

軟弱地盤における偏心多軸式大断面泥土式シールドの 施工と地盤変状計測

TUNNELING WITH DPLEX LARGE-SECTION SLURRY AND EARTH-PRESSURE SHIELD IN SOFT GROUND AND MEASUREMENT OF GROUND DEFORMATION

大門信之¹⁾・藤木育雄²⁾・大塚 努³⁾
Nobuyuki OKADO, Ikuo FUJIKI, Tsutomu OTSUKA

The DPLEX (Eccentric Parallel Linking Multiple-shaft) slurry and earth-pressure shield method was used for the shield tunnel between Kinshicho and Oshiage Stations of Eidan Subway Line Hanzomon.

Measurement of ground deformation was made for the initial drive section because this is the first slurry and earth-pressure shield method ever employed by TRTA. Excavation was made in soft clayey ground, and this is the largest diameter tunnel ever excavated using this type of shield method. Excavation control values were determined on the basis of measurement results. The amount of instantaneous settling and subsequent settlement due to consolidation of the tail void were calculated using the FEM analysis method used by TRTA. The results showed satisfactory agreement with the measured values, proving that this analysis method is applicable for the slurry and earth-pressure method.

Key Words: DPLEX slurry and earth-pressure shield method, ground deformation, drive control, grouting pressure, FEM analysis

1. はじめに

営団半蔵門線延伸区間(図-1)のうち、錦糸町駅～押上駅間のシールドトンネルは、地盤条件、発進基地条件、掘削土の処理・処分に關する経済性を考慮し、偏心多軸式泥土圧シールド工法を採用した。

営団初の泥土圧シールド工法となること、軟弱粘性土地盤の掘進となること、これまでの偏心多軸式泥土圧シールド工法の施工実績の中で最大径となることから、初期掘進区間で地盤変状計測を行い、本掘進における適切な掘進管理値の検討を行った。

本報告では、地盤変状計測結果を基に、偏心多軸式泥土圧シールド工法を採用した場合の軟弱地盤の挙動について述べるとともに、軟弱地盤の変位予測手法として営団が提案した解析方法¹⁾を用いて、裏込め注入圧が作用するときのテールボイドの即時沈下とその後の圧密沈下量を求め、この手法の本工事への適用性を確認する。



図-1 半蔵門線延伸区間平面図

- 1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
- 2) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部 工務部
- 3) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 11号線押上工事事務所

2. 工事概要

本工事では、営団半蔵門線の錦糸町駅～押上駅間の複線シールドトンネル(本所工区)を偏心多軸式による泥土圧シールド工法で構築する。工事概要を表-1に示す。また、シールド機概要を図-2に示す。

表-1 工事概要

トンネル施工延長	907m
シールド外径	φ 9,600mm
セグメント種類	RC 平板型セグメント
セグメント外径	φ 9,400mm
セグメント内径	φ 8,520mm
セグメント幅	1,500mm
セグメント厚	440mm
縦断勾配	-4.0‰～+5.0‰
構築平均土かぶり	13.7m～15.4m

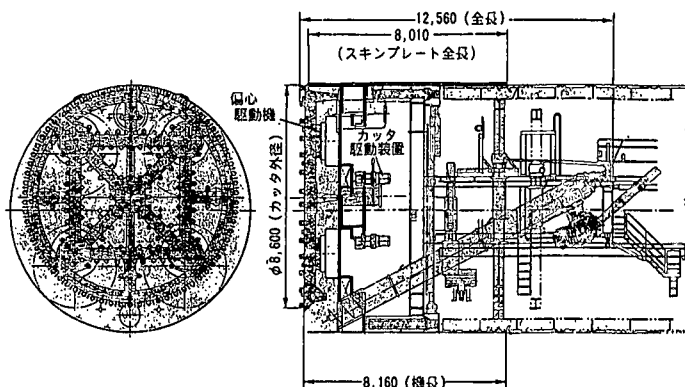


図-2 偏心多軸式泥土圧シールド構造図

3. 地質概要

本工事を施工する地層状況は、GL-25m程度までが沖積粘性土地盤で構成されており、その下に洪積粘性土層、砂礫層が存在する(図-3)。

シールド掘進断面の地層は、下部有楽町粘性土層(YI-c)で、N値が0～4程度と軟弱な粘性土地盤である。また、この粘性土の自然含水比は、ほとんどの箇所で液性限界を超えており、鋭敏比が非常に高く、乱した後の強度低下が著しい地盤である。

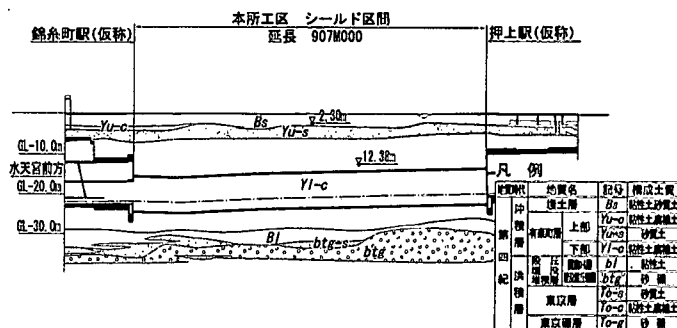


図-3 地質縦断面図

4. シールド掘進管理

(1) 地盤変状計測概要

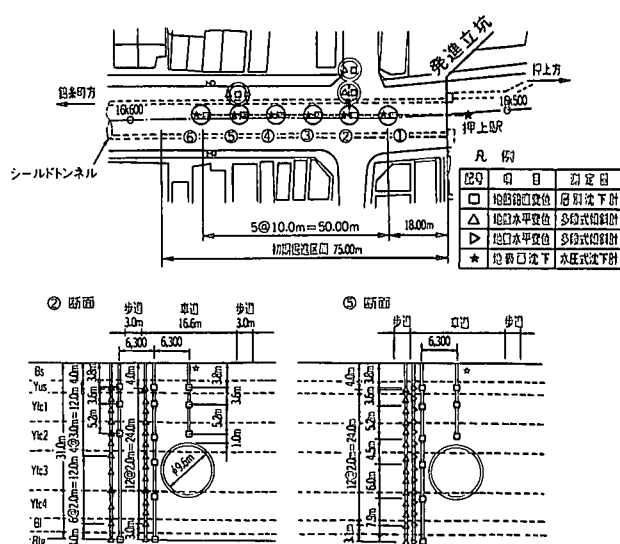
計測断面配置を図-4に示す。計器は、初期掘進区間75mの中に6断面設置し、トンネル直上の鉛直変位を全6断面で、また主計測断面②、⑤でトンネル側方の鉛直変位、水平変位を計測する。

(2) 掘進管理

表-2にシールド掘進による主な地盤変状と、本工事における主な管理項目および制御方法を示す。

このうち軟弱粘性土地盤においては、特に地盤の乱れに起因する後続変位が大きくなる場合が多い。

そこで本工事では、地盤の乱れによる地盤変位を抑えるため、初期掘進区間に初期



※：①、③、④、⑥断面は、トンネル直上の鉛直変位のみ

図-4 地盤変状計測計器配置図

設定区間(①～②断面),修正区間(③～④断面),確認区間(⑤～⑥断面)を設定し,本掘進における掘進管理値の検討を行った.表-3に,初期掘進における主な設定管理値,図-5に実施工における管理値を示す.ここで,裏込め注入圧の上限は管理土圧+100kN/m²,管理土圧は,初期設定区間で主働土圧相当,修正区間で受働土圧相当に設定した.

表-2 地盤変状の発生要因と掘進管理項目

地盤変状の種類	発生要因	管理項目	制御方法
先行変位	切羽における土水圧の不均衡	・チャンパー内土圧管理 ・掘削土量管理 ・添加材管理	・ハルカットに設置した土圧計の検出圧力を中央制御室に伝送し,設定圧力との差異に基づき,自動的に排土量を調整し,チャンパー内土圧を制御. ・スクリーコンベアの回転数,一次圧送ポンプの回転数でチャンパー内土圧を制御.
シールド通過時変位	シールド機と地山の摩擦	・シールド姿勢制御管理	・現場測量,ジャイロコンパスにてシールド機の位置,姿勢を計測し,偏位量,偏向量を常時把握し,シールド姿勢を早期に修正. ・軟弱地盤におけるシールド前方の沈みに対しては,下側のジャッキ能力を大きくして対応.
テールボイド部変位	テールボイドの発生と裏込め注入の過大,不足	・裏込め注入管理	・初期強度が早期に得られる可塑性固結型裏込め材を使用 ・管内の閉塞を防止するため同時注入冷却システムを採用.
後続変位	上記の複合	上記の管理	上記の制御

表-3 初期掘進区間における設定管理値

断面位置		管理土圧 (kN/m ²)	裏込め注入圧 (kN/m ²)	裏込め注入率 (%)		
初期設定区間	①	235	335	130		
	②					
修正区間	③			258	358	170
	④					150
確認区間	⑤					140
	⑥					

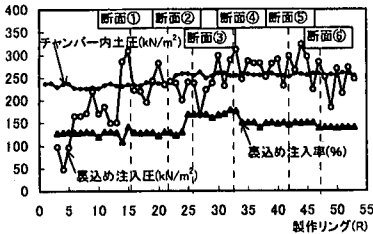


図-5 実施工における管理値

(3) 地盤変状計測結果

1) 鉛直変位

図-6に計測断面①～⑥のトンネル直上における鉛直変位を示す.

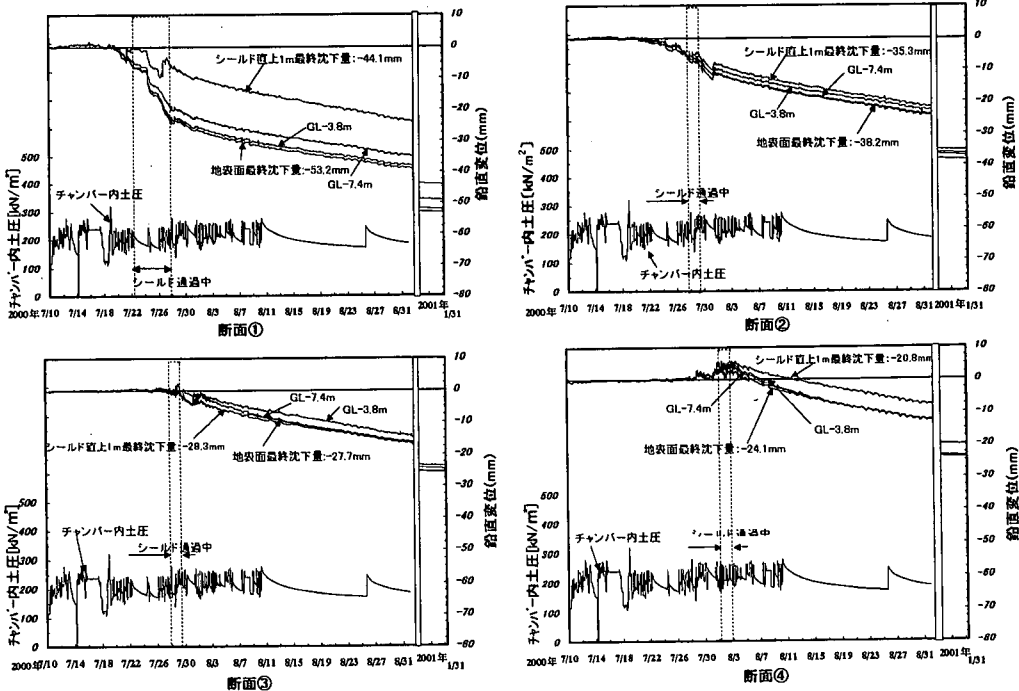


図-6 トンネル直上の鉛直変位計測結果(1)

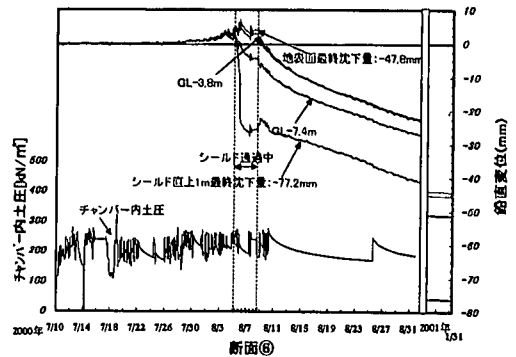
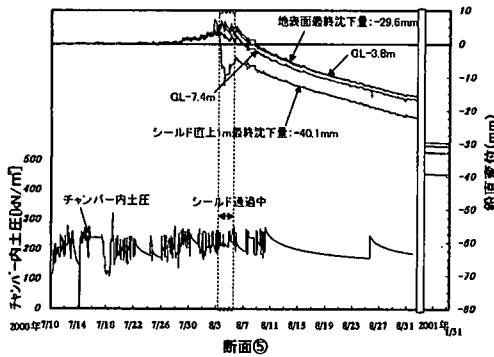


図-6 トンネル直上の鉛直変位計測結果(2)

【テール通過までの変位】

切羽通過前の先行変位は、切羽土圧を主働土圧相当に設定した断面①、②では沈下の傾向を示し、逆に切羽土圧を受動土圧相当とした③～⑥断面では隆起となっている。変位量は±5mm程度である。

シールド通過中には、断面①、⑤、⑥で大きな変位が生じている。断面①では、シールド通過中にセグメントリング組立てのためにシールド機が停止した後の再発進時に切羽における土圧バランスが崩れ、地表面で15mm程度の沈下が生じた。

【テール通過後の後続変位】

①～⑥の各断面で地盤の乱れによる圧密沈下が生じており、①～⑤断面では、地表面が、シールド直上よりも若干沈下量が大きく、いずれも20～35mm程度に収まっている。⑥断面では、トンネル直上でテール通過前に24mmの大きな沈下が生じたため、その後の後続沈下量も約50mmと大きな値となった。

2) 水平変位

断面②、⑤の水平変位計測結果を図-7に示す。

切羽通過時は、各計測位置とも大きな変位は計測されなかった。

また、テール通過後までの水平変位は、トンネル中心深度付近から発生しているが、最終変位はトンネル下端下5m付近から発生しており、この位置付近から圧密沈下が発生したと推測される。

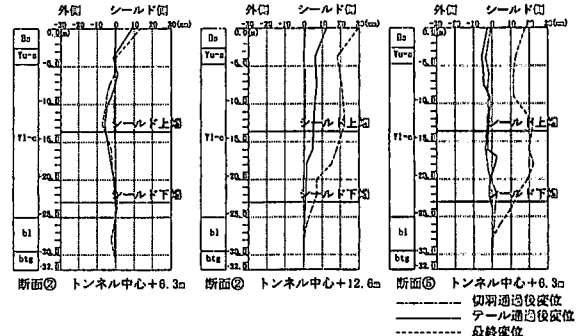


図-7 水平変位計測結果

5. 地盤変形解析

営団では、これまで軟弱地盤掘削時の地盤変状解析として、2次元FEM解析を用いた簡易的手法を用いており、本手法の有用性を確認している¹⁾。ここでは、この提案手法に裏込め注入圧を考慮したときのテールボイドの即時沈下とその後の圧密沈下量を求め、実測値との比較を行い、この計算方法の適用性を確認する。

STEP-1	STEP-2	STEP-3
初期応力の計算	シールドの応力解放	圧密沈下解析
$\sigma = \gamma \cdot (1 - \nu)$ ただし、STEP-2以降は別途 σ_0 を設定する。	$\sigma_t = \alpha \cdot (\sigma_0 - p_d)$ σ_t : シールド掘削面外周に作用させる荷重 α : 解放率 ($\alpha = 0.4$) σ_0 : 初期地盤応力 p_d : 裏込め注入圧力	STEP-3でせん断ひずみ $\gamma \geq 0.1\%$ の範囲で圧密沈下が生じるとし、体積収縮 σ' を入力。

図-8 解析ステップ

(1) 解析方法

解析ステップを図-8に示す。まず、STEP-1で初期応力解析を行い、STEP-2でテールボイド部の応力を解放させるとともに、裏込め注入圧をトンネル中心から外側へ作用させる。ここで、応力解放率 $\alpha=0.4$ 、裏込め注入圧はセグメントに設置した土圧計の計測結果を基に設定した。STEP-3は、STEP-2の解析結果のうち、せん断ひずみ領域に着目し、せん断ひずみが0.1%以上の領域で圧密沈下が生じるとして、せん断ひずみの大きさに応じて圧密沈下量を求める。以下に圧密沈下解析方法について説明する。

(2) 圧密沈下解析方法

正規圧密粘土では、せん断変形を受けて地盤が乱れると、垂直応力が増加しなくても圧密が進むことが分かっている(図-9)。

地盤の乱れに起因する体積圧密率(α')は、森・赤木²¹³⁾の研究を参照して次のように求める。

$$\alpha' = Cc' / (1 + e_0) \cdot \log(k \cdot \gamma + 1)$$

$$Cc' = 0.3Cc$$

$$k = 0.33Ip^{-0.37} \cdot \log St$$

ここに、

α' : 乱れに起因する圧縮収縮率

k : 乱れを表すパラメータ

e_0 : 乱れを受ける前の粘性土の初期間隙比

Cc' : 乱れを受けた粘性土の再圧密領域での圧縮指数

なお、地盤のせん断ひずみ(γ)は、テールボイド部のFEM解析より得られるせん断ひずみの増加分を考え、 $\gamma \geq 0.1\%$ の範囲で圧密沈下が生じるものとする。

(3) 解析条件

検討モデルを図-10に示す。検討断面の土かぶり(13.7m)は、解析領域はトンネルの下方を1D、側方をトンネル中心までのかぶりの3倍とした。

表-4に、地質調査結果を基に設定した土質定数を示す。

ここで、地山の変形係数は下式により設定した。

$$[\text{砂質土}] : E = 2500N \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$[\text{粘性土}] : E = 210C \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

また、圧密沈下の検討対象地盤は下部有楽町粘性土層(Y1-c)のみとし、圧密沈下解析に用いる土質定数は、地質調査結果から $e_0=1.76$ 、 $Ip=37.4$ 、 $St=25$ 、 $Cc=0.7$ とした。

(4) 解析結果

以上の解析手法から求めた解析結果を以下に示す。

図-11は、計測断面②の、テール通過後と圧密完了後の最終変位を示したものであり、両者とも、計測結果と解析結果は良い一致を示している。

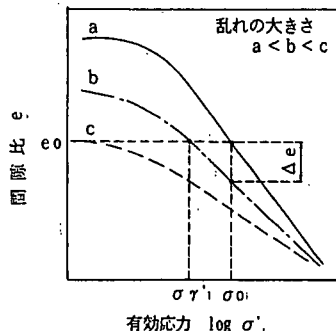


図-9 乱れに起因する圧密曲線の変化

St : 鋭敏比

γ : 地盤のせん断ひずみ

Cc : 乱れを受ける前の粘性土の圧密指数

Ip : 塑性指数

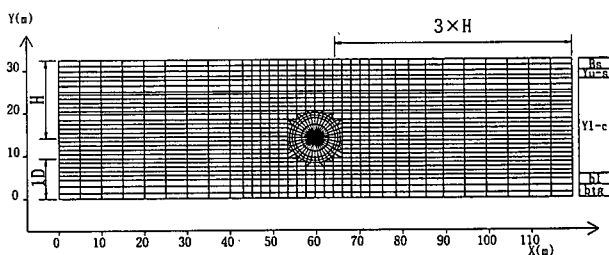


図-10 解析モデル

表-4 設計定数

地質名	埋め戻し土	上部有楽町層 (砂質土)	下部有楽町層 (粘性土)	洪積関東 ローム層	洪積塩谷 段丘層
記号	Bs	Yu-s	Y1-c	bl	btg
N値	3	4	2	8	50>
変形係数 $E(\text{kN/m}^2)$	7500	10000	20000	36000	125000
ポアソン比 ν	0.3	0.3	0.45	0.45	0.3
粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	0	0	93	170	0
内部摩擦角 $\phi(\text{度})$	21	22	0	0	40
単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	18	18	18	17	20
静止土圧係数 K_0	0.55	0.55	0.8	0.8	0.35

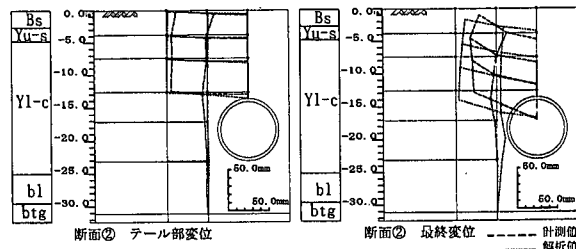


図-11 解析結果と計測結果の比較(②断面)

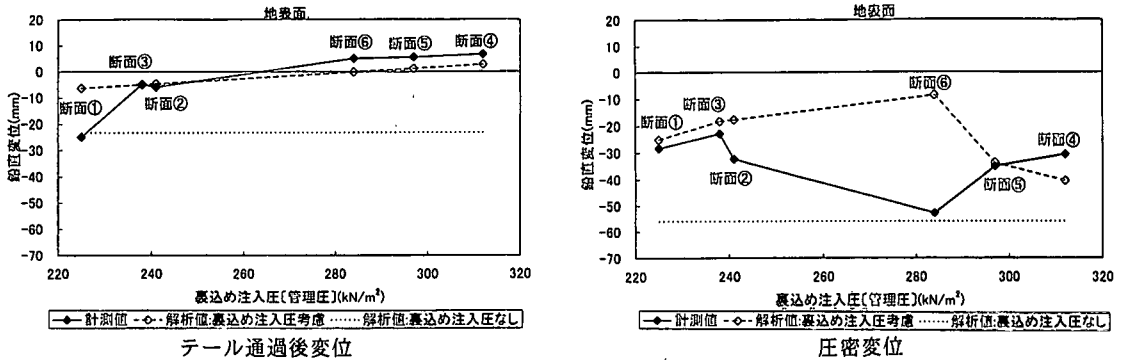


図-12 鉛直変位と裏込め注入圧の関係

また、図-12に、断面①～⑥の鉛直変位量を裏込め注入圧に着目して整理した結果を示す。

以下に、テール通過後変位、圧密沈下の解析結果についてまとめる。

【テール通過後変位】

裏込め注入圧を考慮した解析結果は、計測値と良い一致となっており、鉛直変位は裏込め注入圧と比例関係となっている。

【圧密沈下】

裏込め注入圧を考慮した解析結果は、テール通過後変位がゼロに近い、裏込め注入圧 285kN/m^2 (断面⑥) で圧密沈下量が最小となる上に凸の曲線を描く。一方、計測結果は断面⑥で解析値とは逆の下に凸の曲線を描くが、断面⑥ではシールド通過中に大きな変位が生じており、これを特異点とすると、解析値は計測値と概ね一致する。

6. おわりに

本報告では、偏心多軸式泥土圧シールド工法を採用した場合の軟弱地盤の挙動について述べるとともに、裏込め注入圧を考慮したテールボイドの即時沈下と圧密沈下をFEM解析より求めた。以下に検討結果をまとめる。

- ① トンネル直上の地表面の鉛直変位は特異点を除き、シールド通過前で約 5mm 、シールド通過中で $5\sim 15\text{mm}$ 、後続沈下量は $20\sim 35\text{mm}$ 程度であった。また、切羽通過時の偏心多軸式機構による地盤の乱れは計測されなかった。以上のことから、本工事で採用した偏心多軸式泥土圧シールド工法は、掘進管理を適切に行えば、軟弱地盤においても十分適用可能であると判断できる。
- ② 裏込め注入圧を考慮したFEM解析を行った結果、解析結果は計測結果と良い一致となった。また、裏込め注入圧を考慮しない場合、解析結果は計測結果よりも大きな値となった。以上のことから、営団でこれまで使用している提案式は、本工事のような同時裏込め注入を採用した場合には、裏込め注入圧を考慮する必要があると考えられる。

今後は、他工事においても裏込め注入圧を考慮した今回の解析手法を用いて、本手法の適用性を確認するとともに、裏込め注入圧の設工に与える影響の評価方法についても検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 藤木育雄・横田三則・米島賢二・村田基代彦：軟弱地盤でのシールドトンネル掘進に伴う周辺地盤の変形について、トンネル工学研究発表会論文報告集，第1巻，pp. 83～88，1991年12月
- 2) 森 隣・赤木寛一：非排水せん断変形で生じた乱れに基づく正規圧密粘土の圧密現象，土木学会論文報告集，第335号，pp. 117～125，1983年7月
- 3) 森 隣・赤木寛一：シールド工事に伴う軟弱粘性土の乱れに基づく圧密沈下，トンネルと地下，第11巻8号，pp. 15～19，1980年8月