

# 論文 ポパール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いたビニロン繊維メッシュ巻立て工法による RC 柱のじん性補強効果

赤熊 宏哉<sup>\*1</sup>・松本 浩嗣<sup>\*2</sup>・正木 守<sup>\*3</sup>・三宅 紀<sup>\*4</sup>

**要旨:** ポパール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いてビニロン繊維メッシュを巻き立てた RC 柱の正負交番載荷試験を行い, じん性補強効果を検討した。その結果, ポパール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いてビニロン繊維メッシュを巻き立てて補強を行うことにより, 破壊モードをせん断破壊から曲げ破壊に移行させることができた。さらに, ビニロン繊維メッシュの積層数が多いほどじん性率が向上し, 8 層のビニロン繊維メッシュで補強された試験体では 7.00 のじん性率が発揮され, 大きく変形性能を向上させることがわかった。

**キーワード:** RC 柱, ビニロン繊維メッシュ, ポパール樹脂, ポリマーセメントモルタル, じん性率

## 1. はじめに

近年, 既存鉄筋コンクリート柱 (以下, RC 柱) の代表的な補強工法として, 高強度で腐食の問題がなく, 軽量なため施工が容易であるなどの利点から連続繊維シートの適用が増加している。しかし, 一般的に連続繊維シートは高価であり, 接着に用いられるエポキシ樹脂などが紫外線に弱く, 施工時の天候に影響されること, また環境ホルモンによる人体への悪影響が懸念されるなどの問題点が挙げられる。このような背景からビニロン繊維メッシュ (以下, VFM) をポリマーセメントモルタル (以下, PCM) およびポパール樹脂 (ポリビニルアルコール樹脂) を用いて一体化する補強工法が提案された。<sup>1)</sup> ポパール樹脂は水系樹脂の一種であり, 施工時の天候に影響されにくく, 環境ホルモンの懸念がないという特徴を有する樹脂である。水系樹脂を用いて VFM の密着度を高める本工法の利点として, 一般的な連続繊維シートに比べ VFM が安価であること, 破断伸びが大きいこと, 変形性能の向上を図ることができ, 補強に適していること, モルタルが紫外線や施工時の天候から影響を受けにくいことなどが挙げられる。

既往の研究では, 本工法を用いて, 積層使用された VFM によりせん断補強された RC はりのせん断挙動に関する実験が伊藤らにより行われており, その結果, VFM の積層数の増加とともにせん断耐力が増加し, 変形性能も向上することが確認された<sup>1)</sup>。

本研究は, PCM およびポパール樹脂を用いた RC 柱への VFM 巻立て補強工法を検討したものである。この工法を用いて積層使用された VFM で補強された RC 柱のじん性補強効果を明らかにするため, 補強 RC 柱の正負

交番載荷試験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究では, 補強を施していないもの, VFM4 層および VFM8 層で補強された合計 3 体の試験体を作製した。各試験体の一覧を表-1 に示す。また, 試験体概要およびひずみゲージ位置を図-1 に示す。試験体の柱部は 1 辺が 300mm の正方形断面で, 柱下端から水平載荷点までの高さは 775mm である (せん断スパン比  $a/d=2.87$ )。軸方向鉄筋は引張側と圧縮側に D16 を 4 本ずつ用いた。せん断補強鉄筋を有するものを対象としているが, せん断補強鉄筋と併用した場合はその挙動が複雑なので, 本研究ではせん断スパン内に鉄筋は配置していない。RC 柱の試験体を作製する際, 軸方向鉄筋の抜け出し破壊を防止するため端部を L 字型に加工し, フーチングに埋設した。コンクリートのかぶり厚さは 30mm とした。また, コンクリート打込み時に型枠の四隅に 1 辺 15mm の面木を設けてコンクリートを打込み, 面取りを行うことで隅角部における VFM の応力集中を緩和した。試験体打設後, グライNDER で補強部表面の研掃を行い, 人力で VFM を試験体に巻き立てた。VFM 巻立て後の様子を写真-1 に示す。なお, 樹脂の塗布は, 1 層ごとに脱泡口

表-1 試験体一覧

試験体名	積層数	被覆モルタルの有無	使用樹脂
Ref	-	-	-
P4	4	有	ポパール樹脂
P8	8		

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博士(工) (正会員)

\*3 (株) 富士ピー・エス技術本部 (正会員)

\*4 ユニチカ (株) 産業繊維管理室 (正会員)



表-8 試験結果一覧

試験体名		主鉄筋降伏時			最大荷重時			終局時	じん性率 $\mu$ ( $\delta_u/\delta_y$ )	軸方向鉄筋降伏の有無
		降伏荷重 $P_y$ (kN)		変位 $\delta_y$ (mm)	最大荷重 $P_{max}$ (kN)		変位 $\delta_p$ (mm)	変位 $\delta_u$ (mm)		
		計算値	実験値		計算値	実験値				
Ref	正	87.9	83.1	6.29	85.9	89.6	6.62	6.62	1.00	有
	負		-	-		-90.5	-8.81	-8.81	-	無
P4	正		90.5	6.89	98.7	98.4	20.7	27.6	4.00	有
	負		-	-		-95.3	-11.6	-	-	無
P8	正		64.5	6.14	98.7	89.7	11.4	42.9	7.00	有
	負		-98.5	-6.41		-99.5	-12.2	-19.2	3.00	有

プレストレスを導入して反力フレームに固定した。降伏変位  $\delta_y$  は、主鉄筋の柱基部に位置する4個のひずみゲージの平均のひずみが降伏ひずみに達した際の変位とした。荷重パターンは、主鉄筋の降伏までの1サイクルの荷重、 $\delta_y$ 以降は、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ と  $\delta_y$  ずつ変位を増加させ、変位制御にて静的正負交番荷重試験を行い、降伏変位  $\delta_y$  時の荷重の半分まで荷重が低下した時点で試験を終了した。

2.3 使用材料

本実験で用いたコンクリートの計画配合を表-2に、軸方向鉄筋の力学特性を表-3に示す。また、各試験体の試験日における母材コンクリートの力学特性を表-4に、PCMの力学特性を表-5に、補強材として用いたVFMの形状、力学特性を写真-2および表-6に示す。なお、VFMは写真-2に示すように3方向のストランドそれぞれがRC柱の部材軸と成す角度が  $90^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $-30^\circ$  となるように巻き立てた。表-7に使用した樹脂の力学特性を示す。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験で得られた降伏荷重、降伏変位、最大荷重、最大荷重時の変位および鉄筋降伏の有無を表-8に、それぞれの試験体の荷重-変位関係を図-2に示す。実測の水平変位は、フーチングの回転変位と水平変位を引いたものである。また、各試験体の破壊過程を写真-3~5に示す。Refの試験体において、正側に荷重を行ったところ83.1kNの時点で軸方向鉄筋の平均のひずみが降伏ひずみ ( $1915\mu$ ) に達し、除荷を行った。この時の降伏変位  $\delta_y$  は6.29mmであった。負側では荷重が-90.5kNの時点でせん断ひび割れが発生してピーク荷重を迎え、その後、荷重が負側のピーク荷重よりも23%低下した時点で除荷を行った。正側に2サイクル目の荷重を行った所、荷重が89.6kNの時点でせん断ひび割れが発生して荷重が減

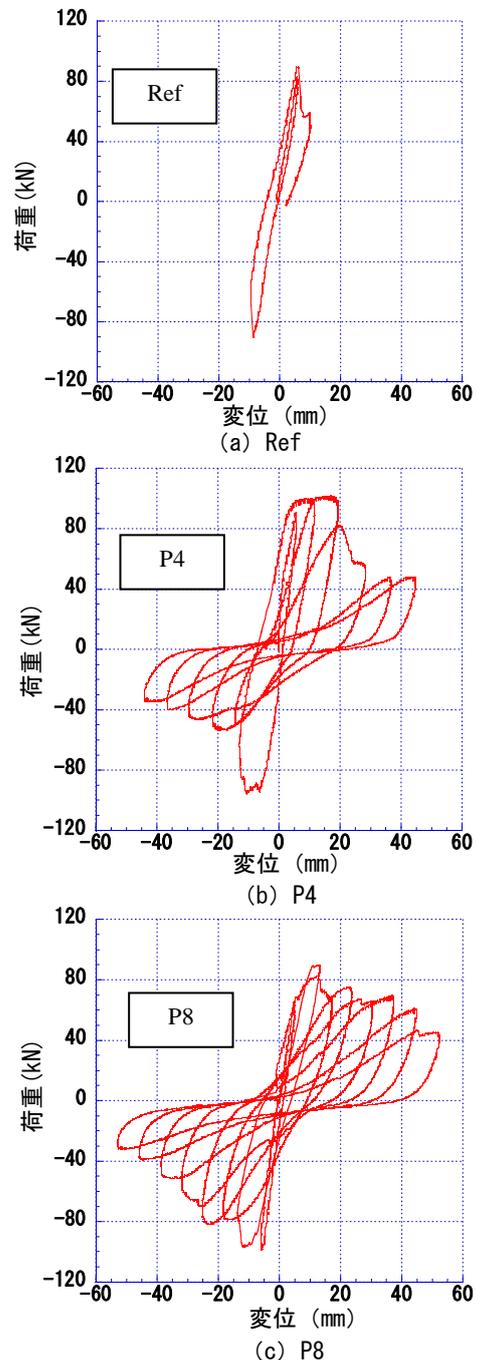
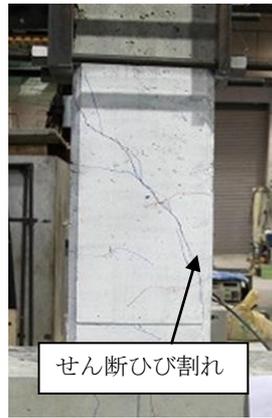


図-2 荷重-変位関係



(a) 降伏時  $1.0 \delta_y$



せん断ひび割れ

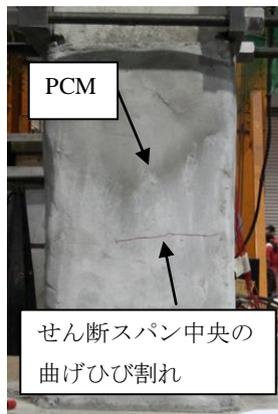
(b) せん断ひび割れ発生時（負側に加力時）



せん断ひび割れ

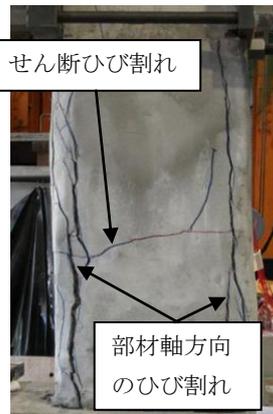
(c) せん断ひび割れ発生時（正側に加力時）

写真-3 破壊過程 (Ref)



PCM  
せん断スパン中央の  
曲げひび割れ

(a) 降伏時  $1.0 \delta_y$



せん断ひび割れ

部材軸方向  
のひび割れ

(b)  $4.0 \delta_y$



はらみ出し部

(c)  $6.0 \delta_y$

写真-4 破壊過程 (P4)



(a) 降伏時  $1.0 \delta_y$



部材軸方向  
のひび割れ

(b) 隅角部にひび割れ発生  $2.0 \delta_y$



せん断ひび割れ

(c)  $8.0 \delta_y$

写真-5 破壊過程 (P8)

少し、荷重が正側の最大荷重よりも 22% 低下した時点で除荷を行った。この時の変位は 6.62mm であり、荷重は 1 サイクル時の正側の降伏荷重の 1.08 倍であった。破壊モードは、正側では軸方向鉄筋の曲げ降伏後にせん断破壊を呈する曲げせん断破壊となり、負側ではせん断破壊となった。

P4 の試験体において、正側に載荷を行ったところ 90.5kN の時点で軸方向鉄筋の平均ひずみが降伏ひずみに

に達し、除荷を行った。この時にせん断スパン中央の

PCM に曲げひび割れが発生し、降伏変位  $\delta_y$  は 6.89mm であった。負側では鉄筋が降伏ひずみに達する前に荷重がほぼ一定で変位のみが増加する段階を迎えた後、変位のみが増加していき試験体の隅角部の PCM に部材軸方向のひび割れが発生し、荷重が下がり初めた時点で除荷を行った。2 サイクル目では、正側は変位とともに荷重が増加し、 $2\delta_y$  に達した時点で除荷を行った。負側では

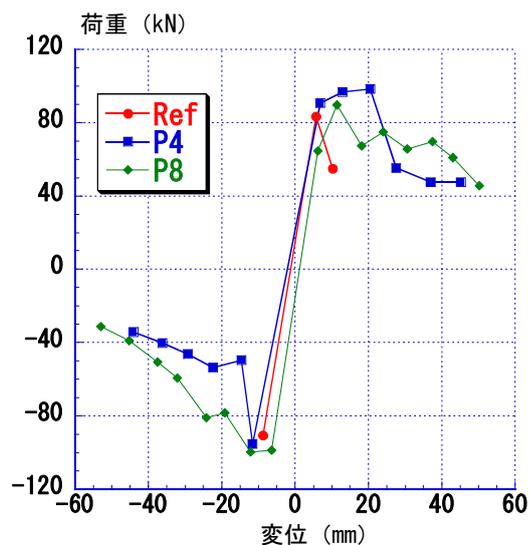


図-3 荷重-変位包絡線

剛性の低下が確認され、 $-2\delta_y$ に到達時に隅角部のひび割れ幅が拡幅していき、荷重は1サイクル時の最大荷重の0.52倍であった。3サイクル目では、正側は98.4kNとなり、試験体の最大荷重を迎えた。負側では、荷重の増加に伴い隅角部のひび割れ幅がさらに拡幅したが、最大荷重は2サイクル目の最大荷重の1.2倍となった。4サイクル目では、正側は81kNでせん断スパン中央のひび割れが進展して、せん断ひび割れに変化し、またせん断スパン中央において内部コンクリートのはらみ出しによりPCMが横方向に膨れ、荷重がなだらかに低下した。 $4\delta_y$ 到達時は、荷重が3サイクル時の最大荷重の0.56倍となった。5、6サイクルで荷重が最大荷重の半分以下となったので試験を終了した。正側では軸方向鉄筋が降伏し、その後に破壊に至る曲げせん断破壊となったが、負側では軸方向鉄筋が降伏ひずみに達することなく耐力が低下していった。

P8の試験体において、正側に荷重を行ったところ64.5kNの時点で軸方向鉄筋の平均ひずみが降伏ひずみに達し、除荷を行った。降伏変位 $\delta_s$ は6.14mmであった。負側では-98.5kNの時点で鉄筋が降伏ひずみに達し、降伏変位は-6.41mmとなった。2サイクル目では、正側は $2\delta_y$ に達した時点で試験体の最大荷重となる89.7kNに達し、除荷を行った。負側では $-2\delta_y$ 到達前に最大荷重である-96.6kNに達した後、試験体隅角部にひび割れが発生し、なだらかに荷重が下がり始め、 $-2\delta_y$ の時点で最大荷重よりも20%低下した。3サイクル目では、正側は $3\delta_y$ 到達前に荷重が下がり始め、 $3\delta_y$ 到達時点では67.3kNとなった。負側では、 $-3\delta_y$ 到達時点で-78.1kNとなった。4サイクル目では、 $3\delta_y$ の到達荷重よりも11%大きい75kNとなり、これ以後の5、6、および $7\delta_y$ ではほぼ同等の荷重を維持し続けた。負側では、 $-3\delta_y$ 到達時点と同等の荷重を示した。6サイクル目の負側では、 $-6\delta_y$ の時点でPCM

に1本のせん断ひび割れが発生し、 $5\delta_y$ 到達時点の荷重より12%低下した。これ以後の $7\delta_y$ および $8\delta_y$ では徐々に荷重が下がり始め、最大荷重の半分を下回ったところで荷重を終了した。P4とは異なり、RC柱のはらみ出しは見られなかった。また、P4とP8の試験体においてVFMの破断はみられなかった。

せん断破壊になるように設計したRefの試験体は、正側は鉄筋が降伏し、負側では鉄筋が降伏せずにせん断ひび割れの発生により急激な荷重低下が生じる破壊に至った。曲げ破壊になるように設計したP4の試験体は、補強量が十分ではなかったために、負側では鉄筋が降伏しなかったが、正側で降伏変位に達した後、 $3\delta_y$ まで荷重の増加が見られ、無補強の試験体と比べて荷重低下後も変形性能は向上した。鉄筋降伏の判定は4つの主鉄筋のひずみの平均で計算されているために試験体作成時の鉄筋組み立てにより、各鉄筋に発生するひずみにばらつきがある。平均ひずみは降伏ひずみに達していなかったが、実際には鉄筋が降伏していたために最大荷重の計算値と実験値が概ね一致していた。P8の試験体では正側で降伏変位に達した後一度荷重が低下したが、その後、荷重は増加と低下を繰り返し、一定の荷重を維持し続け、変形性能は無補強およびP4と比較して大きく向上し、破壊モードは曲げ破壊に移行した。また、最大荷重の計算値と実験値を比較するとRef、P4、P8で概ね一致しており、最大荷重を予測できている。

### 3.2 じん性率

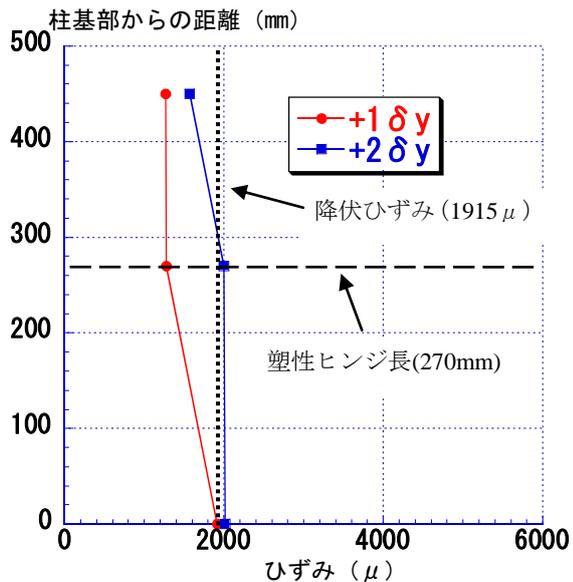
図-3に荷重-変位包絡線を示す。ここで、荷重-変位包絡線が降伏荷重 $P_y$ を下回る時点での変位を終局変位 $\delta_u$ とし、じん性率 $\mu$ を式(3)から求めた

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (3)$$

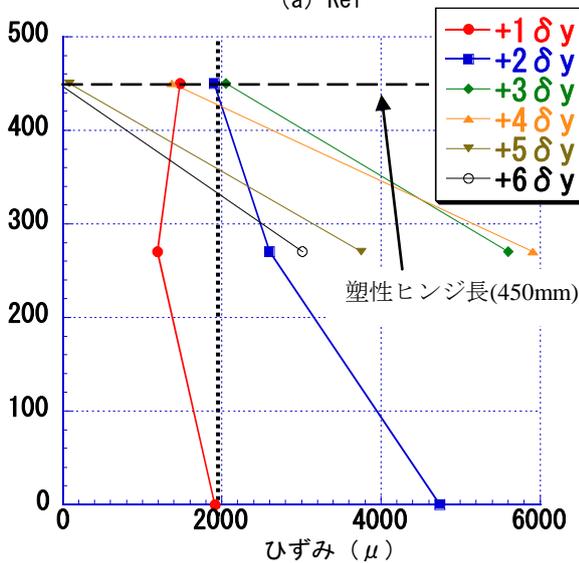
図-3よりVFM、PCMおよびポバール樹脂で補強した試験体は、無補強の試験体と比較して変形性能が大きく向上していることがわかる。P4の試験体では、正側で $4\delta_y$ において軸方向鉄筋降伏時の荷重を下回ることから、じん性率は4.01となる。P8の試験体では、正側で $7\delta_y$ において軸方向鉄筋降伏時の荷重を下回ることから、じん性率は6.99となる。負側では、 $3\delta_y$ の時点で軸方向鉄筋降伏時の荷重を下回ることからじん性率は3.00となる。以上より、VFMの積層数が増すことでじん性率が増加する傾向があることがわかった。

### 3.3 軸方向鉄筋のひずみ性状および塑性ヒンジ長

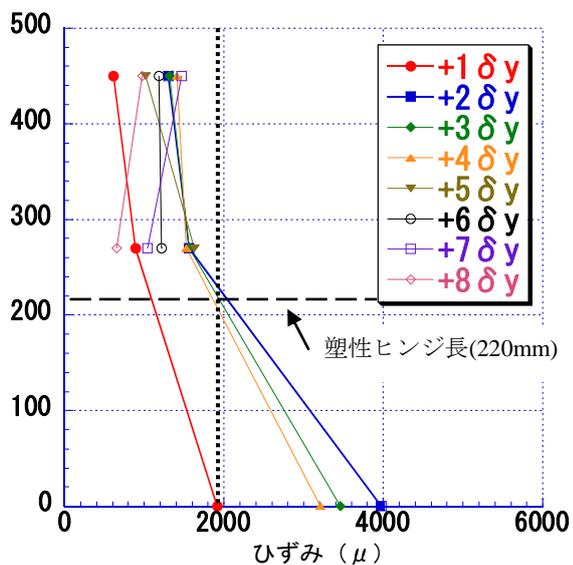
引張側の軸方向鉄筋の鉛直方向のひずみ分布(正側のみ)を図-4に示す。Ref、P4およびP8いずれの試験体においても、柱の基部で最大のひずみが測定された。無補強の試験体においては、柱基部の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した後、 $2\delta_y$ の時点で柱基部から270mmの位置で降伏ひずみに達した。P4の試験体においては、柱基部



(a) Ref



(b) P4



(c) P8

図-4 軸方向鉄筋のひずみ

で軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した後、 $3\delta_y$  時点で柱基部から 450mm の位置で降伏ひずみに達した。P8 の試験体においては、柱の基部のみが降伏ひずみに達し、いずれのサイクルでも柱基部から 270mm, 450mm では降伏ひずみに達することはなかった。

本研究では、降伏曲率や終局曲率を測定しなかったため、塑性ヒンジ長は降伏ひずみに達した柱基部のひずみゲージから各サイクルで最初に降伏ひずみに達したそれぞれの高さのひずみゲージ位置までの長さとした。補強された試験体を比較すると、P4 の試験体においては 450mm, P8 の試験体においては 220mm となり、補強量が多くなるに従い、形成される塑性ヒンジ長は短くなることがわかった。また、既往の研究<sup>4)</sup>によると補強量が多くなるに従い、塑性ヒンジ長が減少することが報告されており、本研究と同様の傾向を示している。

#### 4. 結論

本研究ではポパール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いてビニロン繊維メッシュを巻き立てた RC 柱の正負交番載荷試験を行い、そのじん性補強効果を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 無補強の RC 柱に 4 層のビニロン繊維メッシュを巻き立てて補強を行った結果、正側のじん性率は  $4.00\delta_y$  であった。また、8 層に巻き立てた試験体においては正側のじん性率が  $7.00\delta_y$  となり、4 層の 1.75 倍も大きく変形性能を大きく向上させることがわかった。
- (2) Ref, P4 および P8 の試験体では、軸方向鉄筋のひずみは柱基部で最大となった。また、P4 の塑性ヒンジ長は 450mm, P8 では塑性ヒンジ長が 220mm となり、補強量が増すに従い塑性ヒンジ長が短くなることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 伊藤賢, 正木守, 三宅紀, 二羽淳一郎: ポパール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いたビニロン繊維メッシュ巻き立て工法による RC はりのせん断補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1417-1422, 2013.7
- 2) 二羽淳一郎: コンクリート構造の基礎, 数理工学社, 2006
- 3) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, pp.23-25, 2000.7
- 4) 鈴木直人, 幸左賢二, 藤井康男, 澤田吉孝: 鋼板巻き立て補強橋脚の変形性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.253-258, 1999