

建築物を造る過程の計画と管理 数理科学的アプローチの光と闇

嘉納 成男

早稲田大学 名誉教授



本日の内容：

建築物を造る過程の計画と管理

- (1) 数理科学的アプローチを研究テーマとした背景
- (2) 数理科学的アプローチにおける7つの研究分野
 - (a) 各分野の研究事例の簡単な紹介
 - (b) 計画案の最適化についての詳細な紹介

多工区同期化工法における工程計算
- (3) 50年の研究活動で悟ったこと



研究の背景

私は、1947年(77年前)に兵庫県神戸で生まれて、
1966年(58年前)に大学進学で東京へ。

1970年(54年前)代に大学院、助手時代を過ごす

そのころは、

オリンピック開催、東海道新幹線の開通

建築界では、霞が関ビルの建設

浜松町にある世界貿易センターの建設

システム論が流行る。グラフ理論も

コンピュータでは、

大型コンピュータが大学に導入され始める。

東大大型計算センターが利用可能になる。



研究の背景

私は、1

システム論：

現実を部分に分割し、その部分相互の関係を明確に
することによって、全体を表すことが出来る。

そのころは、

オリンピック

建築界で高度が関ビルの建設

品川松町にある世界貿易センターの建設

システム論が流行る。グラフ理論も

コンピュータでは、

大型コンピュータが大学に導入され始める。

東大大型計算センターが利用可能になる。



卒業論文のテーマ(23歳、1970年)

世界貿易センターの外壁カーテンウォールの作業研究

修士論文のテーマ(26歳、1973年)

建築工事のためのデータベースの構造について

博士論文のテーマ(40歳、1987年)

建築工事の工程計画手法に関する研究

生涯の研究テーマ

建築物を造る過程の計画と管理への数理科学的アプローチ

計画と管理は、技術者の経験・知識・勘・度胸に頼る側面が強いエンジニアリング業務

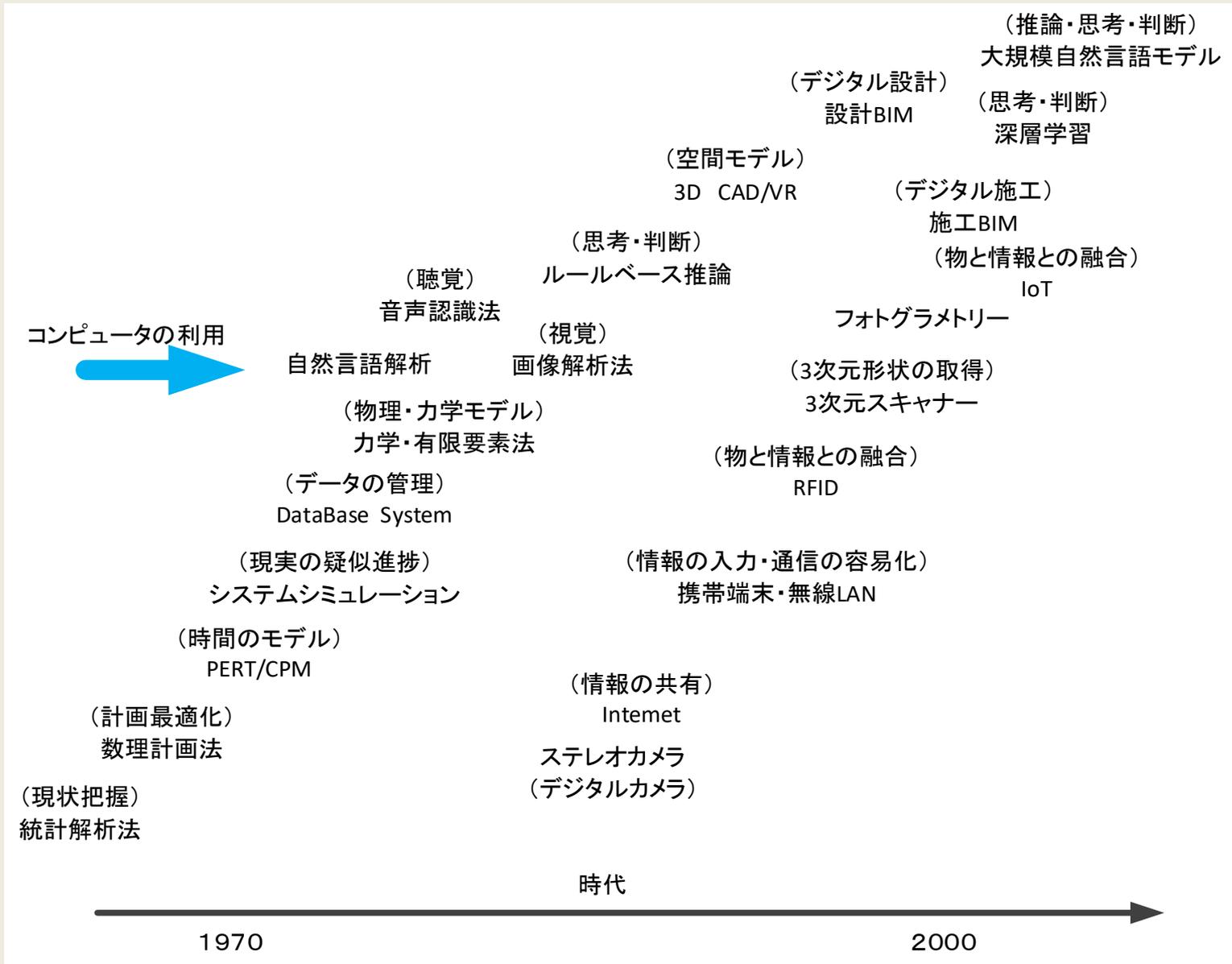
研究の目標は、**経験と勘による計画と管理について、数理科学的アプローチを導入する。**



数理科学的アプローチとは

数学的な考えを用いて、コンピュータを用いて解を求める。





数理科学的アプローチにおける研究分野 7つの研究分野



実績情報をどの様に
活用するか

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

各研究分野の研究事例の紹介



実績情報をどの様に
活用するか

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に
活用するか

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

1. 実績情報の収集・分析

4. 計画立案の手順と重点

2. 実績情報の保存と検索

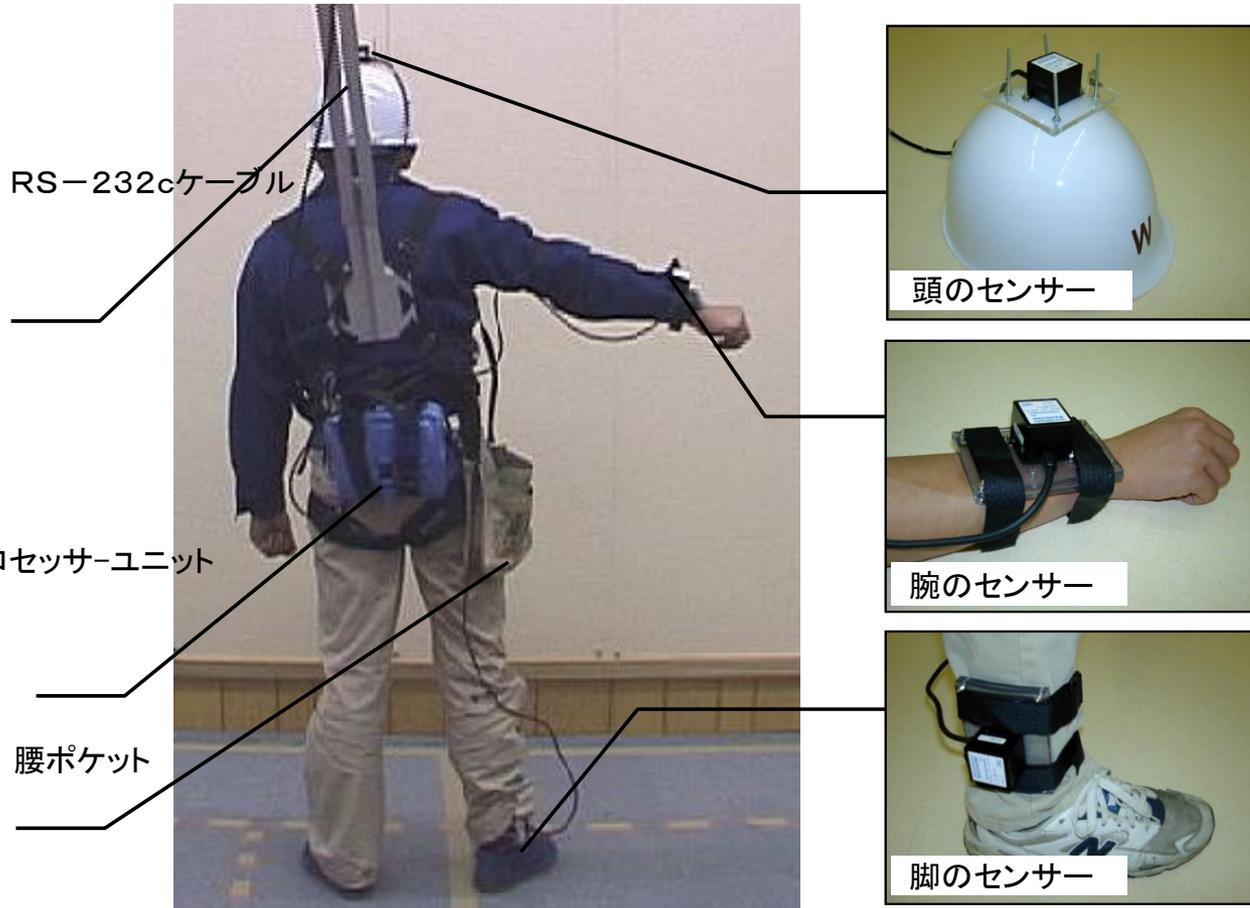
5. 計画案の表現方法

加速度センサーで作業内容の収集

蔡成浩・嘉納成男: 建築工事における作業内容の推定方法に関する研究、計
画系論文集、2003.02、pp295-302、日本建築学会

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案



現在の加速度センサー
(小野測器 カタログより)



写真 作業者に付けた加速度センサー

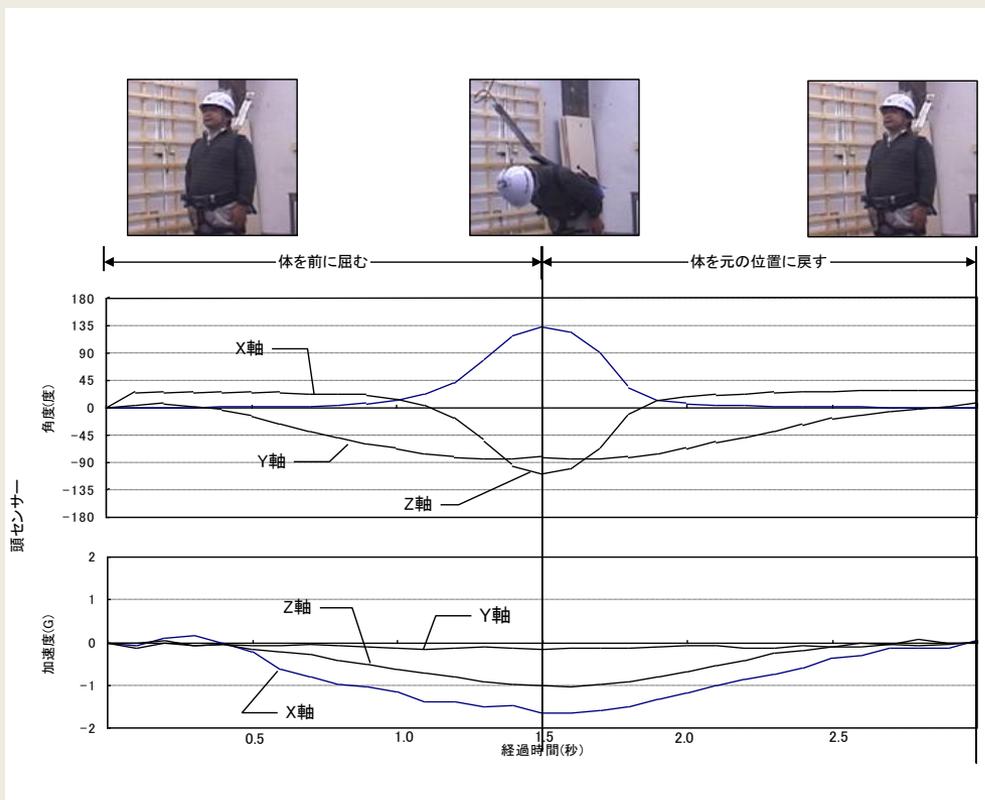


図 頭のセンサーの出力事例
(頭を前後に動かす)

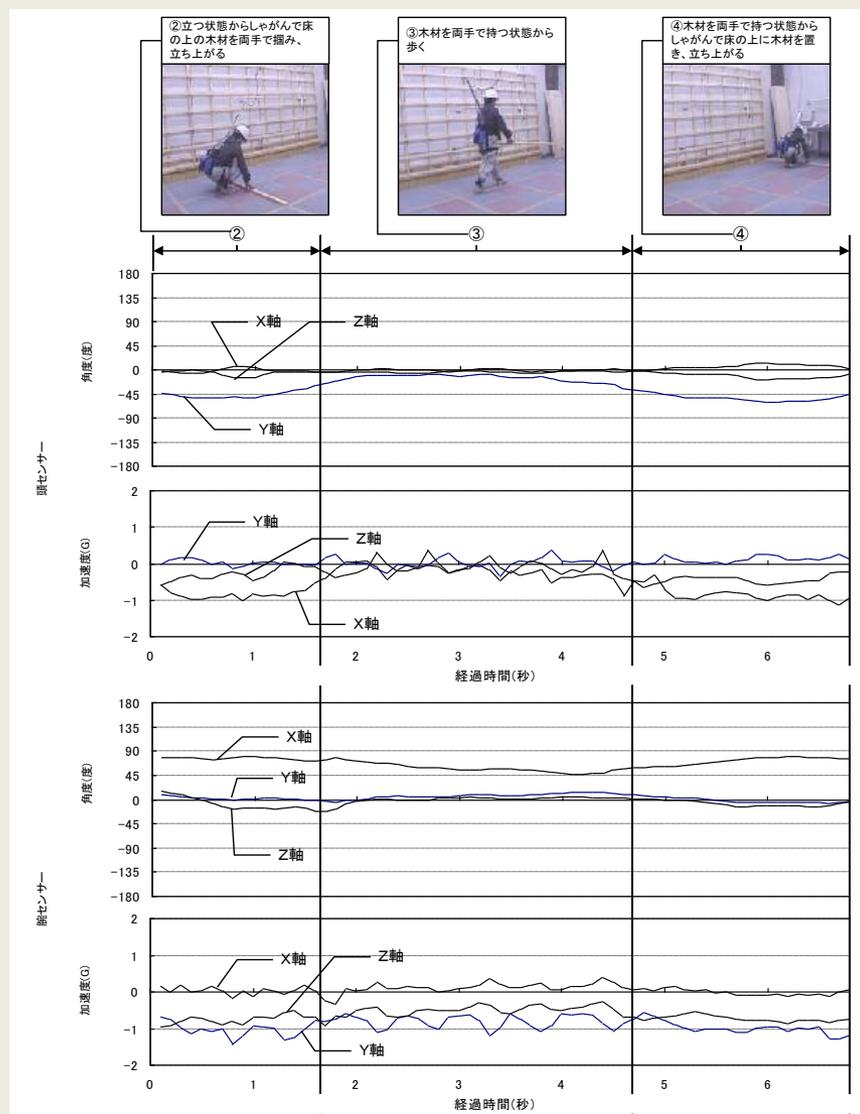


図 頭と腕のセンサーの出力事例
(部材を運搬する)

センサーデータに基づく動作の特性値(1秒毎)

(1)頭・腕・脚センサーの距離

推定期間毎の平均値、標準偏差、変化量(特性値:合計9)

(2)頭・腕・脚センサーの運動加速度

推定期間毎の変化量(特性値:合計3)

ビデオによる作業内容の記録・分析(0.1秒毎)

実際の作業内容を把握

センサーデータ、ビデオデータに基づき

作業内容を推定するニューラルネットワークの作成

(1)学習データ(2/3)

ニューラルネットワークによる学習

(2)検証データ(1/3)

学習結果の検証



事例：パネル取付け作業への適用

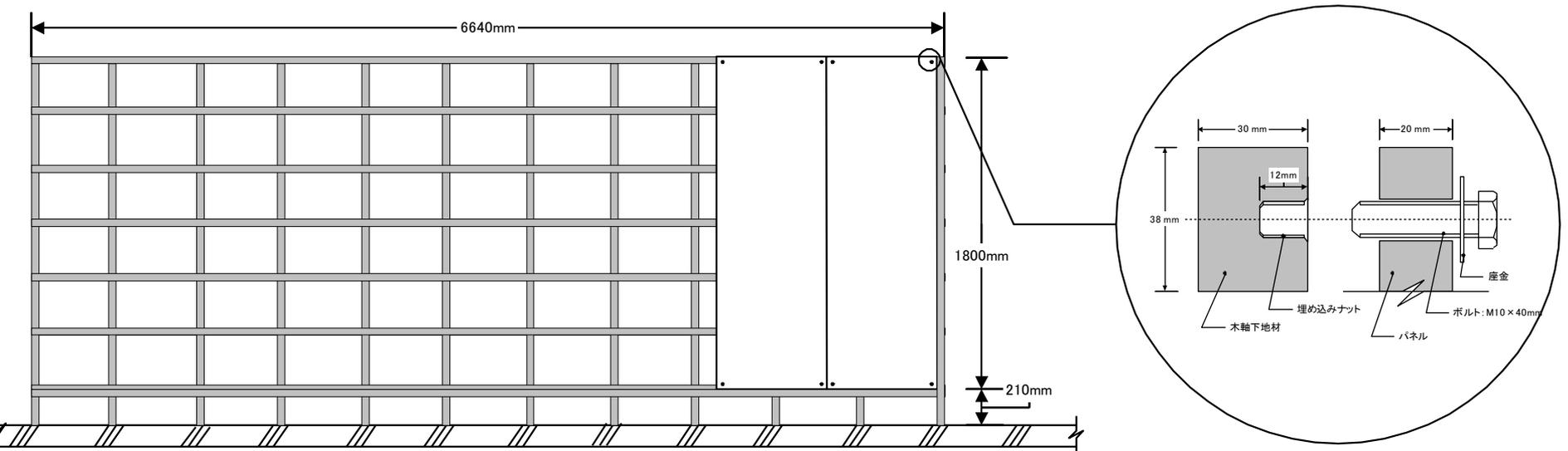


図 パネル取付け作業の配置図

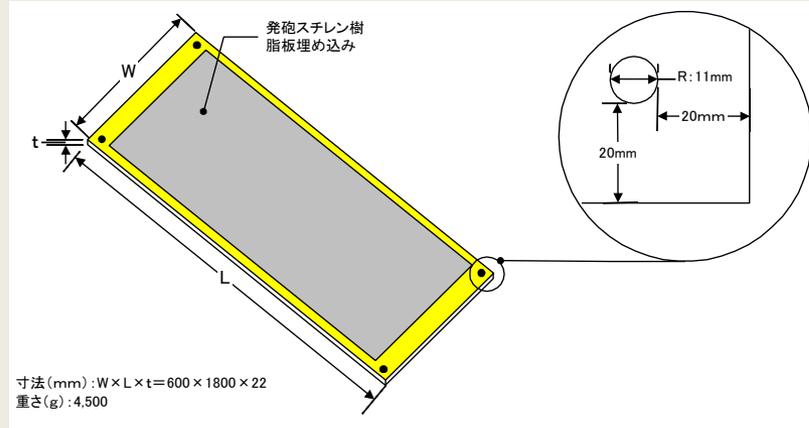


図 パネルの詳細

まとめり作業

単位作業

単位動作

作業写真

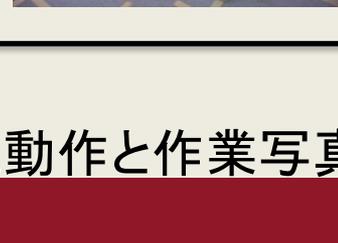
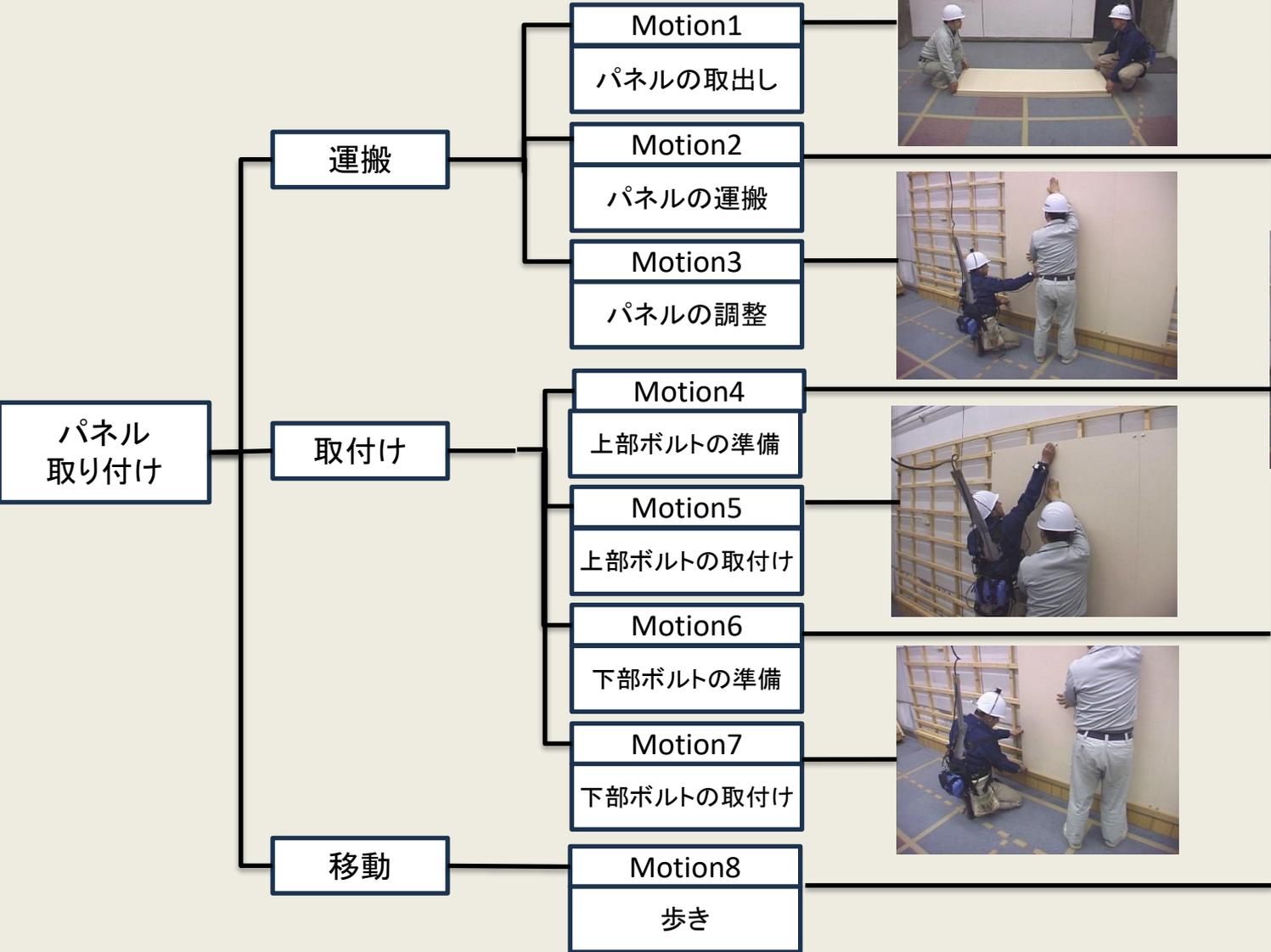
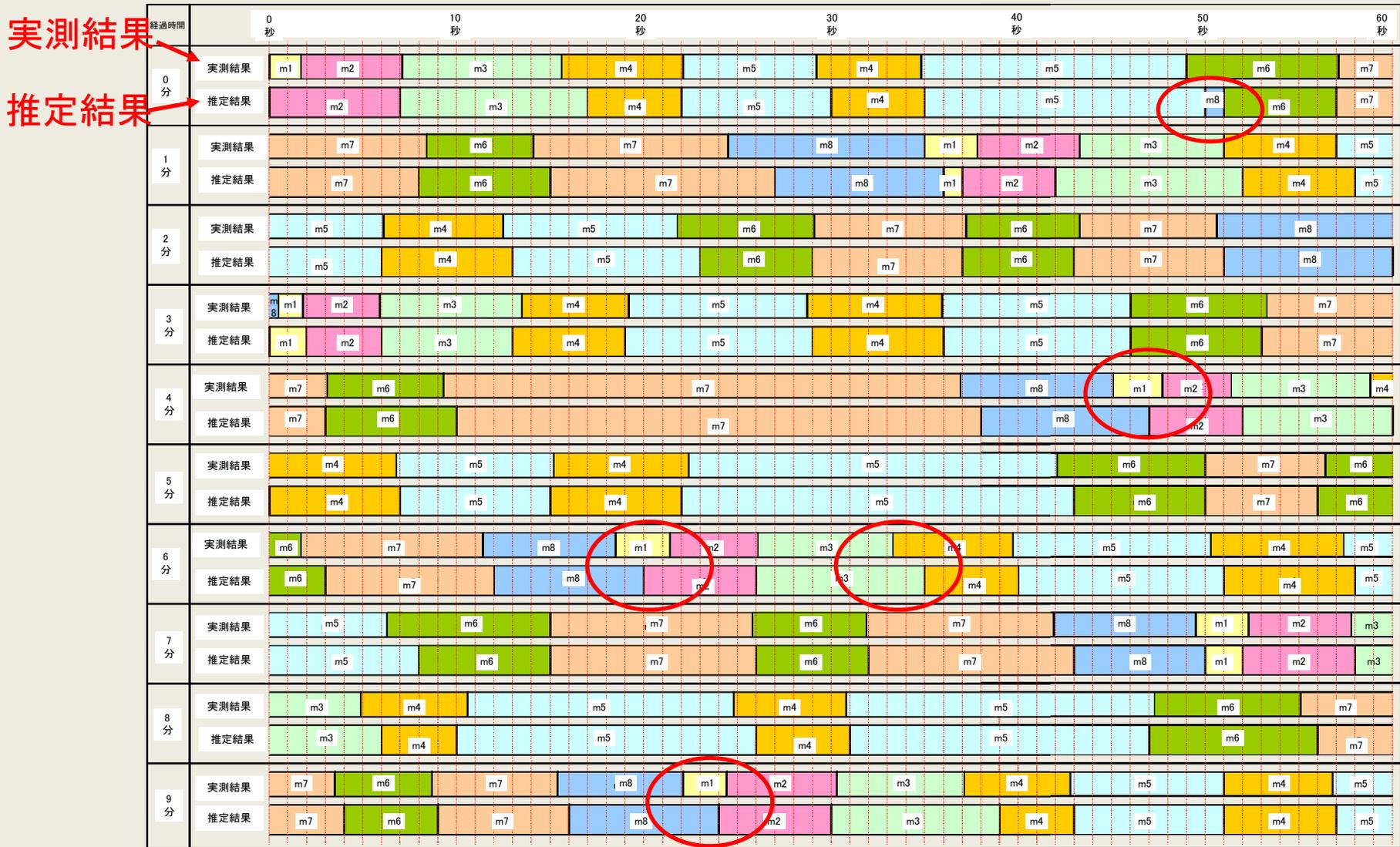


写真 パネル取付け作業の単位動作と作業写真





(注) mは単位動作のMotionを示す

図 経過時間の時系列における実測結果と推定結果の比較
(作業開始時間から10分まで)



表.1 学習データにおける推定結果の0.1秒毎の的中率

項目	単位動作								全単位動作
	Motion1 パネルの 取り出し	Motion2 パネルの 運搬	Motion3 パネルの 調整	Motion4 上部ボルト の準備	Motion5 上部ボルト の取付け	Motion6 下部ボルト の準備	Motion7 下部ボルト の取付け	Motion8 歩き	
作業時間 (秒)	68.70	133.30	187.80	335.10	520.40	364.70	550.10	206.70	2366.80
的中時間 (秒)	48.90	124.40	173.80	312.90	496.70	333.50	534.30	194.90	2219.40
的中率 (%)	71.18	93.32	92.55	93.38	95.45	91.45	97.13	94.29	93.77

表.2 検証データにおける推定結果の0.1秒毎の的中率

項目	単位動作								全単位動作
	Motion1 パネルの 取り出し	Motion2 パネルの 運搬	Motion3 パネルの 調整	Motion4 上部ボルト の準備	Motion5 上部ボルト の取付け	Motion6 下部ボルト の準備	Motion7 下部ボルト の取付け	Motion8 歩き	
作業時間 (秒)	14.50	35.50	44.30	77.40	132.60	81.70	126.90	48.80	561.70
的中時間 (秒)	2.40	29.70	35.20	67.70	120.60	63.90	122.80	48.10	490.40
的中率 (%)	16.55	83.66	79.46	87.47	90.95	78.21	96.77	98.57	87.31



実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

If-Then ルールによる計画知識の保存・検索

嘉納成男: 工程計画におけるエキスパートシステム、計画の推論方法とそのアルゴリズム、建築生産と管理技術シンポジウム、pp235-240、1988、日本建築学会

新たな工事の計画案

地下山留壁工法のIf-Thenルール(一例)

If(地下階数=地下1階、水位差 $<4.5\text{m}$)

Then(主要山留壁工法=親杭横矢板)

If(主要山留壁工法=親杭横矢板、地下水位 $\geq 2.5\text{m}$)

Then(山留壁工法=親杭横矢板)

If(主要山留壁工法=親杭横矢板、地下水位 $<2.5\text{m}$)

Then(主要山留壁工法=シートパイル)

If(地下階数=地下1階、水位差 $\geq 4.5\text{m}$)

Then(主要山留壁工法=シートパイル)

If(主要山留壁工法=シートパイル、地盤N値 ≥ 50)

Then(山留壁工法=親杭横矢板)

If(主要山留壁工法=シートパイル、地盤N値 <50)

Then(山留壁工法=シートパイル)



1980年代 人工知能の研究が盛んになる

1980年代 エキスパートシステム研究の波

1982年 新世代コンピュータ技術開発機構(略称:ICOT)
が発足

第五世代コンピュータの開発(推論エンジン)

11年の歳月と540億円が費やされたプロジェクト

ルールベースの人工知能による工事計画手法の研究

AIシステムKEEを用いた研究(LISP言語)

ops5による工程計画エキスパート・システム

Prologによる計画知識のルール化



KEEによるシステム開発

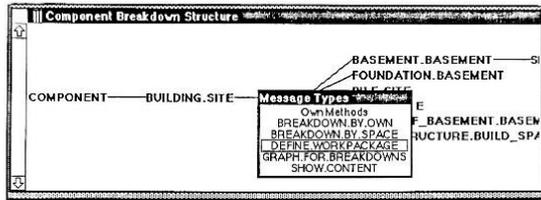


Figure 3 Menu for the Definition of a Workpackage

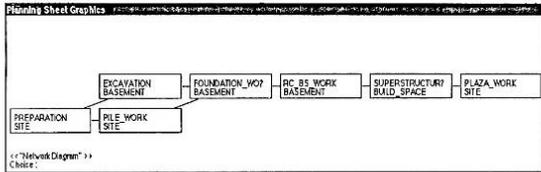


Figure 4 Network Diagram

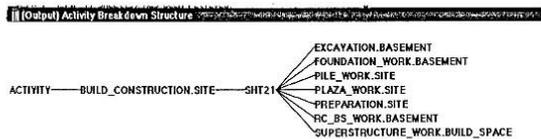


Figure 5 Breakdown Structure for Activities

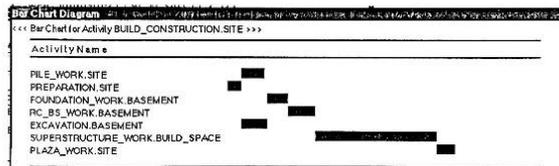


Figure 6 Bar Chart

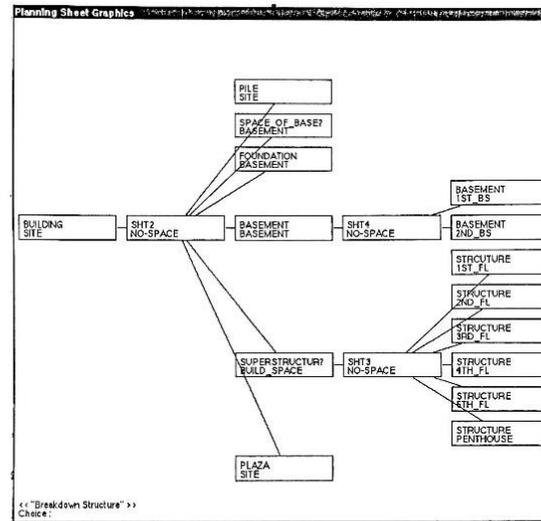


Figure 1 Breakdown Structure for Components

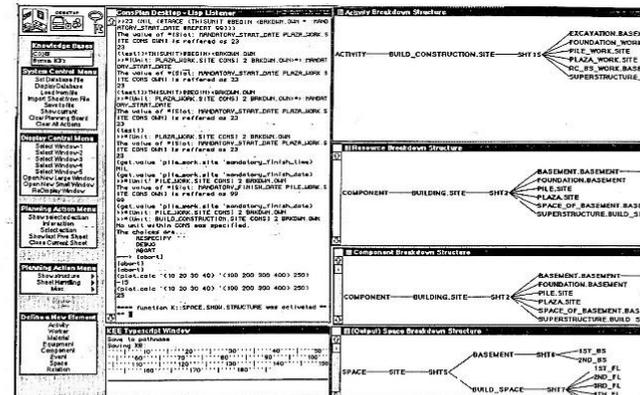
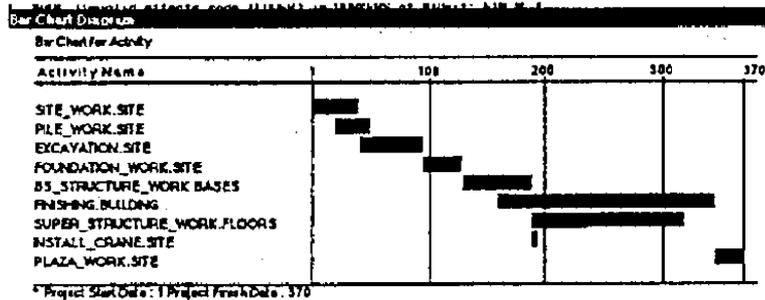
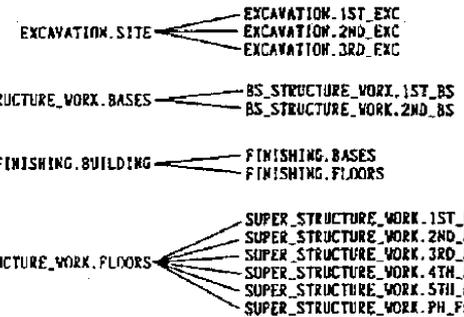


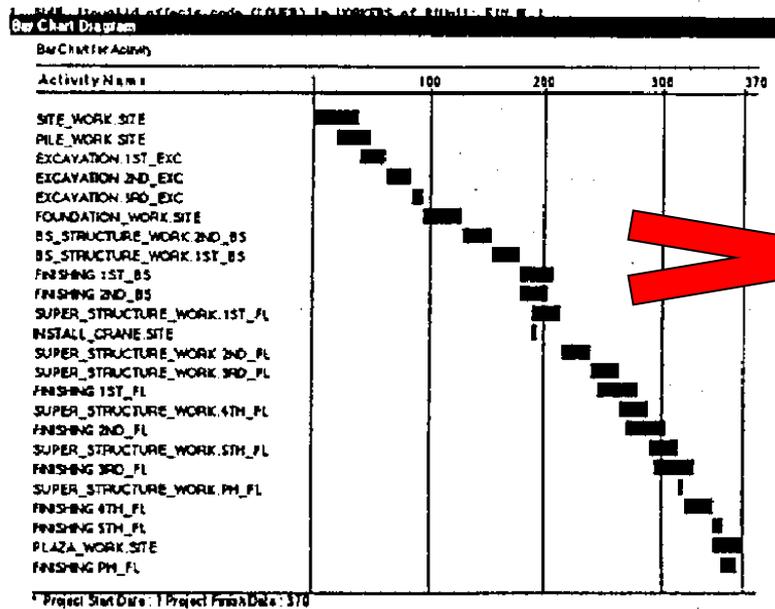
Figure 2 Layout of Menus and Windows in ConsPlans



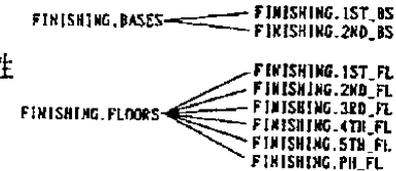
a. 詳細度レベル2のバーチャート



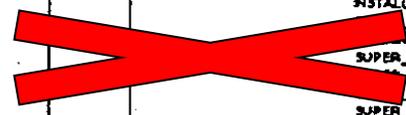
日程の整合性

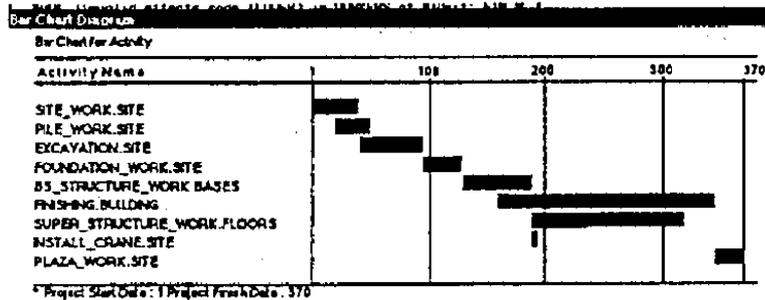


b. 詳細度レベル3のバーチャート



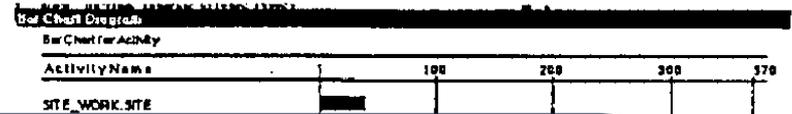
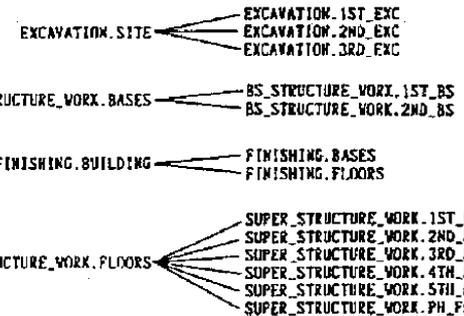
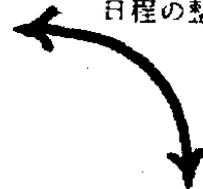
日程の整合性





a. 詳細度レベル2のバーチャート

日程の整合性



研究が挫折した原因:

- (1) ルールが増加(300程度以上)すると、人間の頭の中で制御することが出来なくなる。
- (2) 人間が考えるルールには矛盾が常に含まれている。
- (3) 規模が大きくなると、ルールがどの様に起動して行くかを把握出来なくなる。

実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

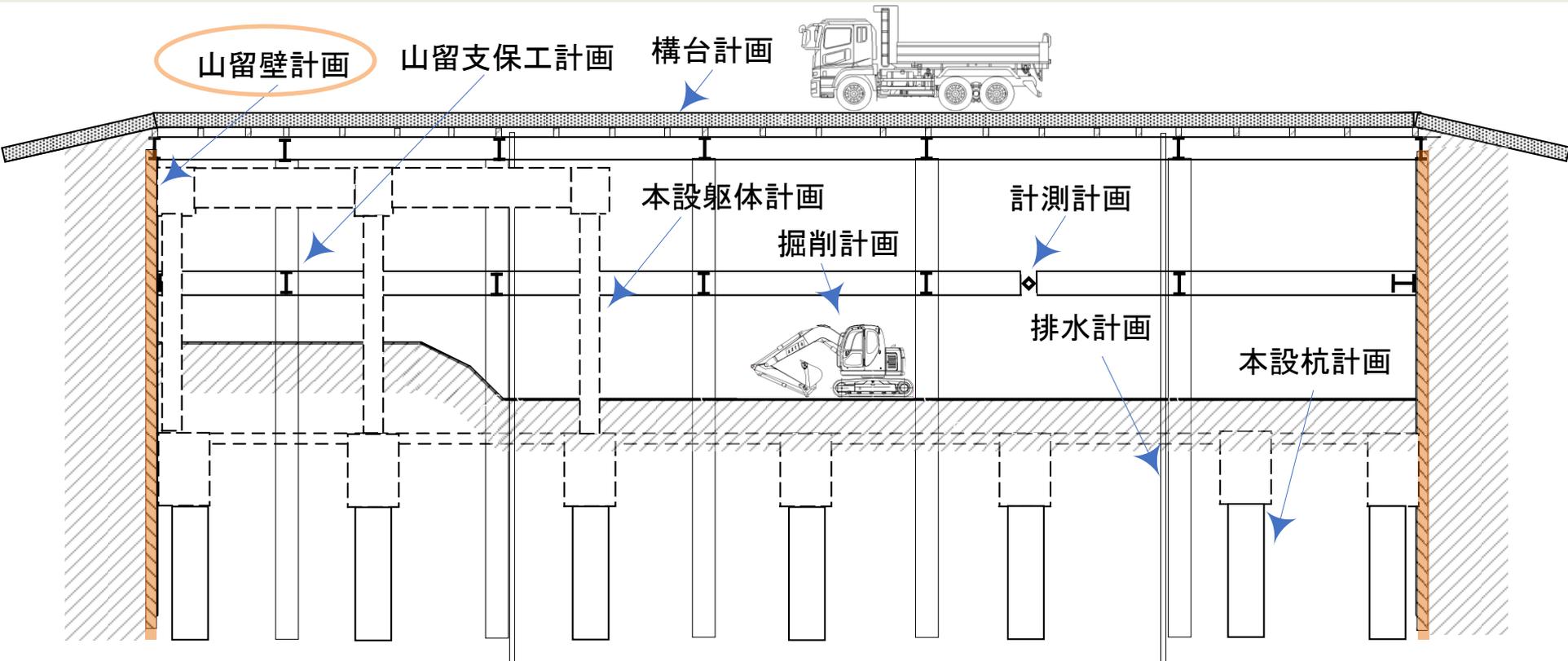
6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

山留壁の工法の推論

嘉納成男・間瀬惇平・金澤英紀・信田直裕・安富彩子: 山留壁の工法推定モデルとその推定精度の比較、計画系論文集、pp197-204、1998.08、日本建築学会

山留壁の工法の推論



山留壁の工法の種類

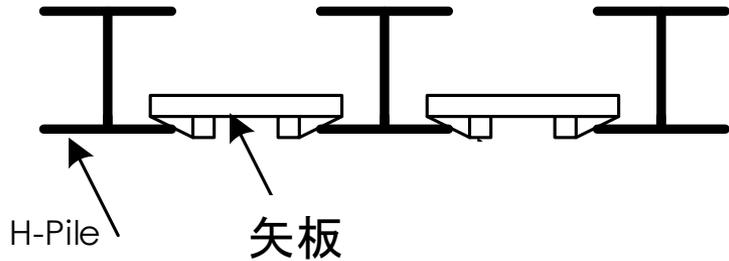


図.1 親杭横矢板工法

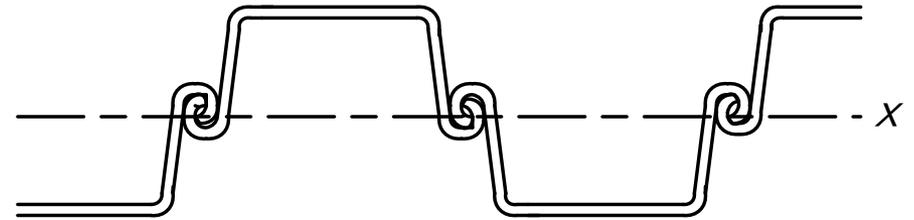


図.2 シートパイル工法

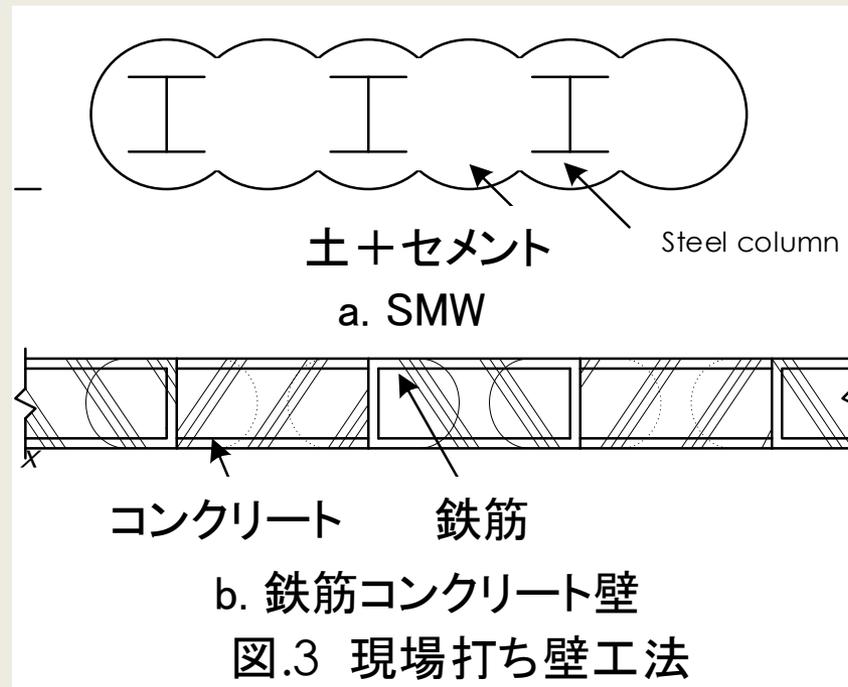


図.3 現場打ち壁工法

過去の工事物件の地盤と採用工法の情報

番号	工法の特定値	工法	データ件数
1	掘削深度 (m)	親杭横矢板	100
		シートパイル	31
2	掘削面積 (m ²)	場所打ち壁	63
		全体	194
3	水位差 (m)		
4	粗粒土厚 (m)		
5	細粒土厚 (m)		
6	平均N値		
7	砂割合		
8	粘土割合		
9	硬質厚 (m ²)		

推論 

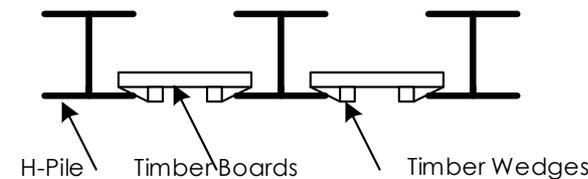


図.1 親杭横矢板工法

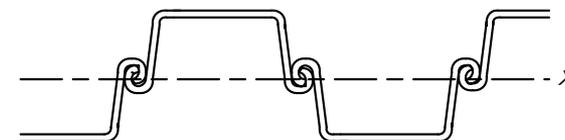
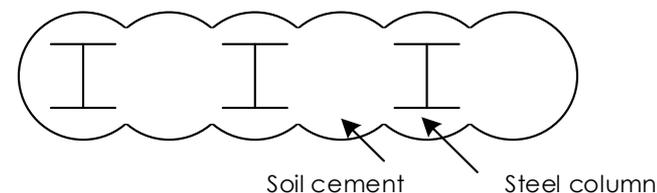
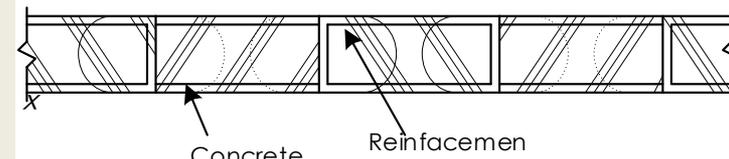


図.2 シートパイル工法



a. Soil Cement Column Wall

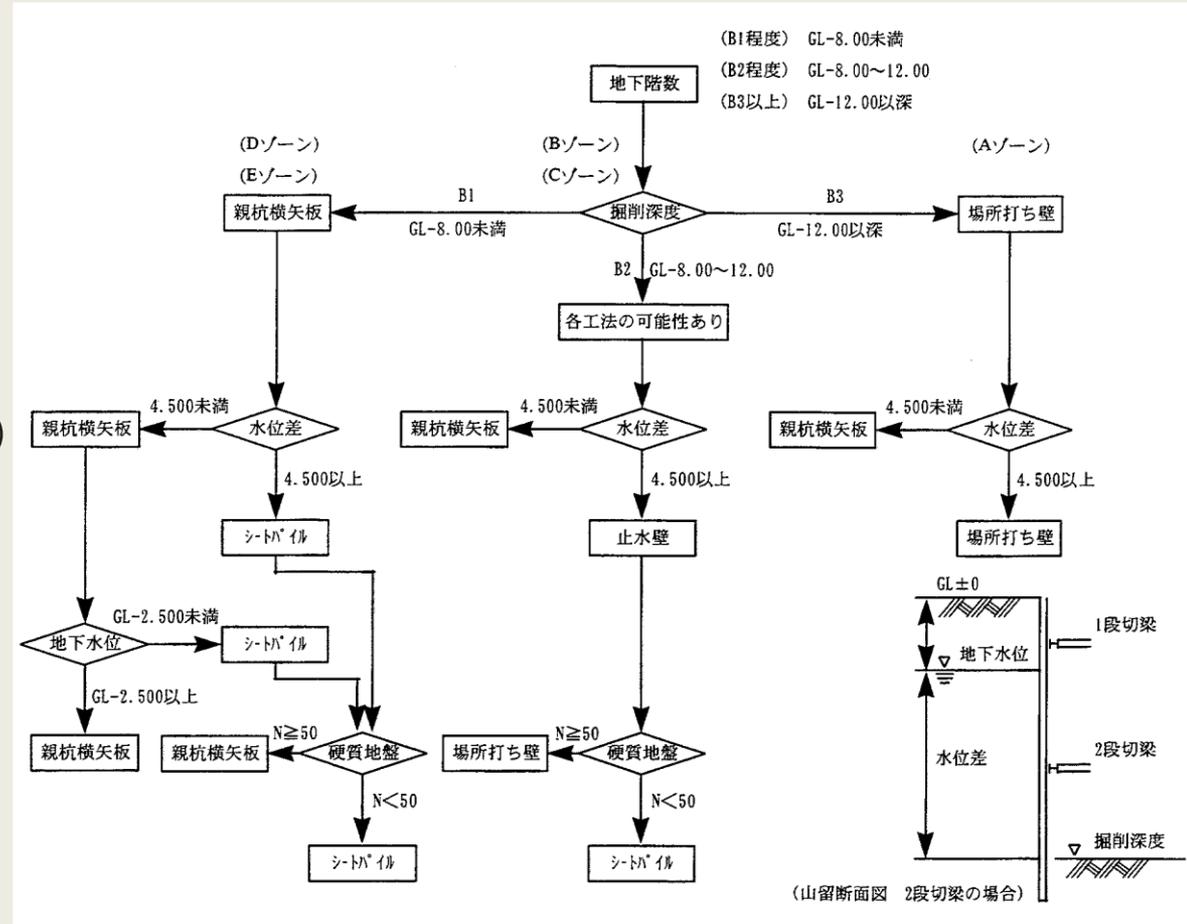


b. Reinforced Concrete Wall

図.3 現場打ち壁工法

工法を推論する手法

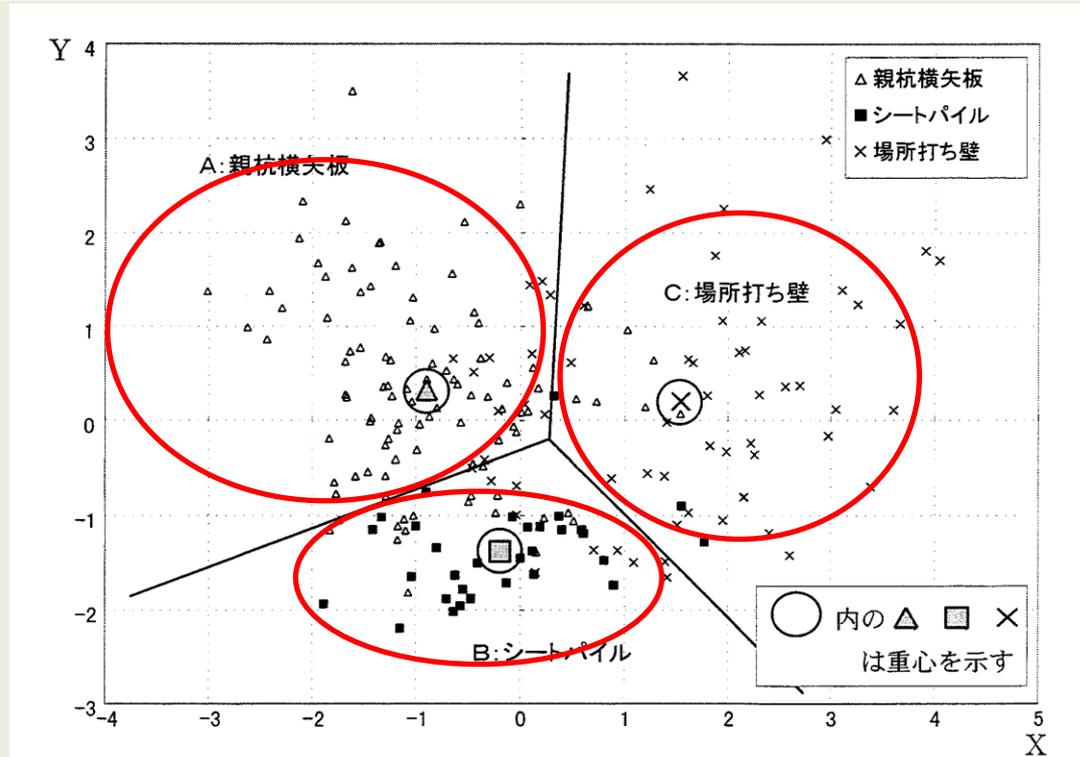
- (1) 判別関数による推論
- (2) 選好関数による推論
- (3) ニューラルネットワークによる推論
- (4) 事例推論による推論
(9次元空間に事例を配置)
- (5) 技術者の経験的ロジックによる推論



(5) 技術者の経験的ロジックによる推論 (間瀬惇平)

判別関数の変数

変数	特性値
a	掘削深度 (m)
b	掘削面積 (m ²)
c	水位差 (m)
d	粗粒土厚 (m)
e	細粒土厚 (m)
f	平均N値
g	砂割合
h	粘土割合
i	硬質厚 (m ²)



判別関数の式

$$x = 1.65 \times 10^{-1} a + 8.09 \times 10^{-5} b + 4.97 \times 10^{-2} c + 2.59 \times 10^{-1} d - 9.54 \times 10^{-2} e - 2.34 \times 10^{-2} f - 1.10 \times 10^{-1} g - 5.53 \times 10^{-1} h - 2.29 \times 10^{-1} i - 1.95$$

式2.2.1

$$y = 2.94 \times 10^{-1} a + 1.03 \times 10^{-4} b - 2.56 \times 10^{-1} c + 5.22 \times 10^{-2} d - 6.78 \times 10^{-2} e + 7.21 \times 10^{-2} f - 4.43 \times 10^{-1} g + 3.28 \times 10^{-1} h - 2.79 \times 10^{-1} i - 2.52$$

式2.2.2

判別関数による推論の結果

表.1 判別分析モデルによる推論結果

山留壁工事		実績			計
		親杭 横矢板工法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭	32	1	0	33
	横矢板工法	71.1%	6.7%	0.0%	36.7%
	シートパイル工 法	11	9	6	26
		24.4%	60.0%	20.0%	28.9%
SMW工法		2	5	24	31
		4.4%	33.3%	80.0%	34.4%
計		45	15	30	90
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					72.2%

表.2 選考関数モデルによる推論結果

山留壁工事		実績			計
		親杭 横矢板工法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭	41	6	7	54
	横矢板工法	91.1%	40.0%	23.3%	60.0%
	シートパイル工 法	2	3	1	6
		4.4%	20.0%	3.3%	6.7%
SMW工法		2	6	22	30
		4.4%	40.0%	73.3%	33.3%
計		45	15	30	90
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					73.3%

表.3 ニューラルネットモデルによる推論結果

山留壁工事		実績			計
		親杭 横矢板工法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭	34	2	0	36
	横矢板工法	75.6%	13.3%	0.0%	40.0%
	シートパイル工 法	6	5	6	17
		13.3%	33.3%	20.0%	18.9%
SMW工法		5	8	24	37
		11.1%	53.3%	80.0%	41.1%
計		45	15	30	90
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					70.0%

表.4 事例モデルによる推論結果

山留壁工事		実績			計
		親杭 横矢板工法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭	34	3	3	40
	横矢板工法	75.6%	20.0%	10.0%	44.4%
	シートパイル工 法	7	7	3	17
		15.6%	46.7%	10.0%	18.9%
SMW工法		4	5	24	33
		8.9%	33.3%	80.0%	36.7%
計		45	15	30	90
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					72.2%

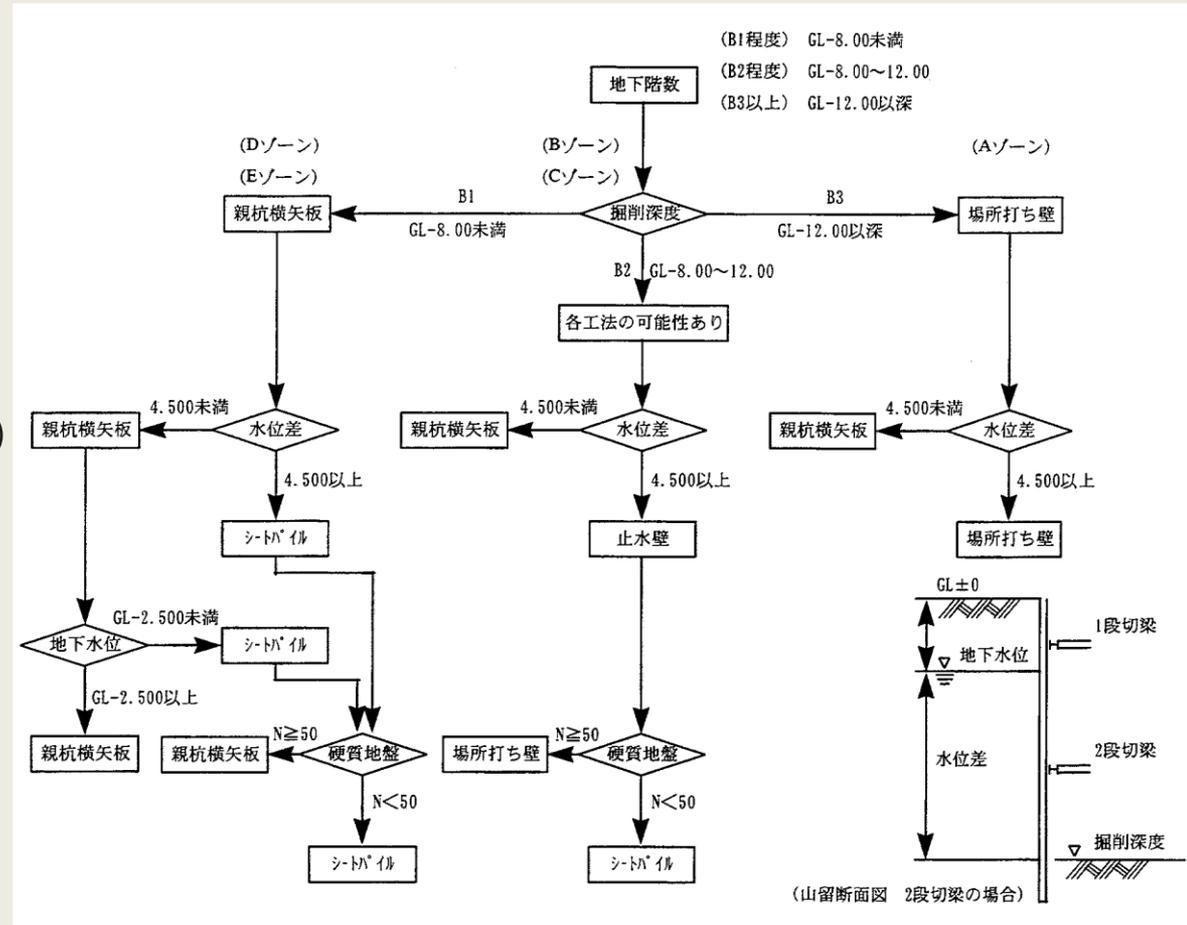
表.5 経験者のルールモデルによる推論結果

山留壁工事		実績			計
		親杭 横矢板工法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭	36	2	3	41
	横矢板工法	80.0%	13.3%	10.0%	45.6%
	シートパイル工 法	4	11	5	20
		8.9%	73.3%	16.7%	22.2%
SMW工法		5	2	22	29
		11.1%	13.3%	73.3%	32.2%
計		45	15	30	90
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					76.7%

推定手法は、ほぼ
平均的中率：70%～76%

工法を推論する手法

- (1) 判別関数による推論
- (2) 選好関数による推論
- (3) ニューラルネットワークによる推論
- (4) 事例推論による推論
(9次元空間に事例を配置)
- (5) 技術者の経験的ロジックによる推論



(5) 技術者の経験的ロジックによる推論 (間瀬惇平)

多数決による推論

5つの手法ですべてが
同じ結果が出た場合

表.6 多数決法による推論結果(5/5)

山留壁工事		実績			計
		親杭 横矢板工 法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭 横矢板工 法	28	1	0	29
	シートパイル工 法	0	1	0	1
	SMW工法	0	1	18	19
		0	33.3%	100.0%	38.8%
計		28	3	18	49
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					95.9%

5つの手法で4つが
同じ結果となった場合

表.7 多数決法による推論結果(4/5)

山留壁工事		実績			平均的中率
		親杭 横矢板工 法	シートパイル 工法	現場打ち壁 工法	
推論結果	親杭 横矢板工 法	29	2	0	31
	シートパイル工 法	3	5	2	10
	SMW工法	0	4	22	26
		0	36.4%	91.7%	38.8%
計		32	11	24	67
		100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
平均的中率					83.6%



実績情報をどの様に
活用するか

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

1. 実績情報の収取・整理

4. 計画立案の手順と重点

2. 実績情報の保存と検索

5. 計画案の表現方法

3. 実績情報の活用

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に活用するか

工事計画をどの様に論理的に立案するか

1. 実績情報の収取・整理

4. 計画立案の手順と重点

2. 実績情報の保存と検索

5. 計画案の表現方法

地下工事の計画の手順

嘉納成男: 工事計画の立案方法に関する研究、土木学会計画学研、1984.01、pp395-402、土木学会

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

事例：地下工事における計画手順の解析

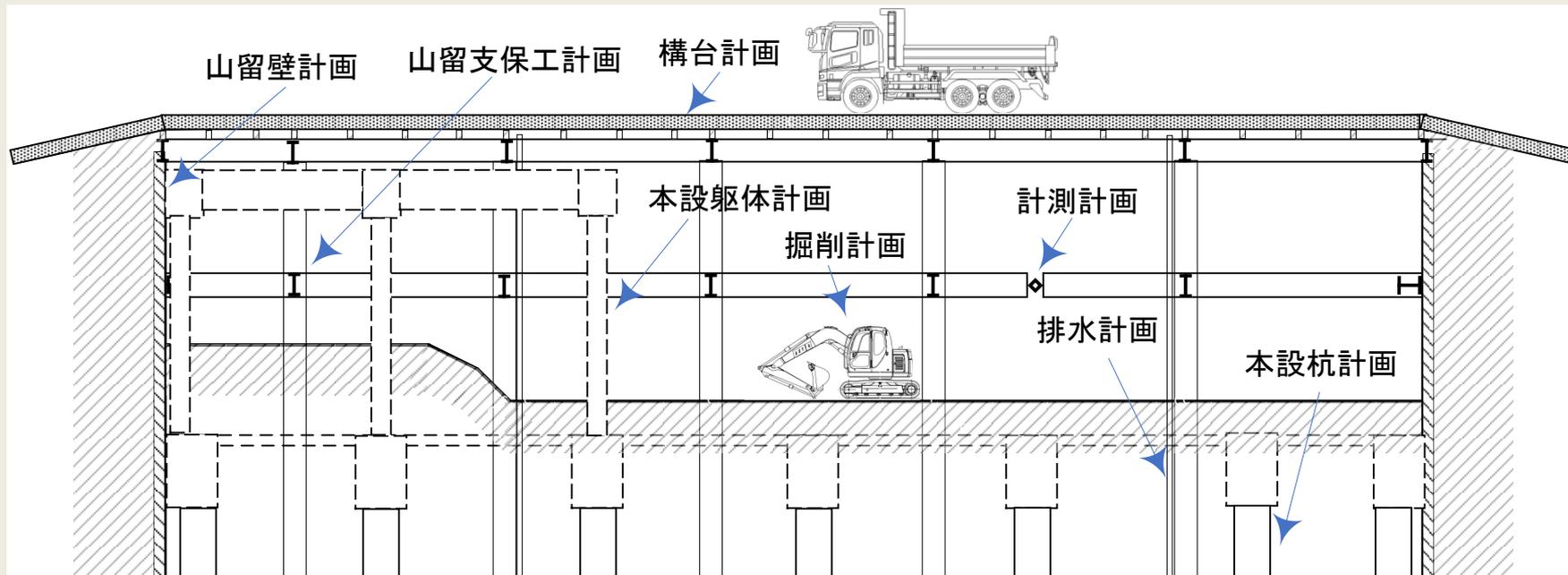


図 地下工事の模式図

表 計画項目間の影響関係

非影響項目 \ 影響項目	1	2	3	4	5	6	7	8
	山留壁計画	山留支保工計画	本設杭計画	構台計画	掘削計画	排水計画	計測計画	地下躯体計画
1. 山留壁計画		0.09			0.01	0.06	0.04	
2. 山留支保工計画	0.05			0.02	0.04	0.02	0.04	0.05
3. 本設杭計画	0.03	0.03		0.01	0.01			0.02
4. 構台計画		0.03			0.04		0.01	
5. 掘削計画	0.03	0.06	0.04	0.04		0.04	0.01	0.05
6. 排水計画	0.05	0.06			0.03		0.01	0.02
7. 計測計画								
8. 地下躯体計画		0.06	0.04	0.02	0.03	0.06	0.01	
他の項目に影響されない割合	0.14	0.13	0.26	0.76	0.50	0.50	0.78	0.28



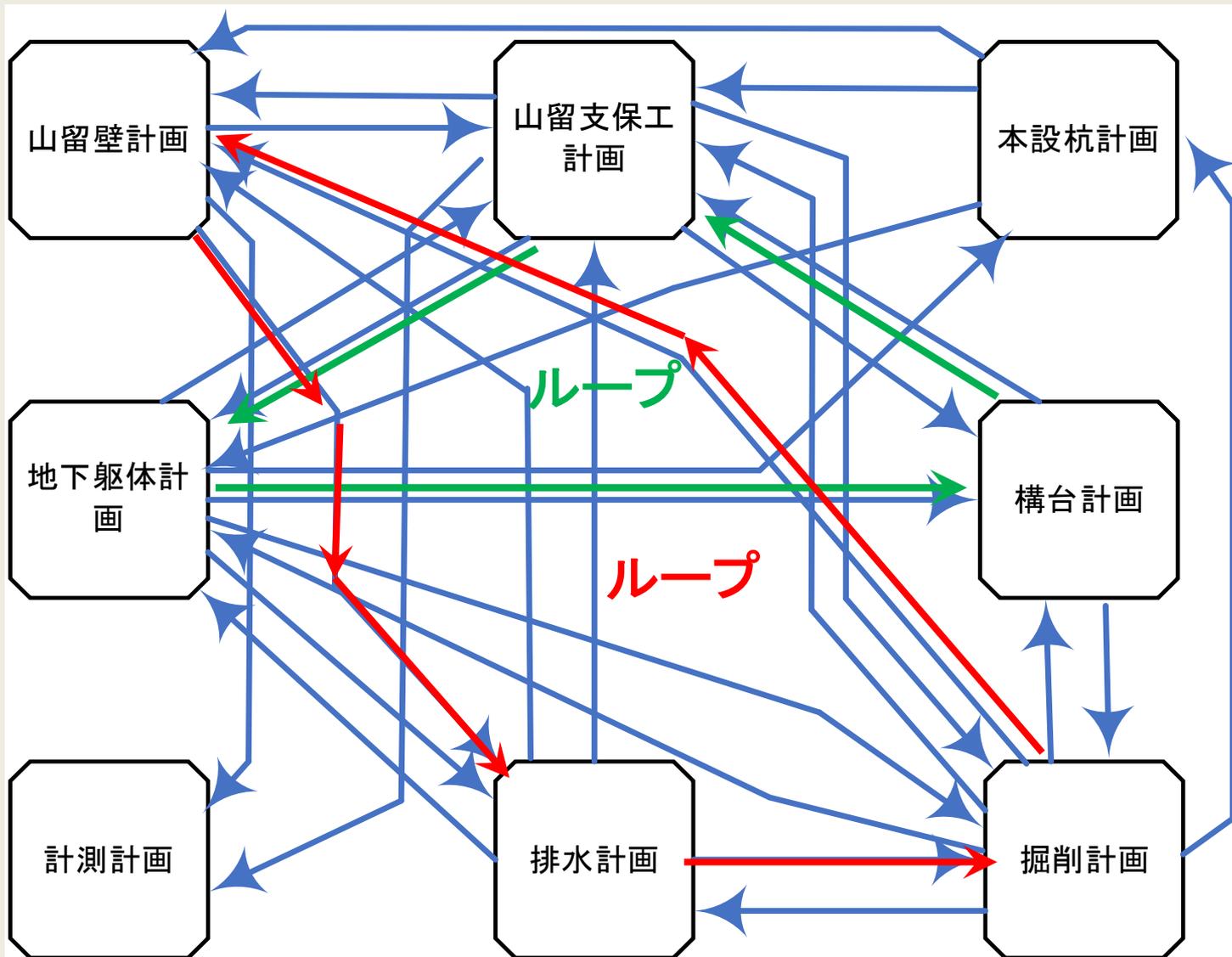
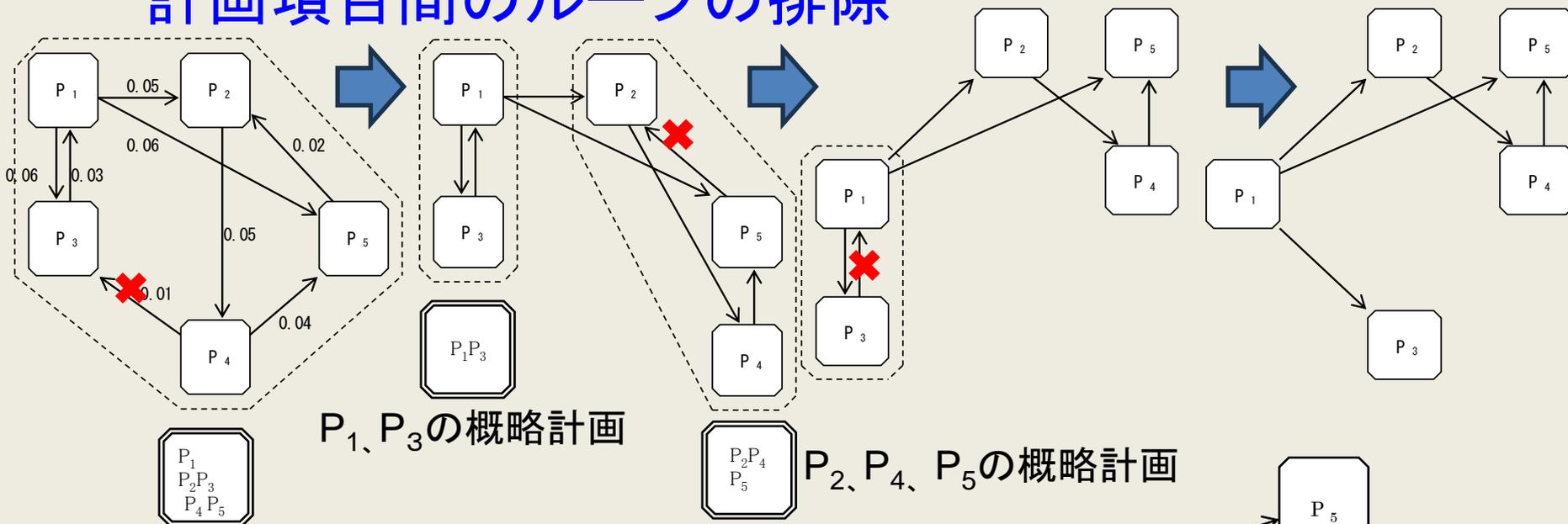


図 地下工事における計画項目間のループ

計画項目間のループの排除

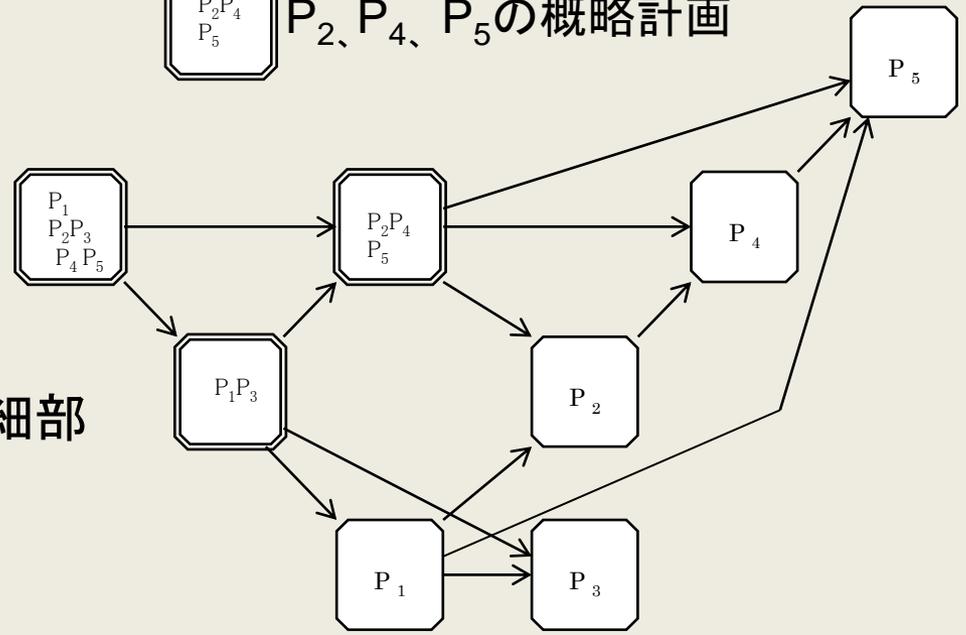


P₁、P₃の概略計画

P₂、P₄、P₅の概略計画

P₁~P₅の概略計画

計画全体を検討しながら、細部の計画を立案する。



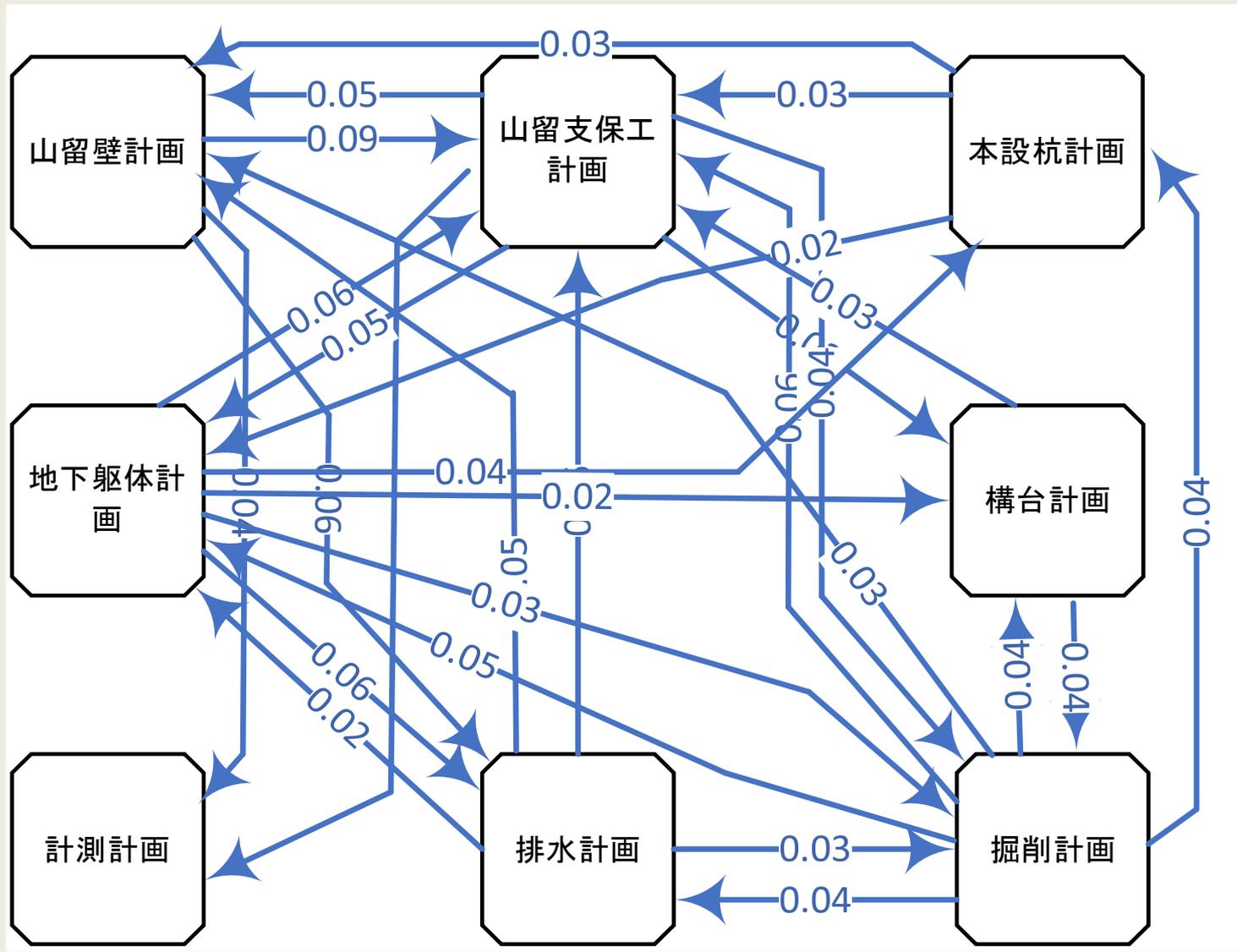


図 地下工事における計画項目間のループ

まず、全体の計画を概略的に立案し、その後、部分を取り出し詳細に計画する。

→ 割り付け方式による計画手順

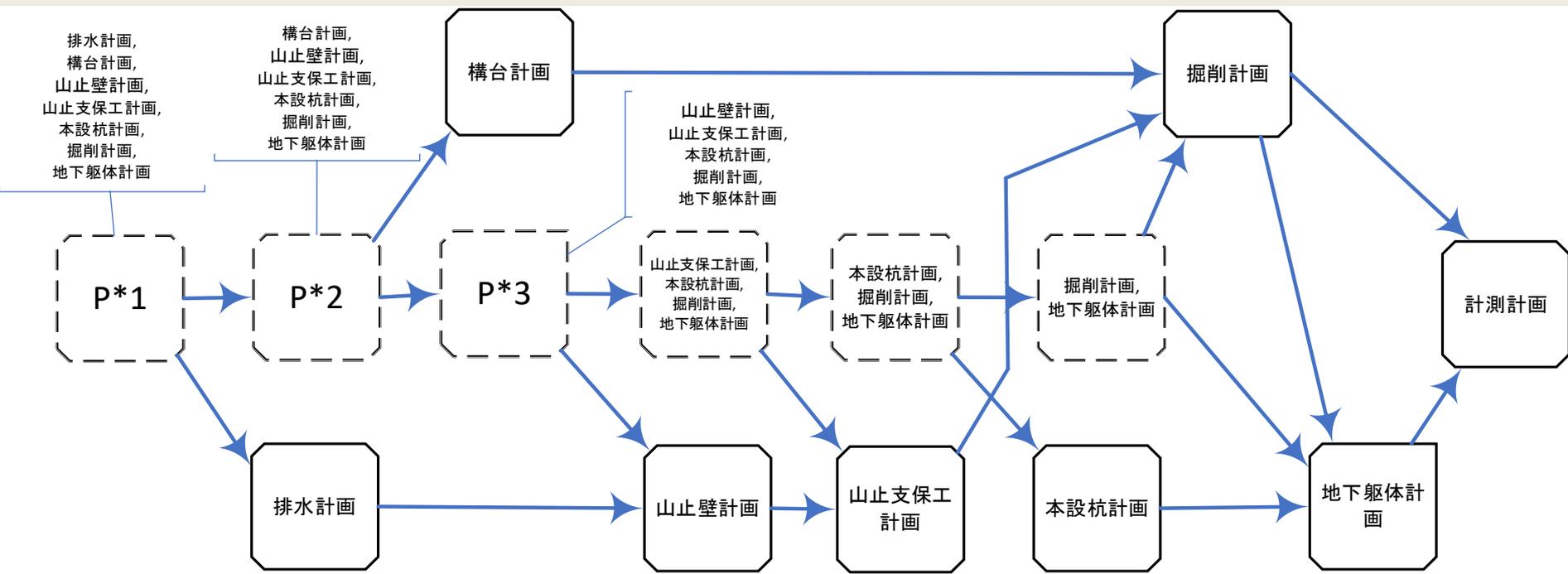


図 地下工事における計画手順の解析

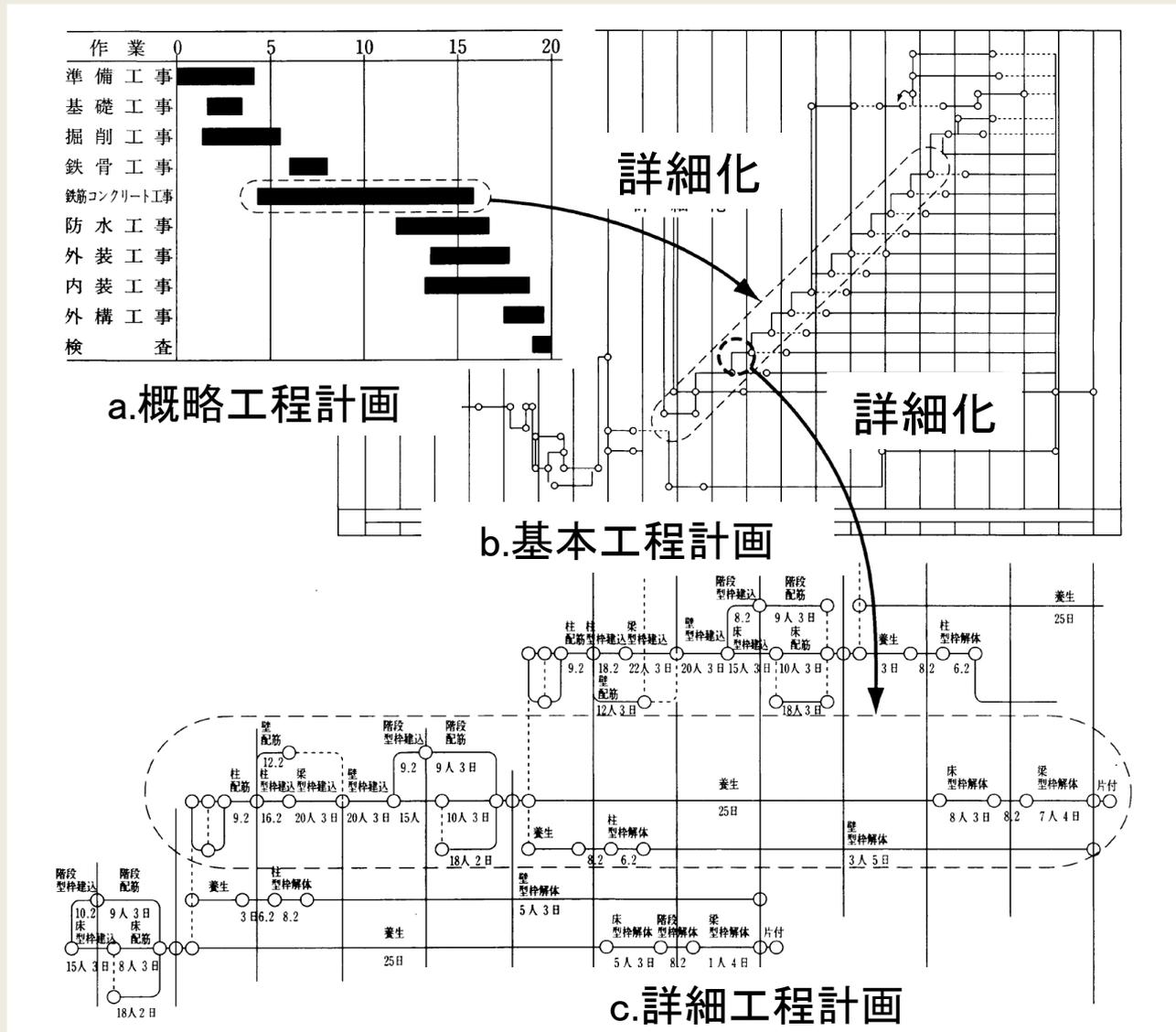
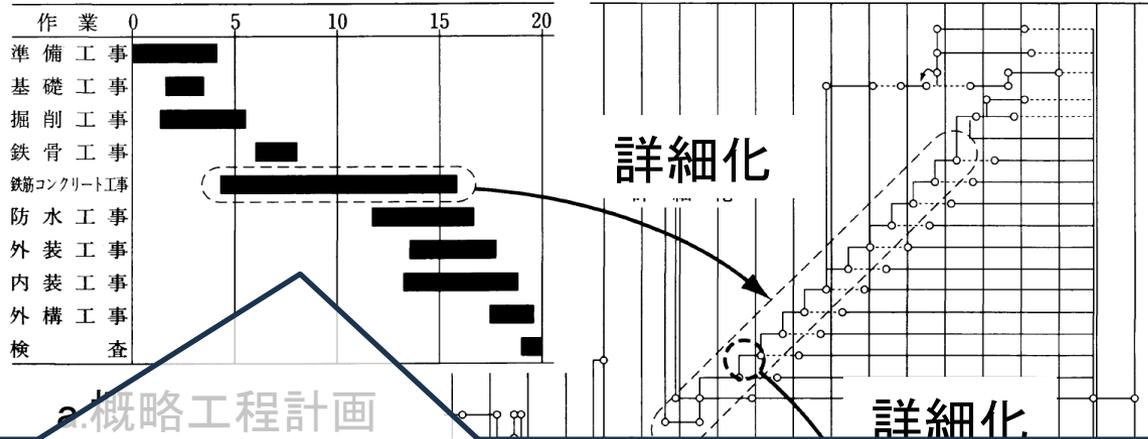


図 工程計画の立案手順



多段階計画法の研究

嘉納成男: 工程計画における多段階計画法、建築生産と管理技術シンポジウム、pp81-84、1985、日本建築学会

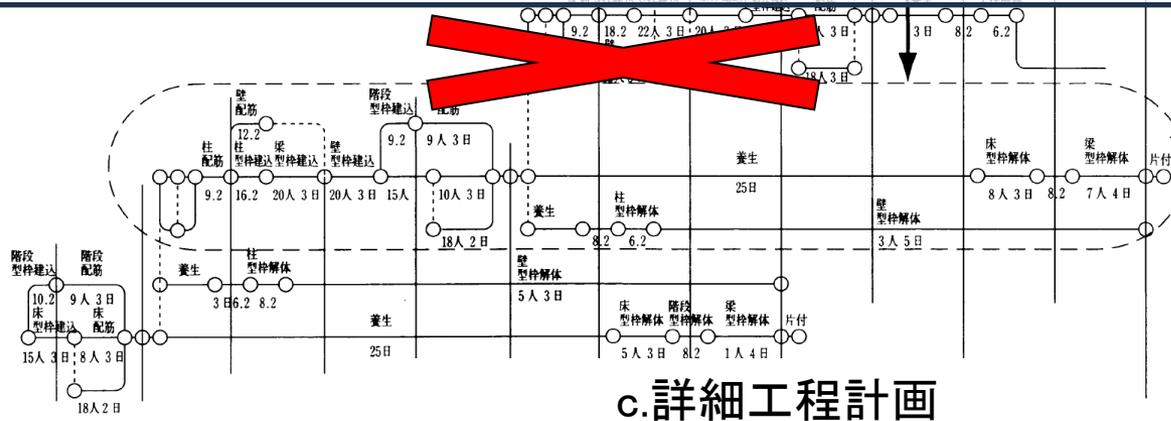


図 工程計画の立案手順



図 工程計画の立案手順

実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

施工モデルの表現方法

(1) 嘉納成男: 作業の活動を中心とした施工モデルの表現方法 施工シミュレーションモデルに関する研究、計画系論文集、pp1569-1578、2017.06、日本建築学会

新たな工事の計画案

コンクリート打設作業をどの様に表現すればよいか。

この写真から何が見えるのか？



図 コンクリート打設作業

床コンクリート打設作業が見える。



工事現場では、何が見えるか？



作業者、圧送ホース、床型枠、床鉄筋が見える。

作業者A

作業者B

作業者C

作業者K

圧送ホース

床型枠

床鉄筋

生コンクリート



工事現場では、人、ものが見えている。



工事現場では、
 作業者、圧送ホース、床型枠、
 床鉄筋が見える。

工事現場に存在するのは、
 作業者、圧送ホース、床型枠、床鉄筋であり、
 → **実体要素** Instance Object
 床コンクリート打設作業は、
 上記の作業者ともものとの動きを概念的に示している。
 → **概念要素** Class Object (Conceptual Object)

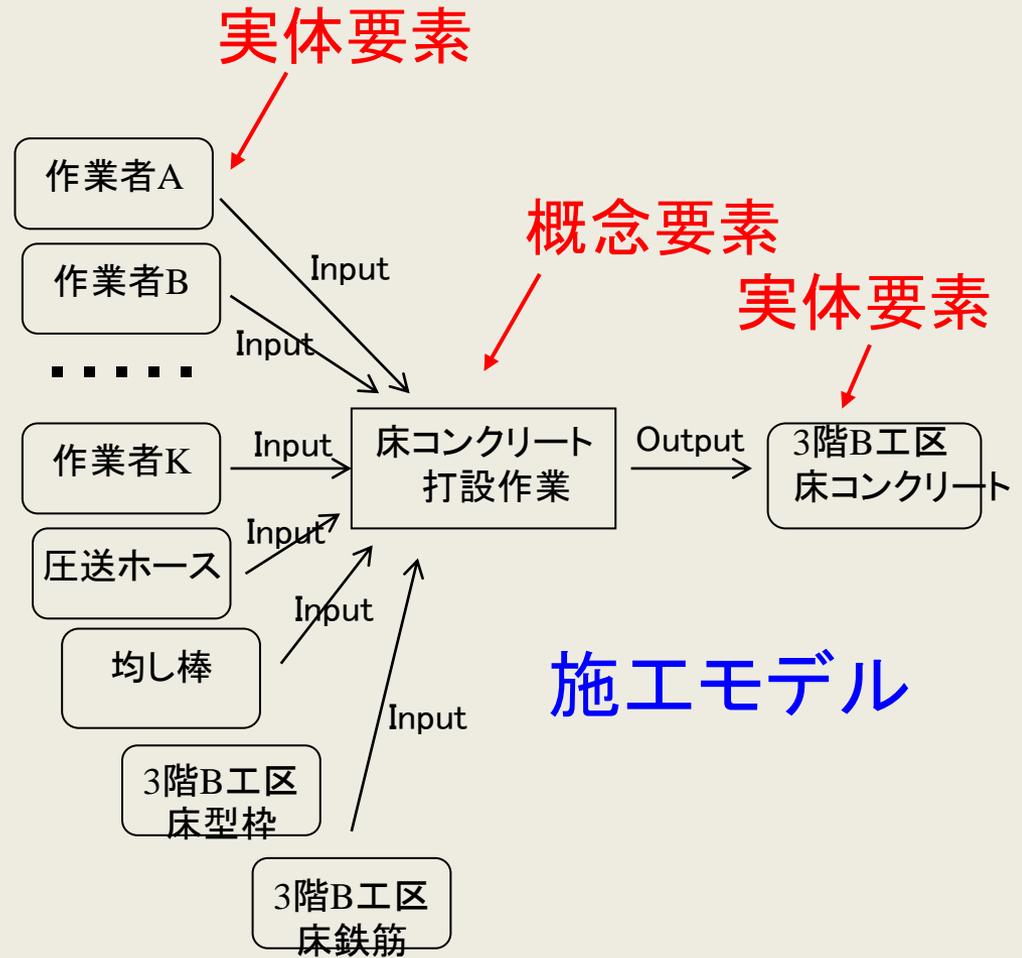
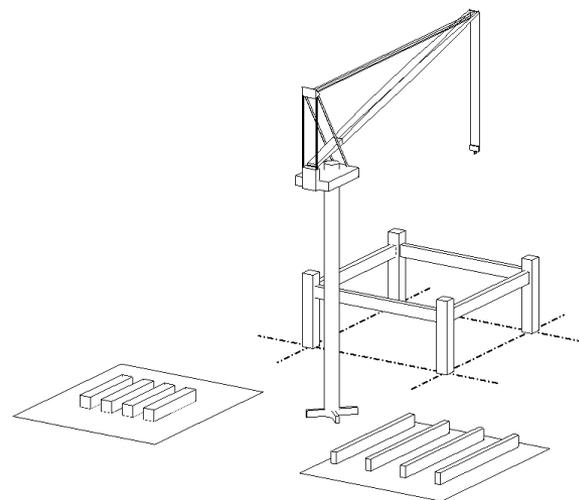


図 床コンクリート打設作業の施工モデル

施工モデルの構成

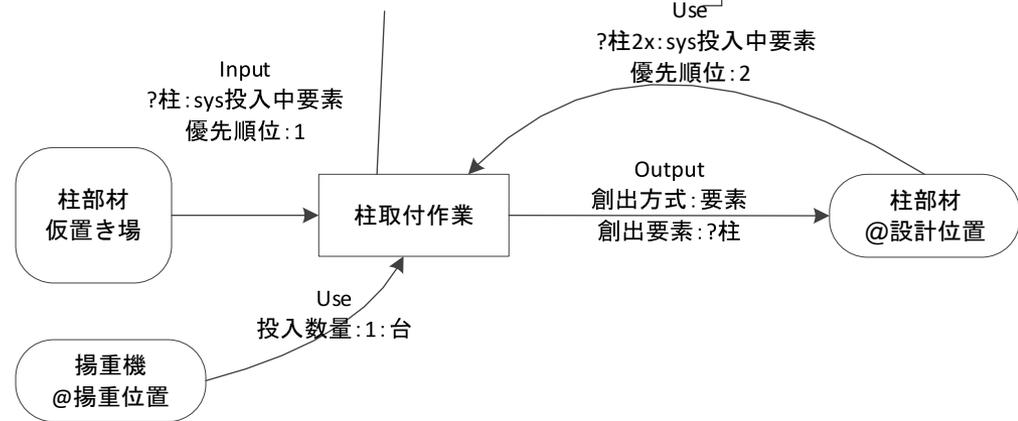
- (1) **図形式モデル(Visio)**
工程における作業の順序関係、投入・創出資源
- (2) **表形式モデル(Excel)**
各種の属性データ
- (3) **3次元CADモデル**
設計図書、総合仮設計画図(部材、仮設の3次元位置)
- (4) **If-Thenルールモデル**
比較的定式化された情報(作業の順序、法規、基準)



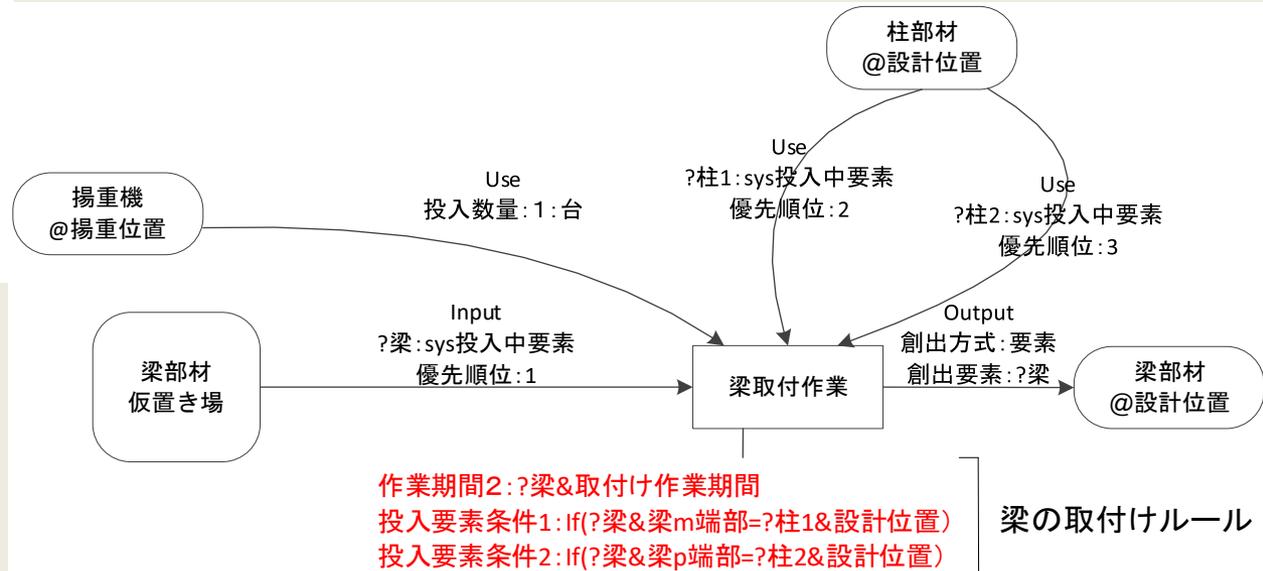


クレーンと部材

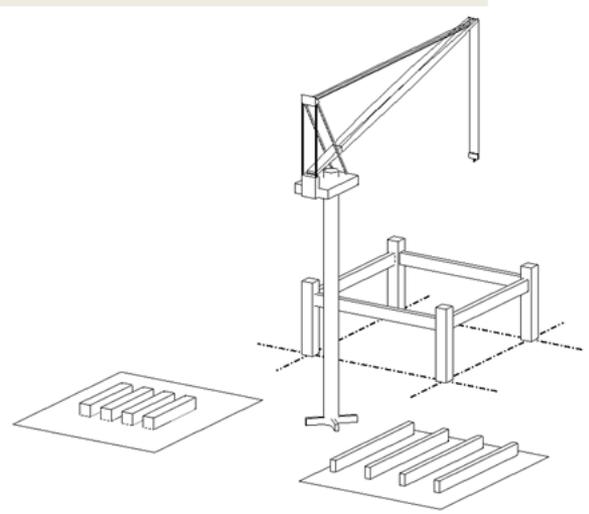
投入要素条件1-1:If(?柱&設計位置XY=?柱2x&設計位置XY)
 投入要素条件1-2:If(Item(GetBackwardLabel(階;(?柱&階));1)=?柱2x&階))) } 柱の取付けルール



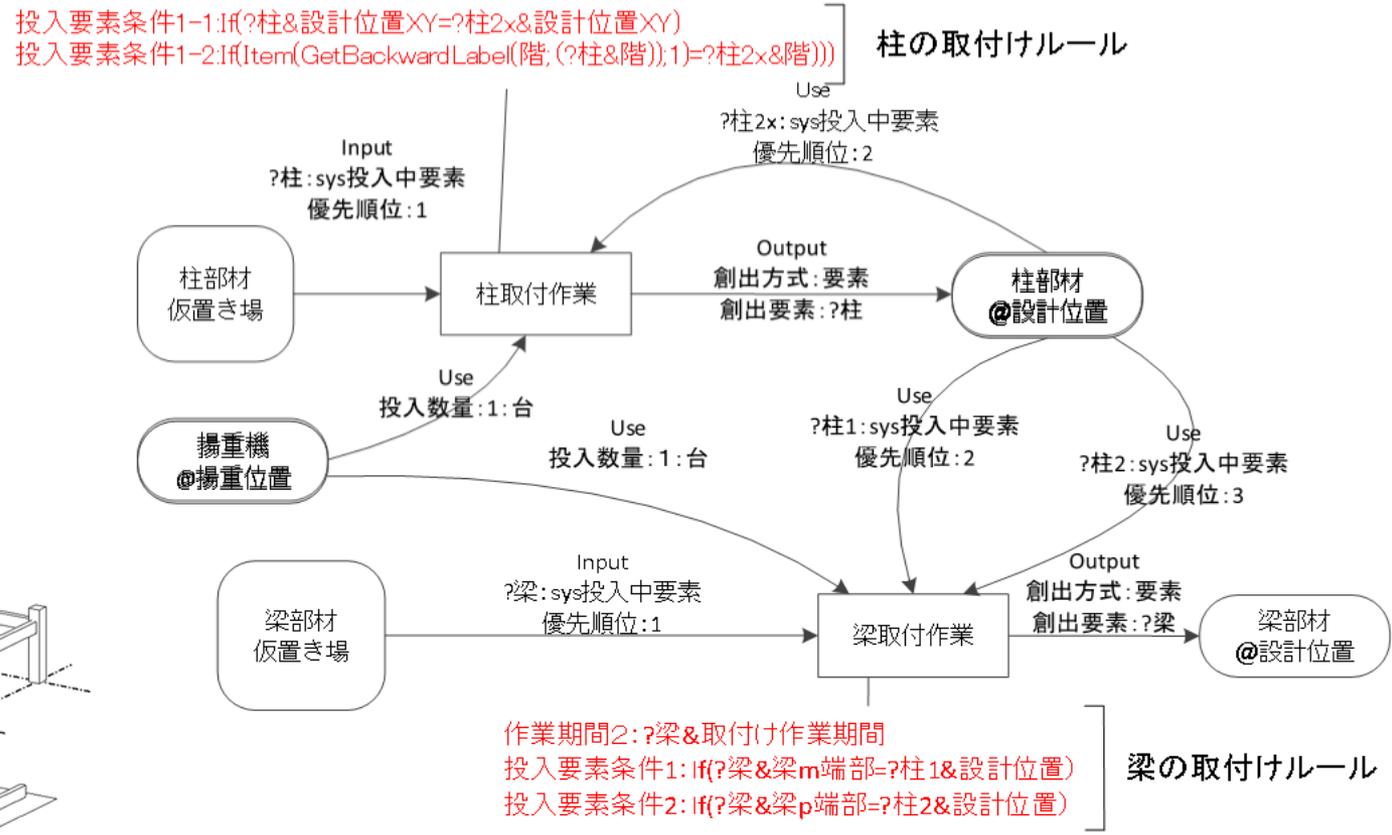
柱PCa取付作業の施工モデル



梁PCa取付作業の施工モデル

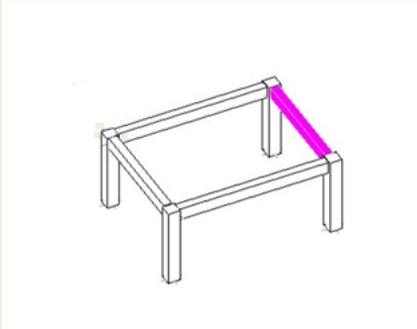


クレーンと部材

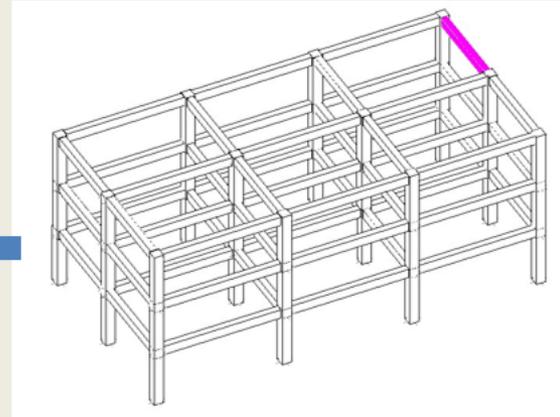
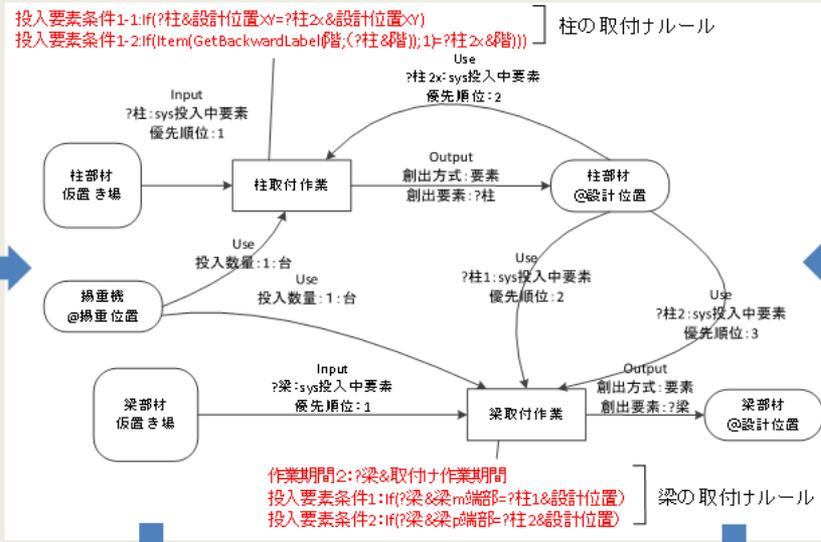


柱PCaと梁PCa取付作業の工程の施工モデル



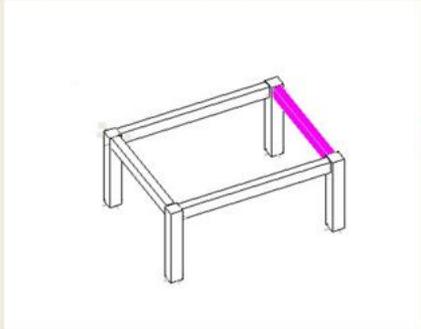


最小部材モデル

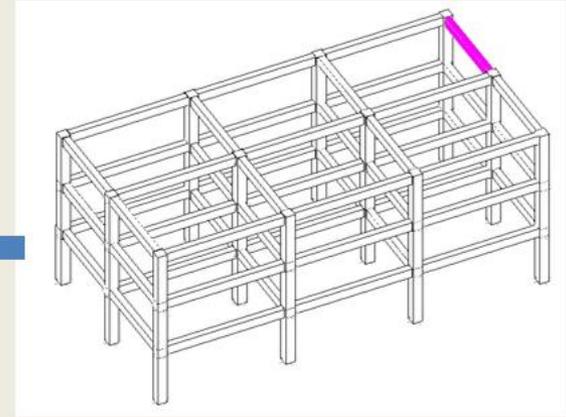
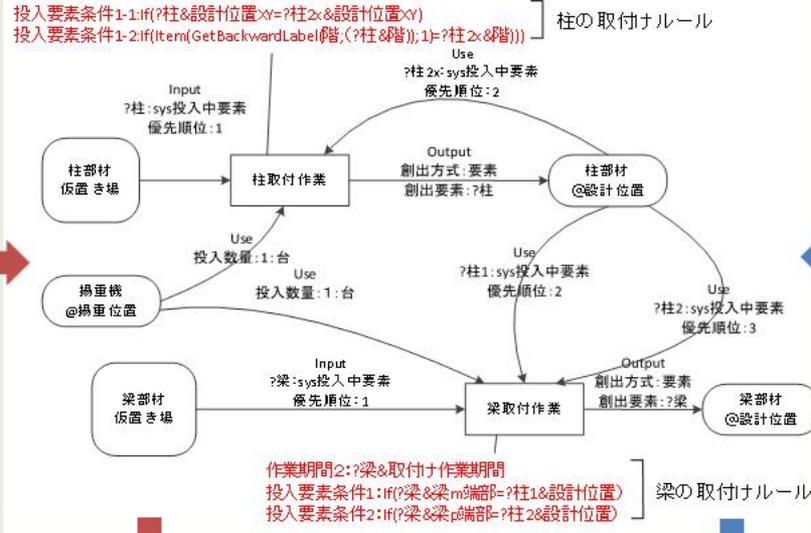


3層部材モデル

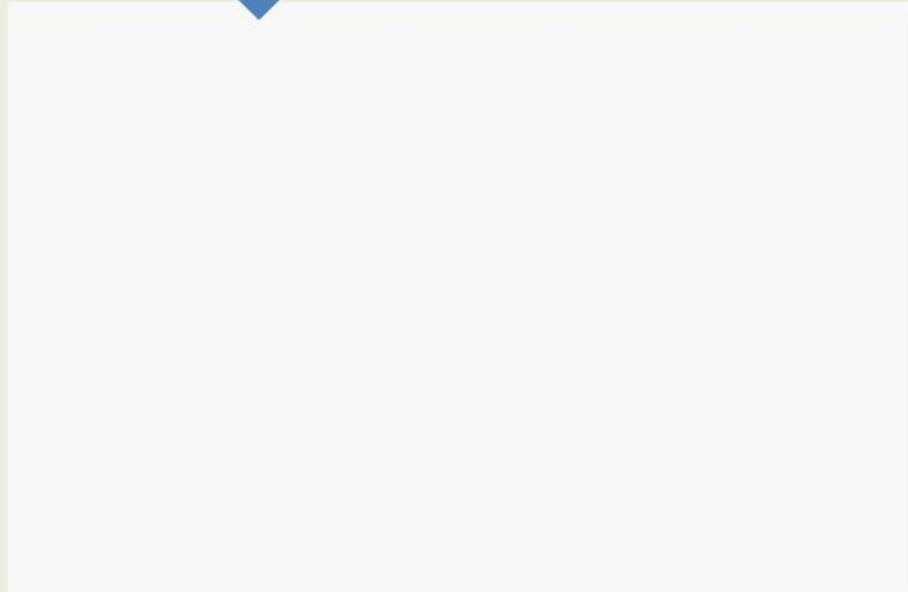
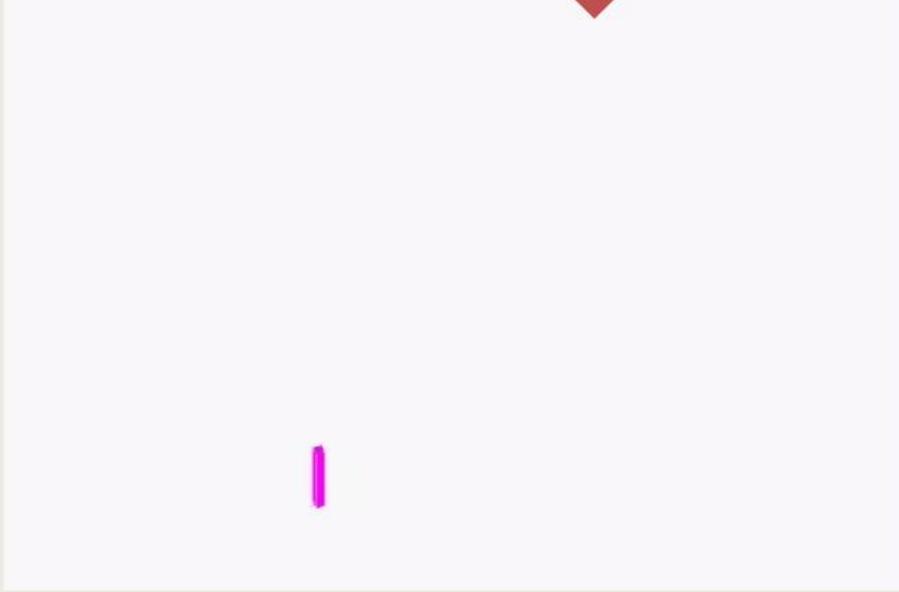


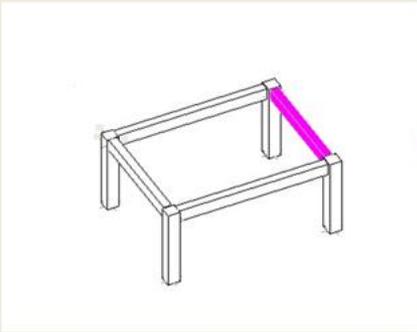


最小部材モデル

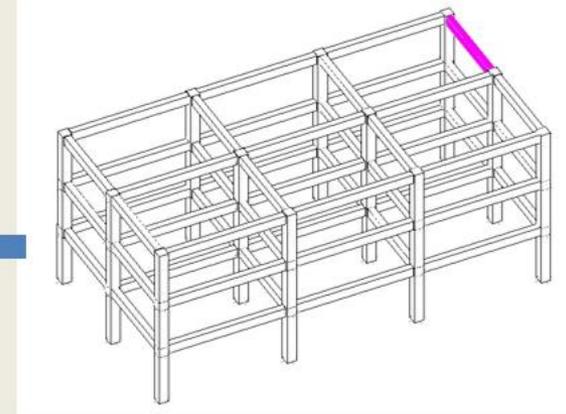
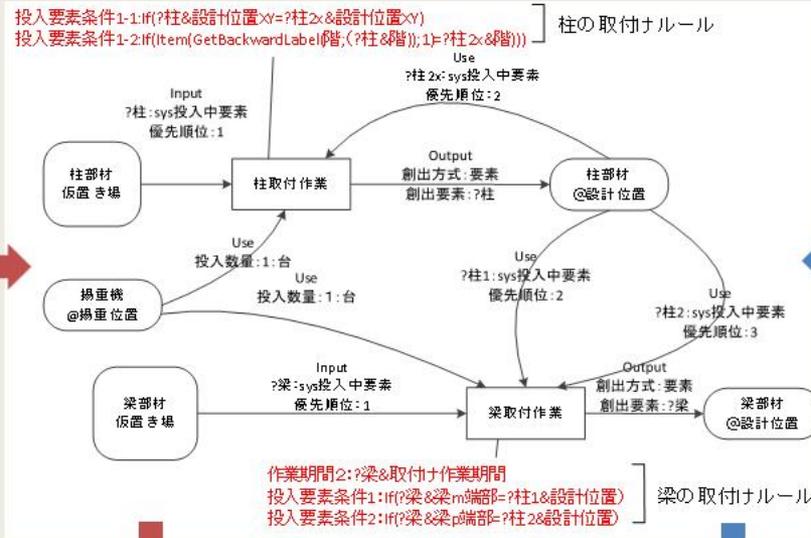


3層部材モデル

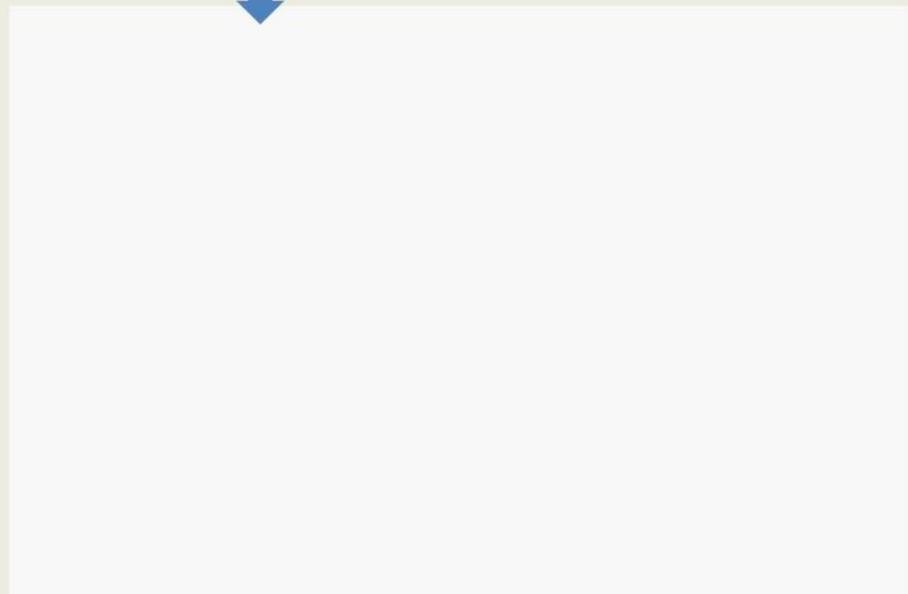
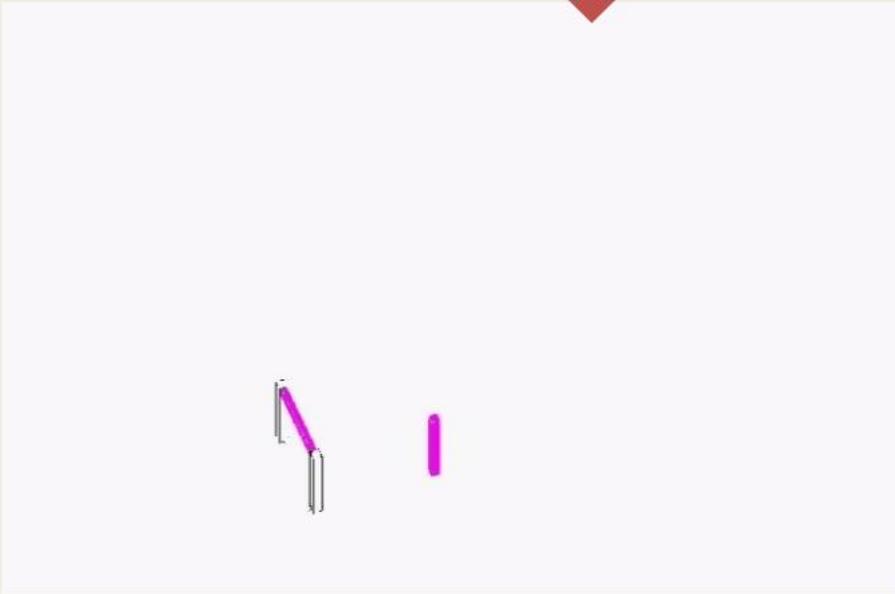


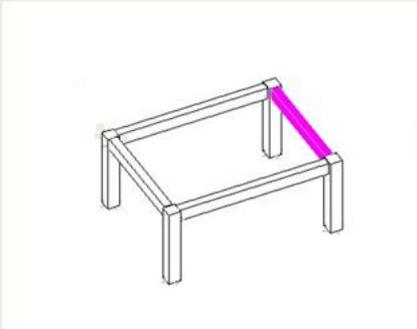


最小部材モデル

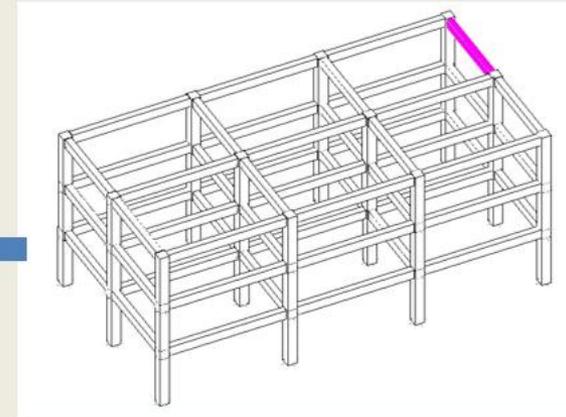
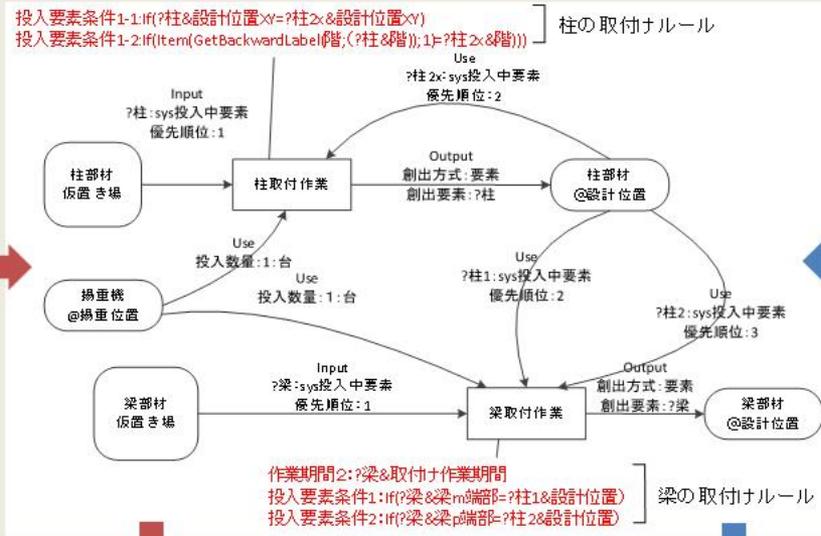


3層部材モデル

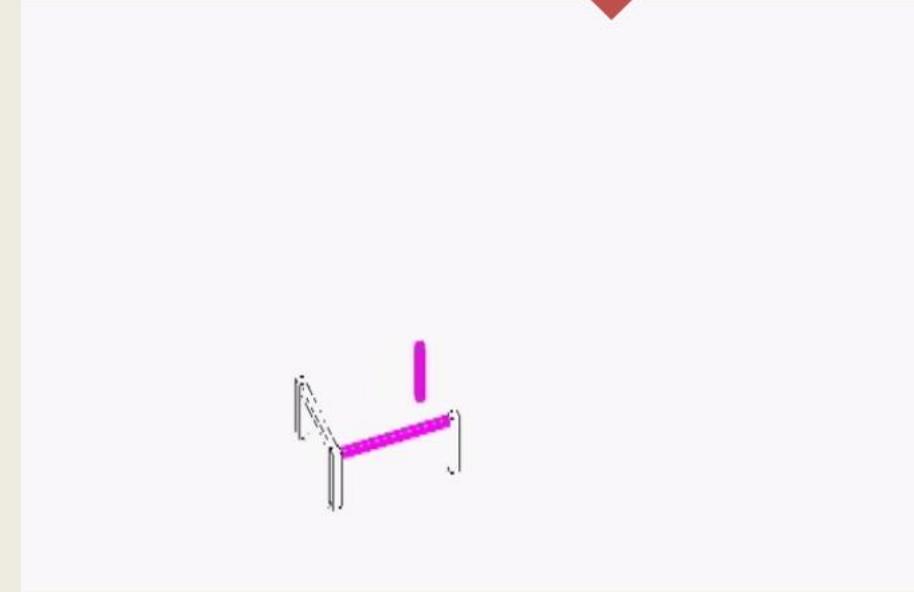


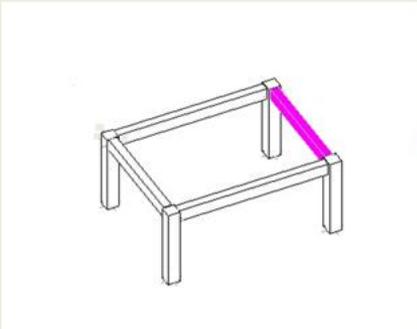


最小部材モデル

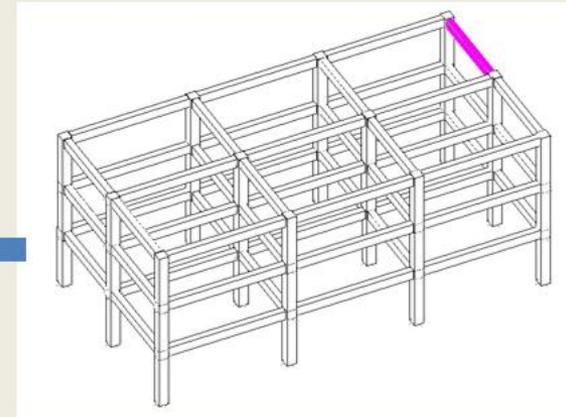
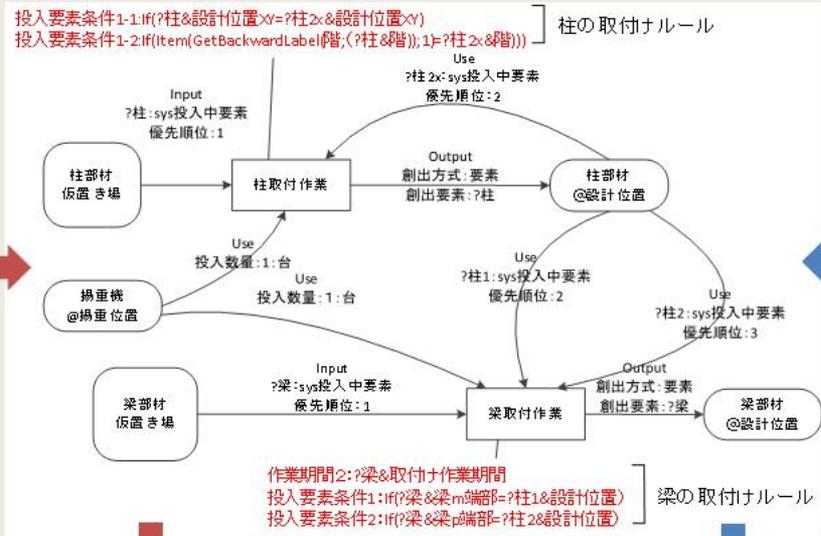


3層部材モデル

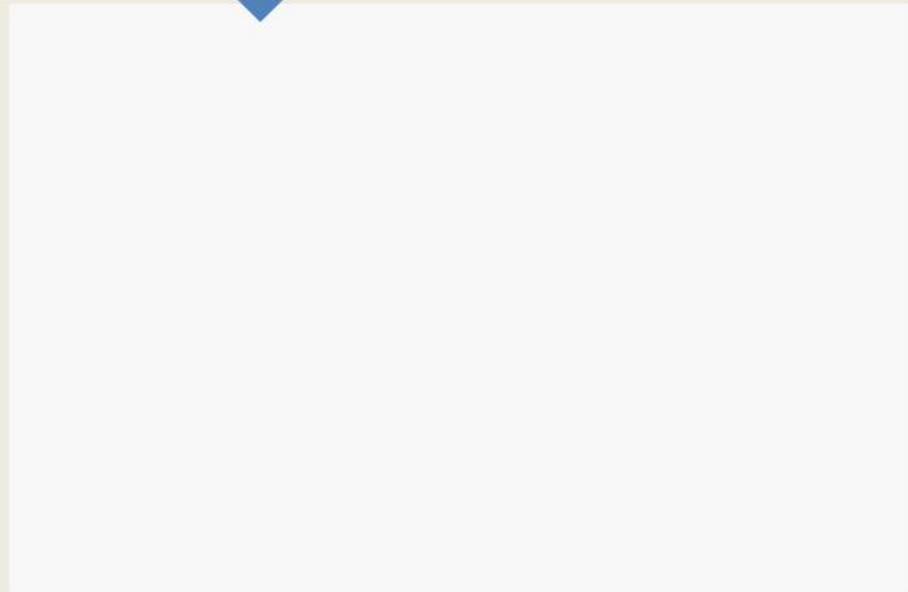
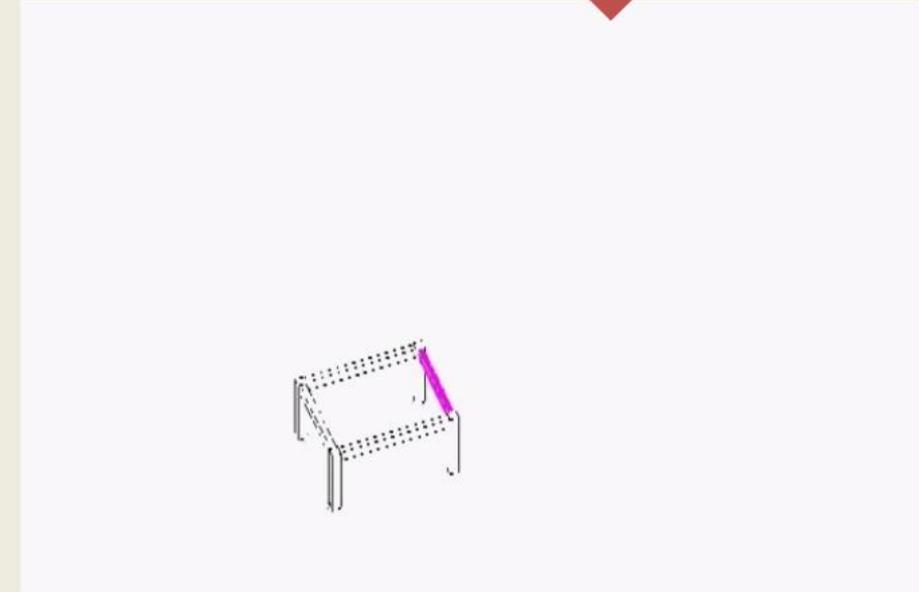


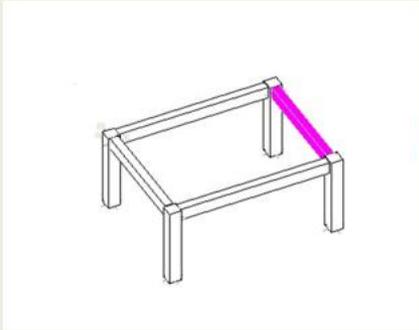


最小部材モデル

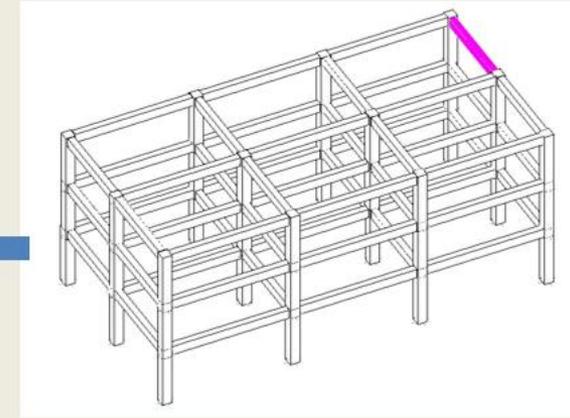
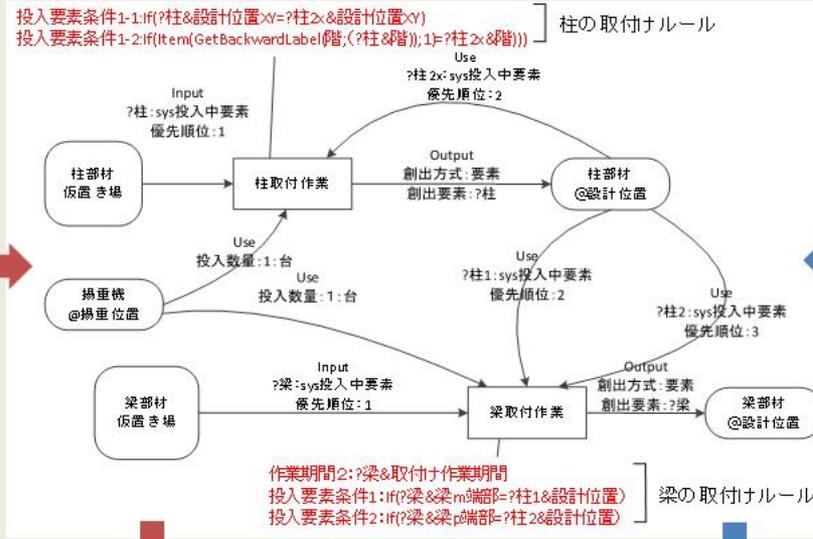


3層部材モデル

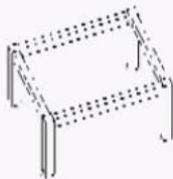


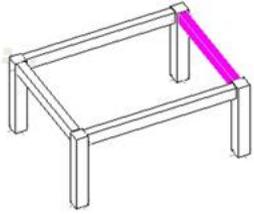


最小部材モデル

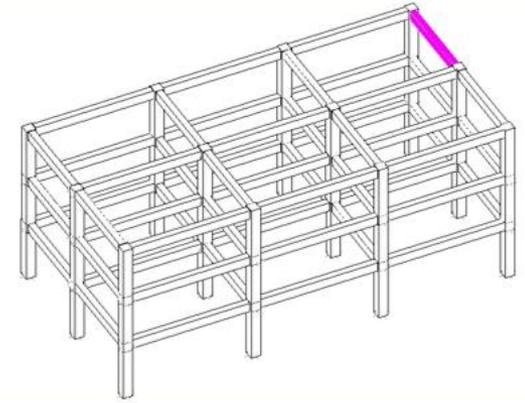
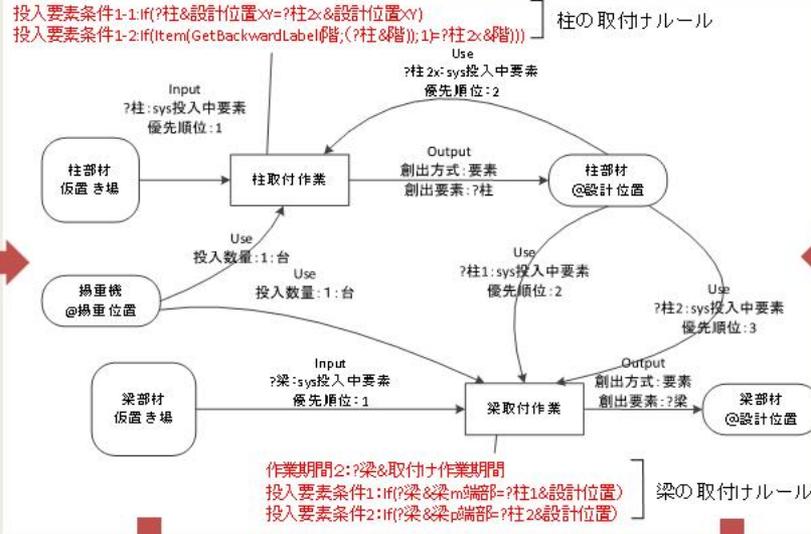


3層部材モデル



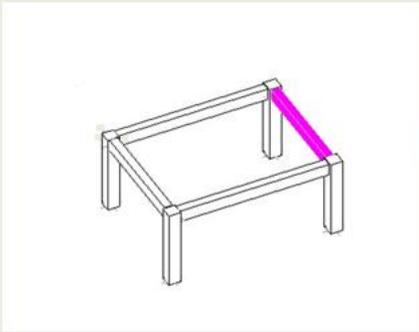


最小部材モデル

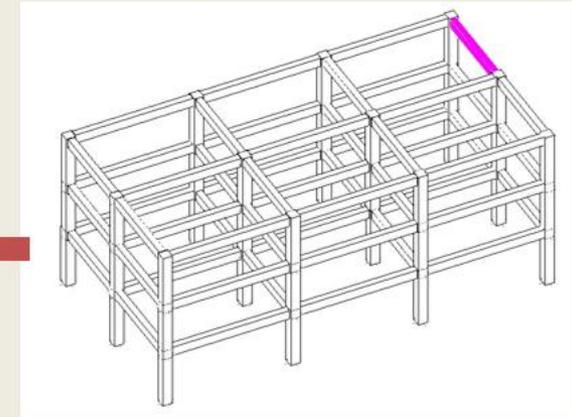
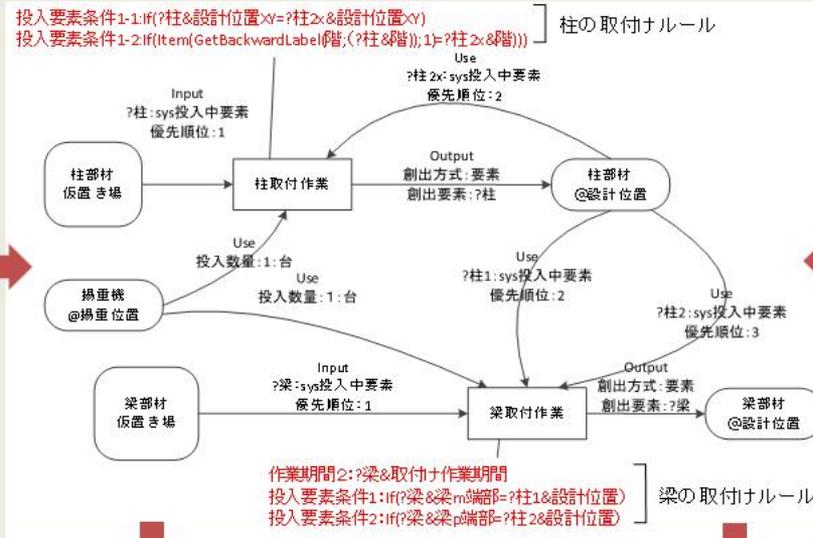


3層部材モデル

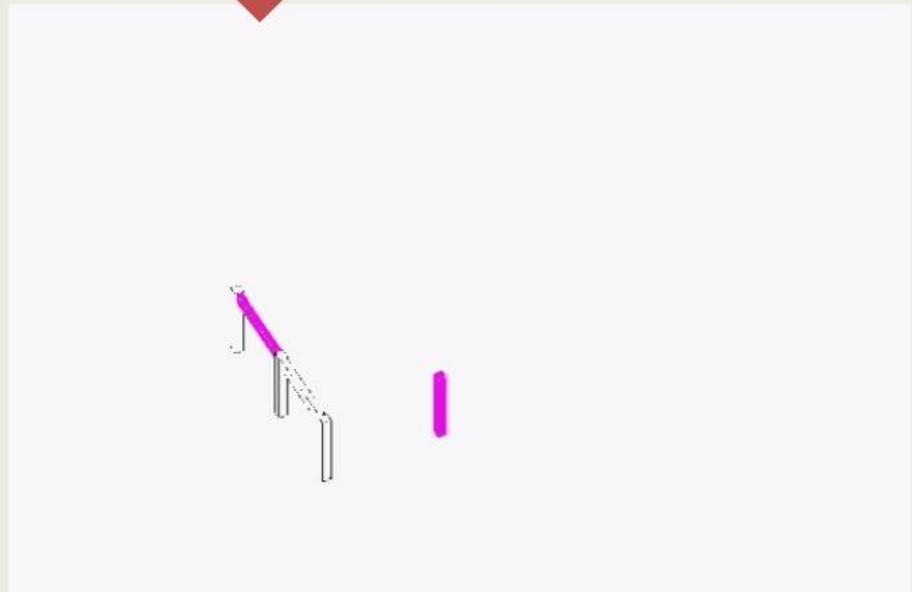
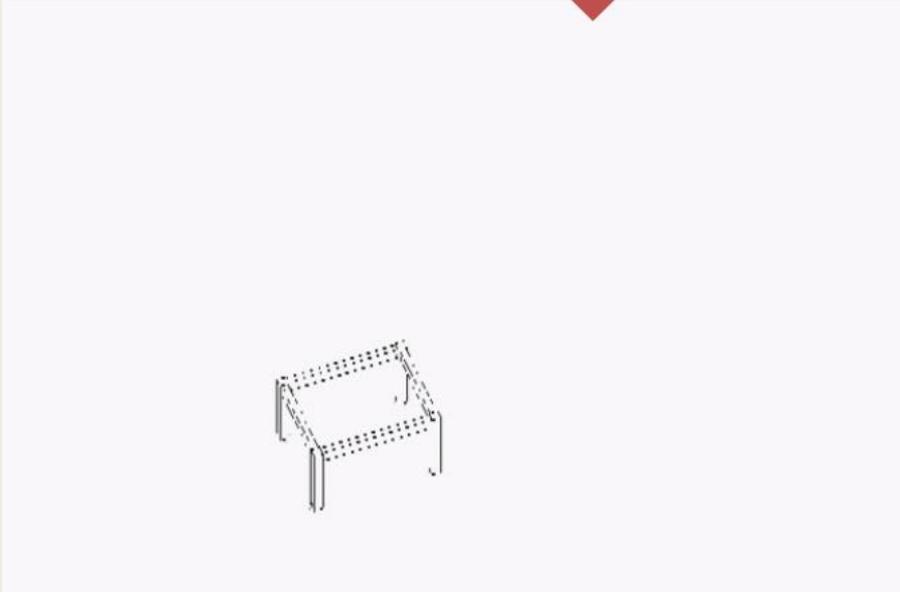


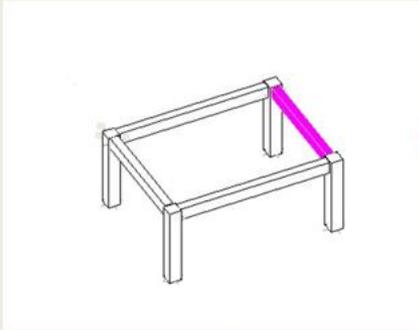


最小部材モデル

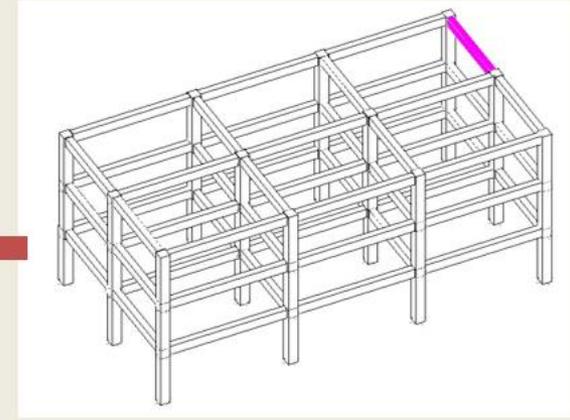
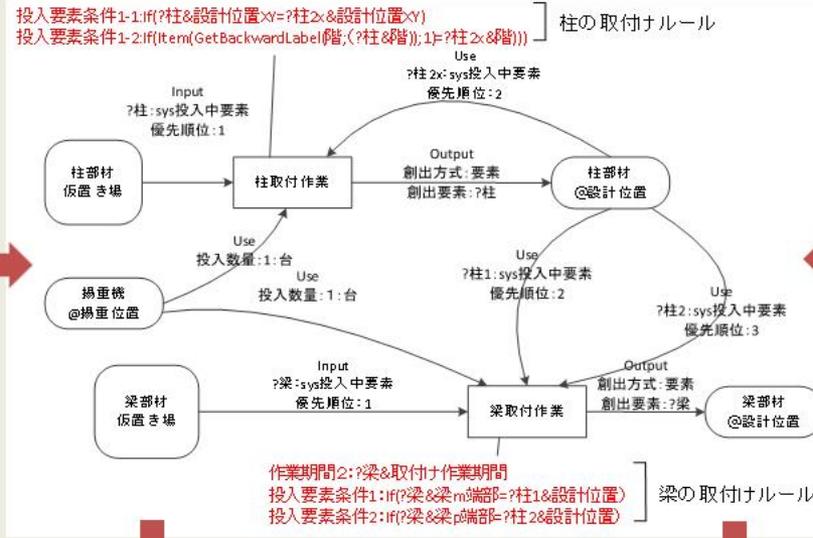


3層部材モデル

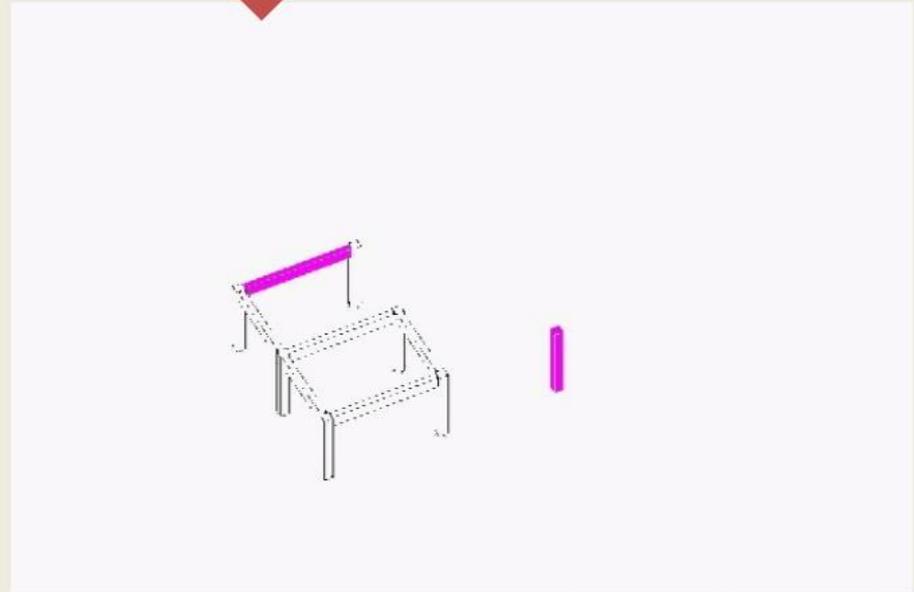
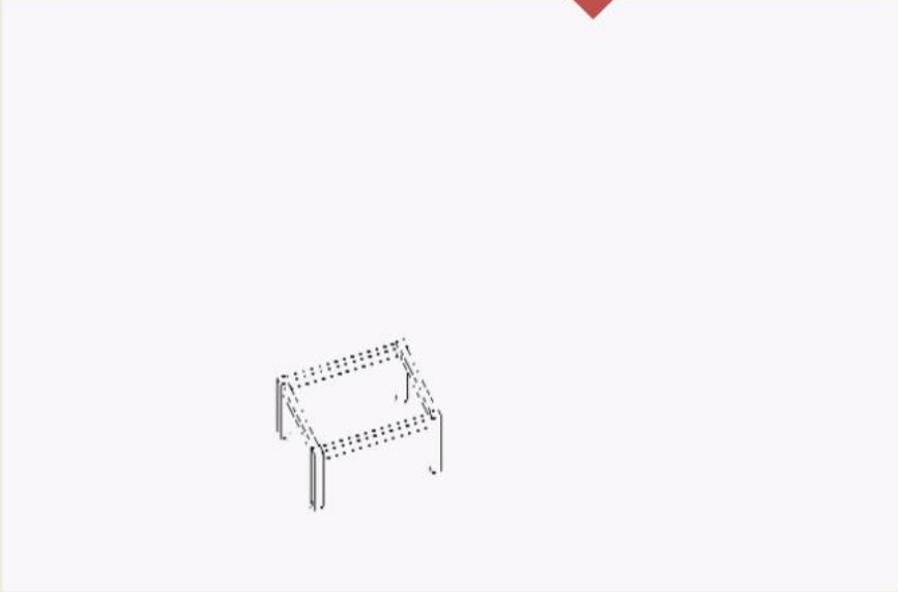


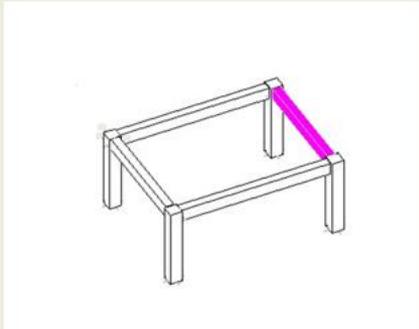


最小部材モデル

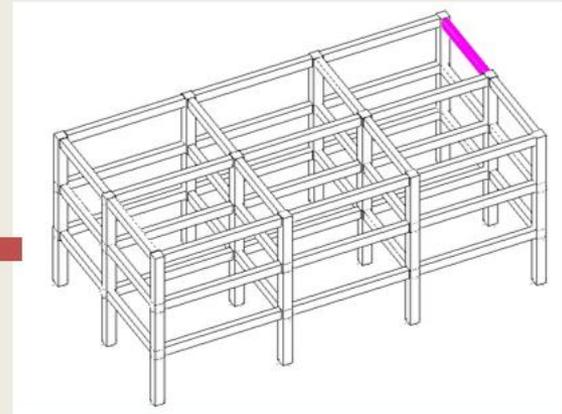
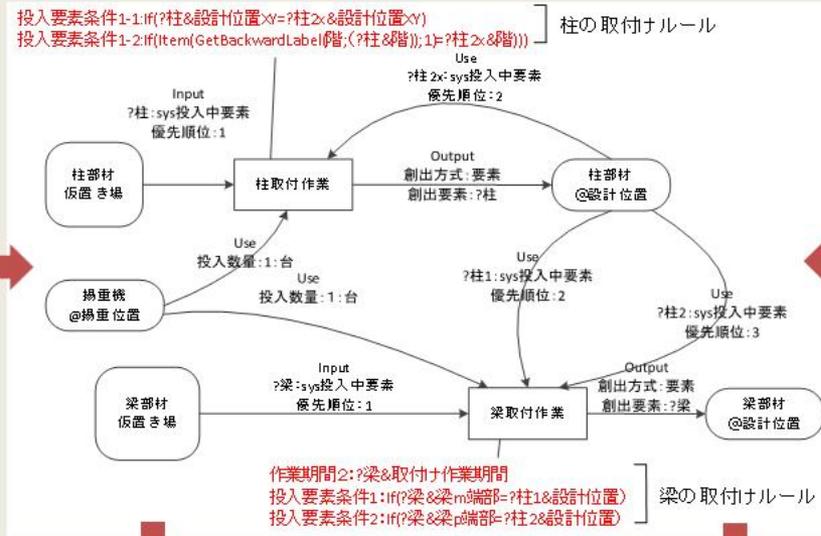


3層部材モデル

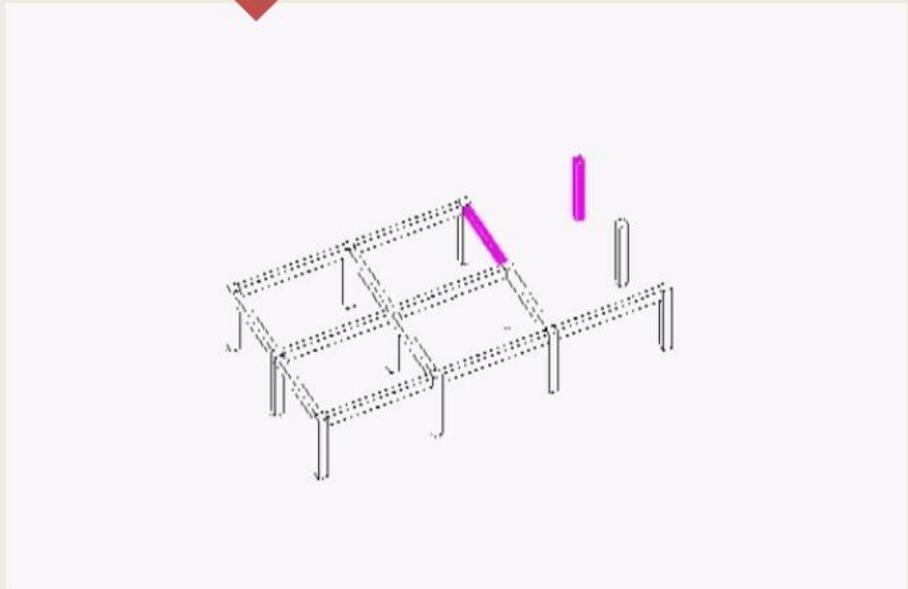
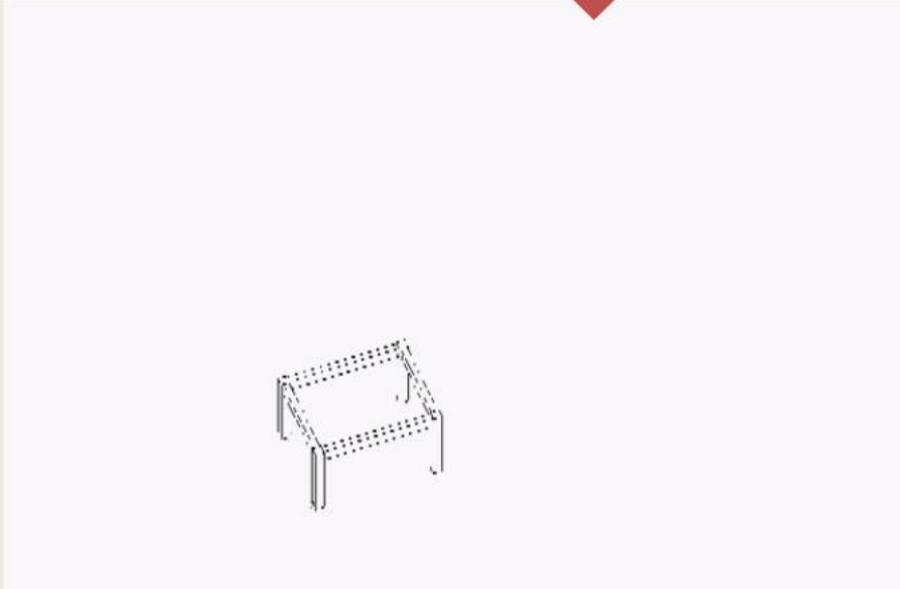


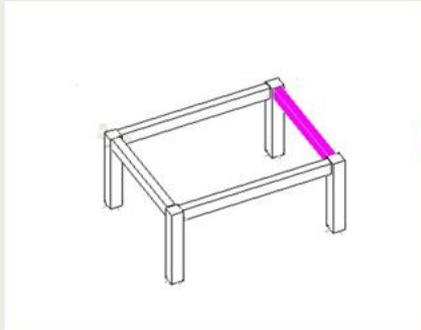


最小部材モデル

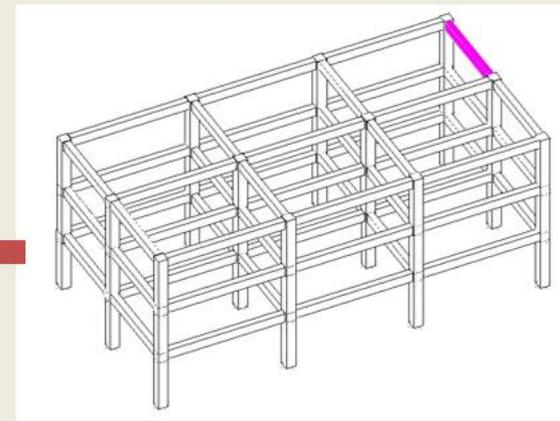
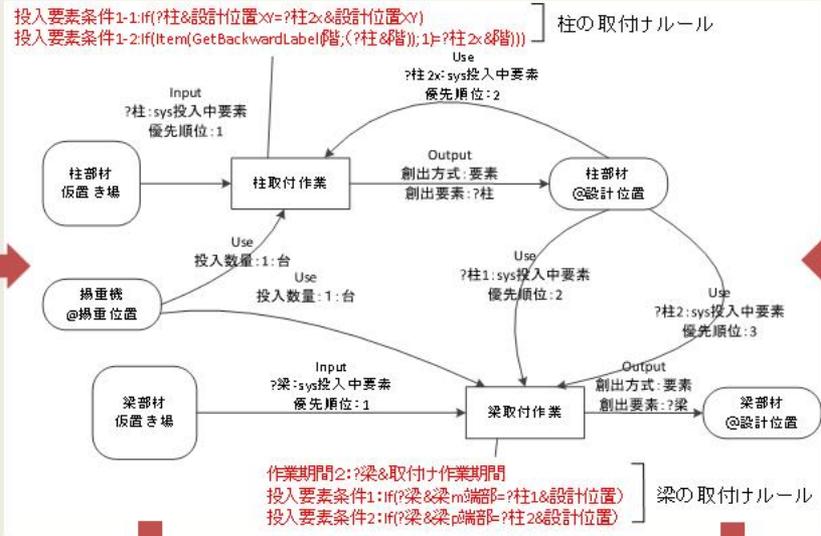


3層部材モデル

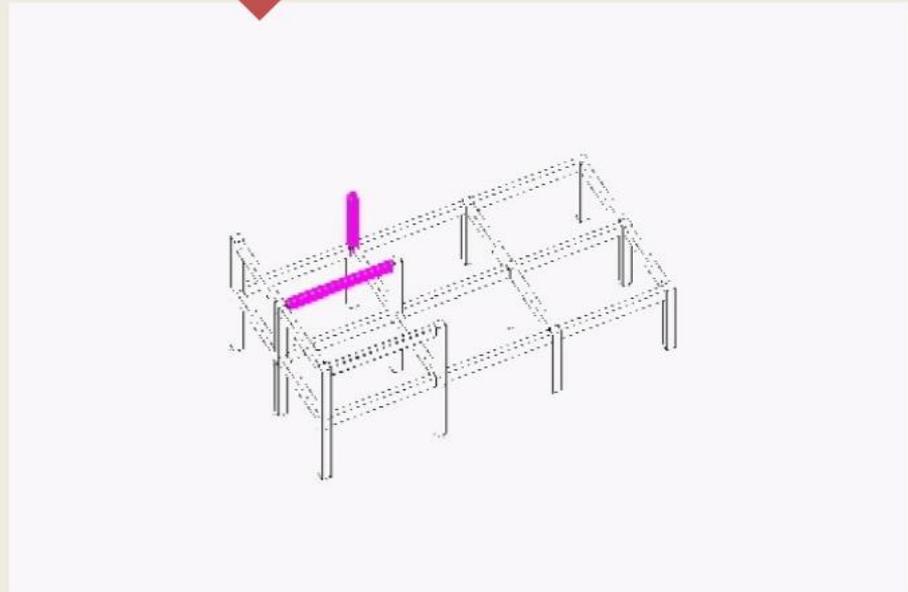
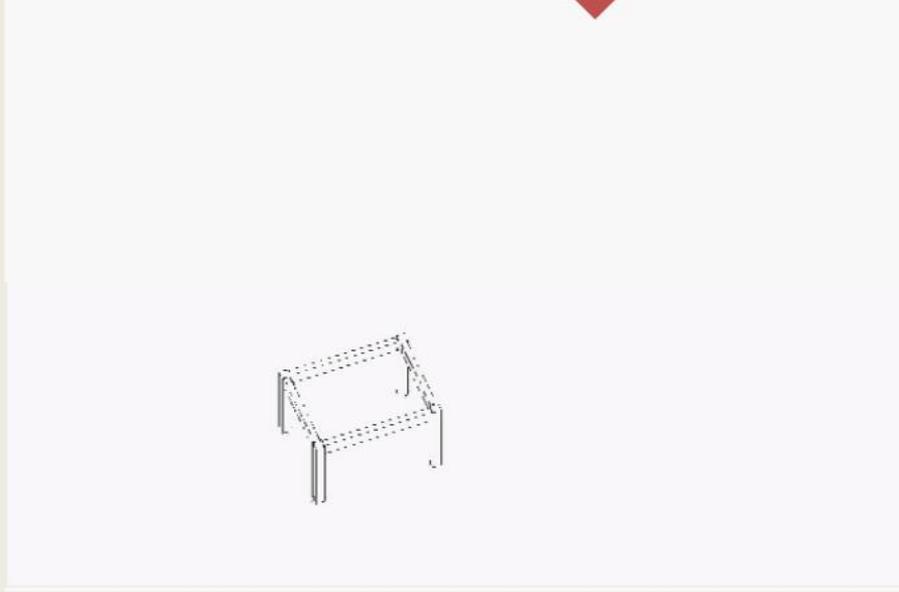


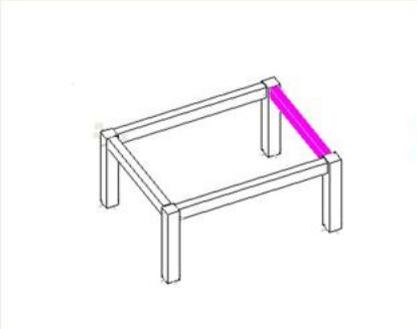


最小部材モデル

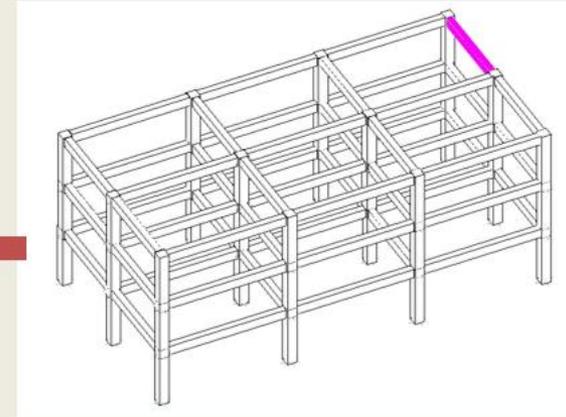
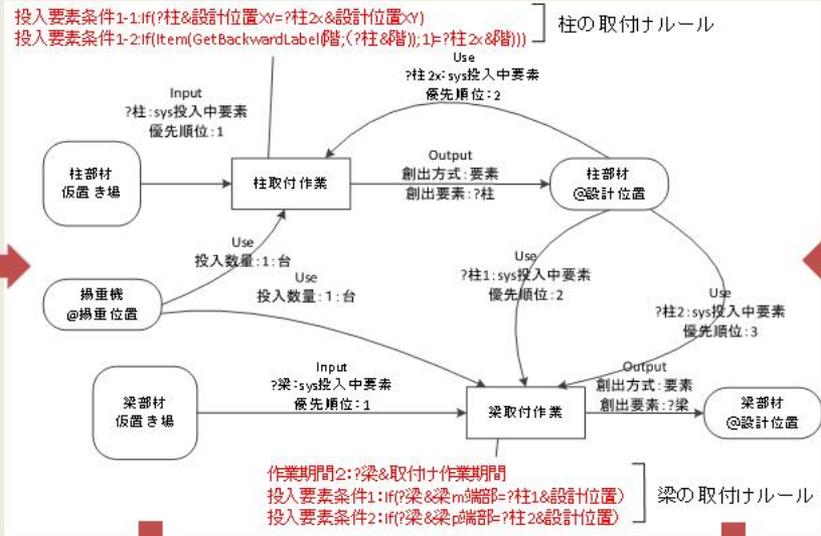


3層部材モデル

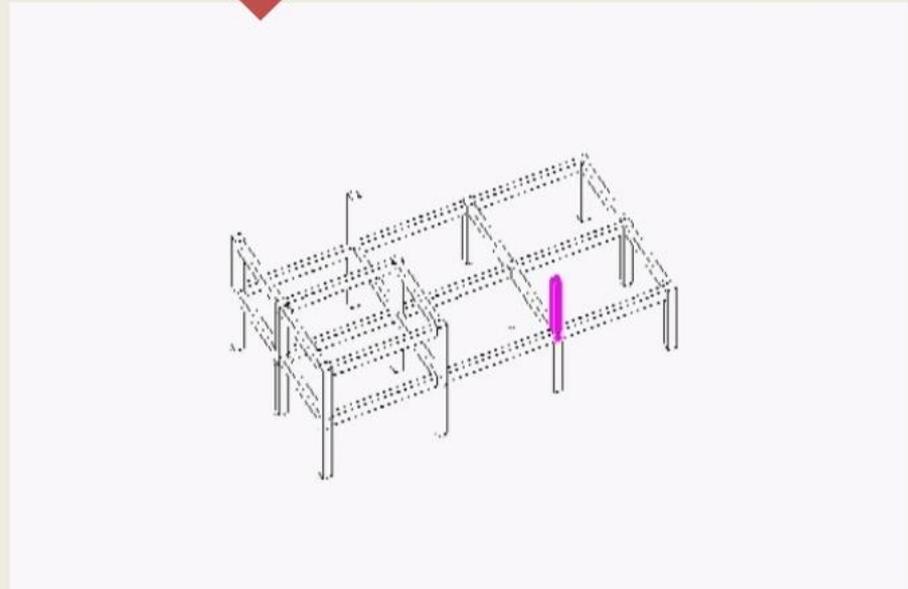
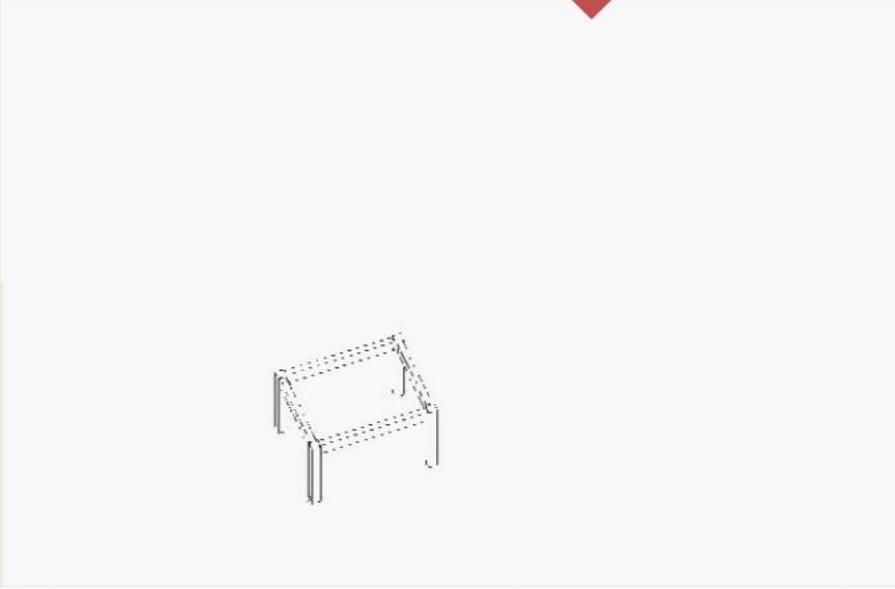


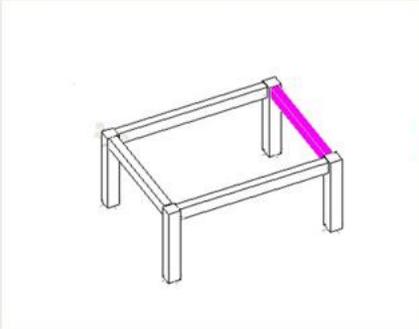


最小部材モデル

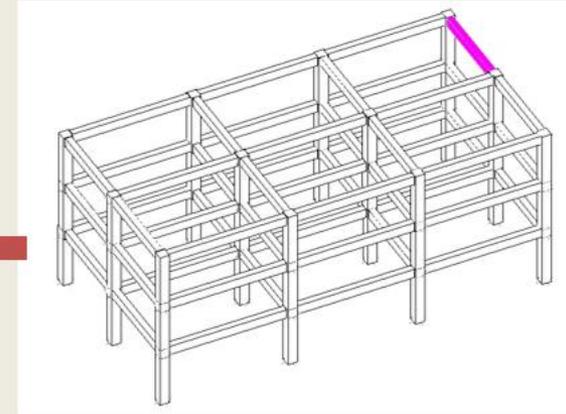
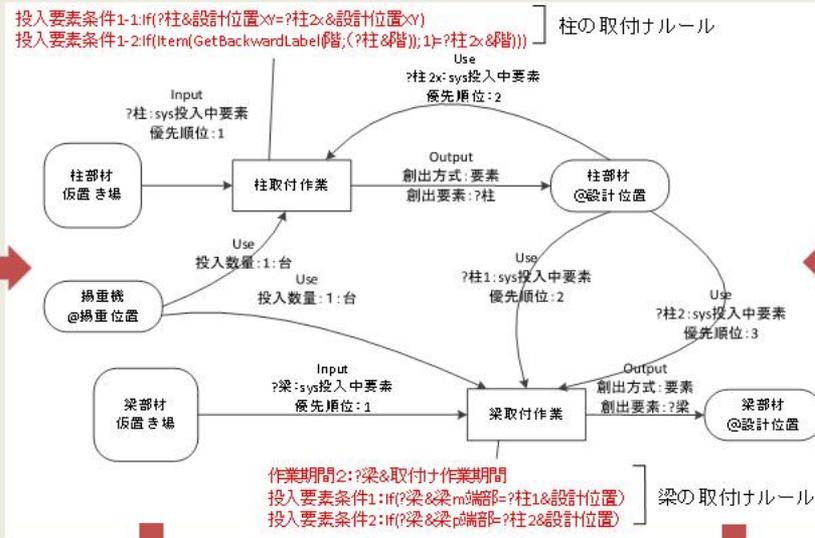


3層部材モデル

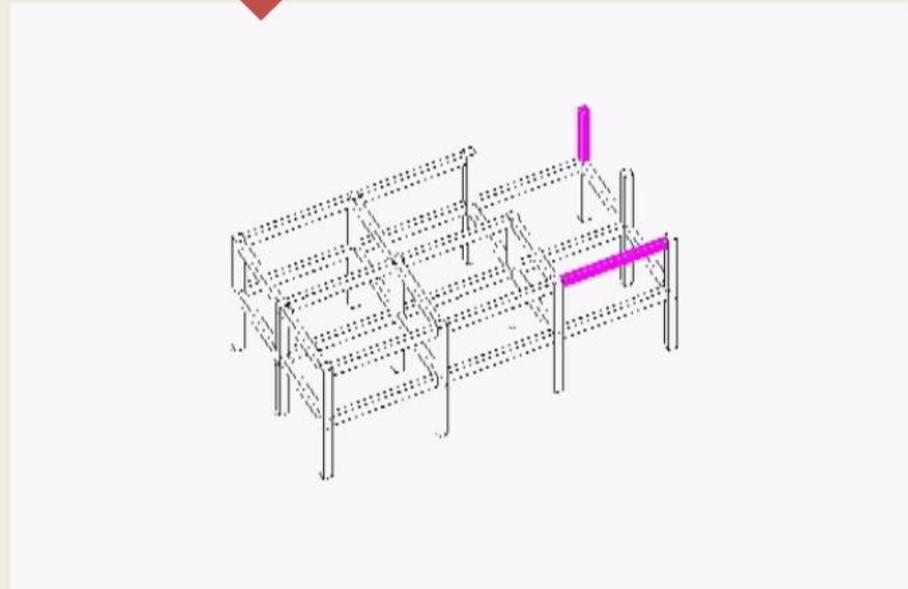
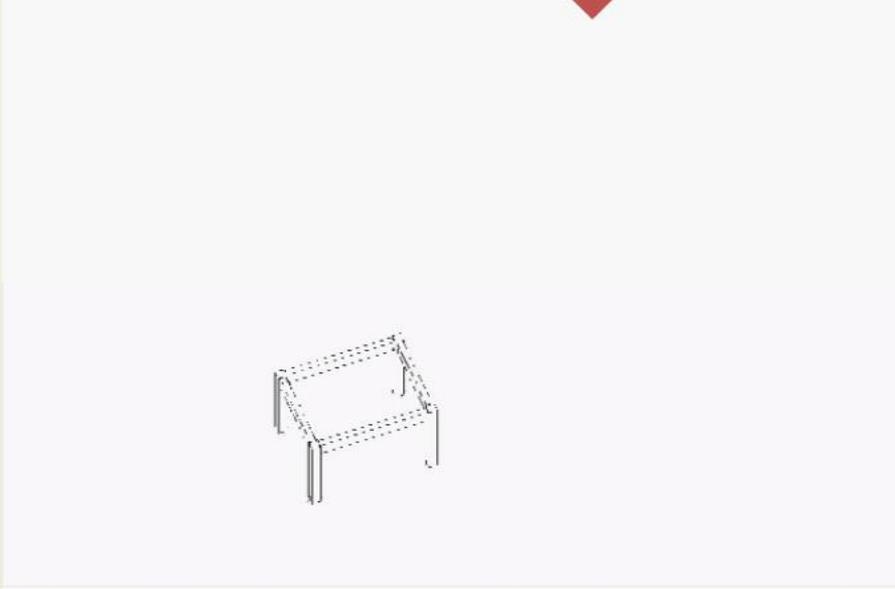


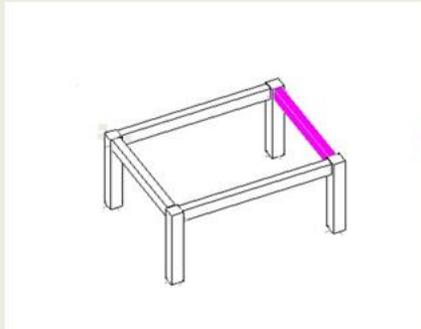


最小部材モデル

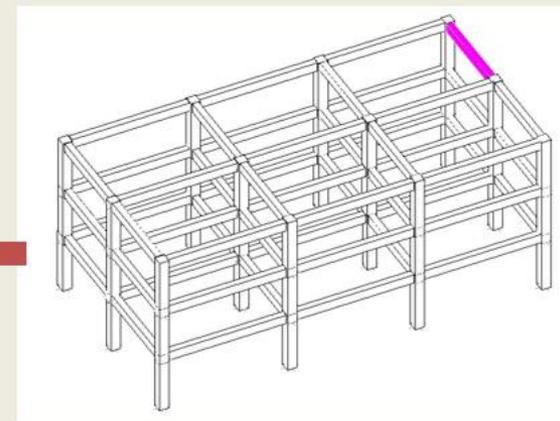
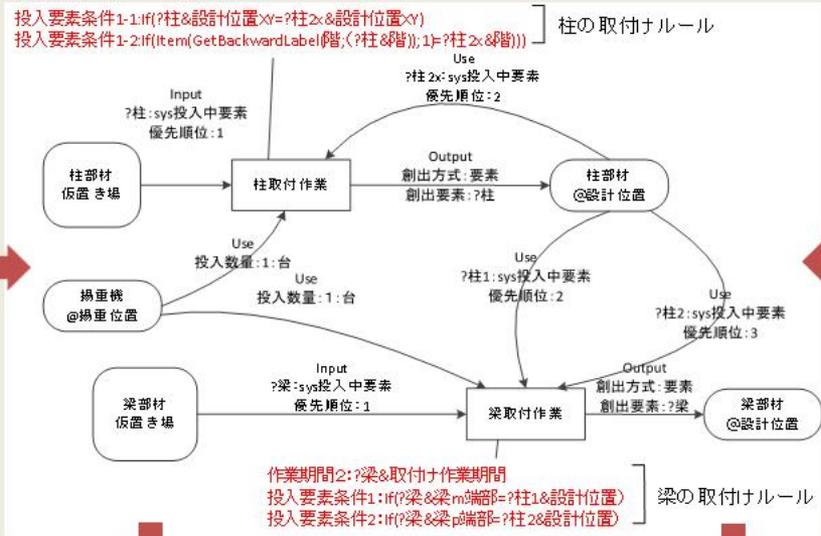


3層部材モデル

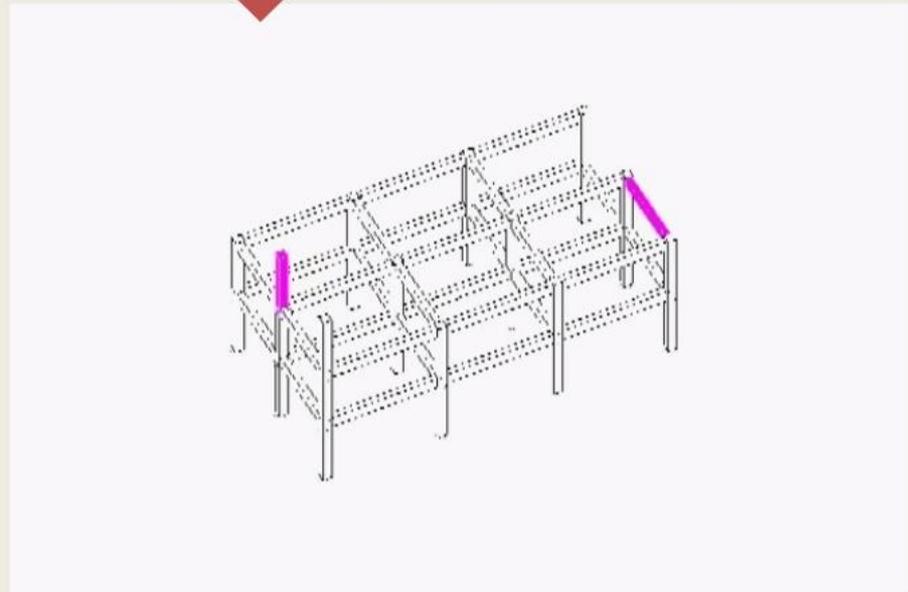
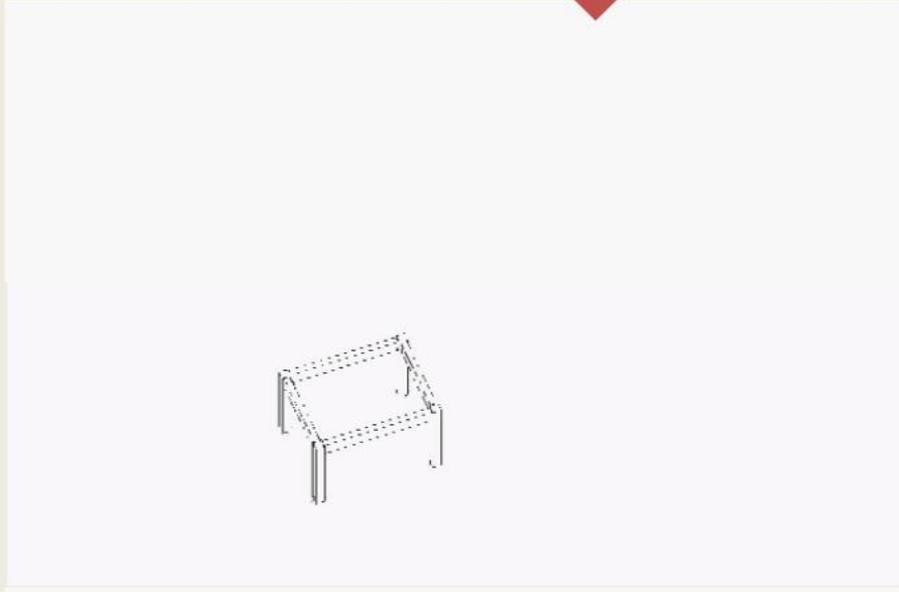


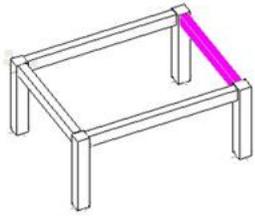


最小部材モデル

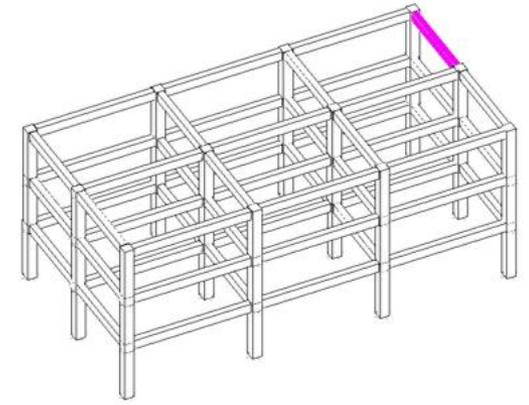
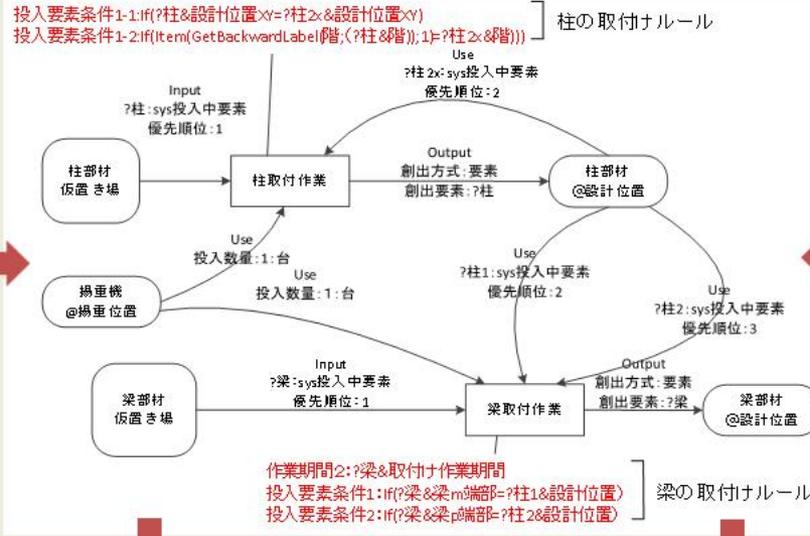


3層部材モデル

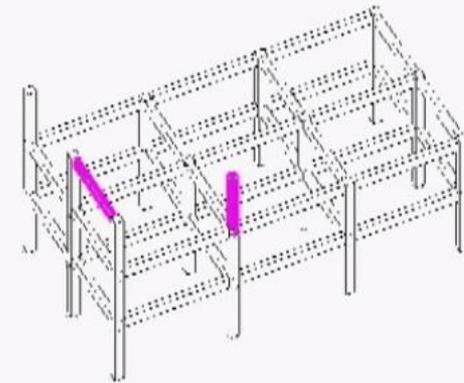


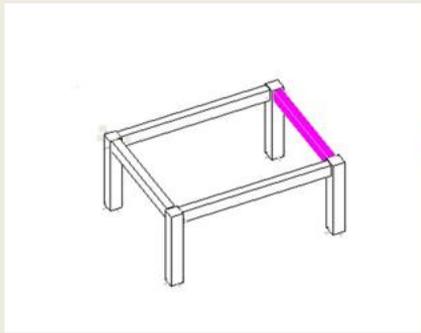


最小部材モデル

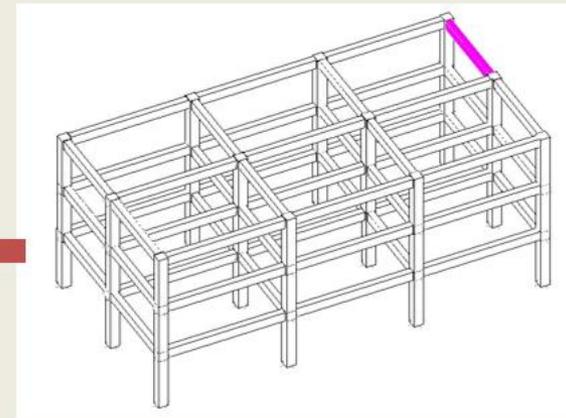
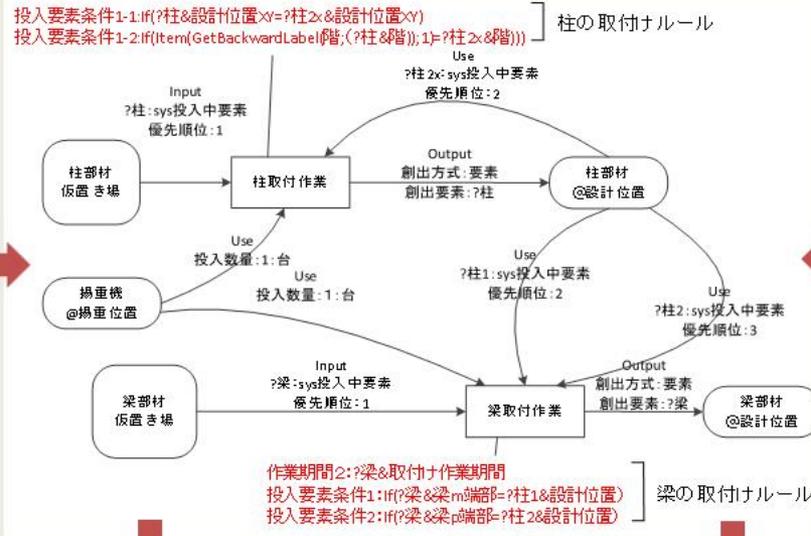


3層部材モデル

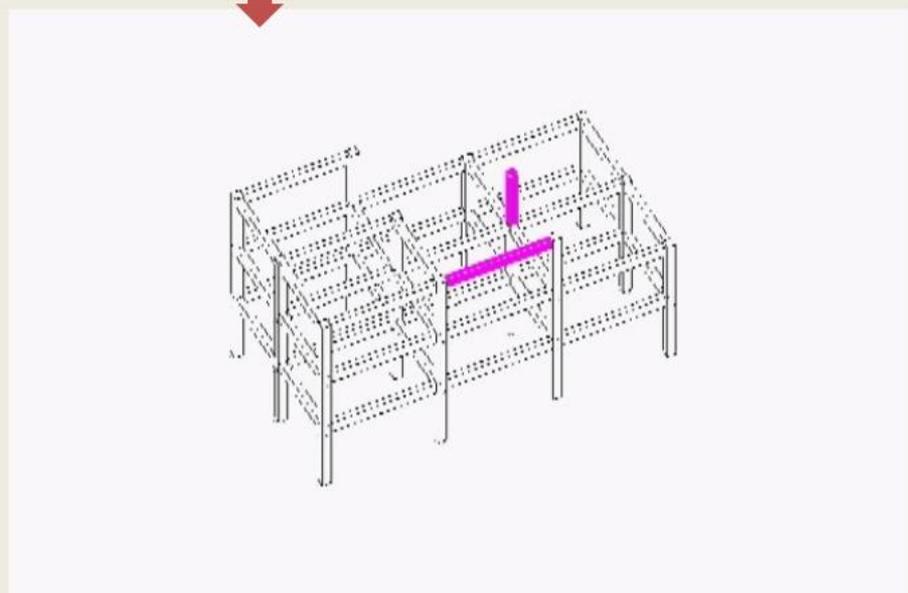
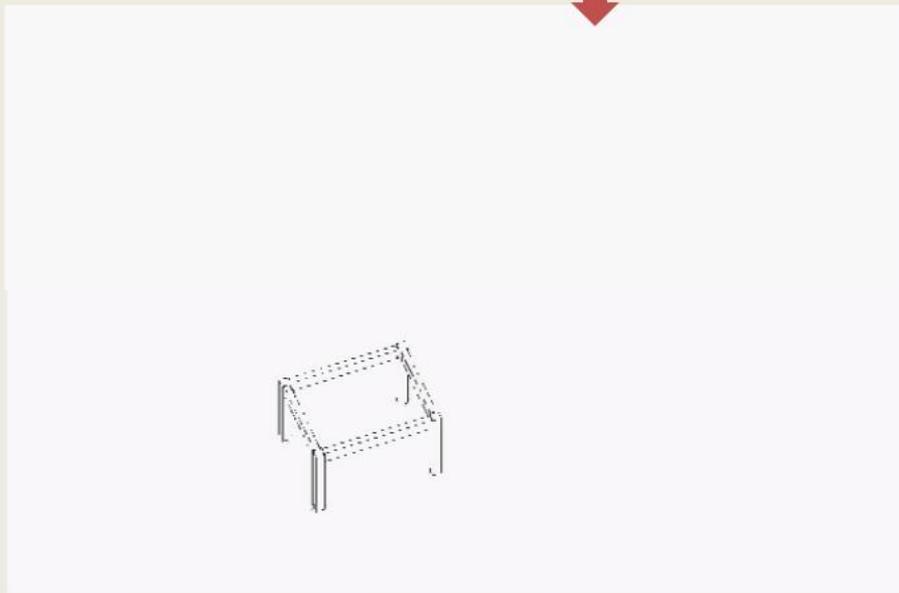


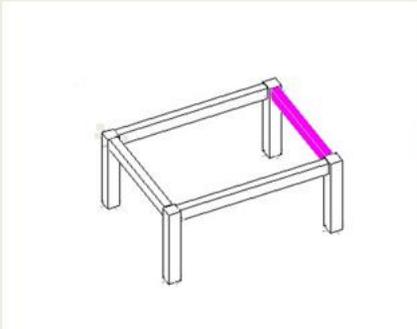


最小部材モデル

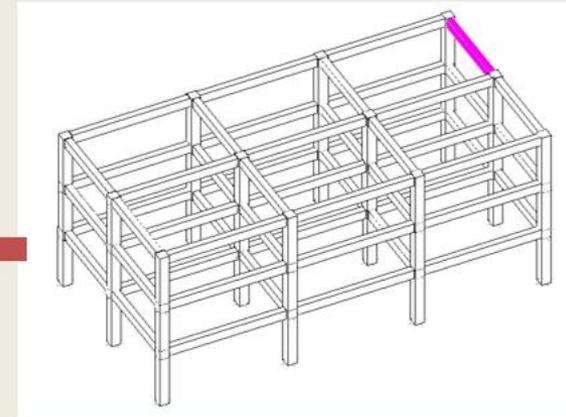
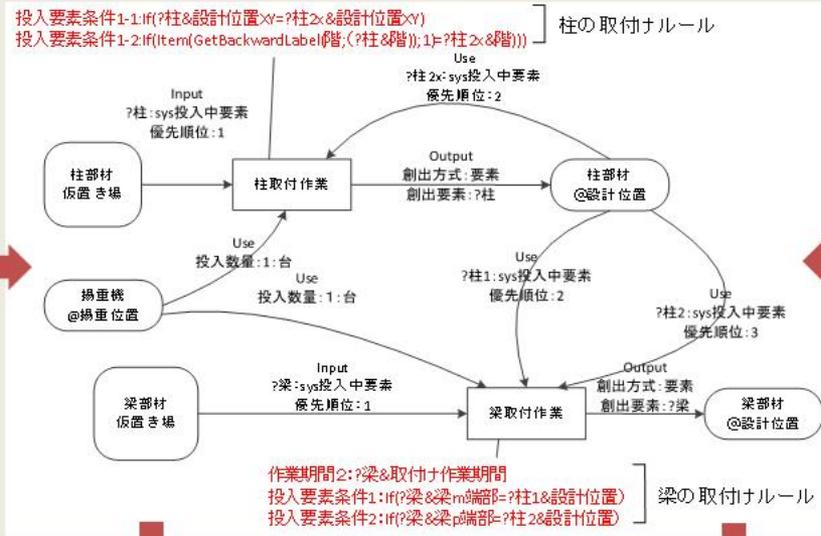


3層部材モデル

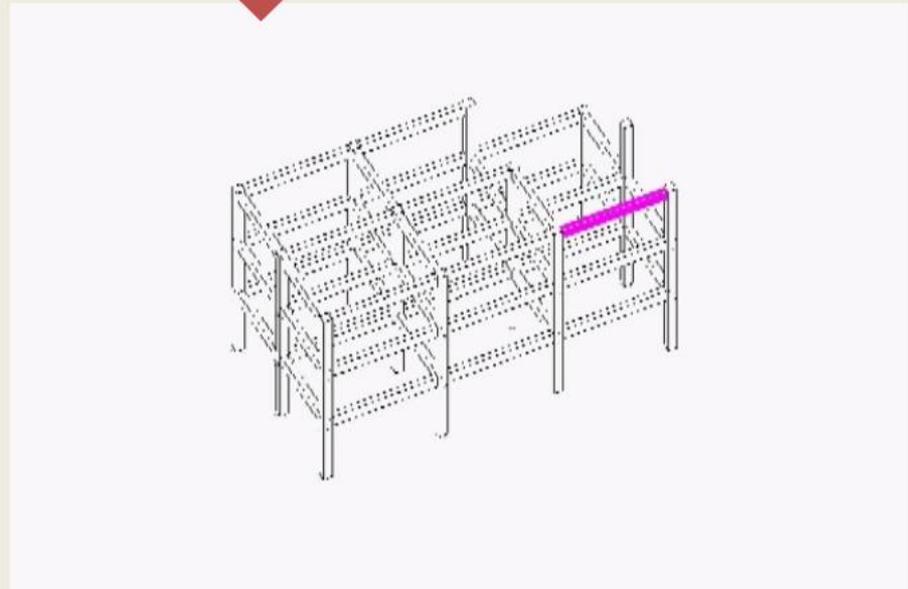
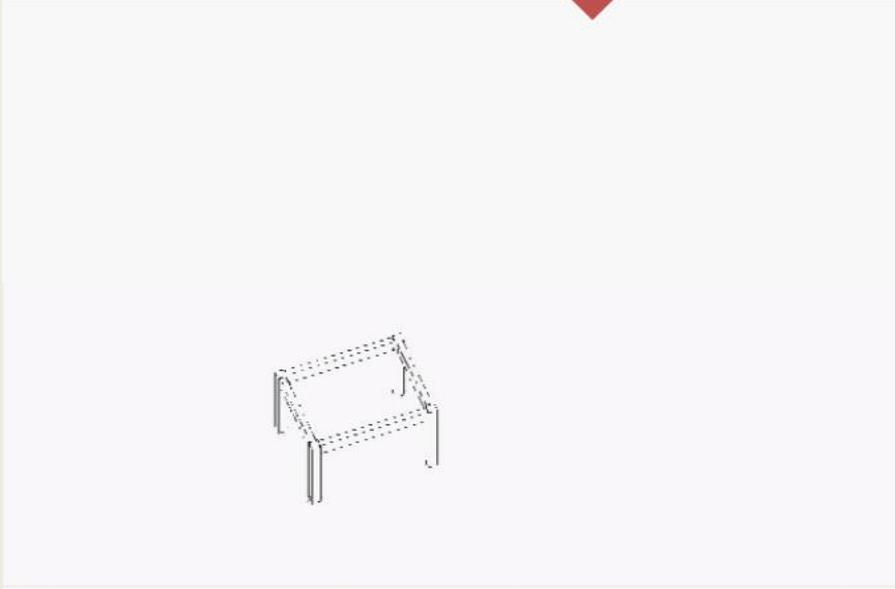


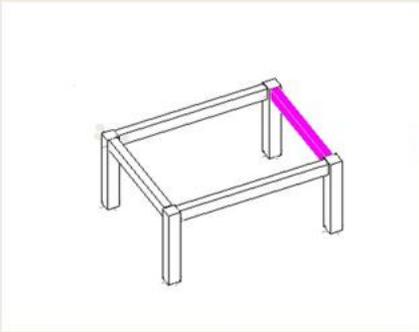


最小部材モデル

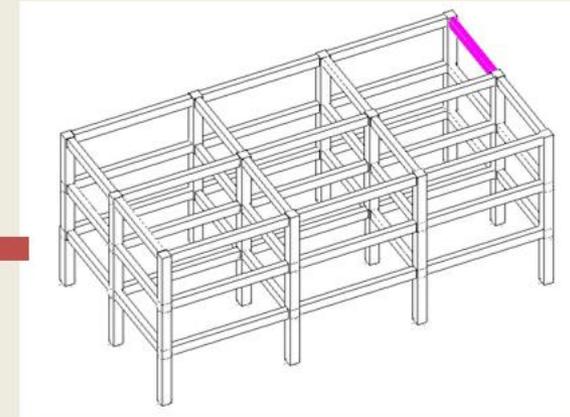
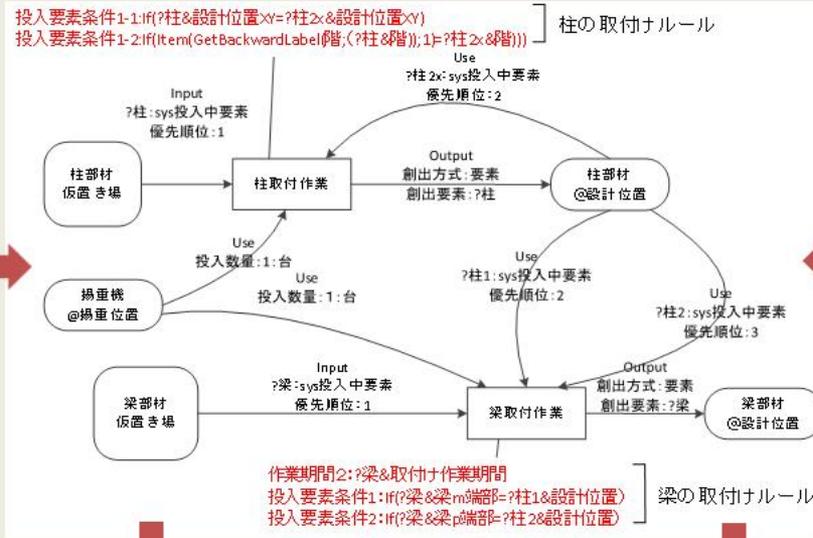


3層部材モデル

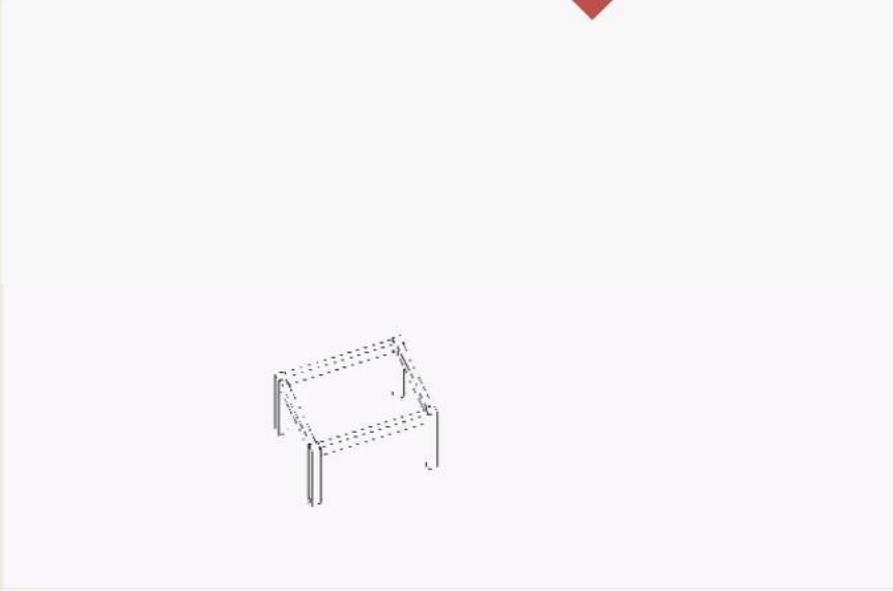




最小部材モデル



3層部材モデル



実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と検索

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に
活用するか

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

多工区同期化工法における工程計算

嘉納成男: 数理最適化手法を用いた工程計画の立案 複数の計画案を含む施工モデルの工程計算、計画系論文集、pp2577-2588、2023.09、日本建築学会

2. 実績情報の保存と検索

5. 計画案の表現方法

3. 実績情報の活用

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

多工区同期化工法における工程計算



多工区同期化工法(松本信二・他、安藤正雄・他)

工事現場を複数の工区に分割し、一連の工程を各工区に対して順番に実施し、工区の作業を同期化する。

投入する作業人や工事設備の平準化を図る。

作業の担当を細分化することによって、

習熟効果を生み出し、生産性を高める。

チームを編成することによって

協働効果を生み出し、生産性を高める。

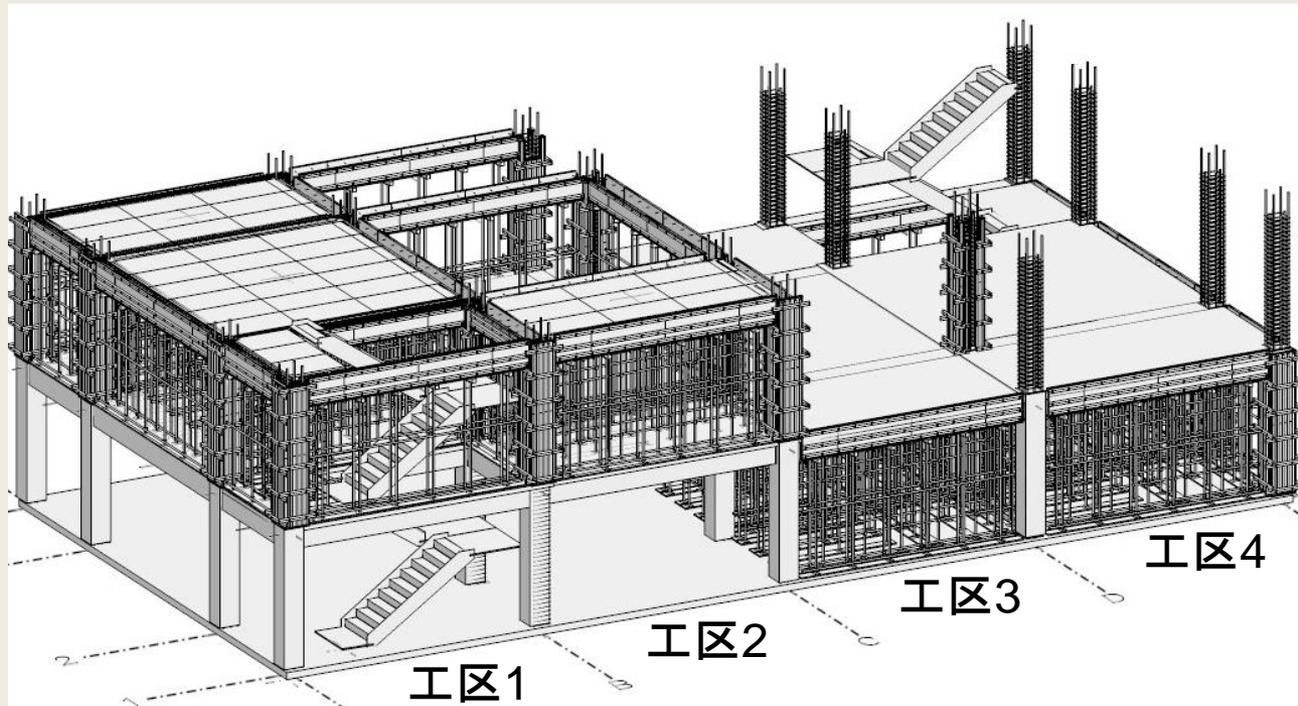
複数の工区を順次施工することによって、

工期の短縮を図る。

- (1) 松本信二、三根直人、内山義次: 建設工事における作業計画方法に関する研究: その1 マルティ・アクティビティ・チャートについて、大会梗概集(材料・施工)、1979.09、pp361-362
- (2) 安藤正雄、崔民権、浦江真人、成田道紀、遠藤裕造、河谷史郎、森戸郁雄: 多工区同期化工法に関する研究: その1~その4、大会梗概集(材料・施工)、1983.09、pp475-482

多工区：

工事現場を複数の工区に分割し、一連の工程を各工区に対して順番に実施し、工区の作業を同期化する。



鉄筋コンクリート工事における多工区同期化工法

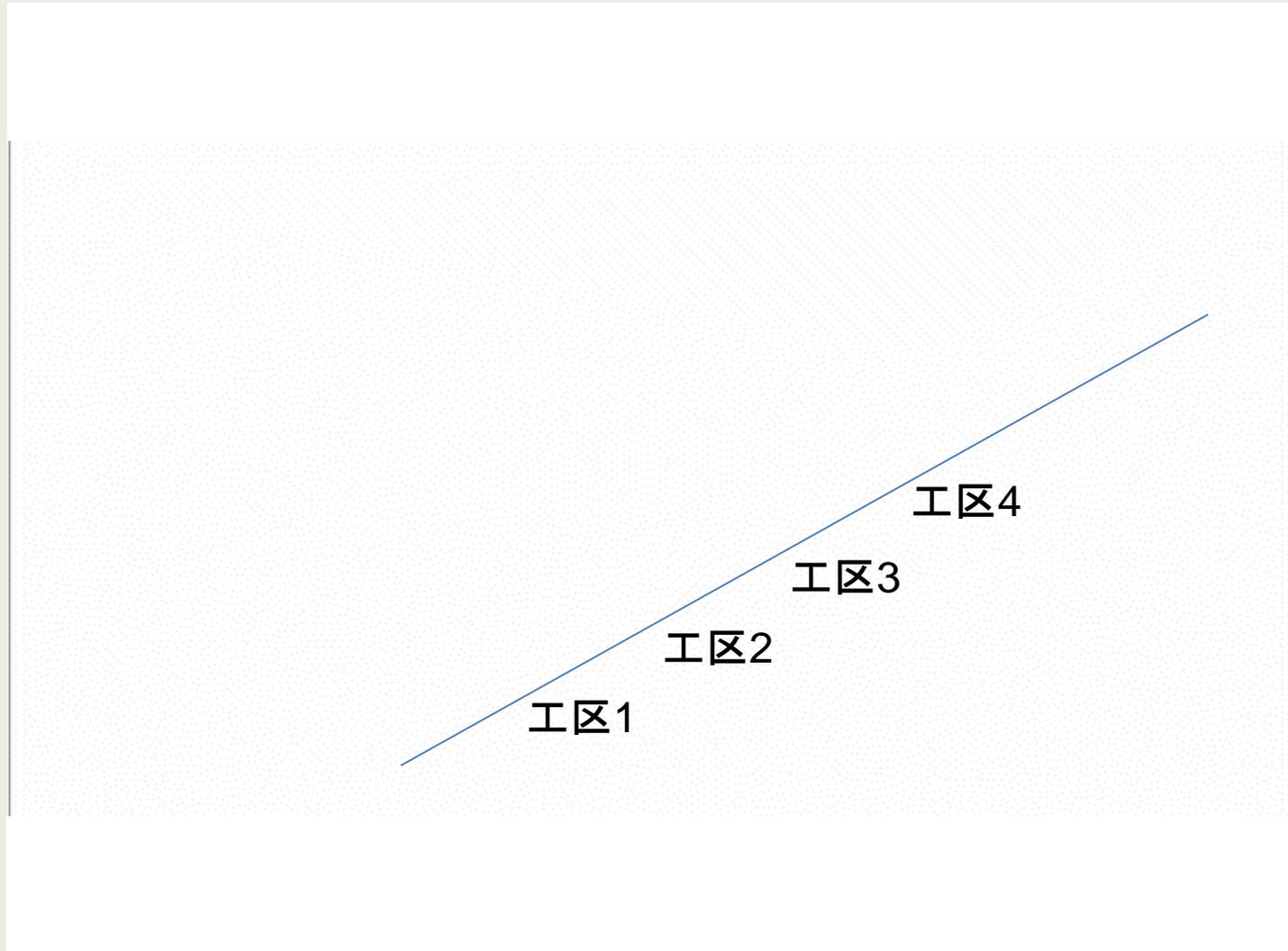


図 多工区同期化工法の工程進捗

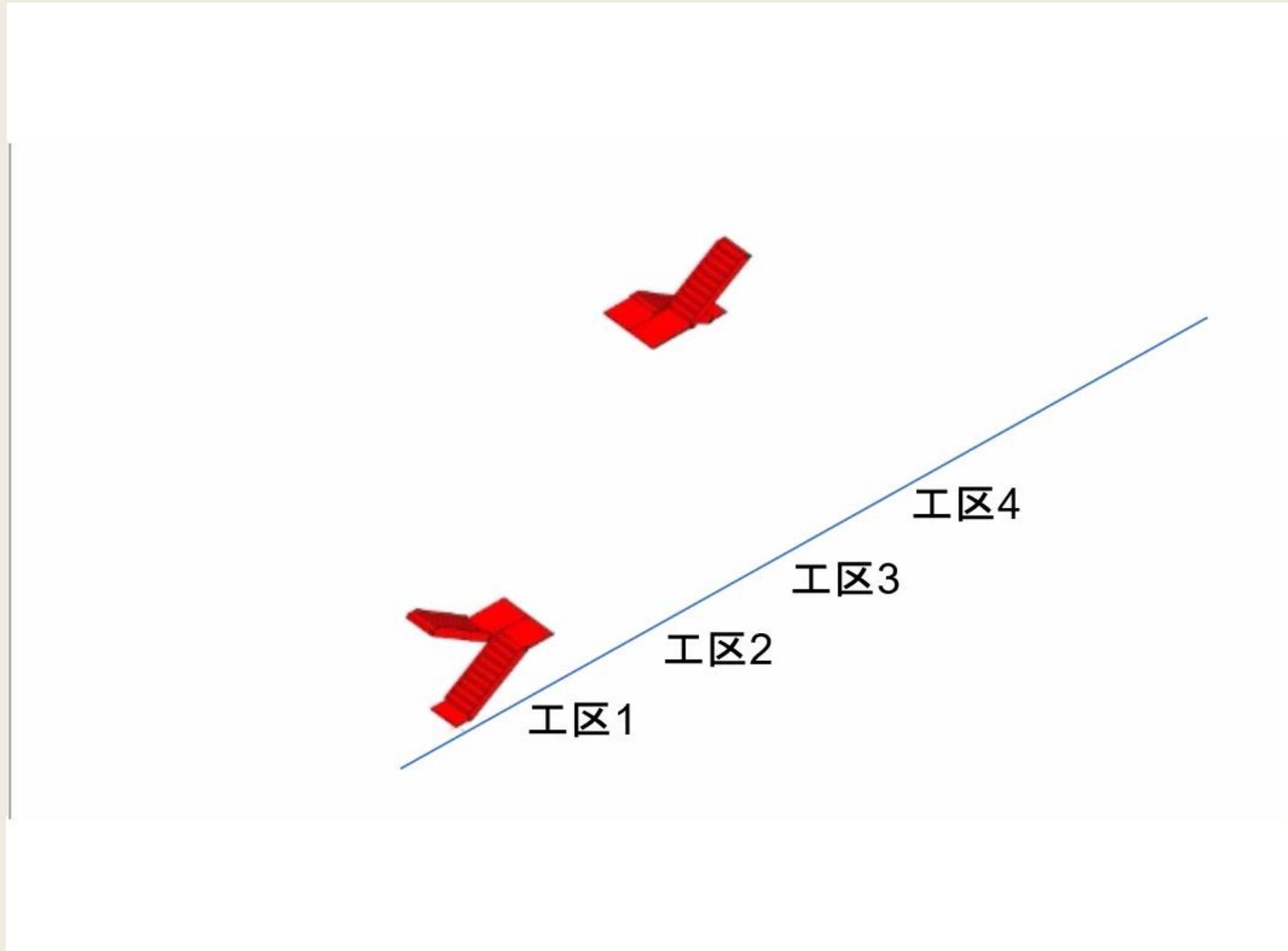


図 多工区同期化工法の工程進捗

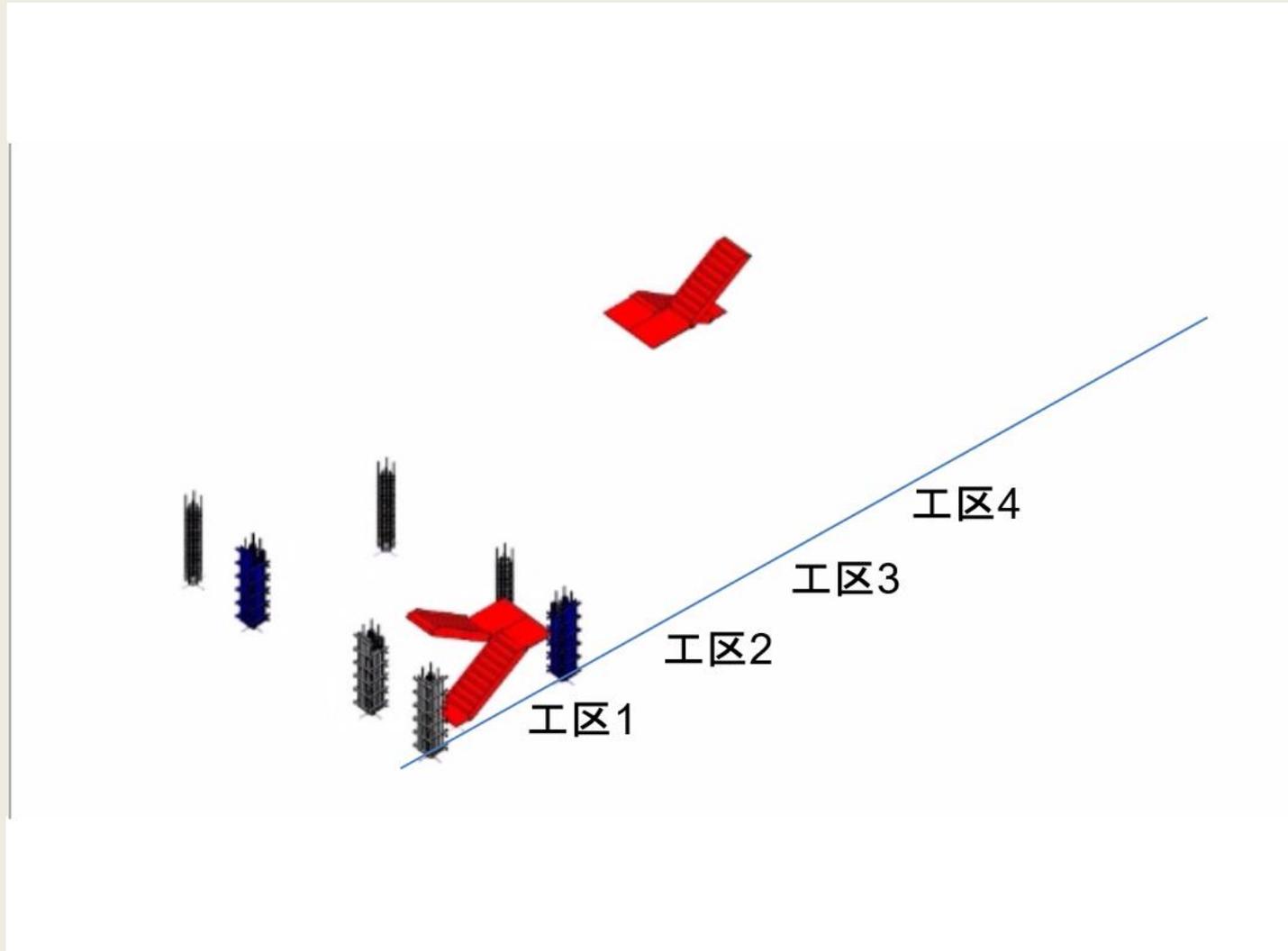


図 多工区同期化工法の工程進捗

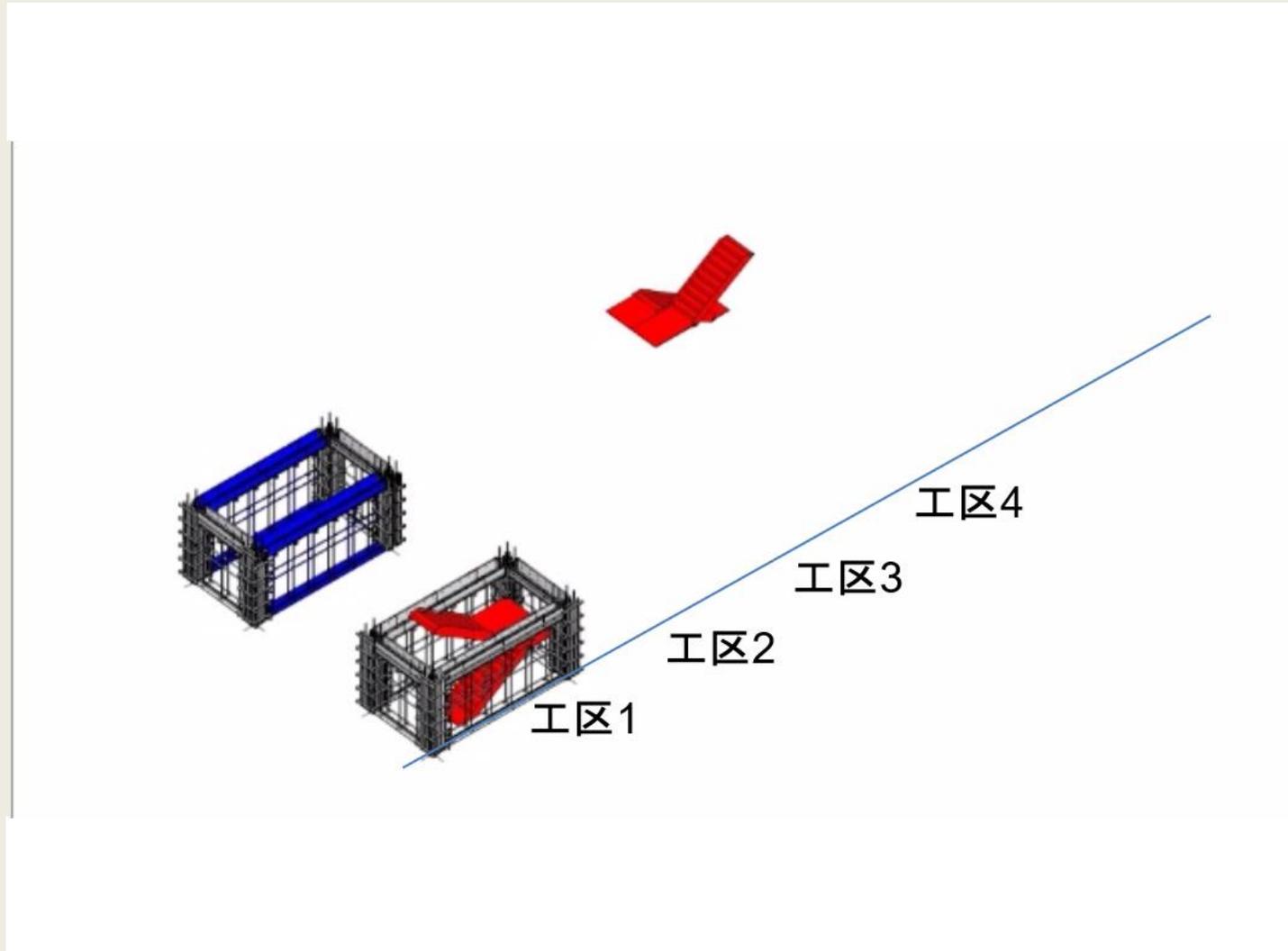


図 多工区同期化工法の工程進捗

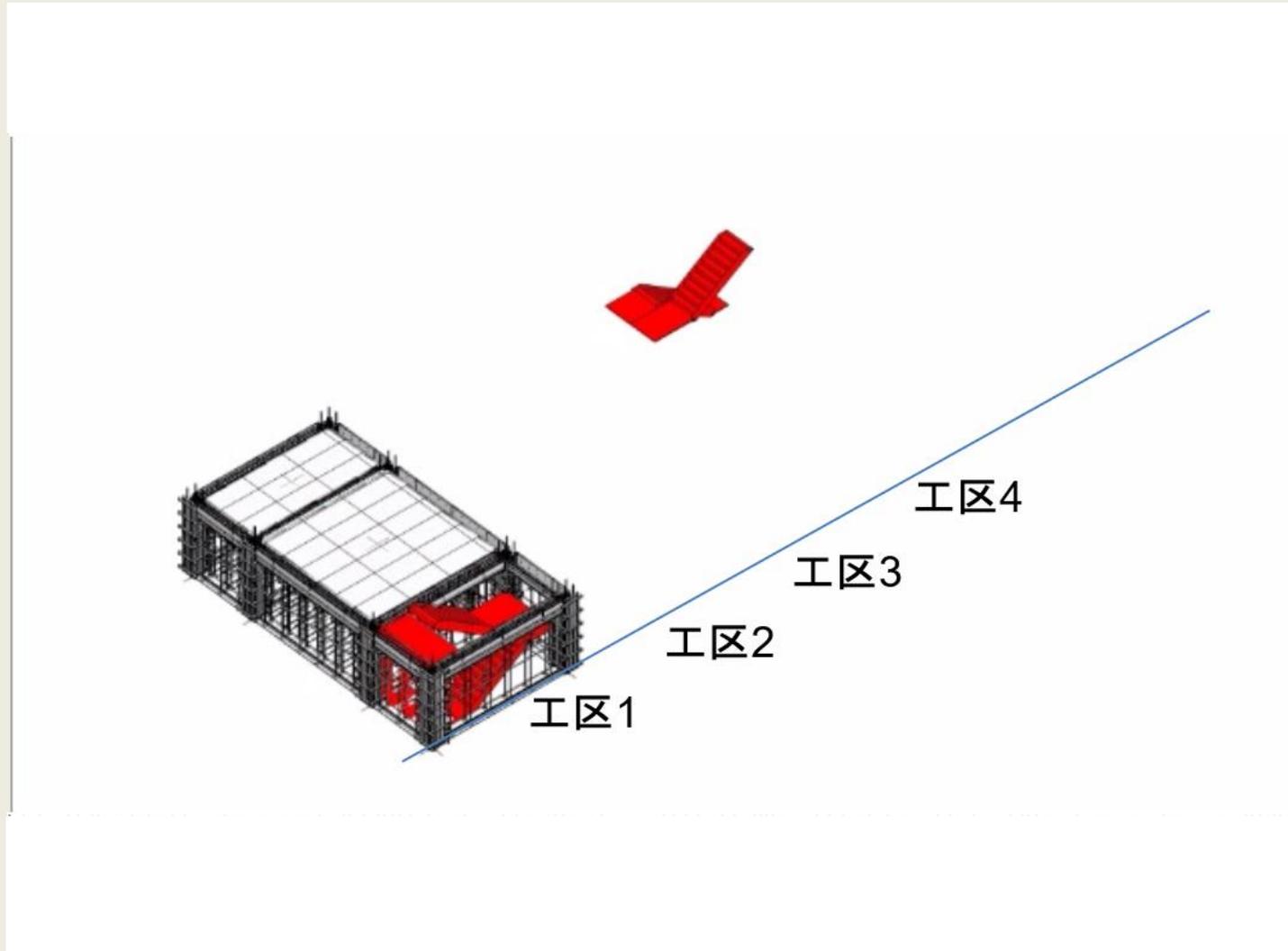


図 多工区同期化工法の工程進捗

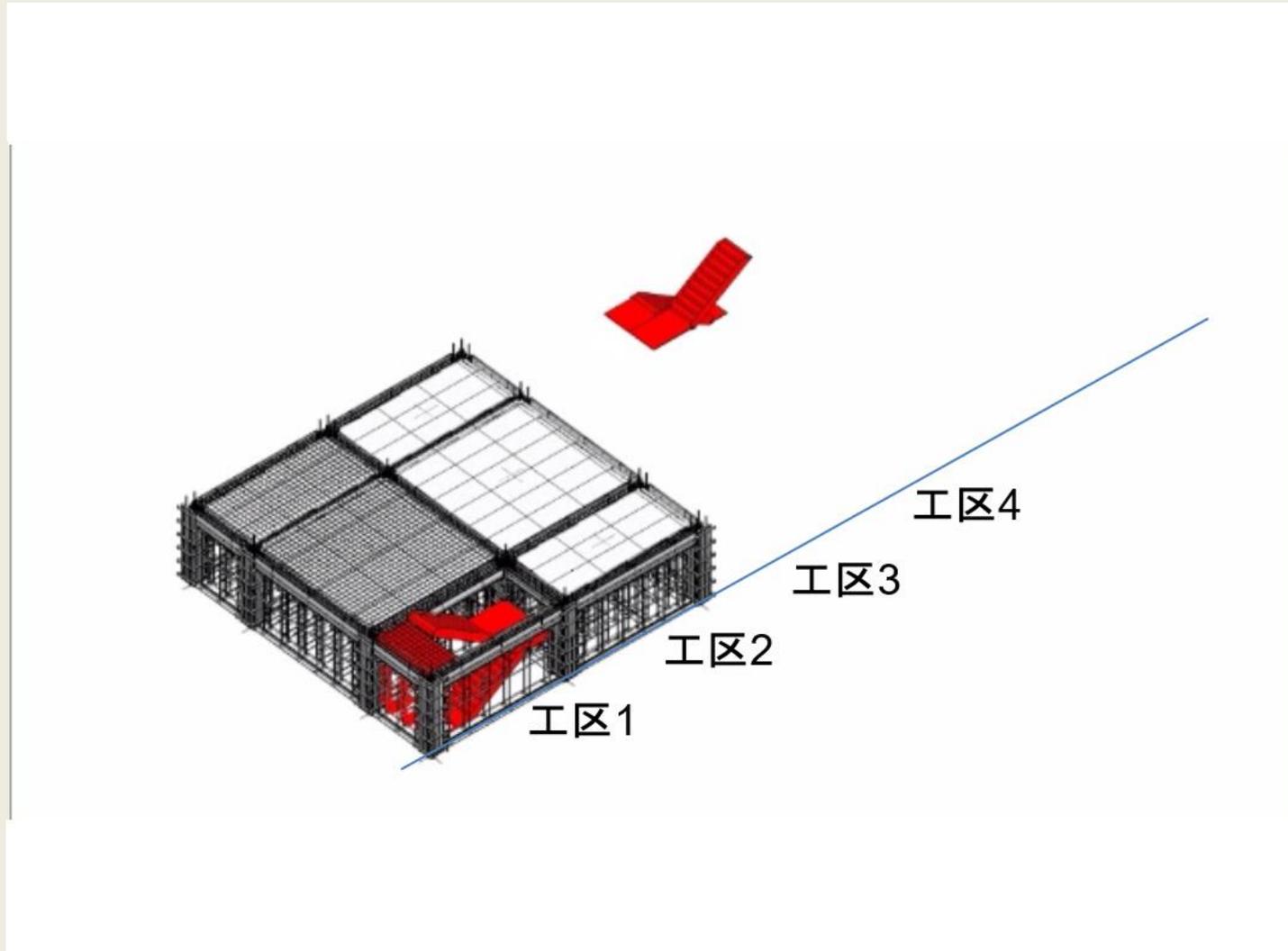


図 多工区同期化工法の工程進捗

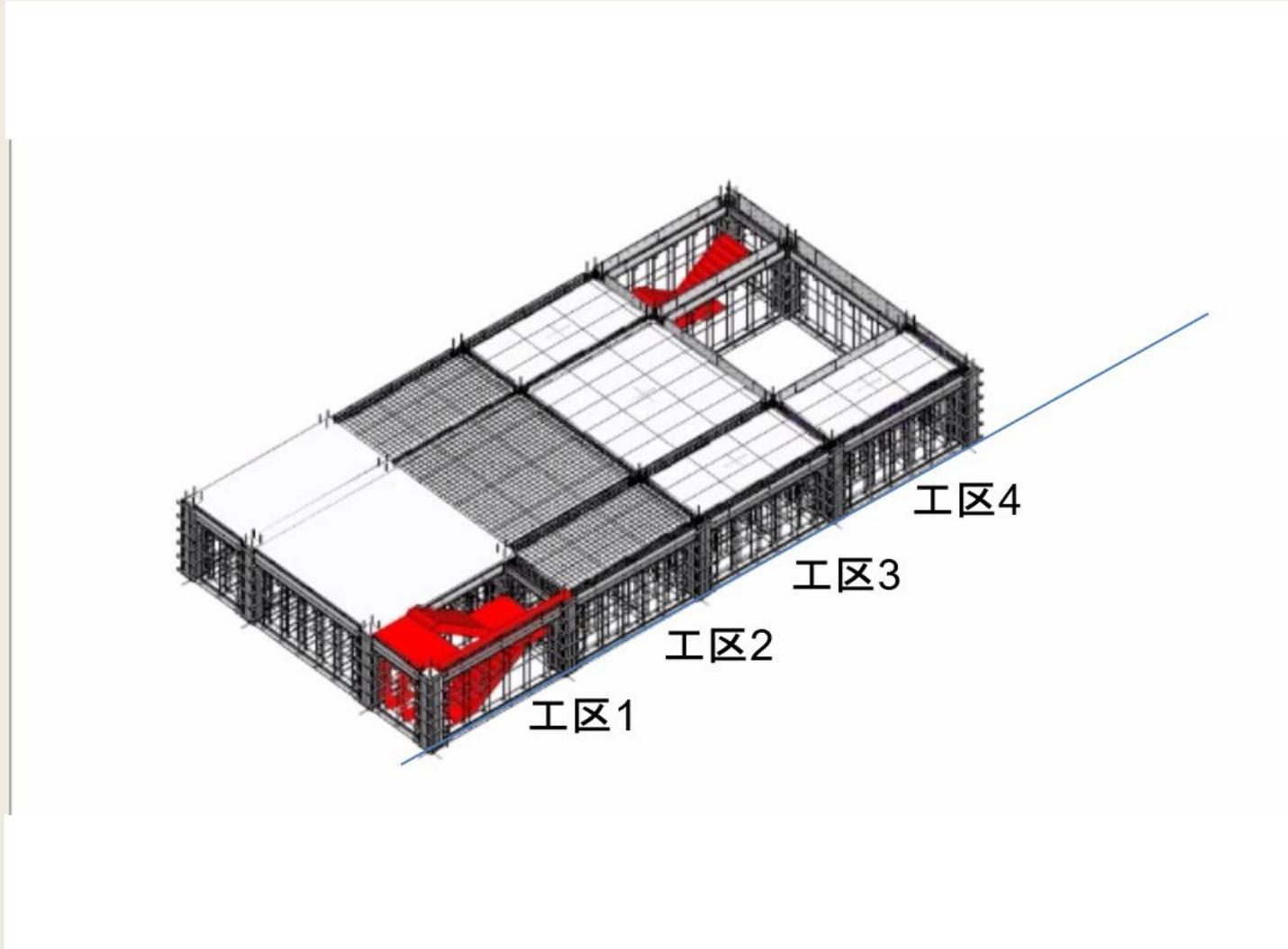


図 多工区同期化工法の工程進捗

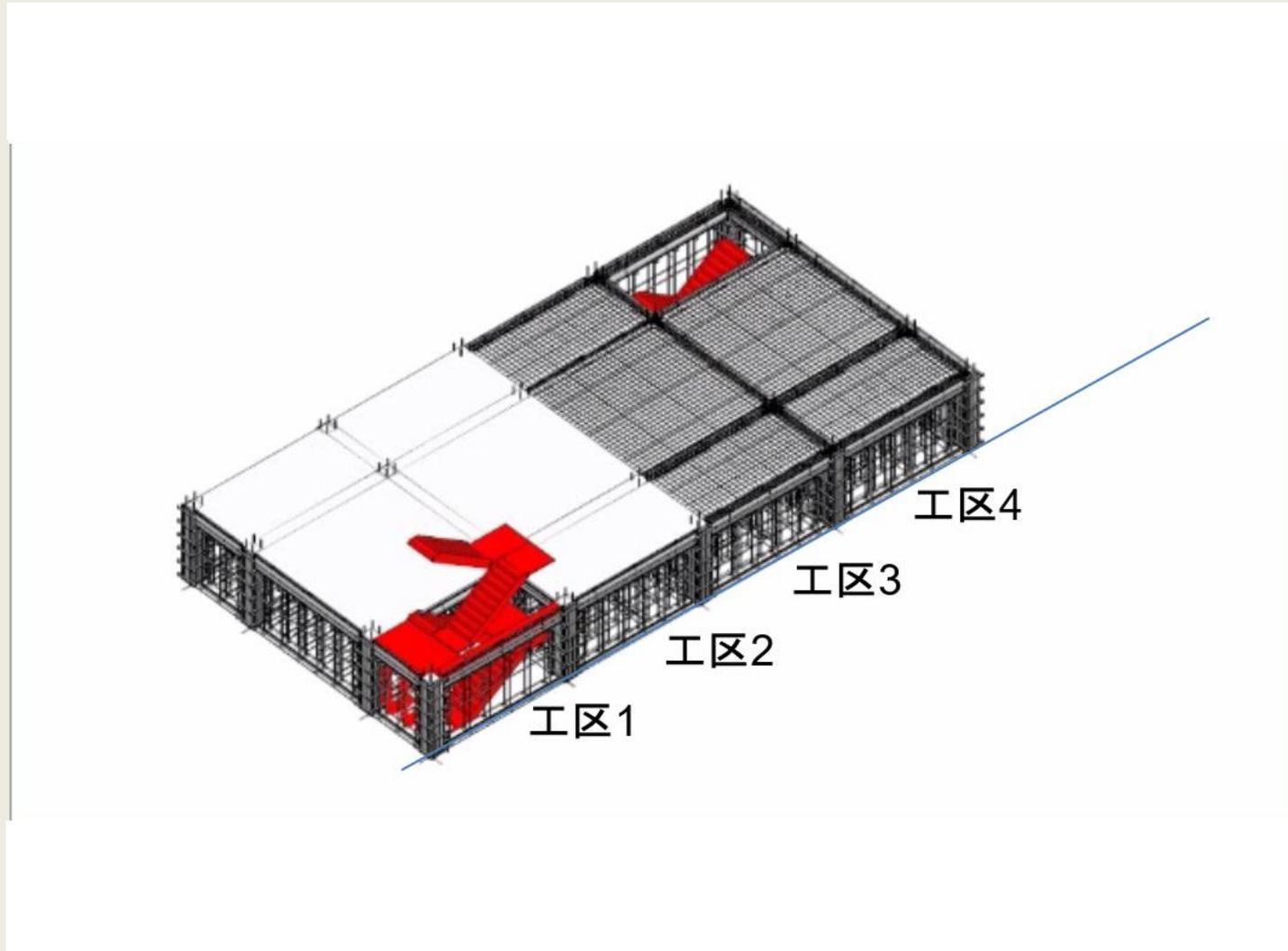


図 多工区同期化工法の工程進捗

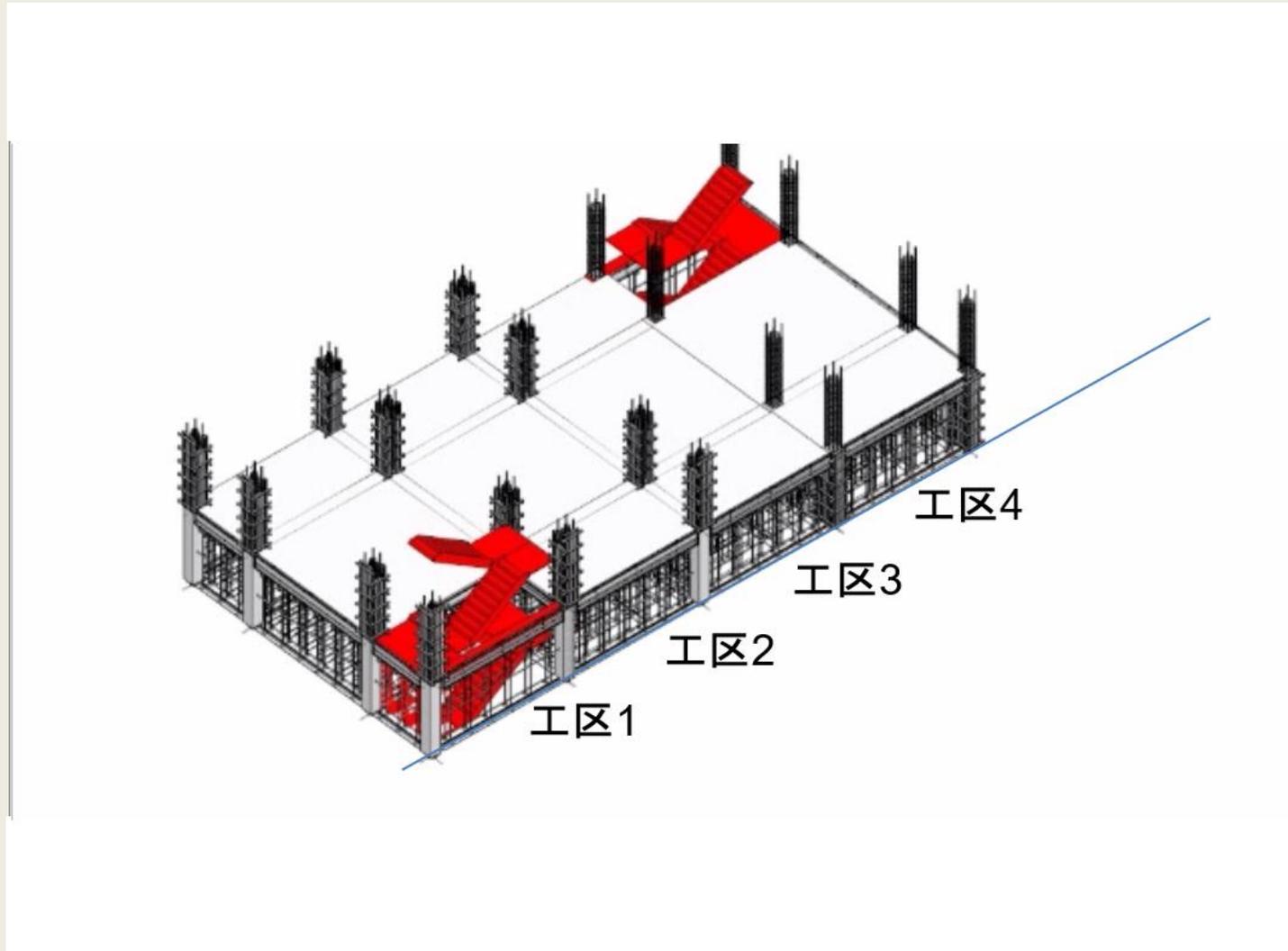


図 多工区同期化工法の工程進捗

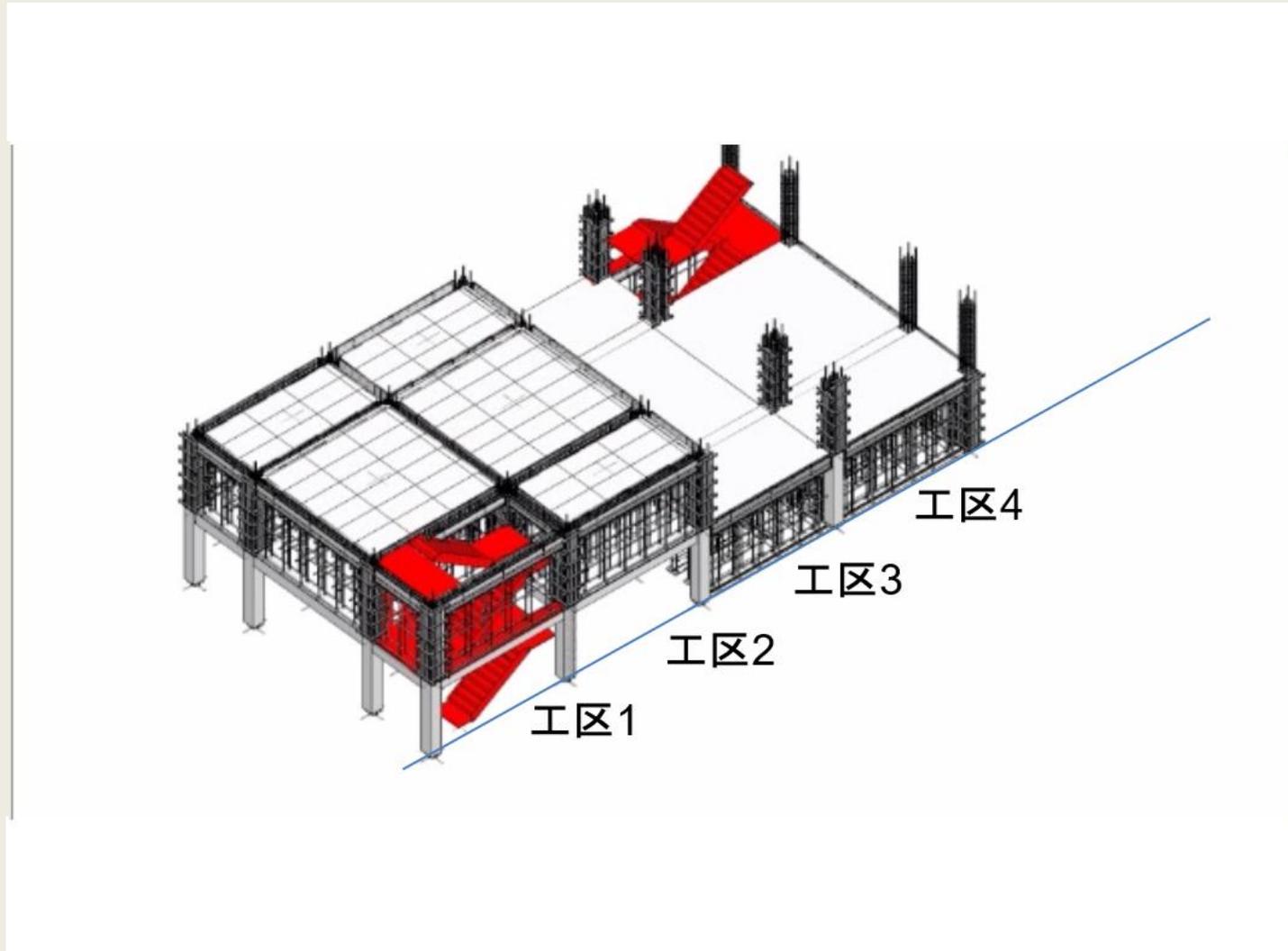


図 多工区同期化工法の工程進捗

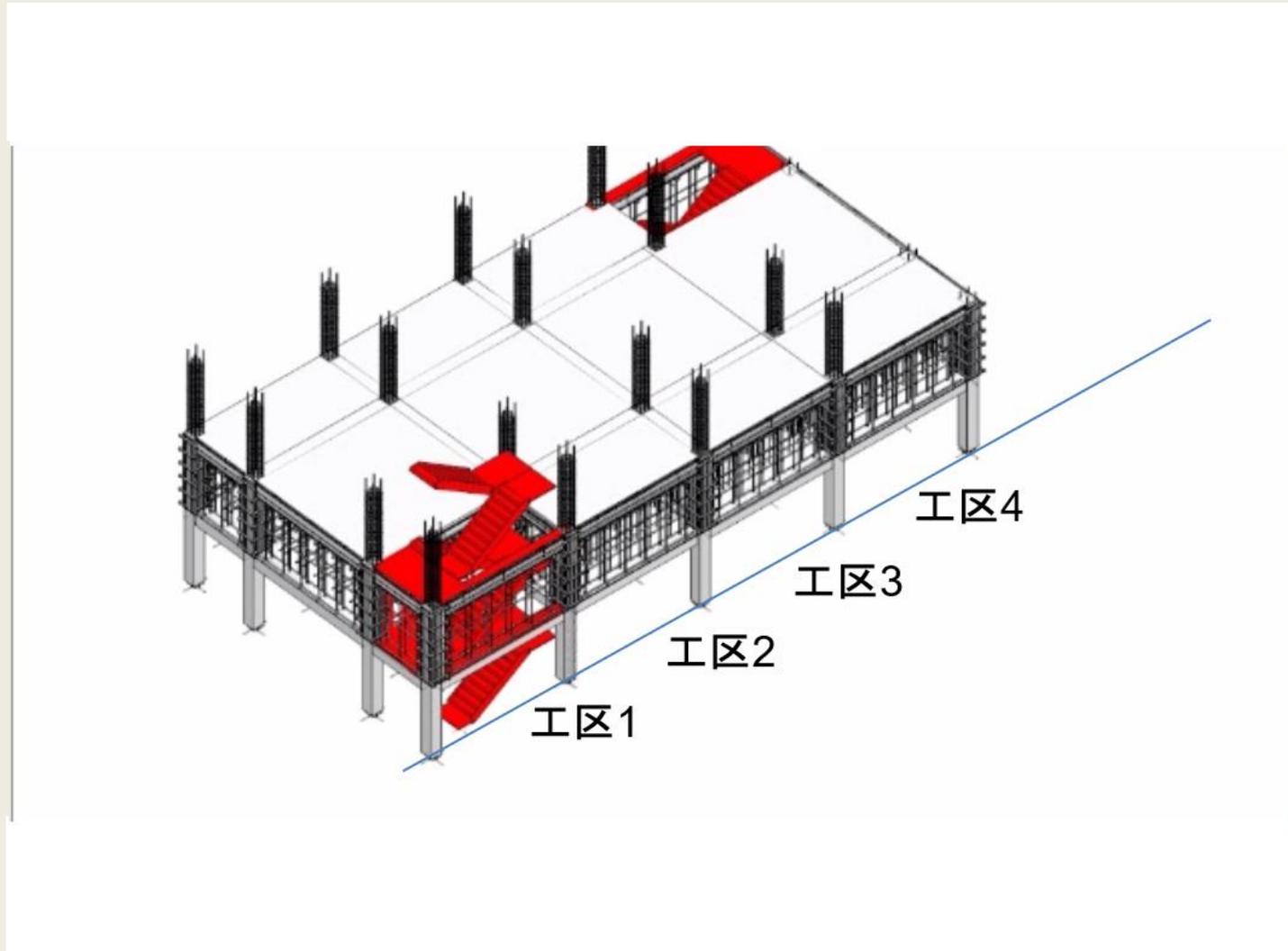


図 多工区同期化工法の工程進捗

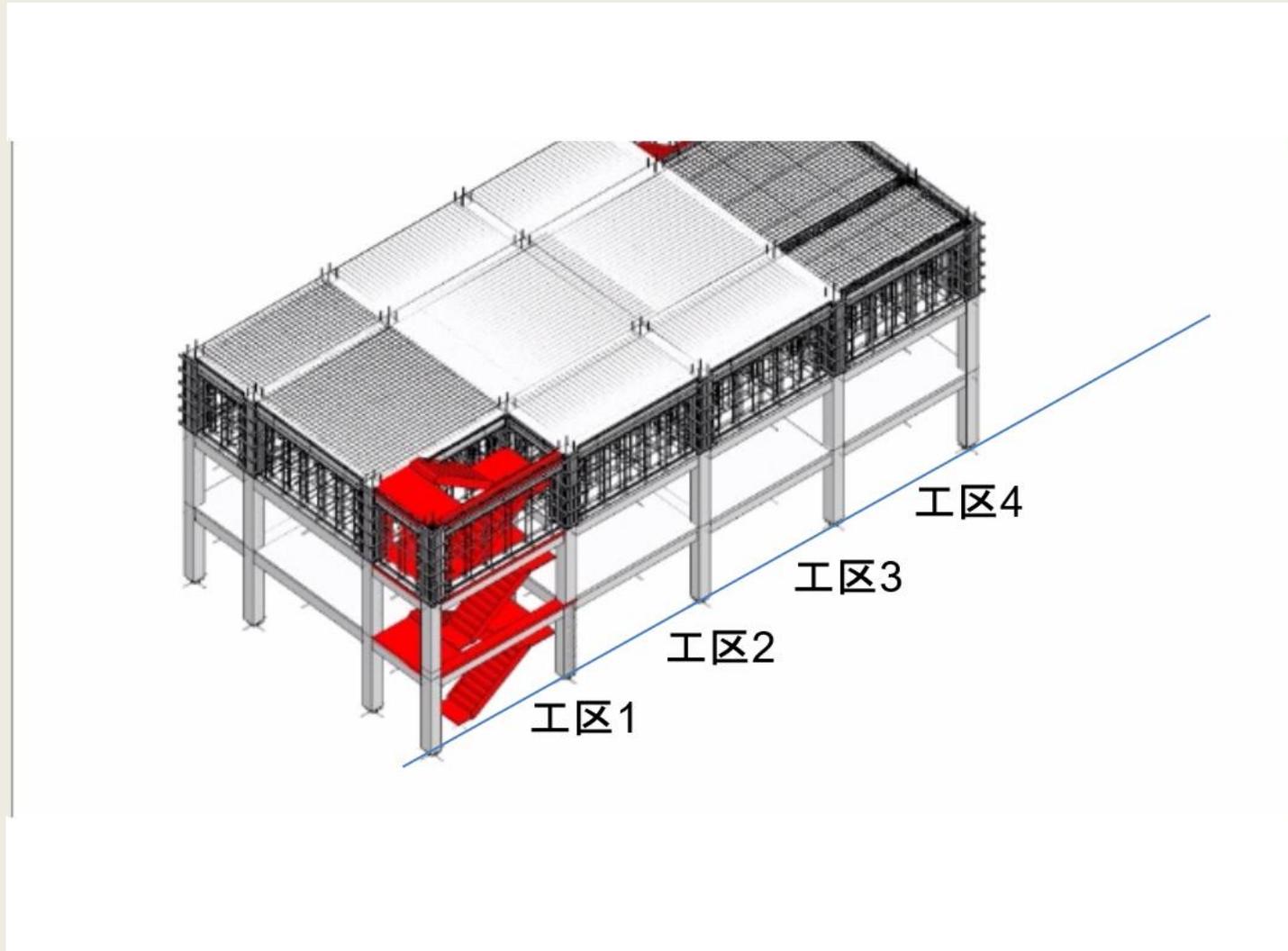


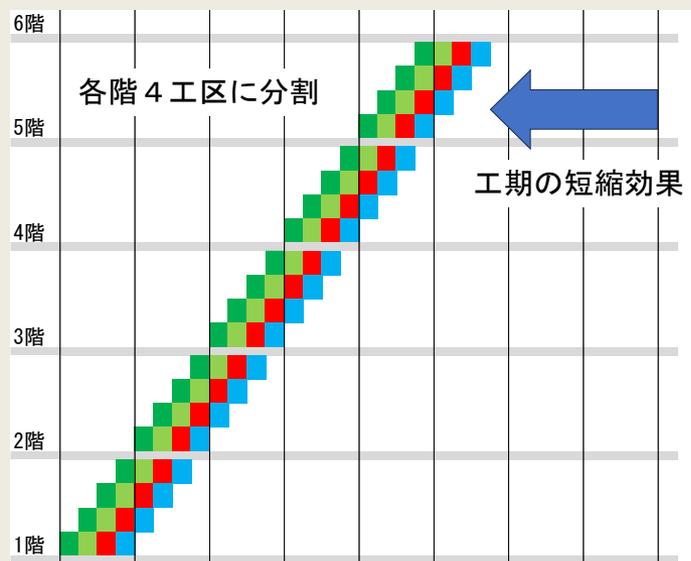
図 多工区同期化工法の工程進捗

工期短縮の効果

各階工区分割なし



各階4工区に分割



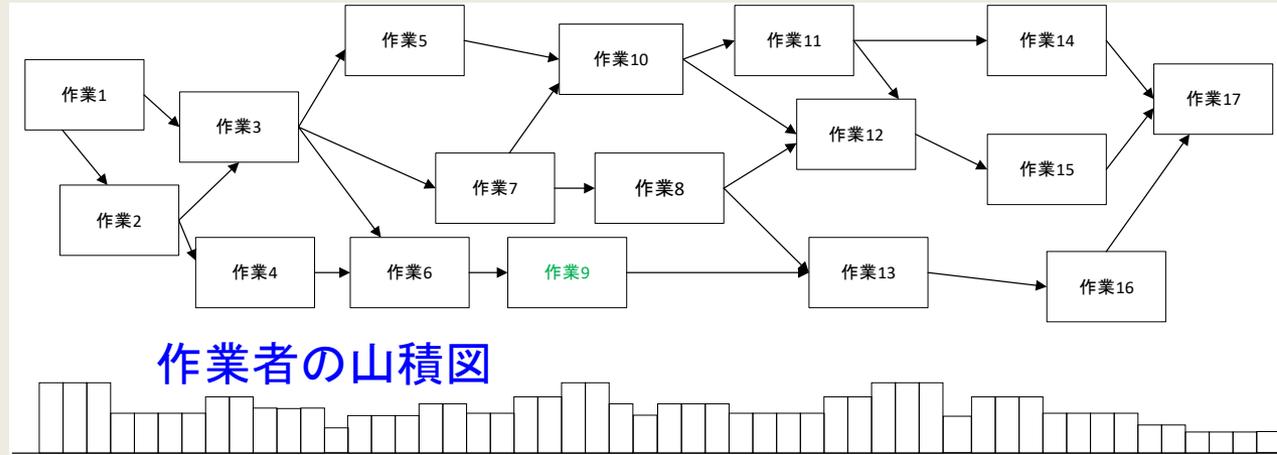


図 工程を編成する一連の作業

第1週目から第4週目まで

各階を1つの工区

図 各階を1つの工区で作業を実施する場合の工程

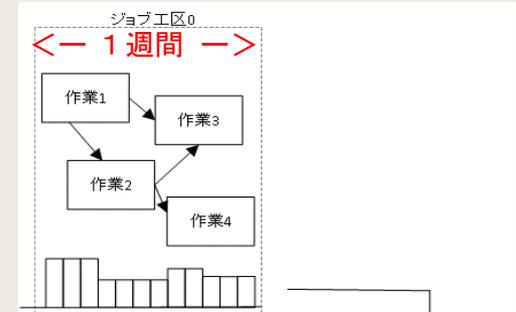
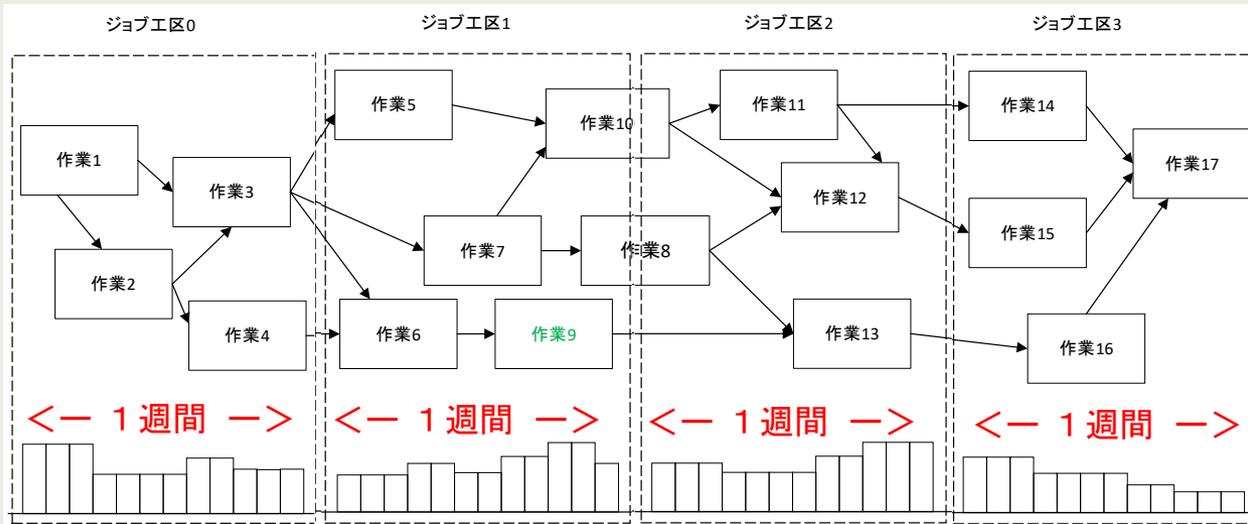


図1 単工区工程のジョブエ区への分割

工区0

工区1

工区2

工区3

第1週目

各階を4つの工区

図 各階を4つの工区で作業を実施する場合の工程

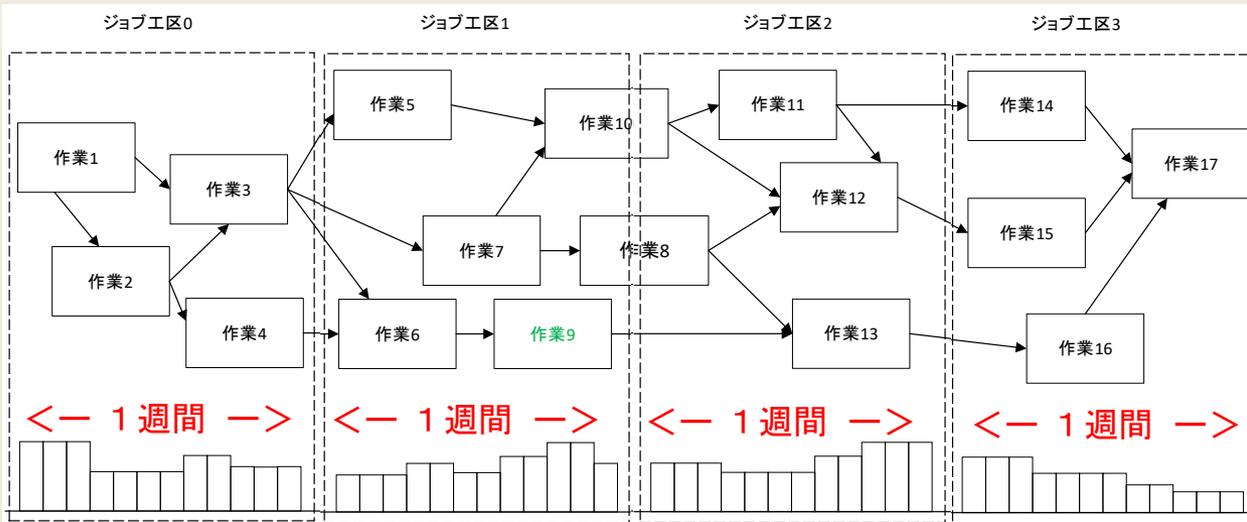


図1 単工区工程のジョブエ区への分割

工区0

工区1

工区2

工区3

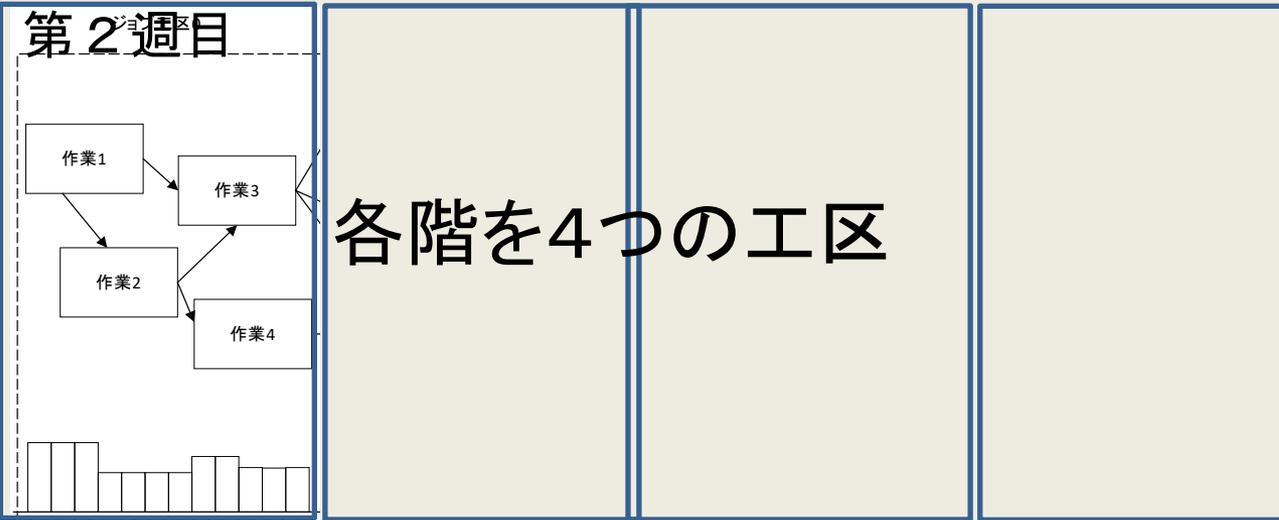
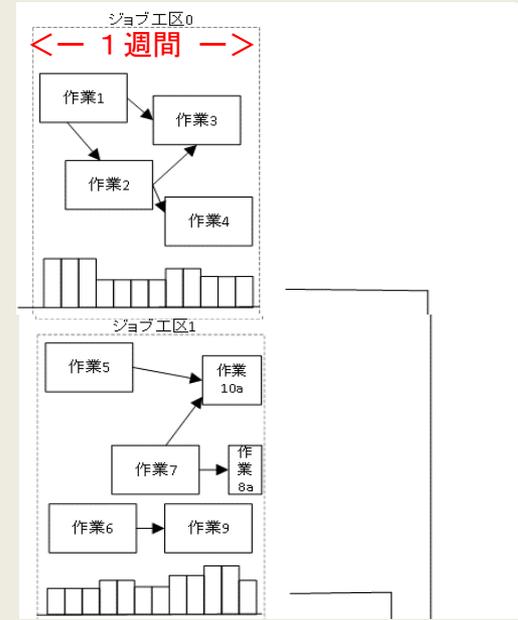


図 各階を4つの工区で作業を実施する場合の工程



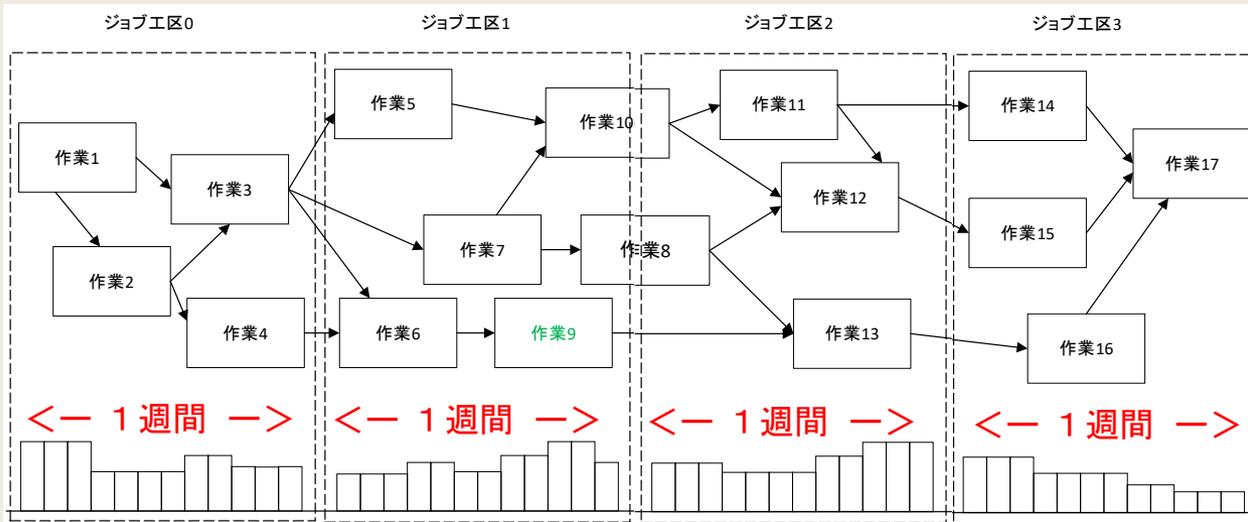


図1 単工区工程のジョブエ区への分割

工区0

工区1

工区2

工区3

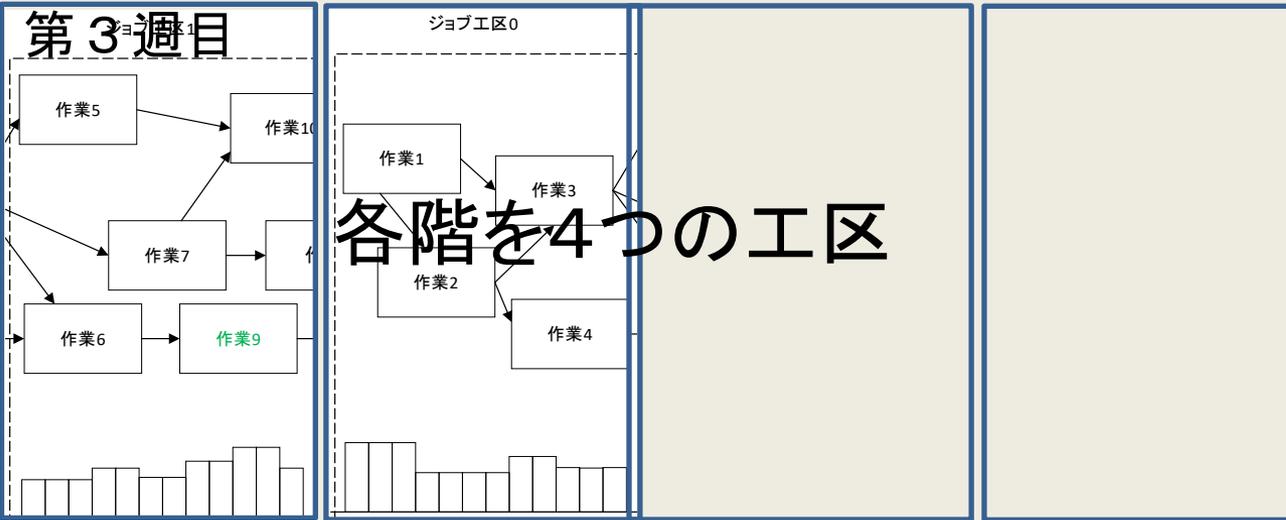
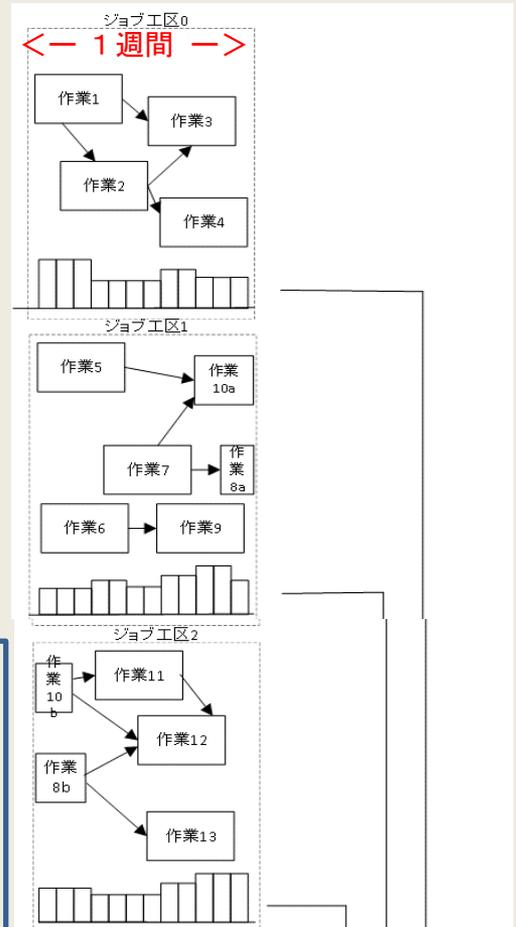


図 各階を4つの工区で作業を実施する場合の工程



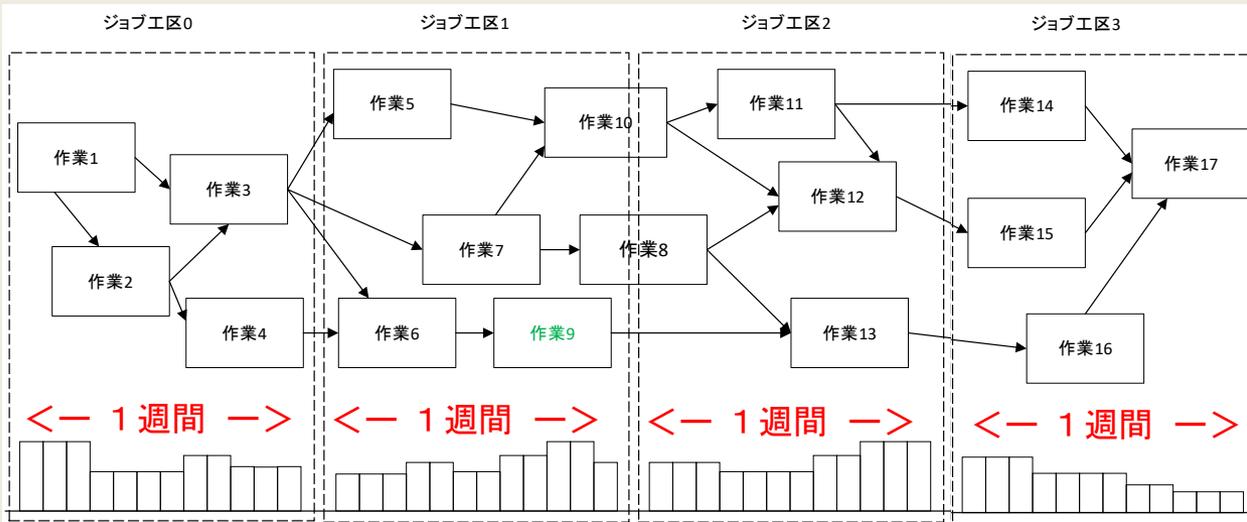


図1 単工区工程のジョブエ区への分割

工区0

工区1

工区2

工区3

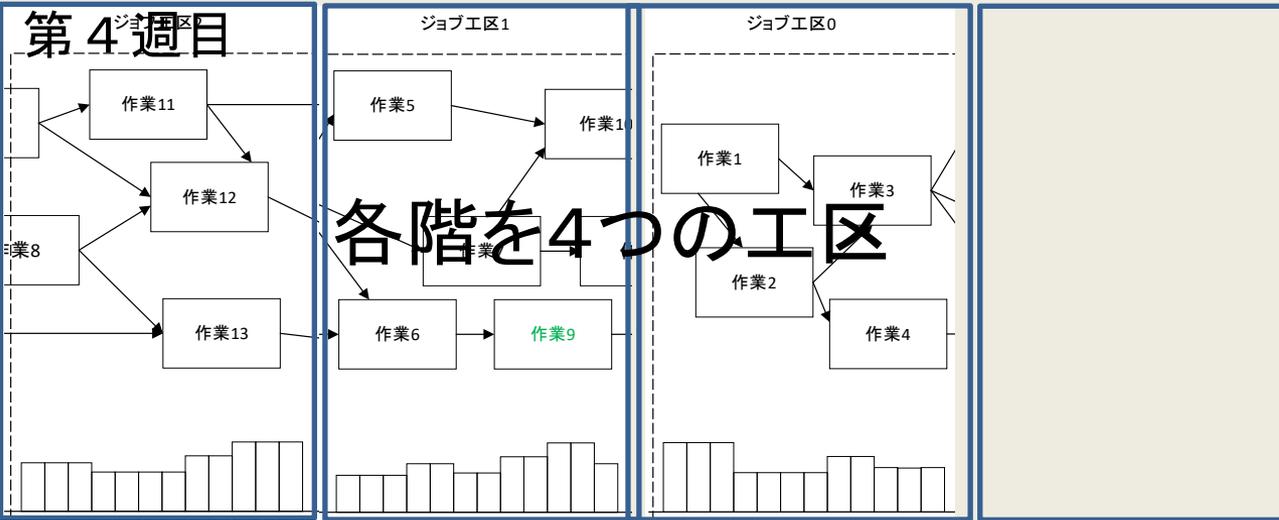
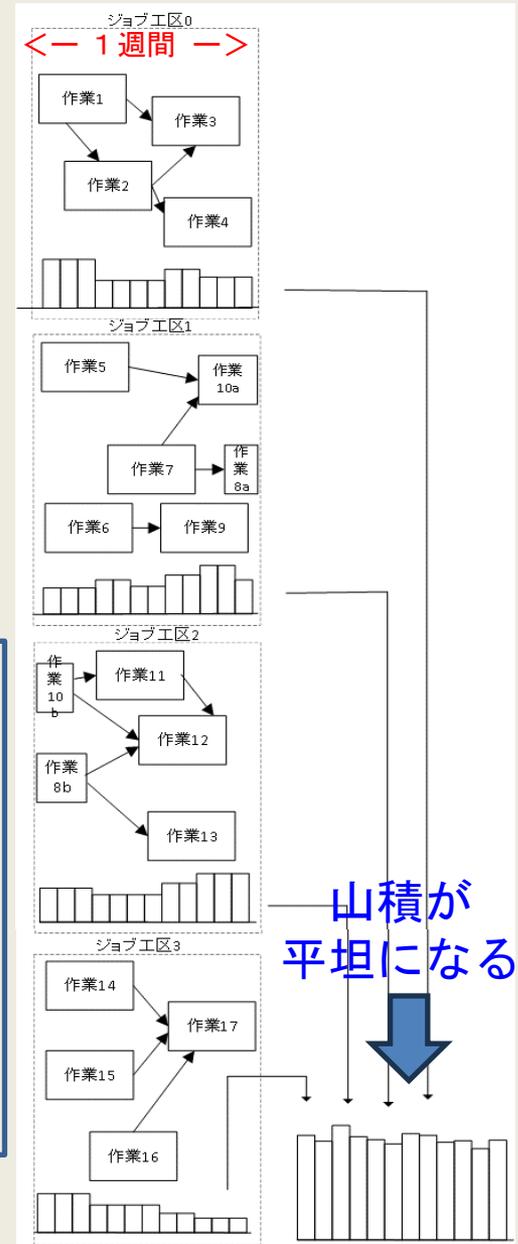


図 各階を4つの工区で作業を実施する場合の工程



山積が
平坦になる



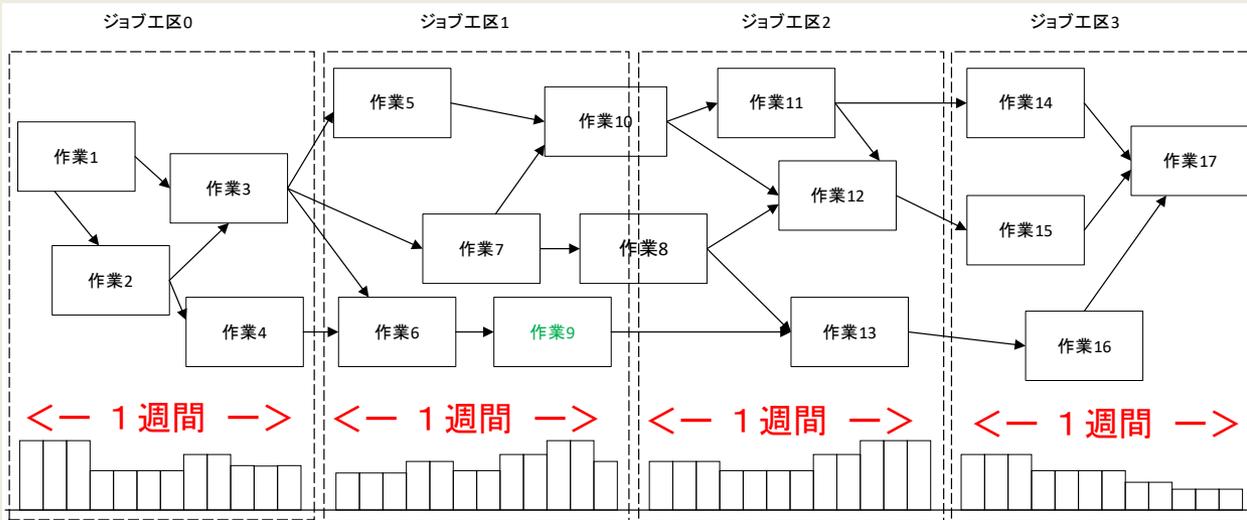


図1 単工区工程のジョブエ区への分割

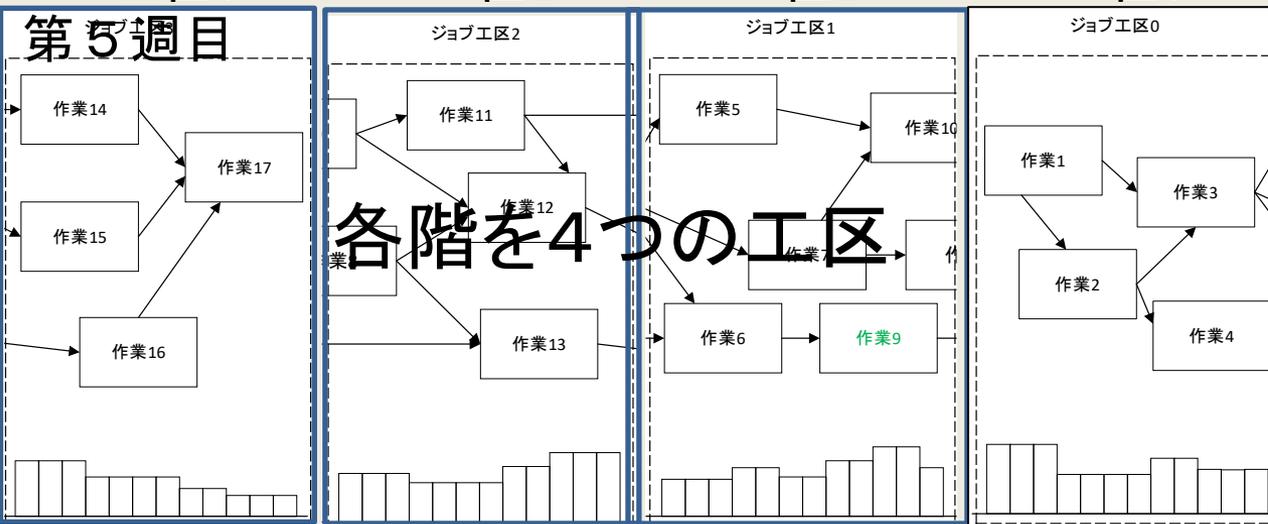
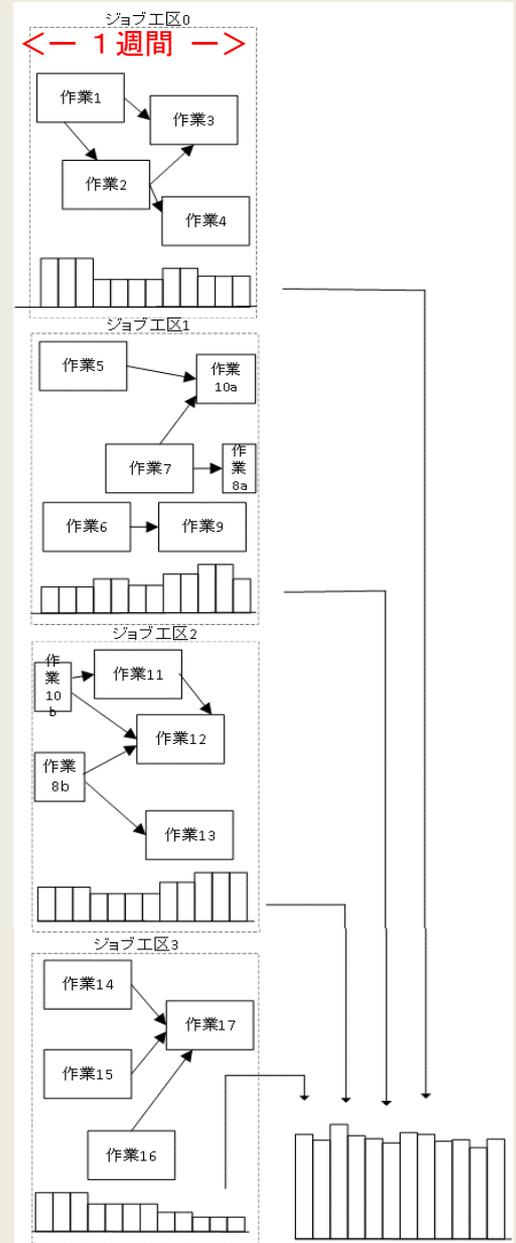


図 各階を4つの工区で作業を実施する場合の工程



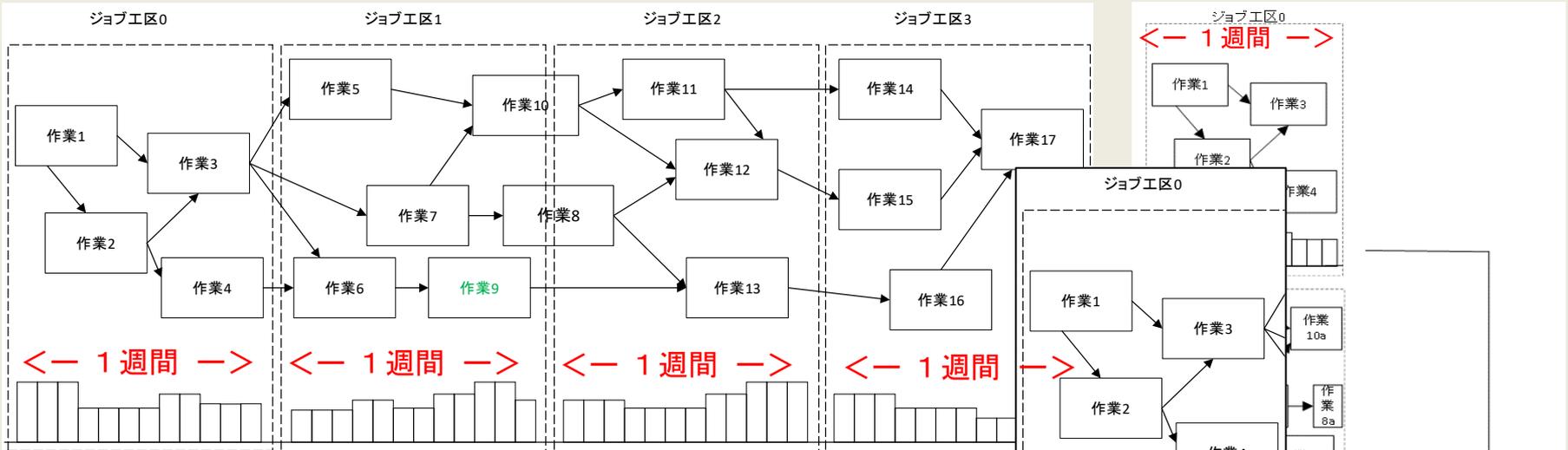


図1 単工区工程のジョブエ区への分割

1階上の区0
第5週目

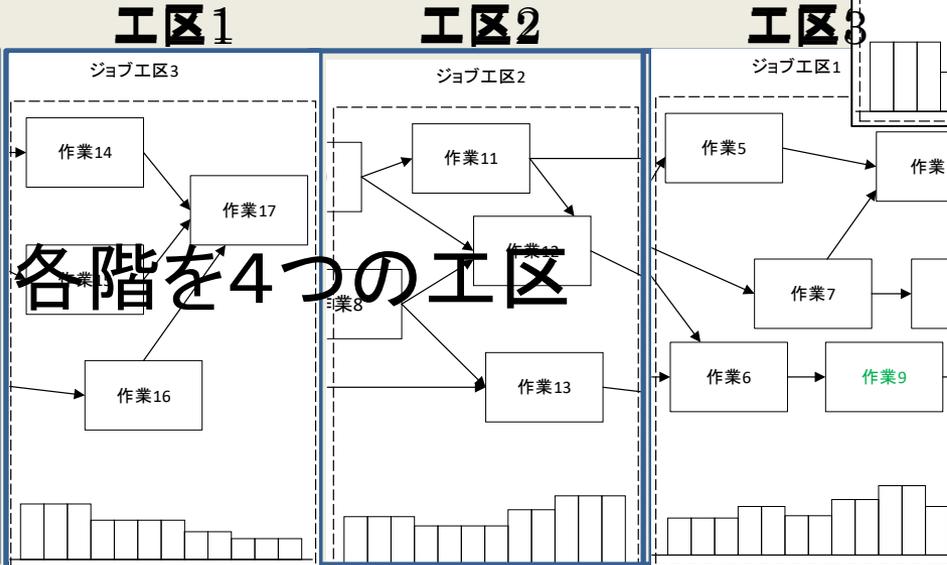
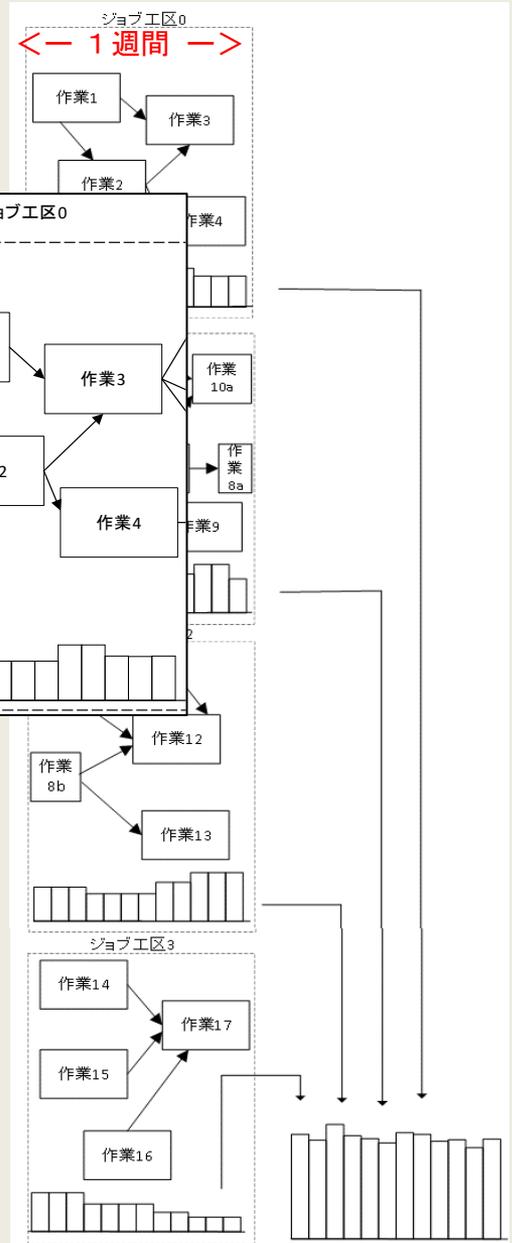


図 各階を4つの工区で作業を実施する場合の工程



多工区同期化工法を、
効率的に運用するためには、
投入する作業者の数が
平準化される様に、
工程を調整する必要がある。

多工区同期化工法の
難しさ

下記の工程項目を調整する

作業方法
作業の順序関係
作業期間
作業の開始時期
投入資源の種類と数量
資源配分の優先順序
など

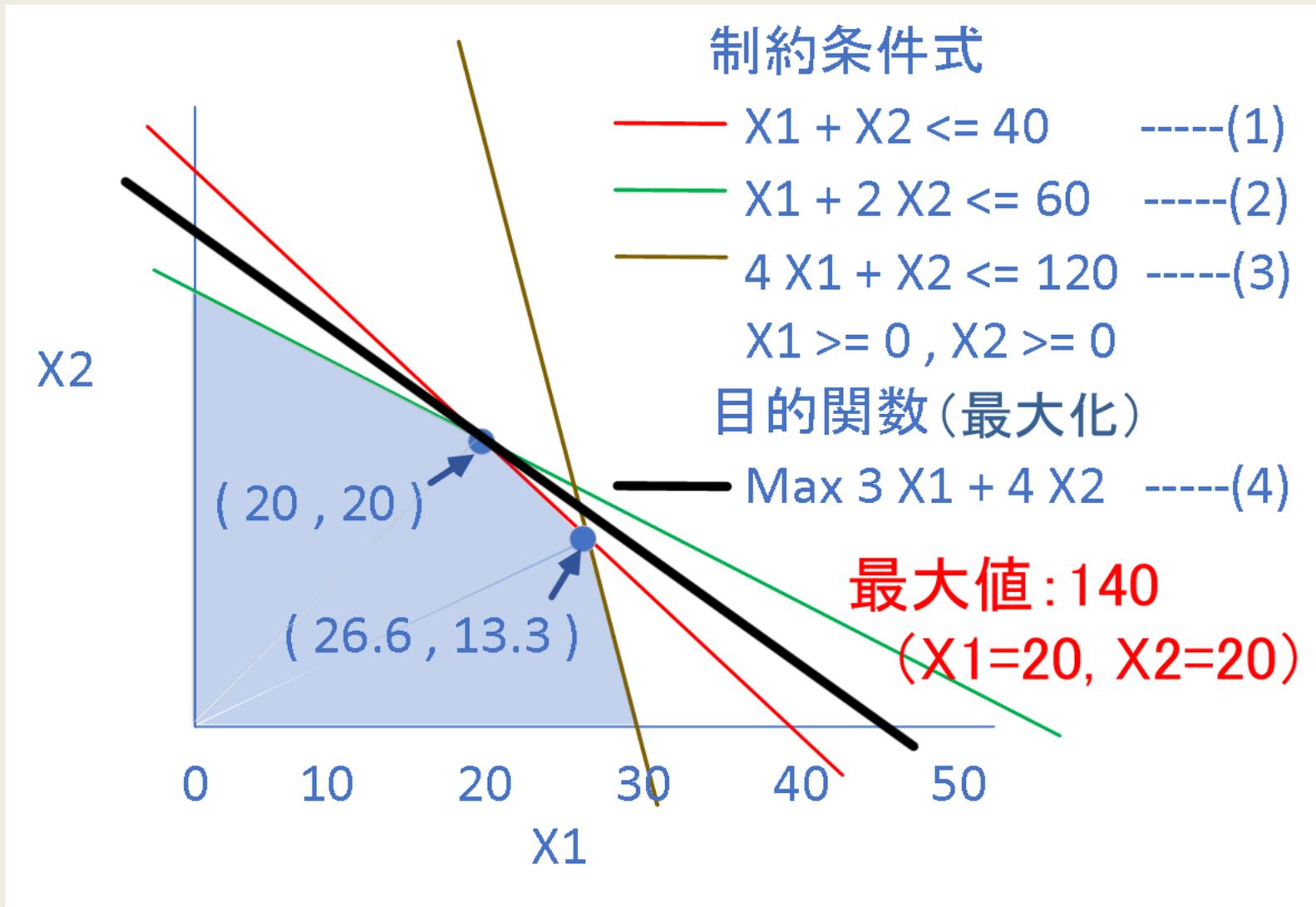
最適な組み合わせ
(人間では至難の技)

組み合わせの最適化を求めるには、数理最適化手法が必要。

多工区同期化工法の工程計画についての
数理最適化モデルとしての解釈
(計画内容の組み合わせの最適化)



数理最適化手法 (Mathematical Optimization)



■ 数理最適化手法 (Mathematical Optimization)

- (1) シンプレックスによる線形計画法(Linear Programming)
(G.B.Dantzig, 1947): 変数 X は実数
- (2) 整数計画法 \longrightarrow 混合整数計画法(MIP)
- (3) 01整数計画法
- (4) 非線形数理計画法($X_1 * X_2, X_1^2$) \longrightarrow 線形化が可能

■ 課題はNP問題

数理モデルの規模が大きくなると、計算時間が指数的に増大する危険性がある。

計算時間の長さは、実行しないと分からない。

■ 経験的には、変数の数、制約条件式の数
数十万であれば、解ける場合がある。(10時間程度)

数十万変数

制約条件式

$$\begin{aligned}
 &a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + a_{13} X_3 + \dots + a_{1n} X_n \leq b_1 \\
 &a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + a_{23} X_3 + \dots + a_{2n} X_n \leq b_2 \\
 &a_{31} X_1 + a_{32} X_2 + a_{33} X_3 + \dots + a_{3n} X_n \leq b_3 \\
 &a_{41} X_1 + a_{42} X_2 + a_{43} X_3 + \dots + a_{4n} X_n \leq b_4 \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &a_{m1} X_1 + a_{m2} X_2 + a_{m3} X_3 + \dots + a_{mn} X_n \leq b_m
 \end{aligned}$$

数十万式

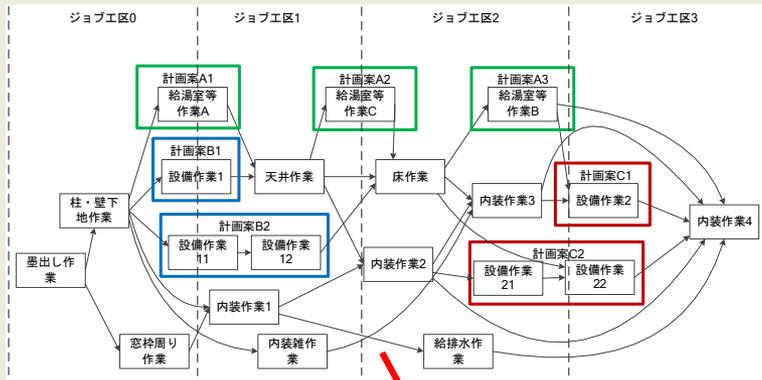
目的関数

$$\text{maximize } c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3 + \dots + c_n X_n$$

提案する数理モデルの規模



多工区同期化工程の工程計算の手順

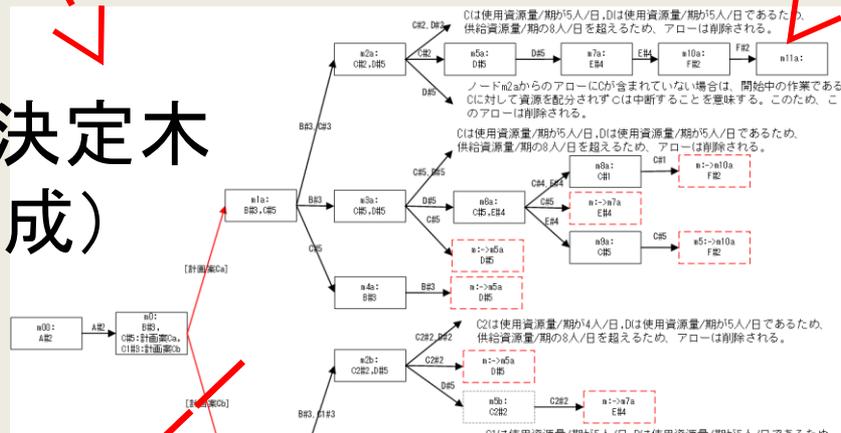


計画案	作業名	作業内容						工程計算の結果			
		作業者職種	作業期間と使用資源量/期の関係			非同時作業	同時開始作業	選択された計画案	担当チーム	ジョブエ区	
			作業方法0	作業方法1	作業方法2						
基本工	墨出し作業	内装多能工	2	2					T3c		
	柱・壁下地作業	内装多能工	2	2					T2a		
	内装作業1	内装多能工	2	5	3	2	4	2	T2a	あり	
	内装作業2	内装多能工	3	2					T1a, T1c		
	内装作業3	内装多能工	3	3					T1c		
	内装作業4	内装多能工	2	4	3	2	4	1	T1c		
	天井作業	内装多能工	2	4	3	2	4	1	作業方法2	T1a	
	床作業	内装多能工	2	4	3	2	4	1	作業方法2	T1a	
	内装雑作業	内装多能工	分割 (小作業は作業期間、使用資源量/期、最大中断回数: 2 (0, 1, 2), (1, 1, 2), (2, 1, 1), (3, 1, 1), (4, 1, 3))							0, T2a, 1, T2a, 2, T2a, 3, T1a, 4, T3c	
	給排水作業	内装多能工	1	3						T3c	
計画案A	計画案A1	給湯室等作業A	給排水多能工	4	2					計画案A3	T2a
計画案B	計画案B1	設備作業1	設備多能工	4	2					計画案B1	T2a
計画案C	計画案C1	設備作業2	設備多能工	2	3						

施工モデル: Visio図

+ Excel表

計画選択の決定木 (自動作成)



目的関数: チームを構成する作業者の総人数/期の最小化

数理モデル

(目的関数、制約条件式)

最適化ソルバーGurobi

→ 工程計画案

多工区同期化工法の工程計画についての 数理モデル(一部)

参考:

嘉納成男:数理最適化手法を用いた工程計画の立案 複数の計画案を含む施工モデルの工程計算、計画系論文集、pp2577-2588、2023.09、日本建築学会

多工区同期化工法による仕上工事の概要

多工区：各階を4工区に分割

仕上工事の内容：

計画案	作業名	作業者職種
基本工程案	墨出し作業	内装多能工
	柱・壁下地作業	内装多能工
	内装作業1	内装多能工
	内装作業2	内装多能工
	内装作業3	内装多能工
	内装作業4	内装多能工
	天井作業	内装多能工
	内装雑作業	内装多能工
	窓枠周り作業	内装多能工
	床作業	内装多能工
	給排水作業	給排水工
自由作業 (計画案A)	給湯室等作業A	給排水工
	給湯室等作業B	給排水工
	給湯室等作業C	給排水工
計画案B1	設備作業1	設備工
計画案B2	設備作業11	設備工
	設備作業12	設備工
計画案C1	設備作業2	設備工
計画案C2	設備作業21	設備工
	設備作業22	設備工



工程編成の複数案

作業実施時期の複数案

工程編成の複数案

作業方法の複数案

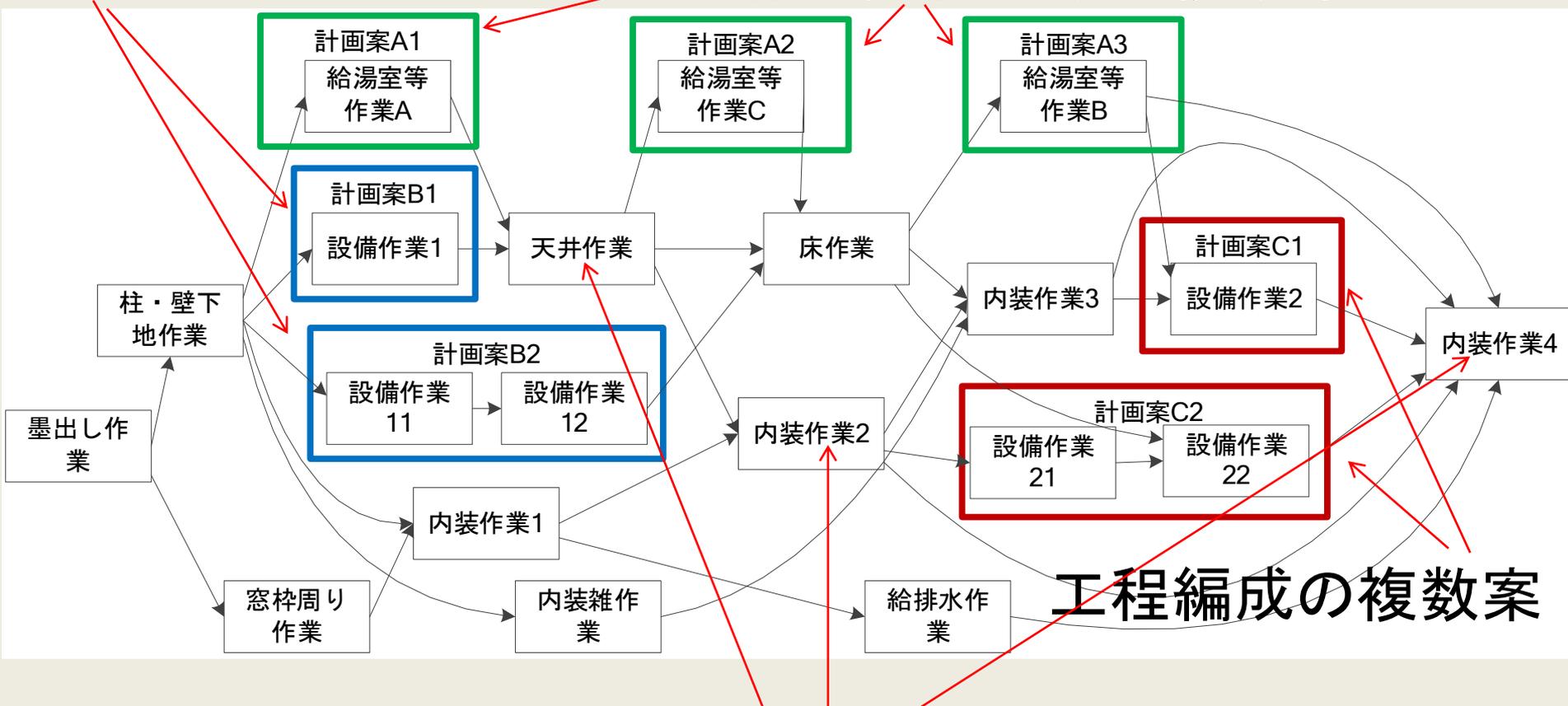


図 複数の計画案で構成した仕上工事の施工モデル

多工区同期化工法における工程計算の結果

数理最適化手法を用いて、
工程編成、作業方法、チームの割り当てなどの
最適な組み合わせを求めた結果



[ジョブ工区0] [ジョブ工区1] [ジョブ工区2] [ジョブ工区3]

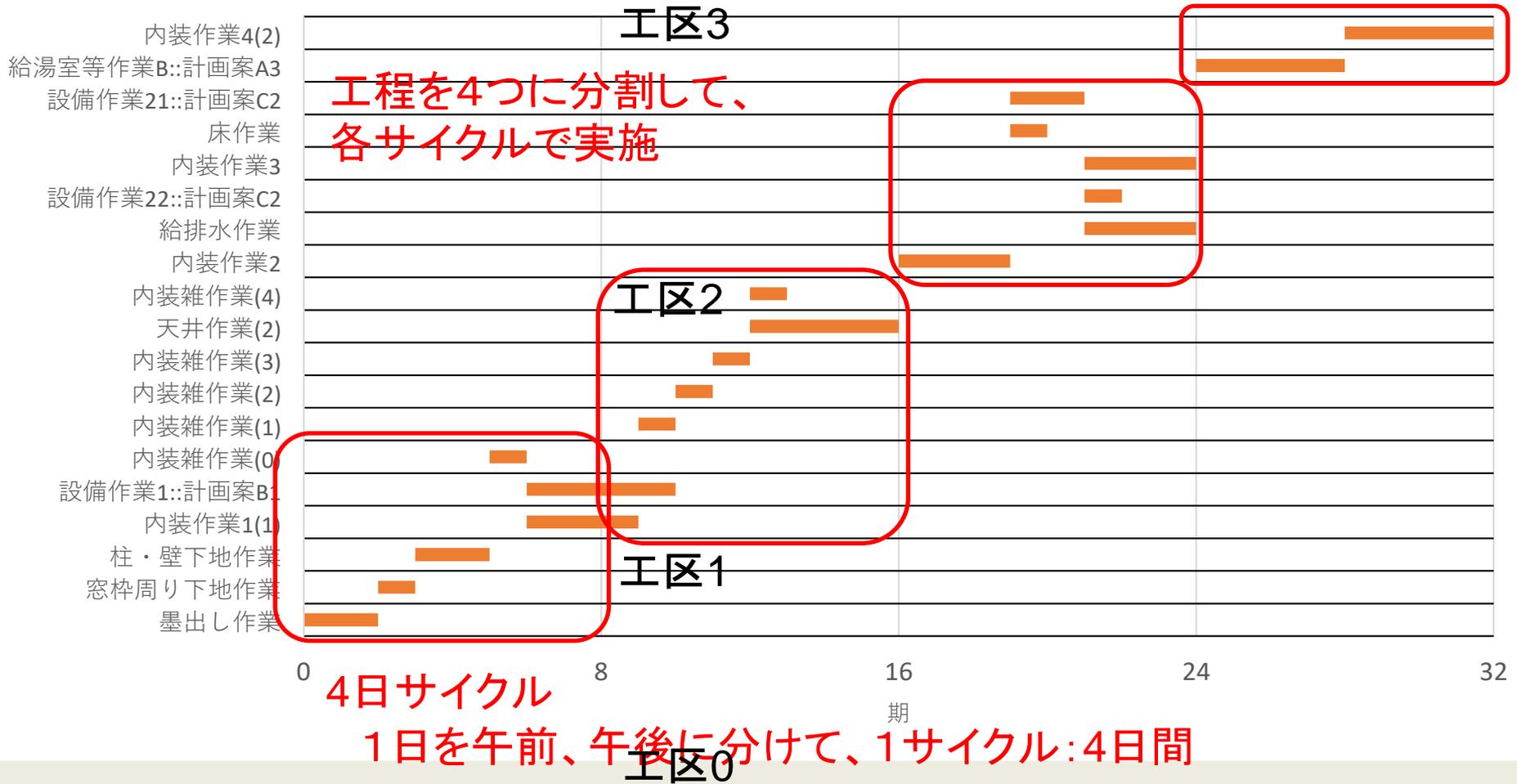
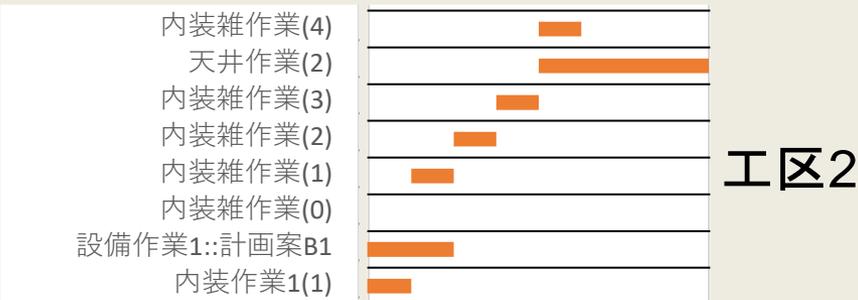
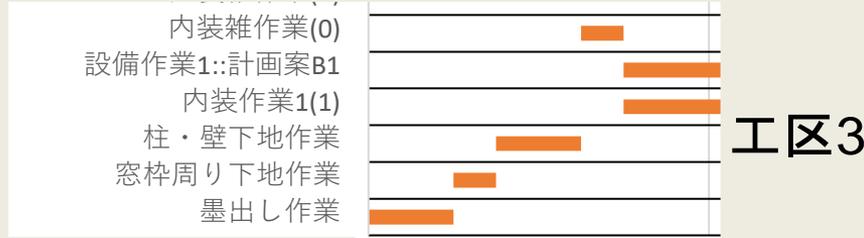
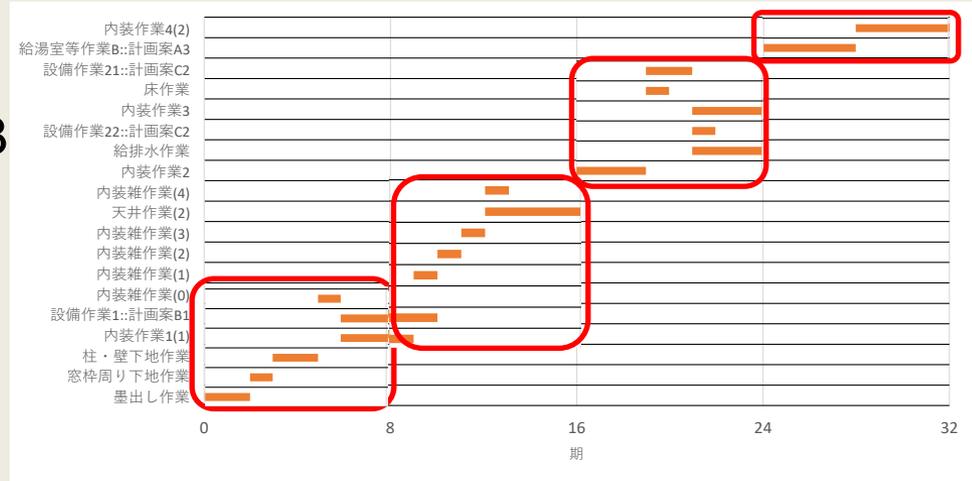


図 各工区の仕上工事の進捗計画



[ジョブ工区0] [ジョブ工区1] [ジョブ工区2] [ジョブ工区3]



工区0~3を同時実行



内装多能工チームの経路

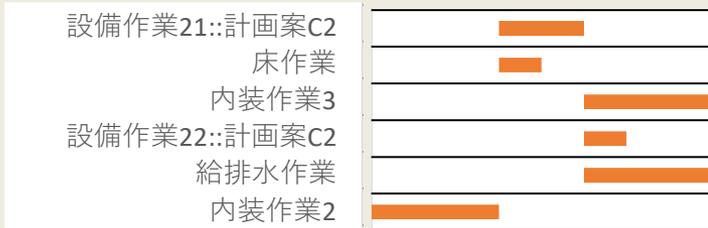


工区3

設備多能工チームの経路



工区2



工区1



工区0

4日サイクル



4日サイクル

各サイクルにおける チームの作業への割り当て



実績情報をどの様に
活用するか

1. 実績情報の収集・分析

2. 実績情報の保存と取り出し

3. 実績情報の活用

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

4. 計画立案の手順と重点

5. 計画案の表現方法

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

実績情報をどの様に活用するか

工事計画をどの様に論理的に立案するか

1. 実績情報の収集・分析 **施工シミュレータの開発** 計画立案の手順と重点

嘉納成男: 作業の活動を中心とした施工モデルの表現方法 施工シミュレーションモデルに関する研究、計画系論文集、pp1569-1578、2017.06、日本建築学会

2. 実績情報の保存と取り出し 5. 計画案の表現方法

3. 実績情報の活用

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

システム・シミュレーション

(コンピュータが利用できる様になった1970年代からの
伝統的手法)

離散系事象シミュレーション

課題:

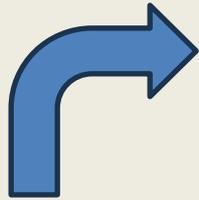
- (1) 複雑な実際の工事の動きをどの様にモデルとして組むか？
施工モデル(CADモデルも含む)の活用
- (2) シミュレーションを実行するシステムの開発はどうするか？
ゲームソフトUnityの活用
- (3) シミュレーションからの結果をどの様に表現するか？
Excel、CADソフト、Unityの活用



鉄筋コンクリート躯体工事のシミュレーション

2017年の研究対象

30年でモデル規模が100倍



1986年の研究対象

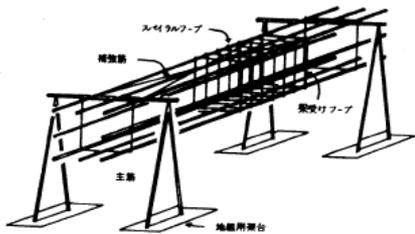


図 柱鉄筋先組作業

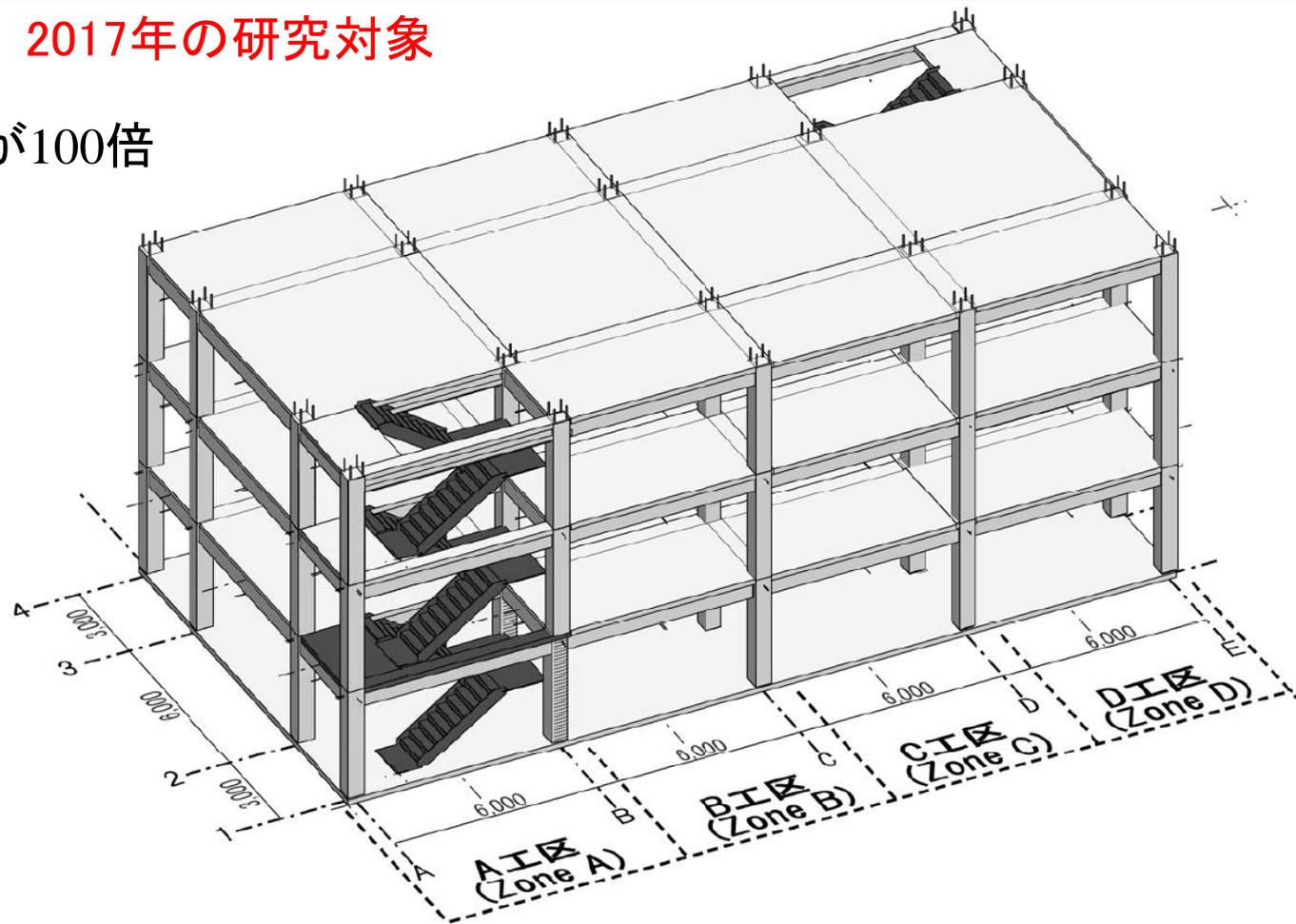


図 鉄筋コンクリート躯体工事

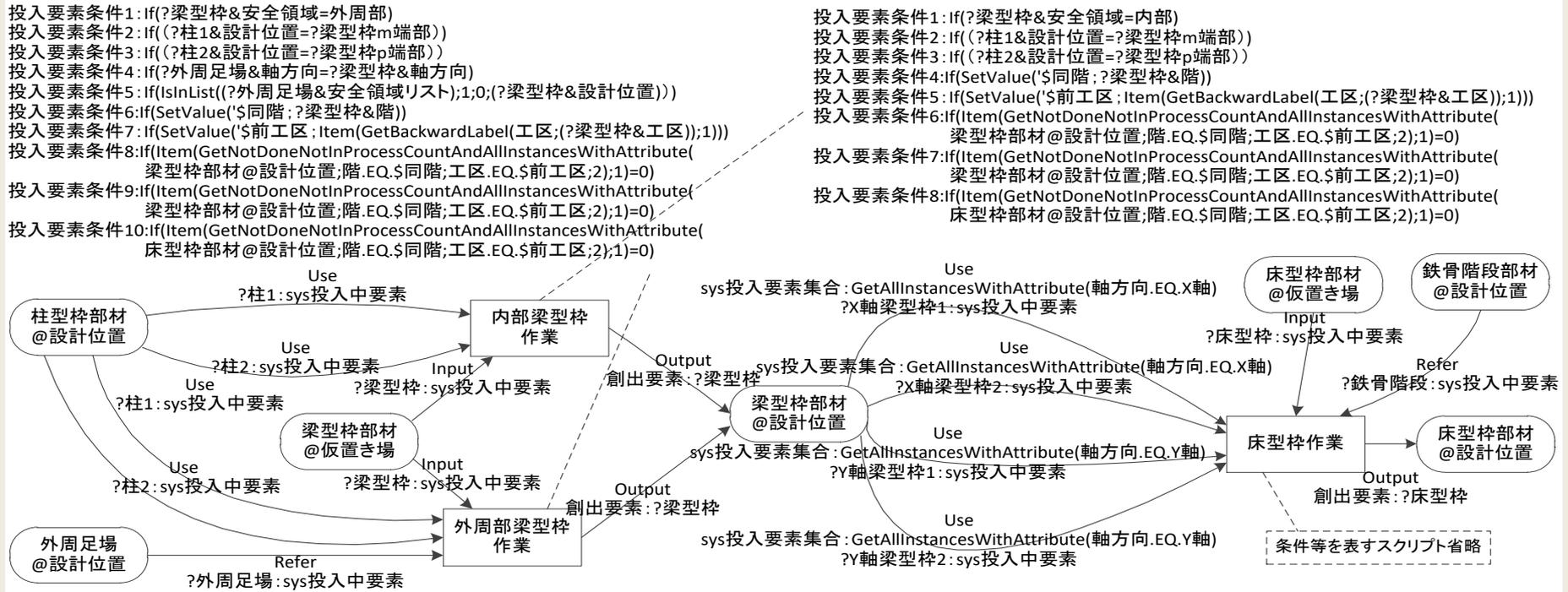


図 鉄筋コンクリート造建築物の施工モデル(壁、床型枠作業)

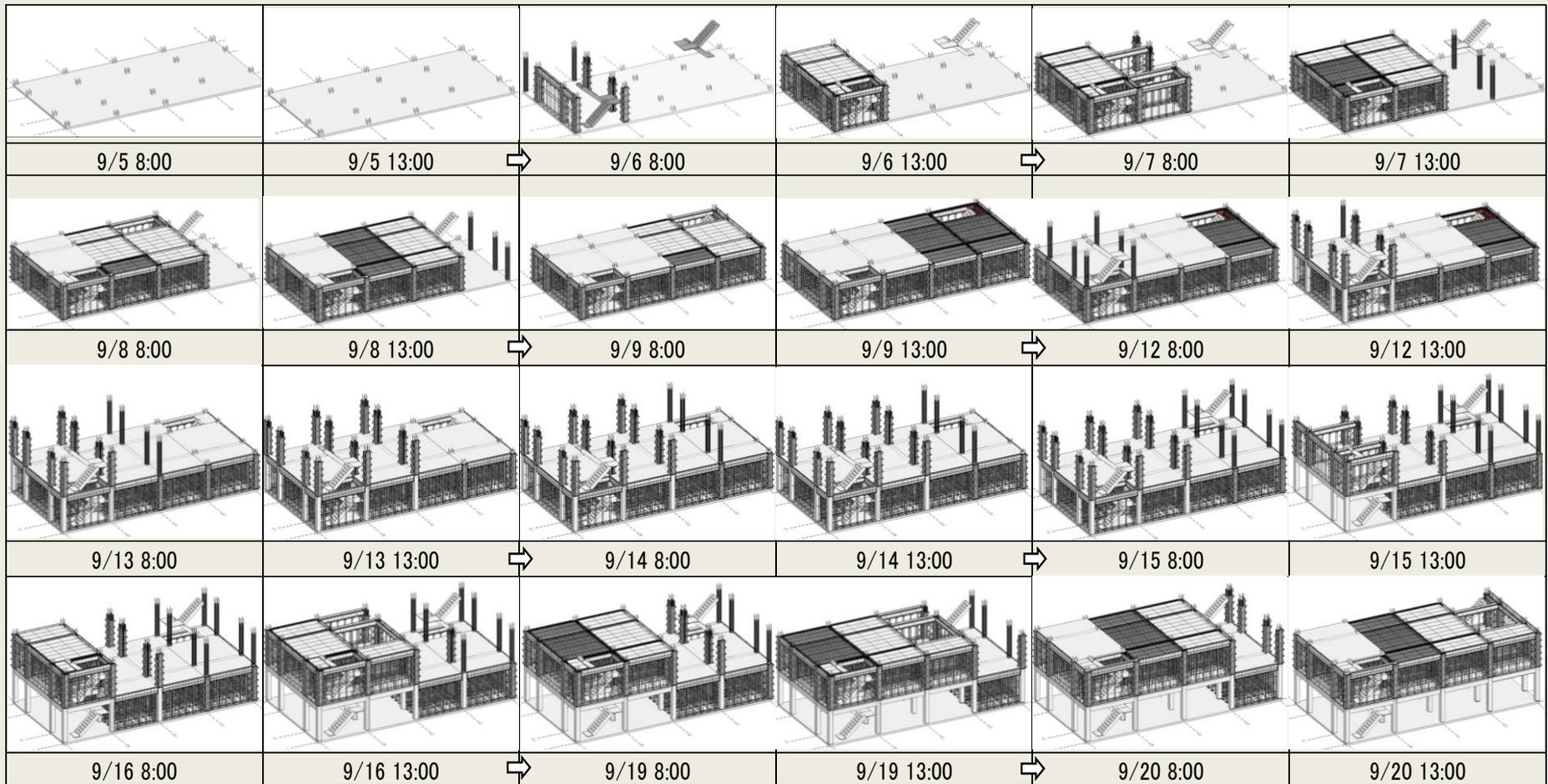
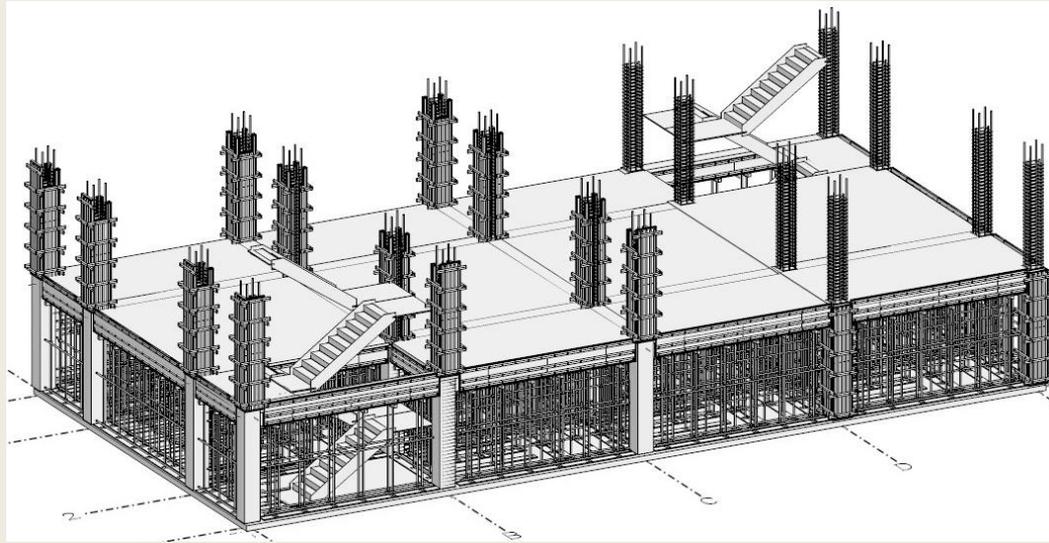


図 鉄筋コンクリート工事のアニメーション(CADソフト)



9/15 8:00



9/16 13:00

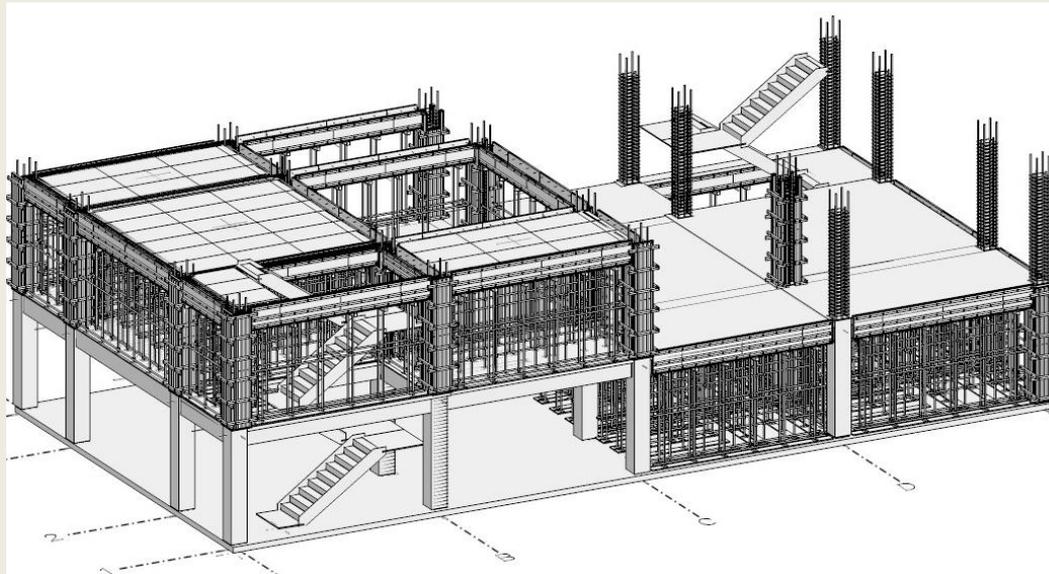


図 鉄筋コンクリート工事の詳細予想図(CADソフト)

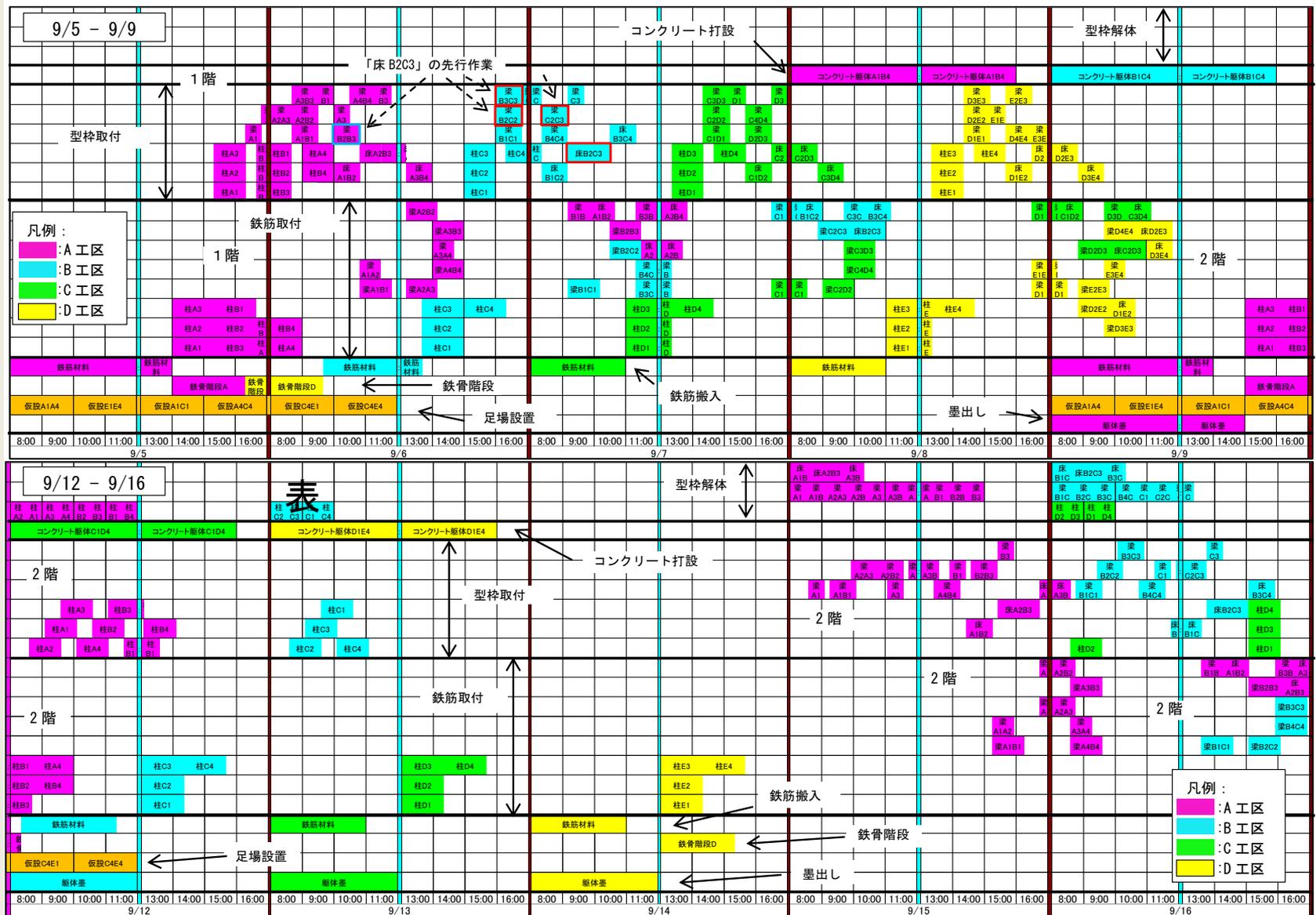


図 詳細工程 (Excel表)

実績情報をどの様に
活用するか

工事計画をどの様に
論理的に立案するか

1. 実績情報の収集・分析

4. 計画立案の手順と重点

2. 実績情報の保存と検索

5. 計画案の表現方法

3. 実績情報の活用

6. 計画案の最適化

7. 計画案の検証

新たな工事の計画案

[本講演内容についての関連文献]

- (1) 嘉納成男: 工事計画の立案方法に関する研究、[土木学会計画学研](#)、1984.01、pp395-402、土木学会
- (2) 嘉納成男: 工程計画におけるエキスパートシステム、計画の推論方法とそのアルゴリズム、[建築生産と管理技術シンポジウム](#)、pp235-240、1988、日本建築学会
- (3) 嘉納成男: 工事計画をめぐる情報の体系化に関する研究(その1) 計画情報の表現方法について、[建築生産と管理技術シンポジウム](#)、pp401-406、1994、日本建築学会
- (4) 嘉納成男・間瀬惇平・金澤英紀・信田直裕・安富彩子: 山留壁の工法推定モデルとその推定精度の比較、[計画系論文集](#)、pp197-204、1998.08、日本建築学会
- (5) 蔡成浩・嘉納成男: 建築工事における作業内容の推定方法に関する研究、[計画系論文集](#)、pp295-302、2003.02、日本建築学会
- (6) 嘉納成男・池田雄一・浜田耕史: 点群データに基づく工事進捗の自動識別に関する研究 PCa工事における出来形の判定、[計画系論文集](#)、pp2081-2090、2015-09、日本建築学会
- (7) 嘉納成男: 作業の活動を中心とした施工モデルの表現方法 施工シミュレーションモデルに関する研究、[計画系論文集](#)、pp1569-1578、2017.06、日本建築学会
- (8) 嘉納成男: 数理最適化手法を用いた工程計画の立案 複数の計画案を含む施工モデルの工程計算、[計画系論文集](#)、pp2577-2588、2023.09、日本建築学会

ご静聴ありがとうございました。

関連文献pdfをご希望の方は、kano@waseda.jp まで。

