

LSI配線径路決定プログラムCARPの評価

杉山吉 種田実 和田康 上田和宏 村田慎吾 五十嵐寛一

(日本電信電話公社 武蔵野電気通信研究所)

(日立製作所)

§1 まえがき

論理用LSIは、バイポーラカ又は、MOSのものが製造され、高速性を余り要求しない電卓等の小規模装置には後者が採られており、また高速性を要求される情報処理装置のCPU等には前者が向くと考えられている。これらLSIの製造をバックアップするために、種々のDAが考えられている。^[1]ここでは、バイポーラ論理回路LSIを対象にした自動配線の1つのアプローチについて述べる。また、これに基づき自動配線プログラムCARP (Computer Aided Routing Program)を試作したので、プログラムの概要・アルゴリズムの概要を述べると共に、数種類の実際的な例題にCARPを適用した結果を記し、考察も加えた。

LSIはICに比べ一般に多品種少量生産の傾向があるので、バイポーラ論理回路をLSI化する時にはマスタスライス方式が経済的に有利である。これは、マスタスライス方式では、集積回路の量産指向性を生かすために、拡散工程までを各品種に共通なプロセスで製造し、配線マスクのみをLSI品種ごとに設計、製造して多品種のLSIを経済的に製造するからである。

従来、マスタスライス方式LSIの配線マスク作成作業には多大な時間と労力が費やされている。配線マスク作成作業は大略以下の通りである。

①実際のチップ上のパターンの100~500倍の大きさの素子レイアウト図を作成する。②レイアウト図上に格子座標を定義する。③ゲートを配置する。④論理接続図を見ながら格子上を論理配線が通るように配線径路を決める。⑤配線径路情報をレイアウト図より読み取り、マスク自動作成プログラムDAP^[2]の入力情報とする。

この作業は全て人手作業であるため時間がかかる。このため、配線径路決定作業がLSI設計で大きなネックになっていた。LSIが大型化するにしたがってこの問題はますます重要視されてきている。そこで、従来の人手作業の部分を全て計算機に任せ、いわゆるターンアラウンドタイムを縮小し、かつミスの絶滅を図ることが考えられる。このような要請のもとに、自動配線プログラムCARPを作成した。

§2 CARPの性能概要

2.1 前提条件

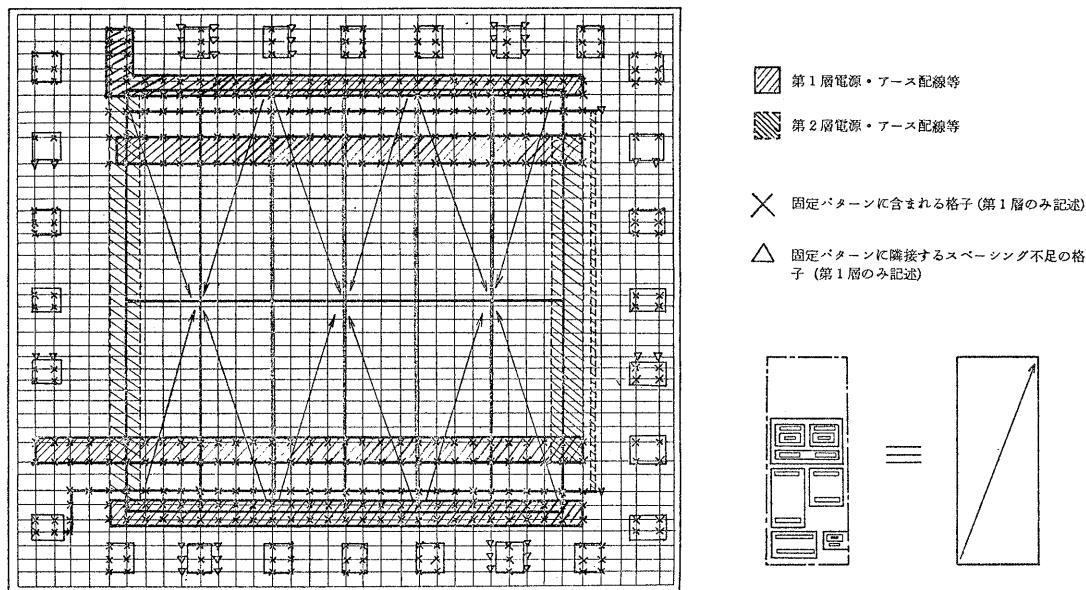
(1) マスタスライスの構造

①マスタスライスは、回路の基本単位である「単位セル」がX方向、Y方向に規則的(アレイ状)に並んでいるものとする。(図1)

②「単位セル」あるいは「単位セルの集まり」に適当な配線を施すことにより論理性能をもった基本回路(ゲート)を構成する。基本回路を構成する配線(ゲート内配線)は自動配線の対象から除く。(図2)

③ゲート周配線を自動配線の対象とする。この際、アース配線・電源配線のように入力容量の大きなものは、マスタスライス・パターンを考える時に一緒に考えるので、自動配線の対象から除く。

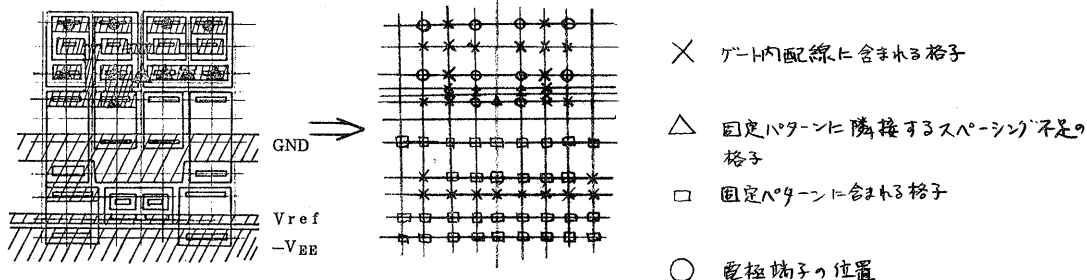
⑩配線層数は2層である。(電源・アース配線を含む)



(a) マスタスライスレイアウト図

(b) 単位セルの構成

図1 マスタスライス構成例



(a) 2セルで4入力
NORゲートを構成

(b) オブスタクル
格子の抽出

図2 基本回路(ゲート)の構成例

(2) 処理の方法

マスタスライス上に拡散されている単位セルを組み合わせて、所定のゲートを実現する。このことを、マスタスライス方式LSIではゲートの配置と呼ぶ。配線アルゴリズムの性質上、ゲート配置と配線とは切り離して処理する。CARPはゲート配置の結果を入力し、配線経路決定を行なう。

(3) 配線アルゴリズムに対する要求条件

- ① 100%配線の実現……100%自動配線は、人手介入を一切要しないという点で、100%でない場合と極端に異なる。たとえ、100%自動配線ができなくても、人手修正により比較的容易に100%配線が可能となる場合もあるので、自動配線処理で出来るかぎり多くの配線を行なっておきたい。
- ② 配線長、平行配線長の制限……チップ内の伝播遅延・誘導・反射等はCARPの対象となるLSIでは問題にならない。したがって、配線長、平行配線長について、アルゴリズム上特に考慮しなくてもよい。

(4) その他

他のプログラムとのインターフェイスを確立し、ターンアラウンド・タイムを縮小し、人為ミスの絶滅を図る。

2.2 機能概要

CARPは入力プログラム、ラインサーチプログラム、経路変更プログラム、出カプログラム、の4つのサブシステムから成る。このうち、ラインサーチプログラム、経路変更プログラムが自動配線を行ない、CARPの主要部である。

入力プログラムは、他のプログラムで得た様々な情報の中から、配線経路決定に必要なものを取り出す処理である。

ラインサーチプログラムは、自動配線の最初に行なわれる処理で、経路探索能力はあまり高くないが、高速に処理することができる。

経路変更プログラムは、自動配線のオス番目の処理で、ラインサーチプログラムで処理できなかった配線の経路を求める。処理速度は遅いが高い経路探索能力をもつ。CARPに特有な処理である。

出カプログラムは、自動配線結果をLSIマスク自動作成プログラムDAPの入力情報に変換する処理を行なう。

§3 入力処理

入力処理を大別すると、①論理図名で書かれた接続情報を格子座標表現の接続情報に変換する処理、②チップ全面に格子を設け、論理配線用に使用可能な格子点とそうでない格子点とに区別する処理、③ラインサーチ処理の配線順序およびタイプを決める処理の3つである。

3.1 接続情報変換

／＼例えば、図3(a)の論理接続情報を、(b)のように変換して、格子座標を用いた表現とする。この処理は次の4つの処理を行なうことにより可能となる。

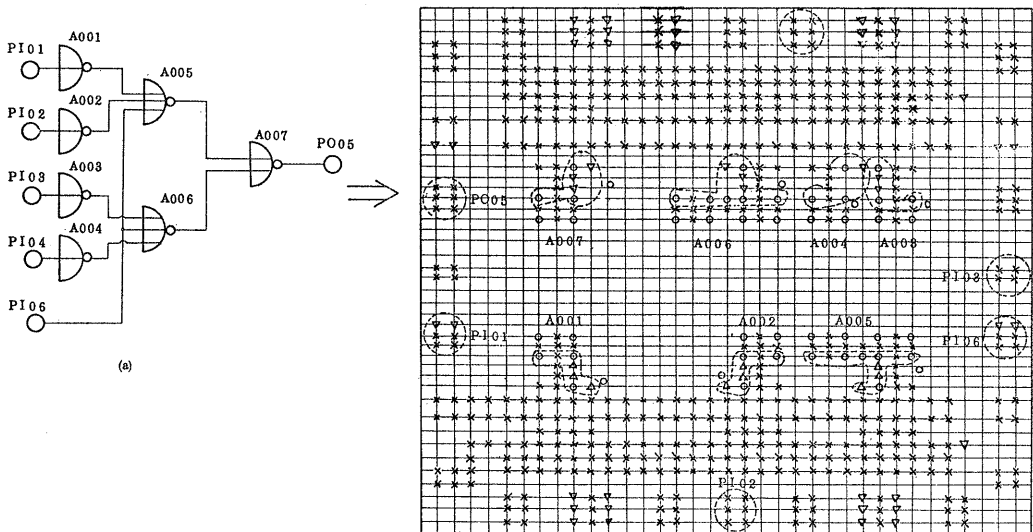


図3 接続情報を (ゲート) ↔ (ゲート) から (格子点群) ↔ (格子点群) に変換

- ①論理接続情報の中にF/F（フリップフロップ）があればそれを複数個のゲートの組み合わせで記述し直す。これは、F/Fを大きなかたまりとして扱おうよりも、ゲートの集まりとして扱おう方が柔軟性に富むからである。
- ②配線パターンの中の分岐を扱がいやすくするため、論理接続情報の記述法を、論理シミュレーションに向けた入力型式から、出力型式に変換する。
- ③ゲート内配線情報とゲート配置情報から、ゲート入出力端子の格子座標を得る。
- ④論理接続情報と格子座標を用いた接続情報に変換する。
- ⑤接続情報に分岐が存在する時には、これをいくつかの2点間接続情報に変換する。

3.2 格子点の配線可否

ゲート内配線や、アース配線・電源配線のある格子点、及びそれらに近接する格子点で配線のためのスペーシングが十分にとれない格子点は論理配線の用に供さない（オブスタクルと呼ぶ）。オブスタクル情報は次の2つの処理により作られる。

- ①ゲート内配線情報と格子情報、ゲート配置情報からゲート内配線に由来するオブスタクルを取り出す。（図2（b）、図3（b））
- ②アース配線・電源配線と格子情報から、アース配線・電源配線に由来するオブスタクルを取り出す。（図1（a））

3.3 配線順序・配線タイプの決定

図4（i）に2点間接続情報の一例を示し、配線タイプを（ii）のように定義する。各区間{1, 2, 3, 4}の配線径路決定を無計画に行なうと、タイプa、及びタイプbに類似な配線パターン（iii）が具合が悪く現われ、チップ全体の配線パターンが錯綜し、径路の見つけれない区間も残るようになる。それで、はじめから計画的に配線タイプの割当てを行ない上記の問題点を解消する必要がある。図4（i）で区間1がaタイプの配線を行なうと、横方向配線の一部が区間2のaタイプの配線と一部チャンネルを重複して使用することになる。このように、各区間につき、それがaタイプ（bタイプ）であるときにとり得るチャンネルの配線重複度を計算すると表（iv）が得られる。（iv）で最小の配線重複度を示すのは区間1がaタイプのものであるので、区間1はaタイプを採用することにする。そこで、（i）から区間1のタイプb側の結線を消去し、もう一度残りの区間の配線重複度を計算してやると、表（v）が得られる。表（v）の最小配線重複度は2であるので、区間2はタイプbにする。以下同様な操作をくり返すことによつて、（vi）の最終結果を得る。CARPでは、配線重複度を図5（i）の場合

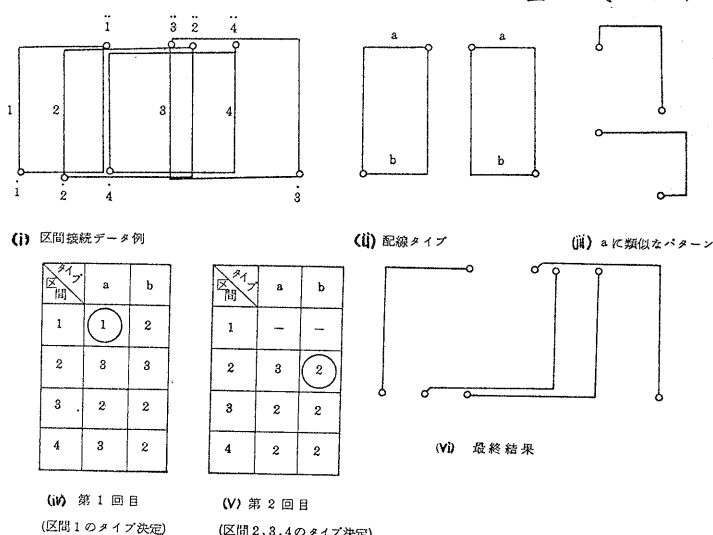


図4 配線径路決定アルゴリズムの概要

合には1と数え、(ii)の場合には2となるようにした。また最終結果からチャンネルの混み具合も分かるので、「接続すべき2方向の距離の小さいものから、同一距離のものがいくつあるるときには、混み合いの大きなところから」という基準で配線順序を決める。

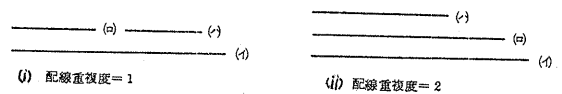


図5 配線重複度の数え方

§4 自動配線処理

図3で、○、×、△のついている格子点は論理配線用に使えない格子点である。図3はオ1層の格子の使用可否を示しているが、オ2層の格子の使用可否は図1(■がオ2層のオブスタクルを形成)から推量できよう。以上述べたオブスタクルの様子から、マスタスライス方式LSIには以下の特有な条件のあることがわかる。

- (条件1) チップの集積度を上げるために、配線可能な領域を有効に使いたい。
- (条件2) 条件1の対策として、「ゲート領域の上の層」を論理配線用に用いると効果が大きい。

この条件以外に、チップ上の配線ということから次の条件がある。

- (条件3) スルーホールは任意の位置に置くことができる。

条件1~3はマスタスライス方式LSIに特有なもので、プリント板、MOSビルディングブロック方式LSI、マルチチップLSI基板等にはない条件である。この中でも、プリント板に用いられる手法が比較的一般性があるので、これをマスタスライス方式LSIに応用してCARPを作成した。

4.1 配線アルゴリズム

自動配線のオ1段階はラインサーチ法によって行われ、オ2段階は径路変更法によって行われる。ラインサーチ法はよく知られた手法⁽⁶⁾なので、ここで改めて述べない。径路変更法は、CARPにユニークな手法なので、4.2で説明しよう。ここでは、ラインサーチ法、径路変更法の組み合わせが優れていることを明らかにする。

- ①径路変更法の処理は処理速度が遅いため、径路変更法でなくても容易に引ける配線をラインサーチ法の処理に任せる。
 - ②ラインサーチ法の処理は処理速度も速く、径路探索能力もかなり高い。
 - ③径路変更法は配線の混んだ状態でその真価を発揮する。これを裏付ける理由が2つある。①径路変更法は迷路法の拡張なので、その枝能の中に迷路法の枝能を含む。したがって、迷路法のもつ「2方向にもし径路が存在すれば、その径路を見つけ出す能力」は、実は径路変更法をもつ。②迷路法にはない枝能として、「迷路法的に処理して径路が存在しなかったとき、前に引いた配線を一旦取り除いて配線してみる」がある。
 - ④ラインサーチ法は、原則としてオ1層をX方向ライン、オ2層をY方向ラインに使っている。このことは、層別による配線方向の整理が個々の配線の径路探索能力を犠牲にして、全体的立場からの配線の容易性を追求しているものと考えることができる。これに対し、径路変更法は、全体的に見た時の配線のしやすさよりも、むしろ個々の配線の径路探索能力に重きを置くと考えられる。
- 以上の理由により、ラインサーチ法の処理に引きつづいて、径路変更法の処理をすれば良い結果が得られることが期待される。

4. 2 経路変更法

経路変更法のアルゴリズムを1例を用いて説明する。ここでは説明を分かりやすくするために「1層内の配線」を扱おうが、プログラムはこれを2層に拡張している。

例題：図6 (i) のメッシュ（ブランクは自由に配線してよい格子， \times はオブスタクルの存在する格子に対応）が与えられたとき，2点 $a-A$ ， $b-B$ をこの順序で配線せよ。

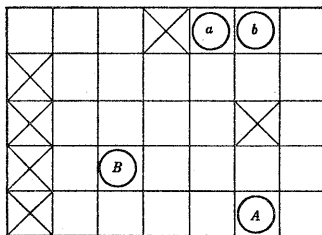
処理1： a ， A から交互にブランク・メッシュにシーケンス1，2，3，1，2，3，……を立ってゆき，両端点から出たシーケンスの波が交われば，その点から a ， A に向かって，3，2，1，3，2，1，……の順にトレース・バックする。この結果破線で示した経路が見つかる。（図6 (ii)）

処理2：以前に見つけた経路を*で表わす。 b ， B から交互に，ブランク・メッシュにシーケンスを立ってゆくが，その途中で，*・ \times のメッシュで取り囲まれるため，それ以上シーケンスの波を立てることが不可能になったならば，*のメッシュにもシーケンスを許して，引きつづきシーケンスの波を立ててゆく。シーケンスの波が交われば，その点から b ， B に向かってトレース・バックする。この結果破線で示した経路が見つかる。この時， $b-B$ を結ぶ経路は，既存経路 $a-A$ と一部のメッシュを重複使用するため，新しく求めた経路 $b-B$ はそのままとし，経路 $a-A$ を決め直す。（図6 (iii)）

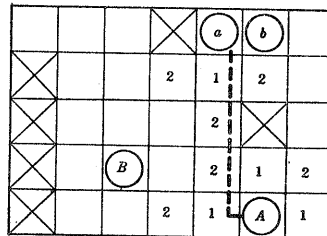
処理3： $a-A$ 間の経路を引き直しをするためメッシュから消去する。経路 $b-B$ は保存し，メッシュに*で示す。 $a-A$ につき再度処理1を行なう。（図6 (iv)）

処理4： $a-A$ ， $b-B$ 間の配線経路が見つかる。（図6 (v)）

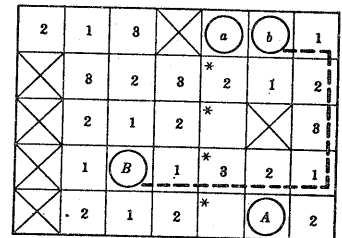
この例題は，従来の迷路法では，配線順序の如何にかかわらず解くことができなかったものが経路変更法により可能となったことを示す。



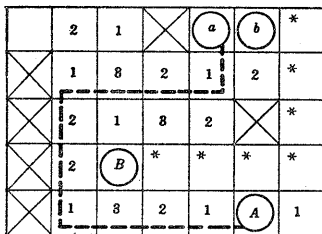
(i) 接続データ $a-A$ ， $b-B$



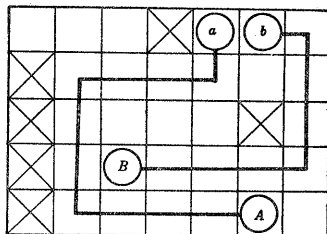
(ii) 第1回目 ($a-A$)



(iii) 第2回目 ($b-B$)



(iv) 第3回目 ($a-A$)



(v) 最終結果

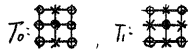
図6 経路変更法

第5章 ラン結果および考察

5.1 配線アルゴリズムの評価

表1はCARPのラン結果を示す。この表より、ラインサーチ法の処理で引き残した配線が少ない時には、径路変更法の処理で、100%配線できるケースの多いことが分かる。

LSI名	ゲート数	区間数	系列数	セル数	Pad数	スルーホール条件	区間数/gate	入力処理	ラインサーチ法	径路変更法		
								時間	配線率	時間	配線率	時間
INC1	50	91	77	62	32	T ₁	1.8	20'	99%	11'	100%	18'31"
INC2	50	130	77	78	32	T ₁	2.6	20'	93%	17'26"	91%	43'44"
INC3	70	91	87	80	24	T ₁	1.3	20'	100%	8'37"	100%	/
INC4	70	130	101	88	38	T ₁	1.9	20'	100%	10'26"	100%	/
RC1	86	157	126	101	50	T ₁	1.8	20'	99%	16'54"	100%	4'10"
INC5	90	169	129	113	44	T ₁	1.9	20'	91%	33'36"	92%	39'21"
ALU*	105	232	122	150	27	T ₀	2.21	20'	73.7%	70'36"	75%	51'28"
INC*	126	239	161	167	51	T ₁	1.90	20'	83.3%	69'43"	87%	46'57"



●新しくセットしたスルーホール, ○スルーホール許可, ×スルーホール禁止

*マニュアル配置

表1 CARPのラン結果

図7は、アルゴリズムを比較するため、「ラインサーチ法+迷路法」、「ラインサーチ法+径路変更法」、「径路変更法のみ」の3つの手法を用いてランした結果を示す。この結果から、配線率の点では「ラインサーチ法+径路変更法」の優れていることが分かる。しかし、処理時間を十分にとれず、処理を途中で打ち切るような時には、かえって、「ラインサーチ法+迷路法」が良い結果を与えることがある。「径路変更法のみ」は、100%配線への収束性が悪い。

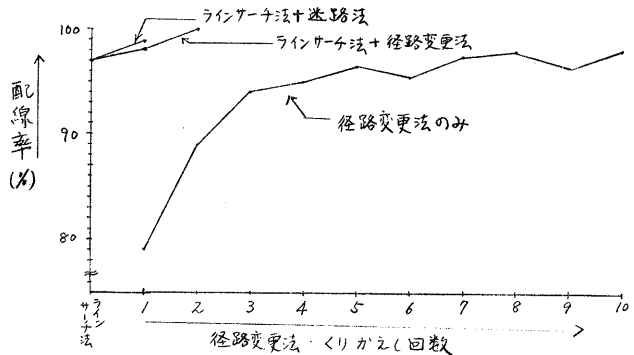


図7 アルゴリズムの比較

CARPを実際に利用する立場から考えてみよう。

まず、配線率についての考え方である。100%自動配線は一切の人手介入を要しないという点で大きな意味がある。径路変更法は、そのアルゴリズム上、本質的に多数回くり返し適用する時にその効果が現われる。したがって、ラインサーチ法の処理で引き残した配線が少ない時には、計算機処理時間的にも径路変更法を多数回くり返し適用できる。しかし、ラインサーチ法による引き残しが多い時には、計算機処理時間上、径路変更法を適用することには問題がある。100%自動配線が困難なときも、人手修正により、簡単に100%配線できることがある。そこで、ラインサーチ法の処理で引き残しが多い場合は、迷路法の処理を行ない、人手配線の部分

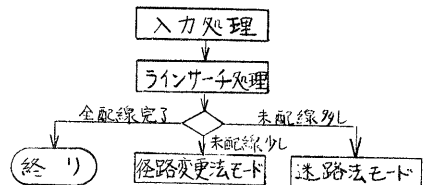
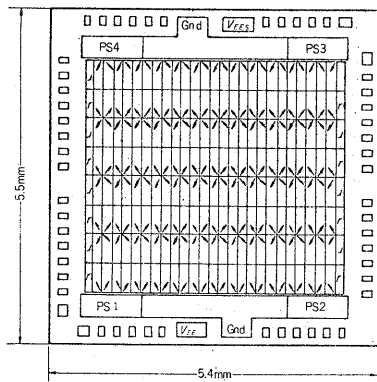


図8 CARPの望ましい運用形態

を極力少なくしておく。もともと、径路変更法は、迷路法を拡張した手法であるので、同一プログラムにより、パラメータを変えるだけで両者の処理を行なうことができる。(図8)

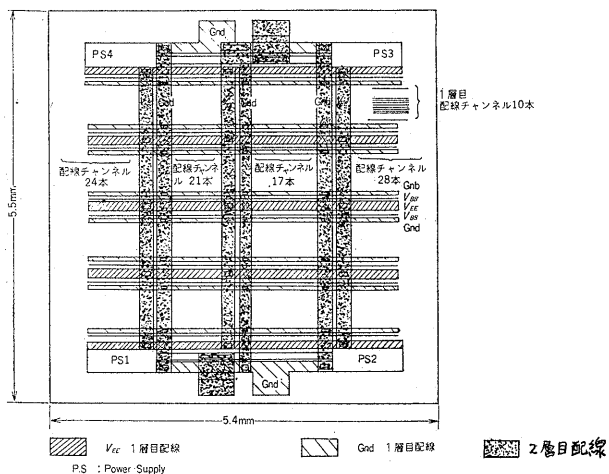
5.2 CARPに向けたLSIの規模とマスタスライスの構造

所定の配線が全部できるか否かは、①対象とするLSIの規模(ゲート数、使用セル数、区画数、系列数)と②マスタスライスの構造(配線領域の面積、アース・電源配線のパターン構造)、③ゲート配置の仕方 に大きく依存する。CARPの処理に先立って、ゲート自動配置ALPS^[4]が行なわれるため、「ALPS+CARP」を1体として評価することが実用上重要である。そこで、ここでは①、②を色々変えて実験した。LSIの規模に注目した実験結果が表1に示されている。ここで、品種INC1~INC5は品種INCからゲート数や区画数を削減したものである。この結果から、ゲート数が90以下の場合、および使用セル数が約100以下の時に100%自動配線できる例の多いことが分る。マスタスライスの構造についての実験はまだ終了していない。図9、図10は実験に用いたマスタスライスの構造である。図10で、電源・アースのオズ層目の配線が配線チャンネルの1つ隘路を形成し、配線する際に大きな妨げとなる。この中でも、中央に位置するオズ層配線は、チップ領域を右半分と左半分とに分離してしまう効果があり、論理配線の径路決定に与える影響は大きい。マスタスライスの構造をCARPに向くように改良する事は、その配線能力をフルに発揮するという点で重要である。



□ : NTL単位セル (図1-16参照)
 □ : Vcc電源回路セル
 PS : 電源回路

図9 NTLマスタスライスのセル構成



1層目配線チャンネル10本
 2層目配線
 Vcc 1層目配線
 Gnd 1層目配線
 PS : Power Supply

図10 電源パターン、配線チャンネルの全体構成

5.3 未結線の原因と考察

ゲート数が少くなると、100%自動配線が困難になる。これのアルゴリズム上の原因として、次の2つがある。

- ① 端子が他の配線により取り囲まれてしまう。
- ② 配線密度の均一化が不十分であり、ところによっては過度に配線の集中するところもある。

CARPでは、①の対策として径路変更法を採り、また②の対策として、ライナー手法の処理に先立って配線タイプを決め、その配線タイプに類似な配線パターンをライナー手法の処理で見つけている。ゲート数が比較的少ない時には

このような簡易な手法で充分であるが、ゲート数が多くなると、より徹底したシステムティックな手法が必要となる。このような試みの一つに、マルチチップLSI基板上の配線プログラムCOMPASS⁴⁾がある。この手法をマスタスライス方式LSIに適用するには、ス層配線の扱いかた、集積度向上等の問題を解決しなければならない。

き6 あとがき

以上の説明通り、CARPを用いることにより、人手による配線設計(配線作業、チェック、データカード作成で約1週間/品種)に比較して、極めて短時間で所定の配線設計を行なうことができる。

ここで報告したCARPの特徴をまとめておく。

- ① マスタスライス方式LSI向きの自動配線プログラムである。
- ② 最初にラインサーチ法で配線し、引き残しの配線を経路変更法で処理する。
- ③ CARPは比較的集積度の小さなLSIの配線に有効である。
- ④ CARPは他のDAプログラムとのインターフェイスがとれているので、CARP独自で用意すべきデータ量が少ない。

CARPはFORTRANで記述されており、規模は入力処理が5K、ラインサーチ法の処理が3K、経路変更法の処理が3Kステートメントである。使用計算機はFACOM230-60である。CARPはLSI設計自動化システムの一環として作成された。今後NTL-LSI論理装置の試作に適用してゆく予定である。

終りに、本研究をすすめるに当り御指導戴いた武蔵野通研向井室長、川島室長、須藤補佐、大柴調査員、日立製作所 川勝主任技師、加納主任技師に深く感謝致します。

[参考文献]

- (1) 川島, 小澤「レイアウト設計のCAD」信学会誌 vol.55 No.4 1972
- (2) 上田, 山本他「LSIマスク自動作成プログラム」
昭和45年電気4学会連大, 1710 (1970, 4)
- (3) 三上, 田淵, 杉本「プリント配線板の自動設計システム」三菱電気技術
vol.43, No.10 1969
- (4) 和田, 福島「LSIゲート自動配置プログラム」昭和48年信学会大 421 (1973.3)
- (5) 杉山, 種田, 上田, 可児, 寺本「マルチチップLSIの配線自動化」
信学会, 回路とシステム理論研資 CST73-79 (1974-01)
- (6) 杉山, 種田他「LSI経路設計の一試案」信学会, 半導体トランジスタ研資 SSP70-4
(1970-05)

付録 品種…INC (表1参照)

手段	孔-ホリ 条件	配線率	孔-ホリ 数	穴/孔使用率	
				1層	2層
人手	T ₀	100%	332 ^個	63.4%	26.0%
CARP	T ₁	87%	424 ^個	43.6%	24.7%

