

境界層内に置かれた三角柱に作用する流体力

加藤榮二*、立川 力*

(昭和59年9月5日受理)

Fluid Force on a Triangular Cylinder in a Boundary Layer

KATO Eizi* and TATIKAWA Tutomu*

Abstract— The object of this report has been to study the separation of a car wiper from the front glass running at a car speed above 140km/h. The body used as the wiper model was two-dimensional triangular cylinder and set up in the boundary layer on the flat plate modeled on the front glass of a car.

The effects of Reynolds number and the space between the body and plate on the force acting on the body have been determined using a wind tunnel balance and by measuring a pressure around the body with a manometer in the Reynolds number range 1.9×10^4 to 7.0×10^4 .

The drag and lift on the body increased with increasing space between the body and plate. The increment of the lift are attributed to the pressure rise in the model front surface and the pressure reduction in the upper surface. The drag increased, however, the lift kept constant with rising in Reynolds number. The resultant force made a counterclockwise angle of around 16.7° from the direction of the flow.

1. 緒 言

境界層内に置かれた物体のまわりの流れは、日常よく見うけられる。例えば、地上風も大規模な境界層なので、地上の物体は境界層内に存在しているとも言える。また、小規模な境界層に関するものとして、自動車速度に制限のない欧州で高速走行時におけるワイパーの浮き上がりの問題がある。これは、車速が140km/hを越えるとワイパーに作用する流体力のためにワイパーが風防ガラス面から離れてしまい、面の拭き取りが十分に行われず運転に必要な視界を確保できなくなる現象である。

^(1~3) 一様流中に置かれた角を持つ物体に関する研究報告は多いが、境界層内に置かれた場合についてのものは少ない。^(4~6) そこで、本研究ではワイパーを三角柱で、風防ガラス面を平板でモデル化し、三角柱まわりの流れを測定することによって物体に作用する流体力を調べた。この方面の報告が^(4,5,7)少ない現状なので、本研究は実際問題への応用に対して基礎的資料を提供するものと考えられる。

2. 主な記号

a, b, c : 三角柱の斜面(前面)長, 底面(上面)長, 斜面(後面)長

C_D, C_L, C_p : 抗力・揚力・圧力係数 $(D/\frac{\rho U^2}{2} h, L/\frac{\rho U^2}{2} h, (p-p_0)/\frac{\rho U^2}{2})$

D : 抗 力

F : 合 力 $(\sqrt{D^2+L^2})$

h : 三角柱の高さ

L, Lm : 揚力, 運動量の変化による揚力

p, p₀ : 任意の点における圧力, 基準圧力

Q, Q' : 三角柱内の通路を流れる流量

Re : レイノルズ数 (Uh/ν)

s : 平板と三角柱の頂点との距離

U : 主流の速度

u, u' : 任意点における x 方向の速度, 変動速度

$\sqrt{u'^2}/U$: x 方向の乱れ強さ

v, v' : 三角柱内の通路における速度

*茨城大学工学部機械工学科(日立市中成沢町)

x, y, z : 平板の前縁から平板中心線上600mm下流の点を原点とし、流れ方向をx軸とする右手系の座標

x_1, x_2, x_3 : 三角柱の各頂点を原点とする前面、上面、後面の座標

θ : 三角柱の頂角

ν, ρ : 流体の動粘性係数, 密度

τ : 三角柱の上面に作用する摩擦応力

φ : 三角柱に作用する合力が流れ方向となす角度

能となっている。

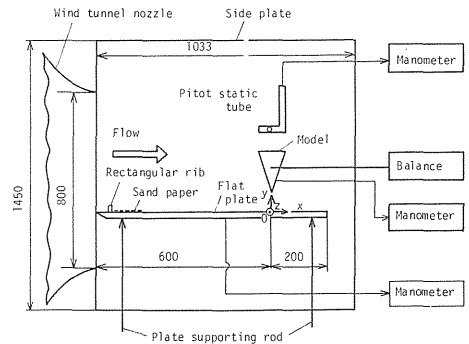


Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

Fig. 1 に装置および測定部の座標系を示す。風胴は、1971年3月に茨城大学工学部に設置された多目的風胴（吐出口：800×800mm，風速：4.8～47.7m/s）を使用した。座標系は、風胴吐出口から600mm下流の平板中心を原点とし、流れ方向にx軸をとる右手系である。

発達した乱流境界層を作る平板は、アルミニウム製（長さ×幅×厚さ＝800×800×6mm）で、前縁を鋭角とし風胴吐出口に接触してあり、平板下方から三点(x, y, z)＝(−550, −6, 0mm), (150, −6, 375mm), (150, −6, −375mm)を、尖頭としたボルト先端で支持され、水平を保ったままy方向へ移動することが可

平板には、境界層が十分に成長するのに必要な長さが無いので、境界層の乱流への遷移を早める乱流促進体として、前縁より20mm下流($x=−580$ mm)の表面に黄銅製の角柱（高さ×長さ×幅＝12×6×800mm）をz方向に付着し、さらに角柱直後から下流74mmの範囲にわたって40メッシュのサンドペーパーを取り付けた。また、平板の中心線上には直径0.7mmの圧力測定孔が流れ方向に21個設けてある。

測定部の周囲の影響が境界層に及ばないように、風胴吐出口の両側面(x−y面に平行)に透明アクリル樹脂板(高さ×長さ×厚さ＝1450×1033×10mm)を配置した。

物体は、Fig. 2 に示すように高さ $h=32$ 、底辺 b

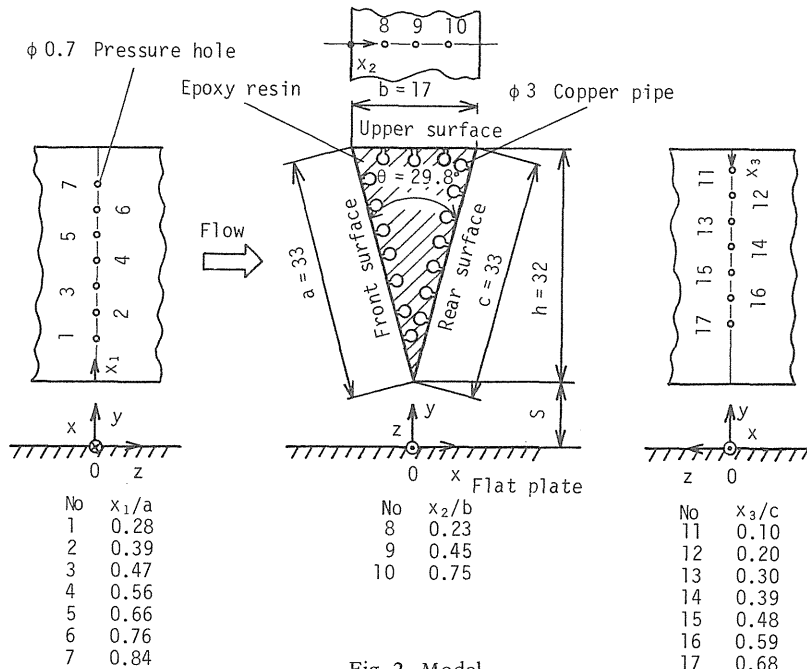


Fig. 2 Model

$= 1.7$, 斜辺 $a = c = 3.3$ mm, 頂角 $\theta = 29.8^\circ$ の二等辺三角形断面を有するエポキシ樹脂製の三角柱である。この物体を境界層内の座標軸の原点に, 流れと直交するように平板の幅一杯に置いた。物体の上流側斜面, 底面, 下流側斜面をそれぞれ前面, 上面, 後面と呼ぶ。これら 3 面には, 面に直角に 17 個の圧力測定孔 (No.1 ~ 17, 直径 0.7 mm) がそれぞれ $z = 0, \pm 195, \pm 390$ mm の計 5 断面に設けられた。表面上の圧力は, 三角柱内に埋め込まれている 17 本の銅管 (外径 3 mm) から取り出す。

3.2 実験方法

まず, 主流速度 U を座標系の原点上方 240 mm に設定されたピトー静圧管 (直径 4 mm) と傾斜微圧計 (精度: 0.01 mmH₂O, 測定範囲: 300 mmH₂O) によって調整する。

次に, 物体のない状態における主流および境界層の速度分布 u/U , 乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ について, $x = -320, -240, \pm 160, \pm 80, 0$ の 7 断面で I 形熱線プローブ (熱線の直径・長さ: $5 \times 10^{-3}, 1.0$ mm, 応答周波数: 50 kHz, 測定気流速度: 0 ~ 200 m/s) を移動装置 (精度: 0.1 mm) に取り付け, y 方向に 5 ~ 10 mm 間隔で移動し, 熱線流速計 (メータ精度: $\pm 2\%$ FS, 応答周波数: 50 kHz) により測定した。

また, 流れの二次元性を確認するために, $x = 0$ 上の ($y - z$) 面内で $y = h/2 = 16$ mm, $y = 6h = 192$ mm の高さにおける z 方向の流れ場を同様にして調べる。

実験のレイノルズ数 Re は, 実際の状態をカバーするように選定した。一般に, ワイパーの風防ガラス面からの浮き上がりを引き起こす車速は 140 km/h 以上と言われている。この車速およびワイパーの高さをそれぞれ代表速度・寸法とすれば, 問題となる Re は 2.2×10^4 以上と考えられる。そこで, 本研究では主流速度 U および三角柱の高さ h を代表量とする Re を $1.9 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$ の範囲とした。

物体に作用する揚・抗力の測定は, 物体を風洞天秤 (精度: 0.5% FS, 揚・抗力測定範囲: $\pm 2 \sim \pm 10$ kgf) に装備し, 流れを所定の Re とした後に平板を水平に保った状態で y の負方向に移動し, 物体と平板間の隙間 s を $s/h = 0.031 \sim 10$ の範囲で変えて行く。

物体表面や平板上の圧力 p は, U を調整するために原点の上方に設置されているピトー静圧管の静圧 p_0 を基準とし, 物体上の 17 点および平板上の 21 点についてゲッチング形マノメータ (精度: 0.05 mmH₂O) で調

べた。

4. 結果および考察

4.1 測定部の流れ場

物体が位置する原点における境界層の厚さは, 実験のレイノルズ数 Re を通して 60 ~ 85 mm であった。原点における境界層の Re は, 前縁からの距離を代表寸法とすれば 7.1×10^5 なので, この境界層は一般には遷移領域か又は乱流である⁽⁸⁾。しかし, ここでは境界層の乱流遷移への促進体として角柱やサンドペーパーが使われているため, 境界層は乱流になっていると考えられる。このことは Fig. 3 において, u/U が乱流速度分布の $1/7$ 乗則と良く一致している事実からも確認できた。

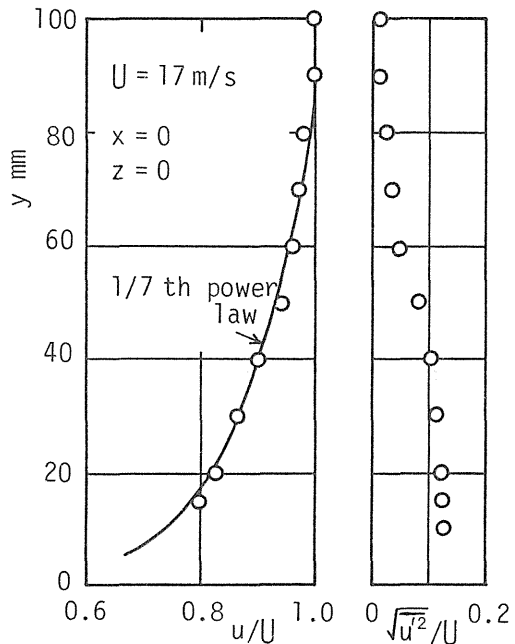


Fig. 3 Flow field in the direction of y-axis.

測定部の速度・乱れ分布 $u/U, \sqrt{u'^2}/U$ は Fig. 4 のとおり良好な二次元性を有する。

平板上の圧力 $C_p = (p - p_0) / (\rho U^2 / 2)$ は, Fig. 5 で示されるように流れ方向に一定であった。

4.2 揚力および抗力

Fig. 6 に揚力 L , 抗力 D を無次元化した揚力・抗力係数 C_L, C_D を表わす。 C_L, C_D は物体と平板との距離 s/h とともに増加した。したがって, ひとつは物体

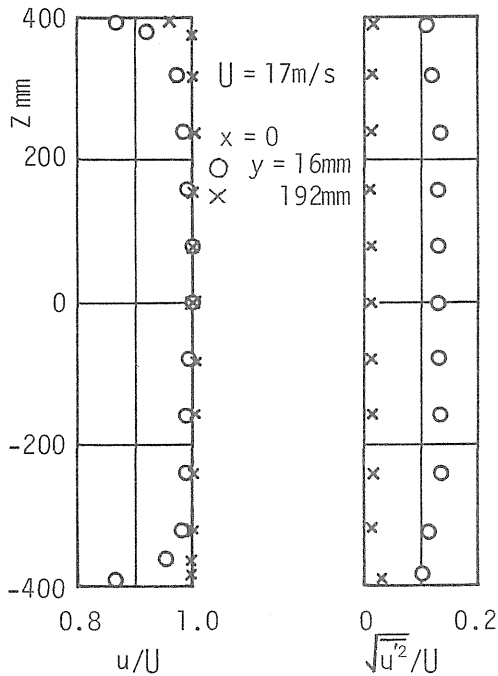


Fig. 4 Flow field in the direction of z-axis.

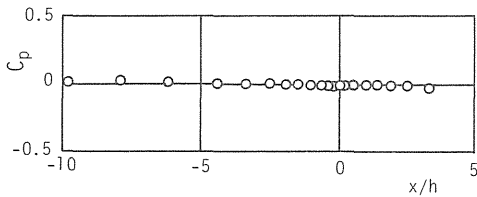


Fig. 5 Pressure distribution on the flat plate.

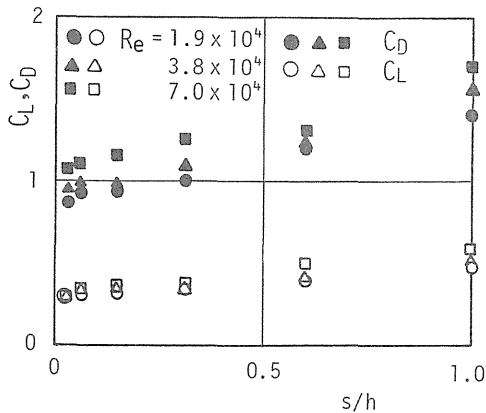


Fig. 6 Lift and drag.

が平板から離れると、この間隔をより増大する方向に揚力が作用する。 C_D は Re の大きなものほど著しいが、 C_L は Re にはほとんど影響されず各 s/h について一定値をとった。

揚抗比 C_L/C_D は、Fig. 7に見られるように Re による差は小さく、また s/h に対してもほとんど一定であり、0.3前後の値をとる。このことから、Fig. 8に示すように物体に作用する合力 F の方向 φ は、次式で表わされる。

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{L}{D} = \tan^{-1} \frac{C_L}{C_D} = \tan^{-1} 0.3 = 16.7^\circ \quad (1)$$

すなわち、 F は流れ方向から反時計方向に 16.7° 程度の角度で作用する。

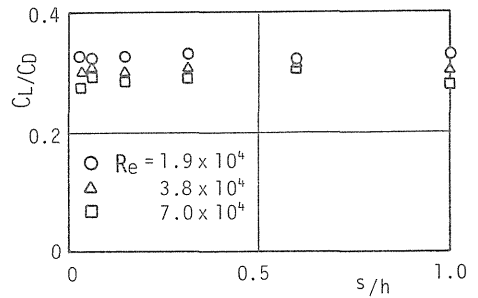


Fig. 7 Lift/Drage ratio.

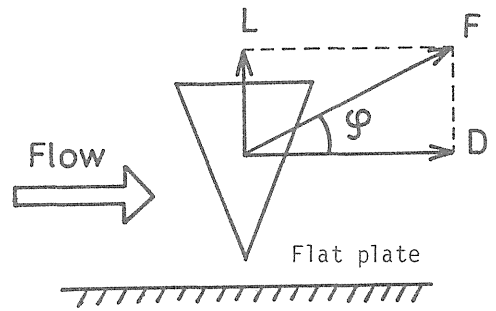


Fig. 8 Forces on the model.

4.3 物体まわりの圧力

物体上および平板上の圧力 p を無次元化した C_p は、Fig. 9(a), (b), (c), Fig. 10(a), (b), (c)のとおりであった。Fig. 9では、物体の前・上・後面の座標 x_1, x_2, x_3 を各面の長さ a, b, c で無次元化してある。

物体の前面 x_1/a の C_p は、 Re および s/h とともに高くなり前面の後半部で最大値をとる。これは、Fig.

10で Re を増大させたとき, 流れが物体にせき止められて低速となり, 原点付近の物体前方 ($x < 0$) における C_p が上昇することに対応している。

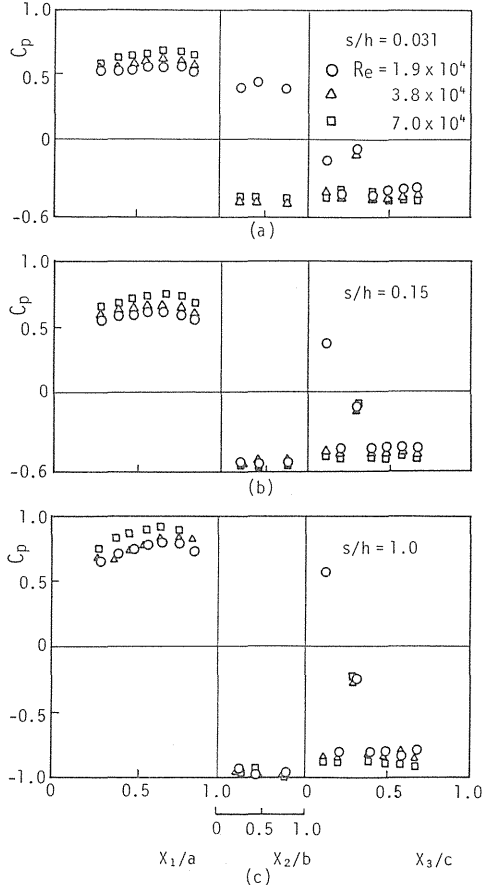


Fig. 9 Pressure on the model.

上面 x_2/b において Fig. 9(a) の $Re = 1.9 \times 10^4$ を除けば, C_p は s/h の増加に伴って減少するが, Re に対しては一定であった。上面の C_p が低下することは揚力の増大を意味する。これは Fig. 6 において, C_L が s/h とともに大きくなる事実に表われている。Fig. 9(a) の $Re = 1.9 \times 10^4$ は他の Re に比べて高い C_p を示した。この現象は上面の逆流が弱いためと考えられる。

後面 x_3/c における C_p は, $Re = 1.9 \times 10^4$ で2カ所その他の Re において1カ所の突出点を持つが, これら以外では Re および s/h が増すほど小さい値となった。これは, Fig. 10 の物体近くの後方部 ($x > 0$) で, Re が大きくなると逆流が強くなり 低圧領域が拡大することに対応しており, C_D の増加を意味し Fig. 6

の傾向と一致する。ただし, $Re = 1.9 \times 10^4$ の最初の突出点 (Fig. 9) において, C_p は s/h の大きさとともに増し他のものとは逆の傾向にある。

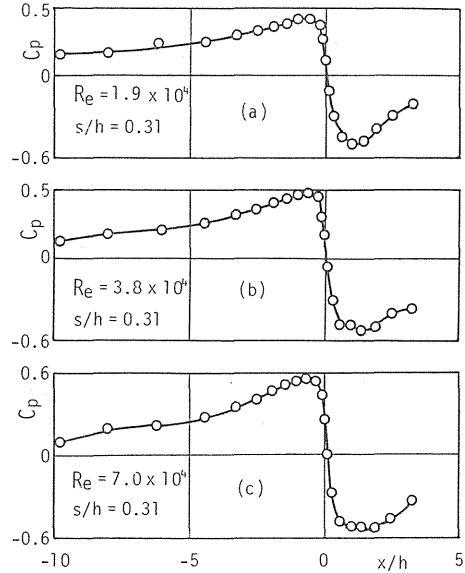


Fig. 10 Pressure on the flat plate.

4.4 物体上の圧力と揚・抗力

ここで, 物体まわりの圧力 p と揚・抗力 L, D との関係を考える。前・後面の摩擦力の影響は小さいと考えられるので, これは無視した。Fig. 11 より, 物体断面の各頂点をそれぞれの原点とし, 前・上・後面の座標および長さを各々 x_1, x_2, x_3 ; a, b, c とすれば, L および D について次式を得る。

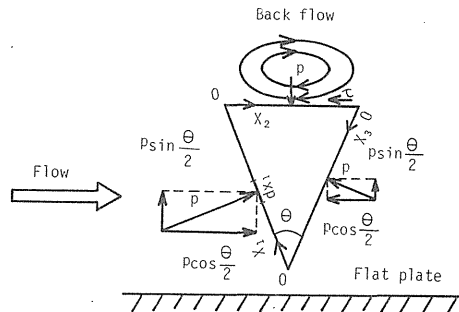


Fig. 11 Pressure and shear stress on the model.

$$L = \int_0^a p \sin \frac{\theta}{2} dx_1 - \int_0^b p dx_2 + \int_0^c p \sin \frac{\theta}{2} dx_3 \quad (2)$$

$$D = \int_0^a p c \cos \frac{\theta}{2} dx_1 - \int_0^b \tau dx_2 - \int_0^c p c \cos \frac{\theta}{2} dx_3 \quad (3)$$

すなわち、 s/h の増加に伴って L を大きくするものは、前面の p 上昇と上面の p 低下である。後面の p 減少は L を減らす方向に作用するが、前の二者に比べて小さいので結果として L の増加となる。

また、 D 増加の主因は前面における p 増大であった。上面の逆流による摩擦応力 τ や後面の p は、 D を減らす方向に作用するが前面の p に比較して小さいため、結局 Re や s/h の大きさに伴って D も増す。

したがって、実際問題としてのワイパーの浮き上がりに対する流体力学の方策として、例えばFig. 12のようなものが考えられる。すなわち、主に前面と上面との圧力差を利用し、前面から上面への通路による流れ(流量 Q 、流速 v)を作り、運動量の変化に基づく負の揚力を発生させる。後面と上面間の圧力差は小さい(Fig. 9)

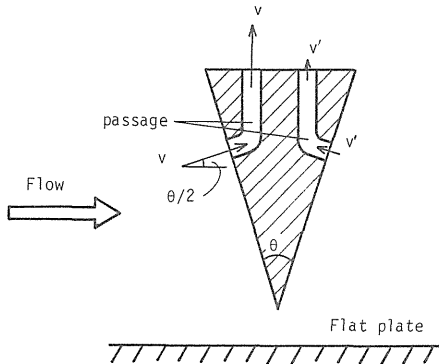


Fig. 12 Method of decreasing the lift.

ので、こちらの流れ(流量 Q' 、流速 v')はあまりあてにならない。この場合に得られる負の揚力 L_m は次式で与えられる。

$$L_m = (\rho Q v + \rho Q' v') (1 - \sin \frac{\theta}{2}) \quad (4)$$

この揚力低減策についての実験的検討は、今後の課題である。

5. 結 言

実験の範囲内で以下のことが明らかになった。

- 1) 物体に作用する揚・抗力は、物体と平板との間隔が増すと大きくなる。
- 2) 揚力の増大の主因は、物体前面の圧力上昇と上面における圧力低下である。
- 3) 抗力はレイノルズ数とともに増加するが、揚力はレイノルズ数に対して一定である。
- 4) 物体に作用する流体力の合力は、流れ方向から反時計まわりに 16.7° 前後の方向に働く。
- 5) 揚力を減少させる方法として、例えば前・後面と上面との間に通路を設け、運動量の変化による負の揚力を利用するものが考えられる。

終わりに、本実験に協力された当時の卒研究生の諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Hoerner, S.F., Fluid-Dynamic Drag, Published by the Author (1958), 3-9.
- 2) 溝田, 岡島., 土木学会論文報告集, 312 (1981), 39.
- 3) 鮎川ほか2名., 流れの可視化, 4-14 (1984), 171.
- 4) Barth, R., ATZ, 66-11 (1964), 323.
- 5) Ibid., 66-12 (1964), 349.
- 6) 坂本ほか2名., 日本機械学会論文集 B編, 49-437 (1983), 44.
- 7) 大谷., 自動車技術, 20-7 (1960), 690.
- 8) Schlichting, H., Boundary Layer Theory 7th ed., Mc Graw-Hill (1979), 453.