

特別寄稿

複合的建設戦略

Combined Construction Strategy

ミュンヘン工科大学 (Technische Universität München (TUM)) 教授

建築具体化及びロボティクス学部 学部長 トーマス・ボック
(Chair for Building Realization and Robotics)

アブストラクト

日本は、世界最先端のプレハブ産業、総合建設業（ゼネコン）、製造業（トヨタ）、建設機械メーカー（小松、IHI、日立建機）、造船業及びサービス産業を持ち合わせている。

日本が環境や自然及び人口動態の課題を抱えるであろう将来の社会に豊かさを生み出すには、これらの産業の持つ強みを融合しさえすればいいのである。

1 はじめに

日本の伝統建築は、自然災害や資源不足などの制約条件の下で発展してきた。資源不足によって、日本文化はその初期から、持続可能なものでなければならなかったのである。

日本のプレハブ産業やゼネコン、建設機械メーカー、製造業、造船業などは、地震や台風などの災害にも耐えられる優れた建物の生産において最強の実力を有している。例えば、日本のプレハブ住宅は100~200万ものパーツを組み合わせて設計することにより、顧客の要望を広く取り入れることを可能にした。

本稿は、産業を破壊するコストダウン戦略に替わるコストアップを可能とする建設方式を取り入

れた新たな戦略を、建設産業に提案するものである。投資収益率をより高く、かつそれをより速やかに獲得するためには、コストアップ方式による建物の質はより高いことが必要で、しかもそれをより早く利用可能としなければならない。

更に、本稿は、工業化されたプレハブメーカーとゼネコン双方の強みを融合させた複合的戦略も提示する。

日本伝統の秩序を重視した文化から TPS<トヨタホーム式建設>へ

プレハブ方式は、何世紀も前から日本の建築文化に深く関わり、特に伝統的な木造建築は、現在の建設業界の高度なプレハブ方式の先駆けと考えられる。また、日本の伝統は、秩序、標準化、体系化への強い意志、そしてサブシステムのライフサイクルに合わせた交換可能性と密接に関係している。そのサイクルには自然の営みと食料供給も織り込まれている。伊勢神宮の周辺には、20年毎の遷宮（建替）に備えて5周期分を賄う樹齢100~500年の森林があり、畑や池は食料をも供給する。

現代の日本人建築家は、これらの規則と共に寸法システムも心得ている。このような寸法の標準化により、建物の平面のみならず、立面や装飾・造作部分（神棚、たんす、空間と空間の融合や仕切りを容易にする障子（日本の伝統的な引き戸）



写真1 伝統建物



写真2 桜町、分解された建物



写真3 歌舞伎のからくり車仕掛け

など)にも、潜在的なリズムを持つ特殊な複数層のグリッド(格子)が生み出されることがある。各建物の大きさは、畳の枚数を元にした坪で計算されるため、都市計画ですら、この畳割寸法システムを基準とすることもある。

この標準化と寸法システムを重視する非常に日本的な傾向は、既に数世紀も前からプレハブ方式を促進する環境を生み出し、技術者や建築家は、この文化を今日に至るまで維持し、発展させ続けてきた。建物の各部分は、劣化やライフサイクルに応じてすべて分解することができるのである。

もうひとつ重要なことは、「からくり」の発展である。ヨーロッパでは、特権階級を楽しませるためにフランスのオートマタひさしげが発展したのとは反対に、日本では、田中久重が平民や農民のために、からくりや和時計を製作した。このからくりの概念は、歌舞伎で使われる廻り舞台、蛇の目舞台及び壁の回転仕掛けなどにも取り入れられていった。

文化と製造の革命：

セキスイハイムM1：生産を考慮した設計

私がフルブライト奨学生として、シカゴのイリ

ノイ工科大学(IIT)のファズラー・カーン教授とマイロン・ゴールドスミス教授の下で研究していた頃、高山正實博士と私は延々と議論を交わしたことがあったが、その中で彼は、故大野勝彦氏が1968年に、東京大学における博士論文の一環として、私の恩師でもある内田祥哉教授の指導の下で開発した、セキスイハイムM1のシステムについて教えてくれた。

このM1は、住宅が大規模工場で大量生産されるきっかけとなった。三次元のモジュールキットは、巧妙かつシンプルで、現代のライフスタイルに合わせて変更可能な設計で評判になった。工場でのライン生産のために複雑度を下げることを可能にしたのである。つまり、M1は設計と生産の



写真4 セキスイハイムM1

問題を一気に解決する原型なのである。鉄骨フレームによって構成された「ユニット」は工業生産に非常に適しており、少数のコンポーネントから、住み手の要望に合った多様な解決策を提供できた。そして、M1は1970年代に年間3,000ユニットを上回る安定した生産を達成し、先進の自動化への投資を実現可能にした。

プレハブ方式が広く受け入れられるためには、日本文化が変化を受け入れ可能であることも重要であった。長い歴史を誇る日本の多くの都市が、(多くの場合、急激に)発展するプロセスの中で、例えば、火災や地震など自然災害による劇的な変化を経験してきた。もうひとつの特徴は、新しい天皇の即位に伴って首都を移す習慣であった。

町全体が素早く移動・再配置されるため、速やかにかつ低価格の再編と再配置の工程を可能にする、強固で効率的な寸法システムと精巧なプレハブ方式のフレームが要求された。こうして、政府や宗教関連の主要施設は、標準化及び工業化された建設方法を用いたプレハブ方式で造られた。

歴史的建物の変容がその土地の気風(ゲニウス・ロキ)を損なうことに繋がることが多いヨーロッパ文化とは裏腹に、日本の文化は継続的な更新の精神を育んできた。日本社会の安定が厳しく試されたのは1867年で、歴史上の大きな分岐点のひとつになった。幾世紀にも渡る国際社会からの隔離(鎖国)の後、開国に踏み切った。それに従い、独立国としての力を維持するため、日本は近代的産業国家へと急激に変容していった。

しかし、これが最後の試練ではなかった。第二次世界大戦が終わった時、西洋による植民地化に首尾よく抵抗した唯一の国に対して遂行された激しい空襲と世界初の原爆使用によって、30%近い日本の住宅は破壊されていた。再び襲った著しい住宅不足のため、早急なシェルターの配置が即時に必要なためであった。

トヨタ生産方式とトヨタホーム

戸建持家住宅の大量生産が発展する中で起っ

たもうひとつの画期的な出来事は、トヨタホームが、空間ユニットの製造にトヨタ生産方式(TPS)を応用したことであった。第二次大戦後の当初、トヨタ自動車株式会社は急速に生産性を向上させる方法を探っていた。数回に渡るフォードとゼネラルモーターズの工場視察を経て、トヨタの経営陣は、大規模な多品種生産に基づく生産概念は、特に日本特有の条件下では大きな成功に結びつきえないという結論に達した(Ohno1988)。彼らの考えでは、新しい生産方式に必要なのは、頻繁に変わる日本の市場ニーズへの素早い対応能力であった。このような事情から、トヨタは日本の必須条件に見合った独自の市場ベースの生産方式を開発し始めた。それがトヨタ生産方式である。

この改革は、従来の、物と情報の流れ(プッシュ型生産)から、実需に基づいた新たな概念(プル型生産)への拡張であった。プル型生産では、ストックや過剰生産を避けるため、実際に需要のある製品のみが生産される。この新しい、物と情報の流れを支えるために、「かんばん」という統合型コミュニケーションシステムが開発された。ここで重要なのは、この工程が基本的に顧客のデマンドがあって初めて起動する点である。

したがって、以前のように工場の生産量はその経営の都合や在庫能力により決まる「プッシュ型」ではなく、顧客に「引っ張られる(プルされる)」のである。生産と顧客デマンドを完璧に同



写真5 セクスイハイムの生産

期化するには、後工程からの要請で初めて、ジャストインタイム・ジャストインシークエンスで（適時に順序だって）前工程が着手できるよう、工場と部品製造業者の徹底的な同期化も必要になる。

大野耐一氏のもうひとつの功績は、「ムダ排除」方針の適用である。第二次大戦後に日本が受けた経済援助はほんのわずかであったため、大野氏は既存資源をより効率的に活用する手段を見い出すよう要請された。そこで彼は、その概念の中で「7つのムダ」を提言した。大野氏曰く、中でも最もよくあるのが「つくり過ぎのムダ」であり、顧客のデマンドなしに製品が作られることであった。

そして、1970年代、トヨタはついにトヨタホームと共同で住宅ビジネスの開発を始め、自動車部門のトヨタ生産方式を、工場の生産ラインで製造されるプレハブ住宅の生産に活用し始めた。その後の数十年の間に、他のプレハブ産業の主要プレーヤーもすべてこの流れを追い、製造現場、製品及び組織にTPSの基本原則を取り入れていった。

販売戦略としての自動化・ロボット化された生産方式

まず、日本人は一般的に、自動化やロボティクスやテクノロジーに対して非常に肯定的であるということに言及しておかねばならない。いくつかの歴史的な出来事が、先進技術に対する特殊な姿勢をかたちづけたと言えよう。

例えば、日本人は16世紀に独自の計時器（和時計）を開発し、個人が各々の仕事のリズムに合わせて時間を知り、調整することを可能にした。続いて、現代日本の自動化やロボティクスの先駆けと見られている「人形からくり」が、機械仕掛けの遊具として普及した（Wisnet 2007; Bock 2011）。そして、次第に日本における自動化とロボティクスは、人間がそれらのために尽すのではなく、人間に役立つために設計されたものであ

るというイメージを色濃くしていった。20世紀という自動化が進んだ時代に入ると、会社の経営陣は人材を解雇する代わりに、サービスや開発の部門に移動させた。

なお、現在では、人口動態の変化や人口減少に伴って浮上する課題に対処するためのロボティクス（サービス・ロボティクス）や支援技術が、有効な解決策として広く受け入れられている。日本では、住宅が自動化やロボティクスやその他の先進技術を用いて製造されているという事実は、その製造業者と製品のイメージアップに大いに役立つ。また、積水ハウス、ダイワハウス、セキスイハイム、トヨタホームなどのプレハブ住宅の主要メーカーの安定した成功とこれまで進めてきた自動化は、歴然たる品質向上に繋がってきた。こうして、過去数十年間に信頼できる製品とサービスを提供してきたプレハブ製造業者は、日本で揺るぎない信用を獲得したのである。

セキスイハイムのERPシステムとBIM

トヨタ生産方式（TPS）の住宅製造分野における応用が成功すると、セキスイハイムもトヨタに続いてTPSを取り入れ、それを改良した。しかし、1980年代、セキスイハイムはもうひとつの重要な新機軸を導入したのである。親会社である積水化学が、生産とロジスティクスの流れを管理するコンピュータベースの革新的な統合基幹業務システム（ERP）を開発したのだ。

ERPシステムはその後、積水化学の各部門に導入された。住宅部門では、このERPがHAPPS（Heim Automated Parts Pickup System）という受発注の管理システムの基盤となった。このシステムは、建築家や顧客の間取り図や設計の必須条件を直接、生産計画及び自動生産に必要なデータに変換する。現在は、新たなプラットフォームやコンポーネント及び解空間（ソリューション・スペース）の開発にも使用可能となっている。このシステムは、部品製造業者や各部門の作業段階の間のコミュニケーションを確実にし、400mの



写真6 セクスイハイムM1リサイクリング

組立ラインへの部品の流れとそのタイミングを正確に維持する。こうして、HAPPSは一戸の住宅に必要な約3万の部品を常備する30万種類の中から選択し、それらを生産工程に合わせてジャストインタイム・ジャストインシーケンスで（適時に順序だつて）整理できるのである。

現在、セクスイハイムは、世界で最先端のBIMシステムのひとつを保持しており、それにより、設計や部品に関する情報の90%以上を直接、生産と組立ての作業に転換することが可能になっている。更にセクスイハイムは、顧客管理サービス（カスタマー・リレーションズ）や維持管理、アップグレードの提供、間取り変更や解体など、提供済みの住宅の長期的な管理のためにもBIMを活用している。

現在の日本のプレハブ産業

日本の住宅産業は世界最強である。しかし、1990年代以降は継続的な変化と衰退を経験してきた。生産高のピークは1994年で、573,173ユニットの新築マイホームの住宅ユニットの製造を記録した。その後2000年には、450,000ユニットが建設され、2009年には318,000ユニットにまで減少した。ピーク時のプレハブ住宅のシェアは、18～19%であった。今日は、地域により異なるものの、13～15%に減少している。しかし、従来型の建設にもプレハブの要素が多く取り入れられているため、それを数字で表すのは困難で、建設

業界全体のプレハブ使用率は、実際には上記よりも高いと言える。

積水ハウスと業界ナンバー2であるダイワハウスの双方が市場縮小対策として、開発事業に目を付けたのは興味深い。まず住宅やアパートの宅地を造成し、建物を設計し建設した後に顧客に貸すのである。これらの住宅やアパートには、大量のカスタマイズ可能な住宅キットが使われており、高価な自動生産設備の能力が最大限に活用されるようになっている。

写真4～6は、上記の主要業者の現在の工場のイメージである。高度にカスタマイズされた建物を大量に生産するために、これらの業者が設置した高度に自動化された生産工程の様子を写したものである。

2 設計の中に生産の知識を組み込む

ロボット化に適した設計 (ROD : Robot Oriented Design)

東京大学の内田研究室における博士課程の期間

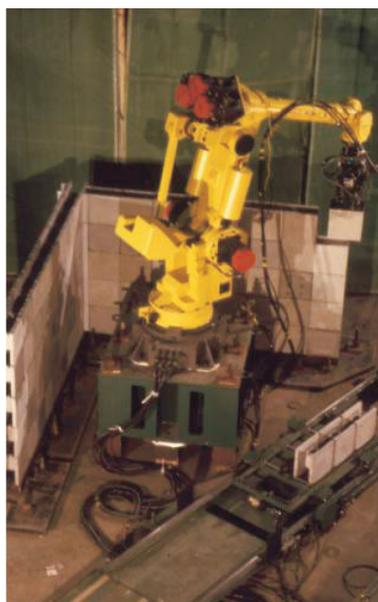


写真7 SMAS構法（ソリッド部品組立構法）

中、私は50体の建設ロボットを分析し、設計と技術（エンジニアリング）とプロジェクトマネジメントがロボット化を考慮に入れたものになりさえすれば、成果は向上するだろうという結論に至った。

ロボット化に適した設計（ROD）は、生産プロセスの複雑度を下げするために、部品そのものと自動・ロボットシステムの両方を再設計する点に焦点を当てている。RODの概念は、私、T・ボックが1988年に日本にて発案したものであり、後に25ヵ所を上回る自動化された施工現場と複数のロボットシステムの基盤となった。

RODは、建設セクターを改善し、従来の建設プロセスやコンポーネントの設計を新しいツールのニーズに合わせて適応させるために開発された。建設セクターのために開発されたものではあるが、その原理は他の様々な産業にも応用可能である。

ロボットや自動システムは、多数の連結や接続部及びセンサーやアクターからなっており、複雑なエンドエフェクタ（ロボットアーム先端に取り付ける効果器）があることもしばしばである。製造されるコンポーネントの形やサイズや構造が複雑で不適切な場合、エンドエフェクタやキネマ

ティクスがより複雑になるか、あるいは、より多数のセンサーシステムの追加が必要となる。逆に、使用される自動技術及びロボット技術に適した設計のコンポーネントや加工物であれば、その複雑度を大幅に下げることができるのである。

写真7は、コンポーネントの再設計により、グリッパーの複雑度を下げられ、作業の正確性も高められるという一例である。この写真のエンドエフェクタは、標準規格の不特定ブランドの建物部材を正確に取り付けられるように作られている。このエンドエフェクタは複雑なグリッパシステムと複数のセンサーシステムから成り立っている。コンポーネントまたは部材をロボット化に適したものに再設計することで、よりシンプルで操作しやすいエンドエフェクタが使用可能になることを示している。

つまり、RODの概念は、製品とそれを加工するツールを相補関係にあるサブシステムとして捉え、複雑な要素はその両方に配分されるべきだと提示しているのである。

コストアップ、有用性アップ

トヨタは、不良品や規格外製品を回避するため



写真8 建設ロボットによる吊り天井の取付け



写真9 耐火被覆材吹付けロボットSSR4



写真10 サーフロボ（SURF ROBO）

に一連の独特な方策を開発した。「ポカヨケ（異常防止の設計）」は、設計段階でこの課題に対処するものであり、「自動化」と「アンドン」は、製造工程において、ポカヨケにより回避されなかったミス进行处理するものである。

ポカヨケの原則は、トヨタが1960年代から段階的に導入し、それに基づいて徐々に設計方法を変えていったものであり、今日では同社の最も重要な設計原則のひとつとなっている。

ポカヨケとは、製品のモジュールやコンポーネントやパーツのすべてが、後の生産工程において誤った接合や組立てが不可能になるように設計されていなければならないことを意味する。これは非常に過激なアプローチではあるが、トヨタ生産方式がストックの回避と全工程の継続的稼働の原則に基づいているため、生産異常によるいかなる工程の中断も回避しなければならないからである。

ポカヨケ対策にもかかわらず異常が起きた場合は、それが発生した時点で「自動化」と「アンドン」が修正するようになっている。「自動化」は、不良品を絶対に次段階に流出させないことを意味する。「アンドン」は、生産異常が起きた場合に、作業員が数段階の生産ラインを遅らせることを可能にし、同時に他の作業員がその不具合の修正を助けるために駆けつけられるようになっている。

現場のロボティクス

初期の建設現場ロボットは、道路工事、塔や橋の建設、ダム建設、原子力発電所の建設、トンネル工事などの反復的作業からなる土木工事分野で導入された。日本の大手建設業者は、1980年代初期からロボティクスによる建設作業のプロセスを研究し、開発していた。

まず、個別のロボットと遠隔操作機械（マニピュレーター）が、工事現場での特定作業をこなすために開発された。コンクリートの搬送や取扱い、鉄骨建物への耐火被覆材の付着作業、大きな資材の取扱いや取付けなどの作業用のロボット

や、外壁の点検や塗装用のロボットなどである。

これまで日本では、合計で400種類を上回るロボットが建設現場用に開発され、用いられてきた。ドイツでは、1990年代以降、既存建築ストックのリニューアル工事の効率アップを狙い、内装の仕上げや改装工事を援助するための様々なロボットが作られてきた。

高い投資収益率を目指して自動化したサイト工場

1990年以降、日本の建設業者（大成建設、竹中工務店、鹿島建設、清水建設、大林組、前田建設工業、熊谷組）により施工された高層建物の自動建設や自動解体の工事現場は、およそ30カ所にのぼる。自動化した高層建築の建設現場は、半自動・完全自動の搬送と組立ての設備が付いた収納システム及び、ほぼ完全自動で建物を建てるロボットを組み合わせた、縦に移動する工場であると言える。

更に、これらのシステムの目的は、建設計画や設計部門からの継続的な情報提供を可能にし、自動化した現場のシステムを管理するリアルタイムのICTや高度な管理システムを使うことで、建設工程の整備や工事の運営を改善することにある。完全自動及び半自動のサイト工場は、必要な



写真11 ABCS NEC



写真12 SMART名古屋

労働力を30%程度減らし、将来的には50%を上回る労働力の節約になると見込まれている。

現在、半自動化した高層建築の建設システムは、個別の非整形の建物を建てることも可能になった。大部分の工程が明確化されることで、資材や資源の消費を減らし、建設廃棄物をほぼ完全になくすことが可能になる。また、サイト工場は、労働者にとって妥当で安全な作業環境も提供する。建物自動建設システムは、徹底的にモジュール化し、順応性も高いように設計することができる。

2010年の3月から12月にかけて、ソウルで初めてロボット化及び自動化された建設工事が実施された。高麗大学（韓国）のキャンパスに、7階建ての建物が建てられたのである。

建築業界は、建設現場における安全性や生産性、品質などの従来の課題を乗り越える必要性にうまく適応してきた。現代特有の課題がもたらす新たな要求に応えるため、建築業界の外で開発された先進技術やシステムも導入されてきている。例えば、高層建築の鉄筋構造のフレームを立ち上げる際に作業員を危険にさらさないために、ハイテクロボットが用いられる。更に、改良されたネジ締めロボットを使った自動建設システムが韓国で開発された。

しかし、建設現場の厳しい環境条件は多くの繊細な機械、センサーやツールに悪影響を及ぼし、ロボット建設システムの有能性を脅かしている。このような厳しい環境が及ぼすロボット性能への悪影響を最低限に抑えるためには、施工工場（CF）が必要であると考えられる。これは、建設ロボットのための安定した好環境を提供する特別の作業スペースである。

本研究では、自動建設により適切な環境を実現するために数種類のCFモデルを開発し、数値流体力学（CFD）のシミュレーションを使い、風速や気温の観点からそれらのモデルを評価した。その結果、屋根と足場が閉まっているCFがロボット建設に最適であり、そうすることでCFの建設による費用の超過や作業の遅延を削減できる



写真13 AMURAD

ことが分かった。

自動化した建設及び解体の工事

ここ11ヶ月の間に、半自動化された解体システム（鹿島建設）によって、東京の都心で3棟の高層建築物が解体された。この解体工程は、通常のそれと逆転しており、再設計されている。

そのプロセスはまず、1階の取り壊しから始まる。1階が取り壊されている間、建物の上階部分はIT制御水圧ポンプによって持ち上げられている。この方法で、各階毎に1階レベルまで下ろされて取り壊される。この解体工事は高度にコーディネートされており、1階レベルで都合よく施工できたため、93%の建物コンポーネントが再利用できた（従来の解体工事における再利用率は55%である）。

この例が示すように、現場への更なる先進技術の導入は、今後の建設・解体工事の持続に不可欠なのではないかと考えられる。解体システム（DARUMA）は、10年以上前に開発された自動現場建設システム（AMURAD、先進技術を用いた全自動建築生産システム）の逆転バージョンである。

3 完結した資源循環を目指した 価値連鎖上の将来的統合

プレハブ方式、先進のロジスティクス体系、自動建設、モジュール式のハイテク工具、組織的解体システムは、各々、個別に実証済みの工業的解決策である。次は、これらの解決策を統合し、ジャストインタイムで実需に基づいて大規模なカスタマイズ式の建築物を生産する製造ネットワークに発展させることではないかと考えられる。

また、そのような統合的工業化は製造に限らず、制御された解体やコンポーネントの再利用などのシステムも新たなネットワークにタイアップし、継続的なコンポーネントの循環をも実現可能にすべきであろう。プレハブ方式、ロジスティクス、工事現場での自動建設、建設ロボティクス、解体システム及び製造を考慮に入れた設計はすべて、相補的要素と見なされなければならない。それらを組み合わせることで、非常に持続的な建設プロセスを築くことが可能であるだけでなく、情報や労働力、エネルギーや資源の継続的フローも確保できるのである。

これらの工業化した分野が統合的アプローチになって初めて、技術の連鎖が完結する。これら複数の工業化した方法の長所を統合してひとつの工業システムにするには、工業生産に合った建物の設計が要求される。設計は、建物の形や性能だけでなく、その生産可能性をも決定するため、非常に重要な要素なのである。

統合的工業建設において、製品の構造と組成は、その工程連鎖の中で最も重要でかつ複雑な要素になる。従来の建物の構造をそのまま取り入れることは不可能である。製造、ロジスティクス、カスタマイズ化及びロボット化の必須条件を建築家が慎重に考慮に入れた上で、革新的な建築構造を設計する必要があるのである。

プレハブ住宅メーカーの生産工程とゼネコンのロボット化・自動化した建設工程は、両方とも成果物のカスタマイズ化が進むと共に、その大部分が自動化され、自動調整及びロボット化したプロ

セスであるという特徴がみられる。また、継続的な改善を通し、追加コストを要しないかたちで、徐々に顧客がより深く生産工程に参画できるようにもなりつつある。

更に、日本企業は、単発のカスタマイズだけでなく、長期にわたってクライアントのニーズに合わせて継続的かつ臨機応変に住宅を適応させ続けるためのカスタマイズ化にまでサービスを拡張しようとしている。これは、二種類の継続的かつ工業化したカスタマイズサービスからなる。

第一に、システムチックな「アップグレード・パッケージ」を提供することで、企業はモジュール式设计の利点を大いに活用できる。つまり、個々のモジュール、コンポーネントやサブシステムを工場で新たにプレハブ製造されたものと取り替えることで、住宅を新しい生活事情やニーズや好みに適応させられるのである。

次に、セキスイハイムは、過去に工場で製造されたモジュール式ユニットを設置場所から取り外し、再び工場に戻す「再築システムの家」のサービスを提供している。それらのサブシステムやサブコンポーネントは、工場で耐力フレーム構造体から取り外され、そのフレームには新たなパーツが取り付けられる。この入替えプロセスにより、顧客のニーズに合わせて住宅を新たにカスタマイズしたり、時には場所を移動することも可能になる。

また、解体されたコンポーネントは、工場の整備された環境内で行われる取外しの工程の後、新たな部材循環サイクルに回され、効率よく再利用あるいはリサイクルすることができる。したがって、このような一体化した方法で製造された将来の建物は、人口動態の変化に合わせて改修が可能になるのである。

ダルマ落としーテコレップ：解体を考慮に入れた設計「DFD」=逆「ROD」

解体を考慮に入れた設計（DFD：Design for Disassembly）は、製品つまり建築物が放置され



写真14 ダルマ落とし

て廃棄物と見なされる最終段階を特に考慮したものである。解体は、経済的及び環境への負担という側面を伴う。第一に、素早く簡単な解体が可能な場合や、その一部（サブコンポーネント）の再利用や売却が可能な場合、顧客や製造者の負担になる廃棄処理のコストをかなり節減することができる。更に、製品による環境への悪影響や汚染の問題は製品企画の中で取り上げられて設計の一環になっている。

特に、設計の際、製品が単一素材のパーツに解体できるように、モジュール性や接合構造や組立方法をデザインすることができる。単一素材のパーツは、より簡単にリサイクルのプロセスに回すことができるからである。なお、リバースロジスティクス及び再製造の課題も設計段階で考慮に入れることができる。

例えば、日本のプレハブ住宅会社であるセキスイハイムは、既存ユニットを工場に戻し、生産ラインで再度カスタマイズすることを実現した（セキスイハイムの再築システムの家）。日本のコントラクターである鹿島は、自動化制御解体システム（DARUMA）を開発したが、そのリサイクル率は96%にのぼる。



写真15 LISA壁～高齢者のための既存アパートのモジュール式アップグレード用

問題は、現在に至るまでの殆どの建物の設計が、このシステムの応用を困難または不可能にしていることである。DARUMAシステムの必須条件を満たした建物の設計にすれば、この方法はより早急に普及するであろうと考えられる。

人口動態の変化を考慮に入れた設計

需要減少に対抗し、建物の付加価値を上げるため、主要業者はいずれも、建物の利用期間や性能、ライフサイクル関連のサービスを管理するための先進のBIM（ビルディング・インフォメーション・モデリング）に焦点を当てるようになってきている。

積水ハウスは、古いモデルラインのクライアントが簡単にしかも継続的に建物の設計や性能をアップグレードできるよう、モジュール型アップグレードパックの提供に取り組んでいる。また、ダイワハウスは、住宅関連の支援技術と高度な健康管理サービスを住宅と共に販売するため、サイバーダイン（HAL）やTOTO（温熱便座付き知能トイレ）と協力して開発を進めている。

そして、セキスイハイムは、持続可能な省エネ

住宅で市場先導を目指しており、再築システムの家で、リバースロジスティクスや建物の再カスタマイズのシステムを展開している。更に、セキスイハイムは、部品製造業者と共同で臨機応変に建物のコンポーネントや顧客や維持管理などのデータ管理ができる、BIMベースの情報管理システムを開発した。トヨタホームは、長期にわたる建物の維持と設備管理を提供するため、段階的な長期保証やサービス各種のモデルを徐々に改良しつつある。

日本のプレハブ産業が上記のようなライフサイクル関連サービスの実施に成功し、実証済のカスタマイズ構造の大量製造や顧客参画型戦略とリンクアップできれば、大規模なカスタマイズ化並びに建物・生活事情関連のサービスをベースにした建設産業の新たな原型が生まれるであろう。その焦点は、投入資材や資源や労働力だけでなく、むしろ長期の顧客管理サービスと製品サービスシステムとなるであろう。

時は金なり：

工業化住宅会社とゼネコンの先進建設技術とマネジメント・設計技術を組み合わせる達成する高い投資収益率

工学院大学建築学部の遠藤和義教授は、訪問教授としてミュンヘン工科大学（ドイツ）に滞在中、建設期間の短縮による収益への影響を研究した。そして、2013年のブダペストにおけるCC2013学会（Creative Construction Conference 2013）にて、その成果について発表した。彼の結論は、コントラクターと顧客の双方に有利な在り方（win-win）であった。

遠藤教授は、自動化やロボティクスのような革新的な建設方法の導入による工事期間の短縮が、そのプロジェクトの正味現在価値（NPV）の向上に繋がると明示した。同様に、彼の提案する、品質と安全の改善を組み入れたキャッシュフローモデルが導入されれば、それを実現するための研究開発のコストなどの追加投資の上限がNPVの向上で補われる、と言及した。

単一のプロジェクトからそれらのコストをはじ

Combined Construction Strategy for Rapid Return on Investment

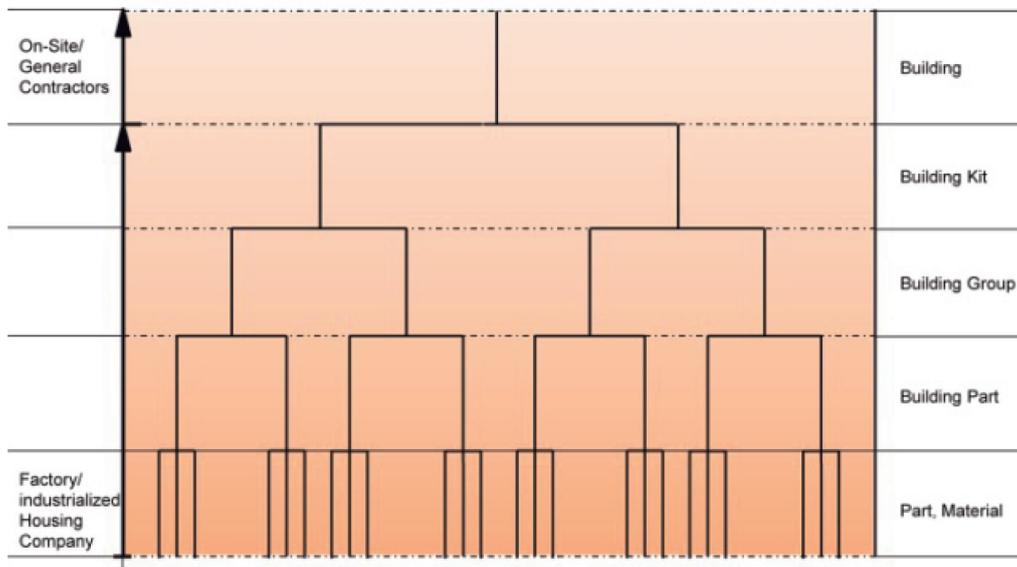


図1 複合的建設戦略

き出すのは非現実的である。研究開発への投資合計額は、類似プロジェクトの合計数を前提に決定されるべきである。コントラクターは、革新的建設方法が長期的に建物のNPVを効果的に増加させることをクライアントに説明するべきである。そうすることで、コントラクターは価格競争から解放される。

新たな概念は「コストダウン」から「コストアップ」への方向転換であると同時に、「ROIアップ」でもある。この研究の提案は、コントラクターだけでなく、クライアントにとっても有益なものである。

結論：複合的建設戦略による コストアップ+ROIアップ！

資源不足で自然災害多発の日本社会は、高齢者が増える一方で、労働人口も減る中、豊かさを生み出しつつ、今後の課題に対応していくために、前述の工業化住宅メーカーやゼネコンなどの産業の持つ最高の技術とサービスを連携させるべきであると考えます。つまり、先進の製造方法とロボティクスによる建設・解体・建替えの技術と高齢者向けの建物や環境作りに向けたサービスのノウハウを組み合わせるべきである。

(原文は英語)

(参考文献)

- 1) Bock, T. (1988), Robot Oriented Design, Architectural Product Engineering, Seko, Shokokusha Publishing, Tokyo (Japanese original version), May 1988
- 2) Bock, T. (2011), Karakuri Kultur in Architektur und Baurobotik, Band 62, Japanisch Deutsches Zentrum Berlin, ISSN:0931-5942
- 3) Endo, Kazuyoshi (2013) 'Rapid Return on Investment by Innovative Methods in Construction Visualized by Cash Flow Model', paper presented at Creative Construction, Budapest
- 4) Fujimoto, T. (eds) (1999) *The Evolution of a Manufacturing System at Toyota*. Oxford University Press, New York, Oxford
- 5) Furuse, J., Katano, M. (2006) 'Structuring of Sekisui Heim automated parts pickup system (HAPPS) to process individual floor plans', paper presented at ISARC International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Japan, June 2006
- 6) Linner, T., Bock, T. (2009) 'Smart Customization in Architecture: Towards Mass Customization of Intelligent Buildings', paper presented at MCPC, Helsinki, October 2009
- 7) Linner, T., Bock, T. (2010) 'Mass Customization in a Knowledge-Based Construction Industry for Sustainable High-Performance Building Production', paper presented at CIB World Congress, Salford, May 2010
- 8) Linner, T. Bock, T. (2012) 'Evolution of large-scale Industrialisation and Service -Innovation in Japanese Prefabrication Industry'. *Journal of Construction Innovation: Information, Process, Management*
- 9) Ohno, T. (eds) (1988) *Toyota Production System? beyond large scale production*. Massachusetts Productivity Press, Massachusetts
- 10) Reynolds, M. J. (eds) (2001) *Maekawa Kuino and the emergence of Japanese modernist Architecture*. University of California Press, Berkely and Los Angeles, California, USA, ISBN 0-520-22495-2
- 11) Sekisui House, Daiwa House, Sekisui Heim, Toyota Home: Research Visits 2008, 2009, 2010, 2011
- 12) Wisnet, A. (eds) (2007) *Robots in Japan- Backgrounds of a Phenomenon*. Indiciun Verlag GmbH Munchen, Munchen ISBN 978-3-89129-188-7