第８回建設マネジメント問題に関する
研究発表・討論会講演集　1990年12月

（Ⅲ－３）

# ＡＩ利用によるシールドの姿勢制御エキスパートシステムと施工実績

Shield Control System Using AI and Its Application

フジタ工業㈱　正員○入江洋之[1)]
正員　和久昭正[2)]
佐藤　清[3)]
加藤　豪[4)]

By Hiroyuki IRIE, Akimasa WAKU, Kiyosi SATOH, Takesi KATOH

近年、都市の過密化にともないシールド工事は、大深度化・大断面化し、また、長距離化の傾向にある。また、施工精度の向上や、高速度施工の要求も高まっている。その一方で、若者の建設業離れ現象による技術者や熟練工の不足、さらには作業員の高齢化が深刻な問題になりつつある。これらの問題を一挙に解消すべく、各方面でシールド工事の全自動化に関する研究が盛んに進められている。本研究は、この全自動化に関する研究のうち、ＡＩ（人工知能）利用によるシールドの姿勢制御に関するエキスパートシステムの開発を行ったものである。

このほど、本システムを２件の工事に適用し、掘進を行ったところ良好な結果が得られたので、ここに報告する。

［キーワード］施工支援、エキスパートシステム、シールド工法、測量

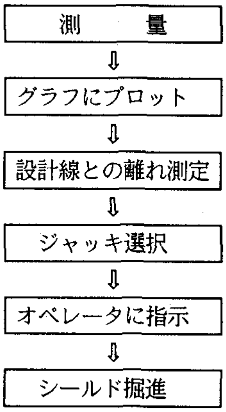
## １．はじめに

シールド工事における最も重要な管理項目の一つにシールド機の姿勢制御がある。

このシールド機の姿勢制御は、従来、土木技術者がシールド掘進ごとに測量を行ない、その結果からシールドジャッキのパターンを選定し、姿勢を制御するという方法がとられていた。図－１に、従来の姿勢制御法のフローチャートを示す。

ジャッキパターンは、例えば、ジャッキ本数が１０本の場合の組み合わせの数は、約１０００通りになり、ジャッキ本数が２０本になると組み合わせの数は約１００万通りにもなる。ちなみに、本報告の事例ではジャッキ本数が１４本であるので、その組み合わせの数は１７，０００通り近くになる。このような天文学的数字の組み合わせの中から、最適ジャッキパターンを瞬時に選定するという作業は、従来から、熟練技術者の経験に基づく判断によって行なわれていた。

しかし、現実は、熟練技術者が不足の傾向にあり、しかも、施工環境的に厳しい条件下での工事が増大してきており、加えて、施工精度の面でも要求される水準が高くなってきている。




図－１　従来の姿勢制御法

われわれは、これらの問題を解決する対策として、ＡＩ（人工知能）利用によるシールドの姿勢制御エキスパートシステムの開発に取り組んだ。

本報文は、そのシステムの概要と、システムを適用して施工した工事の実績について報告するものである。

1)関東支店土木工事部　課長　03-5474-3189
2)技術研究所土木施工研究室長　045-591-3944
3)本社イチケン所長　03-253-3694
4)関東支店土木工事部花見川作業所長0472-57-5921

2．自動シールドジャッキ選択システム

(1) システムの概要

従来、シールド機の姿勢は、エキスパートの経験と勘によって制御されていた。本システムは、このエキスパートの知識をワークステーション上でシステム化したもので、その概要は次のとおりである。

まず、伝送されてくる測量データを収集し、これをＡＩの手法を用いて解析する。そして、その結果に基づき、次の工程で計画線に乗せるための最適なルートを確信度にあわせて決定する。次に、そのルートに適合させるために必要なトルクを算定し、シールドジャッキの選択を行う。

なお、このジャッキパターンの選択作業を短時間で処理するために、ＡＩと統計的検定を採用している。

掘進終了後、データチェックが行われ、データベースの改定および増進がなされる。このため、掘進に伴って、データベースの充実と学習がなされ、知識ベースとともに利用することにより、精度が向上していくという特長を有する。

(2) エキスパートシステム

今回使用したシールドの自動姿勢制御エキスパートシステムは、米国のオーラシステム社との共同で開発したものである。ちなみに、このオーラ社は、ＮＡＳＡの宇宙開発に関するエキスパートシステムを手掛けている会社である。

(3) ワークステーション

パソコンレベルのコンピュタでは、処理速度、容量および言語に問題があるため、高速並列処理が可能なＥＷＳ（SUN-４）を導入した。

(4) 統計処理

シールド機は水平、垂直方向のトルク量によって、ターン（移動）する。このシステムは、ターンとトルクのデータをリアルタイムに取り込みながら最適ジャッキパターンを算出する。この算出に際しては、回帰分析手法を用いて、その有位性を検定する。また、シールド機は一般的に「くせ」と呼ばれる機械の特異性を持っている。これも統計的検定を行ってその有位性をチェックしている。

3．システムの構成

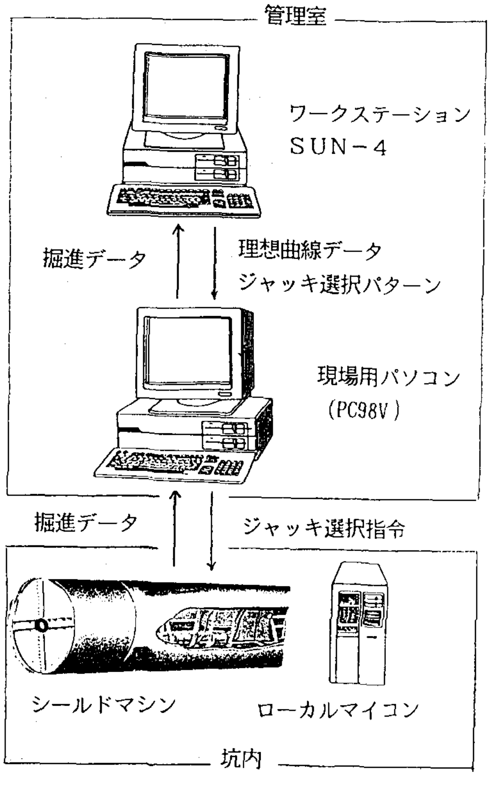
本システムの構成を図－２に、フローチャートを図－３に示す。

(1) センサーおよびシステム

①センサー機構としては、ジャイロスコープ、レベル計、ジャッキストローク計、ピッチング計、推力（ジャッキ圧）計があり、これらのデータより自己位置及び姿勢が検出される。

②シールド機後方にローカルマイコンが設置されており、中央制御室パソコンとの間のデータ伝送が行われる。

③運転席のディスプレーにシールド機の現位置と使用ジャッキパターンが表示されるため、オペレーターは姿勢制御状況を確認しながら作業を進めることができる。




図－２　システム構成図

(2) 中央制御室パソコンの主な機能

①測量データを取り込みワークステーションに伝送する。

②ワークステーションから送られてくるジャッキ選択パターンを、シールド機ローカルマイコンに伝送する。

③各種データを、管理者に分かり易くディスプレーにより表示し、その結果をプリントアウトして記録する。

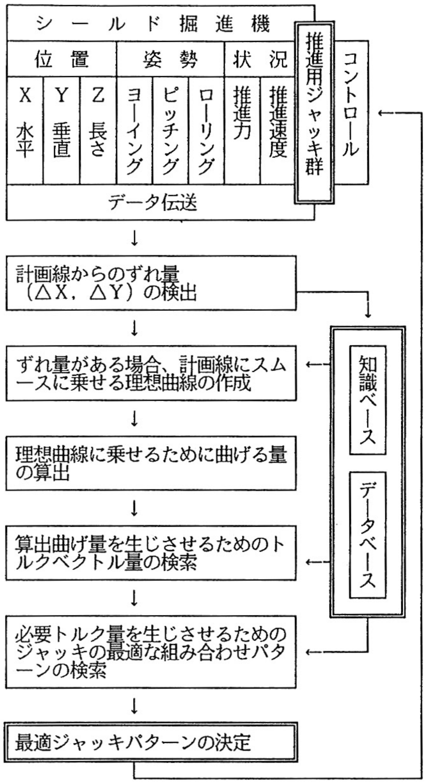
(3) ワークステーションの主な機能

①中央制御室パソコンを通じて伝送されてくる測量データおよび状況データを解析する。この解析結果に基づき、次の工程で計画線に乗せるための最適なルートの設定、すなわち理想曲線の作成を行う。

②シールド機を設定された理想曲線に従って掘進させるために必要なピッチング、ヨーイング量を算定する。この結果から、シールド機に与えるトルクを算定し、知識ベースに基づきジャッキ選択を行う。

③ジャッキ選択パターンを中央制御室のパソコンに伝送する。

④掘進中、データチェックを行い、自動的にデータベースの構築ならびにルールの改定を行う。




図－３　システムフローチャート

写真－１　中央制御室

（ワークステーションとパソコン）

4．実施工への適用

本システムを２件の工事に適用したが、その詳細は下記の通りである。

(1) 東京都下水道局東金町３号雨水幹線工事

（以下、金町工事という）

a) 工事概要

①工期：昭和６３年９月～平成２年３月

②工法：泥水シールド工法

③工事規模：

シールド機：外径３，９５０mm
中折れ機構１段、
シールドジャッキ本数１４本

仕上がり内径：　３，０００mm

鉄筋コンクリートセグメント

外径　：３．８００mm，幅９００mm

延長　：６４６，７m

線形　：曲線率１５％

（このうち２１９mに本システムを適用した）

土かぶり　：約８．０m

地質：中位の砂質土、中位の粘性土、

地下水圧：０．８kg/cm²

b) システムの構築

①知識ベースの修得

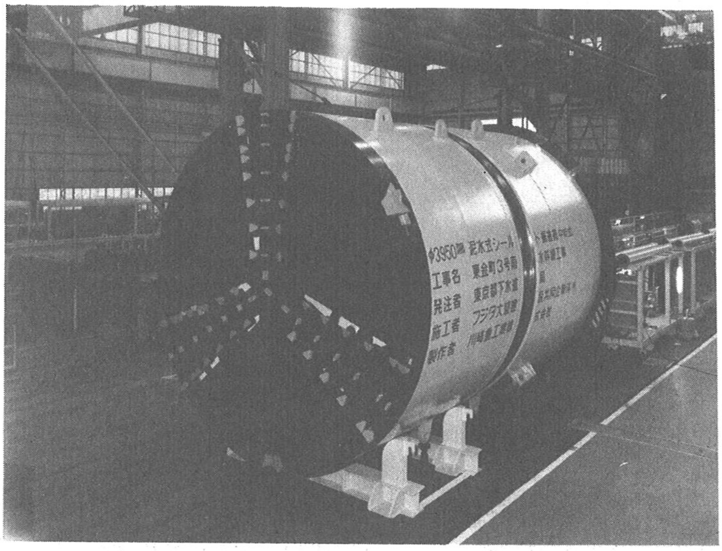
ＡＩによるエキスパートシステムの知識ベースの構築を行なうために、アンケート方式により、専門知識の修得作業が行なわれた。回答は、フジタ工業のシールド技術者が行った。質問件数は、５０件で質問の内容は、主に蛇行修正や曲線部の施工方法について多く設定された。

②システムの修正

システムを稼動させ始めた段階で、シールド技術者の判断と異なる動きをする場合や、方向修正作業がうまく作動しない場合およびシステムが使いづらい点などを洗い出し、システムの修正を行なった。

c) センサー

ジャイロスコープは、トンネル用姿勢検出装置（東京計器製TMG22-B)を使用した。その精度は方位角静定精度で０．０５度である。また、レベルは水位計により検出し、不動点は１５０ｍごとに盛り変えた。検出位置は、シールド機の前胴部とした。



写真－２　φ3,950mm 泥水式シールド機
（中折れ式）

d) 施工結果

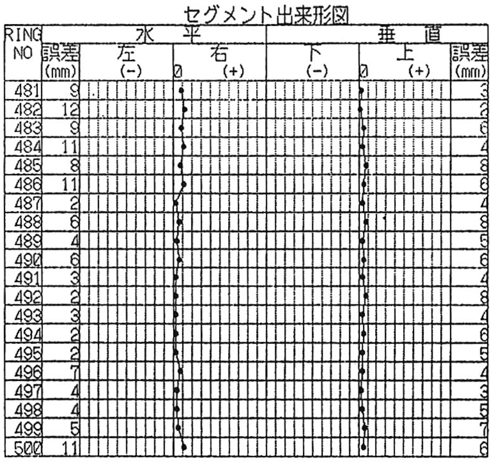
a)のような施工条件のもとでシステムを稼動させ、シールド掘進を行なったが、その実施状況は、下記の通りであった。

①システムの実施当初は、ワークステーションから発せられるジャッキパターンとオペレータの選択するジャッキパターンとの間にかなりの差異が見られた。この原因は、ワークステーションの設定したルートは最短距離で設計線に乗せるべく、ジャッキを選択しているのに対し、オペレータはカーブのＥＣや到達点をにらんでルートを設定し、ジャッキ選択を行っていたためであった。

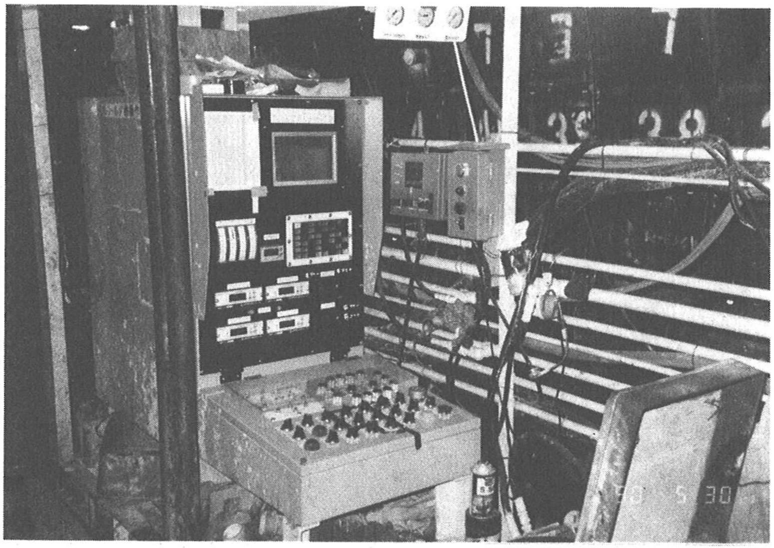
以後、この知識を加えた。

②データの採取間隔、および、演算結果から発せられるジャッキパターンの指令間隔は、各々９秒間隔とした。このため、ジャッキパターン変更の切り替えが素早く実行できるように、OFF のジャッキでもスプレッダーが常にセグメントに接している状態でシールド機の運転を行った。その結果、蛇行修正の即応性が高まり、施工精度の向上を図ることができた。

③施工結果として、セグメントの出来形を図－４に示す。この図より、設計線から20mm以内という非常に良い精度で掘進できたことが分かる。




図－４　金町工事実測結果図



写真－３　シールド運転席

(2) 千葉県印旛沼流域下水道管渠築造工事(8901 工区)（以下、印旛沼工事という）

a) 工事概要

①工期：平成元年１０月〜平成２年１２月

②工法：泥水シールド工法

③工事規模：

シールド機外形３，９５０mm

中折れ機構１段、

シールドジャッキ１４本

仕上がり内径　３，０００mm

セグメント：鋼製セグメント

（一般部）外径φ３，８００mm，幅９００mm

（曲線部）外径φ３，８００mm，幅４５０mm

線形：曲線部５か所

（曲線半径Ｒ＝６０ｍ，３００ｍ，３２０ｍ，４００ｍ，５００ｍ）

延長：１０９５ｍ

土かぶり：約２６〜６ｍ

地質　　：中位の砂質土、

地下水圧：１．２kg/cm²

b) システムの構築

本工事では、半径６０ｍの急曲線における施工にも適用するため、金町工事で使用したシステムの改良を図った。主な改良内容は下記の通りである。

①修正偏角を統計処理するようにした。

この修正偏角は、掘進状況画面においてシールド機を進める予想曲線（点線）と実際の向き（実線）との差で、垂直または水平方向のそれぞれの画面の下に数値表示される。

②シールド機の横滑りを考慮して、あらかじめその値を修正偏角に加えるようにした。

③急曲線施工に対処するために、コピーカッターに関する項目の追加を行なった。内容は

ⓐ中折れ角度が与えられたときにコピーカッター長を表示する。

ⓑ中折れ機構使用時に、トルクとターンの関係式を補正する。

ⓒ曲がり量不足時にコピーカッターを伸ばす指示をする。

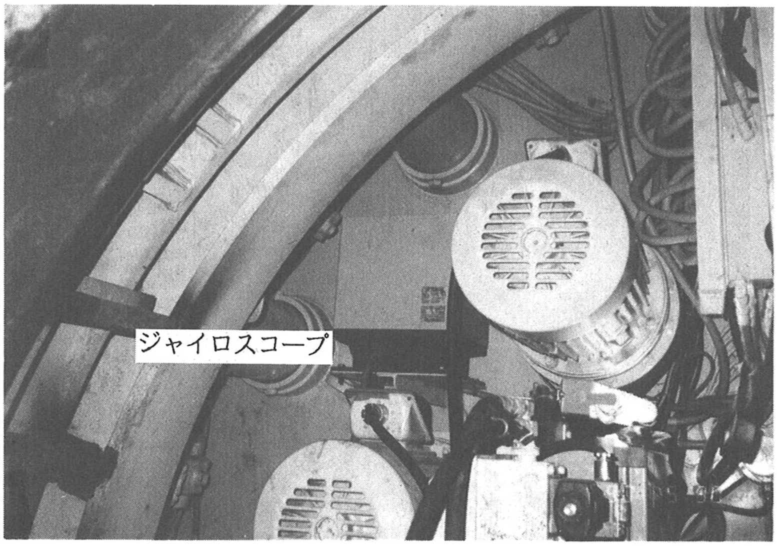
ⓓコピーカッター書式入力画面の追加。

などである。

④センサー精度項目の導入を行なった。これは、センサーの異常値を認識することで、誤ったシステムの稼動を防ぐためである。

c) センサー

ジャイロスコープおよび水位計は、金町工事と同様の機種を使用した。




写真－４　ジャイロスコープ

d) 施工結果

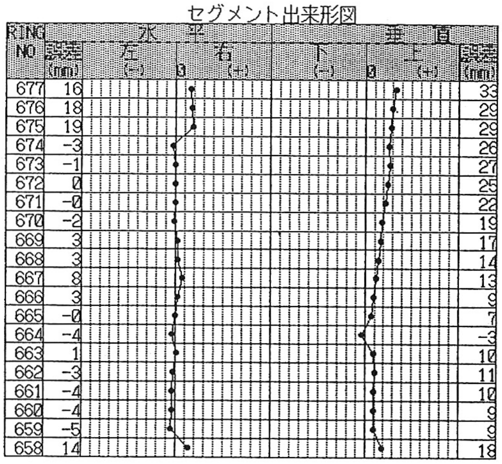
①修正偏角の算定に加えるシールド機の滑り量について、当初、過去の古いデータも平等に処理していたため、徐々に自動制御の誤差が大きくなっていく傾向を示した。そこで、この対策として、従来、新しいデータほど優先するように”重み”を付けるような処置を行なっていたが、さらに、特殊なフィルター処理を加えた。

②曲線区間をオートモードで掘進中に、シールド機の方位角が最大許容曲げ角度近くになると、ジャッキパターンが頻繁に変化した。これを防ぐためにシールド機の方位角が最大許容曲げ角度を越えた場合には、最大許容曲げ角度をそれまでの値から１０％少なくした値を許容値として制御を行なうようにシステムを変更した。シールド機方位角が新しい許容値より小さくなった場合には、最初の最大許容曲げ角度に戻すようにした。この調整を行なった結果、許容値近くでの頻繁に発生したジャッキ変化がなくなった。

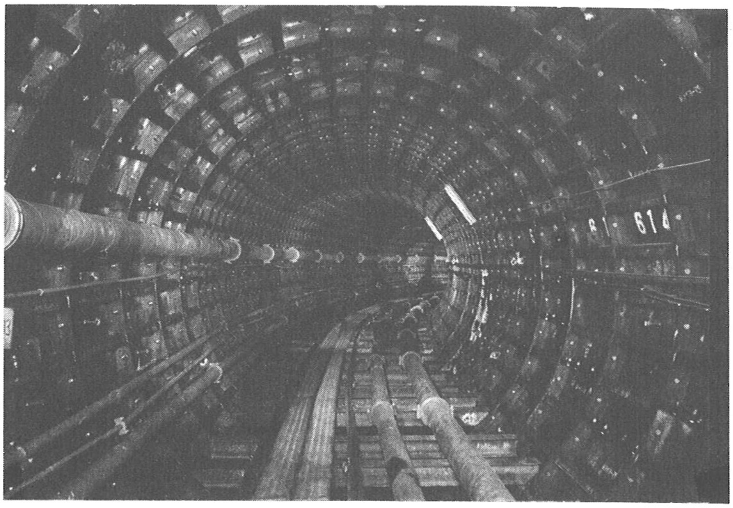
③掘進中、時折、誤差が広がる傾向を示すときがあった。これを防ぐために、システム自身で２５cmおきに垂直方向と水平方向のシールド機の誤差の広がりをチェックさせ、誤差が広がる場合には、0.7本分のジャッキを加えることをＡＩに実行させた。

④曲線半径Ｒ＝６０ｍの施工時に、シールド機の水平位置の推測値にバラツキが発生した。その原因は、シールド機の回転中心位置（腕の長さ）の設定が適正値でなかったためである。この対策として、各種ケースの試算を行なった結果、腕の長さは、シールド機先端から１，３００mmが妥当であるとの結論を得た。この値で、施工を進めたところ良好な結果が得られるようになった。

⑤曲線半径Ｒ＝６０ｍの施工時に、１方分光学測量のデータを入力しないで施工を進めるという試みを行なった。その結果は、２６mm程度の誤差に納まった。このことから、急曲線でも１方分（夜勤）の光学測量を省略しても問題ないと思われた。




図−５　印旛沼工事実測結果図



写真−５　曲線半径６０ｍ部分の施工状況

## ５．システムの施工実績に対する評価と今後の課題

### (1) 施工実績に対する評価

①金町工事でのシステムのバージョンでは、曲線施工に対し、若干の不安があったが、印旛沼工事において、いくつかの改良を加えて施工したところ、ほぼ満足の得られる結果となった。

②水位計に関する精度は、十分満足の得られるものであった。光学測量との差は±５㎜程度の範囲である。

③ジャイロセンサー自体の精度は、ほぼ満足の行くもので、その誤差は実用上問題とは成らなかった。

④光学測量によるチェックは、各種センサーの精度が確信できる場合、１方分省略しても、実施工には支障を来さないものと思われる。

⑤本システムの中折れ状態での使用状況（中折れモード）は、十分その有効性を発揮した。また、小さな中折れでは、このシステムの中折れモードでなくても十分適切な制御が可能であった。

ただし、大きな中折れ状態から直線に戻す場合、修正偏角値が過去のデータを引きずって、適切な制御が出来ないという状態に陥ったことがあった。

### (2) 今後の課題

①曲線部施工時におけるシールド機の腕の長さは、シールド機ごとに異なる値を取るものと思われる。今回も、腕の長さの設定に苦慮したが、もっと容易にこの設定作業が出来るように、最適長さを決定するソフトを開発する必要がある。このためには、今後いくつかの現場において実績を積み、データを蓄積する必要がある。

②ジャイロスコープによる推測は、全面的にジャイロセンサーの精度に左右されるので、その値には十分注意を払う必要がある。今後、全自動化を図るためには、チェックシステムの開発が重要である。

③大きな中折れ状態から直線に戻す場合、修正偏角値が過去のデータを引きずって、適切な制御が出来ないという場合のデータの処理方法について検討を行う必要がある。

## ６．おわりに

本システムを２件の実施工に適用した結果、測量業務の省力化とともに、施工精度も大幅に向上させることができた。これは、「システムのＡＩ機能が有効に稼動し、綿密に姿勢制御を行うことができたため」と評価される。また、急曲線施工にも適用可能であることが判明した。

今後、上記の課題を研究し、また軟弱地盤や、急曲線巨礫層、硬軟互層、岩盤といったハードな施工条件下での実績を積み、知識ベースおよびデーターベースの充実を図り、システムをさらに発展させていきたいと考える。

そして、将来的には、本研究の最終目的である無人化施工の実現にむけて、鋭意努力していきたい。

最後に、本システムの実施に当たりましては、東京都下水道局ならびに千葉県印旛沼下水道事務所の方々には、多大なるご指導ご協力を賜りました。ここに記して、厚く感謝の意を表する次第であります。

【参考文献】

1) 入江洋之、和久昭正、佐藤清、林英雄：ＡＩ利用によるシールドの姿勢制御エキスパートシステム、
土木学会第45回年次学術講演会講演概要集　第３部 pp.84~85　平成２年９月