

高層集合住宅の内装工事における多工区同期化の工程計画手法

Synchronized Multi-site Scheduling for Interior Finish Work of High-rise Condominium Buildings

志手 一哉 Kazuya Shide*1 田澤 周平 Shuhei Tazawa*2

梗概

高層集合住宅における内装工事の工期短縮を目的に、従来躯体工事で研究が進められてきた多工区同期化を内装工事に適用するための手法を開発した。これはクリティカルパスに関連する工程要素を最短となるように分節し、それ以外の工程要素を先の分節と並行進捗することで、工期と遅延リスクの双方を考慮した多工区同期化の工程を計算するものである。本稿ではその理論を述べ、提案手法を用いてサイクル工期と作業空間の分割であるサイト工区および繰り返しの単位時間であるタイムモジュールの関係を考察する。本提案手法を実装した多工区同期化検討ツールを開発し、実施検証を進めている。

キーワード：多工区同期化計画, インターフェイス・マトリクス, リソース競合

Summary

The state of the art of interior finish work, including services, of high-rise condominium buildings is far from being well planned and controlled because of the numerous components/activities and complicated interfacial relationship among them. The authors have attempted to apply the synchronized multi-site scheduling method using the interface matrix (IFM) developed by the authors to deduce possible optimum scheduling solution under fully synchronized condition (100% operating rate). A new method developed and employed in this paper is the further application of IFM to output resource- conflict-free scheduling. Our solution to a sample project shows the possibility of fully modularizing interior finish work while enabling full operating rate within much shorter time.

Keywords: synchronized multi-site scheduling, interface matrix, resource conflict

1 はじめに

高層集合住宅の内装工事は「1フロアを6日ピッチで上がる」というように、繰り返し単位の作業空間であるサイト工区と繰り返しの単位時間であるタイムモジュールの方針が示される。そしてFig.1に示すイメージのように、住戸の完成に必要な一連の作業を分節した作業群であるジョブ工区がタイムモジュール毎にサイト工区を順次移動するように割り付けられた工程が計画される。しかし発注単位が資材や機能に従うため、施工チーム間における作業の順序関係は複雑になる。また、担当する複数の作業が異なるジョブ工区に割り付けられた施工チームには、それらを同時刻に施工できないリソース競合¹⁾が生じやすい。そのため、適度なバッファを見込んだ大括りな纏まりで1フロア単位で進捗するようなタクト的な工程を計画するのが一般的だ

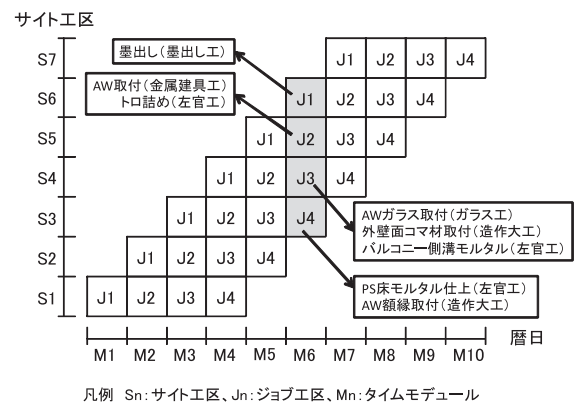


Fig.1 内装工事における工程計画のイメージ
Image of process planning for interior finish work

*1 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

*2 技術研究所 研究員 博士(工学) Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

が、実際にはタクトに倣うわけでも同時に進捗するわけでもないところに問題がある^{2), 3)}。

本稿では、躯体工事同様に水平工区分割し、実施レベルに細分化した作業の順序に矛盾が無く、ジョブ工区が同期化して進捗する「多工区同期化」の工程を高層集合住宅の内装工事で計画する手法について述べる。この手法は、クリティカルパスを中心とした工程を最短で、それ以外をこの分節に対して並行進捗できるようにジョブ工区を作り込むことで、工期とリソース競合リスクのバランスが取れ、施工チームの稼働率が高い工程を数理的に導き出すものである。現在は、いくつかの初期条件を入力するだけでジョブ工区毎の日時スケジュールを出力できる多工区同期化検討ツールを開発し、実施検証を進めている。

2 多工区同期化

2.1 多工区同期化とは

多工区同期化とは水平多工区分割した作業空間を作業群であるジョブ工区が同期して進捗する工法である⁴⁾。躯体工事の場合はタイムモジュールを1日とし、サイクル工期、水平工区分割数、ジョブ工区数を共に等しくすれば、技能者が工区を移動しながら同じ作業を毎日繰り返す計画となる⁵⁾。他社におけるこの事例として、躯体工事のDOC (one Day One Cycle) 工法がある。DOC工法は、水平方向に細かく分割したサイト工区を移動しながら施工チームが毎日同じ作業を繰り返し、1サイト工区/1日の速度で躯体が完成する工法である⁶⁾。

多工区同期化のメリットは、技能者の稼働率が向上することと工程の並行化による工期短縮の2点にある⁷⁾。反面、作業密度が上がるため、工程間、工区間、施工チーム間で作業上の取り合い（インターフェイス）が多くなり検討が複雑になる。そこで安藤、浦江らは、IFMと呼ぶ行列を用いて多工区同期化におけるジョブ工区分節の検討を支援する数理的演算方法を提示した⁸⁾。IFMとは、 n 個の構成材や作業（以下、工程要素と呼ぶ）に対応した $(n \times n)$ 型の行列で、 i 行目に取り合う j 列目の交点 ($i \neq j$)、および構成材や工程要素自身である対角要素 ($i = j$) にインターフェイス (IF)、すなわち「1」を記述したものである。このように建物の“ありよう”を形式化することで、工程要素間の関係や順序関係の性質を数理的に求められ、ジョブ工区分節の客観的な検討が可能となる。

2.2 内装工事への多工区同期化適用

集合住宅の内装工事に多工区同期化を適用したイメージをFig.2に示す。Aは、集合住宅の一般的な工程計画をあらわしており、水平2工区分割した躯体工事と水平1工区が1の内装工事が共に1工区/6日の施工速度で進捗する。これに対してBは、躯体工事と同様に内装工事を水平2工区分割した場合をあらわしている。Bはサイト工区の施工量がAの1/2となるため、Aと同じ投入資源水準でも1/2のタイムモジュール、すなわち1工区/3日の速度で施工でき、その差分である3日×ジョブ工区数の分だけ内装工事のサイクル工期が短縮する計算となる。

現実には、部屋請けなど専門工事会社と技能者間に契約上の制約から1人当たりの施工量が変わらない工程要素があり、この理屈通りに1サイクルの工期を短縮できるわけではない。しかし、躯体工事と内装工事の水平工区を同じように細分化することで全体工期を短縮できる可能性をFig.2から想定できる。

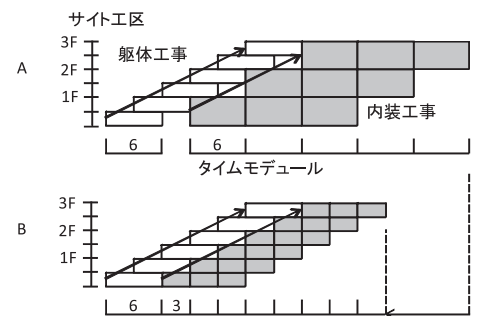


Fig.2 内装工事における多工区同期化のイメージ
Image of synchronized multi-site scheduling
for interior finish work

2.3 内装工事における多工区同期化適用の問題点

タクトによる同期化は、サイト工区の作業時間を等しくしてこれを連続的に繰り返すことで施工チームの手待ちを無くすように一連の工程要素を分節し、施工チームが進捗に合わせてサイト工区を移動すると考える。一方、多工区同期化は、施工チームがジョブ工区間を移動しながら担当する工程要素を施工し、作業時間の合計をタイムモジュールに近づけることで稼働率が向上すると考える。このような同期化を完全同期化と呼ぶ。しかし、高層集合住宅の内装工事は1住戸当たりの所要時間が短い工程要素が多い、複数の工程要素を掛け持ちする施工チームが多い、サイクル工程を構成する工程要素数が多いといった特徴があるため、完全同期化を前提とした多工区同期化において次に述べる相克した2つの問題がある。

- ①サイクル工期を最短とするには各工程要素の最早終了時刻がタイムモジュール以下となるようにサイクル工程

を分節した集合をジョブ工区とすれば良い。しかし、ジョブ工区内で工程要素間のIFが多くなるため、リソース競合が生じる可能性が高くなる。

②一方、リソース競合を排除するには全ての工程要素を並行進捗できるようにサイクル工程を分節した集合をジョブ工区とすれば良い。しかし、サイクル工程のクリティカルパスを構成する工程要素のジョブ工区内における余裕時間が必要以上に長くなり、仕掛在庫状態の住戸が目立つ間延びした工程となる。

現実的な解として、これらの中間に位置するバランスの取れた工程が求められると考える。そこで本稿では、クリティカルパスに関連する工程要素を最短となるように分節し、それ以外の工程要素を先の分節と並行進捗できるバランス型のジョブ工区を作り込む多工区同期化の工程計画を導出する手法を開発した。

3 バランス型ジョブ工区による多工区同期化の工程計画手法

3.1 IFMの作成

本稿で提示する高層集合住宅の内装工事における多工区同期化の検討手順をFig.3に示す。

計画した工程の精度は、実施レベルと同時粒度に細分した工程要素に漏れが無いこと、IFMに記述した工程要素同士のIFの正確さの2点に依存する。工程要素は技能者が入れ替わる、或いは他の作業が着手できるタイミングと定義することで構成材の支持関係に基づく工程要素間のIFを正確に記述できる。

工程要素同士の順序関係は、後続の工程要素Bが先行の工程要素AにIFを持つ(A←B)と考える。下の定義に基づいて、住戸の構成に必要な全ての工程要素間でIFを決定し、IFMを作成する。

- 構成材間の直接的な取合いによって決まるIF
- 構成材に付随する作業によって定義されるIF
- 作業箇所へのアクセスによって定義されるIF
- 躯体工事の進捗などに関係付けられるIF
- 検査・試験に関連付けられるIF

また、LGSか木軸か、壁先行か床先行かなど、設計や工事計画で選択した構工法に対応してIFMは変わる。例えば、工程要素のIFが変わる、部材分割が変わる、発注・調達区分が変わる、構成材の集約などが考えられる⁸⁾。

3.2 完全同期化条件の検討

全工程要素に対し、数量と施工歩掛り或いは1住戸当たりの所要時間、それを担当する施工チームを設定すれば次の手順で完全同期化条件を満たす投入資源水準を仮定できる。1日の作業時間をH、作業 c_i の1住戸当たりの所要時間を t_i とすれば、その作業に必要な人工 $n_i = t_i/H$ となる。また、基準階住戸数をRn、サイト工区分割数をSnとすれば、サイト工区における c_i の人工 $wn_i = n_i \times Rn/Sn$ (少数点第1位切り上げ)となる。作業はタイムモジュールMn日以内での完了が前提なので、施工チームpの人数 Wp_i は、pが担当する作業の wn_i/Mn の最大値以上で仮定される…(1)式。 Wp_i に全工期一定という仮定を置けば、pが担当する c_i のサイト工区における所要時間 tp_i は(2)式であらわされる。ここで、pにおける tp_i の合計がタイムモジュールの時間換算値以下とする(3)式が完全同期化条件となり、それを満たさない施工チームは増員やチーム編成を再検討する。また、施工チームの稼働率は、 $\sum tp_i[p]/(Mn \times H) \times 100(\%)$ で評価できる。

$$Wp_i \geq \text{MAX} \{wn_i[p]/Mn\} \quad \dots (1)$$

$$tp_i = (wn_i \times H)/Wp_i \quad \dots (2)$$

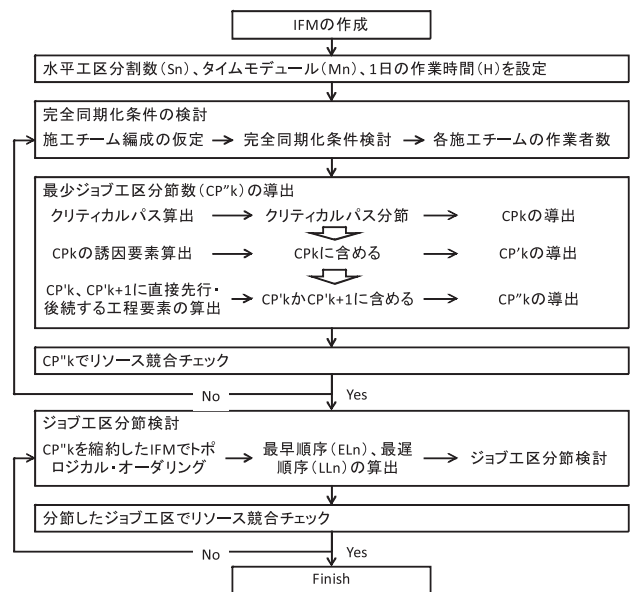


Fig.3 多工区同期化の工程計画検討手順
Study of synchronized multi-site scheduling planning step

$$\sum tp_i[p] \leq (Mn \times H) \quad \dots (3)$$

3.3 最少ジョブ工区分節数 (CP^{''}_k) の導出

3.3.1 クリティカルパスの分節

内装工事と躯体工事を合わせた工期を短縮するには内装工事のサイクル工期短縮、つまりジョブ工区分節数を少なくすることが有効である。理論上最少の分節数は、クリティカルパスを中心とした検討で導出される。以下に、Fig.4に示す工程要素の順序関係をグラフ表現した簡単なモデルを用い、最少ジョブ工区分節数の導出法を示す。

ここに、基準階サイクル工程における全工程要素の集合をC、工程要素をc_i、クリティカルパス集合をCP、その構成要素をcp_iとすれば、 $C = \{c_i\}$ 、 $CP = \{cp_i\}$ 、 $CP \subseteq C$ とあらわされる。IFMとtp_iからCP (Fig.4中の1~9) を算出でき、最早終了時刻EF_tで $\text{Max} \{EF_t \in CP\} \leq (Mn \times H)$ となる分節をCP_kとする (Fig.4の実線囲み)。

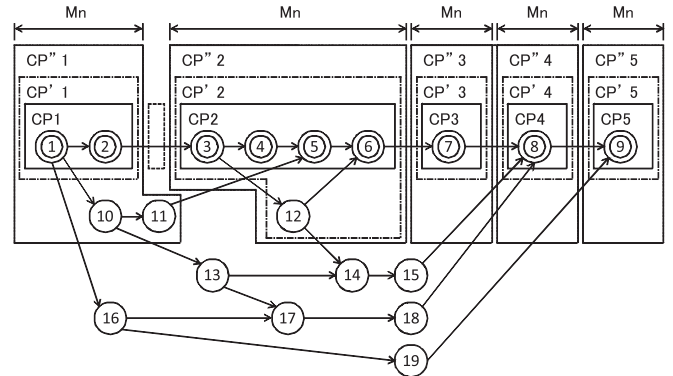


Fig.4 工程要素の関係
Conceptual model of relationship of the tasks

3.3.2 クリティカルパス分節 (CP_k) の誘因要素

$\{c_i\} \in CP$ で、 $\{cp_i\} \in CP_k$ に先行かつ後続のIFを持つ工程要素の集合 (12) は、その先行要素と後続要素の間で施工される。このような工程要素をCP_kの誘引要素集合I(CP_k)と呼ぶことにする。I(CP_k)の先行要素集合をP(CP_k)、後続要素集合をS(CP_k)とすれば、それらの共通部分を、 $I(CP_k) = P(CP_k) \cap S(CP_k)$ と定式化でき、Fig.4の一点鎖線に含まれる工程要素集合CP'_kは、 $CP'_k = CP_k \cup \{I(CP_k)\}$ であらわされる。

3.3.3 CP'_k, CP'_{k+1}に直接先行・後続する工程要素

隣接する2つのCP'_k (CP'_k, CP'_{k+1})とあらわせば、 $\{c_i \in CP'_k\}$ に後続し、 $\{c_i \in CP'_{k+1}\}$ に先行する工程要素の集合 (10, 11) は、 $I(CP'_k, CP'_{k+1}) = S(CP'_k) \cap P(CP'_{k+1})$ で同定される。これらはCP'_kにおける自由後続、CP'_{k+1}における自由先行要素であり、 $\text{Max} \{EF_t \in CP'_k\} \leq (Mn \times H)$ 、或いは $\text{Max} \{EF_t \in CP'_{k+1}\} \leq (Mn \times H)$ の条件を満たす限りでCP'_kもしくはCP'_{k+1}と同じジョブ工区、その条件を満たさない場合はFig.4の破線四角の如くCP'_kとCP'_{k+1}の間で施工される。CP'_k或いはCP'_{k+1}にI(CP'_k, CP'_{k+1})を加えながら $S(CP'_k) \cap P(CP'_{k+1}) = \phi$ となるまで演算を繰り返す、演算が終了した状態のCP'_kをCP''_kとする (Fig.4の点線囲み)。

CP''_kは施工チーム編成や設計を変更しない限り削減できないため、その数を仮定資源水準下における理論上最少のジョブ工区分節数と同定できる。なお、CP''_kに含まれない工程要素 $\{c_i \in CP''_k\}$ はIFを持たないCP''_kが1つ以上存在する。

3.4 ジョブ工区分節検討

3.4.1 最早順序 (ELn), 最遅順序 (LLn) の算出

CP''_kをIFMの部分行列として縮約すれば、Fig.4のグラフはFig.5の如く表現される (以下、CP''_kを縮約した要素をcp''_kとする)。ジョブ工区分節はcp''_kと $\{c_i \in CP''_k\}$ の組み合わせを検討することになる。

CP''_kを縮約したIFMの到達可能行列R'とその転置行列R''を用いたトポロジカル・オーダリング^(注1)の演算から、レベル (Ln) と呼ぶ平行要素の組が求められ、R'のオーダリングで最早順序のレベル (ELn)、R''のオーダリングで最遅順序のレベル (LLn) を得る。Table 1は、Fig.5に基づいて作成したIFMによるトポロジカル・オーダリングの演算結果である。

ELn = LLnでその値が同じ要素の集合は互いにIFを持たないため平行要素の関係である (Table 1の $\{13, cp''_2, 16\}$, $\{14, 17\}$, $\{15, 18\}$)。また、ある要素aとbの関係において、 $ELn(a) \leq ELn(b) \wedge LLn(b) \leq LLn(a)$ の場合、両者の間にIFが存在せず、これらは平行要素の関係にある ($\{14, 17, cp''_3\}$, $\{15, 18, cp''_3\}$, $\{cp''_3, 19\}$, $\{cp''_4,$

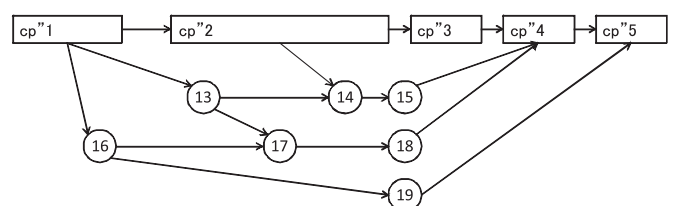


Fig.5 Fig.4の縮約グラフ
Contraction graph of Fig.4

Table 1 Fig.5に対するトポロジカル・オーダリングの結果
Results of topological ordering in Fig.5

ID	CP"1	13	CP"2	16	14	17	CP"3	15	18	CP"4	19	CP"5
ELn	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	3	6
LLn	1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6
ELn-LLn	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0

19)。つまり、 $ELn \neq LLn$ の $\{c_i \in CP_k\}$ は、 $ELn = LLn$ の $\{cp_k\}$ に対して $ELn(c_i) \leq Ln(cp_k) \leq LLn(c_i)$ であれば当該 cp_k に対する平行要素である ($\{cp_k, 19\}$)。上記以外、例えば $ELn(a) \geq ELn(b) \wedge LLn(b) \geq LLn(a)$ の組み合わせ ($\{cp_2, 14, 17\}$)、 $ELn = LLn$ の要素における n と $n+1$ 間 ($\{14, 18\}$) 等の順序関係はレベル値で同定できないため、 CP_k を縮約したIFMの到達可能行列を用いた誘引要素や平行要素の判定に依らざるを得ない^{注2)}。但し、 cp_k と cp_{k+1} の間におけるIFの存在は保証されており、 cp_k に与えられた $ELn \sim LLn$ の値がトポロジカル・オーダリングで得られる Ln の値を網羅するのは自明である。

3.4.2 ジョブ工区分節の検討

CP_k はクリティカルパスを中心とした、相互にインターフェイスを持つ工程要素を Mn で分節した部分集合である。そのため、全ての工程要素を完全並行とした場合と比較して CP_k 自身に短工期の性質があり、 CP_k に起因するリソース競合の可能性が残されている。このことから $\text{Max } \{Ln\}$ をジョブ工区分節数とし、 $ELn = LLn$ の要素に対する平行要素を割り付けたジョブ工区分節は、ある程度短工期である程度リスク回避的なストラテジーと解釈できる。一方、更なる工期短縮を図る場合は、次に示す検討手順となる。

- 1) cp_k と $ELn = LLn$ の $\{c_i \in CP_k\}$ でジョブ工区分節数は任意に決定される。ジョブ工区数 L 、サイクル工期 T 、タイムモジュール Mn の間には、 $T = Mn \times L$ の関係が成り立つため、 $\text{Max } \{Ln\}$ をジョブ工区分節数の初期解とし、 $ELn \neq LLn$ の cp_k に対して、 $ELn \leq Ln(cp_k) \leq LLn$ となる $ELn = LLn$ の $\{c_i \in CP_k\}$ を平行要素として割り付け直せば、ジョブ工区分節数を最少値に近づけることができる。
- 2) 決定したジョブ工区分節数で $\{cp_k\}$ と $ELn = LLn$ の $\{c_i \in CP_k\}$ を割り付けたジョブ工区 J_k に対し、未割当の要素である工程要素の内、 $ELn(\{c_i \in CP_k\}) \leq ELn\{J_k\} \wedge LLn\{J_k\} \leq LLn(\{c_i \in CP_k\})$ 、つまり J_k に割り付け済みの要素に対する平行要素を当該ジョブ工区に割り付ける。この際、同一ジョブ工区に割り付けた要素の ELn 或いは LLn が全て同じであればそれらは平行要素の関係にある。そうでない要素同士はIFが存在する可能性があるため、リソース競合および $\text{Max } \{EFt_i \in J_k\} \leq (Mn \times H)$ の条件に注意する必要がある。
- 3) 上のジョブ工区に対し、割付済みの要素と残りの工程要素がなるべく平行要素となるように割り付ける。この検討は、 CP_k を縮約したIFMを用いた誘引要素或いは平行要素の判定に従うことになる。あるジョブ工区に割り付け済みの要素集合における誘引要素はリソース競合および $\text{Max } \{EFt_i \in J_k\} \leq (Mn \times H)$ の条件に注意して当該ジョブ工区に割り付けざるを得ない。平行要素は ELn 或いは LLn が同じである割付済みの $ELn \neq LLn$ の $\{c_i \in CP_k\}$ にIFをもたないが、それ以外の組み合わせにはIFの存在を否定できない。

3.4.3 リソース競合の判定

ジョブ工区の部分行列による工程計算結果を施工チームで集約し、最遅終了時刻 LFt_i と最早開始時刻 EST_i の関係が、 $LFt_i - EST_i < Mn$ 、つまりジョブ工区内で時間拘束がある作業について、最早終了時刻 EFt_i が小さい順から $i = 1, 2, \dots, n$ と表記すれば、施工チームのリソース競合は EFt_i と最遅開始時刻 LSt_i の関係から、 $EFt_i \leq LSt_{i+1} (i > 1 \wedge EST_i < EFt_{i-1} \wedge LSt_i > EFt_{i-1})$ の場合、 $EFt_i = EFt_{i+1} + tp_i$ と定式化できる。その上で、 $LFt_i - EST_i = Mn$ 、つまりジョブ工区内で時間拘束の無い作業は、所要時間 tp_i と時間拘束がある作業の空き時間のまとまりのマッチングでリソース競合を判定できる。

複数作業を担当する施工チームは、時間拘束のある工程要素が1つでもある場合、(3) 式の完全同期化条件を満たしていてもリソース競合が発生する可能性がある。リソース競合の解消は、増員、施工チーム編成変更、構工法や納まりの変更に加え、当該チームの担当作業を割り付けるジョブ工区の変更による拘束時刻の操作が有効な手段となる。

4 実データによる検証

4.1 検討内容と検討条件

内装工事の速度を躯体工事の速度以下とする場合、躯体が1つの工区を施工する日数 \geq 内装が1フロアを施工する日数となる。内装工事における多工区同期化の計画では、その範囲で投入資源水準、施工チームの稼働率、労務工

数、サイクル工期のバランスを評価することになる。そこで、 $S_n \times M_n$ を一定とした場合の投入資源水準、その稼働率、サイクル工期の関係について、実プロジェクトのデータを参考に考察する。

参考としたプロジェクトの概要をTable 2に示す。間仕切壁/天井下地は木軸、壁と床の関係は

壁先行、ガス供給による温水利用の暖房システムの設計である。なお、躯体工事は水平2工区分割で1工区/6日で進捗する計画であった。

Table 2 参考としたプロジェクトの概要
Overview of the project for reference

建設地	東京都内	住戸数	基準階8戸, 全78戸
構造	RC造	住戸面積	50.03m ² ~128.86m ²
基準階住戸数	515.71m ²	平均住戸面積	79.2m ²
住戸フロア数	16階	住戸タイプ	1LDK+S~3LDK

4.2 分析内容

検討する内容は、第1にサイト工区分割数、タイムモジュール、サイクル工期、投入資源の稼働率の関係、第2にそれらと建物規模の関係とした。そこで、 $S_n \times M_n = 6$ となるように、 $S_n : M_n$ が1:6, 2:3, 3:2, 6:1の4ケースを、規模については結果を考察しやすくするために基準階住戸数 R_n が24, 12, 6の3ケースを仮定し、Table 3に示す12ケースの計算結果を比較する。なお、16フロア数全てが80m²/3LDKの住戸だけで構成された基準階と仮定した。

Table 3 検討ケース
Case of study

		$S_n : M_n$			
		1 : 6	2 : 3	3 : 2	6 : 1
基準階住戸数 R_n	24	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
	12	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4
	6	Case3-1	Case3-2	Case3-3	Case3-4

投入資源量は、同一工程要素は1人/1住戸の密度制約を置き、(1)~(3)式でフル稼働を前提に算出する。これは、投入資源一定の仮定である。密度制約を超える場合は、施工チームをグループ分割し、完全同期時の稼働率が高くなるように工程要素を配分する。また、1住戸当たりの歩掛りがタイムモジュールを超える工程要素は、複数のジョブ工区に跨って作業を行うと考える。このように定義したIFM, S_n , M_n , 施工チーム編成の組み合わせにおけるジョブ工区数の最少数 CP_k^* と最多数 Ln を算出する。なお、 CP_k^* を算出した段階でリソース競合が生じている施工チームは、チームをグループ分割して競合を解消し、 CP_k^* と Ln を算出し直した。サイクル工期の最短 $t\text{-min}$ は $CP_k^* \times (M_n \times H)$ 、最長 $t\text{-max}$ は $Ln \times (M_n \times H)$ である。また、労務工数の指標として完全同期時の技能者数を採用した。平均稼働率ORは、完全同期時におけるグループ [g] の稼働率 ($\sum tp_i[g] / (M_n \times H) \times 100\%$) を施工チームで平均し、さらに全施工チームで平均した値である。

4.3 IFMの作成

当該プロジェクトの工事担当者と、住戸の工程要素をリストアップし、それらの順序関係について検討・協議を重ね、約200の工程要素から成るIFMを作成した。その中からバルコニー工事を除く161の工程要素を利用して考察する。Table 4はそれらの工程要素名、担当施工チーム、1住戸当たりの歩掛、IFを持つ工程要素のIDを列記したものである。このように細分した工程要素の歩掛は整備されていないため、平均住戸面積である約80m²/3LDKで歩掛を推定した。また、工程要素の担当施工チームは総合建設業から見て2次レベルの会社とし、46種を仮定した。

4.4 結果と考察

各ケースの計算結果の一覧をTable 5、サイト工区分割数 S_n とサイクル工期（最短） $t\text{-min}$ の関係をFig.6に示す。

サイト工区分割数とサイクル工期の関係は、 $t = A(J_n/S_n)$ の反比例曲線となる。Fig.6に描かれた3つの曲線は、同じサイト工区分割数では規模が大きいケースほどサイクル工期が長く、規模別による差はサイト工区分割数が多いほど少ない。フル稼働の前提では、 $\sum n_i \leq A/S_n \times 1/R_n$ の施工チームは資源量が最少=1人となる。これらのチームが受け持つ工程要素は施工量が多い=サイト工区数が少ないほど、タイムモジュール内の作業時間が長くなる。したがって、歩掛が小さい工程要素がクリティカルパスとなる場合、規模が大きいケースは小さいケースと比較して CP_k^* の分節数が多くなる。つまり、フル稼働の前提では規模が大きいケースは小さいケースと比較して、サイクル工期が長くなる。

一般的な内装仕上工事のサイクル工期は100日付近で計画され、本検討で $S_n = 2$ としたケースに近い。そこで、Case2-1を、Case2-2と同じサイクル工期（最短）=96日（ CP_k^* 数=16）となるように投入資源量を計算すると完全同期時の技能者数は256人、平均稼働率は48.7%となった。つまり同じサイクル工期に多工区同期化を適用するこ

Table 4 検討対象の工程要素 (IFM)
The list of tasks to consider (IFM)

ID	工程要素名	担当施工チーム	歩掛り	先行工程要素ID	ID	工程要素名	担当施工チーム	歩掛り	先行工程要素ID
101	基本・戸境壁墨出し	墨出し工	0.29		182	システム収納組立	システム収納工	0.43	181
102	ALC立ち上りPCブロック	左官工	0.57	101	183	玄関下足入れ組立	システム収納工	0.57	181
103	PS内縦配管	給排水衛生工	0.57	101	184	間仕切壁内電気配線・BOX取付	電気工	1.00	181
104	外壁ALC建込	ALC工	1.00	101, 102	185	間仕切壁内給水給湯配管固定	給排水衛生工	0.14	181
105	間仕切壁芯墨出し	造作大工	0.29	101, 104	186	スプリンクラーヘッド固定	スプリンクラー工	0.57	181
106	AW取付	金属建具工 (AW)	0.57	104	187	点検口検査	衛生サブコン	0.07	181
107	ALC外面コンセント墨出し	電気工	0.14	101, 104	188	分電盤取付 (結線込)	電気工	0.43	183
108	ALC外面コンセント枠取付	電気工	0.21	104	189	情報分電盤取付	電気工	0.14	182, 183
109	ALCダクトコア墨出し	ダクト工	0.29	101, 104	190	ボード張前BOX検査	電気サブコン	0.29	184
110	ALCドレンコア墨出し	空調工	0.14	101, 104	191	システム収納扉取付	システム収納工	0.29	182, 188
111	ALC冷媒コア墨出し	空調工	0.29	101, 104	192	下足入れ扉取付	システム収納工	0.14	188
112	電気：天井・壁墨出し	電気工	0.29	105	193	壁・壁ボード張	ボード工	3.00	147, 165, 182, 184, 185, 186, 187, 190
113	床設備関連墨出し	設備サブコン	0.29	105	194	壁コンセント類穴開け	電気工	0.57	193
114	外壁ALCコア抜き	ALC工	0.14	104, 105, 107, 109, 110, 111	195	天井照明類穴開け	電気工	0.43	193
115	AWトロ詰め	左官工	0.57	106	196	制気口穴開け	ダクト工	0.36	117, 193
116	スプリンクラー墨出し	スプリンクラー工	0.21	105	197	二重床組立前清掃	土工	0.29	193, 195, 196
117	制気口墨出し	ダクト工	0.14	105	198	二重床組立	二重床工	1.00	197
118	温水暖房配管墨出し	ガス工(温水暖房)	0.14	105	199	レンジフード取付	システムキッチン工	0.25	198
119	外壁面コマ材	造作大工	0.57	104, 105, 114	200	洗面化粧台据付	システムキッチン工	0.21	198
120	天井冷媒配管	空調工	0.86	113	201	トイレ手洗カウンター取付	システムキッチン工	0.14	198
121	給湯器下地アングル取付	ガス工(温水暖房)	0.29	113, 114	202	逆梁部カウンター石取付	石工	0.29	198
122	電気墨出し検査	電気サブコン	0.21	112, 113	203	玄関上り框・巾木取付	石工	0.43	198
123	給水・給湯サヤ管取り付け	給排水衛生工	0.07	114	204	吊戸棚取付	システムキッチン工	0.14	199
124	追炊サヤ管取り付け	ガス工(温水暖房)	0.07	114	205	レンジフードダクト接続	ダクト工	0.14	199
125	ガスサヤ管取り付け	給排水衛生工	0.07	114	206	玄関床石張	石工	0.57	191, 192, 203
126	ドレン管サヤ管取り付け	空調工	0.07	114	207	システムキッチン組立て	システムキッチン工	0.21	204
127	AWガラス取付	ガラス工	0.29	115	208	SD枠・扉ダイノックシート張	ダイノックシート工	0.57	203, 206
128	天井内電気配線支持材貼付	電気工	0.29	112, 122	209	風量測定	空調サブコン	0.14	205
129	天井電気配線アンカー打設	電気工	0.21	112, 122	210	キッチン周りSUSパネル張り	造作大工	0.43	207
130	AWガラス、サッシ、ALCシール	シール工	0.57	115, 127	211	システムキッチン内コンセント取付	電気工	0.07	207
131	天井内電気配線	電気工	0.57	128, 129	212	水回り設備類給水給湯管接続	給排水衛生工	0.14	200, 201, 207
132	スプリンクラー配管	スプリンクラー工	0.57	116, 131	213	ガスコンロガス管接続	給排水衛生工	0.07	207
133	AWクロス巻込用下地取付	造作大工	0.43	105, 106, 115, 130	214	SD扉吊込	金属建具工 (SD)	0.07	208
134	AW窓台	造作大工	0.43	105, 106, 115, 130	215	キッチンパネル張り	キッチンパネル工	0.14	210
135	遮音壁保護管	電気工	0.14	105, 112, 122, 131	216	SD金物取付→施錠管理	金属建具工 (SD)	0.21	214
136	電気区画貫通処理	電気工	0.21	131	217	お湯出し試験	衛生サブコン	0.07	212
137	戸境壁下地組立	耐火間仕切工	0.43	101, 103, 104, 105, 135	218	キッチン他天板シール	シール工	0.14	210, 215
138	天井カセットAC吊込	空調工	0.57	113, 132	219	天井・壁パテ処理	クロス工	2.00	194, 202, 203, 204, 210, 215, 216
139	天井ダクト吊込 (UB上部)	ダクト工	0.14	113, 117, 132	220	水回り排水管接続	給排水衛生工	0.21	218
140	HEX吊り込み	ダクト工	0.14	117, 132	221	ディスプレイ取付	ディスプレイ工	0.07	218
141	スプリンクラー目視検査	衛生サブコン	0.14	132	222	天井・壁クロス貼り	クロス工	3.00	219
142	SD枠取付	金属建具工 (SD)	0.29	105, 137	223	システムキッチン排水管接続	給排水衛生工	0.21	221
143	天井ドレン管配管	空調工	0.57	126, 131, 138	224	クローゼットハンガーパイプ取付	造作大工	0.07	222
144	冷媒目視検査	空調サブコン	0.07	120, 138	225	カーテンレール取付	金属工 (雑金物)	0.07	222
145	SD枠巻モルタル詰め	左官工	0.07	142	226	ピクチャレール取付	造作大工	0.07	222
146	インターホン配線	電気工	0.07	131, 142	227	トイレ・洗面タオル掛け取付	金属工 (雑金物)	0.07	222
147	天井カセットACドレン管接続	空調工	0.14	138, 143	228	トイレ鏡取付	鏡工	0.14	222
148	ALCドレン管貫通口処理	空調工	0.07	126, 143	229	コンセントカバー取付	電気工	0.57	222
149	SD枠ロックウール詰め	土工	0.07	137, 142, 146	230	インターホン機器取付	インターホン工	0.29	222
150	ドレン通水・満水試験	空調サブコン	0.43	143, 147	231	煙感知器取付	防火設備工	0.14	222
151	戸境壁ボード張	耐火間仕切工	1.00	127, 130, 137, 142, 146, 149	232	天井照明器具取付	電気工	0.43	222
152	床追炊管敷設	ガス工(温水暖房)	0.14	118, 124, 151	233	スプリンクラーヘッド取付	スプリンクラー工	0.14	222
153	床ガス管敷設	給排水衛生工	0.29	113, 125, 151	234	天井カセットACカバー取付	空調工	0.07	222
154	天井ダクト吊込 (一般部)	ダクト工	0.57	113, 117, 132, 143, 151	235	洗濯パン取付	給排水衛生工	0.21	222
155	床排水管敷設	給排水衛生工	0.57	103, 113, 151	236	壁掛エアコン取付	空調工	0.14	222
156	UB床組立	ユニットバス工	0.29	105, 139, 151	237	スピーカー取付	放送設備工	0.07	222
157	床給水給湯管敷設	給排水衛生工	0.29	113, 123, 151, 153	238	リモコン取付	ガス工(温水暖房)	0.07	173, 215, 222
158	UB壁組立	ユニットバス工	0.71	156	239	制気口取付	ダクト工	0.43	196, 222
159	UB排水管接続	給排水衛生工	0.07	155, 156	240	WD枠ケーシング取り付け	造作大工	0.43	181, 222
160	給湯機設置・配管類接続	ガス工(温水暖房)	0.14	121, 152, 153	241	UB内器具取付, シール	ガス工(温水暖房)	0.43	165, 168, 173, 238
161	天井フレキシブルダクト取付	ダクト工	0.57	139, 140, 154	242	TV端子・分配器取付・配線接続	視聴設備工	0.29	183, 189, 229
162	ALCダクト貫通口処理	ダクト工	0.07	154	243	LAN・TEL端子・HUB取付導通試験	通信設備工	0.43	183, 189, 229
163	ALC追炊貫通口処理	ガス工(温水暖房)	0.07	124, 152	244	トイレ等床セラミックタイル張	タイル工	0.57	227, 228
164	ALCガス貫通口処理	給排水衛生工	0.07	125, 153	245	床暖房パネル	ガス工(温水暖房)	0.14	232, 233, 234
165	UB照明電源接続	電気工	0.07	131, 158	246	マルチ室外機対向試験	空調サブコン	0.14	234
166	UB給水給湯管接続	給排水衛生工	0.07	157, 158	247	インターホン試験 (住戸内)	インターホン工	0.07	230
167	UB追炊管接続	ガス工(温水暖房)	0.07	152, 158	248	回路検査	電気サブコン	0.21	188, 211, 229, 232
168	UB浴室乾燥機取付	ガス工(温水暖房)	0.43	158	249	調光検査・調整	電気サブコン	0.07	232
169	衛生区画貫通処理	電気工	0.14	153, 155, 157	250	ディスプレイ試験調整	ディスプレイ工	0.07	212, 220, 221, 223
170	排水勾配検査	衛生サブコン	0.07	159	251	ダミー合板・フローリング張	フローリング工	2.50	244, 245
171	ALC給水・給湯貫通口処理	給排水衛生工	0.07	123, 157	252	各所仕上シール	シール工	0.43	206, 210, 222, 244
172	発砲ウレタン吹付	断熱工	0.21	108, 115, 119, 121, 133, 134, 148, 151, 162, 163, 164, 171	253	木質系巾木取付	巾木工	0.43	244, 251
173	UB内部工事	ユニットバス工	0.71	158, 167	254	木製建具吊込	木製建具工	0.57	240, 251
174	UB浴室乾燥機ダクト接続	ダクト工	0.14	139, 168	255	便器取付	給排水衛生工	0.14	244, 253
175	現地配線ジョイント	電気工	0.29	131, 140, 158, 168	256	漏水・ガス漏れ検査	設備サブコン	1.00	212, 213, 220, 223, 231, 233, 235, 255
176	給水水压試験	衛生サブコン	0.29	157, 160, 166	257	温水暖房データ取り試験調整	ガス工(温水暖房)	0.43	160, 234, 238, 239, 256
177	AWカーテンBOX	造作大工	0.57	105, 119, 172					
181	間仕切組下地組	造作大工(間仕切)	12.00	105, 122, 136, 141, 144, 150, 158, 159, 161, 166, 167, 169, 170, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180					

Table 5 結果の一覧
The list of results

		ジョブ工区数		サイクル工期(日)		完全同期時の 作業人数	平均 稼働率 OR
		最少数	最多数	最短	最長		
		CP _k	Ln	t-min	t-max		
Rn24	Case1-1	29	42	174	252	299	83.3%
	Case1-2	33	45	99	135	299	83.3%
	Case1-3	38	49	76	98	305	82.5%
	Case1-4	52	57	52	57	303	81.1%
Rn12	Case2-1	27	41	162	246	159	74.6%
	Case2-2	31	45	93	135	161	73.7%
	Case2-3	35	49	70	98	163	73.3%
	Case2-4	50	56	50	56	163	72.1%
Rn6	Case3-1	24	39	144	234	94	61.2%
	Case3-2	27	40	81	120	95	59.3%
	Case3-3	31	46	62	92	97	59.8%
	Case3-4	45	53	45	53	99	59.0%

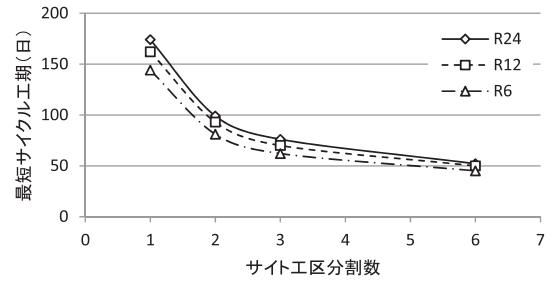


Fig.6 Sn と t-min の関係
The relationship between Sn and t-min

とで、労務工数削減と平均稼働率向上が期待できる。

サイクル工期（最短）は、Sn=1からSn=2で約43%、Sn=2からSn=3で23%前後、Sn=3からSn=6で27~31%短縮する。規模別に完全同期時の技能者数を比較するとサイト工区分割数によらず投入資源量は概ね一定である（Table 5）。つまり多工区同期化の工程計画にサイクル工期と投入資源量の間にトレードオフの関係があるとはいえない。また、Table 5に示すように、サイクル工期を決定付けるジョブ工区分割数の最少数CP_kの数と最多数Lnの数の比は、ジョブ工区分割数が多くなるに従って小さくなる。これはタイムモジュールが小さいほどクリティカルパスの構成要素が多くなるためであり、タイムモジュールが大きいほどジョブ工区分割の自由度が高いと言い換えられる。

5 多工区同期化検討ツール

筆者等は、本稿で提案したバランス型ジョブ工区分節による多工区同期化の検討ツールを開発した。このプログラムは、IFM、工程要素に対する担当施工チームと1住戸当たりの歩掛り、サイト工区分節数やタイムモジュールなどの初期条件を用意するだけで、Lnを分節数としたジョブ工区を算出するものである。Fig.7はこのプログラムで出力したジョブ工区内スケジュールの一部である。横軸はタイムモジュール3日間の作業時間を1時間単位で区切っており、網掛けのバーは最早開始時刻と最早終了時刻、点線白抜きバーは最遅開始時刻と最遅終了時刻をあらわしている。CP列に数字が記述された工程要素はCP_kの構成要素である。Fig.8は、Fig.7を並び替えて左官工のスケジュールを表示したものである。Fig.7で時間拘束が無かった工程要素（ID5）でも、他のCP_k構成要素（ID27）の影響を受けて時間拘束が生じていることが分かる。

このツールは平行要素や誘引要素など工程要素間の関係やリソース競合の有無を随時確認しながら工程要素のジョブ工区割り当てを自由に検討可能である。そのため、工程要素間の順序関係に矛盾無くかつノウハウを活かし、短時間で多工区同期化の工程を計画できる。また、計画したスケジュールの共有を目的に各住戸前に掲示する日めくり方式の進捗管理表を作成し、実プロジェクトで有効性を検証している。

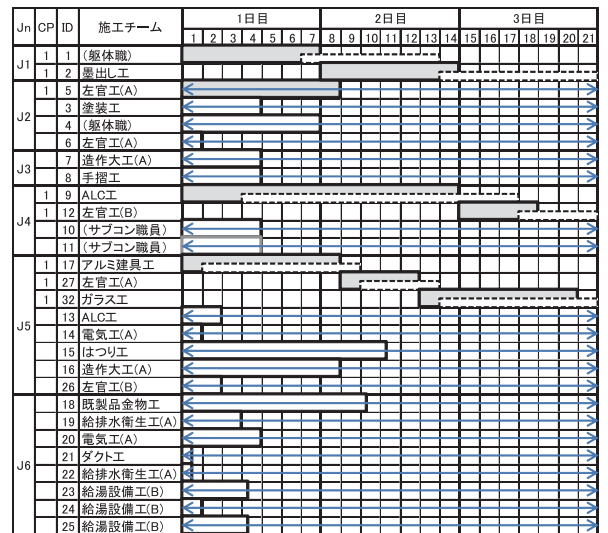


Fig.7 ジョブ工区内工程進捗の例
Case of schedule in the job package

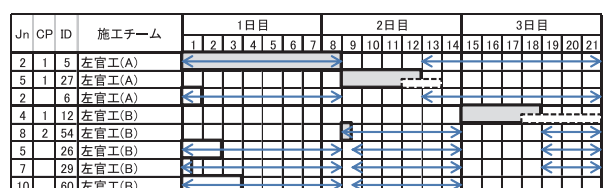


Fig.8 左官工のスケジュール
Schedule of plasterer

6 まとめ

本稿では、集合住宅の内装工事に多工区同期化を適用した工程計画手法について述べた。この手法では、クリティカルパスを中心とした工程を最短となるように分節したサイクル工期の基準となる工程要素群に対し、それ以外を並行進捗できるように組み合わせることでジョブ工区内における施工チーム間の擦り合わせ的な調整を必要としない工程モジュールを半自動的に作り込むことが可能である。また、提案手法を実プロジェクトのデータで検証し、従来の方法と比較して施工チームの稼働率が高く、サイクル工期短縮或いは投入資源水準が低い工程を計画できる可能性を示した。さらに本提案手法をプログラム実装した多工区同期化検討ツールを開発し、実プロジェクトでの実施検証を進めている。今後はいくつかのパターンでIFMを整備し、それを再利用することで協力会社との契約前に施工チーム編成や詳細スケジュールの検討ができる環境整備を目指している。また予実管理への対応も併せて研究開発を進める計画である。

謝辞

本手法の研究開発においてご指導いただいた千葉大学の安藤正雄教授、データ分析に尽力いただいた本田裕貴氏(当時千葉大学大学院生)にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

注

- 1) 到達可能行列 R において自分自身以外 ($i \neq j$) の i 成分が全て0の作業を「レベル1」とし、それらの j 成分を0に置き換える。以降同様に R が空集合になるまで繰り返す。つまり、同時に先行(転置行列を用いた場合は後続)インターフェイスが同時に消滅する要素のまとまりがレベルとなる。
- 2) IFMの到達可能行列 R と c_{ij} の i 成分のブール積から i 成分に対する後続要素集合 $\{ck'\}$ 、 R と j 成分のブール積から i 成分に対する先行要素集合 $\{ch'\}$ が得られ、 $\{ck'\} \cap \{ch'\}$ が誘引要素。 $\{ch'\} \cup \{ck'\}$ の余集合が平行要素。

参考文献

- 1) エリヤフ・ゴールドトラッド(著)、三木本亮(訳):クリティカルチェーン, ダイヤモンド社, 2003.10
- 2) 志手一哉, 湯浅洋一, 蟹澤宏剛, 山本翔太:集合住宅の内装仕上工事における工程パターンの分析, 日本建築学会技術報告集第15巻第30号, pp.557-592, 2009.6
- 3) 志手一哉, 湯浅洋一, 蟹澤宏剛, 石田祥子:集合住宅の内装仕上工事における情報伝達に関する研究, 日本建築学会計画系論文集第76巻第660号, pp.421-429, 2011.2
- 4) 日本建築学会編, 建築工事における工程の計画と管理指針・同解説, 日本建築学会, 2004.2
- 5) 浦江真人, 安藤正雄, 同期化された水平多工区分割工法の計画に関する研究, (その1) 実測データに基づく工法の評価, 第1回建築生産と管理技術シンポジウム論文集, 1985.7
- 6) 安藤正雄, 河谷史郎, 浦江真人, 基準階IFMからの n 工区分割同期化工法の導出法, 第6回建築生産と管理技術シンポジウム論文集, 1990.7
- 7) 安藤正雄, 浦江真人, 同期化された水平多工区分割工法の計画に関する研究, (その2) 工区数・工期・タイムスケジュールの関係, 第1回建築生産と管理技術シンポジウム論文集, 1985.7
- 8) 蟹澤宏剛, 安藤正雄, 浦江真人, 鹿島裕一, 長谷芳春, 戸倉孝之, 古市克也:構工法計画モデルにおける「部分」の記述法について, 日本建築学会第9回建築生産と管理技術シンポジウム論文集, pp.71-76, 1993.7