

# SA 法を応用した組立定盤内のブロック最適配置

正員 奥本 泰久\* 井関 隆太郎\*\*

Optimization of Block Allocation in Assembly Area Using Simulated Annealing Method

by Yasuhisa Okumoto, *Member* Ryutaro Iseki

## Summary

The scheduling of assembly process of hull blocks is very important to rationalize the total construction scheduling because the block assembly is in the middle of the manufacturing process between fabrication and erection. Hence, some researches have been made till now. There are two systems to assemble the blocks: the case done on the fixed area in a wide yard, and the case of line flow system on the conveyor. In the former case it is necessary to optimize the space where blocks are located. Though this allocation of blocks is carried out by experienced workers now, the system which supports this work has been developed recently. Since these systems are done by manual operation on the computer display, an automatic allocation system was developed by the authors here, imitating an optimal allocation of plate nesting.

The applied method is the simulated annealing (SA), which is one of the meta-heuristics approach for combinatorial optimization problems. This paper introduces the technique of the optimization of allocation and the calculation results for sample data. The results showed that this SA method is more effective to optimize the block allocation on the assembly area.

## 1. 緒 言

船体の建造計画は、一般に線表を基にした船台（もしくは建造ドック）への搭載計画がベースとなり、これを考慮した、船殻ブロックの組立てや艤装・塗装工程を折り込んだマスタースケジュールによって詳細化される。ブロックの組立工程は、加工工程と搭載工程の中間に位置し、このスケジュールリングを最適化することは極めて重要な課題であり、過去にも多くの研究がなされてきた<sup>1) - 5)</sup>。

ブロックの組立ては、広い工場内の固定定盤上で行う固定方式と、各作業工程ごとにシフトしながら行うライン生産方式とがあるが、前者ではどのブロックをいつどこで組み立てるかを最適化する必要がある。この配置計

画は現在、現場の熟練者が経験に頼って配置しているのが実状であるが、近年この作業を支援するシステムが開発されている<sup>1) 2)</sup>。これらはコンピュータのディスプレイ上でマウスを使って人が配置するものであるが、本稿はこれを自動的に配置することを試みた。

この種の最適配置問題は、いわゆる板取り問題（パッキング問題）として知られ、鉄鋼関係や服装など広い分野で研究されており、残材を最小化する組合せ最適化問題としてメタヒューリスティックな計算法が適用されている<sup>6) 7)</sup>。船体構造分野では、鋼材のネスティングとして知られ、幾つかの適用例が報告されている<sup>8) - 10)</sup>。

本稿ではこれらの例を参考にし、固定定盤上に有効にブロックを配置する最適化のシステムを開発した。最適化の手法はメタヒューリスティック手法の一つであるシミュレーテッド・アニーリング (SA) 法とした。

## 2. ブロックの組立て

\* 近畿大学工学部

\*\* 近畿大学大学院

原稿受理 平成17年3月28日

現在、船殻ブロックの組立方法は Fig. 1 に示すように固定定盤方式と流れ作業方式とがある。前者は通常、広いヤードに固定の柱状治具（定点治具）を配し、この上で任意の位置に任意のブロックを順に組み立てる方式であり、治具を上下に可動出来るようにして（ピン治具）、主に曲がりのあるブロックに使われている（Fig.2）。後者はローラーコンベアやスキッド上で、板の配材、取付、溶接などの作業を工程順に移動しながらブロックを組み立てていく方式で、主に平板状のブロック組立てに採用されている。この場合のブロックの移動は、コンベア上のブロックをチェーンなどで引き込む方式や、スキッドで移動する方式があり、いずれもタクト生産方式が採用されている<sup>3)</sup>。

ここで、製造工程を「物の流れ」と「作業の流れ」に分けて考えると、固定定盤方式は物を固定した上でその場で作業工程を順に辿る方式であり、流れ作業方式は物の流れと作業の流れを同一にしたものと考えられる。前者は生産資源（人や機械類）が工程順に入れ替わるが、後者ではそれらが同一の場所に固定されることになる。

ブロックの組立ては、搭載スケジューリングを基に作成されたマスタースケジュール（アセンブリースケジュール）に従って行われるが、流れ作業方式では複数の

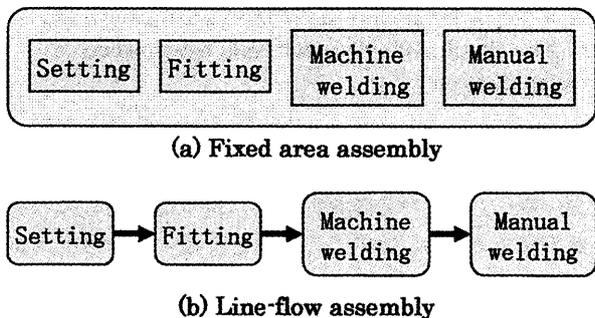


Fig.1 Two assembly systems

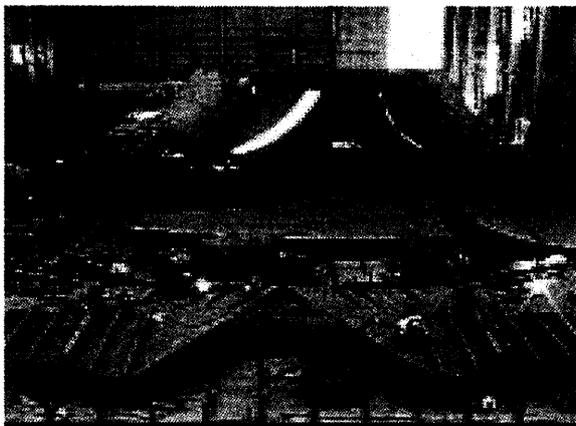
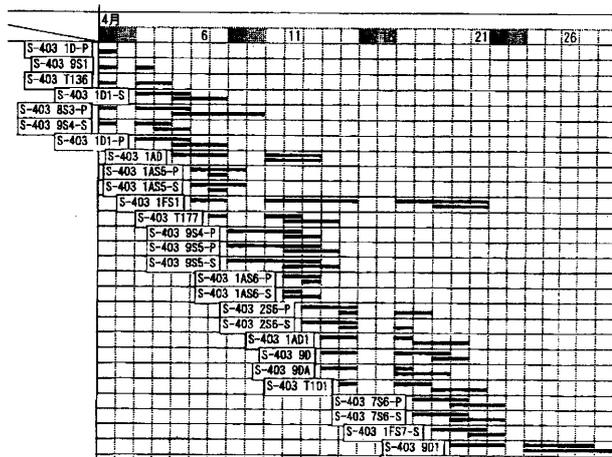


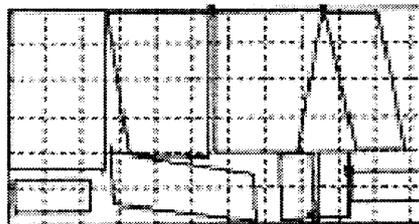
Fig.2 Block assembly yard

工程がタクト時間内で終了するよう配員計画が大切であり<sup>3)</sup>、固定定盤方式では場所の制約があるため、ブロックの場所計画が大切となる。すなわち、固定定盤方式では、どのブロックをどの順番で、どこで製作するかを設備と配員を考慮して計画することになり、設備の有効利用と作業量の平滑化を考慮する必要がある。Fig.3 に示すように、組み立てるブロックの候補(a)と定盤配置(b)との相互検討が必要となる。

ブロックの組立スケジューリングについては、既に報告済みであるので<sup>1), 3) - 5)</sup>、以下では定盤配置についてのみ検討する。



(a) Block assembly scheduling



(b) Block allocation

Fig.3 Block assembly planning

### 3. シミュレーテッド・アニーリング法

#### 3.1 基本アルゴリズム<sup>11) - 13)</sup>

アニーリング(焼きなまし, Annealing)は、鉄または鋼の軟化、結晶組織の調整または内部応力の除去のため、適当な温度に加熱した後、ゆっくりと冷却する操作をいう。内部応力の除去または軟化を目的とする場合には、適当な温度(変態点以下の温度)まで加熱後徐冷する熱処理を、一方、結晶組織の調整を目的とする場合には、 $A_{c3}$  変態点+50°C程度の温度に加熱後徐冷却する熱処理をいう。この冷却プロセスにより系がある安定した平衡状態まで収束するエネルギーの変化を模擬し、組合せ最

適化問題を解く方法をシミュレーテッド・アニーリングと呼んでいる。すなわち、初期の不安定状態（非最適解）を冷却しエネルギー最小の安定状態（最適解）を得るプロセスである。

最適化問題によく使われる局所探索法では、最小化問題を扱うとき、現在解より常に改善方向に降下するが、この方法では大域的最適解よりも局所最適解に収束する場合が多い。シミュレーテッド・アニーリング法では、評価値が改善される解を採択することに加えて、ある制限のもとで評価値が悪化する解も採択することが特徴である。高温時での初期段階では、良くない解を採択する確率を高くし、探索処理が進むに従い温度が低くなれば、良くない解を採択する確率も低くし、温度が下がった最終段階では大域的最適解が採択されるように改善されている。

### 3.2 収束性と温度、採択確率の関係<sup>1) 12)</sup>

熱力学の法則では、新しい状態のエネルギー $E_j$ が現在のエネルギー $E_i$ よりも低いならばその移動が採択され、逆の場合には次式に示す確率で新しい状態が採択される。

$$p(\Delta E) = \exp(-\Delta E / KT) \quad (1)$$

$$\Delta E = E_j - E_i$$

$K$ : ボルツマン定数

$T$ : 温度

これを最適化問題（最小化問題）に利用すれば、目的関数 $S$ が $S_i$ から $S_j$ への遷移に対し、減少する（すなわち改善される）ケースでは確率1で採択されるのに対し、悪化するケースでは温度 $T$ と増分 $\Delta S$ に依存した確率で採択されると考える。

$$p(\Delta S) = \exp(-\Delta S / T) \quad \Delta S > 0$$

$$\Delta S = S_j - S_i \quad (2)$$

$T$ : 温度

$$p(\Delta S) = 1 \quad \Delta S \leq 0$$

すなわち、生成された新しい解が採択されるかどうかの確率は、評価値（一つ前の状態との差）と、そのときの温度に依存している。これを Fig.4 に示す。

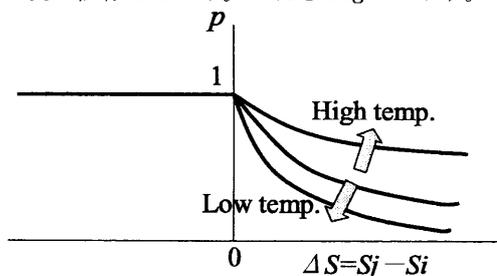


Fig.4 Acceptance probability

### 3.3 冷却スケジュール

シミュレーテッド・アニーリング手法では、以下のパラメータの値を指定することにより決定される。

$\alpha$ : 冷却係数

$T_0$ : 初期温度

Time: 終了時間

$\beta$ : 推移係数

$M$ : マルコフ連鎖の長さ

#### (1) 冷却係数 $\alpha$

冷却係数とは、採択確率式の温度を変化させる係数であり、一定の計算を繰り返すごとに温度 $T$ は $\alpha T$ に減少する。冷却係数を決定する際に、出来る限り正確な値を得るため $T$ は徐々に減少する方が望ましく、一般には $0.8 \leq \alpha \leq 0.99$ とする。ここでは $\alpha = 0.99$ とした。

#### (2) 初期温度 $T_0$

初期状態ではほとんどの状態で採択されなければならないために、初期温度 $T_0$ における採択確率は1に近づくようにする。ここでは $T_0 = 100^\circ\text{C}$ とした。

#### (3) マルコフ連鎖の長さ $M$

これは、一定温度における計算回数を示したものである。この計算回数の中で処理を平衡状態に到達させなければならないため、 $M$ は温度が低下するに従って増える事が望ましい。ここでは $M = 100$ とした。

#### (4) 終了時間 Time (または最終温度)

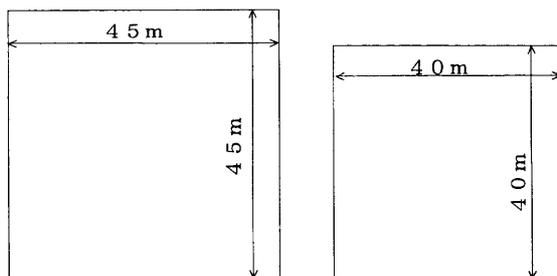
マルコフ連鎖の最終解が連続して変化しない場合、または解が目的の値に達した場合に、処理を停止する時間または温度。今回は計算回数 100,000 を終了条件とした。

#### (5) 推移係数 $\beta$

一定の温度における計算回数を変化させる係数であり、一定の計算を繰り返すごとにマルコフ連鎖 $M$ は $\beta M$ に変化する。ここでは $\beta = 1$ とした。

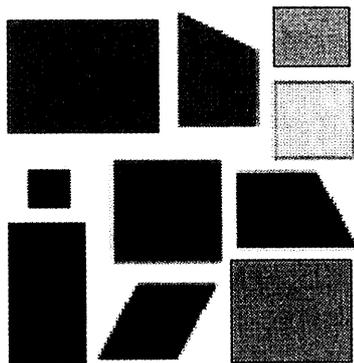
### 3.4 シミュレーテッド・アニーリング手法の手順

- 1) 初期温度 $T_0$ 、停止条件（計算回数 or 最終温度）、反復回数を設定。  
初期解 $S_0$ を生成し、それを暫定的な最良解とする。
- 2) 現在解 $S_i$ の近傍解 $S_j (j \in S)$ をランダムに選ぶ。  
 $\Delta(S_i, S_j) \leq 0$  ならば、無条件に $S_i = S_j$ とする。  
 $\Delta(S_i, S_j) > 0$  ならば、(2)式に示す一定の確率で $S_i = S_j$ とする。  
選択確率は温度 $T$ に依存し、 $T$ が小さい程減少する。
- 3) 冷却スケジュール $\alpha$ に基づいて $T$ を冷却。  
推移係数 $\beta$ に基づいてマルコフ連鎖 $M$ を変化させ2)へ戻る
- 4) 停止条件を満たすならば停止



Case1 Case2

(a) Block assembly area



(b) Shape of blocks

Fig.5 Sample of simulation

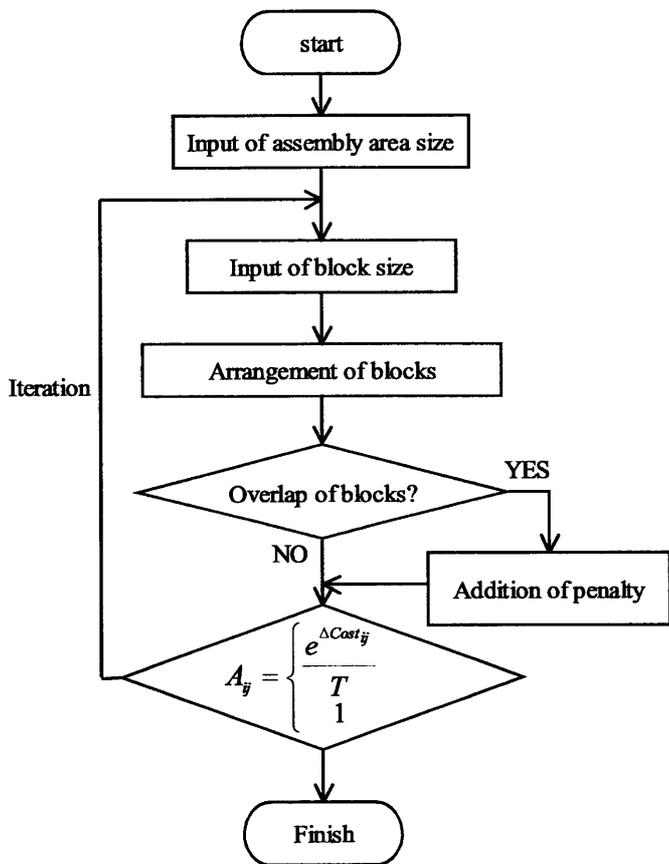


Fig.6 Flow chart

#### 4. シミュレーション内容

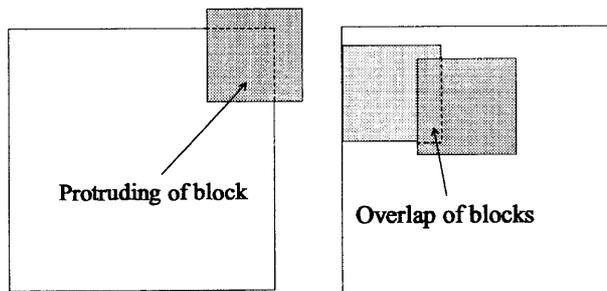
##### 4.1 概要

今回は, Fig.5 に示すサンプルデータを用いて 10 個のブロックを 2 種の固定定盤上に配置するシミュレーションを行った。ブロックの形状は 3 次元的であるがここでは平面への投影形状を考える。

前章の手順に従って C 言語でプログラムを作成した。Fig.6 にプログラムのフローチャートを示す。今回のプログラムにおいては解を早く収束させる事よりも解の精度を上げる事を重要視したため, 冷却係数は  $\alpha$  の値を 1 に近づけ温度の減少を非常に小さくした。初期温度は, プログラムを繰り返し実行することにより, 初期状態で解の良し悪しに拘らず高確率で採用される温度を試行錯誤的に求め, これを採用した。終了温度は, 計算回数の上限を 100,000 回に設定した。これは今回用いたコンピュータ(CPU Celeron400MHz, メモリ 128MB)で計算を行った場合に, 比較的短時間でサンプルを収集できるためである (2~3分)。また, 計算途中で解が 0 になった場合は一旦計算を終了し, 計算結果を出力するようにした。今回のプログラムでは, 推移係数によるマルコフ連鎖の増加は行わなかった。これは, プログラムを作成しサンプルを収集する中で試行錯誤的に求めた。

##### 4.2 目的関数と制約条件

これまでなされた板取り問題などでは, 通常, 板の残材 (空きスペース) を最小化するという目的関数がとられてきた。定盤上それぞれのブロックが重なることができない場合や定盤エリアからはみ出すことのできない場合はこれでもよいが, 実際の現場では, ブロック形状が 3 次元的であるため, 投影の形状では一部重なったり, ブロックが定盤からはみ出ている場面も存在する。そのため, 決められた定盤の中にブロックを収めるのを第一目標とするが, どうしても無理な場合は, ブロックの重なりと, はみ出しを考慮に入れた最適化ができるように考え, 今回は Fig.7 に示す 2 種類の重なりに対しペナルティを考慮に入れ最適化を行った。



(a) (b)

Fig.7 Penalty

目的関数は

$$\text{ペナルティ 1} + \text{ペナルティ 2} \rightarrow \text{最小化} \quad (3)$$

ペナルティ 1: ブロックと定盤の重なり

ペナルティ 2: ブロック同士の重なり

制約条件は

$$\text{ペナルティ 1, ペナルティ 2} \geq 0 \quad (4)$$

### 4.3 ブロックの重複判定

一般にブロックは複雑な形状をしているが、本研究では組立定盤上のブロック配置を二次元問題として考える。定盤上に任意形状のブロックを配置する際、まず、2つのブロックが重なり合うかどうかを判定し認識させる必要がある。そこで、Fig.8に示すような2つのブロックP、Qが重なり合うかどうかを判定する。

判定方法は以下の手順で行う。

- (1) ブロックを凸多角形の二次元図形として考え、それぞれの座標を入力する。
- (2) 2つのブロックの辺を時計回りに辿るベクトルで表現する。
- (3) Fig.8で示される図形Pを形成する各ベクトル式(5)に対し、図形Qの各頂点 $(x_i, y_i)$ の判別式(6)を計算する。

$$e_i: a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (5)$$

$$H_{ij}: a_i x_j + b_i y_j + c_i \quad (6)$$

- (4) 多角形Pの少なくとも一つの辺からみて、多角形Qの全頂点が $H_{ij} > 0$ の関係であれば、二つの多角形は互いに独立であるという条件<sup>1,4)</sup>に基づき2つの図形が重なり合うかどうかを判定する。

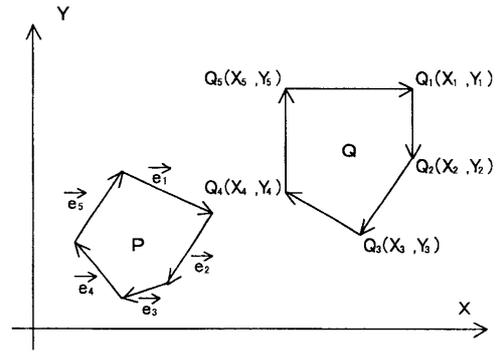


Fig.8 Defined block

## 5. 実行結果

Case 1に対するプログラムの実行結果をFig.9に示す。図の縦軸はペナルティ、横軸は計算回数を示しているが、初期配置状態でのペナルティは1024であり、一時的に値が大きくなることもあるが、徐々に収束していき最終的には最適解0を出すことができた。これはFig.10に示すようにブロック同士が干渉せず、また、ブロックが全て固定定盤上に収まっていることを示す。シミュレーテッド・アニーリングの手法はコンピュータ処理時間も少なく今回のケースで3分未満であった。

次にCase2のシミュレーション結果をFig.11に示す。この場合、最終のペナルティは0でなく、図に示すように1つのブロックがはみ出していることが分かる。これまでの板取りの研究に倣えば、はみ出したブロックを別の固定定盤に載せる、もしくは待機状態にすることにな

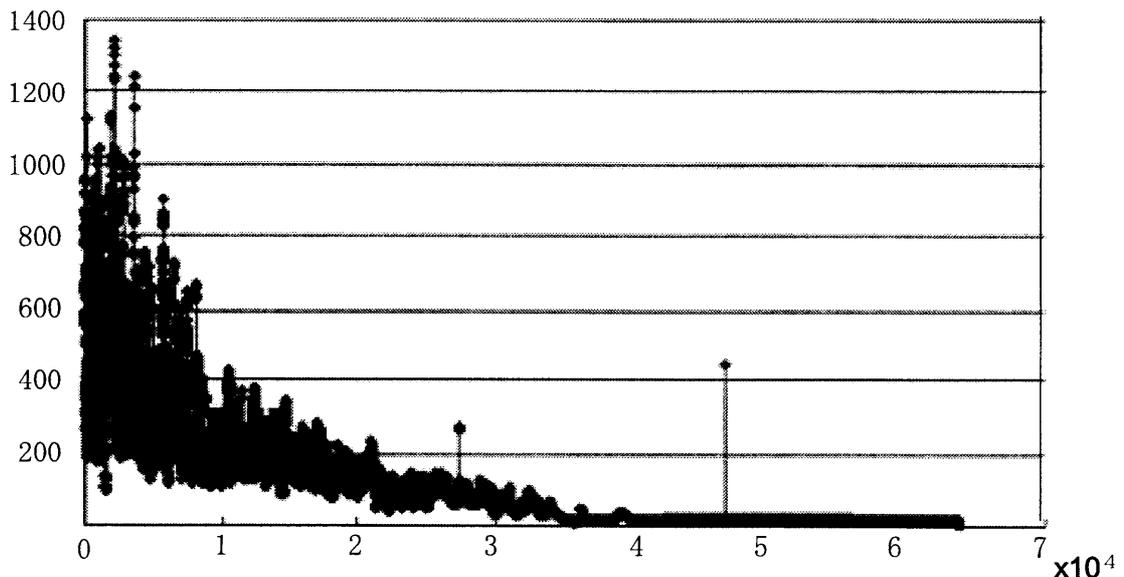


Fig.9 Calculation results for sample data (case1)

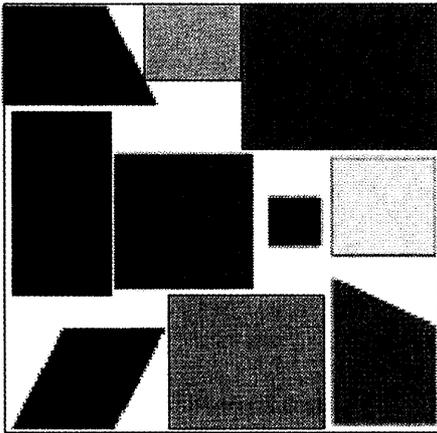


Fig.10 Simulation result (case1)

るが、実際の現場では作業員の判断により多少ブロックがはみ出している作業に支障が無ければそのまま作業が行われている。そのため、本研究ではその点を考慮に入れ全てのブロックが固定定盤内に収まらない場合でも、ペナルティの値が小さな出力結果を表示し、作業員の判断により取捨選択を行い実際の現場に適用することとした。Fig.11のケースでは、ブロックが大ききくはみ出しているために、実際の作業では固定定盤上に置く事ができないと思われるが、計算結果を作業員が見てこの程度のはみ出しなら問題ないと判断すれば、そのまま採用することができる。

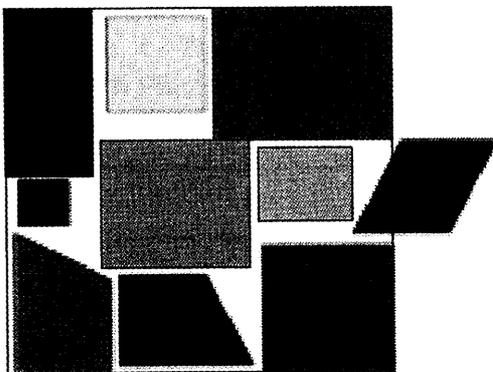


Fig.11 Simulation result (case2)

## 6. 結 言

本稿は、船殻ブロックの固定定盤上の配置問題を取り上げ、複数の船殻ブロックを固定定盤上に配置する際の組合せ最適化を検討した。最適化のアルゴリズムとしては近年メタヒューリスティック手法として適用され始めたシミュレーテッド・アニーリング手法を用いた。サンプルデータによる試計算を行った結果、

- (1) ブロックの配置シミュレーションを行う事により、固定定盤を有効に使用することができた。
- (2) この種の組合せ最適化問題に対しシミュレーテッド・アニーリング手法は短時間に最適解を得ることがわかり、その有効性が確認できた。

ブロックを製作する定盤は面積に限りがある為、この有効利用は生産性向上に欠かせない。このため、本システムを用いてシミュレーション結果を全体のスケジューリングにフィードバックし、無駄の少ない建造計画を立てることが望まれる。

## 参 考 文 献

- 1) 奥本, 笠間, 井上: オブジェクト展開型生産管理システムの開発, 西部造船会々報 第 100 号, (2002), pp.279-292
- 2) 武市, 青山, 小林, 牧原: ペトリネットを利用した工場シミュレータの構築—第3報: 定盤モデルを導入した工場シミュレーター, 日本造船学会論文集 第 190 号, (2001), pp.449-458
- 3) 奥本, 村瀬, 石山, 山岸: 線形計画による組立工程の詳細日程・配員計画, 西部造船会々報 第 102 号, (2001), pp.403-412
- 4) 奥本, 村瀬, 石山, 山本: バックトラック法によるブロック組立順序の最適化計画, 西部造船会々報 第 104 号, (2002), pp.257-266
- 5) 奥本, 山本: タブー探索法による建造工程の最適化, 日本造船学会論文集 第 194 号, (2003), pp.219-225
- 6) 黒杉, 白井, 松本: カutting費用を考慮した最適板取り技法, 日本機械学会第8回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 1998, pp.350-353
- 7) 藤田, 赤木, 廣川: 遺伝的アルゴリズムと極小値探索アルゴリズム化による板取り問題の一解法, 日本機械学会論文集 (C編) 59 卷 564 号, (1993), pp.2576-2583
- 8) 山内, 手塚: 遺伝的アルゴリズムを用いた自動ネスティングの開発と実用化, 日本造船学会論文集 第 178 号, (1995), pp.707-712
- 9) 長島, 丹羽, 平野, 岡田: FINEST アルゴリズムによる鋼板自動ネスティングの実用化, 石川島播磨技報 Vol.44 No.3, (2004,5), pp.229-236
- 10) P.Jain, P.Fenyés, and R.Richter: Optimal Blank Nesting Using Simulated Annealing, Advances in Design Automation 1990, DE-Vol.23-2, (1990), pp.109-116
- 11) 白石: 組合せ最適化アルゴリズムの最新手法, 丸善, (2002.3), pp.43-72
- 12) 柳浦, 茨木: 組合せ最適化—メタ戦略を中心として—, 朝倉書店, pp.97-101
- 13) Colin R. Reeves 編, 横山他訳: モダンヒューリスティックス, 日刊工業新聞社, pp.21-56
- 14) 中前: コンピュータグラフィックス, オーム社, (1987), pp.70-71