

混気圧送管方式の底泥輸送における 効果的な粉体混合手法

EFFECTIVE CEMENT-MIXING METHOD FOR MUD
TRANSPORT USING A COMPRESSED-AIR MIXTURE PIPELINE

岩月哲三¹・神山祐一²・橋本文男³・矢内栄二⁴・益山忠⁵

Tetsuzo IWATSUKI, Yuichi KAMIYAMA, Fumio HASHIMOTO,
Eiji YAUCHI and Tadashi MASUYAMA

¹ 工修 東亜建設工業(株) 土木本部機電部 (〒230 横浜市鶴見区安善町1-3)

² 東亜建設工業(株) 土木本部機電部 (〒230 横浜市鶴見区安善町1-3)

³ 正会員 工修 東亜建設工業(株) 土木本部技術開発部 (〒102 東京都千代田区四番町5)

⁴ 正会員 工博 東亜建設工業(株) 土木本部設計部 (〒102 東京都千代田区四番町5)

⁵ 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋資源学科 (〒424 清水市折戸3-20-1)

A highly efficient transportation system for dredged mud has been developed using the compressed-air mixture method. Recently, the demand for dredged materials to be used as reclamation materials has increased.

In this study, a mud solidification method involving the mixing of mud and cement powder was investigated, and a sudden enlargement structure system was proposed for their effective mixture. The mixing mechanism of the mud and cement powder was investigated experimentally, and a designing method was proposed for effective mixing enlargement in a compressed-air mixture pipeline.

Key Words : Dredging mud, Plug flow, Pipeline, Compressed air mixture, Cement mixing

1. はじめに

海底などに堆積した底泥を管路輸送する方法として、圧送中の底泥に圧縮空気を注入し底泥をプラグ状態として輸送する混気圧送方式¹⁾(図-1)が多く用いられるようになってきている。これは、輸送距離が長くなると底泥の粘着力により圧送効率が低下するため、圧送中の底泥に圧縮空気を混入することにより底泥が管壁と接触する面積が小さくなり、圧送効率が大きく改善される。

さらに、最近では浚渫した底泥を埋立土として再利用するため、底泥に固化材を混ぜ合わせて処理する方法が提案されている。しかし、これまでの方法では混気圧送中の管内に直接固化材を添加しても底泥内に一様に混ざらないため、品質の良い埋立土とはならないことが指摘されていた。

そこで、管路中に拡大部を設け、この拡大部内に固化材を粉体で噴霧する方法をより安価で効果的な埋立土を生成する方法として新たに開発した。

本研究では、混気圧送方式において拡大部に固化材を噴霧したときの混合メカニズムと、拡大部の

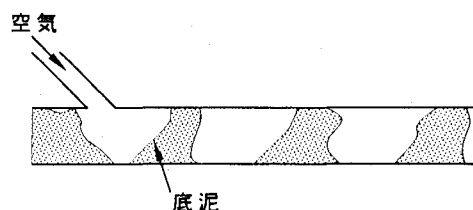


図-1 混気圧送方式¹⁾

設計方法について検討を行った。

2. 水理実験

(1) 実験装置

実験は、図-2に示すような実機に対する縮尺1/10の模型を使用して行った。圧送管は内径25mmのアクリルホースを用いて15m敷設し、その後に拡大部を設けた後、内径35mmのアクリルホースを13m設

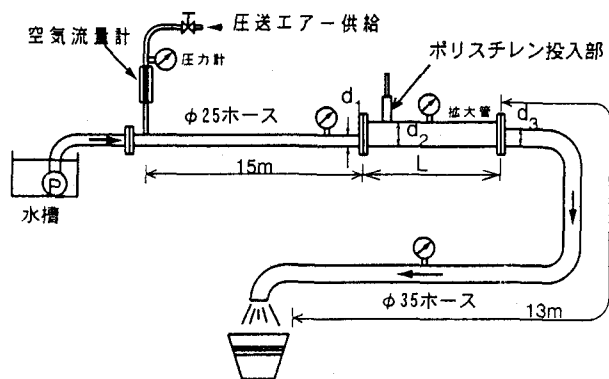


図-2 実験装置

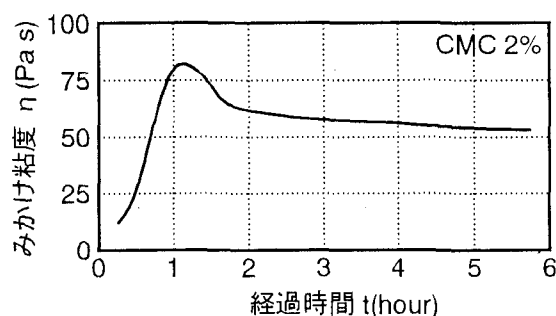


図-4 CMC水溶液のみかけ粘度の時間変化

置いて、流量測定容器に排出した。

拡大部はアクリル管を用いた。ポンプは3.7kwの水中ポンプ、空気圧送のための空気圧縮機は0.75kwのベビーコンプレッサーを用いた。

(2) CMC水溶液

底泥は一般にビンガム流体としての挙動を示すことが知られている²⁾。実験においても浚渫底泥を用いて拡大部内の混合現象を解析することが望ましいが、

- ① 混合過程の可視化が難しい
- ② 有機物含有のため腐敗する

など、実験においての取り扱いが難しい。

そこで、本実験においては底泥と同様の流動特性を有し、無色透明なため実験での取り扱いが容易なCMC(carboxyl methyl cellulose)水溶液を使用することとした。

図-3は、RB110型回転粘度計（東京計器社製）を使用して東京湾泥およびCMC水溶液の流動曲線を計測した結果である。横軸は粘度計のずり速度、縦軸は粘度計軸に作用するずり応力であり、流動曲線の勾配が流体のみかけ粘度 η となる。図中の実線は東京湾で採取された底泥の含水比 W を変化させたとき、破線はCMCの濃度を変化させたときのそれぞれ測定結果である。

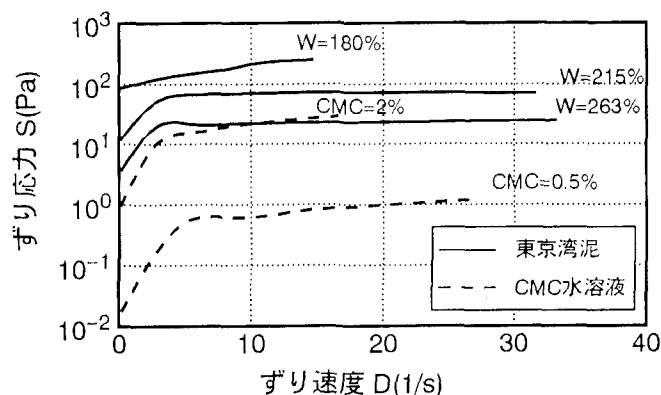


図-3 東京湾泥とCMC水溶液の流動曲線

低・高いずれのずり速度領域においても、両者はともに類似したビンガム流体としての流動曲線を示し、ずり応力はおもに濃度により支配され、本研究で対象とする高ずり速度領域でのみかけ粘度はともにずり速度にあまり関係しないことがわかる。

一方、CMC水溶液は、CMC粉末を混入後流動特性が時間とともに変化する。図-4は、後に示すシリーズ1における2%のCMC水溶液における粉末混入後の経過時間とみかけ粘度 η の関係を示したものである。この結果から、本実験では粘度がほぼ安定する4時間後から実験を開始するとともに、実験開始と終了後に粘度を測定して安定を確認した。

(3) 測定項目と方法

測定は、圧送管流量(Q)と管内のプラグ速度(v_1)、管内圧力(p)、拡大部内の粒子混合度、について実施し、それぞれ以下の方法で測定した。

① 圧送管流量と管内のプラグ速度

圧送管内の流量は吐出口から吐出された流体を容器に取り計測した。プラグ速度 v_1 は、流速計による測定が難しかったことからビデオカメラ（ β カム方式）により測定した。

② 管内圧力

管内圧力は、図-2に示すようにプラグ生成のための圧送エア供給部、拡大部直前、拡大部中央、拡大部後の圧送管中央部(6.5m)の4ヶ所に圧力計を設置し、A/D変換器を通してパソコンに取り込んだ。

③ 拡大部内の粒子混合度

拡大部内の混合度を判別する方法として、流体中に比重1.05、粒径3mmのポリスチレン粒子を投入し、ビデオカメラ（ β カム方式）により可視化する方法を採用した。

混合度合いは、ポリスチレン粒子が鉛直方向に移動した場合を「混合度＝2」と判別し、水平方向にのみ移動した場合を「混合度＝0」として、両者の中間的な状態を「混合度＝1」とした。

(4) 実験ケース

実験は表-1に示す以下の4シリーズについて行

った。シリーズ1は拡大部を設置しない場合について3ケース、シリーズ2は拡大部の形状を変化させた場合について63ケース、シリーズ3は拡大後の圧送管部の径 d_3 を変化させた場合について6ケース、シリーズ4は流体粘度を変化させた場合について22ケース、それぞれ実施した。

すべてのシリーズにおいて、管径、管長等は実際に現地で使用が可能な数値をもとに、縮尺1/10程度を考えてフルード則に基づき決定した。

表－1 実験ケース

シリーズ	拡大部形状 (mm)		圧送管径 d_3 (mm)	CMC濃度 (%)
	管径 d_2	管長L		
1	25	300	35	2
2	50～100	300～1800	35	2
3	50	500～600	40	2
4	50～100	500～1000	35	0.5～1

3. 実験結果と考察

(1) 混合過程の特徴

混合過程を観察した結果、拡大部内で投入した粒子の混合が十分に行われる場合と、粒子の混合がほとんど行われない場合には、それぞれ以下のような特徴が現れることがわかった。

a) 混合が行われるとき

混合は、写真－1に示す状況で生じる。拡大部内に流入したプラグは、拡大部内で一種の跳水現象を引き起こして渦を生じ、投入したポリスチレン粒子を激しく巻き上げている。

図－5 (a)～(c)は、拡大部にプラグが流入するときから流出するときまでの状況を模式的に示したものである。図中、実線は管内の水表面の状況であり、黒点はマーカーとして投入したポリスチレン粒子の動きを示している。

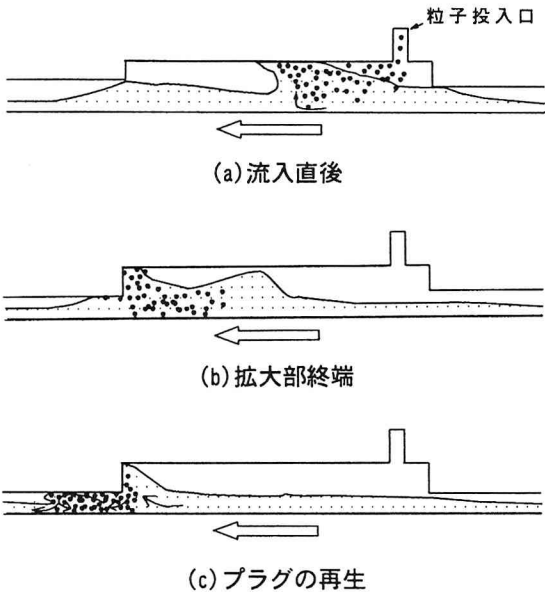
拡大部内に流入したプラグは、一種の跳水現象によって渦が発生するとともに粒子を大きく巻き上げ、

拡大部上面に衝突する（図－5 (a)）。この巻き上げによって、混合作用が行われる。

拡大部終端では、断面急縮の効果により拡大部上部からの流れが再び巻き込まれ、混合がさらに促進される（図－5 (b)）。

拡大部後の圧送管内では、拡大部で崩壊したプラグが再びプラグとして生成され、粒子が十分に混合された状態で輸送される（図－5 (c)）。

以上のことから、拡大部は大きな循環をつくる領域として機能しているものと考えられる。

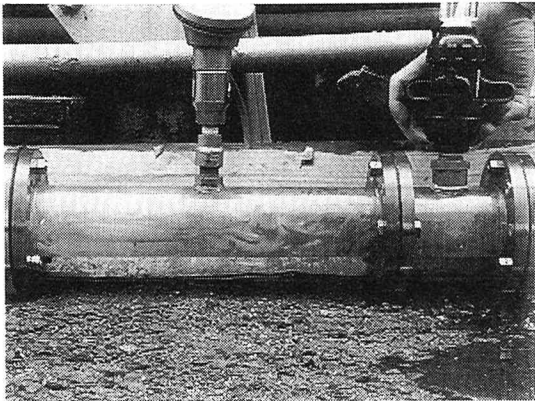


図－5 混合時の拡大部内の特徴（模式図）

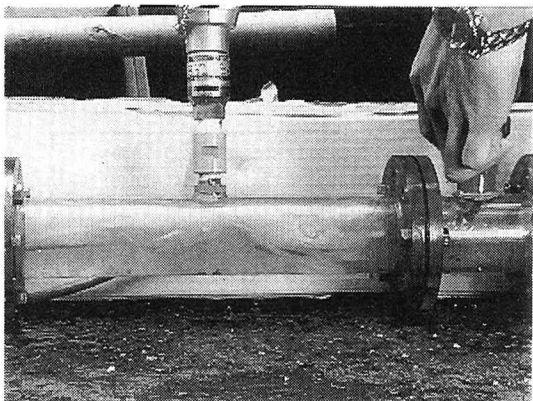
b) 混合が不十分のとき

投入した粒子の混合があまり行われないとき、拡大部内では写真－2の状態を示した。拡大部内に流入したプラグは、混合されるときのような跳水現象を起こさず、拡大部内に滞留していた流体上を波動運動として伝搬する。

拡大部内のプラグの流入・流出状況を模式的に示したものが、図－6 (a)～(c)である。プラグが拡大部に流入した直後、管内に投入した粒子は水平方向に輸送されるものの、鉛直方向の混合はほとんど見



写真－1 拡大部内の状況（混合時）



写真－2 拡大部内の状況（非混合時）

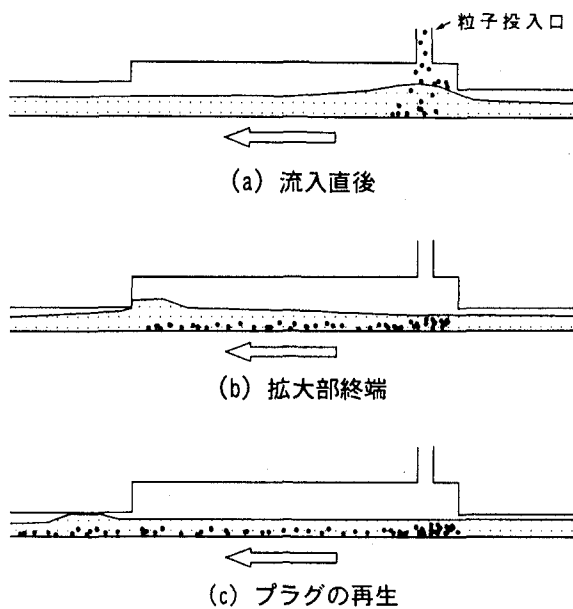


図-6 非混合時の拡大部内の特徴(模式図)

られない(図-6(a)).

拡大部終端においても、波の頂部が鉛直板によってわずかに乱されるものの、大きな混合はほとんど生じない(図-6(b)).

拡大部後の圧送管内で再びプラグが生成されるものの、投入した粒子は混合が十分に行われず管内下部に固まりとなって輸送される(図-6(c)).

(2) 拡大管の効果

上述したように、管路内に拡大部を設けて粒子を混入しても混合が十分には行われないことがあることがわかった。

そこで、現地における拡大部の設計方法を探るために、拡大部による効果について検討する。

a) フルード数と混合度

混合が「跳水」によって生じるとすれば、現象を支配するパラメータとして次式で示されるフルード数 F_r が考えられる³⁾。

$$F_r = v_1 / \sqrt{gd_1} \quad (1)$$

ここに、 d_1 : 拡大部前の管径、 g : 重力加速度である。

図-7は、本実験でのすべてのケースに対して圧送管(拡大前)のフルード数と混合度との関係を比較したものである。

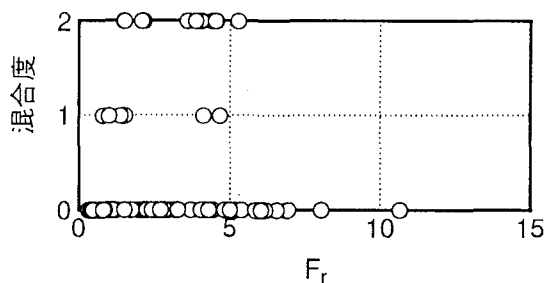


図-7 フルード数と混合度

混合が生じたときは、 $F_r = 1.48 \sim 5.27$ 、非混合時には $F_r = 0.32 \sim 10.65$ であり、混合が生じる明確なフルード数領域は認められない。

b) 流体の粘性とプラグ速度および拡大管形状の影響

実験の結果から、拡大部内での粒子の混合が主に「巻き上げ」によるものであると観察されたことから、混合には流体の抵抗力が影響していると考えられる。

そこで、次式で示されるビンガム流体の粘性と水流の力との比率を表すパラメータを考える。

圧送管内での流速(v_1)、管径(d_1)、流体のみかけ粘度(η)、流体の密度(ρ)を用いると、水流れすなわち慣性力と抵抗力すなわち粘性力の比率として式(2)で示される無次元指標を導入する。

$$R_\eta = \rho v_1 d_1 / \eta \quad (2)$$

式(2)の無次元指標は、満管状態の清水ではレイノルズ数となるが、本研究の場合にはプラグ流・ビンガム流体としての「みかけのレイノルズ数」と言える。

一方、拡大部の設計には、混合に効果的な管径と管長が必要となることから、拡大部の管径を d_2 、管長を L として、混合・非混合時の拡大管径比(d_2/d_1)、拡大管長比(L/d_2)の影響を調べる。

表-2は、混合・非混合時の R_η 、フルード数 F_r 、拡大管径比、拡大管長比を整理したものである。

表-2 混合・非混合時の特性

項目	数値		備考
	混合	非混合	
R_η	414~2331	21~381	
F_r	1.48~5.27	0.32~10.65	
拡大管径比	2~3	4	$R_\eta > 500$
拡大管長比	6~14	16~18	$R_\eta > 500$

無次元指標 R_η が400~500を越えると十分に混合が行われ、拡大管径比では2~3、拡大管長比では6~14の範囲とすることが効果的であることが認められる。

図-8は、同一の拡大部形状($d_2/d_1=2$, $L/d_2=10$)

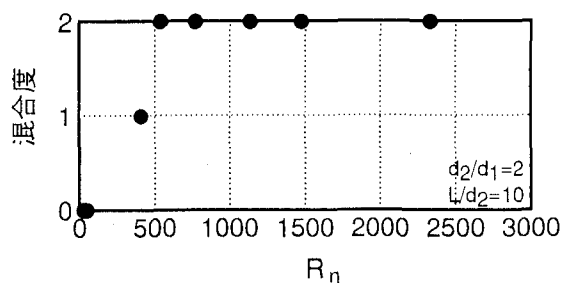


図-8 R_η と混合度

に対する混合度と無次元指標 R_η との関係を示したものである。これによると、混合の遷移領域が $R_\eta \approx 400$ で存在することから、安全を考えると無次元指標 R_η を約500以上にすることによりほぼ十分な混合が得られるものと考えられる。

4. 現地実験

(1) 実験概要

模型実験の成果を確認するため、実際に底泥の埋立を行っている現場で拡大部を用いた混気圧送中に固化材を添加する固化処理実験を行った。

表－3 現地底泥の土質特性

項目	数値
含水比(%)	160～220
中央粒径(μm)	5.5～10.0
強熱減量(%)	7.7～7.9
pH	8.3～11.5

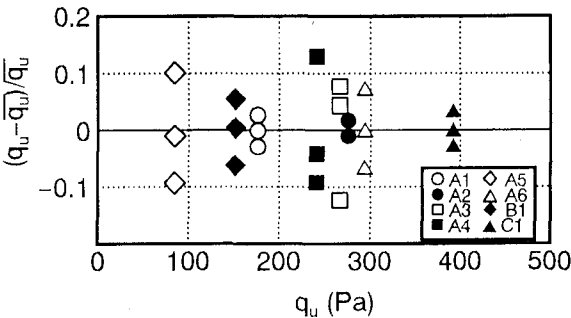
外径400mmの鋼管を150m敷設した後に、長さ5.0m、外径810mmの鋼管杭を拡大部として設置し、その後は内径610mmの鋼管を150m敷設した。吐出した混合土は一度貯泥槽に排出し、不整地運搬車により埋立現場へ輸送した。浚渫底泥の土質特性を表－3に示す。

(2) 実験結果

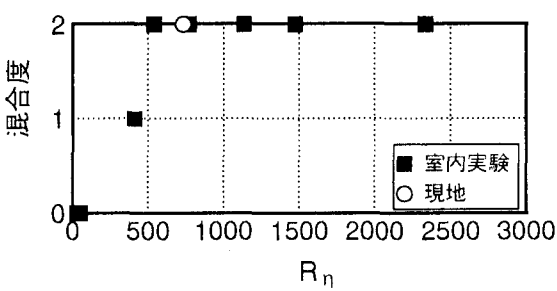
現場における固化材の混合効果を確認するため、3本の供試体の一軸圧縮強度 q_u を測定した。供試体は、貯泥槽から採取した混合土を3本のモールド($\phi 50\text{mm} \times L100\text{mm}$)に移して作成した。

図－9は、個々の供試体の値を3本の供試体の平均値 $\overline{q_u}$ で除してデータのバラツキを比較したものである。凡例記号A～Cは、固化材の添加量等の違いを示す。

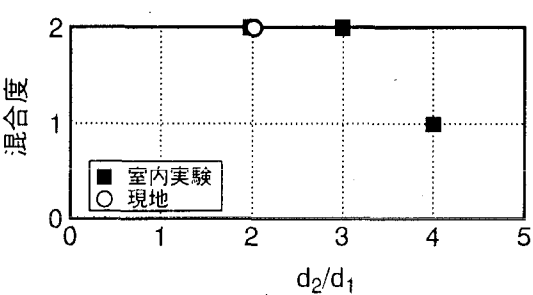
3種類の供試体の強度範囲は10%以下と、従来のミキサー等による方法と同程度の範囲であり、固化材の均一性が高いことがわかる。このときの無次元



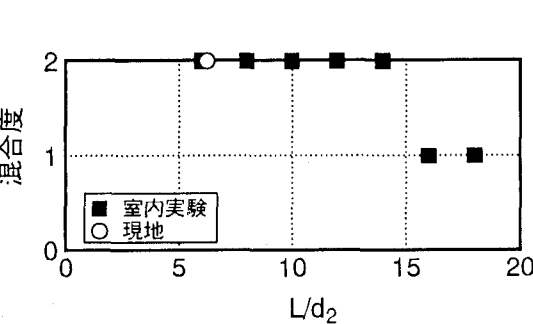
図－9 一軸圧縮強度のバラツキ



図－10 無次元指標 R_η



図－11 拡大管径比



図－12 拡大管長比

指標 R_η ，拡大管径比，拡大管長比を模型実験の結果と比較したものが図－10～12である。

図－10において、現地実験の無次元指標 R_η は734であり、模型実験において十分な混合度を得られた $R_\eta > 500$ の条件を満たし、現地においても良好な混合が得られたことを示している。

図－11，12では、現場実験での条件から拡大管径比は2、拡大管長比は6.25であり、いずれも模型実験での最適化の範囲内となっている。

以上のことから、模型実験から得られた混合時のパラメータとしての無次元指標 R_η ，拡大管径比，拡大管長比が重要であり、これらを模型実験結果の範囲内に設計することにより、現地においても十分な混合効果が得られるものと考えられる。

5. おわりに

混気圧送方式による底泥輸送において、途中に拡大部を設けて効果的に固化材を混合する方法を実験的に検討した。

実際の施工への適用を考えて、実験では特に混合・非混合時のメカニズムの違いに着目し、混合時のパラメータとして、無次元指標 R_{η} ，拡大管径比，拡大管長比が重要であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 荒川敏雄・泉信也：高濃度軟泥圧送船「TOTRA」の開発，マリンボイス21，No.173，pp.50-58，1973.
- 2) 大坪国順：底泥の物性及び流送特性に関する実験的

研究，国立公害研究所報告，No.42，177p，1983.

- 3) 林泰造：基礎水理学，鹿島出版会，310p.，1996.
- 4) 植田辰洋著：気液二相流，355p，1981.
- 5) 野田佳六：土砂の管路輸送，第22回水工学に関する夏期研修会講義集A，pp.3.1-3.16，1986.
- 6) 土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集，第210号，pp.65-91，1973.

(1997.9.30受付)