

# 風洞壁面上の単一孔を通過する流れに関する研究

石橋孝介, 香山寛人 (名大・院), 森浩一, 中村佳朗 (名大・工)

## Experimental Investigation of Flow through a Hole on a Wind Tunnel Wall

by

Kosuke Ishibashi, Hiroto Koyama, Koichi Mori, Yoshiaki Nakamura (Nagoya Univ.)

### ABSTRACT

Although the flow rate through many holes on a transonic wind tunnel wall is very small, this flow makes a significant influence on the wind tunnel test results. However there are less data which show the relationship between the flow rate and the differential pressure through holes at this flow conditions. In this study, the relationship between the flow rate and the differential pressure through a hole on a transonic wind tunnel wall is experimentally investigated. In the case that the flow rate and the differential pressure are very small, the results show that their relationship is linear. Furthermore the slope of the line measures up to the results of CFD.

### ■ 1. はじめに

風洞を用いた航空機の空力計測において, その精度要求は巡航状態において $\pm 1\%$ 以下と非常に高いものとなっている. しかし風洞実験においてはその壁の影響, 支持の影響は無視できず, 風洞試験結果はそれらの各種影響補正法の影響を強く受けるためその高精度化が求められている. そこでテストセクション部を多孔壁にして風洞壁の影響を少なくするような風洞設備を作っている. 風洞を対象とした壁・支持干渉の現象解析, また補正法の妥当性の検証のため, 壁・支持を含めた風洞全体の CFD 解析が行われ実験結果との比較, 検証が行われている.

とくに遷音速風洞では風洞内とプレナム室の圧力差が小さく, 一様流に対して, 多孔壁を出入りする流れが小さく, 風洞内を出入りする流れを再現するときには高い実験の精度が求められる. NASA などでも壁干渉の補正法のためにこのような実験を行っているが, 実験している圧力などが大きく, 遷音速風洞で想定される圧力差での領域の差圧と風洞壁に設けられた多孔壁を出入りするような流量の関係を導くような実験データが少ない.

日本では JAXA などでは遷音速風洞の多孔壁部を設計するために数値流体力学を利用して多孔壁を出入りす

る流れのシミュレーションを行っているが, 実験でこの現象を検証しているデータはない.

### ■ 2. 実験方法

#### 2. 1 実験装置

本研究では, 名古屋大学の遷音速風洞(第1図)を使用した. 風洞の通風条件は $M_\infty=0.75$ ,  $P_0=1.0 \times 10^2$  [kPa],  $P_\infty=70$  [kPa],  $T_0=288$  [K]である. また, 単位長さあたりのレイノルズ数は,  $Re=1.7 \times 10^7$  である.

実験項目は, 1) オイルフロー法による流れ場の可視化, 2) 微差圧センサによる風洞内とプレナム室の差圧測定, 3) 単一孔上の境界層厚さの測定である.



図 1 名古屋大学 遷音速風洞

## 2.2 実験模型

遷音速風洞内に単一孔を設けた平板（第 2(a), (b) 図），風洞の外にプレナムチャンバー（第 3 図）を設置し，それぞれ風洞壁とプレナム室を模擬した．平板を遷音速風洞の壁から支柱を中空の支柱を用いて，50[mm]離れたところに設置した(第 4 図)．これは風洞内の壁面境界層の影響を避けるためである．

また平板のエッジにあたる流れの剥離を少なくするために，平板の流れに当たる面は斜めにカットしてある．

プレナムチャンバーの大きさは流量計からチャンバー内に流れ込んだ流れが単一孔へ流れる前に十分に拡散する大きさにした．

平板上の単一孔は平板の中央に垂直に開いており，実験模型を組み立てたとき単一孔は直径 12[mm]，深さ 12[mm]となる．

空気の漏れをなくすために平板と支柱，風洞壁面とチャンバー，チャンバーとチャンバーのふたの間にはそれぞれ O リングが使われている．

## 2.3 実験方法

第 5 図に実験の概略を示す．本研究では，第 5(a)図に示すように，流量計を用いて流量を制御し，その時の圧力差を測定した．圧力差は風洞内に設置した静圧管を用いて測定した風洞内の一様流静圧とプレナムチャンバー内の静圧の差圧を差圧計を用いて測定した．第 5(b)図は流れが風洞に流入する流入実験を，第 5(c)図は流れが風洞から流出する流出実験をそれぞれ示す．

流入実験では流量計の片端を大気圧に開放させ，風洞内と大気圧の差圧を利用してチャンバー内から風洞内に流れを発生させる．また，流入実験では流量計の片端を真空チャンバーに接続し，真空チャンバーと風洞内の圧力差を利用して，風洞内からチャンバー内に流れを発生させている．

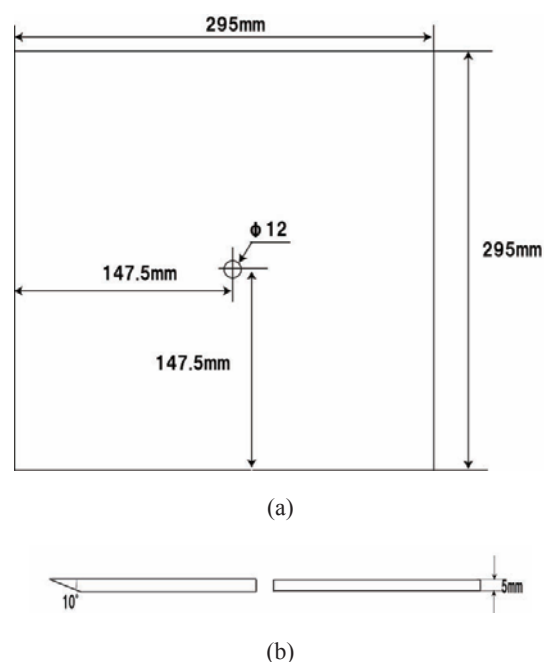


図 2 平板模式図

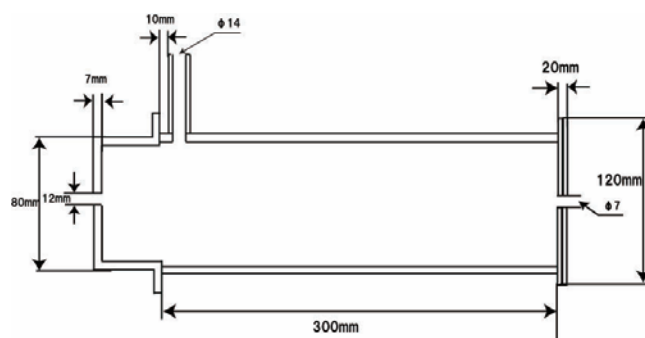


図 3 プレナムチャンバー模式図

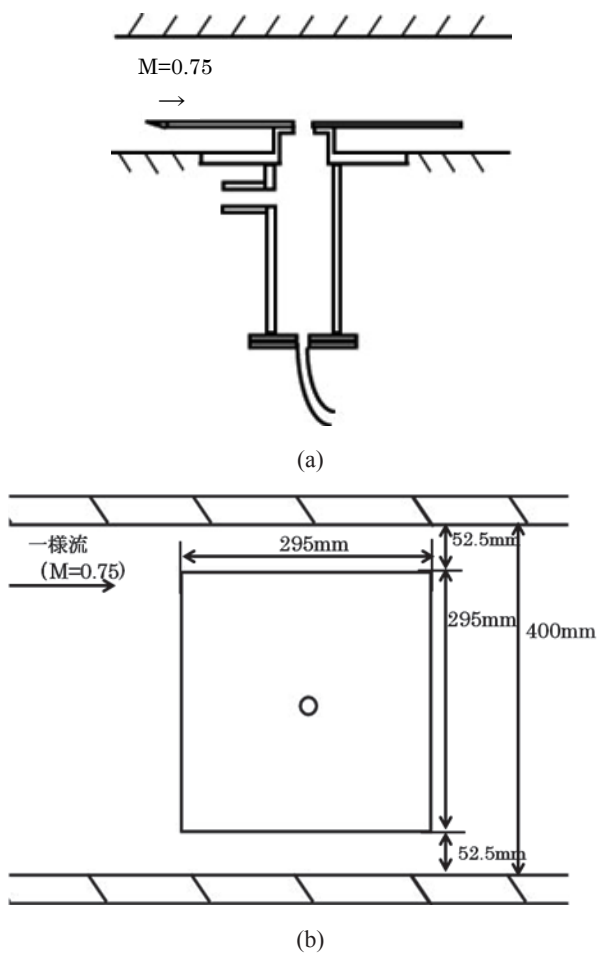


図 4 実験模型テストセクション設置図

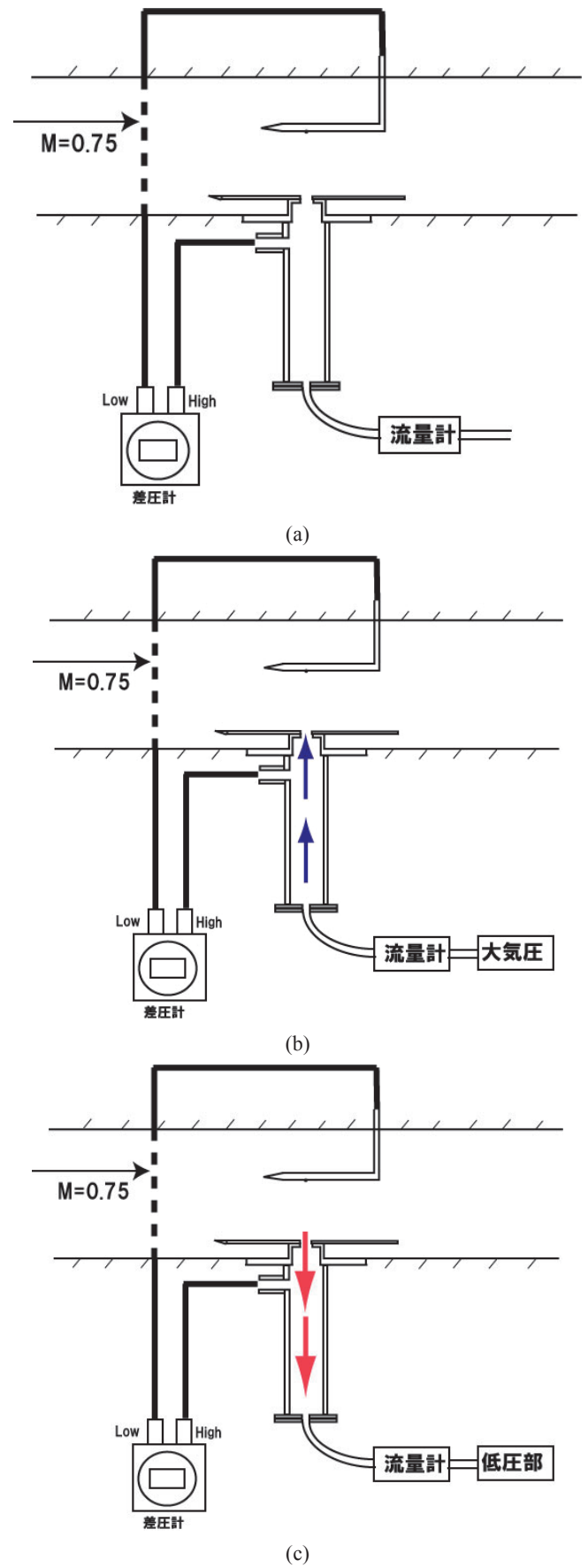


図 5 差圧測定システム

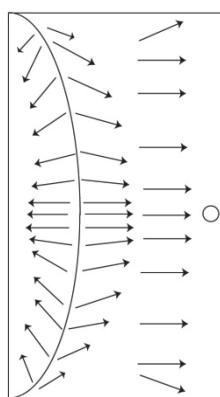
### ■ 3 結果・考察

#### 3.1 平板上の流れ場

第6(a)図にオイルフロー法による平板前縁の流れ場の可視化した画像、第6(b)図に平板前縁の流れ場の概要を示す。平板前縁付近に渦が発生している。この渦が単一孔上の境界層を厚くしていると考えられる。今後、渦を抑制し、境界層の厚さを変化させることが課題の1つである。



(a)



(b)

図6 平板前縁流れ図

#### 3.2 静圧管

今回の実験で用いた静圧管上の圧力分布は図9で示している。静圧管上の圧力孔は管の先端から70[mm]のところに開いている。図7から先端から70[mm]の位置では圧力が一定になっているので、静圧管上の圧力分布の影響は小さいと考えられる。静圧管上の圧力分布は、静圧管の先端付近では先端の形状により、流れが加速され圧力が低くなり、支柱の近くでは、支柱により流れがせき止められ圧力が上昇する。

今回の実験でも差圧を測定するときに使用した静圧孔よりも前縁に近いところでは、圧力が低くなっている。しかし静圧管の支柱付近の圧力も低くなっている。これは圧力を測定

する孔が支柱が流れをせき止める面とは逆の面にあいているために、流れが角の部分で加速し、支柱付近の圧力も低くなってしまったと考えられる。

差圧を測定した圧力孔付近は圧力が一定となっているので、静圧管の圧力分布による差圧測定への影響は小さいと考えられる。

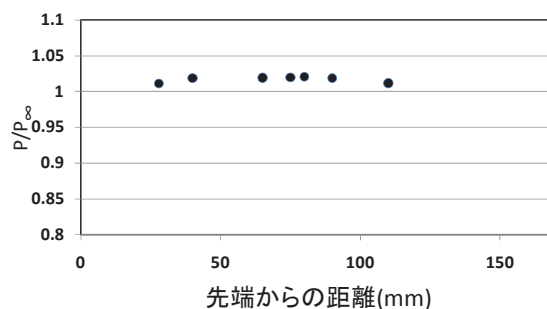


図7 静圧管上圧力分布

#### 3.3 単一孔上の境界層

単一孔上の境界層の速度分布の結果を第8図に表す。

今回の実験での単一孔上の境界層厚さは20[mm]となった。理論値から単一孔上の乱流境界層厚さを求めると3[mm]であるので大きな境界層が単一孔上で発生していることが分かる。これは平板前縁で発生している前縁剥離渦の影響が強く出ていると考えられる。

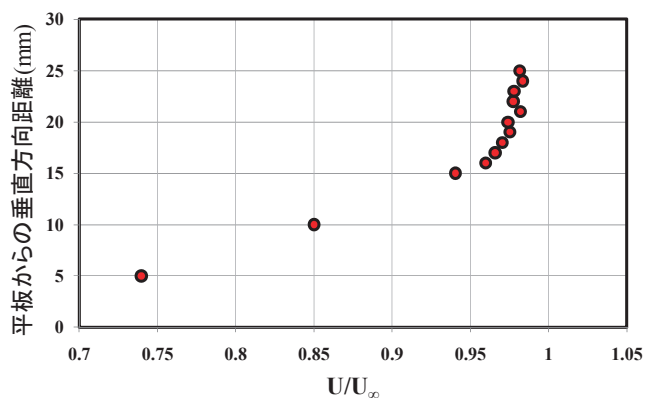


図8 単一孔上境界層速度分布

#### 3.4 差圧測定結果

$$\Delta p = \frac{P_1 - P_2}{1/2 \gamma M_\infty^2 P_\infty} \cdots \text{式(1)}$$

$$m' = \frac{m}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \cdots \text{式(2)}$$

図 9 に実験結果, CFD 解析結果<sup>2)</sup>によって示されたそれぞれの流量と差圧の関係を示す。

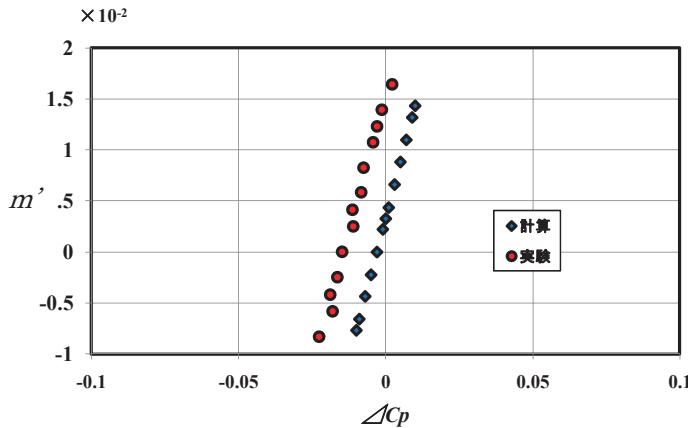


図 9 実験結果

グラフの横軸 $\Delta C_p$ は、式(1)によって無次元化した風洞内の一様流静圧とプレナム室内の静圧の差圧を風洞内の一様流静圧で無次元化した量を示す。 $P_{\infty}$ は風洞内の一様流の静圧、 $P_2$ はプレナムチャンバー内の静圧を示す。 $\gamma$ :比熱比、 $M_{\infty}$ :一様流マッハ数。縦軸は式(2)によって単一孔を通過する質量流量を一様流の質量流量を用いて無次元化した値である。式(2)の $m$ は単一孔を通過する質量流量を表し、 $\rho_{\infty} U_{\infty}$ は一様流の質量流量を表す。また、 $\Delta C_p > 0$ は風洞内の一様流静圧に対して、プレナム室内の静圧が低い場合、 $\Delta C_p < 0$ はその逆の場合である。 $m' > 0$ は流出、 $m' < 0$ は流入である。

第 9 図の横軸からわかるように、差圧の測定範囲は、一様流静圧の 3% 以下、すなわち 2.0[kPa] 以下と非常に小さい。そして、その範囲において、流出時、流入時とも流量と差圧の関係は線形を示す。さらに、その傾きと原点が流出時、流入時とも等しく、1 つの直線上にプロットが存在する。

第 9 図の実験値と計算値を比較すると、絶対値には、ずれがあるが、その傾きはよく合うことがわかる。その値は、実験結果による傾きが 1.05 で、計算結果による傾きが 1.10 である。さらに、実験、計算とも差圧がゼロで流出していることもわかる。計算値とのずれ $\Delta C_p = 0.014$  すなわち 1.0[kPa] は、風洞内静圧の分布が大きな原因であると考えられる。

以下に実験から得られた結果から単一孔を通過する流量と差圧に関して考察する。

### 3.5 単一孔内部の流れ

南部氏ら<sup>2)</sup>の数値解析を参照し単一孔周りの流れ場を考察する。単一孔周りの流れ場の模式図を図 10(a), 10(b) に示す。

図 10(a)は単一孔を通してチャンバー→風洞に流れが発生している模式図、図 10(b)は単一孔を通して風洞→チャンバーに流れが発生している模式図である。

図 10(a)から流れがチャンバー→風洞の方向に発生しているときは単一孔全体から流れが発生していないことが分かる。また、図 10(b)から流れが風洞→チャンバーの方向に発生しているときは単一孔の淵に当たった剪断層によってチャンバー内に流れ込む流れが発生している。

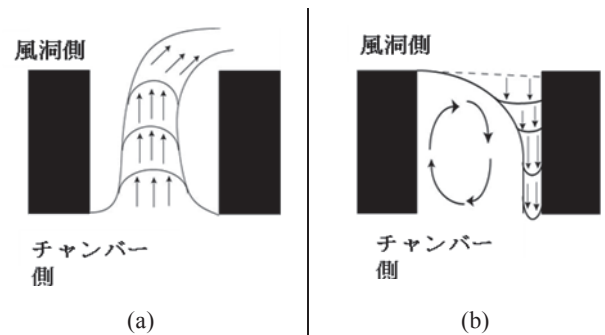


図 10 単一孔内部流れ

$\Delta C_p > 0$ ,  $m' > 0$  の領域。この場合は風洞内の圧力がチャンバー内の圧力よりも高く、風洞内からチャンバー内に流れ出る流れの時である。

風洞内の圧力がチャンバー内の圧力よりも高いので、圧力差によって風洞内からチャンバー内に流れ出る流れが発生していると考えられる。

$\Delta C_p < 0$ ,  $m' > 0$ 。この場合は風洞内の圧力がチャンバー内の圧力よりも低く、風洞内からチャンバー内に流れ出る流れの時である。

風洞側の単一孔上で発生した剪断層が単一孔の側面に当たってチャンバー内に流れ込む流れが発生する(第 10(b)図)。風洞内とチャンバー内の圧力差が小さいので、圧力が高いチャンバー内から風洞内に流れ込む流れも小さくなっている。この時、単一孔を出入りする流れを考えると、風洞内に流れ

込む流れよりも風洞内から出ていく流れの方が大きくなっているために、全体的に見ると風洞内からチャンバー内に流れ出る流れが発生したと考えられる。

$\angle C_p < 0$ ,  $m' < 0$  の領域. この場合風洞内の圧力がチャンバー内の圧力よりも低く、風洞内へチャンバー内から流れ込む流れの時である。

風洞内の圧力がチャンバー内の圧力よりも低いので、圧力差でチャンバー内から風洞内に流れ込む流れが発生していると考えられる。

$\angle C_p = 0$  の点,  $m' = 0$  の点を考える. 今回の実験で差圧と流量の関係から得られたグラフは原点を通らない. この現象は計算結果も同じである。

$m' = 0$ , つまり流量が 0 の時,  $\angle C_p < 0$  となっていて風洞内の圧力がチャンバー内の圧力よりも低くなっている. チャンバー内の圧力が大きいと風洞側に流れ込む流れが発生する. また同時に風洞側の単一孔の上では剪断層が発生し、単一孔の側面に剪断層が当たりチャンバー内への流れ出す流れが発生する. この時、チャンバーから風洞側に流れ込む流れと風洞側からチャンバーに流れ出る流れが釣り合い単一孔を通過する流量が 0 となる。

また  $\angle C_p = 0$ , つまりチャンバー内の圧力と風洞内の圧力が等しい時,  $m' > 0$  となっていて風洞内からチャンバー内に流れ出る流れが発生している. ここでは圧力差がないので圧力差による流れが発生しているのではなく、風洞側からチャンバー内への剪断層が流れ出る流れがありチャンバー内の圧力が上昇する. しかしチャンバー内の空気は真空ポンプによって吸われ続け、チャンバー内の圧力は小さくならうとする. その時に風洞内からチャンバー内に流れ出ることによるチャンバー内の圧力上昇と、チャンバー内から真空ポンプに吸われる流れによる圧力降下が釣り合い、チャンバー内の圧力と風洞内の圧力が等しくなるという現象が起きていると考えられる。

#### 4. 結論

実験では、遷音速風洞を用いて  $M_\infty = 0.75$  の一様流の静圧とブレンナムチャンバー内静圧との差圧と風洞壁面上の単一孔を通過する流量の関係を実験的に調べた. 今回の実験で風洞実験における空力測定精度を向上させるために重要となるデータが得られた。

実験から得られたグラフの傾きは計算結果とほぼ等しくなった。

以下に、その結果をまとめる。

- 平板の前縁では剥離渦が発生しており、それに伴い単一孔上の乱流境界層厚さは 20 [mm]。理論式からは厚さは 3[mm] である。
- 単一孔を通してチャンバー→風洞、風洞→チャンバーの 2 つの異なる流れ場であるが、グラフは線形となる。
- 実験結果による傾きは、計算結果による傾きとよく合う。
- 剪断層の流れ込みにより差圧がない時でも単一孔を通して流れが発生している。
- 平板前縁の渦を抑制し、境界層の厚さを変化させることが今後の課題である。

#### ■ 参考文献

- (1) John S, Dennard, "A TRANSONIC INVESTIGATION OF THE MASS-FLOW AND PRESSURE RECOVERY CHARACTERISTICS OF SEVERAL TYPE OF AUXILIARY AIR INLETS", 1957
- (2) "風洞多孔壁モデル化のための単独孔流れの解析"  
南部太介(早大理工), 橋本敦(JAXA), 青山剛史(JAXA), 佐藤哲也(早大理工)  
H9-3, 第 23 回数値流体力学シンポジウム 2009 年 12 月 16-18 日 仙台市民会館
- (3) 谷 一郎, 小橋 安二郎, 佐藤 浩 "流体力学実験法"  
岩波書店, 1977