

論文

[1055] 極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究

正会員 ○ 山田 和夫 (愛知工業大学工学部)

正会員 小阪 義夫 (名古屋大学工学部)

1. まえがき

近年、電子計測技術の発達に伴って超音波を利用したコンクリートの非破壊試験の研究が再び増加しつつある[1-7]。なかでも、本研究で適用する超音波スペクトロスコピー法[8]は、材料中を伝播した超音波の波形に、材料特性に関わる各種情報が含まれていることに着目し、伝播波の詳細な波形解析を行うことによって材料の内部構造を調べようとするものであり、最近コンクリートの分野でも注目を集めている[9]。筆者らは、従来から超音波スペクトロスコピー法を用いたコンクリートの品質検査のための非破壊試験方法の確立を目的として一連の基礎的研究を行ってきた[3-7]。本報は、その延長上のもので、極低温下に曝されたコンクリートを伝播した超音波の減衰特性を調べるとともに、それらの計測結果を用いたコンクリートの劣化度評価の可能性を確かめたものである。

2. 実験方法

2・1 実験の概要

温度履歴(常温(20℃)→-60℃→常温(20℃)の繰返し(1サイクル:12時間))を受けた各種調査のモルタルおよびコンクリート試験体中を伝播した超音波の諸特性を測定し、それらの特性値とモルタルおよびコンクリートの劣化度との関係を調べた。超音波諸特性値以外の実験要因は、試験体の材種(モルタルおよびコンクリートの2種類)、水セメント比(W/C=50、60および70%の3種類)、冷却繰返し数(0、2、5および10回の4種類)並びに曲げおよび圧縮強度(JIS R 5201による)である。

2・2 試験体の製作および養生方法

試験体は、モルタルおよびコンクリートとも、凍結融解試験装置の容量上の制約のために4×4×16cmの横打ち小型角柱体とし、各要因毎に3個の試験体を製作した。コンクリート試験体は打設上面を打込み直後にこて仕上げし、モルタル試験体は打設後約6時間目にストレートエッジを用いて試験体表面を平滑に仕上げた。何れの試験体も材令1日目に脱型し、以後試験材令(6週)まで養生室内(温度:20±1℃、湿度:45±5%)で空中養生を行った。

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(最大粒径=5mm、表乾比重=2.60)および天竜川産の川砂利

(最大粒径=10mm、表乾比重=2.65)を用いた。モルタルおよびコンクリートの調合は、所定のフロー値またはスランプ値が得られるように試し練りによって決めた。調合表およびフロー値(またはスランプ値)の実測結果を表-1に示す。

表-1 調合表およびコンシステンシーの実測結果

種類	W/C (%)	標準調合 (kg/m <sup>3</sup> )				コンシステンシー
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
モルタル	50	346	691	1106	—	241
	60	352	587	1174	—	251
	70	357	510	1225	—	274
コンクリート	50	200	400	685	1060	11.9
	60	200	333	740	1060	15.2
	70	200	286	779	1060	15.5

[註] W/C:水セメント比、コンシステンシー:モルタルの場合はフロー値、コンクリートの場合はスランプ(cm)。

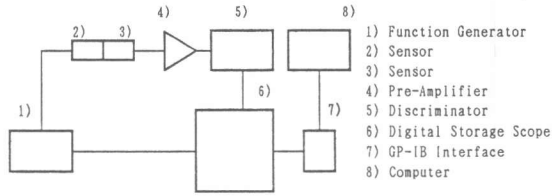
### 2・3 計測・処理方法

使用した計測システムのブロック・ダイアグラムおよび計測機器の各設定感度を、それぞれ図-1および表-2に示す。超音波の計測は、同一試験体に対して3回繰返して行い、その平均値を測定値とした。計測手順は次のようである。すなわち、ファンクション・ジェネレータによって発生させた超音波パルス（パルス幅=2.5μsec）を発振用変換子を介して試験体に入力し、透過波形を検出用変換子で検出した。次に、この検出波を一旦ストレージスコープ（サンプリング間隔および個数：1μsecおよび1024個/1データ、分解能：8bit）に記憶させた後、GP-IB インターフェースを介して電子計算機に転送し、波形解析を行った。なお、入・出力用変換子（AE-905S、共振周波数：約1MHz）は、図-2に示すように、熱可塑性樹脂で試験体両端に直接接着した。本研究では、既報[5]と同様に、計測システムの特性に依存しない媒体固有の周波数応答特性を表わす指標として周波数伝達関数を用いた。また、検出された波形の各種特性を調べるために、山口・小柳津[10]がアコースティック・エミッション(AE)のリアルタイム処理に際して用いた図-3に示すような各種波形特性パラメータを使用した。

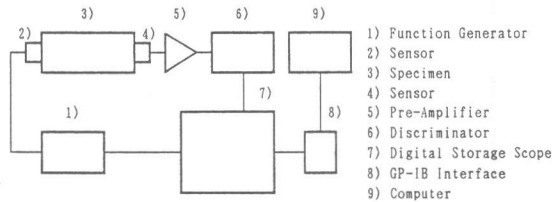
### 3. 実験結果とその考察

#### 3・1 検出超音波の減衰特性

図-4および図-5は、それぞれ透過超音波の各種波形特性パラメータのうち、モルタルおよびコンクリートを透過した超音波の最大振幅(AMPmax)およびエネルギー(Energy)と冷却繰返し数との関係を示したものである。これらの図によれば、エネルギー値は最大振幅値よりも繰返し冷却による試験体の内部劣化の影響を顕著に受けることがわかる。また、モルタルの場合、各波形特性値に及ぼす水セメント比の影響



(a) 変換子を含む計測システムの伝達関数算定用



(b) 変換子を含む計測システムと媒体の伝達関数算定用

図-1 計測システムのブロック・ダイアグラム

表-2 計測機器の設定感度

アンプの増幅度(dB)			フィルター バンド幅 (kHz)	サンプリング 間隔 (μsec)
プリアンプ	メインアンプ	合計		
20	0 <sup>1)</sup>	20	10~300	1.0
20	30 <sup>2)</sup>	50		

[註] 1): 変換子を含む計測システムの伝達関数算定、

2): 変換子を含む計測システムと媒体の伝達関数算定。

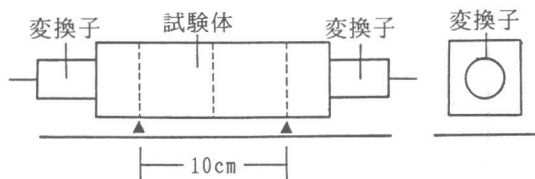
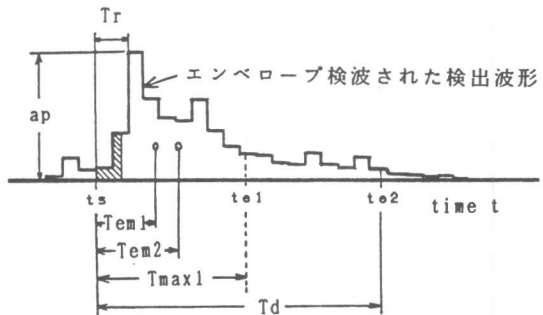


図-2 変換子の装着位置



- ①到達時間(Ts)、
- ②立上り時間(Tr)
- ③持続時間(Td)、
- ④初動振幅(AMPPris)
- ⑤最大振幅(AMPmax)、
- ⑥平均振幅(AMPave)
- ⑦エネルギー(Energy、Et)、
- ⑧エネルギー・モーメント(Tem)

$$Et = \sum_{i=0}^n a_i^2 \cdot \Delta t \quad Tem = \sum_{i=0}^n a_i^2 \cdot T_i \cdot \Delta t / Et$$

- ⑨エネルギー分散(Ed)

$$Ed = \sum_{i=0}^n a_i^2 \cdot T_i^2 \cdot \Delta t / Et - (Tem)^2$$

- ⑩ゼロ・クロッシング数(Nz)、⑪オーバーフロー数

図-3 検出波形の波形特性パラメータ<sup>1B)</sup>

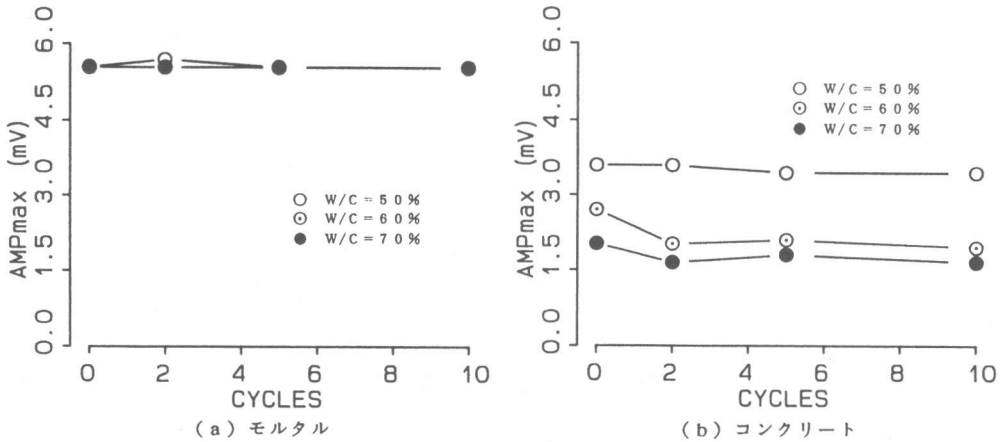


図-4 検出波形の最大振幅(AMPmax)と冷却繰返し回数(CYCLES)との関係

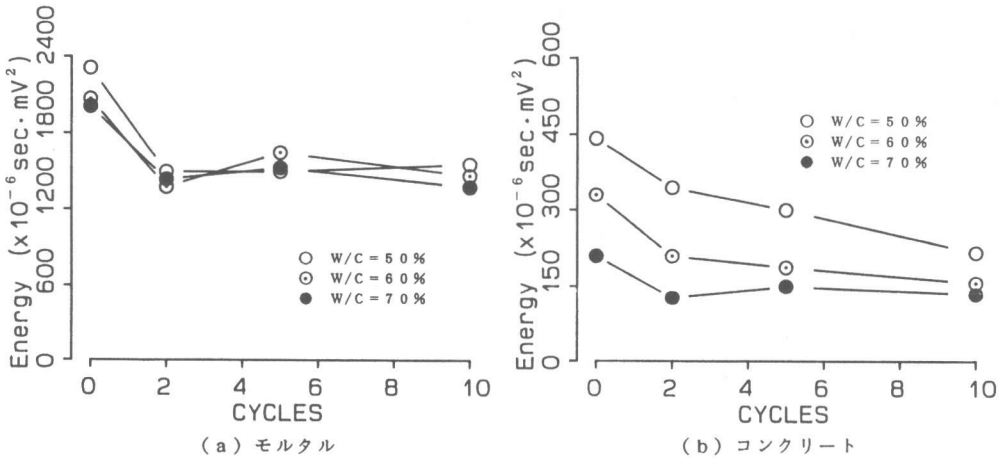


図-5 検出波形のエネルギー(Energy)と冷却繰返し回数(CYCLES)との関係

は明確には認められないが、コンクリートの場合には、これらの波形特性値は、水セメント比が大きいほど小さくなっている。各波形特性値の絶対値は、モルタルよりもコンクリートの方がかなり小さく（モルタルとコンクリートの測定値の平均値の比で、最大振幅が約0.45倍、エネルギーが約0.15倍）になっており、コンクリートの方がモルタルよりも超音波の減衰が大きいことがわかる。これは、コンクリートの場合、粗骨材による超音波の反射や散乱などの影響が大きいためと考えられる。また、前掲の図-4(b)および図-5(b)にみられるように、粗骨材の存在による超音波の減衰は、水セメント比が大きいほど著しくなるが、これは、水セメント比が大きいほど粗骨材と母材モルタルの音響インピーダンスの差も大きくなるためと思われる。表-3は、検出波形の持続時間とゼロ・クロッシング数とを用いて算定した透過超音波の平均周波数を一覧にして示したものである。この表によれば、無冷却のモルタルおよびコンクリート中を透過した超音波の平均周波数は、それぞれ201~234kHzおよび182~227kHzの範囲の周波数域のものが卓越しているが、モルタ

表-3 検出波形から算定された平均周波数

種類	W/C (%)	各繰返し毎の平均周波数 (kHz)			
		0	2	5	10
モルタル	50	234	229	217	193
	60	202	189	187	164
	70	201	171	173	178
コンクリート	50	227	196	178	178
	60	201	192	187	167
	70	182	189	168	178

ルよりもコンクリートの方がまた水セメント比が大きいほど高周波数成分の減衰が著しいため、平均周波数は小さくなる傾向を示している。また、透過超音波の平均周波数は、10回の繰返し冷却により約15%減少している。

### 3・2 試験体の周波数応答の減衰特性

表-4は、モルタルおよびコンクリートの周波数伝達関数のエネルギー（本研究では、 $\int |G_m(j\omega)|^2 df$  を周波数伝達関数のエネルギーと定義した。ただし、 $G_m(j\omega)$ は試験体の周波数伝達関数を、 $\int df$ は周波数領域での積分を意味する）を、50kHzの周波数帯域毎に分類して示したものである。この表から明らかなように、無冷却時のモルタルのエネルギー成分は、水セメント比にかかわらず、100~300kHzの周波数域で全エネルギーの約93%を占めており、全体としては高周波数領域で比較的フラットな周波数特性を示す。しかし、繰返し冷却によって試験体の劣化が進むと、10~100kHzの周波数成分は徐々に減少し、100~150kHz、150~200kHzおよび250~300kHzの周波数成分は著しく減衰する。これに対して、200~250kHzの周波数成分は逆に激増する傾向を示す。最終的には、10~100kHzの周波数成分が0~2%、100~150kHz、150~200kHzおよび250~300kHzの周波数成分がそれぞれ4~10%、200~250kHzの周波数成分が全エネルギーの81~97%を占めるようになる。一方、無冷却時のコンクリートの場合には、100~150kHzの周波数成分が全エネルギーの約73%を占め、50~100kHzおよび200~300kHzの周波数成分は、上記のモルタルの場合の約4.5倍および0.1倍にそれぞれ増減し、全体として低周波数成分の卓越した周波数特性となっていることがわかる。コンクリートの場合には、モルタルの場合のような周波数特性の急激な変化は認められず、繰返し冷却によって50~150kHzの周波数成分が徐々に減衰し、逆に200~

表-4 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエネルギー成分比

種類	W/C (%)	繰返し回数	各周波数帯(kHz単位)におけるエネルギー成分					
			10~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300
モルタル	50	0	0.025	0.044	0.383	0.053	0.194	0.300
		2	0.005	0.023	0.118	0.045	0.750	0.059
		5	0.003	0.025	0.186	0.046	0.691	0.050
		10	0.002	0.019	0.098	0.036	0.810	0.035
	60	0	0.014	0.030	0.255	0.218	0.116	0.368
		2	0.007	0.047	0.198	0.106	0.590	0.052
		5	0.004	0.022	0.111	0.072	0.777	0.014
		10	0.007	0.018	0.059	0.036	0.871	0.009
	70	0	0.021	0.045	0.280	0.113	0.376	0.165
		2	0.036	0.057	0.313	0.137	0.435	0.023
		5	0.000	0.002	0.017	0.007	0.967	0.008
		10	0.000	0.001	0.012	0.004	0.972	0.010
コンクリート	50	0	0.007	0.113	0.792	0.050	0.026	0.011
		2	0.001	0.010	0.117	0.008	0.845	0.020
		5	0.000	0.040	0.182	0.008	0.755	0.014
		10	0.000	0.032	0.168	0.013	0.781	0.005
	60	0	0.009	0.146	0.799	0.024	0.013	0.009
		2	0.036	0.103	0.640	0.070	0.143	0.008
		5	0.004	0.033	0.442	0.101	0.412	0.009
		10	0.005	0.057	0.400	0.085	0.435	0.008
	70	0	0.035	0.271	0.590	0.037	0.053	0.016
		2	0.004	0.029	0.230	0.043	0.681	0.013
		5	0.001	0.039	0.350	0.027	0.572	0.011
		10	0.005	0.043	0.317	0.065	0.558	0.012

250kHzの周波数成分が増大する傾向を示す。また、10~50kHz、150~200kHzおよび 250~300kHzの周波数成分は、試験体の劣化には比較的鈍感で、最終的には100~150kHzおよび200~250kHzの周波数成分が、それぞれ全エネルギーの約30%および約60%を占め、残りの約10%が10~100kHz、150~200kHz および250~300kHz の周波数成分で占められている。以上のことから、繰返し冷却により試験体が劣化すると、モルタルの場合には200~250kHz の周波数成分が著しく卓越した周波数特性を示すが、コンクリートの場合には100~150kHzと200~250kHzの2帯域の周波数成分が卓越した周波数特性を示し、両者に著しい違いのあることがわかる。

### 3.3 強度特性

図-6および図-7は、それぞれ極低温下に曝されたモルタルおよびコンクリートの圧縮および曲げ強度と冷却繰返し数との関係を水セメント比別に示したものである。本実験で行った繰返し回数範囲ではそれほど顕著な強度低下は認められなかったが、図からわかるように、冷却繰返し数の増加に伴って強度は徐々に低下し、10回の繰返し冷却によって、圧縮強度は約15%（9%~19%）、曲げ強度は約20%（13%~29%）の強度低下を示した。透過超音波の各種特性パラメータのうち、凍結繰返しによる強度低下の現象と比較的よい相関のあったパラメータは、検出波形の最大振幅、平均周波数およびエネルギー、並びに100~150kHzと250~300kHzの周波数帯域における周波数伝達関数の局所エネルギーで、例えばコンクリートの圧縮強度との相関係数は、

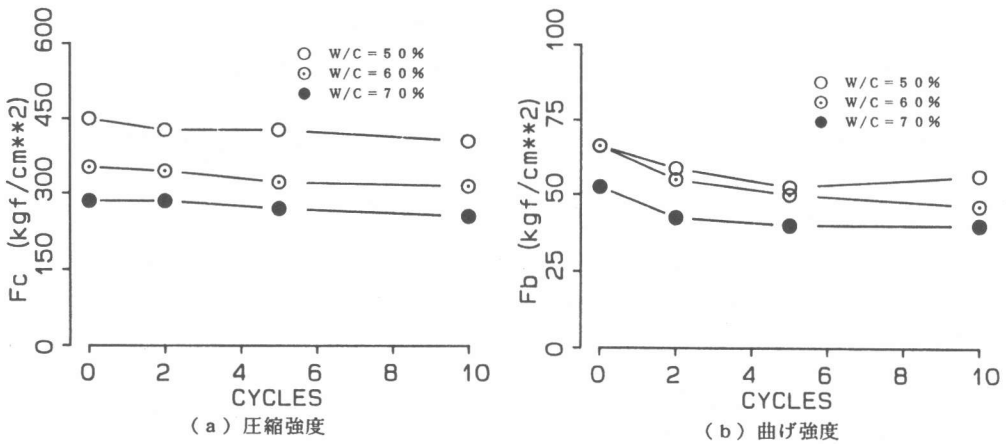


図-6 モルタル強度(Fc, Fb)と冷却繰返し回数(CYCLES)との関係

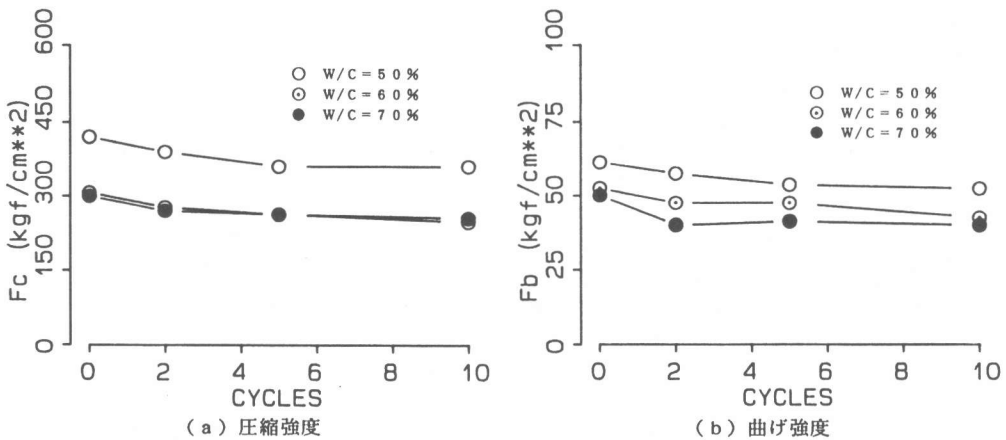


図-7 コンクリート強度(Fc, Fb)と冷却繰返し回数(CYCLES)との関係

それぞれ0.860、0.815、0.875および0.805であった。したがって、これら透過超音波の波形特性値を用いれば、コンクリートの劣化度をかなりの精度で推定できる可能性があるといえる。

#### 4. 結 論

本研究では、超音波スペクトロスコーピーを適用したコンクリートの品質劣化度の診断手法の確立を目的とした基礎的研究の一つとして、極低温下に曝されたモルタルおよびコンクリートを取り上げて一連の検討を行った。本研究によって得られた結果は、およそ次のようになる。

- 1) 極低温下に曝されたモルタルおよびコンクリートを透過した超音波のエネルギーは、最大振幅と比べて繰返し冷却による試験体内部の劣化の影響を顕著に受ける。
- 2) モルタルの場合、透過超音波の各種波形特性パラメータは、水セメント比の影響が明確には認められないが、コンクリートの場合には、水セメント比が大きいほどこれらの波形特性値は減少する。また、各種波形特性値は、モルタルよりもコンクリートの方が小さくなる。
- 3) 極低温下に曝されたモルタルおよびコンクリートを透過した超音波の平均周波数は、10回の20～60℃ 繰返し冷却によって、約15%低下する。
- 4) 繰返し冷却により試験体が劣化すると、モルタルの場合には、200～250kHzの周波数成分が著しく卓越した周波数特性を示すが、コンクリートの場合には、100～150kHz と200～250kHzの2帯域の周波数成分が卓越した周波数特性を示す。
- 5) 極低温下に曝されたモルタルおよびコンクリートの曲げ強度および圧縮強度は、冷却繰返し数の増加に伴って低下するが、圧縮強度よりも曲げ強度の方が強度低下は著しい。
- 6) 凍結繰返しによる強度低下の現象と検出波形の最大振幅、平均周波数およびエネルギー、並びに特定周波数帯域における局所エネルギーの変化の様相とはかなり密接な関係がある。

#### [謝 辞]

実験およびデータ整理に際して御助力を得た土屋宏明(名古屋大学大学院)、今井昌彦(名古屋大学生)および石原 競(愛知工業大学生)の諸君に対して謝意を表するとともに、本研究費の一部は、昭和63年度文部省科学研究費補助金(一般研究(B))によったことを付記する。

#### [引用文献]

- [1] 尼崎省二、明石外世樹、高木宣章、平野博範：超音波スペクトル解析によるコンクリートの品質評価について、セメント技術年報、第40巻、1986、pp.158-161.
- [2] 坂田康徳、大津政康：弾性フィルター特性によるコンクリートのひび割れ評価法に関する基礎研究、コンクリート工学、Vol.24、No.7、1986、pp.135-145.
- [3] 山田和夫、小阪義夫：コンクリート内部で発生したアコースティック・エミッションの伝播特性、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、第1号、1987、pp.499-504.
- [4] 山田和夫、小阪義夫：コンクリート中を伝ばするアコースティック・エミッションの減衰特性、材料、第36巻、第406号、1987、pp.716-722.
- [5] 山田和夫、小阪義夫：火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、1988、pp.361-366.
- [6] 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：コンクリートの伝達関数に及ぼす各種要因の影響、セメント技術年報、第42巻、1988、pp.259-262.
- [7] 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：超音波スペクトロスコーピーによる火災を受けたコンクリートの劣化度評価、日本建築学会東海支部研究報告集、第27号、1989、pp.37-40.
- [8] Brown, A.F.: Ultrasonic Spectroscopy, Ultrasonic Testing, 1982, pp.167-215.
- [9] 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8、1988、pp.1-22.
- [10] 山口楠雄、小柳津宏忠：A E情報分散処理による適応型多目的監視システム、第6回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集、1987、pp.94-99.