

ダイヤモンド格子型のジョイントシステムの提案

Diamond Lattice Joint System

木島 凧沙¹, 舘 知宏¹

Nagisa KIJIMA¹, Tomohiro TACHI¹

¹ 東京大学

¹University of Tokyo

【要約】

日本の伝統的な木造建築に用いられる継手・仕口のように、幾何学的な嵌合のみで接合するブロックシステムを提案する。菱形十二面体形状をなすブロックは、四つが一点でつながる継手を持ち、全体としてダイヤモンド格子に沿って空間を二等分する多孔質な構造 (Schwartz D-Surface の離散版) を構成する。継手のデザインは、すべての部材が共通であり、オス・メスが存在しない。継手のデザインバリエーションとして、一つずつ積み木のように積んでいくもの、二つずつ組で接続するもの、四つ同時にスライドすることで組むものなどを提案し、それらの性質や一般化について論じる。

キーワード: 継手設計, 空間充填, ダイヤモンド格子, 組み立てプロセス

【Abstract】

We propose a block system that is joined only by geometric combinations, like the Japanese traditional wooden joints “tsugite” and “shiguchi.” The blocks, which have a rhombic-dodecahedral shape, have four joints that connect at a single point, and as a whole constitute a porous structure (a discrete version of the Schwartz D-Surface) that bisects space along a diamond lattice. The design of the joint is the same for all members, and there is no male or female. We propose design variations of the joints including those that are stacked one by one like building blocks, those that are connected in pairs of two, and those that are assembled by sliding four simultaneously. We discuss their properties and generalizations.

Keywords: joint design, space tessellation, diamond lattice, assembly process

1. 序論

日本の伝統的な木造建築に用いられる継手・仕口のように、部材同士が接着剤等を用いずに接合し、繰り返し分解や組み替えをできるブロックシステムは、自己組み立て[1]、玩具、プロトタイプ制作用のツール、リユース可能な建築構造物などに応用可能である。本研究では、ダイヤモンド格子に沿って4つのブロックが一点でつながるような継手を持ったブロックを考案した。これらのブロックは一つ一つが菱形十二面体の形状をしており、接続していくと、空間を二等分する多孔質な構造を構成する。

継手のデザインは、いずれもすべての部材が共通であり特にオス・メスが存在しない特徴がある。継手のデザインバリエーションとして、一つずつ積み木のように積んでいくもの、二つずつ組で接続するもの、四つ同時にスライドすることで組むものなどを提案し、それらの性質や一般化について論じる。

2. 基本の幾何構造

本提案のブロックは、菱形十二面体がベースとなっている(図 1)。具体的には、菱形十二面体の、一組の向かい合う三価頂点の周りに集まる六面を隣り合うジョイントと共有するように接続する。この六面に互いにはまり込む凹凸の継手を設計する。

表面の凹凸により、4つのブロックがマラルディの角で接合し、ダイヤモンド格子をなす。このブロックの特徴として、ジョイントとなる凹凸には雄雌の別がないことである。そのため、一つのブロックシステムにつき使われる

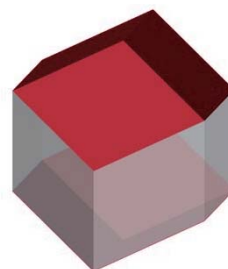


図 1: ブロックの基本をなす菱形十二面体。赤い面を隣接ブロックと共有する。

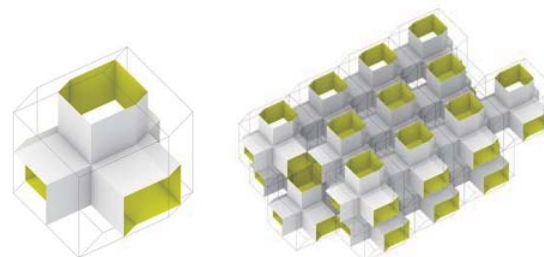


図 2: ブロックを接続した構造。表面を取り出すと、空間を二等分するスポンジ多面体となる。

ブロックの種類は単一である。

このブロックは、すべて繋げていくと、菱形十二面体で充填されたソリッド部分と、その余白とが合同なダイヤモンド格子型の立体形状になる(図 2)。つまり空間の半分を充填した構造となる。このとき境界をなす表面を取れば、それは空間を2等分するスポンジ多面体となる (Gaiiunas)[2, p.115]。また、これは Schwartz D-Surface[3]の離散版とも言える。

3. ジョイント設計のための軸の定義

ジョイント構造を設計するにあたって、ブロックの接合に関する軸と方向を定義する。

ブロック4つが一点で接するように接合された状態を1クラスと呼ぶ(図3(a))。1クラスタの接合部の中心と、各ブロックの接合に使っていないもうひとつの接合部の中心を結んだものを軸Aと定義する(図3(a)紫)。1つのクラスタを見たとき、軸Aの端点のうち接合部でない方の4つは、正四面体の頂点にあたる。この時にできる四面体をクラスタに内接する四面体とよぶ。この四面体の辺に当たる線分を軸Bと呼ぶ(図3(a)青)。また、クラスタに内接する四面体の、向かい合う2辺の midpoint を結んでできる3本の軸を軸Cと呼ぶ(図3(a)緑)。

これらの複数の軸に対してさらにひとつずつIDを与える。まずブロック1,2,3,4からなるクラスタに対して、軸Aはそれぞれのブロックに対応してA1,A2,A3,A4の4本ある。軸Bはブロックのペアに対応して、B1-2, B1-3, B1-4, B2-3, B2-4, B3-4の6本ある。軸Cはブロックを二つのペアに分割する組み合わせに対応しC12-34, C13-24, C14-23の3種類存在する。

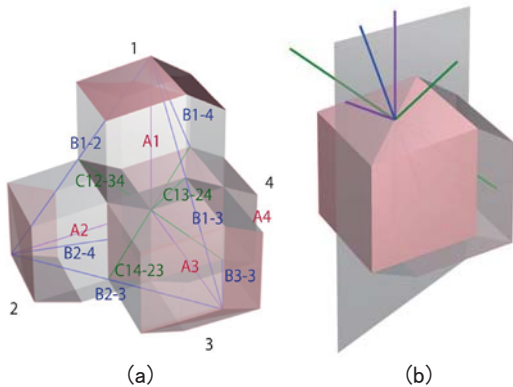


図3. (a)クラスタに内接する四面体構造と軸
紫:軸A、青:軸B、緑:軸C

(b)ブロック1におけるブロック2への接合菱形面から見た、A1,A2, B13-24, B14-23, C1-2 軸の関係

4. 接合方式と軸の関係

ブロックの繋がり方(分解され方)を下記の3種類に分類すると、前節で定義した3種類の軸と対応する。ブロック1におけるブロック2との接合面において引き抜きに
関係ある軸は5軸存在する。菱形の中心から法線方向に向くC1-2と、それを中心として菱形の短い対角線(単軸)方向に傾いたA1,A2と、長い対角線(長軸)方向に傾いたB13-24, B14-23とからなる(図3(b))。

1ユニットから1つのブロックが、他の3つのブロックの接合に影響を与えずに取り外される場合を3-1タイプと呼ぶ。3-1タイプでは軸Aが関連する。ブロック1と2の間の菱形面のジョイントでは、軸A1とA2に沿った引き抜きを考慮する必要がある。

1ユニットをブロック2つずつのペアに分けて、残りの接合に影響を与えずに取り外すことができる場合を2-2タイプと呼ぶ。2-2タイプは軸Cと関連し、ブロック1,3のペアと2,4のペアを取り外すとき、軸C13-24に沿った動作を考慮する必要がある。

1ユニットが分解される時、すべてのブロックを同時に対称に引き抜く場合を1-1-1-1タイプと呼ぶ。1-1-1-

1タイプは軸Bと関連し、ブロック1とブロック2の間の菱形面のジョイントでは、B1-2に沿った引き抜き動作を考慮する。

また、3-1タイプと2-2タイプや、1-1-1-1タイプと2-2タイプなど、一つの種類のブロックで複数の接合方向を組み合わせることもある。

5. ジョイント構造の基本条件

接合方向の議論を用いて、ブロックに施す凹凸がジョイントとして機能するための条件について述べる。

まずは凹凸の対称性に関する条件であるが、ブロックが雌雄の別なく繋がるために、かつ繋いだ時に凹凸同士がぴったり合わせられ隙間ができない必要がある。隣り合う菱形十二面体どうしの関係は、ジョイント面となる

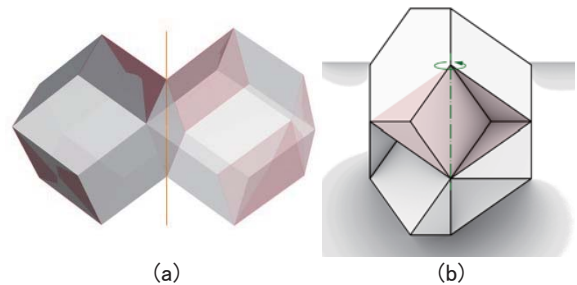


図4. (a)菱形の短軸に対する180°回転コピー (b) ジョイントを正面から見た図。凹凸が短軸に対し180°対称

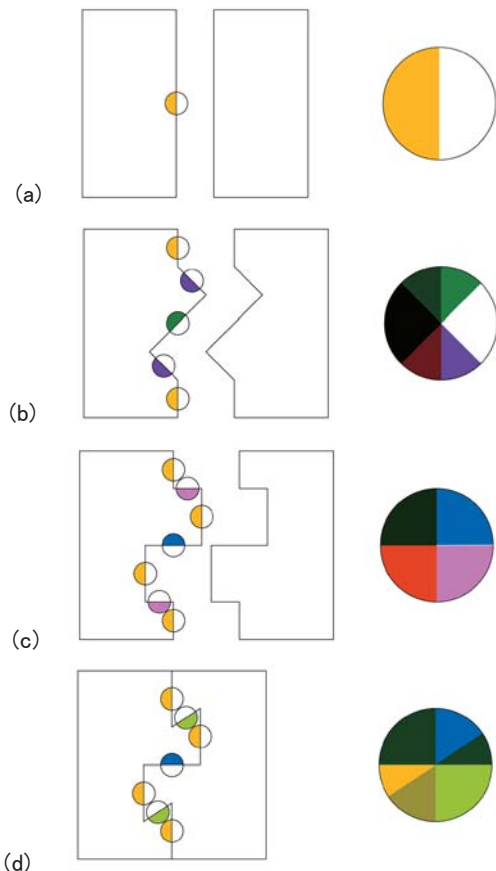


図5. (a) 単純な突合せは、半円すべての方向に引き抜き可能。(b)複数の傾きの辺を共有すると、制限される領域が拡大し、引き抜き可能方向(白)が減る。(c)引き抜き方向が半直線に制約され、1自由度の引き抜きが可能。(d) 引き抜きが不可能。

菱形の短軸を軸とした 180° の回転コピーで表されるから、ジョイント表面の凹凸が単軸周りで 180 度回転対称であることが必要条件である(図 4)。一方 6.1 節で示すように、長軸周りの 180° 回転を用いるとダイヤモンド格子ではなく、菱形十二面体の完全充填の接続関係となる。

次に、凹凸が組み外し可能な条件を考える。今回は並進によって引き抜く(組む・外す)ことを考える。すなわち方向は一定で引き抜く動作の途中で変わらないものとする。組んだ状態から引き抜くことが幾何的に可能であれば、再び組むことも可能であるはずなので、ここからは、基本的に組まれた状態から部材を引き抜く動作について述べる。ここで、引き抜く方向を制限した方が動きに遊びがなくしっかりした接合になると言える。

遊びの有無や量を理解するため、まず、2 次元平面において、2 枚の板が組み外し可能な条件について考える。図 5 のように、板に凹凸がつくと、板の引き抜き可能な向きが制限される。付き合わせたそれぞれの辺によって、引き抜き可能な方向が半円に制限される。いくつかの傾きの辺で付き合わされると、それらの制限空間の和集合が、ジョイント全体の制限を表す。図 5 の円における白い領域が制限される空間の補集合であり、ジョイント全体が引き抜き可能な方向を表す。

引き抜き可能かつ引き抜き方向を一つに制限するには、図 5(c)のように、斜線で塗られていない方向が一つだけに定まるようにすれば良い。

これを3次元平面に拡張して考える。つまり、ジョイントの辺が平面に拡張され、引き抜き可能な半円が半球になる。半球の集合を考え、引き抜き可能な範囲を最小限に設計することで組み合わせの強度や、組み合わせ時のしっくり感が生み出される。

6. ジョイント設計

ここでは、前述の条件を用いて設計した具体的なブロックを紹介する。

6.1. 1-1-1-1 タイプと 2-2 タイプ

4 ピースが同時に組み合わさる 1-1-1-1 タイプを考える。すべてのピースが対称に組み合わさる動きを仮定すると、引き抜き方向は B 軸に平行なベクトルとなる。ブロック 1,2 の間では軸 B1-2 となる(図 6(a))。

ブロック 1-2 間の菱形を垂直な B1-2 軸から見る。5 節で述べた対称性の条件に基づき、菱形に短軸に対して左右対称な図形を描き、この図形を引き抜き方向に前後に押し出すことでジョイント形状を得た。本設計では、さらに長軸に沿っても対称な図形としている図 6(b)。

ただし、この立体は、ソリッドが稜線で接する部分が見れる。これは、3D プリントなどの製作機械での製造性や強度などを考慮すると望ましくない。そこで、線で接するソリッドを解消するように凹凸を適切にトリムしたものが図 6(c)のジョイントである。なお、3D プリント時はこのモデルに嵌合用の適切なオフセットを加える。

このジョイントは長軸に沿った対称性も持つため、図 6(d)の標準的な組み方のほか図 6(e)のようにも組むことができる。図 6(e)の組み方をした場合は、空隙が生まれず、空間すべてが充填する。このように複数の回転対称性を持つことで組み換え可能となる性質は河合継手[4]と同等の性質である。

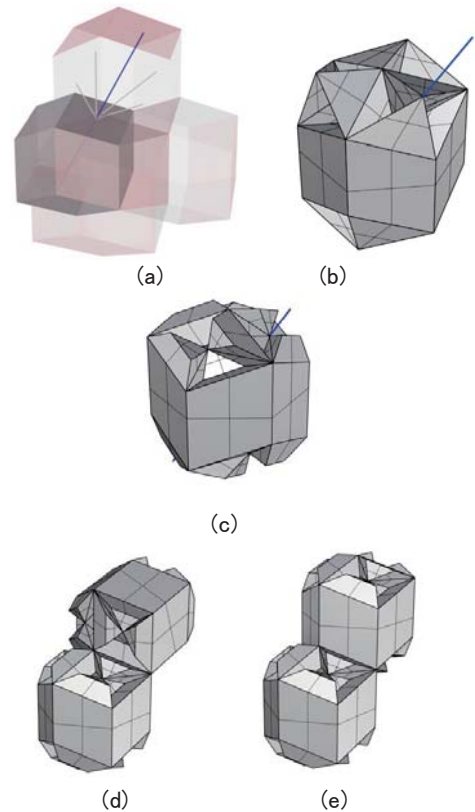


図 6. 1-1-1-1 タイプの設計。(a)軸 B を用いた引き抜きを考える。(b)ジョイントの形状。短軸周り 180 度の回転対称性をもつ。(c)立体が接する稜線を取り除いたもの(d)通常の組み方(ダイヤモンド)(e)異なる組み方(完全充填)

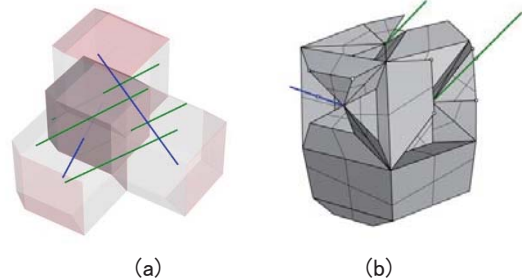


図 7. 2-2 タイプへの改良。(a)引き抜きに用いる軸 B と軸 C (b)実際のジョイント形状。

しかし、7 節に述べるように、この組み方だと多数のブロックを組み合わさる時に不便である。そこで、このモデルを改良して 2-2 タイプを設計した。ペアに分離するために、引き抜き方向の軸を図 7(a)のように変更する。すなわち、クラスタをブロック 1,2 のペアと 3,4 のペアに分け、それぞれのペア内のジョイントは従来通りの軸 B 1-2, B3-4 で接続し、ペア同士のジョイントには軸 C12-34 での接続となるように押し出し方向を設計する(図 7)。

このようにすると、ひとつの点に集まる 3 つのジョイント面の形が全て異なるが、1-1-1-1 タイプに比べて組むのが容易なブロックができる。

6.2. 3-1 タイプ

3-1 のジョイントでは、1 クラスタから 1 つブロックを引き抜くことができる。この時のジョイント面に対する引き抜きベクトルは、そのブロックが引き抜かれた方であった場合とそうでない場合を考える。すなわち、ブロック 1 と 2

の間であれば、A1,A2 に沿ったベクトルの双方で引き抜きが可能でなければならない(図 8(a))。そこで、引き抜き方向をこの 2 本のベクトルの間に張られる平面内に制限したブロックを考える。これが図 8(b)のブロックである。紫色の範囲がブロックの引き抜き可能な方向となる。しかし、これは図のブロックと同様に、線で接する面が存在してしまうため、ファブリケーションには向かない。このブロックを、条件を緩めてファブリケーションしやすくしたものが図 9 である。これは、2 つを組み合わせるときに引き抜き方向が平面に制限されない。オレンジ色の空間が引き抜き可能な範囲である。

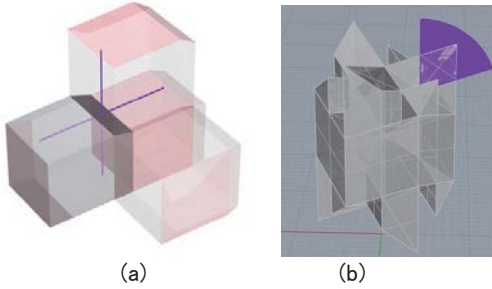


図 8. 3-1 タイプ (a)2 つの引き抜き方向 A1,A2 と(b)A1,A2 で張られる平面でのみ引き抜き可能なジョイント(3)条件を緩めた 3-1 タイプ

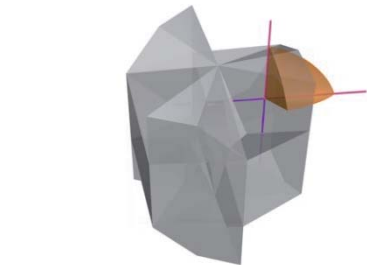


図 9. 3-1/2-2 タイプ (a)引き抜き方向。(b)ブロック

6.3. 3-1/2-2 タイプ

最後に、3-1 タイプ、2-2 タイプどちらでも組み外しできるブロックを考える。この時、ブロック 1,2 に対して引き抜きベクトルは、A1,A2,C13-24,C14-23 の 4 つになる(図 9(a))。これにより設計されたのが図 9(b)のブロックである。引き抜き方向の制限が緩いため、安定感は少ないが、積み木のように積んでいくことができる。

7. 全体組み立てプロセス

これらの 3 種類のブロックで、全体を組み立てるプロセスを考える。1-1-1-1 タイプでスポンジ多面体を構成するには、すべてのブロックを同時にはめ込む必要があり、非現実的である。しかし、4 つ同時にはめ込む操作を再帰的に行うことで、シェルピンスキー四面体のようなフラクタル構造を構成することが可能である(図 10)。

2-2 タイプは、1-1-1-1 タイプでのジョイントを用いて線材を構築し、それらの線材を 2-2 タイプのジョイントで縦横縦横と交互に組むことでスポンジ多面体を構成することができる(図 11)。

3-1 タイプは、緩い組み方であるが、一つずつ積むことができる。重力と引き抜き方向の関係から、最下段の摩擦が十分にあれば安定し、高い自己整列性[5]を持つ(図 11)。



図 10. 1-1-1-1 タイプを再帰的に組んだ形状

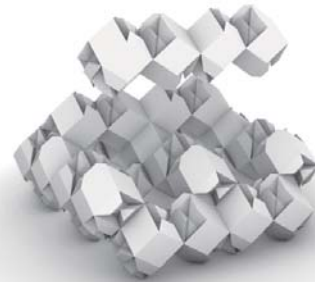


図 11. 2-2 タイプを直線状に接続して、縦横に組んだ形状



図 12. 3-1 タイプを積み重ねた形状

参考文献

1. A. Papadopoulou, J. Laucks, S. Tibbits, From Self-Assembly to Evolutionary Structures, Architectural design, 87(4), pp.28-37, 2017
2. 宮崎興二, “多面体百科”, 丸善出版, 2016
3. H. A. Schwarz, Gesammelte Mathematische Abhandlungen, Springer, Berlin, 1933.
4. 河合直人, “3 方向に継げる継手 : 河合継手の発想と概要”, 建築の研究 (248), pp. 7-11, 2019
5. 関島慶太「Fab3.0 素材のデジタル化へ向けて— Kelvin Block の組み立て分解による三次元造形システムの開発」慶応義塾大学修士論文,2016