

力学モデルによるコンパクション

Compaction based on Dynamics

河西善夫 藤重 高志 伊藤 誠

Yoshio KASAI Takashi FUJISHIGE Makoto ITOH

山梨大学工学部

Faculty of Engineering Yamanashi University

1. はじめに

LSI製造技術の急激な進歩により高集積化が加速し、デザインルールの変更などに強いシンボリックなレイアウト設計システムの必要性が高まっている。一方、LSIのチップ面積は非常に厳しい制限を受けており、シンボリックレイアウトに対し効果的なコンパクションを実現することが重要である。

従来のコンパクションシステムは、水平、垂直方向に許す限り詰める形のものが多く、配線を折曲げたり、素子の相対関係を変更する「積極的」なコンパクションは困難であった。そこで、ここでは、「力」の概念を導入した力学的モデルによるコンパクションシステムを開発した。本コンパクションでは、配線パタンの変更(ジョグの挿入)や素子野移動(相対位置の変更)を自動的に行ない、チップサイズを縮小することができる。また、本モデルはコンパクションを会話型で行なう場合にも有用である。

2. シンボリックレイアウト

本システムでは、トランジスタ、コンタクトなどの基本素子、配線、外部端子を各々一つのシンボルとして取り扱う。基本素子は、トランジスタ3種類(NMOSディプリーション、PMOSディプリーション、NMOS負荷トランジスタ)、コンタクト5種類(メタル-ポリシリコン、メタル-N拡散、メタル-P拡散、ポリシリコン-N拡散、ポリシリコン-P拡散)で、矩形で表わす。配線は、素子ま

たは端子間に接続され、縦および横の線分によって表わされ、色と線種によって各層の区別をする。配線に45°方向は指定できない。外部端子は、セルの入出力端子および電源端子に使用され矩形で表わす。スペースは、シンボル間にすきまが必要なときに使用し矩形で表わす。

3. デザインルール

コンパクションの基本は、チップサイズを縮小するため、素子の配置を製造プロセスが許す限り近づけることにある。

コンパクションを行なう場合、各シンボル間の距離はデザインルールによって決定される。各シンボルは其中に多くの図形を含んでいる。本来、デザインルールは各図形に対して適用されるべきものであるが、各シンボル間の距離を図形ごとに計算するのでは非常に時間がかかる。そこで、本システムでは各図形間に必要な距離をシンボルごとの距離に換算したデザインルールを使用する。また、現在、斜め方向の距離は考慮していない。

4. コンパクションブロック

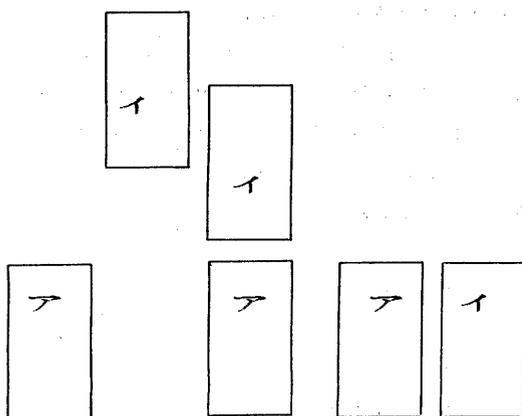
(a) 従来のコンパクション手法

現在、実用化されているコンパクションは、

- 1) X、Y方向をそれぞれ独立に行なう
- 2) コンパクションは、各方向一度ずつ行なう
- 3) シンボル間の距離計算にグラフを利用する

4) 配線パタンの変更や素子の移動は行わないという方法である。

1) 2) のように、X、Y軸方向のコンパクションに分割することによって、各シンボルの位置決定に対する複雑さは、X (Y) 方向の隣り合うシンボルどうしの距離計算だけとなり、コンパクションに要する時間を軽減することができるが、図1のようにXまたはY方向のどちらから行なうかによってコンパクション後のチップサイズは大きな影響を受けてしまう。



(a) 初期状態 (b) X→Y (c) Y→X

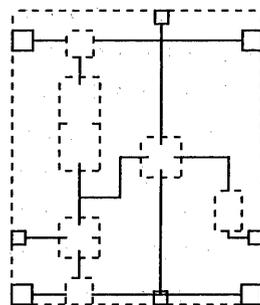
図1 コンパクション方向の影響

3) のグラフ法 [1] [2] では、各シンボルをそれぞれ1つの頂点に対応させ、シンボル図全体をグラフに変換し、各シンボルの位置を決定する方法である。そのため、グラフ作成に多くの時間とメモリを必要とする。また、グラフは回路構造の変化によって再構成する必要があるため、配線パタンの変更や素子の移動は行なうコンパクションには不向きである。

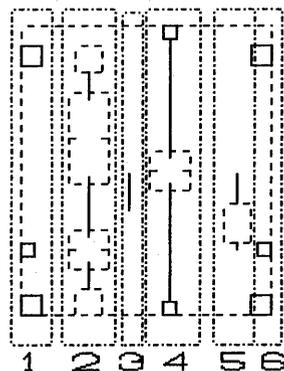
(b) コンパクションブロックの導入

コンパクションを行なう際、各シンボルの位置はそれぞれ独立に決定されるわけではない。X方向のチップサイズを縮小するコンパクション (以下、Xコンパクションという) では、Y方向に接続された一連のシンボル群は、その内のある一つのシンボル

の位置決定によって、他のシンボルも同時にその位置が決定される。したがって、この同一方向に接続されたシンボル群をコンパクションの単位とし、これをコンパクションブロックとよぶことにする。Xコンパクション用のブロックに分割した例を図2に示す。ブロック内の全シンボルは、コンパクションによって同時に同じ距離だけ移動する。また、コンパクション時に行なう距離計算は、全てのブロック間について同時に必要なわけではなく、障壁ブロックと位置決定を行なうブロックとの間のみ必要である。ここで障壁ブロックとは、位置決定対象ブロックの位置を決定する位置決定済みの素子の集合である。Xコンパクションでは各Y座標に対して、既に位置決定済みのシンボルのうち最も大きいX座標を持つシンボルの集合を意味し、コンパクションの進行と共に波のように前進する。この障壁ブロックはメタルやポリシリコンなど必要な層ごとに存在する。



(a) シンボル図



(b) Xコンパクションブロック

図2 コンパクションブロック

5. 力学的モデルの導入

4. のようなコンパクションだけでは、実行後、なおシンボル間にすきまが残っているのでチップサイズはさらに縮小可能である。残っているすきまをなくすため、配線パタンの変更や素子の移動を行なう必要がある。

コンパクションは、チップの上下または左右から力をかけてこれを押しつぶすことに相当すると考えられる。そこで、「力」の概念 [3] を取り入れた力学的なモデルを考える [4]。

5. 1 力学モデルによるコンパクションの概念

一般に行なわれているコンパクションはブロック間の距離を最小にする。

力学モデルではこのコンパクションを次のようにモデル化する。Xコンパクションの場合、X (Y) 方向の配線は伸縮するが、素子、外部端子やY (Y) 方向の配線などを「剛体」(どのような力がかかっても変形しない) と考える(したがって、ブロック全体もまた剛体となる)。また、「すきま」は弾性体と考え力によって収縮すると考える。コンパクションは、このようなモデルに力を加えていくことに相当する。単純コンパクションにおいて、コンパクションの進み方は力のかけ具合によって異なり、チップは力が弱いときには少しずつ、強いときには大きくつぶれると考える。この力の強弱によるチップのつぶれ方の違いを利用し、設計者は状況を確認しつつチップ(セル)サイズの縮小を図ることができる。また、X、Y方向の力のかけ具合により、コンパクションを両方向同時に行なうことができる。

弾性的コンパクションによっていっばいに詰めた後においてもまだすきまが存在し、配線パタンの変更や素子の相対位置移動によりチップには縮小する可能性が残っている。

弾性的コンパクションでは、全てのシンボルを剛体として取り扱ったが、非弾性的コンパクションでは、配線は「折れ曲がる棒」と考えると考える。押し

つぶす力を増していくと、ブロック内の配線には歪が生じる。この歪によって配線は折れ曲がる(ジョグの挿入)。また、素子間の圧力により素子の相対移動が起こる。このように、配線パタンの変更(ジョグの挿入)や素子の移動をとまなうコンパクションを非弾性的なコンパクションと呼ぶ。

5. 2 シンボル間の力の伝播

チップに力を加えてすきまを押しつぶすと、加えた力によってチップ内の素子や配線などのシンボルはコンパクション方向に移動する。このことは、チップに加えた力がチップ内の各シンボルに伝播し、その力によって各シンボルが移動するものとしてとらえることができる。そこで、チップ内のシンボルに伝わる力を解析する。

Xコンパクションの場合、力を加える方向は、右側および左側からである。右側から力を加え、それが伝播してゆくようすは次のようになる。

図3を例にとって考える。まず、右側のセル(チップ)枠に力を加えると、この力は素子ア)に伝えられる。すると、素子ア)は受け取った力を配線イ)へ伝える。イ)に伝えられた力は接続されている素子ウ)に伝わる。そして、素子ウ)から素子エ)、素子エ)から左側のセル枠へと力が伝播していく。ただし、ここでは素子、配線間にすきまはないものとする。

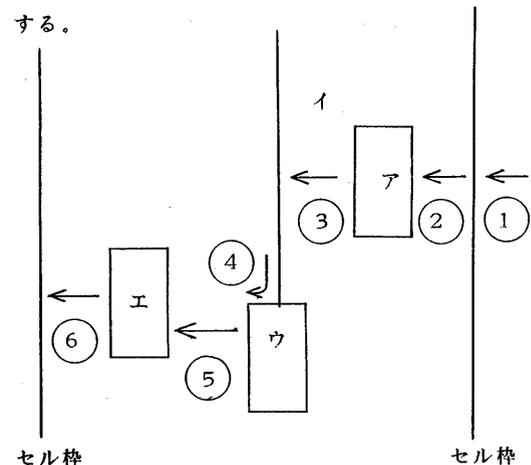


図3 力の伝播

この様子をまとめると次のようになる。

- 1) チップの右側の枠に力を加える。
- 2) この枠に接する物(素子、配線など)に枠が受けた力を伝える。
- 3) 力を受けた物は、その左側に力を伝える物が存在すると、その物に力を伝える。また、力を受けた物に接続されている物にも力は伝えられていく。
- 4) 3) を繰り返しながら左側の枠まで力が伝わっていく。

このような力の伝播を各シンボル間について詳細なモデル化を行なう。

各シンボルが力を受ける範囲は、素子や外部端子などの剛体(以下では特に断わらない限り、「素子」で代表する)および配線の各場合について次のようにモデル化し、図4に示す。

a) 素子→素子の場合

素子は、素子幅+ δ の範囲内において力を受けることができ、また、受けた力を素子幅+ δ の範囲にある物に伝えることができる。素子イ)は右側の素子ア)からア)の素子幅と素子イ)の素子幅との重なり部分で+ δ の範囲の力を受ける。 δ は、ア)とイ)の重なりが解消し上下に隣り合った場合に必要なデザインルール距離である。

b) 配線→素子の場合

素子は、配線が受けた力の範囲と素子幅との重なり部分+ δ の範囲の力を受ける。

c) 素子→配線の場合

配線は、素子幅とその両側 δ_1 、 δ_2 の範囲と配線との重なり合う範囲で力を受ける。

d) 配線→配線

配線ア)が受けた力の範囲とその両側各 δ の範囲と配線イ)の重なり合う範囲で力を受ける。

e) 素子→接続配線

素子に接続されている配線は、接続点から δ の範囲で力を受ける。

f) 配線→範囲外のシンボル

配線が受けた力Fの範囲の外側にある物には、F

の一部F'を幅ゼロの力として伝え、

$$F' = K * F \quad (K < 1)$$

となる。

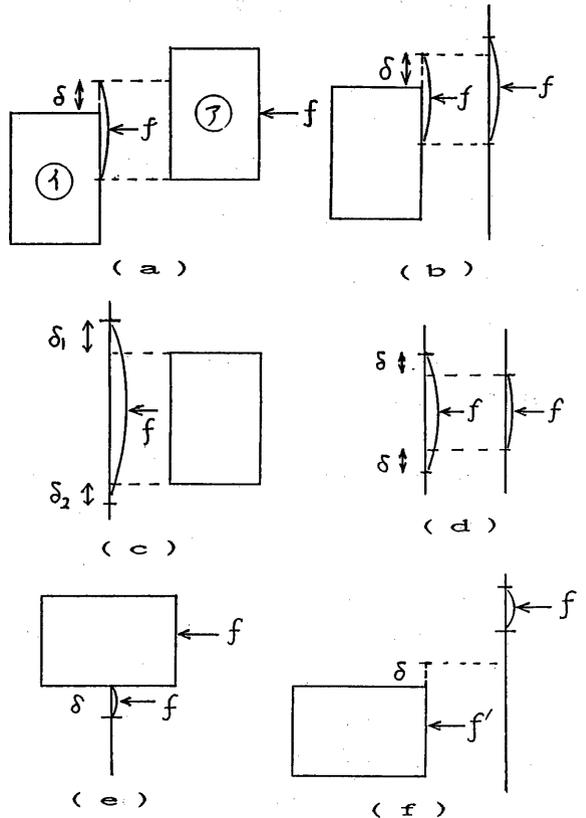


図4 力の伝播範囲

5.3 弾性的コンパクション

弾性的コンパクションでは、X、Y方向に力を加える。この力はすきまを通して伝達されすきまを圧縮する。一方、すきまは弾性的なので圧縮に応じて逆向きの力を発生し、外部からの力と釣り合う位置で停止する。圧縮に対する反発力はすきまの大きさに反比例すると考えるのが適当であろう。反発力を0とすれば従来のコンパクション手法となる。

5.4 非弾性的コンパクション

5.4.1 配線パタンの変更（ジョグの挿入）

チップ（セル）の両側から力を加えると、図5（a）のように配線が左右両方向から力を受けることがある。このような2つの力は、配線に歪を生じさせ、この歪は配線を2つに切断しようとする力、即ち、「揃断力」となる。この点で配線を切断し、ジョグ（切断された配線をつなぐ垂直方向の配線）を挿入すると（b）のようになりサイズを減少することができる。（a）のばあいには、2つの力 F_1 と F_2 は向きが反対で互いに重ならない。したがって、 F_1 と F_2 は揃断力として働き、2つの力の間に折曲げ点を設定することができる。（c）の場合には F_1 と F_2 が重なり合うため揃断力とならないから、ここへジョグ挿入点を設定することはしない。また、（d）の場合には、 F_2 と F_3 の関係は（c）と同様ジョグの挿入は不可能であるが、 F_1 と F_2 の関係は（a）と同様にジョグの挿入が可能である。これらから、ジョグの挿入が可能となる条件は、

- 1) F_1 と F_2 が逆向きで重なり部分を持たない
- 2) F_1 と F_2 の少なくともどちらか一方は、その力と反対向きの力 F_3 と重ならない

である。

実際には、ジョグは配線の材質で定まる一定以上の力が加わると発生すると考えられる。

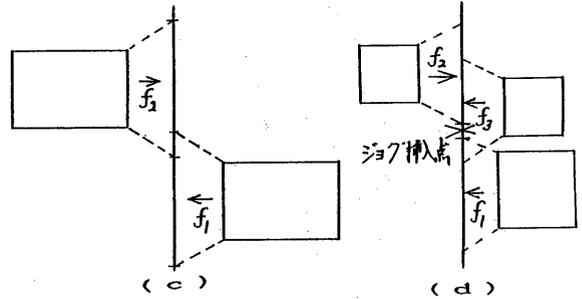
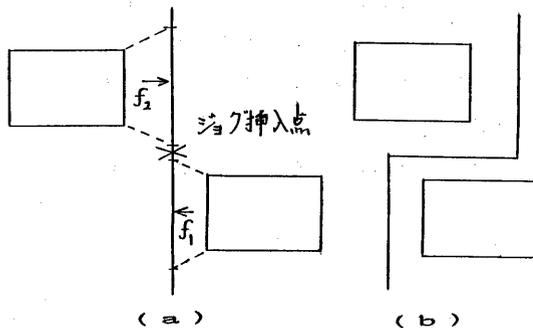


図5 配線パタンの変更

5.4.2 素子の移動

チップに加えられた力によって素子が力を受けた場合、その素子に働く力に応じてその力と垂直の方向に力が発生し、素子が移動すると考える。このように、素子の相対位置が変化することによって一方のサイズ（ X または Y ）は減少する可能性がある。ただし、この移動によって逆に他方（ Y または X ）のサイズは増大する可能性もある。したがって、この方法は、一方のサイズを目標値に近づけるため他方がある程度犠牲にしてもよい場合にも有効である。

素子の移動を、対象となる物が球である場合を例にとって考える。図6のように2つの球が接触している場合、球の中心に作用している2つの力 F_1 、 F_2 （ $|F_1| = |F_2|$ とする）によって、2つの球 B_1 、 B_2 はそれぞれ Z_1 、 Z_2 方向へ移動する。 F_1 を力の作用線とその垂直方向成分の力とに分解すると F_{1t} および F_{1p} になる。同様に、 F_2 は F_{2t} と F_{2p} になる。ここで、 F_{1t} と F_{2t} は互いに逆方向で大きさが等しいので相殺される。したがって、球のずれ移動に寄与する力は F_{1p} および F_{2p} となり、これらの力によって球は Z_1 、 Z_2 方向に移動する。移動力 F_{1p} 、 F_{2p} の大きさは接触角 θ によって異なり、

$$F_{ip} = F_i \cdot \sin \theta \quad (i = 1, 2)$$

となる。このように、圧縮力 F に対して移動力 F_p が発生し素子の移動が起こる。

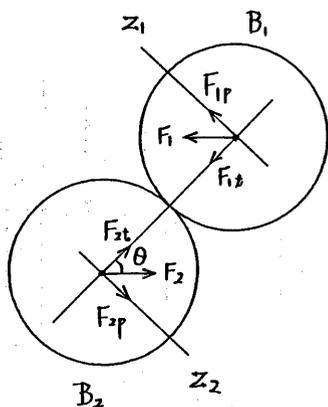


図6 移動モデル(球)

この移動力という考え方をそのまま矩形にあてはめただけでは移動力は発生しない。そこで、圧縮力 F に対して移動力 F_p が発生し素子の移動が起こるということに着目し、この考え方を拡大解釈して矩形素子に適用する。図7のように、 Y (X) 方向の移動力は、 X (Y) 方向の圧縮力が増し、ある大きさ以上になると発生すると考える (F_p の発生)。また、この移動力は接触部分の圧力が高い物が大きいと考える (同じ力なら接触部分の少ない物が移動しやすい)。そこで、素子の移動をひきおこす力 F_p (F に垂直) は圧縮力 F に対して、

$$F/d \geq P_0 \quad (d: \text{力を受けた範囲}, P_0: \text{しきい値})$$

のとき発生し、

$$F_p = K * (F/d) \quad (K \text{ は定数})$$

とする。ここで、接触角 θ の増加は接触部分の幅 d が減少することに対応すると考えて、 $\sin \theta$ を K/d とした。

一方、素子の移動に伴うセル(チップ)サイズの増大は、コンパクションの結果として不利な要素であるから、これに対しては、 F_p に対するチップ(セル)枠からの抵抗力 F_r がチップサイズの増大分に比例して発生し、真の移動力は、

$$F_p - F_r;$$

となると考える。

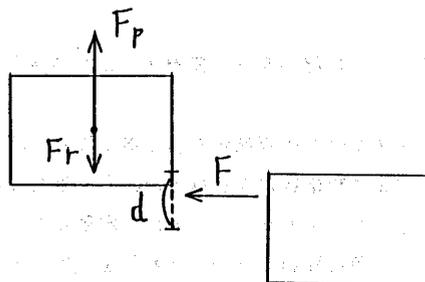


図7 素子の移動モデル

5. 4 実験的コンパクションシステム

以上のようなモデルを用いてコンパクションを行なう実験的システムを作成した。このシステムはジョグの挿入や素子の移動を確認することを中心として次のように簡略化した。

- i) 弾性的コンパクションではすきまの反発力を 0 とする。
- ii) 非弾性的コンパクションではすきまは力を伝播しない。

以下に、非弾性的コンパクションの流れを示す。

- 1) ブロック間に余分なすきまが残らないように、まず弾性的コンパクションを行ない、コンパクション方向をいっぱい詰めておく。
 - 2) 力を伝播させる。
 - 3) 2) で与えられた力によってジョグ挿入を行なうかそれとも素子の移動を行なうかを判断する。
 - 4) 3) で決定された操作を実行する。
 - 5) 弾性的コンパクションを行ない、不要なすきまを削除する。
 - 6) サイズが縮小があれば 2) から 5) を繰り返す。
- コンパクションを終了するとシステムへ戻り、次のコマンド待ちとなる。

実際にコンパクションを行なううえでの条件を以下にあげる。

- 1) ジョグの挿入は条件に合う配線全てについて同

時に行なう。

2) 移動する素子は、最も移動しやすい素子で、

a) 移動力の元となる力 F が作用し合う素子は、互いに独立であること。即ち、相対的位置変更が可能であること。

b) a) を満たし、さらに、 F_p が最大の物とする。また、チップの底辺は固定していると考えて、素子の移動方向は、上向き (Xコンパクション) とする。移動素子に決定したものが下向きの移動であれば、この素子に対応する移動方向上向きの素子を移動対象とする。さらに、ある素子を移動することによって、他の素子も移動しなければならないときは、それらの素子も同時に移動する。

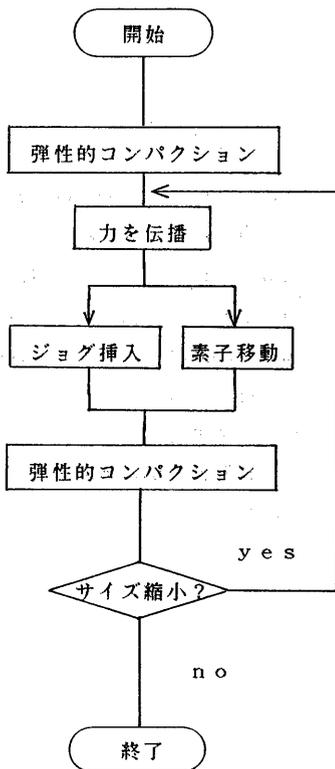
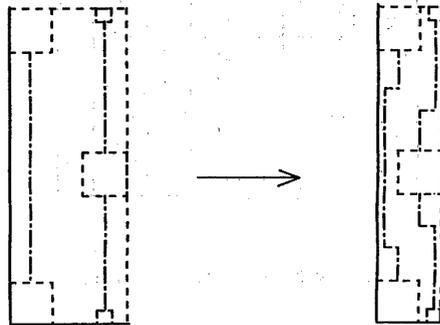


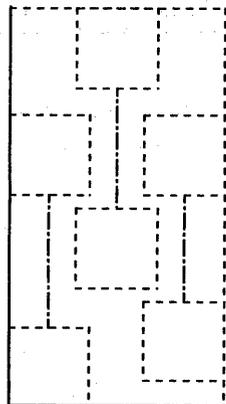
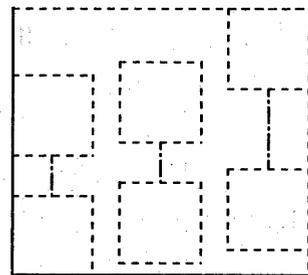
図8 コンパクション手順

5.5 コンパクション例

ジョグ挿入の例を図9 (a) に、素子の移動を行なった場合を (b) に示す。EXOR素子のコンパクションを図10に示す。

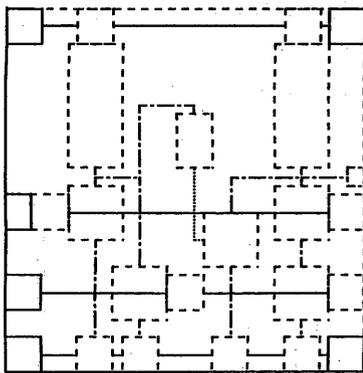


(a) ジョグの挿入

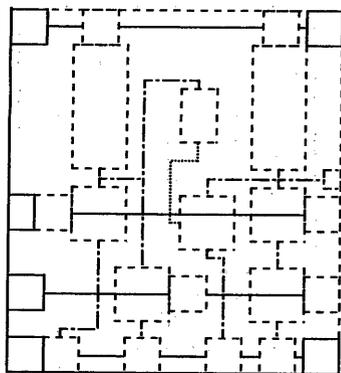


(b) 素子の移動

図9 コンパクション例



(a) 弾性的コンパクション後



(b) 非弾性的コンパクション後

図10 EXOR素子のコンパクション

とによりVLSI用の高機能セルの開発に少なからず役立つものと思われる。コンパクションの実行にブロックを用いることで、一度に考慮するデータ量が減少し、小規模のシステムに有効であることが確認された。

また、本モデルにより配線パタンの変更や素子の移動が効果的に行なわれることも確認した。

現在、コンパクションシステムでは、高速化のために、簡略化したデザインルールを使用しているが、チップサイズを最小にするためには各図形ごとの詳細なDRC (Design Rule Check) を行なう必要があるだろう。さらに、弾性的コンパクションにおいてすきまの反発力を考慮すること、試行錯誤のための効果的なバックトラック手法を確立することも必要である。

参考文献

- [1] G. Kedem, H. Watanabe: "Graph Optimization Techniques for IC Layout and Compaction" 20th Design Automation Conference pp.113-120
- [2] "Christopher Kingslay: "A Hierarchical, Error-Tolerant Compactor" 21th Design Automation Conference pp.126-132 1984
- [3] 松田 栄: 力学概論 大明堂
- [4] 河西善夫、伊藤誠: 情報処理学会第32回全国大会資料 1986年3月

6. おわりに

コンパクションに力学モデルを導入することによって、今まで行なわれていなかった、配線パタンの変更および素子などの相対位置の変更を直感的に理解しやすい手法で統一的行なうことが可能となった。本手法を使い易い会話型システムに組み込むこ