

理化学研究所 ニュース

May.—1978

No. 51

数式処理と超 LSI 用電子ビーム露光法

1. 超 LSI と電子ビーム露光法

ポケット電卓，電子腕時計，マイコンなど最近のエレクトロニクス製品の小型化，高性能化と価格の低廉化はまことにめざましい。このエレクトロニクスの進歩をもたらしたのは，LSI (Large Scale Integration 大規模集積回路) に外ならない。現在の LSI 製造技術は写真と類似の露光技術に立脚しており，光の化学作用を利用してシリコン単結晶上に所定の電子回路を焼き付けるというのが基本原理である。写真なら一枚の原版（ネガ）からポジを何枚でも焼き付け複製ができるわけで，LSI の場合にも電子回路の原版から同一の電子回路を何個でも複製できる。

LSI を小型化し，又同じ面積の LSI 上により多くのより複雑な電子回路を搭載するという高性能化を目指して，LSI の電子回路パターンを微細化する努力がここ数十年続けられた。その成果が今日のエレクトロニクスである。しかし，これまでの LSI 微細加工技術は壁に行き当たってしまった。それは光の波長である。光の波長より微細なパターンは，作れないという物理法則上の限界であり，具体的には光学的方法では $1\ \mu\text{m}$ ($1/1000\text{mm}$) より微細な電子回路パターンを作ることは不可能なのである。 $1\ \mu\text{m}$ よりさらに微細な電子回路パタ

ーンを持つ LSI は，超 LSI (超大規模集積回路) と呼ばれる。超 LSI を製作するには，光学的露光法では不十分であり，これよりも微細なパターンを複製できる方法が必要である。

歴史的にみると，光学顕微鏡の解像力はすでに前世紀に約 $1\ \mu\text{m}$ という光の波長の限界に達してしまった。これを抜本的に改善したのは，1930年代に開発が始まった電子顕微鏡である。今日の電子顕微鏡の解像力は光学顕微鏡の約千倍にも達している。

これと同様に， $1\ \mu\text{m}$ より微細なパターンの露光法には光線の代わりに電子線を使う電子露光法が必要であるということは20年以上も前から言われてきたが，電子露光法の研究開発が真剣にかつ本格的に，取り上げられるようになったのは，LSI 製造技術に光の波長の限界が見え始めたここ数年のことである。

理研情報科学研究室では，約十年前に二重偏向方式と呼ぶ新しい電子ビーム制御法を考案した。この技術は東京芝浦電気(株)で企業化され，この技術を応用した超高精度ブラウン管は，筑波の高エネルギー物理学研究所で素粒子泡箱飛跡自動解析装置などに使われている。この研究を通じて蓄積された電子ビームに関する諸知識を電子露光に応用した成果が今般完成した可変面積型電子ビーム

露光法である。

1 μm 以上の超微細加工には、回路パターンの複写における光の波長の限界の克服以外にも電子回路パターンの原版作成法の問題がある。光学露光法の場合には原版は縮尺写真によって作られる。しかしこの方法では、光の波長よりも微細なパターンをもつ原版は作れない。このため電子露光法では、微細パターンも電子ビームによって作成する必要がある。この場合電子ビームで原版を作り、それを電子ビームで複写する間接露光法と電子ビームで直接シリコン基板上に所定のパターンを書く直接露光法の二つの方法があるが、両者ともパターン作成の原理に差異はない。従来用いられてきたパターン作成法は点ビーム走査法と呼ばれるもので、テレビのブラウン管上に画像を出すのと同じ原理に基づき、非常に細く絞った電子ビーム(例えば直径0.2 μm)を縦横に走査して所定のパターンを作成するものである。この方法は簡単ではあるが、いわば鉛筆(点)で面図形を塗りつぶすようなものでパターン作成速度が遅いのが欠点である。これに対してわれわれの考案した可変面積型電子ビーム法では長方形断面をもつ電子ビームでパターンを作成する。その長方形の縦と横の長さも電気的に自由に換えられるようになっており、いわば幅と厚さが違っている幾種類もの刷毛を使って看板に絵を描くことに相当する高速パターン作成法である。第1図にこの可変面積型電子ビーム露光法の原理を示す。

電子銃から射出する電子ビームは、照射レンズを経て、正方形孔をもつ第1スリットを通り、整形レンズによって正方形孔をもつ第2スリットに投射される。この2枚のスリット間に置かれた偏向器によって電子ビームは偏向され、第1と第2スリット孔の重ね合わせ位置が、電気的に移動してビームの断面形状は縦と横の辺長が任意に換えられる長方形となる。この長方形断面ビームは対物レンズと偏向器により試料面(シリコン板)の所定の位置に投写され露光パターンを形成するのである。

この可変面積型電子ビーム露光法の原理を1976年米国の学会で発表したところ、同じ学会で米国のIBMとベル研究所、フランスのトムソン社から

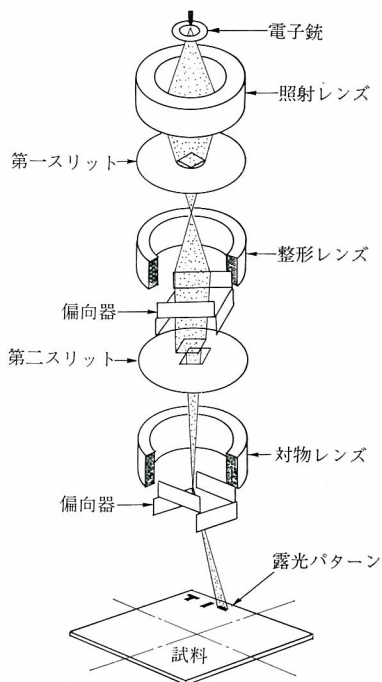


図1 可変面積型電子ビーム露光法原理図

も同様な研究発表があった。かくて可変面積型電子ビーム露光法の研究は世界的にみると四つ巴の競争となっているが、日本の公開特許公報で見ると、その着想は理研が1歩先んじている。この理研の可変面積型電子ビーム法の原理に基づく電子ビーム露光装置が、日本電子(株)によって製造され(JBX-6A)、すでに国内でいくつかの研究機関に納入され、超LSI最先端の研究に使用されている。

電子ビーム露光装置では、電子ビームの位置を光の波長の十分の一に相当する0.1 μm の超高精度で制御する必要がある。それ故、電子ビーム露光装置の設計にもこれに見合う超高精度の設計法が必要である。これに関し、当研究室では次項に述

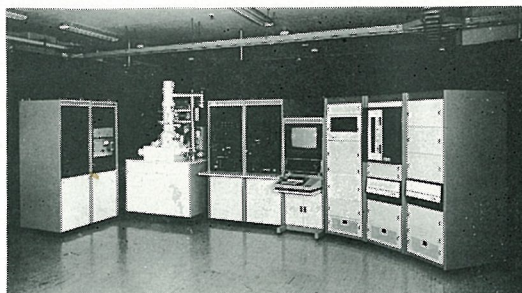


図2 JBX-6A 概観写真

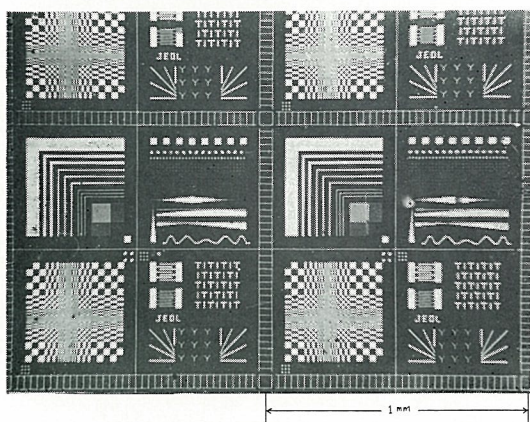


図3 JBX-6Aによる露光パターンの一例

べる計算機による数式処理という新しい手法を駆使して、電子ビーム系の設計基本公式を導出した。超 LSI は高度の総合技術を必要としており、光の波長の限界を克服する電子ビーム露光装置はその第1歩に過ぎない。しかしその第1歩のスタートを切る上で我々の研究は多少とも役立っているといささか自負している次第である。

2. 計算機による数式処理

はじめに

理工学の研究には(電子)計算機が非常に広く利用されてきたが、その利用法の大部分は数値計算である。計算機が未発達時代には数値計算のために対数表、三角関数表など各種の数表が広く使われていたが、最近では数値計算は計算機で手軽にできるので、これらの数表は姿を消してしまった。しかし理工学における数学の応用は決して数値計算がすべてではない。各種の方程式や公式などの数式を導出、変形する諸操作も極めて重要である。これらの数式に関する記号的、非数値的な諸操作は、今日でも数学の公式集などを参照しながら手計算でこつこつと紙の上で実行するのが通例である。しかし、このような数式に関する諸操作もその大部分は原理的には計算機でもできるはずのものであり、これを実行しようというのが(計算機による)数式処理である。

理研の現状

当研究室では、数年前から数式処理の研究に着手し、約2年前から HLISP-REDUCE II と呼ぶ

数式処理システムを理研の計算機(FACOM-230/75)を始め、国内の代表的大型計算機の上で働かせてきた。この数式処理システムは電子ビーム露光装置の設計に次のように威力を発揮した。露光装置中の電子ビームの形状は理想形から各種の要因により多少ずれて不完全な形をとり、このずれのことを電子幾何光学では収差と呼ぶ。露光装置の設計では装置の各部分の形状や寸法を変えた場合の収差を数値的に計算して、これの小さいものを選択するのであるが、このためにはまず収差を計算する公式が必要になる。ところが我々が研究を始めたときには、必要な収差公式はまだどこにもない型のものであった。そこでまず数式処理によって収差公式を導出したのである。その結果は図4のようなものが延々80頁も続く長い式となった。このように長い式を手計算で正しく求めることは容易なことではなく、少なくとも数ヶ月、悪くすると1~2年もの時間を要するであろう。ところが計算機による数式処理ではわずか数時間で結果が得られる。しかし、問題は収差公式

$$\begin{aligned}
 (A1) \quad k_s &= 1/[a^2 \bar{a}^2]_{z_i} \int_{z_0}^{z_i} \\
 &+ 3/64 i\eta \epsilon_1^2 / \epsilon_1^2 f''/(cF)^{1/2} a^2 \bar{a}^2 \\
 &- 1/8 i\eta \epsilon_1' / \epsilon_1 f''/(cF)^{1/2} a^2 \bar{a} \bar{a}' \\
 &- 1/32 i\eta \epsilon_1'' / \epsilon_1 f''/(cF)^{1/2} a^2 \bar{a}^2 \\
 &+ 3/64 i\eta \epsilon_1^2 F' f''/(cF)^{5/2} a^2 \bar{a}^2 \\
 &- 1/8 i\eta \epsilon_1 F' f''/(cF)^{3/2} a^2 \bar{a} \bar{a}' \\
 &+ 1/32 i\eta \epsilon_1' F' f''/(cF)^{3/2} a^2 \bar{a}^2 \\
 &+ i\eta \epsilon_2 F' f''/(cF)^{3/2} (\\
 &- 1/16 a^2 \bar{a} \bar{a}' \\
 &+ 1/16 a^2 \bar{a}^2 a') \\
 &- 1/8 i\eta \epsilon_2 F' f''/(cF)^{3/2} a^2 \bar{a}^2 \\
 &+ i\eta \epsilon_2 F' f''/(cF)^{3/2} (1/16 a^2 \bar{a} \bar{a}' \\
 &+ 1/16 a^2 \bar{a}^2 a') \\
 &- 1/16 i\eta \epsilon_2 F' f''/(cF)^{3/2} a^2 \bar{a}^2 \\
 &- 1/32 i\eta \epsilon_1 F' f''/(cF)^{3/2} a^2 \bar{a}^2
 \end{aligned}$$

図4 電子幾何光学上の収差公式の一部分

の導出だけではない。このように長い長い式に基づいて数値計算用のプログラムを、人手で誤りなく作成することも容易なことではない。それ故数式処理システムは公式を導出するのみならず、必要に応じて数値計算用のプログラムも自動的に作成するようになっている。(この機能がないと数式処理の効用は半減する。)このように数式処理を利用することにより我々は電子光学系設計システムを極めて迅速に作成することができた。諸外国では、電子幾何光学に数式処理を利用することはまだ広く行われるに至っていない。

我々が開発した数式処理システムは上記以外にも、理研所内では、モアレ計測法の基礎公式の導出、レーザー研究における三重共鳴効果の基礎公式の導出に利用され、又原子力研究所では、核融合プラズマ実験炉の設計公式の導出にも利用されている。特に後の2者の数式計算は人手でやったのでは1年で終る見込みはないと考えられ、計算機による数式処理でも数十時間を必要とする大規模な計算である。

歴史と諸外国の状況

不定積分を計算機で記号的に行う数式処理の先駆的研究がMITで20年近く前になされたが、数式処理が実際の理工学計算に利用されるようになってきたのはここ数年のことである。このように実用化が遅れた理由としては、不定積分、因数分解、有理式の簡約化など数式処理の基本操作を、計算機で効率よく実行する方法の研究に時間がかかったことと、計算機の性能、特に高速記憶の容量が数式処理には不十分であったことなどがあげられる。数式処理の研究の中心地は、米国ではMIT、ユタ大学、IBMワトソン研究所などであり、英国ではケンブリッジ大学である。数式処理の応用が最も進んでいる分野は量子電気力学である。理論物理学のこの分野の大規模な計算には数式処理を利用することがすでに常識となっている。ちなみに数式処理の第一人者である米国ユタ大学のハーン(Hearn)教授は、量子電気力学上の計算における必要性からこの道に入った人である。核融合・プラズマ物理の領域では、数式処理システムを整理して本格的利用を図るべし、という勧告が米国では採択されている。数式処理の応用は現在

その黎明期にある。その適用分野の急速な拡大は、我々の電子幾何光学におけるその絶大な効用からみても、疑う余地はない。

今後の課題(ソフトウェアとハードウェア)

数式処理の今後の研究開発の方向としてはソフトウェアの面では国際協力、ハードウェアの面では専用機の製作である。

数式処理の基本操作である、数式の簡約化、不定積分、多変数多項式の因数分解のいずれについても、これを効率よく実行するソフトウェアシステムを作ることは大事業であって、それぞれの世界的第一人者の知識を集積しなくては高性能の数式処理システムとはならない。米国ユタ大学のハーン教授はユタ大学、ハワイ大学、英国ケンブリッジ大学と理研の国際協力による数式処理ソフトウェアの共同開発を提案しており、同教授は昭和53年11月頃この研究連絡のため理研に招聘来日の予定である。開発分担はユタ大学はシステムの総合化、ハワイ大学が微分方程式積分方程式などの解法、ケンブリッジ大学が不定積分と因数分解、理研がハッシュ符号法による数式演算の高速化が予定されている。開発途上のソフトウェアを郵送していたのでは能率が悪いので、これを迅速に伝送するために衛星通信の利用を考えている。又研究連絡のため、筆者が本年6月短期にユタ大学を訪問し、又研究員のユタ大学長期派遣も考慮している。理研分担のハッシュ符号法とは、データ名からデータを高速に取り出す技法であるが、筆者らはこの技法を数式処理に応用すると、数式に関する諸演算が著しく高速化できることを見出し、1976年米国の学会に報告したところ、その成果はユタ大学とケンブリッジ大学の研究者たちによって高く評価され、国際共同研究が先方から提案されるに至った。

ハードウェアに関しては、今日の大型計算機は高速記憶の容量不足と、数式処理基本演算を直接実行するハードウェアが備わっていないという点で、数式処理にはあまり適していない。記憶容量不足の問題は、LSIと(電子ビーム露光法による)超LSIの進歩により記憶装置の価格は急速に低廉化しつつあるので将来の見通しは明るい。この記憶容量増大に対する要求は数式処理に限ら

ず、計算機の広範な応用分野に共通なものである。一方、数式処理基本演算の高速化は、数式処理と記号処理という特定の分野の専用計算機設計の問題といえる。この専用機は是非必要である。ちなみに、我々の数式処理システム HLISP-REDUCEの最初の利用例である三重共鳴効果の基本公式と核融合プラズマ炉の設計公式の導出には、理研の大型計算機級のものですすでに数十時間の計算時間を要している。数式処理を本格的に利用しようとする、計算時間がかかり過ぎて実行不能におちいるであろうことは目に見えている。

数式処理基本演算の一つとして、リスト処理と呼ばれ、データを“いもづる”式にたどる操作がある。最近 MIT でこのリスト処理をハードウェア化した CONS という計算機を試作したところ、従来の純ソフトウェアによるリスト処理と比較して、速度は約10倍になるというデータが得られている。当研究室では、FLATS と呼ぶ数式処理用計算機を設計し部分的試作を行っている。FLATS では上記のリスト処理をハードウェア化

する以外に、ハッシュ符号法、タグ（目印）付データの実行時検査による合理的な多倍長演算、仮想テープによるデータ管理などをハードウェア化する予定で、これを実現するハードウェア機構の提案とその性能と効果の予測などに関してすでに数編の論文を公刊している。その結果専用機の製作により数式処理の速度は少くとも十数倍以上という大幅の改善が期待される。ミニコンの IBM とも呼ばれる米国の DEC 社では、需要が30台以上あれば、MITの試作機 CONSを商用化する計画とのことであり、ユタ大学でも数式処理専用機の製作を考慮している。

おわりに

数式処理は理工学計算に対して世界的に大規模に利用されようという機運にあり、われわれも電子ビーム露光装置の設計をはじめとするいくつかの実例でその効用が極めて大きいことを実証することができた。次世代の理工学計算に備え、数式処理のソフトウェアと専用ハードウェアの研究を今後本格的に推進する所存である。

情報科学研究室
主任研究員 後藤英一

発明・考案リスト

昭和52年10月～昭和52年12月までに公開になったもの

公開番号	出願番号	発明・考案の名称
52-117193	51- 33879	粉粒体の粒度分布の測定方法
52-119508	51- 35358	スパッターイオンポンプの電極構造
52-120686	52- 46119	電子線露光方法（共願）
52-122083	51- 37641	電子線露光装置（共願）
52-124873	51- 41726	荷電粒子ビームの偏向方法
52-125432	52- 48973	結晶模様付金属材料の製造方法
52-125601	51- 57407	輸入木材の放射線による害虫防除方法
52-128054	51- 45171	電磁偏向コイル
52-130570	51- 48100	電子線露光装置（共願）
52-134000	51- 50578	オクトシル酸のアデニン誘導体及びその製造法
52-134322	51- 51187	円弧状の走査信号の発生方法
52-134795	51- 51803	フッ化物の質量分析における試料ガス導入装置の水分除去方法
52-135759	51- 52521	走査偏位検出法
52-145877	51- 62524	磁気分離装置
52-147977	51- 37642	電子線露光装置（共願）
52-148454	51- 65855	金属管突合せ溶接制御方法とその装置



『金門橋』

この写真は有名な金門橋とそれを通して見たサンフランシスコ市の遠景である。この山の上から見た、霧が太平洋側から低く海面を這ってくる

眺めは、誠に絶景である。1974年から1976年にかけて、この町から約60km、車で45分程南下したところにある町で、私は生活をした。そこで、日本から訪れた知人を必ずサンフランシスコに案内したので、いっばしの観光コース通になった気味だったものだった。この町はアイアンサイド警部の勤務している町としてよく知られているように、起伏の多い変化に富んだ町で、大都会にしては小ぢんまりまとまっています、好感が持てた。

或る年の初夏、知人が訪れたので、例によって一日、この町を見物に出掛けた。観光コースの途中にサンフランシスコ湾を眺望できる小高い丘があり、展望塔が建っている。そこからは、写真の Golden Gate Bridge を左に、二階建てで有名な Bay Bridge を右に、一望できる。そこで知人は塔に上り私は下で待つことにした。この場所は、いわゆる名所になっていて、アメリカ人の旅行者がよく立ち寄り、そばにも何人もの観光客がいた。そのうちの中年の、日本風に言えばスカッとしたり、いかにも南部あたりから来た感じのアメリカ人の夫婦が景色を眺めていたが、やおら近寄ってきて、あろうことか、『この両側の橋は、どちらが Golden Gate Bridge であるか?』と尋ねてきた。一瞬、戸惑いながらも、親切に教えて差し上げた。しかしよく考えるとどうも腑に落ちない。余程、私が世慣れたバタ臭い恰好をしていたのだろうか? 何となく笑話的ではなからうか?



このことほど、私にアメリカという国と日本との、国の成り立ちの違いを感じさせたことはなかった。例えば、東京タワーに上った日本人の観光客が、そばにいる青い眼で、鼻の高い、褐色の髪をした人に、『皇居はどっちの方角に見えるのですか?』と日本語で尋ねることがあるだろうか、と考えればその違いが納得できるであろう。腹の中での人種という意識はあるにせよ、とにかく黒い眼の、黒髪の、肌の黄色い我々の姿が異質のものではない、ということは(勿論のこと、アジア系の多いカリフォルニア州であるからということもあるだろうが。)そういう国に照らして日本という国を冷静に知る上に非常に役に立った。

近年は、数年間を外国で研究生活したことがそのまま研究上の収獲になるという世代ではない。私にはむしろ、昼休みによく町の体育館に行き、白人黒人いり混じった中に入って一緒にバスケットボールの試合をやりながら受けた、体臭を感じさせる圧迫感に、なまなましい印象を強く感ずる。それが恐らく私自身に強い影響を与えているに違いなく、何らかの形で研究をする態度に変革をもたらすであろうと信じている。

抗生物質研究室
研究員 浦本昌和