

知能深絞り金型の研究

東京農工大学 工学部 機械システム工学科

助教授 桑原利彦

(平成3年度研究開発助成 AF-91019)

1. 研究の背景

自動車ボディパネルに代表される3次元異形薄板製品の深絞り成形では、しわや割れのない最終製品を得るため、しわ押え力やビード張力の調整に多大の労力と時間を要し、製品納期の短縮化を妨げる要因の一つとなっている。さらに近年の製品形状の高精度化と金型技能者の不足は、金型製作時間およびコストの低減を困難にしつつあり、しわ押え力やビード張力の制御技術を取り入れた金型技術の革新が熱望されている。

しわ押え力をポンチ行程と連動させて制御する方式は文献1)~4)に報告されている。これらの方法では、比較的広い範囲のフランジ流入を制御することはできるが、金型やプレス構造が複雑になる、局所的な張力制御ができない、等の短所がある。

素板張力を局所的に制御するには、通常、ビードが用いられる。しかしながら、通常のビードは金型に彫り込まれるため、深絞り工程中のビード張力は一定である。これに対し、ビード張力をポンチ行程とともに変化させる方式が文献5)、6)で提案されているが、それらを実加工に応用した研究報告はない。

究極的な金型とは、成形工程中に発生するであろう、もしくは発生しつつある容器欠陥を金型自身が感知し、みずから素板の流動を制御して最適な材料流動を創製する機能を備えた「知能金型」であろう。

そこで本研究では、「知能金型」をハード(機構)の面から実現するための基礎研究として、ビード張力を局所的かつ実時間で制御する機能を備えた「ビード張力自在制御金型」を提案する(2節参照)。そしてその適用例として、

- ・円弧曲げ成形におけるスプリングバック抑制効果、
- ・L字形容器の深絞り成形における成形性ならびに形状精度の向上効果、
- ・斜円錐台容器の深絞り成形における容器側壁のしわ除去効果

を確認し、「知能金型」実現のための基礎的知見を得たので報告する。

2. 油圧制御式しごきビードの機構と張力特性

提案した油圧制御式しごきビードの構造を図1に示す。

油圧力は油圧ピストンならびにピンを介してしごきビードに伝達される。これによりビードの先端が素板に押し付けられて、局所的なしごき張力を素板に発生させることができる。

提案した油圧制御式しごきビードの基本特性を調べるために、ビード押し力とビード張力の関係を測定した。供試材はアルミニウム合金板A5182-O(板厚 $t=1.0\text{mm}$)、冷間圧延鋼板SPCEN($t=0.5\text{mm}$)、ステンレス鋼板SUS304($t=0.48\text{mm}$)の3種類で、全て幅25mmの帯板である。潤滑剤は、SPCENにはマシン油#56を、SUS304およびA5182-OにはジョンソンワックスNo.700の3倍の希釈水溶液を使用した。帯板としわ押え板の間にはスペーサ(板厚+0.04mm)をはさみ、定すきまを与えた。引抜き方向は材料の圧延方向、引抜き速さは約16mm/sである。

帯板の単位幅当たりのビード押し力 P と発生するビード張力 T (公称引張応力)の関係を図2に示す。図中の曲線は、実験点の最小自乗近似曲線である。ビード張力はビード押し力の増加に伴い、なめらかに増加することがわかる。

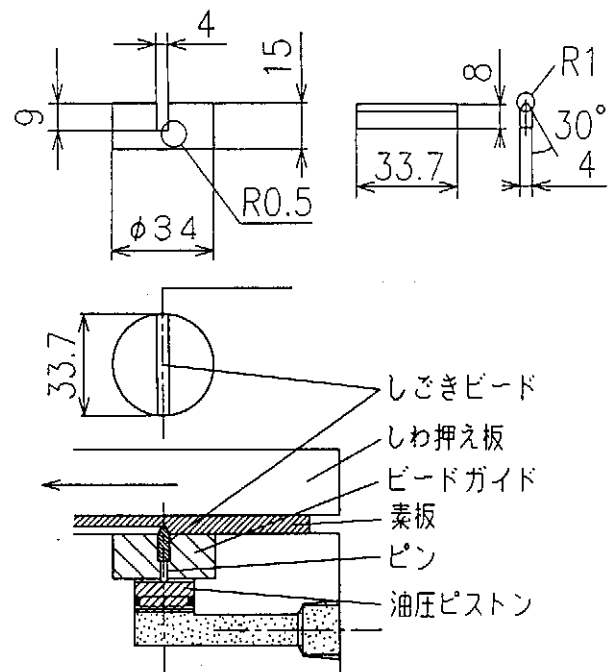


図1 油圧制御式しごきビードの構造

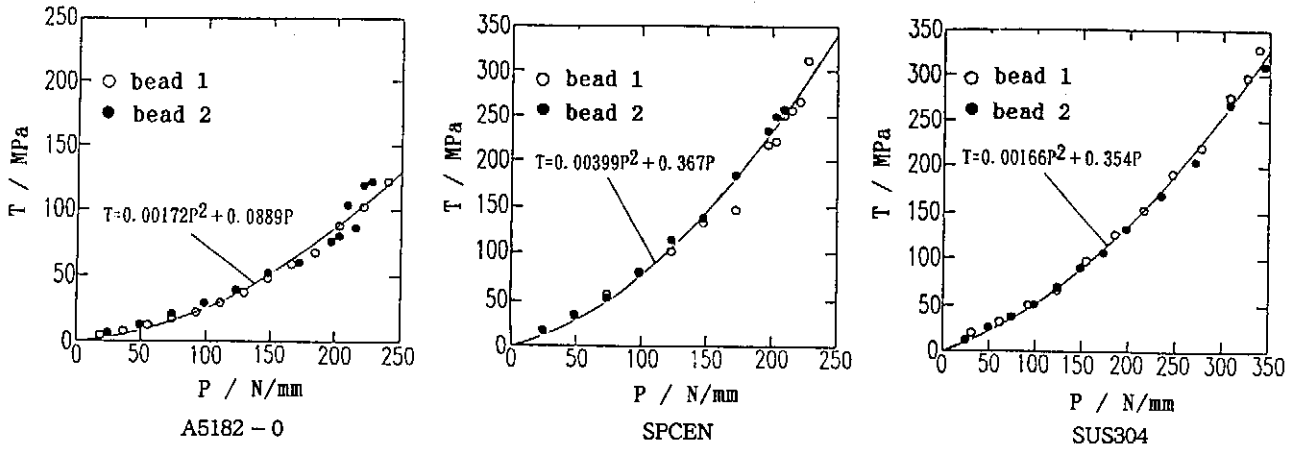


図2 帯板単位幅当たりのビード押し力Pとビード張力T（公称引張応力）の関係（板幅25mm）

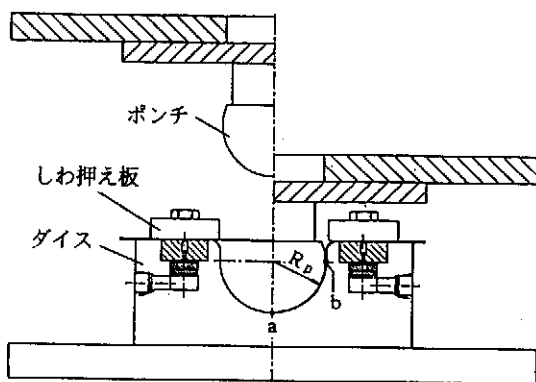


図3 円弧曲げダイスによる引張曲げ実験装置

すなわち本しごきビードを用いれば、油圧を制御してビード押し力を変化させることができ、ビード張力を容易に制御できることが確認された。

3. 円弧曲げダイスによる引張曲げ実験

（ビード張力自在制御金型の適用実験：その1）

3・1 実験方法

実験装置の概略を図3に示す。しごきビード部の構造は図1と全く同一である。ポンチの円弧半径（曲げ半径） R_p は37.5mm、ダイス円弧の内径は38.5mm、ダイス肩半径 r_d は7mmである。板押えとダイスの間は定すきま（板厚+0.04mm）に保たれている。帯板をその間に挿入し、油圧をかけてビードを帯板に押しつけたのちポンチを押し込み、円弧成形を行う。

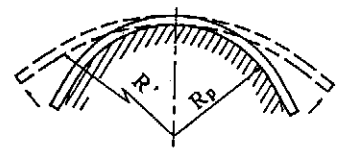
スプリングバック量は次式で定義する（図4付図参照）。

$$\Delta R / R_p = (R' - R_p) / R_p \quad (1)$$

ここで、 R' は帯板の除荷後の曲率半径である。

3・2 実験結果と考察

ビード張力（引張強さ σ_B で無次元化している）を変化



$$\Delta R / R_p = (R' - R_p) / R_p$$

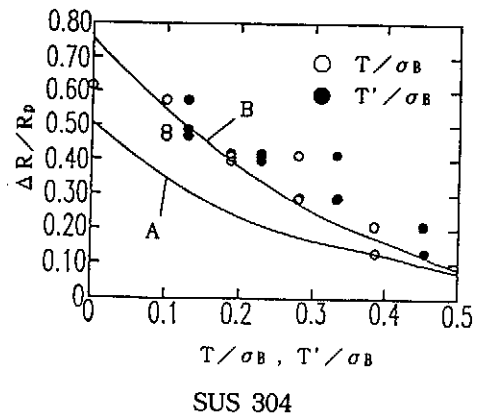
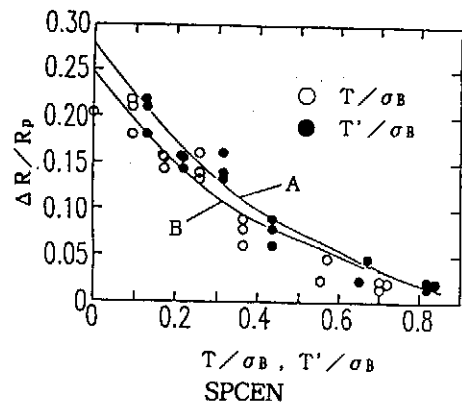


図4 ビード張力Tがスプリングバック量 $\Delta R / R_p$ に及ぼす影響

させた場合のスプリングバック量 $\Delta R / R_p$ の測定結果を図4に示す。実線は計算値（計算の詳細は文献7）参照、測定値○は、油圧の計測値と図2の校正曲線から算定されたビード張力Tをそのまま記載した場合、測定値●は、ダイ

ス肩部における摩擦と曲げ戻し変形による張力増分を考慮した場合である。

いずれの材料においても、曲げと摩擦の影響を考慮した測定値●は計算値とよい一致を示している。このことより、提案したビード張力自在制御金型は、スプリングバックの抑制に有効であることが立証された。さらに、図2の校正曲線と筆者らが開発したスプリングバック解析プログラム⁸⁾を併用すれば、油圧の計測値より、製品のスプリングバック量を精度よく予測することも可能である。

4. L字形容器の深絞り実験

(ビード張力自在制御金型の適用実験：その2)

4.1 実験方法

ポンチ形状としわ押え板の上面図を図5に示す。ポンチ肩半径は5mm、ダイス肩半径は10mmである。しごきビード部の構造は図1と全く同一である。凹部のしごきビードAからは、凹部コーナ底部に発生する肉余り(以下、肉余り)の除去効果が、直辺部のしごきビードBからは側壁部のべ

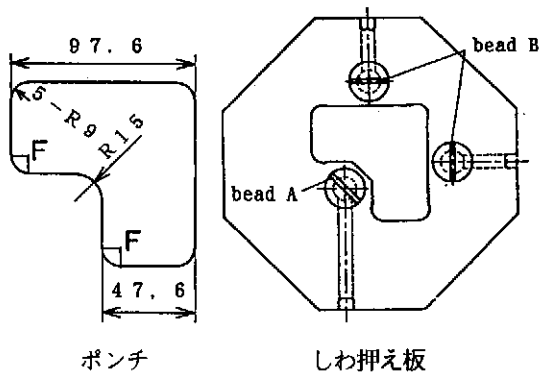


図5 L字形容器の深絞り実験用ポンチとダイス

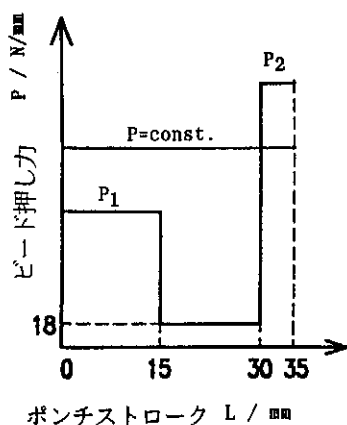


図6 ビード押し力の最適制御パターン

この除去効果が期待できる。

しごきビードの油圧は、ポンチストロークの関数として、サーボ弁(日本ムーフ製J770-100、最大許容油圧=22MPa)によりコンピュータ制御される。本報ではビードA、Bに作用する油圧は同一に設定した。素板材質および実験条件の詳細は文献7)を参照されたい。

4.2 実験結果と考察

予備実験の結果、SPCENの場合は、図6に示すビード押し力制御パターンにおいて、ポンチ肩破断および容器底部の肉余りが効果的に抑制されることが判明した。そこで、帯板単位幅当たりの初期押し力 P_1 および後期押し力 P_2 を、各々18、84、168N/mmの3通りに変化させて、それらの組み合わせが容器の形状精度ならびに破断に及ぼす影響を検証した。

容器底部形状の測定結果を図7に示す。 P_1 を高くすると中央部の凸部が抑制され曲率変化が小さくなるが、高すぎると凹みが形成される。一方 P_2 を高くすると全体的な膨らみが抑制される。 P_2 の作用時間は P_1 よりも短い、凸部の低減効果は P_1 よりも大である。これよりビード張力を制御することにより、より効果的に肉余りが抑制されることが確認された。

このほか、本しごきビードは、ポンチ肩破断危険部の板厚ひずみの低減効果および容器側壁部の形状精度の向上効果をもたらすことが確認されている。詳細は文献7)を参照されたい。

5. 斜円錐台容器の深絞り実験

(ビード張力自在制御金型の適用実験：その3)

5.1 実験方法

使用したポンチ寸法を図8(a)に示す。前部半径30mm、

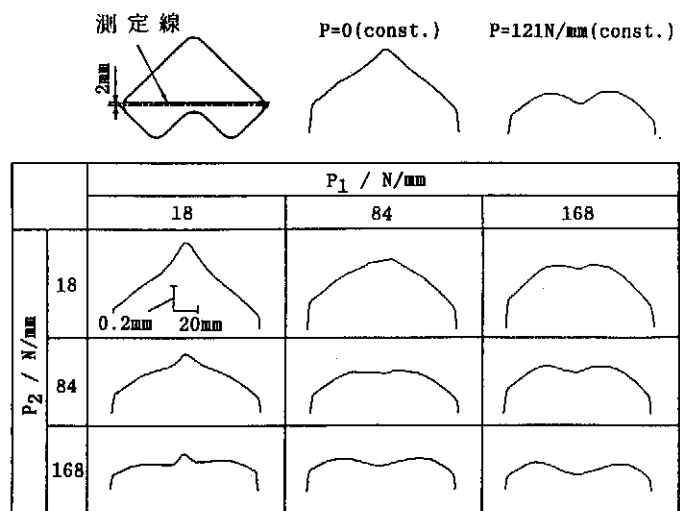


図7 ビード押し力のパターンが容器底部形状に及ぼす影響

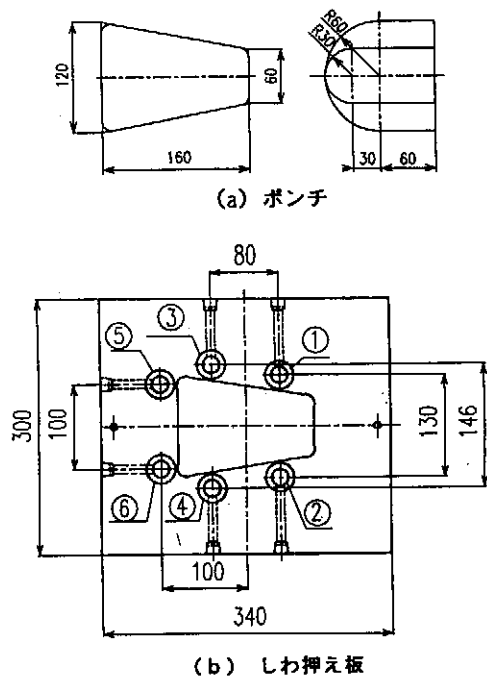


図8 斜円錐台容器の深絞り実験用工具

後部半径60mm、長さ160mmの斜円錐台形状である。ポンチ角部丸味半径は10mm、ダイ肩部丸味半径は10mm、ポンチとダイのクリアランスは1.2mmである。

しわ押え板の詳細を図8 (b) に示す。しごきビードは、容器側面に4個 (①②③④)、容器後部に2個 (⑤、⑥)、計6個が組み込まれている。

供試材はアルミニウム合金板A5052-O (板厚1mm、素板寸法240×210mm) と冷間圧延鋼板 (板厚0.77mm、素板寸法245×210mm) である。潤滑剤は、A5052にはジョンソンワックス#700の3倍希釈液を、SPCEにはマシン油#56を使用した。容器は、A5052では39.2kN、SPCEでは49.0kNの定圧しわ押さえ方式で成形し、絞り深さは一律52mmとした。詳細は文献9)を参照されたい。

5・2 実験結果と考察

しわは容器後端部の両側面に発生した。深絞り行程中のビード押し力を一定に保った場合について、しわの写真と形状測定器による計測結果の一例を図9に示す。ビード押し力が増加するほどしわが減り、最大許容ビード押し力 (A5052では6.15kN、SPCEでは7.69kN) では、しわはほ

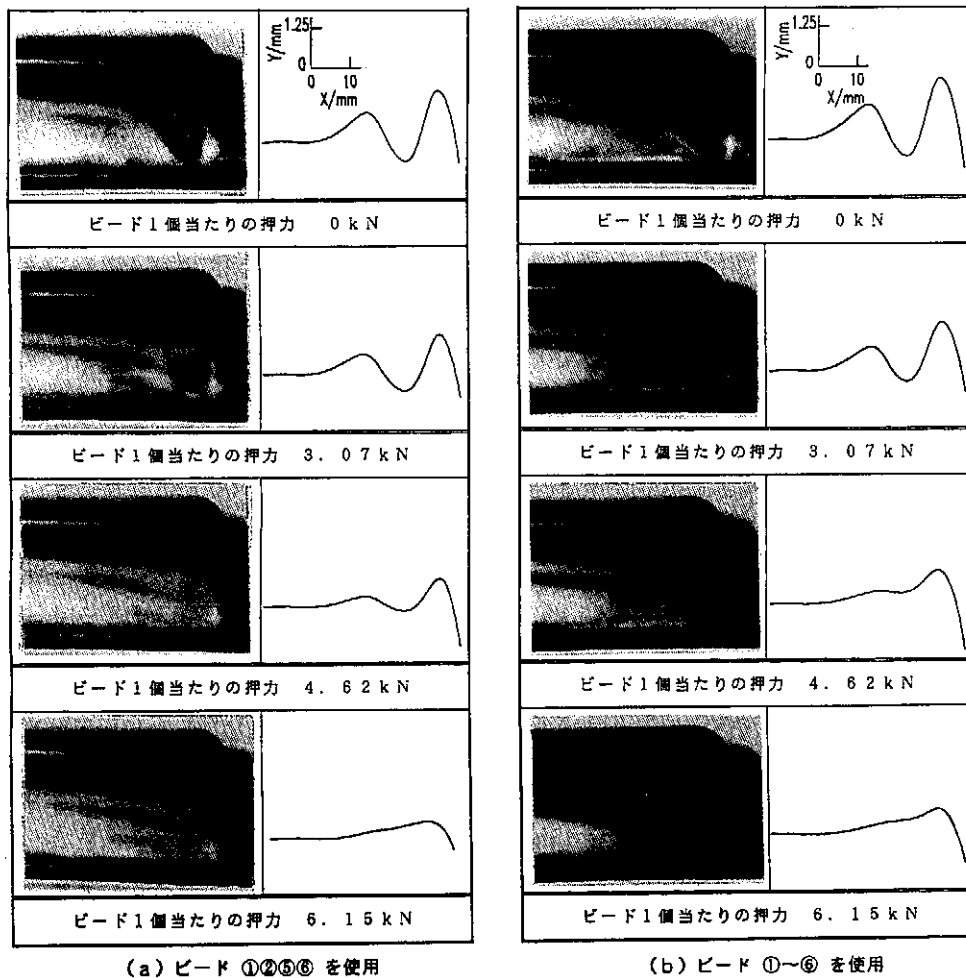


図9 油圧制御式しごきビードのしわ抑制効果 (A5052)
(しわ形状はフランジ面から高さ14mmの位置を水平方向に測定)

ば除去されている。

ビード張力の作用位置としわ抑制効果の関係については、ビード押し力がある値以下では（A5052では4.62kN以下、SPCEでは6.15kN以下）、6個のしごきビード（①～⑥）を使用した方が残留しわは小さいが（図9b）、最大許容ビード押し力では、むしろ①②⑤⑥の4ヶ所にのみビード張力を作用させた方が（図9a）、しわが小さくなることがわかった。容器側面の4ヶ所①～④にのみビード張力を作用させた場合はしわ抑制にあまり効果がなかったことから、しわの除去には⑤⑥の位置にビード張力を作用させることがより効果的と言える。

6. 結 言

油圧制御式しごきビードを組み込み、局所的かつ実時間でビード張力を制御する機能を備えた「ビード張力自在制御金型」を考案した。そしてしごきビードを、下記の成形用金型に組み込んで成形実験を行った。

- ・円弧ポンチによる引張曲げ成形
- ・L字形容器の深絞り成形
- ・斜円錐台容器の深絞り成形

その結果、本しごきビードは、スプリングバックの低減、深絞り容器の成形性ならびに形状精度の向上、容器側壁のしわの除去に有効であることが立証され、「知能金型」を実現するための基礎的知見を得ることができた。また本しごきビードを用いてビード張力を制御する場合は、しわ押し力全体を変化させる必要がないので、省エネルギーの観点からも有利なプレス加工工程を構築できる。

7. 今後の課題

本研究により、金型自身に素板の流動を制御する機能を持たせることが出来るようになった。今後の目標は、素板の変形挙動（しわ、ゆがみ、板厚減少など）をセンシングもしくは予測する機能を金型に持たせ、その情報をもとに、しごきビードによる素板の流動制御を行えるようなシステムを構築することである。そのための具体的な方法としては、

- 1) 金型内に素板の変形挙動を検知するセンサーを組み込む、
- 2) 有限要素法等により素板の変形挙動の予測シミュレーションを行う、

方法がある。1) については、しわや局所的な板厚減少等を

検知でき、しかも金型内に組み込める程度に微小なセンサーを開発する必要がある。電子部品などの不良品検知に使用されるマイクロスコープなどが応用できる可能性もある。2) については、3次元の板成形有限要素法解析が実用的な計算速度で出来るようになれば、有望な手法となる。

謝 辞

本研究遂行にあたり貴重な御示唆を賜った名古屋大学神馬 敬教授、しごきビードの設計・製作にあたり御助言・御援助を賜ったアイダエンジニアリング株式会社技術開発本部小松勇氏、斜円錐台金型の設計・製作にあたり御助言・御援助を賜った日産自動車株式会社技術開発センター高橋進博士、文献3)を御教示下されたアイダエンジニアリング株式会社顧問岩松真之氏、可動ビード⁵⁾の出典について御教示下された東京都立大学名誉教授宮川松男先生、文献6)を頂戴したトヨタ自動車株式会社伊倉真氏に厚く御礼申し上げます。また供試材を御提供下された川崎製鉄株式会社、スカイアルミニウム株式会社、日本金属工業株式会社に御礼申し上げます。本研究は天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成ならびに文部省科学研究費補助金（奨励研究（A））の援助を受けました。あわせて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 真鍋健一・添田健太郎・長島敏幸・西村 尚：塑性と加工、33-375（1992）、423.
- 2) 村田篤信・恵比根美明・松居正夫：塑性と加工、33-375（1992）、411.
- 3) Hoffmann, H. & Schneider, F.: Werkstatt u. Betrieb, 122-5（1989）、363.
- 4) 氏原 新・広瀬洋三：塑性と加工、33-375（1992）、373.
- 5) プレス加工ノウハウ編集委員会編：プレス加工ノウハウ100題（改訂版）、（1981）、168、日刊工業新聞社.
- 6) 特開平3-71932（2）.
- 7) 桑原利彦・増田大助・畔柳 遵：塑性と加工、35-402（1994）、868-874.
- 8) 桑原利彦・高橋 進・秋山浩二・伊藤健治・宮下洋介：塑性と加工、36-410（1995）、203.
- 9) 桑原利彦・小林彰久・高橋進：第45回塑性加工連合講演会論文集、（1994）、351-354.