

立体組合せパネル構造についての基礎研究

工藤聖来[†]・西野大貴[†]・陳沛山^{††}

A Basic Study on the Reciprocal Panel System

Seira KUDO[†], Daiki NISHINO[†], Pei-Shan CHEN^{††}

ABSTRACT

The Reciprocal Panel system is inspired from the idea of 1.5-Layer space frame. A 1.5-Layer space frame is configured with truss shaped key unites and has been a subject of study by the authors. While, to use panels instead of truss shaped key units, reciprocal Panel structures can be obtained. The present paper introduces the geometrical configuration of the Reciprocal Panel System, and presents more configuration patterns to construct variations of reciprocal panel structures.

Keywords: *Reciprocal Panel, Reciprocal frame, 1.5-Layer space frame, space frame*

キーワード : 立体組合せパネル、レシプロカルフレーム、1.5層スペースフレーム、スペースフレーム

1. 研究の背景と目的

古代から今日に至って、人類は新しい構造物の創出に努力して来た。急速に発展してきたコンピュータ技術やさまざまなデジタル・ツールを駆使してより自由に構造形状をデザインする手法が提唱され、フリー・フォーム・デザイン (Free Form Design (FFD))、デジタル・デザインなど様々な設計理念や考え方が研究されている。これらのデザインは、骨組に装饰材料を飾り付け美を表現することではなく、「構造躯体」を「デザインの本体」とし、構造体の造形美を追求することが多い。このように、建築の機能や形態美などの要件を総合的に勘案し、ユニークな構造形態が続々と登場している。ある意味では構造設計と意匠設計が融合する、もしくは想像力や感性の自由さと構造や力学原理からの拘

束という「自由」と「拘束」の融合ともいえる時代がやって来ている。

前述のように計算機を利用して構造形態を創出する手法は大いに研究されている。その一方で、歴史文化や人間のアイディアそして設計者の意志と感情を尊重し、力学美と構造美を追求する精神を忘れてはならない。この考え方では、計算機を一種の道具として利用することに位置づけ、設計者(人間)のアイディアにより構造形態を創出することに重点を置く。このような設計理念では、構造設計が「人間」を中心とした行為であるべきと考えている。著名構造家川口衛は「構造設計は全人格的行為である」と主張し、日本国内外において精妙な力学原理を利用した作品を数多く設計し、高い評価を受けている。

文化や感性に従って、石、木材、竹、コンクリート、鋼材、FRP、セラミックス、ケーブルや膜などのさまざまな材料を活用して、構造美を作り出す。また、植物や動物などの自然体の構造原理を利用して構造形態を創出することに挑

平成 23 年 12 月 22 日受理

[†] 工学部建築工学科・4 年

^{††} 工学部土木建築工学科・同大学院 教授

戦する。建設者の真のチャレンジは如何に構造物をシンプル化することであり、そのチャレンジは建物本体ではなく、そのシンプル化のプロセスにある。

このような背景で、共同研究者の陳は中国宋代虹橋の構造原理を用いて、新しい構造システムとして1.5層スペースフレームを提案した¹⁻⁴⁾。本論で提案する立体組合せパネル構造は、1.5層スペースフレームから派生した新しい構造システムである。1.5層スペースフレームは1層の弦材と斜材によって構成されたスペースフレームである。つまり、2層のスペースフレームと比べて、上弦材があれば下弦材が要らなく、下弦材があれば上弦材が要らない構造システムである¹⁾。そして、後述のように1.5層スペースフレームの単位架構の平面部分をパネルに置き換え、パネルの組合せによって構成した構造システムを発見し、本研究では、「立体組合せパネル」と称する。

この構造システムは他の構造システムと比べ部材の数を減らす事ができ、生産性や経済性を向上させることが期待できる。また、新しい構造システムのため、今までにない新しいデザインを創出することも期待できる。本論で提案する立体組合せパネルは、体育館、駅舎、集会場、倉庫などの大空間施設に適用できる1種の構造シ

ステムである。

本論は立体組合せパネルについての初期段階研究成果を報告する。類似研究について調査研究、構造システムの安定性、そして幾何学構成の特徴、実用化の可能性についての研究結果をまとめて報告する。

2. 立体組合せパネルの成り立ち

2.1 1.5層スペースフレームからの派生

立体組合せパネル構造は、平面パネルを立体的に組合せて構成された構造システムである。その基本的な考えは、1.5層スペースフレームの平面単位架構をパネルに置き換えることである。1.5層スペースフレームの単位架構は図1(a)に示している平面トラスのような架構である。

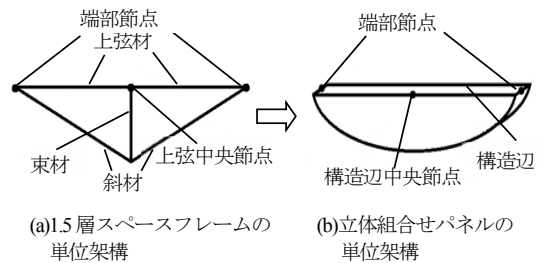


図1 フレームの単位架構をパネルに置換

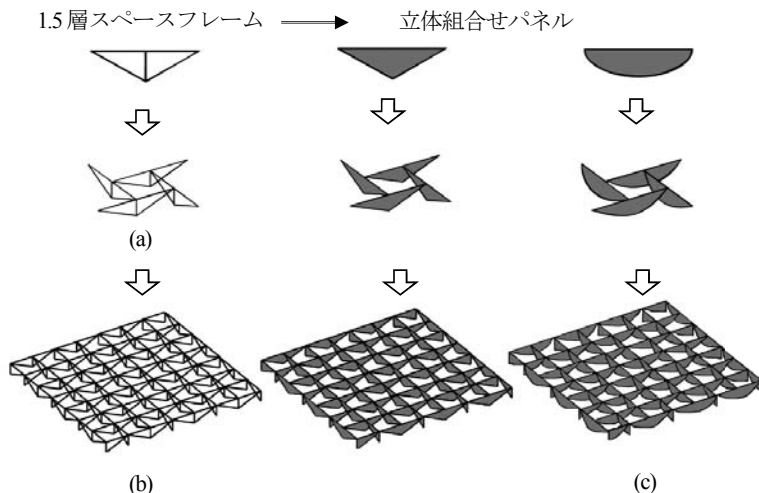


図2 立体組合せパネルの発想

このような単位架構を用いて、図 2(b)に示すような大スパン構造体を組立てることができる。その組み方は、一つの単位架構の端部節点と他の単位架構の上弦中央節点とを相互に接合し、図 2(a)のようなユニットを構成して、これらのユニットを複数組み合わせることによって、図 2(b)のように大スパンの 1.5 層スペースフレーム構造体を組み立てる。

そして、上述のような単位架構を平面パネルに置き換えると、図 1(b)に示すパネルを得ることができる。このようなパネルにより構成された構造システムを図 2(c)は「立体組合せパネル」と称し、本論で初めて提案する最新構造システムである。

2.2 形態創生の基本的手法

図 1(b)に示す平面パネルの縁にある距離で離れている二つの節点を端部節点、二つの端部節点をつなぐ一つのパネル縁を構造辺と呼び、構造辺の端部節点の間の節点を構造辺中央節点と呼ぶ。このような、パネルの端部節点と構造辺中央節点を一定のルールで接合して組合せて、多様な構造形態を創出することが可能である。その基本的な組み方は、Lap 型と交差型の 2 種類がある。まず、Lap 型について紹介して、交差型は後述になる。

Lap 型組合せとは、一つの平面パネルの端部節点と他の平面パネルの構造辺中央節点とを繰返し接合し、図 3 のようなユニットを構成するもので、このユニットをさらに複数組合せ、図 2(c)のような立体組合せパネルを組み立てる。ただし、Lap 型ユニットの場合パネルに回転が生じる為、接合部の工夫によってパネルの自転を止めることを考えている。しかし、接合部の構造についての研究は今後の研究課題にしている。

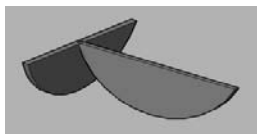
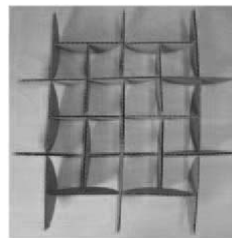
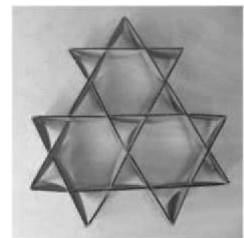


図 3 Lap 型ユニット

上述のような Lap 型の基本的なグリッドとして、四角形平面グリッド(図 4(a))、三角形・六角形平面グリッド(図 4(b))を作り出した。この他にも、後述のように自由な組合せを用いたランダムグリッドのような組合せも可能である。



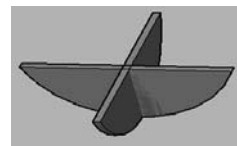
(a) 四角形平面グリッド



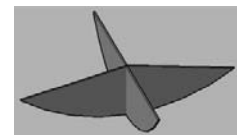
(b) 三角形・六角形平面グリッド

図 4 Lap 型パネルの基本的なグリッド

交差型組合せとは、2 枚のパネルが互いの構造辺中央で交わり、図 5 のようなユニットを構成するもので、このユニットをさらに複数組合せ立体組合せパネルを組み立てる。交差型ユニットの場合、Lap 型ユニットとは違いパネルの回転は生じないが、ユニットとユニットを接合する場合、端部節点同士を接合することになる。



(a) 構造辺がフラットなモデル



(b) 構造辺に角度を設けたモデル

図 5 交差型ユニット

図 5(a)の交差型ユニットで構成すると図 6 のような平面となる。また、図 5(b)のようにもう一方に角度を設けた構造辺を持つ単位架構を用いたユニットでは図 7 のような曲面の構成モデルを作製することができる。

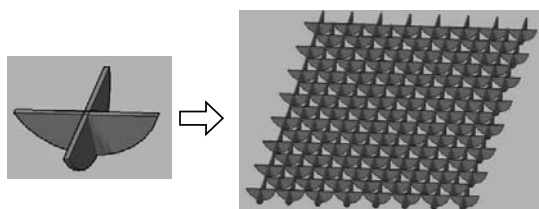


図 6 平面構成モデル

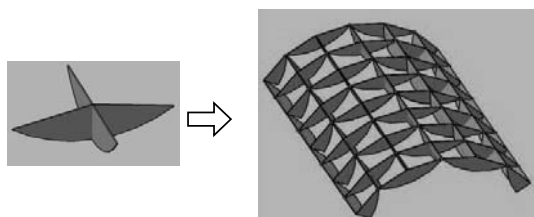


図 7 曲面構成モデル

3. 類似構造形態についての調査研究

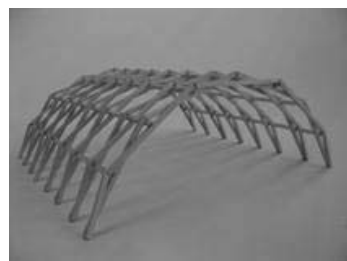
立体組合せパネルが最新の構造システムであることを証明するために過去の文献から類似研究を調査した。その結果、立体組合せパネルと相似するアイデアとして、相互依存形式(The principle of reciprocity)を基にした reciprocal structure や multi reciprocal grid のようなアイデアが挙げられ、これは古くから、東洋、西洋のどちらでも研究・実用化されていたと考えられている。²⁾これらの構造方式は短い梁であっても、隣り合う部材同士が連続的に互いを支えあう事で長いスパンの構造物を作り出すことが可能であるのが特徴である。

東洋では、中国北宋時代(A.D.960-1127)の首都開封(現在の河南省開封市)の風景を描いた中国の国宝の画卷「清明上河図」に、描かれる橋「虹橋」(図 8(a))が最古のものであると考えられている。共同研究者の陳らは、虹橋の構造原理を現代空間構造への応用の試みとして、虹橋の水平横材にあたる部分を延長しアーチ状部材を適切に配置することにより、図 8(b)に示すように Lap-Beam 円筒構造を提案した⁵⁾。図 8 のような Lap-Beam 構造各部材の断面を、図 9 のように構造曲面の面外方向に拡張すれば、一枚のパネルになることができる。その結果、構造体のトポロジー性質が変化しないままで、棒

状部材とパネルを入りかえることによって、新しい構造システムを創出できる。つまり、立体組合せパネルは Lap-Beams 構造と同じ位相関係で、同じ構造特性を持っている可能性がある。



(a) 清明上河図に描かれた虹橋



(b) Lap Beam 構造システム

図 8 中国宋代の虹橋⁵⁾

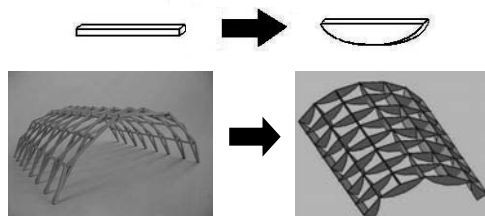


図 9 棒状部材とパネル

西洋では、天才芸術家科学者でもあるレオナルド・ダ・ヴィンチが 1478 年から 1518 年に書かれたとみられるアトランティコ手稿で相互依存形式に基づく自己保持型の橋(図 10)を提案しており、これは三次元空間のものとして、西洋で最古のものであると考えられている⁶⁾。この自己保持型の橋を観察すると、構造の原理は中国宋代虹橋と同じであることがわかる。但し、虹橋の登場はダ・ヴィンチの発明より約 500 年早く、イタリアにいたダ・ヴィンチは宋代虹橋から何かのヒント

を得たことがあったかについては継続的に研究する価値がある。

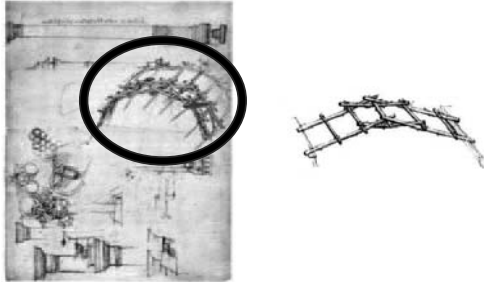


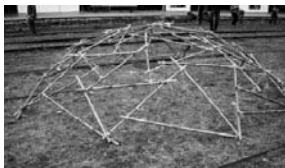
図10 レオナルド・ダ・ヴィンチのアイディア^{7,8)}

前述の図9と同様に、ダ・ヴィンチの提案した橋の部材を曲面外の方に展いてパネルにすれば、本論で提案する立体組合せパネルを得ることができる。但し、本論の提案は、前述のように虹橋の研究から得た発想であり、ダ・ヴィンチのこの類似構造については類似研究調査時に発見したものである。

現在の建築デザイン例としては、スイスのチューリッヒ工科大学 LORENZ LACHAUER(図11(a))やイタリアの建築家 BIAGIO DI CARLO(図11(b))など、日本では村田弘志(図11(c))などの建築家が相互依存形式に基づく構造の研究をしている。



(a)LORENZ LACHAUER の作品⁹⁾



(b) BIAGIO DI CARLO の作品¹⁰⁾



(c) 村田弘志の作品⁸⁾

図11 相互依存形式に基づく作品

上述より、類似構造体の共通点は、相互依存形式に基づいた幾何学的なグリッドで構成され、建設材料として木材を使用していたことであり、これは立体組合

せパネルの特徴とも共通する。そしてこれらは、一本の材をパネルにすると立体組合せパネルと等価的であると見ることができる。

しかし、これらのデザインは主に棒状部材を互いに支え合うように組んでいき、現在では小規模のものとして使用されており、さらにこれらは未だデザインとして提案しているだけである。また、これらの研究やデザインは一種の造形デザインとして研究されたもの多く、構造システムとしての研究が少ない。これに対し、本論で提案したパネルを用いる方法は、パネルを簡素な方法で接合することでより実用的にすることが期待でき、より自由なデザインを大空間で創出することができる新しいシステムであり、今後構造解析を行い、実用的な構造システムとして利用するのが目的である。

4. 安定性についての検証

4.1 自由度の計算

剛性マトリックスを用いた構造力学理論では、剛性マトリックスのランクが自由度の数と等しいならば、線形解析の解が存在し、構造物は安定しているものであることを証明できる。このような力学特性を調べると共に構造物の安定性を判定できる。しかし、本論は立体組み合わせパネル構造についての初期研究についての報告であり、幾何学的な組み方を中心に展開している。そのため、力学解析は今後の研究報告とする。力学解析の代わりに、本論ではクッツバッハ・グループラー方程式を用いて、立体組合せパネルの安定性の必要条件について検証する。

図4(a)に示す Lap 型組合せによる構造を例として、クッツバッハ・グループラー方程式を用いて、自由度計算を行なった。クッツバッハ・グループラー方程式は次の通りになる。 $F=6(n-1)-\sum_k(6-k)f_k$ 。ここに、 n はリンク数(支持部を含む部材数)、 k は拘束機構が持つ自由度の数($k=1\sim6$ を値取る)、 f_k は k の自由度を持った対偶数(拘束機構)、 $(6-k)$ はその対偶により拘束された自由度である¹¹⁾。

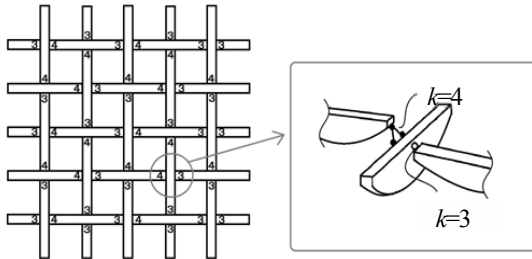


図 12 計算モデルと内部接点のモデル化
(数字は内部接点の自由度を表わす)

また、必要最低限の拘束を明確に数えるために、図 12 のように節点をモデル化することとする。そのため、部材の両端の自由度が 3 つではなく一方を 4 つにした理由は、拘束を少なくして自己応力が存在しないようにすることで、自由度を明確に数えることができるためである。

上記モデルに対する分析は下記の通りに展開する：

(1) リンク数：

リンク数 n は 35 個の部材(剛体)と 1 つの構造体と地面との支持部を合わせて 36 である。

(2) 内部接点の拘束：

図 12 のようにモデル化された節点では、自由度を 3 つ持つ対偶数が 30 あり、自由度を 4 つ持つ対偶数が 20 ある。

(3) パネルの剛体回転に対する拘束：

35 枚のパネルがあるので、それぞれの剛体回転の自由度数は 35 である。よって自由度を 5 つ持つ対偶数が 35 である。

(4) 外部支持点からの拘束：

まず、図 13 のように、周辺に配置された長い材の外端 (③印) と支持地面をピン接合すると、全体の水平回転および面内せん断変位は拘束される。この場合は、自由度を 3 つ持つ対偶数は 5 である。④印に示す残りの部材の内側の節点は 3 つの自由度を持つ対偶で拘束されたので、その外端部においては、4 つ自由度を持つ対偶で拘束することで十分であり、この対偶数は 15 である。

(5) 自由度の計算

上記のとおり、リンク数 $n=36$ 、 $k=3$ の対偶数は $f_3=35$ 、 $k=4$ の対偶数は $f_4=35$ 、 $k=5$ の対偶数は $f_5=35$ であり、これらの値をクッツバツハ・グループラー方程式に代入して計算すると $F=6(n-1)-\sum_k(6-k)f_k=6\times(36-1)-(6-3)\times35-(6-4)\times35-(6-5)\times35=0$ となる。よって、構造全体の剛体変位の自由度 F は 0 となるため、このモデル化された構造体は静定構造であることを証明できる。また、モデル化されない場合は対象構造物が不静定構造になり、十分安定できるものであることを証明できる。ただし、これは構造安定性の必要条件であるため、さらに構造の安定性を検証するためにはマトリックス解析が必要である。

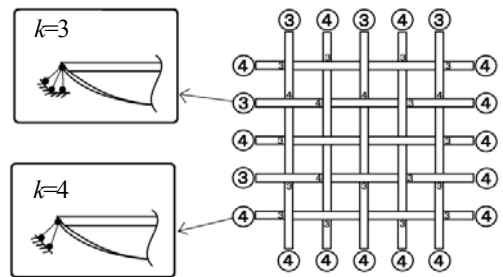


図 13 外部支持点のモデル

4.2 模型検証

自由度計算の結果を考察するために模型検証を行った。模型検証では、図 14 のように構造辺の O-O' 軸を中心とするパネルの回転は剛接合の場合に無視できるため、水平・鉛直方向の自由度のみを検証することとした。また、この場合図 14 の(a)のパネルと(b)の棒部材はトポロジーが同じ物体であると言え、水平・鉛直方向の自由度のみを正確に検証するには、図(b)を使用した模型の方が適するため図 15 の模型で検証した。

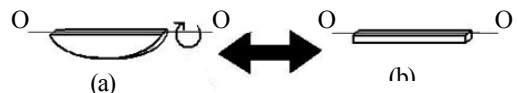


図 14 パネルと検証モデルの関係

この模型検証での接合部にはゴムと針金を使用した。このようにすることによって、節点を中心に各部材が変形や回転をし構造全体の観察ができる(図 15)。

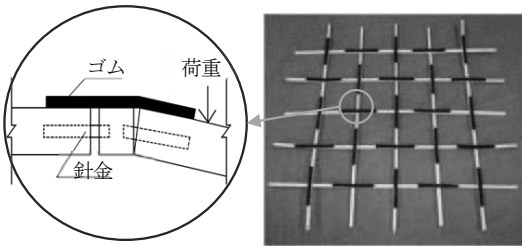


図 15 模型の接合部

自由度計算の結果と模型の動きを比較した結果、計算上の自由度と拘束の関係は等しいと考えられる。また、この構造は多くの外部支持を必要とし、構造体のみでは自立できないことがわかった。そのため、安定させる方法として構造体周辺に支持構造体が必要であり、詳しくは、次節において説明する。

5. 形態創生の方法

5.1 支持構造体

前述の自由度計算や模型検証より、この構造体は自立した構造物ではなく、構造体を安定させるためには多くの支持点を支える支持構造体が必要であるため、図 16 のような周辺支持部材を使用した。実際の支持構造体は、は RC 梁やトラス構造(木造または S 造)とすることが考えられる。



図 16 支持部材を使用した結果

5.2 多彩なデザインの可能性

立体組合せパネルの組み方には、今までの構造システムでは不可能なデザインを取り入れることも可能である。

その組み方の例として、中国では窓や間仕切りのデザインとして用いられる伝統的な格子のデザイン(図 17)や青森県津軽地方に伝わる手芸で、布地に糸で幾何学模様などの図柄を刺繍して縫いこむ「こぎん刺し」のデザイン(図 18)のような組み方も可能である。

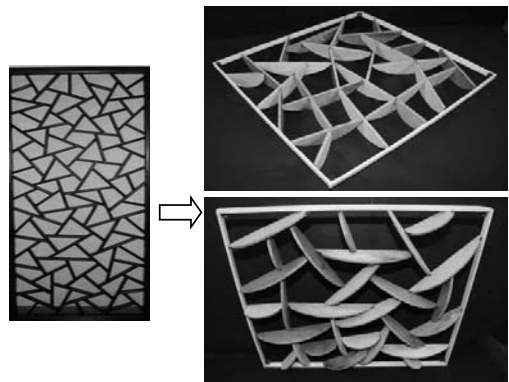


図 17 中国の伝統的な格子のデザイン¹²⁾

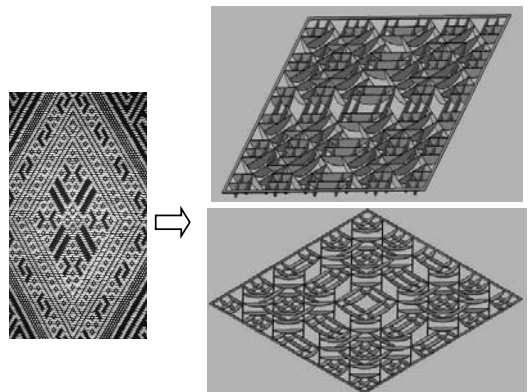


図 18 こぎん刺しのデザイン¹³⁾

6. 結論

立体組合せパネル構造は、1.5 層スペースフレームから派生した構造システムであり、類似研

究の調査結果によりパネルを用いる構造体としては今までにない新しい構造システムであると考えられる。

安定性の検証より、この構造体は自立安定構造ではないことがわかったが、安定させる方法として構造体周辺に支持構造体が必要であることがわかった。さらに構造の安定性を検証するためにはマトリックス解析が必要である。

立体組合せパネルの組み方には、従来の構造システムでは実現困難なデザインを取り入れることも可能であり、本研究で提案したデザインの他にもタイルの模様や、様々な幾何学模様などのデザインを取り入れることも可能であることがわかった。

本研究は初期研究であるため、今後の課題として、実用化に向けた力学特性の解明、接合方法の開発、構造設計理論などを継続的に研究していく必要がある。

謝辞

本研究に携わった陳研究室の皆様にご心から感謝いたします。

参考文献

- 1) PEI-SHAN CHEN, "A Study Report on an Ancient Wood Bridge Hongqiao", Structural Engineering International, 2008.2, pp84-87.
- 2) PEI-SHAN CHEN, "A Report on the Innovation of 1.5-Layer Space Frames", Proceeding of IABSE IASS 2011, London, 2011.Sep.
- 3) 陳沛山、大川原恵美、原田恵美子、細川美穂：宋代「虹橋」の構造原理についての研究、コロキウム構造形態の解析と創生、pp.89-94、2007.10
- 4) 川村 誠、陳 沛山：日本建築学会東北支部研究報告書構造系(73)社会法人日本建築学会、pp57～60、2010
- 5) 川端 龍也、三国 圭太：平成 22 年度八戸工業大学工学部建築工学科卒業論文
- 6) http://vbn.aau.dk/files/56095311/The_Principle_of_Structural_Reciprocity.pdf
- 7) http://www.jrea.co.jp/leonard/CA%20f/CA.data/Stationeries/CA_0028.html
- 8) <http://3rd-architecture.blogspot.com/search/label/Domed%20Pergola>
- 9) <http://eat-a-bug.blogspot.com/2011/08/experimental-wood-structures-at-eth.html>
- 10) <http://www.biagiodicarlo.com/index.php?pag=20&parent=20>
- 11) 山田 学：めっちゃ、メカメカ！リンク機構 99→∞、日刊工業新聞社、2009
- 12) <http://store.shopping.yahoo.co.jp/jikkenkoubou/so1014.html>
- 13) http://33-2007.at.webry.info/200703/article_5.html

要 旨

立体組合せパネル構造は、1.5 層スペースフレームから派生した構造システムである。1.5 層スペースフレームのトラス状の単位架構をパネルに置き換えることにより、立体組合せパネル構造が得られる。本論文では立体組合せパネル構造の幾何学的構成について紹介し、さらに立体組合せパネルの多様な組み方やデザインの可能性についての研究成果を報告する。

キーワード： 立体組合せパネル、レシプロカルフレーム、1.5層スペースフレーム、スペースフレーム