周縁部を拘束したマルチユニット・レシプロカル・フレームのデザイン手法
－ 仮設構造物「木海月」を事例として －

熊谷　和

1章　序：背景と目的

レシプロカル・フレーム（Reciprocal Frame[注1)]，以下RFとする）とは構成部材の相互依存により成立する構造システムである。部材を交互に重なるように配置していくことで、シンプルな接合部で成立するため、古くから屋根架構などに利用されてきた。しかし、三次元で構成される梁の角度や組み方を数値化しにくく、設計段階での正確な形状把握や施工が難しいため、現代の構法の導入とともに、構造体として使われることは減少した。一方、近年では持続可能な建築形態への関心から、広葉樹や低品質の針葉樹などの他の建築構法では使用されることのない短小部材の組み合わせでスパンを得ることができるRFは、再び建築構法として注目されるようになった。しかし、一般にRFは屋根架構の一部に用いられるなどの部分的な応用に止まり、構造体全体がRFでデザインされた提案は極めて少ない。本稿では、既往研究と先行事例より、RFの特性と現状を整理した後に、一度組み上げたRFの再形成と三次元的な位置関係での周縁部拘束により構造全体を安定させるデザイン手法を提案する。筆者らが製作した仮設構造物「木海月（きくらげ）」（以下、本架構とする）を挙げ、構造体全体がRFで成立する架構の実現化の過程で建築物への応用を検討し、RFを主構造とした新たなデザイン手法の可能性を探ることを目的とする。

2章 調査研究：レシプロカル・フレームについて

2.1. 幾何学的特性

RFとは、連続する梁の一方が互いに連続して、多角形となるように閉じて接続し、他方が地面もしくは柱や梁などに支持されることで、自重で安定する面構造である（図1）。これらはSingle-Unit RF（以下、SRFとする）と呼ばれる基本形状であり、これらを組み合わせ、拡張されたものがMulti-Unit RF（以下、MRFとする）である。これらはDanzによって幾何学的及び歴史的な観点から類型化されており[1)]、本稿ではその中でもplanar grillage[注2)]とarc-profile vaults[注3)]を扱う（図2）。また、RFの形状は部材数、部材の断面寸法、接点の比率などのパラメータの変化により大きく変化する。この幾何学は櫻井によって定式化されている[2)]。

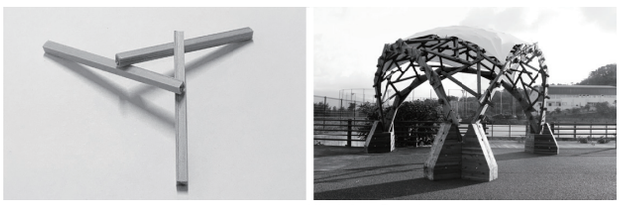


図1　RFと仮設構造物「木海月」

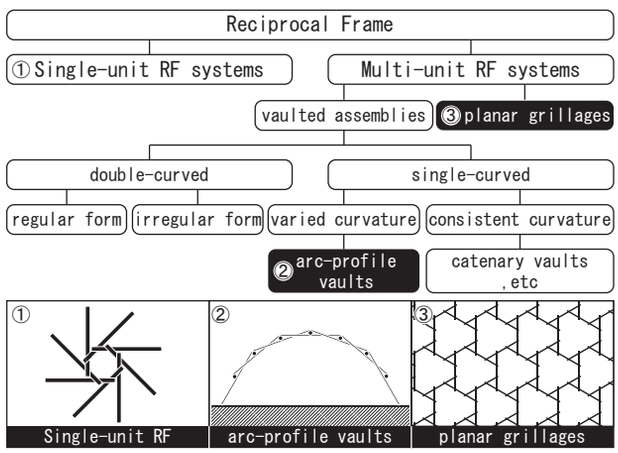


図2　RFの分類図

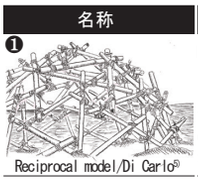
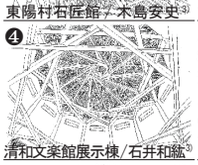
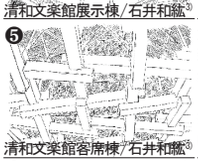
名称	特徴
❶  Reciprocal model/Di Carlo[5)]	RFと類似している構造システムであるテンセグリティをヒントに作られたMRF構造体。二十面体の幾何を元に竹を用いてつくられている。接合部はヒモによる緊結のみとなっている。多面体を元に形態がつくられているためドーム状のように閉じられた形態になっており、人が中に入るような開口部は設けられていない。
❷ Pergola Science City /Udo Thönnissen[4)]	大学キャンパス内に日陰を作るためのパヴィリオン。板状の木材を使うことと、金属部品を使わずに木製のジョイントのみを扱うことに焦点を当て、リサーチベースで製作されたもの。接合部には切り欠きが設けられ、部材の形状は全てユニークなものとなっており、コンピュータ上で形状決定し、部材を割り付けたのちにCNCにより製作された。
❸ 東陽村石匠館／木島安史[3)]	屋根を支えるための屋根架構としてRFが用いられている。三角形を基本ユニットに平面に拡張していくMRFで、端部は外壁に接続されている。部材には丸太が用いられ、計画初期段階では屋根架構は丸太のみであったが、屋根構造全体を安定させることが不可能だったため、接合部金物とボルトが用いられた。
❹  清和文楽館展示棟／石井和紘[3)]	屋根架構に多層のRFが用いられており、各層はシンプルなSRFで構成されている。一番上の層のSRFは中心が正12角形となるように配置されており、部材同士の接合は仕口加工で行われている。RFの端部は全て他の梁もしくは柱などの別要素に接続されており端部は全て同一平面内に位置している。材料は大径木材が使われている。
❺  清和文楽館客席棟／石井和紘[3)]	大径木材が用いられた平面状に展開するMRFの事例。屋根架構としてRFが用いられており、騎馬戦組手工法とも言われている。接合部は仕口を用いた接合となっており、仕口と梁を傾けることで部材厚みによる誤差を吸収していると推測できる。周縁部の端部は全て梁に接続しており、接点は同一平面内に位置している。
❻ bamboo roof／坂茂[3,6)]	セントルイス・フォレスト・パーク・パヴィリオンの。ルーフの試作品。構造はMRFの中心部を柱によって持ち上げられている。MRFの周縁部はどこにも接続しておらず、片持ちになっており、接合部はボルトで接合されている。また、部材の一部が破壊しており、MRF周縁部が支持されないため接合部に引張力が集中したためと推測できる。

図3　RFの事例

2.2. 建築デザインとRF

RFの概念は古くまで遡ることができ、類似するシステムをティピー[注4)]やホーガン[注5)]、ゲル[注6)]などの住居の元型(アーキタイプ)の中にも見ることができる。Larsenによれば、これらの構造体は正確にRFのパターンに即しているわけではないが、相互依存するように配列された多数の短小部材で空間を閉じるというデザインアプローチは共通しており、このアプローチは遊牧のようなライフスタイルや入手可能な建材の不足といった要因によってもたらされたものであった[3)]。また、現代においてはThönnissenやDi Carloなどが相互依存に基づく構造の研究をしており[4,5)]、木島や石井、坂などもRFを建築デザインに組み込んでいる。これらの例を図3に示す。これらの事例よりRFには次のような特徴があげられる。①短小部材を簡素な接合による組み合わせで空間を閉じることができる。②現代建築に構造として導入する際は接合部に複雑な仕口や金物を必要とする場合が多い。③一般にRFの周縁部は柱や梁などの別の要素に接続しており、その端点の位置関係は同一平面内にある。④立体的な構造にした場合は閉じた構造にする必要があり、開口部を作るのが難しい。

3章 手法:MRF周縁部の三次元的な拘束

3.1.Planar Grillage

Planar Grillageとは図4のようにSRFを平面状に接続していくことで、拡張可能なMRFである。ユニット化が可能で部材の向きが程度一定になるなどの特徴があり、様々な組み方がある。しかし、RFは三次元的に構成されるため、仕口等の特殊な接合部を設けない限り、部材の厚みによる歪みで、拡張と同時に架構が浮き上がり、部材数の増加と共に誤差が大きくなる。それにより、周縁部が地面に接地せずに宙に浮いている状態や、接地していても他の部材に比べ角度が大きくなり架構全体としては非常に不安定な状態になる。

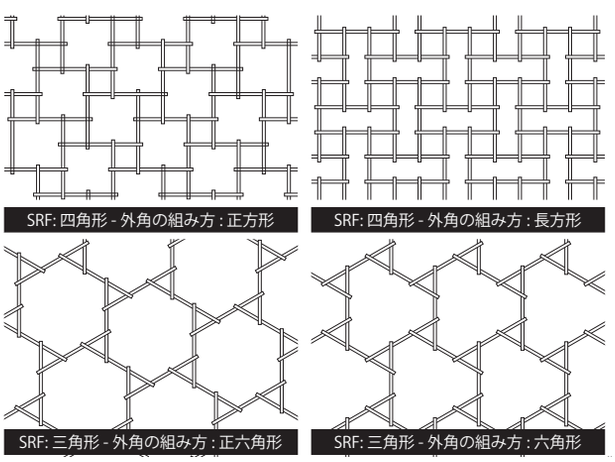


図4 planar grillageのパターン例

3.2. 形状の再形成と拘束

本稿ではplanar grillageの再形成と周縁部の拘束により、構造体全体を安定させるRFの新たなデザイン手法を提案する。RFは自重の相互依存により安定するため自重以上の内力を得ることはできず、不安定である。そこで図5のように一度組み上げたplanar grillageの周縁部に位置している部材の端部(以下、〈拘束点〉とする)を持ち上げることで、周縁部がアーチ状となるように再形成した。再形成の際に応力が導入され、拘束することで、RFの部材間に曲げが生じ、接合部を押し合うような内力が発生するため架構全体がより安定する。また、〈拘束点〉の位置をアーチ状にすることで、arc-profile vaultsに分類されるブリッジ状MRF[注7)]を用いての周縁部拘束を可能にした。図5のように、主材と横材の組み合わせにより成立するブリッジ状MRFの横材を〈拘束点〉で置換することで、自重と内力のみで全体の相互依存により形態が安定する構造体とした。この手法により、構造体全体を短小部材によるRFでデザインすることを可能にした。また、架構の周縁部がアーチ状となるため、短小部材によるRFの課題でもあった開口部を設けることが容易となる。

3.3. 既往研究や事例との比較と位置付け

先に述べたRFに関する既往研究や事例には、一度組み上げたMRFの再形成・拘束による二次的な応力導入により、架構形状を安定させる事例は見られない。またその拘束を別種のMRFを用いて行う点でも革新的であり、RFを主構造とした新たな建築デザインの可能性として本手法を検証することは有意義である。また、本手法では二次的な応力導入により発生する接合部の圧縮力により架構が安定するため、RFの課題でもある接合部の複雑さを回避できる可能性を秘めており、実現化の過程でこれらのディテールや問題点を把握することは、RFの建築デザインへの発展に寄与する。

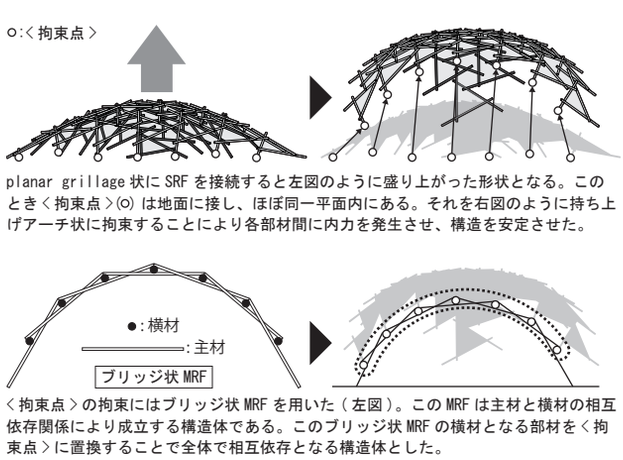


図5 形状の再形成と拘束

4章 設計：「木海月」について

4.1. 架構概要

筆者らは手法の実現化の過程でのディテール検討や問題点の把握のため、木造の仮設構造物「木海月」を設計した。本架構は主架構とその周縁部を拘束するための縁部架構のふたつの架構から成り、それらが自重と内力により相互依存することで成立している。材料はスギを用い、加工はCNCルーター[注8)]により行った。

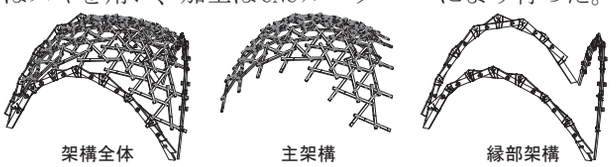


図6　本架構概要

4.2. 主架構

主架構には3つの梁により構成されるSRFを基本ユニットとし、28個のユニットをplanar grillage状に組み合わせるMRFを採用した。部材寸法は長さ950mm、幅50mm、厚さ30mmで、一辺の長さが600mmの正三角形となるように1ユニットを構成した。またその外角で構成される六角形の辺の長さも全て同じとなるように設計した。これにより、〈拘束点〉が全て直線上に位置し、辺に対して垂直となるので、縁部架構での拘束が可能になった。接合部は梁同士が接するだけで成立するが、外力により簡単に接点がずれるため施工が困難になる。そのため、支保工として、各接点にKPロープ[注9)]を用いた簡易的な接合部を設けた。planar grillage上で、各部材の接点となる位置に直径10mmの穴とそれに隣接する端部に溝を設け、そこにロープを8の字に通し緊結した[注10)]。これにより、施工中の部材移動により生じる接点の誤差を最小限に抑えた。

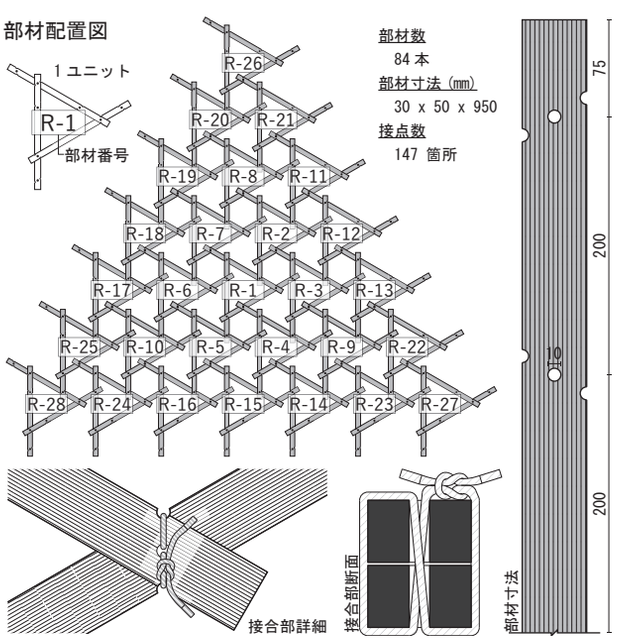


図7　主架構詳細

4.3. 縁部架構

ブリッジ状MRFは主材と横材の組み合わせによって成立する。本架構では横材を主架構周縁部の部材端部（以下、〈主架構端部〉とする）で置換することにより全体形状を再形成・拘束している。主材に当たる部分は厚さ30mmのスギの板材を切り出すことにより製作し、長さ寸法を統一するため、〈主架構端部〉はアーチに沿って等間隔に配置するものとした。ブリッジ状MRFは二次元的な幾何学であり、主材同士が交錯するため、本架構では二層に分けた。また、施工の容易化と、〈主架構端部〉を正確な位置で拘束するために縁部架構は先に組み立てることとした。二層化されている主材同士は鼻栓により固定し、主材端部同士の接点には蟻継ぎを設けた。また、〈主架構端部〉は同一構面内には位置していないため、縁部架構との接合において誤差が予測される。そのため、接合は縁部架構に設けた接合穴に差し込むのみとし、差し込みの深さにより誤差を吸収した。さらに、〈主架構端部〉は縁部架構に対して垂直には接合されないため、角度誤差を考慮して、接合穴には上下10mm、左右5mmの遊びを設けた。

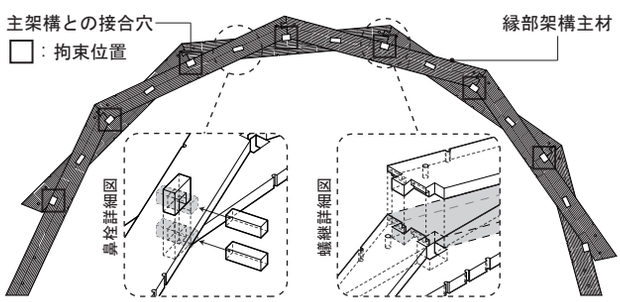


図8　縁部架構詳細

4.4. 座標測定と構造解析

本架構において主架構の周縁部拘束前後の形状変化を把握するために測定試験を行った。測定試験には1/10の模型を用い、主架構の各部材の両端点の座標を測定[注11)]した。その座標をもとにモデル化[注12)]を行い、各ユニットの周縁部拘束前後での角度と位置関係の変化を計測した（図9）。また、周縁部拘束状態での主架構の簡易的な構造解析[注13)]を行った。その結果を図10に示す。My-モーメント図より接合部の応力伝達は全て圧縮力にて伝達されていることが確認できた。

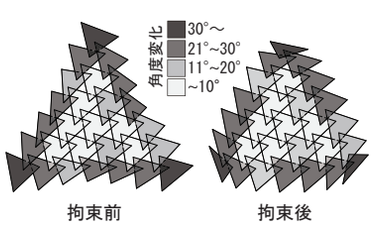


図9　拘束前後の角度変化

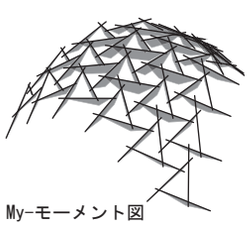


図10　解析結果

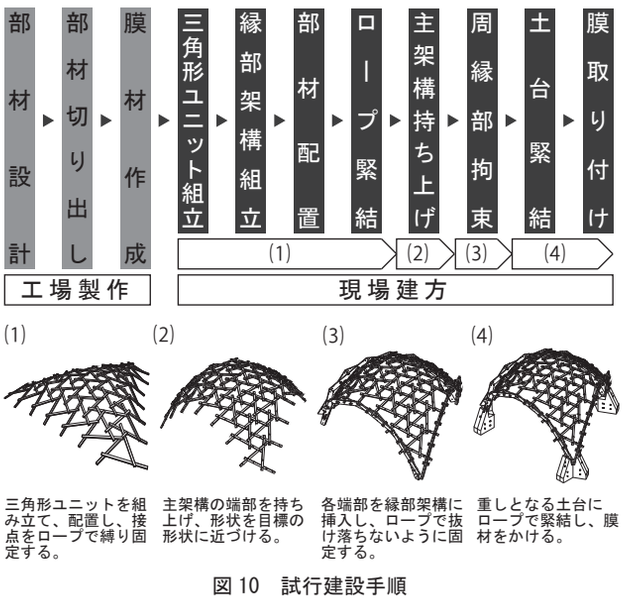


図 10　試行建設手順

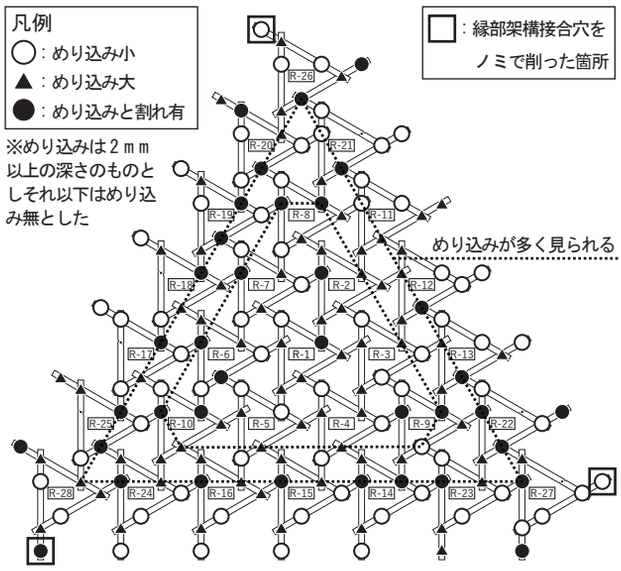


図 11　めり込みの位置関係

5章 実践：試行建設

5.1. 試行建設概要

設計した本架構の検証と問題点の把握を目的として、1/1スケールでの試行建設を行った。現場建方は作業員10名程度を動員し、九州大学伊都地区の屋外及びイースト1号館で行った。施工の手順を図10に示す。

5.2. 結果・考察

現場建方において、主架構の再形成は周縁部を一辺ずつ持ち上げる方法で試みたが、主架構の形状変形による誤差の蓄積により、初めの一辺しかすべての〈主架構端部〉を拘束できなかった。また、〈主架構端部〉と接合穴の角度誤差が大きかったことも原因として考えられた。そのため、特に角度誤差の大きかったR-26,27,28との接合穴をノミで拡大（図11）し、3辺を同時に持ち上げ、均等な応力導入による再形成をすることですべての〈主架構端部〉の拘束を可能にした。この施工方法により、本架構は成立し、形状は安定した。しかし、架構全体としての誤差は小さくなく、縁部架構の接地点に大きな誤差が生じた。また、本架構が安定した後に、各ユニットの間を接続しているKPロープをすべて外したが、安定状態を維持した。この結果から、一度形状が安定した後はKPロープで担保する必要のある引張力が接合部に発生しておらず、本架構全体が自重と内力により安定していると言える。

本架構解体後、主架構の部材のめり込みを記録した。その結果を図11に示す。ほぼ全ての接合部でめり込みを確認できたため、接合部での応力伝達は圧縮力により伝達されていることが推測できる。大きなめり込みや木材の割れは周縁部に近いユニット間に比較的多くみられ、拘束前後の各ユニットの角度変化と照らし合わせると、角度変化の大きな場所に集中していた。

6章 結

本稿では再形成と拘束により、MRFの構造全体を安定させるデザイン手法を提案した。この手法により、周縁部が三次元的に位置する自由な形態を実現することができた。また実現化の過程で以下のことを明らかにした。①ブリッジ状のMRFを用いることで、短い部材でも周縁部をアーチ状に拘束することができ、拘束により導入された応力の相互依存により実大スケールでも形態を安定させることができた。②接合部での応力伝達は全て圧縮力となっているため木材を利用したRFのデザインとしては接合部に発生する問題を回避することができ、RFを主構造とした建築における新たな可能性を示すことができた。しかし、実現化は仮設構造物にとどまっており、より大きく恒久的な構造物においての再形成時の応力導入方法などの施工法を明らかにする必要がある。また、主架構周縁部の拘束位置や角度に大きな誤差が出たため拘束点の理想的な位置や縁部架構での拘束方法に改善の可能性がある。

【注釈】
注1）それまで名前が付けられていなかった構造的なパラダイムを記述するためにイギリスのデザイナーであるGraham Brownによって名付けられた。
注2）平面状に展開してく幾何学状に配置されるように構成されたRF
注3）主材と横材の組み合わせにより持ち送りのようにして成立する橋状のRF
注4）北米インディアンの円錐形のテント小屋　　注5）ナバホ族の伝統的な住居
注6）モンゴル高原に住む遊牧民が使用している移動式住居
注7）主材と横材の組み合わせにより、成立する橋状のMRF。レオナルドの橋。
注8）本稿ではXYZ軸がそれぞれ1,200mm,2,400mm,150mmの加工範囲を持つ3軸フライス加工が可能な加工機を使用した。注9）ポリエチレン・ポリエステル混撚ロープφ4mm
注10）人力で本結びにより緊結した。注11）各部材の両端点の計168点に重りをつけたミシン糸を垂らすことでX,Y座標をプロットした後にZの位置を測定した。
注12）モデル化はX,Y座標をプロットした用紙をスキャンし、「auto CAD」でトレースした後に「Rhinoceros」を用いて座標のモデル化を行った。
注13）構造解析は「Rhinoceros」「Grosshopper」「Kangaroo2」「Karamba」を用いて行った。

【参考文献】
1)Calder Danz, Reciprocal Frames, Nexorades and Lamellae:An investigation into mutually supporting structural forms,University of Washington,2014
2）櫻井昭宏，感度解析によるレシプロカル構造の位相最適化に関する研究，法政大学，2015
3)Olga Popovich Larsen, Reciprocal Frame Architecture (London:Architectural Press,2008)
4) Udo Thönnissen,Hebelstabwerke Tradition und Innovation, Reciprocal Frameworks Tradition and Innovation ,ETH Zürich 2015
5) Di Carlo,B.,The Wooden Roofs of Leonardo and New Structural Research. Nexus Network Journal, 10,pp.27-38,(2008)
6) Cecil Balmond,a+u 2006年11月臨時増刊，pp.40-47，新建築社(2006)