

7. シールド掘進用添加剤の開発 (その3)

溝口 義弘
浅田 毅
原田 哲夫*
松本 光浩*

要 旨

前報で、フォームスチレンビーズを使用した加泥剤Aが、土圧系シールドで用いられている掘進用添加剤として有効であることを報告した。

今回、加泥剤Aを用いてポンプ圧送実験を行った結果、性状に変化はみられず、その実用性を確認することができた。また、実験で得られたデータからポンプ圧送に関する計算式を提案した。

キーワード

加泥剤A／フォームスチレンビーズ／圧送距離／ビンガム流体／圧力損失

目 次

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果および考察
4. まとめ

7. DEVELOPMENT OF AN ADDITIVE FOR A SHIELD TUNNEL METHOD (PART3)

Yoshihiro Mizoguchi Tsuyosi Asada
Tetsuo Harada Mitsuhiro Matsumoto

Abstract

In our last paper we reported on mud additive "A" mixed polystyrene beads for use in earth pressure balanced shield.

This paper deals with the possibility of using additive A as excavation additive. Results of a test using the additive in pumped slurry showed that no changes in performance and reconfirmed the applicability of the additive. We have also proposed an equation for pump force-feed based on the data obtained during the test.

* 大阪本店土木部機械課

1. はじめに

前報の基礎実験で、従来の掘進用添加剤に代わって開発を進めてきた加泥剤Aが、掘削土の流動性、圧縮性および止水性を改良できることを確認したが、さらに、実施工においてもその改良効果を実証することが必要であり、その実施に際し、加泥剤Aの圧送方法（管路輸送）および切羽への注入方法等について検討する必要がある。

これまで、土砂、コンクリートなどのポンプ圧送に関する研究と実験は数多く行われているため、圧送に関する経験式、実用式はある程度確立されているが、粘土にフォームスチレンビーズを混合した加泥剤のポンプ圧送に関するものは全くない。本研究は、この状況をふまえ、加泥剤Aを用いてポンプ圧送実験を行い、その性能および実用性について問題がないことを確認しようとしたものである。

実験の結果、加泥剤Aを用いても800m以上のポンプ圧送が可能であることを確認した。また、得られたデータを解析して加泥剤Aに関する圧送計算式を確立することができた。

2. 実験概要

(1) 目的

加泥剤Aをポンプ圧送したときの管内圧力、圧送距離およびその性状を調査し、ポンプ圧送が可能かどうかを確認する。

(2) 実験仕様

圧送距離	最大 729m
圧送管径	φ50 (2 B) mm
装置仕様	
圧送機	スクイーズ式ポンプ
ミキサー	MS-750 (島津産業機械)
アジテータ	2.5m ³ (同上)
圧力ゲージ	隔膜式 (最大 15kgf/cm ²)

2.1 加泥剤の配合と性状

加泥剤Aはビーズ、粘土およびCMCを練混ぜたものである。表-1にその使用材料の性質を示す（以下、加泥剤A、B、Cは実験に用いた試料名とする）。

実験で使用した加泥剤の配合を表-2に示す。配合割合は、前報の性状試験と同じ配合である。実工事では土質、圧送条件（管径等）、工事の規模などによって状況が異なるため、ビーズの大きさが異なる加泥剤

A、Bを用いた。加泥剤Cは従来から使用されている標準型の掘進用添加剤である。

各加泥剤の性状を表-3に示す。フロー値は、スランプ試験でスランプの測定が不能となったため行ったものであり、試料の広がり度合を表すものである。

表-1 使用材料

粘 土	笠岡産
CMC	メチルセルロース系の増粘剤
ビーズ	ポリスチレン樹脂の球体発泡

表-2 加泥剤の配合

試料名	粘 土	CMC	ビ ー ズ
加泥剤A	○	○	○ (φ7~8mm)
加泥剤B	○	○	○ (φ2~3mm)
加泥剤C	○	○	×

○印：使用
×印：不使用

表-3 加泥剤の性状

試 料 名	含 水 比 (%)	単位体積重量 (g/cm ³)	フロー値 (%)
加泥剤A	90	1.18	125
加泥剤B	92	1.01	168
加泥剤C	200	—	350

2.2 圧送用ポンプと配管状況

(1) 圧送用ポンプ（以下、ポンプと呼ぶ）

ポンプの選定にあたっては、添加土（粘土）とビーズの比重差、ビーズ自体の圧縮性、長距離輸送等を考慮し、従来から使用されているスクイーズ式ポンプ（新明和工業㈱製のモルタル搬送機）を採用した。

表-4に実験で使用したポンプの型式と能力を示す。

表-4 ポンプの型式と能力

型 式		MM180
吐 出 量		4, 7, 10m ³ /h
最 大 搬送距離	水 平	160m (330m)
	垂 直	36m (78m)
動 力	ポンプ	7.5kw
ポンピングチューブ内径		φ65mm

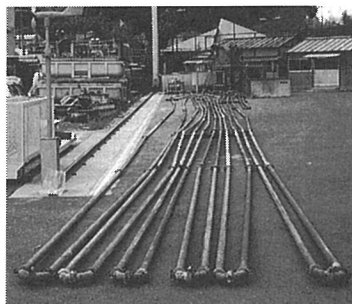
() 内はφ80の配管

(2) 配管状況

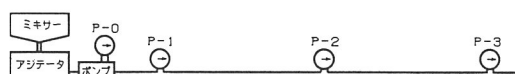
圧送管は、1本5.5mの鋼管を使用した。写真-1のように数カ所のリターン部を設け、圧送後の試料をアジテータに戻して再使用できるように配管した。配管場所は平地で実揚程は無い。そして、圧送距離を変える場合は、配管の途中を短絡して調整した。

管内圧力は、ポンプと配管部分（3カ所）の圧力ゲージで測定した。圧力ゲージ取付け位置を図－1に示す。

実験装置を写真－2に示す。



写真－1 配管状況



圧送距離 L (m)	P－0 (m)	P－1 (m)	P－2 (m)	P－3 (m)
325.85	0	12	165	319
527.35	0	12	319	477.5
171.85	0	12	83	84
195.85	0	12	87.5	97.5

図－1 圧力ゲージの取付け位置



写真－2 実験装置

2.3 実験方法

加泥剤の圧送能率を調べるためには、圧送距離、ポンプの吐出容量を決めておく必要がある。表－5にその必要なポンプ圧送実験の条件を示す。また、表－6にその測定項目を示す。表－6の③は、圧送中の各装置の負荷状態を確認するためのものである。⑤は、曲管部分の摩擦損失係数の増加により、管内が閉塞する恐れがあるかどうかを確認するためのものである。

実験は、加泥剤をあらかじめポンプで送り、配管内に加泥剤が充填されてから、一定間隔おきに圧力、電流値および流量を測定し、試料採取を行った。

表－5 実験条件

圧送距離 L (m)	325.85 , 527.35
ポンプの吐出容量 (m ³ /h)	10 , 7

表－6 測定項目

① 管内圧力	4箇所の圧力ゲージ
② 流量	管先端部分の流量計
③ 電流値	ポンプ, ミキサ, アジテータ
④ 材料性状	圧送前後の試料の状態
⑤ 曲管の影響	曲管前後の圧力ゲージ

3. 実験結果および考察

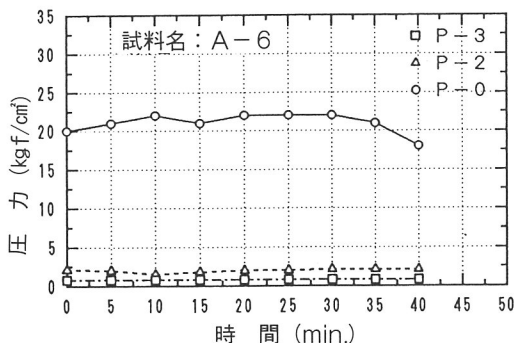
3.1 実験結果

3.1.1 圧送中の圧力変動と流量

図－2－1, 2, 3は、圧送距離L=527.35mのときに、加泥剤A, B, Cを圧送したときの圧力状況を示したものである。圧送中、各加泥剤とも圧力変動は少ない。また、ポンプ等の電流値（負荷）も一定であった。他の実験条件についても同じ傾向を示した。さらに、一時ポンプ圧送を中断（1時間程度）し圧送を再開しても、圧力、電流値とも中断前の状況と変わらなかった。

表－7は、実験結果をまとめたものである。

各加泥剤を、圧送距離L=527.35mで送ったときの管先端部の流量変動を図－3に示す。いずれの場合も流量変動は少ない。図－4は、圧送距離と流量の関係である。流量は圧送距離に応じて順次低くなり、距離が長くなると傾きは小さくなる。加泥剤A, Bの流量はほぼ等しい。



図－2－1 圧力変動 [加泥剤A 圧送距離L=527.35m]

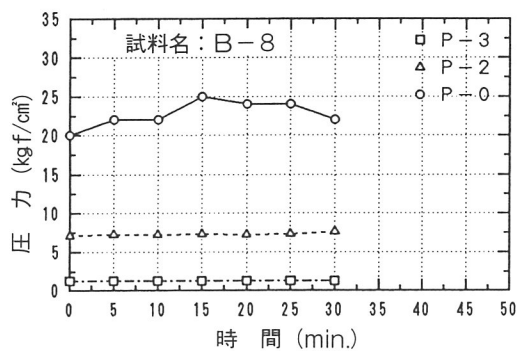


図-2-2 圧力変動 [加泥剤B 圧送距離L=527.35m]

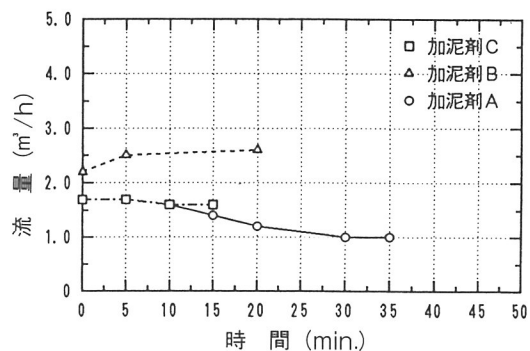


図-3 流量変動 [圧送距離L=527.35m]

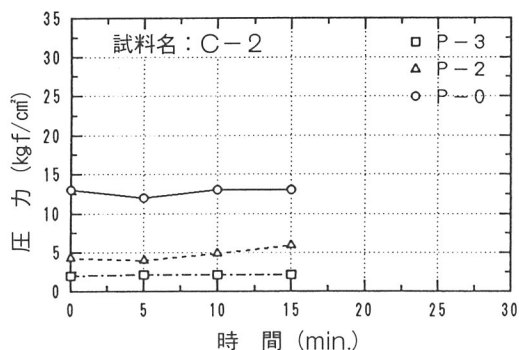


図-2-3 圧力変動 [加泥剤C 圧送距離L=527.35m]

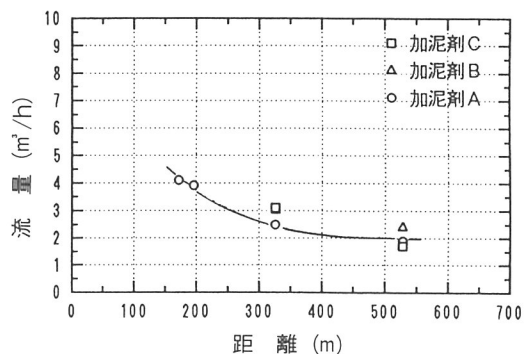


図-4 距離～流量の関係

表-7 圧送実験の結果

No.	試料名	圧送距離 L (m)	P-0 (kgf/cm ²)	P-1 (kgf/cm ²)	P-2 (kgf/cm ²)	P-3 (kgf/cm ²)	流量 (m ³ /h)
A-1	加泥剤A	325.85	24	*	1.8	0.5	2.5
A-2			22	*	1.3	—	
A-3			20	*	0.9	0.0	
A-4		527.35	24	*	4.4	1.1	1.9
A-5			26	*	7.1	—	
A-6			22	*	2.1	0.8	
A-7		171.85	13	—	6.0	6.7	4.1
A-8		195.85	14	—	6.5	5.5	3.9
B-1	加泥剤B	325.85	18	*	0.2	0.0	3.0
B-2			22	*	1.9	1.0	
B-3			20	*	2.7	1.0	
B-4			22	*	2.9	0.9	
B-5		527.35	18	*	2.6	0.8	2.4
B-6			26	*	5.2	0.8	
B-7			20	*	7.2	1.2	
B-8			25	*	7.6	1.3	
C-1	加泥剤C	325.85	13	12	8.1	0.1	3.1
C-2		527.35	13	11	5.9	2.1	1.7

*印：測定不能

3.1.2 圧送後の材料性状

圧送後の加泥剤A, Bの性状は、圧送前に比べ、含水比についてはほとんど変化はなく、加泥剤に含まれるビーズの割合については多少小さ目である（その割合は、加泥剤がアジテータからポンプに吸い込まれる過程を工夫すれば変わらないだろう）が、流出してくる試料の品質は一定している。

3.1.3 曲管の影響

図-5は、配管が直管のみの場合（No.A-8）と折り返し部（曲管3カ所）がある場合（No.A-7）について、加泥剤Aを圧送したときの管内圧力分布を示したものである。直管と曲管の圧力分布は同じ傾向を示す。したがって、曲管部分での圧力損失の増加はない（曲管部分の摩擦損失係数は無視する）。おそらく、ビーズのベアリング効果があらわれたからだと思われる。

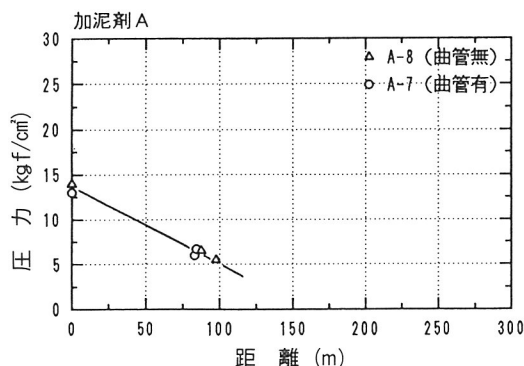


図-5 管内圧力分布

3.2 考察

3.2.1 管内圧力損失

図-6-1, 2は、圧送時の加泥剤別の管内圧力分布を示す。横軸の距離はポンプからの距離である。各加泥剤ともに管内圧力は距離に対して順次低くなる。加泥剤Cの圧力勾配はほぼ一定であるが、加泥剤A, Bは圧送条件にかかわらず距離の短い範囲で圧力降下の大きいことを示している。図-6-3は、加泥剤A, Bの管内圧力分布をまとめたものである。加泥剤A, Bはほぼ同じ傾向を示し、圧送距離が長くなると曲線は右上に移動する。

図-6の圧力分布を基にして圧力損失の状況を図-7に示す。横軸は全圧送距離Lに対する圧力測定地点までの距離の比をとったもので、縦軸の圧力損失は各

加泥剤の平均値をプロットしたものである。ポンプ圧送の際、ビーズの大きさにより圧力損失が異なると予想されたが、ビーズの大小にかかわらず距離比に対する圧力損失は同じであった。それは、ビーズがある大きさに圧縮された状態で圧送されたものと考えられる。

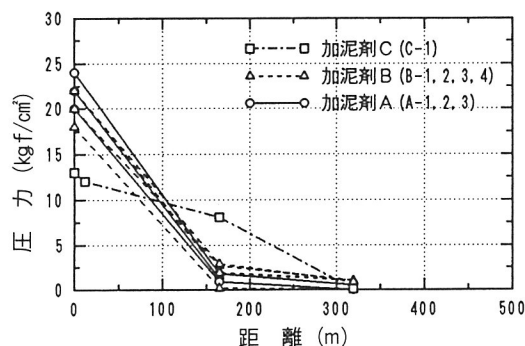


図-6-1 管内圧力分布 [圧送距離L=325.85m]

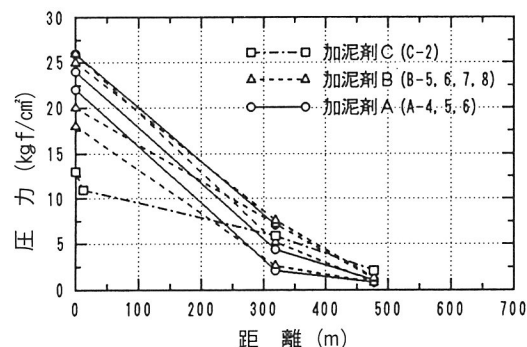


図-6-2 管内圧力分布 [圧送距離L=527.35m]

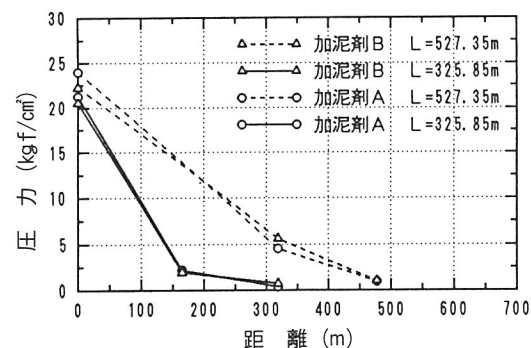


図-6-3 管内圧力分布

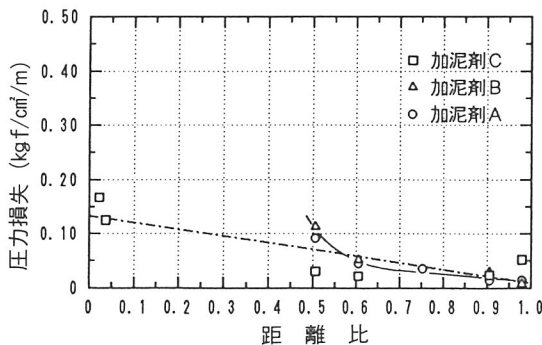


図-7 圧力損失

3.2.2 圧送距離

実験での最大圧送距離は 729mであり、これ以上の加泥剤の圧送距離については推定する。加泥剤A, Bは、距離比に対する圧力損失および流量が同じであるため、ここでは、加泥剤AとCの圧送距離について推定する。

圧送距離に関与する要因としては、加泥剤と管との摩擦、加泥剤の流動性、圧縮性、流速などが挙げられる。これらの影響は、総合的にポンプの圧力として現れると考えられる。図-6の管内圧力分布と図-7の圧力損失を基にして圧送距離に対する圧力損失の関係を示したのが図-8である。加泥剤Aは、放物線を描くようであるが、今回、圧送距離 250m前後で折れ曲がる二つの直線で近似した。圧送距離 250mを境に加泥剤Aの流動状態（模様）が変化し、250m以上になると、加泥剤Aの流動特性が発揮され、圧力勾配が低下する傾向にある。

流量（図-4）についても、圧送距離 250m前後で変曲点がみられる。

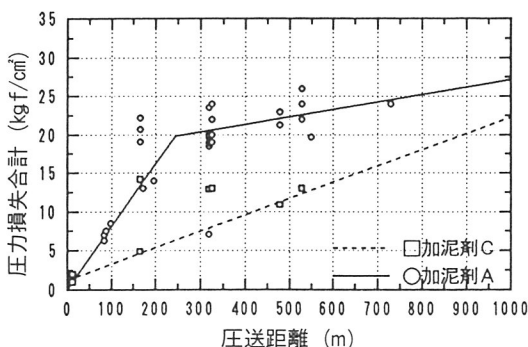


図-8 圧送距離～圧力損失の関係

3.2.3 圧送計算式

管路に水のようなニュートン流体を流す場合には、水理学において確立した解析が示されている¹⁾。つまり、ニュートン流体の圧力損失Pは式(1)で求められる。

$$P = \gamma \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots (1)$$

ここに、 γ ：液体の比重量

f ：摩擦損失係数

L ：管 長

D ：管 径

V ：管内平均流速

g ：重力加速度

一方、粘土水、泥水等はビンガム流体として扱われているため、加泥剤Aはビンガム流体として取り扱うこととする。伊藤氏²⁾は、比栓半径 a の関数を導入して層流域から乱流域にわたって、ニュートン流体の管路摩擦抵抗則と同一の関数になるビンガム流体に関する摩擦係数とみかけレイノルズ数を提案しているが、式(1)をビンガム流体に適用すると、式(2)が得られる。

$$P_B = \gamma \cdot f_B \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots (2)$$

ここに、 f_B ：ビンガム流体での、式(1)中の f に相当するもの

ここで、加泥剤Aの圧力損失を、式(2)で計算し、実験結果と比較してみる。

式(2)で圧力損失を計算するには予め、 f_B 、 V を求めておく必要がある。平均流速 V は、式(3)から求められる。

$$V = \frac{Q}{\pi r^2} \quad \dots (3)$$

ここに、 Q ：流 量

r ：半 径

さらに、 V は式(4)の関係がある。

$$V = \frac{r \cdot \tau_{yB}}{\mu_B} \cdot \alpha \quad \dots (4)$$

$$\alpha = \frac{a^4 - 4a + 3}{12a} \quad \dots (5)$$

ここに、 τ_{yB} ：降伏値

μ_B ：ビンガム流体の粘度

a : 比栓半径

そして、二つの流量 Q_1 、 Q_2 の場合の管長 L 間の圧力降下をそれぞれ P_1 、 P_2 、比栓半径を a_1 、 a_2 とすれば、式(6)、(7)の関係がある。

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad \dots (6)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad \dots (7)$$

式(6)、(7)から、比栓半径を求め、 τ_{yB} は式(8)から、 μ_B は式(4)からそれぞれ求める。

$$\tau_{yB} = \frac{P_1}{2L} \cdot a_1 \cdot r \quad \dots (8)$$

次に f_B は、ビンガム流体の管路流動のときのレイノルズ数から求める。すなわち、レイノルズ数 Re_B は、式(9)の関係がある。

$$Re_B = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu_B} (1-a) 4a \alpha \quad \dots (9)$$

ここに、 ρ : 密度

そして、図-9から f_B を読みとる。このようにして求めた V 、 f_B を式(2)に代入して圧力損失を算出する。

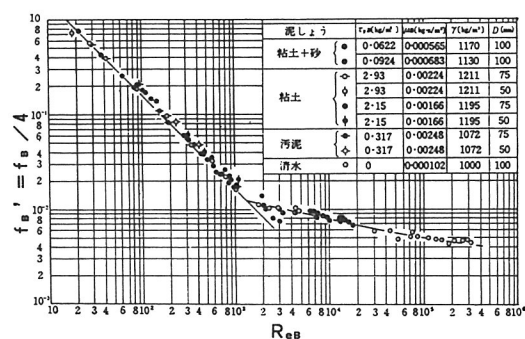


図-9 管摩擦係数

式(2)で計算した圧力損失と図-8の実験結果に差異があるので、実験係数を導入する。加泥剤Aの圧力損失 P は、以下になる。

(i) 圧送距離 $L \leq 245m$ の場合

$$P = 0.717 \cdot \gamma \cdot f_B \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots (10-1)$$

(ii) 圧送距離 $L > 245m$ の場合

$$P = 16.9 + 1.238 \cdot \gamma \cdot f_B \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots (10-2)$$

今回の実験は管径50mmのもので行ったため、式(10-1)、(10-2)は、管径が異なるときには異なった計算式になると考えられる。今後、管径の異なった条件下でのデータを取得し、あらゆる管径に対応する計算式を確立していきたいと考える。

4. まとめ

本実験結果から以下のことがわかった。

- ① 加泥剤Aをポンプ圧送している間、管内圧力、流量および電流値に変動はなく、圧送前後の品質にはほとんど変化はみられない。
- ② 加泥剤Aは、800m程度まで圧送が可能である。
- ③ ビーズの大小にかかわらず距離比に対する圧力損失、流量は同じである。
- ④ 加泥剤Aの圧力損失と流量の特性は、圧送距離245mを境にして変化する。また、管径50mmの場合、加泥剤Aの圧力損失は、式(10-1)、(10-2)で表される。

今後、実工事などを通じて管径、圧送距離などの異なった条件での圧送データを取得し、加泥剤Aのポンプ圧送に関する資料を補強し、精度を高めていく必要がある。

最後に、本開発を進めるにあたり、多大の御協力を戴いた巧友テクノス(株)野村義浩氏と菅機械工業(株)広田義信氏はじめ関係者各位に謝意を表します。

- 1) 寺田 進; 固体混合液の管路輸送、理工図書、1973.
- 2) 伊藤四郎; 塑性流体の流れ、新化学工学講座V-1、日刊工業新聞社、1961.