

切込を有する折紙の折畳展開機構に関する研究

美術研究科 美術専攻

建築研究領域

御幸朋寿

2014 年

目次

1 章 序論	
1-1 はじめに	2
1-2 研究の目的	2
1-3 本研究論文と博士制作との関連性	3
1-4 本研究における折紙と切込を有する折紙について	3
1-5 本論文の構成	4
1-6 関連する先行研究	5
1-6-1 折紙に関する研究	5
1-6-2 飛び出す絵本の仕掛け	6
1-6-3 展開構造物について	7
1-7 本研究の位置づけ	9
2 章 切込を有する折紙の折畳展開機構としての発展	10
2-1 はじめに	11
2-2 基礎的な機構について	12
2-2-1 用語の定義及び説明	12
2-2-2 折紙の機構	14
2-3 切込を有する折紙の折畳展開機構	15
2-3-1 切込を有する折紙の基本機構	15
平面リンク機構型	15
球面リンク機構型	20
2-3-2 切込を有する折紙の発展	23
平面シザーズ機構型	24
球面シザーズ機構型	31
2-3-3 空間リンク機構への発展に関して	37
2-4 切込を有する折紙の可動機構としての位置づけ	46
3 章 スケールモデル制作による機構の検証	48
3-1 はじめに	49
3-2 実用的な機構へと応用する際の課題	49
面が厚みを持つ際に起こる課題	49
面の剛性による可動障害	50
思案点による可動障害	50

目次

3-3 実用化する際の課題の解決策	51
3-3-1 面の厚みを持つ際に起こる課題の解決	51
ミウラ折平面シザーズ機構における面の二層構造の構成	54
ミウラ折球面シザーズ機構における面の二層構造の構成	56
空間リンク機構における面の二層構造の構成	58
その他の解決策	59
ヒンジ部をやわらかい素材で構成する方法	59
屏風兆番によるヒンジ	60
ギアヒンジ	60
3-3-2 面の剛性による可動障害の解決策	61
3-3-3 思案点による可動障害の解決策	61
3-4 スケールモデルの制作	62
3-4-1 ミウラ折平面シザーズ機構のパターン	62
3-4-2 スケールモデルのサイズ	64
3-4-3 厚みの処理について	64
3-4-4 スケールモデルの素材	64
3-4-5 加工方法	64
3-4-6 スケールモデルの組み立て	66
3-4-7 スケールモデルの動き	66
3-4-8 スケールモデルの制作からみえてきた改善点	68
3-5 スケールモデルの改善案	69
4 章 結論	72
4-1 各章のまとめ	73
4-2 結論	74
4-3 今後の課題	75
引用文献	77
参考文献	78
附録	82

1 章 序論

1-1 はじめに

折紙は、紙を折ることで動植物や身の回りにある物などの様々な形状に似せて遊ぶ伝統的な遊戯として広まっており、また熨斗袋や紙垂など儀礼の場でも利用されている。

近年では、数学への応用や工学的利用、ファッションや家具などのデザインなど様々な分野で利用・研究がなされている。建築の分野でも折板構造をはじめとする工学的利用や、椅子やテーブル等のプロダクトデザインから建物の内外の表層のデザインエッセンスなどとして取り入れられている。二次元の平面から三次元の立体が立ちあがる動的なプロセスと表現性は図画工作の領域を超えて工学的、芸術的に応用できる大きな可能性をもっている。その魅力は幾何学的表現もさることながら、2次元が3次元に移り変わるその動的な表現性も大きいと考えられる。⁽¹⁾

折紙の手法の一つとして折り紙建築があげられる。折り紙建築（折り紙建築・ポップアップカード）とは、建築家・故 茶谷 正洋氏に代表される、一枚の紙に切込と折り目をつけ、紙を折り畳むことにより立体的な形が自然と立ちあらわれてくる折り紙の一手法である。海外では Origamic の名称で広まっており、建物の形だけではなく風景や動物、文字など様々な形を立体的に立ち上げることができ、グリーディングカードや教育現場における教材などとして、世界中で親しまれている。1枚の紙に切り込みと数本の折線を入れるだけで立体的な形状が立ち現れるプロセスは、切込みを入れない折紙とは違った魅力が存在する。現状では一種の遊戯としてしか扱われておらず、折り紙建築の工学的応用やデザイン的应用について注目されていない。

1-2 研究の目的

折紙の工学的研究やデザイン要素としての応用が盛んに行われる中、折り紙建築の可変の仕組みや表現性は折紙数理に見られる折畳の幾何学的規則やその幾何学が持つ表現性と多くの共通点を持っているにもかかわらず、研究及び応用の対象としてはあまり注目されてこなかった。本研究は既存の折紙の研究ではほとんど取り上げられてこなかった折り紙建築（以後、切込を有する折紙とする）の仕組みに焦点をあて、折紙の幾何学や展開構造物にみられる可動機構と結びつけながら工学的応用（様々な用途に用いることができる仕組みを持っていることとする。）やデザイン的应用（様々な用途に合わせたデザインが可能なこととする。）が可能な仕組みへの発展を目的とする。

(1) 舘知宏、『計算折り紙幾何学に基づく建築形体デザインシステムに関する研究』、学位論文、2010

1-3 本研究論文と博士制作との関係性

博士制作における作品は本研究の工学的応用性及びデザインの応用性を実証する手段として位置づけている。本研究の工学的応用性については本研究によって考案される機構を幾つかの素材や部品用いて作品を制作し実証する。デザインの応用性に関しては、切込を有する折紙の幾何学的規則や可動形態からもたらされるデザイン可能な範囲について検証し、それを踏まえ作品のデザインを決定する。また実際の制作を行なう上で課題となる点についても解決策を含めた検討を行いそれらを踏まえて作品を制作する。

1-4 本研究における折紙と切込を有する折紙等について

本研究において折紙は、1枚の紙に折り目を付けて造形を行うこと [1] と定義し、切込を有する折紙については、折紙建築・ポップアップカードという名称に代表される、切れ込みと折り目を入れることで、1自由度の仕組みを持つ折紙の手法と定義する。折紙の中で1自由度（物体を動かすことができる方向の数が1つ⁽²⁾）となる動きを示す折紙の手法を、切れ込みのある折紙と区別するため、切れ込みのない折紙と呼称する。

[1] 野島武敏 萩原一郎著, 「折紙の数理とその応用」, 『シリーズ応用数理 3巻 p2』, 日本応用数理学会, 2012

(2) 山田学, 「解説1 機構の基本要素」, 『機械設計 第54巻 第3号, p18』, 日刊工業広告社, 2010

1-5 本論文の構成

1 章ではまず、研究背景として折紙における一般的な現状について述べ、本研究における目的を述べた。次に、関連する既存の研究として、折紙に関する研究、展開構造物に関する研究、及び飛び出す絵本に関する研究について触れ、本研究の研究としての位置づけを行なう。

2 章では、はじめに切込を有する折紙を可動機構として分類し、可動条件や平坦折の条件等を導きながら基本的な構成のあり方を検証する。

基本的な構成をもとに、シザーズ機構やミウラ折といった他の機構を取り入れながら、機構としての発展を行なう。

最後に 2 章のまとめとして、切込を有する折紙のリンク機構としての位置づけを行ない、まとめる。

3 章では、実際の可動機構の制作を通して、本研究の実用性について検証する。実際の空間に応用する際に、問題となる厚みの干渉等について検証し解決策を考案する。次に解決策をもとに、実物の機構としてスケールモデルを制作し、実際の動きや新たに発見される問題を検証し改善策を考案する。最後に改善策をふまえて、スケールモデルの発展を行う。

4 章では、はじめに各章のまとめを行い、そこでもたらされた結果について整理する。

次に、本研究の結論として、工学的デザインの応用性の観点から、切込のない折紙の折畳展開機構やシザーズ機構と比較しながら、切込を有する折紙の折畳展開機構としての可能性について論じる。

最後に、今後の課題について述べる。

1-6 関連する先行研究

本研究において、平面の折畳に関する折畳条件や幾何学的類似性から折紙に関する研究が、面と折線といった可動機構の構成要素や折畳に関する折畳条件の類似性から飛び出す絵本に関する研究が、折畳動作の可動機構の類似性や具体的な用途への応用例から展開構造物に関する研究が関連する先行研究として考えられる。

1-6-1 折紙に関する研究

折紙は日本の伝統的な遊戯として広く認知されてきたが、その幾何学的な性質から数学の研究対象として注目を集め、近年ではその工学的応用の可能性から折紙工学として注目されている。また一枚の面材から立体的な形状を作れることや幾何学的規則に則った折面の見える表情の美しさにより、商品のパッケージデザインやファッション、インテリア等の分野で広く応用されている。

研究の多くは折紙もしくは折紙に通じる構造を幾何学的に捉える研究であり国内外問わず数多くの研究者が存在する。代表的な研究者に、川崎 敏和氏や野島 武敏氏があげられる。川崎 敏和氏は川崎定理と呼ばれる折紙の設計図（折れ線を配置したもの）が平坦に折り畳めるかどうかの必要十分条件などを導く研究を行なった。野島 武敏氏は植物や生物の折畳の構造を折紙の幾何学として捉え折紙の工学的利用に貢献した。

折紙の工学的応用に関する研究分野は多岐にわたっているが、折紙の捉えかたで2つに分類することができる。ひとつは1枚の平面が幾重にもおられることにより紙の構造が強化されることに注目する静的な折紙と、2次元から3次元の形状へと変形するその変形機構に注目した動的な折紙である。⁽³⁾ 三浦 公亮氏はミウラ折（図2）と呼ばれる平面の効率的な展開・収納が可能な折方を発明しただけでなく、吉村パターンと呼ばれる薄肉の円筒形の材を圧縮して座屈した時にできる変形形状のパターンをヒントにPCCPシェルと呼ばれる構造強度が増す折のパターンを考案するなど、幅広い折紙の工学的利用に関する研究がある。近年では折紙の複雑な形状計算をコンピューターを用いて計算させることにより、

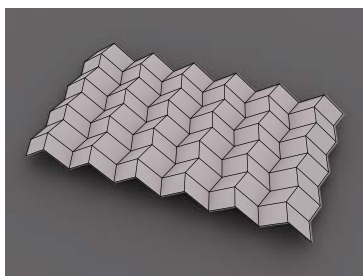


図2 ミウラ折

(3) 舘知宏、「四辺形メッシュに基づく剛体折紙デザイン手法」、『シミュレーション 第29巻 3号 24-29』, 2010

折紙の工学的・デザインの利用の可能性を広げようとする研究が盛んになっている。代表的な研究者に舘 知宏氏や三谷 純氏などがあげられる。

舘 知宏氏は平坦折可能な折紙の剛体折り条件を明らかにし、コンピューターを用いて3次元形状を自在に得るデザイン手法を確立するなど、折紙の工学的応用の可能性を広げている。

このように折紙に関する研究は大きく分けて、数学的に特化した研究と、折紙の折の幾何学に注目しその応用の可能性を踏まえた研究の2つに分類することができる。数学的に特化した研究はすでに自明のものとして扱われつつあるが、後者の折紙の応用の可能性を踏まえた研究はコンピューターの発展とともに大きな盛り上がりを見せている。しかしながら、その多くは折紙を切込のない平面の幾何学モデルとして捉えており、切込を有する折紙をその研究対象とした例は少ない。

1-6-2 飛び出す絵本の仕掛け

飛び出す絵本とは本を開くと絵の描かれた立体形状が立ち現われる仕掛けが施された本である。主に子供向けの内容であるが、中には思いもよらない動きと立体形状が立ち現われ大人も楽しめるものもある。飛び出す絵本は、運動を作り出し、有効な仕事をする部分である機構に平面に折畳まる折畳みの機構を用いたものである。[2]

機構とは機械で限定動作を行なう部分、つまり機械の仕組みを機構という。渡辺克己氏によれば、機構は次のように定義される。機構は、機械において運動の変換や力の伝達を担って限定運動する物体系であり、それらの物体は互いに相対運動が可能なよう連結され、その中のひとつがフレーム (frame) として固定される [2]

2つの機械要素における接続関係(2つのリンクの接続関係)を対偶といい、その動き方により数種類に分類ができる。機械機構における対偶で代表的なものに、回転対偶・すべり対偶・球対偶などがある。

回転対偶とはドアなどの兆番のように回転軸を持ちその軸を中心とした回転運動だけできる組み合わせを言う。

すべり対偶とはふすまのように溝にそって線運動(直線や曲線にそった)を行うのできる組み合わせを言う。

球対偶とは一般的にはボールジョイントと呼ばれるような、球体の回転運動を利用した組み合わせを言う。

[2] 渡辺克己, 「みんなの機構学 (2) 飛び出す絵本の仕掛け (その2)」, 『機械の研究 64(2), p159』, 養賢堂, 2012

飛び出す絵本の機構は、折紙に関する研究や展開構造物などと共通する可動機構を持っていることから、工学的に応用できる可能性が高い仕組みと言える。

飛び出す絵本の仕組みに関する研究はあまり盛んに行われておらず、工学的応用の可能性に言及した研究は少ない。機構学を専門とする渡辺 克己氏によって、飛び出す絵本で見られる飛び出す仕掛けを機械の仕組み、すなわち機構として捉え、飛び出す絵本を折畳の機構として取り扱った研究がある。機械における機構の基礎を飛び出す絵本の仕掛けへと応用する研究であり、工学的な応用に向けた研究ではないが、飛び出す仕掛けを機構として捉える観点は切り込みを有する折紙の工学的応用の可能性について考えるにあたり参考にする点が数多く存在する。

1-6-3 展開構造物について

折紙の工学的応用として関係のふかい可動構造物に展開構造物があげられる。展開構造とは、輸送あるいは収納を目的に小さく折り畳んだ状態から大きく展開して利用する構造物の総称である。[3] 回転可能なジョイントやスライドするメカニズムなど構造内部に何らかの可動部分を持ち形態が変化するため形態可変構造物ということもできる。

建築の分野だけではなく、極限の環境・宇宙空間などで有効な構造として研究及び実例がなされている。建築の分野で言えばテントや仮設展示会場など再利用可能な仮設空間にその応用例がみられ、また宇宙空間では高い収納効率から太陽光パネルやパボラアンテナまたはそれらを支える構造体などに応用例が見られる。

展開構造物はその構成要素から線材によるものと面材によるものとで分けることができ、折紙に関する研究とも深く関係することが多い。展開構造物における主な可動機構は基礎的な機構であることが多く、そのため様々な構成要素に応用することができる。代表的な機構にリンク機構およびジザーズ機構があげられる。

リンク機構は多種多様な要素の組み合わせであるため一概には定義し難い機構である。ごく簡単に説明するならば、リンク機構とは一組のリンク又は節と呼ばれる変形しない剛体をジョイント・関節というような可動部材によって接続した運動伝達機構の総称であると言える。リンク機構は大まかに2種類に分類でき、ロボットアームのような開いた回路をもつオープンループのリンク機構と様々な機械の動力伝達機構に見られる閉じた回路を持つクローズドループのリンク機構とがある。

オープンループは機械設計分野では、ジョイントとリンクの連続した先が何物にも拘束されず、それぞれのジョイントにアクチュエータやセンサーを取り付けた多自由度の動作

[3] 近藤慎輔、川口健一、「シザーズ型展開構造物の単層ラチスドームへの適用に関する研究」、『生産研究 第52巻 第4号, p23』, 2000

を行なう [4] 可動構造とされているが、本研究では動力やセンサーといった機械・電子設備を考慮しないため、機構として捉えることができないが本研究のリンク機構と区別するため、ジョイントとリンクのつながりの先が拘束されない機構をオープンループの機構としリンク機構ではないものとする。

クローズドループは機械設計分野では、ジョイントとリンクの連続の先がはじめのリンクとつながって閉ループをなし、アクチュエータによって1つのリンクを動かすことではかのリンクが追従する構造 [4]とされているが、本研究では動力等を考慮しないため、自由度が1で閉じた回路を持つリンク機構をクローズドループのリンク機構とする。また自由度が1以上のクローズドループについては動力を考慮しないことから機構として捉えられないため本研究では扱わない。

シザーズ機構とはシザーズ型展開構造ともいい、2本の部材の中心同士をピボットとよばれる回転自由なジョイント（ピボットジョイント）で接続した、いわゆるシザーズ部材を構成要素とする展開構造物である。[3] また、シザーズ部材同士を接続することで4つ以上のリンク（剛体）がピンジョイントで接続されたリンク機構の1種として考えることができる。（図4）本機構の主な目的は伸縮性であり、折り畳まれた状態から、フラットに広がるだけでなく、アーチや球状のドームなど様々な展開が可能である。切込を有する折紙による折畳展開機構との大きな違いは、機構の構成部材が、シザーズ機構は線を要素としており、切込を有する折紙による折畳展開機構は面を要素としている点あげられる。一般的にシザーズ機構は仮設テントの展開機構や車庫等の門扉の機構として数多くの実例がみられる。近年では展開の理論だけでなく、建築のスケールでの構造的強度や建設に掛る労力・収納効率など、より実用・実例的な研究が数多くなされている。

展開構造の研究や実例の多さからリンク機構及びシザーズ機構などの可動機構は応用性が高いことが言える。

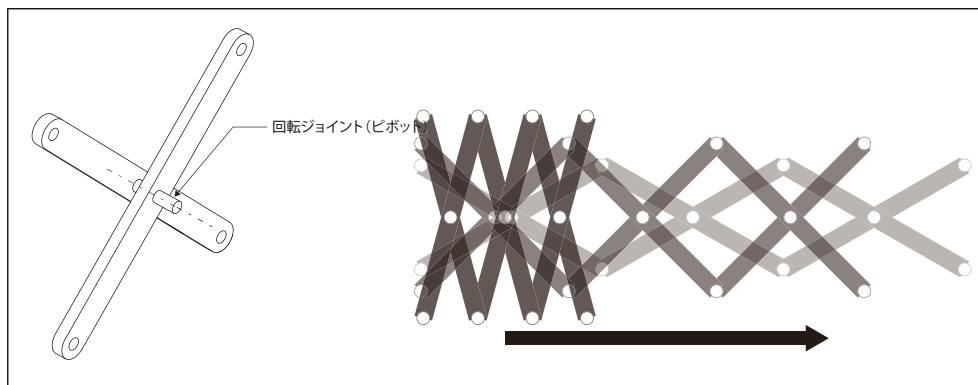


図4 シザーズユニットとシザーズ機構

[4] 山田学, 「解説1 機構の基本要素」, 『機械設計 第54巻 第3号, p18』, 日刊工業広告社, 2010

[3] 近藤慎輔, 川口健一, 「シザーズ型展開構造物の単層ラテドームへの適用に関する研究」, 『生産研究 第52巻 第4号, p23』, 2000

1-7 本研究の位置づけ

本研究は切込を有する折紙を折畳展開機構として捉え工学的・デザイン的に応用することを目的としている。したがって、本研究は折紙に関する研究分野の中の工学的応用に関する領域の一つであり、その中で折紙を動く構造として捉えた分野の一つに位置づけられると考える。また、これまでグリーディングカードや遊戯の一つとしてしか扱われてこなかった切込を有する折紙の特性や仕組みを解き明かすことで、デザイン的に応用できるような可能性を拓ける研究であると考えられる。

2章 切込を有する折紙の折畳展開機構としての発展

2-1 はじめに

切込を有する折紙を工学的な可動機構として捉えるため、切込を有する折紙において面材は無限の剛性を持った剛体であると仮定し、可動状態における面材のたわみ・ゆがみ等は起こらないものとする。また、紙の場合において面と面が接合する辺の部分つまり折線は塑性変形することで回転ジョイントとなるが、本研究においては無限に細い回転軸の兆番で、面と面が接合しているものとする。それによって、面や接合部を構成する素材が何であれ、折り畳みの動作を保証し切込を有する折紙の可動の仕組みを工学的な機構として捉えなおす事が出来る。

本章ではまず基礎的な機構についてふれる。次に機構的に捉えた切込を有する折紙をもとに、機構を成り立たせる要素が一枚の平面にどのように構成できるのかを考察する。そして機構を成り立たせる構成条件をもとに切込を有する折紙の展開機構としてどのような発展形が構成可能なのか検証する。最後に切込を有する折紙の可動機構としての位置づけを行い他の機構と比較して本研究の新規性についてまとめる。

本論文における折紙（切込を有する折紙を含む）の構成要素と機構の構成要素の呼称に関して、折紙（切込を有する折紙を含む）の2次元の平面図形上の山折や谷折を表す線を折線とし、折線の無限の長さをもった延長線を軸線と呼称する。機構における回転対偶となるジョイントを回転ジョイントとし、回転ジョイントの無限の長さをもった延長線を回転軸と呼称する。

2-2 基礎的な機構について

2-2-1 用語の定義及び説明

平面リンク機構は（図5）のように機構全体及び部材が極限に薄くても運動が成立するような機構を指す。可動の条件は（図6）のように回転軸が平行な関係になければならず、1本でも傾くと機構は成立しない。⁽³⁾

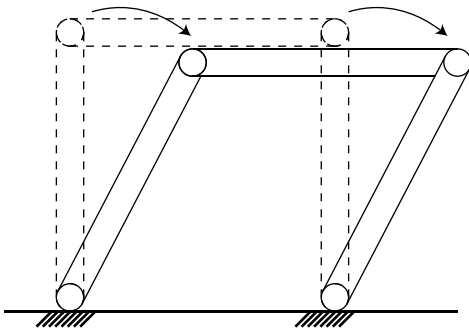


図5 平行リンク機構（平面的な視点）

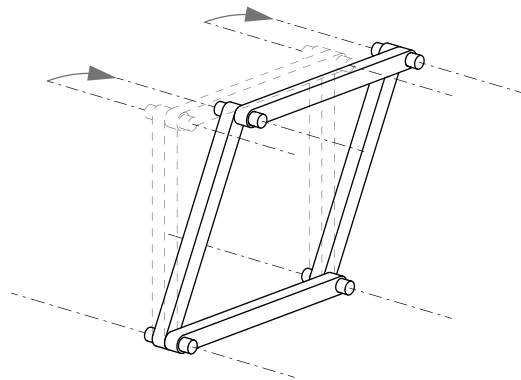


図6 平行リンク機構（立体的な視点）

一点鎖線:回転軸

球面リンク機構は（図7）のように二つ以上の回転軸が角度をもって接していても運動を伝達するような機構を指す。部材の運動は回転軸の交点を中心とする同心球面内に限定される。^[5] 可動の条件は空間上の1点において機構を構成する全ての回転軸が交わらなければならない。回転軸が1本でもその1点と交わらなければ機構は成立しない。⁽³⁾

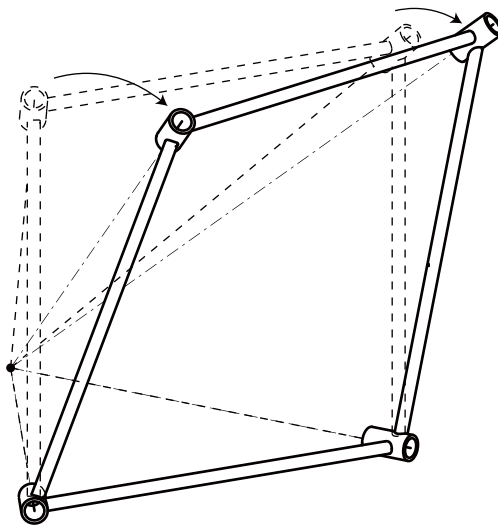


図7 球面リンク機構

(4) 渡辺克己, 「みんなの機構学(2) 飛び出す絵本の仕掛け(その2)」, 『機械の研究 64(2), 159-165』, 養賢堂, 2012

[5] 渡辺克己, 「みんなの機構学(2) 飛び出す絵本の仕掛け(その2)」, 『機械の研究 64(2), p160』, 養賢堂, 2012

空間リンク機構は機構の構成部材が3次元空間内で運動する機構を指す。[5] 機構の複雑さから機構の構成形式が多様になるため統一の可動の条件を定義することは難しい。

2-2-2 折紙の機構

切れ込みのない折紙を機構として捉えるならば、回転対偶によって構成された面状の剛体によるクローズドループのリンク機構として位置付けることができる。また展開構造物の機構の一つであるシザーズ機構も回転対偶によって構成された線状の剛体によるクローズドループのリンク機構として位置付けることができる。

ミウラ折は二重波型可展開面ともいい、地図の折り畳み方から宇宙における構築物などにも応用されている汎用性の高い折り方である。機構的には4つの面が集まるミウラ折の最小構成が球面リンク機構として捉えることができ、それらが複合することにより空間リンク機構としてミウラ折全体を捉えることができる。折り目をジグザグ状につけ山折・谷折を繰り返すことで面積の広がりと力を伝達している。宇宙構造物としては折り畳まれていた太陽光パネルなどを効率よく広げるための仕組みとして用いられていて、平面から立体へと言うよりかは、小さい平面から大きな平面へと言うような活用をされていることが多い。

剛体折は紙のねじれや、伸び縮み、曲げ等の材料の弾性特性による柔らかさを無視し、剛体面を稜線上の回転ヒンジ（回転ジョイント）で接続した機構として捉えた幾何学モデルである。[6] 機構としては1つの頂点を共有する4つ以上の連続した面を最小構成とする球面リンク機構として捉うことができ、それらが複合することにより空間リンク機構として、剛体折全体を捉える事ができる。剛体折は構成要素の変形なしに機構が実現できるため、材料の薄さや柔らかさに依存しない機構、特に建築スケールの繰り返し変形可能な可動構造物を、厚さのあるパネルとヒンジ（回転ジョイント）で作るのに応用することができる。[6]

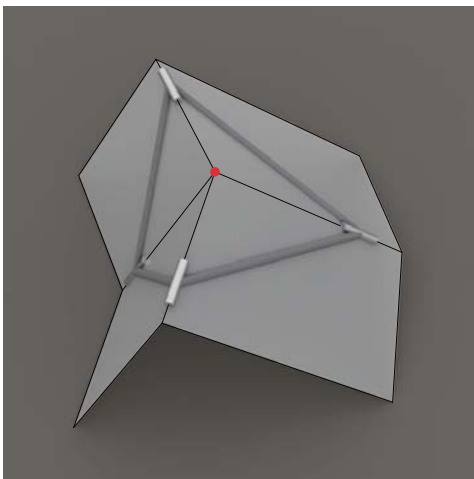


図9 ミウラ折における最小構成とリンク機構

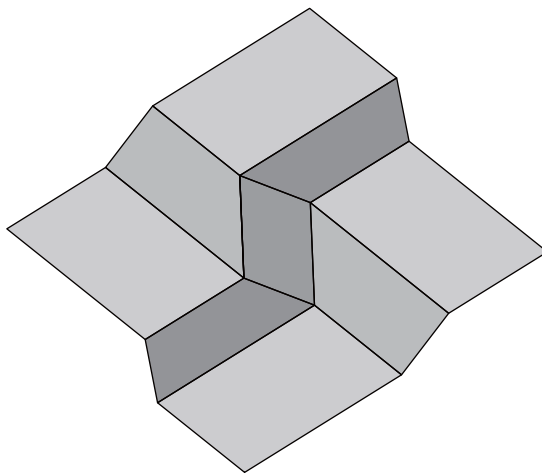


図10 剛体折

2-3 切込を有する折紙の折畳展開機構

切込を有する折紙で用いられている主な仕組みは、機械工学分野等の可動構造物によく見られる4節リンク機構と多くの共通性を持っている。一般的な4節リンク機構は4つの回転ジョイントの間に金属棒のような剛性のある材で繋ぐことにより、動きを伝達する装置である。

切込を有する折紙の仕組みはこれを面に置き換えたもので、回転自由な4つの回転ジョイントと剛性のある面をつなぐことにより、同じように動きを伝達することができる。折線が軸状の回転ジョイントになることから、折線の配置関係とそれにとまなう面の形状、1枚の平面をリンク機構とするための切れ込みの位置など、仕組みとしての規則があり折線の軸線（機構としては回転ジョイントの回転軸）が平行関係にある平面リンク機構と、折線の軸線（機構としては回転ジョイントの回転軸）が空間上1点に収束する球面リンク機構の2つに大別することができる。

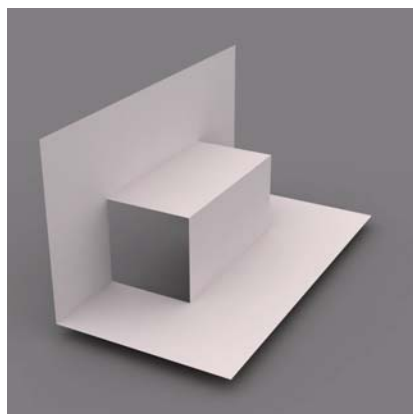


図11 平面リンク機構

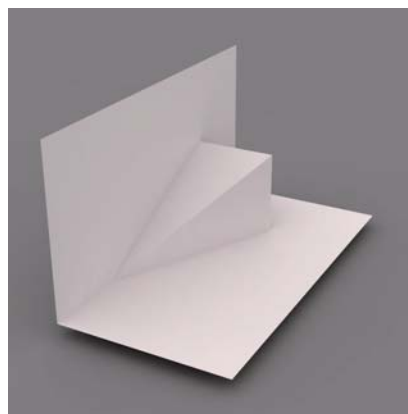


図12 球面リンク機構

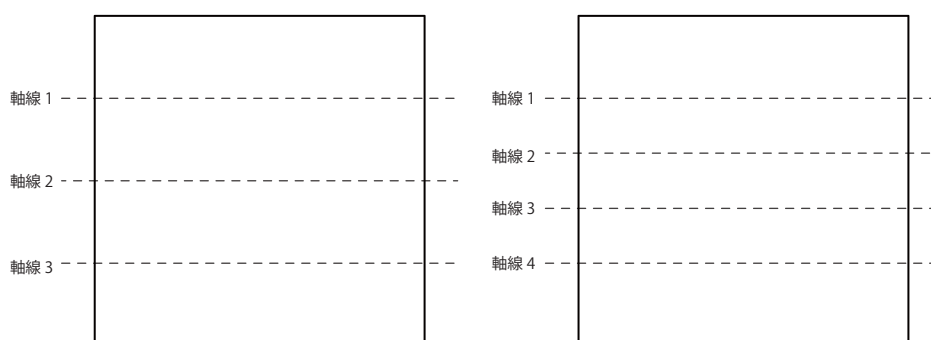
2-3-1 切込を有する折紙の基本機構

平面リンク機構型

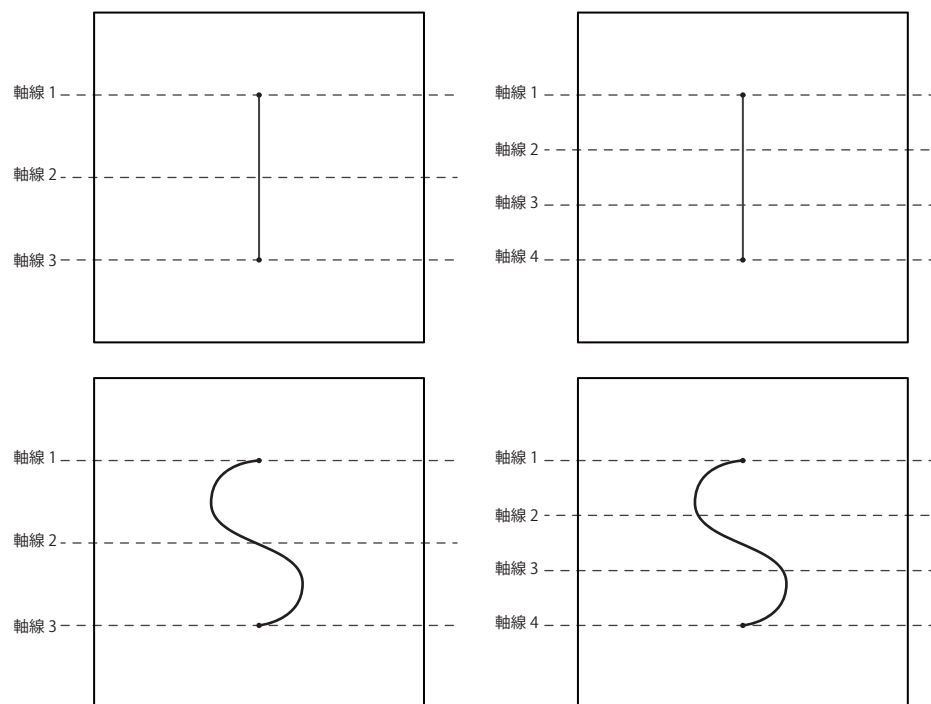
切込を有する折紙における平面リンク機構は4つの回転軸それぞれが平行な配置関係にありその間を剛性のある板状の材で繋ぐことにより動きを伝達する機構である。折紙建築としては最も用いられる基本的な手法であり、ポップアップカードだけでなく折り畳まれた段ボール箱など日常生活において様々な場所で見取れる仕組みである。1枚の平面を平面リンク機構として可動するためには折線（機構としては回転ジョイント）の角度・配置及び折の山・谷の関係と切れ込み線の位置に幾つかの条件が存在する。また、平坦に折り畳むためには可動条件を踏まえつつ折線間の距離関係に条件が存在する。次にその条件を示す。

可動条件

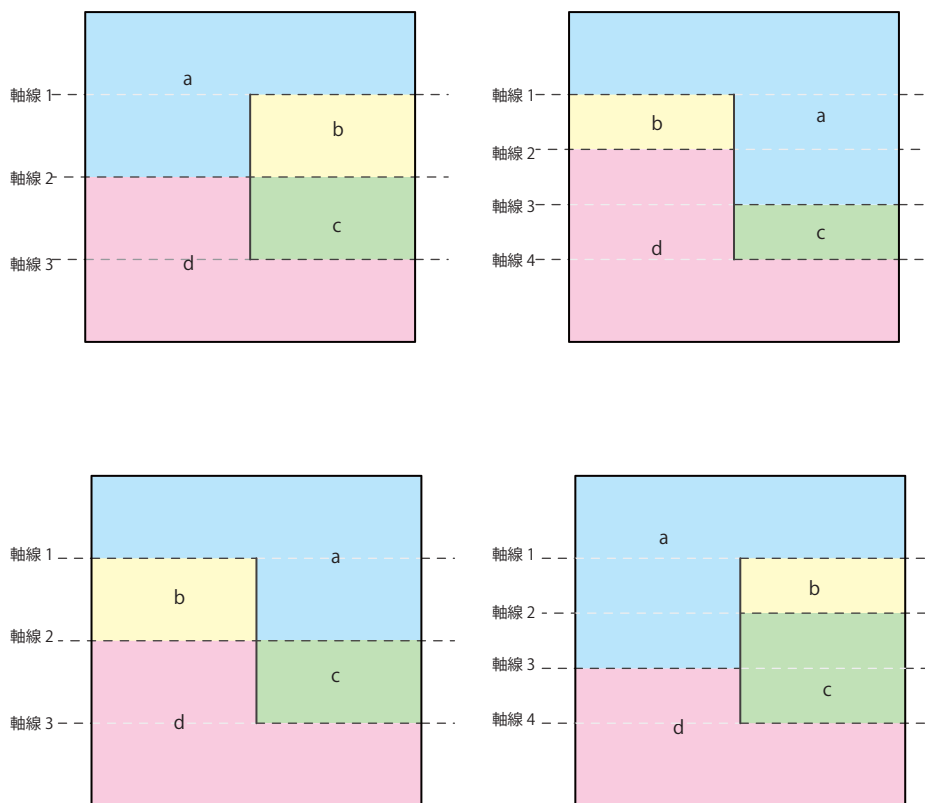
条件 1. 機構の最小構成における折線の軸線は 3 本もしくは 4 本である。また、全ての折れ線の軸線は平行でなければならない。



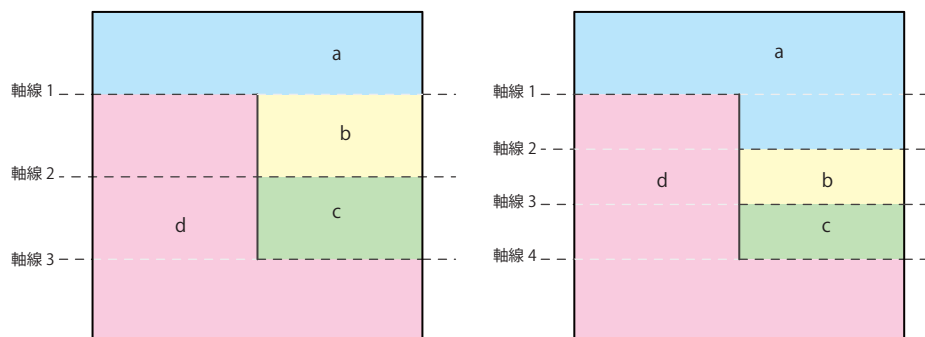
条件 2. 切込み線は一番外側（3 本の場合、軸線 1 と軸線 3。4 本の場合、軸線 1 と軸線 4）2 本の折線の軸線を結ぶように配置しなければならない。※切れ込み線は直線である必要はなく、一番外側の折線の軸線まで連続した線であればよい。



条件 3. 機構の最小構成における面の数は 4 つであること。

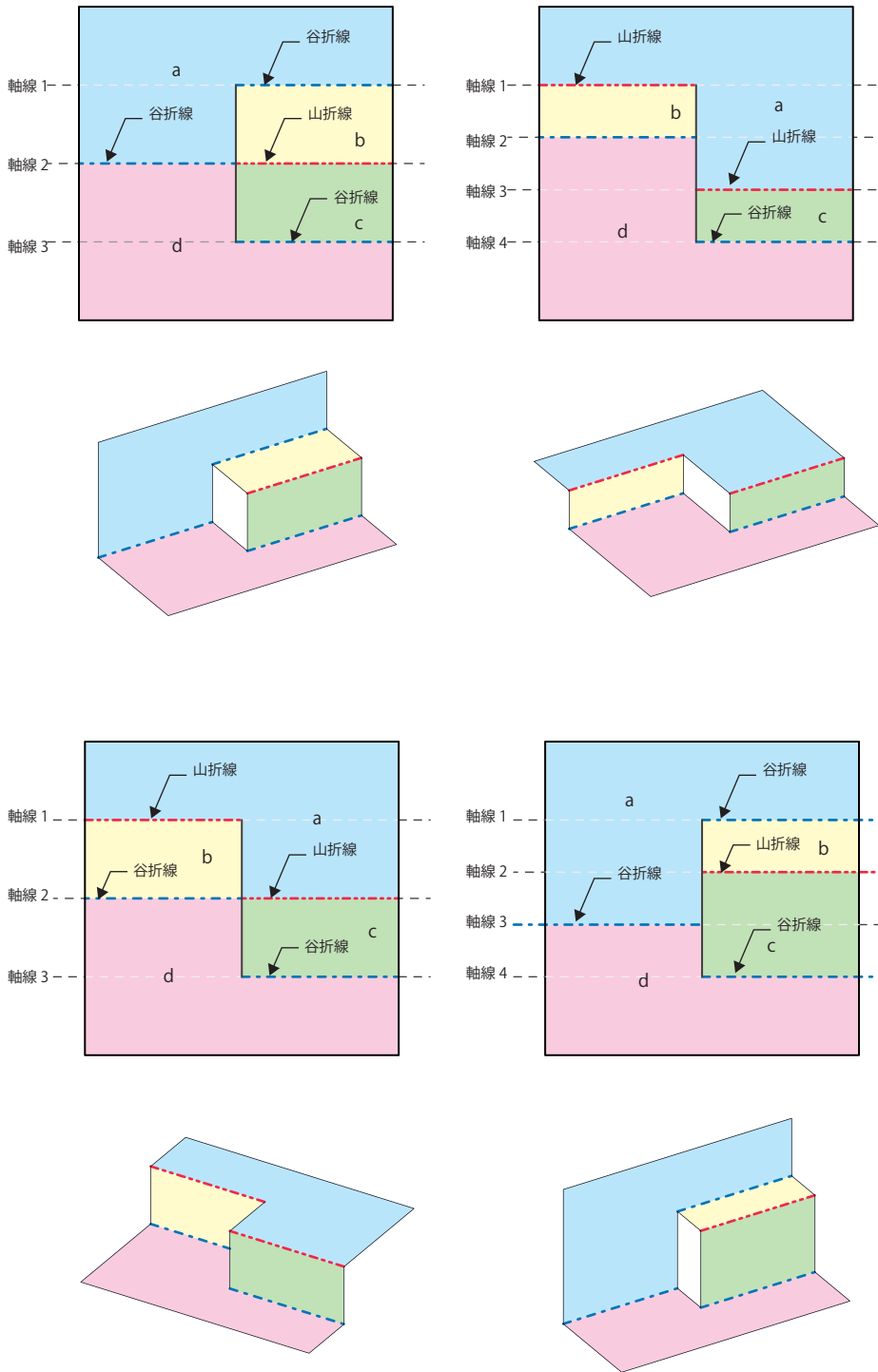


条件 4. 可動するためには面は、一番外側（軸線の数が 3 本の場合、軸線 1 と軸線 3。軸線の数が 4 本の場合、軸線 1 と軸線 4。）の折線両方を持つことは出来ない。



可動できない面形状の構成例

条件 5. 一番外側（軸線の数 が 3 本の場合、軸線 1 と軸線 3。軸線の数 が 4 本の場合、軸線 1 と軸線 4。）の折線をまたぐ面（a と b）は山折又は谷折どちらか一方の折線だけを有する。その他の面は両方の折線を有する。



平坦折の条件

平面リンク機構の可動条件より折線は平行な関係にあることが言える。よって、各折れ線の距離は一定である。(図13)のように機構を構成する4つの面を $a \cdot b \cdot c \cdot d$ とする。機構を構成する4つの面はそれぞれ隣接する他の2面と折線を共有している。またそれぞれの面は折線を共有しない面が存在しこれを対面とする。(図13)で示すと面 a は面 d 、面 b は面 c の関係が対面である。切込を有する折紙が平坦に折り畳まれるにはそれぞれの面がもつ2本の折線間の距離が対面と等しい場合に成り立つ。(図14)が示すように $l_a=l_d$ 及び $l_b=l_c$ となる場合に平坦に込を有する折紙の平面リンク機構は折り畳むことができる。

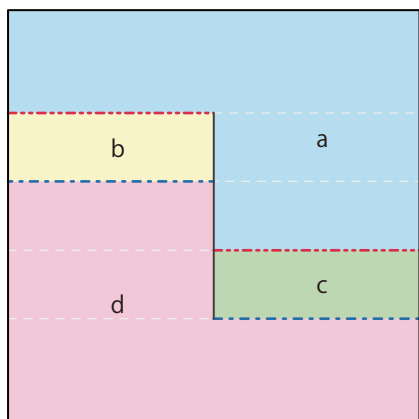


図13

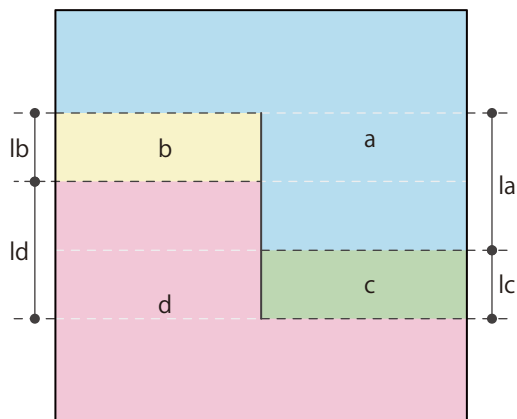


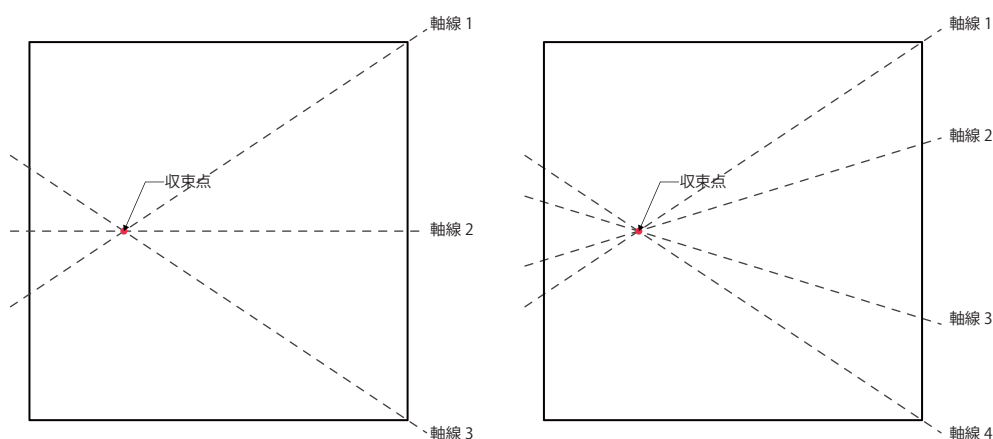
図14

球面リンク機構型

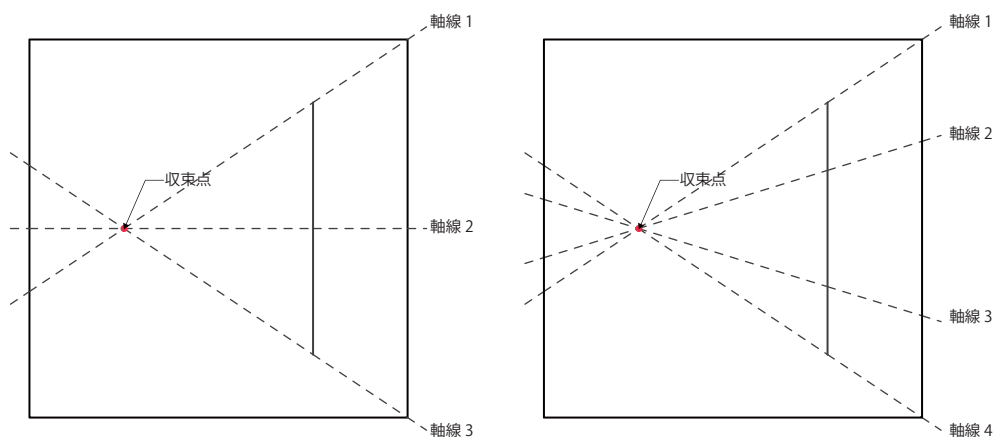
切込を有する折紙における球面リンク機構は空間上のある1点に向かって収束する4つの回転ジョイントと、その間を剛性のある板状の材で繋ぐことにより動きを伝達する機構である。折り紙彫刻では複雑な形・動きなどに利用され、立ち上がる立体をよりダイナミックに表現できる。1枚の平面を球面リンク機構とするためには、2次元図形において、1点で交わる折線の角度、折の山・谷の関係と切れ込み線の位置など幾つかの条件が存在する。

可動条件

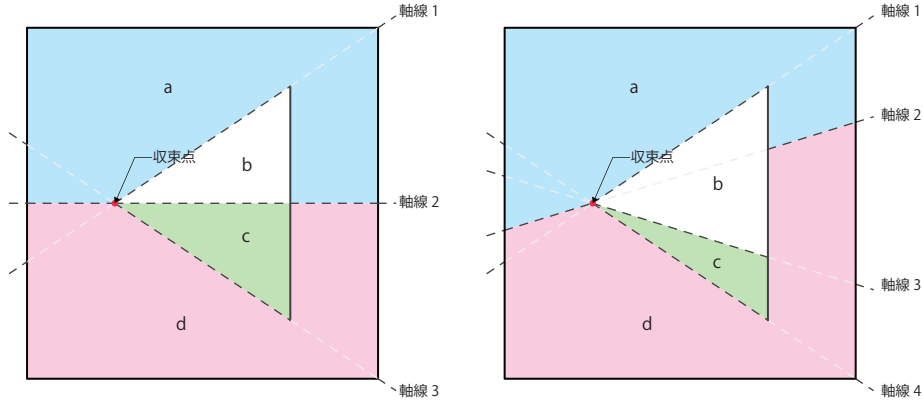
条件1. 機構の最小構成における折線の軸線は3本もしくは4本である。



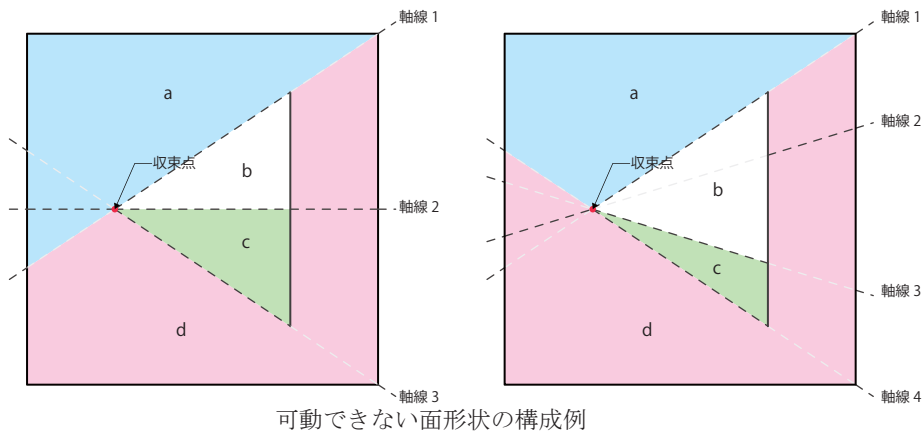
条件2. 切れ込み線は一番外側（3本の場合、軸線1と軸線3 4本の場合、軸線1と軸線4）2本の折線の軸線を結ぶように配置しなければならない。※切れ込み線は直線である必要はなく、一番外側の折線の軸線まで連続した線であればよい。



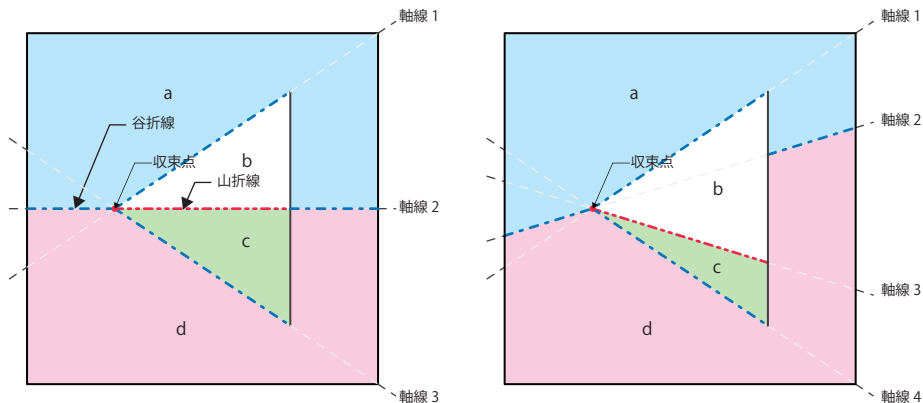
条件3. 機構の構成可能な面の数は4つであること。また面は機構全体を囲う2枚の面（aとd）とそれに囲われた2枚の面（bとc）となるよう構成しなければならない。



条件4. 面全体が自然な動きで可動するためには、機構全体を囲う2枚の面（aとd）が一番外側（軸線の数が3本の場合、軸線1と軸線3 軸線の数が4本の場合、軸線1と軸線4）の折線を持つことは出来ない。



条件5. 一番外側（軸線の数が3本の場合、軸線1と軸線3 軸線の数が4本の場合、軸線1と軸線4）の折線をまたぐ面（aとb）は山折又は谷折どちらか一方の折線だけを有する。その他の面は両方の折線を有する。



平坦折の条件

球面リンク機構型の可動条件よりすべての折線の軸線が配置されている平面の1点において交わる。(図15)のように機構を構成する4つの面を $a \cdot b \cdot c \cdot d$ とする。すべての折線の軸線が交わる1点を中心に見てみると(図16)切込を有する折紙の構成は、切込のない折紙(図17)と同じであることがわかる。したがって球面リンク機構型の平坦に折畳む条件には、切込のない折紙の川崎定理における平坦折の条件を用いることができる。つまり、折線の交点を中心として一つ置きの面の内角の和が 180° となれば平坦に折畳むことができ、面 a の内角+面 c の内角及び面 b の内角+面 d の内角が 180° となればよい。⁽⁵⁾(図18)

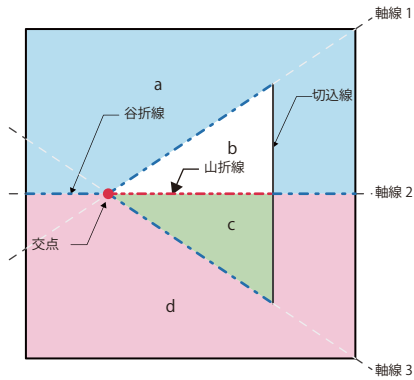


図15

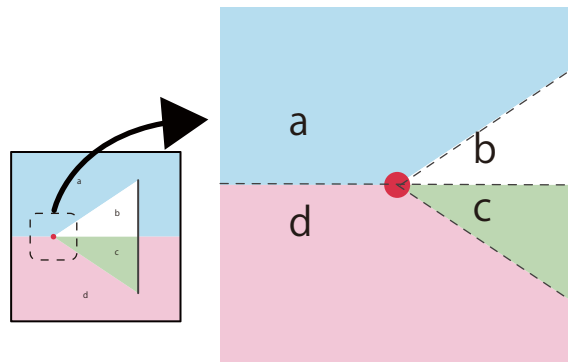


図16

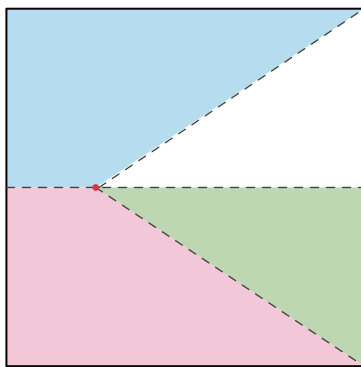


図17

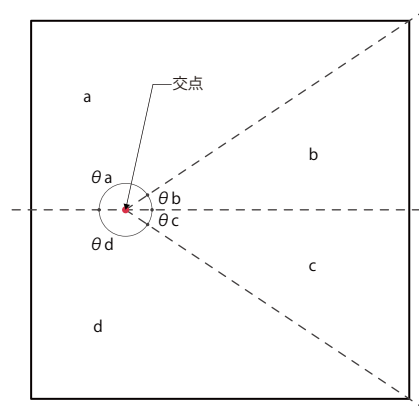


図18

$$\theta_a + \theta_c = \theta_b + \theta_d = 180^\circ$$

(5) 川崎敏和, 「高次元の平坦折り紙について」, 『佐世保工業高等専門学校研究報告 第25号 187-195』, 1988

2-3-2 切込を有する折紙の発展

展開構造物の重要な特徴の一つに、収納効率が高く、運搬時の容積負荷が小さいことがあげられる。[7] このことに関して、これまで検討してきた切込を有する折紙の基本的な平面リンク機構型および球面リンク機構型では、容積負荷に対しては折紙をベースとしているためその要件を満たすことが可能と考えられるが、収納効率（広げた状態の面積 / 折畳んだ状態の面積）に関しては広げた状態と折畳んだ状態とでは最小でも面積が半分にしかならず、収納効率が高いとは言い難い。

そこで、平面リンク機構や球面リンク機構等をもとに、収納効率の高い折畳展開形状についてその他の機構等を参照しながら、機構の発展を行なう。

シザーズ機構を用いた展開構造物は線材で構成されていることもあり、高い収納効率を実現することができる。そこでまず、平面リンク機構型の切込を有する折紙について基本パターンをもとに面材によるシザーズ機構への応用を図る。また、同じように収納効率の高いミウラ折との組み合わせについても検証する。

2本の直線状の部材をピボットと呼ばれる回転ジョイントでつないだX型の部材はシザーズユニットと呼ばれる。[8] このシザーズユニットを連結させていくことで収納効率の高いシザーズ機構を構成することができる。

面材によるシザーズ機構とするためシザーズユニットの部材を線材とピボットから面材と回転ジョイントに置き換え構成を検討する。

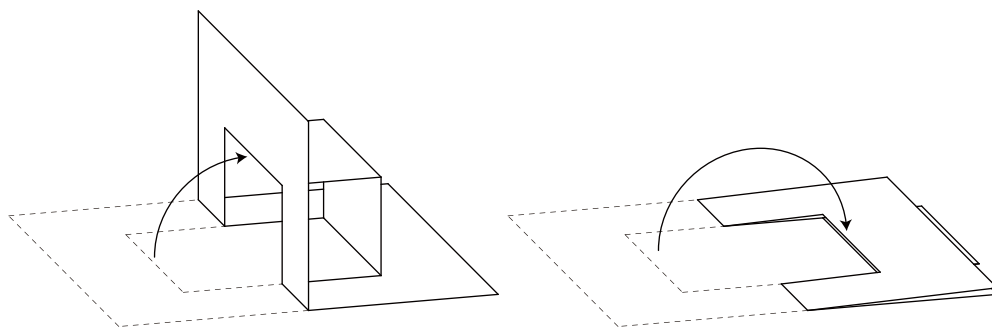


図19

[7] 曾根朋久、鈴木啓祐、川口健一、大家俊治、「リユース可能な展開型アーチ構造物の開発と展開実験に関する研究」『日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）』, P805, 2009

[8] 井上健一、川口健一、萩芳郎、「オフセット型シザーズユニットを用いた展開型 Hoop-Column 構造に関する基礎的研究」『日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）』, P837, 2011

面材におけるシザーズユニットの構成

シザーズユニットの基本的な形として、ユニットの構成される面材の形状を正方形とする。シザーズユニットを構成する部材の形状は2つのL字を組み合わせたような状態になる。他のシザーズユニットとの接続辺と折線が平行な関係にあり、先に求めた平面リンク機構の可動条件と平坦折の条件を踏まえれば、平坦に折り畳むことができる。収納効率が最大となるためには折線は両端の接続辺から等しい距離すなわち中間に位置する必要がある。

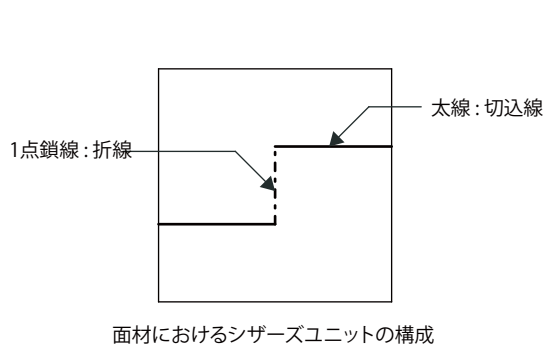


図20

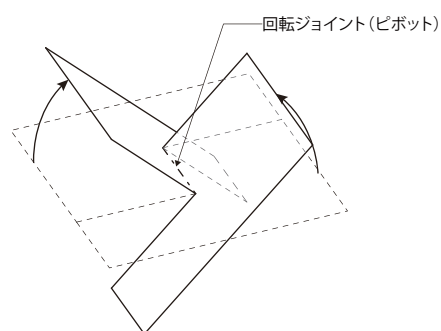


図21

面材におけるシザーズ機構の構成

面材におけるシザーズユニットを接続辺どうして繋げていけば面材におけるシザーズ機構を構成することができる。

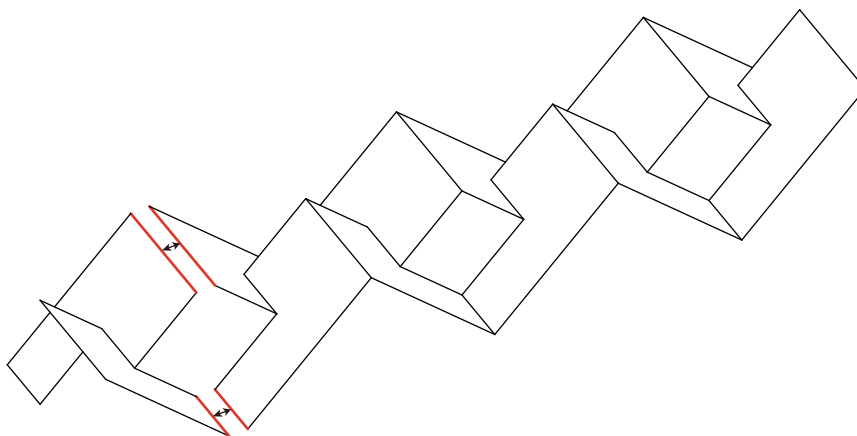


図22

このようにベースとなる面材を正方形ないしは長方形とし、その対辺を接続辺、その中間に折線及び折線と接続辺とを結ぶ切れ込みを、配置することで収納効率の高いシザーズ機構を構成することができる。しかしながら、収納効率は接続するシザーズユニットの個数が増えれば増えるほど高くなるため、実際にはシザーズユニット単体の構成による影響は小さいものと言える。よって、シザーズユニットの構成される面材の形状は正方形ないしは長方形でなくとも構成可能であり、接続辺と折線が平行の関係であれば様々な形状を考えることができる。

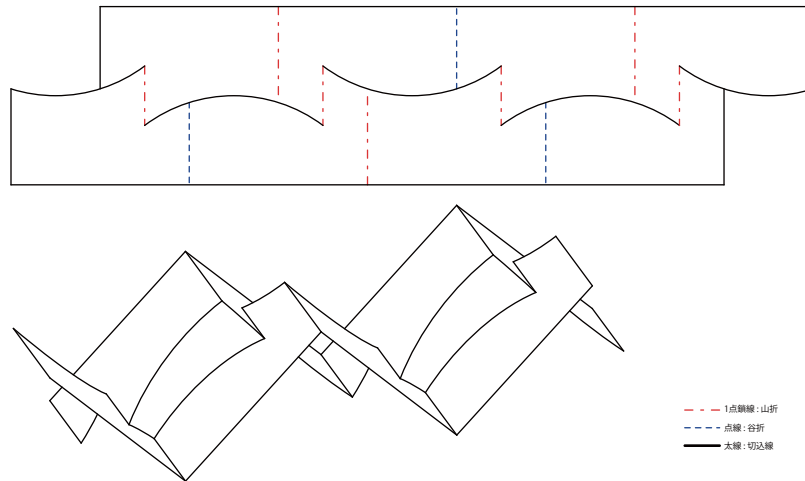


図23 平面シザーズ機構の設計図及び可動プロセス

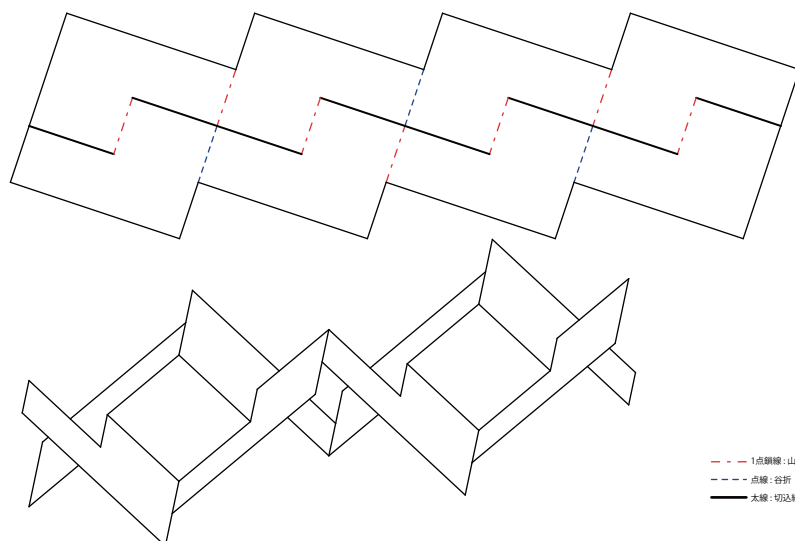


図24 平面シザーズ機構の設計図及び可動プロセス

平面リンク機構型シザーズ機構とミウラ折との組み合わせ

先に考案したシザーズ機構化した切込を有する折紙の平面リンク機構型（以後、平面シザーズ機構型とする）の折畳展開は1方向の動きである。よって収納効率を上げるにはシザーズユニットの接続を増やすしかなかった。また、既存の線材を部材としたシザーズ機構を用いた展開構造物に多く見られる直交2方向に同時展開する機構の構成は、面材による平面リンク機構では構成することが難しい。しかしミウラ折のように面材でも直交する2方向に同時展開できる仕組みが存在することから、平面シザーズ機構型の構成パターンを工夫することで、より収納効率の高い折畳展開機構が設計できると考えられる。

ミウラ折の構成は（図27）のように平行四辺形を敷き詰めたような配列になっている。先にみてきたシザーズユニットの面の形状は直角を持った四角形ではなくても対辺が平行の関係にあれば、シザーズ機構を構成できる。そこでミウラ折に見られる平行四辺形のような面の部材形状において、シザーズユニットの構成を試みる。

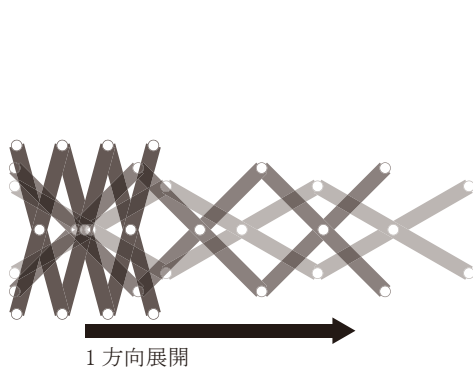


図25

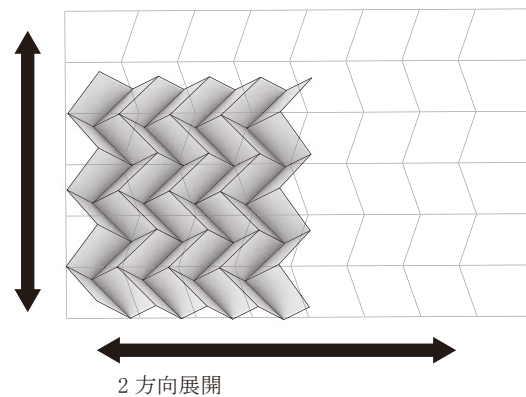


図26

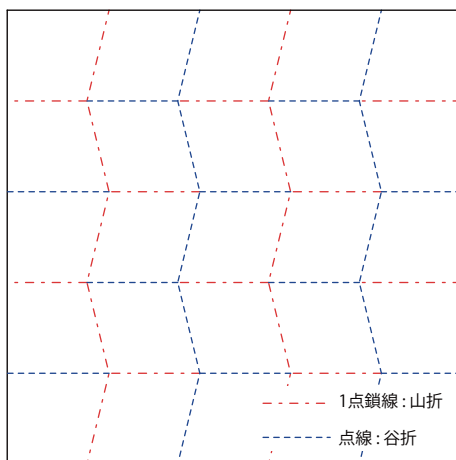


図27

平行四辺形によるシザーズユニット

まず、先に設計した正方形によるシザーズユニットの構成を平行四辺形に置き換える。

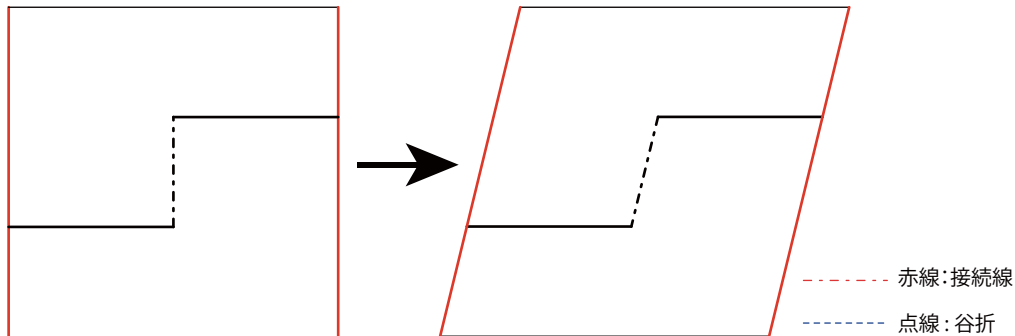


図28

連続した平行四辺形による平面シザーズ機構

隣接シザーズユニットの接続する辺が互いにそろそろよう切込の位置を修正しながら接続させていく。

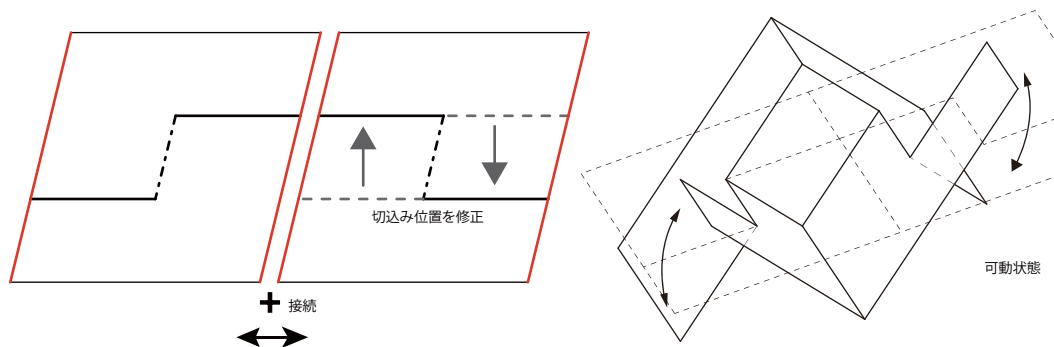


図29

平面シザーズ機構とミウラ折の組合せ

先に設計した平行四辺形による平面シザーズ機構は一方向の展開運動である。これを直交2方向の展開が可能な機構とするには、平行四辺形のシザーズユニットを接続していない辺を用いる必要がある。この平行四辺形による平面シザーズ機構とミウラ折を比較してみると、ミウラ折の面の構成は平面シザーズ機構を線対称にしながらかぎ詰めた構成と非常に類似している。また平面シザーズ機構同士の接続辺に注目すると、そこにミウラ折の最小構成が構成されていることがわかる。このことから平面シザーズ機構を線対称に接続していけば直交2方向の展開が可能な機構が構成できるといえる。

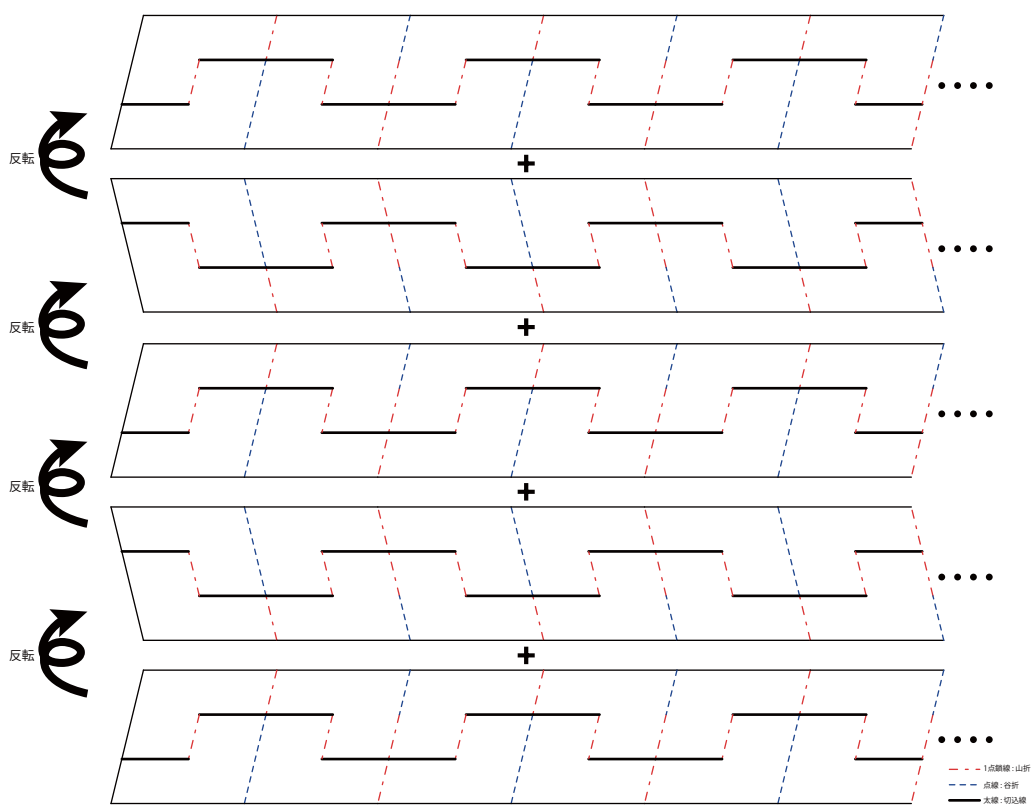


図30 ミウラ折平面シザーズ機構の設計図

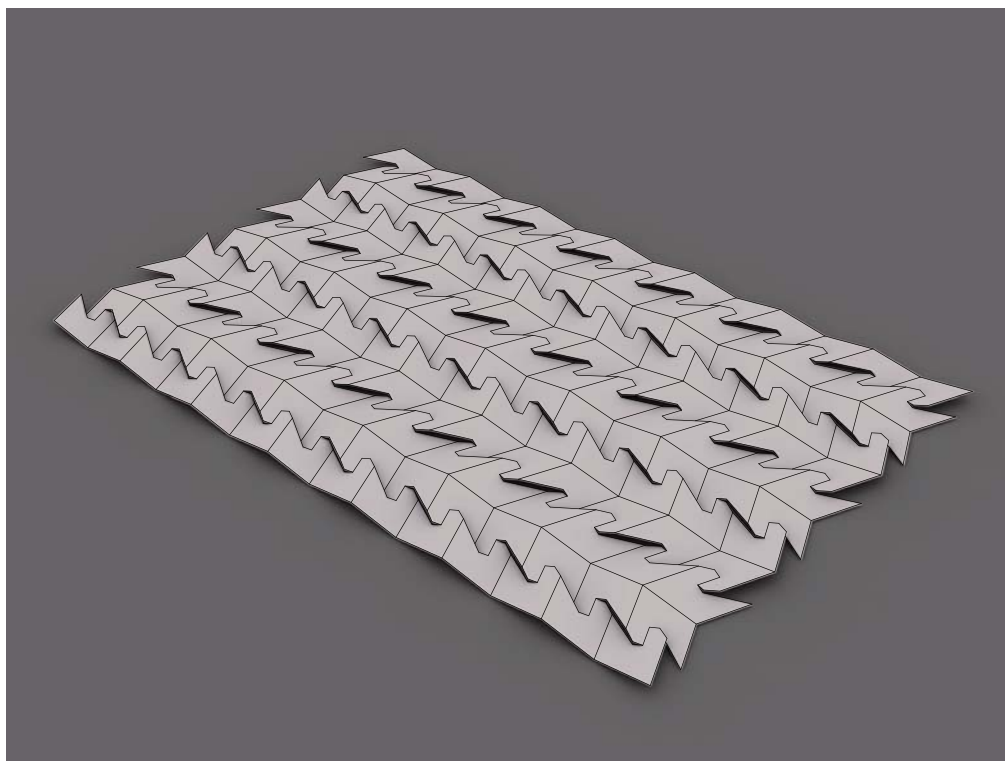


図31 ミウラ折平面シザーズ機構

複層化

本研究は1枚の平面に切込を入れ折畳展開する機構を設計する研究であるが、設計した機構同士が接続でき、新たな折畳展開運動が可能となるならば、本研究の応用性が広がると考えられる。

先ほど設計した平面シザーズ機構とミウラ折の組合せによる機構（以後、ミウラ折平面シザーズ機構とする）の変形プロセスに注目してみると、ミウラ折の波型部分の折線がある平面上でそろっていることが確認できる。このことからミウラ折平面シザーズ機構と折線のなす平面で反転させたものを複層化していくことで、直交2方向だけではない立体的な展開運動を構成することができる。

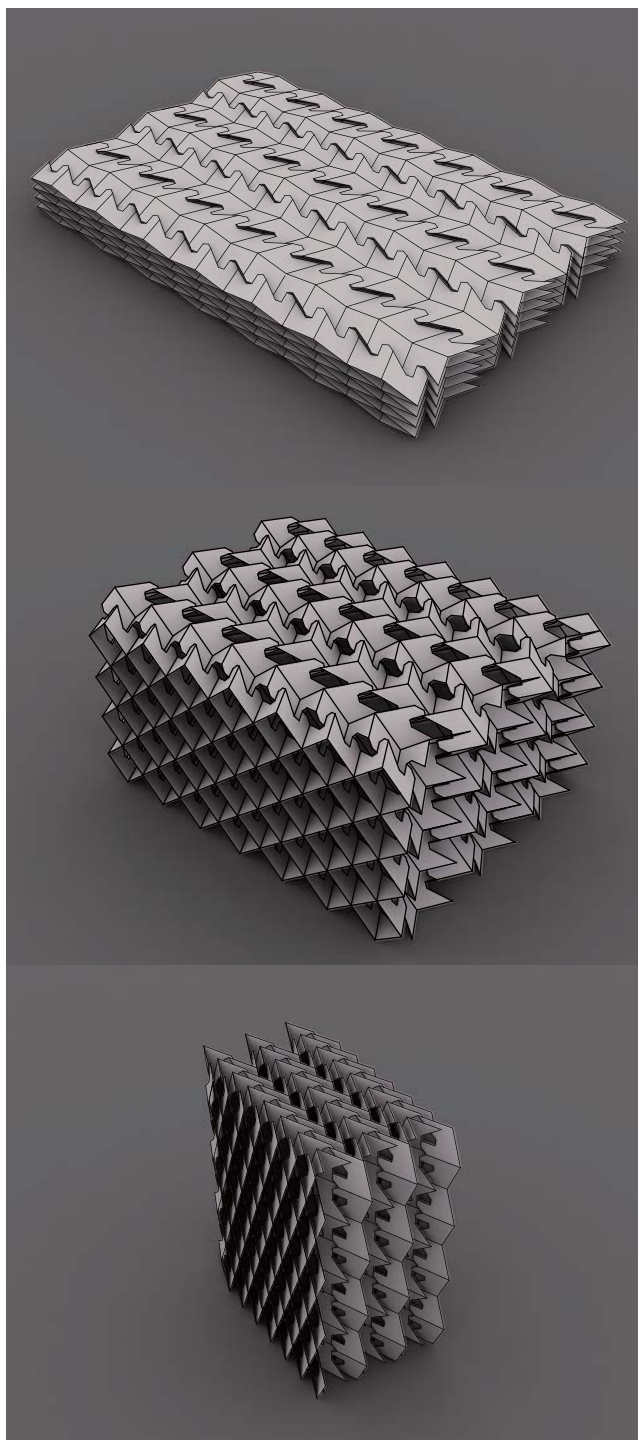


図32 複層化したミウラ折平面シザーズ機構の可動プロセス

様々な展開形状

ミウラ折はベースとなる形状に長方形が使用される事が多いが、それ以外の形状も構成可能である。次の構成は半径方向と円周方向に折畳展開するミウラ折平面シザーズ機構の例である。

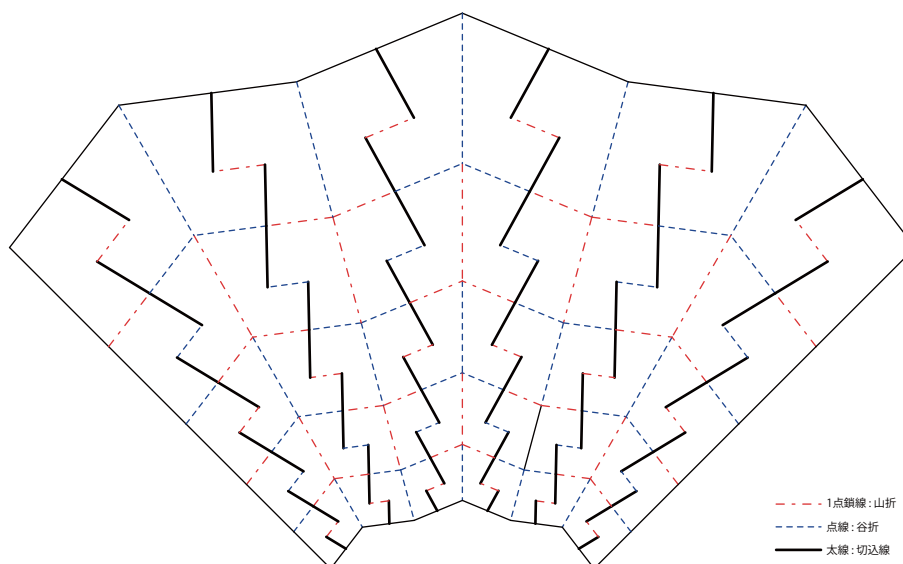


図33 扇型ミウラ折平面シザーズ機構の設計図

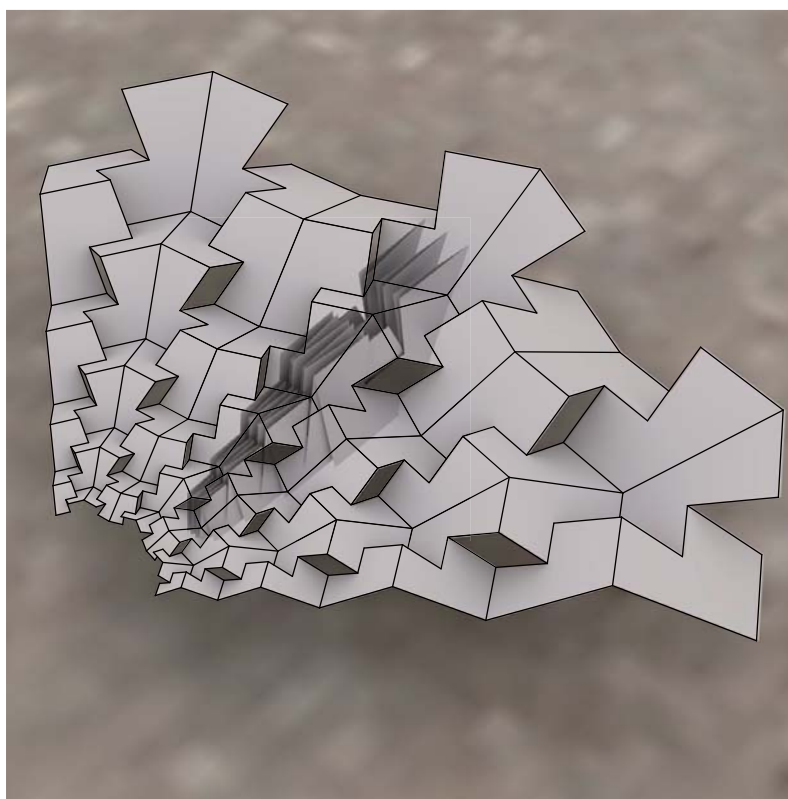


図34 扇型のミウラ折平面シザーズ機構の可動プロセス

球面リンク機構型の発展

平面リンク機構型の場合と同じように球面リンク機構型の切込を有する折紙についても基本パターンをもとに面材によるシザーズ機構への応用を図る。また、収納効率の高いミウラ折との組み合わせについても検討する。

球面リンク機構型におけるシザーズユニットの構成

シザーズユニットの基本的な形としてユニットの構成される面材の形状を正方形とする。正方形の2つの対角の頂点を球面リンク機構における折線の交点として設定し、その2点を結ぶ対角線に折線（シザーズユニットにおけるピボットとなる部分）を設定する。他のシザーズユニットと接続を予定する接続辺を設定し、折線と接続辺を結ぶ切込を配置する。ピボットとなる折線に対角線とした場合、接続辺の対辺同士は平行であるため先に求めた球面リンク機構の可動条件と平坦折の定理を踏まえれば平坦に折畳むことができる。

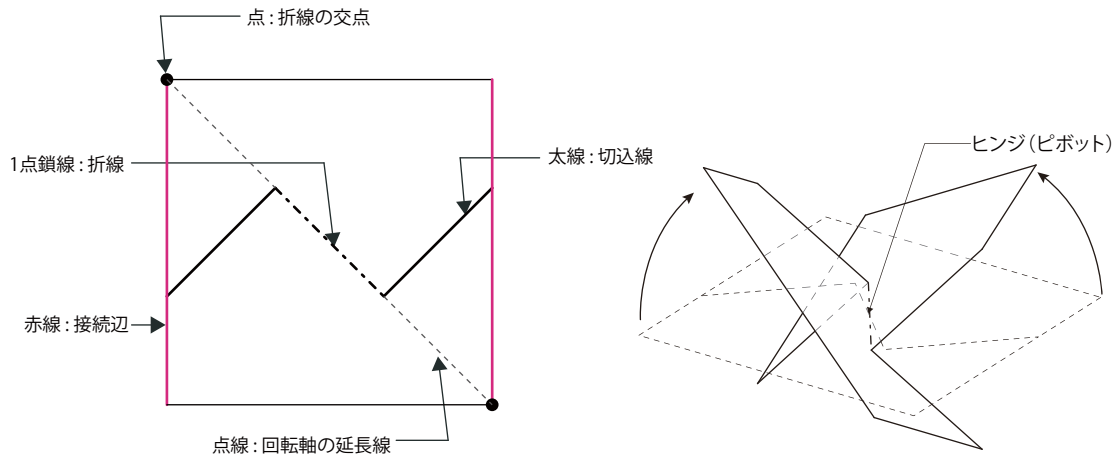


図35

面材におけるシザーズ機構の構成

面材におけるシザーズユニットを接続辺どうしで繋げていけば面材におけるシザーズ機構を構成することができる。

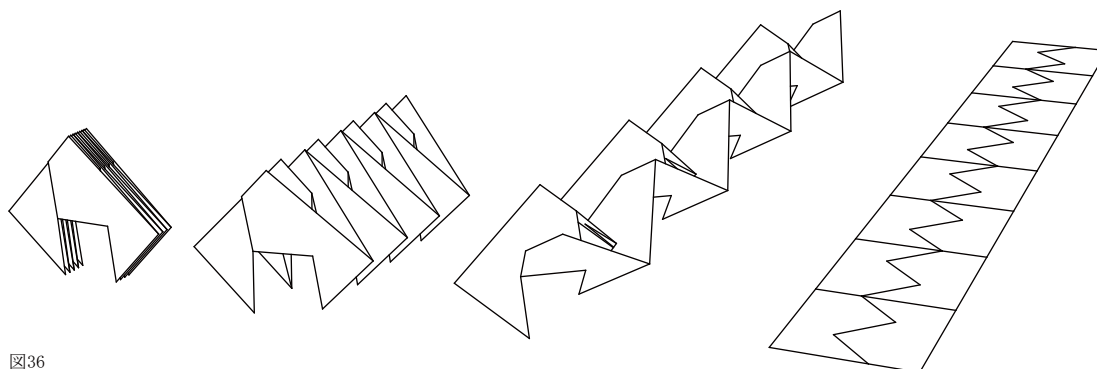


図36

球面リンク機構においてもベースとなる面材を正方形ないしは長方形とし、その対辺を接続辺、対角に交点及び対角線をピボットとなる折線、折線と接続辺とを結ぶ切れ込みを、配置することでシザーズ機構を構成することができる。また、平面リンク機構型と同じようにシザーズユニットの構成される面材の形状は正方形ないしは長方形ではなくとも可動条件と平坦折の定理を踏まえれば構成可能である。

球面リンク機構型シザーズ機構とミウラ折との組み合わせ

先にシザーズ機構化した切込を有する折紙の球面リンク機構型（以後、球面シザーズ機構型とする）の折畳展開運動は、平面シザーズ機構型とおなじ1方向の動きであり、シザーズユニットのベースとなる面形状をミウラ折の面の形状と一致させれば、一見2方向の折畳展開運動が行えるように考えられる。しかし、球面シザーズ機構の場合、ベースとなる面形状をミウラ折の面の形状すなわち平行四辺形とすると、平坦折の定理 $\theta_a + \theta_c = \theta_b + \theta_d = 180^\circ$ から外れ平坦に折り畳めなくなってしまう。

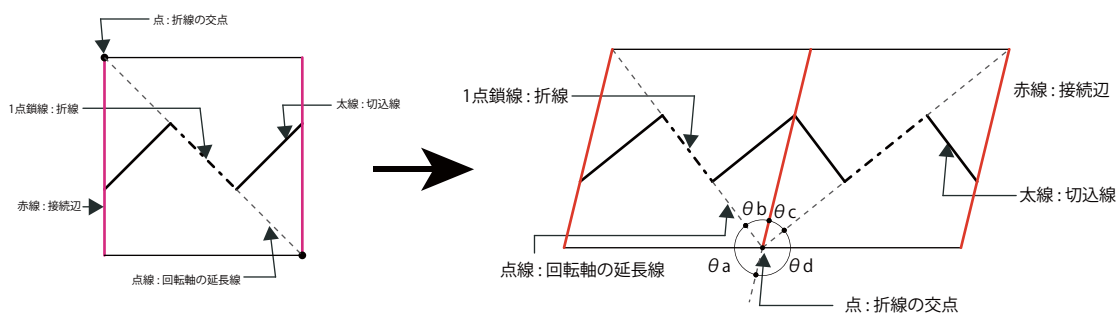


図37

そこで、平坦折を満しつつミウラ折と組み合わせるための球面シザーズ機構の設計について検討する。

球面シザーズ機構が平坦折に折畳まれるには、(図38)の、内角 θ_a 、 θ_b 、 θ_c 、 θ_d が以下の式を満たす時である。

$$\text{平坦折の定理} \quad \theta_a + \theta_c = \theta_b + \theta_d = 180^\circ$$

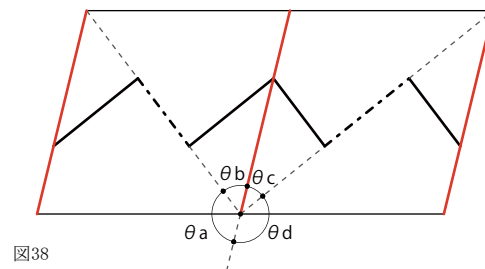


図38

つまり、ピボットとなる折線と接続辺の角度を工夫することで、平坦折の定理は満たせるはずである。平坦折の定理を満たす方法は2通りが考えられる。

ひとつは、接続辺の一部を $\theta_a + \theta_c = \theta_b + \theta_d = 180^\circ$ となるよう修正する方法。

もう一つは $\theta_a + \theta_c = \theta_b + \theta_d = 180^\circ$ となるよう左右のシザーズユニットの幅を変える方法である。前者の方法は一見、シザーズユニット全体の形状が変形していないため、妥当であるように考えられるが、接続辺が上下でズレてしまいミウラ折を上手に構成することができない。(図39) 後者の方法は左右のシザーズユニットの幅が異なるが、球面シザーズ機構やミウラ折における可動及び平坦折の要因は、波型となる折線(図の接続辺)と角度であるため、構成可能である。(図40)

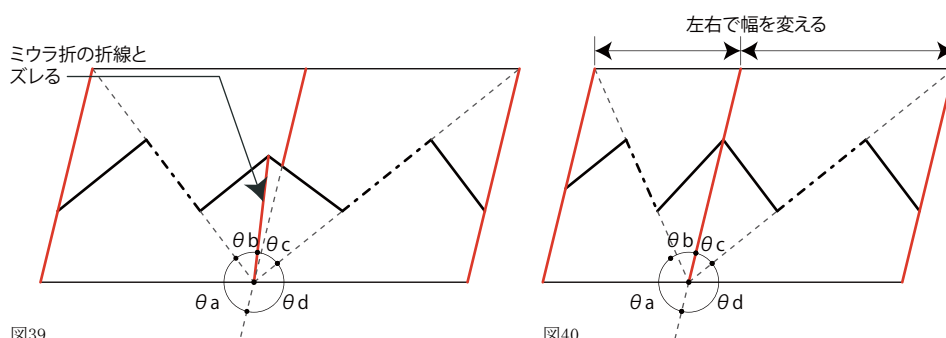


図39

図40

以上のことより、 $\theta_a + \theta_c = \theta_b + \theta_d = 180^\circ$ となるよう左右のシザーズユニットの幅を変えた球面シザーズ機構を用いてミウラ折を構成することとする。

平坦折を満たす平行四辺形の球面シザーズ機構

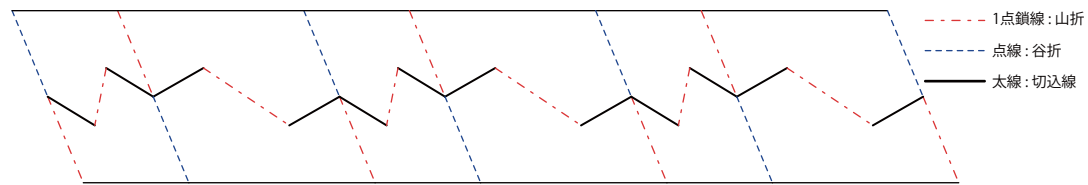


図41

ミウラ折と組み合わせた球面シザーズ機構の変形形状

ミウラ折と組み合わせた球面シザーズ機構（以後、ミウラ折球面シザーズ機構とする）とミウラ折平面シザーズ機構の一番の違いは、折畳展開動作の過程における形状である。ミウラ折平面シザーズ機構は2方向への折畳展開動作を行うが、1方向の動作をミウラ折が、もう1方向の動作を平面シザーズ機構及びミウラ折が担っている。2方向ともに直線的な動作を行なうため平面的な動作形状になる。

ミウラ折球面シザーズ機構も2方向への折畳展開動作を行い、1方向の動作をミウラ折が、もう1方向の動作を球面シザーズ機構及びミウラ折が担っている。どの方向のミウラ折も直線的な動作形状になるよう配置されているが、球面シザーズ機構が球面シザーズ機構の展開方向を回転軸に面の角度を変化させるため、1方向は直線的な動作形状であるが、球面リンク機構の展開方向と直交する方向の動作形状が曲面を描く動作形状となり、アーチ状の動きを示す。

ミウラ折球面シザーズ機構は単体でアーチ状の空間を獲得できるため、仮設建築物などにそのまま応用できる可能性を持っている。

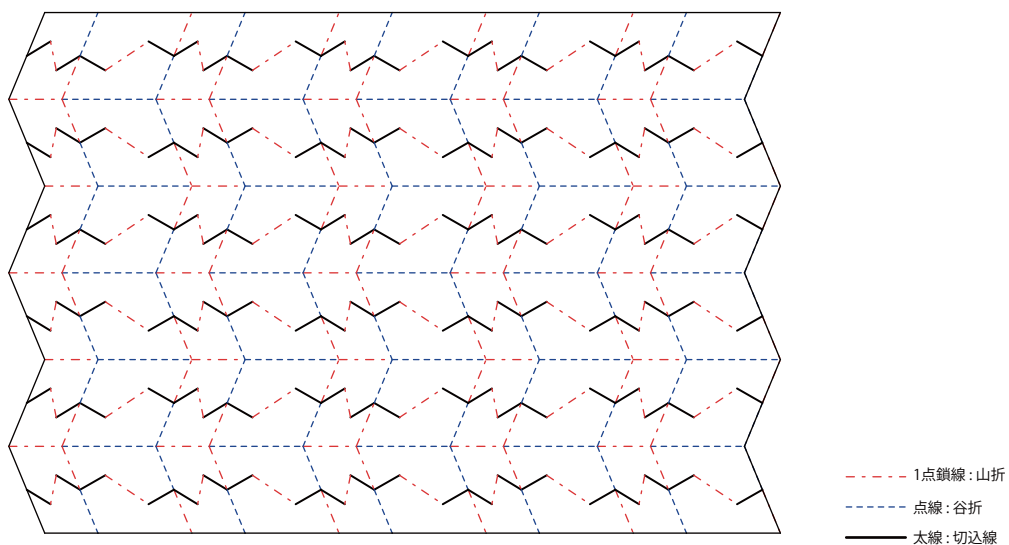


図42

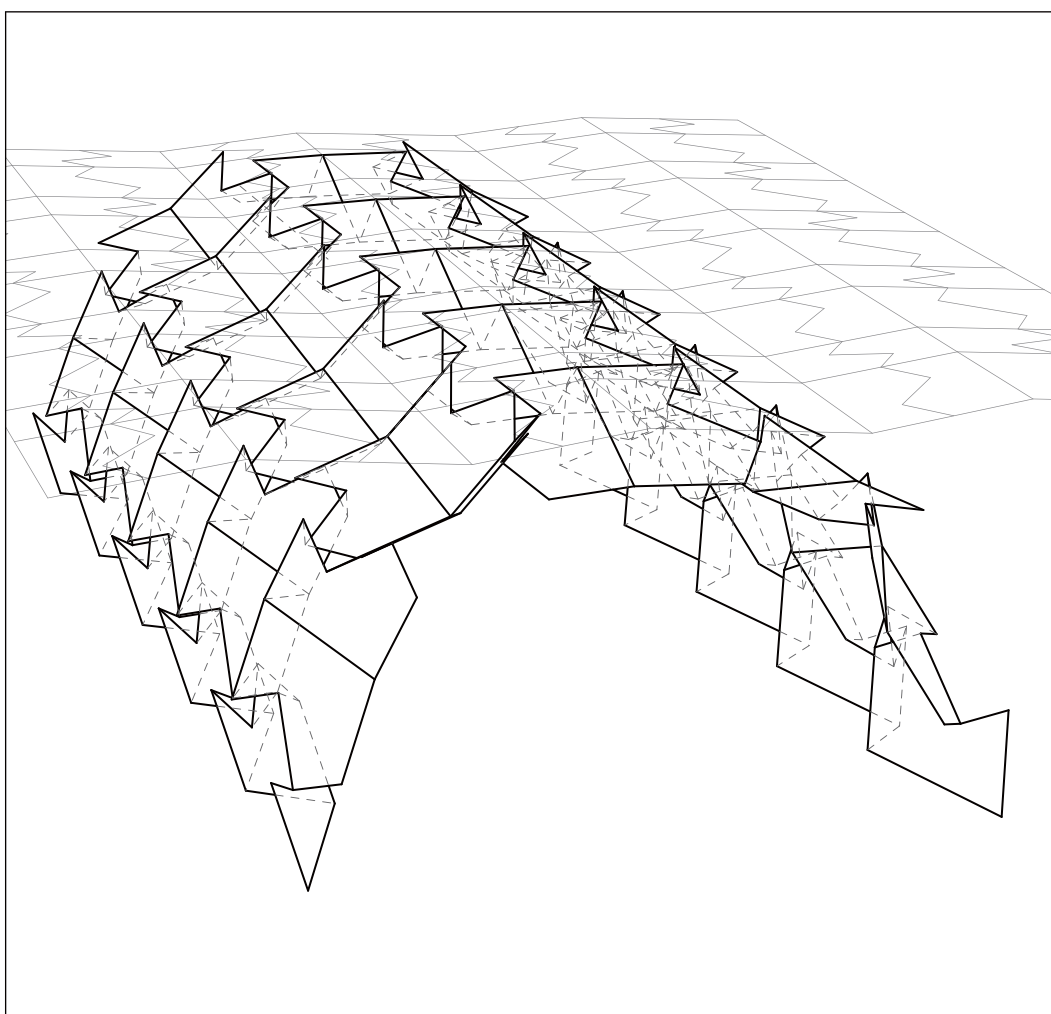


図43

ミウラ折球面シザーズ機構の様々な展開形状

ミウラ折球面シザーズ機構も様々な展開形状を構成できる可能性を持っている。次の構成は半径方向と円周方向に折畳展開動作するミウラ折球面シザーズ機構の例である。半径方向がミウラ折で構成され、円周方向に球面シザーズ機構が構成されている。またその逆も構成可能である。

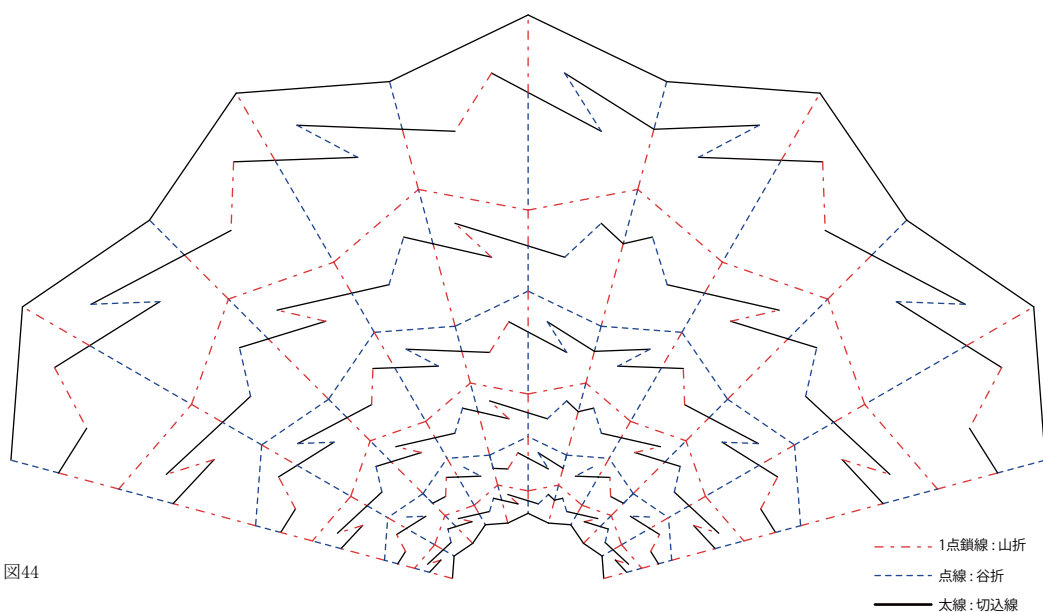


図45 扇型ミウラ折球面シザーズ機構の可動検証用模型

2-3-3 空間リンク機構への発展に関して

リンク機構は構成する部材の運動形状から、平面リンク機構、球面リンク機構、空間リンク機構の3つ大別できる。これまでに検討してきた切込を有する折紙の機構は、平面リンク機構および球面リンク機構についてであり、シザーズ機構に拡張させることで、工学的応用性の高い折畳展開機構へと発展させてきた。しかし、機構の最小構成において空間リンク機構が構成できるかの検証は行ってこなかった。空間リンク機構は、平面リンク機構や球面リンク機構と比べてより複雑な運動を行なうことが期待でき、より工学的応用性の高い機構を設計できる可能性がある。

そこで、切込を有する折紙の空間リンク機構としての可能性を検証する。

同じ回転軸の配置による複数の面形状の可能性について

(図46)、(図47)、(図48)は簡単な切込を有する折紙における球面リンク機構の例である。3つの図の構成に注目してみると、(図46)の構成と(図47)、(図48)の構成は同じ折線の回転軸を持った設計であることがわかる。このことから、同じ折線の回転軸の配置であれば、異なる面形状であっても球面リンク機構の構成が可能である。

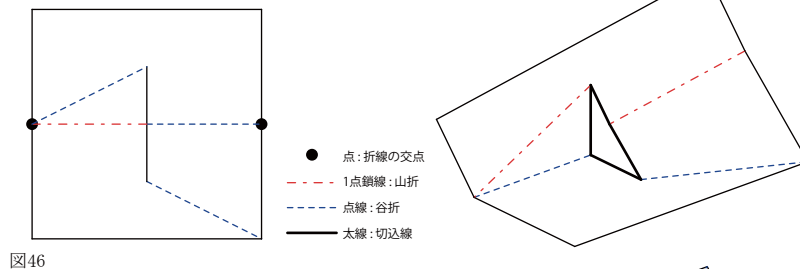


図46

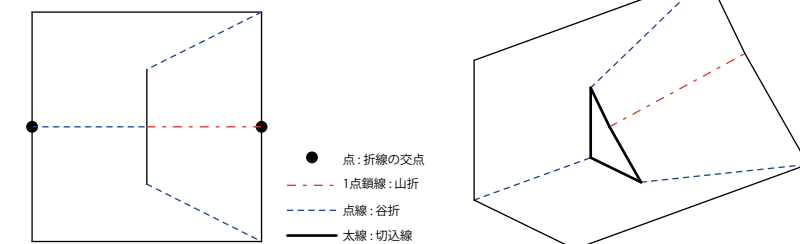


図47

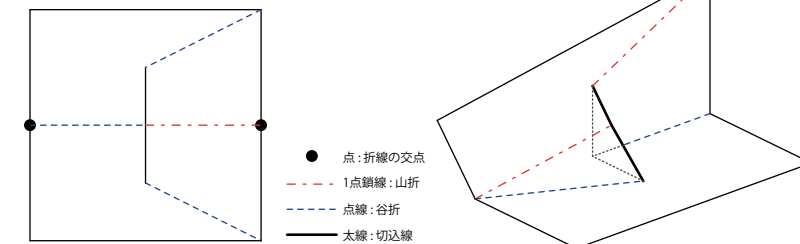


図48

2つの球面リンク機構の合成

(図49)は(図50)の図形を垂直の中心線で反転させたものである。2つの機構は構成を反転させたものであるから、内側の2枚の三角形面を除いた外側2面の動きは重なるはずである。このことから、(図50)の折れ線の構成を(図49)の構成に加えても機構の運動には影響がないことがわかる。

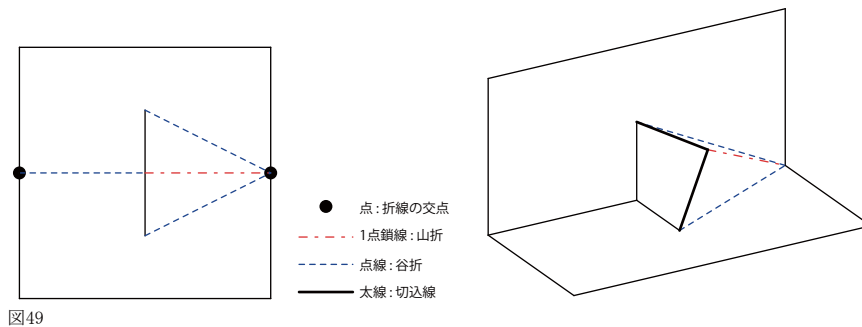


図49

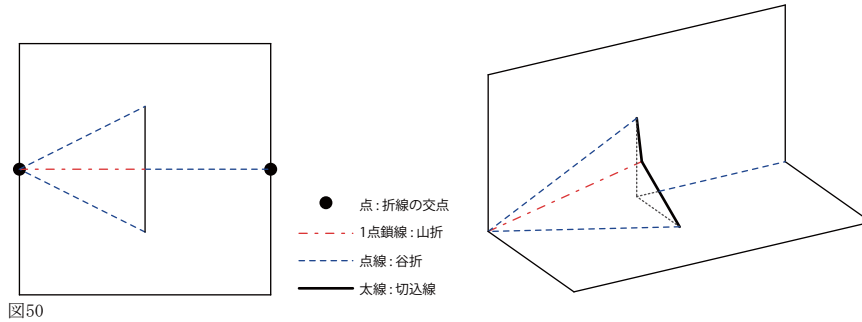


図50

(図51)は(図49)に(図50)の構成を加えたものである。図形が重なる部分は球面リンク機構を構成する面を優先させ構成する。こうすることにより、2つの球面リンク機構が1枚の平面内に収まった一つの空間リンク機構を構成することができる。しかし、この空間リンク機構の構成では、ベースとした球面リンク機構との動きの差異は小さく、機構としての応用性は低い。

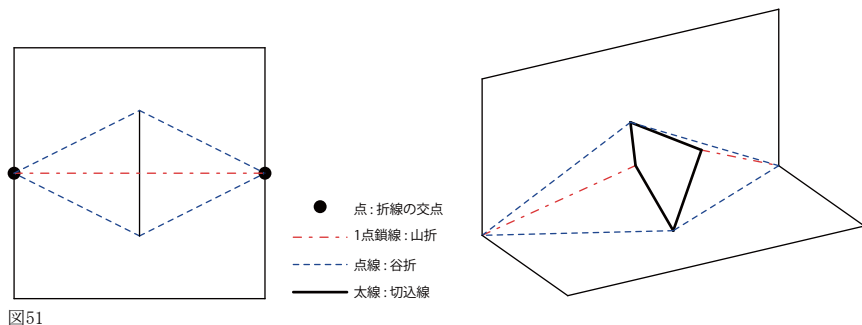


図51

先ほど設計した、空間リンク機構の構成では工学的な応用性は高くない。それは、可変運動が基本的な構成の球面リンク機構や平面リンク機構とさほど変わりなく、また、構成要素が増えている分、シザーズ機構などの他の機構への拡張が難しからである。しかし、面の動作形状については、他のリンク機構よりも複雑であり、より魅力的な動作を行なう機構への発展が期待できる。

そこで、先に見出した、同じ折線の軸線の構成による複数の面形状の可能性について再検証し、より複雑な動きを見せる空間リンク機構について検証する。

同じ回転軸配置における複数の面形状

(図 52) は一枚の平面における (図 51) の折線の軸線を配置したものである。先に定義した平面リンク機構や球面リンク機構の可動条件を踏まえながら、(図 52) の軸線の配置を基準に面形状の構成を試みる。

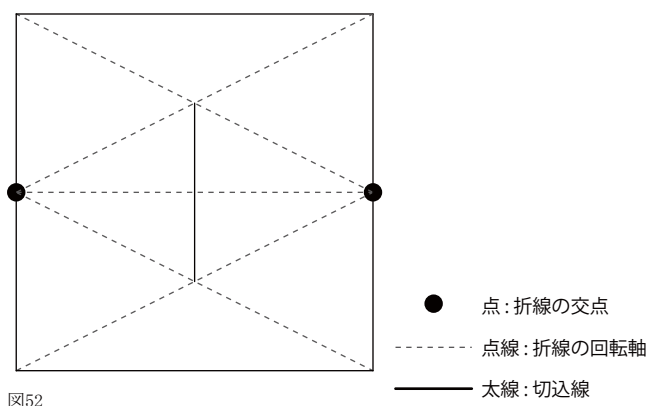
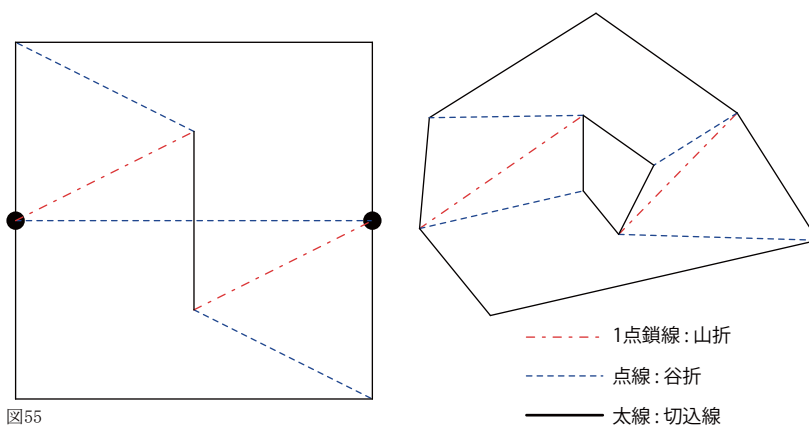
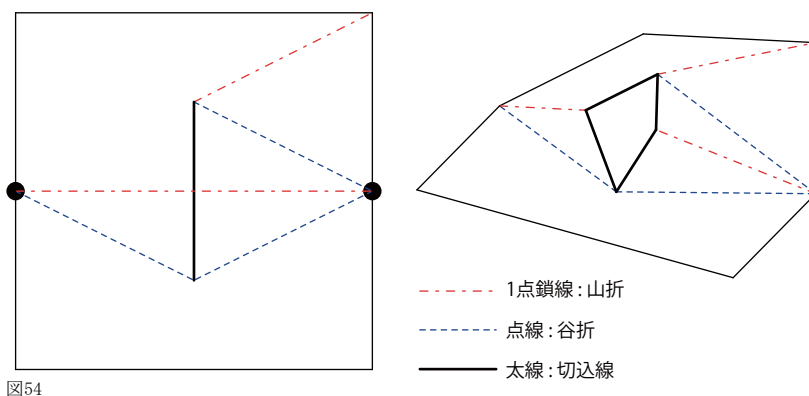
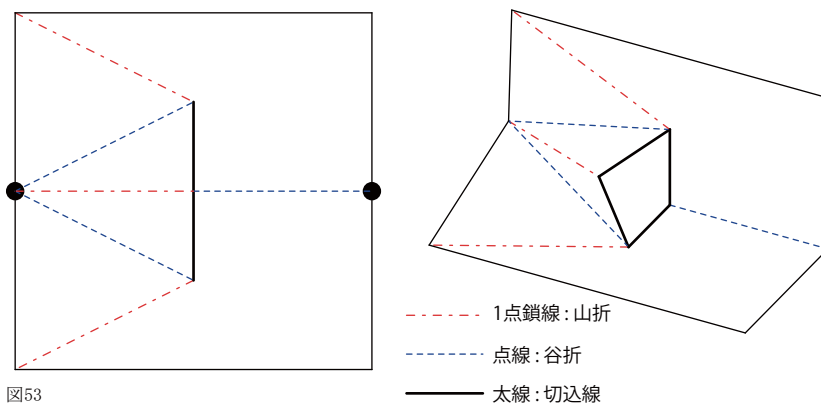


図52

下の図は空間リンク機構型の切込を有する折紙の構成である。これまで設計してきた空間リンク機構の可変運動と比べて、全体がより複雑な動きを見せていることがわかる。

このように折線で囲まれる面形状をシザーズ機構となるよう適切に変えることによって、機構として成立させる。



空間リンク機構型の発展

先ほど見出した空間リンク機構を、平面リンク機構や球面リンク機構と同じように、より収納効率の高いシザーズ機構への発展を試みる。

基本モデルの制作手順を次に示す。

<手順>

①ユニットとする平面図形（一番シンプルな平面充填形である正方形をモチーフとした）に、2つの収束点 P, P' を配置する。

②点 P, P' を結ぶ線分 PP' を引く

③図形の外周上に（図57）のように点 A, A', B, B' を配置する。この時、図形が折り畳み切るには $\angle APP'$ と $\angle BPP'$ および $\angle A'P'P$ と $\angle B'P'P$ のなす角度が等しくなければならない。線分 AP と線分 $A'P'$ の交点に点 M 、線分 BP と線分 $B'P'$ の交点に点 N を配置する。

④点 M, N を結ぶように切れ目を入れ、線分 $A'M$ ・線分 BN ・線分 PP' を谷折、線分 PM ・線分 $P'N$ を山折にすることで、一枚の平面から立体的に折り畳むことが可能である。



図56

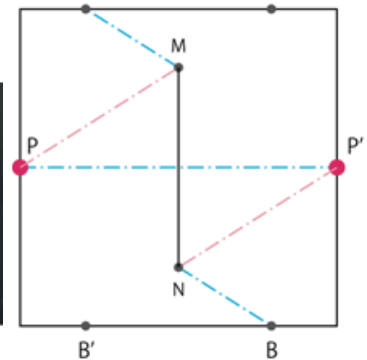
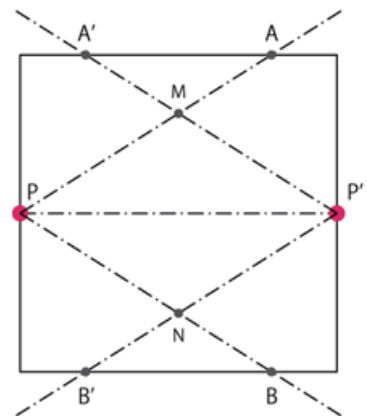
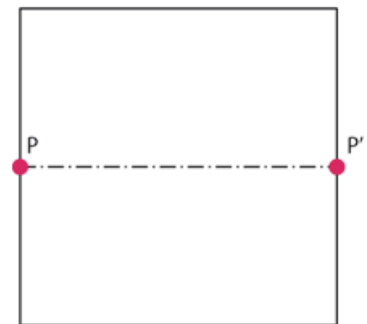
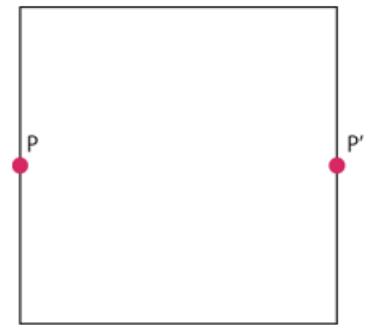


図57

上記の基本モデルを応用して、次に示すような折り畳み手法も可能である。

(図58)のようにAとA'、BとB'が図形の外周上で重なる場合、線分AP上にM、線分AP'上にM'、線分BP上にN、線分BP'上にN'を配し、点M'、M、N'、Nを通る線で切れ目を入れるか、点M'、Nと点M、N'を結ぶ線で切れ目を入れることで折り畳むことが可能

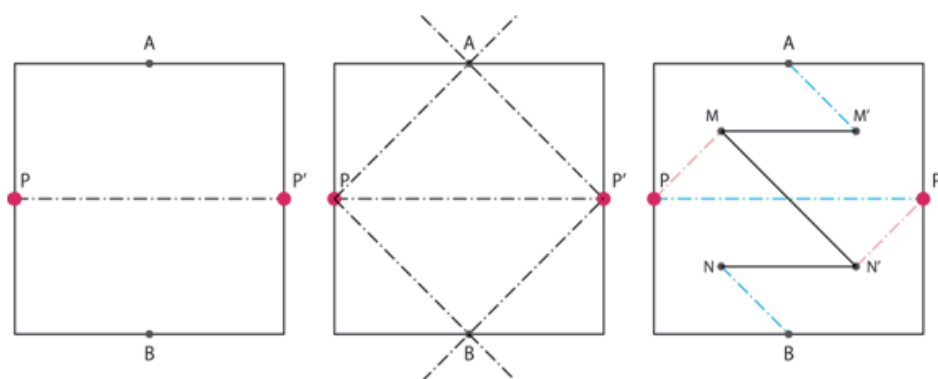


図58

(図59)のように点P, P'が図形の外周上より内側にある場合、点A', B', Bを通る外周上に任意の点Eを、点B', A, A'を通る外周上に任意の点E'を配置し、点P, Eを結ぶ線と点P', E'を結ぶ線に切れ目を入れることで折り畳むことができる。点E, E'は他の折線と交わらなければ外周上のどの位置でも良い。

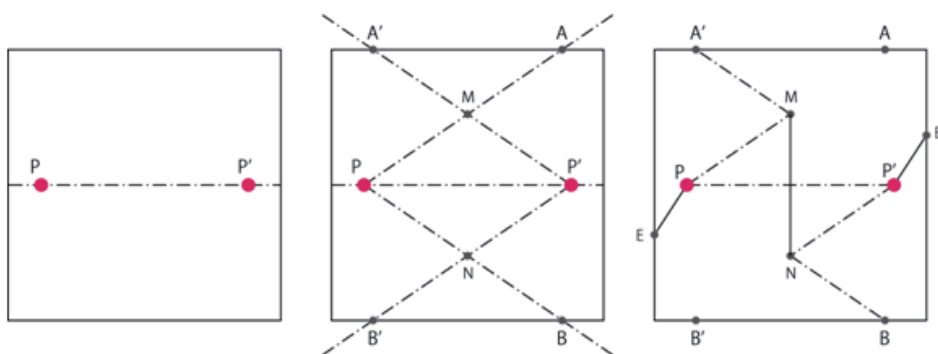


図59

ユニットの増設を考慮した提案

ユニットの平面の形、ユニットにおける折れ線の引き方、ユニットの増設方法を工夫することで、3つのタイプの展開構造システムを提案する。

空間シザーズ機構型正方形ベース 1

折れ線・切り込み線の配置を正方形の4辺それぞれの中点で折れるよう設計。

ユニットの増設形式

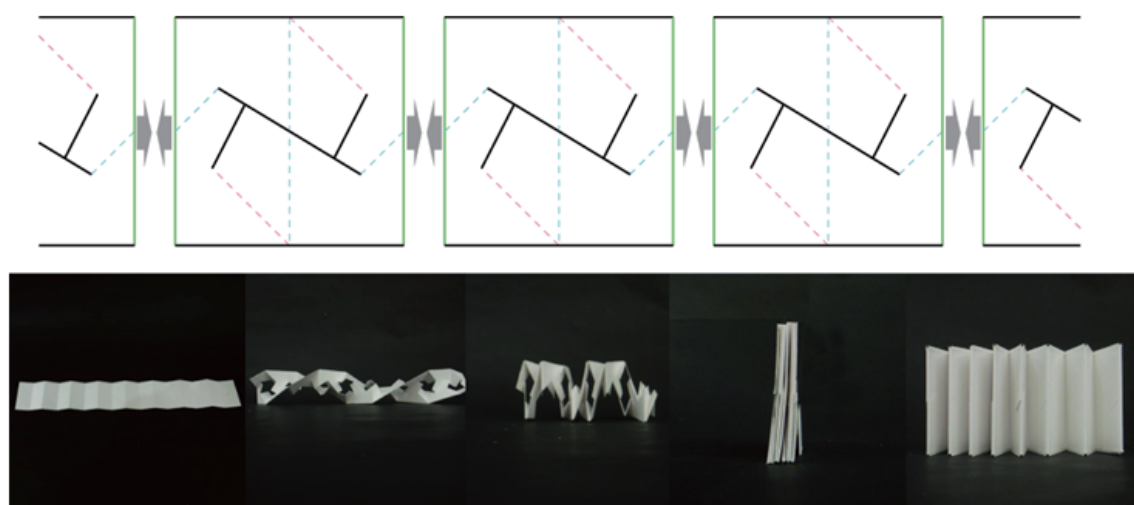


図60

特徴

列状に組み合わせていっても限定動作をしながら折畳むことができ、回転するように折畳展開の動きをみせる。折線の山・谷を反転させると逆回転の動きをみせるため、正回転の帯と逆回転の帯とを途中まで展開した状態で組み合わせることにより自立した構造体とすることができる。さらに真上からみると、空間を充填するように拡張していくことができる。



図61

空間シザーズ機構型正方形ベース 2

折れ線・切り込み線の配置

図形の内側に収束点を配し、4辺をそのまま残すように切り込み線を入れる。3列で1つのシザーズ機構が構成される。

ユニットの増設形式

面状に組み合わせていくことで動きを伝達する。

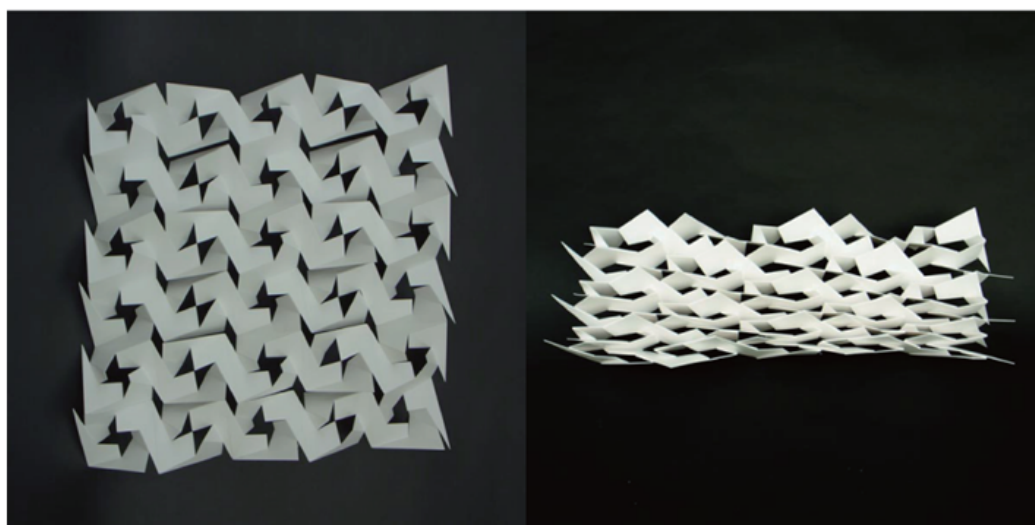
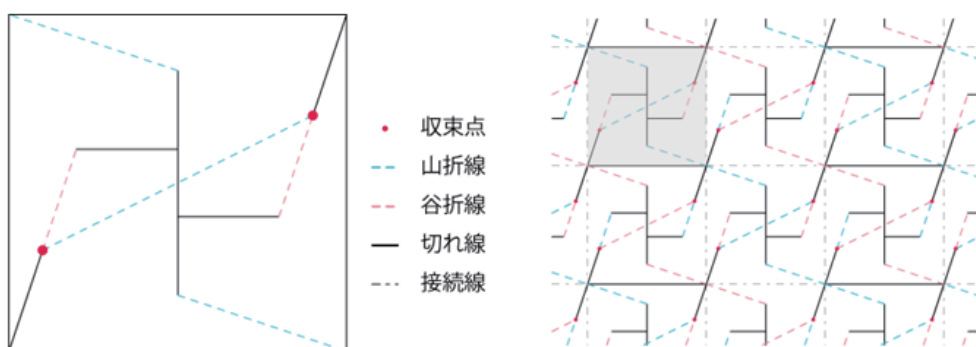


図62

特徴

正方形の4辺をそのまま残すことで、4方向に動きを伝達する。このユニットを面状に組み合わせていくことで、限定された動作を行うことができる。また接続線で折れることはないので、組み合わせた時に1ユニットとしての存在感は消え、表情豊かな全体感を見せる。1方向の折畳展開運動を行なう。

空間リンク機構六角形ベース

折れ線・切り込み線の配置

正六角形をモチーフに収束点を図形の頂点に配し、かつ6辺の途中で折れないよう軸線と切れ込み線を配した。

ユニットの増設形式

面状に組み合わせていくことで動きを伝達する。

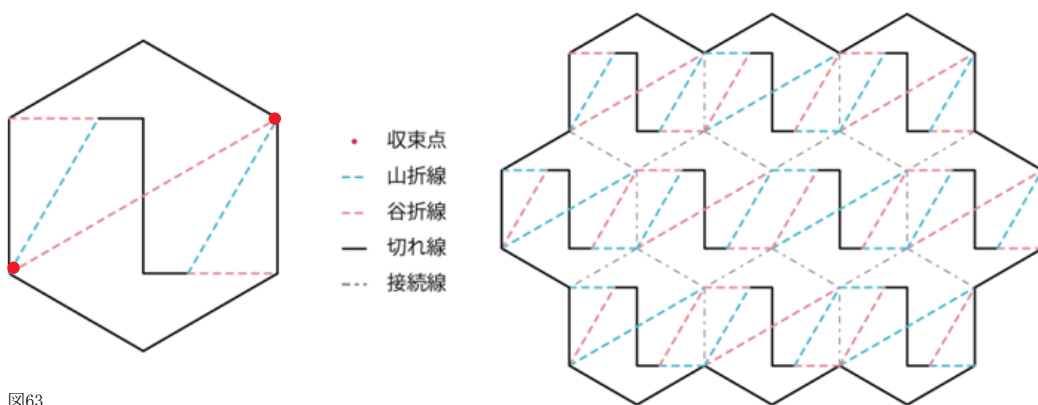


図63

特徴

空間リンク機構を組み合わせることで剛体折を構成し1つの最小構成が全体へと動きを伝達している。繋がった面が多いため面の表情がより立体的に見える。1方向のみの動きである。



図64

2-4 切込を有する折紙の可動機構としての位置づけ

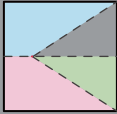
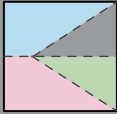
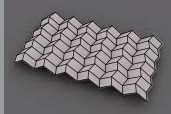

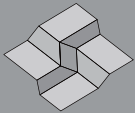


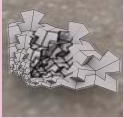

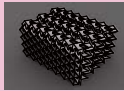

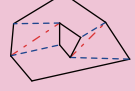

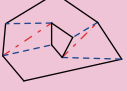
これまで見てきたように、切込を有する折紙の仕組みを機構として捉えた場合、面をリンクに折線を回転ジョイントとして置き換えることで、リンク機構として成立することがわかった。


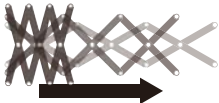

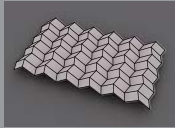
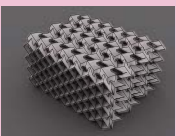
広義の意味でのリンク機構は、構成される機構の部材が閉じた回路を持つクローズドループと開いた回路を持つオープンループの2種類に大別できる⁽²⁾が、切込を有する折紙は面をリンクに折線を回転ジョイントとして置き換えた場合、リンクと回転ジョイントによる回路の閉じたクローズドループのリンク機構として位置づけることができる。

リンク機構は回転ジョイントの回転軸の配置関係から、回転軸が平行な平面内を運動する平面リンク機構、回転軸の交点を中心とした同心球面内を運動する球面リンク機構、回転軸が3次元空間内を運動する空間リンク機構の3つに分類することができる。本研究の切込を有する折紙の折畳展開機構は、機構の最小構成が平面リンク機構及び球面リンク機構、空間リンク機構を構成できる。また、平面リンク機構と球面リンク機構はシザーズ機構等の仕組みを取り入れることで全体の構成が空間リンク機構を構成することができる。

展開構造として多用されるシザーズ機構は、機構の最小構成が平面リンク機構及び球面リンク機構を構成し、それらの機構を複合的に組み合わせることで空間リンク機構が構成できる。

切込のない折紙による折畳展開機構は、その最小構成が球面リンク機構に、全体の構成が空間リンク機構として構成される。

リンク機構			
クローズドループ			
平面リンク機構	球面リンク機構	空間リンク機構	
		全体構成	最小構成
<p>パンタグラフ構造</p> 	<p>ミウラ折</p> 	<p>切込のない折紙の範囲</p>  <p>四角形ねじり折</p> 	
<p>本研究の範囲</p> 		    	 
<p>シザーズ機構 (マジックハンド)</p>		<p>ホバーマンスフィア</p>	<p>カレイドサイクル サルーの機構</p>

	切込を有する折紙	切込のない折紙	シザーズ機構
1 方向展開			
2 方向展開			
3 方向展開			

3章 スケールモデル制作による機構の検証

3-1 はじめに

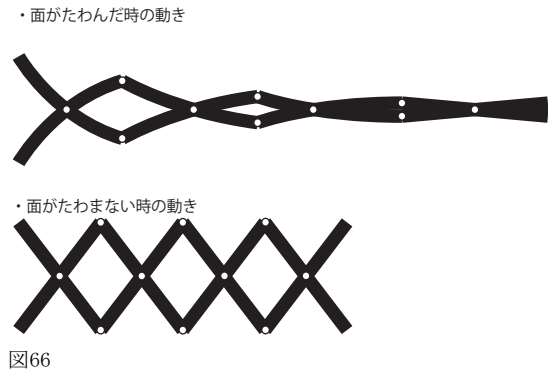
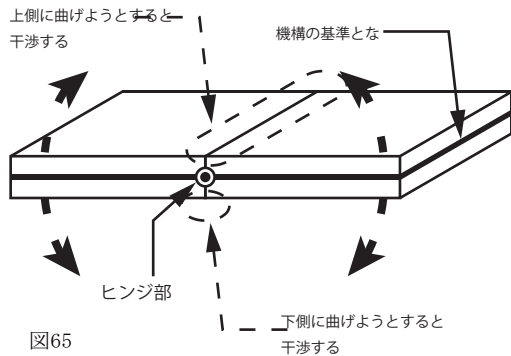
これまで述べてきた切込を有する折紙の折畳展開機構は、厚みのない面をモデルとして考え、また物性についても無限の剛性があるものとして検証を行ってきた。しかし、本研究を実際の空間や用途を持った物に応用しようとする際に、面の厚みや物性を起因とした様々な問題が顕現してくることが予想される。そこで、本章において、切込を有する折紙の折畳展開機構を実用的な機構へと応用する際の課題を考察し、その解決策について検証することを目的とする。また、2章において発展させた切込を有する折紙の折畳展開機構と本章における実用的な機構へと応用する際の課題と解決策を踏まえ、博士制作を行うものとする。

検証の手順として、まず実用化する際に起こる問題（面の厚みや物性等）を探り、その解決策を考案することで、現実の環境下にも応用が可能な可動機構に発展させる。その発展させた機構をもとに、人が一人で扱える程度のスケールを持ったモデル（以後スケールモデルとする）を製作し可動機構としての検証を行なう。最後に制作したスケールモデルの改善案について検証する。

3-2 実用的な機構へと応用する際の課題

面が厚みを持つ際に起こる課題

切込を有する折紙の折畳展開機構を現実の環境下で可動しようとする、可動機構を構成する面の厚みにより、機構的な問題が表れてくる。これまでの機構の検証は、厚みのない面をモデルとして、折畳展開が可能な機構であることを確認したが、機構を構成する面の厚みを考慮すると、面の折れを構成するヒンジ部において面の厚み同士が干渉して面を折ることができず、可動機構として成り立たない事が判明する。（図 79）また、可動機構を構成する面の剛性についても、無限の硬さのある面と仮定して、連続的な運動が可能なことを確認したが、現実的に面に素材の物性を与えると、その素材の剛性により面外方向のたわみが蓄積し、機構の連続的な運動が保障されない事がわかる。（図 80）これらの問題は、可動機構を構成する面が現実の環境下では厚みを持たざる負えないことから起こる問題であり、解決策を講じなければ、スケールモデルに応用できない機構となってしまう。



面の剛性による可動障害

切込を有する折紙の折畳展開機構は、可動時に、面に曲げの力が加わってしまう。そのため、面にある程度の剛性がないと、面がたわんでしまい連続的な運動が行えず、一つの動力で機構全体が可動するといったリンク機構の要素を持てなくなってしまう。

思案点による可動障害

思案点とよばれリンク機構に見られる可動障害が予想される。一定方向への運動が求められているにもかかわらず、複数方向への運動の可能性が存在してしまう位置のことで、切込を有する折紙の折畳展開機構においては、平面状態がその位置にあたる。平面状態から折畳む動作が要求される場合、思案点に対する解決策をほどこさなければ、思い通りの動きを行なうことができない。



図 67 思案点による可動障害

3-3 実用化する際の課題の解決策

3-3-1 面の厚みによるヒンジ部の干渉問題の解決

面の厚みによるヒンジ部の干渉問題は、面の厚みの中間にヒンジ部の回転軸を設けることにより起こる干渉であるため、ヒンジ部を折面の谷側に設けることで解決できる。(図68) この厚みの処理方法は、平面リンク機構の可動条件である折線の軸線が、平行な関係であることを面が厚みを持っていても、保つことが出来るため適用可能である(図69)。

しかし、球面リンク機構においては、面が厚みを持つと、回転ジョイント部の回転軸が面外方向にずれるため、球面リンク機構の可動条件である、折線の軸線(ヒンジ部の回転軸)が空間上の1点で交わることを満たせなくなってしまう。(図70)

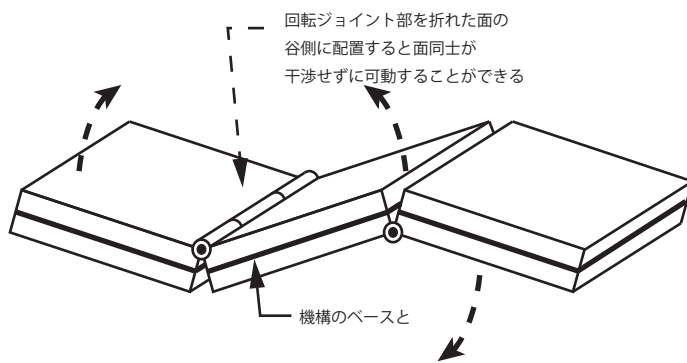


図68 回転ジョイントを折面の谷側にズラす方法

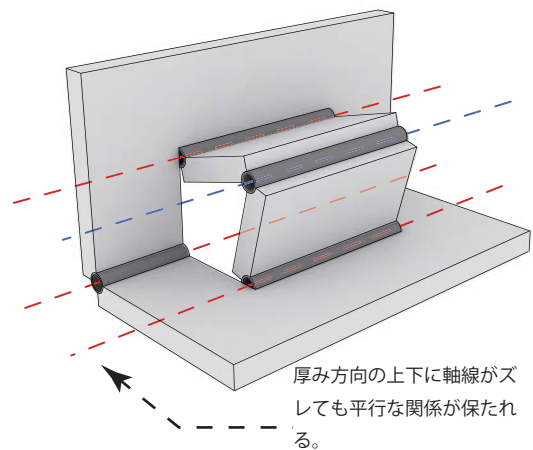


図69 平面リンク機構における厚みの処理

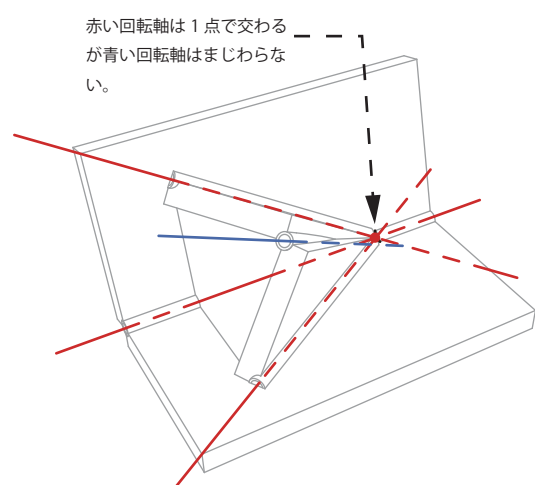
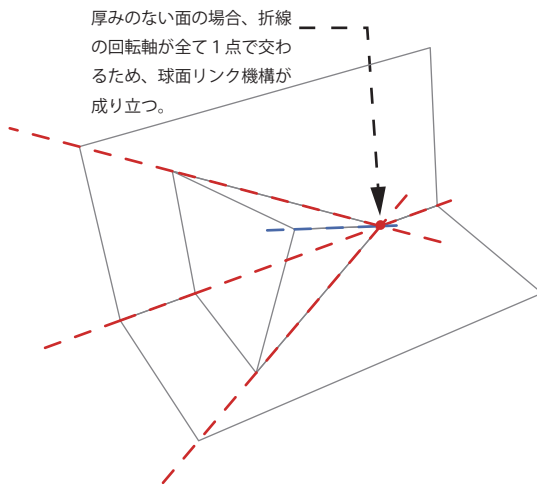


図70 球面リンク機構における厚みの処理

この問題の解決策として、剛体折の機構による可動モデルで舘知宏氏が考案した面の二層構造による厚みの処理方法がある。(3)(図71)

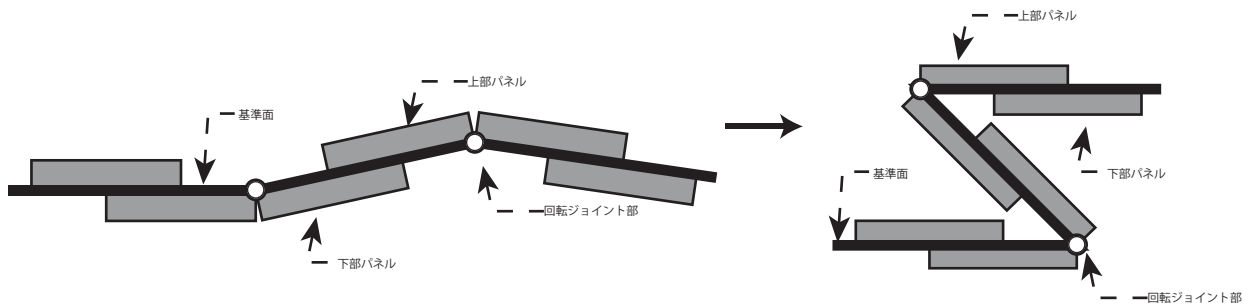


図71 面の二層構造による厚みの処理

この厚みの処理方法は、上部のパネルと下部パネルの2層で、1枚の厚みを持った面を構成するもので、厚みのない面で構成された折面を基準面とし、その上下に厚みを持ったパネルを配置する構成となっている。基準面の折面を境に、山側にパネルの厚みがでるように配置し、パネルが干渉する谷側に厚みがでないよう、谷側のパネルの端を山側にオフセットさせる。(図72, 図73) こうすることで、球面リンク機構の、折線の軸線(回転軸)が空間上の1点で交わるという可動条件をみたしつつ、面の厚みによるヒンジ部の干渉を回避した可動機構が構成できる。この厚みの処理方法は、同じ球面リンク機構を持つ、本研究における、ミウラ折平面シザーズ機構やミウラ折球面シザーズ機構、空間リンク機構といった、複合したリンク機構を持つ機構にも適用することができる。

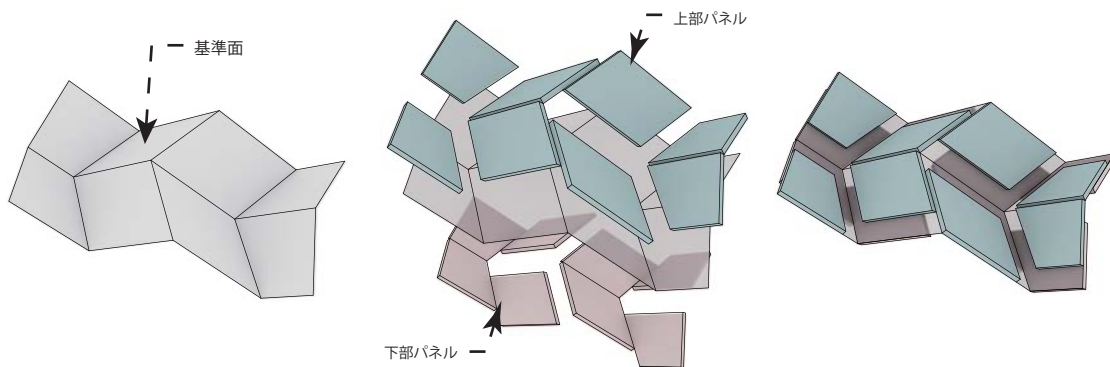


図72 ミウラ折における面の二層構造

(3) 舘知宏, 「四辺形メッシュに基づく剛体折紙デザイン手法」, 『シミュレーション 第29巻 3号 24-29』, 2010

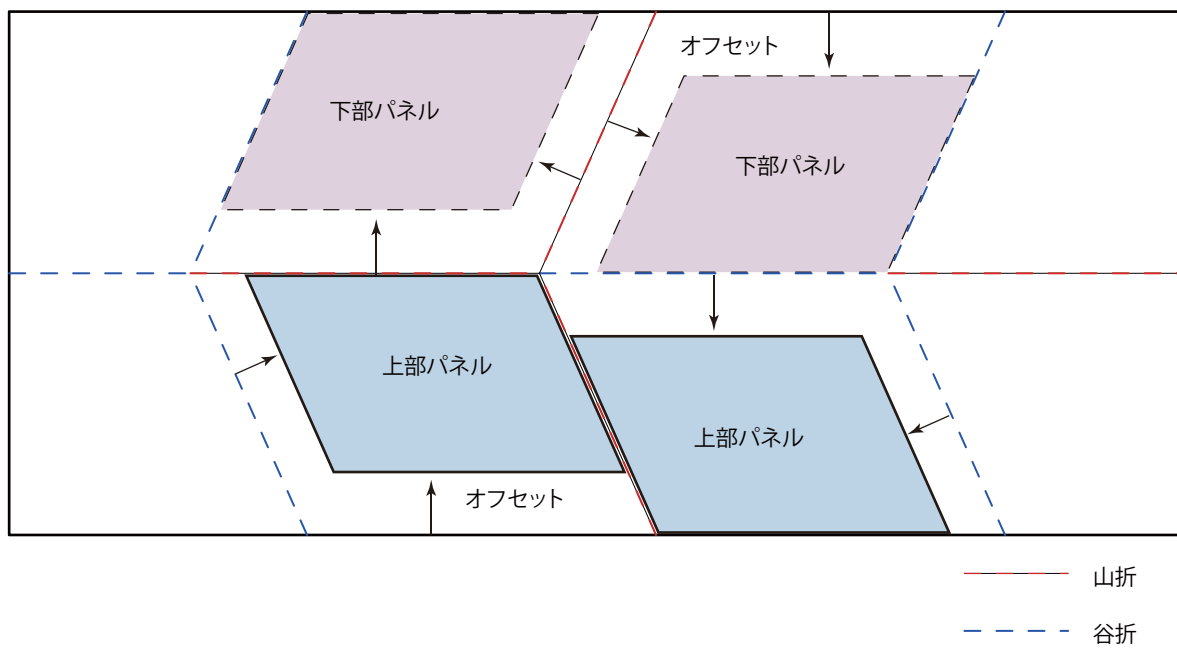


図73 パネルの配置方法

ミウラ折平面シザーズ機構における面の二層構造の構成

ミウラ折平面シザーズ機構は平行リンク機構と球面リンク機構の複合した機構である。そのため、平面リンク機構部においてはヒンジを折面の谷側に設け、ミウラ折となる球面リンク機構部については面の二層構造による処理を行なう混用方法（図74）、平面リンク機構及び球面リンク機構部両方に面の二層構造による処理を行なう方法（図75）の2通りが考えられる。ただし、混用方法による厚みの処理では、機構の組合せを増やすと並行軸機構とミウラ折とのズレが大きくなり、上手く組み合わせることができない。（図76）そのため、ミウラ折平面シザーズ機構における面の厚みは、面の二層構造のみによる処理が望ましいと考える。（図77）にウラ折平面シザーズ機構における面の二層構造のパネル配置を示す。

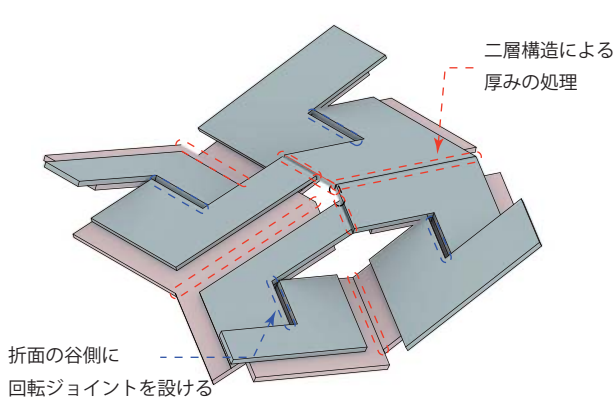


図74 混用方法による厚みの処理

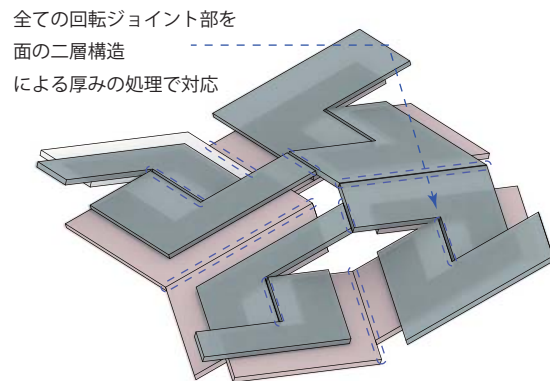


図75 二層構造による厚みの処理

組み合わせを増やすと
ズレが出てしまう

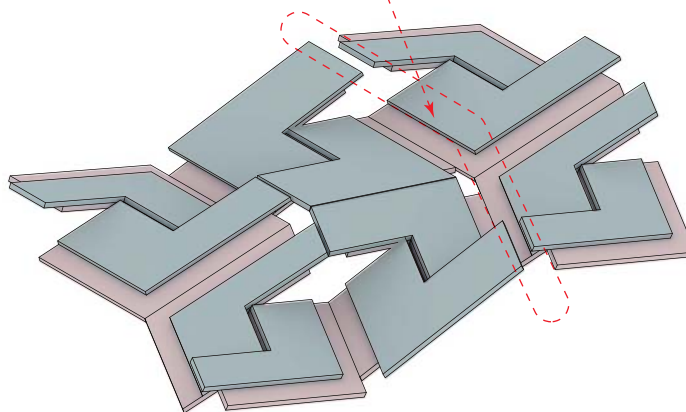
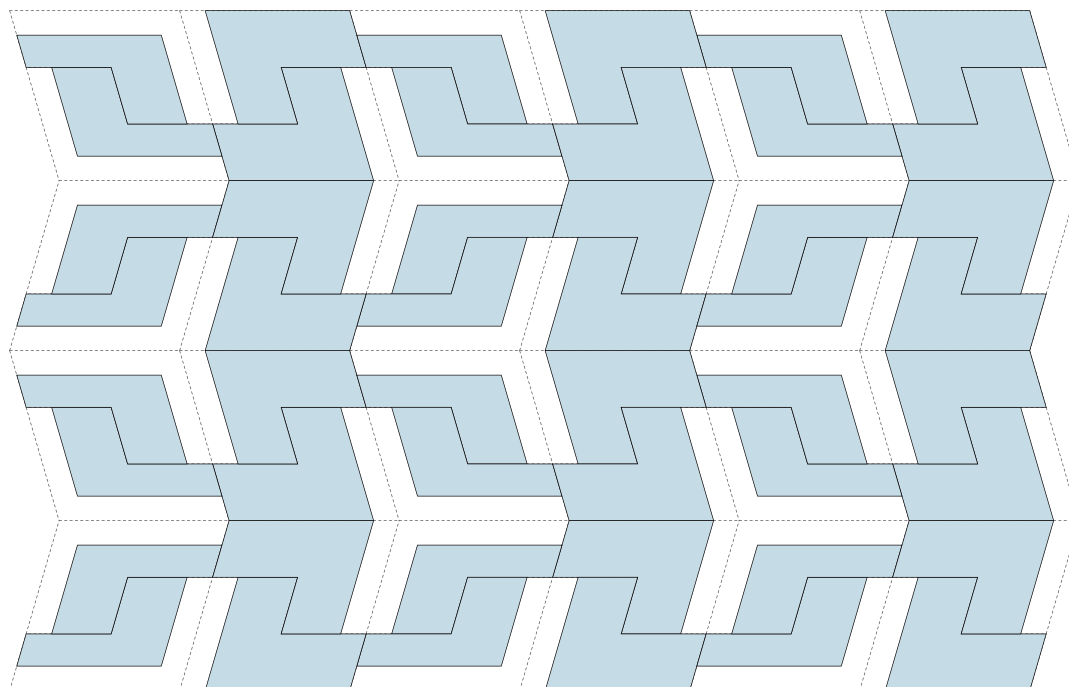
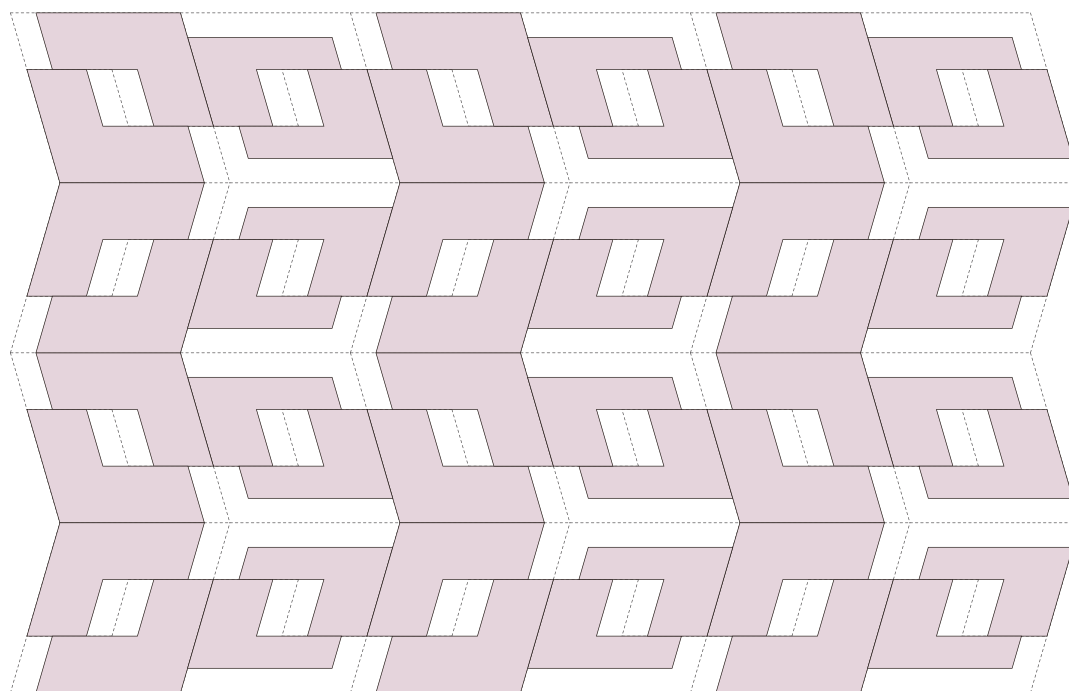


図76 混用方法のズレ

図77 ミウラ折平面シザーズの二層構造のパネル配置



上部パネル配置



下部パネル配置

ミウラ折球面シザーズ機構における面の二層構造の構成

ミウラ折球面シザーズ機構は、全ての可動機構が球面リンク機構となっており、厚みの処理方法は二層構造による処理が可能である。厚みの干渉による可動障害は起こらないが、ミウラ折方向に増設していった場合、ユニット同士の干渉が起こり、上手く稼動しない事がある。折線的设计段階において、角度等を調節する必要がある。

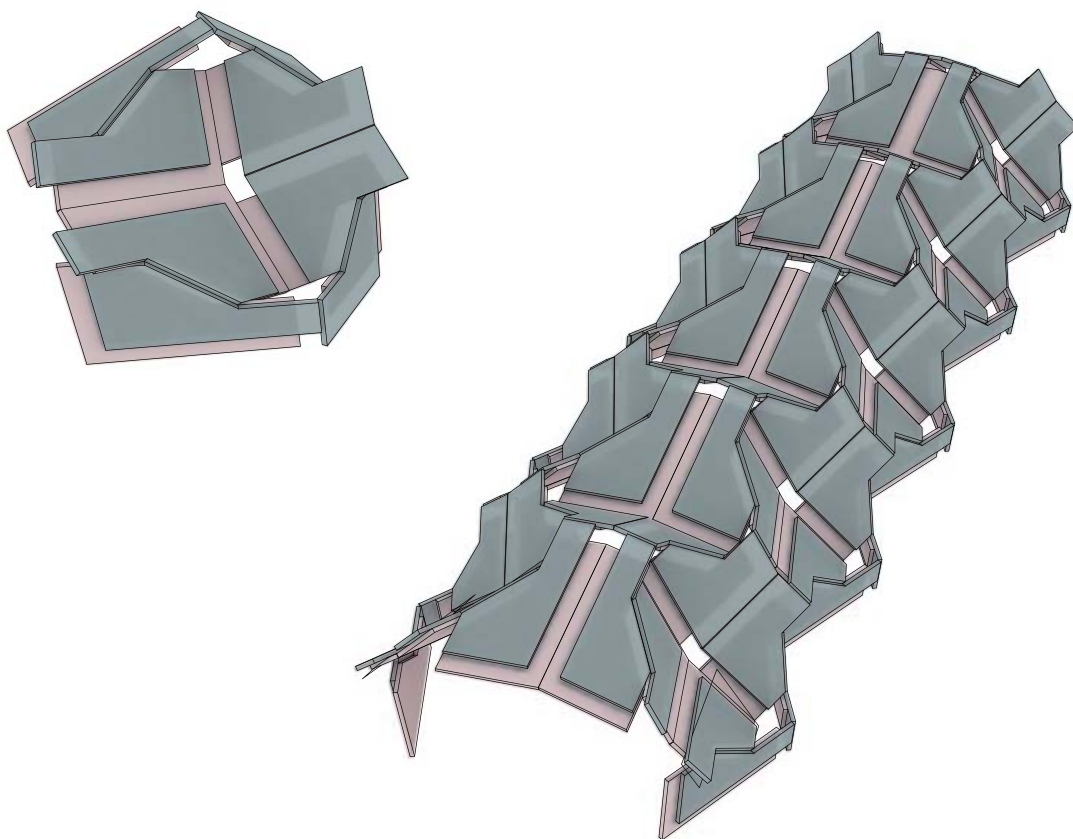
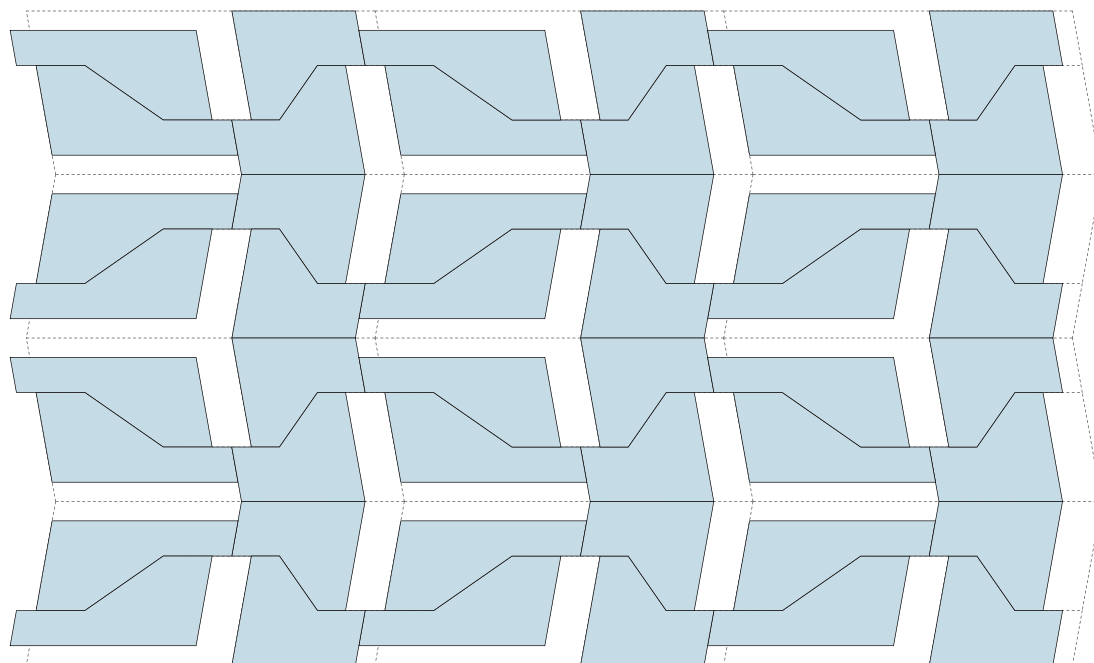
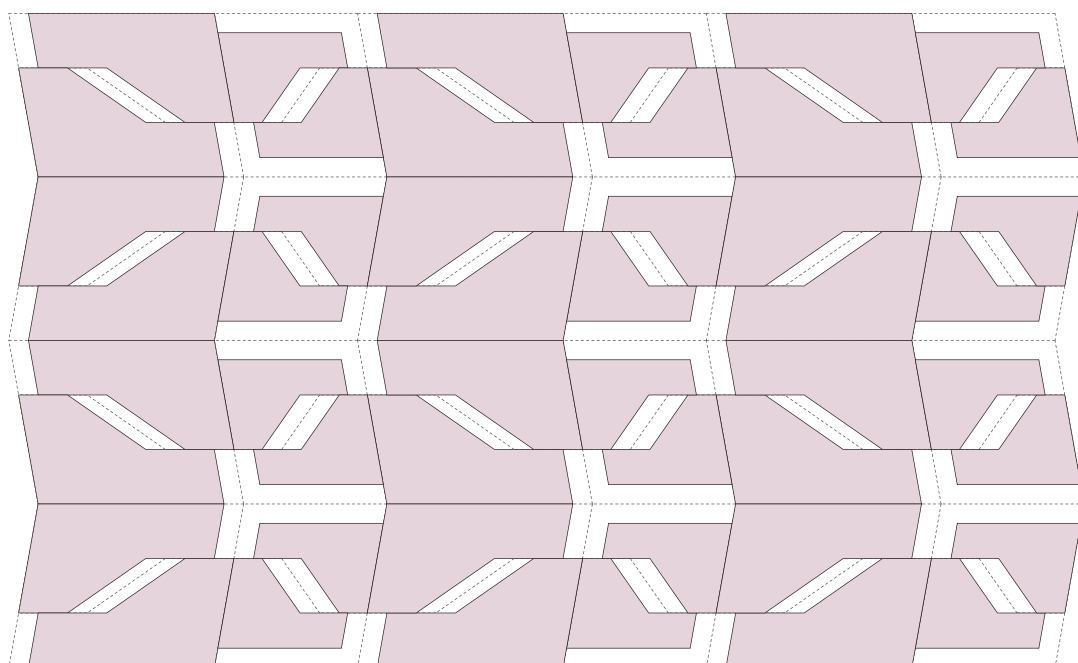


図78 二層構造によるミウラ折球面シザーズ機構

図79 ミウラ折平面シザーズの二層構造のパネル配置



上部パネル配置



下部パネル配置

空間リンク機構における面の二層構造の構成

空間リンク機構も、全ての可動機構が球面リンク機構となっており、厚みの処理方法は二層構造による処理が可能である。ただし、厚みの二層構造による処理方法では、軸線の集中する部分に面の欠損が一部発生してしまう欠点がある。これは、空間リンク機構だけでなく、ミウラ折平面シザーズ機構やミウラ折球面シザーズ機構においても、同じ理由で一部面の欠損が発生する。

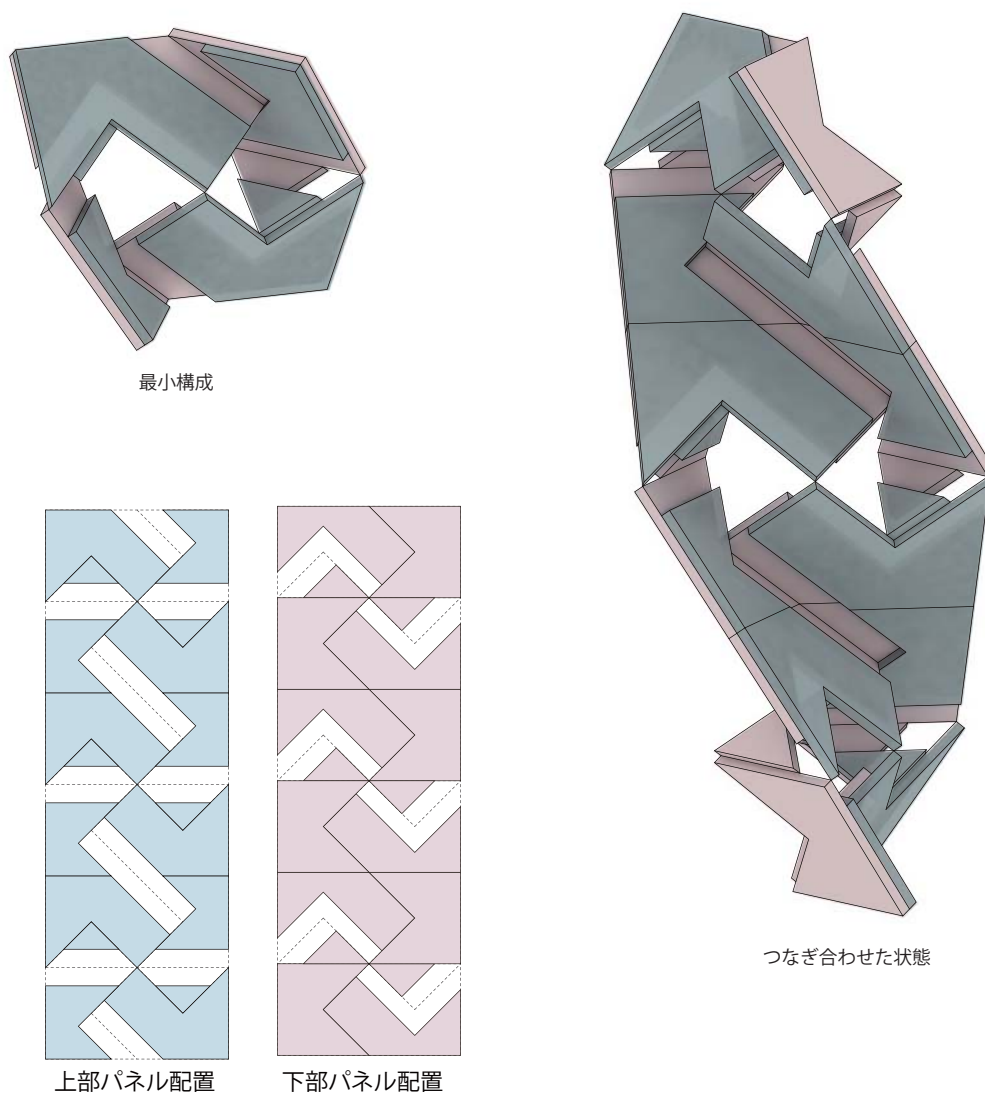


図80二層構造による空間リンク機構のパネル配置

その他の解決策

厚みの二層構造による処理方法は、面に厚みを持たせても、機構の可動条件を保ったまま面の剛性を高めることができる合理的な方法である。面の剛性が高ければ高いほど、より正確な運動を行なうことができ、工学的応用性が高い機構と言える。この処理方法の欠点としては、1枚の面を2枚のパネルで構成するため構成部材の数が増え、形態も複雑になることや、面の欠損が発生する点が挙げられる。

ある程度の面のたわみや動きの遊びを許容することで、面の厚みに対するその他の処理方法をとることができる。

ヒンジ部を柔らかい素材で構成する方法。

機構により正確な運動を求めるとのであれば、二層構造による処理方法が適当であるが、用途や使われ方により動きの遊びなどを、ある程度許容するのであれば、ヒンジ部に柔らかい素材を用いることで面の厚みによる干渉を処理することができる。この方法は面の構成を単純にすることができ、見栄えも良いため、折の表情を強調したい時などに利用できる。

柔らかい素材としてはゴムなどの柔らかい樹脂が適していると思われる。機構の用途や規模により樹脂の柔らかさを調節すれば、動きの遊びをある程度吸収しつつ面の厚みを処理できる可動機構を構成できる。(図 81)

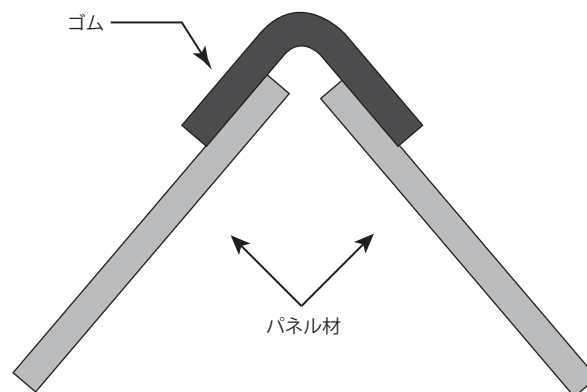


図 81 ゴムによるヒンジ

屏風兆番によるヒンジ

面にある程度のたわみを許容するのであれば、屏風兆番を用いたヒンジで面の厚みによる干渉を処理することができる。屏風兆番とは、日本古来の移動式間仕切りである屏風の連結部に用いられている兆番（ヒンジ）である。この兆番の特徴は面がどんなに厚みを持っていても 360° 回転させることができ、本研究の機構のヒンジ部分にも適用することができる。

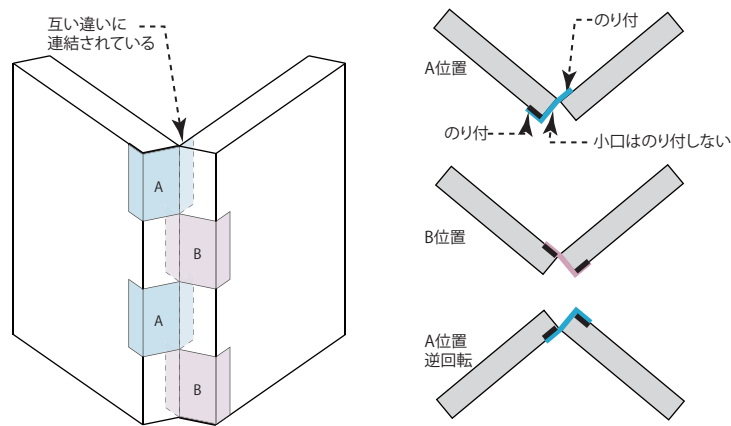


図82 屏風兆番

ギアヒンジ

ギアヒンジとは、アコーディオンドア等に用いられているヒンジで、パネル同士の接合部が歯車によってかみ合い連結されたヒンジのことをさす。もう一方のパネルにモーメントを伝えることができるのが特徴である。面にある程度のたわみを許容する場合、パネルの厚みによる干渉を回避できる。欠点としては、ある程度パネルに厚みが要求され、また、機構も複雑になる。

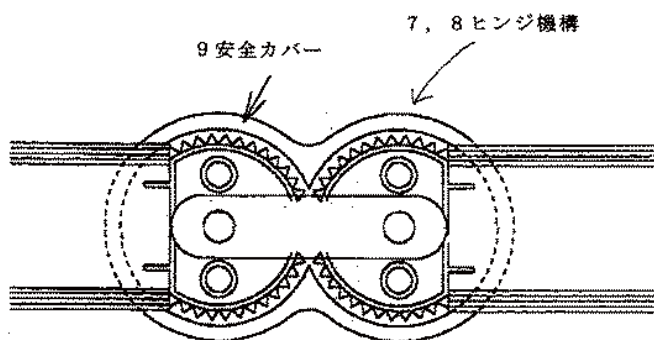


図83 ギアヒンジ <http://j.tokkyoj.com/jtokkyof/309/3099809.gif>

3-3-2 面の剛性による可動障害の解決

面の剛性を高める方法は2つ考えられる。一つは、面の厚みを大きくすることで断面性能を高める方法。もう一つは、剛性の高い素材を用いる方法である。

面の厚みを大きくすると、部材同士の干渉の問題が起きるが、前に述べた、面の二層構造による厚みの処理方法を適用すれば、剛性を高めつつ可動に支障のない機構を構成できる。

剛性の高い素材を用いる方法は、面の厚みが小さくすむため、構成された機構の見栄えが良く、回転ジョイント部に柔軟な素材を用いれば構成が単純なものにできる。剛性の高い素材としては、部材断面が小さくても剛性が高く軽量のCFRPが挙げられるが、用途や大きさによって、それにふさわしい素材が変わるため、一概には言えない。用途や規模が決定してから、使用する素材を決定することが適切であると考えられる。

3-3-3 思案点による可動障害の解決策

思案点への対策として、回転ジョイント部におけるパネル間の微細な隙間を無くすため、制作精度をより高めるか、初期状態を平面状態ではなく、正しい方向へ少し曲げた状態になるようパネルの断面形状を工夫する方法が考えられる。正しい方向へ少し曲げた状態による解決策については、回転ジョイント部をまたぐ断面形状を図84のようにすることで、適切な方向へ面が折れ曲がるよう誘導する。

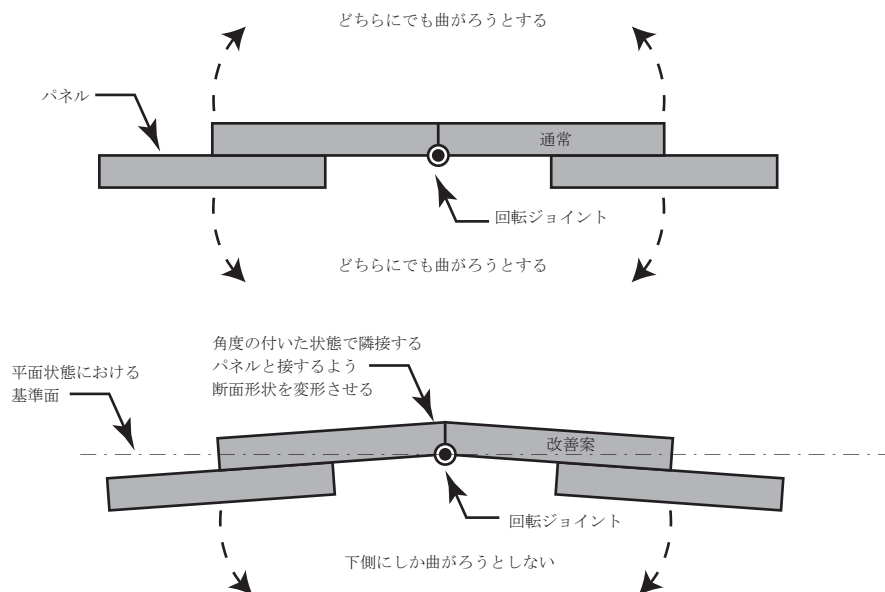


図 84

3-4 スケールモデルの制作

これまで検証してきた、厚みを持った際に起きる問題などの解決策をふまえながら、ミウラ折平面シザーズ機構を用いたスケールモデルの制作を行なう。ミウラ折平面シザーズ機構は、平面リンクと球面リンク機構両方の構成を持っており、一度に両方を検証できることから採用した。また、これは博士制作で制作予定の可動オブジェのモックアップも兼ねている。

3-4-1 ミウラ折平面シザーズ機構のパターン

ミウラ折平面シザーズ機構のスケールモデルを製作するにあたり、可動機構の動きや面の表情を決める、折線や切込などを配置した図（パターン）を設計しなければならない。折線や切込の配置パターンは無限にあるが、設計に際して以下の項目を基準として設計する。

- ・折線の配置について、平面シザーズ機構が連なった列の折畳まれた形状が、できるだけ短くなるよう、平面リンク機構の折線の角度が鋭角になり過ぎないように設計する。これは、折畳まれた形状をコンパクトにするためである。

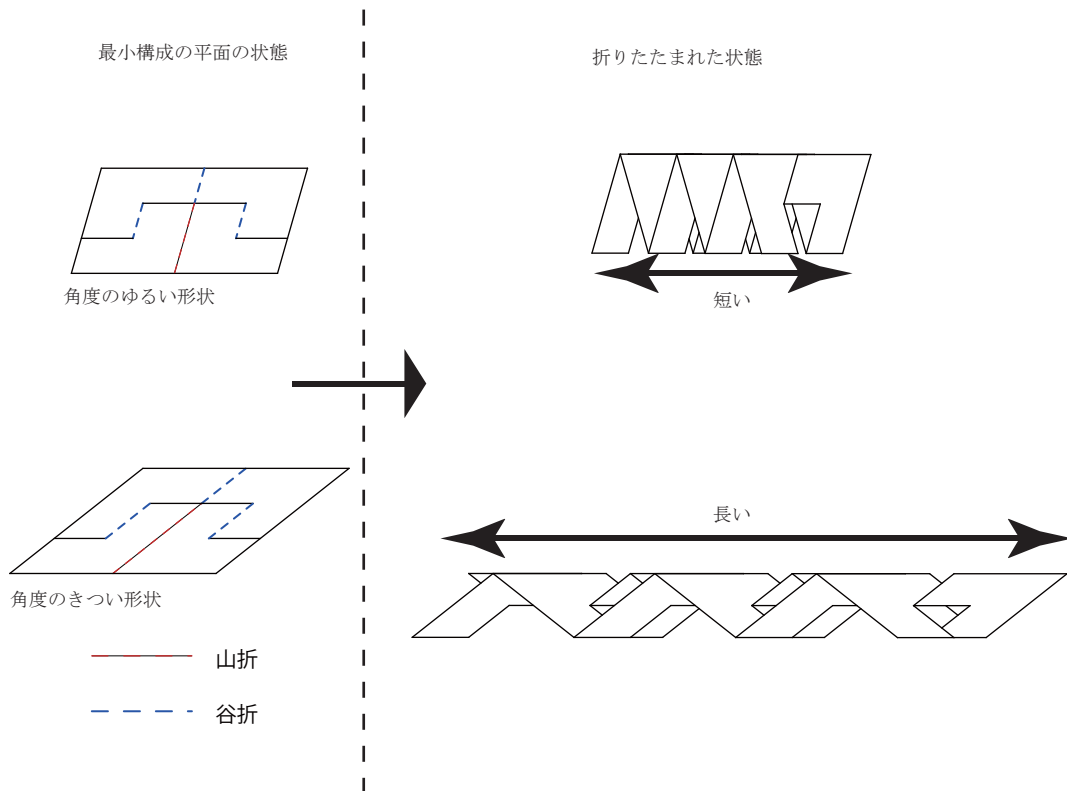


図 85 折線の角度による収納状態の長さの違い

- ・切込み線の配置について、ヒンジとなる辺の長さが著しく短くなったり、長さのバランスが悪くならないよう配慮する。これは、可動時にヒンジに負荷がかかるため、短いヒンジや長さにバラつきがあると、ヒンジ部で破損が起きるためである。

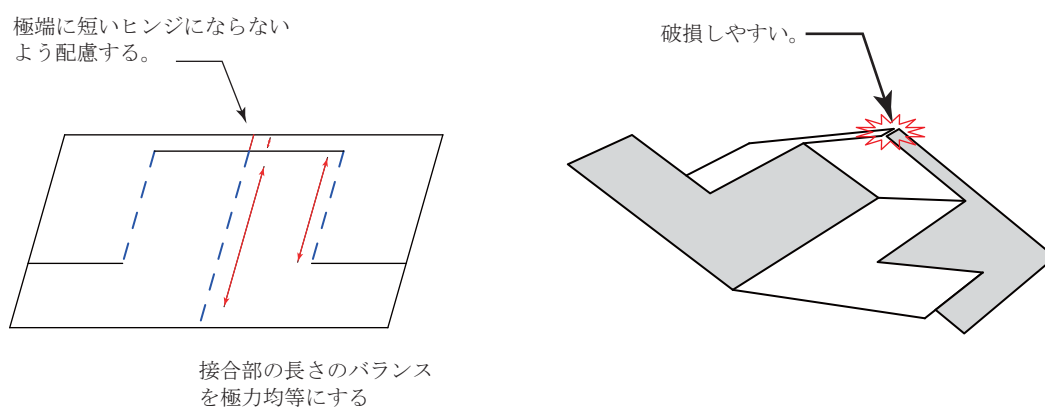


図 86 折線および切れ込み位置のバランス

以下の図はこれらの項目をふまえた、折線と切込の配置パターンである。機構の構成数はミウラ折と平面リンク機構の可動及び増設が検証できる数とした。

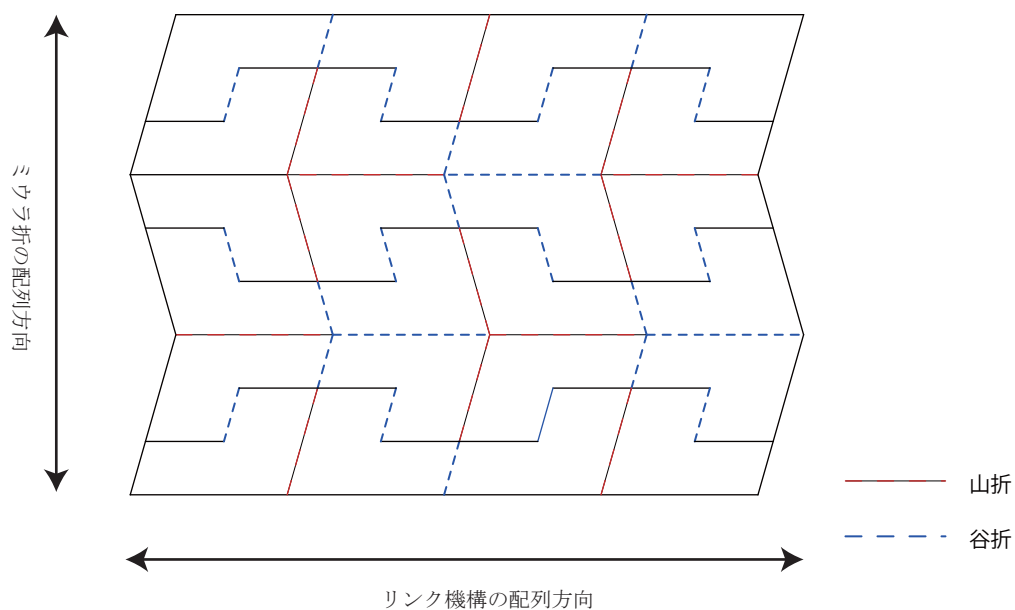


図 87 折線切れ込み線の配置

3-4-2 スケールモデルのサイズ

スケールモデルのサイズは、機構の可動が人の手によって操作できるサイズとした。

全体の寸法	幅：1224mm×高さ：1600mm
シザーズユニットの寸法	幅：408mm×高さ：400mm
展開時の面積	約 2075294mm ²
折畳時の面積	約 307065mm ²
収納効率（展開時の面積 / 折畳時の面積）	約 6.76

3-4-3 厚みの処理について

面（パネル）の剛性や折畳展開運動の可動が合理的な、二層構造による面の厚みの処理を採用した。

3-4-4 スケールモデルの素材

面材（パネル）については、加工がしやすく材質の比較的均質な MDF（木質繊維板）を採用し厚みは上部パネル、下部パネルともに 3mm とした。

ヒンジ部については、動きの遊びが少ない鉄製の蝶番を採用した。面材との取り付けは材質の違いとボルト同士の干渉を考慮して低頭ボルトによる接合とした。

3-4-5 加工方法

パネルの形状、蝶番の取り付け位置など、できるだけ正確な成形が求められるため、加工精度の高いレーザーカッター機器でパネルの切り出しを行なう。

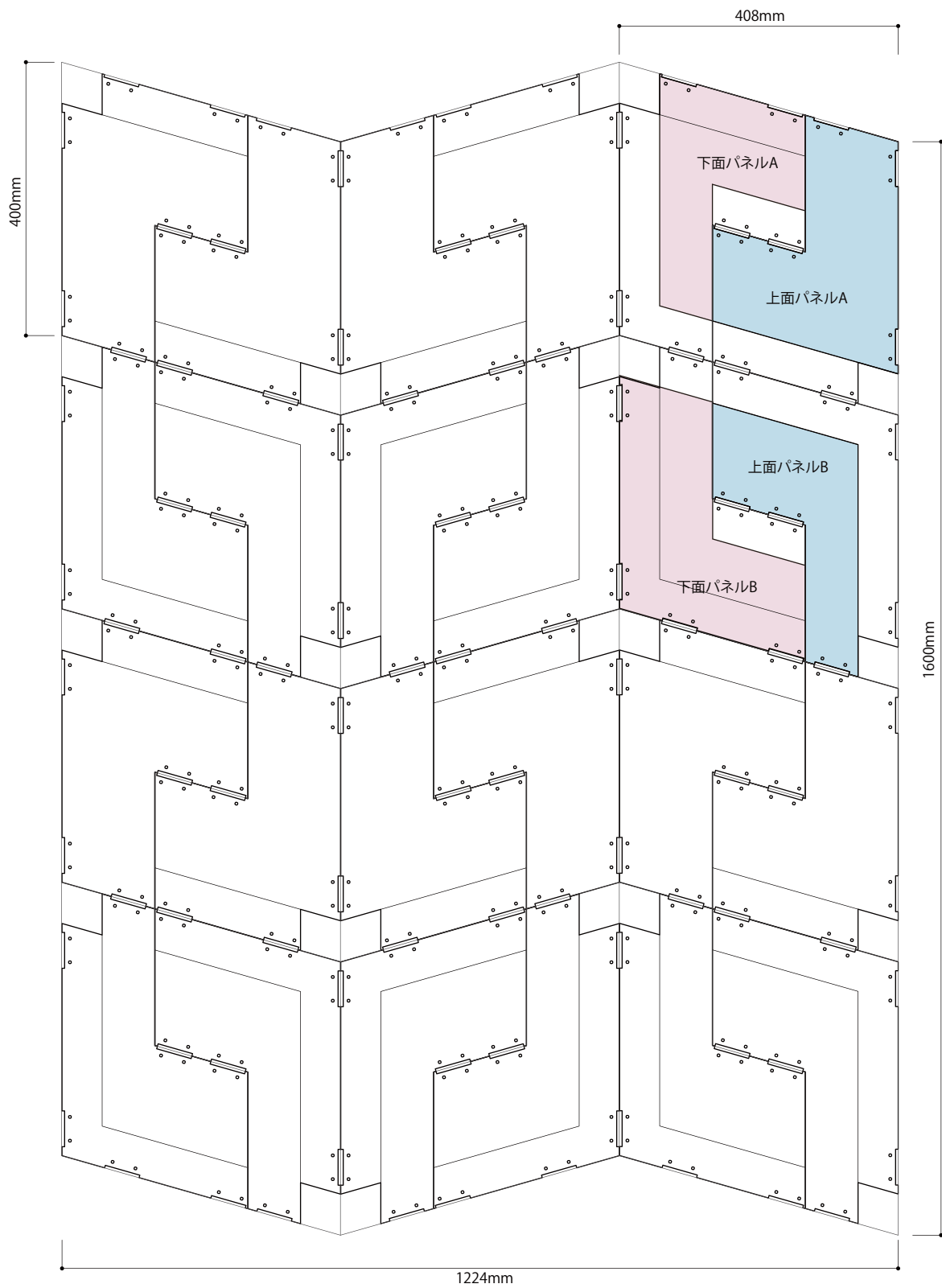
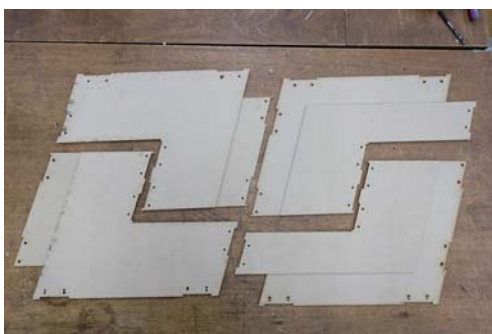


図 88 スケールモデル設計図

3-4-6 スケールモデルの組み立て



1. 上部パネルと下部パネルを張り合わせる



2. 張り合わせたパネルと兆番を接合



3. 数の多いの谷折の兆番をまとめて接合することで、全体の精度を高める

図 89



4. 最後に裏返しにして、反対側の兆番を接合する。これを、必要数繰り返す。

3-4-7 スケールモデルの動き（最小構成）



1. 平面の状態。この時、思案点が発生する可能性がある。



2. やや折畳んだ状態



3. 各面が90°をなすよう折畳んだ状態

図 90

スケールモデルの動き（全体構成）



1. 平面に近い状態



2. やや折畳んだ状態

3. 各面が 90° をなすよう折畳んだ状態

図 91



4. 可動できる範囲で折畳みきった状態。

3-4-8 スケールモデルの制作を通して見えた課題

二層構造による面の表情

制作したスケールモデルはパネルの厚み処理のため、1枚の面が2枚のパネルによって構成される二層構造となっている。そのため、パネル同士の接合箇所に段差ができてしまい、厚みが大きくなればなるほど、1枚の面とは認識し難くなってしまう。面の表情を1枚のように見せたい場合では段差の処理を考える必要が出てくる。



図 92

二層構造による面の表情の改善

段差の処理については、二層構造による厚みの処理を発展させ、図 93 のようなパネルの断面形状とすることで、二層構造による段差を解消し、かつ二層に見える面を一層の面に見えるよう改善することができる。

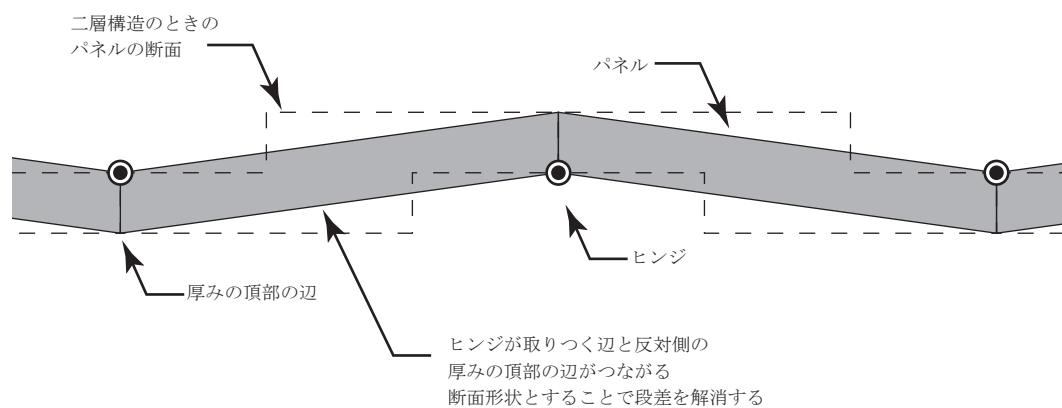


図 93 二層構造の発展

3-5 スケールモデルの改善案

これまで、切込を有する折紙の折畳展開機構を実用的な機構へと発展させるために、予想される問題や、実物の制作を通して新たに見えてきた問題について、改善策を導いてきた。それらの改善策をふまえ、より完成度の高いスケールモデルのあり方について提案する。なお、この改善策をふまえたスケールモデルをベースに博士制作における可動オブジェを計画する。

改善策をふまえたスケールモデルの提案

スケールモデル（改善案）の形状

下の図 109 は可動機構の最小構成の上面図及びヒンジをまたぐように切った断面図である。

全体の形状はスケールモデルの制作で用いた形状を踏襲している。断面形状については、思案点による可動障害を考慮しつつ、2層構造による厚みの処理を発展させ、1層で厚みを処理できる形状としている。その分複雑な形状となり制作が難しくなるが、レーザーカッターや3Dプリンタといったデジタルファブリケーション機器を用いれば十分に可能である。

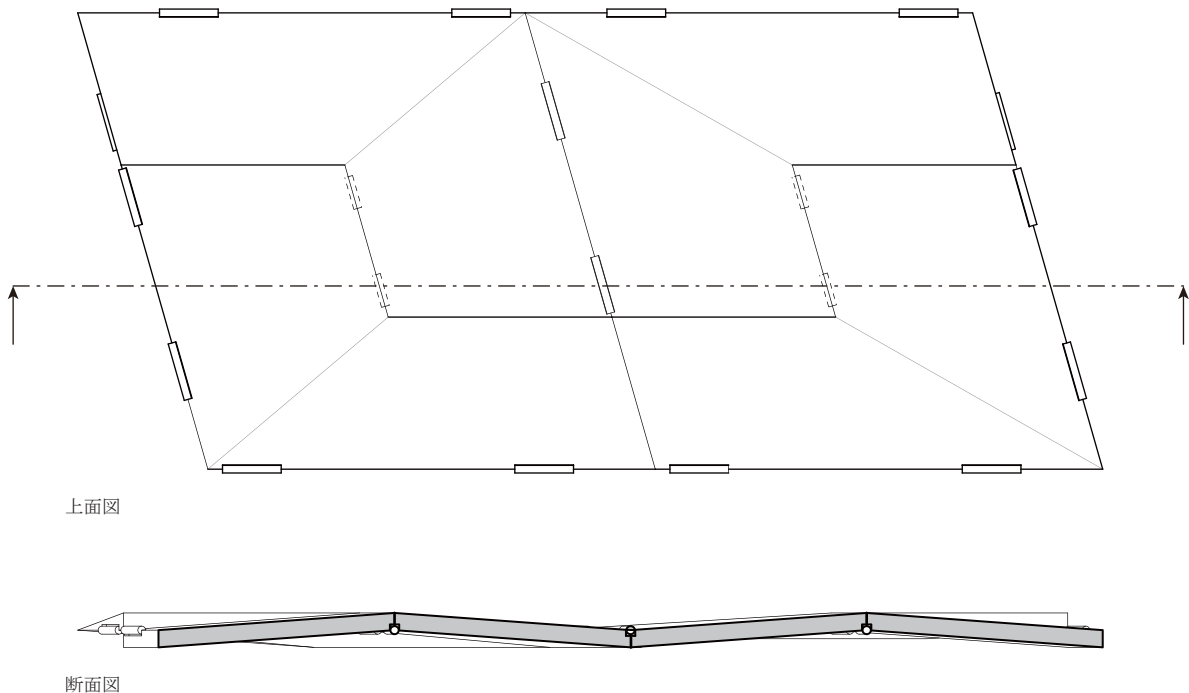


図 94

スケールモデル（改善案）の規模

本章で行ったスケールモデルの制作では、全体の大きさが $1600 \times 1600\text{mm}$ 程度のものがあったが、パネルの厚みや剛性の高い素材、これまで述べてきた改善策を用いることで、さらに大きいサイズのスケールモデルを制作することができる。

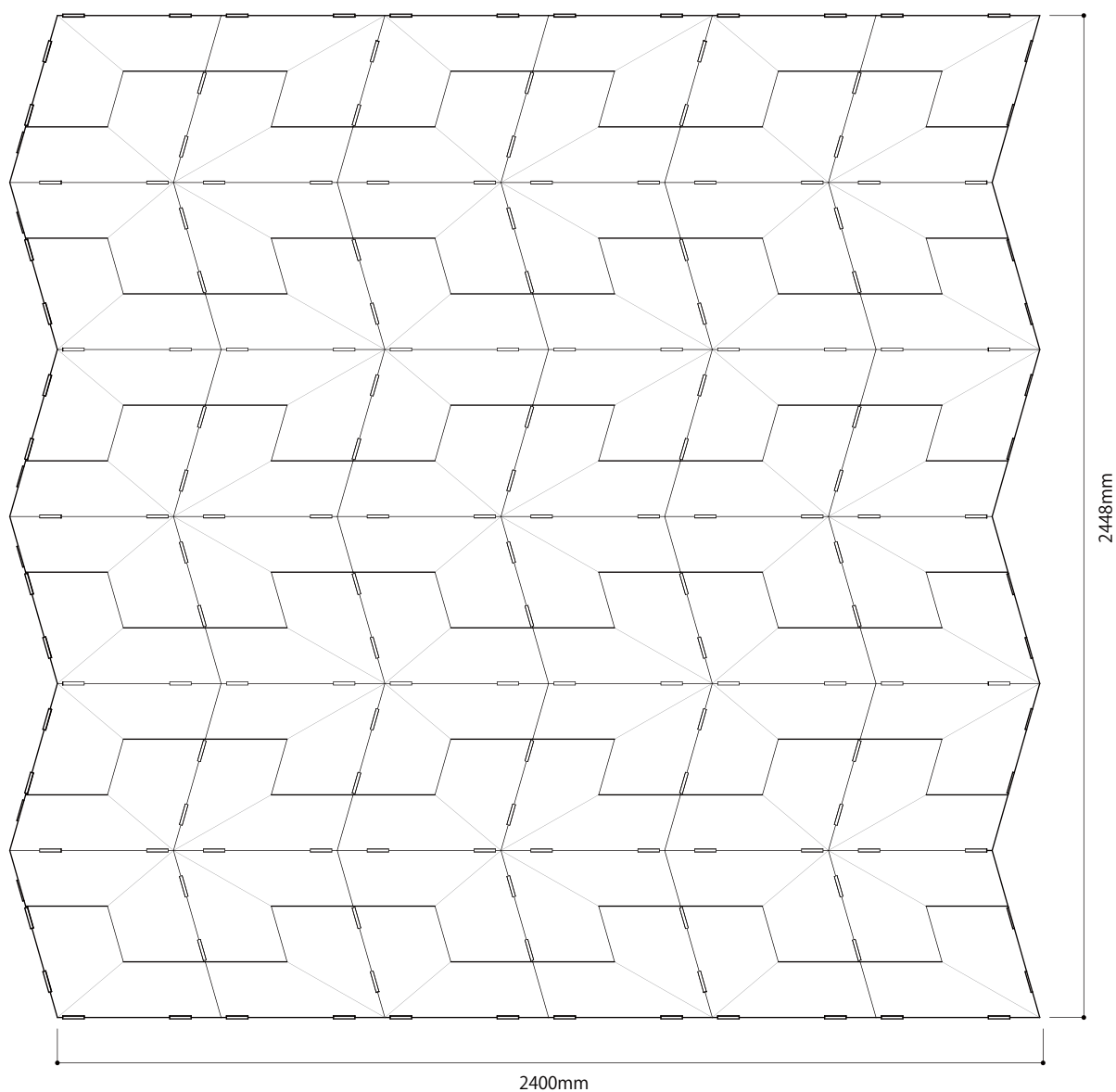


図 95

スケールモデル（改善案）の動き

思案点による機構の可動障害は、二層構造による厚みの処理と合わせて、パネルの断面形状を改善することで回避できる。また、ボルト同士の干渉による可動範囲の減少は組ネジを採用することで、パネル表面への突出がなくなり抑制できる。これらの改善策により、実用性の高い折畳み展開機構が制作できる。

CGシミュレーションによる最小構成の動き

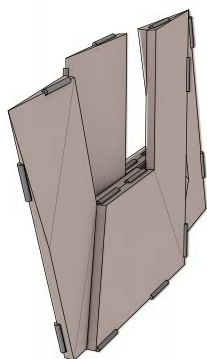
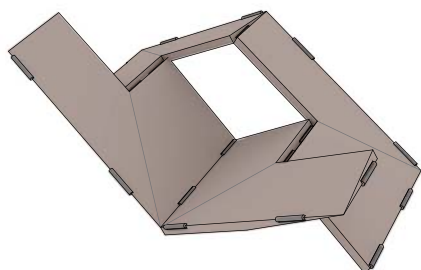
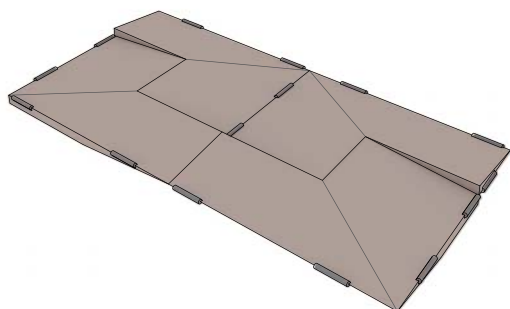


図 96

全体の動き

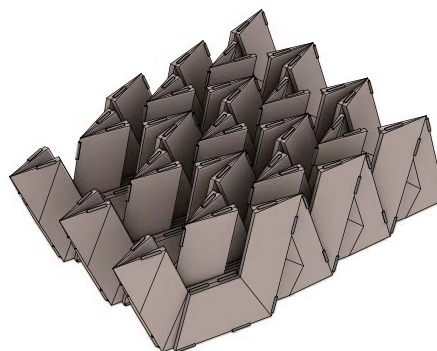
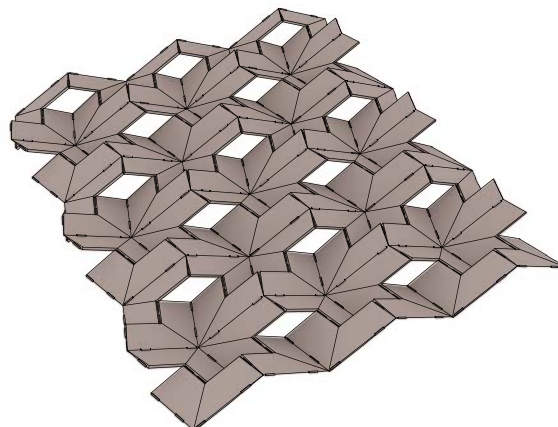
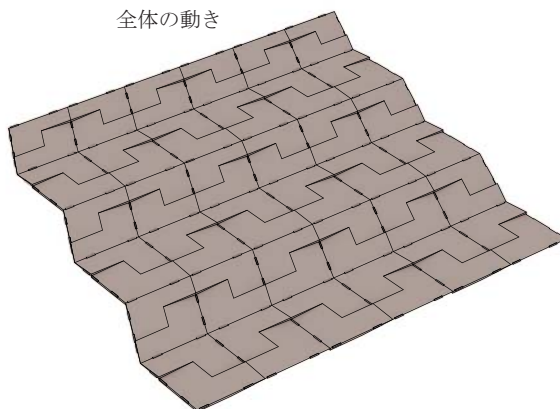


図 97

4 章 結論

4-1 各章のまとめ

1 章のまとめ

切込を有する折紙について、既存の折紙工学や展開構造物の仕組みとの類似性から、工学的、デザインの応用の可能性があることを指摘した。

2 章のまとめ

切込を有する折紙の折畳展開機構は、既存のリンク機構の分類をもとに、3種類の構成方法を導いた。一つは単純な動きを見せる平面リンク機構による構成。二つ目は可動の変化が大きい球面リンク機構による構成。三つ目はより複雑な動きが可能な空間リンク機構による構成である。

切込を有する折紙の平面リンク機構による構成は、まず、可動するための条件と平坦に折畳むための条件を導き、次に構成的にシンプルなシザーズユニットの構成を一枚の平面に置き換え組み合わせることでシザーズ機構を構成した。同じシザーズ機構を接続していくことで、収納効率の高い1方向の折畳展開運動が行える機構を設計することができた。

この構成をふまえながら、折線の配置関係を工夫することでミウラ折を構成し、2方向の折畳展開運動が行える機構を考案した。また、折線や切込の配置を変えることで、様々な動きを見せる折畳展開機構を構成した。

切込を有する折紙の球面リンク機構による構成も平面リンク機構と同じように、シザーズ機構の構成を取り入れることで、1方向の折畳展開運動が行え、構成部材の面材が平面リンク機構とは違った動きを見せる機構を設計することができる。その構成とミウラ折の構成を組み合わせることで、2方向に折畳展開運動するアーチ状の機構を構成した。また、折線や切込の配置を変えることで、様々な動きを見せる折畳展開機構を構成した。

空間リンク機構は、2つの球面リンク機構が1枚の平面内に構成できることに注目し、互いに連動するよう折線や切込線の配置を工夫することで、最小構成においての空間リンク機構が構成できた。一般的なリンク機構が限定動作（1自由度）を行なうためには4節のリンク機構でなければならないが、この切込を有する折紙による空間リンク機構は最小構成においても6節のリンク機構であり、より複雑な可変を行なうことができる。この機構を発展させ、捻れるような折畳展開運動を行なう構成や、面的に配置しつつ1方向のみの折畳展開運動を行なう構成などが設計できた。

3章のまとめ

まず、2章までに検証してきた切込を有する折紙による折畳展開機構の、実用化の際に起こる、面の厚みによる干渉や思案点による可動障害、剛性に関する可動障害を検証し、解決策を考案した。それら解決策をふまえて、実物の機構としてスケールモデルの制作を行ない、可動機構としての実用性について追及した。また、新たに発見された、二層構造による見栄えの改善などの問題に対しても改善策を考案し、発展したスケールモデルについて計画した。

4-2 結論

- ・切込を有する折紙はリンク機構としての要素を持っており、限定動作（1自由度）が行える機構として捉えられる。これにより、切込を有する折紙によるリンク機構は剛性のある面材などを構成部材として想定した時に有効な可動が行える機構としての仕組みを持っていると言える。
 - ・切込を有する折紙が成り立つ条件を導くことで、デザイン可能な範囲が判明した。
 - ・切込を有する折紙を実用的な用途での応用例が多いシザーズ機構へと発展させることで折畳展開機構の重要な要素である収納効率（展開時の面積 / 折畳時の面積）の高い構成が可能である。
 - ・切込を有する折紙は、平面リンク機構、球面リンク機構、最小構成における空間リンク機構が構成できるのに対して、切込のない折紙は最小構成において球面リンク機構及び空間リンク機構が構成できるが平面リンク機構は構成できない。このことから切込を有する折紙は3種類のリンク機構が構成でき、またシザーズ機構やミウラ折といった他の可動機構の仕組みも構成できることから機構として多様性があると言える。
 - ・可動方向の数について切込を有する折紙は、1方向、2方向、3方向のいずれも構成することができ、可動機構として多様性が高いと言える。
 - ・実際に厚みや剛性などを考慮した際に起こる課題と解決策をふまえて可動モデルを製作することで、現実的に有効な可動が行える機構であることを確認した
- 以上の結果から、切込を有する折紙の折畳展開機構は工学的デザインの応用が可能な機構であると言える。
-

4-3 今後の課題

本研究は切込を有する折紙の可変の仕組みを解明し、工学的応用性（様々な用途に用いることができること）のある折畳展開機構へと発展させることを目的とした。しかし、より高い工学的応用性を持つためには、様々な条件下においても設計できる手法や、デザイナーの求める形にできうる限り近い設計を導くための、数理的な構造を解明する必要がある。また、本研究をより広い範囲で応用するためには、可動させるために必要な動力のあり方やより具体的な用途を対象にした追及をしていく必要がある。このような様々なテーマを、今後扱っていき、より工学的に応用性の高い研究を目指す。

引用・参考文献

引用文献

- [1] 野島武敏 萩原一郎著, 「折紙の数理とその応用」, 『シリーズ応用数理 3巻 p2』, 日本応用数理学会, 2012
- [2] 渡辺克己, 「みんなの機構学 (2) 飛び出す絵本の仕掛け (その2)」, 『機械の研究 64 (2), 159-165』, 養賢堂, 2012
- [3] 近藤慎輔、川口健一, 「シザーズ型展開構造物の単層ラチスドームへの適用に関する研究」, 『生産研究 第52巻 第4号, p23』, 2000
- [4] 山田学, 「解説1 機構の基本要素」, 『機械設計 第54巻 第3号, p18』, 日刊工業広告社, 2010
- [5] 渡辺克己, 「みんなの機構学 (2) 飛び出す絵本の仕掛け (その2)」, 『機械の研究 64 (2), p160』, 養賢堂, 2012
- [6] 舘知宏, 「四辺形メッシュに基づく剛体折紙デザイン手法」, 『シミュレーション 第29巻 3号 P24』, 2010
- [7] 曾根朋久、鈴木啓祐、川口健一、大家俊治, 「リユース可能な展開型アーチ構造物の開発と展開実験に関する研究」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 805』, 2009
- [8] 井上健一、川口健一、萩芳郎, 「オフセット型シザーズユニットを用いた展開型 Hoop-Column 構造に関する基礎的研究」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), P837』, 2011
- [3] 渡辺克己, 「みんなの機構学 (1) 飛び出す絵本の仕掛け (その1)」, 『機械の研究 64 (1), 43-50』, 養賢堂, 2012
- [6] 斉藤 公男, 『空間 構造 物語』, 彰国社, 2003年
-

参考文献

- (1) 舘知宏, 『計算折り紙幾何学に基づく建築形体デザインシステムに関する研究』, 学位論文要旨, 2010
 - (2) 山田学, 「解説 1 機構の基本要素」, 『機械設計 第 54 巻 第 3 号, p18』, 日刊工業広告社, 2010
 - (3) 舘知宏, 「四辺形メッシュに基づく剛体折紙デザイン手法」, 『シミュレーション 第 29 巻 3 号 24-29』, 2010
 - (4) 渡辺克己, 「みんなの機構学 (2) 飛び出す絵本の仕掛け (その 2)」, 『機械の研究 64 (2), 159-165』, 養賢堂, 2012
 - (5) 川崎敏和, 「高次元の平坦折り紙について」, 『佐世保工業高等専門学校研究報告 第 25 号 187-195』, 1988
- 井上健一、川口健一、萩芳郎, 「オフセット型シザーズユニットを用いた展開型 Hoop-Column 構造に関する基礎的研究」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 837-838』, 2011
- 寺田絵美、川口健一、新谷真人, 「回転型ジョイントによるシザーズ型展開構造物の基礎的考察と提案」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 811-812』, 2010
- 鈴木啓祐、大矢俊治、川口健一, 「リユース型展開アーチ構造物の開発に関する基礎的検討」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 967-968』, 2008
- 三浦公亮, 「展開宇宙構造物の発想」, 『日本機械学会誌 第 90 巻 第 828 号 2-8』, 1987
-

三谷純, 「軸対称な立体形状を内包する立体折り紙の設計手法」, 『シミュレーション 第29巻 第3号 36-42』, 2010

杉山文子、野島武敏. 「折紙による 3D 幾何学モデルの開発」, 『Dynamic and Design Conference 2007 CD-ROM 論文集 [日本機械学会]』, 2007

杉山文子、野島武敏, 「多面体膜構造の収納モデル」, 『Dynamic and Design Conference 2007 CD-ROM 論文集 [日本機械学会]』, 2007

野島武敏、杉山文子, 「折紙の工学化とその課題」, 『シミュレーション 第29巻 第3号 4-11』, 2010

野島武敏, 「折紙の数理化とその学術的応用 : 主に折紙の工学化について」, 『応用数理 271-284』, 2008

岸本直子、請川克之、樋口健、名取通弘, 「生物における形態変化の特性とその工学的応用に関する考察 - 膜面展開構造物システムの観点から -」, 『日本機械学会 2003 CD-ROM 論文集』, 2003

小林秀敏, 「植物の葉や花に見られる展開構造」, 『生産と技術 第60巻 第1号 91-93』, 2008

野島武敏、杉山文子, 「白銀比・黄金比と折紙構造」, 『日本機械学会 [No. 09-23] Dynamics and Design Conference 2009 CD-ROM 論文集』, 2009

杉山文子、野島武敏, 「折紙による 3D 幾何学モデルの開発」, 『日本機械学会 [No. 07-8] Dynamics and Design Conference 2007 CD-ROM 論文集』, 2007

岸本直子、樋口健、請川克之、名取通弘, 「生物における形態変化の特性とその光学的応用に関する考察 - 膜面展開構造物システムの観点から -」, 『日本機械学会 [No. 03-7] Dynamics and Design Conference 2003 CD-ROM 論文集』, 2003

十亀昭人、古谷寛、「筒状宇宙展開構造物の概念とその幾何特性」、『日本建築学会計画系論文集 第527号 149-154』, 2001

渡辺克己、「みんなの機構学 (1) 飛び出す絵本の仕掛け (その1)」、『機械の研究 64(1), 43-50』, 養賢堂, 2012

渡辺克己、「みんなの機構学 (2) 飛び出す絵本の仕掛け (その2)」、『機械の研究 64(2), 159-165』, 養賢堂, 2012

渡辺克己、「みんなの機構学 (3) 飛び出す絵本の仕掛け (その3)」、『機械の研究 64(3), 227-233』, 養賢堂, 2012

渡辺克己、「みんなの機構学 (4) 飛び出す絵本の仕掛け (その4)」、『機械の研究 64(4), 331-336』, 養賢堂, 2012

斉藤 公男、『空間 構造 物語』, 彰国社, 2003年

小倉史崇、斎藤公男、岡田章、田中晃、宮里直也、「張弦シザース構造の仮設建築物への適用に関する研究」、『2002年度日本建築学会関東支部研究報告集:185-216』, 2002

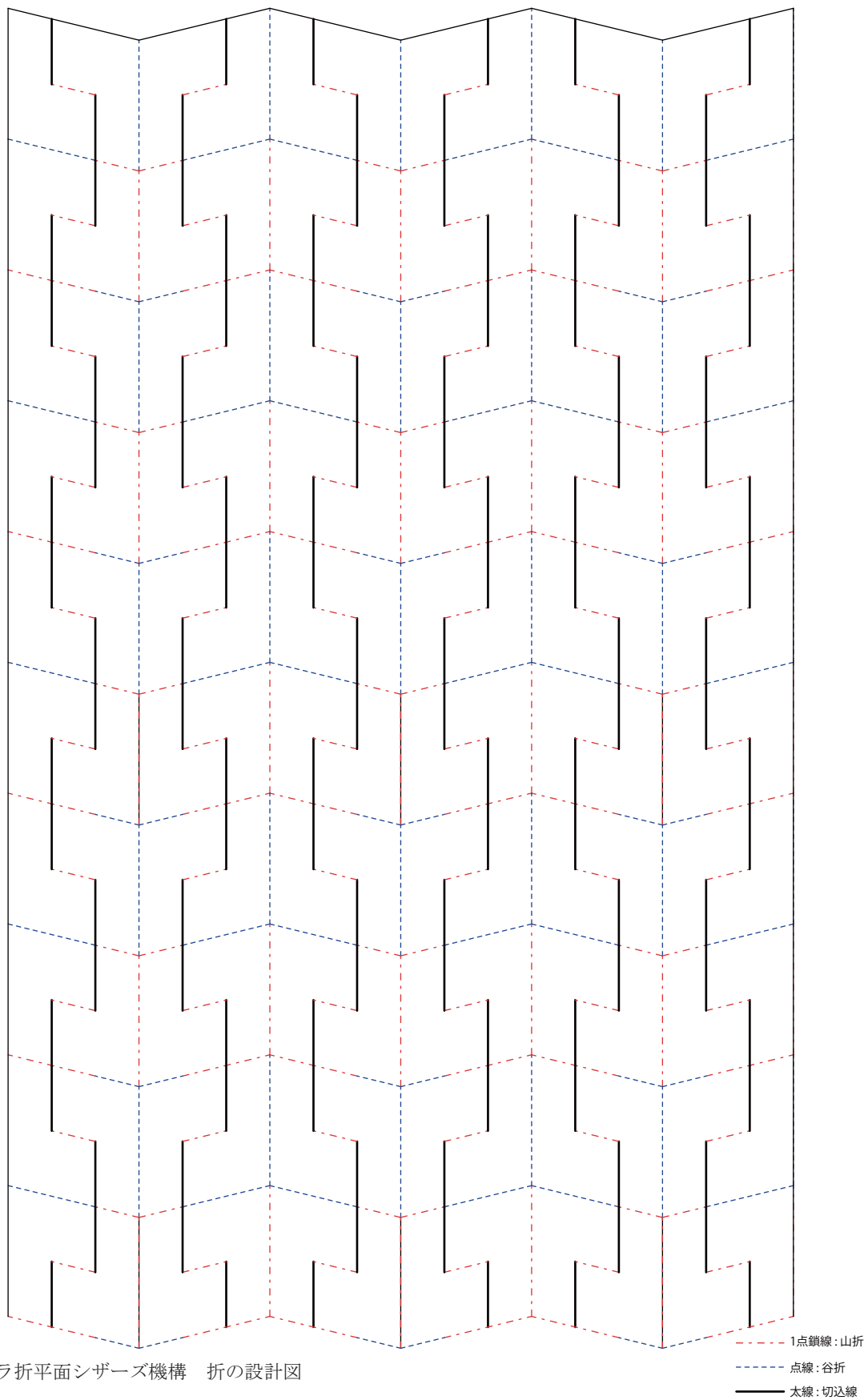
櫻井優貴、斎藤公男、岡田章、宮里直也、高橋厚人、「ドーム型張弦シザース構造の構造特性に関する基礎的研究」、『日本建築学会大会学術講演梗概集 841-844』, 2007

古谷寛、「3次元筒状展開形体(鏡映対称型)の形成条件に関する考察」、『日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 951-952』, 2000

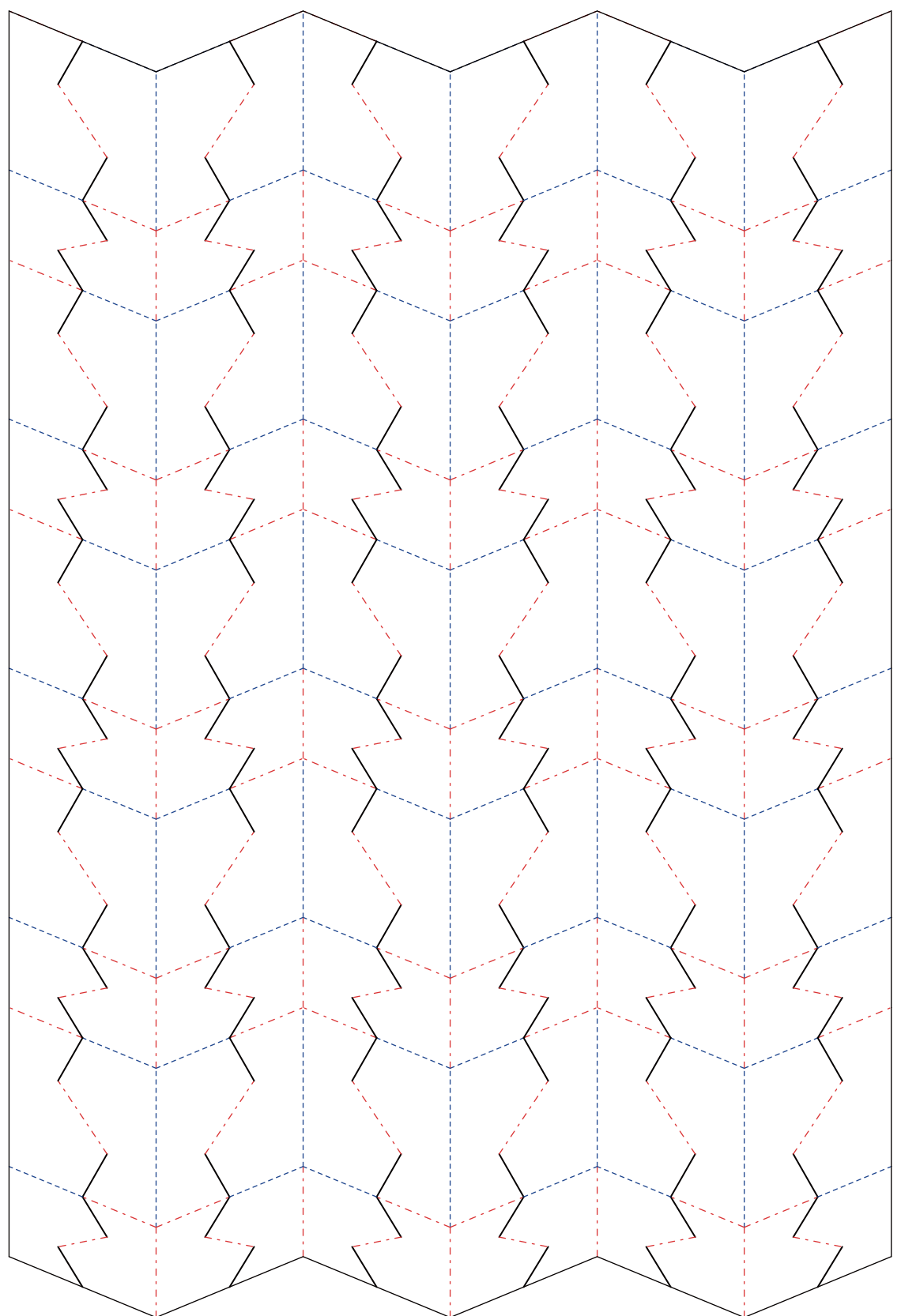
竹内義典、斎藤公男、岡田章、宮里直也、森山卓也、「展開式立方八面体(Cu-ron)の力学特性に関する基礎的研究 - 施工性向上に着目したジョイントの提案 - 」、『日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 845-846』, 2007

-
- 山崎光悦、関口拓郎，「展開構造物の形体設計に関する研究」，『日本機械学会 [No. 047-1] 北陸信越支部 第 41 期総会・講演会論文集，283-284』，2004
- 佐藤孝典，「美に迫る宇宙展開構造物」，『建築雑誌 Vol.111 No.1390, 062』，1996
- 大室健、森田寿郎，「特異姿勢における自由度の拡張を利用してヒンジを再配置できる空間 4 節リンク機構の設計」，『日本機械学会論文集 (C 編) 76 巻 766 号，111-121』，2010
- 茶谷正洋，『折紙建築』，1983
- プリヤ・ヘメンウェイ，『シークレット・コード』，EVERGREEN，2009
- Thomas Hull 編集、川崎敏和 監訳，『折紙の数理と科学』，森北出版株式会社，2003
- エリック・D・ドメイン、ジョセフ・オルーク、上原隆平 訳，『幾何的な折りアルゴリズム』，近代科学社，2009
- ロバート・クロネンバーグ、牧紀男 訳，『動く家』，鹿島出版会，2000
- ジョセフ・オルーク、上原隆平 訳，『折り紙のすうり リンケージ・折り紙・多面体の数学』，近代科学社，2011
- 草ヶ谷圭士，『初学者のための機構学』，理工学社，1960
-

附録

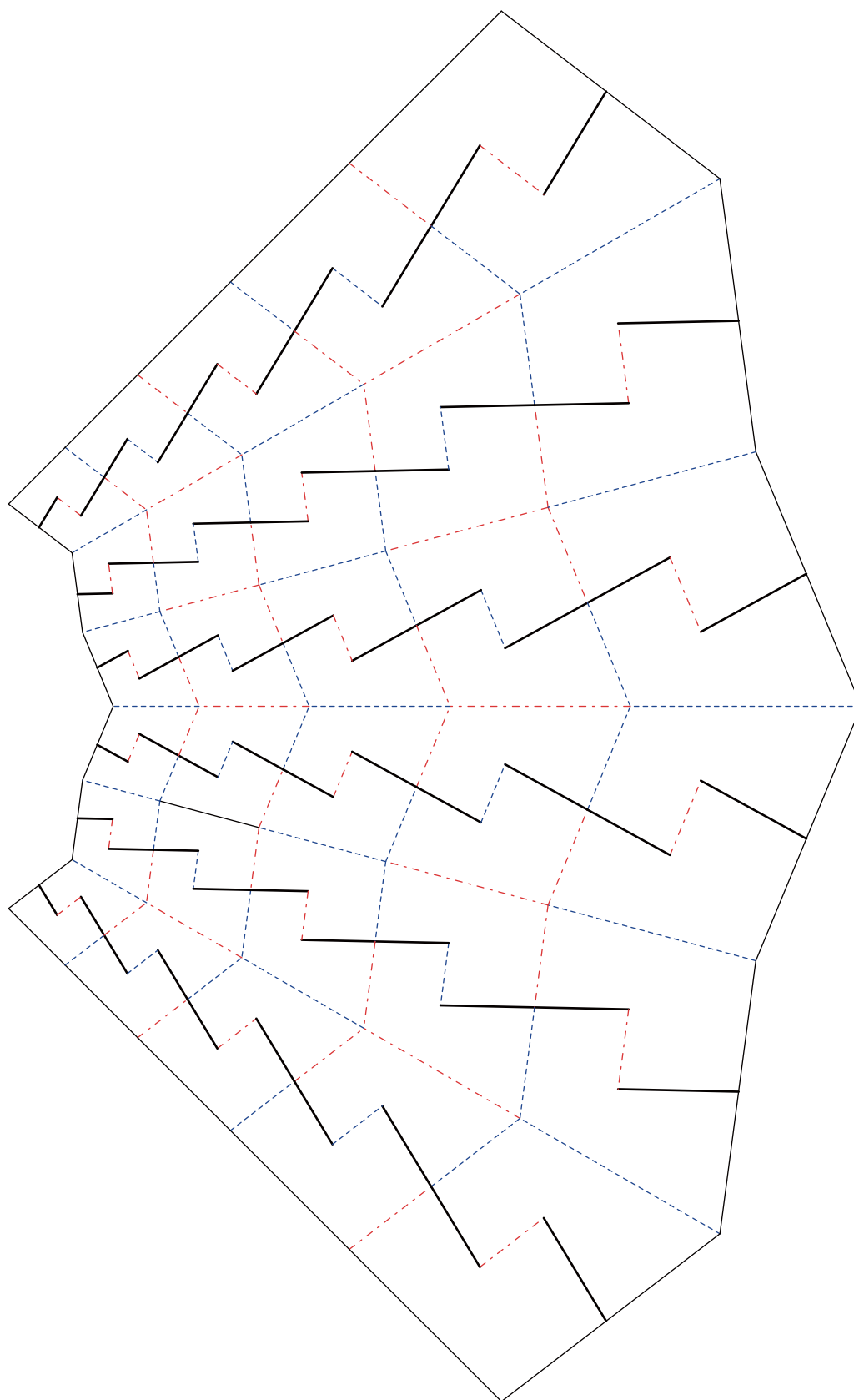


ミウラ折平面シザーズ機構 折の設計図



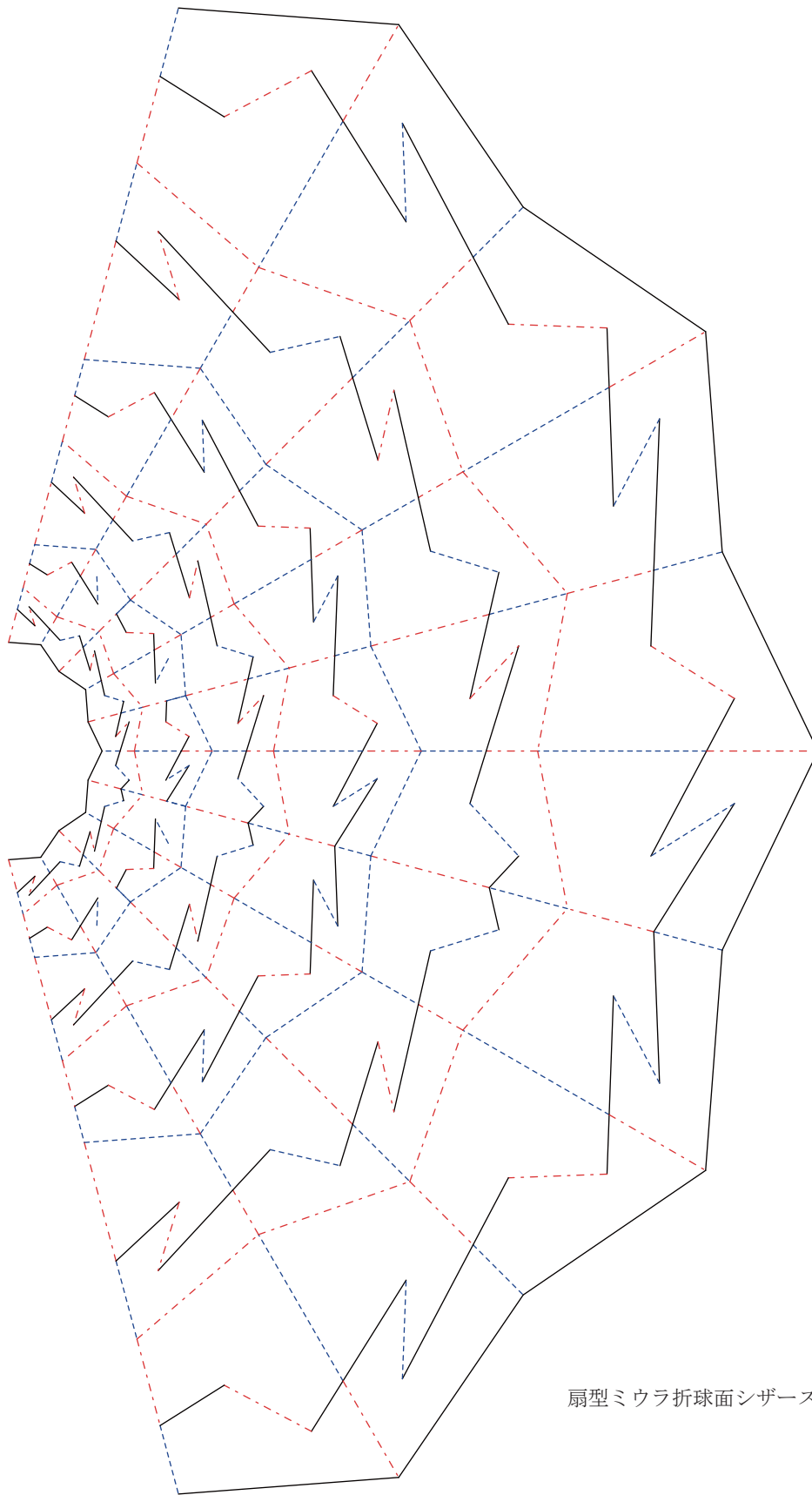
ミウラ折球面シザーズ機構 折の設計図

--- 1点鎖線: 山折
--- 点線: 谷折
— 太線: 切込線



扇型ミウラ折平面シザーズ機構 折の設計図

--- 1点鎖線: 山折
... 点線: 谷折
—— 太線: 切込線



扇型ミウラ折球面シザーズ機構 折の設計図

--- 1点鎖線：山折
--- 点線：谷折
— 太線：切込線