物流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

MODELING FOR LOGISTICS-ORIENTED CONSTRUCTION PROCESS

Simulation models of a construction site

嘉納 成男^{*1}

Naruo KANO

Building constructions requires large varieties and tremendous amounts of materials. Important planning items to handle materials at a construction site include methods of logistic activities (carrying-in, elevating, and transporting), the capacity of elevating equipment, scheduling, and the locations and areas of the stock yard for materials. This paper discusses the methods for representing logistics-oriented models.

Keywords: Simulation, Logistics Model, Building Construction, Planning, Lift

シミュレーション, 物流モデル, 建築工事, 工事計画, 工事用エレベータ

1. 緒言

建築工事の特徴として取付ける部材の種類や数量が多いことが挙げられ、その搬入・揚重・運搬を行う各種作業の方法、工事設備の能力、時期、仮置き場の位置や面積なども重要な工事計画の項目となる。物流においては、工事用エレベータやクレーン、最近ではフォークリフトや電動台車などが使用されるが、本報では、工事用エレベータを用いる物流について検討した。

工事現場における物流、特に揚重についての研究は、霞が関ビル建設に関して二階²⁾(1974)の揚重エレベータに関する研究に始まり、その後、寺林³⁾(1985)の実態調査、森田ら⁴⁾(1996)のJob-Shop問題を用いた揚重スケジュールの研究がある。また、松本⁵⁾(1997)は揚重資材の数量予測の回帰式を提案し、土橋ら⁶⁾(2001)は、工場からの運送と現場内の揚重・間配りとを統合したマネジメントシステムを提案し、志手⁷⁾(2011)は内装に関する物流の特徴と傾向を分析している。また、P.G.Ioannou, J.C.Martinez⁸⁾(1996)はSTROBOSCOPEを用いた物流のシミュレーションを、C.-Y. Cho⁹⁾(2010)は、資材の揚重について各種の方程式を用いた計算シミュレーションで揚重計画の最適化を試みている。これらの研究は、稼働実績や揚重計画について扱っているが、工事現場における各種資材の物流について、詳細な時系列シミュレーションを実施した研究はない。

本報では、前報¹⁾で示した、組立て、取付け、解体などの作業を中心とした施工モデルの方法論に基づき、資材の搬入・揚重・運搬や副産物等の搬出を施工モデルとして表現する方法、及びシミュレーションの計算方法を提案し、事例によってその有用性を検証した。

2. 物流資材

2.1. 資材の物流パターン

本研究では、現場で物流の対象となる資材について、(1)資材が台車やパレットに積載されているか否か、梱包されているか否か、(2)

台車からの荷降ろしや梱包材の荷解きを何処で行うか、(3)取付け作業によって副産物が発生するか否か、について以下の如く分類した。

(1) 資材の積載・梱包について

- a. 台車（又はパレット）上に積載された資材（台車資材）[台]
- b. 梱包された資材（梱包資材）[梱]
- c. 作業に使用する状態の資材（単品資材）[単]

(2) 荷降ろし・荷解きの場所

- a. 現場に搬入した1階仮置き場において
- b. 作業階まで揚重した仮置き場において
- c. 作業を行う住戸内

(3) 副産物の有無

- a. 作業によって副産物を発生する資材
- b. 作業によって副産物を発生しない資材

物流では、資材の荷降ろしや荷解きによって、空の台車や梱包材が発生する。空の台車は、工事用エレベータに載せて1階まで降して搬出することとし、梱包材や残材等の副産物は各階に事前に配置した搬出台車に入れて、一杯になった搬出台車は工事用エレベータで1階まで降ろして現場外に搬出することとした。なお、工事用エレベータは、上記資材以外にも作業者の上下移動、足場等の仮設資材の盛替え等を使用されるが、本事例ではこれらは含めていない。

2.2. 現場内における資材の流れ

物流工程は、①搬入、②1階仮置き、③1階での荷降ろし・荷解き、④揚重、⑤作業階仮置き、⑥作業階での荷降ろし・荷解き、⑦小運搬、⑧作業場所での荷降ろし・荷解き、で構成されている。また、不要になった空の台車、梱包材、作業から発生する残材を現場外に搬出するには、①空の台車の小運搬、②空の台車の揚重（下げ）、③副産物の小運搬、④副産物の搬出台車への投入、⑤搬出台車の揚重（下降）、⑥台車・搬出台車の搬出などがある。

図1は、資材が搬入されて、台車や副産物が搬出されるまでの物

^{*1} 早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Dr.Eng.

流を示した概念図である。同図では資材が搬入された後、台車から荷降しされた資材は工事エレベータに積込まれる。そして作業階に到着した後、梱包は荷解きされて作業場所まで小運搬される。作業場所で作業が行われ、発生した残材は小運搬されて搬出台車に投入される。空になった台車と搬出台車は、工事エレベータで1階まで降され、搬出場所まで小運搬された後、現場外に搬出される。

Fig. 1 A Conceptual Model of Logistics at a Site

3. 施工モデルの表現方法の概要

3.1. ワークパッケージによる作業の表現

前報で示した作業工程の表現方法について概要を示す。(詳細は、既報¹⁾を参照されたい)作業は、ワークパッケージとして以下に示す3つのシステム要素をノードとし、要素間の関係を4種類のアローで繋ぐことによって、一つのグラフ構造で表現している。

[ノード]

- (1) 作業：工事で計画の対象となる活動、行為
- (2) 実体：物理的実体であり、形状を有するもの。すなわち、作業員、材料・部材、仮設資材、工事機械など
- (3) 空間：資材置き場、工区、通路、作業領域など

[アロー]

- (1) Input アロー：資機材等を作業に投入する関係
- (2) Output アロー：作業から資機材等が創出される関係
- (3) Use アロー：作業で資機材等を一時的に占有して使用する関係
- (4) Refer アロー：作業で資機材等の存在が必要とされる関係

要素には、現場に存在する部材や資材に一つ一つに対応する「実質要素」と、これらの要素を特定の観点からグループ化した「概念要素」とがある。概念要素はノードとして示し、実質要素はワークパッケージのノードとアローの中を流すことによってモデル化する方法を用いた。そして、様々な箇所で行われる同様な作業を一つの作業ノードで定義することによって施工モデルの簡素化を図っている。

図2は、柱鉄筋と柱型枠についての作業のワークパッケージを繋ぎ合わせた施工モデルである。柱鉄筋作業が柱鉄筋部材を Input し、設計位置に柱鉄筋部材を Output する。そして、柱型枠作業が柱型枠部材を Input し、既に存在する柱鉄筋部材の周りに柱型枠部材を建て込み、設計位置に Output する工程をモデル化している。個々の部材(柱鉄筋 ●、柱型枠 ○)を実質要素として表現し、ワークパッケージの中を流すことによって、柱が数多くあっても柱

鉄筋作業と柱型枠作業は一つの作業ノードのみで表現することが出来る特徴がある。

Fig. 2 Workpackages of Reinforcement Works and Form Works

3.2. スクリプトによる各種条件式の表現

現場に存在する各種要素の内容や要素間の関係をより詳細に表現するには、施工モデルでは「属性名称、属性値、属性単位」から構成される属性データを用いている。そして、この属性を用いて変数・関数を併用した演算式・条件式をスクリプトで記述することによって、複雑な工程の内容を詳細に施工モデルとして定義出来る様になっている。

4. 物流を中心とした施工モデル

4.1. 資材の流れのモデル化

工事現場内における資材の流れをモデル化するには、作業ノードと仮置き場の資材や空間を意味する概念要素ノードを用いて図.3の如く表す。運搬作業への資材の投入は Input アローで、運搬先は Output アローで繋がる概念要素ノードで表現している。物流の流れに沿って、揚重や運搬の作業と仮置き場所とをアローで繋げて行くことによって、資材の物流をモデル化している。なお、図中の「○」は、運搬作業によって資材(実質要素)が様々な仮置き場を介して、位置が変化していく様子を模式的に示している。

図3では、運搬作業の仮置き場を表すには、空間ノード又は実体ノードが使われている。空間ノードは仮置き場等の空間を表現しているが、実体ノードは仮置き場に保管されている資材そのものを表現している。仮置き場に同様な資材が保管される場合は実体ノードで表現する方が良いが、運搬作業などで多様な資材が保管される場合には、空間ノードを使用の方がモデルとしては理解し易い。

4.2. 物流における資材の取り扱い

4.2.1. 積み込み・荷降しと梱包・荷解き

物流では、搬入、揚重、小運搬、搬出等作業の他に、台車やパレットから資材を荷降しする作業や、梱包材に包まれた資材を荷解きする作業、更には工事用エレベータの荷台への資材の積み込みや荷台からの資材の取出し作業がある。

このような資材の取り扱いでは、荷台に資材を積み込むことによって、荷台の上昇とともに資材も上昇することになる。また、一つの梱包材を荷解きするとその中から複数の資材が発生する。資材の取り扱いによって、物流の途中で資材の性質や個数が変化するため、これ

Fig. 3 Flows of Materials at a site

らを扱う関数をスクリプトとして作業に付与し、資材の取り扱いによって起こる様々な資材の挙動をモデル化している。

4.2.2 資材の積み込みと取出し

A. 資材の積み込み

図.4 は、資材 を工事用エレベータに積んだ後、荷台 の上昇とともに、取出し階まで資材が移動する施工モデルを示している。積み込み作業は、積み込む資材 (? 資材 0) を荷台 (? 荷台) に Input した後に、関数「AttachAnInstance」を用いて資材を荷台に固定すると、資材は荷台とともに移動することになる。ただし、工事用エレベータには許容最大重量があるため、既に積込まれている資材の総重量に追加する資材の重量を加えて、許容最大重量を超えていないことを開始条件で確認して積んでいる。

Fig.4 Loading on a Platform of an Elevator

B. 資材の荷降し

図 5 は、作業階において、荷台に載っている資材を荷降しする作業をモデル化している。資材の荷降し作業では、作業終了時点で関数「DetachAllInstancesWithAttribute」を用いて、荷台が到着した階（現在階）と資材の作業階を意味する階（目標階）が一致する資材を荷台 (? 荷台 2) から取出す。この関数を実行することによって、荷台から取外された資材は「sysDetached 要素」に割り当てられる

Fig.5 Unloading from a Platform of an Elevator

ため、これを変数「? 資材集合」へ代入して、その階で荷降しすべき資材を所定の階で取出すことが出来る。

4.2.3. 資材の梱包と荷解き

A. 資材の梱包

工事現場における梱包資材は、事前に工場など工事現場外で行われているため、梱包作業を施工モデルで記述することは殆どない。搬入時点で梱包されている資材については、属性「梱包要素集合」によって梱包材と梱包される資材を定義する。これによって、以降で説明する荷解き作業を実行すると、その中にある複数の資材と梱包材とを取り出すことが出来る。

B. 資材の荷解き

図.6 は、仮置き場に運搬された梱包資材を荷解きする作業を示している。同図では、梱包資材 に対して、荷解き作業で関数「UnpackAllInstances」を実行することによって、梱包資材の中にあるすべての資材 と梱包材 を分離し、資材は作業場まで

Fig.6 Unpacking a Package

運び、不要になった梱包材は搬出置き場に運び作業を示している。

4.3. 資材における積載関係と梱包関係の構造

積み込み・荷降し、梱包・荷解きの作業を実行すると、複数の資材が一つの資材に纏められたり、一つ資材が複数の資材に分かれたりする。シミュレーションにおいてこの仕組みを実現するには、搬入する資材にこの親子関係を登録する必要がある。本研究では、この関係を積載関係と梱包関係の二つを用いて構造化した。図 7 は、事例に用いた内装作業 1 で使用する資材の構造を示している。

図 7 に示した資材「2・3 内装 1 資材 A_台梱副」について、その動きを述べると次の如くなる。資材「2・3 内装 1 資材 A_台梱副」は、偶数階と奇数階の 2 階分（例えば、2 階と 3 階）の資材を纏めて台車に積載した状態で搬入される。搬入後 1 階で荷降しされて、それぞれの階の資材「2 階内装 1 資材 A」と資材「3 階内装 1 資材 A」（3 階の資材の親子関係は 2 階と同様であるため一部割愛して表示している）が取り出される。そして、台車は不要になるため現場外に搬出される。資材「2 階内装 1 資材 A」は作業階の 2 階に揚重した後、梱包を荷解きして、01~04 号室の資材（例えば、「2 階 01 号室内装 1 資材 X」）に分けられ、各住戸に小運搬される。そして、内装作業 1 を実施することによって「2 階 01 号室内装 1 資材」が設計位置に取付けられ、副産物「2 階 01 号室内装 1 資材残材」が発生する。

Fig.7 Hierarchical Structure of Materials

4.4. 空間の施工モデル

4.4.1. 概念要素のサブクラスによる細分化

施工モデルで、資材の仮置き場を定義する場合、現場に分散する仮置き場を数少ない概念要素ノードで定義している。本施工モデルの特徴として、一つの空間ノードによって、様々な箇所（例えば、2階から9階の仮置き場）にある空間を纏めて表すことが出来るため、

施工モデルの簡潔性を高めている。

しかし、各階や各工区に分散している仮置き場が多くなると、一つの空間ノードの中に数多くの資材が保存されることになる。これは、作業開始の条件や組み合わせ条件を満足する資材をその空間ノードの中から選び出すための演算時間が増大することを意味する。このため、一つの空間ノードの中を複数のサブクラスで区分し、サブクラスの中に分散して資材を登録することによって、上記の演算時間の短縮を図った。

4.4.2. サブクラス付き概念要素への投入と創出

図8は、排出台車に副産物を投入して、エレベータ前まで運搬する作業を示している。すべての階に搬出台車と副産物を仮置きする場所があるため、各階を纏めて一つの施工モデルで表現し、この中をサブクラスに分割している。図8では、副産物の小運搬において、その副産物が存在する階（例えば「6階」）と文字列「副産物置き場」を関数「AddStr」で足し合わせて、「6階副産物置き場」と言う名称のサブクラスの中に、副産物を格納している。

仮置きされた副産物はその階にある搬出台車に入れて、エレベータ前まで小運搬を行うため、副産物が置かれている階と台車が置かれている階とが一致した階についてその階の副産物と台車を選択し、関数「AttachAnInstance」を用いて、台車に副産物を積込んでいる。なお、関数「TransferAnInstanceToActivity」は空間ノードに保管されている資材を作業「エレベータ前に小運搬」に投入することを意味している。なお、投入要素条件1-6によって、搬出台車の積載容積が許容最大容積を超えないことを条件として調べている。

4.5. 保管空間の容量制約

資材の仮置き場は、その大きさを仮置きできる資材の量が制約される。この制約条件を施工モデルで表現するにはスクリプトを用いる。各資材には属性「保管 Foot 面積」を定義し、保管空間には属性「保管許容面積」を定義することによって、資材は様々な保管空間においてその面積に見合った数量を保管することが出来る。

図9の運搬作業では、運搬先の空き状況を開始条件-1で調べた上で、条件が満足する場合にのみ運搬作業が実行される。なお、作業が終了した時点で、スクリプトを用いて仮置き場2の保管可能な数量を減じ、仮置き場1の保管可能な数量を増加させている。

4.6. 工事用エレベータに関する施工モデル

4.6.1 工事設備の動きを表現するスクリプト

工事設備の詳細な動きを施工モデルに組み込むには、スクリプトで記述するが、複雑な動きを表現するためにはスクリプトも多くの行数が必要になる。スクリプトの行数が多くなると、その作成に手間が掛りまた判り難いモデルとなる。しかし、工事設備等の動きは機種によって、工事現場ではほぼ同じ動きをするため、スクリプトを現場毎に作成する必要はなく、一度作成すれば他工事にも転用することが出来る特徴がある。このため、工事設備についての複雑なスクリプトは、施工モデルの簡潔性を損なうものではない。

4.6.2. 工事用エレベータの動き

工事用エレベータの動きには、「扉の開放」、「荷降し」、「荷の積み込み」、荷台移動（上昇・下降）、「扉の閉鎖」の動きがある。
工事用エレベータの動きの概要を示すと以下の如くなる。

Fig. 8 Logistic Works Using Subclasses

Fig. 9 Transporting for a Restricted Space of Stock Area

- (1) 扉の開放：荷台が目指す階に到着すると扉を開ける
- (2) 荷降し：荷台に載っている荷の中で、停止した階が揚重先である荷のみを取出す。
- (3) 荷の積み込み：エレベータに他の階へ揚重する荷が載っている場合は、その揚重方向と同じ方向の目標階を有する資材のみを積み込むことが出来る。なお、積み込みに際しては、エレベータの許容最大重量を超えて積み込むことは出来ない。
- (4) 扉の閉鎖：荷降し・積み込みが終了すれば、扉を閉める。
- (5) 上下移動：扉が閉鎖した後、積み込まれた荷の目標階に向けて移動（上昇または下降）する。そして、その途中階で盛り替える資機材や搬出する台車などがあれば、その階に途中停止し、エレベータの揚重方向の目標階を有する資材をエレベータに積み込む。そして、積み込まれた荷の目標階の中で、現在のエレベータの停止階に最も近い階に向けて移動する。

上記の動きをスクリプトで表現すると、5章の図12の施工モデルとなる。（詳細については5章で示す。）

4.7. 資材の搬入時期と取付作業の開始時期

4.7.1. 資材の搬入時期

資材の搬入時期は、資材がそれを使用する作業の開始時期の直前に到着する様にすることが望ましく、資材が長期に亘って作業場前に仮置きされることが無い様に搬入時期を決める必要がある。しかし資材の搬入時期は作業の開始時期よりも早い場合、シミュレーションを実行すると、資材を搬入する時点では作業の開始時期はまだ決まっていないと言う矛盾がある。このため、資材の搬入時期を決めることが出来ない。

4.7.2. 資材の搬入時期の調整

前項の問題を解決するため、本研究では以下の方法を用いた。
まず、工事用エレベータの各階ゲートの設置時期を、その階で使用する資材の搬入時期の初期値として与えた。そして、シミュレー

ションを実施すると、搬入した資材はそれを使用する作業の開始時期よりも相当早い時点で作業場前に到着することになり、仮置き場で滞留が発生することになる。

次に、この滞留の期間から到着余裕（作業開始時期から前もって資材が到着すべき余裕期間）を差し引いた期間が、資材の到着が早過ぎる期間（仮置き場で無駄に滞留状態となっている期間）となる。この期間だけ資材の搬入時期を遅らせれば、次のシミュレーションでは、資材は作業場前に作業の開始時期から到着余裕を差し引いた時期に原率的には到着することになる。しかし、搬入、揚重、小運搬等の作業において発生する他資材と競合による作業の手待ちや資材の滞留のために、計算通りにはならない。

このため、1 回目のシミュレーションの結果に基づき、上記の方法で各資材の搬入時期を決めて、2 回目のシミュレーションを実施する。2 回目の結果で、資材の到着がまだ早過ぎる場合には、同様に 3 回目のシミュレーションを行う。これを繰り返すことによって、資材の作業場所への到着は、ほぼ到着余裕を考慮した時期となる。5 章に示した事例では 3 回のシミュレーションで、資材の滞留期間はほぼ到着余裕期間に収束している。

4.8. シミュレーション間隔の複数化

物流を中心とした作業の特徴は、比較的短い期間の作業（積み込み、揚重、荷解きなど）が多く集まって、一つの物流工程を形成している。このため、コンピュータ上で再現するためには、シミュレーションの時間間隔も細かくせざるを得ない。例えば、「分」単位の間隔で作業時間が与えられる場合は、少なくとも 0.5 分間隔でシミュレーションを行う必要がある。一方、内装工程の様な作業は、「時」や「日」単位で作業期間が決められている場合が多い。この比較的長い作業期間を持つ作業について、物流作業と同様な時間間隔（例えば、0.5 分）でシミュレーションを実施すると、1 日の作業で 2,880 回のシミュレーション試行を行う必要があり、演算時間の増大に繋がる。本研究では、この問題を解決するため、作業期間の設定の細かさに対応させて、その試行間隔を変化させることとした。5 章の事例では、物流関連作業は 0.5 分間隔、内装関連作業は暦日時刻が「0 分 0 秒」となる時刻で作業の開始と終了の可否を調べることによって、試行間隔が 1 時間毎になる様にした。この結果、内装作業については、試行は 1 日 2,880 回から 24 回に低減して演算時間の大幅な短縮となる。

5. 事例への適用

5.1. 工事概要

事例は、鉄筋コンクリート造の集合住宅における内装工程について、資材の物流を施工モデルで表現して、そのシミュレーションを実施した。対象とした建築物は、図 10 に示す各階 8 戸の住戸を有する 9 階建ての建物である。住戸部は 2 階から 9 階までであり、計 64 戸の住戸がある。

シミュレーションは、各住戸で行われる 10 種類の内装作業と各作業（内装墨出し作業以外の 9 種類の作業）で使用する資材の搬入、揚重、荷降し、荷解き、小運搬、及び空の台車、副産物の搬出などの物流作業を対象とした。資材は、住戸総数 64 戸に対する 9 種類の作業について各 1 個が各住戸に運ばれるため、その資材数は 576 個ある。また、各資材の搬入時は、階別に纏められて積載した

台車や梱包された姿で搬入され、また 6 つの内装作業においては残材等の副産物が発生するため、これらを加えるとシミュレーションで扱う資材数は約 900 程度になる。

Fig. 10 Plan of an Apartment House

5.2. 物流資材

2 章で示した資材のパターンの組み合わせは 3x3x2、計 18 種類ある。この中から 9 種類のパターンの資材を用いて内装作業を行うこととした。以下にその資材の搬入から作業への投入までの概要を示す。なお、資材名に付加されているコードは、2 章で述べた資材パターンを意味する。

- (1) 内装 1 資材[台梱副]: 搬入→台車荷降し(1 階)→揚重→梱包荷解き(n 階)→小運搬→内装作業 1→副産物
- (2) 内装 2 資材[台梱]: 搬入→台車荷降し(1 階)→揚重→梱包荷解き(n 階)→小運搬→内装作業 2
- (3) 内装 3 資材[台副]: 搬入→揚重→台車荷降し(n 階)→梱包荷解き(n 階)→小運搬→内装作業 3→副産物
- (4) 内装 4 資材[台]: 搬入→揚重→台車荷降し(n 階)→梱包荷解き(n 階)→小運搬→内装作業 4
- (5) 内装 5 資材[台副]: 搬入→揚重→小運搬→台車荷降し(i 工区)→内装作業 5→副産物
- (6) 内装 6 資材[台]: 搬入→揚重→小運搬→台車荷降し(i 工区)→内装作業 6
- (7) 内装 7 資材[単副]: 搬入→小運搬→内装作業 7→副産物
- (8) 内装 8 資材[単]: 搬入→小運搬→内装作業 8
- (9) 浴室 A1 資材[台梱副]: 搬入→揚重→小運搬→台車荷降し(i 工区)→梱包荷解き(i 工区)→浴室作業 A1→副産物
- (10) 浴室 B1 資材[台梱副]: 搬入→揚重→小運搬→台車荷降し(i 工区)→梱包荷解き(i 工区)→浴室作業 B1→副産物

内装作業 1 に使用する資材 1 についてその物流過程を示す。まず内装 1 資材は台車に積載されて搬入された後、1 階で台車から梱包された資材を荷降し、工事用エレベータで作業階まで運ぶ。そして、作業階で梱包を荷解きして各住戸に小運搬する。各住戸において内装作業 1 を実施すると副産物が発生するため、これを搬出た車に載せて 1 階まで降し現場外に搬出する。

5.3. 内装工程

5.3.1. 作業と順序関係

図 11 は、各住戸の内装工程を示した施工モデルである。各住戸の工程は、内装墨出し作業、内装作業 1～内装作業 8、で構成されており、浴室作業は 2 種類ある。各階 1 号室～4 号室では浴室作業 A1、5 号室～8 号室では浴室作業 B1 を行うこととした。複数の住戸の工程を一つの施工モデルで表し、その中に種類の異なる作業を併記する方法は、本施工モデルの特徴の一つであり、施工モデルの簡略化に繋がっている。（詳しくは、既報¹⁰⁾を参照）

5.3.2. 躯体日程に基づく内装墨出し作業の指定開始日

開始条件-1: If{sysNowDate>=GetLabelValue(階,LeftStr(?TokenIn00000;2),内装畳出し作業指定開始日)}
 { Condition-1: If{sysNowDate>=GetLabelValue(Floor,LeftStr(?TokenIn00000;2);MandatoryStartDateOfInteriorMarking)) }

```

graph LR
    IM[内装畳出し作業  
( Interior Marking )] -.-> IF1[内装作業1  
( Interior Finishing-1 )]
    IM --> IF4[内装作業4  
( Interior Finishing-4 )]
    IF1 --> IF2[内装作業2  
( Interior Finishing-2 )]
    IF1 --> BFA1[浴室作業A1  
( Bathroom Finishing-A1 )]
    IF1 --> IF4
    IF2 --> IF3[内装作業3  
( Interior Finishing-3 )]
    BFA1 --> IF3
    BFA1 --> IF6[内装作業6  
( Interior Finishing-6 )]
    BFA1 --> IF8[内装作業8  
( Interior Finishing-8 )]
    BFB1[浴室作業B1  
( Bathroom Finishing-B1 )] --> IF6
    IF3 --> IF8
    IF4 --> IF5[内装作業5  
( Interior Finishing-5 )]
    IF5 --> IF6
    IF6 --> IF7[内装作業7  
( Interior Finishing-7 )]
    IF6 --> IF8
  
```

Table1 Schedule of Logistics and Finishing Works

階 (Floor)	コンクリート打設 (Concrete Placing Work)	内装墨出し作業 (Interior Marking Work)	工事用エレベータ設置 (Installment of Elevator)	各階の資材搬入時期 (Mandatory Start Date of Carry-In for Materials)
1	2017/4/3	2017/7/4	2017/4/10	2017/4/11
2	2017/4/17	2017/7/11	2017/4/24	2017/4/25
3	2017/5/1	2017/7/18	2017/5/8	2017/5/9
4	2017/5/15	2017/7/25	2017/5/22	2017/5/23
5	2017/5/29	2017/8/1	2017/6/5	2017/6/6
6	2017/6/12	2017/8/8	2017/6/19	2017/6/20
7	2017/6/26	2017/8/15	2017/7/3	2017/7/4
8	2017/7/10	2017/8/22	2017/7/17	2017/7/18
9	2017/7/24	2017/8/29	2017/7/31	2017/8/1

表 2 は、内装工程に必要な資材の搬入・揚重・小運搬の各作業の作業期間と班数を示している。また、表 3 は、内装工程の各作業の作業期間と班数を示している。班数が複数の場合は、同時に複数の住戸について作業を実施することが出来るため、工期の短縮となる。

[illegible]

作業 (Activity)	作業期間(分) (Duration (minutes))	作業班数 (No. of Work Groups)
搬送作業票の処理 (Exec of Tokens for Carry-In)	1	4
資材の搬送作業 (Holding Materials)	1	4
資材の搬入作業 (Carrying-In Materials)	5	1
荷台扉2の開放 (Opening Door)	2	1
資材荷降し (Unloading Materials from Elevator)	4	1
資材積み込作業 (Loading Materials on Elevator)	4	1
運搬搬上 (Elevating)	4	1
荷台扉の閉鎖 (Closing Door)	2	1
台車からの資材の荷降し作業1 (Unloading1 Materials from Cart)	5	1
台車からの取出し作業2 (Unloading2 Materials from Cart)	5	1
梱包材の荷解き (Unpacking Materials)	5	1
資材小運搬 (Transporting Materials)	4	3
台車小運搬 (Transporting a Cart)	4	1
副産物小運搬 (Transporting Wastes)	3	1
資材の搬出作業 (Carrying-Out Carts and Wastes)	3	1
梱包材の投入 (Loading Wastes in a Cart)	3	1

作業 (Activity)	作業期間(時) (Duration) (hours)	作業班数 (No. of Work Groups)
内装墨出し作業 (Interior Marking)	8	2
内装作業1 (Interior Finishing 1)	32	3
内装作業2 (Interior Finishing 2)	32	3
内装作業3 (Interior Finishing 3)	32	3
内装作業4 (Interior Finishing 4)	32	3
内装作業5 (Interior Finishing 5)	16	2
内装作業6 (Interior Finishing 6)	16	3
内装作業7 (Interior Finishing 7)	32	3
内装作業8 (Interior Finishing 8)	32	3
浴室作業A1 (Bathroom Finishing A1)	16	2
浴室作業B1 (Bathroom Finishing B1)	24	1

5.4.1. 工事用エレベータのワークパッケージ

工事用エレベータに関する、資材の積込み、揚重、資材の荷降し等についてのワークパッケージを図 12 に示す。図 12 では、エレベータに積込む資材の仮置き場を図下部に記し、エレベータから荷降しする資材の仮置き場は図中央右手に記している。現場外に搬出する仮置き場と各階の仮置き場は区別して表現し、資材の流れの経路は Gate ノードで分岐する様にしている (Gate ノードについては既報¹⁾を参照)。エレベータは各階で積込みと荷降しが行われるが、仮置き場は、前項で示したサブクラスを用いて資材の出し入れをするため、すべての階の仮置き場は一つの空間ノードのみで表現している。エレベータは階に到着すると、先ず荷降しする資材があるか否かを調べ、もしあれば取出す。荷降しが終われば、資材の積込みを行う。エレベータの荷台の動きは図中央左手に示しており、[荷台扉の閉鎖]→[揚重]→[荷台扉の開放]の作業ノードを繰り返す。

Fig.12 Workpackages for Elevating Works

5.4.2. 資材の搬入から搬出に関するワークパッケージ

図 13 に 1 階における資材の搬入から台車や副産物の搬出に関するワークパッケージを示す。また、図 14 に各作業階における資材の搬入から台車や副産物の搬出に関するワークパッケージを示す。

A. 搬送作業・搬入作業・荷降し作業

(1) 資材の搬送作業：資材の搬入時期の初期値は、表 1 に示す工事前エレベータの各階のゲートが設置される時期に基づいて行う。このため、各階で使用される資材はその時期に集中して搬入作業の前に並ぶことになる。これは前述の如く演算時間の負荷となるため、資材が集中しないように「資材の搬送作業」を付加し、資材の使用階へのエレベータ揚重が可能になる時期に合わせて、「@搬入可能資材現場ゲート」の前に送られる様にした。この搬送作業で何れの資材を対象にするかについては、搬送作業票の処理で制御している。

(2) 資材の搬入作業：資材を工事現場に搬入して、工事前エレベータ前の仮置き場に置く。なお、2 回目以降のシミュレーションで搬入時期調整を行うため、その制約条件となる調整搬入時期に合わせて現場に搬入される様に、以下のスクリプトで制御している。

[搬入作業における制約条件を示すスクリプト]

投入要素条件 1: If (sysNowDate>=(?資材 1x&最早搬入時期))

投入要素条件 2: If (sysNowDateTime>=(?資材 1x&調整搬入時期))

各階に工事前エレベータのゲートが設置される時期を資材の属性「最早搬入時期」で指定し、この値をシミュレーション期が超えれば、搬入するとした。また、前回のシミュレーション結果で得られた調整搬入時期を同様に考慮して搬入時期を制御している。

(3) 台車からの資材の荷降し作業 1：1 階仮置き場において資材を台車から降す。(資材によっては、作業階において資材を台車から降す場合もある)

B. 作業階の荷降し作業・荷解き作業・資材小運搬作業

(1) 台車からの荷降し作業 2：作業階の仮置き場において、台車から資材を降す。また、空になった台車は搬出資材置き場へ移動する。

(2) 梱包材の荷解き：作業階の仮置き場において、梱包された資材の荷解きを行う。

(3) 資材小運搬：エレベータ前の仮置き場から、各住戸に資材を運ぶ。

C. 副産物小運搬作業・副産物の台車への投入作業

(1) 副産物小運搬：各住戸で発生した副産物をエレベータ前の搬出台車置き場まで運ぶ。

(2) 副産物の台車への投入：発生した副産物を搬出台車に積み込み、一杯になるとエレベータ前の仮置き場に搬出台車を運ぶ。

Fig. 13 Workpackages of Carrying-In Works of Materials

Fig. 14 Workpackages of Unloading and Unpacking Works of Materials

5.4.3. 内装作業のワークパッケージ

内装作業では、様々なパターンの資材を用いている。ここでは、資材の取り扱いが最も複雑な浴室作業 B1 を事例として、そのワークパッケージを図 15 に示す。

浴室作業 B1 に用いる資材は、各住戸内へ台車に乗せて小運搬される。浴室作業 B1 は必要な資材が到着しているか否かを調べ、もし資材が到着していれば、資材を作業に取り込んで作業を開始する。作業では、まず開始時に関数「DetachAllInstances」を用いて台車から資材を降した後資材の取付けを行う。この作業では残材が副産物として発生するため、作業終了時に関数「UnpackAllInstances」を用いて副産物を発生させる。これによって、作業終了後、設計位置に部材を Output するとともに、空になった台車と副産物が発生するため、これを各階住戸内の仮置き場に移動している。

5.5. シミュレーションの実施

シミュレーションは、土日休業、就業時間 8:00-17:00（昼休み 1 時間）の作業体制で行うこととし祭日は無視している。シミュ

Fig. 15 Workpackage of Bathroom Finishing Works

レーション間隔は 0.5 分として、作業や資材の動きを再現した。

シミュレーションは、2 階内装墨出し作業の指定開始日とその資材の物流に要する期間を考慮して、7 月 3 日 8:00 から実施することとした。シミュレーション実施の結果、工事現場に最初の資材が搬入された時期は 7 月 11 日 8:04、最後の作業が実施された時期は 11 月 27 日 16:00 であり、約 147 日間であった。これを分に直すと、約 21 万分ととなり、0.5 分間隔のシミュレーションであるため、シミュレーション試行回数としては、約 42 万クロックで実施したことになる。使用したパソコン^{注1)}では、1 クロックを 0.5 秒で実行出来るため、シミュレーションは約 3 時間を要している。なお、内装作業においては作業期間の単位が「時」であるため、その作業の開始や終了の条件チェックは、「0 分 00 秒」のタイミングで 1 時間毎に行った。

5.6. シミュレーション結果の考察

5.6.1. 資材の搬入時期の調整

資材の搬入時期は事前には決められないため、数回のシミュレーションを実施し、各内装作業が開始する時期に合わせて資材の搬入時期を求めた。図 16 は、横軸にシミュレーションの実行回数、縦軸に資材が作業場前に到着した後の平均滞留期間を示している。

Fig. 16 Average Piled-Up Time of Materials at Work Area

Fig. 19. a Process Chart of Interior Finishing Works and Logistic Works

Fig.17 Schedules of Elevator Movements

Fig.18 Processes of Materials from Carrying-In to Installing

Fig.19.b Process Chart of Interior Finishing Works and Logistic Works

資材の到着余裕を実働で 8 時間に設定しており、3 回程度で、この値近く (13.1 時間) に収束している。なお、資材の搬入は各階の資材を纏めて搬入しているため、01 号室の作業の資材では適した滞留期間となるが、後半で実施する作業 (例えば最後の 08 号室) では、到着余裕を超えた滞留期間が生じる。このため、図の平均値の値は、到着余裕 (8 時間) よりも若干長い時期に収束している。

5.6.2. エレベータの運行

図 17 は、10 月 23 日と 24 日の工事用エレベータの動きを示した図である。工事用エレベータが、扉の開放、資材の荷降し、資材の積込み、扉の閉鎖、揚重を正しく行っていることが分かる。資材の揚重においては、複数の資材を積込んでいる場合は、資材を各階に停止して配りながらエレベータは上昇している。資材を作業階に荷降しした後その階に 1 階へ搬出する台車等がある場合には、これを積込み 1 階まで降下している。

空の台車や搬出台車がエレベータ前に運ばれると、エレベータはそれを感じし、その階に移動してこれを積込み 1 階まで運んでいる。また、荷台の最大許容重量以下に納まる様に数個づつ積載して、順次目標階まで資材を運搬していることが判る。上記によって、スク립トで記述された工事用エレベータの複雑な挙動を正確に再現していることが分かる。

5.6.3. 資材物流の詳細

図 18 は、2 階内装作業 1 で使用する資材の搬入から作業への投入までを示している。7 月 11 日に 8:04 に資材が搬入された後 8:09 に台車から 2 階の 01~04 号室で使用する梱包された資材を荷降しし、工事用エレベータに積み込まれている。そして、他の資材の積込を待って、資材は 8:30 に 2 階へ揚重される。その後資材は、8:39 に梱包資材は荷解きされて各部屋に小運搬される。そして、7 月 12 日 9:10 に 01 号室と 02 号室の内装作業 1 が開始する。

副産物である梱包材は、8:45 に搬出台車に投入されている。なお、03, 04 号室の内装作業はその住戸の内装墨出し作業が終了していないためすぐには実施されていない。図 18 によって、搬入する資材に設定した親子関係に従って、荷降し・荷解きされて新たな資材が発生していることが分かる。

5.6.4. 物流工程と内装工程の進捗概要

図 19 は、シミュレーションの結果を 1 時間毎に示した全体工程表である。同図の下部に物流工程を示している。物流の作業は通常 3 分から 5 分程度であるため、1 時間間隔の工程表に示すと各期の最後に実施した作業が縦帯状で表示 (色は資材が使われる住戸番号を示している) されている。図 19 の上部には、内装作業の実施状況を表示している。各内装作業の開始時期に対応して資材の搬入時期が調整されて、分散して搬入・小運搬され作業場まで運ばれていることが分かる。また、搬入した台車、残材となる梱包材、作業により発生する副産物は小運搬されて、工事用エレベータで各階 1 階まで降された後、搬出されていることが分かる。

6. 結言

本報では、物流についてのモデル化の方法を提案し、その搬入、揚重、小運搬とともに、工事用エレベータの動きを施工モデルとして表現した。そして、物流作業と取付作業等のモデルを統合してシミュレーションを実施し得ることを明らかにした。

また、物流における台車や梱包材の取り扱いをシミュレーションで実施し得るようにし、工事現場内の資材の動きをより正確に表現し、且つその動きをシミュレーションで再現することが出来た。

複雑な工事現場の状況を簡潔な施工モデルとして表現して、シミュレーションで工事の進捗を再現する技術は、今後の BIM の動きに合わせて必要になるバーチャル建設 (着工前に机上の上で工事の進捗のリハーサルを行う) を実現させるためには、不可欠な技術となるものである。

注

注 1) Dell Precision T5600, CPU:Xeon E5-268W, 3.10GHz, 32GB, Windows10 Pro, 64Bit

参考文献

- 1) Naruo KANO: MODELING FOR ACTIVITY-ORIENTED CONSTRUCTION PROCESS, Simulation models of a construction site, Journal of Architecture and Planning(Transactions of AIJ), No. 736, pp1569-1579, 2017. 6
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, 日本建築学会計画系論文集, No736, pp1569-1579, 2017. 6
- 2) Sei Nikai: Chokousou Kenchiku, SekouHen, 1974, Kajima Institute Publishing Co. Ltd
二階盛編: 超高層建築・4 施工編, 1974, 鹿島出版会
- 3) Hajime Terabayashi: Choukousou Biru Kensetu niokeru Buturyu Sisutemu, pp147-155, Operations Resaech, 1981. 3
寺林肇: 超高層ビル建設における物流システム, オペレーションズリサーチ, pp147-155, 1981. 3
- 4) Masahiro Morita: Yoju Scheduling System No Jituyouka, Kenchiku Gijutu, pp. 78-85, 1996. 3
森田真弘: 揚重スケジューリングシステムの実用化, 建築技術, pp. 78-85, 1996. 3
- 5) Toshio Matumoto: A Study on the Method of Planning to the Vertical Transportation of Building Materials for Highrise Building Construction, AIJ Journal of Technology and Design No. 5, pp. 27-30, 1997. 12
松本敏夫: 超高層建築の施工における資材揚重計画手法とその評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 5 号, pp. 27-30, 1997. 12
- 6) Toshimi Dobashi: Development of the Management Method in the Physical Distribution of Construction Materials —Part2 Case Study on Infill Work with Housing Projects—, Symposium on Building Construction and Management of Projects, Architectural Institute of Japan, pp. 163-168, 2004
土橋裕美: 建築資材の物流マネジメント手法の開発, その 2 集合住宅の内装資材への適用結果, 日本建築学会建築生産シンポジウム, pp. 163-168, 2004
- 7) SHIDE Kazuya, KANISAWA Hirotake, ISHIDA Shoko, YUASA Yoichi, SOMEYA Syunsuke: Research on productivity of interior finish work in high-rise buildings Part9 Outline of search procedure in supply chain of interior finish work, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, AIJ, Urban Planning-I, pp. 1289-1290, 2011. 8
志手一哉, 蟹澤宏剛, 石田祥子, 湯浅洋一, 染谷俊介: 高層集合住宅における内装仕上工事の生産性に関する研究 (その 9) 場内物流に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, F-I, pp. 1289-1290, 2011. 8
- 8) Photios G. Ioannou, Julio C. Martinez: SCALABLE SIMULATION MODELS FOR CONSTRUCTION OPERATIONS, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, pp1329-1336,
J. Charnes, D. Morrice, D. Brunner, and J. Swain, eds.
- 9) C.-Y. Cho, John Y S Kim, Youngsuk Kim, Soonwook Kwon: Simulation method of construction hoist operating plan for high rise buildings considering lifting heights and loads, 27th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp22-28, 2010, IAARC
- 10) Naruo KANO, Kosei ISHIDA, CONSTRUCTION PLANNING METHOD FOR REPETITIVE ACTIVITIES, Creating Network Diagrams and Scheduling, Journal of Architecture and Planning(Transactions of AIJ), No. 719, pp1569-1579, 2016. 1
嘉納成男, 石田航星: 繰返し工程に関する工程計画手法の開発, ネットワーク図の表現と日程計算, 日本建築学会計画系論文集, No. 719, pp. 1569-1579, 2016. 1

MODELING FOR LOGISTICS-ORIENTED CONSTRUCTION PROCESS

Simulation models of a construction site

Naruo KANO ^{*1}

^{*1} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Dr.Eng.

1.Introduction

In building construction, large varieties and tremendous amounts of materials are required. Important planning items to be considered in construction planning include methods of logistic activities (carrying-in, elevating, and transporting), the capacity of construction equipment, scheduling, and the locations and areas of the stock yard for materials.

The author's previous paper discussed the methods for representing activity-oriented models such as assembling, installation, and demolition works at a construction site, as well as calculation methodologies for simulation. This paper discussed the method for representing logistics-oriented models such as the activities of carrying-in, elevating, transporting of materials, and carrying-out of waste materials. The author verified the validity of the simulation results based on case studies.

2.Components at a construction site

When classifying logistics at a construction site, the following three aspects should be considered: (1) the condition of components, (2) the location for unloading components from carts and for unwrapping packages, and (3) the generation of wastes from activities using the materials. Activities for logistics include (1) carrying-in to a site, (2) loading to an elevator, (3) elevating, (4) unloading from an elevator, (5) unloading from a cart, (6) unwrapping a package, (7) transporting to an activity area, and (8) carrying-out of empty carts and wastes from a site.

3.Outlines of methodologies for representing activity-oriented work models

The author shows methodologies for representing and simulating activity-oriented work models discussed in the previous paper.

3.Methodologies for representing logistics-oriented models

The above-mentioned logistic activities are modeled based on the work models discussed in the previous paper. For logistics-oriented models, the author creates scripts with various functions to simulate the logistics handling materials at a site. This paper also discussed the representing methods using graph structures and scripts, as to model both constraints of volume in stock area, and the movements of an elevator in detail. The material carrying-in schedules should be decided according to the start dates of each installing work. This paper clarified that the material carrying-in schedule can be obtained through several repeated simulations.

4.Application to a construction project

In a case study of the methodologies discussed in this paper, work models are created assuming the logistics of interior works for an apartment house. Simulation is carried out at 0.5 minute intervals. An apartment house is 9-stories high with 8 dwellings on each floor (from second to ninth floor), so it has 64 dwellings in total. There are 15 logistic works and 10 interior finishing works. Logistic works are done for each materials, and interior finishing works are done for 64 dwellings. Therefore, the number of works reaches about 900 activities as a whole.

Based on the results of simulations, together with the movements of an elevator, detailed time schedules from carrying-in to installation of materials, and time schedules of whole construction works, the author verified that this simulation can reproduce the progress of logistics at a site accurately.

6.Conclusion

This paper verified that the progresses of logistic activities are reproduced accurately with the proposed simulation models and the simulations.

(2017年6月10日原稿受理, 2017年8月28日採用決定)