

# 情報技術の発展に伴う建築部品の設計範囲の拡張に関する研究

—自由曲面を持つ建物の外装部品を対象として—

構法計画研究室 榎山 武蔵

## 序章

### 1.1 研究背景

1950年代以降、建築家や建設会社、部品メーカーらによって建築生産の工業化が進められ、建物を構成する部材は次第に工業生産部品へと置き換えられた。またさらなる工業化の進行の過程で、オープンシステムの理念<sup>注1)</sup>が提唱され、市場一般流通する規格化部品＝オープン部品の開発が試みられた。やがてオープン部品が社会へと浸透し、建築部品が設計に先行するものとして存在するに至った結果、建築設計行為はメーカーカタログからの部品「選択」へ、建物はその「組み合わせ」へと変化した。この時、建築部品自体の設計は部品メーカーが行うため、設計者による建築設計の範囲は大きく狭められることとなった。

一方で、90年代に入ると3次元CADの発達やコンピューショナルデザインと呼ばれる設計手法の誕生を背景として、複雑な形状の3次元モデリングや高度なシュミレーションが可能となった。フランク・ゲーリーやザハ・ハディドらの作品はそれらを活用したものであり、これによって自由曲面形態<sup>注2)</sup>や多面形態<sup>注3)</sup>など複雑かつ新しい建物形態が実現できるようになった。それらは建物形態が複雑であることから、同一の部品が反復的に用いられることが少なく、建物の各部位に個別の対応を要請していると考えられ、建築部品あるいはその構法に技術的な工夫が必要となっている蓋然性がある。

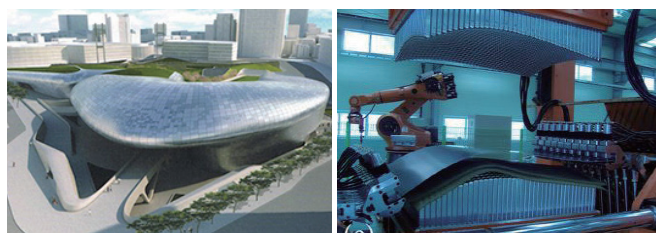
近年、上述したような複雑な形態の建物の建設が相次いでおり、そこで用いられている技術はクローズドなシステムとしてばかりではなく、オープンな生産システムとしても確立されつつあることが推測される。

すなわち、情報技術の発展に伴って建築部品の設計範囲は拡張していると考えられる。この状況を調査し、その技術的背景を明らかにすることは、既往の建築部品概念を更新し、またその今日的意義を再定義することに繋がると考える。

### 1.2 既往研究

生産システムの発展を背景に展開した建築部品の概念については、様々な理論が蓄積されており、その定義も様々である。最初期の建築部品論に剣持吟の研究<sup>注1)</sup>がある。剣持は「規格構成材方式」としてオープンシステム理念を一般化し、建築部品が備えるべき条件を「規格構成材のコード」として明確に整理した。大野勝彦は剣持の部品論を発展させ、建築生産プロセスにも踏み込んで、新しい生産上のまとまりとして部品概念を定義した<sup>注2)</sup>。一方これらの研究から既に40年以上が経ち、生産システムは当時よりも格段に発達している。そこで本研究では、複雑な建物形態を生産可能にする生産技術とその特性を明らかにすることにより、剣持・大野の部品論における部品と現在の生産システムを前提にした部品の差異を明確にし、今日的な部品論について考察する。

また佐藤考一は、既往の部品論が見込大量生産を前提としており、現行の生産システムを反映していないとして、「設計指向型部品」



写真(左)東大門デザインプラザ/外観 (右)MPFSによる外装パネルの成形方法  
(出典: SteelLife社「MPF&MPFS」, <http://www.steelife.net/>, 2017年2月1日)

という概念を提唱した。<sup>注3)</sup>佐藤は、複数の量産型部品においてその生産技術が受注生産方式を前提にしている状況を明らかにし、設計者からの個別の要求に対応しうる部品生産の技術が汎用化する可能性を示すことで、設計指向型部品が成立可能であることを理論的に明確にした。しかし、その今日的な状況は未だ把握されていないため、本研究では現状の調査を行い、部品生産の実態を明らかにする。

以上の既往研究のように、部品論は常にその時代の生産システムと一体で考えられてきたが、現代社会における高度な情報技術を援用した生産システムと結びつけた先行研究は存在せず、本研究はこの点を具体的に追及していくものである。

### 1.3 研究目的

本研究ではこうした背景に基づき①: 佐藤が提唱した設計指向型部品の現在の実態を明らかにすること、②: 新しい生産システムの特性を明らかにし、建築部品において建築設計者が設計可能な項目を明らかにすること、③: ①と②を整理することで、3Dプリント技術<sup>注4)</sup>のようなプロトタイプ型部品の生産システムとの概念上の差異を明かにすること、の3点を目的とする。

### 1.4 研究方法

本研究では、まず設計指向型部品の実態を明確にするために、製品カタログと積算資料を収集し、一般流通部品において建築設計者が設計可能な範囲を明らかにする。ここでは「形状」「構成部材数」「オープン/クローズド性」(以下OP/CL性と略す)の3つの指標(表1)から一般流通部品を評価する。

次に、外形に自由曲面を持つ建物の調査を行う。自由曲面を持つ建物において形態と建築性能を両立させるためには、建物外装を技術的に納めることが必要不可欠である。そのため建築部位の中で部品に対して比較的高い要求性能が求められる建物外装に着目し、外装部品を調査対象としてその実態調査を行った。具体的には、その詳細図面・施工図を基に、対象事例に適用されている部品の性質を整理する。併せて一般流通部品と同じ指標を用いて同様に部品の評価を行い、一般流通部品と比較分析を行うことによって、設計者が設計可能な範囲を明らかにし、個別の建物における設計指向型部品の実態をまとめる。最後に、以上の結果から考察を行い、これらの部品が抱える課題を物性、製造機器、組立てなど生産システムの視点から整理し、今日的な部品論について考察する。

## 2章 建築部品論と生産システムの発展

### 2.1 用語の定義

設計指向型部品は、寸法などの一部の部品属性を未確定のままにしておくことによって、オープンな生産システムを持ちながらも、設計に応じた個別的な形状を取り得る、設計の自由度の高い部品である。

また、本論における部品の定義は「建築の生産上の分割単位」であり、工場生産出荷時における物的な単位を部品と見なす。

### 2.2 情報技術の発達と建築への影響

コンピューショナルデザインやデジタルファブリケーションなどの高度な情報技術を援用した設計・生産の方法は建築生産システムを大きく変えつつある。高度な数値解析による設計の最適化によって、より個別的に部品設計を行うことが必要になっているが、受注生産的な部品生産システムの発達は、個性性の高い部品生産の製造コストを大幅に減少させた。また近年のデジタル工作機器<sup>7)</sup>の低価格化に伴った社会的普及もこの状況を後押ししており、多品種少量生産による生産システムが一般化する状況が整いつつある。

### 2.3 部品概念の課題

情報技術の発達を背景として、かつての建築部品論が抱える課題として、以下の二点が浮上していると考えられる。一点目は設計指向型部品の実態を明かにすることである。もう一点は生産システムの更新に伴う新しい部品単位の考察である。生産システムは部品論が活発に議論された時代から著しく発展した。部品の在り方が常に生産システムと一体である以上、新しい生産特性を踏まえ今日的な部品の概念を再定義する必要がある。

### 2.4 建物外装と形態

一般的に外装部品は建物外周部に配列されるものであり、部品間の取り合いを多く持つ。近年増加している外形に自由曲面を持つ建物において外装部品の割り付けは情報技術の発展によって機械的に計算可能になったが、生産上・構法上の制約は依然として存在する。外形に自由曲面をもつ建物において外装部品の形状は必ずしも一定とならないため、外装部品の部分ごとに個別の設計と生産を要求すると考えられる。従ってこうした事例を調査することによって部品における設計範囲の拡張の実態を明らかにできる可能性が高い。

なお本論において扱う外装部品は、「建物外周部に位置する非耐力壁として外周を覆う面状の乾式部品であり、内外空間を隔て環境因子を制御する機能をもつもの」とする。

## 3章 一般流通部品の設計範囲

### 3.1 カタログ調査とその評価

現在の一般流通部品において設計者が設計可能な範囲を明かにするため、市場に出回っている部品を調査対象とし、各メーカーの商品カタログ・積算資料を資料として調査を行った。また本章で扱う評価の指標は表1の通りである。

### 3.2 対象とした一般流通部品の概況

対象とした一般流通部品の選定条件は以下の通りである。

- ①建物外装を構成する部品であること
- ②完全受注生産品ではないこと
- ③属性の設計に関するある程度のフレキシビリティを持つこと

以上の条件から外装を構成する21種の部品を選択し、3社のカタ

表1 部品の評価方法

「形状」	部品の形状を規定する数値項目すなわち、幅・高さ・奥行などの外形寸法や面内曲率・端部曲率などについて、これらの設計の自由度を3段階（自由・選択可・選択不可）で評価した。
「構成材数」	部品を構成する構成材の点数を指す。構成材数から部品の複雑さを探る目的を持つ。
「オープン・クローズド性」	建築部品の生産システムがオープンなものか、クローズドなものか判断する。

表2 一般流通部品の評価

部品	形状				設計の自由度	構成材数	OP/CL
	設計できる属性		設計できない属性				
	自由	選択	選択不可				
HCT山溝形鋼	長さ	フランジ幅 フランジ厚 ウェブ高さ ウェブ厚	曲率 端部角度	中	1	OP	
CT鋼	長さ	フランジ幅 フランジ厚 ウェブ高さ ウェブ厚	曲率 端部角度	中	1	OP	
山形鋼	長さ	フランジ幅 ウェブ厚 厚み	曲率 端部角度	中	1	OP	
溝形鋼	長さ	フランジ幅 フランジ厚 ウェブ高さ ウェブ厚	曲率 端部角度	中	1	OP	
角形鋼管	長さ	厚み 幅 ウェブ高さ	曲率 端部角度	中	1	OP	
丸形鋼管	長さ	厚み 直径	曲率 端部角度	中	1	OP	
板ガラス	幅 長さ	厚み	曲率 端部角度	高	1	OP	
複層ガラス	幅 長さ	中空層厚 中空層数 ガラス厚	曲率 端部角度	高	4	OP	
ALC板	厚み 長さ	幅	曲率 端部角度	高	1	OP	
鋼板	厚み	幅 長さ	曲率 端部角度	中	1	OP	
押出セメント板	厚み	幅 長さ	曲率 端部角度	中	1	OP	
GFRC	厚み 幅 長さ 曲率		曲率 端部角度	高	1	OP	
タイル		厚み 幅 長さ	曲率 端部角度	中	1	OP	
デッキプレート		厚み 幅 長さ 山高さ 山幅	曲率 端部角度	中	1	OP	
エキスパンドメタル		厚み 幅 長さ 刻み幅 メッシュ幅	曲率 端部角度	中	1	OP	
窯業系サイディング		厚み 幅 長さ	曲率 端部角度	中	1	OP	
金属系サイディング		厚み 幅 長さ	曲率 端部角度	中	3	OP	
スチールサッシ窓		厚み サッシ高さ	曲率 端部角度	低	4	OP	
木製サッシ		厚み サッシ高さ	曲率 端部角度	低	4	OP	
スチールドア		厚み ドア高さ	曲率 端部角度	低	9	OP	
木製ドア		厚み ドア高さ	曲率 端部角度	低	7	OP	
ガスケット	長さ	厚み 断面	曲率 端部角度	高	1	OP	

設計の自由度: 設計の自由度を定性的に示すため、各部品の「形状」の項目をもとに、「設計できる属性」と「設計できない属性」の割合から3段階(低・中・高)で評価した。<設計の自由度 A = 設計できる属性÷設計できない項目>「低: A < 0.6」「中: 0.6 ≤ A < 0.7」「高: 0.7 ≤ A」

表3 一般流通部品の設計範囲を制約する条件

部品	部品の設計範囲を制約する条件			
	物性	構成部品	製造機器	製造コスト
H形鋼				断面形状
CT鋼				断面形状
山形鋼				断面形状
溝形鋼				断面形状
角形鋼管				断面形状
丸形鋼管				断面形状
板ガラス		厚み		厚み
複層ガラス		厚み		幅、長さ
ALC板	長さ		幅	厚み
鋼板			幅	
押出成形セメント板	長さ	幅	幅	厚み
GFRC			厚み、幅、長さ	
タイル			幅	断面形状、長さ
デッキプレート			幅	メッシュ形状
エキスパンドメタル		幅、長さ、厚み		厚み、幅
窯業系サイディング			長さ	厚み
金属系サイディング		幅、長さ		厚み
スチールサッシ窓				幅、厚み、高さ
木製サッシ				幅、厚み、高さ
スチールドア				幅、厚み、高さ
木製ドア				幅、厚み、高さ
ガスケット				

表4 設計範囲を制約する条件の区分

物性	カタログに、部品の耐圧力を理由として寸法が特定の数値に制約されていると表記が確認できた場合、物性による制約とみなす
構成材材	複合部品が、複合部品の構成材の生産の制約をうけて複合部品自体の寸法を制約している場合、構成材材による制約とみなす
製造機器	部品の寸法が、製造機器の製作限界による制約をうける場合、製造機器による制約とみなす
製造コスト	物性、構成材材、製作機器の項目に制約されないと考えられる場合、製造コストによる制約とみなす

ログを用いて調査を行った。

### 3.3 一般流通部品の設計範囲の調査

表2は一般流通部品の評価結果一覧である。「形状」は設計できる項目とできない項目に区分され、さらに設計可能なものについては、予め記載された寸法から選べる「選択」型と、示された寸法範囲から必要な寸法を自由に設定する「自由」型に区別できる。

「構成材数」の結果と併せて考察すると、部品の構成材数が多い

表 5 対象事例の部品一覧及び評価結果

建物名称	部品								拡張された設計範囲		
Guggenheim Bilbao	H形鋼	丸形鋼管	C形鋼	ガルバリウム鋼板	防水シート	イナズマプレート	チタン鋼板		端部角度		
Great Court at British Museum	角形鋼管	接合金物	構造用シリコン	ガスケット	複層ガラス				端部角度		
Kunthaus Graz	角形鋼管	ブラケット	下地鋼板	断熱材	防水シート	DPGブラケット	BIX証明	アクリル板	端部角度	曲率	
Walt Disney Concert Hall	H形鋼	丸形鋼管	角形鋼管	山形鋼	下地鋼板	イナズマプレート	ステンレス鋼板		端部角度		
30st Mary Axe	丸形鋼管	角形鋼管	ブラケット	複層ガラス	スチールサッシ				端部角度		
Free University	丸形鋼管	角形鋼管	ボールジョイント	ガスケット	ステンレスメッシュ	アルミニウム複合パネル	複層ガラス		面内角度		
BMW World Munich	角形鋼管	ブラケット	ガスケット	複層ガラス	山形鋼	丸形鋼管	角形鋼管	ステンレス複合パネル	面内角度		
Nordpark Railway Stations	平鋼	PEガスケット	構造用シリコン	ステンレス鋼板	PU樹脂	フロートガラス	シーリング		端部角度	曲率	
Neuer Zollhof	PCコンクリート	ブラケット	山形鋼	アルミニウム鋼板	ガルバリウム鋼板	断熱材	ステンレス鋼板	ステンレス複合パネル	端部角度		
Heydar Aliyev Centre	丸形鋼管	H形鋼	ブラケット	鋼板	デッキプレート	防水シート	断熱材	GFRP	GFRC	端部角度	曲率
Dongdaemun Design Plaza	丸形鋼管	ブラケット	防水シート	ステンレス鋼板	防湿シート	断熱材	防水シート	平鋼	アルミニウム複合パネル	端部角度	曲率

■ - 端部角度が設計可能な部品

/// - 曲率が設計可能な部品

表 6 拡張された建築部品の設計範囲

部品名称	拡張された設計項目
H形鋼、角形鋼管、丸形鋼管	端部角度
平鋼	端部角度、曲率
単板ガラス、複層ガラス	端部角度、曲率
鋼板	端部角度、曲率
アクリル板	端部角度、曲率

ほど形状の設計の自由度は低くなると判断できる。生産の観点から言えば、部品の設計の自由度が高まるほどプレファブリケーションの度合いが低くなり、現場作業が増加するといえる。

### 3.4 設計者による設計の自由度の分析

さらに、前節で扱った部品について、部品の設計の制約となる原因を明らかにし、整理を行った(表3、表4)。

表3は「形状」の評価結果から「選択」型と判断された部品属性について、これが「自由」型とならない要因を整理したものである。制約要因は「製造機器」と「製造コスト」に関するものが多い。「製造機器」に関する制約を受けるものは主に原料が湿式の部品であり、その成形過程で型を必要とするものである。また「製造コスト」に関する制約を受けるものは、技術的には自由に設計可能な部品とすることができるが、製造コストによって特定の形状に限られると判断されるものである。

以上の結果から、一般流通部品において設計者が設定可能な項目は、部品断面方向の寸法や材軸方向の寸法が多く、曲率や角度は設計者が設定することが難しいことが分かった。また選択可能な属性であっても、生産効率が要求されることから製造コスト上の制約を受ける場合が多い。製造機器・成形過程の制約が改善されることによって、建築部品の設計可能な範囲はより拡張すると考えられる。

## 4章 外形に自由曲面を持つ建物のケーススタディ

### 4.1 調査概要

外形に自由曲面を持つ建物の外装部品の事例検証を行い、前章の結果と比較することによって、設計指向型部品の実態を把握し、またこうした事例に用いられる建築部品においてどのような属性の設計の自由度が拡張されているかを明らかにする。

事例の選定は以下の条件を満たすものについて行った。また詳細図面が収集可能なものに関しては、下記①を満たさない場合でも対象とした。

- ①雑誌『DETAIL』(2006年1月号～2016年12月号)に掲載された建物作品
- ②自由曲面の外装を建物全体、あるいは部分において持つこと
- ③外装部品の詳細な図面が収集可能であること

結果、12作品が対象として選出された。

### 4.2 調査方法

外観写真、詳細図面、施工写真を用い、各建物に採用されている部品を表5にまとめた。各部品に対して前章の一般流通部品に対して行ったものと同様の評価を行い、設計可能な属性が一致するものを「C: Constant」、一致しないものを「V: Variable」とした。Vと評価した部品項目は設計範囲が拡張された部品であると見なし、その生産システムについてさらに調査を行った。

### 4.3 事例検証 / 自由曲面を持つ建物における部品の設計範囲

上記の対象作品全てに対して評価・分析を行ったが、ここでは代表的な3事例について詳細に述べる。

《The Great Court at British Museum》は波状の屋根を持つ建物であり、形状が全て異なる三角形のガラスパネルにより構成され、その支持構造は異なるスパン・端部角度を持つ角形鋼管により構成されている。ガラスパネルはCNC切断機によって個別の形状に加工され、支持構造はすべて現場溶接によって組み上げられた。《Nordpark Railway Station》の自由曲面外壁は曲面ガラスにより構成され、面内方向が自由に切断加工された平鋼を構造体としている。曲面ガラスは全て二次曲面となるように設計され、金型を用いた自重変形によって成形されている。またこの事例では、接合部を5軸の可動域を持つCNC切削機によって高分子ポリウレタン板から削り出すことによって、曲率の異なるガラスパネルと躯体を接合している。《Dongdaemun Design Plaza》の自由曲面は、曲面成形されたステンレス複合パネルで構成され、ボールジョイントによる立体トラスを支持構造としている。ステンレス複合パネルはマルチポイントストレッチフォーミング\*5を用いることによって、パネル



枚数分の金型を製作することなく生産された。

#### 4.4 建築部品の拡張した設計範囲

表6は事例検証によって確認された設計範囲が拡張された建築部品とその属性を示している。新たに設計可能となった部品の属性は「部品の端部角度」や「部品の曲率」であり、何れも一般流通部品では設計者が設計できなかった項目である。

CNC切断機・切削機を用いた加工は製作精度と速度が早く、また部品の材料を問わず加工が可能なことから、より自由な部品形状が設計可能である。一方、曲げ加工は材料によっては難しく、現時点で自由に曲げ加工可能なオープン部品を成立させることは難しい。しかし型枠となる部品をCNC加工することは可能であるため、湿式材料を用いた部品の場合、受注生産品ではある程度可能であると判断できる。以上から、その生産過程にCNC工作機が導入可能な部品では今後のオープン化が期待され、反対に導入が難しいものはクローズド部品に留まると考えられる。

### 5章 建築部品の拡張された設計範囲に関する考察

#### 5.1 設計指向型部品の実態調査

図1は建築生産のプロセスを示す図<sup>4)</sup>であり、本論で扱う部品はこの図における「建築材料」「部材」「部品」のいずれも該当する。3章の調査結果から一般流通部品には設計範囲が技術上自由に設定可能なものの、製造コスト等との兼ね合いから設計範囲が制限される場合が多い属性がある(図1/M2~M3の段階)。4章のケーススタディから、自由曲面を持つ建物において設計指向型部品はある程度実現されており、また情報技術を援用した製作機器によって「切断加工」「曲げ加工」が可能になるなど、部品の設計範囲が拡張していることも分かった(図1/M3~M4の段階)。

以上の結果より、現在の部品の設計の自由度は、材料の組立ての段階ではなく、加工段階の技術発展により向上していると言うことができ、佐藤の提唱する設計指向型部品とは設計の自由度を担保する部品の生産技術において異なる部分がある。

#### 5.2 付加製造方式と建築部品

本研究が確認する限り情報技術の発展によって拡張した設計範囲は、生産プロセスの中で特に加工段階に影響を与えるものである。そのため加工される母材の生産は依然として工業生産的な性格を持つものであり、建築生産全体を俯瞰して観察すると工業的建築生産の域を出ていない。

蒲生秀典の指摘<sup>5)</sup>によれば、こうした工業生産的な製造方法は「除去加工」と「成形加工」に二分される。一方で近年建築界でも注目を浴びている3Dプリンターは、「付着加工」という造形方法を取り、材料を付加することによって必要な形を造り出す「付加製造方式」と呼ばれる方式である。これは図2のM2、3の工程を経ずにM1からM4へと進むものであり、本研究が到達した部品概念からさらに発展した部品概念として定義される必要がある。「付着加工」が生産システムにおいて一般化したとき、表3の「製造機器」「製造コスト」に分類される属性は大きく改善される。また同様に「構成部材」の改善も見込まれる。

建築部品の定義は理論ごとにさまざまであるが、一貫した定義は「建築の生産上の分割単位」である。付加製造方式が一般化し、部品形状を自由に設定可能となった場合に「生産上の分割単位」を規

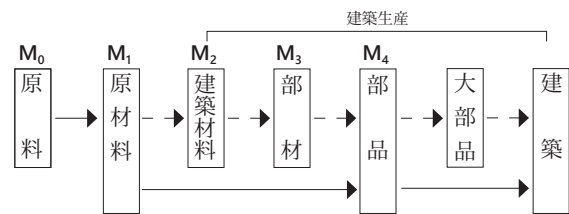


図1 部品の生産プロセス

定するものは「新たな製造機器の制約条件」あるいは「物性」に限られると推察される。大型付加製造機の開発や極小部品の製造が可能となっている現状を踏まえると、「製造機器」は課題とは成り得ず、「物性」をいかに設計範囲に取り込むかが今後の部品概念を規定する項目となるはずである。

### 6章 結論

本研究では設計指向型部品の実態を調査し、そこで拡張された設計範囲を明らかにすることによって、部品の今日的な定義を考察した。本研究を通して得られた知見は以下にまとめられる。

- 1) 一般流通する外装部品において、設計者が複数の数値から寸法等を選択できる「選択」型と特定の値域から自由に設定できる「自由」型が発達してきていることを明らかにし、「選択」型の寸法属性は製造コストが制約となっている可能性を示した。
- 2) 近年の外形に自由曲面を持つ建物においては、佐藤の提唱する設計指向型部品がある程度用いられていることを明らかにし、またその設計範囲は、情報技術の発展に伴った加工機器の発達によって拡張しており、部品の「曲率」「端部角度」が新たに設計可能となっていることを明らかにした。
- 3) 付加製造方式はこれまでの生産システムと異なる性格をもつことを示し、「物性」を「建築の生産上の分割単位」として捉える部品概念を再定義する必要があることを指摘した。

#### 参考文献

- 1) 剣持玲：開口部論，東京大学学位論文，1965
- 2) 大野勝彦，部品化建築論，東京大学学位論文，1971
- 3) 佐藤孝一，設計指向型部品に関する研究，東京大学学位論文，1996
- 4) 江口禎，プレファブリケーションの生産性向上効果に関する研究，東京大学学位論文，1965（一部修正）
- 5) 蒲生秀典，デジタルファブリケーションの最近の動向，科学技術動向137号，2013.8

#### 注

- 注1) 建築生産の工業化を推進した理念であり、建物全体を造るトータルシステムと部分を生産するサブシステムによって構成される。不特定の建物へ適用可能な互換性を備えたサブシステムによって構成されるトータルシステムをオープンシステムと呼ぶ。
- 注2) 本論においては、二次曲線以上の高次の数式によって定義可能な曲面から構成される形態と定義する。
- 注3) 本論においては、一次曲線によって定義可能な曲面から構成される形態として定義し、視覚的に曲面形態の近似を試みているものも含める。
- 注4) 付着加工によって必要な形を作り出す製造機器の総称であり、積層造形法とも呼ばれる。型枠を必要としないこと、コンピュータから直接加工データを転送できることによって複雑な形態の造形が高速かつ高精度で可能となった。
- 注5) 1項写真(右)に示される製造方式の名称。格子状に配列され、上下に高さを調節可能な支持金具によって個別の曲板成形が可能。