

大型覆工模型実験による 繊維補強コンクリート覆工の耐荷特性の把握

A Study of the Withstand Load Characteristic of Fiber
Reinforced Concrete Using Large Tunnel Lining Model Test

岡野法之¹・植村義幸¹・小島芳之¹・生駒末年馬²・磯谷篤実³
Noriyuki Okano, Yoshiyuki Uemura, Yoshiyuki Kojima
Minema Ikoma and Atsumi Isogai

¹正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:nokano@rtri.or.jp

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東京支社 成田鉄道建設所
(〒286-0031 千葉県成田市新町1032-1)

In this paper we try to figure out the resistance of fiber reinforced concrete tunnel lining against deformation and loading by using a testing machine with a large tunnel lining model. The size of this machine is one-fifth scale of double track Shinkansen tunnel, and it can carry out vertical loading test by a hydraulic cylinder. We experiment plain concrete case in the same way, and comparing with FRC case. These results are helpful for establishing unified design basis of FRC tunnel lining.

Key Words tunnel, tunnel lining, loading test, model experiment, fiber reinforced concrete

1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートに発生するひびわれとしては、コンクリートの硬化に伴う温度応力や乾燥収縮に起因するものの他に、膨張性地山や地山の劣化に伴う緩み土圧等地山条件に起因するものもある。一般的に、覆工コンクリートの軽微なひびわれはトンネルがアーチ構造であることから、即座に有害な変状とはならないことは知られている。しかし、将来的な覆工コンクリートの耐荷力の低下等により長期安定性には影響をおよぼす場合があり、ひびわれの発生形態(閉合ひびわれ等)によっては、剥離・剥落の危険性も懸念される。

さらに、坑口部の小土被り部や断層破碎帯、膨張性地山等の条件の悪い区間においては、後荷に伴うトンネルの変状が懸念されるところである。このような状況を鑑み、覆工コンクリートにも力学的機能

を付加させるため、鉄筋や繊維の混入により補強を行うことがある。また、最近の傾向としては、鉄筋の組立て作業と比較してその作業性の良さから繊維補強コンクリートを用いる場合が多くなっている。

現在、鉄道の山岳トンネルでは、繊維補強コンクリートの仕様はトンネルごとに地質条件や覆工打設直前の内空変位量および変位速度等の条件に応じて個別に決められており、統一された設計手法は確立されていない。また、繊維補強コンクリートによる山岳トンネル覆工の耐荷特性についても十分に検証されているとは言い難い状況である。今後さらに繊維補強コンクリートに対する需要が高まることが予想されることから、非鋼繊維も含めた山岳トンネルの繊維補強覆工コンクリートの耐荷特性を把握し、膨張性地山等の覆工に繊維補強コンクリートを適用する場合の設計法の確立が望ましいと考える。そこで筆者らは、その目的に資するため、地盤と覆工の

相互作用を考慮できる縮尺1/5の大型トンネル覆工模型実験装置¹⁾を用いて、鋼繊維補強コンクリートおよびポリプロピレン繊維（非鋼繊維）補強コンクリートについて鉛直載荷実験を行った。本稿では、それらの実験結果を以前に実施した無筋コンクリートのケース²⁾と比較することにより得られた知見について報告する。

2. 実験装置¹⁾

載荷試験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置を図-1に示す。実験装置は新幹線複線標準断面の縮尺1/5であり、反力フレーム、反力用油圧シリンダ、載荷用油圧ジャッキからなっている。供試体の周囲に地盤ばねを模擬した油圧シリンダ付きの皿ばねを配置しており、載荷用油圧ジャッキで与えた供試体の変形負荷を皿ばねの変形で受けることにより、覆工と地盤の相互作用を模擬している。各装置の仕様を以下に示す。

- ・ 載荷用油圧シリンダ
最大載荷圧：500kN
(載荷板面積当り 5.6MPa)
ストローク：250mm
載荷板：300mm×300mm
- ・ 反力用油圧シリンダ
内径：φ125
ストローク：200mm
- ・ 皿ばね
寸法：外径 200mm×内径 102mm×厚さ 12mm
ばね定数：3000kN/m (皿ばね 20 枚/1 ケ所)
地盤反力係数換算：16MN/m³

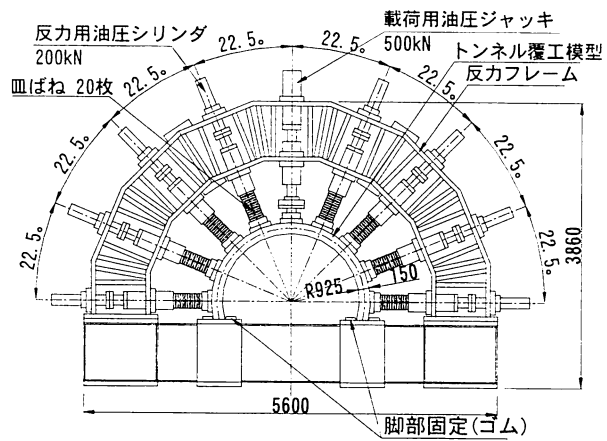


図-1 模型実験装置の概要

3. 実験条件

(1) 検討ケース

今回は、鋼繊維および非鋼繊維を混入したケースについて実施し、以前実施した無筋コンクリートのケースと合せて検討した。検討ケースを表-1に示す。実験に使用したコンクリートの配合は、無筋コンクリートのケースと同じとした(表-2)。実験に用いた繊維の諸元を表-3に示す。

(2) 供試体の作成

実験に使用したコンクリート供試体の寸法を図-2に示す。コンクリート供試体は巻厚150mm(実物換算750mm)、内径925mmで、奥行き方向は載荷板寸法と同じ300mm、スプリングラインから下は250mmとなっている。

繊維を混入するケースについては、ミキサーに所定量のフレッシュコンクリートと繊維を投入し90秒間練混ぜることにより、繊維補強コンクリートを作成した。(写真-1参照)

コンクリートは鋼製の型枠に、両脚部からの高さが均一となるように打設し、バイブレータで締め固めながら行った。また、供試体作成時に一軸圧縮試

表-1 検討ケース

実験ケース	混入率 (vol%)
鋼繊維	0.5
ポリプロピレン繊維	0.5
無筋コンクリート ²⁾	—

表-2 実験に使用したコンクリートの配合

設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	セメントの種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)
21	普通ポルトランド セメント	20	15±2.5

表-3 実験に使用した繊維の諸元

繊維種類	繊維径	繊維長	比重	形状
鋼繊維 (タフグリップ)	0.75mm	43mm	7.85	両端 フック付
ポリプロピレン 繊維 (バルチップ J-K)	0.78mm	48mm	0.91	インデント 形

() 内は商品名

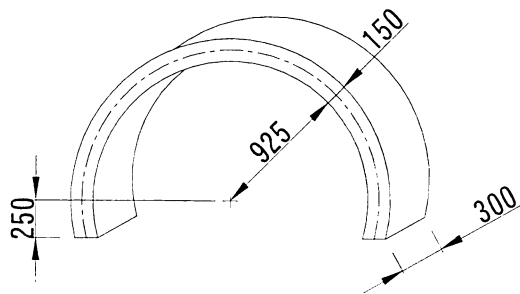


図-2 実験に使用した供試体



写真-1 鋼繊維練混ぜ状況

験用のテストピースを採取し、一軸圧縮強さの確認を行った。そして、所定の強度が得られるまでの期間、型枠を付けたまま養生を行った。

(3) 載荷方法

載荷はクラウンからの鉛直載荷とし、覆工模型は背面空洞および巻厚不足等の欠陥がなく、健全な状態とした。

載荷ステップは、載荷板押込み量 0.2mm/step の変位制御にもとづく段階載荷で、1 分間載荷したのち、載荷を停止して 1 分間の観察・計測を繰り返し、載荷重が上昇しなくなるまで行った。図-3 に載荷実験のフローを示す。

計測項目はトンネル内空変位 9 個所、ひずみゲージ 9 個所×内外＝18 個所および載荷荷重である。変位計、ひずみゲージの配置を図-4 に示す。

4. 実験結果

本稿では、曲げ引張ひびわれ（以下、単に「ひびわれ」と称す）および曲げ圧縮破壊（以下、「圧ざ」と称す）の発生状況、荷重－変位曲線について示し、考察する。

なお、テストピースによる一軸圧縮強さ試験（養生日数 28 日）の結果を表-4 に示す。

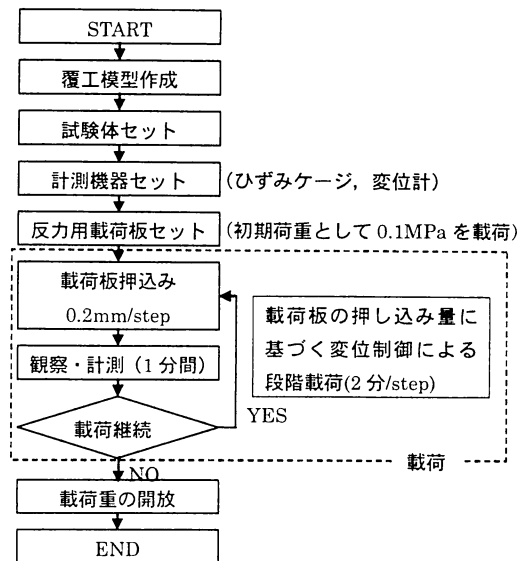


図-3 載荷実験フロー

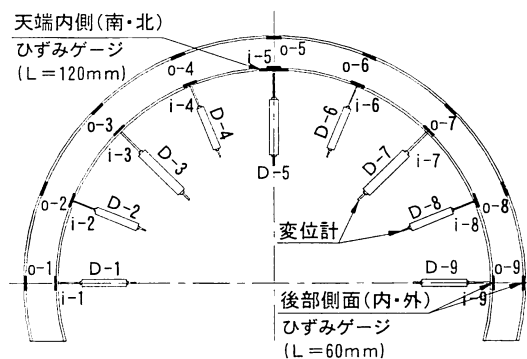


図-4 計測機器の配置

表-4 テストピースによる一軸圧縮試験結果

実験ケース	一軸圧縮強さ (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
鋼繊維	24.3	18,900	0.21
ポリプロピレン繊維	27.0	18,600	0.19
無筋コンクリート	22.2	18,000	0.18

(1) ひびわれおよび圧ざの発生状況

a) ひびわれおよび圧ざの発生順序

各実験ケースの試験終了時の状況を写真-2～4、ひびわれ進展状況を図-5 に示す。

鋼繊維補強コンクリートのケースでは、まず、クラウン部内空側にひびわれが、次に、アーチ両肩部の外側に数本のひびわれが発生した。その後、クラウン部外側に圧ざ、アーチ両肩部の内側に圧ざ、アーチ両肩部外側に数本のひびわれの順に発生していった。ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび無筋コンクリートのケースについては、鋼繊維補強コンクリートのケースと比較するとアーチ両肩部外

側のひびわれの発生数が少ないものの、曲げ引張ひびわれおよび圧ざの発生順序はほぼ同じであった。

以上をまとめると、ひびわれ発生順序は各ケースで若干異なるが、①クラウン内側にひびわれ→②アーチ肩部外側にひびわれ→③クラウン外側に圧ざ→④アーチ肩部内側に圧ざであると言える。この発生順序は無筋コンクリートに関する既往の研究結果²⁾と一致するものであり、背面空洞、および巻厚不足といった構造欠陥のない覆工コンクリートにおいて、クラウン部鉛直載荷を行った場合には、繊維補強コンクリートは無筋コンクリートと同様の変形挙動を示すことが確認された。

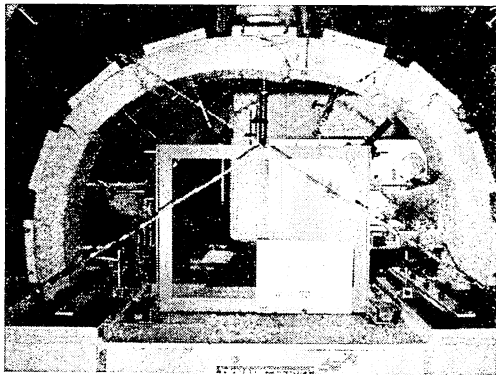


写真-2 鋼繊維ケース破壊状況

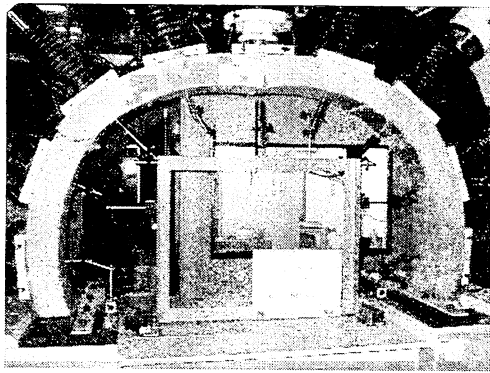


写真-3 ポリプロピレン繊維ケース破壊状況

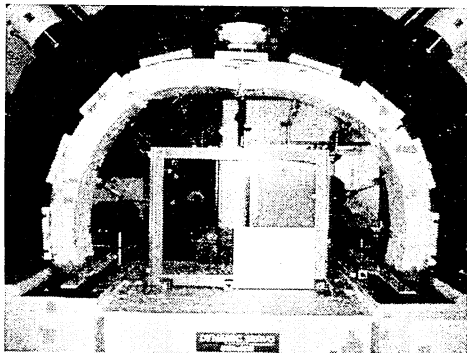
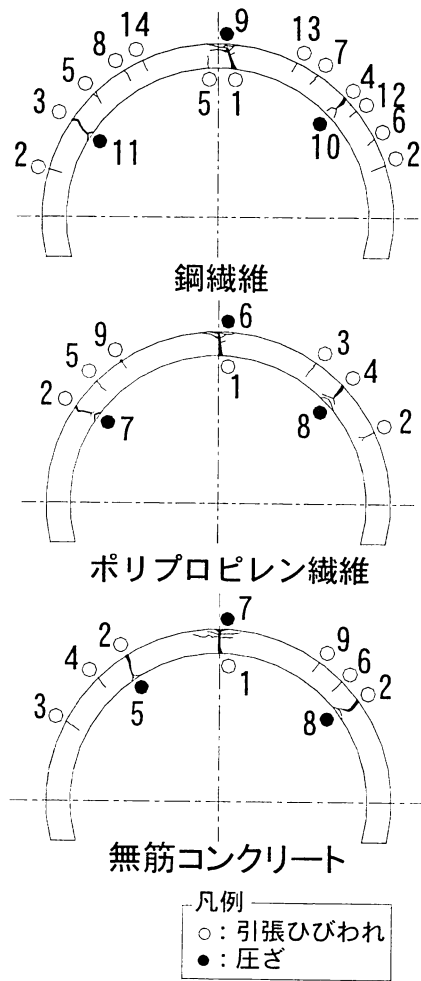


写真-4 無筋コンクリートケース破壊状況

b) ひびわれおよび圧ざの発生数

各実験ケースのひびわれおよび圧ざの発生数を表-5に示す。

圧ざの発生数はいずれのケースでも同じであるが、ひびわれの発生数は、鋼繊維補強コンクリートのケースは他の2ケースに比べ、内空側、地山側ともに多くなっていることがわかる。一般的に鋼繊維にはひびわれの分散効果があるとされているが、本実験結果はこれを裏付けるものとなった。



図中の数値は発生順序を示す。

図-5 ひびわれ発生状況

表-5 ひびわれおよび圧ざの発生数

実験ケース	発生位置および発生数			
	内空側		地山側	
	圧ざ	ひびわれ	圧ざ	ひびわれ
鋼繊維	2	2	1	11
ポリプロピレン繊維	2	1	1	6
無筋コンクリート	2	1	1	6

c) はく落に対する抵抗性

各実験ケースの試験終了時の圧ぎ発生状況（アーチ左肩部内側）を写真-5～7に示す。

無筋コンクリートのケースでは圧ぎ発生部分のコンクリートが大きく破壊し、供試体からはがれ落ちているのに対し、鋼繊維およびポリプロピレン繊維補強コンクリートの場合、はく落片は小さく、はく離はしているものの落下せず供試体に止まっていることが確認された。この実験結果は繊維補強コンクリートのはく落防止効果を裏づけるものである。

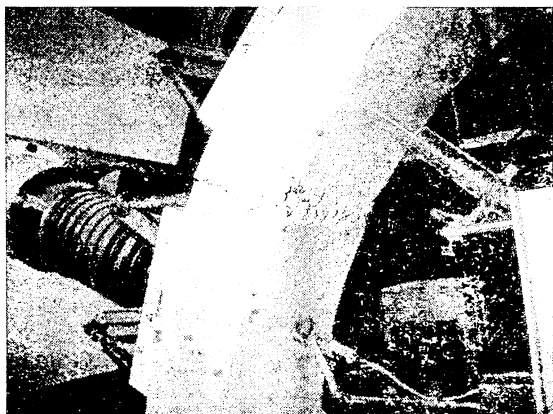


写真-5 鋼繊維ケース圧ぎ発生状況



写真-6 ポリプロピレン繊維ケース圧ぎ発生状況



写真-7 無筋コンクリートケース圧ぎ発生状況

(2) 荷重－変位曲線

実験により得られた荷重－変位（天端沈下量）曲線を図-6に、また天端沈下量 10mm までのひび割れ発生位置を荷重－変位曲線の図-7に示す。

a) 最大荷重

各ケースの最大荷重は、鋼繊維補強コンクリートのケースが 177kN、ポリプロピレン繊維補強コンクリートのケースが 168kN、無筋コンクリートのケースが 132kN であった。

無筋コンクリートと比較すると繊維補強されたケースは耐力的に優れている（最大荷重差 35kN～45kN 程度）という結果となったが、鋼繊維補強コンクリートとポリプロピレン繊維補強コンクリートの最大荷重の差は 10kN 程度しかなく明確な違いは見られなかった。

b) ひび割れ発生前の挙動

いずれのケースも最初にクラウン内側にひびわれが発生し荷重－変位曲線の勾配が緩くなっているが、最初のひびわれが発生するまでの荷重－変位曲線の

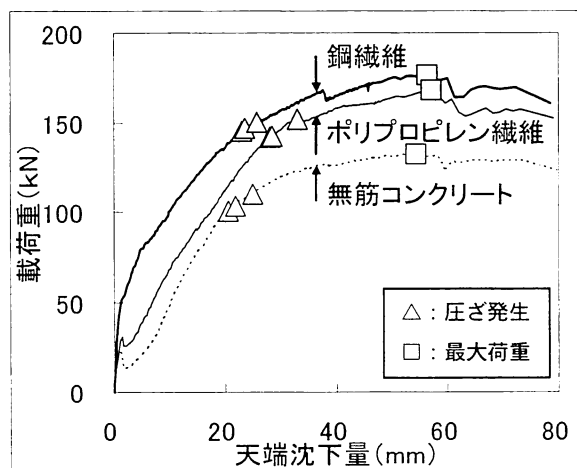


図-6 荷重－変位曲線

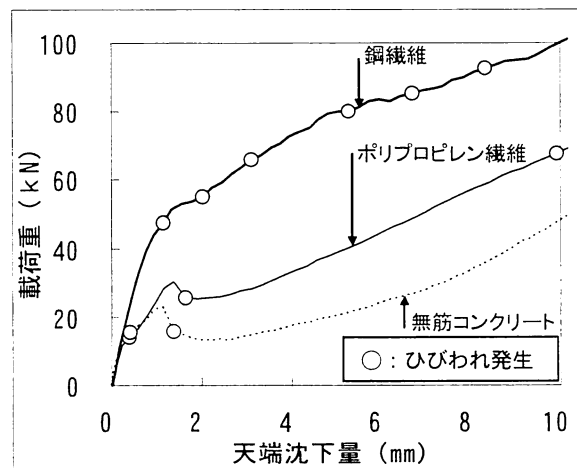


図-7 荷重－変位曲線（天端沈下 10mm まで）

勾配はほぼ等しい結果となった。

この領域はコンクリートの曲げ剛性、軸剛性が支配的因子になるため、覆工巻厚が同じ場合は最初のひびわれが発生するまでの荷重－変位曲線の勾配はほぼ等しくなると考えられる。

c) ひびわれ発生～圧ざ発生前までの挙動

まず、最初のひびわれ発生時の荷重および天端沈下量の違いについて考察する。ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび無筋コンクリートのケースでは、最初のひびわれが発生したときの天端沈下量はともに 0.4mm 程度（実寸換算で 2mm 程度）であり、この時の荷重は 15kN 程度であった。

これに対し鋼繊維補強コンクリートのケースでは、最初のひびわれが発生したときの天端沈下量が 1.2mm（実寸換算で 6mm 程度）、その時の荷重が 47.5kN となっており、他の 2 ケースと比較すると変位、荷重ともに約 3 倍程度大きな値となっている。

ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび無筋コンクリートのケースでは、2 つ目のひびわれが発生した際に荷重の低下が見られたが、鋼繊維補強コンクリートのケースでは、最初のひび割れ発生時に荷重－変位曲線の勾配は小さくなるものの、荷重低下は見られなかった。

ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび無筋コンクリートにおける荷重低下後の荷重－変位曲線は、圧ざが発生するまでほぼ同じ勾配であるのに対し、鋼繊維補強コンクリートは天端沈下量 5～6mm（実寸換算 25～30mm）において 4 つ目のひびわれが発生するまで、他の 2 つのケースより大きい勾配を示している。

これらのことは、鋼繊維はひびわれ発生直後から補強効果を発揮し、覆工コンクリートの曲げ引張強さが向上しているのに対し、ポリプロピレン繊維は覆工コンクリートの初期のひびわれに対する抵抗性の向上にはさほど効果がなく、ある程度変状が進んだ（ひびわれが開口した）状態からその効果を発揮することを示している。

この違いは、鋼繊維とポリプロピレンの引張強度および剛性の違いによるものと考えられる。

d) 圧ざ発生後の挙動

ポリプロピレン繊維補強コンクリートのケースでは若干遅いものの、20mm（実寸換算で 100mm）を超えたところで圧ざが発生し、荷重－変位曲線の勾配はかなり小さくなるが、その後も荷重は増加し続け、60mm 手前で最大荷重に達する。この挙動は繊維

の有無、種類の違いによる差異はなかった。

5. まとめ

本稿では、背面空洞や巻厚不足等の欠陥がないトンネルに対するクラウン部鉛直載荷模型実験について述べた。本実験により得られた知見を以下に示す。

- ・ひびわれ発生順序は、いずれのケースも①天端内側の引張ひびわれ→②アーチ両肩部外側の引張ひびわれ→③天端外側の圧ざ→④アーチ両肩部内側の圧ざとなり、繊維補強コンクリートは無筋コンクリートと同様の変形挙動を示す。
- ・鋼繊維のひびわれ分散効果を実験により再現できたが、ポリプロピレン繊維ではひびわれの分散効果は確認できなかった。
- ・最初のひびわれが発生するまでの荷重－変位曲線の勾配は、繊維の有無、繊維種類によらずほぼ等しい。
- ・繊維補強されたトンネル覆工は無筋コンクリートに比べ耐力的に優れている。
- ・鋼繊維とポリプロピレン繊維とでは最大荷重に大きな差は見られなかったが、天端沈下量 20mm 程度までを比較すると鋼繊維のほうが力学的に優れているといえる。

6. おわりに

筆者らは、山岳トンネル覆工に繊維補強コンクリートを用いる場合の設計手法の確立を目的に種々の検討を行っているところである。本稿ではその一環として実施した大型トンネル覆工模型実験結果について示した。今後は現在進めている要素実験や解析的検討の深度化および様々な載荷パターン（側圧、偏圧、地盤ばねの有無等）の模型実験を行うことにより、設計法を提案していきたい。

参考文献

- 1) 高橋幹夫，津野究，小島芳之：大型トンネル覆工模型実験装置の開発，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-070，pp.139-140，2006.9
- 2) 岡野法之，小島芳之，植村義幸：大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現，第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，132，pp.909-914，2008.9