

## 疑似気圧モデルに基づく VLSIフロアプランの局所修正

大戸 友博, 高橋 篤司, 梶谷 洋司

東京工業大学 工学部 電気・電子工学科  
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
TEL : 03-5734-3572, FAX : 03-5734-2902  
E-mail : {oto, atushi, kajitani}@ss.titech.ac.jp

あらまし フロアプランの位相構造が与えられ、各領域の最小面積、最小幅、最小高さが与えられた場合、一般にフロアプランは無駄領域を含む。本研究では、位相構造を局所的に変更することにより、フロアプランに含まれる無駄領域を削減するアルゴリズムを提案する。位相構造の変更操作として、隣接する2つの領域の上下関係と左右関係を入れ替える2種類の操作を用いる。実験では、与えられた位相構造をほぼ保ちながら無駄領域を削減することを確認した。

キーワード フロアプラン, 位相構造, 局所修正, 疑似気圧モデル

## A Local Reconfiguration Algorithm for VLSI Floorplan Based on Air-Pressure Model

Tomohiro Oto, Atsushi Takahashi, and Yoji Kajitani

Dept. of Electrical and Electronic Engrg., Tokyo Inst. of Tech.  
Ookayama, Meguro, Tokyo, 152-8552 Japan  
TEL : +81-3-5734-3572, FAX : +81-3-5734-2902  
E-mail : {oto, atushi, kajitani}@ss.titech.ac.jp

**Abstract** Floorplan contains wasted-area in general if the topology is fixed and the minimum area, width and height of each region are given as constraints. In this paper, we propose an algorithm to reduce the wasted-area by changing the local topologies of floorplan. In a reconfigure operation of local topology, two regions adjacent vertically are changed to adjacent horizontally, and vice versa. In experiments, it is shown that the wasted-area is reduced while the topology is almost preserved.

key words Floorplan, topology, local reconfiguration, air-pressure model

## 1 はじめに

近年、ハードウェアの大規模化に伴い、LSI 設計の自動化を余儀なくされている。LSI 設計は複雑で困難な問題を多く含むため、いくつかの設計工程に分割され段階的に処理される。まず、仕様が形式的に記述され、その記述をもとに回路が合成される。合成された回路の要素は実装可能な単位デバイスに割り当てられる。これらの処理を総じて高位合成と呼ぶ。次に、合成された回路はチップ上にレイアウトされる。レイアウトも一度にすべての配置配線を行うわけではなく、概略から詳細へと段階的に配置配線される。レイアウト結果であるマスクパターンが設計工程の最終出力であり、デバイスプロセスに回され、チップとして製造される。

レイアウトの最初の工程はフロアプランと呼ばれ、チップを矩形やL型の領域に分割し、その領域にモジュールを割り当てる。このとき、各領域の大きさは割り当てられたモジュールの機能を実現するのに十分な面積を持たなければならない。領域分割とモジュール割り当ては、最終的なチップ面積や性能に大きな影響を与えるため、モジュール間の接続に必要な配線や遅延をできる限り正確に推定し、慎重に決定しなければならない。

フロアプランは、領域の位相関係の決定工程と、各領域の位置と大きさを決定する工程に分けることができる。疑似気圧法 [1] は矩形領域の位相関係と各矩形領域の最小面積が与えられたとき、各矩形領域の縦横比と位置を高速に計算する。各領域の縦横比に制限がないとき、各領域を与えられた最小面積で実現する無駄領域のない配置結果が得られる。しかし、モジュールを極端に細長い領域で実現しなければならないことがある。また、縦横比に制限を与えない場合には、レイアウトが予め与えられるような汎用的なモジュールに対応できない。したがって、一般的には、各領域の縦横比には制限が与えられると考えなければならない。各領域の縦横比に制限が与えられた場合にも凸最適化問題に帰着する手法 [2] では最適解を得ることができる。しかし、縦横比に制限がある場合には、無駄領域が本質的に必要な場合がある。また、モジュールの接続関係などを考慮して領域の位相構造は与えられたと考えられるため、位相構造の大幅な変更は好ましくないが、絶対的に維持しなければならないという性質の

ものではない。縦横比の制限と位相構造が相容れないため無駄領域が生じている場合などは、位相構造の局所的な変更により無駄領域を削減するほうが好ましいと考えられる。疑似気圧法は縦横比に制限が与えられた場合には必ずしも最適解を与えないが、配置結果に無駄領域が含まれる場合には領域間に圧力差が生じる。

本論文では、疑似気圧法が出力する配置において圧力が大きい領域や小さな領域は、縦横比制約と位相構造が相容れない部分と考える。圧力が大きい領域や小さな領域を位相構造の局所変更の候補とし、その領域に関連する位相構造の局所変更を行い、無駄領域を削減するアルゴリズムを提案する。位相構造の変更操作として、隣接する2つの領域の上下関係と左右関係を入れ替える2種類の操作を用いる。これらの操作は位相構造を局所的に変更する操作であるが、連続適用により任意の位相構造から任意の位相構造に変更することも可能である。実験では、与えられた位相構造をほぼ保ちながら領域を削減することを確認した。

## 2 フロアプラン

ここでは、我々が扱うモジュールと位相構造について述べる。

### 2.1 モジュール

演算器やメモリなどの汎用的な機能を持つモジュールは、通常、専用設計され、マクロセルとしてライブラリに登録されており、その形状は既知であり固定されている。このようなモジュールでは反転や90度単位の回転のみ許される。ひとつのモジュールに対してライブラリに複数の候補が登録されており、その中から選択可能な場合もある。フロアプランの工程において候補が選択され、また反転や回転が決定される。ここではこれらを離散的モジュールと呼ぶ。

制御部分などの回路はフロアプラン段階では詳細なレイアウトは確定しておらず、フロアプランの工程においてその形状を決定しなければならない。このとき回路規模からそのモジュールのレイアウトに必要な面積を推定し、その面積のもとで任意の幅と高さの形状を取ることできるモジュールと考えることが多い。そのようなモジュールを、ここでは完全連続的モジュール

ルと呼ぶ。

完全連続的モジュールによるモデル化では限りなく細長い形状も取り得る。しかしながら、実際には極端に細いモジュールは実現が困難である。そこで、幅と高さに下限を与えたモジュールを考えることが多い。そのようなモジュールを最小幅制約付き連続的モジュールと呼ぶ。

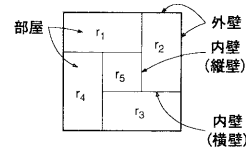


図 2: 壁と部屋の例

## 2.2 位相構造

フロアプランにおいては、様々な形状のモジュールを重ねる重なりなくチップ平面上に配置する。位相的フロアプランは、モジュールの平面上における物理的な座標ではなく、抽象化された相互の位置関係によって配置を表現する。

チップは垂直線分と水平線分の集合により分割される。それらの線分を内壁と呼ぶ。線分の両端点は直行する線分上にあり、線分同士は交差しない。外周上の4つの線分を外壁と呼び、内壁と外壁を合わせて壁と呼ぶ。また、 $x$ 座標軸に水平な内壁を横壁と呼び、垂直な内壁を縦壁と呼ぶ。壁と壁が接している点を接続点と呼ぶ。また、壁  $w$  の両端の接続点を  $w$  の終端接続点と呼び、壁  $w$  のそれ以外の接続点を  $w$  の中間接続点と呼ぶ。図 1 に例を示す。内側に壁を含まない極大な矩形領域を部屋と呼ぶ。壁や部屋の例を図 2 に示す。部屋とその境界となる壁は隣接していると言う。部屋はモジュールが配置される領域に対応し、壁はチャンネルと呼ばれる配線領域に対応させることができる。

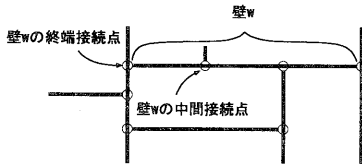


図 1: 接続点の例

位相的フロアプランを平面上の線分や矩形で描画することもあるが、位相を表現する場合には物理的な座標は意味を持たない。例えば、図 3 には 6 つのモジュール  $m_1, \dots, m_6$  からなるフロアプランの位相を表した図が 4 つ示されている。左上の図と右上の図では、網掛けの部分の物理的位置が異なるが、これらは位相的

には等しく、左下の図と右下の図では、モジュールの配置は等しく見えるが、網掛けの部分の位相が異なるため、位相的に異なる。

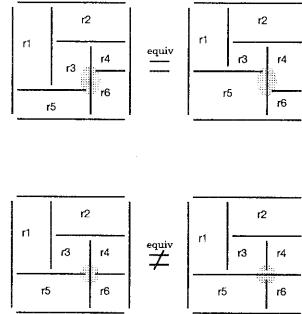


図 3: 位相的フロアプランの等価性

## 3 疑似気圧モデル

### 3.1 完全連続モデル

部屋  $r_1, r_2, \dots, r_n$ 、壁  $w_1, w_2, \dots, w_{n+3}$  からなるフロアプランを考える。部屋  $r_\ell$  の幅と高さをそれぞれ  $x_\ell, y_\ell$  とする。部屋  $r_\ell$  に面積  $a_\ell$  の完全連続的モジュールが割り当てられたとき、 $x_\ell y_\ell \geq a_\ell$  ( $\ell = 1, \dots, n$ ) の制約が与えられる。

疑似気圧モデルでは、気体から圧力を受けて壁が移動し、やがて均衡する自然現象を模倣する。モジュールを質量  $a_\ell$  の気体と見なし、体積  $x_\ell y_\ell$  の部屋に密封されていると見なす。部屋  $r_\ell$  の気圧を

$$P_\ell = \frac{a_\ell}{x_\ell y_\ell}$$

と定義する。

部屋  $r_\ell$  が壁  $w_i$  に与える力は、パスカルの原理に従い、部屋  $r_\ell$  が壁  $w_i$  に接している部分の長さに比例する。垂直（水平）な壁  $w_i$  は左右（上下）の部屋から力を受ける。  $w_i$  の左右（上下）に隣接する部屋の集合をそれぞれ  $R_i^-, R_i^+$  とする。右（下）への方向を正として、壁  $w_i$  が受ける力を

$$F_i = \sum_{r_\ell \in R_i^-} P_\ell y_\ell - \sum_{r_\ell \in R_i^+} P_\ell y_\ell.$$

と定義する。

疑似気圧モデルではこの力を元に各壁を移動させ、各壁にかかる力を均衡させる。

疑似気圧モデルを用いることで、各壁の圧力は均衡し各部屋の圧力は1に近づき、無駄領域のないレイアウトを生成する。

### 3.2 最小幅制約付き連続モデル

完全連続的モジュールのレイアウトにおいてモジュールは無限に細くできるが、実際には非常に細いモジュールは実現が困難である。そこで、通常は縦横比制約が与えられる。これは各モジュールに対する最小幅および最小高さ制約と等価である。各部屋  $r_\ell$  に割り当てられたモジュールは幅と高さの下限  $x_\ell^{\min}, y_\ell^{\min}$  を持つものとする。

部屋の幅と高さの下限を表すため、“つっかえ棒”モデルを導入する。各部屋  $r_\ell$  に対して、長さ  $x_\ell^{\min}$  の水平なつっかえ棒と長さ  $y_\ell^{\min}$  の垂直なつっかえ棒を入れる。つっかえ棒は部屋が最小幅（高さ）よりも狭くなることを防ぐ。部屋の幅（高さ）がつっかえ棒よりも長ければ、つっかえ棒は何の影響も及ぼさない。部屋の幅（高さ）が最小幅（高さ）のとき、縦（横）壁が部屋を狭くするように移動しようとしたら、つまり、壁がつっかえ棒に当たってさらに部屋を狭くするよな力がその壁に働いていたら、つっかえ棒は反対側の壁に力を伝え、これらの壁とつっかえ棒とは一緒に動く。これら一緒に動く壁の集合を複合壁と呼ぶ。複合壁に含まれる壁にかかる力の（方向を考慮にいた）総和を複合壁にかかる力とし、一つの壁として移動させる。

このアルゴリズムでは部屋の面積  $x_\ell y_\ell$  が割り当てられたモジュールの面積  $a_\ell$  よりも小さいレイアウトを生成する可能性がある。そのようなレイアウトの例

を図4に示す。このレイアウトでは複合壁にかかる力は全て均衡している。壁  $w_1$  と  $w_B$  が  $r_4$  のつっかえ棒にぶつかり複合壁を成している。部屋  $r_1, r_3, r_5$  の気圧がこの複合壁を下向きに、外領域の気圧が上向きにこの複合壁を押している。  $r_1$  と  $r_3$  の気圧は外領域の気圧1よりも低いため、  $r_5$  の気圧が外領域の気圧1よりも高い状態でこの複合壁にかかる力が均衡している。同様の議論が他の複合壁にも成り立つ。したがって、この例に置いては気圧が1よりも高い部屋が存在するにもかかわらず、全体が均衡している。このレイアウトから実現可能なレイアウトを得るためには、各部屋の面積制約を満たすように全体を拡大しなければならない。

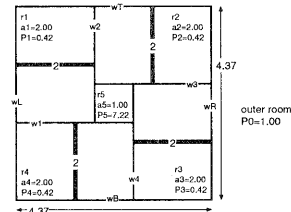


図4: 面積制約を満たさない部屋がある均衡レイアウト

## 4 構造変更

第3章で述べた疑似気圧モデルは最小幅制約付きモジュールを扱うことができるが、位相構造が固定されているため、無駄領域を多く含むレイアウトを生成することがある。図5(左)のような場合がその例である。部屋1, 2の左右関係を上下関係に変えることで、図5(右)のような最適解が得られる。一般的に位相構造を変更することで無駄領域が少ないレイアウトを得ることができる。ただし、無駄領域を最小化した位相構造が得られたとしても、密に接続しているモジュールが遠方に置かれたりすると、必ずしも良いレイアウトとはいえない。そこで我々は、与えられたモジュールの隣接関係を局所的に変更する単位変更操作を導入し、この手続きに基づいたチップ面積を最小化するフロアプラン修正アルゴリズムを提案する。

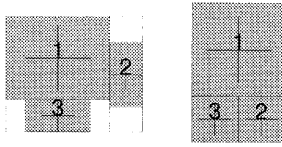


図 5: 無駄領域を含むレイアウト (左) と, 無駄領域を含まないレイアウト (右)

#### 4.1 単位変更操作

単位変更操作として, 以下の2つを定義する.

##### 1. Rotate

中間接続点を持たない内壁  $w$  を回転させる操作. 内壁  $w$  をはさんで縦 (横) に並んでいる部屋を横 (縦) に並ぶように内壁  $w$  を動かす (図 6). 横壁の場合,

- RotateR (右側の終端接続点を下に持っていく操作)
- RotateL (上に持っていく操作)

の2種類を定義する. 縦壁の場合も同様.

##### 2. Bend

中間接続点を持つ内壁  $w$  を折り曲げる操作. 内壁  $w$  の端点に最も近い中間接続点を選ぶ. 選んだ接続点まで壁  $w$  を縮退させて, その接続点で接していた壁をほかの壁に当たるまで延ばす (図 7).

横壁の場合は,

- BendRR (最右の上壁との中間接続点に対する操作)
- BendRL (最左の上壁との中間接続点に対する操作)
- BendLR (最右の下壁との中間接続点に対する操作)
- BendLL (最左の下壁との中間接続点に対する操作)

の4種類を定義する. 縦壁の場合も同様.

この単位操作は,

- 1回適用することでの局所性
- 多数適用することでの任意到達可能性

を持っている.

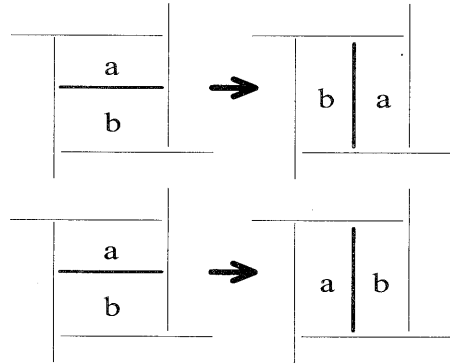


図 6: 内壁  $w$  が中間接続点を持たない場合 (RotateR (上) と RotateL (下))

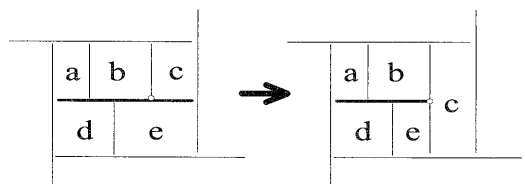


図 7: 内壁  $w$  が中間接続点を持つ場合

## 4.2 単位変更操作の性質

4.1章で定義した単位変更操作は、連続適用することにより任意の構造から任意の構造に変更することが可能であることを述べる。

この性質より、この単位操作を Sumilated Annealing などの探索手法の単位操作とすることで、解空間の中に最適解を含むことを保証することができる。

**補題 4.1** 単位変更操作は可逆操作である。

**証明:** RotateR, RotateLに関しては、同じ壁に対して RotateL, RotateRをそれぞれ行えば、元に戻るため、可逆であるといえる。横(縦)壁 w1 に対して BendRR を適用した場合について考える。選択した中間接続点で内壁 w1 と接していた壁を w2 とする。BendRR を適用した後では、定義より壁 w2 は中間接続点で内壁 w1 と必ず接しており、またその位置は左(下)側の一番下(左)にある。よって、壁 w2 に対して BendLL を適用することによって戻ることが可能である。同様に BendRL, BendLR, BendLL に対しても BendRL, BendLR, BendRR を適用することによって、元の状態に戻ることができる。このことより、単位変更操作は可逆であることがいえる。 □

**補題 4.2** 単位変更操作を繰り返すことにより、任意の構造から横一列に並んだ構造に変更することが可能である。

**証明:** 任意の構造を横一列に並んだ構造に変換するアルゴリズム 図 8 により証明する(例として図 9)。

横壁が存在するとき、任意の壁が選択される。その横壁に中間接続点があれば、内側のループにより Bend 操作が適用される。Bend 操作を一回適用することにより、中間接続点の数がひとつ減る。中間接続点の数が有限であるため、内側のループを繰り返すことにより中間接続点なくなる。中間接続点なくなれば Rotate 操作により横壁を縦壁に変更される。上記の操作で横壁は新たに生じることはなく、横壁はひとつ減る。したがって、外側のループを繰り返すごとに横壁の数がひとつずつ減る。横壁の数は有限であるため、横壁がなくなる。横壁がない状態とは部屋が横一列に並んでいる状態なので、Rotate 操作を 2 回隣同士を入れ替えることを繰り返して、任意の順序に並び替えるこ

とができる。 □

```
while(横壁がある)
{
    任意の横壁を選択する
    while(選択した横壁に中間接続点がある)
    {
        選択された横壁に対して Bend を適用する。
    }
    選択された横壁に対して Rotate を適用する。
}

バブルソートの要領で、並んでいる 2 つの部屋を Rotate を 2 回行って、順番を入れ替える。
```

図 8: 横一列構造に変換するアルゴリズム

**定理 4.1** 単位変更操作を繰り返すことにより、任意の構造から任意の構造へ変更することが可能である。

**証明:** 補題 4.2 より、任意の構造から横一列の構造に変更でき、また補題 4.1 より可逆であるため横一列の構造から任意の構造に変更することも可能である。よって、任意の構造から任意の構造に変更できる。 □

## 5 構造変更アルゴリズム

局所的な位相構造の変更で、チップ面積を小さくすることが望ましい。そのために、チップ面積に最も悪影響を与えていると思われる箇所を繰り返し修正するという方法を採用する。モジュールに対して広すぎるとり狭すぎたりする部屋の周辺がチップ面積に最も悪影響を与えると考える。図 10 に位相構造を Greedy に変更する提案アルゴリズムを示す。

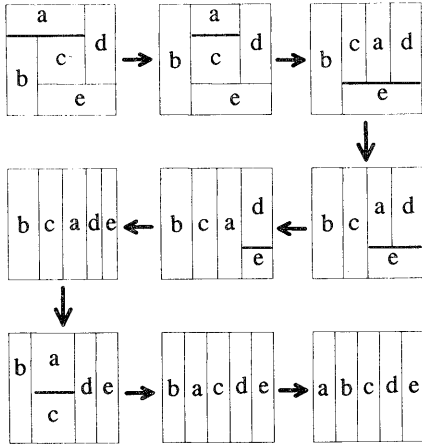


図 9: 任意の構造を横一列に並んだ構造に変換するアルゴリズムの例

1. 入力として与えられる位相的フロアプランを、疑似気圧モデルを用いて物理的フロアプランを生成する。このレイアウトを現在の出力解とする。
2. 現在の出力解のうち圧力の最も高い部屋と低い部屋に対して、それらの部屋を構成する壁を候補とする。
3. 2で候補となったそれぞれの壁に対して次の操作で新たな位相的フロアプランを生成する。  
4.1章で定義した単位操作の中で適用可能な操作に対して、新たな位相フロアプランをそれぞれ生成する。
4. 3で新たに作られたすべての位相的フロアプランに対して、疑似気圧モデルを用いてそれぞれレイアウトを生成する。
5. 4で生成されたレイアウトの中で最も評価のよいレイアウトが現在の出力解の評価よりよい場合、最も評価のよいレイアウトを現在の出力解とし、2へ行く。
6. 現在の出力解を出力し、終了する。

図 10: フロアプランの構造変更アルゴリズム

## 6 実験

### 6.1 実験結果

59個のフロアプランに対して、5章で提案した構造変更アルゴリズムを用いた場合と用いない場合で比較実験を行った。

各フロアプランに対する実験結果のうち11個を表1に示す。また、No.40のフロアプランの改善前と改善後のフロアプランを図11に示す。

テストデータ	M数	位相変更無し	位相変更を適用	改善率
No.5	8	117.97%	102.67%	12.97%
No.10	40	130.42%	127.78%	2.02%
No.15	40	129.52%	121.86%	5.91%
No.20	40	131.45%	131.45%	0.00%
No.25	40	126.41%	114.36%	9.53%
No.30	40	123.09%	116.55%	5.31%
No.35	40	142.87%	121.81%	14.74%
No.40	40	153.44%	121.08%	11.09%
No.45	42	118.03%	106.62%	9.67%
No.50	42	117.72%	112.37%	4.55%
No.55	42	117.79%	105.90%	10.09%

凡例

- M数 … モジュール数
- 改善率 … 位相変更しないときのチップ面積に対する減少したチップ面積の割合

表 1: 各フロアプランの改善率

### 6.2 考察

データ全体としては、比較的改善がなされた。しかし、No.20のように全く改善されなかった場合もあった。これは、最も悪影響を与えていると思われる部屋の周辺の構造を単位変更しても改善されなかった例である。Simulated Annealing等の探索手法を使うことでこの問題点を解決することができるが、位相変更を局所的な変更にとどめるためには何らかの工夫が必要

である。

## 7 まとめ

本研究では、モジュールの位相関係を局所変更する手続きを導入し、この手続きに基づくチップ面積を最小化する探索アルゴリズムを提案した。また、このアルゴリズムを用いることで、チップ面積を減らすことができることを確認した。

今後、L型やT型などの領域を扱える単位操作の導入、配置禁止領域、配線混雑度の考慮などのモデルの拡張が必要である。また、位相構造の変更による悪影響と面積削減の効果の兼ね合いを考慮して位相構造を決定しなければならない。そのために、位相構造が異なっている度合いを示す指標を導入するなど、位相構造を面積以外で評価する方法を定め、得られる面積と合わせて評価して位相構造を選択する必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、終始御指導いただきました北九州大学中武繁寿講師、京都大学泉知論助手ならびに富士通研究所河村薫氏、澁谷利行氏に深く感謝致します。また、本研究はCAD21プロジェクトの一部である。

## 参考文献

- [1] T. Izumi, A. Takahashi and Y. Kajitani: "Air-pressure model and fast algorithms for zero-wasted-area layout of general floorplan", IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, **E81-A**, 5 (1998).
- [2] T.-S. Moh, T.-S. Chang and S. L. Hakimi: "Globally optimal floorplanning for a layout problem", IEEE Trans. on Circuit and Systems - I: Fundamental Theory and Applications, **43**, 9, pp. 713-720 (1996).

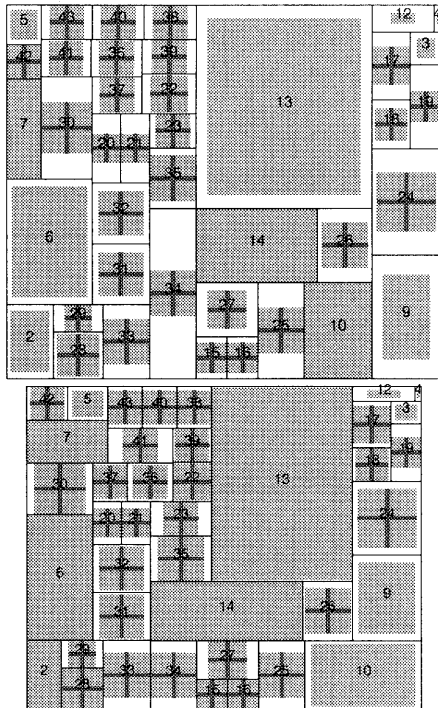


図 11: No.40 のフロアプラン (改善前 (上) と改善後 (下))