

FiNEST アルゴリズムによる鋼板自動ネスティングの実用化

Application of Automatic Nesting to Ship Hulls Using the FiNEST Algorithm

長 島 智 樹 株式会社アイ・イー・エム エンジニアリング部
丹 羽 太 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド船舶海洋設計部 課長代理
平 野 光 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド情報化推進部 課長代理
岡 田 哲 男 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド船舶海洋設計部 課長

長方形の鋼板に対して、歩留り良く部材を配置していく作業（ネスティング）は、従来から手作業で行われている。自動ネスティングを適用している事例もあるが、部分的適用にとどまっている。筆者らは、部材の重なりから反発力を演算することと、乱雑さの指標（温度）の導入によって確率論的に部材を移動・回転させ最適配置を探索することの2点をキーポイントとする、全く新しい手法を開発した。本稿では、この概要を述べ、船舶の実際のブロックに適用した事例をとおして、本手法の有効性を説明する。

Nesting is the process used to arrange many complicated hull structure pieces from rectangular steel plates. Automation of this process has been studied for many years, but full application to the hull of ships was difficult. A newly developed method, called the FiNEST algorithm, has two important developments. The first is to calculate repulsive forces based on lapping area calculation of the pieces. The second is to search for the optimum arrangement using stochastic moves and rotations, introducing “temperature,” or a parameter to express randomness. In this paper, the algorithm is summarized, and the usefulness of this method explained through application to an actual ship hull structure.

1. 緒 言

船体構造はそれを構成する部材一つ一つを長方形の鋼板から切り出して組み立てる。その際に、切った後のスクラップを少なく（歩留り良く）、なおかつプラズマ切断機などを効率良く稼働させることができるよう鋼板に部材を配置していく作業がネスティングである。

従来からこの作業は手作業で行われており、多大の作業時間を要していた。これに対し、近年では電算プログラムによる自動ネスティングもある程度みられるようになってきた。その手法としては、経験則をプログラム化していく手法あるいは遺伝的アルゴリズムによる方法^{(1)~(3)}、焼きなまし法⁽⁴⁾による方法などがある。しかし、一般に船体構造の部材は複雑な形状であるため、歩留りとNC切断上の諸条件を同時に満足し、ネスティング後に手直しを必要としない自動ネスティング手法の開発は非常に困難であり、いまだ完全に自動化された事例はない。

このような状況で、筆者らは以下に述べる全く新しい手法による自動ネスティングアルゴリズムを開発した。一般に自然界は外乱を適切に与えることによってエネルギー準

位最小の状態に近づく。地震が起これば土中のすき間が締まり、すき間に満たされていた水分が噴出して液状化現象を引き起こす。鋼は適切な温度コントロールをすることで組織が均一化され、また内部応力が除去される。これらの現象にヒントを得て、部材が重なった状態や散らばった状態をエネルギー準位の高い状態と定義し、適切な温度コントロールすなわち部材を確率論的に自由に移動・回転させる範囲・量のコントロールをすることで、すき間がなく部材を配置するアルゴリズムを考案し、これをFiNESTアルゴリズムと名付けた。

本稿では、FiNESTアルゴリズムおよびこれを実船のネスティングに適用していくうえでのシステム開発の概要を述べ、船舶の実際のブロックに適用した事例をとおして、本手法の有効性を説明する。

2. FiNEST アルゴリズム

一般に船の建造はブロックと呼ばれる幾つかの部分ごとに進められ、ネスティング工程においてもブロック単位に処理される。ネスティング工程は事前に購入された数枚～数十枚の長方形の鋼板に、ブロックを構成する数百の部材

を板厚や材質ごとに割り振り，高い歩留りで効率良く切り出せるように配置することが求められる．

対象となる船体構造部材の形状はさまざまで，特に船体内部の構造部材は複雑な形状をもつ部材が多く，実用上満足できる歩留りで自動ネスティングを困難にしていた．また，切断工程を効率良く行うためのネスティング上の配慮も必要である．

このようなネスティングに要求されるさまざまな要件を満たすため，汎用性の高い以下のようなネスティングアルゴリズムを開発し，実用的な自動ネスティングシステムを実現した．

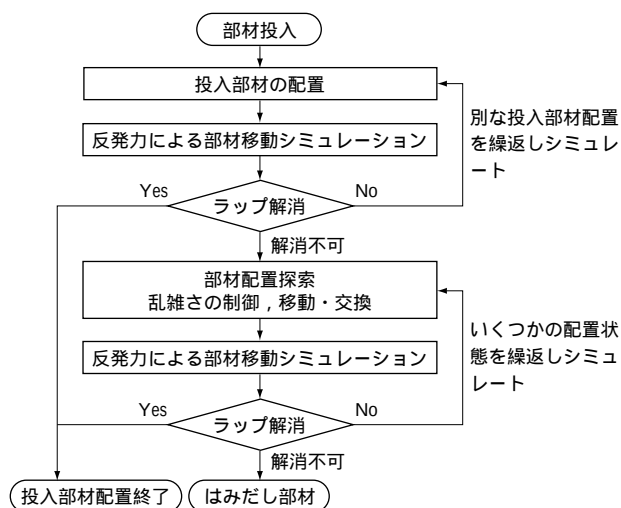
2.1 FiNEST アルゴリズム概要

鋼板上にランダムに部材を配置し，部材間の重なった部分に仮想的に適切な反発力を発生させ，重なりがなくなるように部材を移動する．同様に，鋼板からはみ出した部分についても適切な反発力を発生させ，はみ出し部分がなくなるように部材を移動する．このような反発力による部材の移動を繰り返し行い，最初のランダムな部材配置から部材の重なりや，はみ出し部分が最小となる部材配置をシミュレーションすることができる．初期の部材配置の組合せが適当で，鋼板サイズが十分であれば最終的に部材間の重なりや，はみ出しのない部材配置を得ることができる．しかし最初の部材配置が不適当であったり，また，部材が密に配置された状態では部材同士がつかえたような状態となり，部材間での重なりや鋼板からはみ出しが残る場合がある．このため，以降に説明する部材温度をパラメータとする反発係数を上げて部材配置状態を不安定にしたうえで，部材温度が高い状態にある部材の移動や交換を行い，新たな部材配置状態に遷移させてシミュレーションを重ねる．

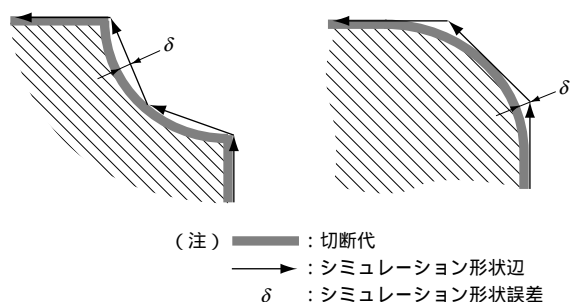
FiNEST アルゴリズムの概要フローチャートを第 1 図に示す．

2.2 シミュレーション部材形状

シミュレーションに用いる部材形状は切断代を考慮するため，開先形状に応じた切断代幅を付加する．また，計算機上での部材運動のシミュレーションを簡単にするため，部材形状に含まれる円弧やスプライン曲線を許容誤差範囲内に収まるよう直線で近似し，反時計回りのループとなるように構成する．円弧に対するシミュレーション部材形状を第 2 図に示す．ただし，鋼板形状は部材が鋼板からはみ出す部分を認識する必要があるため，部材形状とは逆に時計回りのループとなるように構成し，鋼板の外側の領域との重なりを認識する．



第 1 図 FiNEST 概要アルゴリズムのフローチャート
Fig. 1 Flowchart of the FiNEST algorithm



第 2 図 シミュレーション部材形状
Fig. 2 Piece contour shape expression for simulation

2.3 部材運動シミュレーション

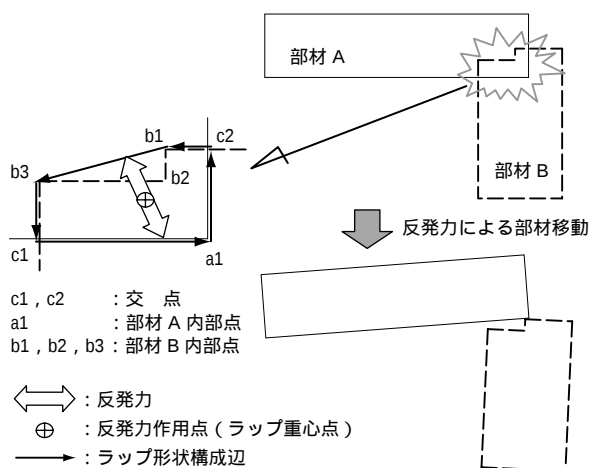
部材間の重なりと鋼板からはみ出し領域（以下，ラップと呼ぶ）を認識する．ラップに仮想的な反発力を発生させてラップがなくなるように部材を移動する．このような部材の移動を全部材に対して行い，ラップ量と以降に説明する部材温度の減少が認められなくなるまで繰り返し行う．

2.3.1 ラップ認識と反発力による部材移動

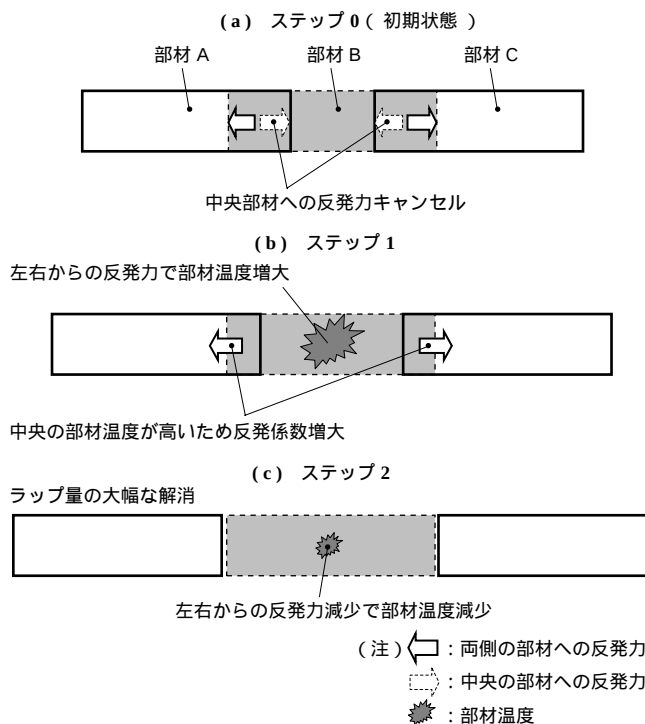
部材間の構成辺同士の交点と頂点が他方の部材に含まれる内部点であるかを判定する．これらの交点，内部点を結ぶことによってラップ領域の形状が得られる．同様に鋼板からはみ出し領域についてもラップを認識する．次にラップ重心位置に適切な反発力を発生させて部材を移動する．第 3 図にラップによる部材移動例を示す．

2.3.2 部材温度と反発係数

一つの部材に打ち消し合う方向に発生する反発力を部材に蓄えられる内部エネルギーと捕え，部材温度パラメータとして定義する．部材温度は部材間の反発係数（第 4 図）として部材移動量に反映する．部材温度パラメータ



第 3 図 ラップによる部材移動例
Fig. 3 Movement and rotation of pieces based on lapped area



第 4 図 部材温度と反発係数
Fig. 4 Piece temperature and repulsive factor

の導入効果を第 4 図に、三つの部材 A, B, C が重なり合
って配置された状態を例に説明する。真中の部材 B は両
側の部材 A, C から反発力を受けるためほとんど移動し
ない (- (a))。両側の部材 A, C はラップ量の半分程度移
動するが、ラップは半分程度残った状態となる (- (b))。
次の部材移動では真中の部材温度が上昇しているため相
対的に温度が低い両側の部材 A, C の移動量は大きくな
る。この結果、部材 A, B, C のラップ量は大幅に減少す
る (- (c))。

2.4 部材配置

2.4.1 ネスティング優先度

グレードが低く板厚が薄い鋼板から面積が大きい順にネ
スティングを行う。鋼板のグレード、板厚などの条件によ
ってネスティング対象となる部材を選択し 1 部材ずつ下記
の優先度順にネスティングを試みる。ただし、部材に指定
されるグレード、板厚が許容範囲内で下回る部材について
も優先度を落してネスティングを試みる。

特定の鋼板にネスティングされる部材は、以下の優先順
で選択される。

鋼板が明示的に指定されている。

鋼板との板厚差が少ない。

材質グレード差が少ない。

面積が大きい。

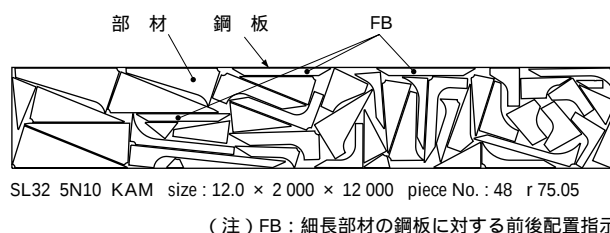
2.4.2 ペアリング処理

手作業によるネスティングでは似たような形状をもつ 2
～ 4 個の部材を組み合わせて配置する、ペアリングと呼ば
れる配置が行われことがある。ペアリングによってピアシ
ング点と呼ばれる部材切断を開始するための穴あけ数を少
なくすることができる。また、ペアリングされた部材の外周
形状が矩形に近くなるためネスティングが容易になるメリ
ットがある。本自動システムにおいても部材配置を容易に
するため、二つの部材をペアリングして配置する機能をも
っている。

2.4.3 投入部材配置

ネスティング優先度順に部材ごとに、もしくは有効なペ
アリングが可能であればペアリングしたままの状態でネス
ティングを試みる。投入する部材の配置を次のように行う。
鋼板の左端からランダムにほかの部材が配置されていない
空地を探して部材を投入する。部材運動シミュレーション
によってラップがなくなるまで何度か別の空地への部材投
入を試みる。この方法が有効である適用例を第 5 図に示す。

なお、この例では第 5 図中に FB と表示している細長い
部材が、必ず鋼板の前後方向に配置されている。これは、



第 5 図 適用例 (その 1)
Fig. 5 Application example (1)

NC 切断時、定盤から落下するのを防止するための制約である。FiNEST アルゴリズムは純粋に部材形状と素材形状から確率論的に配置を求めており、このような制約条件を部材の配置指示として、簡単に与えることができることも一つの利点である。

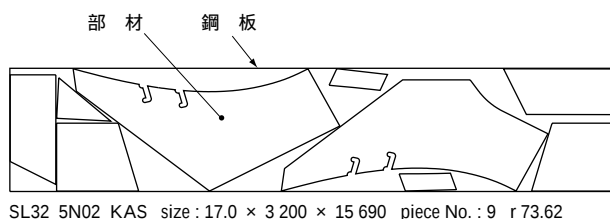
2.4.4 部材配置探索

前記の投入部材配置ではすでに幾つかの部材が配置されている状態の空地に、部材を投入してネスティングを試みる。しかし部材を投入する前の部材配置の組合わせによってはネスティングできない場合がある。このような状態はラップが解消されないため、先に述べた温度が著しく上昇する。この場合、部材温度が高い状態にある部材を確率論的に大きく移動・回転させたり、他部材との配置交換といった操作を行い、新たな部材配置の組合せで部材運動シミュレーションを何度か試みる。このような方法は部材配置の組合わせが重要な問題に有効である。第 6 図に適用例を示す。

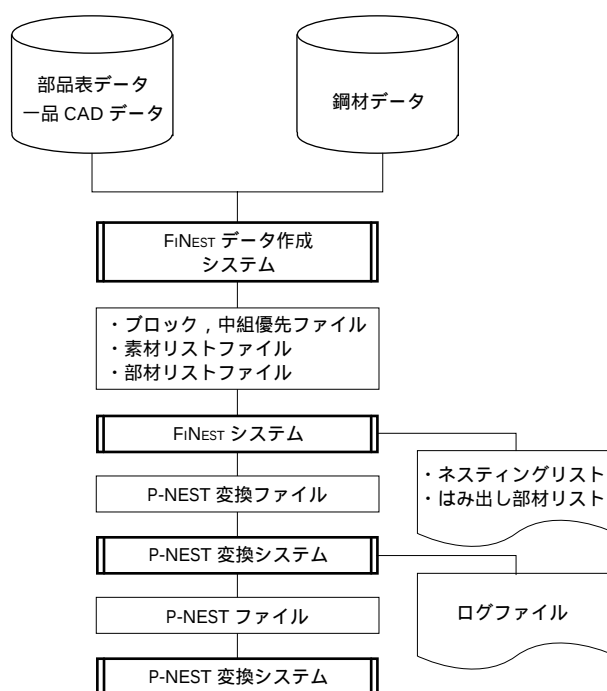
3. 実船適用のための周辺システム

実船へ適用するための FiNEST システム概要を第 7 図に示す。FiNEST データ作成システムは鋼材データと、部品表データから、ネスティング対象部材を取り出し、FiNEST システム用のデータを作成する。この際に、指定した部材を特定の鋼板に強制的に割り当てる（指名手配）など、効率的に実船適用していくための追加機能をもっている。第 8 図に FiNEST データ作成システムにおけるデータ作成メニュー画面を示す。

P-NEST 変換システムは上記で作成したデータを P-NEST 用のフォーマットに変換するシステムである。P-NEST とは、株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッドにおいて開発された対話型ネスティング用プログラムである。P-NEST システム は手動でネスティングの修正を行うことができ、カットパスを定義し NC データを作成する。



第 6 図 適用例（その 2）
Fig. 6 Application example (2)



第 7 図 FiNEST システム概要
Fig. 7 Outline of FiNEST system flow



第 8 図 FiNEST データ作成メニュー画面
Fig. 8 FiNEST data preparation menu

4. 実船適用例

4.1 実船適用ブロック

7 500 TEU 積み大型コンテナ船の機関室ブロックである 4D32 ブロックで、FiNEST システムによる自動ネスティング（以下、FiNEST と呼ぶ）を実行した例について述べる。対象部材は内構材に限定して行い、素材鋼板枚数は 20 枚である。

第 1 表に板厚の小さい素材順に FiNEST と手作業によるネスティングの歩留り率対比結果を示す。両者を比較する

第 1 表 各板の歩留り率対比表 (4D32)
Table 1 Scrap ratio comparison of each plate (4D32)

符 号	板 番	材 質	板 厚 (mm)	幅 (mm)	長 さ (mm)	歩留り (%)	
						Fi NEST	手作業 ネスティング
1	9G17	GAM	9.0	1 270	4 880	87.3	87.3
2	9G06	GAM	11.0	3 470	12 000	87.6	82.6
3	9G07	GAM	11.0	3 470	10 900	89.7	87.4
4	9G26	GAM	11.0	2 820	7 950	84.9	79.4
5	9G15	GAM	11.5	2 420	10 450	80.5	86.6
6	9G05	GAM	12.0	3 300	14 200	90.1	91.3
7	9G25	GAM	12.0	2 660	11 600	86.3	81.7
8	9G16	G2A	12.0	3 670	7 000	91.5	84.3
9	9G23	GAS	13.0	3 500	10 800	88.9	83.8
10	9G04	GAS	13.0	2 530	10 500	74.3	71.4
11	9G24	GAS	13.0	2 600	7 950	98.3	98.3
12	9G21	GAS	14.0	3 500	13 250	92.1	90.2
13	9G14	GAS	14.0	3 000	12 100	90.0	86.4
14	9G22	GAS	14.0	3 500	9 500	92.1	90.0
15	9G03	GAS	14.0	2 000	12 600	59.1	68.5
16	9G02	G2A	14.0	1 850	6 000	67.9	74.3
17	9G01	GAS	16.0	2 670	13 700	83.2	82.5
18	9G13	GAS	16.0	1 900	7 800	71.8	79.9
19	9G12	G2A	19.0	1 300	3 530	48.0	48.0
20	9G11	GAS	30.0	1 000	3 000	35.7	35.7

と、FiNEST の結果は手作業によるネスティング結果よりも引当部材が多く、歩留りが良くなっていることを確認できた。はみ出し部材（鋼板に入らなかった部材）については、手作業ネスティングでは全 410 部材中 11 部材に及び、保管材を多用したのに対して FiNEST では 3 部材であった。結果として、FiNEST を適用することによって歩留りが 1.5% 向上した。ブロックによって素材枚数は数枚から数十枚に及ぶが、一度に処理する素材枚数が多い程、歩留りの向上につながりやすい。

4.2 FiNEST の結果

第 9 図に 4D32 の 20 枚すべての FiNEST の結果を示す。今回、長さが 3 000 mm 以上の部材については、特定の素材に指名手配して FiNEST を実行した。

FiNEST の結果、第 9 図 - (a) では矩形の部材が規則正しくネスティングされている。 - (b) では指名手配した 3 部材 (A , B , C) が、素材幅ぎりぎりにネスティングされている。ほかの素材についても、今回、指名手配した部材は、はみ出しがなくネスティングされたことを確認できた。

FiNEST では素材の板厚が小さい板から引当てられるが、5 番目の素材板 (- (e)) では手作業ネスティングに比べ

て歩留りが悪くなっている。これは、FiNEST の性能が良いため、手作業では - (e) の素材板に引当てた板厚 11.0 mm の部材が、 - (b) ~ - (d) の素材板でネスティングできて、 - (e) に残された部材数が少なくなったためである。手作業ネスティングでは、板厚 11.0 mm の小さいブラケット 5 枚が - (e) までの板に入りきらず、板厚 12.0 mm の素材に引当てている。しかし、FiNEST では - (e) までですべてネスティングできている。

- (f) , - (g) , - (h) は、板厚 12.0 mm の部材が多く用意されているので、歩留り率が再び上がり、手作業によるネスティング結果よりも良い傾向となっている。

- (i) のア - 字型の部材 D は、一般的に開口部にブリッジを設ける。今回は、事前の一品処理でブリッジ処理をしていなので、開口部にも部材がネスティングされている。

- (j) の FiNEST の結果では、指名手配部材を含めて大きい部材と小さい部材がランダムにネスティングされ、手作業によるネスティング結果よりも歩留り率が高い。第 10 図に示す手作業によるネスティング結果と比較すると、FiNEST の結果では、余す所なくネスティングされている。手作業の結果では、規則正しくネスティングすることに重点が置かれ、ランダムにすき間なく配置する方が歩留りが高い傾向にあることを意味している。

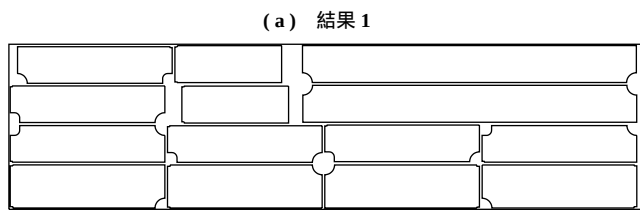
第 9 図 - (l) ~ - (p) の板厚 14.0 mm の素材は、再び最初の方ですき間がなく多数の部材がネスティングされたことから、 - (o) , - (p) では引当てる部材が少なくなり、歩留り率が悪くなっている。

- (s) , - (t) は、発注できる最低の板サイズが、幅方向で 1 000 mm , 長さ方向で 3 000 mm であるのに対して、引当てるべき部材数が少ないことから歩留り率が悪い。FiNEST と手作業ネスティングでは、同じ部材が引当てられ、歩留り率は同じ結果となっている。 - (t) の結果では、左側に部材がネスティングされていることで、右側の余っている素材が今後、保管材として有効利用できる。

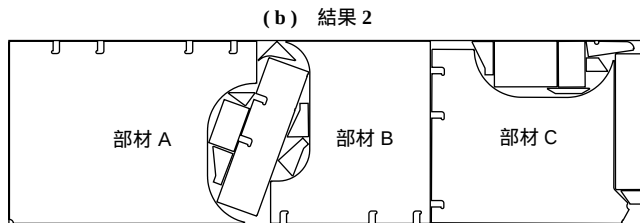
4.3 今後の課題

FiNEST を実行した結果、今後の課題は以下である。

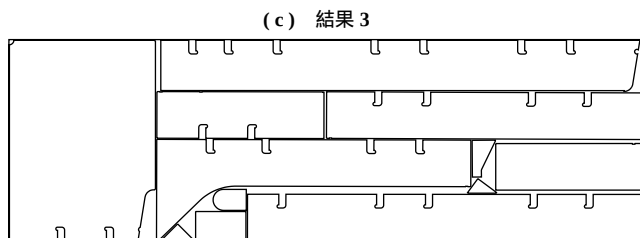
- (1) 現在、フラットバ - のような成品類については、材料の予量時に板切りとして考慮していない。FiNEST は 4.2 節のとおり、部材を可能な限り詰め込む結果、同一板厚の最後の素材ですき間ができる傾向にある。この性能の良さを活かして成品を FiNEST 時に挿入することで、歩留り率のさらなる向上が期待できる。
- (2) 手作業によるネスティングでは、切断加工能率向



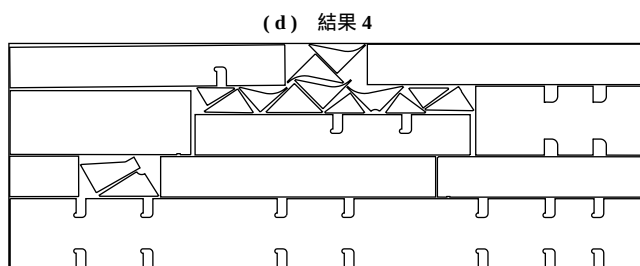
4D32 9G17 GAM size : 9.0 × 1 270 × 4 880 piece No. : 14 r 87.29



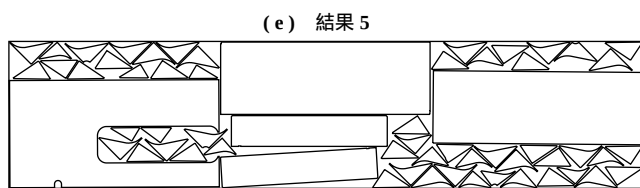
4D32 9G06 GAM size : 11.0 × 3 470 × 12 000 piece No. : 18 r 87.64



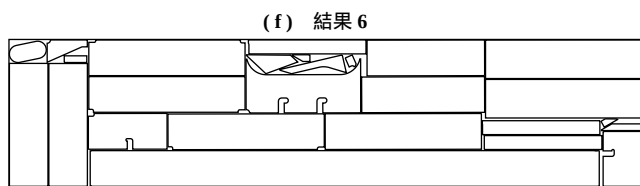
4D32 9G07 GAM size : 11.0 × 3 470 × 10 900 piece No. : 12 r 89.73



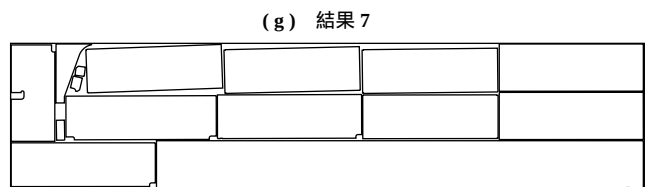
4D32 9G26 GAM size : 11.0 × 2 820 × 7 950 piece No. : 23 r 84.86



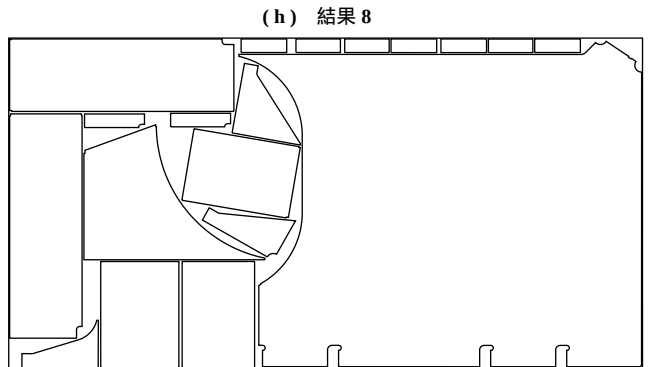
4D32 9G15 GAM size : 11.5 × 2 420 × 10 450 piece No. : 60 r 80.54



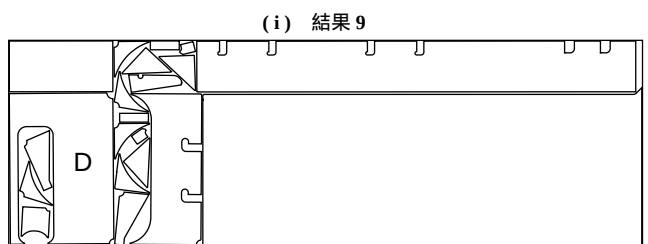
4D32 9G05 GAM size : 12.0 × 3 300 × 14 200 piece No. : 26 r 90.08



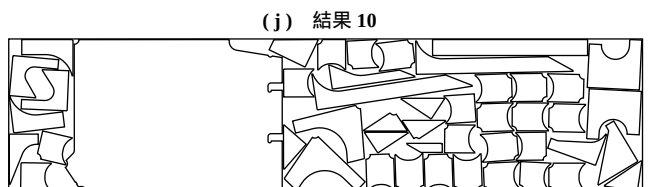
4D32 9G25 GAM size : 12.0 × 2 660 × 11 600 piece No. : 15 r 86.32



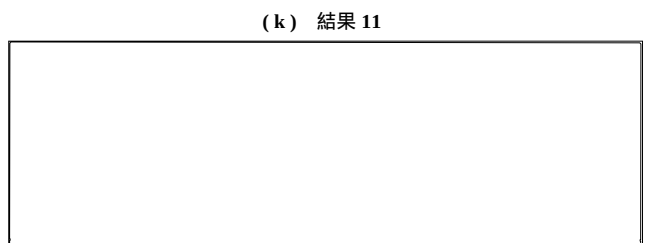
4D32 9G16 G2A size : 12.0 × 3 670 × 7 000 piece No. : 19 r 91.46



4D32 9G23 GAS size : 13.0 × 3 500 × 10 800 piece No. : 21 r 88.92

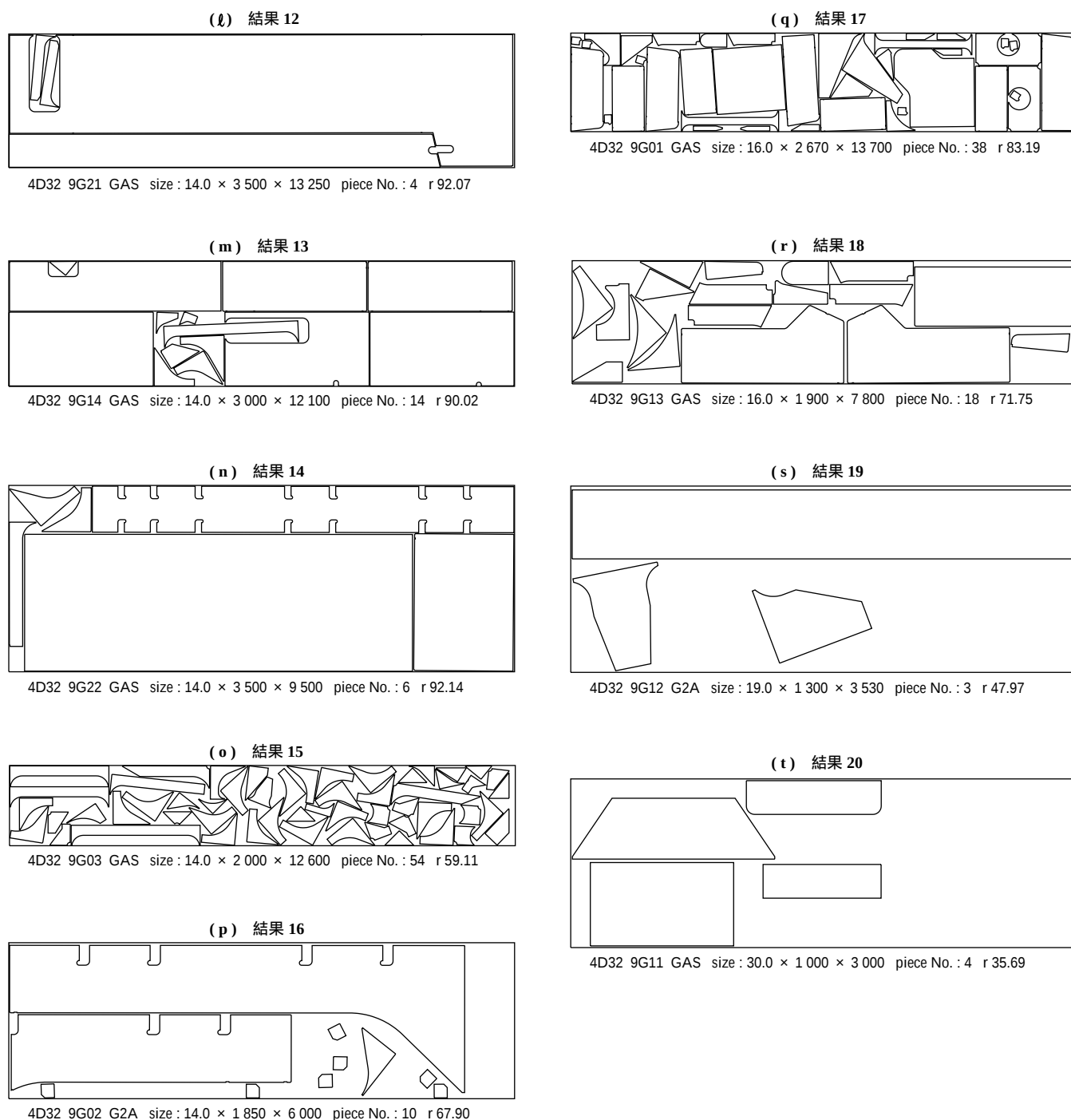


4D32 9G04 GAS size : 13.0 × 2 530 × 10 500 piece No. : 47 r 74.25



4D32 9G24 GAS size : 13.0 × 2 600 × 7 950 piece No. : 1 r 98.25

第 9 図 FiNEST 結果図 -1 (4D32)
Fig. 9 Results of FiNEST application -1 (4D32)

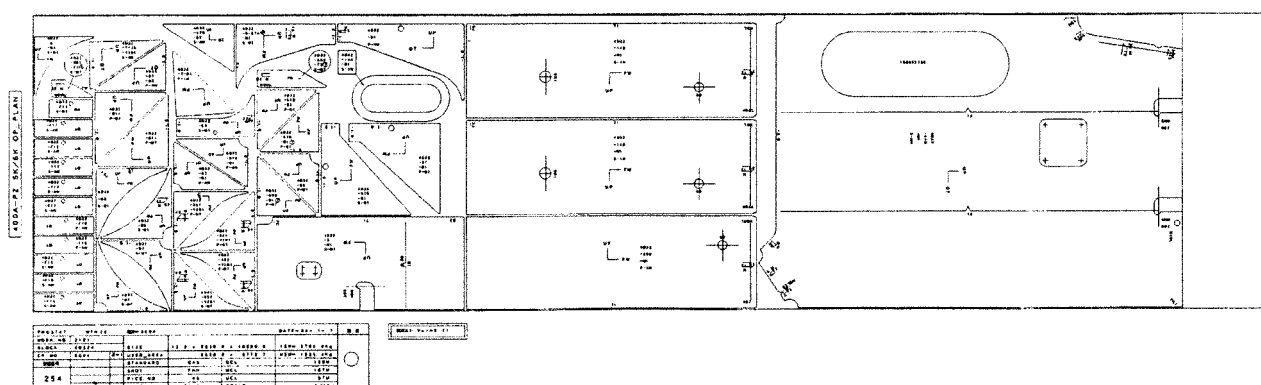


第 9 図 FiNEST 結果図 -2 (4D32)
Fig. 9 Results of FiNEST Application -2 (4D32)

上のため、さまざまな条件に配慮している。たとえば FiNEST の結果では、すき間がなく大きい部材と小さい部材がランダムにネスティングされる。一方、手作業によるネスティングでは加工の切断順序を考慮して、小さい部材を原点側（左下）に配置し大きい部材を最後に切断するようなネスティングをしている。また、手作業によるネスティングでは、多部材が一筆書き切断できるように規則的に部材を並べる場合がある。今

後、運用面で P - NEST 変換後のネスティング修正をいかに少なくするか、カットパスの最適化などが課題である。

(3) ア - チ型のブリッジ、切り止め処置など、カットパス時で考慮すべき細かい決めごとがある。例えば、FiNEST 実行前に一品処理でブリッジを入れておくなど、FiNEST 処理による運用面のルールの整備が必須となる。



第 10 図 手作業によるネスティング結果 (4D32 9G04)
Fig. 10 Results of manual nesting (4D32 9G04)

5. 結 言

本稿では、確率論的手法による自動ネスティング手法として新たに考案した FiNEST アルゴリズムについて概要を述べ、実船のブロックに適用した事例をとおしてその有効性を説明した。歩留りに関しては、人間では思いもよらない配置が実現でき、全般的には人手による手法よりも良い傾向にある。また、本手法によってネスティング作業時間を大幅に削減できる。

このように、実用化に十分耐え得る自動ネスティングシステムを開発できたことは、大きな成果である。今後、実船への適用を積み重ねながら、さらに効率・品質の良い自動ネスティングシステムに向けて検討を進めていく所存である。

参考文献

- (1) Berthold Kroeger, Peter Schwenderling and

Oliver Vomberger : Parallel Genetic Packing of Rectangles Proc. of Parallel Problem Solving from Nature 1st Workshop (1991) pp.160 - 164

- (2) 藤田喜久雄, 赤木新介, 廣川敬康: 遺伝的アルゴリズムと数理計画法とのハイブリッド化による板取り問題の一解法 日本機械学会 No.920-103 第2回設計工学・システム部門講演会 1992 年 12 月 pp.115 - 120
- (3) 山内重樹, 手塚研治: 遺伝的アルゴリズムを用いた自動ネスティングシステムの開発と実用化 日本造船学会論文集 第 178 号 1995 年 11 月 pp.707 - 712
- (4) P. Jain, P. Fenyese and R. Richter : Optimal Blank Nesting Using Simulated Annealing Advances in Design Automation -1990- DE-Vol.23-2 (1990) ASME pp.109 - 116