

(8) 全面接着式ロックボルトの作用効果と設計法について REINFORCEMENT EFFECT OF FULLY GROUTED ROCKBOLTS ON TUNNEL STABILITY

蒋 宇静*・江崎哲郎**・末松史朗***・大久保達也****
Yujing JIANG, Tetsuro ESAKI, Siro SUEMATU and Tatsuya OKUBO

In this study, a new elasto-plastic analysis for the ground-bolts interaction in rational design of tunnel support was presented, in which the shear stress due to the cohesive action between rock bolts and ground owing is modeled to the active reinforcement effect of the fully grouted rockbolts, and the post-failure behavior of the rock after it yielded was taken into consideration. By a detailed parametric study with the newly developed analytical solutions and the scale model tests using the base friction technique, it was clarified that the wall convergence and the plastic zones around tunnel could be effectively controlled by the rockbolts if the competency factor, Srp , ranges from 0.5 to 1.0. Finally, the optimum bolt length and bolting density on the tunnel stability according to the ground conditions were discussed.

1. はじめに

トンネルの支保工や補強材料として、ロックボルトがよく用いられている。ロックボルトの作用機構に関していくつかの理論的および実験的研究がなされてきている^{1)~3)}。しかしながら、トンネルの安定性に対してロックボルトがどのように作用効果を発揮し、地山条件によってその効果がどう変わるか、また、周辺岩盤の非弾性的挙動に対してどのような設計を行えば有効であるかなどについては、まだ十分に解明されているとは言えない。

著者らは、周辺岩盤との間の付着で発生したせん断応力をロックボルトの作用効果としてモデル化することによって、全面接着式ロックボルトと地山岩盤との相互作用を解明できる新しいトンネルの理論解析法を提案し、ロックボルトの作用効果が十分に発揮できる地山条件や影響要因などについて考察を行っている⁴⁾。本論文は、さらにこの解析法を用いて、ロックボルトの打設長さおよび打設密度がトンネルの周辺の弾塑性応力の分布、内空変位や塑性領域の発生など、周辺岩盤の安定性に対する影響について詳細な考察を行い、ロックボルトの支保量の最適設計法について検討する。また、理論解析の妥当性は、底面摩擦模型装置を用いた模型実験を実施することによって、比較検討を行う。

2. ロックボルトの作用機構の理論解析法

一般にロックボルトと地山の間の付着が完全であれば、軸力の分布および地山との境界面に発生するせん断応力の分布はFig.1に示すようになり、軸力が最大となる点に対応し、せん断応力がゼロとなるニュートラルポイントが存在する。実際は、ロックボルトの頭部にベアリングプレートが取り付けられる場合があり、それによって軸力およびせん断応力の分布が変わってくると考えられるが、ここではプレートの影響を無視して考える。なおベアリングプレートのトンネル壁面変位に対する抑制効果を考慮する場合はそれを内圧の形式で評価することができる。

2.1 ロックボルトによる摩擦効果の表現

Fig.2に示す軸対称問題を考える。 a はトンネルの半径、 ρ はトンネル中心からのニュートラルポイントの距離、 L はボルトの長さ、 $L_1 = a + L$ である。 L_2 はトンネル軸方向のボルト間隔を表す。Fig.3に示すように、一本のボルトが半径方向 dr 、円周方向 L_r 、厚さ L_z の扇形要素を受け持つことになる。ボルトと地山の境界面に働くせん断応力が一様に分布し、また、ボルトがトンネルの軸方向と円周方向に、それぞれ等間隔に打設されるとする。そこで、接線方向応力 σ_t の拘束作用により、ボルトと地山岩盤の境界面に働

* 正会員 工博 九州大学工学部助教授

** 正会員 工博 九州大学工学部教授

*** 学生会員 九州大学大学院工学研究科

**** 正会員 住友建設株式会社技術研究所

く摩擦力 dF_b は

$$dF_b = \pi d_b \lambda \sigma_i dr \tag{1}$$

ただし、 d_b はボルト径、 λ はボルトと地山の間の摩擦係数である。

したがって、この微小要素の釣合を考えると、応力の釣合方程式が次のように得られる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - (1 - \beta) \sigma_i}{r} = 0 \tag{2}$$

ただし、 β は $\beta = \pi d_b \lambda a / L_r L_r$ で表され、全面接着式ボルトの打設密度パラメータと呼ぶ。 β の値はほとんどのケースで 0.05-0.20 と変化する⁹⁾。また、ニュートラルポイントよりもトンネル壁面側では β の符号が逆になる。

2.2 解析ケース

トンネルの変形挙動および安定性は周辺地山の力学的特性、特にピーク強度以降の応力-ひずみ関係に大いに支配される。ここで、岩盤が Mohr-Coulomb の破壊規準に従い、破壊後にひずみ軟化およびグイレタンスー挙動を呈するものとする。初期地山応力が静水圧で、自重も無視される場合は、Fig.3 に示した座標系において、接線方向応力 σ_t と半径方向応力 σ_r がそれぞれ最大と最小主応力となる。また、トンネルの周辺には、ひずみ軟化領域と塑性流動領域が発生するため、それらの規模は塑性半径 R_e と R_f によって表す (Fig.2)。 R_e と R_f 、 L_i および ρ の位置関係によって、Table 1 のような9つの解析パターンが考えられ、大きく分類すると次の3つのグループになる。

グループ1 (Case1~Case3) は、トンネル周りに塑性流動領域が発生し、かつロックボルトがひずみ軟化領域や塑性流動領域内にとどまっている。地山強度が比較的に低く、ロックボルトが短い場合に、このようなケースになる。

グループ2 (Case4~Case6) は、塑性流動領域が発生し、ロックボルトが弾性領域までに打設される場合である。

また、グループ3 (Case7~Case9) は、ひずみ軟化領域のみが発生する場合である。

なお、ロックボルトの打設に伴う周辺地山中の応力とひ

Table 1 Analysis cases

Cases	Categorization of plastic zones and bolt length
1	$a < \rho < L_i < R_f < R_e$
2	$a < \rho < R_f < L_i < R_e$
3	$a < R_f < \rho < L_i < R_e$
4	$a < \rho < R_f < R_e < L_i$
5	$a < R_f < \rho < R_e < L_i$
6	$a < R_f < R_e < \rho < L_i$
7	$a < \rho < L_i < R_e$
8	$a < \rho < R_e < L_i$
9	$a < R_e < \rho < L_i$

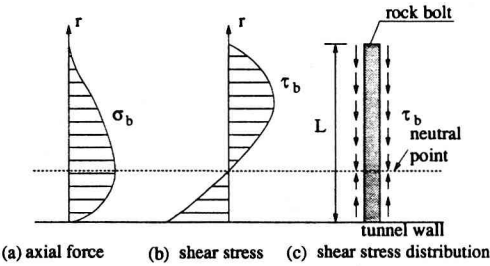


Fig.1 Behavior of fully grouted rockbolt.

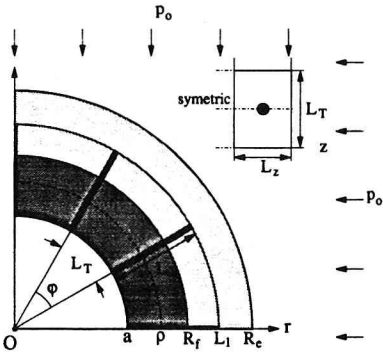


Fig.2 Relationship among plastic radii, bolt length and neutral point.

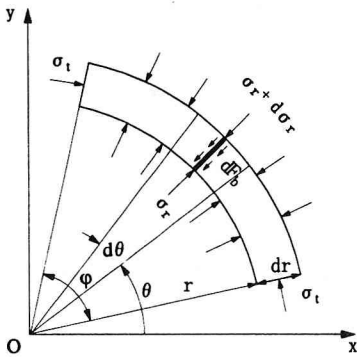


Fig.3 Equilibrium consideration for bolt-ground interaction.

ずみの分布、塑性領域の規模に関する具体的な解析は、応力の釣合方程式を半径方向の応力が $r = R_e$ と $r = R_f$ の境界において連続するという条件を用いて解くことによって求めることができる⁹⁾。

3. トンネルの安定に対するロックボルトの作用効果

ロックボルトの作用効果には、吊り下げ作用、梁形成作用、キーストーン効果および補強作用があるが、NATMを用いる軟岩トンネルの場合において、周辺地山の塑性破壊あるいは塑性変形の進行を抑制し、かつ強度低下を生じた岩盤の分離、脱落を防ぐために全面接着式ボルトが用いられる。その作用効果はボルトの打設密度と打設長さ、また

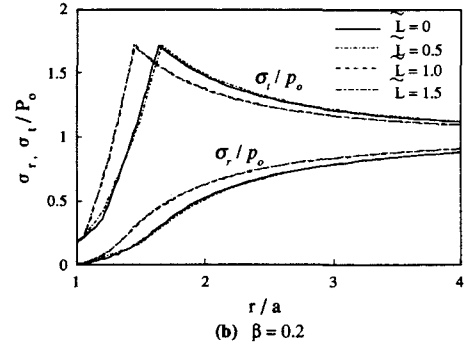
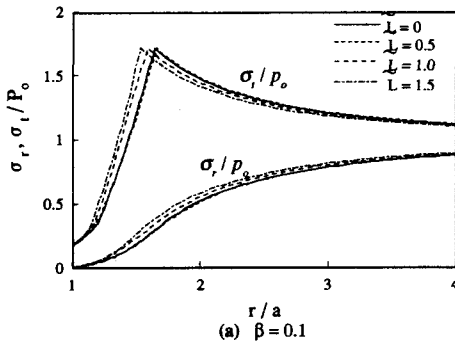


Fig.4 Influence of relative bolt length on stress distribution around a circular tunnel.

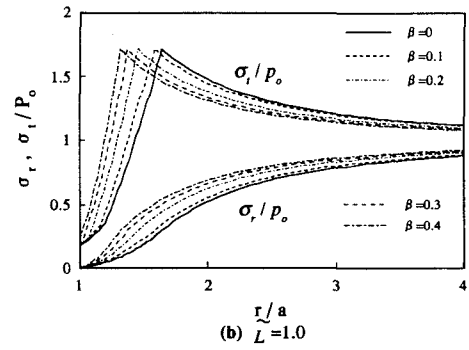
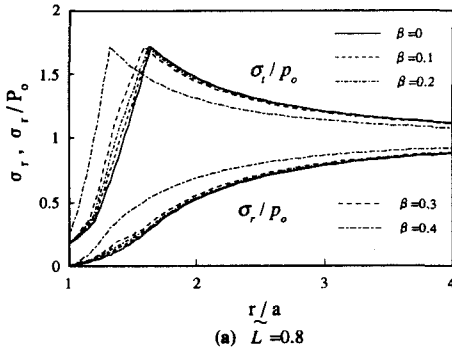


Fig.5 Influence of bolt density parameter on stress distribution around a circular tunnel.

地山の力学的特性に大きく支配されると考えられる。これらを定量的に評価するために、前述した理論解析法に基づいて開発したソフトを用いて、パラメトリックスタディと考察を行うことにする。

解析では、一軸圧縮強度と初期地山応力の比で定義される地山強度比 Srp を 0.1~2.0 と変化させ、他のパラメータは、以前に求めた一軸圧縮強度との関係式を用いている。

トンネル周辺の応力分布に及ぼす影響については、打設密度パラメータ β を一定として、ボルト長さを变化させたケースと、ボルト長さを一定として打設密度を变化させた2つのケースを考えた。ボルト長さは、 $\tilde{L} = L/a$ と無次元化し、以下では相対ボルト長さと呼ぶ。ここでは一例として、初期地山応力を $p_0 = 5.0\text{MPa}$ 、地山強度比を $Srp = 0.5$ と一定としている。

(1) β が一定で、 $\tilde{L}$ を变化させた場合

Fig.4 は、 β をそれぞれ 0.1, 0.2 で一定としている。Fig.4(a) では、ロックボルト無しの状態 ($\tilde{L} = 0$) と比べて、トンネル半径に対する相対ボルト長さ $\tilde{L} > 0.5$ とすると、ボルト長さの増加に伴い、しだいに応力分布の曲線のピークがトンネル側にシフトし、塑性領域が減少する。一方、Fig.4(b) を見ると、打設密度が倍になったため、 $\tilde{L} = 1.0$ となると、応力ピークの位置が大きくトンネル壁面に近づいてくる。しかしながら、それ以上にボルト長さを増やしても、応力ピークの位置がほとんど変化しない。

(2) $\tilde{L}$ が一定で、 β を变化させた場合

Fig.5 は、打設密度パラメータによる影響効果を示す。 $\tilde{L} = 0.8$, $\beta \leq 0.3$ では、弾塑性境界（応力ピーク）の位置は、あまり β によって変化しないが、 $\beta = 0.4$ では、応力ピークが急にトンネル壁面に近づき、塑性破壊を生じた領域が大幅に減少している。また、Fig.5(b) では Fig.5(a) に対して、 $\tilde{L}$ が 1.0 まで増やされたため、 β の増加に伴い、応力ピークの位置が次第にトンネル壁面に近づき、 $\beta = 0$ に比べて $\beta = 0.4$ では、塑性領域の規模がほぼ半減した。

4. 地山条件に応じたロックボルトの最適設計法の検討

4.1 基本的な考え方

全面接着式ロックボルトは、基本的に岩盤と一体となって挙動することにより地山強度を向上させて、岩盤変形と塑性破壊を抑制するが、地山強度が余りにも低く、とくに破壊後残留強度が顕著に低下する場合は、岩盤とボルトの間の相対変位が大きくなるため、ボルト内に生じる軸力と境界面（グラウト）のせん断破壊の可能性が大きくなる。この傾向は周辺地山が軟岩の場合に特に顕著であることが多数の事例報告から分かる。また、理論解析においても明らかになったように、ボルトの打設長さや密度は地山強度比によって各々の影響効果が変動する一方、両者の組み合わせによってもトンネルの安定機構が大きく変わる。したがって、最適なロックボルトの設計としては、地山の post-failure 挙動を考えるとともに、ボルトの長さや打設密度の

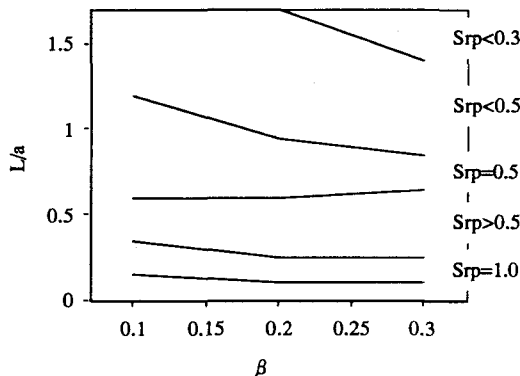


Fig.6 Optimum bolt length and bolt density according to the competency factor, S_{rp} .

組合わせを合わせて検討すべきであろうと考える。

4.2 ロックボルトの最適設計法

ここでは、地山強度比 $S_{rp}=0.1\sim 2.0$ において、相対ロックボルト長さ $\tilde{L}$ と打設密度の相互作用を解析的に明らかにした上で、最適設計法の一案を示す。解析プロセスとしては、まず、 $\tilde{L}$ を一定とし、 S_{rp} に対して塑性領域の大きさと内空変位が顕著に変化し始めるときと一定に近づくときの β の2つの境界値を求める。次は、 β を一定として、同様に S_{rp} に応じる $\tilde{L}$ の2つの境界値を求める。それらを S_{rp} に対して整理すると Fig.6 のようになる。つまり、 S_{rp} によって異なるが、塑性領域の大きさおよび内空変位の抑制から、 β と $\tilde{L}$ の間には最適な組み合わせが存在し、この図から判断することができる。

地山強度比が0.3以下または1.0以上の場合、トンネル半径より短いボルトを打設する限り、塑性半径、壁面ひずみに対する β の効果がほとんど期待できない。打設長さも同様な傾向を示すが、 $S_{rp} > 1.0$ では、 $\tilde{L}$ が約0.2~0.4の範囲内でもトンネルの壁面ひずみを3%以下に抑制できるが、それより長いボルトを打設しても、それ以上の抑制効果は期待できない。 $S_{rp} = 0.5$ の場合、 $\tilde{L}$ が0.8以上でないと塑性領域がほとんど抑制されず、トンネル半径と同じ長さのボルトを打設しても、壁面ひずみが約5%までしか抑えられない⁶⁾。一方、 $S_{rp} < 0.3$ のような非常に軟弱な地山条件では、掘削によって地山が大きく変位を生じるため、トンネル径よりも長いロックボルトを打設しないと、塑性半径と壁面ひずみを抑えるのに対して作用効果はほとんど現れない。この結果から、非常に弱い地山の場合は、ロックボルトのみでは、トンネルの安定に対してそれほどの抑制効果が期待できないため、ほかの対策工を合わせた設計を考える必要があると考えられる。以上の結果から、ロックボルトの作用効果が有効に発揮できる地山条件として、本解析条件では $S_{rp} = 0.5\sim 1.0$ にあるのではないかと考える。

5. 模型実験による検討と考察

Table 2 Bolt density parameter and size of plastic zones by analysis.

Cases	bolt	β	U_a/a	R_f/a	R_c/a
1	0	0	0.0178	1.454	1.711
2	8	0.104	0.0145	1.423	1.675
3	22	0.283	0.0111	1.330	1.567

5.1 模型実験の概要

理論解析の妥当性の検証と実験的挙動との比較を行うために、著者らが設計した底面摩擦模型装置を用いて、模型実験を実施した。解析と同様に静水圧的初期地山応力状態は地山模型に垂直と側方から均一の荷重を加えるように表現される。また、模型の変形状況などは画像解析システムによって収録し、実験終了後に数値処理を行う。

地山模型材料は、硫酸バリウム：酸化亜鉛：ワセリンを質量比70：21：9として配合し、一定の圧力で単位体積重量が1.9gf/cm³となるように押し固めて作成する。このように作成された模型の一軸圧縮強度は0.152MPa、ヤング率50MPa、内部摩擦角32.8°である。実物との間の応力スケールは2.97、荷重は $p_0 = 0.304$ MPa としたため、地山強度比は $S_{rp}=0.5$ となる。

ロックボルトのモデル化では、原型との相似性と加工性を考えてアルミニウム（ヤング率 7.0×10^4 MPa）を採用し、また模型実験では幾何学的スケールを100としたため、径1mmのアルミ線材を用いた。地山模型材料との間の付着力を確保するために、エポキシ系の接着剤を用いて、アルミ線材の表面に均一に標準砂を接着し、模型材料に粘着させる方法考えた。その付着力は引っ張り試験によって測定されている。ロックボルトの模型内への打設は、地山模型作成の際に、予めトンネル（直径10cm）周りの所定位置に埋設した。

5.2 実験的挙動と作用効果についての考察

模型実験では、グラウトロックボルトの長さを5cmと一定とし（ $\tilde{L} = 1.0$ ）、打設密度パラメータ β を変化させた。Table.2は、 β と実際の打設本数の関係、および内空変位と塑性領域の半径の解析解を示す。

Fig.7には、理論解析による塑性領域と実験において観察された亀裂の発生状況を合わせて示してある。塗りつぶした部分は解析的に予測したひずみ軟化領域と塑性流動領域を表す。 $\beta = 0$ に比べて、全面接着式ボルトの打設（ $\beta = 0.283$ ）によって、解析結果と同様に塑性領域の約10%、内空変位の37%が抑制された。また、模型実験では、塑性流動領域における亀裂の進展が観察され、とくに重力の作用で、トンネル両側壁において円弧状の亀裂が発生し、とくに $\beta = 0, 0.104$ の両ケースでは壁面付近が剥落した。一方、ひずみ軟化領域においては目で見える亀裂が観察され

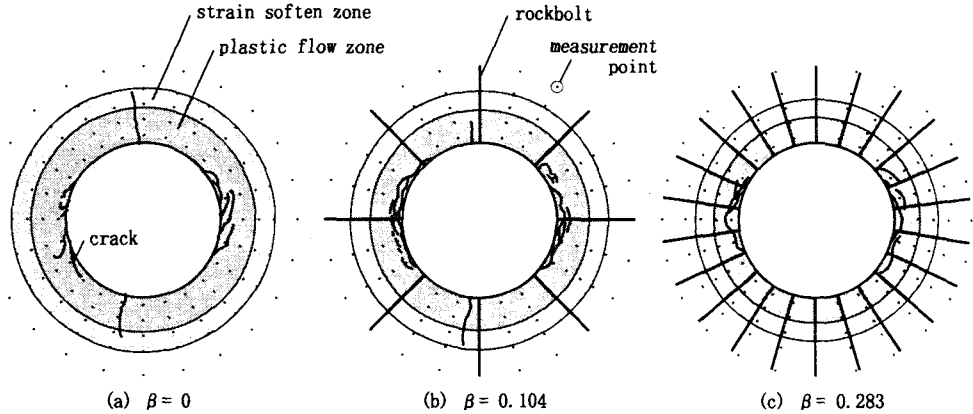


Fig.7 Comparison of analytical solutions and scale model tests on plastic zones and propagation of crack.

なかったが、周辺の変形の増加量から塑性破壊を生じていると判断することができた。また、トンネル両側壁の間および上下盤の間の内空変位は、Fig.8に示したように、上下盤の間は、自重を無視した理論解析よりも大きく計測されたが、自重の影響をほとんど受けていない両側壁間は理論解析とよく一致した。これらは、ここで提案したロックボルトの理論解析法が妥当であることを示している。

6. おわりに

トンネル工法にNATMを用いる際、ロックボルトの力学的挙動を明らかにすることは、より合理的な支保設計を行うために重要である。本論文は、ロックボルトと周辺岩盤間の付着で発生したせん断応力をその作用効果としてモデル化することによって、トンネル安定に対する全面接着式ロックボルトの作用機構の理論解析法を提案することができた。それを用いた解析と実験的検討の結果、ロックボルトの作用効果は打設長さと密度に大きく支配されるが、すべての地山条件に対して有効に現れるわけではなく、効果的に適用できる地山条件が存在することが明らかになった。また、地山強度比に応じたロックボルト長さや打設密度の相互作用効果を明らかにした上で、最適設計法の一案を示した。更に、提案した理論解析法の妥当性が模型実験において検証された。ただし、本論文は、初期地山応力とロックボルトの打設が軸対称となる場合のみを対象とし、またグラウトのせん断破壊も考慮されていないことに注意されたい。今後は、非軸対称問題やグラウトのせん断破壊挙動までも考慮できるように検討を重ねてゆきたい。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：NATMにおけるロックボルト工，第1回トンネル技術シンポジウム，1980。
- 2) 山本 稔：ロックボルトの地山支持機構を考える，トンネルと地下，Vol.20, No.2, pp.7-19, 1989。

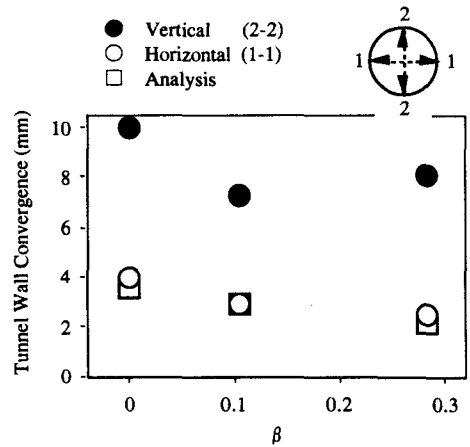


Fig.8 Influence of the bolting density parameter on tunnel wall convergence.

- 3) Hoek, E. Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.: *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, A.A. Balkema, 1995.
- 4) Hoek, E. & Brown, E.T.: *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- 5) Indraratna, B. & Kaiser, P.K.: Analytical model for the design of grouted rock bolts, *Int. J. for Numerical Methods in Geomechanics*, Vol.14, pp.227-251, 1990.
- 6) Indraratna, B. & Kaiser, P.K.: Design for grouted rock bolts based on the convergence control method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.27, No.4, pp.269-281, 1990.
- 7) Kaiser, P.K., Yazici, S. and Nose, J.: Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.29, No.3, pp.293-306, 1992.
- 8) 蔦 宇静, 江崎哲郎, 横田康行：トンネル安定におけるロックボルトの力学的作用効果，土木学会論文集投稿中，1995。
- 9) 江崎哲郎, 蔦 宇静, 横田康行：地山特性曲線に影響を及ぼす要因の定量的分析，第9回岩の力学国内シンポジウム論文集，pp.767-772, 1994。