

トンネル変状対策工の補強効果に関する実験的研究

Experimental study on the effect of reinforcement for deformed tunnels.

蒲田浩久¹⁾・真下英人¹⁾・石村利明¹⁾

Hirohisa KAMATA, Hideto MASHIMO and Toshiaki Ishimura

Inner concrete lining and inner reinforcement lining are typical reinforcement methods for deformed tunnels. The effectiveness of inner reinforcement lining against the load type which generates compressive forces on the tunnel lining and reaches compressive collapse or shear collapse has not been clarified. In this study full-scaled loading tests and analyses considering the development of cracks for steel-plate and liner-plate as inner reinforcement lining were carried out. The following conclusion were obtained. 1) The maximum loading capacity of liner-plate reinforcement depends on the existing lining concrete strength. Liner-plate does not have much effect on the reinforcement. 2) Steel-plate become one with the existing tunnel lining and has much effect on the restriction of deformation. Exfoliation, however, was occurred between the steel plate and the exiting lining at almost the same maximum load as no reinforcement.

Key Words : tunnel lining, inner reinforcement, loading test

1. はじめに

今後増大が予測される変状が発生したトンネルの効率的な維持管理を進めるために、このようなトンネルに対して適切な補修・補強を行うための合理的な設計手法の確立が求められている。変状の発生原因は大きく過大な土圧の作用とコンクリート覆工の材質劣化に分けられ、過大な土圧の作用による変状に対しては補強工を実施している。現在主に用いられている覆工への補強工は、内面補強工（鉄板接着工、繊維シート接着工など）と内巻工（吹付け、現場打ちコンクリートなど）があり、これらに関する載荷実験、設計方法の提案（例えば1）、2）なども行われてきている。内面補強工に関して、曲げ引張りで覆工が破壊するような荷重形態（背面拘束が小さい状態）に対しては、引張補強材としての補強効果は高いと考えられる。しかしながら、背面拘束の高い状態で天端からゆるみ荷重が作用して、覆工に大きな圧縮力が働き、曲げ圧縮やせん断で破壊するような荷重形態に対しての補強効果については十分に明らかにされていない。また、これまでの載荷実験規模が比較的小規模であり補強をした構造物が複合構造物であることなどを考えると、実験規模の影響もあると考えられる。そのため本報告では、これら対策工の補強効果を把握することを目的とした実大規模の載荷実験を実施した。さらに、ひび割れ進展を考慮できる数値解析により実験結果の検証を行った。

2. 実験方法

一度載荷して損傷（ひび割れ）を与えた覆工に補強対策工を取り付け、再度載荷を行い対策工の効果を確認する実験を行った。写真・1に載荷実験装置を示す。コンクリート覆工は外径 9700mm・厚さ 300mm である。なお、写

1) 正会員 独立行政法人 土木研究所 基礎道路技術研究グループ（トンネル）

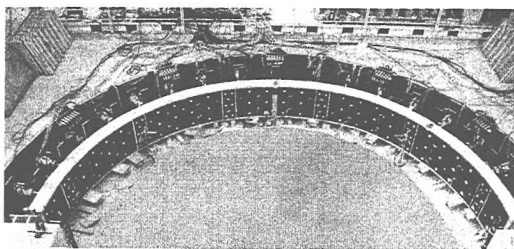


写真-1 載荷実験装置

真は内側に鉄板接着工を取り付けたケースである。図-1に載荷形式を示す。実験手順は、載荷形式1で健全な覆工が破壊するまで載荷して、損傷のある供試体を作成する（一次載荷）。その後、一度、除荷し、無対策または対策工を施工して載荷形式2に変更して載荷実験を再開する（二次載荷）。載荷位置以外のジャッキはバルブを閉めることで圧縮側のみ効くバネとして働かせた。なお、載荷形式1は、空洞等があり背面拘束の小さい状態で覆工にゆるみ荷重が作用した場合を想定した荷重形態である。一方、載荷形式2は、背面拘束が高い状態で（通常、補強後は背面空洞注入を行うため背面拘束は高くなると考えられる）、覆工にゆるみ荷重が作用したことを想定した荷重形態である。載荷は載荷形式1を変位制御方式、載荷形式2を荷重制御方式とした。実験ケースを表-1に示すが、No.1,2は、載荷形式の違いを見るために損傷を与えずに健全な状態で最初から載荷形式1、2で載荷するケースである。No.3は、載荷形式1で損傷を与えた覆工供試体（No.1の最終状態）を無対策のまま載荷形式2で載荷するケースである。No.4, No.5は、対策工として引張補強材（ライナープレート工、鉄板補強工）を内面側に取り付けたケースである。

図-2に内面補強工の詳細図を示す。脚部は両対策工とも支点に直接力が伝達しないようにした。各供試体のコンクリートならびにエアモルタル（ライナープレート工の充填材）の一軸圧縮強度を表-2に示す。

3. 実験結果

3.1 載荷形式の違いについて

対策工を設置するための損傷を与えた覆工供試体を作るため、載荷形式1により健全な覆工を載荷した（一次載荷）。図-3にケース（No.1）の一次載荷時の荷重変位曲線（ジャッキ1本当たりの荷重と覆工内側90°の変位）を示す。なお、図中に最大荷重時のひび割れの位置を示すが、各ひび割れ深さは25cm程度と深く（写真-2）、ひずみの値からも、曲げ圧縮破壊ではなく、複数箇所のひび割

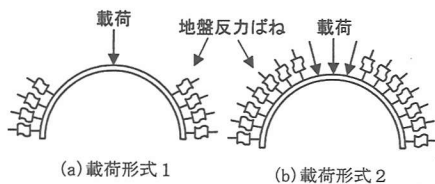
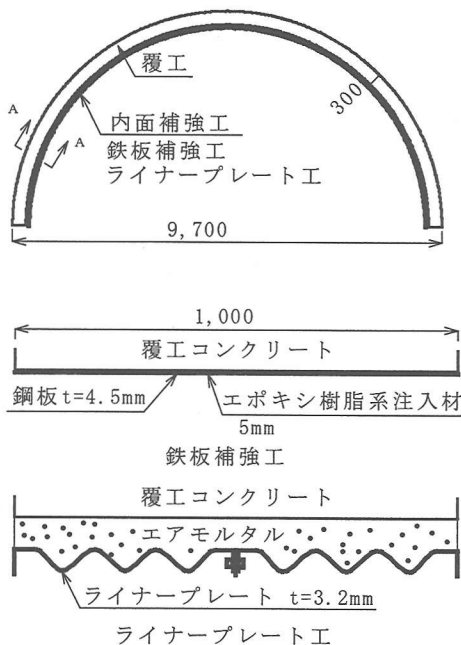


図-1 載荷形式

表-1 実験ケース

No	供試体状態	対策工	載荷形式
1	健全	なし	1
2	健全	なし	2
3	損傷あり	なし	1→2
4	損傷あり	ライナープレート工	1→2
5	損傷あり	鉄板補強工	1→2



A-A断面図

図-2 内面補強工詳細図

表-2 供試体圧縮強度

No	一軸圧縮強度 f_c' (N/mm ²)	
	コンクリート	エアモルタル
1	19.4	-
2	19.9	-
3	ケース1と同じ供試体	-
4	26.9	2.54
5	28.3	-

れの進展により構造全体が不安定化し最大荷重に至ったと考えられる。一方、同図に載荷形式2により健全な覆工を載荷したケース (No.2) の結果を示すが、載荷形式1より最大荷重は大きく、最終的には肩部 (65,115 度) の覆工内側の圧縮破壊で最大荷重が決まった。

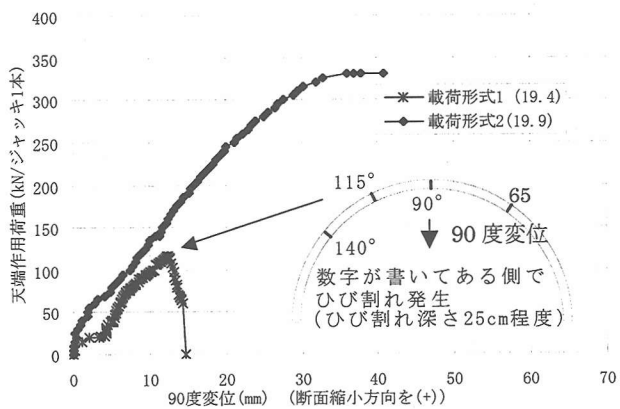


図-3 荷重変位曲線 (損傷なし)



写真-2 ひび割れ状況

なお、図中の凡例の中の括弧内の数値は、覆工の圧縮強度 (N/mm²) を示す。

3.2 対策工

図-4 に載荷形式1で破壊した覆工供試体に対策工を取付け、載荷形式2で載荷 (二次載荷) をした場合の荷重変位曲線を示す。

(1) 無対策

無対策では、225kN程度までは健全なコンクリートのケース (No.1) とほぼ同様な勾配となっており、最大荷重についても、若干低いもののそれほど大きな違いではない結果となった。つまり、図-3 のように曲げが卓越して複数の大きなひび割れ (ひび割れ深さ25cm 程度) が進展して耐力が無くなった覆工でも、背面注工後のような背面拘束度が高い状態を想定した載荷形式になると、覆工体に軸力が導入され、耐力は大きく向上することが期待できると言える。図-5,6 に覆工 (コンクリート) の周方向の内、外側のひ

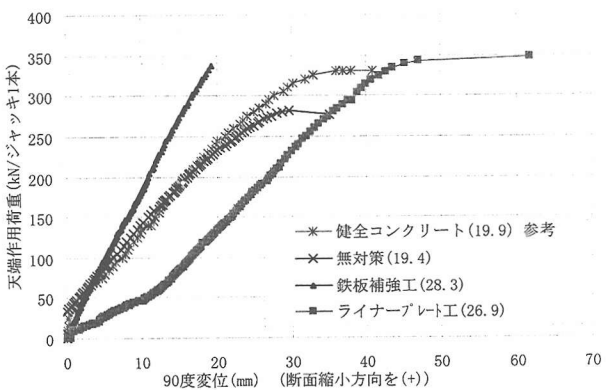


図-4 荷重変位曲線 (損傷あり)

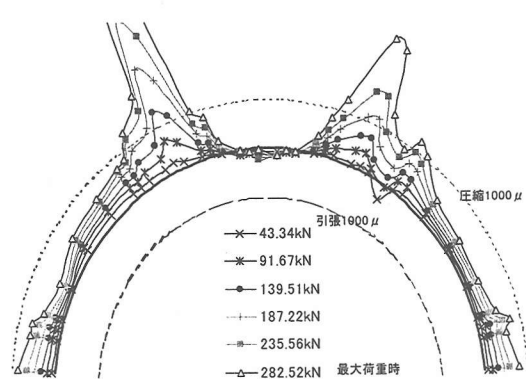


図-5 覆工内側ひずみ (無対策)

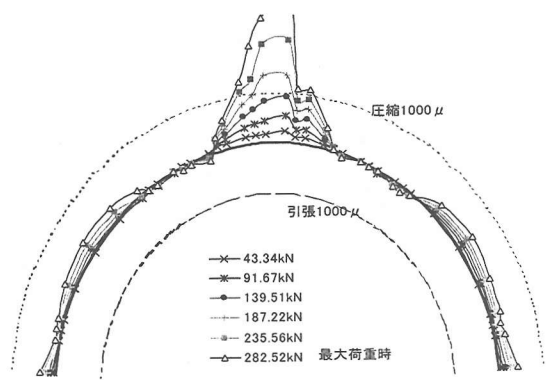


図-6 覆工外側ひずみ (無対策)

ずみ分布（円周方向ひずみ）を示す。荷重の増加とともに、肩部内面内側と天端部背面外側で圧縮ひずみが増加し、それぞれ 65° と 115° および 90° の断面でのひずみの増加が著しいことがわかる。

(2) 内面補強工

ライナープレート工

ライナープレート工の荷重変位曲線は、初期には無対策に比べ勾配が小さいが、50kN 程度からはほぼ同じような勾配となっている。なお、70kN 程度から、肩部から天端部に向けてライナープレートと覆工コンクリート間に充填されたエアモルタル部に円周方向のせん断クラックが入った（写真-3）。最終的には覆工肩部 65° 付近でコンクリートの内側の圧縮破壊を起こし、同じくコンクリートの内側の圧縮破壊で決まった無対策より若干高い程度の最大荷重で終了した（図-4、写真-4）。図-7、8 にライナープレートの円周方向のひずみ分布および覆工外側のひずみ分布を示すが、天端部のライナープレートに引張りひずみが発生し、覆工外側ひずみの値も無対策に比べ抑えられているが、ライナープレートのひずみは肩部から急激に小さくなり、ライナープレートと覆工が一体化して脚部まで力を十分に軸力を伝達したとは言えない分布形状である。

鉄板補強工

図-4 を見ると、鉄板補強工の荷重変位曲線は無対策・ライナープレート工に比べて勾配は大きく、変位抑制効果は高いことがわかる。図-9、10 に鉄板の円周方向のひずみ分布および覆工外側のひずみ分布を示すが、鉄板のひずみ分布から、肩部から脚部にかけて連続的に圧縮ひずみが発生していることがわかる。また、無対策に比べ、同程度の載荷荷重に対して覆工外側のコンクリート圧縮ひずみが小さく抑えられ、無対策時のような 90° 断面でのひずみの集中も見られない。補強することにより、全体の剛性は高くなり、覆工と鉄板が一体化して外力に抵抗していると言える。しかしながら、無対策やライナープレート工の最大荷重とあまり変わらない荷重（天端の鉄板のひずみが引張 1000μ 程度）で、大きな音とともに天端部でコンクリートと鉄板の剥離（コンクリート表面）が発生し、この時点で載荷は終了した。したがって最大荷重までは至っていないが、鉄板の剥離後は、覆工自体で外力に抵抗すると考えられるため、無対策の結果から判断するとあまり耐荷力の向上は期待できないものと考えられる。ただし、鉄板の剥離が発生しないように天端の鉄板と覆工の間にボルトの取付けなどを行った場合は最大荷重が増加する可能性はあると考えられる。

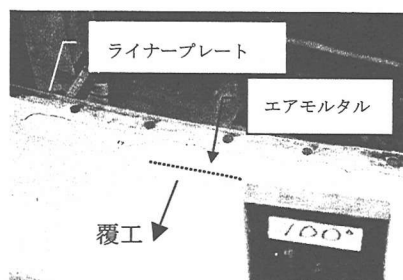


写真-3 せん断ひび割れ状況(ライナープレート)

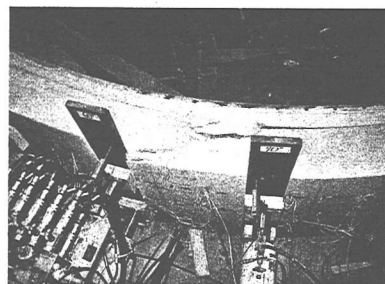


写真-4 破壊状況(ライナープレート)

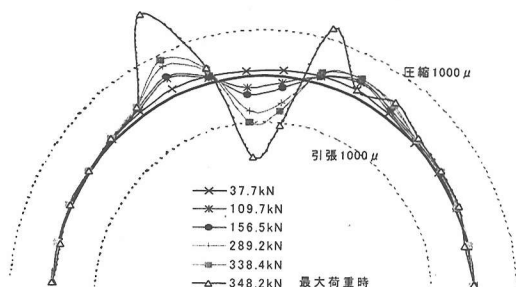


図-7 ライナプレートひずみ分布
(ライナープレート工)

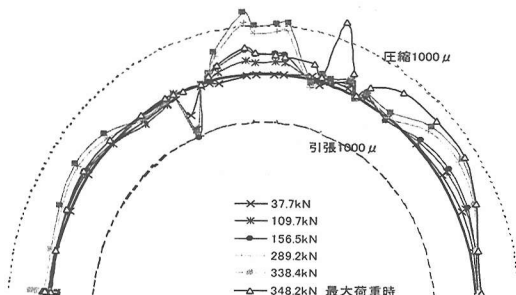


図-8 覆工外側ひずみ(ライナープレート工)

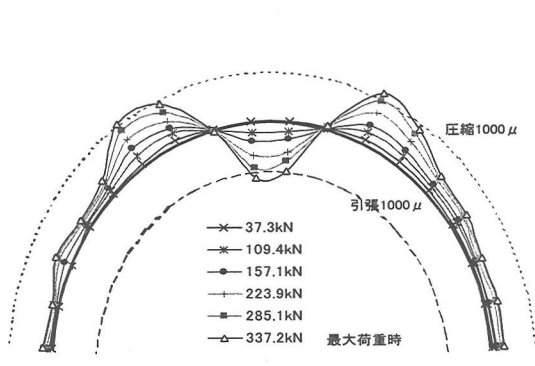


図-9 鉄板ひずみ分布 (鉄板補強工)

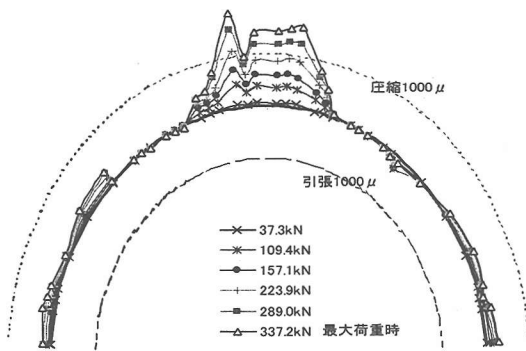


図-10 覆工外側ひずみ分布 (鉄板補強工)

4. 数値解析

(1) 解析方法

数値解析ではひび割れの進展を考慮できる有限要素解析 (解析コード: ATENA) により、実験結果の検証および数値解析の適用性を検討した。コンクリートの材料特性などについては砂金ら³⁾のものと同一とした。ここでは、対策工による違いを見ることを目的として、実験時のように一次載荷後の状態 (残留ひずみ、ひび割れ) を模擬せず、最初 (健全コンクリート) から対策工を行った場合で、コンクリートの圧縮強度もすべて同じ値 (26 kN/mm^2) を用いた解析を行った。また、実験結果からも健全コンクリートのケースと損傷を与えたコンクリートのケースとは勾配、最大荷重値にそれほど大きな違いは見られず、一次載荷を考慮しない解析でもある程度解析可能であると判断した。補強工のモデル化については、鉄板、ライナープレート工は覆工と同じ四角形要素 (ライナープレート工の波形は考慮せず) を用い、鉄板と覆工との間の接着材は考慮せず、覆工と連続したメッシュを作成した。一方、ライナープレート工のエアモルタル部は幅 5cm として、同じく覆工と同様なメッシュを作成し、圧縮強度として覆工圧縮強度の 1/10 の値 (2.6 kN/mm^2) を採用した。解析ケースは、内面補強工をしない無対策および内面補強工 (ライナープレート工・鉄板補強工) について行った。

(2) 解析結果

図-11 に変位荷重曲線の解析結果を示す。解析結果は、耐力力・勾配とも無対策<ライナープレート工<鉄板補強工の順となった。無対策と鉄板補強工のケースでは、図-4 の実験結果と比較すると同じような傾向となっていることがわかる。図-12, 13 に 220kN 載荷時の無対策および鉄板補強工時の円周方向のひずみ分布に関する解析結果を示している。実験結果 (無対策: 図 5, 6、鉄板補強工: 図-9, 10) と比較すると、分布形状など概ね一致している。特に、天端覆工外側のひずみ分布に関して、実験結果のように無対策ではひずみ 90° に集中するが、鉄板補強工では均等化する傾向など解析結果にも現れている。また、図-13 には鉄板との境界部の覆工に発生するせん断ひずみを示しているが、天端付近で比較的大きなせん断ひずみが発生していることがわかる。このせん断ひずみにより、コンクリートや鉄板が降伏する前に、覆工と鉄板の剥離破壊が発生したものと考えられる。

一方、図-11 のライナープレート工の結果を見ると、解析結果の勾配は無対策と鉄板の中間に位置するが、実験結果は無対策と同じような勾配となっていることなどと異なる結果となった。しかしながら、図-14 はエアモルタル部の周方向のせん断ひずみ分布であるが、せん断ひずみは覆工断面内でエアモ

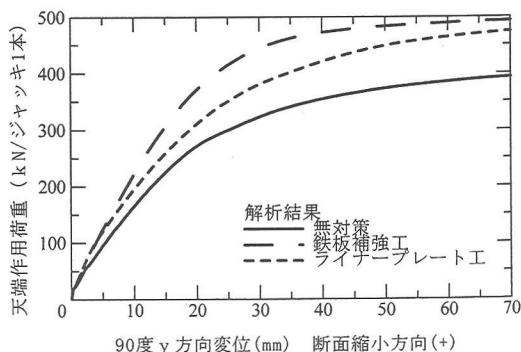


図-11 荷重変位曲線 (解析結果)

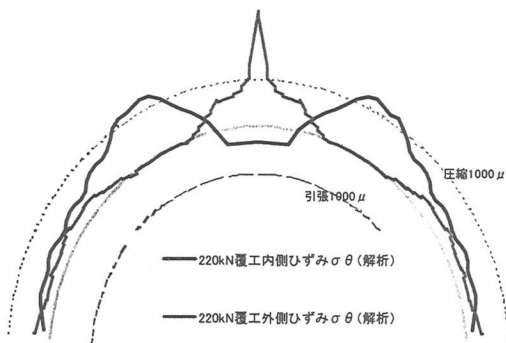


図-12 周方向せひずみ分布（無対策工）

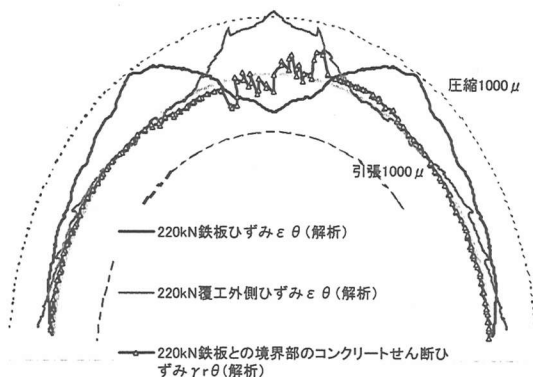


図-13 周方向ひずみ分布（鉄板補強工）

ルタル部が最も大きく、80度、100度の位置から発生し、荷重の増加とともに肩部から天端部にかけて広い範囲に渡り発生していることがわかる。なお、実験においても70kN程度から肩部付近のエアモルタル部にせん断ひび割れが発生し、写真-3に示すように天端部に向かってひび割れが伸びていく結果となった。このように、ライナープレート工に関しては、ひび割れ発生後の全体の挙動については問題はあるものの、エアモルタル部のひび割れ発生再現はできており、耐荷力の評価にとってエアモルタルの強度が重要であることが示された。

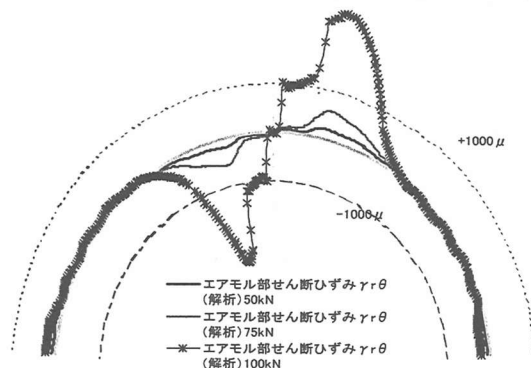


図-14 周方向せん断ひずみ分布（ライナープレート工）

5. 結論

圧縮力が大きい荷重形態の場合の内面補強工の補強効果を確認するため実大規模の載荷実験および数値解析を行った。その結果以下のことがわかった。

①実験結果より

曲げが卓越して一度損傷を受けた覆工でも、周辺の拘束度を高めることで軸力が導入されると、耐荷力が向上する場合がある。内面補強工の補強効果に関しては、ライナープレート工は、覆工コンクリートの曲げ圧縮破壊で耐荷力が決まり、補強効果はあまり期待出来ない場合がある。また、鉄板補強工は、無対策やライナープレート工と異なり、覆工と一体となって挙動し変位抑制効果は高く、圧縮力の脚部へのスムーズな伝達も可能なものの、覆工表面での鉄板との剥離が発生し、最終的な耐荷力は、無対策やライナープレート工と変わらない場合がある。

②解析結果より

ひび割れ進展を考慮した有限要素法を適用することにより、定量的な議論は残されているものの、内面補強工の構造的な特徴を明らかになった。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘、安東豊弘、中田雅博、佐野信夫、若菜和之：変状対策としての内面補強工の効果に関する実験的研究、トンネル工学研究論文・報告集第4巻、P171-178、1994. 11
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル、1998. 2
- 3) 砂金伸治、真下英人、義永茂司、馬場弘二、城間博通：トンネル覆工の耐荷力に関する基礎的研究、トンネル工学研究論文・報告集第11巻、P141-146、2001. 11