

# 論文 コンクリートの膨張作用による鉄筋隅角部の変形挙動に関する解析的検討

田中 泰司\*1・岸 利治\*2

**要旨**：アルカリ骨材反応による鉄筋隅角部の破断問題に対して、本研究では、コンクリートが膨張する際に内部鉄筋に生じる変形状態とひずみの局所化について解析的な検討を行った。その結果、鉄筋隅角部での降伏以降にひずみの局所化が急進し、曲げ戻し的な変形が隅角部とその近傍で卓越すること、局所化の程度は直線部鉄筋の長さとかぶりの有無によって、大きく影響を受けることが示された。また、このような局所化現象は、鉄筋とコンクリートの付着特性に支配されていることが明らかとなった。

**キーワード**：アルカリ骨材反応，メゾレベル解析，局所化，付着，鉄筋破断

## 1. 序論

アルカリ骨材反応により隅角部鉄筋が破断する事例が報告されている<sup>1)</sup>。その原因としては、水素脆化や時効効果などの材料劣化、曲げ加工時の初期損傷、コンクリートの膨張による鉄筋隅角部での変形の局所化などが挙げられ、検討が行われている。

特に、鉄筋の破断を引き起こす直接の駆動力はコンクリートの膨張力であるため、それに伴う鉄筋の変形を把握することは、重要な問題である。

これまでに、膨張作用を受ける鉄筋は曲げ戻し的な変形を受けることが解析的に示されている<sup>2)</sup>。一方、鉄筋破断の発生要因として、初期欠損と脆化現象に着目した研究が精力的に実施されている。材料欠損、脆化現象といった材料的な要因が鉄筋破断問題の主因であるとすれば、ケミカルプレストレス部材や、常時せん断力を受ける部材においても同様の問題が危惧される。

本研究では、コンクリートの膨張が部材断面を取り囲むスターラップや帯筋に与える変形挙動を再検討することによって、これらの問題を

解決する手がかりを得ることとした。この目的のために、メゾレベルの2次元有限要素解析を行い、鉄筋隅角部に生じる変形とひずみについて検討を行った。

## 2. 帯鉄筋を有する正方形断面のメゾレベル解析

### 2.1 解析概要

コンクリートの膨張による帯鉄筋の変形状態を把握するために、2次元有限要素解析を行った。解析対象は内部に帯鉄筋が1組配置された正方形断面とした。解析手法として、本研究ではFine Mesh手法<sup>3)</sup>を採用することとした(図-1参照)。この手法では、鉄筋とコンクリートをそれぞれ単体要素として表現することで、ふしによる変位拘束に伴う、応力伝達が定量的に評価可能である。解析にはRC非線形有限要素解析プログラムWCOMD(Ver.7.7)を使用した。

### 2.2 解析条件

本研究では鉄筋とコンクリートの付着の影響に着目して、付着のある場合とない場合のそれぞれについて以下の方法により解析を行った。

\*1 長岡技術科学大学 環境・建設系助手 修(工) (正会員)

\*2 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門助教授 博(工) (正会員)

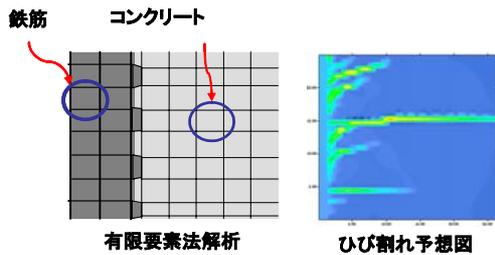


図-1 Fine Mesh 解析

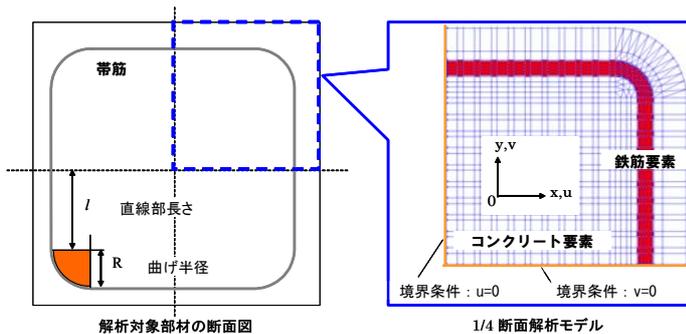


図-2 解析概要

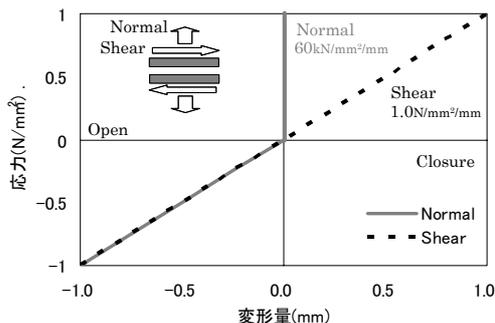


図-3 接合要素の特性値

表-1 解析に使用した材料特性値

コンクリート		鉄筋(D13)	
圧縮強度 $f_c'$	35N/mm <sup>2</sup>	降伏強度 $f_y$	350N/mm <sup>2</sup>
引張強度 $f_t$	2.0N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 $E_s$	200kN/mm <sup>2</sup>
支圧強度 $f_a'$	70N/mm <sup>2</sup>	ふしの高さ	1.0mm
破壊エネルギー ギャー $G_I$	0.09N/mm	ふしのピッチ	15mm

(1) ふしを考慮したメゾレベル解析

正方形断面の対称性を考慮して、1/4断面を解析対象とした(図-2参照)。解析に使用した材料特性値を表-1に示す。アルカリ骨材反応を生じたコンクリートは材料特性が大きく変化することが報告されている<sup>1)</sup>が、ここでは膨張現象の影響に主眼をおいて、健全なコンクリートの材料特性値を使用することとした。縮尺の考察ケースを除き、奥行きは15cm、かぶり厚さは3cm、鉄筋径は13mm、曲げ半径は1.5D(Dは鉄筋径)を標準とした。また、コンクリートの膨張は等方・一様性を仮定し、コンクリート要素に膨張ひずみとして入力した。

材料間には、本来、適切な接合要素を適用すべきであるが、コンクリートおよび鉄筋の変位は鉄筋のふしの位置で相互に拘束を受けることから、鉄筋とコンクリートは完全付着とした。なお、鉄筋と隣り合うコンクリート要素には支圧力が作用するので、圧縮強度に替えて支圧強度<sup>4)</sup> $f_a'$ を採用した。

鉄筋にはバイリニア型のモデルを使用し、降伏以降の剛性は弾性係数  $E_s$  の 1/1000 とした。

(2) 付着を除去した場合の解析

鉄筋の付着の有無が、鉄筋隅角部の変形性状に与える影響を検討することを目的として、付着を除去した解析を行った。材料特性値は前項と同一とし、かぶりコンクリートは考慮しないこととした。鉄筋要素とコンクリート要素間では、直応力のみが伝達するものとして、鉄筋とコンクリートの境界には接合要素を配置した。接合要素の材料特性は、図-3に示す値とした。

2.3 対象因子

対象とする因子は、直線部長さ  $l$ 、部材寸法、かぶり厚さ、付着の有無、とした。

3. 解析の結果および考察

3.1 コンクリートの膨張量と鉄筋のひずみ分布

図-4には、ふしを考慮した場合の、膨張量の増加にともなう鉄筋ひずみ分布の推移を示した。なお、ひずみの値には以下の式から算定される相当ひずみの要素内での平均値を採用した。

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\left\{ \varepsilon_x^2 - \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y + \varepsilon_y^2 \right\} + \frac{3}{4} \cdot \varepsilon_{xy}^2} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon$ は相当ひずみ、 $\varepsilon_x$ はx方向の軸ひずみ、 $\varepsilon_y$ はy方向の軸ひずみ、 $\varepsilon_{xy}$ はせん断ひずみをそ

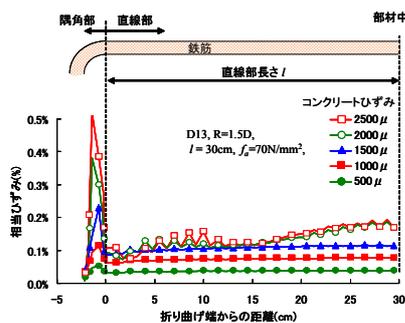


図-4 コンクリートの膨張に伴う鉄筋ひずみ分布の推移

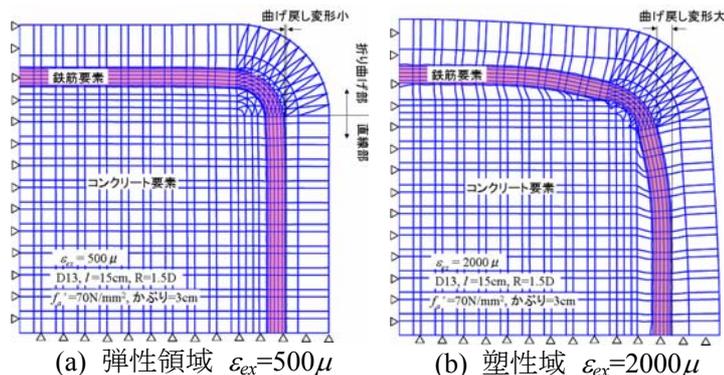


図-5 コンクリート膨張による部材変形図

れぞれ表す。

コンクリートの膨張量が数百  $\mu$  程度の初期状態から、隅角部のひずみは周囲に比べて大きい、その度合いは比較的小さい。

鉄筋の降伏は、コンクリートの膨張量が1200  $\mu$  であるときに開始した。鉄筋の降伏以降は、隅角部でひずみの局所化が開始した。膨張ひずみ  $\varepsilon_{ex}$  が2000  $\mu$  を超えると、直線部分のひずみ分布に変化が生じなくなり、隅角部のみで変形が進行する結果となった。このような傾向は、帯筋を有する膨張コンクリート部材の鉄筋ひずみ分布測定<sup>5)</sup>によっても示されている。

### 3.2 変形図による考察

鉄筋降伏以降にひずみ分布が変化する原因を確認するために、変形図による検討を行った。

図-5 には、隅角部鉄筋ひずみが弾性域(膨張ひずみ  $\varepsilon_{ex}=500\mu$ )および塑性域(膨張ひずみ  $\varepsilon_{ex}=2000\mu$ )にある時の部材変形図を示した。隅角部周辺の鉄筋の変形状態に着目すると、弾性範囲(図-5(a))では、概ね初期形状に相似して変形し、曲げ戻し的な変形は比較的小さい。一方、塑性域(図-5(b))では、隅角部での局所変形が顕著であり、軸方向の伸び変形に比べて曲げ戻し変形が卓越する結果となった。

### 3.3 部材寸法と鉄筋ひずみ

図-6 において、部材寸法の異なる解析対象の鉄筋ひずみ分布の比較を行った。ここで、鉄筋径、折り曲げ半径、膨張ひずみ等の条件は固定し、直線部長さ  $l$  のみを変化させた。

隅角部のひずみは、直線部長さ  $l$  が大きくなる

ほど、隅角部のひずみは大きくなる結果となった。ただし、直線部長さ  $l$  が30cm以上の範囲では、頭打ちとなる傾向にある。一方、直線部のひずみ分布は、直線部長さによらず、折り曲げ端からの距離が同一である場合には概ね一致することが分かる。

図-7 には、コンクリートに付与した膨張ひずみと鉄筋の相当ひずみの関係を示した。ここで、ひずみ値には、折り曲げ部のガウス点で算出された値の最大値を採用した。コンクリートの膨張ひずみが約1000  $\mu$  以下の範囲では、部材寸法に関らず、相当ひずみはほぼ同程度となり、比較的小さい値となった。

一方、膨張ひずみが1500  $\mu$  を超える範囲では、相当ひずみは、部材の寸法の影響を大きく受け、部材寸法が大きくなるほど、値が大きくなる結果となった。ただし、直線部長さが30cmを超えると、膨張ひずみと相当ひずみの最大値の関係は寸法によらず、同様の結果となった。

### 3.4 かぶりの影響

図-8 に、かぶりがない場合の、膨張ひずみー鉄筋相当ひずみの最大値の関係を示す。直線部長さ  $l$  による影響は概ねかぶりがある場合と同様であるが、膨張ひずみが1500  $\mu$  以上では、直線部長さ  $l$  が30cm以上のケースで、局所化の進行が大きくなる結果となった。図-9 には直線部長さ  $l$  が30cmである場合のかぶり厚さの影響を示した。鉄筋の相当ひずみはかぶり厚さが大きくなるほど低下する傾向となった。

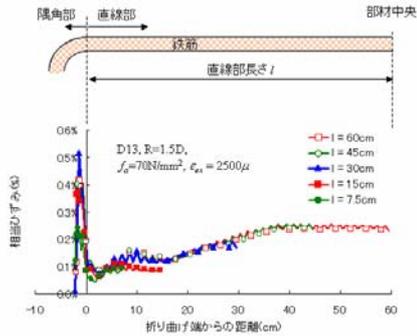


図-6 鉄筋ひずみ分布の比較 ( $\epsilon_{ex}=2500\mu$ )

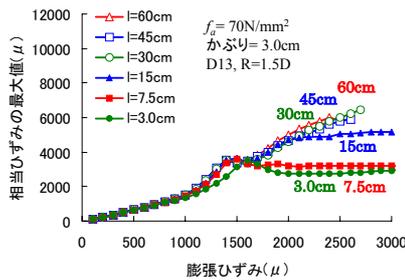


図-7 直線部長さが相当ひずみに与える影響 (かぶりあり)

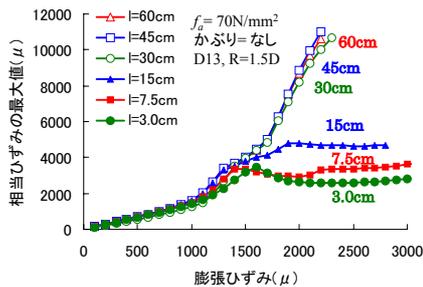


図-8 直線部長さが相当ひずみに与える影響 (かぶりなし)

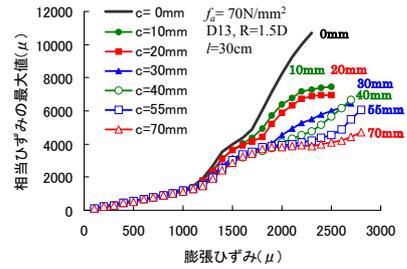


図-9 かぶり厚さが相当ひずみに与える影響

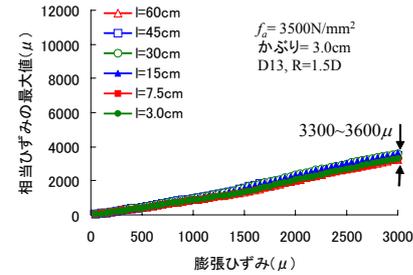


図-10 大きな付着力を想定した場合の膨張ひずみ-相当ひずみ関係 ( $f_a=3500N/mm^2$ )

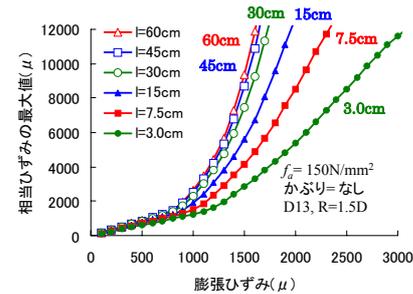


図-11 付着を考慮しない場合の膨張ひずみ-相当ひずみ関係

### 3.5 付着の影響

かぶりコンクリートの有無が鉄筋ひずみに与える影響機構のひとつとして、鉄筋の付着の影響が考えられる。そこで、付着が鉄筋ひずみに与える影響を明確にするために、(1)支圧強度に大きな値を設定することで付着力を大きくした場合、(2)鉄筋にふしを設けず、鉄筋-コンクリート間に接合要素を設けて付着を除去した場合、についてそれぞれ解析を行い、検討することとした。

ふしに接するコンクリートの支圧強度を一軸圧縮強度の約 100 倍に設定した場合には、図-10 に示すように、部材寸法によらず、鉄筋ひずみは膨張ひずみとほぼ一致する結果となった。これは、コンクリートに十分な付着力が伝達さ

れる結果、鉄筋とコンクリートが完全に一体化して変形したためである。

図-11 には、付着を除去した場合の解析結果を示した。鉄筋ひずみの最大値は、付着のある場合に比べて大きくなっている。また、ひずみは部材寸法が大きくなるほど大きな値を示し、直線部長さが 30cm 以上の範囲でも、わずかながら局所化が大きくなる傾向が確認できる。

図-12 に、鉄筋ひずみ分布における付着の有無の影響を示す。直線部のひずみ分布に着目すると、付着がある場合には、部材中央に近づくほど鉄筋ひずみが増加していくのが確認できる。一方、付着がない場合には直線部のひずみは一定となり、その値は付着がある場合に比べて小さい。図中の斜線で示した直線部におけるコン

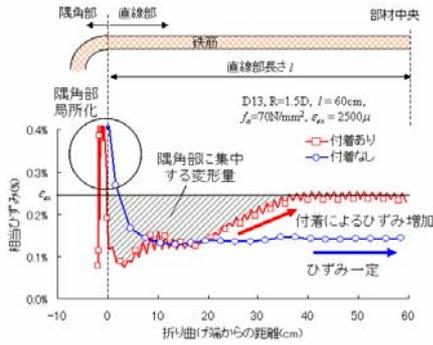


図-12 付着の有無が鉄筋ひずみ分布に与える影響(膨張ひずみ 2500 $\mu$ 時)

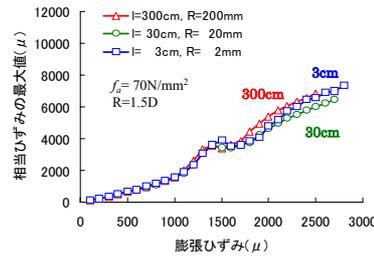


図-13 破壊力学的な寸法効果の検討

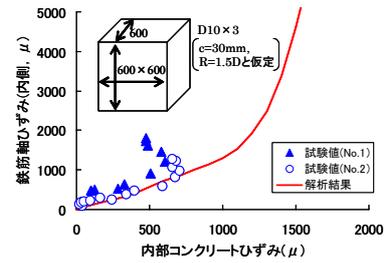


図-14 試験値<sup>6)</sup>と解析値の比較

クリート膨張量と鉄筋ひずみの差分は、隅角部で負担される変形量を表すと考えられる。付着がない場合には、隅角部から離れた場所でも、コンクリートと鉄筋のひずみが一致しない分だけ、付着がある場合に比して、隅角部の負担が大きくなり、鉄筋ひずみの局所化が進行すると考えられる。

### 3.6 付着と部材寸法が隅角部鉄筋ひずみに与える影響

付着のある場合には、隅角部から十分離れた位置では鉄筋とコンクリートが一体となって変形し、鉄筋のひずみはコンクリートの膨張ひずみと一致する。そのため、直線部の長さ  $l$  が定着長さより大きい場合には、隅角部での局所化傾向は直線部長さによらず同様となると考えられる。図-7, 8 の解析結果はこのような機構を反映した結果であると説明される。

一方、付着がない場合には、上述のとおり、隅角部から十分に離れた位置においても鉄筋とコンクリートのひずみは一致しない。この差の蓄積量が隅角部での局所化の度合いを支配するために、付着がない場合には、部材寸法が大きいほど、鉄筋隅角部でのひずみの局所化の進行が促進されると考えられる。

### 3.7 破壊エネルギーに準じる寸法効果の影響

前節で示された部材寸法の影響のうち、コンクリートの破壊力学的な寸法効果の影響を確認することを目的として、部材形状を同一として縮尺のみを変更した解析を行った。折り曲げ

半径  $R=1.5D$ 、使用鋼材 D13、直線部長さ  $l=30\text{cm}$  のケースを基本として、縮尺を 1/10 倍としたケース、10 倍にしたケースについて解析を行った。なお、本研究で使用した解析プログラムには分散ひび割れモデルが採用されており、引張軟化曲線に破壊エネルギーを考慮することで、ひび割れの発生・進展に伴う寸法効果を定量評価可能である。

図-13 に解析結果を示す。解析対象の縮尺が変化しても、解析値はほぼ同程度の値となった。このことより、本研究で指摘する部材寸法の影響は、せん断強度などで議論されるような、コンクリートの破壊エネルギーに基づく寸法効果とは異なることが分かる。

鉄筋破断を評価する際には、鉄筋に対して破壊力学的な知見を導入し、亀裂進展の解析と検討を行う必要がある。鋼材の亀裂進展現象は本研究のメソレベル要素寸法よりも、数オーダー小さい領域で生じる上に、曲げ加工時にふしの根元で生じる亀裂の影響も無視できないので、本稿ではコンクリート側の検討に留め、鉄筋に関しては今後の課題としたい。

## 4. 鉄筋隅角部で局所化が進行する条件

以上の解析結果を踏まえると、コンクリートの膨張によって、鉄筋隅角部で局所化が卓越する条件は以下のようにまとめられる。

- 大きな膨張ひずみが生じていること
- 曲げ半径に対して直線部長さが大きいこと

- ・直線部の付着特性が低下していること

寸法の大きな部材であっても、鉄筋とコンクリートの付着が保たれている場合には、隅角部の局所化は、顕在化しないと考えられる。このため、ケミカルプレストレスト部材や、常時せん断力を受ける部材などでは、このような隅角部の鉄筋破断現象は極めて生じにくいと考えられる。

ASR 劣化を受けた部材では、異常膨張による脆弱化が生じやすく、比較的拘束度の小さい直線部では、鉄筋軸に沿ったひび割れが生じることもある。これらの劣化現象は、いずれも鉄筋付着を低下させるので、隅角部での局所化が顕在化しやすくなると考えられる。

本検討では、隅角部鉄筋の降伏以降に、隅角部のひずみ局所化機構が存在することを示した。ただし、この局所化機構では、鉄筋拘束下での有効膨張ひずみが数千 $\mu$ となるような、割合大きな膨張エネルギーを要する。このため、現実にこのような現象が発現することは極めて稀であると思われる。また、本検討で指摘した局所化現象が生じたとしても、十分に延性的な鉄筋を使用する限りにおいては、破断には至らないと思われる。

## 5. 試験結果との比較

図-14にASR膨張時の鉄筋隅角部内側の軸ひずみの試験値<sup>6)</sup>と解析値の比較を示す。解析対象には、鈴木らの帯状鉄筋を含む立方状のコンクリート試験体を採用した。解析結果は、試験結果と大きくは相違しないことが分かる。ただし、試験結果は割合膨張ひずみが小さい範囲に留まっているので、試験による解析結果の妥当性については今後も検証を進める必要がある。

## 6. 結論

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張が帯筋隅角部の変形特性に与える影響を検討するために、メゾレベル解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ・鉄筋隅角部のひずみが降伏ひずみを超えると、局所化が急進する。その度合いは直線部長さに大きく関係し、定着長さに相当する範囲では、直線部長さが大きいほど、隅角部のひずみは大きくなる。
- ・鉄筋隅角部の変形は、弾性範囲内では部材形状を保つような変形が割合大きく、塑性域では、曲げ戻し的な変形が卓越する。
- ・鉄筋隅角部で生じる変形の局所化は、直線部の鉄筋とコンクリートの付着特性の影響を大きく受ける。鉄筋軸に沿ったひび割れの発生等により、かぶりコンクリートの寄与が期待できない場合や、異常膨張によるコンクリートの脆弱化などによって付着が極度に低下した場合には、鉄筋隅角部の局所化が顕著になる。

本検討では各因子の影響度が概ね明らかとなったが、鉄筋破断が生じた実構造物では部材諸元、材料諸元が本解析とは異なるので、別途検討が必要である。

## 参考文献

- 1) アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, 土木学会, 2005
- 2) 眞野ら: 曲げ加工部での鉄筋損傷メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.963-968, 2004
- 3) Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H.: NONLINEAR MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE, Spon Press, 2003
- 4) コンクリート標準示方書構造性能照査編, 土木学会, 2002
- 5) 田中・西村・岸・魚本: コンクリートの膨張作用を受けた鉄筋隅角部のひずみ分布, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, V-349, pp.695-696, 2004 年 9 月
- 6) 鈴木ら: ASR 膨張と塩化物腐食が鉄筋曲げ加工部へ及ぼす影響, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, V-062, pp.123-124, 2003 年 9 月