

論文 セメント硬化体の圧縮強度に及ぼす内部液体の表面張力の影響

尾上 幸造^{*1}・松下 博通^{*2}・鶴田 浩章^{*3}・若林 幹夫^{*4}

要旨：セメント硬化体の圧縮強度は水中では著しく低下する。この原因のひとつとして、水分の付着により、ひび割れ面で解放される界面エネルギーが低下することが考えられており、過去にモルタルの曲げ強度と内部液体の表面張力の関係を調べた報告がある。本研究では、モルタルの圧縮強度と内部液体の表面張力の関係を調べた。その結果、内部液体の表面張力の増大にともなって、圧縮強度が直線的に低下することが明らかとなった。

キーワード：圧縮強度、含水状態、表面エネルギー、表面張力、内部液体

1. はじめに

試験時の供試体の乾湿の違いにより、コンクリートの強度が変動することはよく知られている。実構造物においても、コンクリート橋脚のように一部が水中に没している部材では、同一材でありながら上部と下部で強度あるいは変形の性質が異なることは、設計上重要な意義をもつと考えられる。しかしながら実際の設計においては、コンクリートの内部水分の影響がほとんど考慮されていない。

一般に、セメント硬化体の内部に水が存在すると、強度は低下し弾性係数は増加する¹⁾。強度低下の理由として、ひび割れ面に水分が付着することで表面エネルギーが低下する²⁾ことが考えられている。堀³⁾は、セメント硬化体の強さを表面エネルギーの観点から検討し、内部液体の表面張力が増大するほど曲げ強度が直線的に低下することを報告している。

ここで、セメント硬化体が引張力あるいは曲げ引張力を受ける場合には、単一のひび割れが分岐しながら拡大して全体の破壊に至るのに対し、圧縮力を受ける場合にはひび割れの数、長さ、幅が増大することにより徐々に破壊が進行

する⁴⁾という違いが存在する。さらにひび割れ面が外部と接しているか否かにより、内部液体の作用の仕方も異なると考えられる。過去に液体の表面張力とセメント硬化体圧縮強度との関係を報告した例としては、D.J.Cookら⁵⁾や浅本ら⁶⁾の研究があり、いずれも内部液体の表面張力が大きいほどセメント硬化体の圧縮強度が低下することを報告している。しかしながら、内部液体の種類が限定的であるため、データを補足し充実させる目的で、本研究においても試験を実施することとした。

本研究ではまず含水状態の違いがセメント硬化体の圧縮強度・静弾性係数に与える影響について調べ、さらに表面エネルギーの観点から内部液体の表面張力と圧縮強度との関連について検討した。なお、セメント硬化体が圧縮力を受ける際、内部に非圧縮性の水分が噛み込むことで引張力を生じ、ひび割れを進展させるといった作用も考えられるが、今回はこのいわゆる「くさび作用」については考慮していない。

2. 含水量の異なるコンクリートおよびモルタルの圧縮強度・静弾性係数

*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士(工学)(正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門教授 工博(正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門助教授 博士(工学)(正会員)

*4 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻(正会員)

2.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3270\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し，細骨材には海砂（表乾密度 2.57g/cm^3 ，吸水率 1.60% ），粗骨材は（表乾密度 2.89g/cm^3 ，吸水率 1.10% ）を用いた。また，混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤およびアルキルアリルスルホン酸系の空気連行剤を使用した。コンクリートおよびモルタルの配合をそれぞれ表-1，表-2 に示す。なお，コンクリートとモルタルそれぞれについて，単位水量を一定とした。

(2) 試験方法

コンクリートおよびモルタルは，パン型強制練りミキサーにより練り混ぜた。供試体は $\phi 7.5 \times 15\text{ cm}$ の円柱供試体とし，各要因につき 3 本ずつ作製した。脱型後直ちに水中養生を開始し，材齢 7 日，28 日，91 日における圧縮強度を JIS A 1108 に従って測定した。このとき試験時に供試体軸方向に検長 60 mm のワイヤストレーンゲージを 2 枚貼付して縦ひずみを測定し，静弾性係数を算出した。

供試体は表乾状態および絶乾状態の 2 通りに調整した。本研究における表乾状態および絶乾状態を表-3 のように定義する。表-3 から分かるように，絶乾供試体の材齢は乾燥炉に投入した時点としており，厳密には表乾供試体の材齢と同一ではない。しかし，後述するように，乾燥炉に投入後，供試体中の水の大部分は比較的短時間で逸散することを考慮し，この期間における水和反応による強度の増進は小さいものと判断した。

2.2 試験結果および考察

(1) 乾燥による質量減少率の変化

図-1，図-2 にコンクリート供試体およびモルタル供試体の質量減少率の時間変化について，28 日間水中養生後，乾燥炉および気中にて乾燥させた例（供試体 3 本の平均）を示す。ここで質量減少率とはコンクリートおよびモルタル供試体の乾燥過程における質量変化を同一供

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					AE 減水剤 (g/m^3)	AE 剤 (ml/m^3)
		水 W	セメント C	海砂 S	砕石 G			
					5~10 (mm)	10~20 (mm)		
40	45	168	420	756	419	628	1575	8.40
50	45	168	336	787	436	654	1050	6.72
60	45	168	280	808	447	671	875	5.60

表-2 モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C	単位量 (kg/m^3)		
		水 W	セメント C	海砂 S
40	1.9	275	687	1305
50	2.6	275	550	1416
60	3.2	275	458	1491

表-3 状態の定義

表乾状態	水中から取り出し，布で表面を丁寧に拭き取った状態
絶乾状態	所定の材齢に達した時点で 110°C の乾燥炉に入れ，一定重量になった状態

試体の表乾質量で除した値であり，式(1)で表される。

$$\Delta m = \frac{m_{\text{wet}} - m}{m_{\text{wet}}} \times 100 \quad (1)$$

ここに， Δm ：質量減少率 (%)

m_{wet} ：表乾質量 (kg)

m ：乾燥中の質量 (kg)

参考のため 20°C ，相対湿度 60% にて気中乾燥させた供試体のデータも示す。図-1 および図-2 より，乾燥炉で乾燥した場合，開始から 50~100 時間程度までに質量が急激に減少するが，その後の質量減少は非常に緩やかなものとなるのが分かる。このことより，乾燥初期に水分が急激に逸散しており，供試体内部には多数の微細なひび割れが発生していることが考えられる。一方，気中乾燥では，質量が緩やかに減少し，1600 時間程度の乾燥では収束しなかった。これらの傾向は，7 日間および 91 日間水中養生後に乾燥させた場合でも同様であった。

(2) 含水状態が圧縮強度・静弾性係数に与える影響

図-3 に材齢 28 日におけるコンクリートお

() 内の数値：供試体 3 本の表乾質量の平均

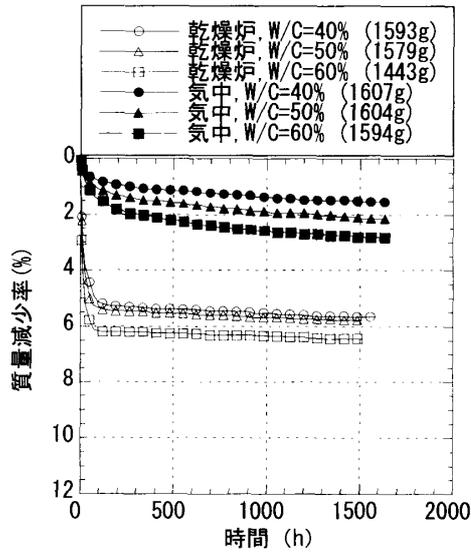


図-1 質量減少率の時間変化
(コンクリート, 28 日間水中養生後)

よびモルタルの応力-ひずみ曲線の一例を示す。コンクリート・モルタルともに絶乾状態の方が表乾状態に比べて最大応力時のひずみが大きいことが分かる。これは、表乾状態ではセメント硬化体中の水に間隙水圧が発生し、固体部分の有効応力が小さくなり、結果としてひずみが小さく現れるが、絶乾状態では固体部分で全ての外力を受け持つために、ひずみが大きく現れたと考えられる。また、絶乾状態では微細なひび割れが多数発生していることや、C-S-H 網の補強効果を有するゲル水を欠いていること⁷⁾等もひずみが大きくなった原因と考えられる。

一方、最大応力に関しては、絶乾状態の方が表乾状態よりも大きくなる傾向にある。すなわち、コンクリートやモルタルの内部が湿潤状態にあると、圧縮強度が低下すると言える。この理由として、水分子の付着によるひび割れの成長促進⁷⁾が考えられる。固体にひび割れが発生した場合、ひび割れの発生により失われたひずみエネルギーとひび割れの周りに新たに生じた表面エネルギーとが等しくなると、クラックはそれ以上に成長しない⁸⁾。しかし、成長の止まっていたひび割れ面に水分子が付着すると表面エネルギーが減少するため、ひび割れは新たな破

() 内の数値：供試体 3 本の表乾質量の平均

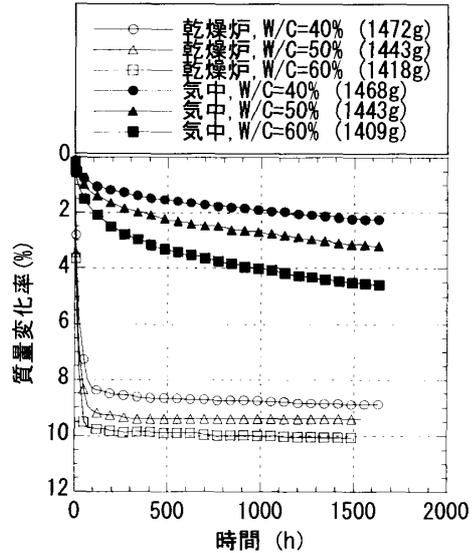


図-2 質量減少率の時間変化
(モルタル, 28 日間水中養生後)

壊面を作り、荷重に対し安定になろうとする。したがって、水分子が存在することでひび割れの成長が促進され、結果として表乾供試体の最大応力は絶乾よりも小さくなったと考えられる。

図-4 にコンクリートおよびモルタルの圧縮強度および静弾性係数の測定結果（それぞれの要因につき、供試体 3 本の試験値の平均）を示す。供試体の種類、水セメント比、材齢に関係なく、圧縮強度は表乾の方が絶乾より小さく、静弾性係数は表乾の方が絶乾より大きくなった。

図-5 に圧縮強度比および静弾性係数比（絶乾/表乾）の一覧を示す。同一の W/C および材

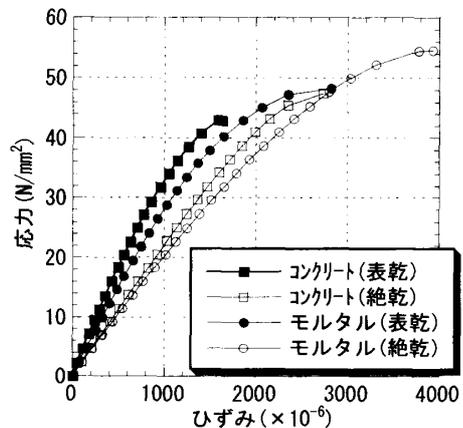


図-3 コンクリートおよびモルタルの応力-ひずみ曲線 (W/C=50%, 材齢 28 日)

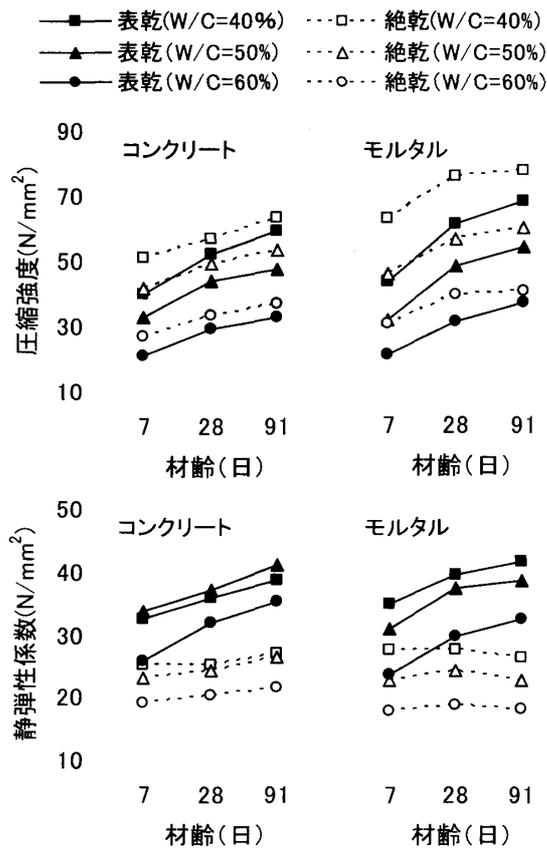


図-4 圧縮強度と静弾性係数の測定結果

齢で比較すると、圧縮強度比はコンクリートよりもモルタルの方が大きく、乾燥による強度増加がより顕著に現れている。これは、ペースト量の違いによるものと考えられる。すなわち、破壊現象がペースト部分のひび割れ進展過程を経ること、また乾湿の違いはひび割れ進展過程に影響を与えることを考えると、モルタルの方がペーストの占める割合が高いために、圧縮強度比が大きくなったものと考えられる。また、材齢が進むにつれ圧縮強度比が小さくなる傾向にあるが、これはセメントの水和が進行して組織が密になるにつれ、セメント硬化体自身の表面エネルギーが増すために、強度に対する乾湿の影響が小さくなることを示しているものと考えられる。静弾性係数比についても、モルタルの方がコンクリートよりも大きい、圧縮強度比ほどの差は認められなかった。

3. 表面張力の異なる液体中におけるモルタル

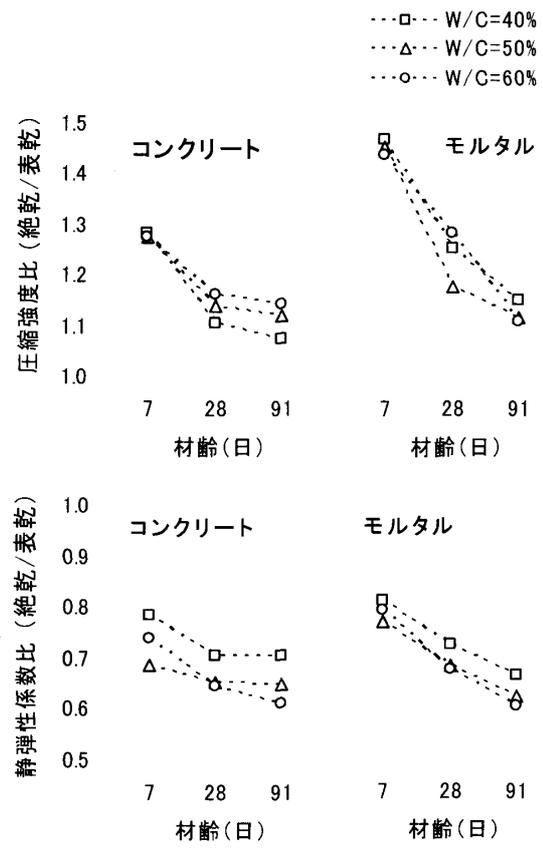


図-5 圧縮強度比および静弾性係数比

の圧縮強度試験

2. でコンクリートおよびモルタルの圧縮強度は内部水分の存在により低下することを確認した。Griffith の破壊強度式²⁾を式(2)に示す。

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi a}} \quad (2)$$

ここに、 σ_c : 破壊強度

γ_s : 固体の表面エネルギー

E : ヤング係数

a : 切り欠き長さの半長

すなわち、欠陥を含まない理想的な固体の破壊強度は、固体の表面エネルギーの平方根に比例する。一方、界面エネルギーは固体（セメントペースト）と液体のもつ表面エネルギーとの差に等しい⁹⁾ため、式(3)で与えられる。

$$\gamma_{sl} = \gamma_s - \gamma_l \quad (3)$$

ここに、 γ_{sl} : 界面エネルギー

γ_l : 液体の表面エネルギー

ここで、液体の表面エネルギーは液体の表面張

力と等価である。コンクリートあるいはモルタルの強度がひび割れの界面エネルギーと関係があると仮定すれば、式(2)と式(3)より、内部液体の表面張力が大きいほど強度は低下することが予想される。

3.1 実験概要

(1) 使用材料およびモルタルの配合

セメントおよび海砂は 2. で用いた材料と同じものを使用した。モルタルの配合を表-5 に示す。表面張力の異なる液体として、コンクリートを腐食させない有機溶媒を使用した。表-6 に本試験で用いた液体とその表面張力(20°Cでの値)を示す。各種液体表面張力の値については、既往の文献^{3),10)}より引用した。

(2) 試験方法

モルタル供試体は 4×4×16 cm の角柱とし、圧縮強度試験は JIS R 5201 に従った。液体として水を用いた場合については水中養生 28 日目で水中にて強度試験を行った。空気中で試験を実施したものについては、供試体中に含まれる水分を乾燥させるため材齢 28 日目で温度 110°C の乾燥炉に供試体を入れ、質量が一定になった時点で試験を実施した。2. 1(2)で述べたように、乾燥期間での強度増進の影響は小さいものとなした。水以外の液体を用いた場合については、材齢 28 日より 110°C 乾燥炉にて乾燥させ、質量が一定となったモルタルを各液体に浸漬し、質量が一定となった時点で、液体中にて強度試験を行った。

写真-1 に圧縮試験状況を示す。なお、圧縮強度の値は供試体 6 本の平均とした。

3.2 試験結果および考察

図-6 に本研究および他の研究者によるセメント硬化体の圧縮強度比と液体の表面張力の関係を示す。参考のため、堀³⁾によるモルタルの曲げ強度比と液体の表面張力の関係を図-7 に示す。なお、空気は水蒸気を含むことから、実際には表面張力は 0 でないことが考えられるが、今回の検討では空気の表面張力を 0 とした。モルタルの圧縮強度比は、表面張力が大きいほど

表-5 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)		
		水 W	セメント C	海砂 S
50	2.4	284	567	1361

表-6 液体の表面張力と圧縮強度

液体の種類	表面張力 (dyn/cm)	圧縮強度
空気	0	66.8
ジエチルエーテル	17.0	56.8
ヘキサン	18.4	60.7
エタノール	22.7	44.1
シクロヘキサン	25.5	60.0
ベンジルアルコール	39.0	55.0
ベンズアルデヒド	40.0	57.6
水	72.8	44.7

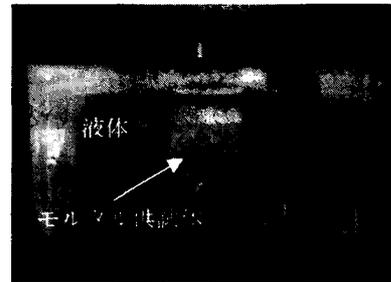


写真-1 圧縮試験状況

- ◆ モルタル(W/C=0.5、本研究)
- ペースト(W/C=0.35、浅本ら[6])
- △ ペースト(W/C=0.6、浅本ら[6])
- ▲ コンクリート(W/C=0.4、D.J.Cookら[5])
- モルタル(W/C=0.5、D.J.Cookら[5])
- モルタル(W/C=0.35、D.J.Cookら[5])

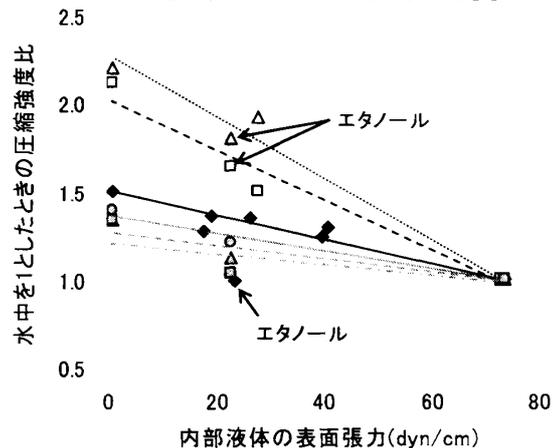


図-6 液体の表面張力とモルタルの圧縮強度比の関係

直線的に低下し、ひび割れ進展の過程が異なるにも関わらず、曲げ強度試験³⁾の場合と同様の傾向が認められた。

図-6 中の直線の傾きの絶対値が大きいほど、

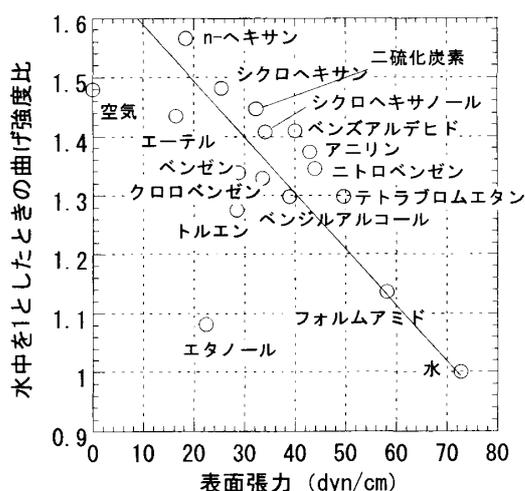


図-7 液体の表面張力とモルタルの曲げ強度比の関係³⁾

内部液体の表面張力の影響が大きいと考えられる。直線の傾きの絶対値は、ペースト、モルタル、コンクリートの順に大きくなっており、これはセメントペースト量と対応していると考えられる。また、直線の傾きの絶対値は水セメント比が低いものほど小さくなっているが、これはセメント硬化体自身の表面エネルギーが大きいほど液体の表面エネルギーによる影響が小さくなることを示しているものと考えられる。

また、本研究においてエタノールを用いた場合の圧縮強度が予想される値よりもかなり小さい値を示したが、この原因は本研究の範囲内では明らかとすることはできなかった。浅本ら⁶⁾の実験では、エタノールを使用した場合の圧縮強度は水を使用した場合よりも大きく出ており、本研究の結果と異なっていることから、この点に関しては今後の検討課題としたい。

なお、本論文中には図示していないが、式(2)を参考にして横軸を表面張力の平方根としてプロットしたところ、同様の直線関係が得られ、相関係数にも有意な差はなかった。

以上より、セメント硬化体の含水による圧縮強度の低下の原因として、水の表面張力の影響が大きいことが確認されたが、今後は冒頭で述べた「くさび作用」についても検討を行う必要があると考えている。

4. 結論

- (1) セメント硬化体の圧縮強度は表乾状態よりも絶乾状態の方が大きい、静弾性係数は表乾状態の方が大きい。ただし、両者の差は材齢が経つほど小さくなる。
- (2) セメント硬化体の圧縮強度比は内部液体の表面張力の増大に伴って直線的に低下した。ただし、本研究でエタノールを用いた場合のプロットは直線から大きく外れた。
- (3) セメント硬化体の含水による圧縮強度低下の原因として、水分付着によるひび割れの表面エネルギー低下の影響が大きい。

参考文献

- 1) 岡島達雄：コンクリートの強度・ヤング係数と水分の関係，コンクリート工学，Vol.32，No.9，pp.20-22，1994.9
- 2) 岡島達雄，石川時雄：表面エネルギーからみたセメント硬化体強度の含水率依存性，セメント技術年報，35，pp.130-133，1982
- 3) 堀素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ，窯業協会誌，70 [7]，C268-C273，1962
- 4) 岩崎訓明：コンクリートの特性，共立出版，p.80，1975
- 5) D.J.Cook and M.N.Haque：Strength Reduction and Length Changes in Concrete and Mortar on Water and Methanol Sorption，Cement and Concrete Research，Vol. 4，pp.735-744
- 6) 浅本晋吾，石田哲也：微細空隙中の液体特性に着目したコンクリートの時間依存変形機構の検討，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.159-172，2004.5
- 7) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊，学献社，pp.45-47，1990
- 8) Griffith, A. A. : Phil. Trans. Roy. Soc., Vol. 221, p.163, 1920
- 9) G. Antonoff : J. chem., phys., 5, p.372, 1907
- 10) 関根幸四郎：表面張力測定法，理工図書，pp.129-148，1957