

第9章 プロダクト・モデリングからプロセス・モデリングへ

9. 1 はじめに

9. 1. 1 構工法計画とプロダクト・モデリング、プロセス・モデリング

本章で取り扱うのは、構工法の選択・組合せ問題であり、すなわち構工法計画のコアをなす考え方と手法である。ここでいう構工法の選択・組合せ問題とは、「①所与の設計¹（物的達成目標）を、②適切な資源・技術を用い、③ある手順に従って実体化する方策を、④ある生産環境・生産条件のもとで、⑤評価・決定すること」をいう。言い換えれば、所与の設計をプロダクト・モデルと呼ぶとき、それを適切に方法・手順化したプロセス・モデルに変換することだと言える。問題をこのように定義するに当たっては、次のような認識を前提にしている。

a) 設計の不確定性：設計（図書）は一般的には構成材の仕様や組立を指示する確定的な情報であると理解されるが、実際にはその内容は設計以降の段階に委ねられることが多い。すなわち、設計は緩やかに規定された達成目標であり、曖昧性、不確定性を含む。確定されていない部分は設計から施工にいたるプロセスで決定される。本論文では、物的存在としての明示的な建築物（の成立・構成）を「構法」と呼び、不確定な内容を含みうる「設計」と区別する。構法とは、質・量ともに確定された建築の物的要素とそれらの間の関係である。

b) 構工法の不可分性：「構法」は実体としての建築の静的なモデルであって、それ自体によって実現のための方策が指示されているわけではない。また、方策も、構法自体を包括的に規定するものではなく、構法の部分に対応した要素技術の集積である。これらの要素技術はそれに関する情報をもとに、それに関連する資源とともに、設計・計画の都度、外部から適宜調達されるものである。資源・技術の用い方と手順は動的なプロセスであり、これを狭義に「工法」と呼べば、それは建築という行為の動的なモデルであるといえることができる。さらには、これらの要素（部分）を、ある達成目標や条件に合致するように、統合的に計画し、管理する方策もある。広義には、これらの全体を「工法」と呼ぶのが適当であろう。しかし、（狭義の）工法は特定の（部分）構法に即して記述されるがゆえに、両者は不可分である。

c) 構工法の不確定性：構工法が計画の対象となるためには、その内容が（計画の進行に応じて）必要十分に明らかにされていなければならない。これが可能であるためには、構工法が確定した技術規範として広く世の中に定着しているか、またはすでに前例が知識として蓄積されているか、あるいは必要なデータがその都度新たに仮定されなければならない。事前に外部に存在する規範・前例などのデータは、必ずしも当該プロジェクトにとって必要十分な情報を提供するものとはいえない。すなわち、情報に不足がありうるうえに情報の内容が不確定である。そこで、これらの選択・計画に当たっては、さまざまな仮定を加え、適用構工法の内容を確定しておかなければならない。すなわち、部分構工法の属性を確定してゆく過程にすでに計画行為が混入しているということになる。

d) 部分構工法の選択＝組合せ：部分構工法の選択はそれぞれが単独で完結するわけではない。性能やコスト、工期などは、全体としての構工法の属性を評価する必要のあるものの例である。選択された部分構工法の評価とは、部分構工法全体の評価、およびそれらのある部分または全体の組合せの評価を総合したものでしかありえない。

¹ 後に「建物基本モデル」として説明するように、実はプロダクト・モデルも構工法計画が確定するまで確定しない。すなわち、プロダクト・モデルは最終的にはプロセス・モデルと同時に確定される。

e) 部分を全体とつなぐ計画モデルの必要性：個々の部分構工法の計画は部分と全体の間を往還しながら進められる。そこで必要になるのが、構工法の全体と部分をつなぐ計画モデルである。これらの例としては、構法モデル、工事空間モデル、工程モデル、資源モデルなどが考えられる。これに時間的要素を組み合わせれば、構工法の部分と全体に関するさまざまな状態、属性値とその変化過程を表現することができる。

f) 構工法の評価は構工法計画の評価：構工法の評価はこのように最終的に確定した物的存在とプロセスを対象とするが、重要なことは、初期の条件としての設計や計画知識は本来不確定なものと想定されていることである。したがって、確定した構工法モデルの機能・属性値を評価するだけでは、構工法の選択・組合せを評価したことにならず、不確定な要素を確定してゆく計画過程そのものもまた評価されなければならないという点である。その過程は、一般的には機械的・演繹的なプロセスではなく、計画者の（恣意的な）方針を「決定（仮定）」として含む。そこでこうした意思決定を支援する構工法計画機能の有無に関わらず、構工法の評価はそのモデル解のさまざまな値を評価すると同時に、計画者の判断・方針を評価するものであるということを忘れてはならない。

以上の認識を踏まえ、冒頭の問題を次のように書き換える。

すなわち、構工法計画とは、「①所与の設計を、②プロジェクトの達成目標と諸条件を勘案しながら、③既存の知識、④さまざまな構工法計画手法に支援された計画者の判断・方針と、⑤全体一部分をつなぐ計画モデルに基づいて、⑥それらモデルの属性値と⑦部分構工法の仕様を同時に仮定し、⑧それらからもたらされる諸々の指標値を評価することによって、⑨計画者の判断や方針が妥当であるかを確かめつつ、⑩最終的にプロジェクトの達成目標と条件に合致する適切な構工法の仕様を確定すること」である。

本章では、構法と工法、および部分と全体をつなぐ計画モデルのコアとして、3次元CADシステムとIFMによる工程演算機能を組み合わせた手法を構築した結果について述べる。4次元構工法モデリングという命名は、3次元のプロダクト・モデリング手法に時間軸を加えたプロセス・モデリング手法を統合したことに由来している。

9. 1. 2 本章の構成

9. 2 プロダクト・モデルからプロセス・モデルへ

9. 2. 1 建築基本モデル

クローズドとオープン

部品化、システムズ・ビルディング

9. 2. 2 足し算の建築と引き算の建築

RC造と鉄骨造

現場打ちとP C a 化

「割付け」型と「積上げ」型

9. 2. 3 部分構工法の記述法

9. 2. 3. 1 構工法計画における「部分分割」

構工法計画においては、「部分」をもたらす「分割」が重要な意味を持つ。では、「部分分割」はどのような場合に生起するのか。以下に事例をあげ、その指示属性を検討する。

a) 構法の機能的「部分分割」＝部位分割：躯体・仕上げ・設備、柱・梁・壁・スラブ等、建築を建築として成立せしめるような機能的意味による部分分割である。これらは、同時に形態・領域のまとまりをもち、また空間内の位置に関する情報をもつ。果たすべき機能は性能としてあらわされる。部位による分割概念は、こうしたまとまりをもつうえに、しばしば特定の構成材、業種・工種との関連性を強くもっているために、構工法の部分分割を決める際の上位概念として用いられることが多い。

b) 構成材の種類による「部分分割」：材料の同一性、類似性によって抽出される部分である。構成材の中にも形態・領域のまとまりをもち、機能的部分（a）に近い「定型的」な構成材（～部材）とこうしたまとまりをもたず、素材に近い「不定形」な構成材（～材料）とがある。設計図書に指示された情報と組み合わせた場合、構成材は構法に近い内容を指示するようになる。また、構成材はそれを扱う技能・技術による専門的区分、発注・調達区分とも密接な関係があるために、業種・工種と同様に扱われる可能性がある。

c) 構成材の部材分割による「部分分割」：連続した同種の構成材またはその組を部材分割する場合である。その操作に関連して、割付けという言葉がよく用いられる。また、これらは揚重単位、輸送制限といった外部的条件によって決定されることがある。構成材（b）の属性に、領域・位置情報を加味した指示内容をもつ。

d) 部分構工法の「割付け」による「部分分割」：属性が既知である特定の構工法を全体構工法の部分として割付ける場合である。その場合、構法は設計図書および構工法知識体系により特定され、工法も施工要領書などによって特定される。例えば、大型型枠の隣接工区間での転用を必要とする垂直・水平コンクリート分離打設工法のように、構工法の特性によって空間分割（後述）が引き起こされる場合もある。

e) 部品化・プレファブ化による「部分分割」：建築の部分を物的存在としても、またプロセスとしても分節し、別個の生産単位とする場合である。これにより、その部分構工法をつくるための物的要素とプロセスは「現場」という生産システムから分離される。ただし、サイト・プレファブといったケースでは、現場の生産資源と密接な関係を持つこともある（同一下請による地組など）²。これらはまた、専門区分、調達区分とも密接な関係を持つ。その意味で、これらは（d）の特別なケースとみなすこともできる。

f) 構工法の工区分割による「部分分割」：単なる空間分割の操作である（j）、あるいは物的存在としての構成材の領域分割である（c）に対し、分割された空間に含まれる構工法を単位とした部分分割である。構工法により空間（工区）分割の仕方が異なる場合がある。多くの場合、こうした空間（工区）分割の目的は、作業空間を分割することにより異種プロセスの同時進行化を可能にすることにあるが（多工区同期化）、同一発注単位としての構工法の大きなまとまりを導くための空間分割もある（システムズ・ビルディング型）。前者の場合、現場の生産システムは、相互に順序関係（空間領域としてのインターフェイス）をもつ複数のサブシステム（複数のプロジェクトと理解してもよい）に分割される。

g) 発注・調達区分による「部分分割」：ワークパッケージ等とも呼ばれる。技能・技術的専門工事区分とも類似しているが、一式請負や、同一工種を複数の業者に発注するケースなどもあり、プロジェクトごとに特定の部分分割がなされる。この区分は確定された構工法を前提としており、本設資材（～構成材）の施工に関連する資機材の扱いを含む。

² 6章参照。

h) 工程による「部分分割」：一連のプロセスのまとまりを抽出した結果である。工程（～プロセス）の要素は作業空間、作業内容、その順序関係、時間、必要資源とその量によってあらわされるが、その確定は構工法の確定を前提とする。何をもって一連のまとまりとするかは、工程の属性のどの部分を共通とみるかによる。最も厳密に言えば、発注区分・使用資源・作業内容名が同一の連続したプロセスということになり、これはふつう同種の構成材のまとまりの存在を必要条件としてもたらされる。しかし、資源や作業内容の一部が違っても、同一の発注区分・工種に属するプロセスが連続していれば、それを工程の単位とみなすこともありうる。専門区分や発注・調達区分がことなつたプロセスとの取合いは工程分節化の十分条件であるが、同種のプロセスでも、工区分割や部材分割単位によって工程分割がなされることがある。工程の分節化はこのように、工期、資源の水準（cf. 転用）、工事計画手法など多くの要因に支配される。

i) 技能・技術的専門区分による「部分分割」：その部分を設計し、施工するのに要する技能・技術的専門区分である。扱う資機材との関連が深く、業種・工種（職種）等の概念と近い。

j) 作業空間の分割＝工区分割：建築空間を領域分割した場合の部分分割である。棟・地上・地下・階・ペリメーターなど、工事計画の対象となる工区がこれにあたる。

k) 工期・時期による「部分分割」：工程等に関連付けられた時間的要素によって区切られたプロセス群を指す。

l) 構成材の発注・納入時期による「部分分割」：同種の資材でも、全体工期の中でいくつかの時期に分けて発注・納入がなされることがある。これらは、資源の在庫状況に直接影響し、工程に間接的に影響する。また、納入時期にはジャスト・イン・タイムなど、工法計画に密接に関係する「部分」である。

このように、構工法における「部分」は多様であり、しかもそれらは互いに密接に関連している。計画者はこれら部分分割の要因のいずれか（の組）を考慮の対象として構工法を分節し、「部分」を抽出する。一般的には、どの要因が支配的であるとはいえない。したがって、構工法計画に当たっては、どの要因からも整合的な「部分分割」が誘導されるようにしておくことが重要である。そのためには、これらの用意によって分割される構工法モデルの「部分」の属性とその上での操作を、共通かつ恣意的・慣習的な「意味性」を排除した情報モデルとして整理しておくことが重要である。

9. 2. 3. 2 構法・工法・構工法の「部分」

前述の構工法の「部分」をその指示内容である属性との関連において整理したのが表 9-1 である。

物的実体としての構法の「部分」を直接的に表す概念は、部位（機能的部分）または構成材である。これらは主に「もの」の種類・量・質・位置関係といった属性によって記述される「部分分割」であるが、プロセスに関する情報をもたない³。構成材はその種類によってプロセス（＝やりよう）を暗黙的に示すことがあるが、確定的、普遍的な関係はない。一方、工法に関わる部分分割のみをあらわす概念の例は、技能・技術的専門区分、工区、工期であるが、これらだけではプロセスのその他の属性はほとんど決まらない。技能・技術的専門区分は特定の構成材と結びつきやすいが、確定的、普遍的な関係はここにもない⁴。

部分構工法の割付け、部品化・プレファブ化、構工法の空間（工区）分割、調達・発注区分（ワ

³ 述語論理によって、「梁は柱によって支えられる」といった関係構造を導入する試みが多くなされているが、このような概念・手法化には限界があるとするのが本論分の主張である。

⁴ 材種・職種が確実な対応関係にあり、それを普遍的な工種とみなしうるのは、在来工法のように技術規範が広く成立している場合のみである。

ーク・パッケージ)、工程は、「ありよう」と「やりよう」の両方に深く関係した「部分分割」をとまなうものであり、これらにおいて、構法・工法は不可分である。注意しなければならないのは、(本設資材以外の資機材を含む)資源の水準と時間、作業空間に関わる属性である。これら以外の属性は、所与の構法から誘導される構工法の属性のうちの不変のものであり、与条件や一般的な知識を加味してその値を決めることができる。

しかし、先の3つの属性は、工事計画者の選択的判断に委ねられるものであり、かつ工期、必要資源、コストなど全体構工法(プロジェクト全体)のパフォーマンスを左右する重要な属性である⁵。したがって、構工法の空間分割、調達・発注区分、工程などを決定する際に必要なこれらの属性の値の確定は、構工法の部分を確定する計画の中でも、一段高度な決定内容であるとしてよからう。

ところで、構工法の「部分分割」を規定するのはこれまで述べてきたように属性(の集合)であるが、「全体構工法」⁶の個々の「部分」を規定するのはこれらの属性の値である。両者は別の意味をもつので、以後、前者を{分割}、後者を集合的に{部分}、またその要素を[部分]とあらわして区別することにする。

いくつかの{分割}を合成することが可能であり、その場合には、新しく重ねあわされた属性値をもつ{部分}が定義される

表 9-1 構工法の部分分割とその属性

	物的実体Ⅱありよう	プロセスⅡやりよう	構 構 構 構 構 構 構 構 工 工 工 工 工												
			a	b	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
			機能的部分Ⅱ部位	構成材の種類／部材	構成材の種類／部材	構成材の部材分割	部分構工法のあてはめ	部品化・プレファブ化	構工法の工区分割	調達・発注区分	工程	技術・技能の専門区分	ゾーン・工区分割	発注・納入時期	
○		実体的名辞の有無	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	◎	△	—	—	—
○		機能・性能(品質)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	③	—	—	◎
○		仕上げの状態・室	◎	◎	①	◎	◎	◎	◎	◎	◎	③	—	—	①
○		構成材(本設資材)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—	◎
○		本設資材量	◎	①	①	◎	◎	◎	◎	◎	◎	③	△	—	◎
○		寸法・形状	◎	◎	①	◎	◎	◎	◎	◎	◎	③	—	—	◎
○		構成材の位置・領域	◎	①	①	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	—	①
○		空間の領域	—	—	—	—	—	—	◎	◎	◎	—	◎	—	①
○		作業内容・プロセス	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—	—
○		作業量	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—	—
○		作業能率・生産性	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	③	△	—	—
○		業種／工種	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—
○		技術・技能・資格	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—
○		職種編成・人数	—	—	—	—	—	—	②	②	③	—	—	—	—
○		仮設資材	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—	—
○		機材(道具・機械・設備)	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	△	—	—	—
○		仮設・機材の量	—	—	—	—	—	—	②	②	③	—	—	—	—
○		仮設・機材に伴う作業内容	—	—	—	—	—	—	◎	◎	◎	◎	△	—	—
○		仮設・機材に伴う作業量	—	—	—	—	—	—	②	②	③	—	—	—	—
○		資源の調達先	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	③	△	—	◎
○		資源の調達コスト	—	△	△	△	◎	◎	◎	◎	◎	③	△	—	◎
○		部分の時間(時間)	—	—	—	—	—	—	②	②	③	—	—	—	◎
○		部分の時期	—	—	—	—	—	—	②	②	③	—	—	—	◎
○		部分間のインターフェイス	◎	①	①	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	◎	◎
凡例 ◎:「部分」の直接的指示内容															
①:設計を介して間接的に指示															
②:工期／資源水準のいずれかが決まれば指示可能															
③:設計・施工要領資料を介して間接的に指示可能															
△:非確定的な関連性がある															
—:無関係															

9. 2. 3. 3 手続きからみた部分分割

●「部分」と「全体」

部分構工法を確定するという操作は、前述のようなさまざまな{分割}に対応する属性の集合を定め、その値を決定(仮定または変更)して{部分}を確定するという二重の内容を意味する。すべての属性の値が確定されたとき、構工法は全体的かつ最終的に確定されたといえる。

[部分]の確定は、ある{分割}概念にしたがって単に全体から{部分}を切り取るだけではなく、{部分}の総合としての全体の属性の値を決定する(または書き換える)という手続きをとまなっている。すなわち、[部分]の決定は、分節と総合という双方向の手続きとなっているのである。総合的に{部分}をみた全体構工法は、「部分」間の整合性および品質、工期、コスト等、プロジェクトの目標の達成度によって評価されなければならない。

⁵ これら3属性(変数)は互いに他の従属変数となっている。
⁶ ある属性の集合で定義された限りの構工法。

●[部分]の切断・代替・割付け

[部分]の決定の仕方として、次のような典型的なケースがある。それぞれのケースによって手続きや操作はことなる。

①**切断**：{部分} または[部分]の切断を指す。ある {分割} に関わる属性の値を定め、[部分]を並列的に導き出す⁷。

②**代替**：[部分]を他の[部分]によって代替すること。異なる[部分]で代替するには、属性の値の一部が異なっていると同時に、一定の[部分]が共通の値をもっていること必要がある。このように代替は包含関係にある二つの {分割} とそれにしがつた {部分} の存在を前提とする。他の[部分]および全体への影響はその都度評価されなければならない。

③**割付け**：特定の {分割} にしがつた[部分]を優先的に採用、確定する場合。このとき、属性の値（境界も）は与件として決まる。ただし、すでにあてはめられた[部分]に接して（[部分]間のインターフェイスを介して）割付けがなされる場合、その間の境界は必ずしも機械的に確定されないので、注意が必要である。

●組合せの整合性

まず、2つの[部分]の間の整合性を、インターチェンジアビリティ（交換可能性）とコンパティビリティ（適合性）という2つの観点からみる。

①**インターチェンジアビリティ**：[部分]間の交換可能性。[部分A]が他の同様の[部分B]と交換（代替）可能であるということ。前述の「代替」とまったく同じ内容を指す。

②**コンパティビリティ**：[部分]間の適合性。並列関係にある（インターフェイスを有する）[部分A]と[部分B]を組み合わせることが可能であるということ。必要条件は、境界条件（インターフェイスでの属性の値）が合致していることである。「切断」はコンパティブルな[部分]を同時に抽出すること、また「割付け」はコンパティブルな[部分]を順次確定してゆくことに相当する。

いずれも、一部共通の {分割} にもとづいた[部分]間のインターフェイスでの値の合致および {部分} の総合的な値の妥当性を必要条件としていることは同じである。以上のことは二つ以上の[部分]の組合せについても成り立つ。

構工法計画においては、「切断」、「割付け」によって部分構工法の仮定を行い、検討の途中の段階で「代替」がなされる。

9. 2. 3. 4 部分－全体の関係の構造化

構工法計画における構工法の選択問題は、構法の部分を何らかの分割概念にしがいながら部分構工法として仮定し、それをもとに全体構工法のパフォーマンスを評価するという手続きをとる。ここでクリティカルな問題となるのが、部分－全体の構造化である。構造化には大きく分ければ、さまざまな部分分割手法を互に関連付けるための構造化、および、部分的に仮想された構工法の属性を全体構工法として評価するための構造化の二つがある。

部分分割の方法としては、従来、部位分割を主体とした階層的な方法がとられることが多かったが、これは構工法選択の実態に沿わないばかりではなく、基本とする部位分割の構造そのものが構

⁷ 全体（またはある {分割A} にしがつた上位の {部分}）のある属性（{分割B}）について値（の範囲～境界）を特定すること。 $\{分割A\} \cap \{分割B\} = \emptyset$

工法の多様性を排他的に除外してしまうという欠点をもつ。本項では、部位分割を規定する属性の群である {分割} とその属性値である {部分} とによって、多様な部分分割を構造的に結びつけることが可能であることを示した。さまざまな部分分割法に対応する属性の集合およびその要素によって、包含関係、順序関係が定義されるのである。

部分構工法の価の全体的な評価は、構法モデル、工事空間モデル、工程モデル、資源モデルの四つの計画モデルを用いて進められる。各モデルの値の多くは部分構工法の値と連結されている。また、各モデルで共通のラベルをもつ属性は同じ値をもつ。その意味で、これらのモデルは同じ構工法計画モデルの別な側面であると解してよい。

{分割} による {部分} 間の関係を構造化するのは、その {分割} 固有の [部分] 間のインターフェイスである。このインターフェイスは全体の整合性を調整する媒介でもある。

{分割} の属性項目と [部分] 間のインターフェイスで結ばれた構造は、階層的なものではない。構工法の多様な選択・組合せを遂行する上では、このような構造化が不可欠である。

9. 2. 4 部分構工法群からプロセス・モデルへ

9. 2. 4. 1

形状の分節

意味の分節

9. 3 4次元構工法モデリング手法を用いた構工法計画

9. 3. 1 4次元構工法モデリング

9. 3. 1. 1 4次元構工法モデリング手法開発の状況

●4次元構工法モデリングとは

4次元構工法モデリングとは、建築を構成する3次元CADオブジェクト群をその組立に関する時間的情報と連動させることにより、(a) 施工プロセスを可視化すること、または、(b) 3次元オブジェクトの属性値および工程/工程計画情報を用いた構工法計画を可能にすることを総称して言うことにする。言い換えれば、プロダクト・モデルのプロセスへの展開ということである。

4次元モデリングのもっとも簡単な例は、3次元CADオブジェクトを施工期間中の時刻にしたがって画面上に次々表示するものであるが、これは単なるアニメーションであって、構工法モデリングと呼ぶにはふさわしくない。工程/工事計画情報の基本は個々のオブジェクトの組立に関する先行後続関係であるが、他にも投入資源水準や工区分割数等がある。先行後続関係に組立に要する時間を付加すれば、同様のアニメーション、すなわち組立プロセスの可視化(a)ができあがるが、時間は3次元オブジェクトの属性値である施工数量と工程/工事計画情報の一部である投入資源水準から割り出されるため、厳密にはすでに構工法計画(b)が行われていることになる。また、構工法計画の過程で時間経過は特定の型の確率分布にしたがう離散事象として扱われることが多く、この場合はシミュレーションと呼ぶのが適当である。

一方、3次元オブジェクトのデータあるいは属性値を生産情報として用いることに関しては、数

量積算をはじめ応用の例は多い。しかし、問題は、プロダクト＝構法としての CAD オブジェクトとプロセス＝工法をいかに対応付けるか、という点にある。構法と工法が一對一に対応するのであれば、プロセス情報はプロダクトの属性値として扱うことが可能であるが、これは非現実的である。一般的には、機能的・空間的なエンティティとしての部位概念をキーに、部位構法と部位工法を結びつける方法が主流であるが、部位によるクラスの単純化、固定化は構工法計画の融通無碍な実態とは相容れなかったといつてよからう。

そこで、構法（計画）と工法（計画）を統合的に構工法（計画）として取扱う考え方が生まれてきたが、本章のアプローチもこれに添うものである。

●手法の特徴

ここで述べる 4 次元構工法モデリングは、筆者等が開発したインターフェイス・マトリクス (IFM) による工程計画手法と 3 次元 CAD を組合せたもので、次のような特徴を有する。

1) 建物基本モデルを階層的に構法展開ないしは工法展開することをせず、「部分構工法」をその都度「割り付け」する方法を採る。このとき、プロダクト・モデルとしての建物基本モデルの「部分」が CAD オブジェクトとして切り出されるとともに、その実現プロセスに関する情報を 3 次元オブジェクトの属性値として与えることが可能である。このような方法を採用したのは、本来無限に多様な部分構工法に固定的なクラスの制限を加えないためであり、実態に即した構工法計画を考慮したためである。

2) IFM は部分構工法を単位とする構成材（本設・仮設資材のまとまり）群の間のインターフェイスによって先行後続関係を定義する。したがって、本研究の場合、工程情報もまた 3 次元 CAD オブジェクトの属性値として与えられる。

3) 工程計画では工区分割や部品・部材分割を行うが、その実行は本手法では 3 次元オブジェクトの分割という操作に還元することができる。その結果もまたオブジェクトの属性値となる。

4) 他の手法では仮設を扱うのが困難であったが、本研究では部分構工法の割付けと同時に仮設が定義されるため、これらを本設のオブジェクトと同等に取り扱うことが可能である¹⁾。

1. 9. 3. 1. 2 4 次元構工法モデリング手法の構成

プロダクトからプロセスの表現へ

1) 全体の流れ

本節では、まず、3 次元 CAD を用いて部分構工法の領域を割り付ける方法について述べる。次いで、部分構工法間のインターフェイスによって定義された IFM を用いて多工区同期化構工法の工程を出力する方法について述べる。この段階での入力情報である数量データは 3 次元 CAD から受け渡される。出力された工程は再び 3 次元 CAD にフィードされ、指定された時間スケールで、施工プロセスを CRT 上に 3 次元の動画で出力する。

続いて、この方法を用いて実際に 4 次元構工法モデリングを行

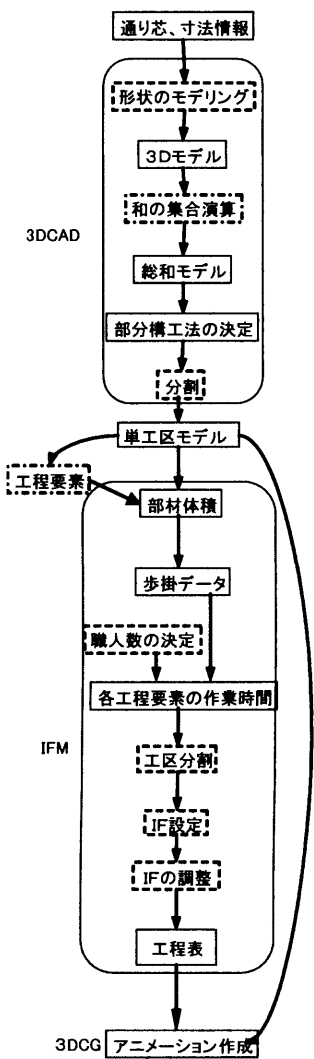


図 9-1 4 次元構工法モデリング

った例を紹介する。この例は超高層 RC 造集合住宅躯体工事の基準階の構工法計画への適用事例であり、従来の部位概念を逸脱した構法の「部分」が随意に定義される様子が示される。また、1 日をタイムモジュールとした 3 工区分割の計画例と 2 日をタイムモジュールとした 2 工区分割の計画例を示し、同一の躯体構法から多様な工程計画がもたらされうることがヴィジュアルに示す。同一の建物基本モデルから異なった構工法計画が算出されることを示すことについては、機会を改めて報告したい。

2) 部分構工法のあてはめ→領域定義（切り取り）→部分構工法の数量算出

3 次元の基準階モデルに部分構工法をあてはめるために、3 次元オブジェクトの集合演算を用いて実際の構法に基づいた 3 次元オブジェクトの集合体に分割をする。単純に 3DCG として形状を表現するためだけではなく、その過程において、各部材の体積も属性値としてオブジェクトに与えていくため、3D 処理の手法としてはソリッドモデリングを用いる。ソリッドモデリングは体積も考慮に入れた 3 次元処理のため、例えば梁の形状から梁の PCa 材の形状を引くことにより梁の現場打ちコンクリートの体積を求めることができる。同様に躯体を分割して各部材の体積を出すことにより作業時間を求めることが可能となる。モデリングのための 3DCAD ソフトとして AutoCAD を使用する。

ブール演算のあらまし

- ・立体の切断：部材を構法に従って分割するときに必要な操作で、立体に対して切断面を干渉させて干渉点、干渉線を生成し、断面形状を 2 重に作成して切り離すという手順からなる。
- ・集合演算：3 次元オブジェクトの集合演算は、単純な形状を組み合わせて複雑な形状を生成するためには欠かせない操作である。和の集合演算は、干渉計算による干渉点、干渉線の生成と不要部分の除去、立体の結合という手順によって行われる。他に、差、積の集合演算もあるが、これらの計算はド・モルガンの法則から和の集合演算と立体を反転する演算の組み合わせで実現できる。

建物モデルの分割手順

通常、設計図書をもとに作成した 3D モデルは、通り芯や断面寸法をもとにモデリングされているので、仕口部分などにおいてオブジェクト同士が重なっている。そのため、外見では全体の形状は正しいが、躯体全体の体積と各オブジェクトの体積の総和が異なっている。そこで、集合演算を使って部材の分割をする前に、和の集合演算によって一体となったソリッド形状を作成し、これを総和モデルと呼ぶことにする。また、一体化する前のデータも分割の過程において寸法などの参照や、集合演算に利用するので、別レイヤーに保持しておく

建物モデルが一体のソリッド形状になった時点で部材の分割を進めていくが、その手順に関しては選択する部分構工法によって異なってくる。そのため、今回の事例では手作業により分割を行なったが、今後、この過程の自動化は十分に可能であると考えられる。

ブール演算のあらまし

3) IFM による工程計算→工程計画の出力

IFM を用いた多工区同期化構工法の工程計画についてはすでに報告している¹¹⁾ので、ここではその手法のあらましを示す。

多工区同期化構工法の工程計画は繰り返し型の工事に適用されるもので、形態的には、一つのタイムモジュール内に作業者が頻繁に工区間を移動することに特徴がある。手法的には、全職種の全

作業者が完全同期化条件（手待ちの時間が0であること）で稼働しているという条件から出発して工程計算を行うところに特徴がある。計算の流れは概略次のとおりである。

- ① 部分構工法の属性値の決定：演算の対象とする構工法（＝部分構工法の組合せ）について、工程計算に必要な属性値を用意する。必要な属性値は部分構法毎の施工数量（基本的に1種類の構成材）、工数歩掛、および部分構工法間のインターフェイスである。前2者の属性値は構工法DBから供給されるという想定である。インターフェイスは基本的に物理的な構法特性によって定義されるもので、これが先行後続関係を唯一決定する構法属性である。
- ② サイクル工期と投入資源水準の決定：要求工期に応じて基準階1階の施工に要する工期（サイクル工期）を決定する。また、先の施工数量と工数歩掛を用いて機材数や各職種の人数などの投入資源水準を決定する。完全同期化は必ず実現されるからⁱⁱⁱ、ここで決定した投入資源水準は工期の設定を変える場合以外、変更する必要はない。
- ③ IFMの作成：部分構（工）法を計画単位としたIFMを作成する。この段階ではまだ工区分割が行われていないので^{iv}、これを「単工区モデル」と呼ぶ。IFMの縦ないしは横の一行のベクトルが部分構法の組合せを表し、行列の非対角要素が部分構法間のインターフェイスをあらわす。このベクトルを部分構工法を表現するものに拡張するには、その構工法の施工に従事する作業チームを各部分構法に対応させなければならない。このとき、部分構工法によっては複数の作業チームが同時に作業に当たることがあるため^v、そのような場合には必要な数だけ行列の次元数を増やす。IFMに関しては、組作業でくくられた各作業チーム（職種）の直接の先行要素と後続要素を他の職種も共通に持つとして、インターフェイスを付加する。
- ④ 水平工区分割数と分割工程、タイムモジュールの決定：水平工区分割に従ってIFMを部分行列に分割する。3工区分割ならば3つの部分行列に分けられる。単工区モデルに示された基準階工程をどこで分割するかは計画者の判断によるが、主要な工程をバランスよく各工区に配置することが求められる。このとき、単工区は複数工区となり、構法表現された別の建物モデルが工区分割の数だけ作られたことになるから、部分行列間に位置するインターフェイスはすべて消去される。工区分割数が与えられると同時にタイムモジュールが決まる。タイムモジュールと工区分割数を掛け合わせた数字が基準階の施工に要するサイクル工期に相当する。⑥に示す工程計算を行うと、各工区の部分行列があらわす工程の工期は所定のタイムモジュールをオーバーしている可能性がある。その場合は、工区分割数を増やし、垂直工区分割を組合せる。このとき、上下階間の同一部分構工法間のインターフェイスを考慮する必要がある。一般に、垂直工区分割を含めた工区分割数（ジョブ工区数）は水平工区分割数（サイト工区数）よりも多い^{vi}。
- ⑤ IFMによる工程計算：基準階の施工数量を工区分割数で割った値を、②で決定された投入資源水準を工数歩掛に掛けた数値で除した値が、各部分構工法の施工に要する時間である。IFMの対角要素にこの時間を代入することにより、そのIFMが表す各工程要素の最早日程、最遅日程、トータルフロート、フリーフロート、クリティカルパスを計算することができる。各ジョブ工区に対応する部分行列のあらわす工期が1タイムモジュールに相当する工期であるが、一般にこの工期は設定されたタイムモジュールよりは短くなっている。それは、この段階では同期化がなされていないからである。すなわち、ジョブ工区間を移動しながら同じ作業チームが各種の作業をするわけであるが、同一作業チームが同じ時間帯に別のジョブ工区で作業を行っているという非現実的な事態が起こっている可能性がある。そこで、次の同期化の操作が必要になる。

- ⑥ 同期化：⑤で算出された各ジョブ工区間で同一作業チームの作業時間帯が重ならないように、作業順序を決める。すなわち、今度はジョブ工区の範囲を越えて、同一作業チームの作業間にインターフェイスを付加する。この場合、クリティカルパス上にない作業を選んで順序化する。同期化された多工区分割工程の完成：改めて IFM による工程計算を行う。各ジョブ工区の工期がタイムモジュールをオーバーしていなければ同期化された多工区分割工程の完成である。そうでなければ、⑥の作業を繰り返す。

3 次元工程アニメーションの作成

IFMにより求めた2通りの工程計画それぞれを、3次元CGを用いてアニメーション化する。多工区分割同期化工法において施工プロセスを動画で表現することの利点として、図面や工程表よりも直感的に工事の流れを伝えることが可能となること、工区の境界付近での作業の流れに無理がないかチェックできることがあげられる。アニメーションのための3DCGソフトウェアとして3D Studio MAX（以下3DS）を使用する。

アニメーションはフレームと呼ばれる多くの静止画像から構成されている。一般的な3Dソフトウェアでは動画を作成する場合、ある命令の開始、または終了といったキーとなるフレーム(key frame)を作成し、その中間のフレームはコンピュータによって自動的に補完され、作成される。3DSの場合は、そのオブジェクトのパラメータ（位置座標、サイズ等）がある時間でどのような状態にあるかを示すトラックビューにパラメータを指定することによってキーフレームを作成する。

本例における工程計画アニメーションの作成手順は、以下のとおりである。

- ①部分工法選択の段階で集合演算により分割した躯体の単工区モデルをAutoCADより読み込む。今回の事例では、共通の部分構工法での比較、検討なので読み込むモデルは基本的に共通であるが、Hコンの境界が工区分割によって異なるので、それぞれサイト工区の境界においてHコンのオブジェクトを分割しておく。さらに、読み込んだ各部材をサイト工区ごとにまとめておく。
- ②単工区モデルのオブジェクトすべてに対して可視状態を操作する可視トラック(visibility track)を作成し、すべてのオブジェクトを不可視状態にする。
- ③IFMにより導き出した工程表をもとに各オブジェクトを時間に沿って不可視状態から可視状態に変更していく。
- ④以上の操作を分割された工区ごとに行い、単工区モデルすべての部材にキーフレームを付加する。
- ⑤さらに、タイムモジュールぶんだけキーフレームをずらした単工区モデルを作り、それらを積層することにより複数のフロアにわたるアニメーションを作成することができる。

ジョブ工区が複数のフロアにわたる場合は、上階の作業スペースとしてスラブPCaの揚重を先行させる等、縦方向での検討が必要になってくる。アニメーションを作成すれば工程要素の前後関係の把握が容易になり、それらに問題点があればIFMを変更する。

9. 3. 2 工区分割を変えた4次元構工法モデリング

ケーススタディ

ここでは、超高層RC造集合住宅躯体工事において、工区分割数、投入資源水準、タイムモジュールを変えた2通りの工程計画を、4D構工法計画の適用事例として紹介する。

対象工事概要

対象とした建築物は埼玉県さいたま市に現在建設中の集合住宅棟のうち、高層棟のB棟である。

構造は鋼製制震壁を組み込んだRC造純ラーメン構造であるが、仲どおりの柱の一部を厚肉スラブ状の柱頭をもつ独立柱（MOS柱）とし、無梁の内部空間を有しているところに特徴がある。また、駐車場の北側にPCa部材製作のサイト工場を設け、躯体のDOC工程と同期化させたスピードでPCa部材を製作している。

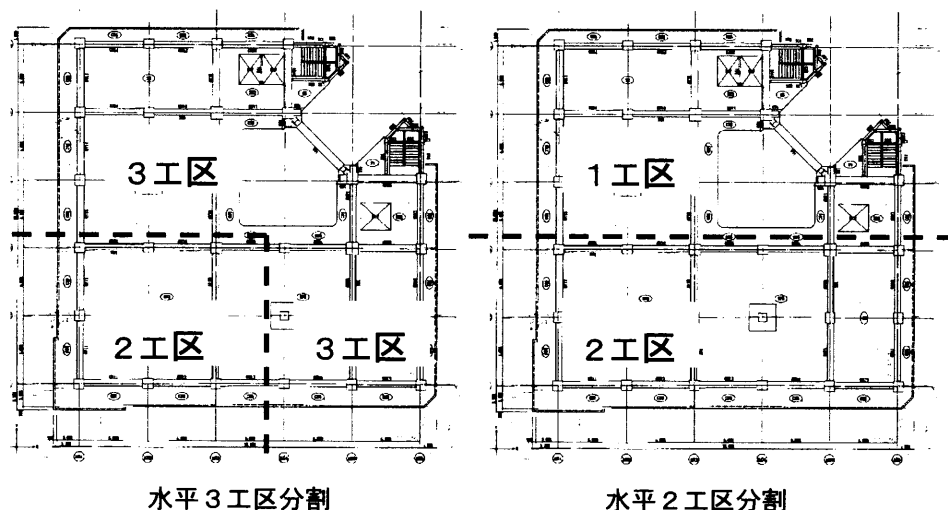


図 9-2 基準階のサイト工区分割

建物モデルの分割

今回の高層集合住宅の事例では、内床、梁をハーフPCa、外床、柱をフルPCaとする複合化工法を採用した、単純な形状の境界から分割していくほうが容易に作業できるため、床、柱、仕口、大梁の順に分割と部材の定義を行った。

・床：まず、基準階の総和モデルから床スラブ厚を読み取り、そのレベルにおいて総和モデル全体を切断し、分割する。次に、一体となっているスラブ形状から外床のフルPCaとなる部分を切り出す。この時点で外床のフルPCa部材の形状と体積が決定する。

残った内床部分をPCaの部材厚レベルで上下に分割し、上部は床スラブの現場打ちコンクリート形状として定義する。

下の部分と統合前の建物モデルの柱、大梁との干渉計算を行い、柱、大梁の形状を引いたものからPCa版の体積と形状を求める。次に、積の集合演算を用いて柱、大梁形状と重なっている部分を求め、床の現場打ちコンクリート部分と統合する。

・柱：この時点で残った形状は、柱、梁と仕口部分の和になっている。この形状を梁底のレベルで分割することによってフルPCaの柱を定義できる。他に3本の独立柱がある

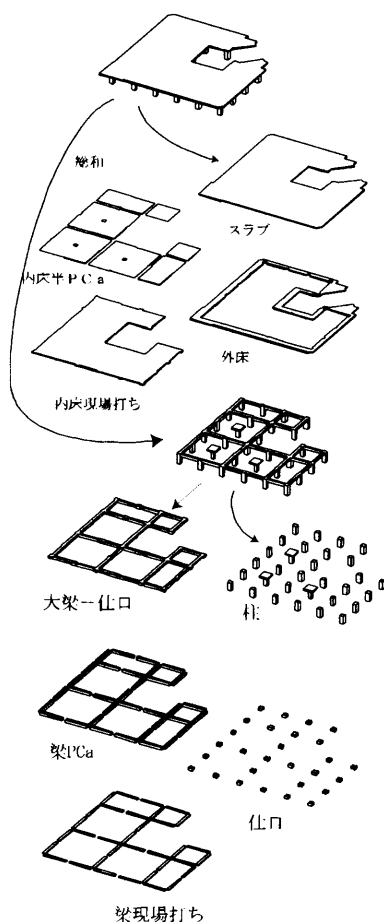


図 9-3 基準階モデルの分割手順

が、これらは個別に切り出しておく。

- ・仕口：統合前の基準階モデルにおいて、大梁と柱が重なっている部分が仕口と定義できにより仕口部分を求め、現場打ちコンクリートの体積として定義する。
- ・大梁：残っている部材から先に求めた仕口部分を引いてやることにより大梁の形状を求めることができる。また、大梁はハーフPCa部材を用いるので、梁の断面形状からPCa部分と現場打ち部分の境界を求め、さらに大梁を分割する。

現場打ちのコンクリートはVH分離打設を行っているので、仕口部分をVコン、床、梁、部分の現場打ちコンクリートはHコンとして定義する。

以上の操作により建物モデルを分割し、選択した構工法に従った形状に重複なく再定義することができた。

I F Mによる工程計算

躯体モデルの分割により部分構工法が決定され、I F Mによる工程計画に必要な属性地が出揃う。

このデータをもとに2通りの工程表を出力する。両者とも、ジョブ工区が複数のフロアにわたっているの、工区分割、インターフェイスの操作の際には垂直方向の配慮が必要となる。

表 9-2 部分構工法とインターフェイス

		工程要素名	職種	時間		ジョブ工区		インターフェイス（先行要素）		
				3分割	2分割	3分割	2分割	単工区モデル	3分割	2分割
1	X1	梁、MOS柱墨出し	墨出し工	0.3972	0.7944	1	1			
2	M1	MOS柱揚重・取付・測量	筋工	0.2	0.3667	1	1			X1
3	M2	MOS柱揚重・取付・測量	墨出し工	0.1382	0.2764	1	1			X1
4	M3	MOS柱揚重・取付・測量	鍛冶工	0.0556	0.1042	1	1			X1
5	S1	制震壁立上げ取付	鍛冶工	0.1656	0.3104	1	1		M3	M3
6	S2	制震壁揚重・取付・測量	筋工	0.1712	0.3139	1	1	S1	S1, I1	S1, Y1
7	S3	制震壁揚重・取付・測量	墨出し工	0.1382	0.2764	1	1	S2	S1, O2, O1	S1, M2, Y1
8	Y1	柱、床用支保工移動	筋工	0.3232	0.5926	1	1		M1	M1
9	Y2	柱、床用支保工移動	型枠大工	0.4444	0.8333	1	1		M1	M1
10	B1	梁PC揚重・取付・測量	筋工	1.2556	2.3019	2	1	S2, S3	P1	S2, S3, Y1, Y2, C1
11	B2	支保工調整	墨出し工	0.5701	1.1403	2	2	S2, S3, Y1, Y2	X1	S3
12	B3	カブラー・斜めサポート	鍛冶工	0.2211	0.4146	2	2	S2, S3, Y1, Y2	S1	S1
13	B4	梁グラウト材注入	土工	0.8593	1.7185	2	1	B1, B2, B3	B1, B2, B3	B1, Y8
14	H1	閉鎖型フープ筋取付	鉄筋工	1.213	2.4259	2	1	B4	R1	B4, P2
15	T1	鉄骨階段揚重・取付・測量	筋工	0.4424	0.8111	2	1	B1, B3, B4	B1, B3, B4, D1	B1, B4, I1
16	T2	仮設手摺・足場取付	墨出し工	0.8986	1.7972	2	2	B1, B3, B4	B1, B3, B4, S3	B3, Y4
17	T3	鉄骨階段ボルト本締・溶接	鍛冶工	3.7083	7.4167	6	5	T1, T2		
18	Y3	内・外床用支保工設置・測量	型枠大工	1.7733	3.325	3	1	Y1, Y2, B1, B2, B3	Z1, X2	Y1, Y2, B1, Z3
19	Y4	内・外床用支保工設置・測量	鍛冶工	0.6104	1.2208	3	1	Y1, Y2, B1, B2, B3	X2	Y1, Y2, B1, O2
20	X2	床墨出し	墨出し工	1.0715	2.1431	3	1	M1, M2, M3, B1, B2, B3, B4	A1	M1, M2, M3, B1B4, T2
21	F1	F S床揚重・取付	筋工	0.1379	0.2528	3	2	M1, M2, M3, Y3, Y4, X2	Y3, Y4, X2, O1	Y5
22	I1	内床半PC揚重・取付・支保工調整	筋工	0.8611	1.5787	3	2	B1, B4, H1, Y3, Y4, X2, F1	Y3, Y4, X2, F1	F1, Y3
23	I2	内床半PC揚重・取付・支保工調整	型枠大工	0.5844	1.0958	3	2	B1, B4, H1, Y3, Y4, X2, F1	Y3, Y4, X2, F1	F1, Y3
24	I3	床・梁隙間埋め（躯体補修）	左官工	3.4	3.5262	3	2	B1, B2, B3, B4, F1, I1, I2	B4, I1, I2	B2, B3, F1, I1, I2, H3
25	R1	スラブ筋取付	鉄筋工	5.4472	10.894	4	2	B4, H1, F1, I2, I3	P2	
26	P1	地組鉄筋揚重・取付	筋工	0.2475	0.4537	4	2	B1, B4, H1, F1, I1, I2, I3	Y1	D1
27	P2	地組鉄筋揚重・取付	鉄筋工	0.3963	0.7926	4	2	B1, B4, H1, F1, I1, I2, I3	Y1	R1, D1
28	A1	A L C立上げ墨出し	墨出し工	1.7174	3.4347	5	2	F1, I1, I3, R1, P1	M2	R1, P1, X2
29	A2	A L C立上げ取付・溶接	鍛冶工	4.57	8.5688	5	3	I2, I3, R1, P1, P2, A1	A1, O3	O3
30	Q1	コンクリート段取り	土工	1.7352	3.4704	5	4	R1, P1, P2	C3	
31	Q2	コンクリート段取り	左官工	3.4	3.3048	5	4	R1, P1, P2		
32	E1	E V型枠取付	型枠大工	0.5133	0.9625	4	4	I1, I2	I2	Y2
33	O1	外床PC揚重・取付・測量	筋工	1.6364	3	4	2	B1, B4, H1, Y3, Y4, X2	B1	P1
34	O2	支保工調整	墨出し工	0.9507	1.9014	4	2	B1, B4, H1, Y3, Y4, X2	B2	C2
35	O3	溶接・外床ネット取り付け	鍛冶工	1.3878	2.6021	4	2	B1, B4, H1, Y3, Y4, X2	B3	B3
36	C1	上階柱PC揚重・取付・測量	筋工	1.6364	3	4	3	B1, B2, B3, B4, I1, I2, I3, O1, O2, O3	O1, O2, O3, T1	S2
37	C2	上階柱PC揚重・取付・測量	墨出し工	0.841	1.6819	4	3	B1, B2, B3, B4, I1, I2, I3, O1, O2, O3	O1, O2, O3, T2	B2
38	C3	柱グラウト材注入	土工	0.8412	1.6824	5	3	C1, C2		C1, C2, B4
39	Z1	柱・梁仕口型枠取付	型枠大工	1.9856	3.7229	5	3	B1, B2, B3, B4, H1, C1, C2, C3	C3, Y2	C1, C2, C3, I2
40	V1	Vコンクリート打設	土工	0.8949	1.7898	5	4	M1, M2, M3, H1, Q1, Q2, C3, Z1	Q1, Q2	Q1, Q2, C3
41	H2	Hコンクリート打設	土工	1.4287	2.8574	5	4	V1, I1, I2, R1, P1, P2, A1, A2, E1	A1, A2, V1	E1, V1
42	H3	床均し	左官工	3.4	7.4595	5	6	V1, H2	V1, H2, I3	Q2
43	Q3	清掃・片付け・次日段取り	土工	1.2843	2.5685	5	3	V1, H2	V1, H2	Q1, Q2
44	E2	F V型枠取り外し	型枠大工	0.0978	0.1833	6	1	E1, H2	E1	E1
45	Z2	下階梁・仕口型枠脱型	型枠大工	0.6822	1.2792	6	2	Z1, V1, H2	E2	E2
46	Z3	下階梁・仕口型枠移動	型枠大工	0.28	0.525	6	2	Z2	Z2	Z2
47	Y5	下階支保工解体・移動準備	筋工	0.1141	0.2093	6	3	B3, Y3, Y4, I1, I2, O1, O2, V1, H2	S2	B1
48	Y6	下階支保工解体・移動準備	型枠大工	0.8289	1.5542	6	4	B3, Y3, Y4, I1, I2, O1, O2, V1, H2	Z3, S2	V1, H2, Z1
49	Y7	志保プレート外し（アングル）	土工	0.0528	0.1056	6	3	Y5, Y6	Y5, Y6, Q3	Y5, Q3
50	Y8	志保プレート移動	土工	0.0532	0.1065	6	3	Y7	Y7	Y7

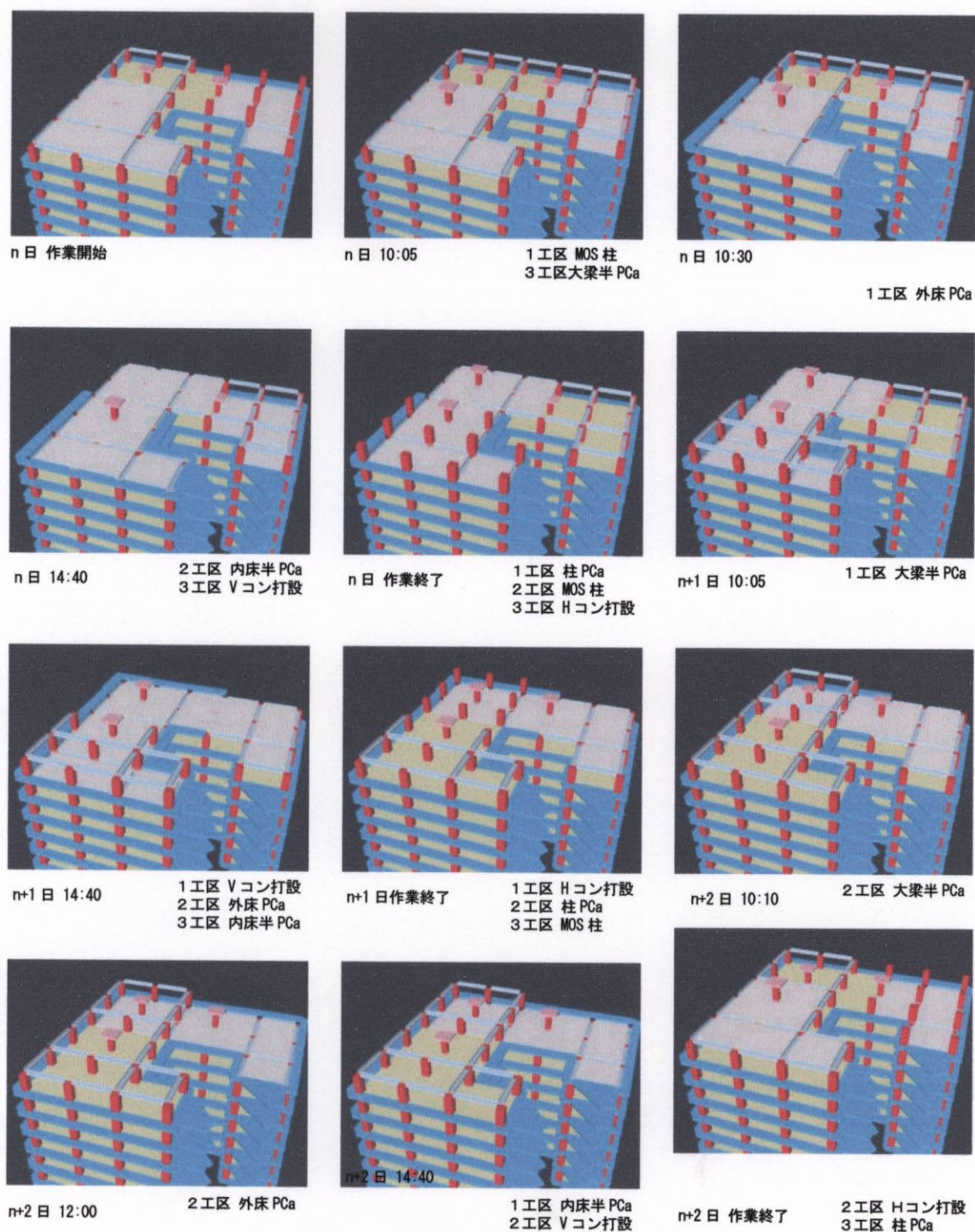


図 9-4 水平 3 工区分割のアニメーション

A) 水平 3 工区分割

基準階を三工区に分割し、そこに 6 つのジョブ工区を割付けたものである。タイムモジュールは 8 時間で、3 日で 1 フloor 持ち上がる形になっている。先行するジョブ工区 1 が新たに作業を開始するには作業床として下階内床の半 PCa 材が事前に揚重、取付けされている必要がある。ジョブ工区 1 の下は常にジョブ工区 4 になるので、内床半 PCa の揚重をそれに先行するジョブ工区 3 に設定している。

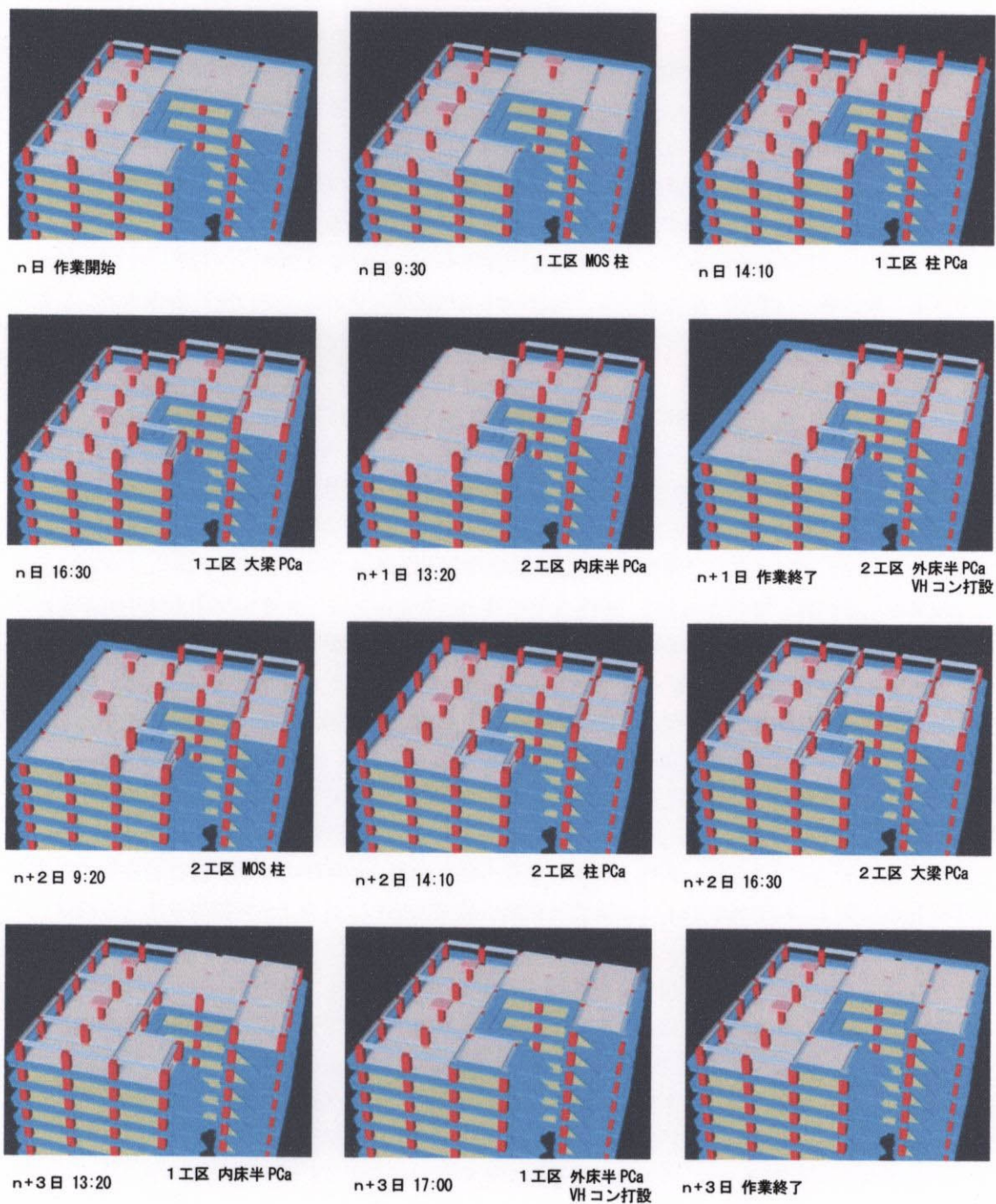


図 9-5 水平 3 工区分割のアニメーション

B) 水平 2 工区分割

この事例では基準階を 2 分割しているが、1 6 時間タイムモジュールのため、4 日で 1 フloor 持ち上がるように計画されている。A と同じ理由で内床半 PCa の揚重はジョブ工区 2 に設定されている。また、A よりジョブ工区分割数が少なく、多少の手待ちが発生するため、職人の数に若干余裕を持たせた。

分析

同一の躯体全体構法・部分構工法から、工区分割数、投入資源水準、タイムモジュールの異なる二通りの多工区分割同期化工程の解を導くことができたが、全体がタイムモジュール内おさまるようスムーズに解を導くには I F M による工程計算過程における④ジョブ工区の割り当てにおいての作業時間の長い工程要素の取り扱い、⑥同期化における作業順序の検討において手待ちのないようにインターフェイスを追加するなど、「操作」の部分に「慣れ」や「経験」が必要である。また、ジョブ工区の分割数が少ないほど作業間のインターフェイスが多数存在し、同期化の解を導くことが困難であった。これらの問題点については、より簡単な「操作」で解を導けるような改善の余地があると思われる。

9. 4 部分構工法の選択組合せを変えた 4 次元構工法モデリング

9. 4. 1 計画の目的と内容

筆者らは、建物の最終出来形から生産設計・計画者の能動的な意思と蓄積されたデータに基づいて構工法計画のシミュレーションを行うことを、4 次元構工法モデリングと呼んでいる。そのためのツールとして、3 次元 C A D と単工区基準工程から多工区同期化工法の工程（プロセス）を導き出すことができるインターフェイス・マトリクス（I F M）を組み合わせ用いる。3 次元 C A D は最終出来形（以後これを「建物基本モデル」と呼ぶ）をそれぞれある空間的領域を占める部分構法に分割するのに用いる。一方 I F M は、領域分割される以前の部分構法クラス間のインターフェイスによって定義される単工区基準工程から多工区分割同期化後の部分構工法を要素とする工程を導き出すのに使われる。これにより、プロダクト（建物）を一定の条件化でプロセス（工程）に展開すること、また逆に望ましいプロセスにふさわしいプロダクトの分割を検討すること、という双方向のインタラクティブな構工法計画が可能となる。部分工法、部分構法はいずれも構工法計画の結果生成される部分構工法の異なる属性の組を表すもので、構法（プロダクト）と工法（プロセス）を独立した計画要素としたり、工法を構法の属性と捉えることはできない、とするのが筆者等の主張である。

3 次元モデルのプロダクトデータに事前に計画した時間情報を組み込むことによりアニメーションを作るという事例は、これまでも様々な研究で報告されているが、そのためには構法と工法とが 1 対 1 に対応するという前提が必要で、柔軟性がなく非現実的である。

昨年の報告（注）の段階では、建物基本モデルからの部分構法クラスへの分割が同一であっても異なった工区分割を行えば、異なった工程（すなわちプロセス）がもたらされることを示した（注：I F M による多工区分割同期化工程の導出は完全同期化（各職種の 100% 稼働という条件化でのラインバランシング）を出発点としているため、工程の解は複数存在する。このことから、工区分割数に拠らず同一プロダクト・モデルからさまざまなプロセスが導かれることは明らかなのであるが、前報ではプロダクトの属性からプロセスが一意的に決定されるわけでないことを例示するために、工区分割の問題を扱った。詳細については文献（注：セミナー論文）を参照されたい）。本論文ではこれを一歩進めて、同一の建物基本モデルからさまざまに分節された部分構法クラスの定義と領域分割（工区・部材分割）が生成され得ること、またこの分割が構工法計画として一体に行われるのに応じてさまざまな工程（プロセス定義）がもたらされることを示す。4 次元構工法モデリングという用語は、このようにプロセス、プロダクトを統合した動的なモデリング手法の特性を表現したものである。

9. 4. 2 対象物件

今回対象とした建物は、現在埼玉県さいたま市に建設中の高層集合住宅住棟の躯体である。基準階住戸数は23戸で、実際の躯体工事は、本論文で扱った事例Bと同じく、施工速度6戸／日、4サイト工区分割で計画・実施されている。

9. 4. 3 3次元CADによる部分構工法モデル（基準階構工法プロダクト・モデル）の作成

図面に示された基準階躯体に任意の部分構工法を選択し、工程計画を行うことになるが、その際に各部分構法・部材の形状、ボリュームなどのプロダクトデータを取得するために、三次元ソリッドモデラー（Auto CAD）を用いて、躯体（建物基本）モデルを個々の部分構法・部材に再定義できるようにする。

Step 1：図面をもとに、対象となる建物の3次元ソリッドの基準階建物基本モデルを作成する。床、柱、梁などの部材をそれぞれ寸法通りに作成、配置した後に和の集合演算を用いることで、重複の無い一体の建物形状を作成することができる。これにより、基準階の躯体ボリューム（＝施工量）を求めることが可能となる。

Step 2：設定された条件（資源・工費・工期等）を満たす可能性のありそうな構工法を仮定する。今回は比較検討のために表9-3の部分構法・部材分割に対応する2種類の構工法計画を用意した。事例Aでは標準的なMOS-DOC工法に基づいた構工法計画を、例Bでは実際に採用されることになった構工法計画に近い案を取り上げている。

表 9-3 2つの基準階構工法と工程要素の諸元

事例 A					事例 B				
ID	コード	工程要素名	職種	時間	ID	コード	工程要素名	職種	時間
1	START	START			1	START	START		0.00
2	Y1	1墨出	墨出工	3.80	2	X1	1墨出し	墨出工	3.73
3	Y2	1柱地組鉄筋揚重取付	筋工	0.57	3	D1	1デッキプレート地組	筋工	1.26
4	Y3	1柱地組鉄筋揚重取付	鉄筋工	0.36	4	D2	1デッキプレート地組	鉄筋工	0.59
5	Y4	2B B型枠揚重取付	型枠大工	1.71	5	Z1	1下階支保工解体・移動準備	型枠大工	0.37
6	G1	2B B型枠揚重取付	筋工	0.59	6	Z2	1下階支保工解体・移動準備	筋工	0.04
7	B1	2梁支保工組立	筋工	0.10	7	Z3	1下階仕口型枠脱型	型枠大工	1.20
8	B2	2梁P C揚重取付	筋工	0.96	8	I1	1下階躯体補修	左官工	1.23
9	V1	2Vコン打設	土工	2.66	9	Y1	1床支保工設置	型枠大工	0.71
10	V2	2Vコン養生	土工	0.07	10	Y2	1床支保工設置	墨出工	1.58
11	G2	3BB型枠脱型	型枠大工	0.52	11	O1	1外床揚重・設置	筋工	0.07
12	G3	3BB型枠移動	型枠大工	0.52	12	I2	2内床半PCa揚重取付	型枠大工	0.28
13	G4	3BB型枠清掃・ケレン	型枠大工	1.04	13	I3	2内床半PCa揚重取付	筋工	0.28
14	R1	3上階廊下支保工組立	筋工	0.04	14	I4	2デッキプレート敷込	筋工	0.19
15	R2	3上階廊下P C揚重取付	筋工	0.61	15	I5	2デッキプレート敷込	型枠大工	0.13
16	R3	3上階廊下P C揚重取付	型枠大工	1.51	16	P1	2地組鉄筋揚重取付	筋工	0.12
17	T1	4上々階PC階段揚重・取付	筋工	0.73	17	P2	2地組鉄筋揚重取付	鉄筋工	0.10
18	T2	4上々階PC階段揚重・取付	鉄骨工	0.77	18	K1	2雑壁PC a	筋工	0.55
19	T3	4上々階PC階段ボルト本締め	鉄骨工	0.23	19	L1	2先行揚重材	筋工	0.27
20	T4	4上々階PC階段溶接	鍛冶工	1.50	20	W1	2妻壁PC a	筋工	0.55
21	T5	4階段手摺・足場取付	墨出工	0.58	21	R1	2スラブ配筋	鉄筋工	5.50
22	F1	4内床支保工組立	筋工	1.98	22	M1	2埋設配管取付	設備工	0.03
23	F2	5内床揚重敷込み	筋工	0.25	23	M2	3止型枠取付	型枠大工	0.05
24	M1	5埋設配管取付	設備工	0.01	24	B2	3梁設置（バルコニー）	筋工	0.48
25	F3	5上階内床配筋	鉄筋工	4.98	25	S1	3S-MOS	筋工	0.14
26	W1	5止型枠取付	型枠大工	0.04	26	T1	3上階階段設置	筋工	0.68
27	W2	5止型枠取付	鍛冶工	0.05	27	C1	3柱設置	筋工	1.22
28	K1	6上階戸境壁鉄筋揚重取付	鉄筋工	0.67	28	C2	3柱継手モルタル充填	土工	1.13
29	A1	6ALC壁揚重立ち上げPC	土工	1.19	29	W2	3戸境壁設置	筋工	0.39
30	H1	6Hコン打設	土工	2.43	30	B3	3梁支保工設置	型枠大工	0.25
31	H2	6Hコン養生	土工		31	B4	3梁設置（廊下）	筋工	0.58
32	END	END			32	B6	3梁継手充填	土工	0.61
					33	Z4	4仕口型枠取付	型枠大工	3.49
					34	Q1	4コンクリート段取	土工	2.38
					35	Q2	4コンクリート段取	左官工	2.50
					36	H1	4Hコン打設	土工	2.42
					37	END	END		0.00

事例BではVH分離による2回のコンクリート打設を行っているのに対し、例Bでは、垂直構成材にPCa部材を採用することにより、1フロアあたりのコンクリートの打設をHコンの1回のみとしている。

Step 2 から Step 5 にいたる段階では工区分割がなされていないため、構工法モデル（構工法計画のアウトプット）は未完である。

Step 3：一体になった3次元ソリッドの基準階建物基本モデルを構工法計画に基づく部材形状に切り分ける。採用する部分構法により、部材の形状が異なるので、それに見合った形状に基本モデルを切り分け、各部材を定義していく。例Aでは、外床がフルPCa、柱、戸境壁が現場打ち、梁がハーフPCaで、内床にはオムニア板を使用している。例Bでは、柱、外床、戸境壁がフルPCa、梁がハーフPCa、内床にはオムニア板とデッキプレートを用いている。

このように、建物基本モデルをそれぞれの部分構法に切り分け、再定義することにより、特定の構工法プロダクトモデルに対応した各部分構法・部材の形状、ボリュームなどのプロダクトデータを得ることができる。

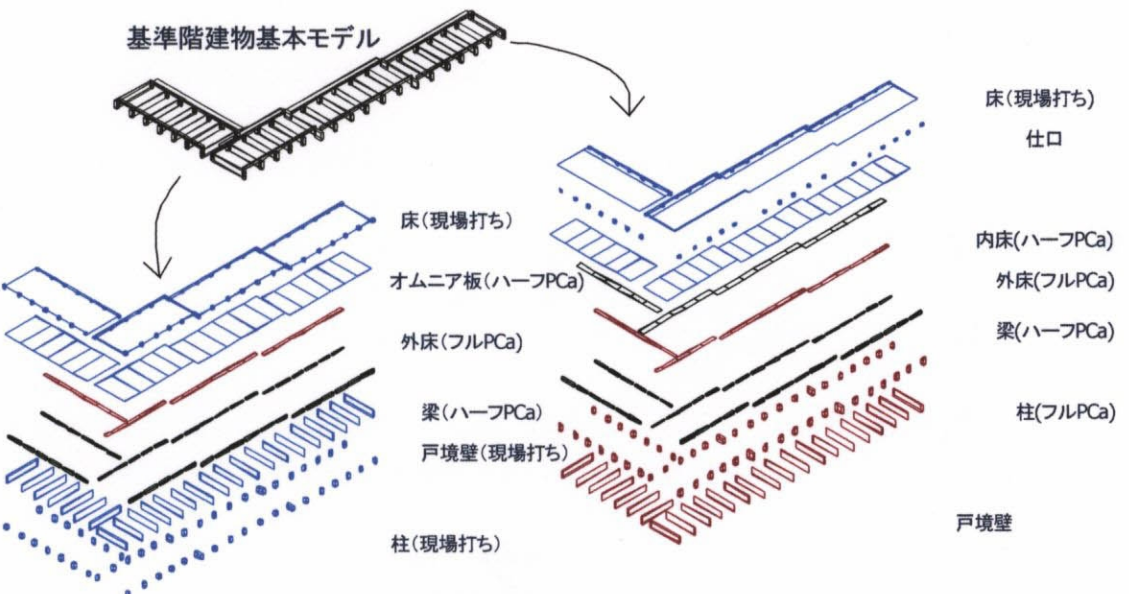


図 9-6 基準階建物基本モデルの部分構法・部材への切り分け

9. 4. 4 IFMによる工程計算

Step 4：Step 3の構工法プロダクトモデルの各部分構法はまた部分工法の単位でもあり、プロセス（工程）を構成する工程要素に対応する。工程要素の施工量（部分構法のボリューム）はプロダクトモデルの属性として与えられている。別事例での実績などから得られた歩掛りデータと仮定されたサイクル工期に基づき（同一職種（作業チーム）が担当する工程要素の基準階当たり所要作業時間の合計がサイクル工期と合致するように）、職種別労務資源水準（人数）を定める。本モデリング手法は完全同期化（各作業チームが常時フル稼働している状態）を前提とするため、労務資源水準は工区分割数・タイムモジュールによらずサイクル工期（～施工速度）によって一意的に定めら

れる（注：投入労務資源水準に制約があるときは、逆に、サイクル工期は労務資源水準によって一意的に決まるということができる。「サイクル工期＝タイムモジュール×サイト工区分割数」であるから、タイムモジュールが所与であればこのときサイト工区分割数が一意的に決まるということになる。Step6 参照）。

Step5：部分構法間のインターフェイスより各工程要素の前後関係を決める。インターフェイスの冗長性は識別できるので、直接先行ではない工程要素もすべて挙げる。この時点で、工程要素とその作業時間、先行後続関係が求められたので、IFMによる工程計画が可能になる。

Step6：工区分割数を決める。すなわち、工程要素の分節を示すジョブ工区とサイト工区の分割数を決める。ジョブ工区については、一般に、分割数が多いほど工区間のインターフェイスが消滅するので、同期化が容易になる。ただし、あまり多すぎると職人の工区間の移動が煩雑になってしまい、かえって効率が悪くなることに留意する。

Step7：サイト工区分割の決定手順は、計画条件が工期制約的であるか資源制約的であるかによって異なる。

資源制約的な場合、投入資源水準からまずサイクル工期（～施工速度（戸／日））が決まり、タイムモジュールが1日であればサイクル工期の日数によってサイト工区分割数が与えられる。資源水準が低く制約されていれば一般に工区分割数は多くなり、同期化の必要上分割されたジョブ工区が同一サイト工区の上下階に重なることは起こりにくい。

工期制約的な場合には、所要工期とタイムモジュールからサイト工区分割数が決まり、これに見合うように資源水準が決められる。工期短縮が要求される場合、サイト工区分割数は少なくなりがちである一方、大勢の作業チームの同時作業と同期化を可能にするためにジョブ工区分割数を多くすることが必要となるため、同一サイト工区の上下階に異なるジョブ工区が重なることがおこりやすい。

基準階平面をサイト工区に分割することは、Step4 で決まった基準階の施工量、所要作業時間から、1 タイムモジュール（注：この場合、例 A、例 B とも1日）当たり（＝1 サイト工区当たり）の施工量に対する各工程要素の所要時間を確定することに相当する。ひとつの構工法モデルの諸元はこの段階で一応の確定を見る。

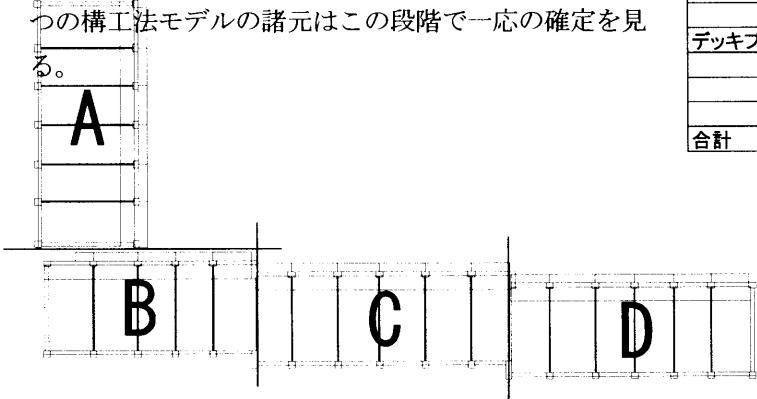


表 9-3 基準階躯体体積内訳

	事例A	事例B
現場打コンクリート	417	434
デッキプレート	0	76.4
ベランダ側仕口	0	15.6
ベランダ側梁	83	83
外床Pca(廊下側)	48.4	48.7
ベランダ側柱	60.6	79.5
戸境壁	309.5	309.5
床Pca	181.5	29.2
仕口(廊下側)		22.9
柱(廊下側)	63.2	63.3
梁Pca(廊下側)	48.6	48.6
合計	1211	1211

表 9-4 基準階面積内訳

		事例A	事例B
内床Pca(㎡)	A	584	89.7
	B	550	77.1
	C	572	95.9
	D	536	91.5
外床Pca(㎡)	A	55.6	55.6
	B	40.6	40.6
	C	58.3	58.3
	D	54.3	54.3
デッキプレート(㎡)	A	—	512
	B	—	407
	C	—	496
	D	—	473
合計		2451	2451

表 9-5 その他資材量

Vコン(m)	411
戸境壁枚数(P)	25
梁(廊下側:P)	23
梁(ベランダ側:P)	23
	46
ベランダ側柱Pca(P)	23
	2
廊下側柱	25

図 9-7 基準階平面図

事例 A

この事例では、MOS-DOC 工法の実績に基づいて 1 日 2 住戸の施工速度を仮定し、12 サイト工区分割という工程計画を採用した。ジョブ工区分割数を多くしても同一サイト工区の上下階でジョブ工区が重なることはないので、VH に分離された 2 回のコンクリート打設を 1 日の作業工程の最後とし、作業時間の長い工程要素（墨出、内床配筋、階段設置）が最初に来るように、ジョブ工区を 6 分割した。

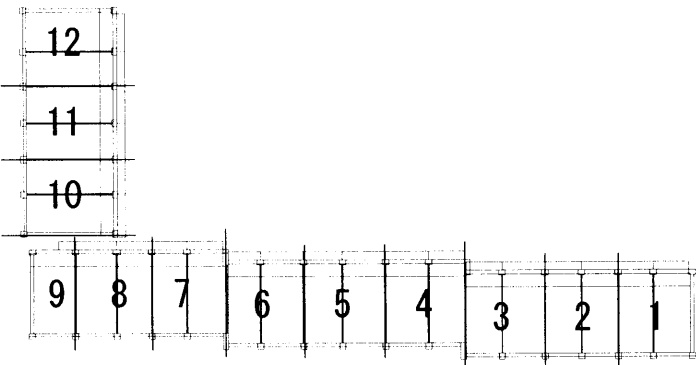


図 9-8 事例 A におけるサイト工区分割

表 9-6 初期入力の基準工程 IFM（事例 A）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	STAF	Y1	Y2	Y3	Y4	G1	B1	B2	V1	V2	G2	G3	G4	R1	R2	R3	T1	T2	T3	T4	T5	F1	F2	M1	F3	W1	W2	K1	A1	H1	H2	END
1	STAF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	Y1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	Y2				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	Y3				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	Y4				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	G1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	B1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	B2							1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	V1								1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	V2									1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	G2										1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	G3											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	G4													1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	R1														1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	R2															1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	R3																1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	T1																	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	T2																		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	T3																			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	T4																				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	T5																					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	F1																						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	F2																							1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	M1																								1	1	1	1	1	1	1	1
25	F3																									1	1	1	1	1	1	1
26	W1																										1	1	1	1	1	1
27	W2																											1	1	1	1	1
28	K1																												1	1	1	1
29	A1																													1	1	1
30	H1																														1	1
31	H2																															1
32	END																															

表 9-7 工区分割後のインターフェイス（事例 A）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	STAF	Y1	Y2	Y3	Y4	G1	G2	G3	G4	R1	R2	R3	R4	T1	T2	T3	T4	T5	F1	F2	M1	M2	W1	W2	K1	A1	H1	H2	END			
1	STAF	1	1	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
2	Y1		1	1	1																3											3
3	Y2			1	1																											1
4	Y3				1																											1
5	Y4					1	1	3	3	3																						3
6	G1						1	1	3	3	3																					3
7	R1							1	1																							3
8	R2								1	1																						1
9	V1									1	1																					3
10	V2										1	1																				3
11	G2											1	1	3		1																3
12	G3												1	1																		3
13	G4													1																		3
14	R1														1	1	1															3
15	R2															1	1															1
16	R3																1															1
17	T1																	1	1	3	3	1										3
18	T2																		1	1	3	3										3
19	T3																			1	1	3										3
20	T4																				1	1										3
21	T5																					1										1
22	F1																					1										1
23	F2																						1	1	1	3	3					3
24	M1																							1	1	1						3
25	F3																								1	1	1					3
26	W1																									1						1
27	W2																										1					1
28	K1																											1	1	3	3	3
29	A1																												1	1	3	3
30	H1																													1	1	3
31	H2																															1
32	END																															1

事例 B

この事例は、高速施工を目標としたものである。基準階は4サイト工区（6戸／サイト工区）に分割され、タイムモジュールは1日、サイクル工期は4日に設定されている。また、上下階での作業間にインターフェイスが生じないように、ジョブ工区もサイト工区と同じ4工区分割としている。

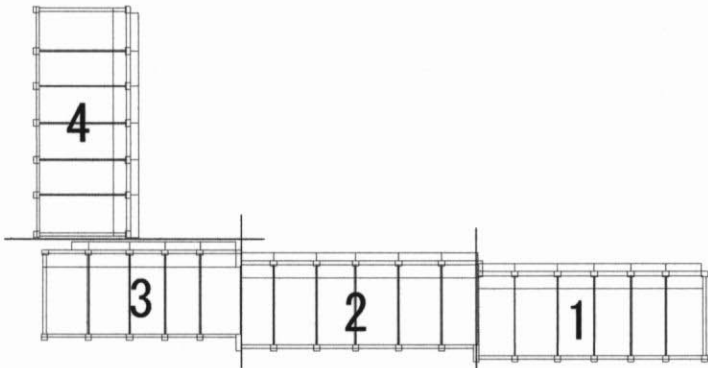


図 9-9 事例 B におけるサイト工区分割

表 9-8 初期入力の基本工程 IFM（事例 B）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
	STA	X1	D1	D2	Z1	Z2	Z3	I1	Y1	Y2	O1	I2	I3	I4	I5	P1	P2	K1	L1	W1	R1	M1	M2	B2	S1	T1	C1	C2	W2	B3	B4	B6	Z4	G1	G2	H1	END	
1	STA	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3
2	X1		1										1	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3			3	3	3	3	3	3	3	3			1	3
3	D1			1																																		1
4	D2				1																																	1
5	S1					1																																1
6	Z2						1																															1
7	Z3							1																														1
8	I1								1																													1
9	Y1									1		1	1	1	3	3	3	3				3	3	3			1	3	3	3	3	3	3	3	3		3	
10	Y2										1	1	1	1	3	3	3	3				3	3	3			1	3	3	3	3	3	3	3	3		3	
11	O1											1																										1
12	I2												1	1	1	3	3					3	3	3			3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	
13	I3													1	1	1	3	3				3	3	3			3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	
14	I4														1	1						1	3	3			3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	
15	I5															1	1	1				1	3	3			3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	
16	P1																1																				1	
17	P2																	1																			1	
18	K1																			1																	1	
19	L1																				1																1	
20	W1																					1															1	
21	R1																						1	1	1												3	
22	M1																							1				1	3	3	3	3	3	3	3		3	
23	M2																								1												3	
24	B2																									1			1	3	3	3	3	3	3		3	
25	S1																										1										1	
26	T1																											1									1	
27	C1																												1								1	
28	C2																													1	1	3	3	3	3		3	
29	W2																														1		1	3	3		3	
30	B3																															1	1	3	3		3	
31	B4																																1				1	
32	B6													</																								

表 9-9 工区分割後のインターフェイス（事例 B）

No.	ID	コード	工程要素名	職種	工区	時間	EST	EFT	バーチャート
1	1	START	START				0.00	0.00	
2	2	Y1	1墨出	墨出工	1	3.80	0.00	3.80	IIIIIIII-----
31	3	Y2	1柱地組鉄筋揚重取付	筋工	1	0.57	5.65	6.22	II--
14	4	Y3	1柱地組鉄筋揚重取付	鉄筋工	1	0.36	5.65	6.01	I---
5	5	Y4	2B B型枠揚重取付	型枠大工	2	1.71	0.25	1.96	IIII
6	6	G1	2B B型枠揚重取付	筋工	2	0.59	0.25	0.84	II---
16	9	V1	2Vコン打設	土工	2	2.66	1.96	4.62	IIIIII
23	7	B1	2梁支保工組立	筋工	2	0.10	4.19	4.28	I---
26	8	B2	2梁P C揚重取付	筋工	2	0.96	4.28	5.25	II---
20	10	V2	2Vコン養生	土工	2	0.07	4.62	4.69	I
9	14	R1	3上階廊下支保工組立	筋工	3	0.04	0.84	0.88	I---
8	11	G2	3BB型枠脱型	型枠大工	3	0.52	1.96	2.48	II----
18	16	R3	3上階廊下P C揚重取付	型枠大工	3	1.51	2.48	3.99	IIII----
17	15	R2	3上階廊下P C揚重取付	筋工	3	0.61	3.58	4.19	II----
21	12	G3	3BB型枠移動	型枠大工	3	0.52	3.99	4.51	II----
24	13	G4	3BB型枠清掃・ケレン	型枠大工	3	1.04	4.51	5.55	IIII----
11	17	T1	4上々階PC階段揚重・取付	筋工	4	0.73	0.88	1.61	II---
12	18	T2	4上々階PC階段揚重・取付	鉄骨工	4	0.77	0.88	1.65	II-----
15	22	F1	4内床支保工組立	筋工	4	1.98	1.61	3.58	IIII---
19	19	T3	4上々階PC階段ボルト本締め	鉄骨工	4	0.23	1.65	1.88	I-----
22	20	T4	4上々階PC階段溶接	鍛冶工	4	1.50	1.88	3.38	IIII-----
27	21	T5	4階段手摺・足場取付	墨出工	4	0.58	3.80	4.39	II-----
3	23	F2	5内床（オムニア）揚重敷込	筋工	5	0.25	0.00	0.25	I
10	25	F3	5上階内床配筋	鉄筋工	5	4.98	0.67	5.65	IIIIIIIIII--
13	24	M1	5埋設配管取付	設備工	5	0.01	5.65	5.66	I---
30	26	W1	5止型枠取付	型枠大工	5	0.04	5.66	5.70	I---
29	27	W2	5止型枠取付	鍛冶工	5	0.05	5.66	5.71	I---
4	28	K1	6上階戸境壁鉄筋揚重取付	鉄筋工	6	0.67	0.00	0.67	II-
7	29	A1	6ALC壁楊重立ち上げPC	土工	6	1.19	0.67	1.85	III-
25	30	H1	6Hコン打設	土工	6	2.43	4.69	7.12	IIIIII
28	31	H2	6Hコン養生	土工	6		7.12	7.12	
		H3	床均し	左官工	6				
32	32	END	END				7.12	7.12	
					合計				

表 9-11 I F Mによって求められた工程の解（事例B）

No.	ID	コード	工程要素名	職種	工区	時間	EST	EFT	バーチャート
1	1	START	START			0.00	0.00	0.00	-
2	2	X1	1 墨出し	墨出工	1	3.73	0.00	3.73	IIIIIIII-----
3	5	Z1	1 下階支保工解体・移動準備	型枠大工	1	0.37	0.00	0.37	I-
4	6	Z2	1 下階支保工解体・移動準備	筋工	1	0.04	0.00	0.04	I-
5	8	I1	1 下階躯体補修	左官工	1	1.23	0.00	1.23	III----
11	3	D1	1 デッキプレート地組	筋工	1	1.26	0.65	1.91	III-
12	4	D2	1 デッキプレート地組	鉄筋工	1	0.59	0.65	1.24	II----
18	7	Z3	1 下階仕口型枠脱型	型枠大工	1	1.20	5.78	6.98	III
23	9	Y1	1 床支保工設置	型枠大工	1	0.71	6.98	7.69	II--
24	10	Y2	1 床支保工設置	墨出工	1	1.58	6.98	8.56	IIII
36	11	O1	1 外床揚重・設置	筋工	1	0.07	8.56	8.63	I
7	12	I2	2 内床半PCa揚重取付	型枠大工	2	0.28	0.37	0.65	I---
9	13	I3	2 内床半PCa揚重取付	筋工	2	0.28	0.37	0.65	I-
13	14	I4	2 デッキプレート敷込	筋工	2	0.19	1.91	2.10	I--
14	15	I5	2 デッキプレート敷込	型枠大工	2	0.13	1.91	2.03	I-
16	16	P1	2 地組鉄筋揚重取付	筋工	2	0.12	2.10	2.22	I---
19	17	P2	2 地組鉄筋揚重取付	鉄筋工	2	0.10	2.10	2.20	I--
22	21	R1	2 スラブ配筋	鉄筋工	2	5.50	2.20	7.69	IIIIIIIIII--
21	18	K1	2 雑壁PC a	筋工	2	0.55	3.44	3.99	II---
25	20	W1	2 妻壁PC a	筋工	2	0.55	3.99	4.54	II---
31	19	L1	2 先行揚重材	筋工	2	0.27	5.83	6.10	I---
26	22	M1	2 埋設配管取付	設備工	2	0.03	7.69	7.72	I--
10	23	M2	3 止型枠取付	型枠大工	3	0.05	0.65	0.70	I---
20	27	C1	3 柱設置	筋工	3	1.22	2.22	3.44	III---
27	28	C2	3 柱継手モルタル充填	土工	3	1.13	3.44	4.57	III---
28	24	B2	3 梁設置（バルコニー）	筋工	3	0.48	4.54	5.01	I---
29	26	T1	3 上階階段設置	筋工	3	0.68	5.01	5.70	II---
17	30	B3	3 梁支保工設置	型枠大工	3	0.25	5.53	5.78	I-
30	25	S1	3 S-MOS	筋工	3	0.14	5.70	5.83	I---
33	29	W2	3 戸境壁設置	筋工	3	0.39	6.10	6.49	I---
34	31	B4	3 梁設置（廊下）	筋工	3	0.58	6.49	7.07	II---
35	32	B6	3 梁継手充填	土工	3	0.61	7.95	8.56	II-
6	34	Q1	4 コンクリート段取	土工	4	2.38	0.00	2.38	IIII-----
8	35	Q2	4 コンクリート段取	左官工	4	2.50	1.23	3.73	IIIIII-----
15	33	Z4	4 仕口型枠取付	型枠大工	4	3.49	2.03	5.53	IIIIII-
32	36	H1	4 Hコン打設	土工	4	2.42	5.53	7.95	IIII-
			床均し	左官工	4				
37	37	END	END			0.00	8.63	8.63	
				合計					

3 Dアニメーションの作成

Step 9：以上の手順を経て導いた工程計画をもとに3 DCGソフト（3 D S t u d i o）を用い

て工程アニメーションを作成する。まず、3Dソフトに3DCADで作成した基準階の形状を読み込む。次に、IFMによって求めた工程計画をもとに、3D空間上にオブジェクトを表示していくことによって工程アニメーションを作成する。

工程をアニメーション化することにより、実際に作業の流れをビジュアルに見ることができ、第三者への伝達を容易に行うことができる。またここで、工区間、上下フロアでの作業の取り合いをチェックし、問題があればインターフェイスを調整して解決する。

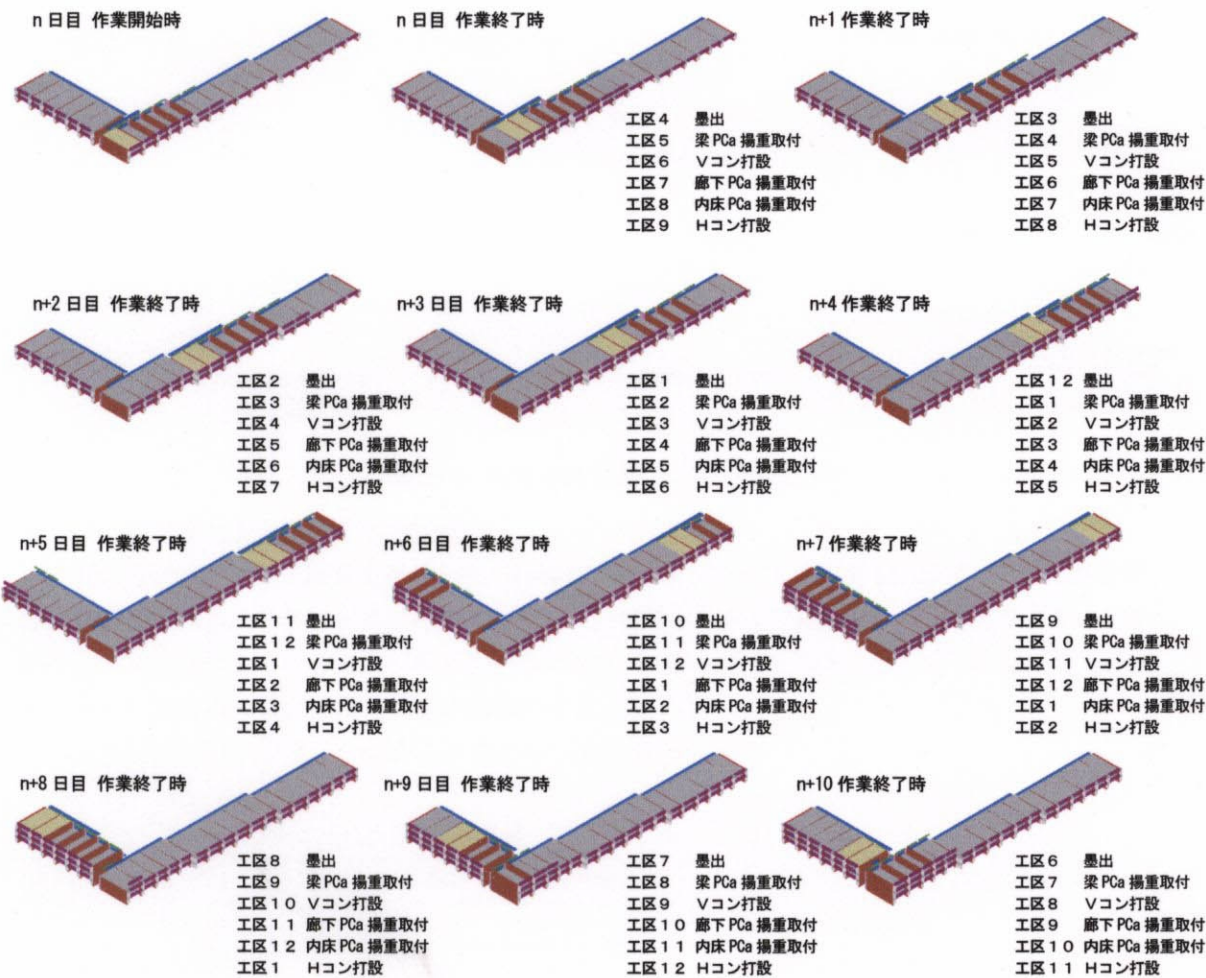


図 9-10 事例 A の工程アニメーション

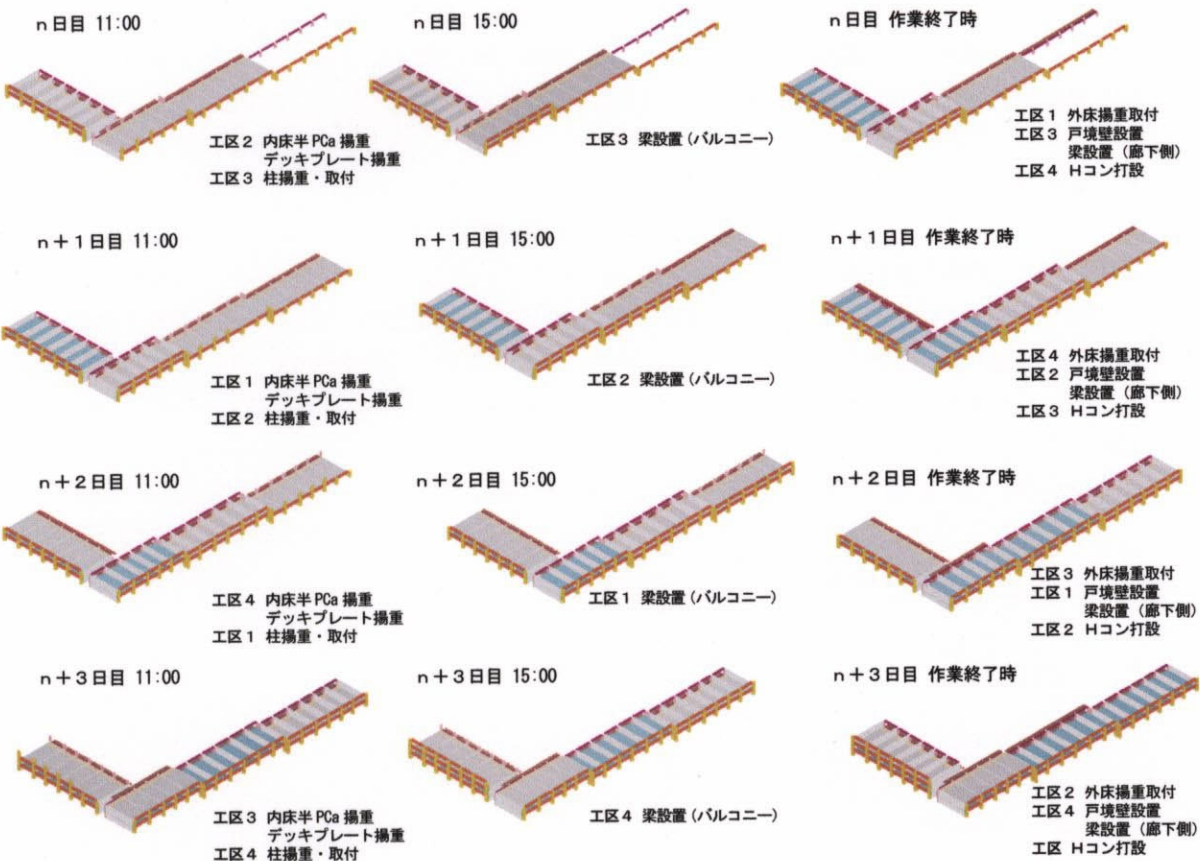


図 9-11 事例Bの工程アニメーション

9. 4. 5 構工法全体モデルの評価

構工法計画の結果を評価することは、計画のアウトプットとしての構工法モデルの属性値を評価することである。評価のクライテリアとしては、工期、コスト、資源水準等が考えられる。計画のインプットを変えたいくつかの構工法モデルから、計画の目標と条件に応じてこれらクライテリアをもっとも有効に満足するものを評価選択することになる。

今回検討の対象とした二つの構工法モデルの属性値をに示す。

表 9-12 構工法モデルの属性の比較評価

構工法モデル	事例 A	事例 B
サイクル工期 (a)	12 日	4 日
1 日当り労務資源水準 (b)	26 人	60 人
基準階当り労務資源水準 (a × b)	312 人日	240 人日

工期に関しては、事例BはAの 1/3 となっている。1 日当りの労務資源水準は事例AがBの 43%と各段に少ないが、基準階を施工するのに必要な労務資源水準を比べると逆に事例Bの方がAより約 25%少なくなっている。これらのことから、事例 A は工期、労務コスト、仮設資機材の調達コストといったクライテリアからすれば評価が高く、事例 B は労務資源の上限に制約があるときに評価が高い構工法モデルである、ということが出来る。

9. 4. 6 基本設計・生産設計とプロダクトモデル

以上の比較に示されるように、4次元構工法モデリングは同一の建物基本モデルからさまざまな構工法モデルを生成することを可能とし、それらの属性による総合的な評価を可能とする意味で生産設計上きわめて有効である。

最後に、建物基本モデルと構工法モデルのプロダクトモデルとしての異同を含め、4次元構工法モデリングにおける基本設計と生産設計の意味合いを整理しておきたい。

図9-12は繰返し型の工程を持つ構工法モデルを導く場合の「基本設計」と「生産設計」の関係を示したものである。基本設計の段階では、物的制作目標をあらわすものとしての建物基本モデルは、構想（基本設計）時の意味的分節（入力時の3次元オブジェクトのクラス構造やその属性値）はどうかであれ、現実には造られる一体の建物の最終出来型としてまとめられる、という考え方を示している。すなわち、鉄筋やコンクリート等の本設資材の物性やそれらが占める空間的領域・位置は確定しているが、それは生産設計段階での任意の部分構工法の割付けによっていかようにでも分節が再定義されるというものである。

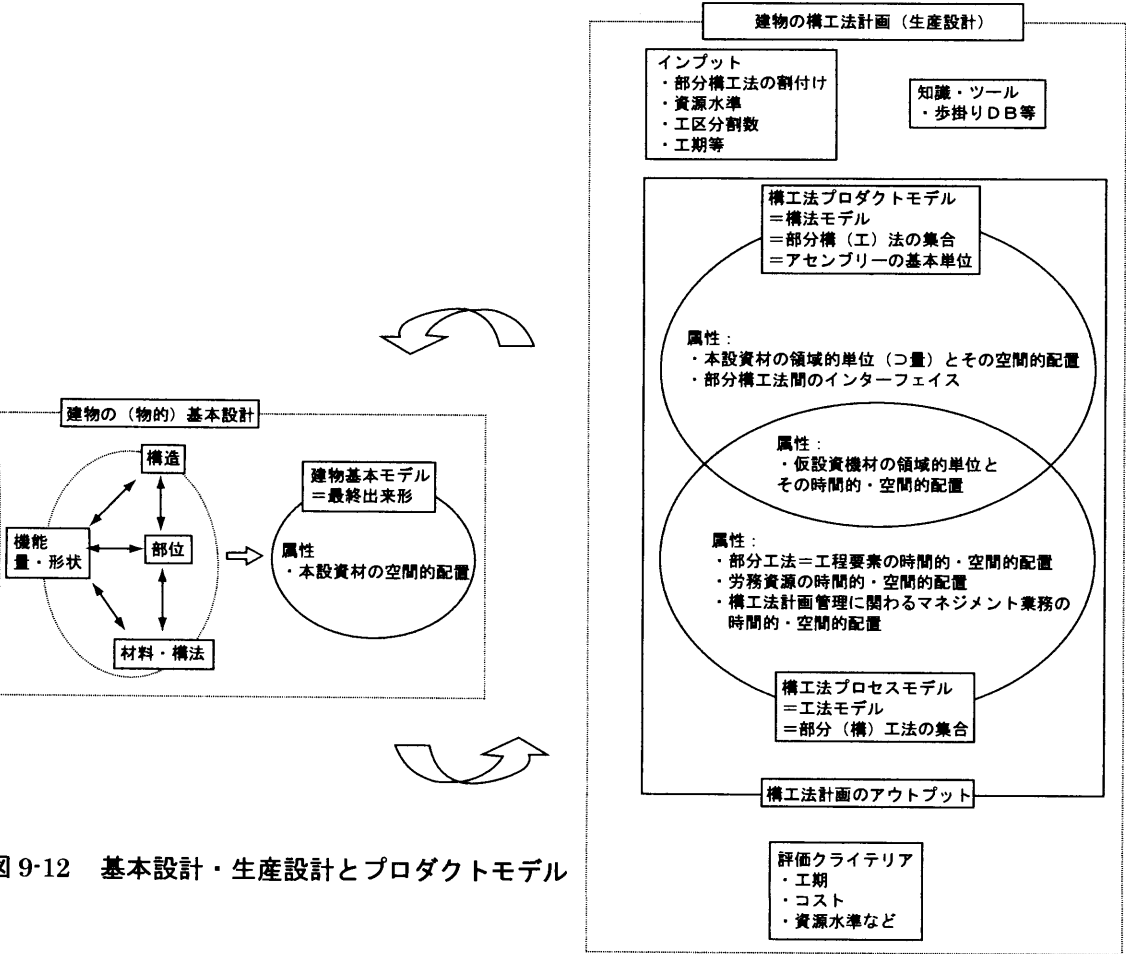


図 9-12 基本設計・生産設計とプロダクトモデル

構工法計画（生産設計）の結果得られた構工法モデルの物的側面（＝構工法プロダクトモデル）と建物基本モデルのいずれも広い意味でのプロダクトモデルであるが、生産（施工）プロセスと有効に関連付けられたプロダクトを指してプロダクトモデルというのであれば、前者のみがそれにふさわしいということになる。

はじめに記したように、基本設計時にアプリオリに分節されたオブジェクト群としてのプロダクトモデルの存在を前提し、その属性としてプロセスを導出するような方法では、ここに示したような多様な構工法モデルは生成され得ない。建物基本モデルから新たに意味と領域の再定義がなされた構工法モデルの物的側面がプロダクトモデルでなければならないのである。現実には、基本設計は生産設計を反映していることも多いから、構工法モデルに近い内容をすでに有していると考えなければならない。しかし、その場合でも、生産設計をさらに有効に行おうとするのであれば、最終出来形としての建物基本モデルを措定しておくべきなのである。

9. 5 本章の結論

【成果】

- * プロダクト・モデリング、プロセス・モデリングを同一の構工法計画の異なるアспектとしてとらえ、両者を双方向的・統合的に取扱うことのできる構工法モデリング手法を開発した
- * 具体的には、3次元で定義された建物基本モデルから、計画者の意図する意味分節にしたがって部分構法（3次元オブジェクト群としての構工法プロダクト・モデル）を切りだし、その属性をIFMによるプロセス・モデリングの変数として利用する手法を完成させた
- * このような構工法モデリングにより、同一の建物基本モデルから、完全同期化条件を満たす多様な構工法計画が生成されるようになり、そのパフォーマンス（工期、投入資源水準等）によって目的に応じた構工法計画策定が可能であることを示した
- * また、数理的に導かれた構工法計画の結果をアニメ表示して可視化する（4次元構工法モデリング）を完成させた
- * 「割付け」型の構工法計画においては、基本設計に相当する建物基本モデルは本来の意味でのプロダクト・モデルとは言えず、生産設計（構工法計画）による部分構工法の割付けが適用されてはじめてプロセス・モデルと連動するプロダクト・モデルが定義されうることを示した

【第9章に関する主要既発表論文・講演】

- ・フラットスラブ構法における工法選択（その1）－工事計画段階における部位工法選択のプロセス（1991）
- ・フラットスラブ構法における工法選択（その2）－部位工法選択のシステム化（1991）
- ・構工法計画モデルにおける「部分」の記述法について（1993）
- ・3次元プロダクトモデルにもとづいた構工法計画の生成（2001）
- ・4次元構工法モデリング手法を用いた多工区同期化構工法計画（2002）

i IFM中の縦横のベクトルに本設構成材は1回のみ現れるが、仮設は組立、解体・撤去の2度現れる。

ii 文献1。

iii その意味でこの手法は最適化手法ではなく、さまざまな最適解を生成する手法であるといえる。

iv この段階ではまだ工区分割も同期化も行われていないので、各作業チーム間には手持ちが存在する。

v 例えば、クレーンを用いる作業は薫工、クレーン・オペレーターとの組作業になる。

vi 言換えると、基準階工程のジョブ工区への分割は各ジョブ工区の工期がタイムモジュール内に納まっているという条件を満たせば任意の工区数、分割位置で行ってよい。このとき、水平工区（サイト工区）分割数をモードとした垂直の工区の重ね合わせが起こっているということになる。

第 10 章 結論

10. 1 本研究の成果

*本論文は「もの」(＝構成材)と「こと」(＝工程要素)を同等に扱うことにより、構法、工法を一体的に扱うことのできる構工法計画の理論と手法をまとめたものである。

*この計画理論・手法の基礎は、構成材／工程要素のインターフェイスによって定義されるインターフェイス・マトリクス (IFM) にある

*本論文では、まず、IFM を工程計画手法に展開し、次いでそれらを用いて多工区同期化工程を持つ繰返し型の複合化構工法の構工法計画手法に発展させた

*最後に、この手法を 3 次元 CAD による部分構法分割・定義法と組み合わせ、統合的な構工法計画手法として完成させた

*成果の内容を各章別に示す

【定義部分】

第 2 章 IFM による構法」と「工法」の一体化の実現

アロー型とフロー型ダイアグラムの長所を兼ね備えた行列の提示

【IFM による工程計画手法の開発】

第 3 章 IFM によるトポロジカル・オーダリング手法の提示

ダミーを排し、冗長性を許容することによって関係構造を保存

第 4 章 IFM によるサブシステム化の手法開発およびその応用

「職種」を変数として付加

第 5 章 IFM による工期／工程算出法の開発

「作業時間」を変数として付加

IFM による最早日程行列、クリティカル・パスなどの導出

【多工区同期化構工法計画の理論化・手法化】

第 6 章 ジョブ工区による基準階工程の分節とサイト工区への割付け法

「施工量」, 「施工能率」, 「資源水準」を変数として新たに付加

完全同期化条件の定立と、最適解探索によらぬライン・バランシングの解法

第 7 章 IFM を時間の関数に拡張する手法の開発

リアルタイムの工程計画管理手法への応用

第 8 章 工区間のインターフェイスをサイト工区分割数のモードとして取り扱う手法

多様な工区分割法を取り混ぜた多工区同期化工程の作成法

【部分構法の割付けによる構工法モデリング手法の開発】

第 9 章 3 次元 CAD と IFM による工程演算を組合わせた 4 次元構工法モデリング手法

建物基本モデルから任意の部分構法の組み合わせを得る手法

モデリング手法からみた基本設計と生産設計の明確化

10. 2 本研究の意味

本研究の意味は大きく次の4点にあると考える。

第一は、「構法」と「工法」が不可分のものであり、したがって構工法という一体的な取扱いが必要なのだという認識を、構工法計画の理論と手法に具体化し得たという点である。

第二は、多くの作業チームの同時作業を可能にするための多工区同期化法について、完全同期化条件を明らかにしそれを前提とする手法を開発したことによって、分割された工区の資源平準化問題が最適化問題ではなく、多様な解が存在しうることを、またその解を導く方法を提示し得たという点である。

第三は、基本設計をもとにした生産設計の手順を構工法計画としてあきらかにすることにより、生産設計、基本設計の位置付けを明らかにする基礎を築いた点である。

第四は、設計・計画において、計画者による対象の意味分節が可能であることを手法として明らかにした点にある。計画対象の構成要素はア・プリオリに存在しているのではない。部分と全体との対応は一通りではなく、全体は一意的に部分に分解されない。意味による部分の分節を随意に組み替えることなくして創造的な活動は成し得ない。著者が本研究を通じてもっとも大きな目標としていたのはこのことを明示的な理論、あるいは手法として示すことにあった。

創造的な行為は建築をつくるプロセスの全過程にわたって存在する。その際、「部分を積み上げる」ことではなく「構想としての部分を割り付ける」ことが必要であるが、それは実践の場では日常的に起こっていることである。本研究の成果は、理論と実践のかけはしのいくばくかを築き得たと考える。