

## 天然ゴム材料の破断特性の把握とそのモデル化

吉田純司<sup>1</sup>・杉山俊幸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

<sup>2</sup>正会員 工学博士 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

### 1. はじめに

天然ゴム、高減衰ゴムなどの高分子材料は、積層ゴム支承に代表される免震デバイスの主材料として広く応用されている<sup>1)</sup>。高分子材料を応用した免震デバイスは材料の大ひずみ下における動力学的な性質を積極的に利用していることから、デバイスの力学特性を把握することは、構造物全体の挙動を予測する上で重要な要素となる。特にデバイスが破壊に至ると落橋などの可能性があることから、現在では、実物大の実験ベースによりデバイスの限界性能を把握している<sup>2)</sup>。しかし、実験による方法では手間・コストかかり、また支承の寸法・形状などに大きく依存するという欠点を有している。このことから材料の破断特性を把握・モデル化し、デバイスの破壊を予測することが望まれている。しかし高分子材料一般においてガラスなど脆性的な材料では、破壊に関する研究が行われているものの、延性に富むゴム、プラスチックなどに関してはほとんど検討されていない<sup>3), 4), 5)</sup>。

本研究では、免震デバイスの限界性能を予測するための解析モデルの構築を最終目的とし、その第1段階として多軸変形下におけるゴム材料の破壊現象を精緻に計測するための実験手法を提案し破断特性を把握するとともに、材料の破壊基準を構築することを目的とする。

まず、二軸および単軸引張り変形下での破断を把握するための材料試験片を考案し、それを用いて天然ゴム材料の破断試験を行った。本実験では、試験片のひずみ場を画像計測し破壊時の挙動を精緻に把握している。

次いで得られた実験データを基に、材料の破断を判定するための基準を提案する。本基準は、基準化した主軸伸張比で記述されており、有限要素法などの数値解析に適用可能である。

### 2. 天然ゴムの破断実験

ここでは、免震・制振デバイスに広く利用されている天然ゴムの多軸変形下における破断特性を把握するための実験について述べる。以下では、まず、本実験で用いた装置と、考案した試験片について述べ、次いで実験方法および計測手法について説明する。最後に実験で得られた結果を示し考察を行う。

#### (1) 実験の概要

##### a) 破断の定義

本研究では、文献 5) と同様にして、ゴムの破断を、単調な変形を受けた場合に破壊に至った場合に限定し実験を行った。すなわち、繰り返し載荷により破断に至るものは疲労と考え、本実験では対象としていない。

なお、一般に材料の破壊は、ミクロなレベルでのクラックの進展が原因とされているが、実際にミクロなレベルまでの計測を行うことは極めて困難であり、また実務への適用性が低い。従って本実験では、あくまで材料を連続体として扱い、マクロなレベル（連続体のレベル）での平均的な破断特性の把握を目的とする。

##### b) 試験装置

ここでは、多軸変形を受けるゴム材料の破断特性を把握することを目的とし、図-1 に示す一般二軸引張り試験装置を用いた。この試験装置では、試験片に引張り変形を2方向に独立に与えることができる。載荷は図-1 の  $X_1$  方向に 360mm,  $X_2$  方向に 260mm まで最大 20 [mm/sec] の速度で可能である。

##### c) 試験体

本破壊実験では、設計上の静的せん断弾性係数  $G = 0.98$  [Mpa] を有する、異なる会社で製作された4種類の天然ゴム材料を対象とした。図-2 に実験

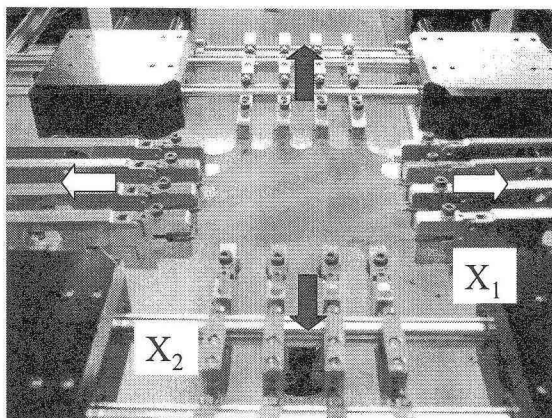


図-1 二軸引張り試験装置

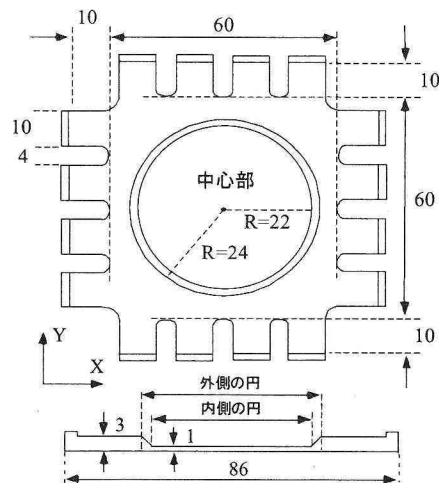


図-2 シート型二軸引張り破断試験用の試験片

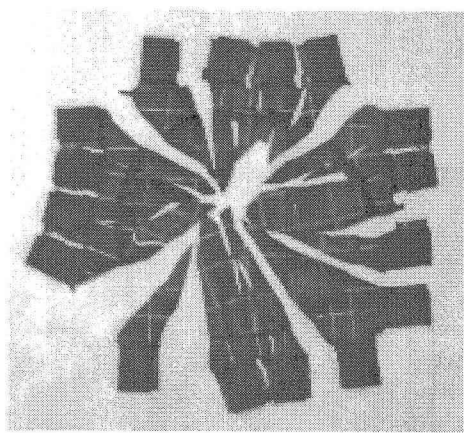


図-3 破断後の二軸引張り試験片の状態

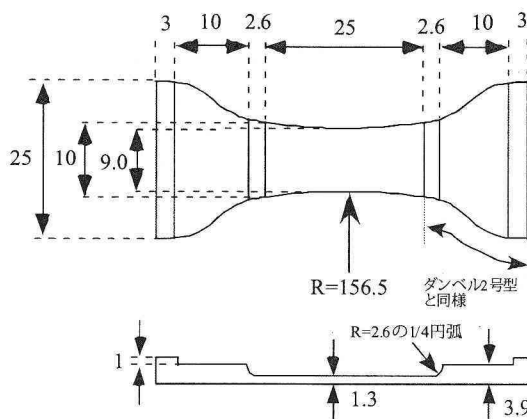


図-4 単軸引張り用試験片

に用いた二軸引張り試験用のシート型試験片を示す。シート型試験片は、試験片のつかみ部とその周辺の厚みが大きく、逆に円形状の中心部においては厚みが小さくなっており、この厚みの変化により破壊に至る際に中心部付近から亀裂が発生するようになる。図-3は、試験片の中心部付近に亀裂が生じそれが周囲に放射状に進展して破壊に至った例である。

一方、単軸引張り試験に用いたダンベル型試験片は、図-4に示すように試験片のつかみ部の厚みが大きくなっており、かつ中心部の幅に僅かではあるがアールをつけている。これによりつかみ部での変形を極力抑え、かつ試験片がダンベルの中心部付近で破断するようになっている。なお、通常のJIS<sup>①</sup>で規定されているダンベル片を用いると、幅が急激に小さくなる中心部の付け根で破壊が発生するという欠点を有している。

#### d) 実験方法

本実験では、ゴムの多様な変形状態での破壊現象を再現するために、均等二軸引張り試験、単軸引張り試験、一軸固定二軸引張り試験を実施した。一軸固定二軸引張り試験では、拘束方向（ $X_2$ 方向）の伸張比を1に拘束する場合と、2あるいは3に拘束する場合の2種類について実験を行った。

また、ひずみ速度の破断に対する影響を把握するため、単軸引張り試験および均等2軸引張り試験については、異なる載荷速度での破断実験を行った。以上の試験条件を表-1にまとめて記す。

#### (2) 画像処理を応用した計測

##### a) 計測装置

上述した材料試験において、試験片は中心部付近に数百%に及ぶ大ひずみを生じ破壊に至る。試験片は、厚さが均一でないことから非一様な変形を示し、変位-荷重関係からでは破断時のひずみや

表-1 材料試験における載荷ケース

| 試験方法        | $X_1$ 方向：伸張比 $\lambda_1$ | $X_2$ 方向：伸張比 $\lambda_2$        | 本文での名称                        |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 均等二軸引張り試験   | 単調な引張り変位を付与              | $X_1$ 方向と同一の引張り変位を付与            | 均等二軸                          |
| 一軸固定二軸引張り試験 | 単調な引張り変位を付与              | 事前に伸張比 2 or 3 に相当する変位を付与し、それを維持 | 一軸固定(伸張比 2)<br>or 一軸固定(伸張比 3) |
| 一軸固定二軸引張り試験 | 単調な引張り変位を付与              | 事前に伸張比 1 に相当する変位を付与し、それを維持      | 一軸固定 (伸張比 1)                  |
| 単軸引張り試験     | 単調な引張り変位を付与              | 自由                              | 単軸                            |

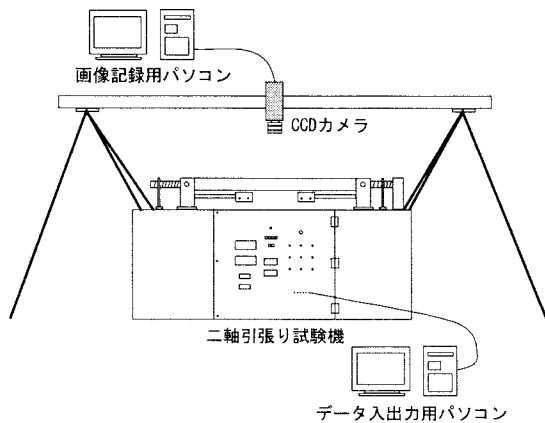


図-5 計測システム全体の概略図

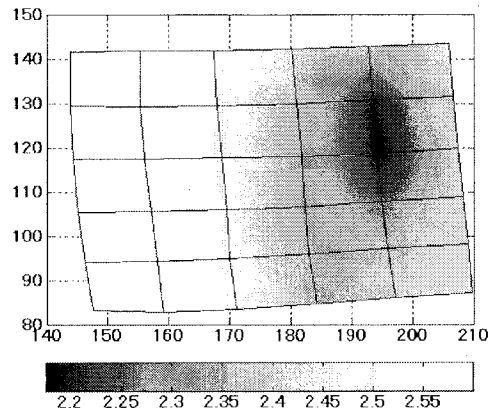


図-6 二軸引張り試験において画像計測より得られたGree-Lagrange ひずみ（引張り方向成分）

応力を近似的に算出することができない。

そこで本研究では、試験片の変位場を精緻に把握するために試験片の変形過程を CCD カメラ（420 万画素、16fps、8bit のグレースケール）により画像記録し、それを画像処理して変位場およびひずみ場を算出した。図-5 に計測装置全体の概略を示す。

#### b) 画像処理手順

画像計測の手法としては、試験片表面（破壊の発生が想定される薄い部分）に格子状に点を描き、各変形レベルにおいて格子点での変位を算出している。具体的には、格子点を 2 値化により抽出し、ラベリング<sup>7)</sup>を実施した後、各点の重心を算出して変位場を得、それを内挿<sup>8)</sup>することで試験片のひずみ場を把握した。

図-6 に画像処理により得られた Green-Lagrange ひずみの引張方向成分を示す。図-6 より、実際の試験片において、ひずみは若干ばらついて分布している。このことから、破壊の判定においては、3. (2)で述べるように画像計測結果を処理し、正確な主軸伸張比を算出している。

#### (3) 実験結果と考察

図-7 に異なる速度で載荷した場合における、破断時の引張り方向の伸張比 ( $\lambda_1$ ) を示す。なお、図-7 を含む本実験結果では、破断時の主軸伸張比は、試験片に最初の亀裂が発生した位置を目視により記録し、その点を含む要素（図-6）の平均値を用いている。図-7 をみるとひずみ速度が大きく異なる場合でも、破断時の伸張比の差は最大で 1 割程度であり、かつひずみ速度の変化に対し一定の傾向はみられない。この性質は、本実験で対象とした他の天然ゴムについても、同様であった。このことから、ここで対象とした天然ゴムについては破断現象の速度に対する依存性は小さいといえる。

次いで、図-8 に各試験において、破断に至った時の引張り方向の伸張比  $\lambda_1$  と拘束方向の伸張比  $\lambda_2$  の関係を示す。図より、 $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の間には明らかな相関がみられるが、これらの傾向は既往の実験結果<sup>5)</sup>とは異なっている。文献 5)では、純ゴム（添加剤を含まない）を対象としており、多軸変形下においてもゴムの破壊は最大となる主軸伸張比の

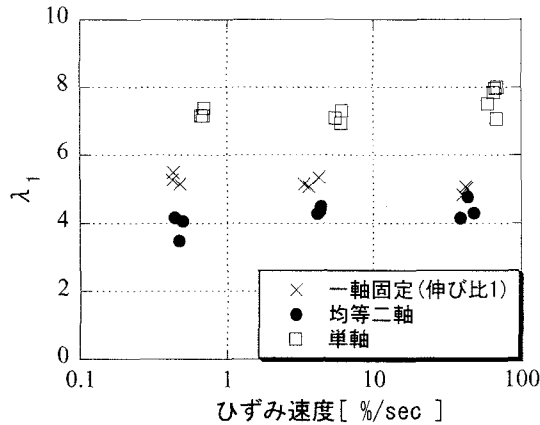


図-7 破壊時のひずみ速度と伸張比 $\lambda_1$ との関係

みに依存することを示している。本実験で対象としたゴム材料は、耐久性や限界伸びを増強させることを目的として加硫時に多くの充填材を用いているためミクロな構造が純ゴムと比較して複雑になっている。既往の研究結果との差異は、このことが原因として現れたものと考えられる。

以上より、本実験で対象とした天然ゴム材料の破壊を、文献5)で提案されている最大伸張比基準により判定することは一部の結果を過大あるいは過小評価することになる。このことから、本実験結果での破壊を説明できる新たな破壊基準の構築が必要となる。

### 3. 天然ゴムの破壊基準の構築

#### (1) モデル化での前提

ここでは上述した実験結果に整合するゴム材料の破壊基準を構築する。まず、前提として天然ゴムの破壊が方向によらず同様に発生する（等方性である）と仮定する。さらに、本文2. (1)で定義したように破壊が過去の履歴等に関係しないものとする。破壊の条件は、等方性の超弾性体と同様に右 Cauchy-Green 変形テンソル  $\mathbf{C}$  の不変量  $I_C$ ,  $II_C$ ,  $III_C$  あるいは主軸伸張比  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  で記述される必要がある<sup>8)</sup>。さらに既往の载荷実験結果から、積層ゴム支承において高圧縮荷重下においても、ゴム層内部で破断に至りにくいことを考慮して、ゴム材料の破断は、実用上体積変形に依存しないものとみなす。

#### (2) 材料試験での主軸伸張比の算出

本研究で行った材料試験では、画像計測を行って

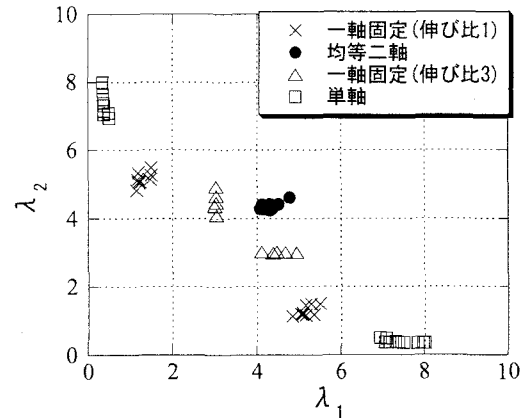


図-8 破断時の主軸伸張比 $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ の関係

いることから、面内の変形分布を把握することができる。ここでは、破壊基準を構築するにあたり、上述した不変量  $I_C$ ,  $II_C$ ,  $III_C$  あるいは主軸伸張比  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  を求めるために、以下のような方法を用いた。

試験片で現れる変形は、概ね平面応力状態とみなすことができることから、右 Cauchy-Green 変形テンソル  $\mathbf{C}$  の成分は以下のように記述できる。

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

このうち、 $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$  は実験での画像計測結果から直接求めることができる。また、本節(1)で述べたように体積変形が大変形時にもほとんどないと考えると、 $\det(\mathbf{C}) \approx 1$  より

$$C_{33} \approx \frac{1}{C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21}} \quad (2)$$

となる。さらに  $\mathbf{C}$  の主軸を基底とする座標系において座標変換を行い、 $\mathbf{C}$  を成分表示すると、

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

となり<sup>8)</sup>、画像計測結果より正確な主軸伸張比  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  を算出できる。

#### (3) 破壊基準

ここでは、主軸伸張比を用いた破壊基準を提案する。式(3)で得られる主軸伸張比  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  において、 $\lambda_1 \geq \lambda_2$ ,  $\lambda_2 \geq \lambda_3$ , すなわち  $\lambda_3$  を最小の主軸伸張比としても一般性を失わない。さらに、

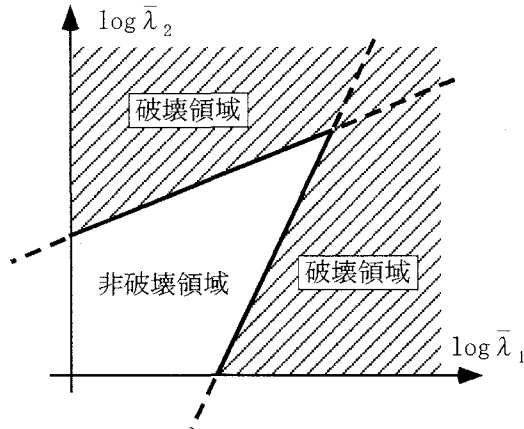


図-9 基準化した主軸伸張比による破断基準の概念図

$\lambda_1, \lambda_2$ を $\lambda_3$ で基準化し,

$$\bar{\lambda}_1 \equiv \lambda_1 / \lambda_3, \quad \bar{\lambda}_2 \equiv \lambda_2 / \lambda_3 \quad (4a,b)$$

のように定義する. ここでは, 上述の $\bar{\lambda}_1$ を横軸,  $\bar{\lambda}_2$ を縦軸にとった座標平面において, 次式で示す2つの曲線と座標軸に囲まれた領域の外側を破壊と判断する基準を提案する. すなわち, 天然ゴムが破壊する条件は,  $\bar{\lambda}_1 > 0, \bar{\lambda}_2 > 0$ の条件下で

$$\bar{\lambda}_1 - A \cdot \bar{\lambda}_2^B \geq 0 \text{ or } \bar{\lambda}_2 - A \cdot \bar{\lambda}_1^B \leq 0 \quad (5)$$

となる. ただし,  $A, B$ はゴムの種類により決定される材料定数である. 上式は,  $\bar{\lambda}_1$ と $\bar{\lambda}_2$  ( $\lambda_1$ と $\lambda_2$ )の大きさに順番を付けていないことから,  $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_2$ について対称な領域である. さらに, 式(5)の境界となる曲線を $\log \bar{\lambda}_1$ を横軸,  $\log \bar{\lambda}_2$ を縦軸とする両対数平面で記述すると,

$$\log \bar{\lambda}_1 = B \log \bar{\lambda}_2 + \log A \quad (6a)$$

$$\log \bar{\lambda}_2 = B \log \bar{\lambda}_1 + \log A \quad (6b)$$

のような $\log \bar{\lambda}_1 = \log \bar{\lambda}_2$ について対称な2つの直線となる. 以上の議論より式(5)で示される基準において破壊が発生する領域は, 両対数の $\bar{\lambda}_1 - \bar{\lambda}_1$ 平面でみると, 図-9で示すように2直線と座標軸で囲まれる閉領域の外側として記述できる.

図-10に材料試験結果と, 式(5)で示される破壊基準との比較の一例を示す. 図-10の場合は,  $A = 3.0 \times 10^{-3}, B = 2.4$ であり, 他の天然ゴムについても同様の結果が得られている. 図-10をみると, 対象とした天然ゴム材料の実験においては, いずれの変形からの破壊も本基準により判定できることがわかる.

今後は, 高減衰ゴムおよび合成ゴムについても材

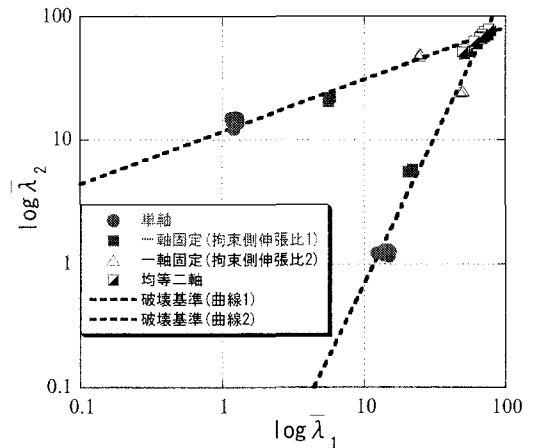


図-10 材料試験結果と破壊基準の比較

料実験を実施し, その結果から破壊基準を構築するとともに, 支承レベルでの破壊実験結果と, 本基準を有限要素法に取り入れた場合の解析結果との比較を行い, 両者の整合性についても検討していくつもりである.

#### 4. まとめ

本研究では, 免震・制振デバイスに広く応用されている天然ゴム材料を対象として, 破断実験を実施し, 破壊基準の構築を目的とした. 得られた主たる知見を以下に示す.

- 1) ゴムの単軸および二軸引張り試験において, 材料の破壊を把握することに適した材料試験体を提案した. 本試験体を用いることにより, 変形が概ね一様となる場所において破壊を発生させることが可能となった.
- 2) 対象とした天然ゴムの破壊は, ひずみ速度に対する感度が低く, ひずみ速度依存性は微小であることがわかった.
- 3) 既往の研究において提案されている最大伸張比基準は, 対象とした天然ゴムの実験結果を一部説明できないことがわかった.
- 4) 主軸伸張比を用いた破壊基準を提案した. 本基準は, 対象とした天然ゴムの材料試験での破壊を説明でき, かつFEMなどにも適用可能な汎用的なものである.

謝辞: ゴムの材料試験に用いた試験体の設計・製作にあたっては, ゴム支承協会にご協力頂きました. ここに記して謝意を表します.

## 参考文献

- 1) R.I.スキナー, W.H.ロビンソン, G.H.マックベリー著, 川島一彦, 北川良和監訳: 免震設計入門, 鹿島出版会, 1996.
- 2) 鵜野禎史, 森重行雄, 今井隆, 竹之内勇: 天然ゴム系支承のせん断変形性能, 第2回免震・制振コロキウム講演論文集, pp.143-148, 2000.
- 3) Kausch, H.H.: *Polymer fracture*; 2<sup>nd</sup> revised ed, Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, Germany, 1987.
- 4) 吉田純司, 阿部雅人, Lewangamage C.S., 藤野陽三: 画像解析を応用したゴム材料の破断特性の把握とモデル化, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.135-146, 2003.
- 5) 川端季雄: ゴムの大変形と破壊, 高分子, Vol.42, pp.394-398, 1993.
- 6) 日本工業標準調査会: 加硫ゴム物理試験方法, JIS -K-6301, 1983.
- 7) 井上誠喜, 八木伸行, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人: C言語で学ぶ実践画像処理, オーム社, 1999.
- 8) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.