

## 論文 FRP シート曲げ補強 RC 梁の衝撃荷重載荷実験

岸 徳光\*1・三上 浩\*2・佐藤昌志\*3・安藤智啓\*4

要旨：本研究では、新素材繊維シートで曲げ補強した各種 RC 梁の衝撃荷重載荷実験を行い、無補強 RC 梁の衝撃挙動との比較によりシート補強が RC 梁の耐衝撃性に与える影響を検討した。その結果、1) シート補強を施すことで曲げひび割れが分散し梁の損傷は抑制され、その抑制効果は目付け量等によって異なる。2) シートの軸剛性が同等であれば、梁の応答変位は同程度に抑制される。3) FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃設計は、静的曲げ耐力の 2 倍程度を動的耐力と評価することで可能であるものと判断される、等が明らかになった。

キーワード：RC 梁、曲げ補強、新素材繊維シート、衝撃荷重、耐衝撃性

## 1. はじめに

著者らは、これまで主として曲げ破壊型の鉄筋コンクリート (RC) 梁の耐衝撃性に関する実験的・数値解析的研究を行ってきた。その結果、1) 重錘落下衝撃実験において、重錘の衝突速度を梁が終局に至るまで 1 m/s ずつ漸増させて行う実験 (以下、繰り返し載荷実験) 結果は、実現象に即した単一載荷実験と照らして大略類似の性状を与えること、2) 梁終局時の最大合支点反力と静的曲げ耐力の関係および載荷エネルギーと吸収エネルギーの関係を工学的に定式化できること、3) それらの関係式を用いることにより、静的曲げ耐力に基づく曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計が可能であること、等が明らかになった<sup>1),2)</sup>。一方、近年北海道積丹半島周辺の国道上で発生した大規模岩盤崩落に代表されるように、地山の経年変化により落石規模が大きくなる傾向にある。落石防護構造物はこのような状況に対しても、補強等によって十分な安全性を確保しなければならない。

本研究では、このような状況を鑑み、既設耐衝撃用 RC 部材を新素材繊維 (FRP) シートで曲げ補強した場合の耐衝撃性向上効果および耐衝撃補強法を確立するための基礎資料を得ることを目的

として、FRP シート曲げ補強 RC 梁の衝撃荷重載荷実験を行った。また、この種の実験例は極めて少ないことより載荷方法の影響にも着目し、繰り返し載荷および単一載荷の 2 種類の載荷方法による実験を試みた。なお、本実験に用いた試験体は、材質や目付け量の異なる FRP シートで曲げ補強した RC 梁および無補強 RC 梁であり、いずれも静載荷時に曲げ破壊が卓越する梁である。

## 2. 実験概要

表-1 に試験体および実験結果の一覧を示す。試験体数は、アラミド繊維シート (以下、AFRP シート) および炭素繊維シート (以下、CFRP シート) を 2 種類の目付け量で補強した梁と無補強梁の 5 種類に対して 2 体ずつ製作した計 10 体である。試験体名はシートの材質 (N: 無補強, A: アラミド繊維, C: 炭素繊維), 目付け量 (AFRP シートの場合: 415, 623 g/m<sup>2</sup>, CFRP シートの場合: 300, 445 g/m<sup>2</sup>), 載荷方法 (I: 繰り返し載荷, S: 単一載荷) を組み合わせて表示している。静的曲げ耐力  $P_{usc}$  は、表-2, 3, 4 に示すコンクリート, FRP シートおよび主鉄筋の力学的特性

\*1 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

\*2 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

\*3 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博 (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 工学部建設システム工学科 工修 (正会員)

表-1 試験体および実験結果の一覧

試験体名	衝突速度 $V$ (m/s)	静的曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	累積残留変位 $\delta_{cr}$ (cm)	最大重錘衝撃力 $P_{ud}$ (kN)	最大支点反力 $R_{ud}$ (kN)	実験終了時 シートの状態
N-I	1~4	19.3	8.87	118.0	113.7	-
A415-I		30.3	5.35	122.6	93.2	剝離
A623-I		34.7	4.91	125.2	102.8	剝離
C300-I		30.9	5.73	123.4	109.9	破断
C445-I		35.4	4.79	127.1	104.7	剝離
N-S	4	19.3	5.27	115.6	66.4	-
A415-S		30.3	3.31	124.9	52.5	一部破断
A623-S		34.7	2.25	123.8	50.5	変化なし
C300-S		30.9	2.69	126.6	78.3	一部破断
C445-S		35.4	2.10	127.6	78.1	変化なし

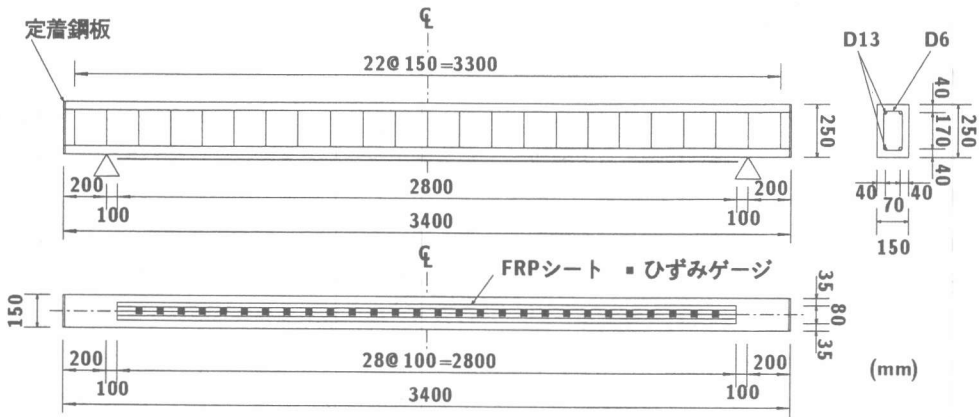


図-1 試験体の形状寸法および配筋位置

を用いて断面分割法により算出している。また、表中には、衝突速度  $V = 4$  m/s 時の最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、最大支点反力  $R_{ud}$ 、累積残留変位  $\delta_{cr}$  および実験終了時におけるシートの状態も合わせて示している。

図-1 に試験体の形状寸法、配筋位置およびシートに貼付したひずみゲージ位置を示す。各試験体は梁高および梁幅がそれぞれ 25 cm、15 cm の複鉄筋矩形形梁である。また、梁端部には主鉄筋の定着長を節約するため 9 mm 厚の鋼板を設置し、この鋼板に鉄筋を溶接している。スターラップは D6 (SD295A) を 15 cm ピッチに配筋している。各 FRP シートは、幅 8 cm のものを用い、シートとの付着性を向上させるためにコンクリートのシート接着面に 2.5 mm 深さのチップングを施し、梁下面の梁幅中央部に両支点 10 cm 手前まで貼り

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
47	22.5	22.7	0.19

表-3 FRP シートの力学的特性

材質	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	目付け量 ( $g/m^2$ )	シート厚 (mm)	軸剛性 (MN/m)
アラミド	2.48	127	415	0.286	36.2
			623	0.429	54.3
炭素	4.07	231	300	0.167	38.5
			445	0.248	57.2

表-4 主鉄筋の力学的特性

主鉄筋 名称	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
D13	379	546	206	0.3

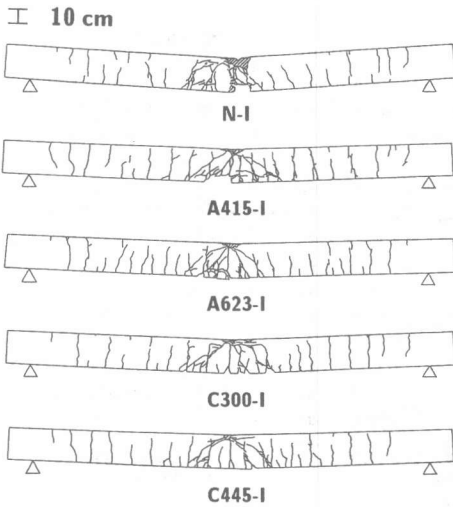


図-2 繰り返し載荷実験終了後のひび割れ分布

付けている。また、シート中心線上にはゲージ長 10 mm のひずみゲージを 10 cm 間隔で 28 点貼付している。なお、梁支定点は端面から 20 cm の位置で鋼製治具により固定し、梁のリバウンドを防止している。治具全体は梁の回転を許容し、ピン支持に近い境界条件となっている。

実験は RC 梁のスパン中央部に重量 2.94 kN、載荷部直径 15 cm の円柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させて行っている。重錘落下は、繰り返し載荷の場合には初速度、増分速度を 1 m/s とし梁が終局に至るまで行い、単一載荷の場合には繰り返し載荷の最終衝突速度と同一速度で行っている。RC 梁の破壊は、全て曲げ破壊型であるものと推察されることより、既往の研究<sup>1)</sup>と同様にスパン中央部の累積残留変位が純スパン長の 2% (本試験体の場合にはいずれも 6 cm) 程度に達した状態と規定している。表-1 より、N-I 梁の場合には累積残留変位が 6 cm を大きく越えている。なお、測定項目は重錘衝撃力、支点反力、シートのひずみ、スパン中央部の変位 (以下、載荷点変位) 波形である。重錘衝撃力および支点反力の測定にはそれぞれ容量 1470, 500 kN、応答周波数 4.0, 2.4 kHz のひずみゲージ型ロードセルを、載荷点変位の測定には容量 200 mm、応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いている。

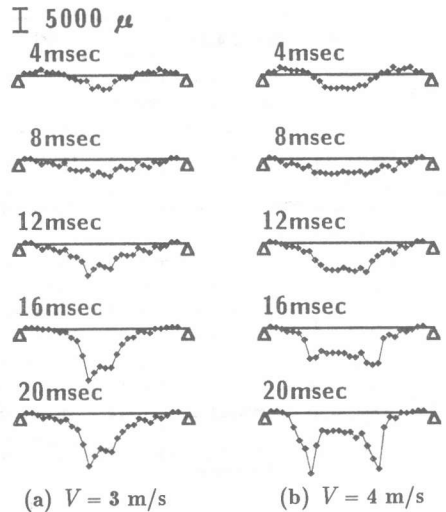


図-3 シートのひずみ分布 (A623-I)

### 3. 実験結果および考察

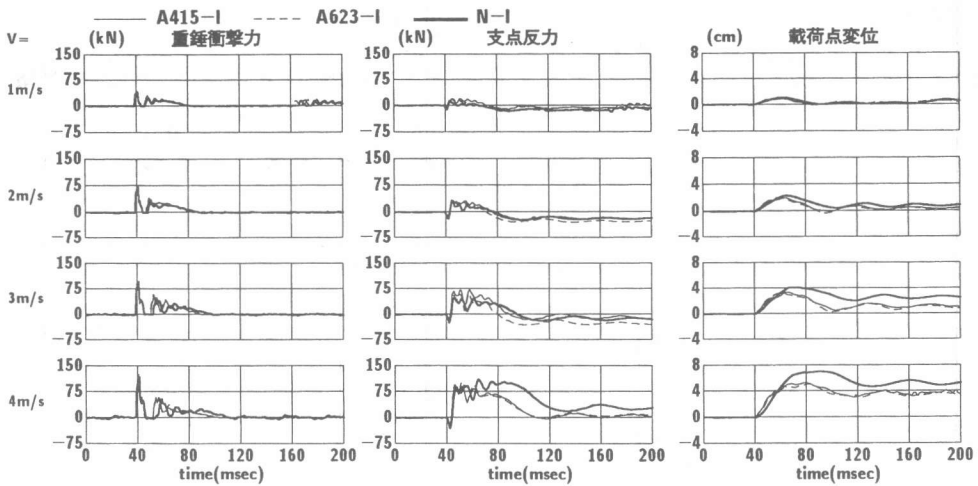
#### 3.1 ひび割れ分布

図-2 に繰り返し載荷実験終了後の各 RC 梁のひび割れ分布を示している。図より、FRP シート補強した試験体の変形量は無補強試験体のそれに比べて小さいことがわかる。また、シート補強した試験体の曲げひび割れ本数は無補強試験体のそれに比べて多い。シートの材質および目付け量の影響についてみると、AFRP シート補強の試験体、また目付け量の多い試験体の方が曲げひび割れ本数が若干多く、ひび割れ分散効果が大きく示されている。

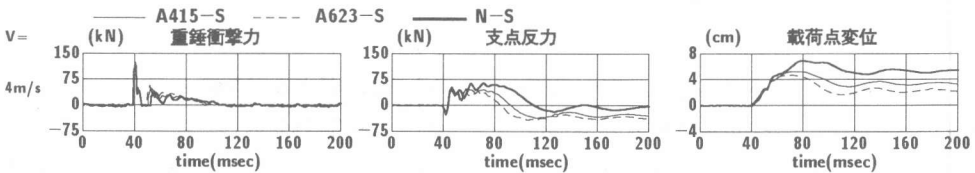
#### 3.2 シートのひずみ分布

図-3 には A623-I 梁を例に、シートのひずみ分布の時間的推移状況を示している。図中の時間は重錘衝撃力が励起する時刻を 0 msec とした経過時間であり、ひずみの符号は上下をそれぞれ圧縮、引張としている。(a) 図は衝突速度  $V = 3$  m/s、(b) 図はシートの剝離を伴い終局に至った  $V = 4$  m/s 時の分布である。

両図とも、重錘衝突後 4 msec 時に梁支定点部近傍に圧縮ひずみが生じていることがわかる。これは、重錘衝撃力が梁に作用した直後に、3 次モードが励起されたことを示唆している。しかしながら、8 msec 経過時には最低次モードのみの分布と



(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷

図-4 重錘衝撃力波形, 支点反力波形および荷重点変位波形 (A415, A623)

なっている。16 msec 時以降には、(a) 図では荷重点部近傍で大きな引張りずみが生じているのに対して、(b) 図では荷重点から多少離れた位置で大きな引張りずみが生じている。これは、図-2 にみられるように、アーチ状ひび割れの進展による中央部コンクリートの押し抜けが、シートの引き剥がれ(ピーリング)を発生させたことによるものと考えられる。

### 3.3 重錘衝撃力波形, 支点反力波形および荷重点変位波形

図-4 は、AFRPシート補強した A415 と A623 梁の重錘衝撃力, 支点反力および荷重点変位波形を無補強梁の各波形と合わせて示したものである。(a), (b) 図はそれぞれ繰り返し載荷と単一載荷の結果を示している。ここで、支点反力は両支点反力の合計としている。

(a) 図より、シート補強した試験体の各波形の継続時間は、いずれも無補強試験体のそれに比べて衝突速度の増大とともに相対的に短くなる傾向

にあることがわかる。これは、FRPシート補強をすることにより、シートの軸剛性やひび割れの発生および進行が抑制され、梁の曲げ剛性が無補強に比較して大きくなることによるものと推察される。また、重錘衝撃力および支点反力の最大値は補強の有無によらず大略類似しているが、荷重点変位の最大値はシート補強することにより減少している。一方、目付け量の異なる A415, A623 に着目すると、目付け量が多い A623 の支点反力および荷重点変位波形の継続時間が、A415 のそれに比べて若干短い傾向にある。また、荷重点変位の最大値も若干 A623 の方が小さいようである。

(b) 図より、(a) 図の場合と同様、シート補強の場合は、無補強の場合に比較して各波形の継続時間が短かつ荷重点変位の最大値も小さく示されている。一方、目付け量の違いをみても、A623 の支点反力, 荷重点変位波形の継続時間の方が短かつ荷重点変位の最大値も小さい。また、この傾向は (a) 図の場合よりも顕著に示されている。

これは、表-1に示したように単一載荷の場合にはシートの剝離あるいは著しい破断が生じなかったことより、目付け量によるシート軸剛性の違いが梁の応答性状に顕著に現れたためと推察される。

なお、これらの結果はCFRPシートで補強した試験体の場合にも大略同様であった。

### 3.4 累積残留変位

図-5に繰り返し載荷における各RC梁の累積残留変位を示している。図より、シート補強した試験体の累積残留変位は、無補強試験体のそれに比べて小さいことがわかる。また、シート補強した試験体の目付け量の違いに着目すると、A415とC300の累積残留変位は、それぞれA623とC445のそれよりも若干大きい。さらに、シートの材質

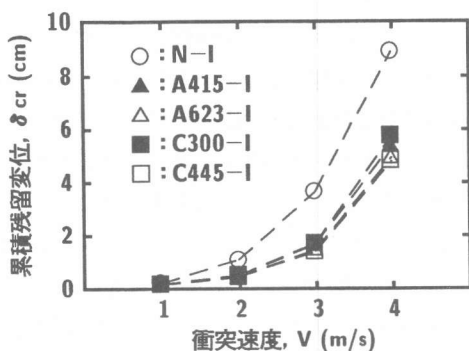


図-5 累積残留変位

の違いに関してみると、A415とC300およびA623とC445の累積残留変位は大略一致していることがわかる。なお、表-1に示されているように、これらの結果は単一載荷の残留変位に対しても同様である。これより、梁の応答変位の抑制効果は、シートの材質によらずシートの軸剛性が同等であれば同程度であるものと判断される。

### 3.5 重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線

図-6は、 $V = 4 \text{ m/s}$ における各RC梁の重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線を示したものである。(a),(b)図はそれぞれ繰り返し載荷と単一載荷の結果である。また、図中 $E_P, E_R$ は、それぞれ重錘衝撃力および支点反力の履歴曲線から求まる吸収エネルギー量である。なお、N-I試験体では、その累積残留変位が破壊基準を大きく越えている点に留意する必要がある。まず、重錘衝撃力-載荷点変位曲線についてみると、載荷方法によらず、重錘衝撃力は梁の変位が励起されない段階で急激に増加していることがわかる。また、最大値を示した後少ない変位量で一旦急激に除荷されている。なお、この第1ループの形状は、試験体によらず大略類似している。その後、再度急激に増加し、第2ピーク発生後変

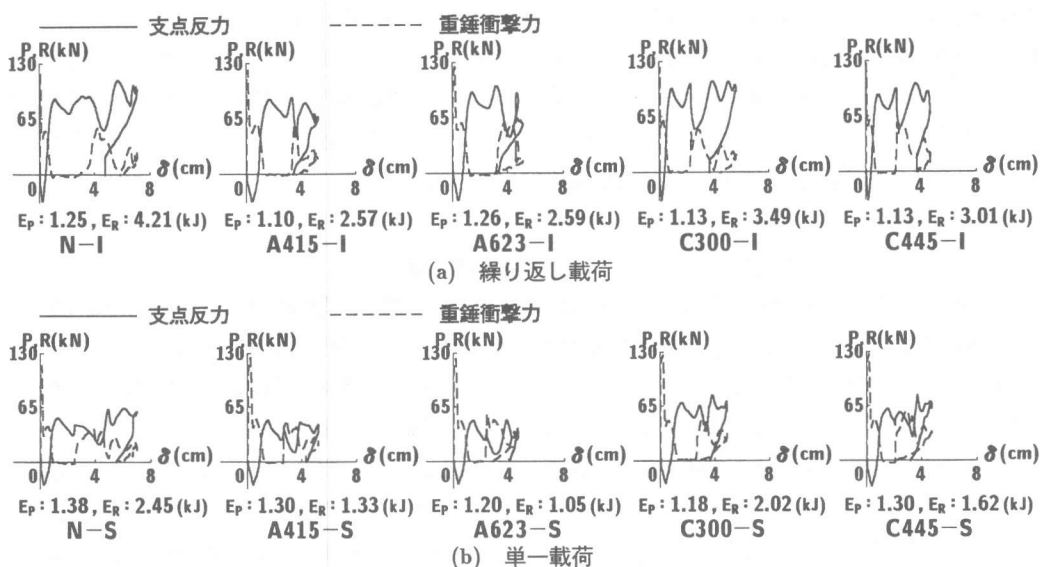


図-6 重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線 ( $V = 4 \text{ m/s}$ )

位の増大とともに徐々に減少している。この第2ループは試験体によりその形状や面積が若干異なっている。特に、無補強試験体の吸収エネルギーは、シート補強した試験体のそれに比べて大きい。これは、無補強の場合にはシート補強の場合に比べて梁の損傷による曲げ剛性の低下が著しく、この時点の耐衝撃性が乏しいことを暗示している。

次に、支点反力-載荷点変位曲線についてみると、載荷方法によらず、支点反力は重錘衝撃力の第1ループの急激な減少とともに増大し、重錘衝撃力の第2ループの立ち上がり近傍で若干減少した後再度増大していることがわかる。ここでも無補強試験体の吸収エネルギーは、シート補強した試験体のそれより大きく示されている。また、同材質のシートでは目付け量が多い試験体の吸収エネルギーが小さく、同程度の軸剛性ではAFRPシート補強の試験体の吸収エネルギーが小さい傾向にある。これは、同一衝突速度では吸収エネルギーの小さい梁が耐衝撃上健全である点を考慮すると、RC梁を目付け量が多いAFRPシートで補強した場合が最も健全であることを示唆している。

### 3.6 最大支点反力と静的曲げ耐力の関係

図-7は、各RC梁破壊時における最大支点反力の静的曲げ耐力に対する比（以下、耐力比率）を示したものである。なお、重錘衝撃力波形は衝撃初期に継続時間が著しく短かつ振幅の大きい第1波を含む複雑な性状を示すことより、ここではそれらの影響を間接的に含む最大支点反力に着目して検討することとした。また、図-5より、N-I試験体の累積残留変位は  $V=4\text{m/s}$  時に破壊基準を大きく越えていることより、一段低い  $V=3\text{m/s}$  時のデータを用いて評価している。

図より、各載荷方法における耐力比率は試験体により若干異なるものの、繰り返し載荷の場合で3.0程度、単一載荷の場合でN試験体を除き2.0程度である。なお、載荷方法による耐力比率の違いは、実験時におけるシートの剝離や破断の有無が大きく影響しているものと考えられる。以上より、既往の研究結果<sup>1),2)</sup>と同様、FRPシート補強したRC梁も、シートの材質や目付け量に関わ

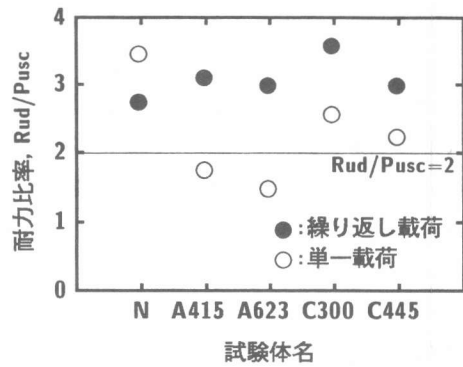


図-7 耐力比率

らず耐力比率を2.0程度と評価することで、衝撃荷重に対する設計が可能であるものと推察される。

## 4. まとめ

アラミド繊維および炭素繊維シートで曲げ補強したRC梁の衝撃荷重載荷実験を行い、各RC梁の耐衝撃性を検討した。本実験結果を要約すると、

- (1) 梁下面にシート補強を施すことで曲げひび割れが分散し、梁の損傷が抑制される。また、シートの目付け量が多いほどその分散性は高く、かつ梁の損傷抑制効果は大きい。
- (2) シートの材質によらず、その軸剛性が同等であれば梁の応答変位は同程度に抑制される。
- (3) 梁の吸収エネルギーはシート補強により低減し、耐衝撃性は向上する。
- (4) FRPシート曲げ補強RC梁の耐衝撃設計は、静的曲げ耐力の2倍程度を動的耐力（最大支点反力）と評価することで可能であるものと判断される。

## 参考文献

- 1) 岸 徳光, 安藤智啓, 三上 浩, 松岡健一: RC梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響, 第4回建造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1998.
- 2) 松岡健一, 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: スパン長の異なるRC梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, 1998.