

リサイクル調整支援へのマルチエージェント技術の適用

○小野 貴久^{*1}

萩原 淳^{*1}

秋吉 政徳^{*2}

^{*1}東京電力(株)

^{*2}三菱電機(株)

本報告では複数の人や組織の間で相互に依存する計画を交渉によって立案/修正する業務の支援システムについて報告する。このような調整業務においては、一般的に参加者は固定されず調整も非同期に行われるため、支援システムの設計はトップダウン的に行うよりは個々の調整主体の機能からボトムアップ的に行う方がより柔軟かつ現実的なものとなりうる。ここでは複数建設所間でのコンクリート塊などの資材融通計画問題である建設副産物リサイクル調整業務を対象として取上げ、マルチエージェント技術の適用を試みた。エージェントの定義及びその動作の設計を行い、シミュレーションによって有効性を確認した。

Multi-agent based coordination assistant system for recycling materials

Takahisa Ono^{*1}

Jun Hagihara^{*1}

Masanori Akiyoshi^{*2}

^{*1}Tokyo Electric Power Company

^{*2}Mitsubishi Electric Corporation

This paper reports on the coordination assistant system for recycling materials. We deal with planning coordination among many people or organizations. It is hard to design assistant system for such a job by top-down approach because generally coordination is asynchronously made and relevant members are not fixed. So we apply 'multi-agent technique' to design the system. We study the planning of recycling construction materials among many sites as an example and designed software agents for planning and negotiation. We evaluated our system through the simulation.

1. はじめに

近年、パーソナルコンピュータや計算機ネットワークなどの情報基盤の拡充・整備とともに、業務支援システムの開発も単に定型業務の機械化による作業効率の向上を目的とするばかりでなく、作業の質的向上を指向するようになってきている。しかし、これらのシステムは、フラットな組織体制における他箇所との調整を要する計画業務や交渉業務における意思決定までは支援していない。筆者らは、調整業務を複数の人や組織の間で相互に依存する計画を交渉によって立案/修正する問題と考え、調整業務を支援するシステムの枠組みを検討している[1]。

本報告では、建設副産物リサイクル調整業務を対象として取り上げ、マルチエージェントによる

設計を行い、シミュレーションにより提案する手法の有効性を確認した。

2. 調整業務へのマルチエージェント技術の適用

複数の意思決定者により行われる調整業務においては、一般的に各参加者は対等な立場であり、かつその存在は固定的とは限らない。また調整は非同期に行われ、意思決定者の戦略が途中で変化する場合もありうる。そのため支援システムの設計は、例えば業務の階層化等を行ってトップダウン的に仕様を決めていくよりは、個々の調整主体の機能からボトムアップ的に構築する方がより自然で柔軟な設計となる。また、調整業務は分散協調問題解決といえるが、共通

の問題を機能分散するのではなく、個々の戦略を反映できる枠組みが必要となる。そこで本研究ではマルチエージェント技術を適用することとした。エージェントには多くの特性があるが[2]、調整業務を支援するエージェントは、移動性、知性、協調性の3つの特性が重要である。すなわち、調整の場における参加者が変動するため、情報を自律的に収集できる必要があり（移動性）、集めた情報から、ユーザーの指示に従った立案をする必要があり（知性）、その結果をもとに他の参加者のエージェントと交渉して計画を作成する必要がある（協調性）。

3. 建設副産物リサイクル調整業務への適用

3.1. 建設副産物リサイクル調整業務

建設副産物とは、建設工事において発生するコンクリート塊やアスファルト塊、木材、残土などを指し、通常は再生化処理業者に処理を依頼するか、産業廃棄物として処理されるものである。建設副産物リサイクル調整業務は、これらを他建設所の工事資材として融通する計画を立てるものであり、各建設所の担当者は以下の3つの資材情報（図1）を用いる。

- (1) 建設副産物の発生する量と時期（搬出側）
- (2) 必要となる資材の量と時期（受入側）
- (3) 資材仮置場の保管可能量（搬出／受入側）

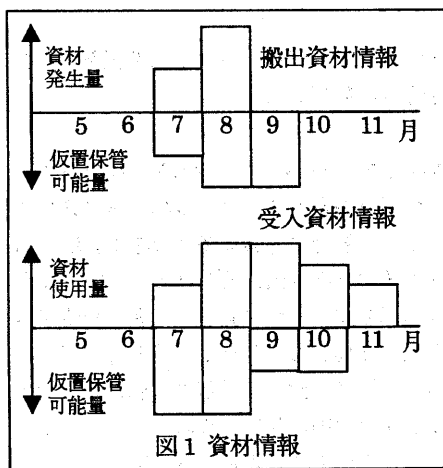


図1 資材情報

計画の作成は搬出側建設所が主に行い、受入側建設所は自所の情報を公開して搬出側からの提案

を待ち、よりよい案を採用することになる。一般に融通相手は複数となり、個々の計画についてもどちらの仮置場を使うかなどで複数の経路が考えられるため、融通計画は組み合わせ問題になる。評価尺度としてはコストやリサイクル率などがあげられるが、本報告ではコストのみを考慮する。

3.2. エージェントの設計

3.2.1. 配置および役割

3.1.で説明した建設副産物リサイクル調整業務の分析に基づき、以下のエージェントを定義する。

(1) 営業エージェント（搬出側）

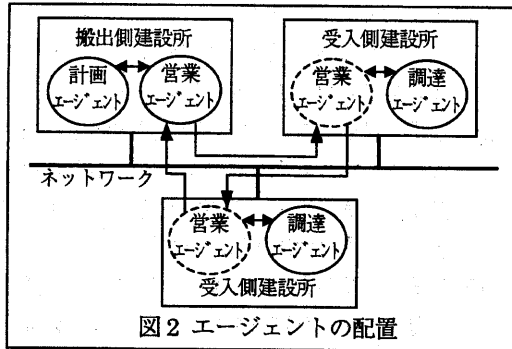
ユーザーが入力した搬出資材情報を記憶し、ネットワークに接続された他建設所の計算機に移動し、受入れ可能な資材の有無をその建設所の調達エージェントに確認し、存在した場合にはその情報を記憶して他の建設所に移動することを繰り返す。巡回終了後、収集した情報を自所の計画エージェントに渡す。

(2) 計画エージェント（搬出側）

営業エージェントが収集した情報をもとに融通計画案を作成し、受入先の調達エージェントに計画の承諾を求め通知を出す。全ての相手から承諾がとれたら調整を終了するが、拒否回答やキャンセルがあれば、その相手よりもコストの安い相手との取引は保留し、残りについて次善の受入先候補との融通計画案を再検討する。

(3) 調達エージェント（受入側）

営業エージェントが来た場合、その提示する資材価格と他建設所と融通の合意ができている部分の取引価格を比較して、提示価格より安い融通の計画分を全受入資材情報から引いた情報を受入可能資材情報として渡す。また、計画エージェントから融通計画案の承諾請求があった場合、その提示価格により受入計画を再検討し、受入可能か、拒否（部分受入れを含む）かの回答を返す。再検討の結果、承諾済み取引部分でキャンセルが発生すると、その相手に通知される。



これらのエージェントのネットワークにおける配置を図2に示す。また、その調整は以下のように進められる。

- (i) 営業エージェントがネットワーク上で受入先を探し回り、調達エージェントは受入可能資材情報を提供する。(1,2)
- (ii) 計画エージェントは収集された情報から融通計画案を作成し、許諾請求を出す。(3,4,5)
- (iii) 調達エージェントの回答により計画エージェントは再立案を行い、次善候補に許諾請求を出す。(6,7,8)
- (iv) 全てから承諾が返り調整は一旦終了する。(9)
- (v) 他からより安い取引を受理した場合は、キャンセルを通知する。(10)
- (vi) これを受けた計画エージェントは再立案する。(11,12,13)

ここで()内の番号は図3中の番号と対応したものである。

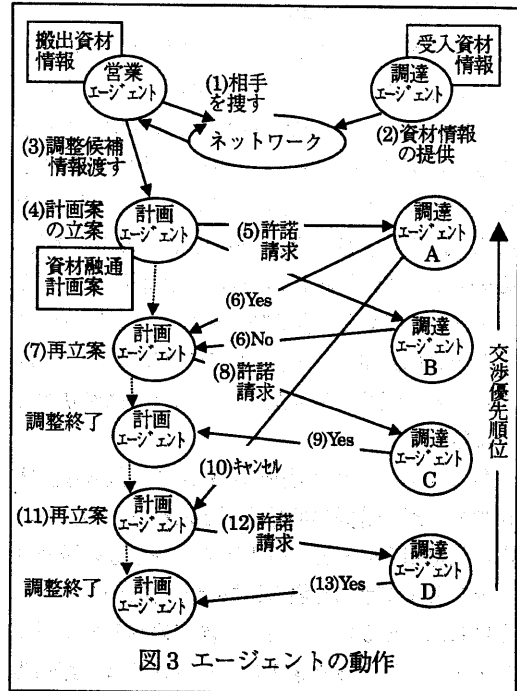
3.3. 立案アルゴリズム

本節では調整の対象となる資材融通計画の立案アルゴリズムについて述べる。

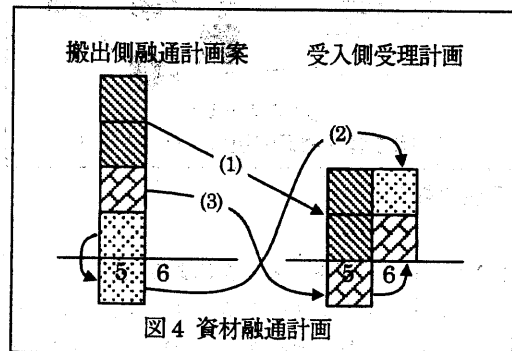
3.3.1. 資材融通計画問題

この問題は、以下に示す4通りの方法を組合わせて、最もコストが安くなる場合を求めるものである。なお、中継地点を経由する3点輸送や、一旦自所に持ち帰るような資材の戻りはないものとする。

- (1) 資材の発生と使用が同じ月であり仮置場を使用しない場合。



- (2) 発生した資材を搬出側仮置場に置き、使用される月に受入側建設所に輸送する場合
 - (3) 発生した資材を輸送し、受入側建設所の仮置場に置いた後、使用する場合
 - (4) 搬出側、受入側双方の仮置場を使う場合。
- 図4に1対1の場合の資材融通計画を示す。この例では(1)~(3)の組み合わせで全ての資材が融通できている。このような計画問題に対するアプローチとしては最大フロー問題として定式化して解く方法と、ヒューリスティックによる方法が考えられる。



3.3.2. 最大フロー法による立案

資材の流れに着目したフローグラフによるモデル化を行うことにより、計画案は OR 手法の一つである最大フロー法を適用して作成することができる。図 5 の(1)の資材情報から作成されるフローモデルは(2)のようになる。図中、○□は搬出側建設所の各月の資材発生現場、仮置場を表し、●■は受入側建設所の各月の資材使用現場、仮置場を表している。容量制約やコスト(輸送費用)はアークに設定される。このグラフにおいて OUT から IN へ流せる最大量を求めれば計画が立案できる[3]。

最大フロー法では評価関数に基づく最適な立案ができるが、計画の部分修正が困難なため、複数ある調整相手の一部が計画案を受理しない場合や、キャンセルが生じた場合は計画を最初から作成しなければならない。一方、次節で述べるヒューリスティックによる立案アルゴリズムでは、評価関数への柔軟な対応や解の最適性の保障が困難であるが、立案方針がわかりやすく計画の部分修正が

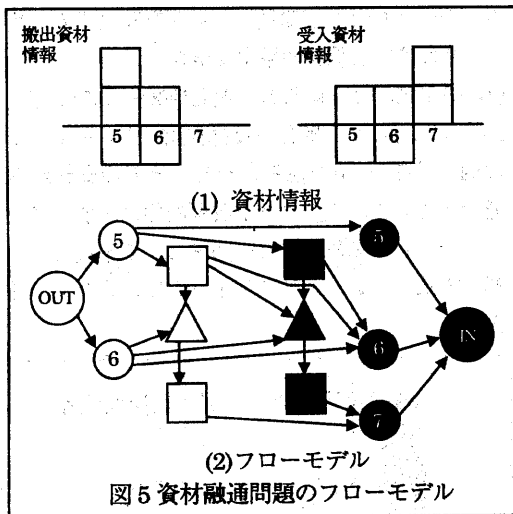


図5 資材融通問題のフローモデル

可能である。

3.3.3. ヒューリスティックによる立案

ヒューリスティックによる立案では、コスト最小となるような計画を立てるために、(1)コストの安い建設所との取引を優先する。(2)融通量が

変わらないならば仮置場をなるべく使わない。という2つの戦略を用いる。計画エージェントが行う立案アルゴリズムを以下に示す。

- (A) 融通候補をコストの安い順に並べ替え、順番に1対1の計画を立てていく。搬出資材情報は立案毎に決定分を除いたものを次順の候補との計画に使用する。
- (B) 仮置場の使用を少なくするためには保管期間を短くしなければならない。例えば、融通量が変わらないならば4月の発生資材は6月より5月に使うというように資材発生月と使用月の間をできるだけ空けない必要がある。従って以下に示すように対応する月対月の計画を立てていく。
 - (a) 資材発生最終月から開始月へ順に(b)を行う。
 - (b) 資材使用開始月から終了月へ順に(c)を行う。
 - (c) (a)の月 \leq (b)の月ならば融通計画を立てる。
- (C) 資材の移動経路は次の優先順位に従う。
 - (a) 仮置場を使わず直接融通する。
 - (b) 相手側の仮置場を使用する。
 - (c) 自分側の仮置場を使用する。

このアルゴリズムに従い1対1の融通計画を作成した例が図6である。資材の番号は融通計画の決まった順番と、融通経路を示している。

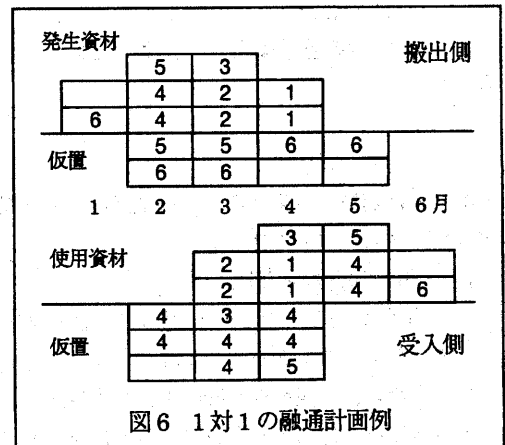


図6 1対1の融通計画例

このアルゴリズムは図7に示すような再帰関数で実現でき、plan(資材発生最終月)を実行する事により計画案が作成できる。

```

plan( 月 t ){
  IF ( t < 資材発生開始月 ) THEN return 0 ... (1)
  return canMove( t, x, 発生現場 ) ... (2)
  plan( t - 1 ) ... (3)
}

canMove( 月 t, 資材量 x, 場所 place ){
  IF ( t > 資材使用最終月 ) THEN return 0 ... (4)
  x1 = min( t の受入側資材使用量, x ) ... (5)
  x2 = canMove( t + 1, min( 受入側仮置場可能量,
    x - x1 ), 受入側仮置場 ) ... (6)
  IF ( place ≠ 受入側仮置場 ) {
    x3 = canMove( t + 1, min( 搬出側仮置場可能量,
    x - x1 - x2 ), 搬出側仮置場 ) ... (7)
  } ELSE x3 = 0
  return x1 + x2 + x3
}

```

図7 ヒューリスティックによる立案アルゴリズム

ここで、 $canMove(t, x, place)$ は月 t における融通可能資材量である。引数 $place$ は、発生現場、搬出側仮置場、受入側仮置場、使用現場のどれかが指定され、月 t に $place$ にある資材量 x のうちの融通可能量がこの関数により返される。計画開始時点では資材は発生現場にあるから(2)式により月 t における融通可能資材量が求まる。(1)(4)式はアルゴリズム(B)の終了条件であり、(3)式が(B)(a)を、(6)(7)式が(B)(b)を実現している。また(5)(6)(7)式はそれぞれ(C)(a)(b)(c)の資材量を求めている。

調達エージェントの立案アルゴリズムは計画エージェントのものとはほぼ同じであるが、資材発生量が計画エージェントからの融通計画量となり、搬出側仮置場が使用できない点が異なる。調達エージェントでの融通計画で残った資材量は許諾請求を出した計画エージェントへのキャンセル通知分となる。

3.3.4. キャンセルへの対応

調整の過程で各建設所の計画/調達エージェントはそれぞれ自所に最適な立案を行うため以下の場合にキャンセルが生じる。

- 調達エージェントが、これまでの取引よりもコストの安い融通計画案を受け取り、既存の取引を修正した場合。
- 計画エージェントが、融通計画案を拒否またはキャンセルされ、再立案の結果すでに承諾済みの取引の修正が生じた場合。
- 計画エージェントが、新しい受入側建設所の発生（営業エージェントが探索）に伴い、計画の修正を行った場合。

これらのキャンセルに伴う再立案は以下の方針で行われる。

- キャンセルされた相手よりもコストが安い相手との取引は変更しない
- キャンセルされた相手及びそれよりコストの高い相手との取引を再立案する

よって、全体としての融通計画はキャンセルと再立案の繰り返しにより収束していくことになる。ここでは2つの搬出側建設所と2つの受入側建設所の場合を取り上げキャンセルを伴う調整を説明する。

(1) 第1調整

初期資材情報と建設所の地理的配置（遠/近）を図8に示す。ここで建設所間の距離が遠いものは輸送コストがかさむと考える。最初に搬出側建設所1(OUT-1)と受入側建設所2(IN-2)だけがリサイクル調整に参加しているとすると、この場合の調整は図4で示したものと同一結果になる。

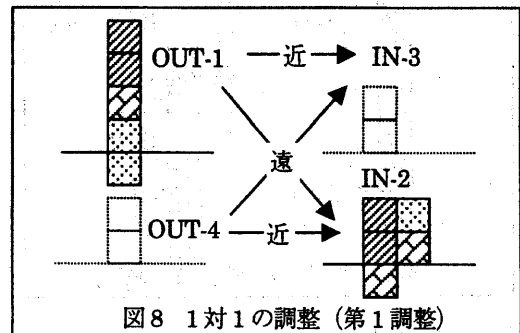


図8 1対1の調整 (第1調整)

(2) 第2調整

次に受入側建設所 3(IN-3)が入ってくると、

OUT-1はIN-2よりもIN-3の方がコストが安い
ため再立案し、IN-2にキャンセルと修正案
を送付する。またIN-3に融通計画案を送付す
る。IN-2,3はこの案を受理する。(図9)

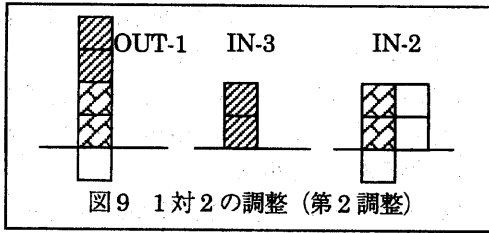


図9 1対2の調整(第2調整)

(3) 第3調整

次に搬出側建設所(OUT-4)が入ってくるとIN-2はOUT-1よりもOUT-4の方がコストが安い
ためOUT-1との融通を部分キャンセルし、
その旨をOUT-1に通知する。(図10)

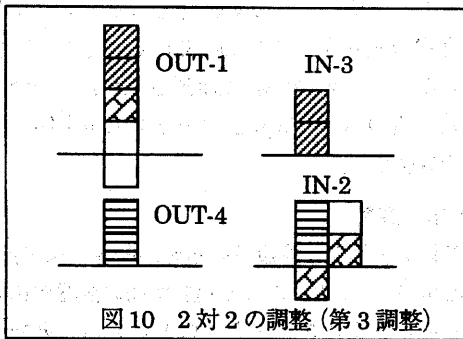


図10 2対2の調整(第3調整)

(4) 第4調整

キャンセルされたOUT-1は再立案し、追加分
をIN-2に送付する。IN-2は受理する。(図11)

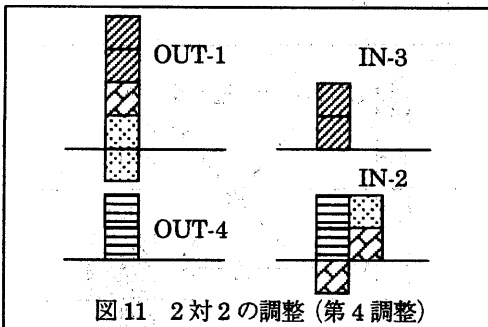


図11 2対2の調整(第4調整)

3.4. シミュレーション

提案した調整支援システムはJAVAを用いて
プロトタイプを作成中である。マルチスレッド

による非同期調整機能が実現され、現在ネットワ
ーク上での処理機能に拡張している。図12にシ
ステムの画面を示す。

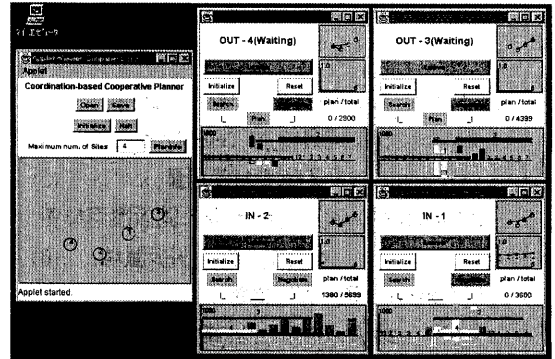


図12 プロトタイプシステム画面

4. まとめと今後の課題

本報告では複数の人または組織の間で相互に依
存する計画を交渉によって立案/修正する調整業
務の支援システムについて建設副産物リサイクル
調整を例にとり報告した。マルチエージェントを
適用しボトムアップ的な設計を行なうことにより、

- ・フラットな組織間の調整
- ・調整メンバーの増減への対応
- ・非同期に進む計画調整

といった柔軟な機能が実現できた。今後は調整の
収束性について検証していくとともに、インター
フェースについても検討していく予定である。

5. 参考文献

- [1] 小野, 大橋, 秋吉, 瀬尾: 交渉に基づく調整
業務支援の基礎検討, 電気学会電子・情報・
システム部門大会(1997)
- [2] 木下, 菅原: エージェント指向コンピューテ
ィング, ソフト・リサーチ・センター
- [3] 秋吉, 小野, 萩原: 組織モデルを用いた分散
資源向け非同期交渉シミュレーション手法, 情報処理
学会 数理モデルと問題解決研究会(1998)