

自律分散エージェントを用いた原料ヤード内鉱石の動的搬送経路計画

菊池 純二*・小西 正躬*・今井 純*

Transfer Control of Conveyers in Ore Yard by Autonomous Decentralized Agents

Junji KIKUCHI, Masami KONISHI and Jun IMAI

Synopsis : In steel works, iron ores are stored in ore yard and sent to various plants in down stream according to transfer requests. To attain stable operations of steel works, it is necessary to keep a certain safety stock level in ore tanks of all plants. To attain this purpose, a novel ore transfer routing method has been developed based on a decentralized agent method. In case of disaster such as a big earthquake or a big fire, damages in the facilities of industrial complex may be unavoidable. In this paper, a decentralized optimization method is tested if it is able to cope with such emergencies. A decentralized agent corresponding to the kind of ore makes its own transfer route plan exchanging information with others. As the application of the proposed method, transfer scheduling in ore yard in steel works are made in case of destruction of the transfer facilities. Further, application of the proposed route planning method to the analysis of distribution of transfer loads for conveyers is described.

Key words: decentralized agent; route planning; ore yard; pheromone information; transfer control; ore transportation.

1. はじめに

我が国の臨海部製鉄所の原料ヤードには鉱石船により世界各地から運ばれてきた様々な銘柄の鉄鉱石が貯蓄されている。安定した鉄鋼生産を行うためには、原料ヤードから見て下流工程である高炉やコークス炉などの各プラントへ、必要な量の原料を円滑かつ効率的に搬送する必要がある。また、臨海部で地震や大火災などの災害が起こった場合、臨海コンビナートにおける工場の搬送設備や生産プラントへの損害は避けられない。そのような場合、異常状況に対応した搬送スケジューリングの調整が必要となる。以上の背景から、本論文では、異常時にも対応可能な仕組みとして、自律分散エージェント法を用いた原料ヤードにおけるコンベヤ搬送経路計画の作成を目的とする。提案法では、鉱石の各銘柄に対応した経路計画エージェントが自律的に経路計画を行う。この経路計画では、原料ヤードからプラントまでの鉱石の搬送コストを最小化する問題として取り扱う。また、各エージェントは、経路計画を行うときに、通過する経路情報を互いに交換しあうことによって、協調的な計画を実現する。なお、最短経路を求める問題にTSPがあるが、本研究で扱う経路計画問題は、TSPに時間の概念が追加されたものである。

ところで、大きな災害が起きた場合、コンビナートにおける生産環境や計画状況が正常なときと比べて急激に変化

する可能性が生じる。集中型システムでは、このような状況が生じた場合、システム全体が停止する可能性があるが、分散型システムでは、局所的なサブシステムの停止で済むため、システム全体の停止に陥らない。さらに、分散型システムでは、システム全体に対する計算をする必要がなく、各サブシステムごとに計算を行うため、問題の規模を比較的小さくすることが出来る。したがって、大規模な問題に対して非常に有効的である。1999年イタリアのドリゴにより、蟻の巣から餌までの行列ルートがフェロモンの情報によって定まるメカニズムにアイデアを得た、自律分散最適化法(Ant法)が提案された¹⁾。この方法はこれまで、主として搬送経路計画問題に適用されてきた。その適用例としては、半導体工場における無人搬送車の経路計画がある^{2,3)}。近年、そのような経路計画問題以外にも生産スケジューリング問題として、分散エージェント法が適用され、解の最適性とともにより良好な計算速度が示されている⁴⁾。

しかし、自律分散最適化法には、収束性が速く、環境の変化にも対応しやすいという特徴を持つ反面、分散処理により、局所最適解に陥りやすいという弱点も存在する。本論文では、分散エージェント法の応用として、原料ヤードを対象とする経路計画の最適化を行い、搬送設備の故障にも対応できる環境適応型システムの構築を目的とする。

2. 原料ヤードにおける搬送経路計画問題

今回モデル化した製鉄所における上流での生産設備を Fig. 1 に示す。鉱石船により輸入された鉱石は、一旦原料ヤードに保管され、高炉や焼結炉など下流プラントからの需要に応じてベルトコンベヤにより各プラントへ搬送される。本論文では、コンベヤにより鉱石を搬送する場合、複数の異なる銘柄の鉱石がコンベヤ上で混在してはならないという制約があり、経路計画を行う際に必ず満たさなければならない条件である。また、搬送コストを最小化し、後続の搬送を円滑に行うためには、鉱石を原料ヤードからプラントまで最短距離を短時間で搬送することが求められる。これと同時に、ベルトコンベヤで搬送を行う場合、円滑な搬送を行うために経路の方向変更が最小になることが求められる。そこで本研究では、制約条件を満たし搬送時間と経路の方向変更数を同時に最小化する経路計画作成を問題として取り扱う。

Fig. 2 に示すように、高炉における原料槽の鉱石ストックは、高炉での鉄生産に消費されるため、時間の経過につれて減少する。高炉で鉱石が消費されると、不足した分の鉱石が原料ヤードから搬送され、原料槽に供給されるため再びストックレベルが上昇する。図に示すように、原料槽のストックレベルが設定された閾値を下回ると、鉱石の搬送要求が発生し、その要求に応えるため、鉱石搬送の経路計画が作成される。

Fig. 3 に搬送経路計画問題の対象となる搬送路を示す。

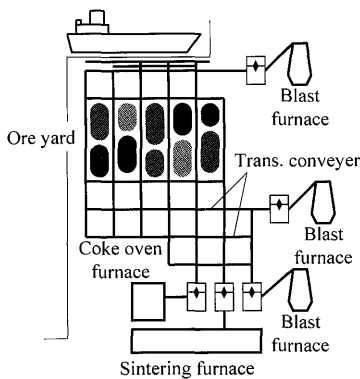


Fig. 1. Production facilities in steel work.

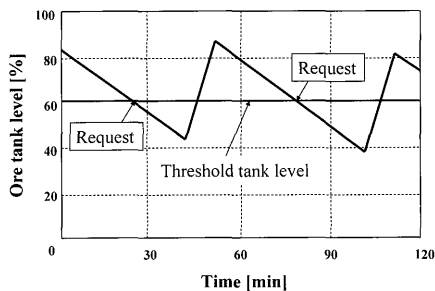


Fig. 2. Ore stocking tank level in blast furnace.

このモデルは、53個のノードとそれらを接続するアークで構成されている。ここで、ノード#8から#31を原料ヤードとし、これらのノードから原料払い出しが行われる。ノード#7, #39, #51, #52, #53はそれぞれ各プラントの位置であり、これらの位置に原料ヤードから鉱石が搬送される。それ以外のノードは原料を運ぶための搬送路であり、原料ヤードからプラントまでをつないでいる。鉱石はノード上でのみ停止と方向転換を行うことができ、ベルトコンベヤに相当するアーク上を移動するものとする。なお、本研究では、鉱石がノードからノードへ移動するまでの時間を1期としている。

本論文では、時々刻々と発生する搬送要求に対して、静的搬送経路計画を繰り返し作成することにより、動的経路計画問題を扱う。ところで、静的経路計画問題で扱う鉱石の種類が多い場合、与えられた搬送路モデルの容量を越えてしまう可能性があり、実行可能解が存在するかどうかの判定が困難となる。ここでは、問題の解空間に対して実行可能領域を十分大きいものとしている。つまり、実行可能解が必ず得られるように問題の規模を設定している。したがって、時々刻々と発生する搬送要求に対して、静的経路計画問題で扱う鉱石の種類を限定すれば、長い時間経過の中では実行可能解が保証される。これらについては数値例で検証する。

本研究では、Fig. 4 に示すような分散型経路計画システムを構成している。まず、プラントシミュレータにより各プラントの原料ストックの推移が模擬され、その推移によ

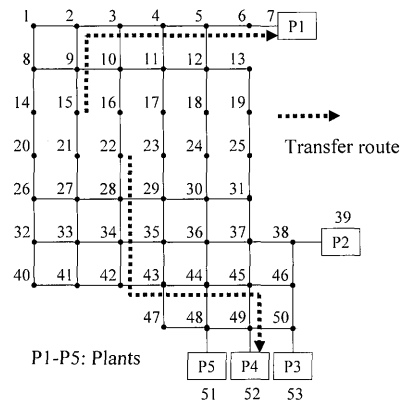


Fig. 3. Example of ore transfer route.

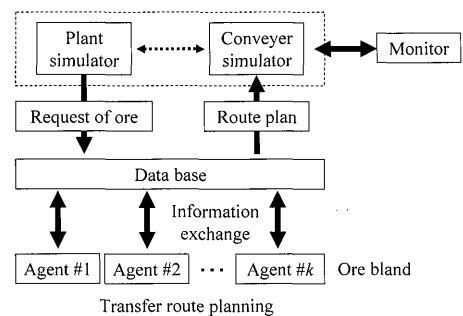


Fig. 4. Construction of decentralized routing system.

り必要ならば鉱石の搬送要求が発生する。搬送要求が発生すると、鉱石の銘柄に対応したエージェントがその搬送経路を計画する。エージェントは、経路を探索するとき、他の鉱石の位置情報を共有のデータベースから獲得し、その情報を元に作成した搬送経路をデータベースに出力する。このように、データベースを介して、エージェント間で情報交換を行うことにより、協調的に搬送計画を作成する。

3. 搬送経路計画問題の定式化

本章では、決定変数を定義し、制約条件および目的関数の定式化を行う。

3.1 決定変数

経路計画問題に対して、決定変数 $x_{i,j,t}^k$ を次のように定義する。

$$x_{i,j,t}^k = \begin{cases} 1; \text{ 鉱石エージェント} \#k \text{ が} t \text{ 期にノード} \#i \\ \text{ からノード} \#j \text{ へ移動するとき} & \dots(1) \\ 0; \text{ それ以外のとき} \end{cases}$$

ここで、 N_i はノード $\#i$ に直接接続されているノード集合であり、ノード $\#i$ を含んでいるものとする。 V は鉱石銘柄の集合であり、 S_k は鉱石 $\#k$ の初期ノードである。 H_k は、エージェント $\#k$ のノード占有期間である。(2)式は、鉱石エージェントは1期間において直接接続されていないノードへの移動が出来ないことを示している。(3)式は、エージェントは1期間で一つのコンベヤ系列のみ選択できることを示している。(4)式は、 t 期にノード $\#i$ へ移動してきたエージェントは、 $(t+1)$ 期においてノード $\#i$ から移動可能なノードへ移動することを示している。(5)式は、エージェントの初期ノード位置を示している。(6)式は、同時に同一ノードに存在可能なエージェントは一つのみであ

$$\sum_{j \in N_i} x_{i,j,t}^k = 0 \quad (\forall k, \forall i, \forall t) \dots(2)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_{i,j,t}^k \leq 1 \quad (\forall k, \forall i, \forall t) \dots(3)$$

$$\sum_{j \in N_i} x_{j,i,t}^k = \sum_{m \in N_i} x_{i,m,t+1}^k \quad (\forall k, \forall i, \forall t) \dots(4)$$

$$\sum_{j \in N_{S_k}} x_{S_k,j,0}^k = 1 \quad (\forall k) \dots(5)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N_i} x_{j,i,t}^k \leq 1 \quad (\forall i, \forall t) \dots(6)$$

$$\sum_{j \in N_i} \left(x_{j,i,t}^k + \sum_{k' \neq k} \sum_{l=0}^{H_k} x_{j,i,t+1}^{k'} \right) \leq 1 \quad (\forall k, \forall i) \dots(7)$$

ここで、 N_i はノード $\#i$ に直接接続されているノード集合であり、ノード $\#i$ を含んでいるものとする。 V は鉱石銘柄の集合であり、 S_k は鉱石 $\#k$ の初期ノードである。 H_k は、エージェント $\#k$ のノード占有期間である。(2)式は、鉱石エージェントは1期間において直接接続されていないノードへの移動が出来ないことを示している。(3)式は、エージェントは1期間で一つのコンベヤ系列のみ選択できることを示している。(4)式は、 t 期にノード $\#i$ へ移動してきたエージェントは、 $(t+1)$ 期においてノード $\#i$ から移動可能なノードへ移動することを示している。(5)式は、エージェントの初期ノード位置を示している。(6)式は、同時に同一ノードに存在可能なエージェントは一つのみであ

るということを示している。(7)式は、エージェント $\#k$ がノードを占有している間、他のエージェントはそのノードに移動することができないことを示している。

3.3 目的関数

搬送経路計画問題の目的関数は(8)式で与えられる。

$$I = \sum_k I_k \rightarrow \min \dots(8)$$

$$I_k = n_k + \alpha D_k \dots(9)$$

ここで、 n_k は鉱石 $\#k$ の初期ノードから目的ノードまでの搬送時間、 D_k は鉱石 $\#k$ の搬送経路における方向変更数である。

以上より、本研究の搬送経路計画問題は、制約条件式(2)~(7)式をもとに、(8)式の目的関数を最小化し、(1)式に示す変数を決定する最適化問題として定式化できる。

4. 分散エージェントによる経路計画アルゴリズム

Fig. 5に提案する経路計画アルゴリズムを示す。提案するアルゴリズムでは、鉱石の銘柄に対応したエージェントが、経路探索と情報交換を繰り返しながら全体の経路計画を最適化する。エージェント間における情報交換では、エージェントが作成した個々の経路の暫定解（一次経路）がデータベースを通じて交換され、経路計画が実行可能となり、かつ解が収束するまで経路探索が繰り返される。一次経路上には各エージェントを識別するフェロモン情報が散布され、近傍解（二次経路）は、このフェロモン情報を参照しつつ作成される。また、本アルゴリズムは、非同期に近い実環境において利用可能となっている。利用環境については5.2節で述べる。以下では、各鉱石エージェントの経路計画アルゴリズムの詳細を示す。

STEP 1 初期データの獲得

プラントから搬送要求を受けた鉱石の銘柄に対応した

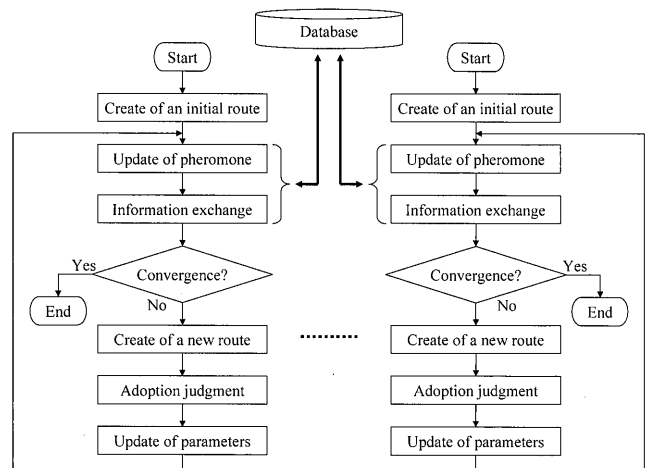


Fig. 5. Route planning flow.

エージェントは、搬送元（初期ノード）と搬送先（目的ノード）及び搬送量に対応したエージェントのノード占有期間 H_k が与えられる。また、温度パラメータの初期温度を $T_q = T_0$ とする。

STEP 2 一次経路の作成

エージェントは、初期ノードから目的ノードまでの一次経路を搬送中の鉱石と干渉しないようにランダムに一つ作成する。ただし、経路計画中の他鉱石エージェントの一次経路は考慮せずに作成する。

STEP 3 フェロモン情報の更新

データベースにアクセスし、(10), (11), (12)式によりフェロモン情報を更新する。

$$ph_{i,t}^k = (1-\rho)ph_{i,t}^k + W \sum_{j \in N_i} x_{j,i,t}^k \quad (\forall i \in N) \dots\dots\dots(10)$$

$$ph_{m,t}^k = (1-\rho)ph_{m,t}^k + W_1 \sum_{j \in N_i} x_{j,i,t}^k \quad (\forall i \in N, \forall m \in N_i) \dots\dots\dots(11)$$

$$ph_{m,t}^k = (1-\rho)ph_{m,t}^k \quad (\forall i \in N, \forall m \in N_i) \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 $ph_{i,t}^k$ は、時刻 t 、ノード i 上に散布されているエージェント $\#k$ のフェロモン量、 W は一次経路のノード上におけるフェロモン散布量、 W_1 は一次経路の隣接ノード上におけるフェロモン散布量、 ρ は蒸発係数である。(10)式は、一次経路上のフェロモン量を蒸発させ、さらに W 散布することを表している。(11)式は、一次経路と隣接するノード上のフェロモン量を蒸発させ、さらに W_1 散布することを表している。(12)式は、一次経路でなく一次経路と隣接もしないノード上のフェロモン量を蒸発させることを表している。また、フェロモン情報は、搬送中でエージェントがノードを占有する期間中は、(13)式により蒸発しない性質をもつものとする。

$$ph_{i,t+1}^k = ph_{i,t+2}^k = \dots = ph_{i,t+H_k}^k = ph_{i,t}^k \dots\dots\dots(13)$$

STEP 4 情報交換

鉱石エージェントは、一次経路の情報をデータベースに書き込み、同時にデータベースから他の鉱石エージェントのフェロモン情報と一次経路の情報を読み込む。

STEP 5 一次経路の評価

一次経路の評価を(14)式にしたがって行う。 r は、アルゴリズムの繰り返し回数である。

$$I_k^{(1)} = n_k^{(1)} + \alpha D_k^{(1)} + \sum_{l \neq k} \beta_{k,l}(r) \cdot C_{k,l}^{(1)} \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $I_k^{(1)}$ 、 $n_k^{(1)}$ 、 $D_k^{(1)}$ はそれぞれ一次経路に対する鉱石銘柄 $\#k$ の評価値、鉱石銘柄 $\#k$ の初期ノードから目的ノードまでの搬送時間、経路の方向変更数である。 $\beta_{k,l}(r)$ は r 回目の経路探索における鉱石 $\#k$ と鉱石 $\#l$ 間の干渉に対するペナルティの係数であり、(12)式に更新ルールを示す。 $C_{k,l}^{(1)}$ は一次経路上で鉱石 $\#k$ が鉱石 $\#l$ と干渉する場合 1 となり、それ以外は 0 となる変数である。

STEP 6 収束判定

収束判定を行う。以下の収束条件を満たせばアルゴリズムを終了し、一次経路を最適解として出力する。

- 経路計画中の全銘柄の鉱石が他の鉱石と干渉を起していない。
- 規定回数解の更新が行われない。

STEP 7 二次経路の作成

- (a) 各エージェントは t 期におけるノード i から $(t+1)$ 期に移動するノード候補をランダムに選択する。
- (b) 各エージェントは、移動先であるノード候補上のフェロモン情報を用いて、(15)式に従って Δph を計算する。

$$\Delta ph = ph_{i,t+1}^k - \sum_{k' \neq k} ph_{i,t+1}^{k'} \dots\dots\dots(15)$$

- (c) Δph が(16)式を満たせば、ノード候補は採用され、それ以外は棄却され(a)へ戻る。

$$d \leq P \dots\dots\dots(16)$$

$$P = \begin{cases} 1 & : \Delta ph \geq 0 \\ \exp(\Delta ph / T_p) & : \Delta ph < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(17)$$

ここで、 d は 0 以上 1 未満の一樣乱数である。

- (d) 採用されたノードが目的ノードでなければ、 $t \leftarrow t+1$ として、(a)に戻る。そうでなければ、STEP 8へ進む。

STEP 8 二次経路の評価

二次経路の評価を(18)式にしたがって行う。

$$I_k^{(2)} = n_k^{(2)} + \alpha D_k^{(2)} + \sum_{l \neq k} \beta_{k,l}(r) \cdot C_{k,l}^{(2)} \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $I_k^{(2)}$ 、 $n_k^{(2)}$ 、 $D_k^{(2)}$ はそれぞれ二次経路に対する鉱石銘柄 $\#k$ の評価値、鉱石銘柄 $\#k$ の初期ノードから目的ノードまでの搬送時間、経路の方向変更数である。また、 $C_{k,l}^{(2)}$ は二次経路上で鉱石 $\#k$ が鉱石 l と干渉する場合 1 となり、それ以外は 0 となる変数である。ここでの干渉の有無は、STEP 7 で作成した鉱石 $\#k$ の二次経路と他の鉱石の一次経路を用いて判定する。

STEP 9 二次経路の採否判定

一次経路の目的関数値と二次経路の目的関数値の差 $\Delta I_k = I_k^{(1)} - I_k^{(2)}$ を計算し、(19)式を満たせば、二次経路を一次経路として更新し、二次経路評価も一次経路評価として更新する。そうでなければ、二次経路は棄却される。

$$d \leq Q \dots\dots\dots(19)$$

$$Q = \begin{cases} 1 & : \Delta I_k \geq 0 \\ \exp(\Delta I_k / T_q) & : \Delta I_k < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(20)$$

STEP 10 ペナルティ関数の重みと温度パラメータの更新

得られた一次経路が実行不可能であれば、干渉を起している鉱石エージェントのみ(21)式にしたがってペナルティ関数の重みを更新し、STEP 3へ戻る。

Table 1. Parameters in the algorithm.

W	W_1	ρ	T_p	T_0	α	$\Delta\beta$	γ	r_s
6	1	0.3	20	18	0.2	0.3	0.85	10

$$\beta_{k,l}(r+1) = \beta_{k,l}(r) + \Delta\beta \sum_{l \neq k} C_{k,l}^{(2)} \dots\dots\dots(21)$$

ただし、 $\Delta\beta$ は定数である。さらに、同一温度パラメータで二次経路を r_s 回作成した場合、温度パラメータを(22)式にしたがって更新する。

$$T_q \leftarrow \gamma \cdot T_q \dots\dots\dots(22)$$

ただし、 γ はアニーリング比である。

以上に示したアルゴリズム中のパラメータをTable 1に示す。これらのパラメータは、その値により解の精度、収束性などが大きく影響を受ける。ここでは、これまでの研究から経験的に適切と考えられる値に設定した。

5. 鉱石搬送路決定の数値実験

5.1 搬送経路計画の例題

5.1.1 問題設定と得られた結果

同時刻に発生した7つの搬送要求に対して、搬送経路計画を行う問題を取り扱う。7銘柄の鉱石の搬送元（初期ノード）と搬送先（目的ノード）は、Table 2に示すように、あらかじめ与えられているものとする。この問題に対する経路計画結果をFig. 6に示す。全銘柄の鉱石が干渉を生じることなく初期地から目的地までの経路を最短とする経路計画が得られた。なお、この例題で得られた経路長は42であり、総搬送時間は45であった。経路長より搬送時間が長いのは、干渉を避けるため途中で停止が含まれているためである。また、経路の方向変更数を含めた目的関数値は48.0であった。Fig. 7は、各時刻における各銘柄の鉱石の位置を示している。過去に分散エージェント法が適用された例として、半導体工場における無人搬送車の搬送経路計画問題がある。この問題では、無人搬送車が搬送路を点状に移動するのに対し、本研究では、このように各鉱石が複数のノードを占有しながら線状で移動している。

5.1.2 フェロモン情報と目的関数の推移

Fig. 8(a)は、時刻3、ノード#30における経路探索の繰り返し回数に対するフェロモン情報の推移、Fig. 8(b)は、時刻4、ノード#31における経路探索の繰り返し回数に対するフェロモン情報の推移、Fig. 8(c)は、時刻5、ノード#37における経路探索の繰り返し回数に対するフェロモン情報の推移を示している。鉱石の位置を示すフェロモン情報は一次経路上のノード及び一次経路上の隣接ノードに撒かれ、それ以外のノードに撒かれたフェロモンは一定の割合で蒸発する。したがって、経路計画アルゴリズムが繰り返

Table 2. Start and goal node for each ore agent.

Ore number	1	2	3	4	5	6	7
Start Node	16	18	25	23	27	14	20
Goal Node	7	39	53	52	51	17	30

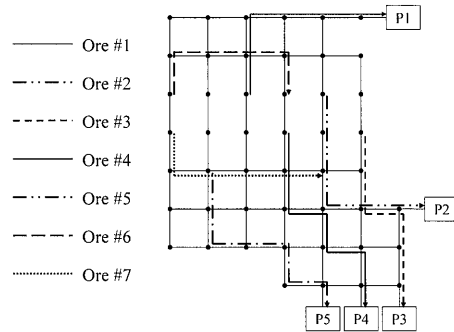


Fig. 6. Result of transfer route.

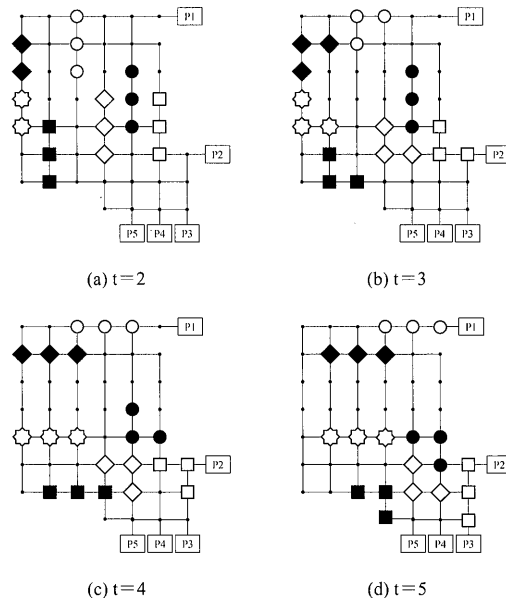


Fig. 7. The position of each kind of ore (transfer starting time: $t=0$).

されるにつれて、一次経路上と一次経路の隣接ノードにのみフェロモンが蓄積していく。図に示すように、はじめは、同一ノードに複数種類のフェロモン量が散布されているが、アルゴリズムが繰り返されるにつれて、最終的に一種類の鉱石のみフェロモン量が蓄積している。例えば、Fig. 8(a)では、ノード#30が時刻3で鉱石#2により占有されることを示している。Fig. 9は、ノード#37におけるフェロモン情報の時間変化を示している。図は、時刻2から4の間は鉱石#2がノード#37を占有し、時刻5から7の間は鉱石#3がノード#37を占有することを示している。本稿では、コンベヤによる鉱石搬送を取り扱っているため、搬送路上の線状移動を問題としている。したがって、同種類のフェロモン情報が同一ノード上に一定期間蓄積した状態になっ

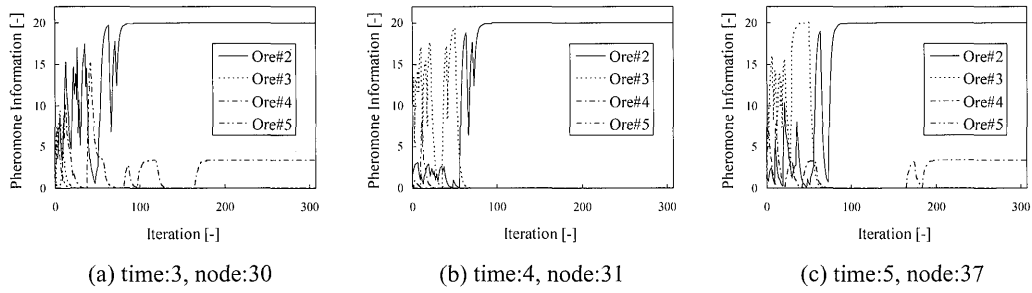


Fig. 8. The transition of pheromone Information with iteration.

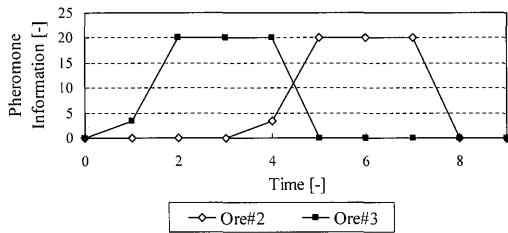


Fig. 9. The time change of pheromone information (node: 37).

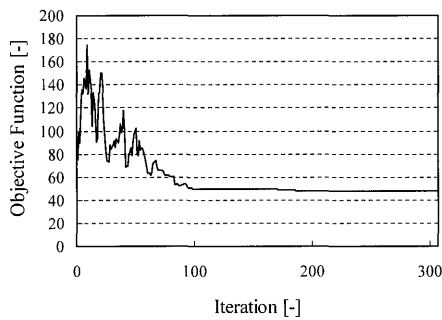


Fig. 10. Minimization of objective function.

ている。

Fig.10に、経路計画アルゴリズムの繰り返し回数に対する目的関数値の推移を示す。この場合、繰り返し回数が185回で収束している。

5・2 動的経路計画問題への適用

5・2・1 問題設定

Fig.11に搬送要求の発生と経路計画作成のタイミングを示す。経路計画は、計画周期 S_{plan} (2min)ごとに作成され、 S_{plan} は計算時間 (10s以下) に対して十分大きい値としている。したがって、実際の原料ヤードの搬送問題において同期か非同期かを考慮せずに利用可能となっている。また、すでに経路計画が作成され、搬送中の鉱石については、再経路計画を行わないことにする。つまり、新しい搬送要求に対して、エージェントは、搬送中の鉱石の経路を禁止領域として経路計画を行う。本論文では、計画周期 S_{plan} の間に発生した搬送要求に対して静的経路計画問題を繰り返し解くことにより、動的環境における経路計画問題を扱う。

5・2・2 原料在庫量の推移

Fig.12は、鉱石在庫量の推移を550期間 (1期間を2min

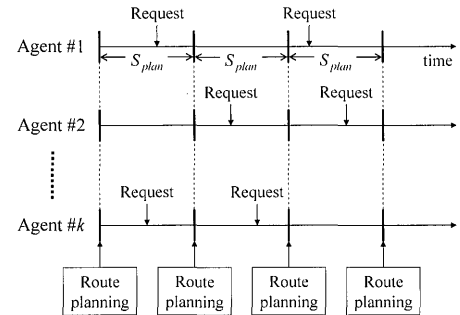


Fig. 11. The timing of route planning in dynamic transportation.

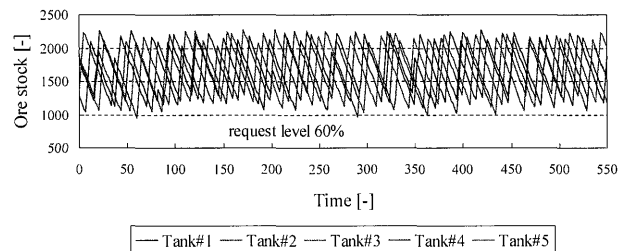


Fig. 12. The transition of stocks in ore tanks.

とする) にわたってシミュレーションした結果である。ここでは、5種類の銘柄の鉱石が、各種類に対応したプラントへ搬送される問題を取り扱っていて、鉱石の種類とプラントが一対一対応となっている。5つある各プラントの鉱石在庫量は、一定の割合で減少していくものとし、最大量の60%を下回ると鉱石の搬送要求が発生するものとしている。また、同種類の鉱石を原料ヤードの複数箇所に配置し、時間の経過とともに搬送元が変化するように設定している。図に示すように、鉱石の消費と供給が繰り返され、安定した搬送が行われていることが確認できる。

5・3 従来法との比較

本節では、提案手法と従来法との比較を行う。ここで扱う従来法は、SA法を用いた搬送経路計画法である。提案手法が各銘柄の鉱石の搬送時間を独立して最小化するのに対し、従来法は、全銘柄の鉱石の総搬送時間を考慮して最小化を行うという集中型の方法である。そのアルゴリズムを以下に示す。

STEP 1 初期解の作成

全銘柄の鉱石の搬送経路をランダムに作成し、これを初期解とする。このとき、経路計画問題に対する制約条件(2)~(7)式を満たすように搬送経路を決定する。

STEP 2 近傍解の作成

各鉱石の搬送経路をランダムに変更し、近傍解を作成する。ここでも、経路計画問題に対する制約条件を満たすように経路を決定する。

STEP 3 解の採否判定

解の採否をSA法により判定する。

STEP 4 終了判定

STEP 3において規定回数(200回)解が更新されなければ、得られた解の中から最も評価の良い解を採用し、アルゴリズムを終了する。そうでなければ、STEP2に戻る。

Table 3は、同じ問題を提案手法と従来法で解いたときの評価値と計算時間の比較を示している。ここでは、鉱石の銘柄数を8とした。SA法のパラメータの設定は、同一温度での試行回数を10回、初期温度を20、アニーリング比を0.9とした。結果は、乱数を変えて10回の試行を行った平均である。提案手法では、約3倍の速度で従来法とほぼ同程度の解が得られた。

5.4 原料在庫量の推移

このシミュレータの性能を確認するため、搬送のリクエストレベルを原料槽の最大貯蓄量の60%から50%に変化させ、原料在庫量の時間変化についてシミュレーションを行った。結果をFig.13に示す。この場合も、原料在庫量の水準が安定し提案法の実行可能性を示すことが出来た。

5.5 異常時への対応

原料搬送に利用するコンベヤに故障が生じた場合、従来までの集中型の搬送システムでは、短時間で経路計画を行うことは困難であるため、原料の供給に支障が生じてしまう可能性がある。このような状況において、耐故障性、柔軟性の観点から自律分散型の搬送システムは非常に有効であるといえる。

Fig.14に示すように、あらかじめ、計画されている経路上に故障が生じた場合、経路計画を作成しなおす必要があるが、分散型の搬送システムでは、集中型のシステムより迅速に経路計画を行うことが出来るため、製鉄所における生産システムへの影響を最小限に抑えることが可能である。

Fig.15に原料在庫量の推移を示す。150期より異常時として、Fig.14に示すように3ヶ所で故障コンベヤが発生した状態となっている。図に示すように、設備の故障後に原料在庫量の最小値が減少する部分が見られるが、時間の経過にともない一定の水準に止まっている。Table 4は、Fig.15に示した原料在庫量の最大値と最小値、平均値の平均を示している。搬送設備の異常発生前後で在庫量の最大値は大きな変化はないが、最小値と平均値は小さくなっている。つまり、異常発生後は、使用できるコンベヤ数が減少したため搬送設備の搬送能力が低下したものと考えられる。

6. 搬送負荷の分散化への応用

Fig. 3に示すように、プラントの位置が一方向に集中している搬送路では、鉱石の搬送が特定の経路に集中するため搬送経路のボトルネックとなる場所が存在する。つまり、

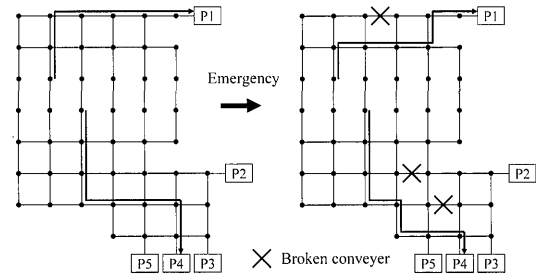


Fig. 14. Example of transfer route in emergency.

Table 3. Comparison with decentralized agent method with SA.

	Evaluation value [-]	CPU time [sec]
Proposed method	55.21	3.87
SA	54.69	10.71

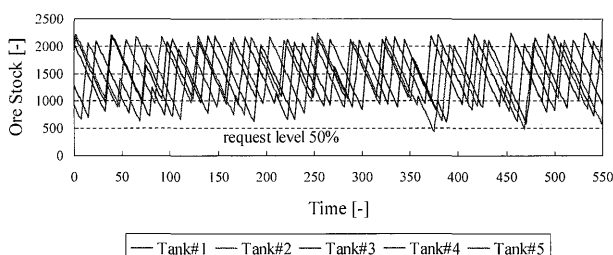


Fig. 13. The transition of stocks in ore tanks.

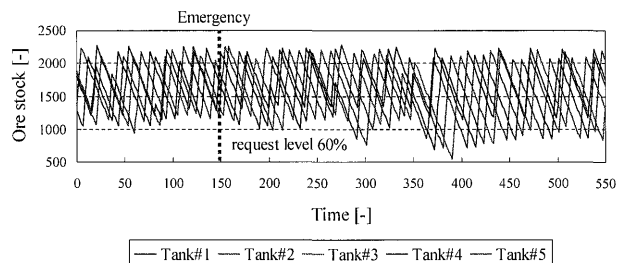


Fig. 15. The transition of stocks in ore tanks for emergency.

Table 4. Maximum, minimum and mean of ore tank stock.

	Max [-]	min [-]	mean [-]
Before emergency	2261	1038	1664
After emergency	2255	761	1577

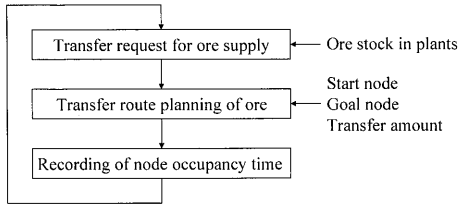


Fig. 16. Flow chart of transfer simulation.

搬送の負荷が大きい経路と小さい経路が存在する。本節では、時々刻々と発生する搬送要求に対して経路計画を行い、鉱石の搬送が集中する位置の検討を行う。搬送負荷分布の検討を Fig.16 に示す流れで行う。鉱石の搬送要求に応じて、提案手法により経路計画を行い、鉱石の搬送に使用された経路の情報をノード別に記録していく。

Fig. 3 (model 1) に示す搬送路モデルで搬送負荷分布の解析を行った結果を Fig.17 に示す。図は、鉱石の搬送を行うときに、ノードを使用した時間の合計をノード別に示している。図より、ノード #30, 36, 45, 48 に搬送負荷が集中しているという結果が得られた。鉱石の搬送に利用されていないノードが存在しているが、ここでは、搬送元（初期ノード）候補をノード #15 から #19 及びノード #21 から #25 に設定しているためであると考えられる。したがって、この設備では、一部の経路に負荷が集中し、設備の冗長性やコストの面から考えて不利益なものであると思われる。このように、搬送路のネックとなる位置を探ることは、搬送設備を設計する上で有効である。

Fig.17 に示す結果をもとに、ほとんど搬送に利用されていないコンベヤを削除し、搬送が集中している場所に近くにコンベヤを追加した搬送路モデルを Fig.18 (model 2) に示す。Fig.19 は、model 2 で同様の数値実験を行い、経路の搬送負荷分布の解析を行った結果を示している。Fig.17 と Fig.19 を比較すると、負荷分布がやや平準化されていることが確認できる。また、model 2 は、model 1 より経路の数が少ないが、負荷の最大値は、近い値に抑えられている。また、搬送の負荷が集中するノードは、Fig.17 では #36 と #37, Fig.18 では #31 と #32 であり、同じ位置になっていることが分かる。Table 5 は、model 1 と model 2 における総搬送時間 (TTT) と搬送負荷の標準偏差 (SDTL)、コンベヤの本数 (NC) をそれぞれ示している。model 2 は、model 1 よりコンベヤ数は少ないが、総搬送時間はほぼ等しく搬送能力としては同等のものであると考えられる。model 2 の搬送負荷分布の標準偏差は、model 2 より小さくなっているため負荷分布がより分散されていることが確認できる。以上のように、搬送負荷が集中している経路を探ることにより、搬送能力を向上させる必要があるコンベヤを見つけ出すことができる。

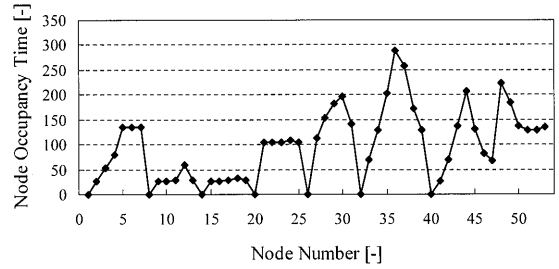


Fig. 17. Distribution of transfer loads.

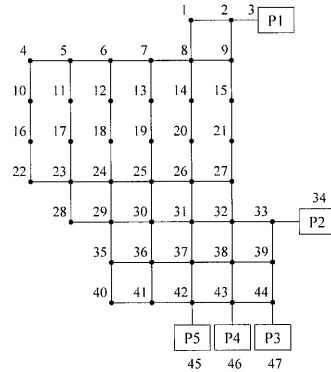


Fig. 18. Transfer facility model.

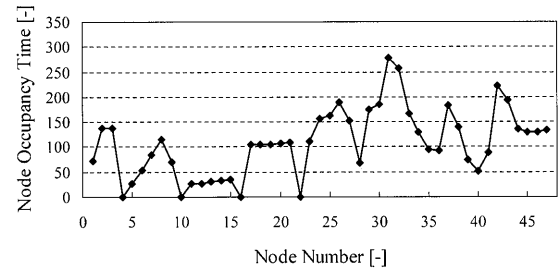


Fig. 19. Distribution of transfer loads.

Table 5. Evaluation value for two models.

	TTT [-]	SDTL [-]	NC [-]
model 1	789	72.9	74
model 2	790	68.7	64

7. おわりに

本研究では、自律分散エージェント法を用いた製鉄所原料ヤードにおける搬送経路計画作成方法を提案した。経路計画では、銘柄別の鉱石をエージェントとみなし、エージェント間で情報交換を行いながら他の鉱石搬送と干渉を起こさないように、目的関数を最小とする経路を自律的に作成する。

経路計画では、原料ヤードからプラントへの鉱石搬送を取り扱い、鉱石が5区割の原料ヤードに貯えられているとし、下流工程のプラントも5つとした。搬送経路の作成方法にはメタ戦略の一つである Ant 法を採用した。エージェ

ントは暫定的に最適とされる経路のノード上にフェロモンを散布し、自らの最適経路の占有を他のエージェントに対し主張する。経路探索を行うとき、フェロモン情報を用いて確率的に無駄な経路を発生させないことで探索の効率化をはかった。数値実験では、経路探索が繰り返されるにつれて特定の鉱石銘柄のフェロモン情報がノード上に蓄積していく様子を示した。収束性の比較として、分散エージェント法と集中型最適化法であるSA法で経路計画を行い、分散エージェント法の高速性を示した。また、地震や大火災などの災害により搬送設備が故障した場合を想定したシミュレーションを行った。エージェントはコンベアの故障に対応して、代替経路を作成することにより、鉱石の供給を維持しプラントの原料ストックを許容範囲内に保つことが出来た。さらに、原料ヤードの搬送路モデルにおいて、鉱石の搬送に使用された経路情報を記録していくことによって、搬送のネックとなるノードが抽出された。今後の

課題は、鉱石の銘柄を増やし原料ヤードのモデルを実規模レベルまで拡大し、分散エージェント法の性能を検証することである。また、搬送のネックとなるノードの解消法について検討を行う必要がある。

文 献

- 1) M.Dorigo and A.Coloni: *IEEE Trans. SMC*, **26** (1996), 29.
- 2) K.Sotobayashi, M.Konishi, T.Nishi and J.Imai: Proc. 2002 Japan-USA Symp. on Flexible Automation Hiroshima, Japan, (2002), 14.
- 3) 安藤昌和, 西 竜志, 小西正躬, 今井 純: 計測自動制御学会論文集, **39** (2003), 759.
- 4) アルスヘイム・サレイマン, 小西正躬, 能勢和夫, 大谷龍次: 日本生産管理学会, **10** (2003), 35.
- 5) H.Kawamura, M.Yamamoto, K.Suzuki and A.Ouchi: *Intelligent Autonomous System*, IOS Press, (1998), 587.
- 6) M.Konishi, S.Al-Seheim, J.Kikuchi and Y.Dai: *Prog. Saf. Sci. Technol.*, **5** (2003), 1320.
- 7) 大内 東, 山本雅人, 川村秀憲: マルチエージェントシステムの基礎と応用—複雑系工学の計算パラダイム—, コロナ社, (2002).