

論文 高強度コンクリートの自己収縮特性に関する研究

萩原伸治*¹・榊田佳寛*²・中村成春*³・上西隆*⁴

要旨:本研究は、水結合材比が 19～25%の高強度コンクリートについて、型枠拘束による自己収縮および乾燥収縮ひび割れ試験を行い、自由収縮ひずみ、拘束引張ひずみ、収縮応力、ひび割れ発生時のひずみおよび応力・強度比などを実験的に検討したものである。その結果、次のことが明らかとなった。①拘束が大きくなる場合や、水結合材比が小さくなる場合、収縮応力、弾性ひずみ、拘束引張ひずみおよび拘束引張ひずみと弾性ひずみとの差は大きくなる。②引張ヤング係数は、圧縮ヤング係数の約 80%である。③応力・強度比が 45～60%、拘束引張ひずみがおよそ 300×10^{-6} 以上になるとひび割れが発生した。

キーワード:高強度コンクリート、自己収縮、収縮応力、拘束引張ひずみ、ヤング係数

1. はじめに

近年、設計基準強度が 100N/mm^2 級の高強度コンクリートの研究開発が盛んに行われ、実際の建築物にも適用されるようになった。しかしながら、水結合材比が小さく、単位結合材量の多い高強度コンクリートでは、自己乾燥に伴う自己収縮によるひび割れの発生が顕在化し、実施工する上で問題となっている¹⁾。従って、自己収縮に起因するひび割れ発生の予測方法および制御方法の確立が求められているが、これらの方法の基本条件となる、ひび割れ発生の条件自体が不明確であるのが現状である。

本研究は、このような自己収縮によるひび割れ発生を予測するための基礎資料を得ることを目的に、実験的に検討したものである。すなわち、調合条件と拘束条件を広範囲に変化させ、自由収縮条件ならびに拘束収縮条件による、自己収縮試験と乾燥収縮試験とを同時に実施し、拘束収縮条件の挙動を自由収縮条件の挙動の影響から取り除くことで、拘束力自体が及ぼす自己収縮特性ならびに乾燥収縮特性を定量的に比

較検討し、ひび割れ発生条件を考察したものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表 1 に実験計画を示す。実験は、供試体に対する実験条件が拘束収縮条件と自由収縮条件の 2 条件について行い、自己収縮特性と乾燥収縮特性とが把握できるようにシリーズ I とシリーズ II に分けて設定した。特に、シリーズ I

表 1 実験計画

実験条件	拘束収縮					自由収縮	
	1.6	2.0	2.4	2.9	3.2	自己	乾燥
計測試験名	自己	自己	自己	自己	乾燥	自己	乾燥
調 合 種 類	19160	—	—	—	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
	22160	I	I	I	I・Ⅱ	Ⅱ	I・Ⅱ
	22180	—	—	—	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
	25160	—	—	—	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

I: シリーズ I, Ⅱ: シリーズ II, *) 単位 [mm]

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

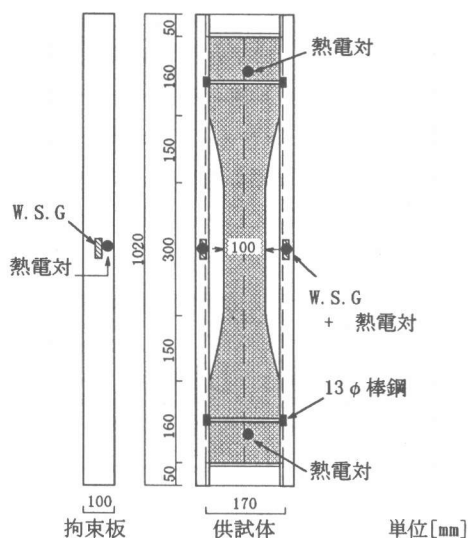
*4 (株) 奥村組技術研究所 (正会員)

表－2 使用材料

材料	種類・産地	物性
セメント	低熱ポルトランド	比重 3.20, C ₂ S 46%
混和材	シリカフェーム	比重 2.20 ブレン値 18.5m ² /g
細骨材	鬼怒川産川砂	表乾比重 2.58 吸水率 1.94%
粗骨材	岩瀬産碎石	表乾比重 2.66 吸水率 0.59%
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

表－3 コンクリートの調合

調合	W/B	単位量 (kg/m ³)				
種類	(%)	W	C	SF	S	G
19160	19	160	758	84	561	907
22160	22	160	655	73	653	907
22180	22	180	736	82	529	907
25160	25	160	576	64	723	907



図－1 拘束供試体の概要

表－4 拘束枠の剛性

枠厚(mm)	1.6	2.0	2.4	2.9	3.2
剛性 (× 10 ³ kN)	109	136	161	187	210

では、1 種類の調合について、5 種類の拘束枠を用い、拘束力の違いが拘束収縮挙動に及ぼす

影響を検討した。また、シリーズⅡでは、4 種類の調合のコンクリートについて、1 種類の拘束力で、自己収縮特性と乾燥収縮特性の違いが及ぼす影響を検討した。

2.2 使用材料とコンクリートの調合

表－2 に使用材料の品質を、表－3 にコンクリートの調合を示す。セメントは高粉末度の低熱ポルトランドセメントを使用し、シリカフェームはスラリー状のものを使用した。調合は、水結合材比(W/B)を3段階に、単位水量を2段階にした条件を組合せ、4 種類に設定した。

2.3 実験方法

自由収縮条件の挙動は、JCI「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」³⁾に準じて測定した。すなわち、10 × 10 × 40cm の角柱供試体を用い、埋込み型ひずみ計により、打込み時からコンクリートひずみを計測した。ここで、乾燥収縮特性の計測は、ポリエチレン製フィルムで覆わない以外、自己収縮特性の計測と同一とした。

拘束収縮条件の挙動は、JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」³⁾に準じて測定した。すなわち、図－1 に示す拘束供試体を用い、ウェブ中央に貼り付けたひずみゲージにより、打込み直後から拘束枠のひずみを計測した。打込み翌日に脱型して、コンクリートの側面にゲージを貼り付けた後、直ちに起こして縦置きにした。ここで、自己収縮特性の計測については、コンクリートを打込んで表面仕上げを行った後、直ちにフィルムおよび湿布で覆って養生した。また、脱型後もフィルムで密閉して乾燥を防いだ。ところで、拘束収縮ひずみについて、コンクリートに貼ったゲージが途中で剥がれたりして計測不能になる場合があったが、その時点までは拘束枠のひずみと同じ動きを示したため、拘束枠のひずみでコンクリートのひずみを代用した供試体もある。また、表－4 に載荷して求めた拘束枠の剛性を示すが、この値は拘束枠の厚さに比例している。

以上の自由収縮および拘束収縮条件の挙動は、

すべて $20 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 5\%\text{R.H.}$ の雰囲気となる恒温恒湿室で行った。また、自己収縮特性の計測時に供試体質量のチェックも行ったが、材齢 50 日後も 0.1g 未満の変化しかなく、乾燥の影響を防止していたことを確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度・引張強度・圧縮ヤング係数

図-2 に圧縮強度、引張強度および $1/3$ 割断法の圧縮ヤング係数の経時変化を示す。これらは、対数表示の材齢に対し、ほぼ直線的に増加しているため、対数関数で近似し、以下の解析では近似の値を用いることとした。

3.2 シリーズ I の自己収縮特性

シリーズ I の自己収縮試験における、自由収縮ひずみ (ε_f) の経時変化と、拘束収縮ひずみ (ε_r) の経時変化を図-3 に示す。材齢を対数で表示すると材齢 1 日未満の部分を除いて、 ε_f および ε_r ともに、ほぼ直線的に増加している。そこで、これらを材齢 1 日から対数関数によって近似し、以下の解析では近似式を用いることとした。拘束引張ひずみ (ε_t)、弾性ひずみ (ε_e)、収縮応力 (σ) を次の計算より求めた。

$$\varepsilon_t(t) = \varepsilon_f(t) - \varepsilon_r(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_e(t) = \sigma(t) / E_c(t) \quad (2)$$

$$\sigma(t) = K_s \times \varepsilon_s(t) / A_c \quad (3)$$

ここで、 ε_f : 自由収縮ひずみ、 ε_r : 拘束収縮ひずみ、 E_c : コンクリートのヤング係数 (kN/mm^2)、 K_s : 表-4 中の拘束枠の剛性 ($\times 10^3 \text{kN}$)、 A_c : コンクリートの断面積 (mm^2) とする。なお、コンクリートのヤング係数は、便宜的に圧縮ヤング係数を用いた。

式(1)、(2)、(3)より求めた ε_t 、 ε_e および σ を図-4、図-5 に示す。厚さが 3.2mm の拘束枠 (t3.2 と略す) は、 σ も大きく、 ε_e 、 ε_t も大きくなっている。また、拘束枠の厚さの薄いものは σ 、 ε_e 、 ε_t とも小さい。t3.2 と t1.6 との ε_e の差は小さいが、 ε_t の差はかなり大きく、 ε_t から ε_e を差し引いた値は、材齢 50 日で t3.2 が約 200×10^{-6} 、t1.6 が約 180×10^{-6}

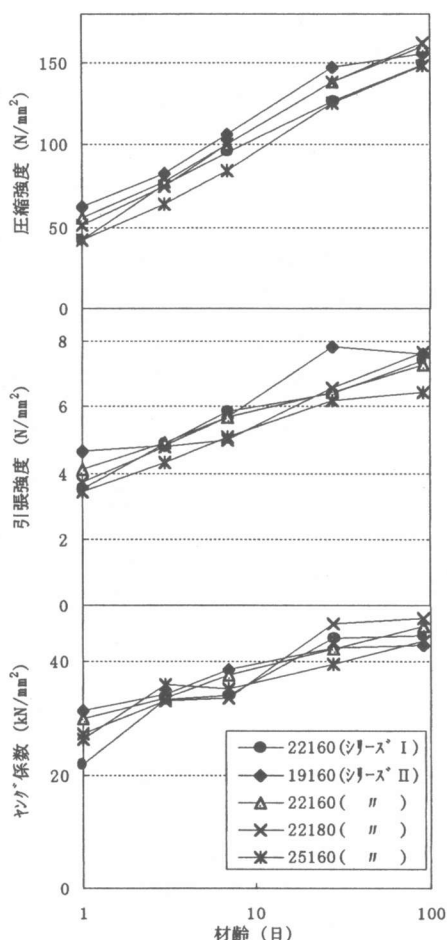


図-2 力学特性試験結果

となり、拘束枠の厚い方が大きい傾向にある。

ε_t と ε_e の差の ε_e に対する割合は、約 3.5 ~ 4 倍となっている。 ε_t と ε_e の差は、引張クリープひずみと引張力を受けながら水和反応の進行によって封じ込められたひずみ成分を含んでおり、ひび割れが発生するかどうかに関与していると考えられる。また、 σ は、引張強度の約 30 ~ 40% 程度であり、この大きさの σ ではひび割れは発生しなかった。

3.3 シリーズ II の自己収縮特性

シリーズ II の自己収縮試験における、自由収縮ひずみ (ε_f) の経時変化と、拘束収縮ひずみ (ε_r) の経時変化を図-6 に示す。W/B が 19% や単位水量が 180kg/m^3 の場合は、 ε_f も ε_r も大きいことが認められる。

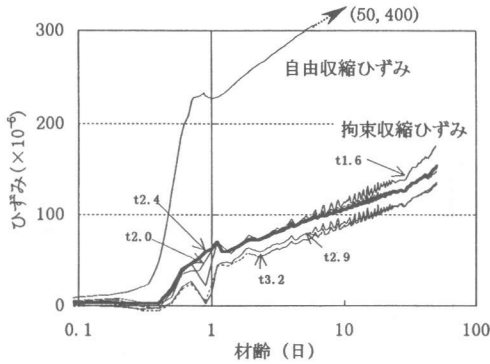


図-3 自由収縮，拘束収縮ひずみ経時変化
(シリーズ I 自己収縮)

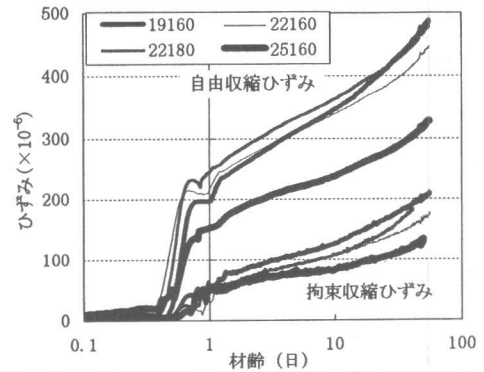


図-6 自由収縮，拘束収縮ひずみ経時変化
(シリーズ II 自己収縮)

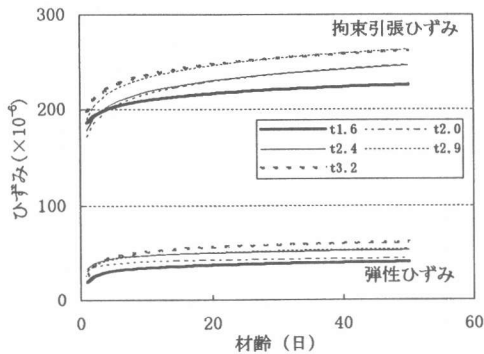


図-4 拘束引張，弾性ひずみ経時変化
(シリーズ I 自己収縮)

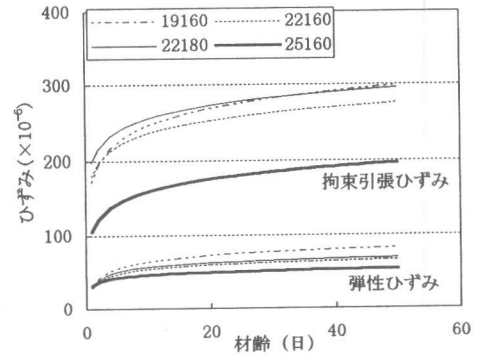


図-7 拘束引張，弾性ひずみ経時変化
(シリーズ II 自己収縮)

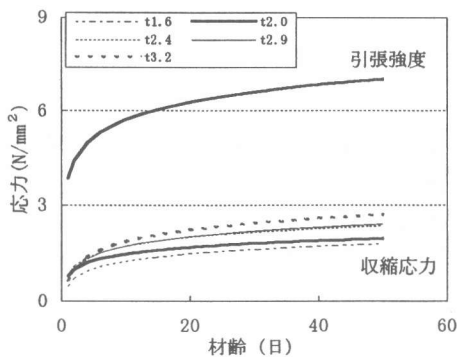


図-5 引張強度と収縮応力の関係
(シリーズ I 自己収縮)

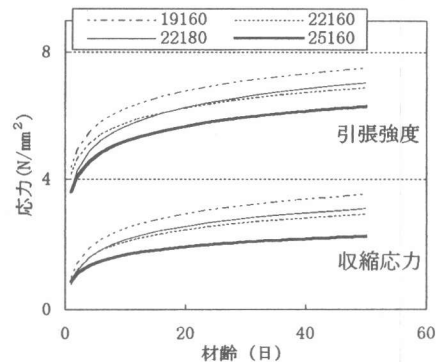


図-8 引張強度と収縮応力の関係
(シリーズ II 自己収縮)

また、3.2 節と同様にして求めた拘束引張ひずみ (ϵ_t) および弾性ひずみ (ϵ_e) を図-7 に、収縮応力 (σ) を図-8 に示す。W/B が 19, 22% と 25% とでは、 ϵ_t に大きな差があり、19, 22% のひずみの経時変化は、25% のひずみの経時変

化の約 1.5 倍大きい値となっている。 ϵ_t から ϵ_e を差し引いた値は、材齢 50 日において W/B が 19% では約 220×10^{-6} 程度であるが、25% では約 140×10^{-6} 程度で、W/B = 19% は 25% の約 1.5 倍の大きさとなっている。

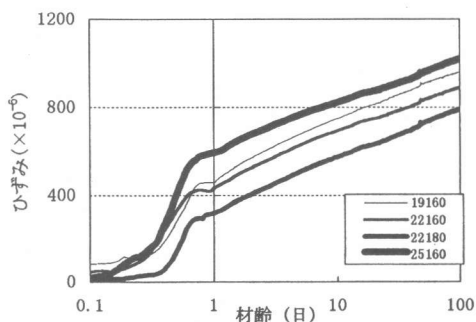


図-9 自由収縮ひずみ経時変化
(シリーズⅡ乾燥収縮)

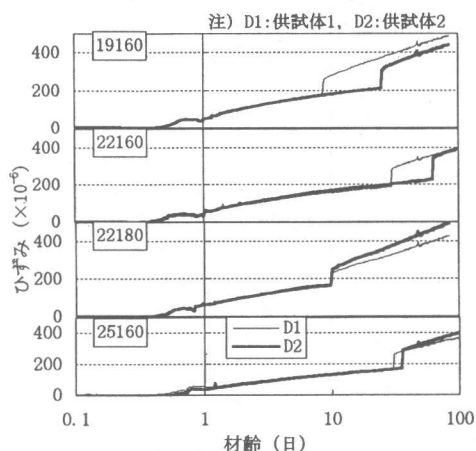


図-10 拘束収縮ひずみ経時変化
(シリーズⅡ乾燥収縮)

3.4 シリーズⅡの乾燥収縮特性

シリーズⅡの乾燥収縮試験における、自由収縮ひずみ(ϵ_f)の経時変化を図-9に、同試験での拘束収縮ひずみ(ϵ_r)の経時変化を図-10に示す。乾燥収縮試験での ϵ_f は、図-6に示した自己収縮試験での ϵ_f と、変化挙動の傾向が異なり、W/Bの高い方が大きかった。

また、拘束収縮条件の供試体において、ひび割れが発生した後のコンクリートの収縮挙動は、拘束が解除されるために、自由収縮挙動とほぼ同じ傾向でひずみが増加している。ここで、乾燥収縮試験における拘束供試体は、全てひび割れが発生したので、3.2節及び3.3節と同様な解析は、ひび割れが発生する直前まで行うこと

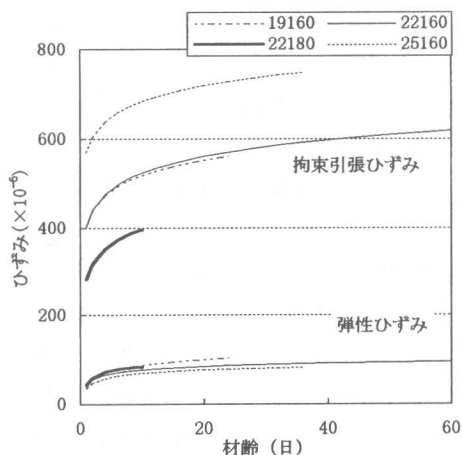


図-11 拘束引張、弾性ひずみ経時変化
(シリーズⅡ乾燥収縮)

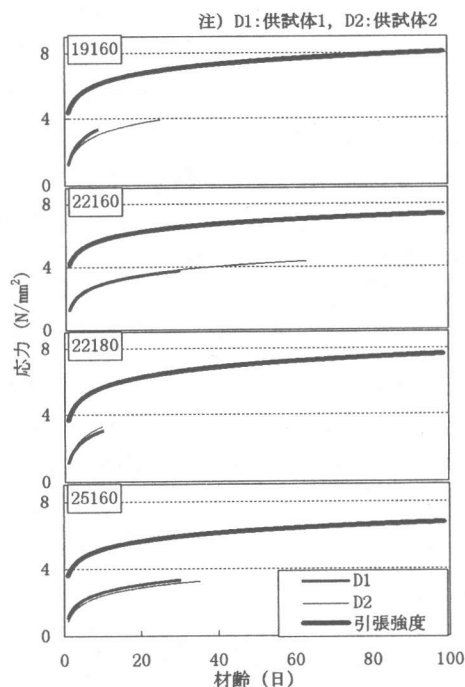


図-12 引張強度と収縮ひずみの関係
(シリーズⅡ乾燥収縮)

とした。

図-11に拘束引張ひずみ(ϵ_r)および弾性ひずみ(ϵ_e)の経時変化を、図-12に引張強度と収縮ひずみ(ϵ_r)を示す。調合ごとの ϵ_e の差は小さいが、 ϵ_r には大きな差があった。乾燥収縮試験の ϵ_r は、図-7に示した自己収縮試験

の ε_t とは傾向が異なり、W/B の高い方が大きかった。また、ひび割れが発生するまでの応力・強度比 (σ / 引張強度) は、約 50 ~ 60% となっている。

3.5 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

シリーズ I, II の拘束供試体において、ひび割れ発生時およびひび割れ発生後のコンクリートひずみを分析することより、ひび割れ発生時の収縮応力およびコンクリートひずみの戻りから算定される引張ヤング係数を求め、圧縮ヤング係数との比を求めた。その結果を図-13 に示す。今回は、自己収縮試験でひび割れが発生したものが1体あったが、ひび割れ発生時のコンクリートひずみの変化データが取れなかったため、いずれも乾燥収縮試験によるものである。本図より、引張ヤング係数は、圧縮ヤング係数の 80 ~ 90% 程度であることがわかる。

3.6 ひび割れ発生条件に関する考察

図-14 に、拘束収縮条件において、ひび割れが発生した場合はひび割れ発生時の、ひび割れが発生しなかった場合は最終計測時の、応力・強度比と拘束引張ひずみ (ε_t) の関係を示す。ひび割れ発生は、自己収縮試験の場合には、応力・強度比が 45 ~ 55 %, ε_t が $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ 程度の範囲であり、乾燥収縮試験の場合には、応力・強度比が 50 ~ 60 %, ε_t が $500 \sim 800 \times 10^{-6}$ の範囲であった。ひび割れが発生した供試体の ε_t は、乾燥収縮試験が自己収縮試験よりかなり大きな値となっているが、ひび割れは逆に早い材齢において発生した。

4. まとめ

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 拘束が大きくなる場合や、水結合材比が小さくなる場合、収縮応力、弾性ひずみ、拘束引張ひずみおよび拘束引張ひずみと弾性ひずみとの差は大きくなる。
- (2) 引張ヤング係数は、圧縮ヤング係数の約 80% である。
- (3) 応力・強度比が 45 ~ 60%, 拘束引張ひずみ

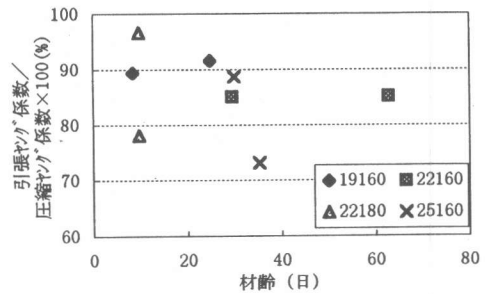


図-13 ひび割れ時のヤング係数比

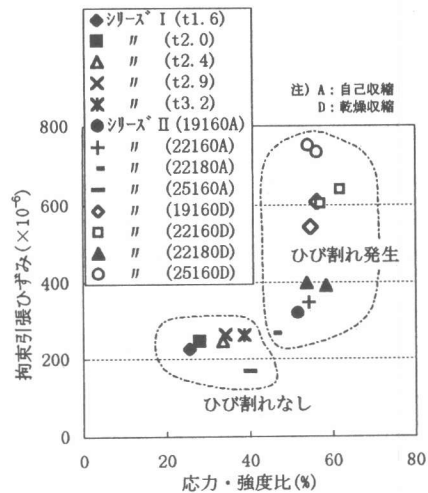


図-14 ひび割れ発生条件

が約 300×10^{-6} 以上になると、ひび割れが発生した。

謝辞

本研究を実施するに当たり、(株)奥村組技術研究所研究員の河野政典氏、起橋孝徳氏に多大な御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書，1996.11
- 2) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書Ⅱ，1994.5
- 3) 仕入豊和，青柳征夫，川瀬清孝：コンクリートのひび割れ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，1985