

論文

[2157] AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 梁の衝撃挙動に及ぼす緊張材位置の影響

田村富雄*1・三上 浩*2・岸 徳光*3・松岡健一*4

1. はじめに

建設材料として用いられているコンクリートは、圧縮に比べ引張やせん断に弱いという宿命的な欠点があり、この弱点を補うものとして RC や PC が考案され利用されている。しかし、補強材に用いる鉄筋や PC 鋼材などは、耐蝕性や帯磁性に問題があり、これらを改良すべく連続繊維状の高分子材料を補強筋として用いるコンクリートに関する研究が活発に行われている [1], [2]。

著者らも新素材として組紐状 AFRP ロッドを用いたコンクリート部材について種々研究している [3], [4]。これらの研究結果は、AFRP ロッドの特性（高強度、高弾性伸び率）が衝撃的な外力を受ける部材の補強材として有利であることを示しており、さらに詳細な検討を加えるべく研究を進めている。特に、緊張材として長繊維を用いた PC 部材に対する衝撃実験はこれまで例がなく、従来の PC 鋼材を用いた PC 部材の衝撃挙動に及ぼすプレストレスの影響もまだ明らかではない。

本論文では、この点に着目し組紐状 AFRP ロッドを PC 緊張材として用いた梁を対象に、これが落錘衝撃力を受けるときの衝撃挙動に及ぼすプレストレスの影響を検討した。衝撃挙動に及ぼすプレストレスの影響としては導入プレストレス量、緊張材位置、PC 材の材質などが考えられるが、本研究では特に総プレストレス量（断面中心でのプレストレス応力）を一定とし、緊張材位置を変化させた実験を行い緊張材位置の影響に限定して検討した。

2. 実験概要

試験体の一覧を表-1 に示す。PC 梁はプレテンション方式で作製した。用いた緊張材は組紐状の AFRP ロッド FA11、FA13（公称径 10.4 mm、12.7 mm）である。組紐状 AFRP ロッド FA11、FA13 は保証引張耐力がそれぞれ 8.0 tonf、12.0 tonf で、弾性係数は $0.7 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ である。緊張材位置は 3 種類とし、(a) 断面中央に 1 本 (PC-A)、(b) 断面下側核点位置に 1 本 (PC-B)、(c) 断面上下の核点位置に 2 本 (PC-C) とした。また、総プレストレス量はいずれも同一とし、プレストレス応力は断面中央位置で 50 kgf/cm^2 とした。コンクリートは 25 日圧縮強度が 465 kgf/cm^2 で、弾性係数は $2.9 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ である。なお実験はコンクリート打設後 25 日目に行った。

図-1 に試験体の形状寸法、配筋及びゲージ位置を示す。なお、張出し部の長さは、衝撃による張出し部の慣性力の影響を少なくし、かつ緊張材の定着長を確保するため 17.5 cm とした。また、各供試体にはスターラップ（丸鋼、径 4 mm）をピッチ 75 mm で配置し、衝撃による梁側面でのコンクリートの剝落を少なくするようにした。さらに、梁の上下各 2 cm の位

表-1 試験体一覧

梁種別	緊張材位置	載荷速度(m/sec)
PC-A	断面中央	1, 2, 3, 4
PC-B	下側核点	1, 2, 3, 4, 5
PC-C	上下核点	1, 2, 3, 4, 5

*1 三井建設（株）技術開発本部技術研究所副所長、（正会員）
 *2 三井建設（株）技術開発本部技術研究所主任研究員、工博（正会員）
 *3 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博（正会員）
 *4 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）

置にひずみ測定用のひずみゲージを貼付するために径 4 mm の丸鋼を配置した。

衝撃荷重は円柱状の鋼製重錘（直径 15 cm、重量 100 kgf）を所定の高さにセットし、梁中央部に自由落下させて載荷した。重錘には衝突時の加速度を測定するために容量 1000 G のひずみゲージ型加速度変換器を両側に 2 個貼付した。支点は、試験体両端面から 17.5 cm の位置で梁の上下を支点反力測定用のロードセルを介し鋼製のピンを用いて単純支持した。

載荷実験は、重錘が梁に衝突する直前の落下速度を載荷速度として、載荷速度を 1m/sec 刻みで破壊するまで行い、重錘加速度、鉄筋及び AFRP ロッドのひずみ、たわみ及び支点反力を測定し、各載荷速度毎にひび割れ状況も観察した。なお、梁破壊時における重錘の載荷速度は PC-A は 4 m/sec、PC-B,C は 5 m/sec であった。

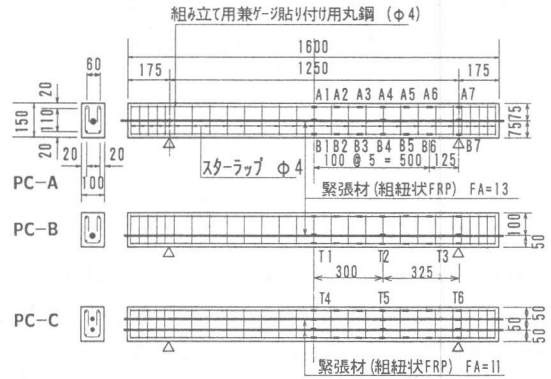


図-1 試験体

3. 実験結果

3.1 ひずみ波形

ひずみ測定用に配置した鉄筋のひずみ波形を載荷速度 3m/sec に限定し、梁中央付近の A1、A2、A3、B1、B2、B3のみについて図-2 に示す。上端筋（A1～A3）の波形はいずれも立ち上がりから約 20msec 経過時までは圧縮の値を示し、その大きさは、 $C < B = A$ である。その後周期約 9 msec の減衰自由振動を示している。圧縮領域から自由振動に移行するとき大きな引張ひずみを生じており、特に PC-B の梁では初期の最大圧縮ひずみより絶対値の大きな引張ひずみを示している。これは梁下縁のプレストレス量に差があるためで、重錘落下後の梁の跳ね返りが PC-B で最も大きいことを示しており、緊張材位置が下方にある B の梁の下縁プレストレス量が最も大きいことに対応するものと考えられる。除荷後の残留ひずみは僅かではあるが生じており、A では圧縮、B では引張、C では A1 で引張、A2、A3 で圧縮となっている。

一方下端筋（B1～B3）のひずみ波形は、衝撃初期に大きな引張ひずみを示し、その大きさは $B = C < A$ である。その後はやはり減衰振動を示し減少しているが、上端筋のようなひずみの反転現象は顕著ではない。また、除荷後の残留ひずみは、いずれの梁も B1 では引張、B2、B3 では圧縮となっている。

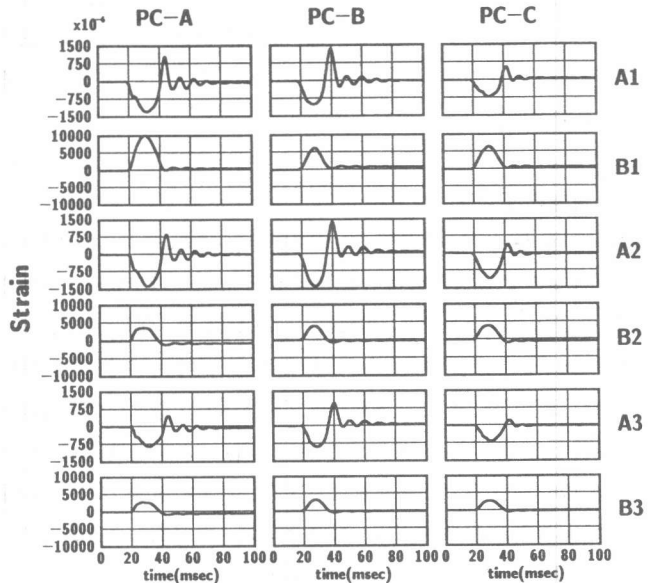


図-2 ひずみ波形 (V=3m/sec)

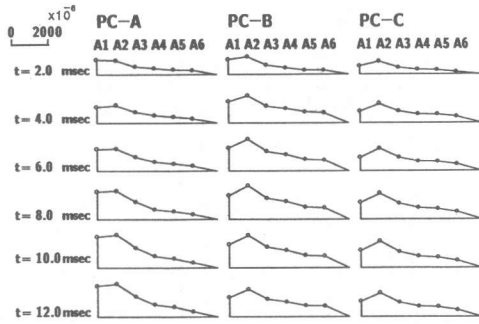


図-3 上端筋ひずみのスパン方向分布

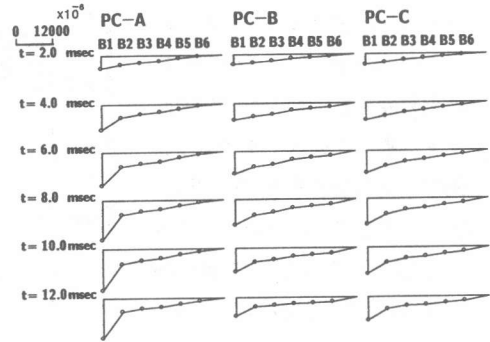


図-4 下端筋ひずみのスパン方向分布

載荷速度 3 m/sec におけるひずみのスパン方向分布を代表的な経過時間ごとに示したのが図-3、4 である。図-3 には、上端筋のひずみ分布を示したが、いずれの梁も最大ひずみ発生時刻付近では中央点で最大値を示さず、A2 点で最大ひずみを示している。この傾向は特に B の梁で著しい。また、下端筋のひずみ分布は図-4 のようであるが、下端筋では時間の経過とともに中央点のひずみが増大し、応力が中央部に集中している様子がわかる。この傾向は特に A の梁で著しい。

各ひずみの最大値と載荷速度との関係を図-5~7 に示した。上端筋については、圧縮と引張の最大値を別々に整理した。下端筋ひずみは (図-5)、破壊近傍を除けば、A、C 両梁のひずみはほぼ載荷速度に比例しているのに対し、B 梁では放物線のような曲線関係を示しており、載荷速度が増加するにつれひずみも大きく増加している。

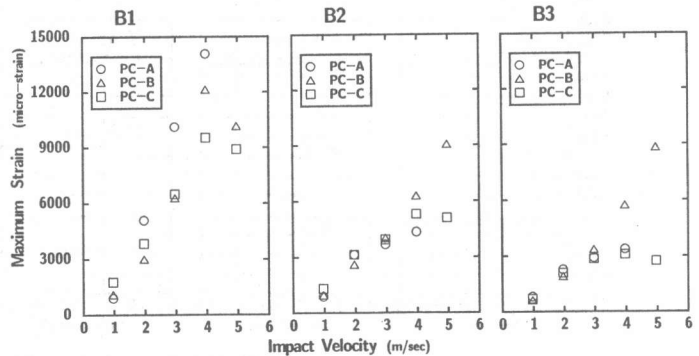


図-5 下端筋ひずみの最大値と載荷速度との関係

上端筋の圧縮ひずみは (図-6)、いずれもきれいな直線関係にないが、A、C の梁は比較的似た挙動を示し、B の梁は A1 のひずみが速度によらずほぼ一定であるのに対して、A2、A3 のひずみは速度に比例して増大する傾向にある。

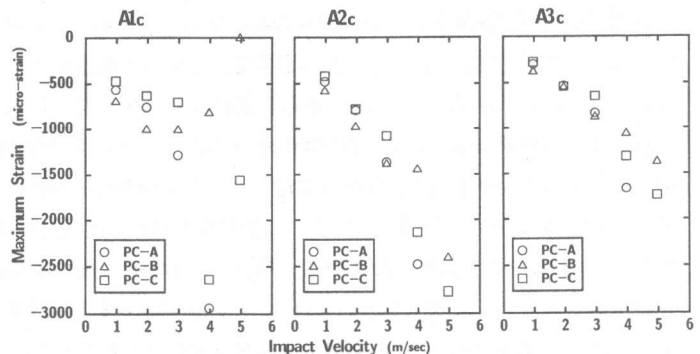


図-6 上端筋の圧縮ひずみの最大値と載荷速度との関係

また、上端筋の引張ひずみ (図-7) でも、A、C の梁は比較的似た挙動を示しているが、B の梁では A1 のひずみが他と比べてかなり大きく、載荷速度とともに放物線的にひずみが増加している。

3.2 AFRPロッドのひずみ波形

図-8に載荷速度が 3 m/sec ときの AFRP ロッドのひずみの時刻歴変化を示す。A、B 梁はロッド一本、C 梁は二本であり、下側ロッドのひずみを T1～T3、上側ロッドを T4～T6 として示した(図-1参照)。中央点のひずみ(T1, T4)を比較すると、C 梁の下側が一番大きく、次が B 梁で、A 梁と C 梁の上側はほぼ

同じ大きさとなっている。これは、B 梁と C 梁の下側は同じ位置であるが、ロッドの断面積が C 梁の方が小さいことと A 梁と B 梁では位置が違うためと考えられる。また、C 梁の上側のひずみも引張となっていることは、梁の下側にひび割れが入り中立軸がかなり上方へ移動していることを示しているものと考えられる。一方、支点部の T3 と T6 のひずみ波形から、A、B 梁では C 梁よりも大きなひずみが残留しており、これは大きな衝撃荷重載荷によって緊張材に抜け出しの現象が生じたことを示すものと推察される。なお、この傾向は C 梁の上側緊張材にも見られる。

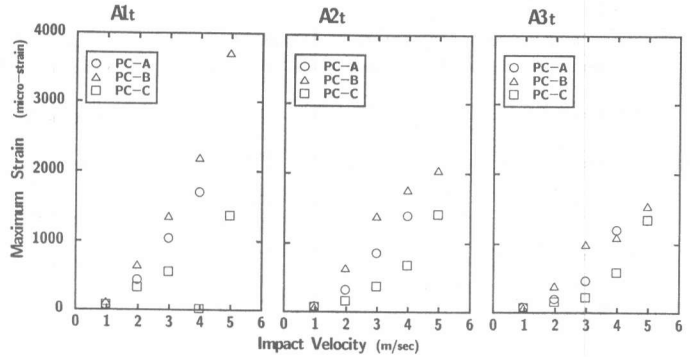


図-7 上端筋の引張ひずみの最大値と載荷速度との関係

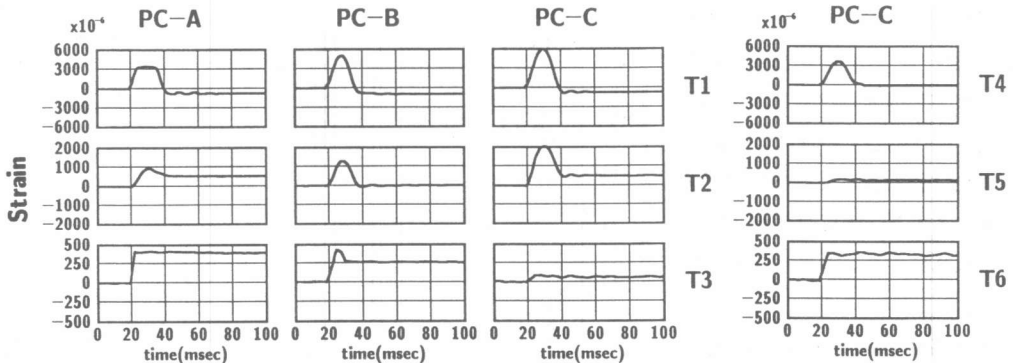


図-8 緊張材 AFRP ロッドのひずみ波形 (V=3m/sec)

3.3 ひび割れ発生状況

各載荷速度毎に観察されたひび割れの状況を図-9に示す。A 梁は 1 m/sec ではひび割れは発生せず、2 m/sec で下側に曲げによるひび割れが生じ、その後本数は変化せず 4 m/sec で圧縮側の圧壊により破壊にいたっている。B 梁は 1 m/sec から下側はもとより上側にもひび割れが発生している。これはひずみ波形でみられた跳ね返りによるひび割れとみられる。その後速度の増加とともにひび割れ長さ、本数とも増加し、せん断ひび割れや、緊張材に沿うひび割れが発生し緊張材にそったひび割れ幅の増大と上側の圧壊によって 5 m/sec で破壊している。C 梁のひび割れ発生状況は 1 m/sec ですでに下側にひび割れが発生するものの A 梁と比較的似ている。即ち、3 m/sec 位までは下側に数本のひび割れが発生するのみで本数も多くはない。A 梁と異なる点は 3～4 m/sec で支付近の上側にもひび割れが発生することである。その後、5 m/sec では中央部にせん断ひび割れがみられるとともに圧縮部が大きく圧壊することにより破壊している。図に示すようにいずれの梁も最終的には圧縮部の圧壊で破壊していると思われるが、最終載荷速度や破壊状態から、衝撃耐力の大きさは A < B < C であると推測される。

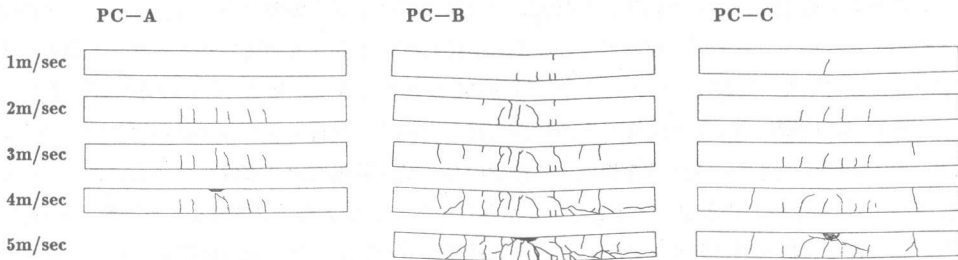


図-9 ひび割れ発生状況

3.4 反力波形

重錘落下衝撃実験では、重錘の衝撃力の評価が重要な問題である。衝撃点の衝撃力を直接評価する方法としては、重錘加速度による方法や落下位置に設置したロードセルによる方法などがある。また、間接的に評価する方法として、支点反力を測定する方法も行われている。本実験では衝撃力と支点反力の関係を明らかに

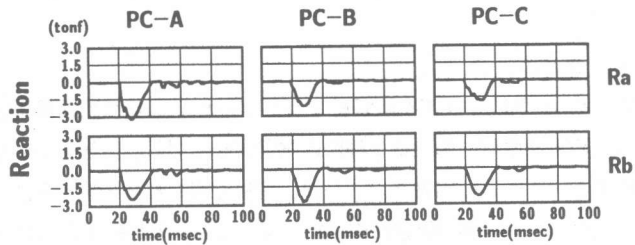


図-10 支点反力波形 (V=3m/sec)

にするために、支点部にロードセルを設置し測定を行った。載荷速度が 3m/sec における計測結果を図-10 に示す。波形は左右の支点部に設置したロードセルの波形である。いずれも衝撃の初期に大きく、主たる反力の継続時間は 20 msec 前後であり、強いて比較すれば、 $B < C < A$ である。また、左右のロードセルの最大値の合計は A、B、C それぞれ約 5.7 tonf、4.9 tonf、4.1 tonf であり、 $C < B < A$ である。

3.5 載荷速度と重錘衝撃力及び支点反力の関係

各梁について、重錘加速度から得られる衝撃力と支点のロードセルから得られる支点反力を載荷速度に対して示せば図-11 のようになる。衝撃力は重錘に取り付けた加速度計の最大加速度に重錘重量を乗じて求めた。各梁の衝撃力は、載荷速度 3 m/sec 位までは多少のばらつきがあるもののほぼ速度に比例しており、大きさの順序は $A < B < C$ である。載荷速度 4 m/sec 以上では、梁の損傷が大きくなるため衝撃力も減少傾向にあり、5 m/sec の B、C 梁はその傾向が大きく特に C の梁で著しい。反力の最大値も載荷速度とほぼ比例関係にあるが、全体として大きさは $C < B < A$ であり、衝撃力とは逆の傾向となっている。図をみると 1 m/sec の値はかなり差があるが、勾配は各梁ともそれほど差はなく、1~5m/sec の平均を取ると A、B、C それぞれ約 1.42 tf、1.28 tf、1.26 tf となっており、衝撃力の約 1/8 ~ 1/10 となっている。

3.6 緊張材位置の影響

以上、総プレストレス量を一定とし(断面中心で一定プレストレス応力)、緊張材位置を変化させた場合の重錘自由落下衝撃を

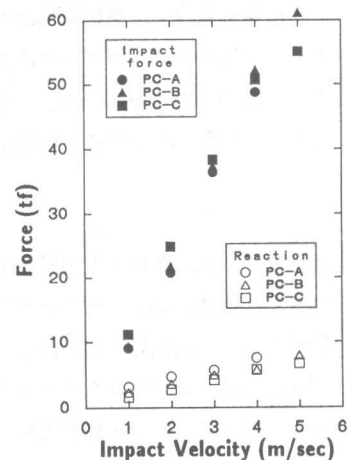


図-11 載荷速度と重錘衝撃力及び支点反力の関係

受ける梁の挙動を考察した。その結果、衝撃力、支点反力等には多少影響はみられるものの、その差はそれほど顕著ではない。しかし、ひずみ及びひび割れ発生状況にはかなりの違いがみられる。即ち、緊張材を断面中心に配置した A 梁では中央部の上下端筋のひずみが大きく、そこでのひび割れが梁上部にまで進展して圧縮部の圧壊により破壊している。B 梁では、下側中央付近のひずみと跳ね返りによる上側の引張ひずみが広範囲に大きく、上下端を貫通する多数のひび割れ発生により破壊している。また、C 梁では A 梁に似た挙動を示しているが、全体としてひずみは小さく、ひび割れが分散して破壊耐力を増加させていると思われる。総合的に判断すれば、これら 3 種の緊張材位置では、上下に配置した C 梁が最良の結果を与えていると考えられる。A 梁では、PC 緊張材は静的載荷時で考えられるプレストレス導入のみの効果で補強筋の効果が少ない。B 梁では PC 材の補強筋効果はあるものの、プレストレスによる初期曲げモーメントの影響により上側が弱点になることが考えられる。それに対して C 梁ではプレストレス導入の効果とともに、補強筋の効果も現れ良い結果を与えるものと推察される。

4. まとめ

組紐状 AFRP ロッドを緊張材として用いた PC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす緊張材位置の影響を検討するため、緊張材位置の異なる 3 種類の試験体を作製し、重錘落下衝撃実験を行った。紙面の都合で全ての実験結果を示すことは出来なかったが、実験で得られた結果から次のことが明らかとなった。

- 1) 破壊に至った載荷速度は PC-A が 4 m/sec、PC-B、PC-C が 5 m/sec であり、緊張材を断面中央に配置することは、衝撃的外力に対しても得策ではない。
- 2) 各梁の重錘衝撃力には顕著な差はないが、傾向として $A < B < C$ であり、載荷速度に比例している。
- 3) 下端筋ひずみは、中央点では A 梁が大きい、その他の点では低速度ではほぼ同じであり、速度が大きくなると B 梁が大きい。
- 4) 上端筋には衝撃初期に大きな圧縮ひずみを生じるが、その後はかなり大きな引張ひずみを生じており、特に B 梁の中央部で大きくその絶対値は圧縮ひずみよりも大きい。
- 5) ひび割れ発生状況を比較すると、A、C 梁は主として下側の引張りひび割れが顕著であるが、C は A に比べひび割れが分散している。B 梁は、A、C 梁とは異なり低載荷速度から上側に引張りひび割れが生じており、載荷速度の増加とともに多数のひび割れが発生している。
- 6) この実験からは、上下に緊張材を配置した梁が総合的に判断して良い特性を示しているものと考えられる。これは、プレストレス応力の効果と PC 緊張材が補強筋として衝撃力に抵抗する二つの効果を合わせ期待できるからであると思われる。
今後、RC 梁との比較などを重ね PC 梁の耐衝撃挙動をより詳細に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 古川 茂・辻 幸和・大谷杉郎・小島 昭：CFRC ロッドで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状、第 11 回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 849-854、1989.6.
- 2) 岡野素之・小島克郎・木村耕三：炭素繊維を緊張材に用いたプレストレスコンクリートはりの曲げ実験、第 12 回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 1111-1116、1990.6.
- 3) 三上 浩・林 寿夫・加藤正利・田村富雄：アラミド繊維による組紐状棒材を用いた PC ばりの静的耐荷挙動、第 10 回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 665-670、1988.6.
- 4) 三上 浩・岸 徳光・松岡健一・能町純雄：組紐状 AFRP ロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動、構造工学論文集、Vol.37A、pp. 1591-1602、1991.3.