

# 論文 セメントアスファルト乳剤複合体の三軸圧縮特性

原田竜也\*<sup>1</sup>・上田満\*<sup>2</sup>・村田秀一\*<sup>3</sup>・佐々木慎吾\*<sup>4</sup>

**要旨:**セメント, アスファルト乳剤, 砂の三成分によるセメントアスファルト乳剤複合体(以下ではCA複合体と称す)の三軸強度特性に与える影響を検討する為, 力学的な基本特性を求めた。即ち割裂強度, 純引張強度, 三軸圧縮強度を求め, さらに物理的な常数としてのポアソン比, 体積弾性係数等を求めた。また三軸圧縮試験による破壊包絡線が一軸強度前後の側圧で不連続となる要因をMuskhelishviliの提案式を用いて解明した。

**キーワード:**C/E, Mohrの応力円, 破壊包絡線, 空隙率, 塑性破壊, 塑性流動破壊

## 1. はじめに

CA複合体はその配合によって, 三軸圧縮強度特性としてセメントコンクリート, 土等とは異なる特性を持つものが存在することが筆者等の研究によって明らかとなった。そこで本研究の目的はこの特異な材料であるCA複合体の一軸, 三軸圧縮の荷重過程よりばあそん比, 体積弾性係数を求めることである。さらに骨材最大寸法がCA複合体の破壊包絡線の傾きに与える影響についても検討した。三軸圧縮試験にて, 塑性破壊と思われるCA複合体について, その破壊包絡線が一軸圧縮強度の側圧付近にて不連続となる要因の究明も本研究の目的とした。

材を用い, 標準的な試験には砂を用いたが, 骨材最大寸法を変化させる場合には砂と同質量のフィラー又は碎石を使用した。セメント, アス

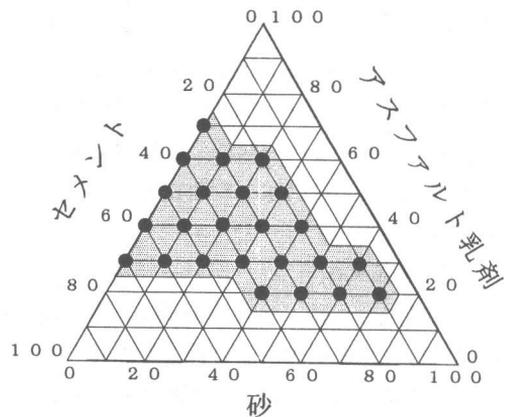


図-1 三角座標による配合分布

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び配合

使用材料は普通ポルトランドセメント(比重: 3.15, 粉末度: 3280cm<sup>2</sup>/g), ノニオン系のセメント混合用乳剤(YON乳剤→濃度: 57.9%, 蒸発残留分の針入度: 211), 豊浦標準砂(比重: 2.63)の三成分で, 配合は図-1に示す三角座標の格子点上24配合とした。また骨材最大寸法の影響を求める実験に於いては表-1に示す骨

表-1 骨材の比重及び粒径

	比重	粒径(mm)
標準砂	2.63	0.1~0.3
フィラー	2.70	0.074以下
碎石	2.58	0.6~5.0

\*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)

\*2 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (正会員)

\*3 山口大学教授 工学部社会建設工学科, 工博

\*4 島根県

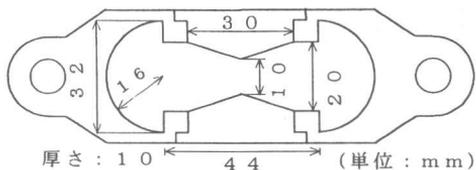


図-2 純引張試験用型枠

ファルト乳剤，砂の質量配合比が3:2:5のCA複合体は325等と以下では称する。

## 2.2 一軸，三軸圧縮試験

供試体はΦ5×10cmの円柱供試体で打設後24時間は温度20℃，湿度80%以上の恒温槽にて型枠のまま養生し，脱型後は温度20℃の室内にて27日間養生した。一軸圧縮試験は万能圧縮試験機（最大荷重5tf，ひずみ制御方式）を用い，ひずみ速度一定（3mm/min）のもとで行った。

三軸圧縮試験は供試体にゴムスリーブを装着し，真空ポンプの圧力により三軸室内に水を送り込んで側圧をかけ，万能圧縮試験機によりひずみ速度一定（3mm/min）のもとで軸圧をかけた。側圧の大きさは一軸圧縮強度以下及び以上の各々に対し三段階ずつ変化させた。いずれの試験も室温20℃の下で行った。

## 2.3 引張試験

割裂試験は一軸，三軸圧縮試験と同寸法の供試体で行い，純引張試験は図-2のような型枠を用いて供試体を作成し，両端を軸方向に引張して強度を求めた。

## 2.4 細孔径分布測定

一軸及び三軸圧縮試験終了後の供試体に対しポアサイザ9320システムを用いて水銀の圧入及び退出から試料中の細孔径（空隙）別の容積分布を測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 ポアソン比及び体積弾性係数

一軸圧縮試験の際に測定した縦ひずみと横ひずみより算出したポアソン比とC/E（セメントとアスファルト乳剤の質量比）の関係を図-3に示す。図よりC/Eの増加に伴いポアソン比が

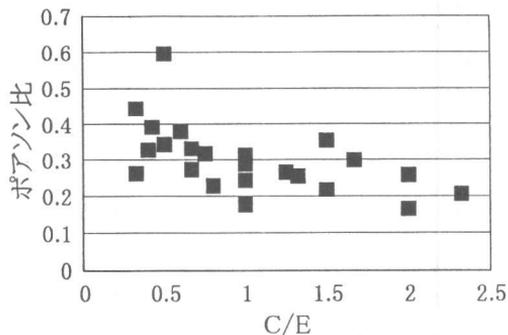


図-3 C/Eとポアソン比の関係

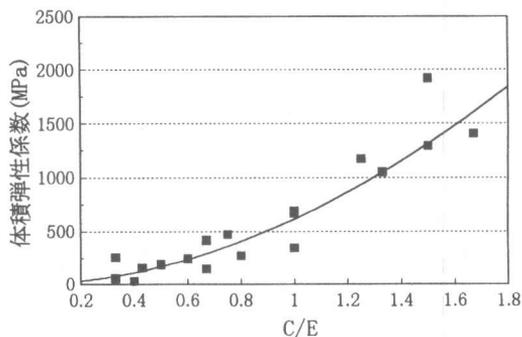


図-4 C/Eと体積弾性係数の関係

減少していることがわかる。これはC/Eの小さなものはセメントに比べアスファルト乳剤の量が多く柔らかい材料のため横ひずみが大きく，C/Eの大きなものは逆に堅い材料であると考えられる。ほとんどの配合でポアソン比が0.2以上であるのでCA複合体はセメントコンクリートより柔らかい材料であると言える。また図-4にC/Eと体積弾性係数を示す。この図より体積弾性係数はC/Eの増加に伴って放物線的に大となる。

### 3.2 引張強度

図-5，図-6に割裂試験と純引張試験の結果を示す。両図より割裂強度，純引張強度共にC/Eと正の相関があることがうかがえるが，純引張強度が割裂強度の2倍近くの値を示すものなど，各配合で強度比が明らかに異なるものが存在する。これは，供試体の形状寸法や実験方法が異なる為であると思われる。本研究では，供試体寸法及び打ち込み方法が同一供試体より

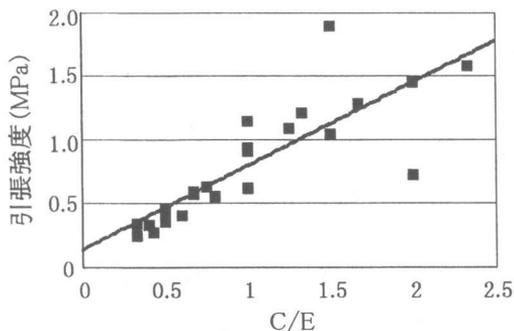


図-5 C/Eと割裂強度の関係

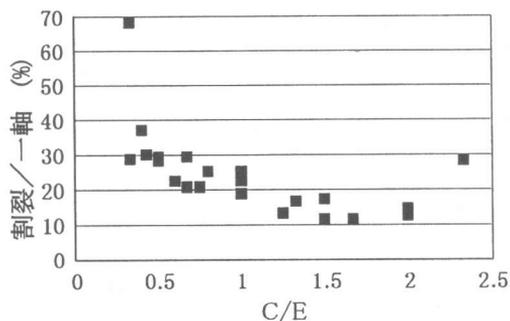


図-7 C/Eと割裂/一軸の関係

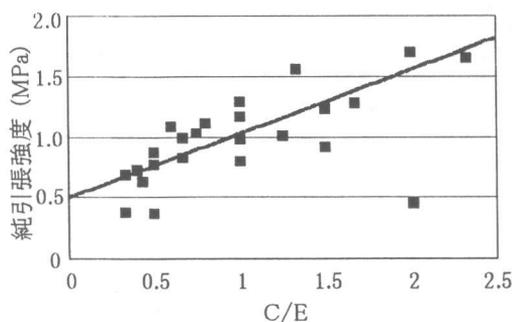
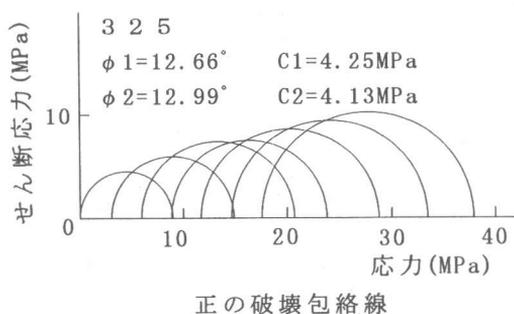
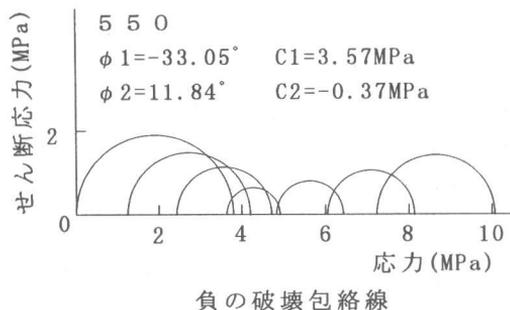


図-6 C/Eと純引張強度の関係



正の破壊包絡線



負の破壊包絡線

図-8 Mohrの応力円群

求めた割裂強度を引張強度とする。図-7よりC/Eの増加に伴い一軸圧縮強度に対する引張強度の割合が減少する傾向にあることが分かる。一般にコンクリートでは引張強度は一軸圧縮強度の1/10~1/16であるが、CA複合体の引張強度は一軸圧縮強度の4/10~1/10となる。これらの力学特性（割裂強度、純引張強度）とポアソン比等はC/Eの増加に伴い単調に増加及び減少しているので内部摩擦角がC/E=1.0付近で極小値をとる<sup>1)</sup>ことと合致しないので三軸圧縮特性との相関性はないものと思われる。

### 3.3 Mohrの応力円群

一軸、三軸圧縮試験の結果より描いたMohrの応力円群を図-8に示す。一軸圧縮強度以下の側圧の場合の内部摩擦角を $\phi_1$ 、粘着力をC1とし、一軸圧縮強度以上の大きさの側圧の場合を同様に $\phi_2$ 、C2と定義した。Mohrの応力円群は図のように破壊包絡線の傾きが正のものと、側圧が一軸圧縮強度内では負で強度外では正の

ものと2種存在する。前者は一般に良くみられる土、セメントコンクリート等と同じ破壊現象であり、一軸強度内外の側圧によるMohrの応力円群に連続性がみられる。しかし、後者は一軸圧縮強度を境にそれ以下と以上の側圧に対するMohrの応力円群に連続性が見られない。

### 3.4 骨材最大寸法の影響

骨材の最大寸法を変えて行った一軸、三軸圧縮試験の結果を図-9、10に示す。これら

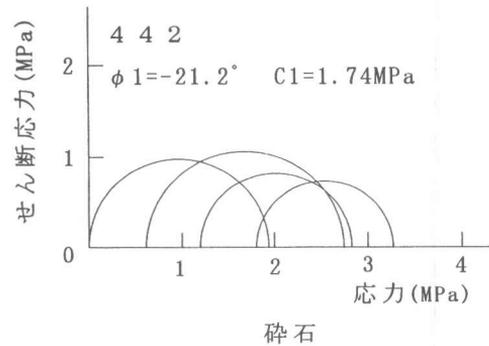
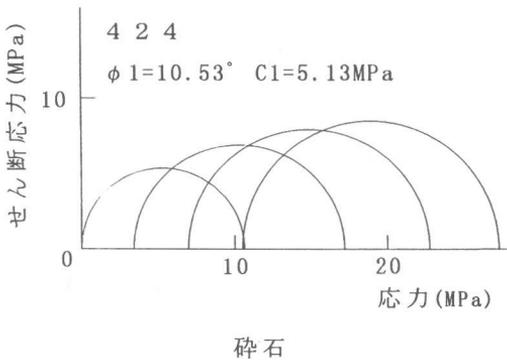
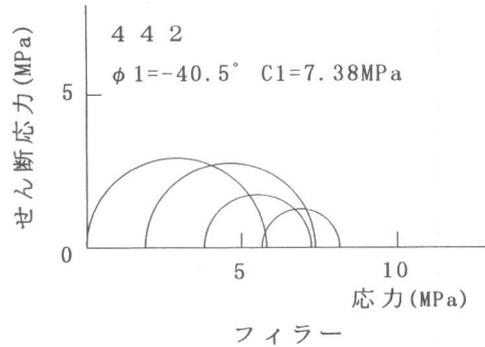
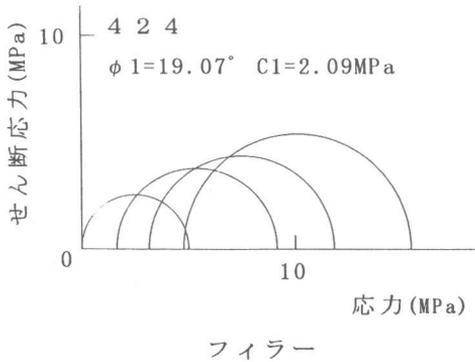
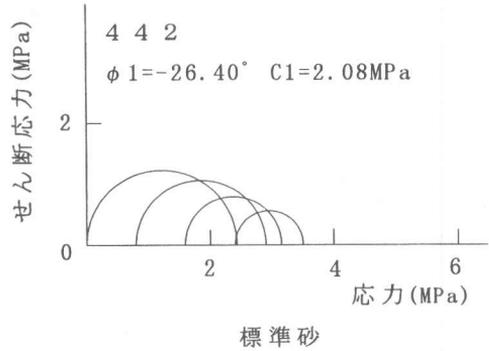
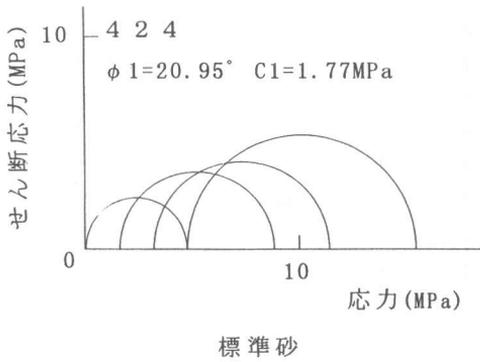


図-9 骨材最大寸法の影響（正の場合）

図-10 骨材最大寸法の影響（負の場合）

Mohrの応力円群を見ると、強度には若干の影響が見受けられるが、内部摩擦角の正、負の傾向に変化は見られなかった。しかしながら内部摩擦角、粘着力は配合442の場合、骨材最大寸法の増大に伴って内部摩擦角が大となり骨材最大寸法の影響が表れている。配合424にて、骨材に砕石を用いた場合は締固めの困難さの影響が生じている。

### 3.5 細孔径分布

図-11にバージン供試体と三軸圧縮試験（側圧が一軸圧縮強度の1/3倍）終了後の供試体の細孔直径と累積細孔容積の関係を内部摩擦角が正と負の場合について示す。この図より負のものは正のものよりも空隙の減少量が大きく、正のものは細孔直径が最大のものから  $1 \times 10^6$  (Å) 付近で、負のものは  $1 \times 10^4$  (Å) あたり

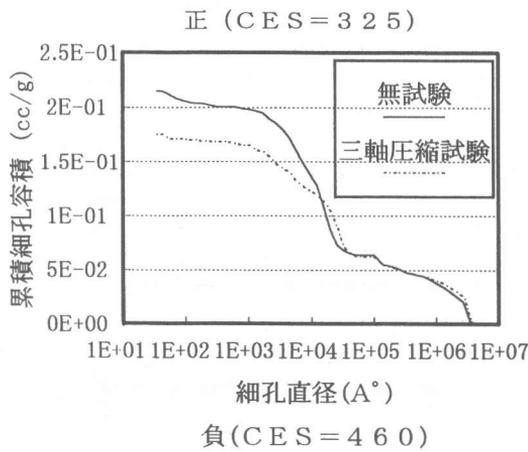
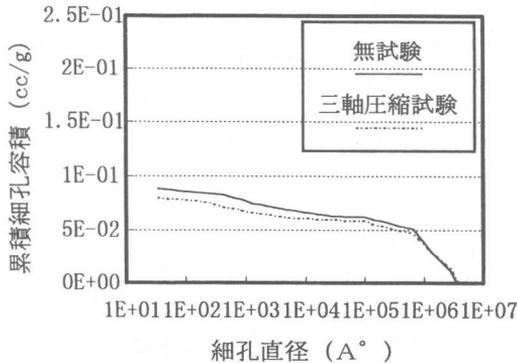


図-11 細孔径分布測定結果

で累積曲線の傾きに変化が見られる。次にセメントモルタルの JIS 試験用標準供試体の細孔径分布を図-12に示す。セメントモルタルは大きな細孔が極端に少なく、小さな細孔が多数存在しているのに対し CA 複合体では大きな細孔が多数存在することが確認できる。このことが内部摩擦角が負となる要因の一つであると思われる。

#### 4. 破壊形態の検証

Uriel romero 等<sup>2)</sup>は Muskhelishvili<sup>3)</sup>の式から材料中の空隙が破壊包絡線の傾きに影響を与えているとしている。図-13の様に空隙を楕円孔と見立て、载荷軸方向壁③、载荷軸直角方向壁④に作用する最大接線応力をそれぞれ  $\sigma_{\theta 3}$ 、 $\sigma_{\theta 4}$  とすると式(1)、(2)で表されるとしている。

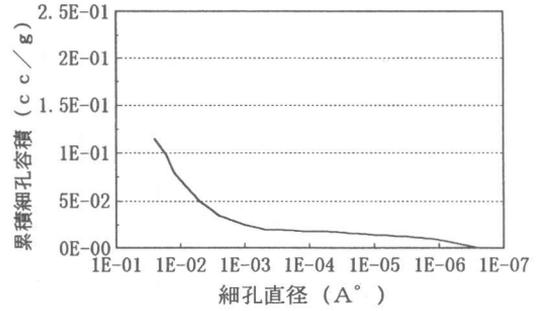


図-12 セメントモルタルの細孔径分布

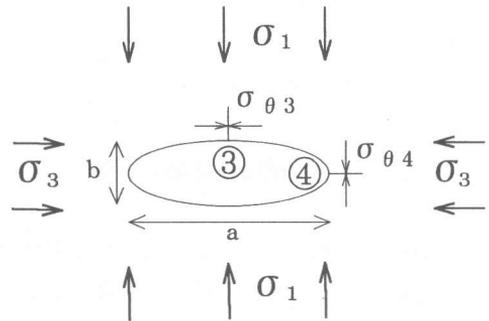


図-13 応力発生分類

$$\sigma_{\theta 3} = (2b/a)\sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta 4} = (2a/b)\sigma_3 + (2a/b+1)(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

楕円孔周辺の引張強度を  $T$ 、圧縮強度を  $K$  とし楕円孔周辺壁が破壊する条件を検討すると3つのパターンが考えられる。

(A) :  $\sigma_{\theta 3} = -T$  で周辺壁③が引張破壊する。

(B) :  $\sigma_{\theta 3} = K$  で周辺壁③が圧縮破壊する。

(C) :  $\sigma_{\theta 4} = K$  で周辺壁④が圧縮破壊する。

これら3つの破壊を破壊包絡線で表すとそれぞれ式(3)、(4)、(5)となる。(図-14参照)

$$\tau = \frac{b/a\sigma + T/2}{\sqrt{2b/a+1}} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{b/a\sigma - K/2}{\sqrt{2b/a+1}} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{-a/b\sigma + K/2}{\sqrt{2a/b+1}} \quad (5)$$

Uriel romero 等は破壊 (A) を脆性破壊、(C)

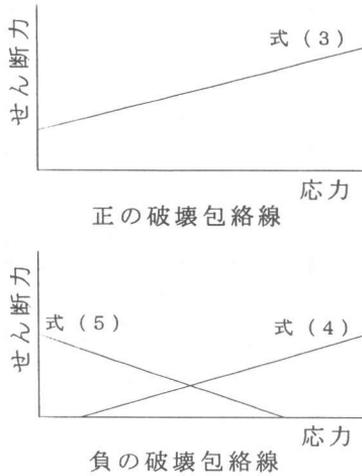


図-14 破壊包絡線の分類

を塑性破壊と定義している。(B)の定義はされていないのでここでは塑性流動破壊と称することにする。以下では一軸圧縮強度以下の側圧では図-8に示した内部摩擦角が負となる配合550についてその破壊形態の検証を行う。まず一軸圧縮強度以下の側圧においては式(5)が適用でき、(C)の塑性破壊であると考えられる。Kは式(5)より、Tは一軸圧縮強度と引張強度の比より  $T=K/10$  として求めた。図-15より実際に、 $\sigma_{\theta 4}$ が先にKに達しているのが確認できる。即ち、楕円孔周辺壁④にて圧縮で破壊している。次に、一軸圧縮強度以上の側圧においては式(4)が適用され、(B)の塑性流動破壊であると考えられる。図-16より、側圧が作用した時点で周辺壁③、④において $\sigma_{\theta 3}$ 、 $\sigma_{\theta 4}$ 共にKを越えている。どちらが先にKに達したかは不明であるがこの場合は③にて圧縮で破壊したと考えられる。

## 5. 結論

- 1) 粘性領域24配合においてポアソン比は0.2以上になる。
- 2) 引張強度及び体積弾性係数はC/Eと正の相関がある。
- 3) 引張強度は一軸強度の4/10~1/10である。

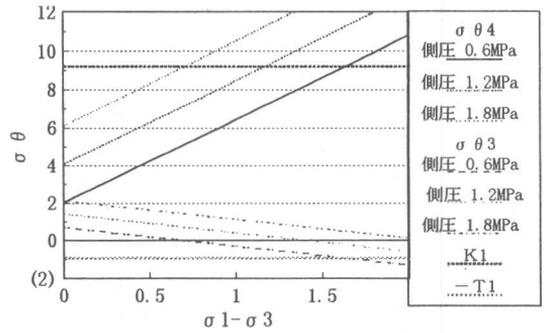


図-15 塑性破壊の検証

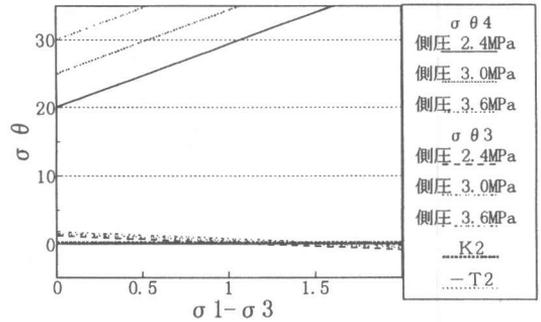


図-16 塑性流動破壊の検証

- 4) 骨材の最大寸法は破壊包絡線の傾きに多少なりとも影響を与える。
- 5) CA複合体の破壊包絡線と破壊形態はMuskhelishviliの式により説明できる。

## 参考文献

- 1) 佐々木慎吾・上田満・浜田純夫・村田秀一：セメントアスファルト乳剤複合体の三軸圧縮試験による実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp. 547-552, 1997
- 2) Uriel Romeo and B. Bravo Gomez : Brittle and Plastic Failure of Rocks, Proceedings of the second Congress of the international Society for Rock Mechanics, pp. 137-144, 1970
- 3) Savin, G. N. : Stress Concentration Around Holes, pergamon press, 1961