高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の 火災時の変形性状に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON DEFORMATION PROPERTY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING HIGH-STRENGTH CONCRETE DURING A FIRE

一瀬 賢一*, 河辺 伸二**

Ken-ichi ICHISE and Shinji KAWABE

This paper describes analytical study on deformation property of reinforced concrete columns using high-strength concrete during a fire. The following conclusions were obtained.

1. The past test results of deformation property in reinforced concrete columns can be reappeared using the model in consideration of the temperature dependability of concrete and a steel rod by nonlinear finite element method.
2. In the stage of structural design, this analysis is useful to selection of concrete strength and member size, and can predict the deformation property of reinforced concrete columns using high-strength concrete during a fire.

Keywords: Fire resistance efficiency, High-strength concrete, Reinforced concrete column, Finite element method, Stress analysis

耐火性能, 高強度コンクリート, 鉄筋コンクリート柱, 有限要素法, 応力解析

1. はじめに

近年, 都心部を中心として30層を超える超高層鉄筋コンクリート造(超高層RC造)集合住宅の開発が進んでおり, 設計基準強度(以下 F_c)100N/mm²級の高強度コンクリートが適用されるようになってきた。RC造は, 本来耐火構造として認められているが, 高強度コンクリートを使用した場合, 火災時に表層部のコンクリートが爆裂し, 耐火性能の低下が危惧される。このため高強度コンクリートの適用には, 部材実験や解析による検討が適宜行われている。しかし高強度コンクリートを使用した実大部材レベルの実験は, 設備面, コスト面などから実施が困難であり, 小型試験体を用いた載荷加熱試験結果が幾つか報告されているにすぎない^{1), 2)}。

一方解析においては, 温度測定結果に基づいた検討が一部行われているが, 火災時における温度依存性を考慮した熱定数や材料定数等について, まだ十分なデータが揃っていないこともあり, あまり活用されていない。実験による検討が, 十分にできないことを考慮すれば, 解析による検討をより積極的に行うことが重要であると考えられる。

そこで本論文では, 高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時の変形性状について解析的検討を試みるものである。初めに既往の鉄筋コンクリート柱部材の耐火性能試験結果と解析によって得られる値との整合性を検討する。次に実際に40層程度の鉄筋コンクリート造として設計した柱部材(F_c 80N/mm²)について, 火災時の変形についてシミュレーション解析を行い, 実

計への適用性を示す。

2. 解析プログラム

2.1 解析方法

解析には, 長沼^{3), 4)}が中心となり開発した非線形有限要素解析プログラム(名称FINAL)を使用した。これは, 熱伝導解析, 静的応力解析, 動的応答解析が可能であり, 主にコンクリート系構造を対象として, 外力および温度荷重を受ける場合の弾性から破壊に至るまでの挙動を, 材料レベルの構成則に基づいて予測することができる解析プログラムである。

解析手順は, まず熱伝導解析を行い, 断面の各要素における時刻歴温度を求める。続いてその時刻歴温度を各要素に与え非線形応力解析を行った。非定常熱伝導方程式の解法には, Crank-Nicolsonの差分式を用い, 非線形応力解析は, 接線剛性法により, 収束計算にはNewton-Raphson法を用いた。

2.2 解析の対象

解析の対象は, 松戸ら⁵⁾の報告による図1に示す断面を有する柱部材(400×400×3600mm)試験体(5体)とした。加熱区間は, 柱中央部2000mmとした。解析に使用した各試験体の諸元, コンクリートおよび鉄筋の常温時における力学的性質を表1～表3に示す。解析は, 部材の対称性を考慮して, 柱断面の1/4部分を図2に示すようにメッシュ分割して行った。コンクリートと主筋は四辺形要素, 帯筋と中子筋は線材要素としてモデル化した。また帯筋と中

* 元名古屋工業大学 大学院生・博士(工学)
(大林組技術研究所 主任研究員)

** 名古屋工業大学大学院 助教授・工学

Formerly Graduate Student, Dept. of Environmental Technology and Urban Planning, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
(Chief Research Engineer, Technical Research Institute, Obayashi Corporation)
Assoc. Prof., Dept. of Environmental Technology and Urban Planning, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

図1 柱部材の断面図

図2 解析モデル

主筋は、熱伝導解析ではヒートブリッジとして熱を伝わりやすくしており、温度応力解析ではコンクリートの拘束効果に関与している。加熱温度は、ISO 834 に定める標準加熱温度曲線であり、以下の式で表される温度を与えた。加熱時間は、実験結果に合わせて4時間加熱とした。また冷却時は、文献5)で示された炉内の平均温度を与えた。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (0 \leq t \leq 240) \quad (1)$$

T：加熱温度(℃)，t：経過時間(分)

2.3 解析における各定数

熱伝導解析に使用したコンクリートおよび鉄筋の各熱定数を表4に示す。熱定数は、Eurocode No. 4⁶⁾に準拠して設定した。また応力解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料定数は、温度依存性を有するものとし、常温値に対する比を以下の各式に基づき定めた。式の適用範囲は、コンクリートについては700℃まで、鉄筋については1000℃までとした。なおそれ以上の温度においては、コンクリートでは700℃、鉄筋では1000℃の値を用いた。なおコンクリートには、冷間試験の結果を適用した。これは、熱間試験の結果が少ないことと冷間試験の結果が、熱間試験の結果に比べ各力学的性質の低下率が大きく、安全側に評価できるものとして適用した。また降温過程においても同一式を採用した。

1) コンクリートの圧縮強度⁷⁾

$$\sigma_{c(\theta)} / \sigma_{c(20)} = 1.02 + 3.75 \times 10^{-4} \theta - 2.44 \times 10^{-6} \theta^2 \quad (2)$$

$\sigma_{c(20)}$ ：20℃におけるコンクリートの圧縮強度

$\sigma_{c(\theta)}$ ： θ ℃におけるコンクリートの圧縮強度

θ ：温度（以下同様）

2) コンクリートのヤング係数⁸⁾

$$E_{c(\theta)} / E_{c(20)} = 1.07 - 2.53 \times 10^{-3} \theta + 1.45 \times 10^{-6} \theta^2 \quad (3)$$

$E_{c(20)}$ ：20℃におけるコンクリートのヤング係数

$E_{c(\theta)}$ ： θ ℃におけるコンクリートのヤング係数

3) コンクリートの圧縮強度時のひずみ⁸⁾

$$\varepsilon_{(\theta)} / \varepsilon_{(20)} = 1.00 - 1.10 \times 10^{-4} \theta + 5.64 \times 10^{-6} \theta^2 \quad (4)$$

$\varepsilon_{(20)}$ ：20℃におけるコンクリートの圧縮強度時のひずみ

$\varepsilon_{(\theta)}$ ： θ ℃におけるコンクリートの圧縮強度時のひずみ

4) 鉄筋の降伏点⁹⁾

表1 各試験体の諸元⁵⁾

試験体名	調査番号	実強度 σ_B (N/mm ²)	軸力 $\sigma_N \cdot A_c$ (kN)	軸力比 σ_N / σ_B	含水率(%)	
					表面	中心
C13N27	S18	126.5	5443	0.27	4.9	6.4
C11N30	S24	113.4	5443	0.30	4.6	6.6
C11N35			6104	0.35	4.6	6.6
C08N30	S35	77.3	3710	0.30	5.1	7.9
C08N44			5443	0.44	5.1	7.9

表2 コンクリートの力学的性質⁵⁾

調査番号	水結合材比 W/B (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	最大応力時歪 ($\times 10^{-6}$)
S18	18	126.5	37910	3614
S24	24	113.4	36390	3604
S35	35	77.3	34810	2999

表3 鉄筋の力学的性質⁵⁾

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D19(USD685)	792	220500	971
U9(SBPD1275)	1410*	208000	1520

*：0.2%オフセット

表4 コンクリート・鉄筋の熱定数

種類	項目	算定式
コンクリート	熱伝導率 (W/mK)	$\lambda_c = 2.0 - 0.24 \times (\theta / 120) + 0.012 \times (\theta / 120)^2$ ($20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$)
	比熱 (J/kgK)	$C_c = 900 + 80 \times (\theta / 120) - 4 \times (\theta / 120)^2$ ($20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$)
	線膨張係数	$\alpha_c = 9.0 \times 10^{-6} + 6.9 \times 10^{-11} \theta^2$ ($20 \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$) $\alpha_c = 0.0$ ($700^\circ\text{C} < \theta$)
鉄筋	熱伝導率 (W/mK)	$\lambda_s = 54 - 3.33 \times (\theta / 100)$ ($20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$) $\lambda_s = 27.3$ ($800^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$)
	比熱 (J/kgK)	$C_s = 470 + 20 \times (\theta / 100) + 3.8 \times (\theta / 100)^2$ ($20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$) $C_s = 873$ ($800^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$)
	線膨張係数	$\alpha_s = 1.2 \times 10^{-5} + 0.8 \times 10^{-8} \theta$ ($20 \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}$) $\alpha_s = 0$ ($750 < \theta \leq 860^\circ\text{C}$) $\alpha_s = 2.0 \times 10^{-5}$ ($860^\circ\text{C} < \theta$)

高強度鉄筋の高温時における物性データは、ほとんど報告されていない。このため降伏点およびヤング係数については、文献9)に示されるSD490のデータを代用した。

$$\sigma_{s(\theta)} / \sigma_{s(20)} = 0.978 + 1.85 \times 10^{-4} \theta - 2.83 \times 10^{-6} \theta^2 + 1.69 \times 10^{-9} \theta^3 \quad (5)$$

$\sigma_{s(20)}$: 20℃における鉄筋の降伏点

$\sigma_{s(\theta)}$: θ ℃における鉄筋の降伏点

5) 鉄筋のヤング係数⁹⁾

$$E_{s(\theta)} / E_{s(20)} = 0.988 + 3.42 \times 10^{-4} \theta - 2.39 \times 10^{-6} \theta^2 + 1.13 \times 10^{-9} \theta^3 \quad (6)$$

$E_{s(20)}$: 20℃における鉄筋のヤング係数

$E_{s(\theta)}$: θ ℃における鉄筋のヤング係数

6) コンクリートの過渡ひずみ¹⁰⁾

コンクリートに圧縮荷重が作用した状態で加熱を受ける際に生じる全体ひずみは、熱膨張ひずみと応力ひずみおよびクリープひずみを足し合わせた値よりもかなり大きな収縮を示す。この加熱過程で生じる収縮ひずみは、「過渡ひずみ (Transient strain)」または「遷移ひずみ」と呼ばれている。このひずみを考慮しないと火災加熱を受ける鉄筋コンクリート系構造物の熱応力・変形状を精度良く模擬できないといわれている。本解析では、Anderbergら¹⁰⁾によって示された次式により過渡ひずみを考慮している。なおクリープひずみについては、考慮していない。

$$\varepsilon_{tr} = -2.35 \times \varepsilon_{th} \cdot \sigma_{(\theta)} / \sigma_{c(20)} \quad (7)$$

ε_{th} : 熱膨張ひずみ, $\sigma_{(\theta)}$: 存在応力度,

$\sigma_{c(20)}$: 20℃における圧縮強度

3. 既往の実験を対象とした解析

3.1 熱伝導解析

熱伝導解析値と実験値の比較の一例を図3に示す。解析では、潜熱を考慮しており、コンクリートの含水率として帯筋の内側には表1⁹⁾に示す中心の含水率、外側には表面の含水率を与えた。経過時間200分後に中心部の含水率が0%に達すると急激に温度上昇が生じ、解析値と実験値とは大きく異なった。これは、実際の柱部材の加熱では、コンクリート中の水蒸気圧の上昇に伴い、内部の水分移動によって高含水状態の領域が生じ、中心部の水分が移動しにくくなるものと考えられる。その結果、解析値に比べ水分蒸発が遅くなるものと推察される。

3.2 応力解析

柱部材としての崩壊条件は、次の2条件のどちらかを満たす時点とした。これは、耐火性能試験における合格判定基準に基づいて定めたものである。

① 軸方向収縮量(mm): $h/100$ 以上。

② 軸方向変形速度(mm/分): $3h/1000$ 以上。

ここで h : 加熱区間長さ(mm)

本解析では、 $h=2000$ mmより軸方向収縮量20mm、軸方向変形速度6mm/分を崩壊条件とした。

解析値と実験値の比較を図4～図6に示す。これらの結果からC13N27を除いて、鉄筋コンクリート柱部材の加熱時の変形を概ね推定できることがわかった。C13N27は、解析値と実験値との差が大きい。これは、文献5)でも記述されているように加熱開始直後から試

図3 熱伝導解析による温度の時刻歴(潜熱考慮)

図4 応力解析による軸方向変形の時刻歴(C13)

図5 応力解析による軸方向変形の時刻歴(C11)

図6 応力解析による軸方向変形の時刻歴(C08)

図7 応力解析による軸方向変形の時刻歴(C13)

験体に生じた生じた爆裂が大きく影響しており、部材の断面欠損により変形が早く進んだためと推察できる。そこでかぶりコンクリートの約1/3が加熱初期から欠損していたものと仮定して解析した結果を図7に示す。爆裂によるかぶりコンクリートの欠損を考慮することにより、柱部材の軸方向変形の推定が他の試験体と同様に可能であることがわかった。

また解析による柱部材崩壊の判定は、すべて実験値よりも早期に生じており、安全側に評価できることがわかる。よって本解析方法によって火災時の鉄筋コンクリート柱部材の変形を概ね推定でき、また崩壊についても安全側に評価できるものと考えられる。

4. シミュレーション

4.1 解析対象

実工事に適用した鉄筋コンクリート柱部材（断面：900×900mm，加熱区間：3000mm）について検討した。柱部材の断面図を図8に示す。この部材は、 $F_c 80\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを使用し、適用柱部材の中で最も鉄筋量が少ないものである。解析モデルは、柱部材断面の対称性を利用して図9に示す1/4断面とした。熱定数は、表4から算定される値を用いた。また常温時における各材料定数を表5に示す。コンクリートの含水率は、既往の実験結果^{5),9)}を参考に柱部材内部5%一様と仮定した。加熱温度は、ISO 834 に定める標準加熱温度曲線に従い、(1)式で表される温度を与えた。加熱時間は、3時間加熱とした。また冷却時の炉内温度は、加熱速度と同一速度で冷却させ、次の(8)式で表される温度を与えた。

$$T = 1110 - 345 \log_{10} [8(t-180)+1] \quad (180 < t \leq 300) \quad (8)$$

T ：加熱温度(℃)， t ：経過時間(分)

柱部材の崩壊条件は、前述と同様(3.2参照)とし、軸方向変形30mm以上、軸方向変形速度9mm/分以上とした。実務においては、建物の形状、高さによってコンクリート強度、鉄筋の強度や本数が異なるが、ここでは、配筋は変えずにコンクリート強度、軸力、部材の断面寸法の影響についてシミュレーションを行った。なお実強度(σ_c) 80N/mm^2 ，軸力比(σ_N/σ_c) 0.3の場合を中心として、軸力比、設計基準強度、断面寸法の影響について検討した。 σ_c は、60～120N/mm²， σ_N/σ_c は、0.2～0.5の範囲で検討し、断面寸法は、900×900mmと1000×1000mmを比較した。図中の表示は、共通部分を除き、部材寸法-コンクリート強度-軸力比の順(表示例 C900- σ 80-N 0.3)に記した。

図8 柱部材の断面図

図9 解析モデル

表5 材料定数および算定式

種類	項目	材料定数および算定式
コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	$c \sigma_B : 60, 80, 100, 120$
	ヤング係数 (kN/mm ²)	$E_c = 33.5 \times (\gamma/2.4)^2 \times (F_c/60)^{1/3}$ (γ ：一律 2.4)
	ポアソン比	$\nu = 0.17$ (一律)
鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	主筋：490 帯筋：785
	ヤング係数 (kN/mm ²)	主筋：205 帯筋：208
	ポアソン比	$\nu = 0.30$ (一律)

図10 熱伝導解析による温度の時刻歴

図 11 軸力比の影響 (C900-σ80)

4.2 軸力比の影響

σ_c 80N/mm², σ_N/σ_c を 0.2~0.5 (軸力として 12.96MN~32.4MN) とした場合の熱伝導解析および応力解析の結果をそれぞれ図 10, 図 11 に示す。図 3 の既往実験の結果に比べて柱部材中心部の温度上昇が低いことがわかる。これは、部材断面が既往実験の 400mm 角に比べ、900mm 角と大きいこと、加熱時間が 4 時間から 3 時間へと短いことによる。また図 10 の中子筋③の部分までは、受熱温度として 200℃未達であり、既往の材料実験結果⁸⁾からも強度劣化がほとんどないことが推察できる。またこの部材では、軸力比の増加に伴い変形量は収縮側に大きくなるが、軸力比として 0.5 を与えた場合でも崩壊に至っておらず、十分に 3 時間の耐火性能を有することが予想できる。

σ_c 60N/mm² を超える高強度コンクリートでは、含水状態、強度レベル等の違いによって加熱開始 10~30 分後からかぶりコンクリートの爆裂が生じる場合が多い。既往の文献¹¹⁾では、かぶりコンクリートの半分以上が爆裂する報告も示されている。そこで加熱開始前からかぶりコンクリートの半分 (20mm) が欠損部分と仮定して、熱伝導解析および応力解析を行った。断面の欠損面積は、約 8.7% になる。また断面には、欠損のない状態の軸力を与えた。熱伝導解析の結果を図 12 に、応力解析の結果を図 13 に示す。熱伝導解析の結果から、図 10 と比較してかぶりコンクリートの欠損により 3 時間加熱後において帯筋④の温度で 200℃程度異なることがわかる。応力解析の結果によれば、図 11 に比べて、収縮側への変形量が大きくなっているものの、3 時間加熱後における収縮量は小さく、崩壊しないことが予想できる。しかし、解析の結果によれば、軸力比 0.4 以上において冷却時に崩壊の危険性を示している。冷却時の変形状態については、冷却速度により大きく左右されることが予想できるが、比較できる十分なデータがないので、評価方法も含め今後の課題の一つと考える。

4.3 コンクリート強度の影響

軸力を一定 (19.44MN) として、 σ_c 60N/mm²~120N/mm² まで変えた場合の応力解析結果を図 14 に示す。コンクリート強度が高いほど収縮側への変形量が小さくなることがわかる。これは、軸力を一定としたため、コンクリート強度が高いほど、軸力比が小さくなることと、コンクリートの残存強度も高くなるため、収縮側への変形が小さくなるものと推察できる。またこの部材に、 σ_c 60N/mm² のコンクリートを使用した場合でも、3 時間の耐火性能を有する可能性

図 12 熱伝導解析による温度の時刻歴 (C900-σ80 かぶり 20mm 欠損)

図 13 軸力比の影響 (かぶり 20mm 欠損)

図 14 コンクリート強度の影響 (軸力一定)

図 15 コンクリート強度の影響 (軸力比一定)

が高いことが予想できる。

また σ_N/σ_B を 0.3 一定として σ_B 60N/mm² ~ 120N/mm² まで変えた場合 (軸力 14.58MN ~ 29.16MN) の応力解析結果を図 15 に示す。軸力比を一定とした場合は、コンクリート強度が高いほど火災時の伸び出しが小さい。これは、鉄筋の配筋が同一であるため、コンクリート強度が高いほど主筋の負担が小さくなったことによると推察できる。

4.4 部材寸法の影響

主筋および帯筋の配筋は変えずに、部材断面を 1000 × 1000mm に変えた場合 (σ_B 80N/mm², σ_N/σ_B 0.3) の比較を図 16 に示す。コンクリート強度および軸力比を一定とした場合は、部材断面の大きい方が加熱時の変形量を小さくできることがわかる。これは、部材断面の大きい方が、火災時の部材平均温度が低く、熱膨張ひずみも小さくなり、部材の変形が小さくなるものと推察できる。

軸力を一定 (19.44MN) として、部材断面、コンクリート強度を変えた場合の比較を図 17 に示す。軸力一定の場合は、部材断面の大きい方が熱膨張ひずみによる伸び出し後の収縮が小さいことが読みとれる。また C1000- σ 60 と C900- σ 80 を比較すると、火災時に同じような変形性状を示すことがシミュレーションによってわかった。このように設計段階で、部材寸法、コンクリート強度を変更した場合の火災時における変形性状を比較検討できる。

5. まとめ

高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時の変形性状について解析的に検討を行い、以下のことがわかった。

- (1) コンクリート、鉄筋の温度依存性を考慮したモデルを用いて、既往の鉄筋コンクリート柱部材の耐火試験における変形性状を非線形有限要素解析により概ね再現できる。
- (2) 本解析は、設計段階において、コンクリート強度、柱部材の断面寸法の選定に有用であり、火災時の鉄筋コンクリート柱部材の変形性状を予測できる。

今後は、爆裂の時期や程度を考慮した評価式の提案、高強度コンクリートおよび高強度鉄筋の高温時の力学性状の見直しを行い、解析精度の向上を目指す予定である。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、(株)大林組技術研究所長沼一洋博士には、解析の指導および貴重なご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水野敬三他：高強度 ($F_c=1000\text{kgf/cm}^2$) RC 柱の耐火性能に関する研究 (その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), A-2, pp. 73-78, 1995. 8
- 2) 茂木 武他：鉄筋コンクリート柱の耐火実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), A-2, pp. 85-86, 2000. 9
- 3) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp. 39 ~ 48, 1991. 3

図 16 部材寸法の影響 (軸力比一定)

図 17 部材寸法の影響 (軸力一定)

- 4) 長沼一洋：非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方性構成モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 485 号, pp. 109 ~ 116, 1996. 7
- 5) 松戸正士他：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究 (その 1), (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), A-2, pp. 21-24, 2002. 8
- 6) Commission of European Communities: Eurocode No. 4, Design of Composite Structures part 10, Structural Fire Design, 1990. 4
- 7) 一瀬賢一, 河辺伸二：高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp. 17 ~ 21, 2002. 11
- 8) 一瀬賢一, 長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp. 23 ~ 30, 2001. 3
- 9) 長尾覚博, 江戸宏彰, 丹羽博則, 上杉英樹：鉄筋コンクリート用棒鋼の高温引張試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), A-2, pp. 75-76, 2000. 9
- 10) Anderberg, Y. and Thelandersson, S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures 2. Experimental Investigation and Material Behavior Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No. 54, Sweden, 1976
- 11) 長尾覚博, 中根 淳：高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 631-636, 1997. 7

(2002年10月8日原稿受理, 2003年3月4日採用決定)