館は365日24時間開いてる
- 4セメスター制：授業は2カ月単位で進む（週に2回×15回）
- 学生と教員の「距離」が近い（教職員は400人くらいで学生数は1000人くらい）

# 自己紹介




所属：

北陸先端科学技術大学院大学

情報科学系 教授

DBLP

## 専門分野：理論計算機科学

- アルゴリズム
  - 特にグラフアルゴリズム
- 計算量
  - 特にパズル/ゲームの計算量
- 計算幾何学
  - 特に計算折り紙

エルデシュ数＝2
(Pavol Hell氏と共著)

JAIST ギャラリーの…

今日，ここにいる理由

Refine by AUTHOR

Ryuhei Uehara (134)
Erik D. Demaine (32)
Takeaki Uno (25)
Martin L. Demaine (22)
[top 4] [top 50] [all 116]

Refine by VENUE

CCCG (18)
Theor. Comput. Sci. (TCS) (12)
ISAAC (12)
IEICE Transactions (IEICET) (8)
[top 4] [all 44]

Refine by YEAR

2015 (7)
2014 (23)
2013 (14)
2012 (16)
[top 4] [all 19]

# 計算折り紙(Computational ORIGAMI)とは？

- 折り紙(ORIGAMI)
  - 1500年代，おそらく紙の普及とともに自然発生的に…?アジアで…
  - 現在，ORIGAMI はすでに英語化していて，書店にも ORIGAMI コーナーがある.
  - 折り紙っぽいものも…

「折ってない」「紙じゃない」Origami も増えてきた… おそらくNSFのビッグファンドのせいだと思ってますが…?

# 計算折り紙(Computational ORIGAMI)とは？

- 折り紙の急激な発展
  - 1980年代~1990年代，折り紙が急速に複雑化した.

前川の「悪魔」
1980年頃発表
（正方形1枚から
折れる！）

川崎ローズ
1985年頃発表
（正方形1枚
から折れる！）

Robert Lang のハト時計
1987年頃発表
（1×10の長さの長方形の紙
1枚から折れる！）

# 計算折り紙(Computational ORIGAMI)とは？

- コンピュータの利用と折り紙への応用
  - 1990年代以降，コンピュータを用いた折り紙デザインが発展

2016年、
シン・ゴジラと
Death Note の
両方に登場!!

Robert Lang のハト時計
1987年頃発表
（1×10の長さの長方形の紙
1枚から折れる！）

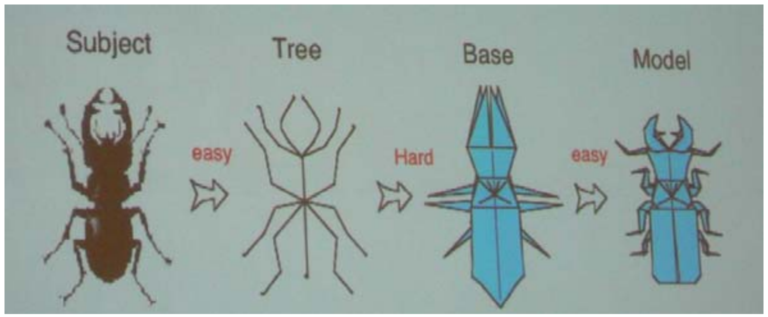
舘知宏のOrigamizer
2007年発表
（長方形の紙1枚から
10時間くらいで折れる）

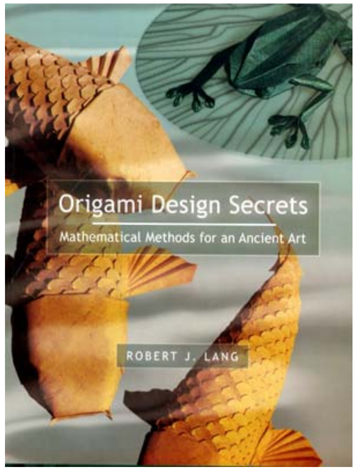
三谷純の回転対称な折り紙
2010年頃発表
（長方形の紙1枚から折れる）

# 折り紙とコンピュータサイエンス


- 近年、むしろ海外で脚光をあびている
- 方法論の確立とソフトウェアの開発:
  - 1980年代:前川さんの「悪魔」
    - CAD的に「パーツ」を組み合わせる コンプレックス折り紙の発祥
  - 2000年代:Lang さんの TreeMaker
    - 与えられた「木構造」(距離つき) を正方形上に展開するソフト
    - さまざまな最適化問題を 現実的な時間で計算

NP完全問題も
解いている




# 折り紙とコンピュータサイエンス


- 折り紙の科学に特化した国際会議:
  - 1989年12月@ Italy
    The International meeting of Origami Science and Technology
  - 1994年@滋賀県大津
  - 2001年3月@アメリカ
    The International meeting of Origami Science, Mathematics, and Education (3OSME)
  - 2006年9月8日～10日@アメリカ
    4OSME
  - 2010年7月13日~17日@ シンガポール
    5OSME
  - 2014年8月10日~13日@東大
    6OSME

# 計算折り紙(Computational ORIGAMI)とは？

- “Computational Origami”の提案

  1990年代~

  計算幾何学の分野で「計算幾何」や「最適化問題」として「折り」の問題をとらえ始める

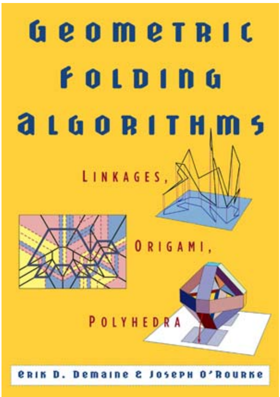
この分野の超著名な研究者：Erik D. Demaine

- 1981年生まれ
- 20歳でカナダで博士号を取得し，
  そのままMITの教員になり，現在に至る
- 彼の博士論文のテーマが計算折り紙であった．

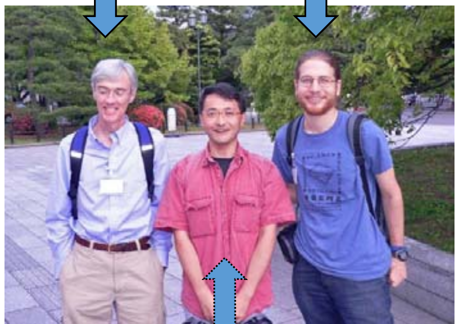
# 計算折り紙(Computational ORIGAMI)とは？

- 文献紹介

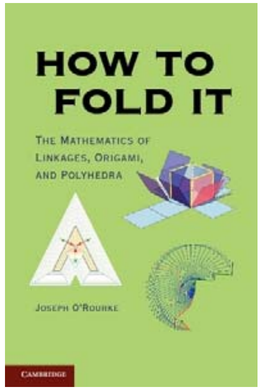
  *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*
  by J. O'Rourke and E. D. Demaine, 2007.



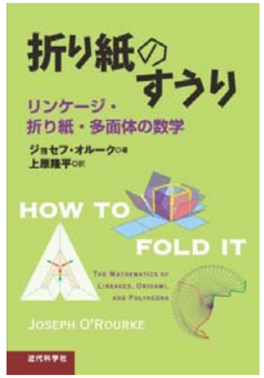

Authors




I, translated it to Japanese (2009).




2011




2012

# 本講義のトピック

**今日：複数の凸多面体が折れる展開図の研究**

- 展開図と立体のとても悩ましい関係：最大の未解決問題
- 与えられた「展開図」を折って作れる（凸）「立体」

計算幾何

**明日：「折り」のアルゴリズムと計算量の関係**

- 折り紙の基本操作
- 折り紙のアルゴリズムと計算量
  - １次元の紙における効率のよい折り方（アルゴリズムと計算量）
  - １次元の紙における計算不能性（計算の理論）

アルゴリズム
計算量

# （辺）展開図とは？

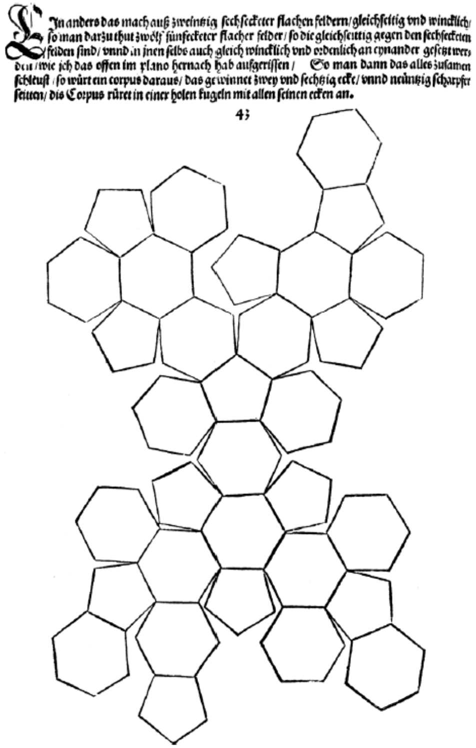
- （一般）展開図：多面体の表面を切って平面上に広げた多角形
  - 連結であること
  - 重なりを持たない単純多角形であること（便宜上、直線の集まりとする）

- （辺）展開図：多面体の辺に沿って切り広げた多角形
  - 展開の境界部分は多面体の辺からなる

★今日は「展開図」といえば一般の展開図という意味なので注意

# 展開図の簡単な歴史

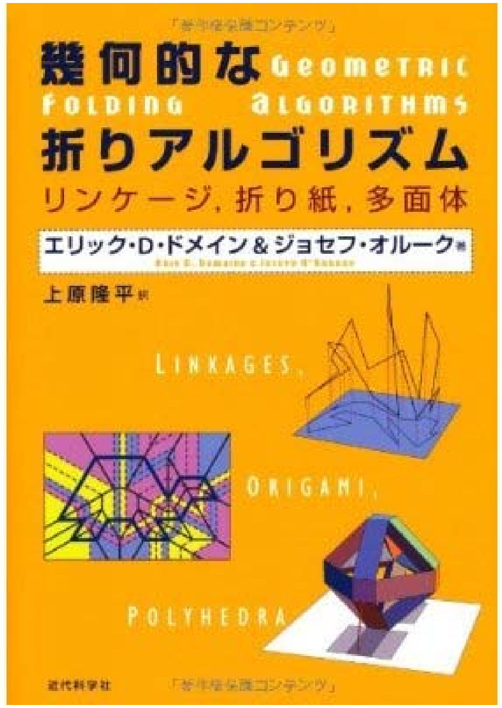
- アルブレフト・デューラーの『画家マニュアル』(1525)




- 数多くの立体を辺展開図で記述していた
- どうも以下の成立を予想していた…?

未解決予想:
任意の凸多面体は辺展開図を持つ

# 展開図の簡単な歴史




もし興味があれば…

**未解決予想:**
任意の凸多面体は辺展開図を持つ

(今日はやらない)未解決予想の周辺の結果:

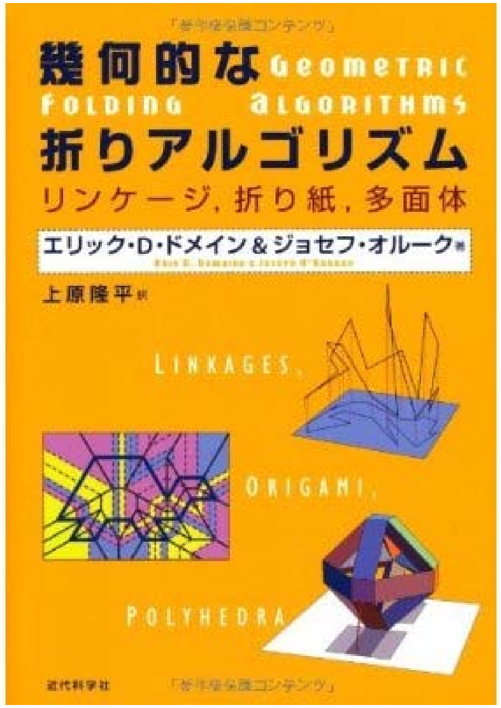
- 反例らしいものすら見つかっていない(当然?)
- 凹多面体なら反例がある
  (どんな辺展開も重なってしまう)
- 辺展開でなく一般展開なら可能
  (一般の点から各頂点に最短路を描いて切るという方法)
- ランダムな凸多面体をランダムに展開すると
  実験的にはほぼ確率1で重なってしまう

まとめ: <u>展開図に関してわかっていることは、ほとんどない</u>

# 展開図の簡単な歴史

未解決予想:
任意の凸多面体は辺展開図を持つ

まとめ: <u>展開図に関してわかっていることは、ほとんどない</u>




もし興味があれば…

本研究の興味の対象:

- 多角形Pが与えられたとき、Pから折ることのできる（凸）多面体Qの特徴づけ・アルゴリズム
- （凸）多面体Qが与えられたとき、展開して得られる多角形Pの特徴づけ・アルゴリズム

# 展開図の簡単な歴史

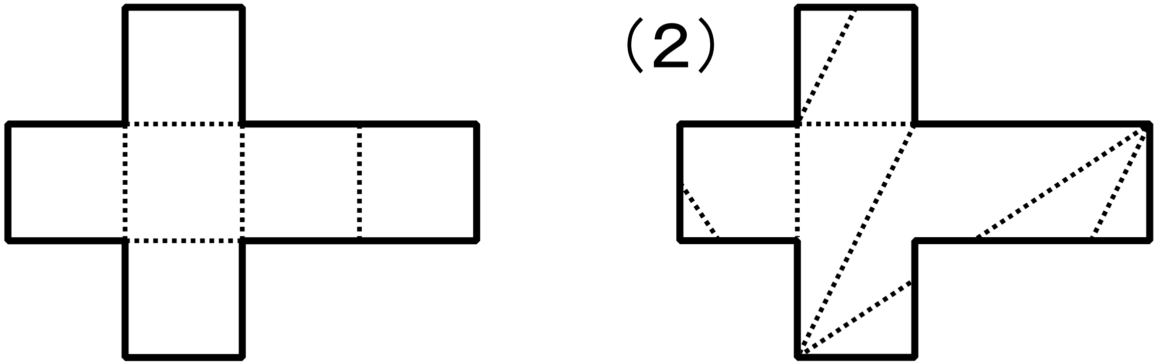
ポイント：展開図に関してわかっていることは、ほとんどない

本研究の興味の対象：

- 多角形Pが与えられたとき、Pから折ることのできる（凸）多面体Qの特徴づけ・アルゴリズム
- （凸）多面体Qが与えられたとき、展開して得られる多角形Pの特徴づけ・アルゴリズム

演習問題：何が折れるでしょう？

（1）　（2）



ちなみにこの「ラテンクロス」からは85通りで23種類の異なる凸多面体が折れることが知られている.

# 今日の予定

1. 展開図の基礎的な知識
1. 正多面体の共通の展開図

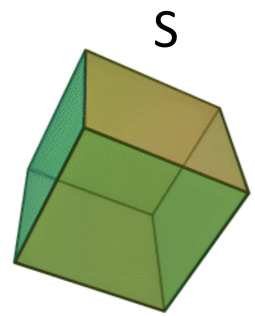
1時間目～2時間目

2. 複数の箱が折れる共通の展開図：３時間目
3. Rep-Cube：最新の話題

4. 正多面体に近い立体と正４面体の共通の展開図
5. ペタル型の紙で折るピラミッド型：２時間目～３時間目

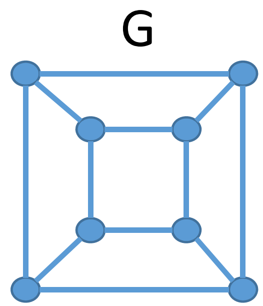
# 1. 展開図の基礎知識(1)

凸多面体Sの頂点と辺から構成されるグラフをGとする




[全域木定理(その1)]
Sの辺展開におけるカットラインは、G上の全域木である

系:正多面体では、すべての辺展開においてカットの長さは同じ

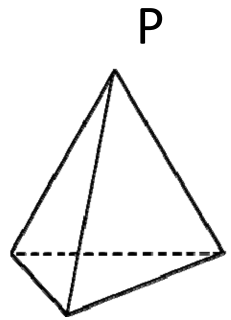



[証明]

- すべての点を訪れること:
  カットされない頂点があると、平坦に開けない
- 閉路をもたないこと:
  閉路があると、展開図がばらばらになってしまうため、連結にならない

[全域木定理(その2)]
Sの一般展開におけるカットラインは、S上ですべての頂点を張る木である

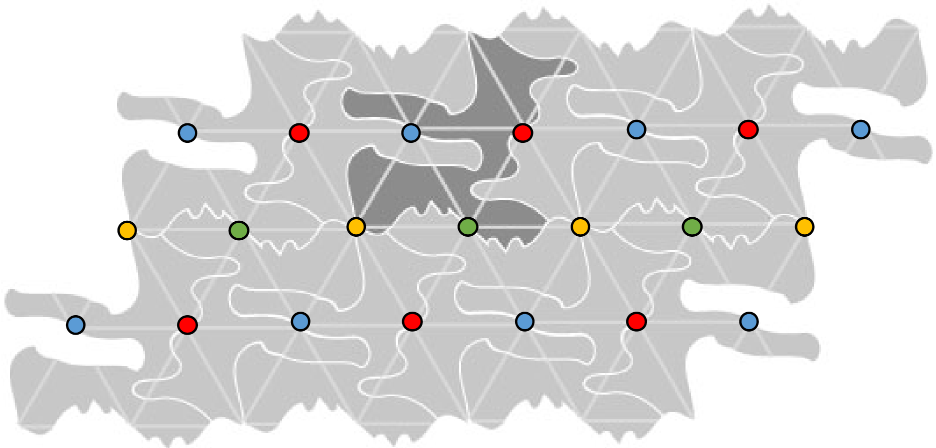
# 1. 展開図の基礎知識(2)



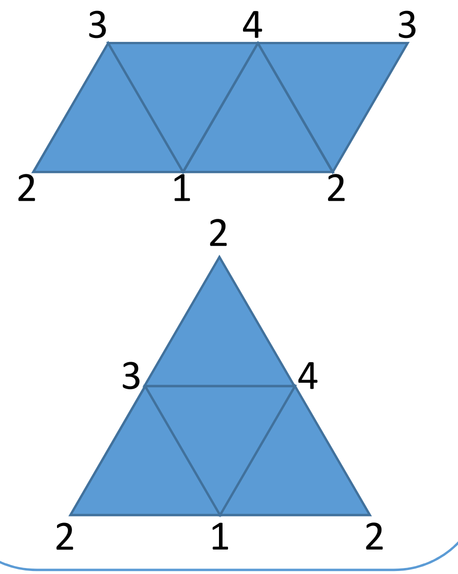

## 正4面体の(一般)展開図に関する特徴づけ

[正4面体の展開図定理(秋山 2007)]
正4面体の展開図Pは以下の条件を満たすタイリングであり、逆も成立する。

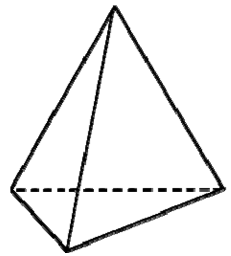
**(1)** **P** は **p2 タイリング。**つまり180°回転で敷詰め可能
**(2)** **回転中心**の **4** 頂点が正三角格子をなす
(3) この4頂点は、タイリング上で「同値」な位置にない



参考：正4面体の辺展開図は二種



P



# 1. 展開図の基礎知識(2)

## 正4面体の(一般)展開図に関する特徴づけ

[正4面体の展開図定理(秋山 2007)]
正4面体の展開図Pは以下の条件を満たすタイリングであり、逆も成立する。
**(1)** **P** は **p2 タイリング。**つまり180°回転で敷詰め可能
**(2)** **回転中心**の **4** 頂点が正三角格子をなす
(3) この4頂点は、タイリング上で「同値」な位置にない

Tile-Makers and Semi-Tile Makers, Jin Akiyama, *The Mathematical Association of America*, Monthly 114, pp. 602-609, 2007.

[直感的な説明]
平面上で正４面体を４回、
上手に転がすと、元に戻る。
各面にインクをつけて転がすと
平面全体にスタンプを押せる。

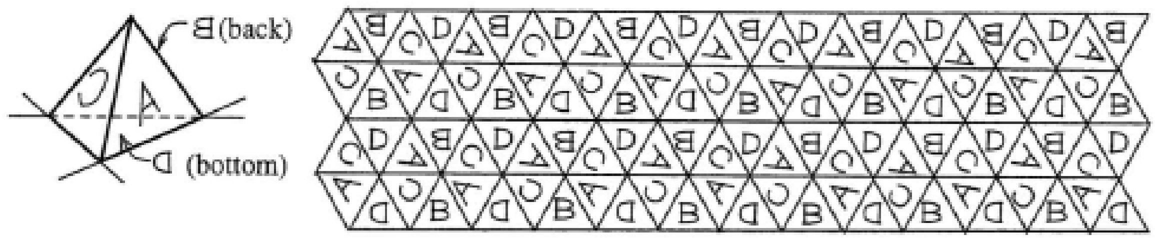
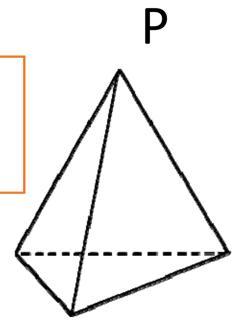



**Figure 2.1.** Carved regular tetrahedron R and the tiling by stamping with *R*.

# 1. 展開図の基礎知識(3)

4単面体(Tetramonohedron):
4つの面が合同な4面体

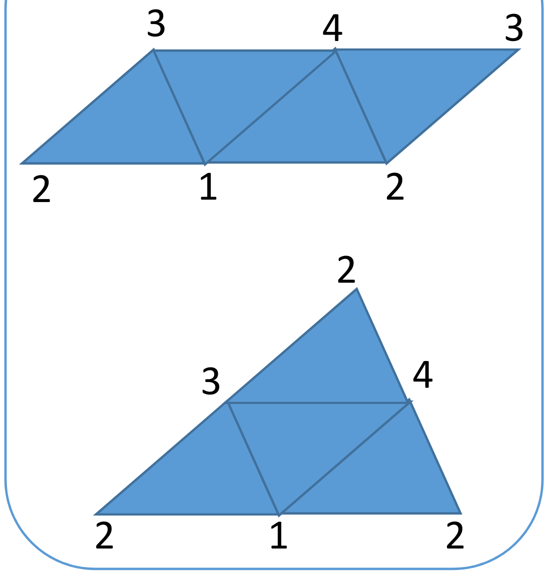



## 4単面体の(一般)展開図に関する特徴づけ

[4単面体の展開図定理(秋山、奈良 2007)]
4単面体の展開図Pは以下の条件を満たすタイリングであり、逆も成立する。
**(1)** **P** は **p2 タイリング。**つまり180° 回転で敷詰め可能
**(2)** **回転中心**の **4** 頂点がその単面による三角格子をなす
(3) この4頂点は、タイリング上で「同値」な位置にない

[直感的な説明]
正三角形を全体にゆがませればよい。

参考:4単面体の辺展開図は二種



# 1. 展開図の基礎知識：演習問題

正多面体の一般展開図の最短カットの長さは？

- 正4面体にはわりと美しい最適解があります
  - 最適解とその証明ができればなおよし
- 正8面体と正6面体
  - 最適解を見つけるのは、なんとかなると思う
  - 最適性を示すのは、手間がかかります
- 正20面体と正12面体
  - 最適解を見つけるのはちょっと大変かも