

特別寄稿

木造スペースフレーム建築の生産システムについて —地産地消で巨大ドームを作る—

株式会社 森林経済工学研究所
代表取締役(元、大阪大学教授)

今井 克彦

1. はじめに

身近にある材料で建物などを作るというのは、ブリコラージュと云われ、例えばピグミーの竹の家、モンゴル遊牧民のゲルやイヌイトが氷の家を作るのがその例である。人類学上の重要な概念といわれており、身近の材料を工夫して物を作るというものづくりの原点でもある。最近では、情報システムのティンカリング (tinkering) やインターネットでのブリコラージュによるコーディングの有効性等がいわれている。

現在でも地球上の大半の建物がこれであるという研究者もいる。これと対極にあるのがエンジニアリングと云われているが我々は、これらを融合させることにより新しいものづくりの形を提案している。建築生産学「事初め」と位置付けている。木造スペースフレーム建築をデザイン、製作、建設、経済分析まで含めて総合的に捉える研究を紹介する。

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。

間伐促進とその有効利用は、地域経済活性化だけでなく森林環境改善に寄与するものと考えられる。

木造スペースフレーム (KiTruss) の開発は、2001 年フロンティア研究機構の森林経済工学 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 14,400 m^2 である。

KiTruss は、次の特長を持っている。1) 製造に技

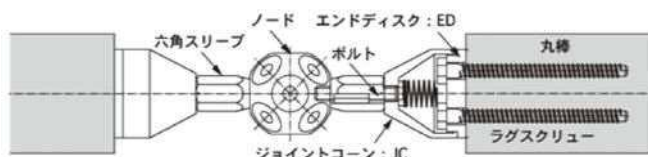


図-1 KiTruss の接合システム

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。

2. システムの概要

KiTruss 接合システムを図-1 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。

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						
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

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

3. 形状生成と標準データファイルの作成

Formex 代数に基礎を置く形状処理言語 Formian が効率的な形状生成を可能にしている。

Formian は、代数を運用するメインプログラムと座標変換するユーザーによるサブプログラムからなっている。Formex 代数は、図形や連結を直接四則演算できるので位相幾何学的一种である。グリッド生成時にデザイナーの意思を直接反映できる点に特長がある。多くの形状生成プログラムライブラリーを蓄積しており、実際の設計に

当たってはこれらをマイナーチェンジすることにより行われることが多い。Formian は、座標データ、部材連結、節点属性（荷重点、支持点、境界荷重点）を File-A として出力する。

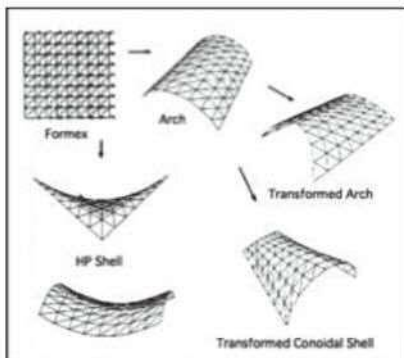


図-2 形状生成の例

KiTrussConnector は、File-A ベースの異なる形状を結合できる。

KiTruss3Dpre-proc は、File-A を元に標準データファイル (File-B) を作成する。File-B は、座標、部材連結、種別、支持条件、部材端接合部の情報、荷重データなどを含んでいる。後に示すソフトネットワークの多くのプログラムがアクセスできる。

形状のデザイン検討は、File-B を利用して MultiFrame4D による簡易型 CG で行える。また、MultiFrame4D 経由で 3D-DXF ファイルを出力することにより、一般の CG ソフトにより写実的な表現ができる。



図-3 簡易型 CG (左) と写実的 CG (右)

4. 構造解析

KiTruss-3D は、構造解析とこれに基づく部材設計及び接合部設計を行う。解析結果は、PostTrs によりグラフィカルに表現される。応力分布は、カラーグラデーションで変形は、拡大して表現される。PostTrs は、結果を画像データとして出力する。

Fatigue は、想定される 2 つの荷重による結果を用いて部材毎の疲労寿命を推定する。

BucklingSingle は、単層構造の座屈解析を行う。

MultiFrame4D は、Beam Element を有するモデルの構造解析を行う。

5. 木造部材の生産システム

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。

部材加工データ、部品及び数量は、表-3 のように MemberListKiTrs から出力される。

表-3 部品リスト

Name	TB No.	Timb-Dia.	BOLT	JC-Dia.	Timb-L.	Quantity	Lag	Lag QTY
1	TB11	80.0	M-12	56.0	1474.5	55	M-12 x 2	110
2	TB11	80.0	M-12	56.0	1498.9	264	M-12 x 2	528
3	TB11	80.0	M-12	56.0	1649.2	72	M-12 x 2	144
4	TB11	80.0	M-12	56.0	1718.0	137	M-12 x 2	274

NUMBER OF LAGSCREW (M-12) : 1056

木材長さは、表-3 を参照して ±0.1mm の精度を持つクロスカットソーで切断される。独自に開発された長尺デジタルノギス (図-4) 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な技術が無くてもスペースフレームに必要な高い精度が得られる。

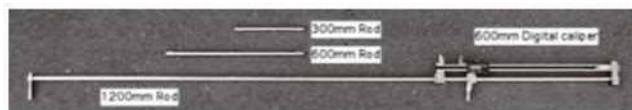


図-4 長尺デジタルノギス



図-5 組立ライン上での作業

図-5 は、作業風景を、図-6 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できるようになった。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。

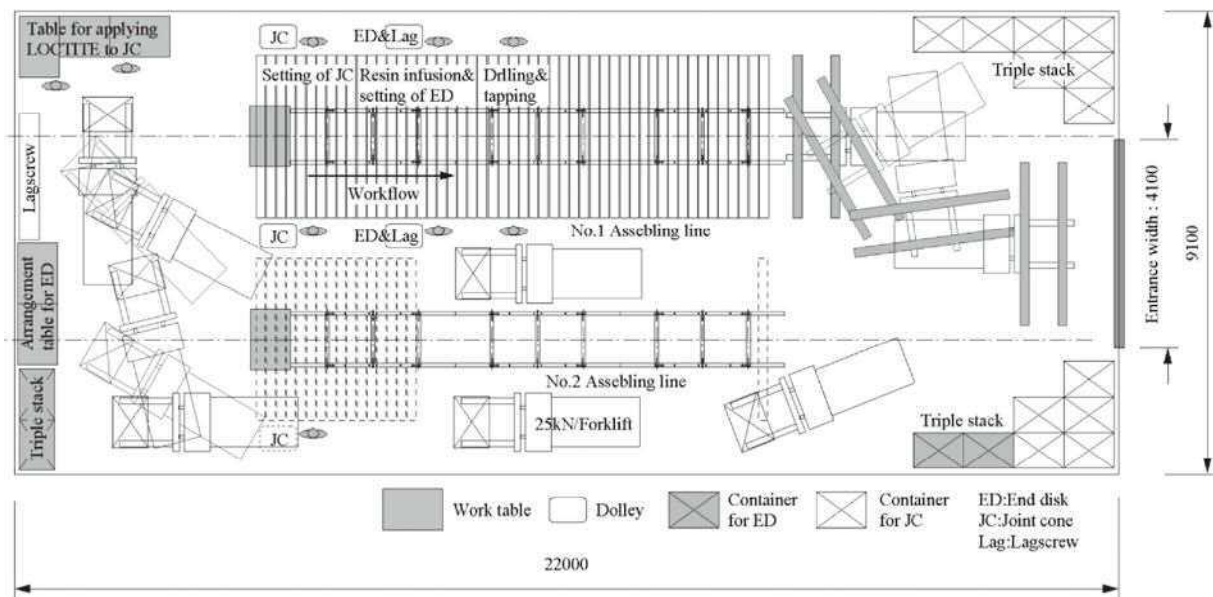


図-6 室戸屋内野球練習場用部材組立てライン (廃校校舎内に設置)

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1組、合計6人で行う。作業によっては、楽なものそうでないものがあ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・ストロースのクラウドブリコラージュと位置付けている。

6. 現場施工

現場組立ては、部材精度が良いことと接合ボルトがバネで押し出されるため節点間距離が正確な距離であっても簡単に行える。組立て順序を考える必要が無い。また、スペースフレームで重要なボルト締付けは、所謂ナット回転角法で行えるようにしてあるので目視確認ができる。簡単でかつ極めて信頼性の高い施工法である。

図-7 に現場組立て図面の例をしめす。これらは、FromFileB to MemCAD と NewBall TB KiTrs を参照して TrsChecker の pict ファイル出力と Excel ファイル出力を Vector にペーストしたものである。

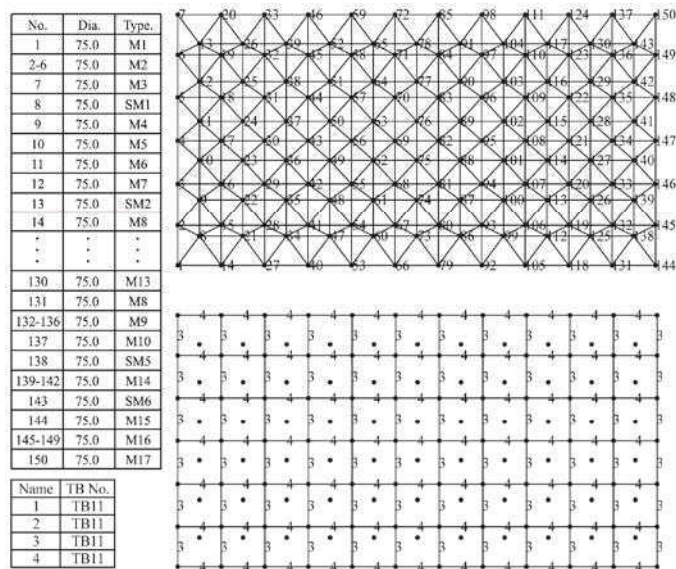


図-7 施工図の例(ノード番号図、部材番号図)

従来、総足場の上で一本ずつ組立てていたが最近の改良により接合部性能が鉄骨並みに向上したので地組みしたブロックをクレーンで上架することが可能となった。この方法は、足場は、部分的でよいことと地上作業が多いことで安全性、大幅な工数削減と工期短縮が可能となった。図-8 の例では、トラス工事にに関して、屋根面積 2,536 m²を正味 10 日で施工した。



地組みブロック

ブロックの上架

ブロックのドッキング

図-8 ブロック工法(福崎サルビアドーム/スパン40m)

7. 生産システム支援ソフトウェアネットワーク

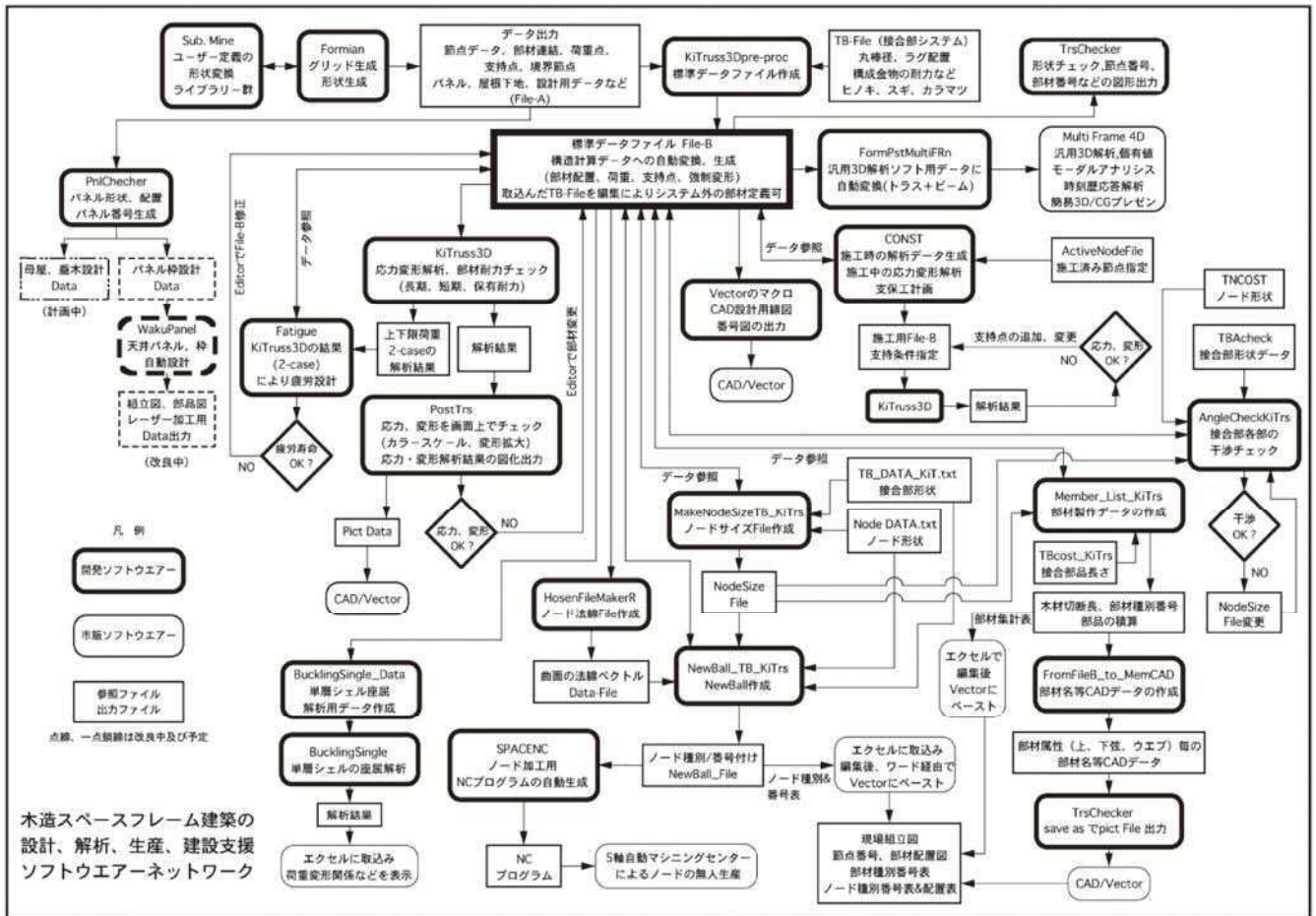


図-9 生産システムを支援するソフトのネットワーク

8. 経済分析

室戸PJTでは、木材径120～220mm、長さ2.5～3.8mのヒノキ3,800本を使用した。このための原木を約650m³、屋根下地用にスギ原木約550m³を使用した。またこの組立ては、地元の人によって行い、金物の製造も地元企業で行った。

福崎PJTでは、木材径120～180mm、長さ3.5～4mのヒノキ1,750本を使用した。このための原木を約170m³を使用した。原木価格は、2.9百万円、丸棒製材価格5.8百万円、切断価格77万円、部材組立て

価格1.1百万円である。屋根下地用のスギ原木は、2.8百万円、製材費12百万円、加工費4.1百万円である。合計費用は、29.5百万円である。

今までの平均屋根面積は、1,200m²であり、トラスに関する木材ベースの価格は、15百万円である。全て地域材であり、それなりの効果を地域経済に与えている。金物価格は、この数倍になるのでかなりの経済効果を及ぼしていると考えられる。

我が国林業の現状を考えると本稿で述べたスペースフレームへの応用は、林業復活に向けたほんの小さな一歩

ではあるが、図-10 に示すような展開により更なる木材利用が可能となる。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。

9. 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



シルバークール屋根の
面内耐力確保

石橋南小学校耐震補強工事



遊具 / 三島大社縁日イベント



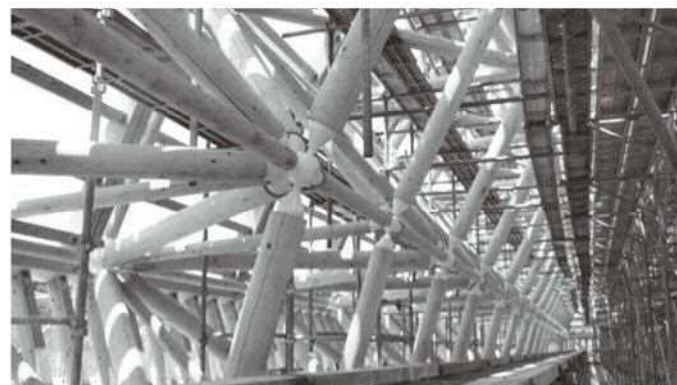
完成予想図



俯瞰



遠望



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) / 藤田宜紀建築設計事務所
(設計: 藤田宜紀 (S40 年卒) & 神吉良輔 (H14 年卒) / エンジニアリング (株) 森林経済工学研究所)

