

報告

[2174] 連続繊維補強筋を帯筋に用いた RC 柱の耐震性能に関する実験的研究

玉城 康哉*1・山川 哲雄*2・藤崎 忠志*3

1. 序

鉄筋コンクリート造構造物には、塩害等により鉄筋が腐食し、その結果コンクリート内部に膨張圧が発生し、コンクリートにひび割れが生じるなどの弱点が存在する。近年、これらの鉄筋コンクリートの弱点を克服することを目的に、鋼より引張強度が高く、軽量でかつ磁性を帯びにくく、耐薬品性にも優れ、しかも錆びない新素材繊維をコンクリートの補強材に利用する研究開発が活発に行われている[1]。本研究報告は高強度の連続炭素繊維を樹脂に含浸させながら、格子状に一体成形した連続繊維補強筋[1]を中子筋付の帯筋として用い、主筋には在来の鉄筋を用いたRC柱の耐震性能を検討したものである。なお、本論では連続繊維補強筋をFRP筋と以後呼称する。

2. 試験体

試験体の形状、寸法及び配筋図を図-1に示す。試験体のせん断スパン比(M/QD)は1.5であり、かつ曲げ破壊先行の試験体である。試験体は主筋(12-D10-SD345)を共通にして、中子筋付帯筋を在来の鉄筋(D6-SD295A)で60mmと40mmピッチで配筋した試験体各1体に対応させて、格子状に一体成形した連続繊維補強筋(FRP筋)を中子筋付の帯筋として同じピッチで配筋した。したがって、試験体の総数は帯筋が在来鉄筋の2体とFRP筋2体の合計4体である。しかも、これらの4体は同一

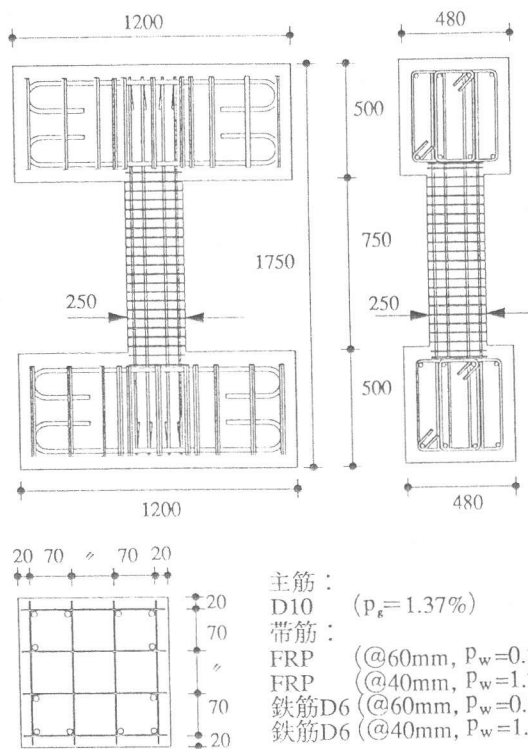


図-1 試験体の形状、寸法、配筋図

表-1 柱の試験体一覧

帯筋	連続繊維補強筋 (FRP)	在来鉄筋 (D6-SD295A)
@60mm	NFC-NN-1	RCC-NN-1
@40mm	NFC-NN-2	RCC-NN-2

注) 主筋はすべて共通の12-D10-SD345($P_g=1.37\%$)である。

表-2 鉄筋とFRP筋の力学的特性

補強筋	a (cm^2)	$s\sigma_y$ (MPa)	$s\epsilon_y$ (%)	$s\sigma_u$ (MPa)	sE (GPa)	
FRP筋	0.31	1798.8	1.77	1798.8	101.0	
鉄筋	D6	0.32	398.4	0.219	557.4	196.0
	D10	0.71	408.8	0.209	583.9	202.9

注) a: 断面積, $s\sigma_y$: 降伏点応力, $s\epsilon_y$: 降伏点ひずみ, $s\sigma_u$: 引張強度, sE: ヤング係数

*1 (株) 国建, 工修 (正会員) *2 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科, 工博 (正会員)
*3 清水建設 (株) 技術開発センター, 主査 (正会員)

バッチの生コンクリートを用いて、4体同時に打設した。表-1の柱の試験体一覧を参照されたい。なお、FRP筋の断面積はD6の公称断面積(0.32cm²)とほぼ同じ断面積(0.31cm²)である。表-2, 3に使用材料の力学的性質を示すとともに、在来鉄筋とFRP筋の応力-ひずみ曲線を図-2に示す。

3. 測定及び荷重方法

変位計で柱頭の水平と鉛直変位、及び反曲点位置に相当する柱中央位置の水平と鉛直変位成分を測定した。変位計の取り付け略図を図-3に示す。ひずみゲージは柱頭、柱脚部の主筋と帯筋の一部に貼付した。

図-4に示すような建研式水平加力装置を用いて、一定軸圧縮力(0.22cσ_B)と正負繰り返し水平力を与えた。水平加力はひび割れが発生するまでは荷重制御により行い、ひび割れ発生後は柱の部材角Rを0.5%づつ、同一振幅で3サイクルづつ正負繰り返しの変形制御で3%まで行った。

4. 実験結果と考察

表-4に各柱試験体の部材角R=0.5, 1, 1.5, 3%時で、かつ3サイクル終了後のひび割れ状況を示す。帯筋にFRP筋を用いた柱の試験体は、主筋に沿った付着割裂ひび割れが多く観察された。特に、帯筋間隔が小さい試験体(NFC-

表-3 コンクリートの力学および材料的性質

		cσ _B (MPa)	cε ₁ (%)	σ _t (MPa)	cE (GPa)	スランブ (cm)
FRP筋	NFC-NN-1	29.2	0.29	2.29	23.4	14
	NFC-NN-2	28.0	0.29	2.47	24.1	
鉄筋	RCC-NN-1	26.0	0.28	2.20	22.6	
	RCC-NN-2	26.0	0.26	3.96	26.8	

注) cσ_B: シリンダー強度, cε₁: cσ_B時のひずみ, σ_t: 割裂強度, cE: 割線ヤング係数

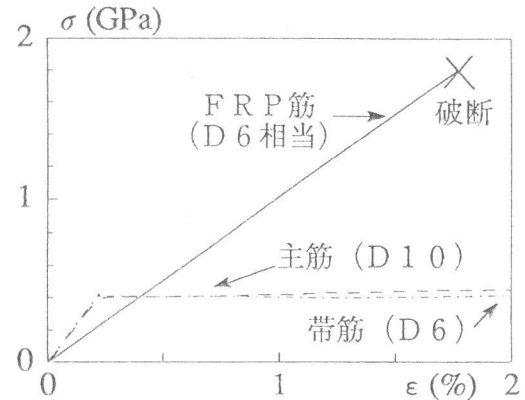


図-2 鉄筋およびFRP筋のσ-ε曲線

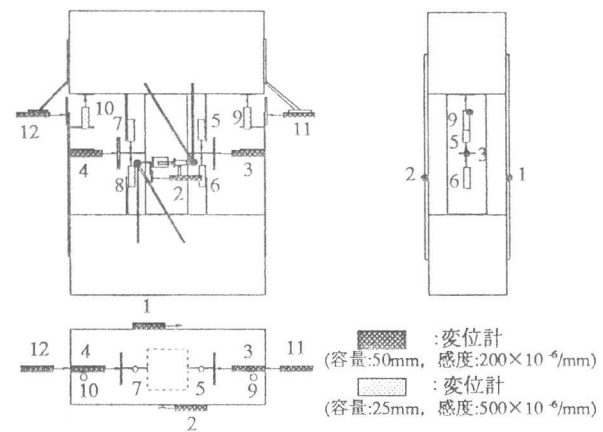


図-3 変形の取り付け略図

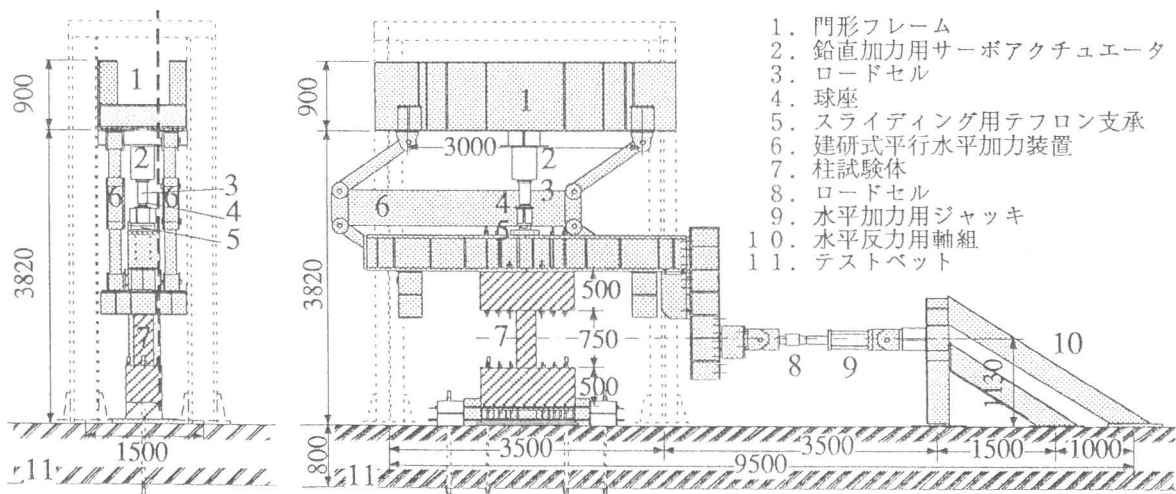


図-4 加力装置と柱試験体取り付け状況

NN-2)では部材角が小さいレベルから付着割裂ひび割れが数多く、しかも細かに生じた(表-4参照)。一方、在来の鉄筋を帯筋に用いたRC柱では付着割裂ひび割れがほとんど見られず、基本的には曲げひび割れ先行の曲げせん断ひび割れが支配的であった。

柱のQ-R曲線に関する実験結果と、鉛直方向の柱の伸縮変形を柱の内のり高さで除した平均収縮ひずみ ϵ_v と部材角Rの関係も合わせて表-5に示す。表-5から求めた実験結果のスケルトンカーブに関する比較を図-5に示す。初期剛性を検討するために、図-5からスケルトンカーブをR=0.5%まで拡大して描いた図を図-6に示す。また、各柱の累積エネルギー吸収量W(MN・cm)と部材角R(%)の関係を図-7に示す。これらの図表により、帯筋にFRP筋を用いると耐力とエネルギー吸収量が若干低下するものの、初期剛性とじん性に関しては在来鉄筋とほとんど差異がないことがわかる。耐力やエネルギー吸収量が若干低下する理由としては、表-2および図-2に示すよ

表-4 一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平外力を受ける柱の各部材角終了時のひび割れ状況

帯筋 (主筋共通)		R=0.5%		R=1.0%		R=1.5%		R=3.0%	
		WEB	FLANGE	WEB	FLANGE	WEB	FLANGE	WEB	FLANGE
FRP筋	NFC-NN-1 (@60mm)								
	NFC-NN-2 (@40mm)								
鉄筋	RCC-NN-1 (@60mm)								
	RCC-NN-2 (@40mm)								

うにFRP筋のヤング係数が鉄筋より小さいために、帯筋によるコンクリートの横拘束効果がやや小さいためと考えられる。ただし、図-7でFRP筋のピッチが小さい(帯筋量が多い)試験体" NFC-NN-2" が、FRP筋のピッチが大きい(帯筋量が少ない)試験体" NFC-NN-1" よりエネルギー吸収量が小さい実験結果になっている。断面の平面保持を仮定したfiberモデルによる柱試験体の弾塑性解析を行い、実験結果と比較した。FRP筋を用いた帯筋による横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの構成則に関する実験式がないので、解析は帯筋

表-5 各柱のQ-R曲線, 材軸伸縮ひずみ曲線 (実験結果)

帯筋 (主筋共通)	全変形		
	Q-R 曲線	材軸伸縮ひずみ ϵ_v -R 曲線	
FRP筋	NFC-NN-1 (@60mm)		
	NFC-NN-2 (@40mm)		
鉄筋	RCC-NN-1 (@60mm)		
	RCC-NN-2 (@40mm)		

に鉄筋を用いたRC柱試験体(RCC-NN-1, 2)に限定する。解析に用いる鉄筋, コンクリートの各材料定数は表-2, 3より与えた。鉄筋は完全弾塑性を仮定した。帯筋の横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの構成則[2]と, 在来からのe関数を用いた(図-8参照)。各軸圧縮力ごとに求めた曲げモーメントの最大値を用いて作成した柱試験体のN-M相関曲線を図-9に示す。柱試験体の高さ方向に曲率分布を表-6のように仮定して曲げ変形を算出した。そのうえに弾性時のせん断変形と, 軸力によるP- δ 効果も考慮した柱試験体のせん断力Qと部材角Rの関係を図-10に示す。計算結果は実験結果をほぼとらえているようである。特に, 帯筋によるコンクリートの横拘

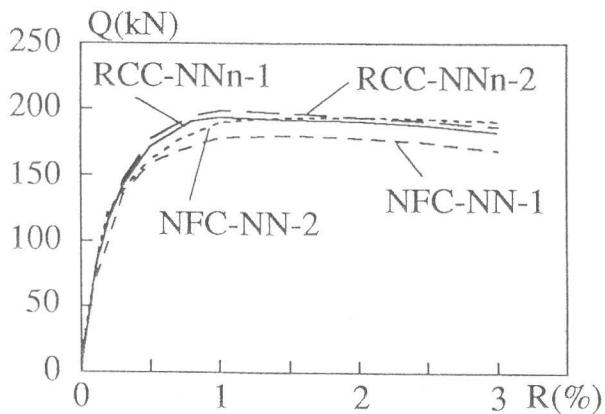


図-5 スケルトンカーブ (実験結果)

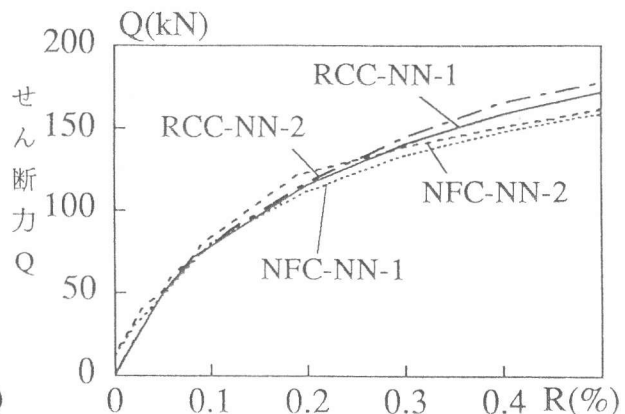


図-6 初期剛性の比較 (実験結果)

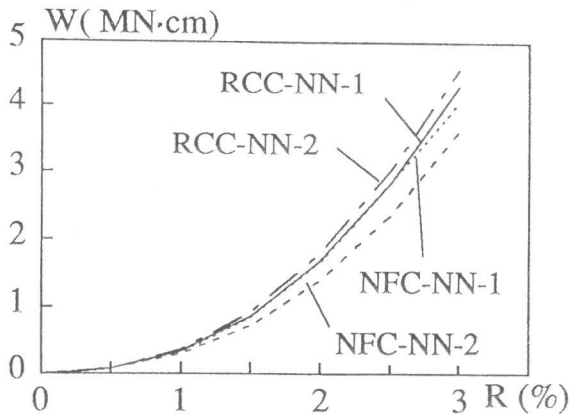
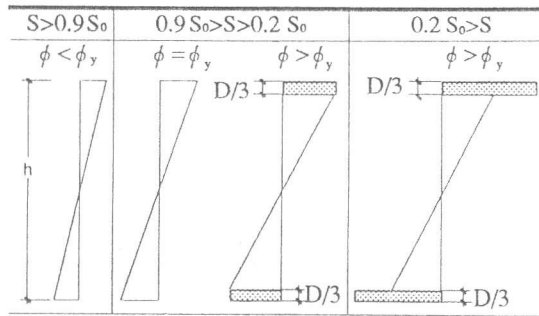


図-7 累積エネルギー吸収量 (実験結果)

表-6 柱の曲率分布仮定



注) h : 柱の内り高さ, D : 柱せい, ϕ_y : 最外縁の主筋降伏時の曲率, S : $M-\phi \cdot D$ 曲線の勾配, S_0 : $M-\phi \cdot D$ 曲線の初期勾配

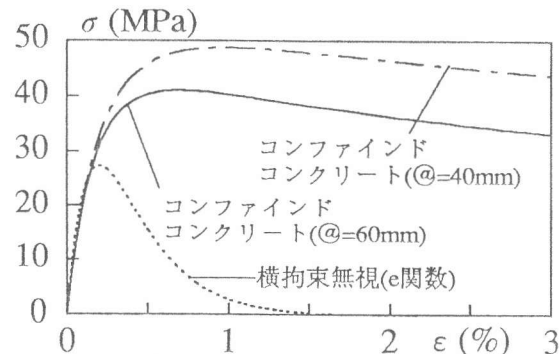


図-8 仮定したコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線

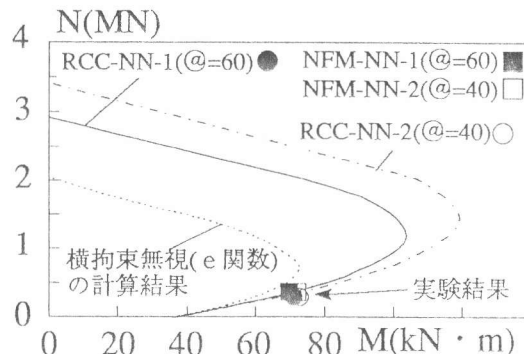


図-9 柱のN-M相関曲線

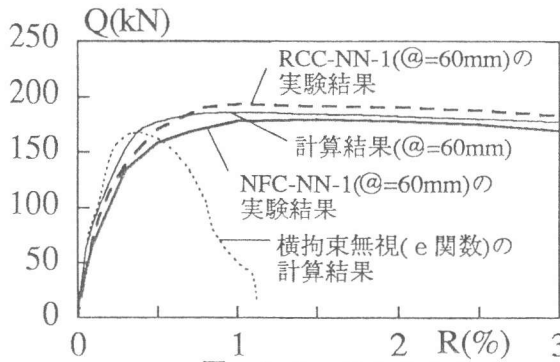


図-10 スケルトンカーブに関する実験結果と計算結果の比較

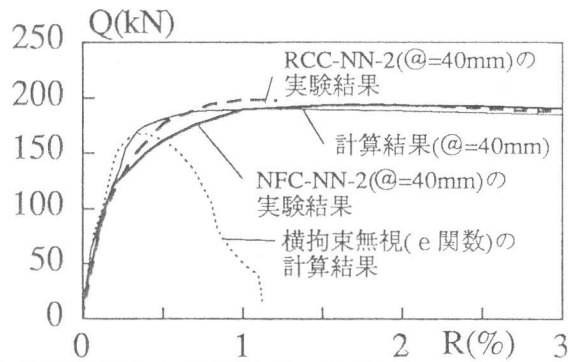


表-7 帯筋 (@60mm) のひずみと部材角の関係 (柱脚位置における実験結果)

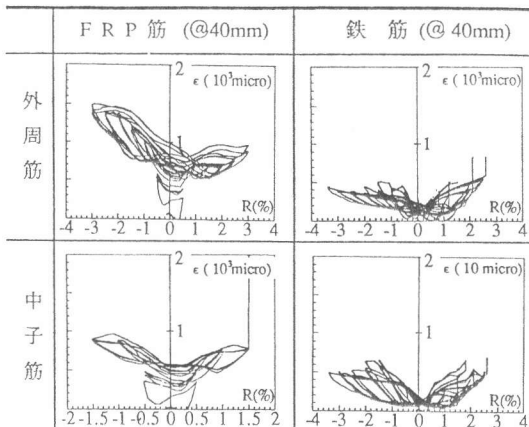
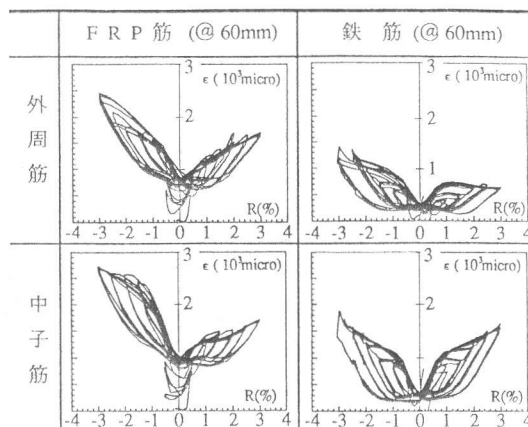
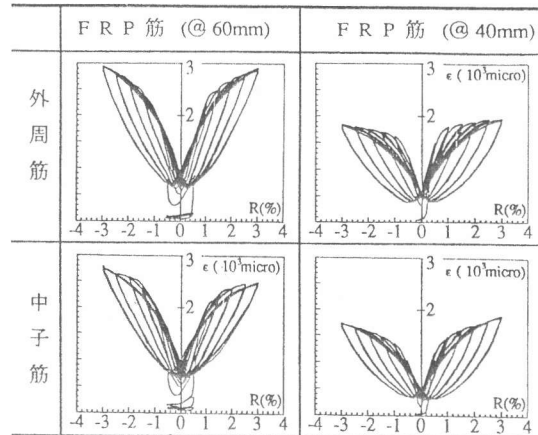


表-8 帯筋 (@40mm) のひずみと部材角の関係 (柱脚位置における実験結果)



束効果を考慮したコンファインドコンクリートの構成則を用いることが重要であり、従来のように横拘束効果を見逃した ϵ 関数では実験結果を説明できないことを示唆している。特に、軸力が大きくなると曲げ強度に大きな差異が生じている(図-9参照)。帯筋の横拘束効果を見るために、表-7, 8に柱脚部の帯筋のひずみ ϵ と部材角 R の関係を示す。表-7, 8によればFRP筋のひずみが鉄筋のひずみより常に大きくなっている。このように横補強筋のひずみが大いことは、それだけ柱のコアコンクリートが膨張していることになり、FRP筋の横拘束効果が小さいことを意味している。表-9に柱の反曲点位置における帯筋のひずみを参考までに示す。

表-9 FRP筋(帯筋)のひずみと部材角の関係(反曲点位置における実験結果)



5. 結論

主筋を在来鉄筋(D10-SD345)で共通に配筋し、帯筋に連続繊維補強筋(FRP筋)を用いたRC柱は、在来鉄筋(D6-SD295A)を帯筋に用いたRC柱より耐震性能のうち耐力、エネルギー吸収量の点で若干低下するようである。これはFRP筋のヤング係数が図-2, および表-2に示すように鉄筋より小さいために、帯筋によるコンクリートの拘束効果がやや小さいことも、その原因の1つではないかと考えられる。このことは、表-4に示したひび割れが付着割裂の様相を示していることからもある程度推測される。しかし、FRP筋が破断したり、一体に成形されたグリッドの交叉部で破断するようなことは一切観察されず、柱の部材角が3%まで十分変形に追随できることがわかった。また、柱の解析には帯筋による横拘束効果を、コンファインドコンクリートの構成則として反映させることが特に重要であることがわかった。

謝辞:

本実験に関して清水建設(株)の磯畑脩博士、田中伸幸氏らに種々のご教示とご協力、ご支援をいただきました。PC鋼棒は高周波熱練(株)に提供していただいたほか、加力装置のリフォーム、治具関係、取り付け等は地元石綿の金秀建設(株)、生コンは石綿県生コンクリート工業組合、大城物産に、そのほか多くの皆様にいろいろとお世話になりました。本研究に琉球大学大学院生の枇杷田篤君等のほか、琉球大学4年生・島袋学(三見金属工業(株))、中山耕一(琉球大学大学院学生)、八木格((株)青木建設)の各君が平成5年度の卒業研究として参加した。ここに記して、関係各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献:

- [1] 杉田稔, 中辻照幸, 藤崎忠志 他多数: "繊維強化複合素材(NFM)の建築構造への利用に関する研究その1-その13", 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), (関東), (九州), (中国), pp.131-138, pp.813-818, pp.147-150, pp.959-966, 1987年, 1988年, 1989年, 1990年
- [2] J.B.Mander, M.J.N.Priestley and R.Park: "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, Aug. 1988
- [3] 山川哲雄 他2名: "鋼管と帯筋で二重に横補強したRC短柱の弾塑性性状に関する研究", コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13-2, pp.957-962, 1991年