JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	中低品質木材による大スパン建築等の開発 ： 木構造開発に関するイノベーション／森林経済工学研究所の取り組み
Author(s)	今井，克彦；宮原，浩維
Citation	年次学術大会講演要旨集，31：41-46
Issue Date	2016-11-05
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/14018
Rights	本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
Description	一般講演要旨

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

1BO4

中低品質木材による大スパン建築等の開発
木構造開発に関するイノベーション／森林経済工学研究所の取り組み

○今井克彦（株式会社森林経済工学研究所）
宮原浩維（大阪大学大学院工学研究科博士前期課程）

はじめに

我が国の森林問題は、間伐が進んでいないため木材が過剰に蓄積されていることである。現在、約 40 億 m^3 が、人工林に蓄積されており、28 億 m^3 が要伐採量である。一方、現在の可能伐採量は、年間 2000 万 m^3 で、なお年率 3%（1.2 億 m^3）で増加している。間伐促進と高付加価値化による有効利用は、地域経済活性化だけでなく森林環境改善に寄与すると同時に大きな可能性を秘めていると考えられる。

木造スペースフレーム（KiTruss）の開発は、2001 年阪大フロンティア研究機構（文部科学省の「科学技術振興調整費戦略的研究拠点育成プログラム」で大阪大学大学院工学研究科に設置）の森林経済工学 PJT のテーマとしてスタートした。節だらけの木材が上級材と何ら遜色無く使えるという新発見がきっかけである。乾燥亀裂は、そのままとし、何らの改質処理を施していない。その後何度かの改良が行われてきた。木口に打込んだラグスクリューを引張るとラグスクリューが切断するという画期的研究結果に基づく 2013 年 6 月の大幅改良により鉄骨トラスに匹敵する構造パフォーマンスとこれを凌駕する経済性を達成した。現在までの実績は、17 件、約 14,400m^2 である。

この開発によって得られた多くの技術開発は、新しい国産木材利用に道を開きつつある。一方、古の宮大工などによって経験的に行なわれている技術の科学的裏付けにより、再度現在に生かすことも重要なことと考えられる。

身近にある材料を工夫して物を造るというのは、ブリコラージュと云われ、例えばピグミーの竹の家やモンゴル遊牧民のゲルがその例である。人類学上の重要な概念といわれており、ものづくりの原点でもある。宮大工が、知恵を働かせて巨大な神社仏閣を建設してきたのは、この好例と云える。筆者らは、ブリコラージュと対極にあるエンジニアリングとの融合による新しいものづくりを紹介する。

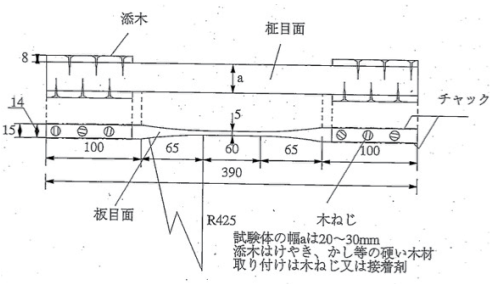
１．間伐材等中低品質材の新素材としての可能性

従来、節などの欠点が木材の引張り性能に大きく影響すると考えられており、建築基準法や、建築学会指針にもこのことが記述されている。すなわち、（１）式が明記されており、世界的にも同様である。

$$f_b > f_c > f_t \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに、f_b=許容曲げ許容応力度、f_c=許容圧縮応力度、f_t =許容引張り応力度

しかし、ここに根本的な材料力学的矛盾がある。（１）式の $f_b > f_c$ が成り立つためには、$f_t > f_b$ が必須である。$f_b > f_c$ は、実大実験が容易であるので妥当である。引張り実験は、世界的に図－１に示す無欠点小試験体によって行われてきた。しかし、試験片の採取位置によって年輪幅が大きく異なり、結果が大きくばらつく。これらを統計処理するため不当に小さな値となる。また、小試験体では、節の影響を評価することは、不可能である。鋼材などの均質材に準じた試験法は、木材のような不均質材の試験には不向きであるとともに有意とは考え難い。筆者らによる木材の実大引張り試験法の開発（2002 年／世界初）により、節が強度的な弱点にならないという画期的な結果が得られた。また、意外に結果がばらつかないことも明らかになった。これは、宮大工の言うように節は、弱くない、むしろ節の多い木は、強いので構造材に適しているということも科学的に証明された（図－５参照）。また、同時に $f_t > f_b$ が明らかになり、材料力学的な矛盾も解消された。これは、木材が繊維の塊であることを考えると至極当然の結果ではある。枝打ちしても節は、消える訳でなく隠れ節として内部に残る。図－４は、興味深い破壊をした試験体であるが、もう少し太く製材すれば無節と



図－１　無欠点小試験体

図－２　実大引張り実験

して扱われたものである。現状、表面的な目視で等級が決められており、材料学的かつ強度的な意味は、殆ど無い。

さらに、筆者らの実験によると重量あたりの強度を表す材料比強度で比べるとヒノキ間伐材の曲げ強度が 220kN·m/kg と超々ジュラルミンや最近話題のセルロースナノファイバーを超えている。これに加えて振動減衰性、表面傷に強い、断熱性の高さ、高い耐疲労特性など多機能な性質がある。さらに、適切な使用方法と環境であれば数百年の使用に耐えることは、歴史の証明する所である。これは、もはや新素材としての位置付けが妥当である。これらの結果によって枝打ちされていない節の多い木材も付加価値の大きな構造材として 100%使えるという画期的な結果が得られた。鎌倉時代までの建築物を見てみると、特に節を避けて木を選んだ形跡は無い。木材は、自然林から調達されたため、枝打ちされていないので節が多い。奈良の吉野地方で無節の樽材を生産するための枝打ちが江戸時代に始まったが、構造強度を大きくするためではなかった。無節の美しい木→上等の木→強い木とすり替わってしまったと思われる。東大寺転害門（天平 15 年／743 年）の堂々とした節は、感動的ですらある。木材は、山に立っていたまま使えと云う宮大工のいうように芯持ちで使う限り節は、全く弱点にならないということが科学的に証明された。ただし、集成材のように板材を貼り合わせて使うと節が弱点になるので節を排除する必要があり、輸入材に比べ小径材の国産材では歩留まりが格段に落ちる。

図－３　実大引張り結果

図－４　表面に出ない隠れ節

図－５　竹中大工道具館の展示

２．引張り接合の開発

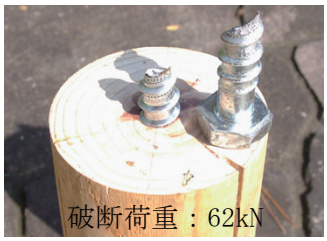
木材が鋼材などに比べて構造的に決定的な弱点となるのは、引張り接合が困難であることである。伝統的な寺社仏閣建築も曲げと圧縮に頼った構造形式である。有効な引張り接合が開発されない限り人工材料に太刀打ちできない。

金物を用いた接合法に対する宮大工のコメントは、「木造接合の基本は、芯引き（木と接合具の重心を合わす→木に無理を掛けない）や。ただし、鋼板を割り込むのは、邪道で鉄骨の真似や。あれだけは、止めときなはれ。」であった。宮大工の考えを形にすると木口からボルトを打込むしか方法が無い。しかし、建築学会指針では、木口に打込んだボルトに引張りを作用させることを想定していない。木材が強いのは、繊維方向（軸方向）で、繊維直交方向にボルトを打込むと接触面積が小さいので応力集中が起きることとこれによる割裂き（薪割り状態）が生じさらに小さくなる。従って、木口に打ったラグの引張力を効率よく繊維に伝達（定着）するのが最も有効で合理的な方法である。

図−６にこれを解決する画期的な方法を示す。ネジ下穴に特製のタップにより雌ネジを形成する。次に、注入器により必要量の樹脂を穴入り口に注入する。この状態でレンチによりラグスクリューをねじ込む。ラグスクリューは、樹脂を取込みながら余った樹脂を押し込んで行く。結果として完全な雌ネジが、全長に渡って形成される。この注入器は、RC 建築の耐震補強などで使われるものである。コンクリートに穿孔した穴の底に樹脂を必要量注入した後、異形鉄筋を挿入してアンカーするものであり、ネジ部などの狭小部に充填することを想定していない。これは、本来の使い方ではない使い方により問題を画期的に解決するという正にブリコラージュの手法である。

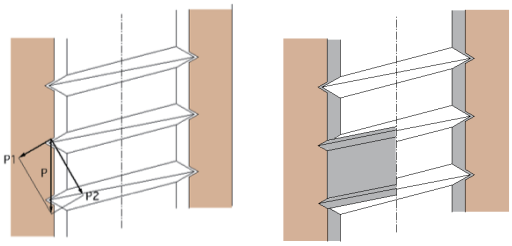
図－６　ネジ保持力強化法（左から、下穴にタッピング、樹脂注入、ラグ打込み、充填状況）

このようにして打込んだラグスクリューを引張ると 62kN でネジが破断した。また、8 本打の接合部試験体（図−８）では、469kN という驚異的な耐力となった。この例では、木口ブロックの底で繊維が引張り破断したが、ラグスクリューの耐力 8x6.2=496kN と近い値である。10 本打の接合部では、590kN となっており、鉄骨なみの引張り耐力を実現している。なぜこのような高性能が実現するかについても解明されている。樹脂が無い場合は、図－９左のようにネジ表面に平行な分力 P_1 が面直交方向の P_2 による摩擦力より大ききなるためラグスクリューが引張られると穴を拡げる方向への力が大きくなる。結果として木材が割れ、ラグスクリューが引抜けることになる。樹脂が充填されていると樹脂が鉄筋コンクリートのフープ筋に似た働きをし、P_1 が生じなくなる。このモデルを用いて引抜き耐力を計算するとラグスクリューが常に破断するという結果が得られた。エポキシ樹脂は、強力な接着材でもあるのでラグスクリューに密着していても鉄筋コンクリートのフープ筋同様の働きをする。木構造で困難であった有効な引張り接合法を手に入れたことにより次節で述べる KiTruss のみならず各種の応用が可能となる。これは、接合という最も基本的な技術に関するイノベーションと考えられる。



図－７　ラグの破断

図－８　ブロック抜け



図－９　樹脂による拘束の模式図

２．木造スペースフレーム（KiTruss）の開発

KiTruss は、最初 2002 年の学遊館アイビードームで実用化された。その後何度か改良され前節の樹脂注入法を取り入れたシステム開発が、2013 年に行われ現在に至っている。

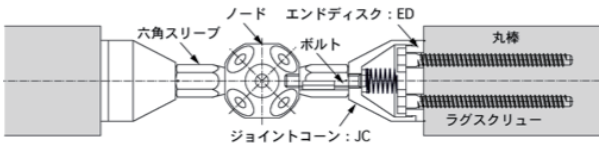
KiTruss は、次の特長を持っている。1）製造に技術を要しない 2）製造に設備や資格が不要 3）通常の荷重、長期間荷重や繰り返し荷重に対する安全性 4）現場施工の容易性 5）鉄骨では考えられない部材長精度 6）劣化部材の簡単取り替えなどである。長期間荷重や繰り返し荷重に対しては、接合部に関して 3 年間に及ぶクリープ実験と疲労実験を行っており、極めて良好な結果を得ている。木構造では、接合部レベルのこういった研究は、殆ど行われていない。多雪地域での適用や現在開発が進んでいる屋外構造物用 KiTruss への応用が期待されている。屋外構造物として対象となるものは、大型公園施設、モニュメント、大型パーゴラ、物見塔、人道橋、広告塔、道路サイン塔、津波避難タワー、移動体通信用アンテナ電波塔、農業用超大型ビニール温室などである。

KiTruss 接合システムを図−１０に示す。木材は、端部を切断するだけの簡単加工で誰がやっても精度確保が簡単なようになっている。表−1 にシステム範囲を示す。木材は、ヒノキ、スギ、カラマツのいわゆる間伐材等の中低品質材であり、芯持ちのムク材である。表−2 に許容引張り耐力の範囲を示す。今後、P.6 に示すように基本形から発展させた超ローコスト版や PC 鋼棒テンション材と組合せることによる多様な展開が可能となる。

次ページに実施例を示す。

表-2　KiTruss の引張り許容耐力（kN）

	長期	中長期	中短期	短期	最大耐力
トラス Bolt	15.1~225.5		22.7~338.2		38.1~568.3
Lag screw	6.0~177.2		9.0~265.8		15.3~452.4
木材端部のブロック抜け引張り耐力					
ヒノキ	6.0~176.7	6.0~229.7	9.0~257.0	9.0~321.3	16.4~481.9
スギ	6.0~145.0	6.0~188.5	9.0~210.9	9.0~263.6	16.4~395.5
カラマツ	6.0~155.8	6.0~202.5	9.0~226.6	9.0~283.3	16.4~424.9



図―１０　KiTruss 接合部

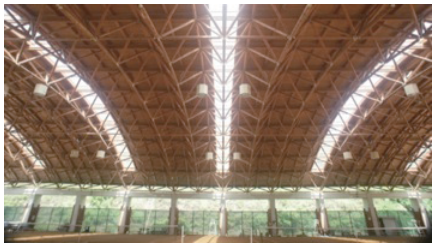
表-1　KiTruss のシステム範囲

トラス Bolt	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30
木材径							
40	40						
50	40			金物外径			
60		46					
80		56	56				
100		74	74				
		56					
120			92	92			
			74				
150				110	110		
				92			
180				140	140		
				110			
200					167	167	167
					140		
220					167	167	167
					140		
220						197	197
240						197	197
						167	
270						197	197
300						197	197
350						197	197

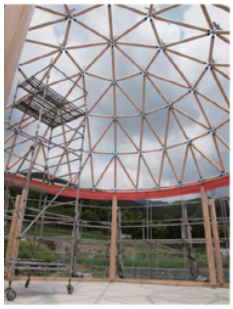
（実施例）

学遊館 Ivy Dome（スパン 40m）

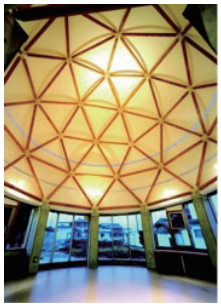
西はりま特別支援学校（スパン 33m）



清水ふれあいドーム（スパン 40m）



保育園遊戯室



JR 社駅ふれあい館

石橋南小学校耐震補強工事

遊具/三島大社縁日イベント

完成予想図

俯瞰図

ドーム立ち上がり部

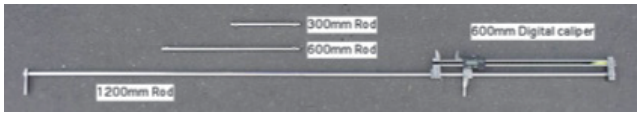
室戸屋内野球練習場兼大規模防災拠点（50x50m／天井高さ 22m）
地震時の重要度係数 1.5 で設計（通常の大地震の 1.5 倍の地震荷重）

３． KiTruss の製造／地産地消

木口は、材軸に直角に切断後、ラグスクリューを打ち込む穴をドリルで開ける。次にエンドディスクをセットし、ラグスクリューを締め込む。部材端接合部品は、積層型構成なので組み立てるのが容易で部材長精度が出し易い。木材長さは、±0.1mm の精度を持つクロスカットソーで切断される。独自に開発した長尺デジタルノギス（図―１１）により切断精度を検証している。始業時に数本の木材を切断し、ノギスで測定して切断機の精度を校正するだけで良い。ノギスは、精度±0.01mm、可変式で最長 3.9m 測定できる。手順に従って作業すれば特別の技術が無くてもスペースフレームに必要な高い部材長精度が得られ、結果として高い構造性能が得られる。

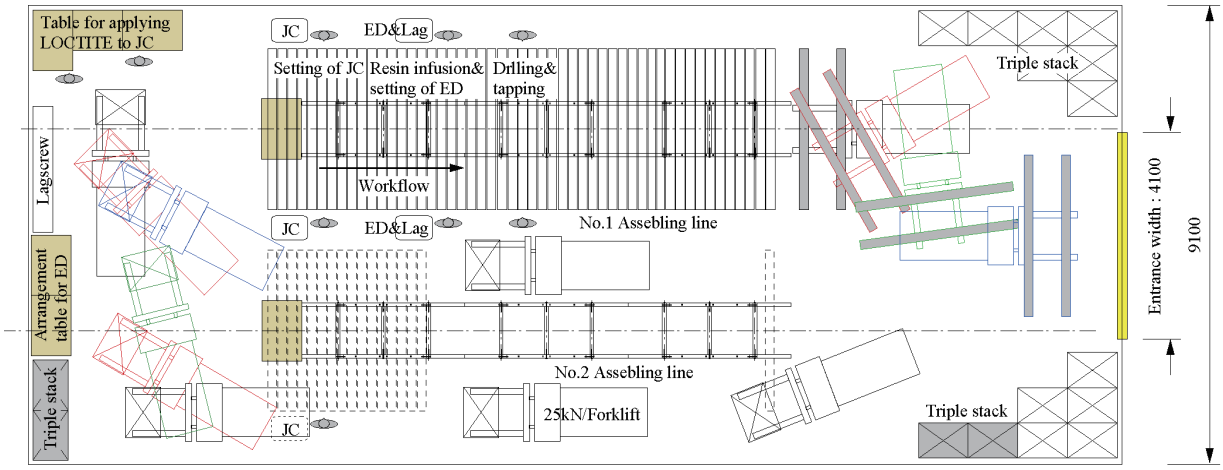
図―１２は、作業風景、図―１３は、廃校に設置した室戸屋内野球練習場用の組立ラインを示す。従来は、木材を穴開け機まで移動する必要があったが簡易な穴開けジグを開発したことにより作業が全て組立ライン上で行えるようになった。結果的に総工数は、40%程度となった。組立ライン上での作業は、ものをできるだけ動かさないで人間が動いて作業するという最近の車の組立ラインの考え方を踏襲している。室戸クラスの巨大 PJT を設備無し、作業員の資格無し、熟練技能無しで製造可能にしている。

作業員は、第一組立てラインに沿って移動して行く。この間にフォークリフトのグループは、第二組立てラインに木材を並べて次の作業の準備をする。第一組立てラインの作業が終われば作業員は、第二組立てラインに移動する。フォークリフトのグループは、第一組立てライン上で組み終わった部材を集



図―１１　長尺デジタルノギス

図―１２　組立ライン上での作業



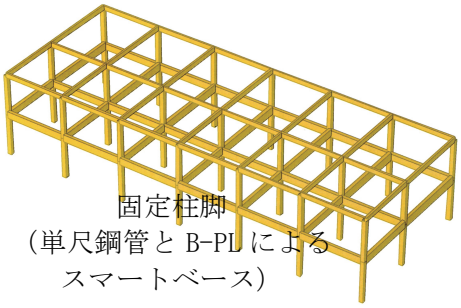
図―１３　室戸屋内野球練習場用部材組立てライン（廃校校舎内に設置）

積場に移動し、その後、再び第一組立てラインに木材を並べて次の作業の準備をする。これを繰り返すことにより効率的に作業を進めることができる。組立て作業は、木材の両端で、2 人一組、合計 6 人で行う。作業によっては、楽なものとそうでないものが有るので時々交代して行うことができる。作業台は、寸法切断済みの木材や部材完成品を運搬する木製ラックをひっくり返して使用できるようにしている。ラックの接合部は、KiTruss と同じでかつラグスクリューの表面をパラフィンコーティングして組立て分解可能にしている。室戸屋内野球練習場向けの 330 種類、約 3800 本の組立てを 8 人で 2 ヶ月余りで完了した。トヨタ生産方式と同じ考え方で、レヴィ･ストロースの云うブリコラージュと位置付けている。

４．木造ラーメンの開発／災害復旧住宅の開発

現在、1～2 階建てで筋違い等を使わない鉄骨なみのフレームの開発も進めている。これも地産地消を前提としている。公共施設、事務所や住宅等、一般的な建築に使用できるので大きな木材使用量が期待できる。このシステムは、組立て分解が容易で、備蓄できる災害復旧住宅（あえて仮設住宅と云わない。数十年以上使用可能な本設仕様。）としての応用を考えている。普段は、イベントや季節限定シェルターとして使用可能である。使用材料は、ヒノキ、スギの中低品質の芯持ち無垢材である。

従来のいわゆる木造ラーメンの問題点を一挙に解決する画期的構造システムを開発中である。その特長は、1）柱梁接合部に締付け力導入（ガタの無い接合部）2）簡単施工の完全固定柱脚（鉄骨固定柱脚と同等性能）3）普通の大工で加工可能 4）現場での寸法調整不要（誰が建てても同じ）5）十年～数十年後あるいは地震後の締め直しが可能（木造の宿命である材直交方向の「木痩せ」にも対応）6）組立て分解が可能などである。



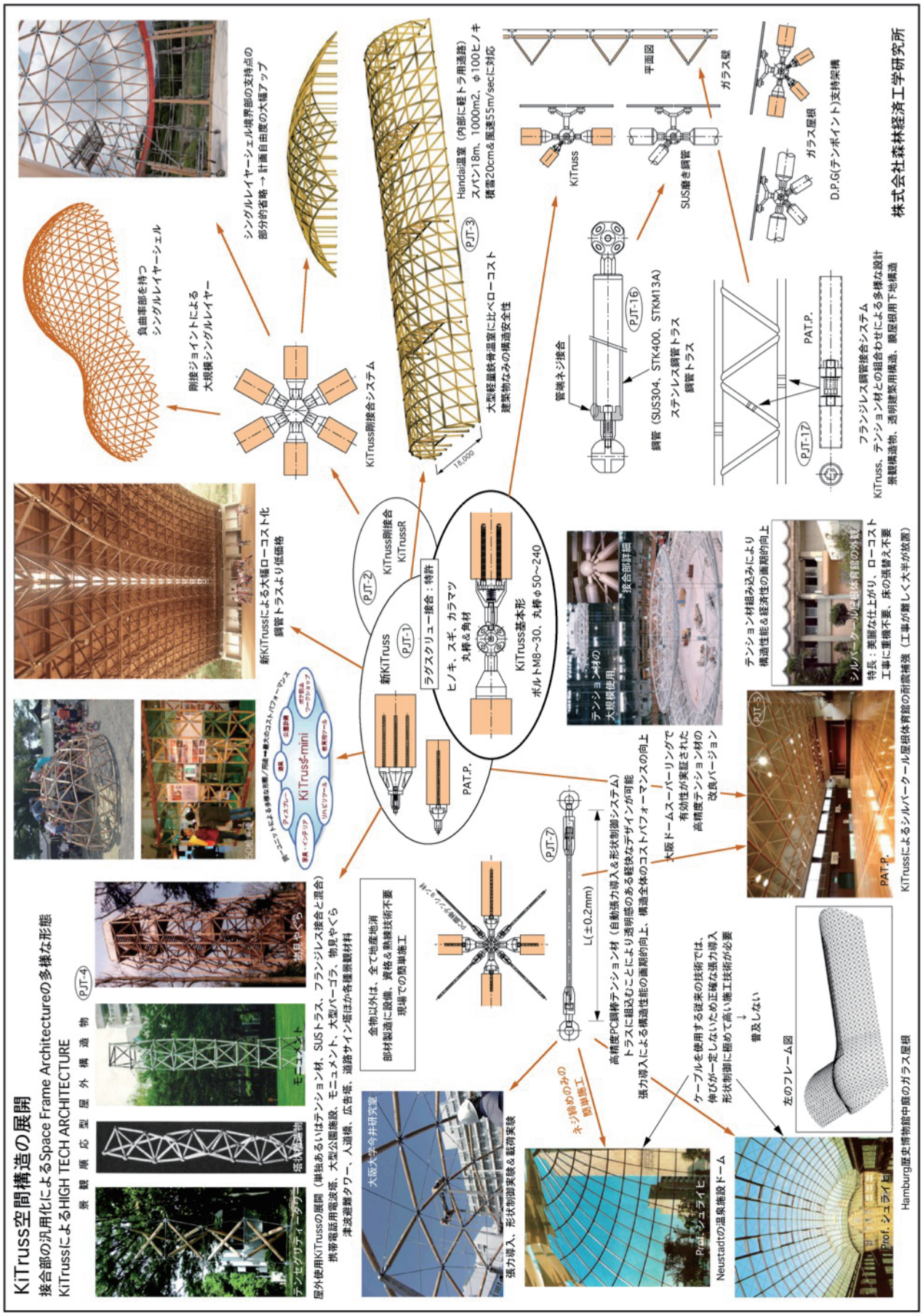
図―１４　２方向ラーメン設計例

ここでも KiTruss 接合部で採用したラグスクリューによる高性能引張接合法を用いる。鉄骨なみにブレース併用も可能な仕様としている。

おわりに

以上、KiTruss 開発に関係する各種の技術開発の事例について述べたが、従来に無いあるいは逆の画期的な知見が得られると次々と新たな開発が連鎖的に起こる。筆者らは、これを「イノベーションの連鎖」と呼んでいる。シュムペーターの云う異分野技術との新結合によるイノベーションは、いわゆる改良、改善ではなく不連続なジャンプである。イノベーションは、大きなものものばかりではない。イノベーションを続けることにより創造的破壊へとつながる。特に、木材利用に関して我が国は長い歴史を持っており、温故知新がイノベーションに繋がることが少なくない。

イノベーターは、教育によって養成できるとは限らないが、連鎖が起きた場合には、訓練、教育により、これに続く者を養成出来る可能性がある。（狭い専門）知識を詰め込みすぎるとイノベーター出現を阻害する可能性が有る。専門外の知識や経験が重要である。



図―１５　KiTruss の展開：基本形、改良型をベースにした展開イメージ