

Title	矩形双対グラフを用いた最適区画配置手法に関する研究
Author(s)	藤田, 喜久雄; 赤木, 新介; 島崎, 定雄
Citation	日本機械学会論文集 C編. 60(579) P.3662-P.3669
Issue Date	1994-11
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/3013
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

矩形双対グラフを用いた最適区画配置手法に関する研究*

藤田 喜久雄[†], 赤木 新介[†], 島崎 定雄[‡]

Optimal Space Partitioning Method Based on Rectangular Duals of Planar Graphs

Kikuo FUJITA, Shinsuke AKAGI and Sadao SHIMAZAKI

The layout problem, in which a region should be partitioned into plural subregions of layout components so as to satisfy neighboring relationships between them and the size conditions for the whole region and respective subregions, occurs in several layout designs. It is difficult and computationally hard to find optimal solutions for them. In this paper, we propose an optimal space partitioning method based on rectangular duals of planer graphs, which is used for dealing with the topological structure of the arrangement of subregions. In the method, such a structure is optimized through a simulated annealing algorithm, and the layout structure represented with a rectangular dual graph is transformed into an embodiment layout by using the generalized reduced gradient method, one of the numerical optimization techniques for constrained nonlinear optimization problems. Finally, we show an example of an access control room layout in a power plant design for checking the effectiveness and validity of the proposed method.

Key Words : Optimal Space Partition, Rectangular Dual, Simulated Annealing, Optimization, Design Engineering, Layout Design

1 緒言

ある一定の広さを有する領域を複数の区画に分割し、その際に、区画間における特定の隣接関係を満足させるとともに、個々の区画のサイズについての条件をも満足させる必要のある区画配置問題は、プラント配置設計や建築設計などの分野において見られる問題である。しかし、このような問題においては、上記のような条件を同時に考慮する必要があることや、位置関係についての位相的な組合せ条件を数多く内在していることから、最適な配置を求めることが困難な問題であるとされている。

本研究では、区画配置問題における位相的な隣接関係を表現するための方法として Kozminski らによる矩形双対グラフ (rectangular dual)⁽¹⁾⁽²⁾ に対して田宮が拡張を行なった方法⁽³⁾を導入した上で、そのような位相構造を操作するための方法としてシミュレーテッドアニーリング法 (Simulated Annealing, SA)⁽⁴⁾⁽⁵⁾を、また、

位相構造から具体的な配置を求めるための方法として制約条件付き非線形最適化アルゴリズムである一般縮小勾配法⁽⁶⁾を用いることにより、上記のような配置問題において準最適な配置解を求めるための手法を提案する。さらに、発電プラントにおけるある施設内の区画配置設計に適用して、その妥当性を検証する。

なお、このような配置における位相的な組合せ条件と具体的な配置情報とを階層的に取り扱い、ハイブリッド化解法を適用するという考え方は、著者らによるプラントの機器配置手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾や最適板取り手法⁽⁹⁾とも通じるものである。

2 配置設計とその支援手法

2.1 区画配置設計問題の構成と特徴 緒言でも述べたように、本研究で取り上げる区画配置問題は特定の領域を複数個の区画に分割する問題であり、その特徴とするところは以下の通りである。

- 全体の領域のサイズは、その形状とともに固定されている。
- 各区画のサイズについては、最小面積が与えられ

*原稿受付 1994 年 2 月 17 日。

[†]正員, 大阪大学工学部 (〒 565 吹田市山田丘 2-1)。

[‡]学生員, 大阪大学大学院工学研究科。

ており、その形状(縦横比)は極端に歪んだものでない限り、任意である。

- 特定の区画の間には、領域内のアクティビティに対応する満足すべき隣接関係が存在する。以下では、このような満足すべき隣接関係を特に「隣接条件」と呼んで、単に区画が相互に隣接している状態とは区別するようにする。

このような問題は、様々な配置問題と同様、配置の位相構造に関する組合せ条件を数多く含んだ複雑な問題であり、加えて、各区画の形状に任意性があるため、VLSI設計などにおける配置問題に比べてその取り扱いが困難となる。

そこで、本研究では組合せ条件に関する内容を矩形双対グラフをもとに表現する一方、組合せ最適化の問題を有効に解くことのできるSA法によりそのような構造を操作し、また、上述の面積に関する内容を扱うために非線形最適化アルゴリズムである一般縮小勾配法を融合化して、準最適配置を求めることができるようにする。

2.2 シミュレーテッドアニーリング法 シミュレーテッドアニーリング法(Simulated Annealing, SA)⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、金属の焼きなまし過程を模擬した、従来からの数理計画法で取り扱うことが困難であるような最適化の問題を近似的に解くための手法である。その内容は、ある解を仮定した上で、その解の近傍解を次々に求めつつ、それによって得られる解により評価値が改善される場合には、その近傍解を新しい解として受け入れ、改善されない場合においてもある確率で受け入れていき、以上の過程における受け入れ確率を金属の焼きなまし過程の温度に対応したパラメータを介して徐々に低下させていくことによって、最終的に、大域的に最適解を近似的に求めようとするものである。

SA法は、巡回セールスマン問題⁽⁴⁾やVLSIの配置問題⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽³⁾への適用をはじめ、多段減速機の歯数を決定する問題⁽¹¹⁾や板取り問題⁽¹²⁾、3次元的なコンポーネントの配置問題⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾などにも適用されており、組合せ条件を内在した様々な問題に対して有効であることが示されつつある。しかし、上述のような最適化過程において、解の受け入れ確率をどのように制御していくかはもちろんのこと、ある解に対してその近傍解をどのように定義するかが、個々の問題に対してSA法を有効に適用していく上で重要であるとされており、各試みにおいても、個々の問題の性質に応じた適切な問題の表現方法と、近傍解の定義方法が用いられている。したがって、本研究で取り上げる区画配置問題において

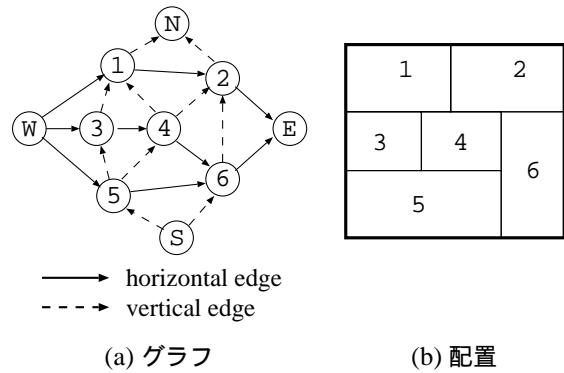


図1 矩形双対グラフの例

も、望ましい表現方法を用いる必要があると考えられる。

2.3 グラフ表現を用いた配置設計手法 矩形双対グラフは、矩形領域の配置問題において各配置要素間の隣接関係を効率的に扱うために導入された方法であり、配置における隣接関係を4連結三角化無向平面グラフ(4-connected triangulated plane graph)を用いて表現した上で、そのようなグラフと具体的な配置とを相互に変換することによって、隣接関係をグラフ上で位相的に操作しようとするものである。このような表現方法に対して、Kozminskiらは、そのようなグラフの性質と領域分割のアルゴリズムを示している⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、田宮は、上記のグラフを有向グラフへと拡張することによって、マクロセル配置問題をSA法で解く際の配置変更方法(後出、図1・図2を参照)を提案している⁽³⁾。

以上のようなグラフによる方法は、配置における隣接関係を直接的に操作できることから、2.1項で示したような特徴を有する配置問題においても、有効な表現方法であると考えられる。一方では、マクロセル配置などの配置問題では各区画の形状寸法があらかじめ与えられていたり、隣接条件が明確には規定されていなかったりするなどの点で、性質を異にする部分も多く、本研究では、以下の節で述べるように、グラフから配置を求める過程で最適化アルゴリズムを用いたり、隣接条件を満足する配置を求めるためのアルゴリズムを付加するなどの点で、独自の拡張や変更を行なう。

3 矩形双対グラフと区画配置の表現

3.1 矩形双対グラフによる配置表現 本手法で用いる矩形双対グラフの表現方法⁽³⁾を図1に示す。図中(a)はある配置の位相構造についてのグラフ表現であり、(b)はその具体的な配置の例である。図(a)中の各

ノードは、配置すべき区画(図中 1, 2, 3, …)と全体の配置領域に対する各東西南北方向の無限遠平面(図中 E, W, S, N)を表現しており、それらの間の隣接関係が2種類のエッジを用いて表現されている。‘→’なる水平エッジはそれによって接続されているノードが西から東の順で隣接していることを、‘---’なる垂直エッジは各ノードが南から北の順で隣接していることを表現している。

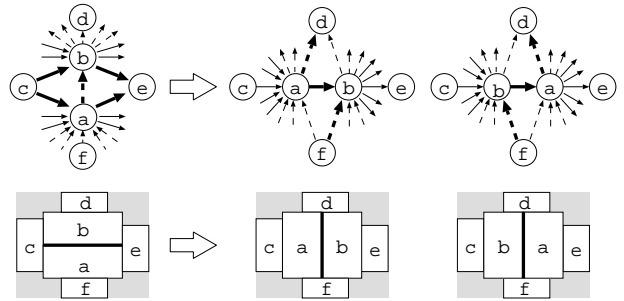
以上のような矩形双対グラフの特徴は、以下のよう
にまとめられる⁽³⁾。

- 配置における各区画は相互に重なり合うことがなく、また、それらに間に隙間を生じることもない。
- 配置の外形は長方形となる。
- 矩形双対グラフにおいてエッジで結ばれているノードの対は、配置において必ず隣接する。

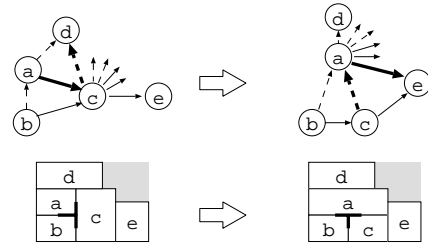
これらの点を、2.1項に示した区画配置の特徴に照らし合わせてみた場合、全体の領域を隙間を生じることなく分割できる点や、区画間の隣接条件をグラフ上におけるノード間のエッジの存在条件に置き換えて取り扱うことができることから、図1に示したような矩形双対グラフによる表現は、区画配置を処理するための方法として、有効であると考えられる。

3.2 矩形双対グラフの位相構造変換 図1に示したようなグラフに対してSAの過程で逐次的な変更を加えていくためには、上述のように、あるグラフに対してその近傍を求めるための変換操作を定める必要がある。図2は田宮⁽³⁾によるそのような変換のタイプを示したものであり、矩形双対グラフにおける矩形領域の隣接性を局部的に変更する変換である。図中、タイプ1は、水平(垂直)方向に隣接した2つの矩形領域を90度回転し垂直(水平)方向に隣接させる変換である。タイプ2は、3つの矩形領域に囲まれたT字の方向を変える変換である。タイプ3は、4つの矩形領域からなる領域における中心部分の接続形態を変更する変換である。なお、これらの各タイプの変換について、それぞれ、2個、8個、4個の類似形が存在する。

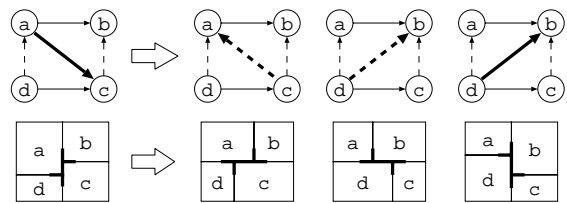
後述のSAの過程では、図2に示した変換に従って、図中の左側のグラフと同様な矩形双対グラフのサブグラフを見つけ、そのサブグラフに対して、それぞれの変換を適用することにより、その近傍の配置を見つけ出すようにする。なお、このような変換を有限回繰り返して行なうことにより、ノード数の等しい全ての矩形双対グラフは相互変換可能であることが示されており⁽³⁾、これにより最適な配置となる区画の位相構造をSA法により求めることが可能となる。



(a) タイプ1の変換



(b) タイプ2の変換



(c) タイプ3の変換

図2 矩形双対グラフの変換

3.3 一般縮小勾配法による配置の具体化 一方、上記のような変換を通じて定義される位相関係から図1(b)に示すような配置を具体化する方法については、以下のように制約条件付き非線形最適化問題として定式化を行ない、それを一般縮小勾配法(Generalized Reduced Gradient Method, GRG法)⁽⁶⁾によって解くようにする。

3.3.1 設計変数 図3に示すような座標系を設定した上で、各区画 i , ($i = 1, \dots, N$)について、それぞれ、位置と寸法についての4つの設計変数 x_i^+ , x_i^- , y_i^+ , y_i^- を導入する。

3.3.2 制約条件 以下の2種類の制約条件を考慮する。

- 矩形双対グラフによる位相構造に従って、対応する区画が隣接するようにし、さらに隣接部で共有される部分の長さがある一定の長さ以上にする。例えば、図4のように区画 i の東側に区画 j が隣

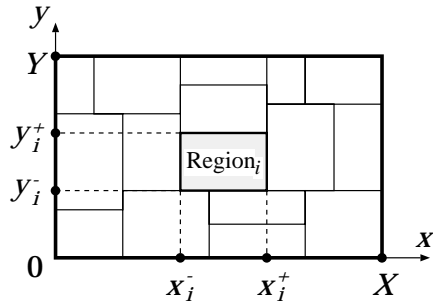


図3 座標系と設計変数

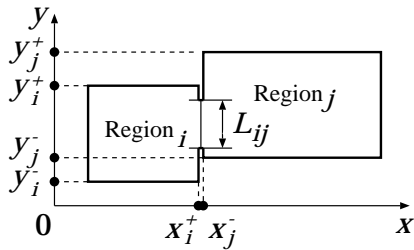


図4 隣接する区画間についての制約条件

接している場合には、以下の条件式を定める。

$$\left. \begin{aligned} x_i^+ &= x_j^- \\ y_i^+ - y_j^- &\geq L_{ij} \\ y_j^+ - y_i^- &\geq L_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 L_{ij} は区画 i と区画 j の隣接部の最小寸法であり、それらの区画の間に隣接条件が指定されている場合には、対応するアクティビティに必要な通路の幅を L_{ij} とし、そうでない場合には $L_{ij} = 0$ とする。

- 各区画に対してその必要最小面積を確保する。
例えば、区画 i については以下のように定める。

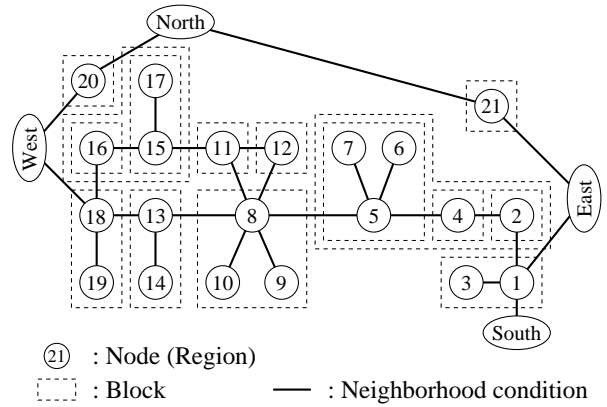
$$\left. \begin{aligned} (x_i^+ - x_i^-)(y_i^+ - y_i^-) &\geq S_i \\ x_i^+ - x_i^- &\geq L_i \\ y_i^+ - y_i^- &\geq L_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 S_i は区画 i の必要最小面積、 L_i は区画 i の一辺の最小長さである。

3.3.3 目的関数 目的関数は、配置を行なうべき全体領域のサイズ、 $X_S \times Y_S$ に対して、図3の位置変数 X, Y をもとに以下のように定める。

$$(X - X_S)^2 + (Y - Y_S)^2 \rightarrow Min. \quad (3)$$

以上のような定式化は、制約条件付き非線形最適化問題であり、一般縮小勾配法を用いてそれを解くことにより、図1(a)のようなグラフから(b)のような配置を求めることができるようになる。



②1 : Node (Region)
⋯ : Block — : Neighborhood condition

図5 グラフのブロック化の一例

4 最適区画配置設計手法

本節では、上述の矩形双対グラフによる表現⁽³⁾と一般縮小勾配法⁽⁶⁾による配置の具体化に基づいたSA法⁽⁴⁾⁽⁵⁾による最適区画配置手法について述べる。その概要は、まず、与条件として規定された隣接条件を満足するグラフを導出し、それを初期解としてSA法を適用していくことにより、準最適な配置解を求めようとするものである。以下にその詳細を示す。

4.1 初期可能解の導出 本研究で扱う問題においては、前述のように特定の区間を互いに隣接させる必要があり、そのような関係を矩形双対グラフ中のエッジに対応させる。一方、後述のSA法による最適化過程では、規定された隣接関係を満足するグラフに限定して、最適化操作を繰り返していくようにする。このため、SA法における初期解としては、与えられた隣接条件のすべてを満足する矩形双対グラフを求めておく必要がある。

そこで、グラフにおいて与えられた隣接条件のうち満足されていない条件の数を評価関数とした降下法のアルゴリズムを用いて、そのような初期解を導出する。すなわち、任意に生成した矩形双対グラフに対して、図2に示した位相構造変換を適用しつつ、上記の評価関数が改善される場合には解を受け入れ、そうでない場合には受け入れないことにより、逐次的にすべての隣接関係を満足するグラフを求めるようにする。このとき、初期解を容易に得られるように、配置すべき区画群を隣接条件に基づいてブロック化した上で、ブロック間のグラフと各ブロック内のグラフのそれぞれに対して、降下法のアルゴリズムを適用する。以上の方法の詳細を、以下に示す。

- (1) 配置すべき区画の隣接条件や各区画の内容をもとに、グラフ上の枝の部分に幹を含めたり、連続

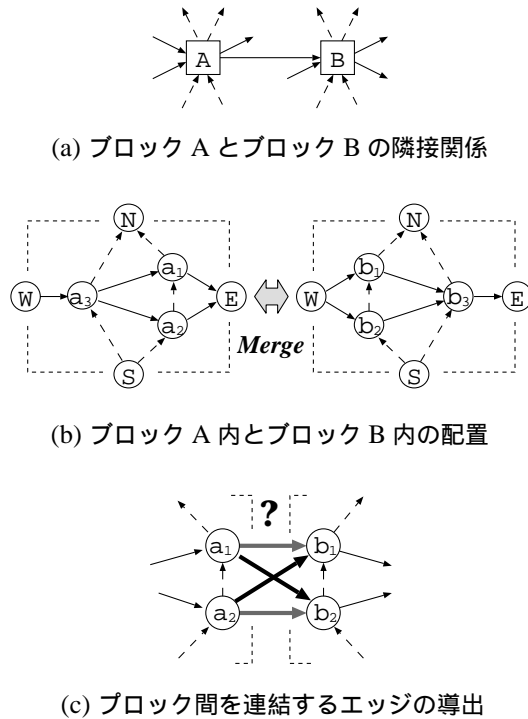


図 6 ブロック配置の統合化

した幹の部分をもとめたりすることにより、複数の区画をブロック化し、それによってブロック間のグラフを定義する。なお、図 5 は 5 節で取り上げる事例におけるグラフのブロック化を示したものである。

- (2) 与えられた区画間の隣接条件をもとにブロック間で満足されるべき隣接関係を定義し、そのような隣接関係を満足するブロック間の矩形双対グラフを降下法により求める。
- (3) 以上のようにして定めたブロック間の隣接関係により規定される各ブロック内のエッジの方向性を満足するように、各ブロック内の区画配置を降下法により求める。
- (4) 各ブロック内の配置を全体としてまとめた場合に、すべての隣接条件を満足させることができれば、その配置を SA 法における初期可能解として、アルゴリズムを終了する。満足させることができない場合は、ステップ (5) へ行く。
- (5) 現在のブロック間のグラフに対して図 2 に示した位相構造変換を任意に適用することにより、それとは異なる別のブロック間のグラフを求めて、ステップ (3) へ行く。

このうち、(4) の各ブロック内の配置を全体としてまとめる処理については、図 6 にも示すような処理を繰り返して行なうことにより行なう。すなわち、例え

ば、(a) のようにブロック A とブロック B が西から東への関係で隣接しており、さらに、それぞれにブロック内の配置が (b) のように求まっている場合には、ブロック A 内のノード a_1 と a_2 、ブロック B 内のノード b_1 と b_2 、の双方のノード間におけるエッジの連結として (c) に示すような可能性を想定でき、本来の矩形双対グラフの平面性を満足しつつ、ノード間の隣接条件をできるだけ多く満足できるように、相矛盾するエッジのうちのいずれかを除去していくようにする。以上のような処理を行なっていくことにより、(2) と (3) の処理によって与えられた各配置を統合化することができるようになる。

4.2 SA 法による位相構造の最適化 前節のようにして求まる初期可能解に対して、以下のような SA 法⁽⁴⁾⁽⁵⁾のアルゴリズム (図 7) を構成し、最適な区画配置を求めるようにする。

- (1) あらかじめ規定された隣接条件の全てを満足する矩形双対グラフを任意に生成し、この解により定まる配置の評価値を、例えば、後出の式 (4) により求めて、 C とする。
- (2) 初期温度を T とする。
- (3) 現在の解に対して 3.2 項で示した位相構造変換を適用することにより得られる解の中から要素間の隣接条件を満足しないものを除き、さらに残ったものの中からランダムに一つを選択して、候補解とする。この候補解に対して 3.3 項で示した方法により実配置を求め、その評価値を、例えば、後出の式 (4) により計算して、 \tilde{C} とする。
- (4) $\Delta f = \tilde{C} - C$ とし、 $\Delta f < 0$ の場合、候補解を新しい解として受容し、 \tilde{C} を新たな C とする。 $\Delta f \geq 0$ の場合についても、確率 $p = \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right)$ で候補解を新しい解として受容する。
- (5) 以上の操作を規定回数、繰り返した場合には、ステップ (6) へ行く。それ以外の場合は、ステップ (3) へ行く。
- (6) 温度 T に温度更新係数 α を乗じて温度を下げる。
- (7) 解が収束したと判断された場合には、終了する。それ以外の場合はステップ (3) へ行く。

以上のようにして、逐次的に配置を改善していくことにより望ましい配置が得られることが期待できる。

4.3 区画配置の評価 上記の過程で用いる評価値については、個別の問題に依存するが、次節で示す

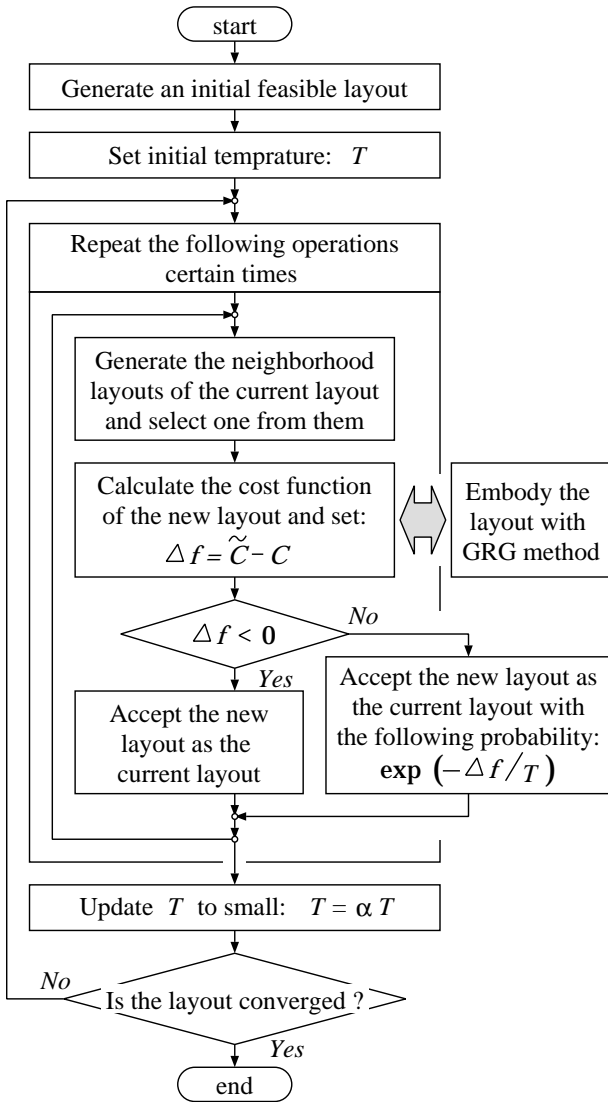


図7 SA法による位相構造の最適化

事例においては、以下に示す関数により定める。

$$C = w_1 \sum_{i=1}^N surplus_i + w_2 \sum_{i=1}^N ratio_i \quad (4)$$

ここで、 $surplus_i$ と $ratio_i$ は、それぞれ、各区画の余剰面積と縦横比に関する評価関数であり、 w_1 と w_2 は各項についての重み付けの係数 ($w_1, w_2 > 0$) である。

余剰面積は必要最小面積を超過した面積であり、その評価関数は区画 i に対して、具体的な配置における面積を S_i 、配置条件として定められる必要最小面積を \hat{S}_i として、次式により定義する。

$$surplus_i = \begin{cases} S_i - \hat{S}_i & \dots S_i > \hat{S}_i \\ 0 & \dots S_i \leq \hat{S}_i \end{cases} \quad (5)$$

一方、縦横比 $R_i (\geq 1)$ の評価関数については、次式

により定義する。

$$ratio_i = \begin{cases} (R_i - \hat{R}_i)^2 & \dots R_i > \hat{R}_i \\ 0 & \dots R_i \leq \hat{R}_i \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{R}_i = R_{min} \times \left(\frac{\hat{S}_i}{S_{min}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (7)$$

ここで、 R_{min} は必要最小面積が最小となる区画の縦横比の最大許容目標値、 S_{min} はそのような区画の必要最小面積である。 β は R_{min} の値をもとに必要最小面積の大きな各区画の縦横比の最大許容目標値を設定するための係数 ($1 \leq \beta \leq \infty$) であり、 \hat{S}_i の大小関係に依存するが、 $\beta = 1$ の場合には、縦横比を評価するのではなく、すべての区画に対して短辺の長さがある一定値以上に定めようとする事になり、一方、 $\beta = \infty$ の場合には \hat{R}_i をすべて R_{min} に等しくできることから、両者の間の適切な値をとることにより、面積の小さい区画ほど正方形に近い形状とする一方、比較的面積の大きい区画についてはある程度長細い形状になることを許容するようなバランスのとれた配置が得られるようになることが期待できる。

4.4 配置手法の実装方法 次に、以上のような配置手法をコンピュータ上に実装する方法について述べる。本手法における処理は、大きく、配置の位相構造についてのグラフを扱う部分と、そのようなグラフから実際の配置を求める部分とから成り立っており、前者は、グラフ表現中のパターンを変換するところに、後者は数値的な計算を主体とするところに、それぞれ特徴がある。このような内容を各プログラミング言語の特徴と照らし合わせた結果、前者については記号処理に優れた Lisp 言語を、後者については C 言語を用い、UNIX オペレーティングシステムにおけるソケット通信の機能⁽¹⁵⁾を用いて両者の間のデータのやり取りを行なうことにより、最適配置システムを構築した。なお、具体的なシステムの構築・実行に当っては、Sun SPARC Station (SunOS 4.1.1) を用いた。

5 適用事例

最後に、本手法をある発電プラントにおける出入り管理設備の配置問題に適用した事例を示す。このような施設の配置では、作業員がある定められた順序で各区画を通過していくため、そのようなアクティビティに対応した区画間に隣接関係を実現するとともに、それぞれの区画に対して必要な面積を確保することが求められる。

表1はある設計事例において配置すべき21個の区画を示したものであり、それらの間で前出の図5に示し

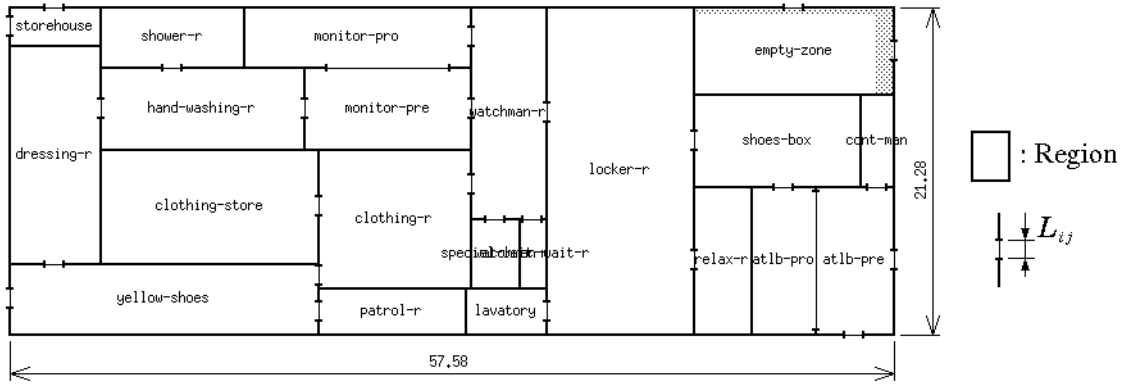
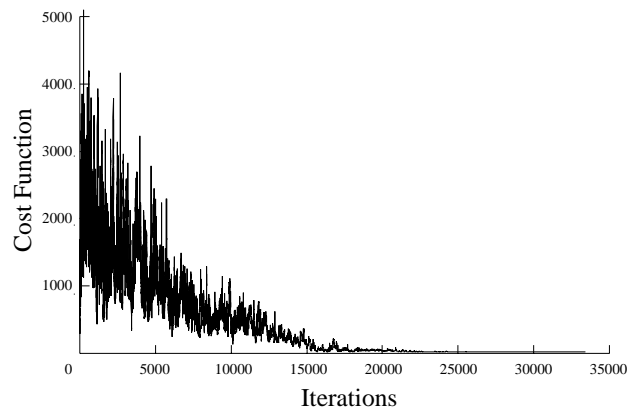


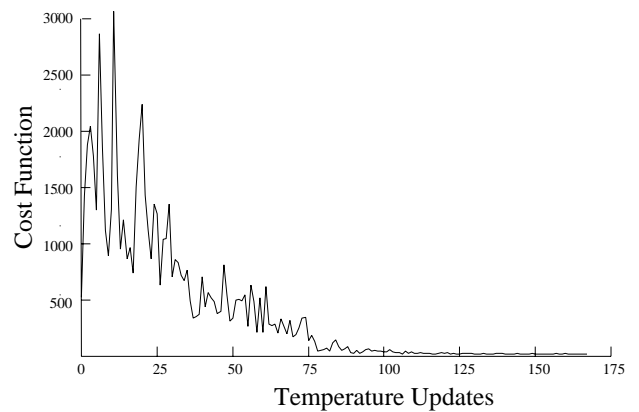
図 8 配置結果の一例

表 1 配置条件

No.	Name of subregion	S_i	\hat{R}_i
1	atlb-pre	49.00	2.74
2	atlb-pro	40.00	2.56
3	cont-man	13.00	1.76
4	shoes-box	65.00	3.02
5	locker-r	204.00	4.42
6	lavatory	16.00	1.89
7	relax-r	36.00	2.48
8	watchman-r	68.00	3.06
9	watchman-wait-r	8.00	1.50
10	special-wait-r	14.00	1.81
11	monitor-pre	58.00	2.90
12	monitor-pro	58.00	2.90
13	clothing-r	89.00	3.35
14	clothing-store	105.00	3.54
15	hand-washing-r	71.00	3.11
16	dressing-r	84.00	3.28
17	shower-r	37.00	2.50
18	yellow-shoes	92.00	3.39
19	patrol-r	29.00	2.30
20	storehouse	15.00	1.85
21	empty-zone	62.00	2.97



(a) 新しい解を生成した回数に対する評価値の変化



(b) 温度の更新による評価値の変化

図 9 SA 法の収束過程

た 27 個の隣接条件を満足させる必要がある。図 8 は、そのような問題を本手法により解いた場合の一例であり、与えられた隣接関係を満足しつつ、バランスの取れた良好な配置が得られていることを確認することができる。また、図 9 は、図 8 に示した配置解を得る過程において、式 (4) の評価値が変化していく様子を示したものであり、横軸については、(a) が候補解を生成した回数を、(b) が温度 T を更新した時点を示しており、縦軸については双方とも評価値 C を表している。これらの図からも、温度が低くなっていくにつれて、解の評価値の変動幅が小さくなっていき、徐々に最適な解へと収束していく様子を確認することができる。

なお、本計算例においては、初期温度を $T = 1000$ 、規定繰返し数を 200 回、温度更新係数を $\alpha = 0.95$ 、重み付け係数をそれぞれ $w_1 = 1.0$ 、 $w_2 = 2.0$ 、縦横比の評価関数におけるパラメータを $R_{min} = 1.5$ 、 $\beta = 3$ とした。

6 結 言

本研究では、区画配置における位相関係を矩形双対グラフにより表現した上で、シミュレーテッドアニーリング法を用いて操作することにより、最適な配置を求める手法を提案した。また、プラント配置における具体的な事例に適用して、その妥当性を検証した。

矩形双対グラフは、区画配置における隣接関係を取り扱う上で、具体的な配置から位相的な関係を分離して取り扱うことができるなどの点において有効な手法であり、そのような位相構造を最適化する方法として、シミュレーテッドアニーリング法が有効であることが確認できた。さらに、区画配置問題における望ましい配置を求めるために、各区画についての余剰面積と縦横比から構成される評価関数を導入し、そのような関数によりバランスに優れた良好な配置解が得られることを確認した。

最後に、5節で取り上げました区画配置問題について御教示頂きました、三菱原子力工業の 仲戸川 哲人氏、安田 公輔氏、柴戸 要氏に謝意を表します。

文 献

- (1) Kozminski, K. and Kinnen, E., An algorithm for finding a rectangular dual of a planar graph for use in area planning for VLSI integrated circuits, *Proceedings of the 21th Design Automation Conference, IEEE and ACM*, (1984), 655.
- (2) Kozminski, K. and Kinnen, E., Rectangular Duals of Planar Graphs, *Networks*, **15**, (1985), 145.
- (3) 田宮, 矩形双対グラフに基づく配置手法, 情報処理学会研究報告, **91-35** (DA-57), (1991), 57-3-1.
- (4) Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C. D., and Vecchi, M. P., Optimization by Simulated Annealing, *Science*, **220**-4598, (1983), 671.
- (5) van Laarhoven, P. J. M. and Aarts, E. H. L., *Simulated Annealing: Theory and Applications*, (1987), D. Reidel Publishing.
- (6) 例えば, Gabriele, G. A. and Ragsdell, K. M., The Generalized Reduced Gradient Method: A Reliable Tool for Optimal Design, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Industry*, **99**, (1977), 394.
- (7) 赤木・藤田, 制約指向に基づく基本配置設計支援システムの研究(第1報:制約指向による基本配置アルゴリズム), 機論, **56**-528, C (1990), 2286.
- (8) 藤田・赤木・長谷・仲戸川・竹内, 制約指向探索と最適化法とのハイブリッド化によるプラントの配置設計手法, 機論, **58**-547, C (1992), 967.
- (9) 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とのハイブリッド化による板取り問題の一解法, 機論, **59**-564, C (1993), 2576.
- (10) Sechen, C. and Sangiovanni-Vincentelli, A., The

TimberWolf Placement and Routing Package, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **SC-20-2**, (1985), 510.

- (11) Jain, P. and Agogino, A. M., Optimal design of mechanisms using simulated annealing: theory and applications, *Advances in Design Automation - 1988 -*, DE-Vol. 14, (1988), ASME, 233.
- (12) Jain, P., Fenyves, P. and Richter, R., Optimal blank nesting using simulated annealing, *Advances in Design Automation - 1990 -*, DE-Vol. 23-2, (1990), ASME, 109.
- (13) 杉浦・張・中島, アニーリング法の3次元レイアウト設計への適用 — 潜水艇3次元レイアウト設計への適用, 機論, **58**-546, C (1992), 352.
- (14) Szykman, S. and Cagan, J. Automated generation of optimally directed three dimensional component layouts, *Advances in Design Automation - 1993 -*, DE-Vol. 65-1, (1993), ASME, 527.
- (15) 例えば, Curry, D. A., *Using C on the Unix System - A Guide to System Programming*, (1989), O'Reilly & Associates, Inc., (邦訳:アスキー書籍編集部(監訳), UNIX C プログラミング, (1991), アスキー).