

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 60 Sept. 1968

高压噴流の構造に関する実験結果，及び

モルタル試料掘削実験結果について

……………藤 井 喜一郎・守 口 照 明・近 藤 基

金沢港におけるポンプ船試験報告

(ブースタポンプを使用した長距離輸送について)

……………八 木 得 次・宮 崎 昭 児・是 石 昭 夫

運輸省港湾技術研究所



総 目 次

高圧噴流の構造に関する実験結果, 及び モルタル試料掘削実験結果について.....	藤井喜一郎・守口 近藤 基	照..... 3
金沢港におけるポンプ船試験報告 (ブースタポンプを使用した長距離輸送について)	八木 得次・宮崎 是石 昭夫	昭児.....45

『高圧噴流の構造に関する実験結果，及びモルタル 試料掘削実験結果について』

目 次

要 旨

1. ま え が き	2
2. 噴流の構造に関する実験結果について	4
2.1 噴流の基本的構造について	4
2.2 実験及び実験装置	4
2.3 実験結果	5
3. 噴流によるモルタル試料掘削実験結果	23
3.1 試験装置	23
3.2 ノズルを固定させた場合の掘削実験結果	24
3.3 モルタル試料移動掘削実験結果	29
3.4 ノズルに首振り運動を与え，かつ移動させて掘削させた実験結果	32
4. ま と め	38
参 考 文 献	39
附 録	40

**Results of Experiments on the Structure of High Pressure
Submerged Water Jets and on the Excavation Test by them**

Kiichiro FUJII*

Teruaki MORIGUCHI*

Motoi KONDOU**

Synopsis

With the large scale of dredging and reclamation works in port and harbour constructions in recent years, it has become more and more difficult for the present pump-dredgers to carry out dredging at hard strata of sea-bottom or the bottom of deep sea. So the need of new method of dredging and improvement of dredging apparatus in dredgers has become pressing.

To meet these requirements, high-pressure water jets may bring about effective dredging operation, if we use them for the excavation of hard strata and hard rock.

In the first half of this technical note, we present the results of experiments on the fundamental structure of water jet with the pressure of 40~50kg/cm², spread out into water tank, and analyzed them comparing with the data of experiments carried out by other researches hitherto. And in the latter half, we showed excavation test by water-jet for the mortar test-pieces, changing the way of excavation, and excavation time by water jets. And some data on the excavated depth, excavated volume, and excavation limits were gained.

Through the results of these experiments, the test-pieces, the compressive strength of which are about two times of the pressure of water jets are proved to be crashed by submerged water jet. But as these result are limited only to the test-pieces we made this time, we must make further deep study on the crash condition of each rock by submerged jets.

* Member of Researcher of Dredging and Construction Equipment Laboratory.

** Former Chief of Dredging and Construction Equipment Laboratory.

≡ 高圧噴流の構造に関する実験結果、及びモルタル 試料掘削実験結果について ≡

藤 井 喜 一 郎*

守 口 照 明*

近 藤 基**

要 旨

近年、港湾工事における浚渫埋立作業の大規模化、複雑化にともない、従来の浚渫船等による浚渫は、高深度及び硬土盤などにおける作業がますます困難になり、新たな作業方法及び浚渫装置の改善の必要性が生じるようになった。殊に硬土盤、岩盤などの圧縮強度の比較的高い地層での掘削作業は、従来の機械的なカッター、ディパーなどによる掘削方法では不可能であるため、高圧の噴流水を用いて破壊する方法が考えられるようになり、またかなりの効果的な掘削作業を期待されると思われる。

本資料では、圧力40~50kg/cm²程度の噴流を用いて実験室内の水槽の中で噴流させられた噴流の基本的な構造についてまず実験、解析し、従来の研究報告と比較、調査し、次に各種の圧縮強度の模型モルタル試料を使用して実際の浚渫作業への応用を考慮しつつ、噴流による掘削方法や掘削時間を変化させた場合について、掘削深さ、掘削量、掘削限界などについて実験し、調査した。

今回の実験の結果、使用したモルタル試料だけに関しては、噴流の圧力の2倍前後の圧縮強度を持つ試料の破碎が可能であった。しかし、これは特殊な条件下における試料についての結果であるために、噴流による岩盤の破碎条件に関して、なお今後深く検討しなければならない。

1. ま え が き

現在各地の浚渫埋立工事には従来までの浚渫船では著しく困難、または不可能な程の圧縮強度の高い岩盤、硬土盤のある地点で掘削作業を余儀なくされている。また、これらの場所では、発破による破碎方法も漁業補償等の障害のため円滑には行えず、結局従来の機械的または物理物作業方法を更に発展させた種々の方策を考ねばならなくなった。そこで考えられたのが高圧水による岩盤の破碎方法で、無限にある海水に高圧ポンプにより破碎用のエネルギーを与えて岩盤を破碎する方法で、破碎用に使用されるノズルの摩耗、破損が小さいという利点があり極めて有効な方法と考えられる。水流により岩石を破碎させる試みは、空中ではすでにソビエト連邦で石炭掘削などに応用されて実用化されておるが、水中での噴流水による岩盤掘削への応用に関する研究は数少ない。そ

こで当研究所機材部作業船研究室では、数年前より、この開発を進めて来たが、噴流の吐出圧力を40~50kg/cm²までに高め、水中における噴流の掘削特性などを調査してきた。本資料では噴流による岩盤破碎機構、及び破碎過程を明らかにするために、まず前半においては水中における噴流の基本的な構造を調査した。噴流の構造そのものに対する研究は、今世紀になり、Tollmien, Goetler, Abramovich, Zimm, 等の多数の研究者によりその理論的構造が明らかにされており、実験的にも確かめられておるが、Tollmien 等の行った実験は空気の噴流の実験で、しかもノズル出口附近における流速が30m/sec前後のものである。今回行った実験では、ノズル出口速度がほぼ90~100m/sec前後のもので、ノズル径を変えた

* 機材部作業船研究室研究員

** 前機材部作業船研究室室長

場合について上記研究者達の理論値が適応出来るかどうか、比較、検討してみたものである。また後半では、掘削実験用として数々のモルタル試料を製作し、その破碎状況、結果などを調査した。しかし、前半の噴流の構造に対応する掘削現象について理論的に解析を試みようとしたが、破碎そのものが複雑であるため、今回は単なる掘削結果だけを図示するに留めた。また実験条件は極めて限られた条件であったので、その結果もまたある特定の結果であることはやむをえなかった。

なお、本資料では、港湾技術研究所報告3巻5号「ジェット掘削に関する研究」(その1)の研究者達の指導のもとに、その研究のあとをひきつぎ、その報告では、やわらかい土砂の掘削に関する研究を主としたものに対し、今回はあくまで硬土盤の掘削を目的とする実験の報告であり、やわらかな土砂をこの程度の圧力水で水中で掘削、拡散させた場合についての実験は行っていない。

2. 噴流の構造に関する実験結果について

1) 噴流の基本的構造について

噴流はほぼ2つの領域に分れており、その一つは核領域で、他の一つは混合領域である。核領域とは、ノズル口より噴出させられた流体がその噴出口での速度 U_0 を流出方向に維持しうる領域を意味し、混合領域とは、噴流境界層(噴出させられた流体により共に運ばれた周囲の流体分子より構成されている)が厚くなり、かつ非粘性の核部分を徐々に浸蝕している領域である。殊にノズル口により核部分を生ずる噴流の区域を流れの方向に初期区域と称し、次に噴流全体が混合領域で占められ、ある程度下流域になると、明らかにその速度分布がある相似性を持った領域が存在し、これを主領域と称し、初期区域と主領域の間に、はっきりした相似性の見られない領域があり、これを遷移領域と称する。Kuethe はこれをそれぞれA, B, Cの領域とした。(図-1 参照)以下これに順することにする。

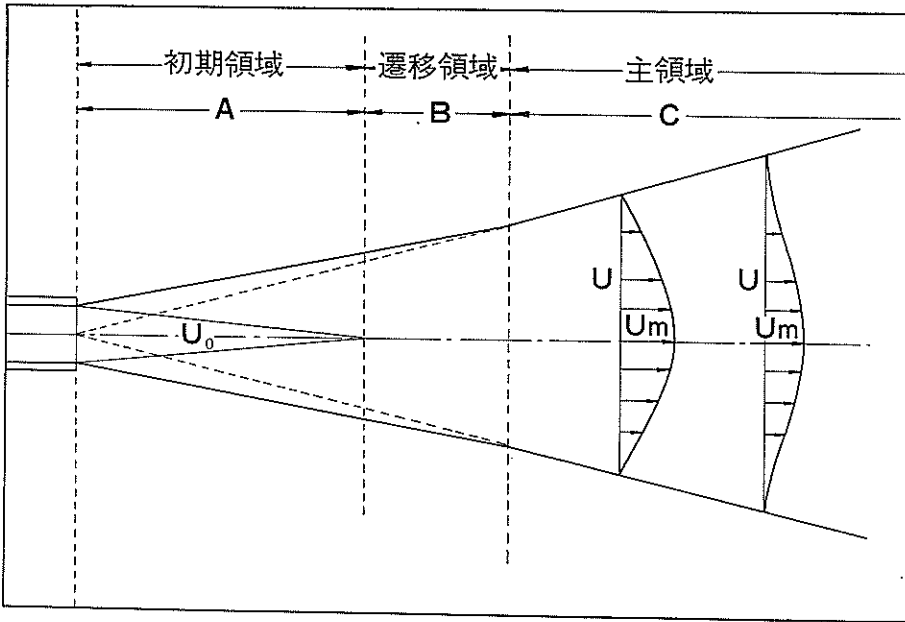


図-1 噴流の基本的構造図

2) 実験及び実験装置

上記の従来までの噴流の理論的構造を確認する目的で、我々は次のような実験装置で実験を試みた。本実験には、噴流発生装置として、10段タービンポンプ(吐出圧力40 kg/cm², 流量 625 l/min, 回転数 2950rpm)を使用し、加圧された水はノズルに導かれ、ノズルは図-3に示す径、9 mm, 11 mm, 13 mmの3種の異った径のノズル

を使用し、そのいずれにも整流装置をとりつけて均一の噴流が得られるようにした。また水槽は噴流の拡散を測定するに十分な広さをもつようにした。

実験は、ノズル径が9 mm, 11 mm, 13 mmのものを使用した場合に、その出口速度はそれぞれ、103.3 m/sec, 102.2 m/sec, 92.7 m/sec であり、拡散された噴流の流速分布をピトー管(内径1 mmのステンレス製)を用い、

ピトー管の動圧を圧力ヘッドに誘導し、これを電磁オシログラフに記録させ、流速に変換して測定した。測定は流れが定常状態になってから測定を始め、測定にあたりノズル端面の中心を原点とし、これより直角水平方向に

Y軸を定め、ピトー管の水平部をX軸に平行ならしめ、これをY軸に平行に左右に移動させることにより、流速分布の測定をした。

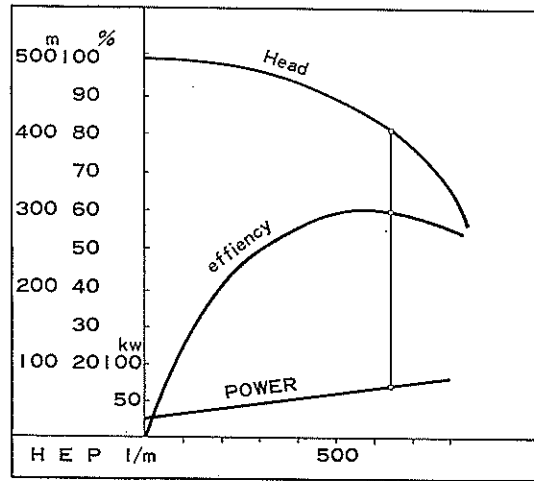


図-2 高压ポンプ性能曲線

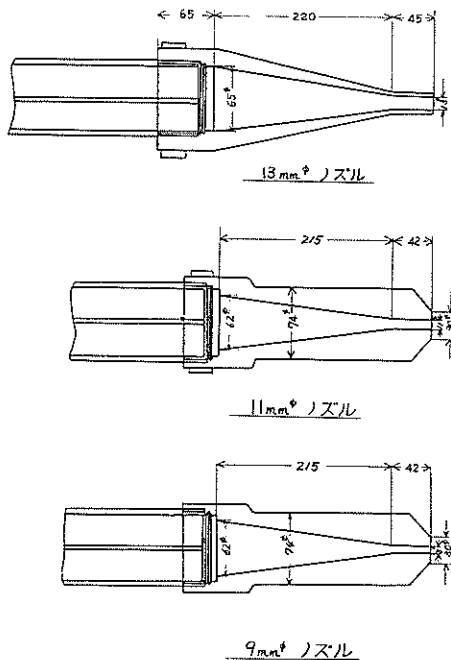


図-3 実験に使用したノズル

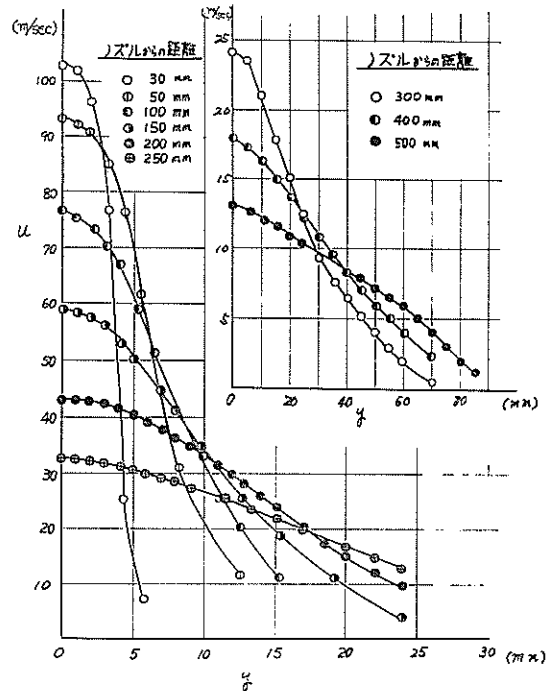


図-4 9 mmφ ノズル速度分布

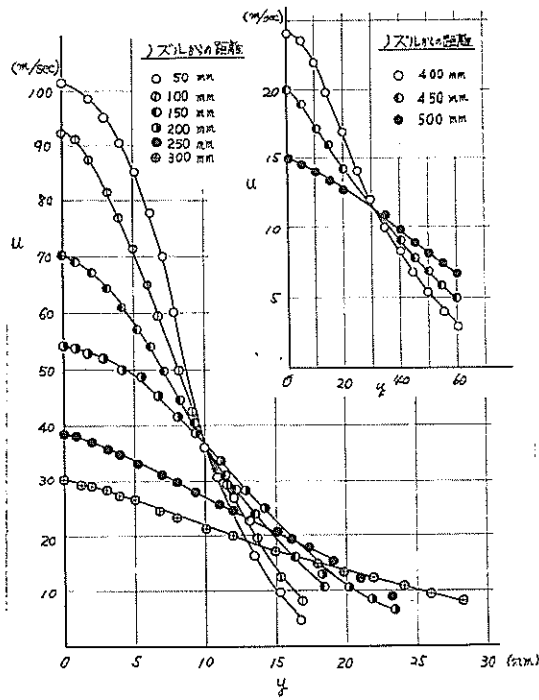
3) 実験結果

次に実験結果を図示する。図-4, 5, 6は各ノズルの

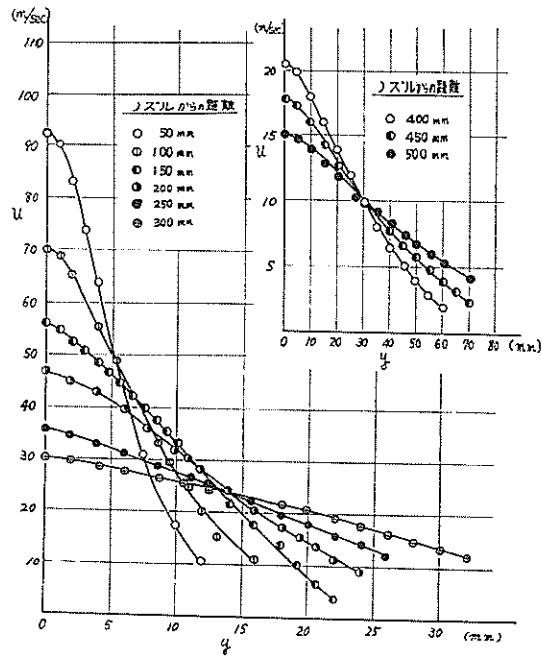
各断面における流速分布状態を示す。これらの図では、x

軸の両側の測定値をY軸の片側に重ねて示したものであ

る。また表—1, 2, 3はそれらの具体的な測定値である。



図—5 11mm ϕ ノズル速度分布



図—6 13mm ϕ ノズル速度分布

表-1 9mm φ ノズル 速度分布表 y = 中心軸からの距離(mm) u = 速度(m/sec)

x = 1 cm		x = 3 cm		x = 5 cm		x = 10 cm		x = 15 cm		x = 20 cm		x = 25 cm		x = 30 cm		x = 40 cm		x = 50 cm	
y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u
5.0	12.9	8.0	15.8	13.0	10.0	15.0	12.0	20.0	11.1	24.0	9.0	27.0	9.0	35.0	6.0	80.0	1.0	80.0	—
4.0	30.3	7.0	22.4	12.0	12.0	14.0	15.0	19.0	12.1	23.0	10.3	26.0	9.5	34.0	7.0	75.0	1.5	75.0	—
3.0	77.8	6.0	31.4	11.0	18.0	13.0	20.0	18.0	16.3	22.0	12.2	25.0	10.0	33.0	8.0	70.0	2.0	70.0	4.5
2.0	96.4	5.0	34.5	10.0	20.0	12.0	22.0	17.0	17.9	21.0	14.3	24.0	10.5	32.0	8.5	65.0	3.1	65.0	5.0
1.0	101.9	4.0	73.2	9.0	26.0	11.0	25.0	16.0	19.8	20.0	16.1	23.0	11.0	31.0	8.7	60.0	4.2	60.0	6.0
0.0	102.8	3.0	88.9	8.0	31.0	10.0	32.0	15.0	21.5	19.0	17.0	24.0	12.4	30.0	9.0	55.0	5.3	55.0	7.0
-1.0	102.0	2.0	97.7	7.0	42.0	9.0	38.2	14.0	22.3	18.0	18.0	21.0	13.0	29.0	9.5	50.0	6.1	50.0	7.5
-2.0	97.3	1.0	101.0	6.0	51.0	8.0	41.3	13.0	25.4	17.0	20.4	20.0	13.3	28.0	10.0	45.0	7.2	45.0	7.8
-3.0	78.0	0.0	101.4	5.0	62.0	7.0	50.8	12.0	28.3	16.0	22.3	19.0	14.7	27.0	10.5	40.0	8.3	40.0	8.0
-4.0	33.0	-1.0	101.0	4.0	76.0	6.0	55.2	11.0	31.4	15.0	25.2	18.0	15.6	26.0	11.5	35.0	9.6	35.0	9.0
-5.0	12.0	-2.0	99.0	3.0	85.2	5.0	59.0	10.0	35.0	14.0	26.3	17.0	17.2	25.0	12.0	30.0	11.1	30.0	9.5
		-3.0	90.0	2.0	91.0	4.0	68.3	9.0	38.0	12.0	28.1	16.0	18.1	24.0	13.0	25.0	12.0	25.8	11.2
		-4.0	72.3	1.0	93.1	3.0	68.9	8.0	42.0	11.0	30.0	15.0	19.0	23.0	13.5	20.0	13.9	20.0	11.5
		-5.0	34.5	0.0	93.5	2.0	72.1	7.0	45.0	10.0	31.9	14.0	19.8	22.0	14.0	15.0	14.8	15.0	12.8
		-6.0	33.0	-1.0	94.0	1.0	73.0	6.0	47.5	9.0	33.1	13.0	20.0	21.0	14.5	10.0	15.9	10.0	13.0
		-7.0	22.5	-2.0	91.2	0.0	73.3	5.0	50.1	8.0	35.3	12.0	21.5	20.0	15.0	5.0	17.2	5.0	13.5
		-8.0	13.6	-3.0	86.4	-1.0	72.9	4.0	52.3	7.0	37.5	11.0	22.1	19.0	16.0	0.0	18.3	0.0	13.6
				-4.0	77.0	-2.0	72.2	3.0	54.1	6.0	38.0	10.0	23.1	18.0	16.5	-5.0	17.3	-5.0	13.5
				-5.0	63.1	-3.0	69.0	2.0	55.0	5.0	39.0	9.0	24.0	17.0	17.0	-10.0	15.7	-10.0	13.0
				-6.0	52.3	-4.0	68.5	1.0	57.0	4.0	40.0	8.0	25.7	16.0	17.5	-15.0	14.7	-15.0	12.8
				-7.0	42.4	-5.0	60.0	0.0	58.1	3.0	40.5	7.0	26.5	15.0	18.0	-20.0	14.0	-20.0	11.5
				-8.0	30.0	-6.0	55.4	-1.0	57.1	2.0	41.0	6.0	27.4	14.0	19.0	-25.0	12.0	-25.0	11.2
				-9.0	25.9	-7.0	50.8	-2.0	55.3	1.0	42.5	5.0	28.3	13.0	19.5	-30.0	11.0	-30.0	9.5
				-10.0	19.8	-8.0	41.3	-3.0	54.2	0.0	43.0	4.0	29.0	12.0	20.0	-35.0	9.6	-35.0	9.0
				-11.0	17.8	-9.0	38.5	-4.0	52.3	0.0	43.1	3.0	30.0	11.0	20.5	-40.0	8.3	-40.0	7.9
				-12.0	11.9	-10.0	32.3	-5.0	50.3	-1.0	43.0	2.0	31.0	10.0	21.0	-45.0	7.3	-45.0	7.8
				-13.0	10.1	-11.0	25.4	-6.0	47.5	-2.0	42.5	1.0	32.0	9.0	21.5	-50.0	6.2	-50.0	7.5
						-12.0	22.3	-7.0	45.3	-3.0	41.3	0.0	32.4	8.0	22.4	-55.0	5.3	-55.0	7.0
						-13.0	20.1	-8.0	41.9	-4.0	40.5	-1.0	32.0	7.0	22.6	-60.0	4.4	-60.0	6.0
						-14.0	15.3	-9.0	38.7	-5.0	40.0	-2.0	31.0	6.0	23.0	-65.0	3.2	-65.0	5.0
						-15.0	12.2	-10.0	36.2	-6.0	38.9	-3.0	30.0	5.0	23.5	-70.0	2.0	-70.0	4.5
								-11.0	32.3	-7.0	38.0	-4.0	29.2	4.0	23.5	-75.0	1.5	-75.0	—
								-12.0	27.9	-8.0	37.6	-5.0	28.5	3.0	23.6	-80.0	1.0	-80.0	—
								-13.0	25.3	-9.0	35.3	-6.0	27.4	2.0	23.7				
								-14.0	22.4	-10.0	33.1	-7.0	26.5	1.0	23.9				
								-15.0	21.8	-11.0	31.9	-8.0	25.7	0.0	24.1				
								-16.0	19.3	-12.0	30.0	-9.0	24.0	-1.0	23.8				
								-17.0	17.9	-13.0	28.2	-10.0	23.2	-3.0	23.6				
								-18.0	16.3	-14.0	26.3	-11.0	22.3	-5.0	23.5				
								-19.0	16.1	-15.0	25.1	-12.0	21.5	-7.0	22.6				
								-20.0	12.1	-16.0	22.1	-13.0	20.9	-9.0	21.5				
								-17.0	20.4	-14.0	19.5	-11.0	20.0						
								-18.0	18.3	-15.0	19.0	-13.0	19.0						
								-19.0	17.2	-16.0	18.1	-15.0	17.9						
								-20.0	16.3	-17.0	17.2	-17.0	17.0						
								-21.0	14.5	-18.0	15.5	-19.0	16.0						
								-22.0	13.3	-19.0	13.9	-21.0	14.5						
								-23.0	11.3	-20.0	13.2	-23.0	13.5						
								-24.0	10.1	-21.0	22.9	-25.0	12.0						
										-22.0	12.4	-27.0	10.5						
										-23.0	11.0	-29.0	9.5						

表一 2 11mm φ ノズル 速度分布表 y = 中心軸からの距離(mm) u = 速度(m/sec)

x = 1 cm		x = 3 cm		x = 5 cm		x = 10cm		x = 15cm		x = 20cm		x = 25cm		x = 30cm		x = 40cm		x = 50cm	
y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u
7.0	15.8	10.0	12.9	15.0	102.3	18.0	8.2	19.0	9.0	23.0	7.3	26.0	8.0	30.0	7.5	55.0	4.0	65.0	5.0
6.0	83.9	9.0	18.9	14.0	100.0	17.0	9.1	18.0	10.0	22.0	8.2	25.0	8.5	29.0	8.0	50.0	5.1	60.0	7.2
5.0	99.0	8.0	25.9	13.0	99.3	16.0	10.1	17.0	14.5	21.0	9.1	24.0	9.0	28.0	8.3	45.0	7.3	55.0	7.5
4.0	102.3	7.0	40.7	12.0	95.0	15.0	11.9	16.0	16.3	20.0	10.0	23.0	9.9	27.0	8.7	40.0	8.0	50.0	8.0
3.0	102.3	6.0	64.7	11.0	91.0	14.0	17.9	15.0	18.1	19.0	12.0	22.0	11.0	26.0	8.9	35.0	10.3	45.0	9.0
2.0	102.3	5.0	82.9	10.0	85.0	13.0	22.3	14.0	20.0	18.0	15.1	21.0	12.1	25.0	10.0	30.0	12.2	40.0	10.0
1.0	102.3	4.0	99.5	9.0	78.6	12.0	28.2	13.0	22.1	17.0	18.2	20.0	14.3	24.0	10.5	25.0	14.3	35.0	10.5
0.0	102.3	3.0	102.3	8.0	70.3	11.0	32.1	12.0	25.1	16.0	20.3	19.0	15.0	23.0	11.0	20.0	18.1	30.0	11.0
-1.0	102.3	2.0	102.3	7.0	63.2	10.0	37.1	11.0	28.0	15.0	22.5	18.0	16.0	22.0	11.5	15.0	20.3	25.0	12.0
-2.0	102.3	1.0	102.3	6.0	50.1	9.0	40.3	10.0	34.2	14.0	25.1	17.0	17.9	21.0	12.0	10.0	22.1	20.0	12.5
-3.0	102.3	0.0	102.3	5.0	35.2	8.0	50.2	9.0	38.3	13.0	28.2	16.0	19.0	20.0	12.1	5.0	23.5	15.0	13.0
-4.0	102.3	-1.0	102.3	4.0	30.1	7.0	60.0	8.0	45.4	12.0	31.0	15.0	20.9	19.0	13.3	0.0	24.0	10.0	14.0
-5.0	99.0	-2.0	102.3	3.0	25.1	6.0	65.2	7.0	50.1	11.0	34.3	14.0	22.0	18.0	14.2	-5.0	22.9	5.0	14.5
-6.0	83.9	-3.0	102.3	2.0	18.0	5.0	71.0	6.0	54.5	10.0	36.3	13.0	23.1	17.0	15.3	-10.0	22.0	0.0	15.0
-7.0	15.8	-4.0	99.5	1.0	13.2	4.0	78.0	5.0	57.9	9.0	39.2	12.0	24.2	16.0	16.0	-15.0	20.6	-5.0	14.8
		-5.0	83.0	0.0	10.1	3.0	81.0	4.0	61.0	8.0	41.3	11.0	25.3	15.0	17.0	-20.0	19.3	-10.0	14.2
		-6.0	65.0	-1.0	100.1	2.0	89.2	3.0	65.3	7.0	43.0	10.0	27.4	14.0	18.0	-25.0	13.9	-15.0	13.9
		-7.0	41.0	-2.0	99.0	1.0	92.0	2.0	68.2	6.0	45.1	9.0	28.9	13.0	19.0	-30.0	12.4	-20.0	12.3
		-8.0	26.0	-3.0	94.5	0.0	92.0	1.0	69.5	5.0	49.5	8.0	30.0	12.0	19.5	-35.0	9.9	-25.0	12.1
		-9.0	18.3	-4.0	89.9	-1.0	92.0	0.0	70.9	4.0	50.0	7.0	32.1	11.0	20.5	-40.0	8.2	-30.0	11.3
		-10.0	13.0	-5.0	84.5	-2.0	89.0	-1.0	68.0	3.0	51.9	6.0	34.2	10.0	21.3	-45.0	7.0	-35.0	10.6
				-6.0	78.5	-3.0	82.3	-2.0	68.0	2.0	52.0	5.0	35.1	9.0	22.1	-50.0	5.0	-40.0	10.0
				-7.0	71.5	-4.0	79.5	-3.0	65.5	1.0	52.9	4.0	36.2	8.0	24.3	-55.0	4.0	-45.0	9.0
				-8.0	64.8	-5.0	72.8	-4.0	62.0	0.0	53.3	3.0	38.1	7.0	26.3			-50.0	8.1
				-9.0	50.6	-6.0	66.7	-5.0	58.9	-1.0	52.9	2.0	39.0	6.0	27.2			-55.0	7.5
				-10.0	36.3	-7.0	59.9	-6.0	55.0	-2.0	52.0	1.0	40.0	5.0	28.3			-60.0	7.2
				-11.0	31.8	-8.0	52.3	-7.0	51.3	-3.0	51.9	0.0	40.7	4.0	29.1			-65.0	5.0
				-12.0	26.4	-9.0	41.3	-8.0	46.3	-4.0	50.0	-1.0	39.8	3.0	29.6				
				-13.0	17.9	-10.0	39.5	-9.0	39.4	-5.0	49.5	-2.0	39.0	2.0	30.3				
				-14.0	14.5	-11.0	34.3	-10.0	35.4	-6.0	45.1	-3.0	38.5	1.0	31.2				
				-15.0	11.3	-12.0	29.1	-11.0	29.3	-7.0	43.0	-4.0	36.4	0.0	31.7				
						-13.0	23.1	-12.0	26.1	-8.0	41.3	-5.0	35.4	-1.0	31.5				
						-14.0	18.1	-13.0	22.3	-9.0	39.2	-6.0	34.5	-3.0	29.0				
						-15.0	12.3	-14.0	20.0	-10.0	36.3	-7.0	32.3	-5.0	27.9				
						-16.0	9.9	-15.0	19.5	-11.0	34.3	-8.0	30.5	-7.0	27.0				
						-17.0	9.1	-16.0	16.9	-12.0	31.0	-9.0	28.8	-9.0	22.0				
						-18.0	8.2	-17.0	15.0	-13.0	28.2	-10.0	27.5	-11.0	20.5				
								-18.0	10.0	-14.0	25.1	-11.0	25.5	-13.0	19.0				
								-19.0	9.0	-15.0	22.5	-12.0	24.3	-15.0	17.8				
										-16.0	20.3	-13.0	23.5	-17.0	15.0				
										-17.0	18.2	-14.0	22.1	-19.0	13.7				
										-18.0	15.1	-15.0	20.5	-21.0	12.1				
										-19.0	12.0	-16.0	18.9	-23.0	11.4				
										-20.0	10.0	-17.0	18.3	-25.0	10.6				
										-21.0	9.1	-18.0	17.5	-27.0	8.5				
										-22.0	8.2	-19.0	16.5	-29.0	8.0				
										-23.0	7.3	-20.0	15.5	-31.0	7.0				
												-21.0	13.1						
												-22.0	12.1						
												-23.0	9.8						
												-24.0	9.1						

表-3 13mm φノズル速度分布表 y = 中心軸からの距離(mm) u = 速度(m/sec)

x = 1 cm		x = 3 cm		x = 5 cm		x = 10cm		x = 15cm		x = 20cm		x = 25cm		x = 30cm		x = 40cm		x = 50cm	
y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	u	y	x	y	u	y	u	y	u
6.0	12.6	6.0	17.8	10.0	12.3	15.0	12.0	16.0	10.0	22.0	9.9	26.0	12.0	28.0	13.1	60.0	1.5	65.0	4.5
5.0	41.8	5.0	45.5	9.0	17.9	14.0	13.0	15.0	12.3	21.0	11.1	25.0	13.0	27.0	15.3	55.0	3.3	60.0	5.0
4.0	88.3	4.0	74.6	8.0	22.1	13.0	15.0	14.0	14.1	20.0	13.1	24.0	14.0	26.0	16.0	50.0	4.3	55.0	5.5
3.0	91.8	3.0	85.6	7.0	25.3	12.0	17.5	13.0	15.3	19.0	15.1	23.0	14.1	25.0	18.0	45.0	5.4	50.0	7.0
2.0	92.7	2.0	91.0	6.0	35.2	11.0	21.0	12.0	20.5	18.0	17.5	22.0	15.0	24.0	18.5	40.0	6.3	45.0	7.5
1.0	92.7	1.0	91.8	5.0	48.1	10.0	28.1	11.0	26.7	17.0	19.0	21.0	16.5	23.0	19.0	35.0	8.2	40.0	8.2
0.0	92.7	0.0	92.7	4.0	64.1	9.0	30.9	10.0	28.2	16.0	19.5	20.0	18.1	22.0	19.3	30.0	10.3	35.0	9.1
-1.0	92.7	-1.0	91.8	3.0	74.1	8.0	33.4	9.0	33.4	15.0	20.5	19.0	19.3	21.0	19.6	25.0	12.1	30.0	10.0
-2.0	92.7	-2.0	91.0	2.0	82.9	7.0	37.8	8.0	37.7	14.0	22.5	18.0	20.0	20.0	20.0	20.0	14.3	25.0	11.0
-3.0	91.8	-3.0	85.6	1.0	90.1	6.0	43.7	7.0	41.8	13.0	25.3	17.0	21.0	19.0	20.3	15.0	16.2	20.0	11.9
-4.0	88.3	-4.0	74.6	0.0	92.7	5.0	50.4	6.0	45.5	12.0	27.5	16.0	22.3	18.0	20.9	10.0	18.2	15.0	12.9
-5.0	41.8	-5.0	45.5	-1.0	90.1	4.0	56.4	5.0	48.8	11.0	28.1	15.0	23.1	17.0	22.2	5.0	20.1	10.0	14.1
-6.0	12.6	-6.0	17.8	-2.0	82.9	3.0	61.8	4.0	50.4	10.0	30.3	14.0	25.1	16.0	23.2	0.0	21.0	5.0	14.5
				-3.0	74.1	2.0	65.2	3.0	52.5	9.0	32.0	13.0	26.1	15.0	24.1	-5.0	20.1	0.0	15.1
				-4.0	64.1	1.0	68.8	2.0	53.5	8.0	35.1	12.0	27.6	14.0	24.5	-10.0	18.2	-5.0	14.5
				-5.0	48.1	0.0	73.5	1.0	55.1	7.0	37.5	11.0	27.5	13.0	25.0	-15.0	16.2	-10.0	14.1
				-6.0	35.2	-1.0	68.8	0.0	56.4	6.0	39.9	10.0	28.5	12.0	25.2	-20.0	14.3	-15.0	12.9
				-7.0	25.3	-2.0	65.2	-1.0	55.1	5.0	41.3	9.0	29.0	11.0	25.5	-25.0	12.1	-20.0	11.9
				-8.0	22.1	-3.0	61.8	-2.0	53.5	4.0	42.3	8.0	29.0	10.0	26.5	-30.0	10.3	-25.0	11.0
				-9.0	17.9	-4.0	56.4	-3.0	52.5	3.0	43.4	7.0	29.3	9.0	27.0	-35.0	8.2	-30.0	10.0
				-10.0	12.3	-5.0	50.4	-4.0	50.4	2.0	45.1	6.0	30.3	8.0	27.6	-40.0	6.3	-35.0	9.1
						-6.0	43.7	-5.0	48.8	1.0	46.1	5.0	31.4	7.0	28.2	-45.0	5.4	-40.0	8.2
						-7.0	37.8	-6.0	45.5	0.0	47.2	4.0	32.3	6.0	28.7	-50.0	4.3	-45.0	7.5
						-8.0	33.4	-7.0	41.8	-1.0	46.1	3.0	33.5	5.0	29.5	-55.0	3.3	-50.0	7.0
						-9.0	30.9	-8.0	37.7	-2.0	45.1	2.0	35.2	4.0	30.0	-60.0	1.5	-55.0	5.5
						-10.0	28.1	-9.0	33.4	-3.0	43.4	1.0	36.1	3.0	31.0			-60.0	5.0
						-11.0	21.0	-10.0	28.2	-4.0	42.3	0.0	37.8	2.0	31.5			-65.0	4.5
						-12.0	17.5	-11.0	26.7	-5.0	41.3	-1.0	36.1	1.0	32.0				
						-13.0	15.0	-12.0	20.5	-6.0	39.9	-2.0	35.2	0.0	32.1				
						-14.0	13.0	-13.0	15.3	-7.0	37.5	-3.0	33.5	-1.0	32.0				
						-15.0	12.0	-14.0	14.1	-8.0	35.1	-4.0	32.3	-3.0	31.0				
								-15.0	12.3	-9.0	32.0	-5.0	31.4	-5.0	29.5				
								-16.0	10.0	-10.0	30.3	-6.0	30.3	-7.0	28.2				
										-11.0	28.1	-7.0	29.3	-9.0	27.0				
										-12.0	27.5	-8.0	29.0	-11.0	25.5				
										-13.0	25.3	-9.0	29.0	-13.0	25.0				
										-14.0	22.5	-10.0	28.5	-15.0	24.1				
										-15.0	20.5	-11.0	27.5	-17.0	22.2				
										-16.0	19.5	-12.0	27.0	-19.0	20.3				
										-17.0	19.0	-13.0	26.1	-21.0	19.6				
										-18.0	17.5	-14.0	25.1	-23.0	19.0				
										-19.0	15.1	-15.0	23.1	-25.0	18.0				
										-20.0	13.1	-16.0	22.3	-27.0	15.3				
										-21.0	11.1	-17.0	21.0	-29.0	12.3				
										-22.0	9.9	-18.0	20.0						
												-19.0	19.3						
												-20.0	18.1						
												-21.0	16.5						
												-22.0	15.0						
												-23.0	14.1						
												-24.0	14.0						
												-25.0							

表-4

中心流速測定結果

x = ノズルからの距離(cm), u = 点 x における中心流速, R : ノズル半径

$x/R = x$ と R の比 $u/u_0 = u$ と u_0 (ノズル出口速度) との比

13mm ϕ ノズル				11mm ϕ ノズル				9mm ϕ ノズル			
x	u	x/R	u/u_0	x	u	x/R	u/u_0	x	u	x/R	u/u_0
1	92.73	1.54	1.00	1	103.32	1.81	1.00	1	103.29	2.12	1.00
2	92.73	3.08	1.00	2	102.32	3.64	1.00	2	103.29	4.40	1.00
3	92.73	4.62	1.00	3	102.32	5.45	1.00	3	101.50	6.60	0.98
4	92.73	6.15	1.00	4	102.32	7.27	1.00	4	98.56	8.80	0.95
5	92.30	7.69	0.99	5	102.32	9.09	1.00	5	93.51	11.10	0.91
6	90.56	9.23	0.98	6	102.32	10.91	1.00	6	89.29	13.30	0.86
7	86.97	10.77	0.94	7	99.41	12.73	0.97	7	85.85	15.60	0.83
8	82.27	12.31	0.89	8	97.71	14.55	0.95	8	81.85	17.80	0.79
9	78.30	13.85	0.84	9	95.11	16.36	0.93	9	77.65	20.00	0.75
10	73.04	15.40	0.79	10	90.60	18.10	0.89	10	73.33	22.00	0.71
11	69.12	16.92	0.75	11	85.85	20.00	0.84	11	70.29	24.40	0.68
12	64.96	18.46	0.70	12	82.89	21.82	0.81	12	67.37	26.70	0.65
13	61.17	20.00	0.66	13	77.65	23.64	0.76	13	62.74	28.90	0.61
14	58.51	21.54	0.63	14	74.35	25.45	0.73	14	59.17	31.10	0.57
15	55.73	23.08	0.60	15	70.89	27.27	0.69	15	57.15	33.30	0.55
16	53.54	24.62	0.58	16	65.99	29.09	0.64	16	53.52	35.60	0.52
17	51.26	26.15	0.55	17	63.40	30.91	0.62	17	50.95	37.8	0.49
18	49.68	27.69	0.54	18	59.31	32.73	0.58	18	48.43	40.00	0.47
19	48.05	29.23	0.52	19	56.41	34.55	0.55	19	45.46	42.20	0.44
20	47.22	30.77	0.51	20	53.36	36.36	0.52	20	43.12	44.40	0.42
21	44.62	32.31	0.48	21	52.12	38.18	0.49	21	40.93	46.70	0.40
22	43.71	33.85	0.47	22	47.55	40.00	0.46	22	37.73	48.90	0.39
23	41.85	35.38	0.45	23	44.83	41.82	0.44	23	36.15	51.10	0.35
24	39.91	36.92	0.43	24	42.92	43.64	0.42	24	34.24	53.30	0.33
25	37.86	38.46	0.41	25	40.93	45.45	0.40	25	32.48	55.6	0.31
26	37.86	40.00	0.41	26	38.83	47.27	0.38	26	30.70	57.8	0.30
27	35.69	41.54	0.38	27	37.73	49.09	0.37	27	29.23	60.00	0.28
28	33.39	43.08	0.36	28	36.61	50.91	0.36	28	27.76	62.20	0.27
29	32.91	44.62	0.35	29	31.70	52.73	0.31	29	24.56	64.40	0.24
30	32.17	46.15	0.35	30	31.70	54.55	0.31	30	24.12	66.70	0.23
31	30.91	47.69	0.33	31	31.70	52.36	0.31	31	22.79	68.90	0.22
32	30.91	49.23	0.33	32	31.70	58.18	0.31	32	22.42	71.10	0.22
33	28.22	50.77	0.30	33	31.70	60.00	0.31	33	20.46	73.30	0.20
34	27.65	52.31	0.30	34	31.70	63.64	0.31	34	18.30	75.60	0.18

表-4 (続)

中心流速測定結果

x = ノズルからの距離(cm), u = 点 x における中心流速 (m/Sec)

R : ノズル半径 $x/R = x$ と R の比 $u/u_0 = u$ と u_0 (ノズル出口速度) との比

13mm ϕ ノズル				11mm ϕ ノズル				9mm ϕ ノズル			
x	u	x/R	u/u_0	x	u	x/R	u/u_0	x	u	x/R	u/u_0
35	26.77	53.85	0.29	35	29.66	63.5	0.29	35	18.30	77.80	0.18
36	26.77	55.38	0.29	36	28.64	65.5	0.28	36	18.0	80.0	0.17
37	25.24	56.92	0.27	37	27.6	67.5	0.27	37	18.0	82.2	0.17
38	25.24	58.46	0.27	38	27.3	69.1	0.27	38	16.52	84.4	0.16
39	21.86	60.00	0.24	39	26.5	70.9	0.26	39	15.49	86.6	0.15
40	21.86	61.54	0.24	40	24.24	72.8	0.23	40	14.4	88.8	0.14
41	21.86	63.08	0.24	41	23.4	74.5	0.23	41			
42	21.86	64.62	0.24	42	22.4	76.4	0.22	42			
43	19.95	66.15	0.22	43	21.4	78.2	0.21	43			
44	19.95	67.69	0.22	44	21.0	80.0	0.20	44			
45	17.85	69.23	0.19	45	20.9	81.8	0.20	45			
46	17.85	70.77	0.19	46				46			
47	17.85	72.30	0.19	47				47			
48	16.69	73.84	0.18	48				48			
49	15.76	75.38	0.17	49				49			
50	14.81	77.1	0.16	50				50			
51	14.81	78.46	0.16	51				51			
52	13.91	80.0	0.15	52				52			
53	12.98	81.5	0.14	53				53			
54				54				54			
55				55				55			
56				56				56			
57				57				57			
58				58				58			
59				59				59			
60				60				60			
61				61				61			
62				62				62			
63				63				63			
64				64				64			
65				65				65			
66				66				66			
67				67				67			
68				68				68			

そして表-4は、ノズル中心軸上におけるノズルからの各距離における速度を表示したもので、更に図-7, 8, 9等は各ノズルの出口速度を U_0 、中心軸、すなわち x 軸上の流速を U としたときの比 U/U_0 と、ノズル半径に対する距離の比 x/R の関係を表-4に従い対数グラフに示したものである。これらの図からもわかるように、ノズル中心軸上の流速は、さきに示した区域がはっきりあらわれてくる。すなわちノズル出口速度を維持する区間、それからゆるやかに減少する区間、そして急激に減少する

区間、そしてその後また更に減少する区間の4領域に分けられることが、このグラフから観察される。これらの現象を先に示した噴流の基本構造と照しあわせてみるならば、各ノズルによりその区間の大きさは異っては来るが、各グラフとも第1段階がA領域であり、第2段階がB領域で、第3段階がC領域であろう。そして第4段階目の領域はKuetheの理論には表われてはいないが、後にも述べる日本の研究者達の報告に発表されているD領域と称するものである。

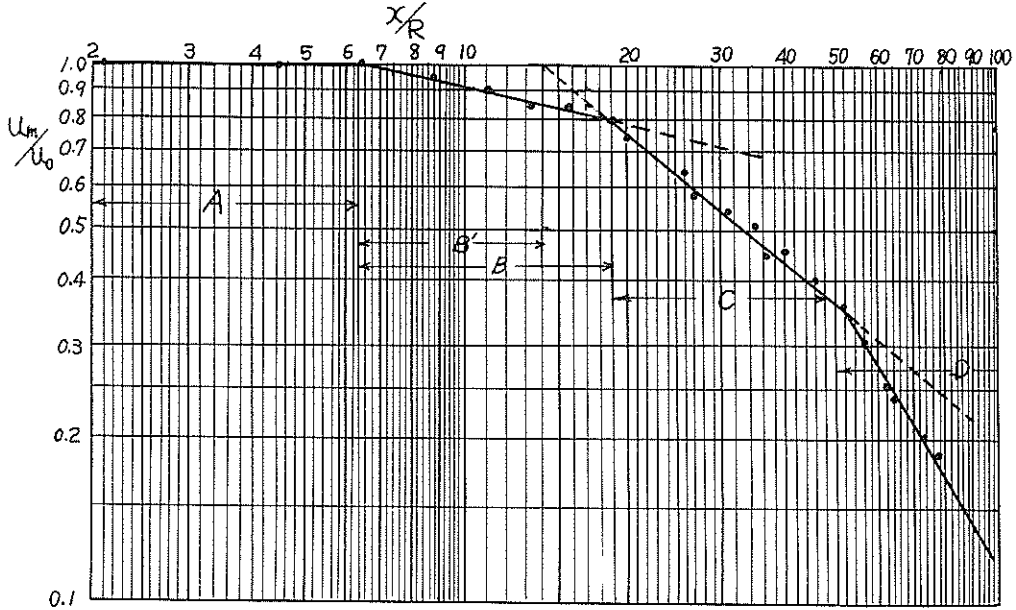


図-7 中心軸上の流速減少の状況 (9 mm φ ノズル)

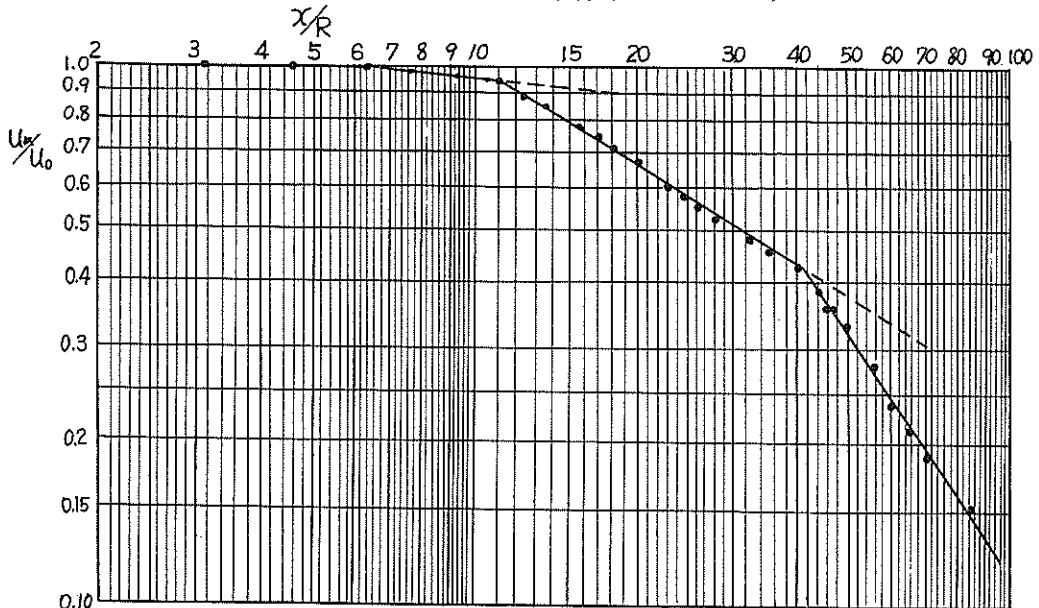


図-8 中心軸上の流速減少の状況 (11 mm φ ノズル)

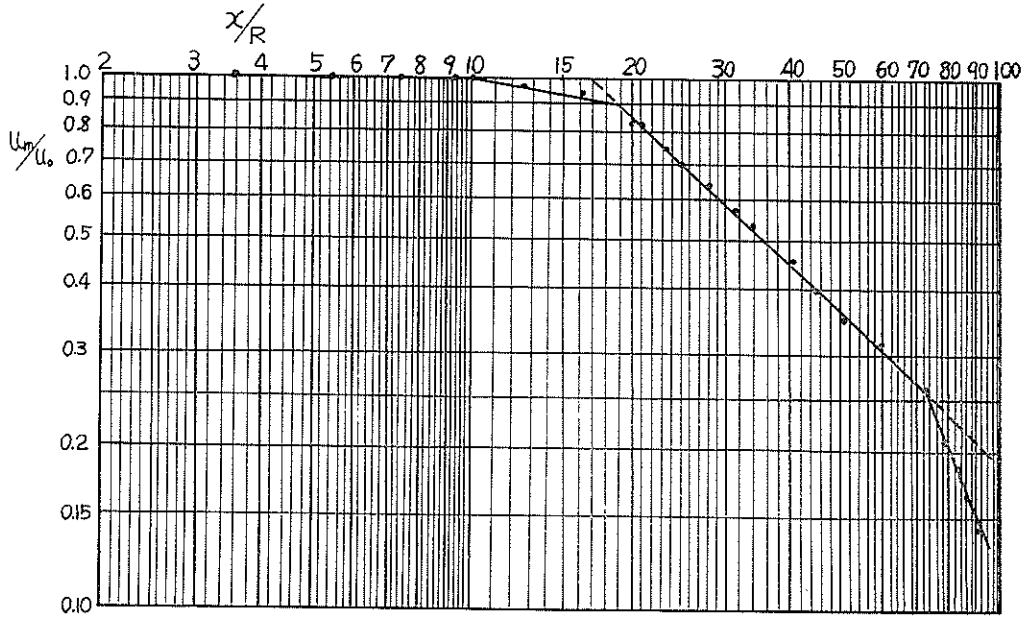


図-9 中心軸上の流速減少の状況 (13mm φ ノズル)

さてこれらのグラフからもわかるように、中心流速が徐々に噴流境界層に浸蝕され、減衰されていく割合が各ノズルともはっきり確かめられる。次に各領域について得られた実験値と、従来まで研究されてきた理論との比較を行ってみよう。

① A領域について

A領域とは、ノズル口からコアの形成される区間までをさすが、このコアの形は図-1に示してあるように円錐形をなしている。その円錐角度、及びその存在区間については理論的に Abramovich 等によって及められており、円錐角度は 12.6° で、その区間はノズル口よりほぼ $8R$ (R : ノズル半径) という理論値を発表しており、一方 Kuethe は $9.5R$ という数値を発表している。いずれにせよ、ほぼ $0 \sim 10R$ 前後に理論的に存在すると考えられ、くわしい理論計算については後の附録を参照されたい。

さてこれらの値と得られた実験値と比較するなら、図7, 8, 9からも明らかなように、このノズル出口速度を維持する区間は各ノズルによりそれぞれかなり異ってきており、径9mmのノズルでは、 $0 \sim 7R$ 、径11mmのノズルでは $0 \sim 10R$ 、径13mmのノズルでは $0 \sim 6.5$ 前後である。すなわち9mmφ、13mmφのノズルでは理論値よりやや少なめに測定されたが、11mmφのノズルはやや大きく測定されている。更に、図-10は、表-1, 2, 3, に基づいて各ノズルのコアの形を流速分布

の測定値から描いたもので、 $U=U_0$ を与える位置で示したものである。これらもまた各ノズルによりその形状がかなり異ってきている。これらの原因については、ここでははっきりしたことは述べられないが、各ノズルの製作の際の精度によるものではないだろうか。いずれにせよ、

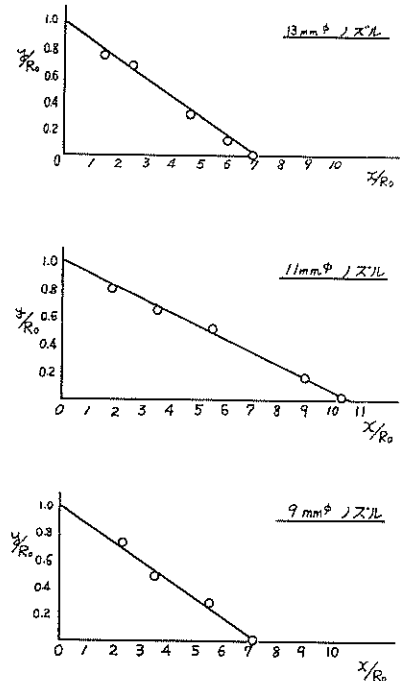


図-10 各ノズルによるコア部分の形

今回の実験では異なったノズルで同一の径を用いて実験を行っていないので、ここでは結論が出せないが、ほぼ上記の理論値に近い値が測定されている。

② B領域について

B領域についての理論構造についても、やはり Abramovich は理論的にその区間を算出しているが、彼は2通りの方法で計算しており、そのうち簡単な方法と実験値との比較を行ってみよう。その方法とは、図-7にも示すように、B領域とはA領域の終点から、A領域を特徴づける線とC領域を特徴づける線との交点までを一応のB領域と定義する考え方である。(この考え方に基づく計算法も後の附録に示してあるので参照されたい)

さて、彼の算出した値は上記の考え方に従うとB領域とは、8R~12Rとしている。

次に、この理論値と得られた実験値との比較を行ってみよう。図-7, 8, 9において、C領域を特徴づける線を延長するとその区間が得られる。そして各ノズルでは、径9mmでは6.5~14R, 径11mmでは10R~17R, 径13mmでは6.5R~10.5Rである。このように各ノズルでこのB領域の値はかなり異った値を示す。しかもこれらの値はどれも Abramovich の算出した理論値より広範囲に測定されている。

さて、これらの値はあくまで Abramovich が示した簡単な方法による理論値で、真のB領域はこれより大であり、図-7, 8, 9において、9mmφノズルでは、6.5R~19R, 11mmφノズルでは10R~19R, 13mmφノズルでは6.5R~11Rである。そしてその大きさはそれぞれ皆異っている。これらのことからB領域の大きさについてもノズルそれ自体の特性によってかなり異ってることがわかる。

次に、この種の実験で示された他の研究者の実験値をここに示す。建設省土木研究所報告による佐藤、細井両氏による実験では、B領域は9R~24Rと測定されたとしており、また土木学会誌で発表している岩崎、千秋両氏の実験では7.6R~16.4Rと測定しており、これらはいずれも水噴流による実験である。このように各実験ごとに、このB領域の値は定まらず、ほぼ8R~20R前後に存在するものと考えられる。

③ C領域について

次にC領域についての考察であるが、この領域とは実験結果のグラフ(図-7, 8, 9)に現われる第3段階目の領域である。噴流を構成する大部分がこの領域と次に述べるD領域とによって構成されており、古くから流体

力学上興味ある研究対象とされてきた。この領域は図-11に示すように、各断面におけるx軸方向における流速が各々 y/x をパラメーターとする相似的な分布をされており、これについては多数の研究者により実験的、理論的に求められてきた。

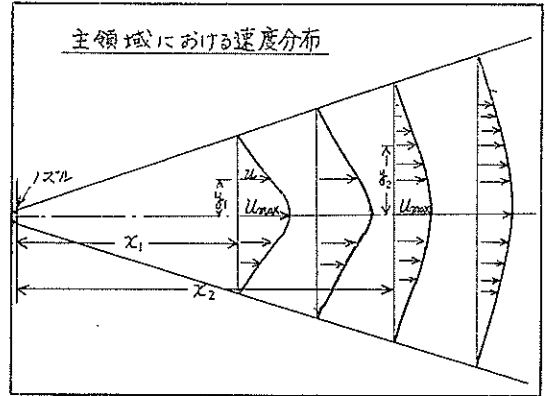


図-11

次に実験値と従来まで研究されてきた理論値との比較を行ってみよう。

Tollmien は次の考え方に従って、この領域の流速分布を計算した。すなわち、

- (i) 噴流内部の圧力は、その外部の圧力と同一であること。従って方向の運動量は各断面について一定である。
- (ii) Reynolds 数が充分に大である場合には、充分下流において、相異なる断面間では流れの状態に幾可学的、ならびに力学的相似性が成立すること。
- (iii) 混合距離 l は、どの断面においても、その断面上において一様なること。

以上の仮定に基づき、運動方程式を作り、その中で乱流の自由せん断応力の一般式として、

$$\tau = \rho \cdot \tau^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$$

を用いて、 $\eta = y/x$ を独立変数とする常微分方程式を求め、任意の断面における流速を

$$\frac{u}{u_m} = f\left(\frac{y}{ax}\right) \dots \dots \dots$$

- ここに
- u : 点 (x, y) における流速
 - u_m : ノズル口より距離 x におけるノズル中心軸の流速
 - a : 実験常数
 - f : Tollmien の函数(詳細は附録を参照)

と表わした。

一方 Goetler は Tollmien と同様の仮定と、運動方程

式を用い、その中に用いられる乱流自由せん断応力として、

$$\tau = \rho \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \varepsilon = k \cdot b \cdot u_0 \quad \begin{cases} k: \text{実験常数} \\ b: \text{噴流の幅} \\ u_0: \text{ノズル中心} \\ \text{軸上の速度} \end{cases}$$

を用いて、同じく $\eta = y/ax$ をパラメーターとする解

$$\frac{u}{u_m} = g(\vartheta \cdot \eta) \quad (\vartheta: \text{実験常数}) \dots \dots (3-2)$$

として求めた。また Schlichting は、後流についての考え方から、

$$\frac{u}{u_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^{1.5} \right]^2 \quad (\text{ここに } b: \text{噴流の幅})$$

として、噴流の速度分布を表わした。

さて、このように表わされた Tollmien の式、Goetler の式、Schlichting の式はそれぞれ異ったパラメーターの函数であるため、実験値と比較出来ない。すなわち、3つの式を同じパラメーターに変換して実験値と比較せねばならない。そこで便宜上これらの函数を y/Y (Y は $u/u_m = 1/2$ を生じる y の値) で表すことにする。すなわち (3-1) 式で u/u_0 が y/ax の函数として表わされているが、ここで $u = u_0/2$ を与える Y を見つける (図-12参照)

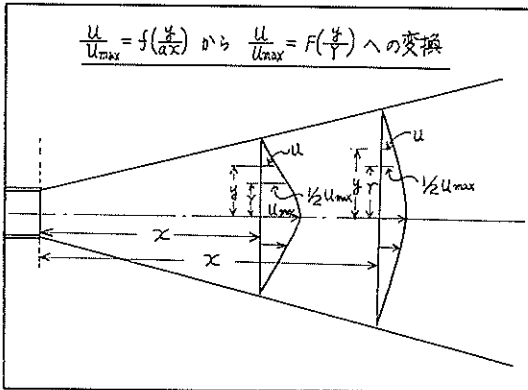


図-12

いま、 $\eta = y/ax = Y/ax$ 、 $y/Y = \eta_{0.5} \cdot y/Y$ であり、 $\eta_{0.5} = Y/ax$ は $u/u_0 = f(\eta/a) = 1/2$ を満足する η の値である。Tollmien の理論曲線によれば $\eta_{0.5} = 1.22$ であり、従って $\eta = 1.22y/Y$ と表わされる。そして、

$$\frac{u}{u_m} = f\left(1.22 \cdot \frac{y}{Y}\right)$$

となり、また Goetler の式においても理論曲線から全く同様の方法によってパラメーター変換して

$$\frac{u}{u_m} = g\left(1.84 \cdot \frac{y}{Y}\right)$$

Schlichting の式も、全く同様にして、

$$\frac{u}{u_m} = \left[1 - \left(0.44 \cdot \frac{y}{Y}\right)^{1.5} \right]^2$$

こうして、3式が y/Y の函数として表わされ、それらの数値とグラフが表-5、及び図-13に示すものである。

y/Y	Tollmien u/U_{\max}	Goetler u/U_{\max}	Schlichting u/U_{\max}
0.0	1.000	1.000	1.000
0.1	0.980	0.992	0.982
0.2	0.944	0.967	0.949
0.3	0.900	0.928	0.906
0.4	0.845	0.877	0.858
0.5	0.794	0.818	0.804
0.6	0.737	0.753	0.747
0.7	0.678	0.686	0.687
0.8	0.619	0.619	0.626
0.9	0.560	0.555	0.564
1.0	0.503	0.499	0.502
1.1	0.448	0.438	0.440
1.2	0.395	0.386	0.380
1.3	0.345	0.340	0.322
1.4	0.297	0.299	0.267
1.5	0.253	0.262	0.215
1.6	0.213	0.230	0.168
1.7	0.176	0.202	0.125
1.8	0.142	0.178	0.086
1.9	0.112	0.157	0.056
2.0	0.086	0.138	0.030
2.1	0.062	0.122	0.013
2.2	0.042	0.108	0.002
2.3	0.025	0.095	0.003
2.4	0.010	0.085	0.007

表-5 パラメーター変換した後の各函数の値

さてこのようにして求めた3式と実験値との比較を行ってみよう。表-6、7、8等は、表-1、2、3に基き、 u/u_m と $u = \frac{1}{2}u_m$ を与える Y ですべての y を除いた x の各値について求めたものである。そして、これらの数値をプロットして上の式と比較したものが図-14、15、16、17、18、19である。

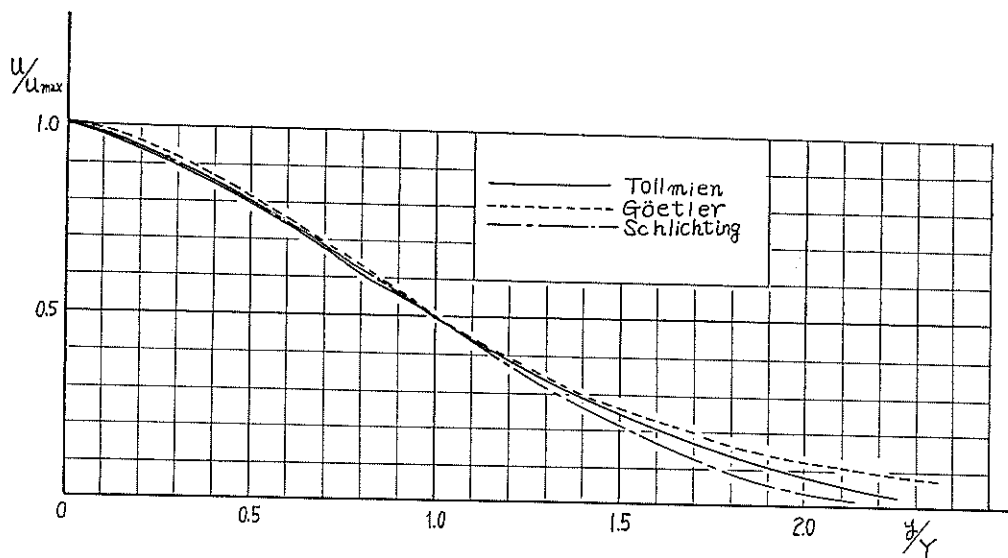
これらの図から判断するなら、各ノズルを使用した場合、ノズル流出速度がそれぞれ全く異なるにもかかわらず、流速分布を u/u_m と y/Y との値で表すなら各距離の断面においてある曲線に集り、それらに相似性が確認される。しかし各ノズルごとに、全断面において厳密な意味における完全な相似は認められない。殊に 9 mmφ ノズル、11 mmφ ノズルにおいては、ノズルから

表-7 ノズル径 11mmφ

X=1cm		X=3cm		X=5cm		X=10cm		X=15cm		X=20cm		X=25cm		X=30cm		X=40cm		X=50cm	
y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀
1.421	0.125	1.860	0.156	1.705	0.099	2.143	0.089	1.979	0.127	1.704	0.137	1.688	0.197	1.829	0.237	1.833	0.167	1.182	0.333
1.142	0.294	1.627	0.221	1.591	0.129	2.024	0.099	1.875	0.141	1.630	0.154	1.624	0.209	1.768	0.252	1.667	0.213	1.091	0.480
0.857	0.756	1.391	0.310	1.477	0.176	1.905	0.110	1.771	0.204	1.555	0.171	1.559	0.221	1.707	0.262	1.500	0.304	1.000	0.500
0.571	0.937	1.162	0.341	1.364	0.245	1.786	0.129	1.667	0.230	1.481	0.188	1.494	0.243	1.646	0.274	1.333	0.333	0.909	0.533
0.285	0.991	1.903	0.724	1.250	0.294	1.667	0.195	1.563	0.255	1.407	0.225	1.429	0.270	1.535	0.281	1.167	0.429	0.818	0.600
0.0	1.000	0.697	0.879	1.136	0.344	1.548	0.242	1.458	0.282	1.333	0.283	1.364	0.297	1.525	0.316	1.000	0.508	0.727	0.667
-0.285	1.000	0.465	0.966	1.023	0.490	1.429	0.307	1.354	0.312	1.259	0.341	1.299	0.351	1.464	0.331	0.833	0.596	0.636	0.700
-0.571	0.937	0.231	1.000	0.909	0.618	1.310	0.349	1.250	0.354	1.185	0.381	1.234	0.369	1.403	0.347	0.667	0.754	0.545	0.733
-0.857	0.756	0.000	1.000	0.795	0.688	1.191	0.403	1.146	0.395	1.037	0.471	1.169	0.393	1.342	0.363	0.500	0.846	0.455	0.800
-1.142	0.294	-0.231	1.000	0.682	0.769	1.071	0.438	1.042	0.482	0.963	0.529	1.104	0.440	1.281	0.379	0.333	0.921	0.364	0.833
-1.421	0.125	-0.465	1.000	0.568	0.831	0.952	0.516	0.938	0.540	0.889	0.582	1.039	0.467	1.220	0.382	0.167	0.979	0.273	0.867
		-0.697	0.879	0.455	0.890	0.833	0.652	0.833	0.640	0.815	0.643	0.974	0.514	1.159	0.420	0.0	1.0	0.182	0.933
		-0.903	0.724	0.341	0.929	0.714	0.709	0.729	0.706	0.741	0.681	0.909	0.541	1.098	0.448	-0.167	0.954	0.091	0.967
		-1.162	0.341	0.227	0.971	0.595	0.772	0.625	0.768	0.667	0.735	0.844	0.568	1.037	0.483	-0.333	0.917	0.0	1.0
		-1.391	0.310	0.114	0.978	0.476	0.848	0.521	0.816	0.593	0.775	0.779	0.595	0.976	0.505	-0.500	0.858	-0.091	0.987
		-1.627	0.221	0.0	1.0	0.357	0.880	0.417	0.860	0.518	0.807	0.714	0.622	0.915	0.536	-0.667	0.792	-0.182	0.947
		-1.860	0.156	-0.114	0.979	0.238	0.970	0.313	0.921	0.444	0.846	0.649	0.673	0.854	0.568	-0.833	0.579	-0.273	0.927
			-0.227	0.968	0.229	0.999	0.208	0.962	0.370	0.927	0.584	0.710	0.229	0.793	0.599	-1.000	0.517	-0.364	0.820
			-0.341	0.924	0.0	1.0	0.104	0.980	0.296	0.938	0.520	0.737	0.229	0.732	0.615	-1.167	0.413	-0.455	0.807
			-0.455	0.879	-0.119	1.00	0.0	1.0	0.222	0.974	0.455	0.789	0.229	0.671	0.647	-1.333	0.342	-0.545	0.753
			-0.568	0.826	-0.238	0.967	-0.104	0.956	0.148	0.976	0.390	0.840	0.229	0.610	0.672	-1.500	0.292	-0.636	0.707
			-0.682	0.768	-0.357	0.895	-0.208	0.956	0.074	0.992	0.325	0.862	0.229	0.549	0.697	-1.667	0.208	-0.727	0.667
			-0.795	0.693	-0.476	0.864	-0.313	0.924	0.0	1.0	0.260	0.889	0.229	0.488	0.767	-1.833	0.167	-0.818	0.600
			-0.909	0.634	-0.595	0.791	-0.417	0.874	-0.074	0.976	0.195	0.936	0.229	0.427	0.830			-0.909	0.540
			-1.023	0.495	-0.714	0.725	-0.521	0.830	-0.148	0.974	0.130	0.958	0.229	0.366	0.858			-1.000	0.500
			-1.136	0.355	-0.833	0.651	-0.625	0.776	-0.222	0.972	0.065	0.983	0.229	0.305	0.893			-1.091	0.480
			-1.250	0.311	-0.952	0.567	-0.729	0.723	-0.296	0.944	0.0	1.0	0.229	0.244	0.918			-1.182	0.333
			-1.364	0.258	-1.071	0.449	-0.833	0.653	-0.370	0.929	-0.065	0.978	0.229	0.183	0.934				
			-1.477	0.175	-1.191	0.429	-0.938	0.556	-0.444	0.850	-0.130	0.958	0.229	0.122	0.956				
			-1.591	0.142	-1.310	0.373	-1.042	0.499	-0.518	0.822	-0.195	0.946	0.229	0.061	0.984				
			-1.705	0.111	-1.429	0.316	-1.146	0.413	-0.593	0.775	-0.260	0.894	0.229	0.0	1.0				
					-1.548	0.251	-1.250	0.368	-0.667	0.741	-0.325	0.870	0.229	-0.061	0.994				
					-1.667	0.197	-1.354	0.314	-0.741	0.685	-0.390	0.848	0.229	-0.183	0.915				
					-1.786	0.134	-1.458	0.282	-0.815	0.653	-0.455	0.794	0.229	-0.305	0.880				
					-1.905	0.108	-1.563	0.275	-0.889	0.598	-0.520	0.749	0.229	-0.366	0.852				
					-2.024	0.099	-1.667	0.238	-0.963	0.535	-0.584	0.708	0.229	-0.488	0.694				
					-2.143	0.089	-1.771	0.212	-1.037	0.475	-0.649	0.676	0.229	-0.610	0.647				
							-1.875	0.141	-1.111	0.443	-0.714	0.627	0.229	-0.732	0.599				
							-1.979	0.127	-1.185	0.381	-0.779	0.597	0.229	-0.854	0.562				
									-1.259	0.341	-0.844	0.577	0.229	-0.976	0.473				
									-1.333	0.287	-0.909	0.543	0.229	-1.098	0.432				
											-0.974	0.504	0.229	-1.220	0.382				
											-1.039	0.464	0.229	-1.342	0.360				
											-1.104	0.450	0.229	-1.464	0.334				
											-1.169	0.430	0.229	-1.585	0.268				
											-1.234	0.405	0.229	-1.707	0.252				
											-1.299	0.381	0.229	-1.829	0.221				
											-1.364	0.322	0.229						
											-1.429	0.297	0.229						
											-1.494	0.241	0.229						
											-1.559	0.224	0.229						
											-1.624	0.219	0.229						
											-1.688	0.197	0.229						

表-8 ノズル径 9mmφ

X=1cm		X=3cm		X=5cm		X=10cm		X=15cm		X=20cm		X=25cm		X=30cm		X=40cm		X=50cm	
y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀	y/Y	u/u ₀
1.110	0.154	1.470	0.026	2.000	0.107	1.579	0.164	1.739	0.190	1.455	0.209	1.543	0.278	1.400	0.249	2.162	0.055	1.391	0.281
0.952	0.820	1.323	0.178	1.846	0.128	1.474	0.205	1.652	0.207	1.394	0.239	1.486	0.293	1.360	0.290	2.029	0.082	1.304	0.301
0.793	0.968	1.176	0.253	1.692	0.193	1.368	0.273	1.565	0.279	1.333	0.283	1.429	0.309	1.320	0.311	1.892	0.109	0.217	0.331
0.634	1.000	1.029	0.397	1.539	0.214	1.263	0.300	1.478	0.306	1.273	0.332	1.371	0.329	1.286	0.332	1.757	0.169	1.130	0.40
0.476	1.000	0.882	0.632	1.385	0.278	1.158	0.341	1.391	0.339	1.212	0.374	1.314	0.339	1.240	0.361	1.622	0.229	1.043	0.441
0.317	1.000	0.735	0.810	1.231	0.332	1.053	0.436	1.364	0.368	1.152	0.394	1.257	0.383	1.200	0.373	1.487	0.290	0.956	0.515
0.158	1.000	0.538	0.971	1.077	0.449	0.947	0.521	1.217	0.382	1.091	0.432	1.200	0.401	1.160	0.394	1.352	0.333	0.870	0.55
0.000	1.000	0.441	1.000	1.000	0.546	0.847	0.563	1.130	0.435	1.030	0.473	1.143	0.410	1.120	0.415	1.216	0.393	0.782	0.603
-0.158	1.000	0.294	1.000	0.769	0.663	0.737	0.693	1.044	0.484	0.970	0.517	1.086	0.454	1.080	0.436	1.081	0.454	0.696	0.651
-0.317	1.000	0.147	1.000	0.615	0.813	0.632	0.753	0.957	0.537	0.909	0.585	1.029	0.481	1.040	0.477	0.946	0.525	0.609	0.762
-0.476	1.000	0.000	1.000	0.462	0.912	0.526	0.805	0.870	0.599	0.849	0.610	0.971	0.531	1.000	0.498	0.811	0.607	0.522	0.799
-0.634	1.000	0.147	1.000	0.308	0.974	0.421	0.932	0.783	0.650	0.788	0.652	0.914	0.559	0.960	0.539	0.676	0.656	0.435	0.824
-0.793	0.968	0.294	1.000	0.154	0.996	0.316	0.940	0.696	0.719	0.727	0.696	0.857	0.586	0.920	0.560	0.541	0.759	0.348	0.846
-0.952	0.820	0.441	0.000	0.0	1.0	0.211	0.983	0.609	0.770	0.667	0.740	0.800	0.611	0.880	0.581	0.445	0.809	0.261	0.911
-1.110	0.154	0.588	0.971	-0.154	1.006	0.105	0.996	0.522	0.813	0.606	0.768	0.743	0.617	0.840	0.602	0.270	0.869	0.174	0.956
		-0.735	0.810	-0.308	0.976	-0.0	1.0	0.435	0.857	0.545	0.819	0.686	0.663	0.800	0.622	0.135	0.940	0.087	0.993
		-0.882	0.632	-0.462	0.924	-0.105	0.994	0.348	0.895	0.485	0.870	0.629	0.682	0.760	0.664	0.0	1.0	0.0	1.0
		-1.029	0.397	-0.615	0.824	-0.211	0.985	0.261	0.926	0.424	0.882	0.571	0.713	0.720	0.685	-0.135	0.945	-0.087	0.993
		-1.176	0.253	-0.769	0.675	-0.311	0.941	1.174	0.941	0.364	0.905	0.514	0.741	0.680	0.705	-0.270	0.858	-0.174	0.956
		-1.323	0.178	-0.923	0.560	-0.421	0.934	0.087	0.975	0.303	0.928	0.457	0.793	0.640	0.726	-0.405	0.803	-0.261	0.941
		-1.470	0.126	-1.077	0.454	-0.526	0.818	0.0	1.0	0.242	0.940	0.400	0.818	0.600	0.747	-0.541	0.765	-0.348	0.846
				-1.231	0.321	-0.632	0.756	-0.087	0.983	0.182	0.951	0.343	0.846	0.560	0.788	-0.626	0.656	-0.435	0.824
				-1.385	0.277	-0.737	0.693	-0.174	0.952	0.121	0.986	0.286	0.873	0.520	0.809	-0.811	0.601	-0.522	0.699
				-1.539	0.212	-0.842	0.563	-0.261	0.933	0.061	0.998	0.329	0.895	0.480	0.830	-0.946	0.525	-0.609	0.662
				-1.692	0.190	-0.947	0.525	-0.348	0.900	0.0	1.0	0.171	0.926	0.440	0.851	1.081	0.454	-0.696	0.581
				-1.845	0.127	-1.053	0.441	-0.435	0.866	-0.061	0.998	0.114	0.957	0.400	0.871	1.216	0.399	-0.782	0.574
				-2.000	0.108	-1.158	0.346	-0.522	0.817	-0.121	0.986	0.057	0.986	0.350	0.892	1.350	0.339	-0.870	0.551
						-1.263	0.304	-0.609	0.780	-0.182	0.958	0.0	1.0	0.320	0.929	1.487	0.290	-0.956	0.515
						-1.368	0.274	-0.696	0.721	-0.242	0.940	-0.057	0.988	0.280	0.938	1.622	0.240	-1.043	0.441
						-1.474	0.209	-0.783	0.666	-0.303	0.928	-0.114	0.957	0.240	0.954	1.757	0.175	-1.130	0.368
						-1.579	0.166	-0.870	0.623	-0.364	0.902	-0.171	0.926	0.200	0.975	-1.892	0.109	-1.217	0.331
								-0.957	0.556	-0.424	0.882	-0.229	0.901	0.160	0.975	-2.027	0.082	-1.304	—
								-1.044	0.480	-0.485	0.872	-0.286	0.880	0.120	0.979	-2.162	0.055	-1.391	—
								-1.130	0.435	-0.545	0.819	-0.343	0.841	0.080	0.983				
								-1.217	0.386	-0.606	0.768	-0.400	0.818	0.040	0.992				
								-1.304	0.375	-0.667	0.740	-0.457	0.793	0.0	1.0				
								-1.391	0.332	-0.727	0.696	-0.514	0.741	-0.040	0.987				
								-1.478	0.308	-0.788	0.654	-0.571	0.716	-0.120	0.979				
								-1.565	0.281	-0.849	0.610	-0.629	0.688	-0.200	0.975				
								-1.652	0.277	-0.909	0.582	-0.686	0.663	-0.280	—				
								-1.739	0.208	-0.970	0.513	-0.743	0.626	-0.360	0.892				
										-1.030	0.473	-0.800	0.602	-0.440	0.830				
										-1.091	0.425	-0.857	0.586	-0.529	0.788				
										-1.152	0.399	-0.914	0.531	-0.600	0.743				
										-1.212	0.378	-0.971	0.478	-0.680	0.745				
										-1.273	0.336	-1.029	0.429	-0.760	0.664				
										-1.333	0.309	-1.086	0.407	-0.840	0.602				
										-1.394	0.282	-1.143	0.398	-0.920	0.560				
										-1.455	0.234	-1.200	0.383	-1.000	0.498				
												-1.257	0.359	-1.080	0.436				
												-1.314	0.324	-1.160	0.394				
												-1.371	0.309	-1.240	0.361				
												-1.429	0.293	-1.320	0.311				

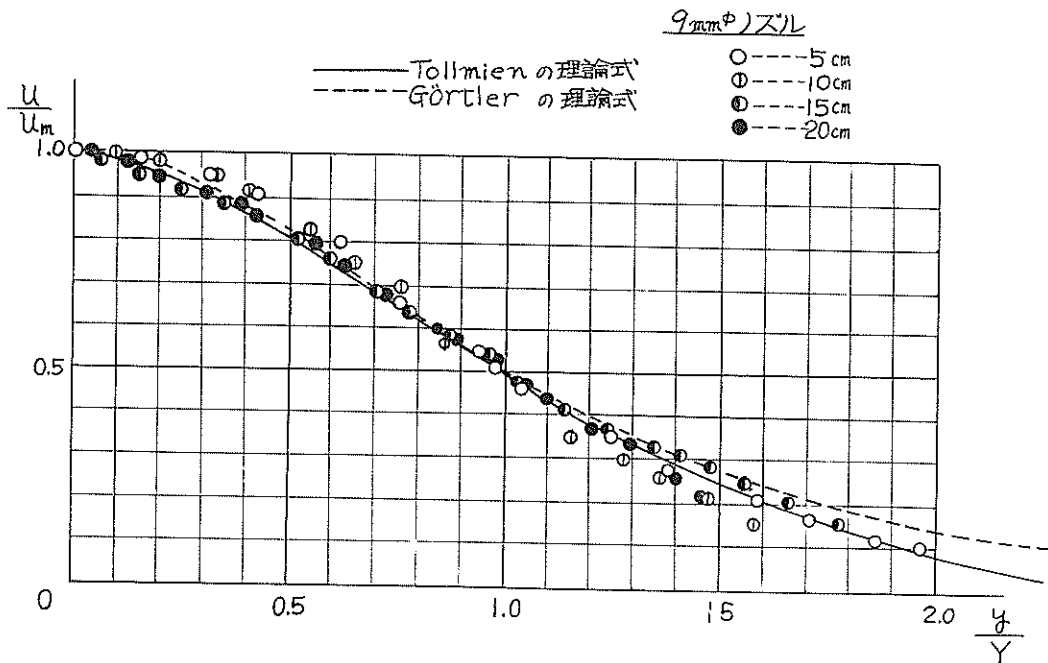


図一13 パラメーター変換した各理論曲線の比較

近い距離において（5 cm～25cm）いずれも理論曲線より過大に出る傾向があり、ノズルから遠ざかるにつれて過少になる傾向がある。また各ノズルともB領域と考えられる距離においても他の断面と同様の傾向を示し、ある程度の相似性が確認出来る。この領域には相似性はない

と他の文献にはみられるが、多少存在するようである。

以上のことから、多少の差はあるが、Tollmien等の理論式は今回の実験においてもその適応性が充分確認出来た。



図一14 理論式と実験値との比較

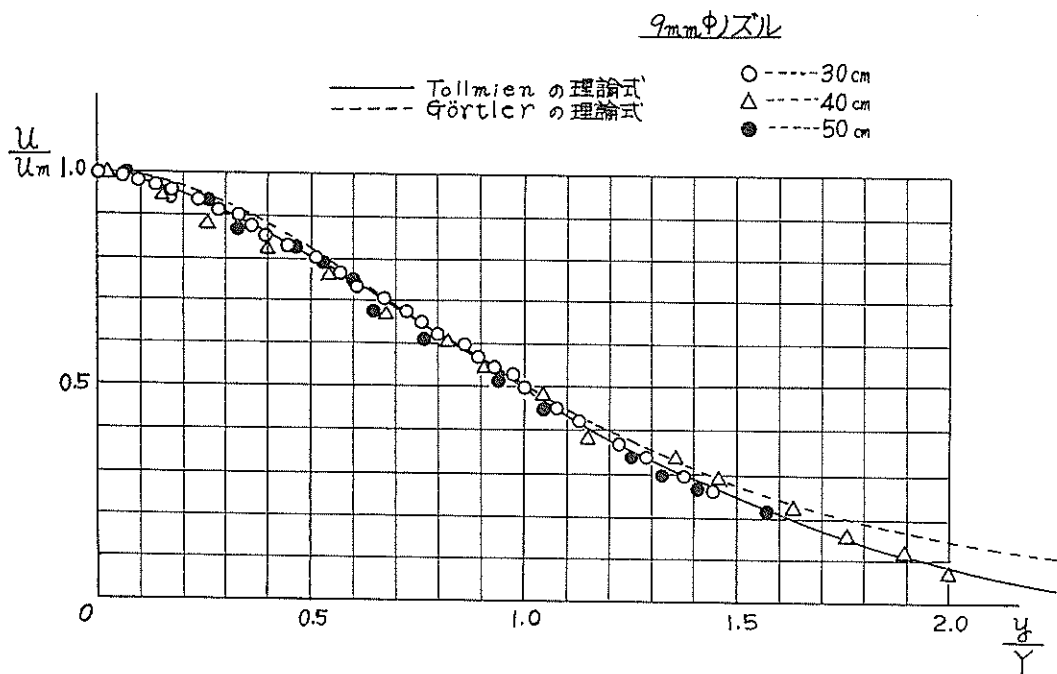


図-15 理論式と実験値との比較

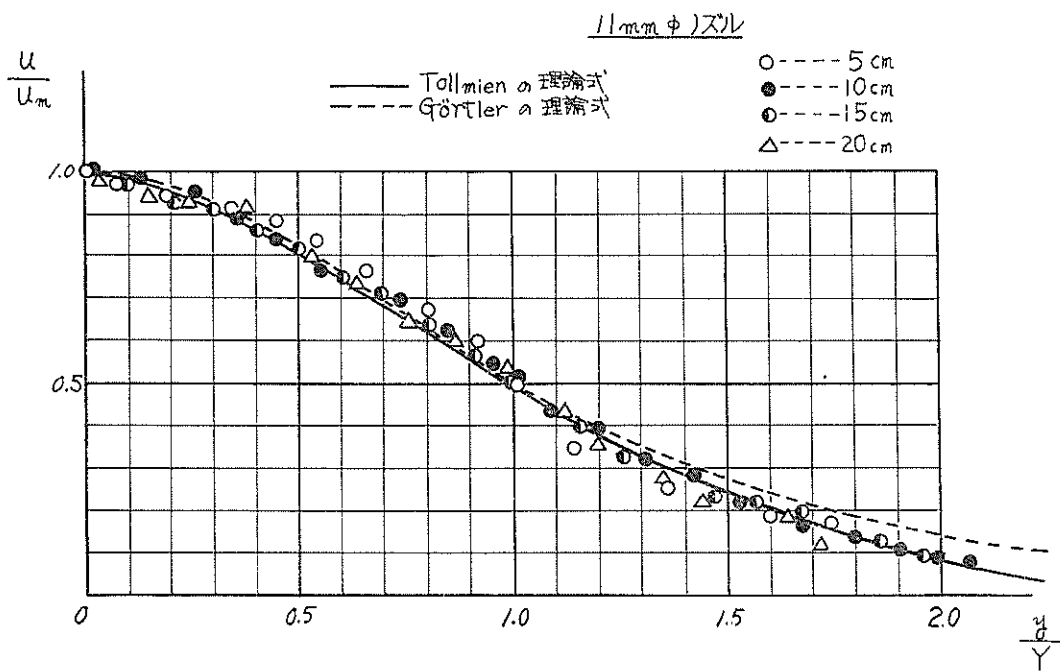


図-16 理論式と実験値との比較

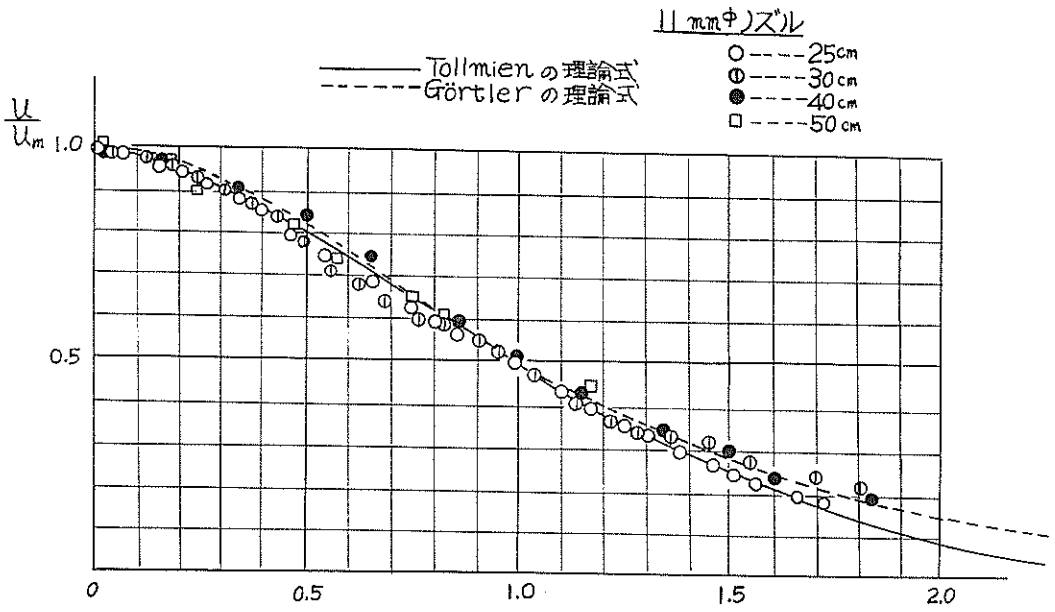


図-17 理論式と実験値との比較

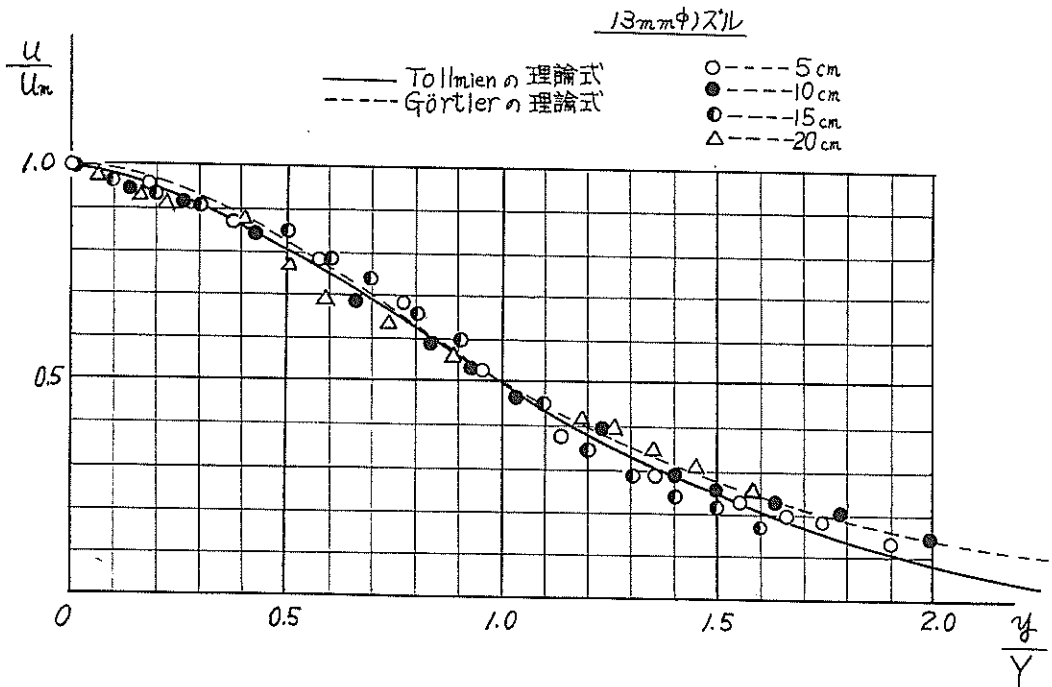


図-18 理論式と実験値との比較

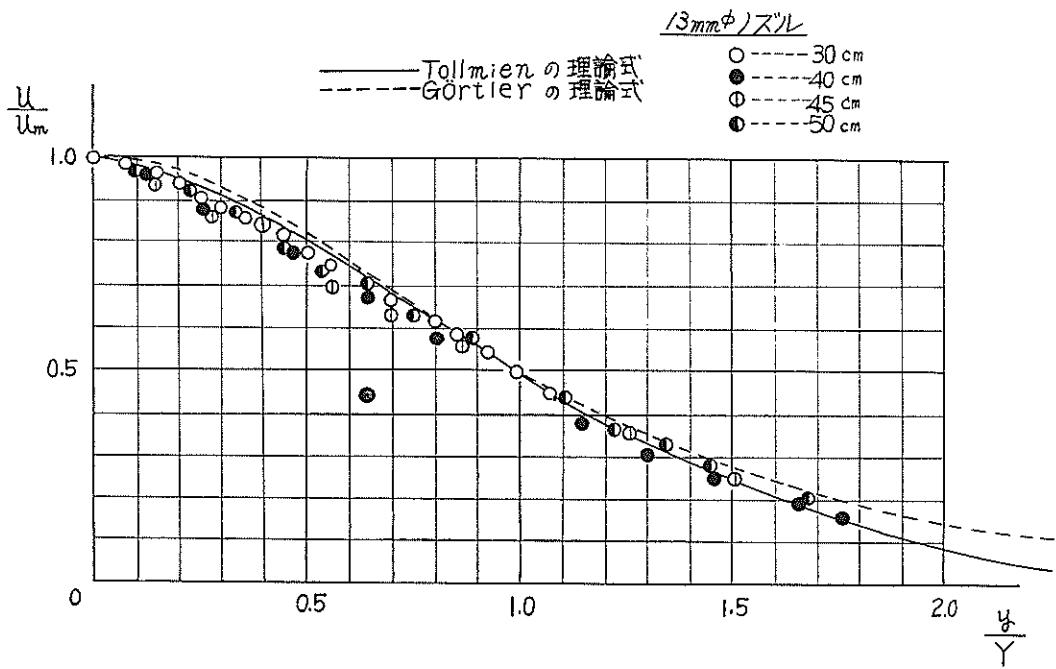


図-19 理論式と実験値との比較

④ D領域について

この領域については外国の学者などの文献などには発表されていないが、我が国においては、さきに示した佐藤、細井両氏の実験、岩崎、千秋両氏の実験にも指摘されているように、C領域より更に下流にD領域なる新しい領域を設定しなければ説明出来ない領域があり、これも今回の実験で確認出来た。すなわち図-7, 8, 9にも明らかなように中心流速がC領域よりも更に急激に減少する区域が各ノズルごとに見い出される。しかしその区域の始まる点は各ノズルごとに異なり、9mmφノズルでは52Rから、11mmφノズルでは72Rから、13mmφノズルでは40Rから始っており、それぞれかなり異なってくる。なお、佐藤、細井両氏の実験では72RからこのD領域が始まっているとしている。

このように、この領域がどこから始まるかについて、今回の実験で、はっきりしたことはいえない。いずれにしても、このようなD領域が存在することは確かである。

⑤ まとめ

以上、調査した実験結果は、すべて広い静止した障害物のない水中に噴出された時の噴流の構造を調査したもので、実際に岩盤に衝突して掘削を開始している状態における噴流の構造ではないので、これらの調査結果をそのまま噴流による掘削現象について適用出来るものではない。しかし少なくとも、掘削開始前の噴流の構造が以上のようなものであることが確認された。なお今後、我々は種々の掘削過程における噴流の構造についての研究、解析を行なう予定である。

3. 噴流によるモルタル試料掘削実験結果

噴流による基本的構造についての調査結果は以上述べた通りだが、次にこの噴流によるモルタル試料の掘削、破碎についての調査を行った。破碎供試料としてモルタル製の模型試料を数多く製作し、数々の掘削実験を行なったが、その破碎現象を理論的に考察することは、現在の未熟、且つ不完全な知識では困難であった。なぜなら破碎手段が連続の水流であることと、被破碎物自体の構造が複雑であることと、更に噴流の被破碎物体への衝突現象、及び被破碎物の破碎現象、破碎された破片の水流による拡散現象及び衝突後の水流のはねかえりによる干渉などを理論的にとらえることが困難であったからである。そこでとりあえず今回は、実際の掘削実験を行い、その現象を観察し、噴流の実際の浸透への応用の際に必要な掘削能力、及び掘削形状等の調査を行った。

1) 試験装置

試験装置としては、噴流の構造を調査するために使用した同一のポンプ、及び図-20に示す水槽を用い、水は清水を使用した。またノズルは今回は13mmφのもののみを使用した。これは使用するポンプの圧力が径を変えてもあまり大きな変化を期待出来ないことと、ノズル径等を変化させることにより実験自体が非常に大規模となるので、今回はこの径のノズルのみを使用した場合について行い、ノズル径の変化による掘削実験は他の機会に調査することにした。また本実験に使用したモルタル試料は、掘削効果を詳細に調査するために、出来るだけ大きなブロックとして製作し、角型(600mm×700mm×350mm)、及び円柱型(径350mm×高さ600mm)のものを使用した。これらは皆実験室内で製作し、砂とセメントとの配合比を変えることにより圧縮強度を変えて、6種のグループのモルタルブロックに分けて製作した。モルタルブロックの圧縮強度は、アムスラー試験機で測定し、ポンプの吐出圧力の関係から各々のブロックの圧縮強度は34kg/cm²~88kg/cm²のものを製作して使用した。なお製作したモルタルの圧縮強度の測定結果は表-9に示す。表-9からもわかるように圧縮強度の均一なモルタル試料を製作することは困難であり、ある程度のばらつきはやむをえなかった。また極端に圧縮強度の違った試料について行った場合の掘削データは採用しなかった。ポンプの運転状態は、先に示した噴流の構造の調査と比較、対照させるため同じ運転条件の下で運転させた。すなわち13mmφのノズルを使用した時、ノズル出口圧力40kg/cm²となるようにした。

実験はノズルを固定させた場合、ノズルを噴流の吐出方向と直角な方向に直線的に移動した場合(但し、実験

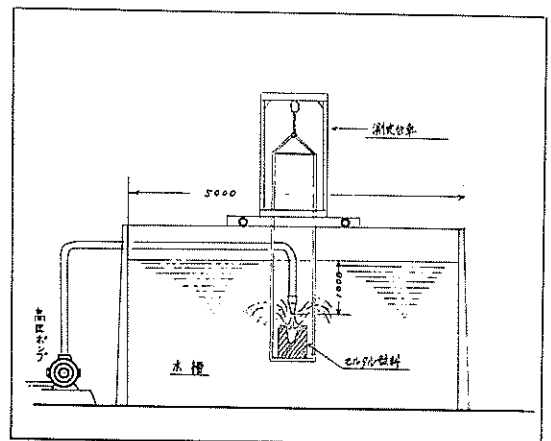


図-20 掘削実験図

では試料の方を動かした), ノズルに首振り運動を与えながら移動させた場合の3種の状態でノズルと試料との距離の変化, 掘削時間, 試料の圧縮強度, ノズルの移動速

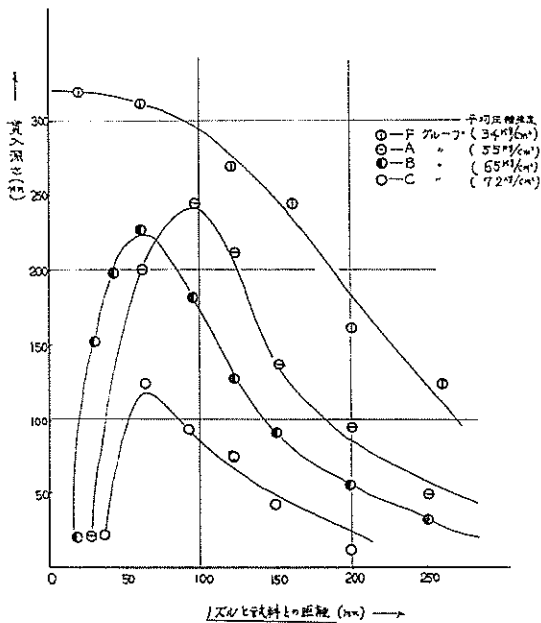
度の変化によって, 掘削深さ, 掘削形状, 掘削量の変化を求めることを主目的とした。

1 2 3	1			2			3			4			5			平均
	イ	ロ	ハ	イ	ロ	ハ	イ	ロ	ハ	イ	ロ	ハ	イ	ロ	ハ	
	A	54.8	55.9	56.3	50.2	55.8	55.0	52.5	53.2	52.0	56.5	58.5	57.5	55.3	56.2	
B	67.5	64.5	66.8	64.3	64.0	63.0	69.3	68.5	69.0	62.0	64.0	63.5				65.5
C	70.5	74.8	72.6	74.5	72.8	70.3										72.0
D	88.5	88.0	86.0	85.0	84.9	86.0										86.4
E	39.8	40.9	41.5	38.8	39.9	39.6	40.5	41.5	41.8							40.5
F	33.4	33.2	30.5	35.5	34.8	36.8										34.0

表一 9 圧縮強度測定表 (kg/cm²) ①測定回数 ②種別 ③モルタルグループ名

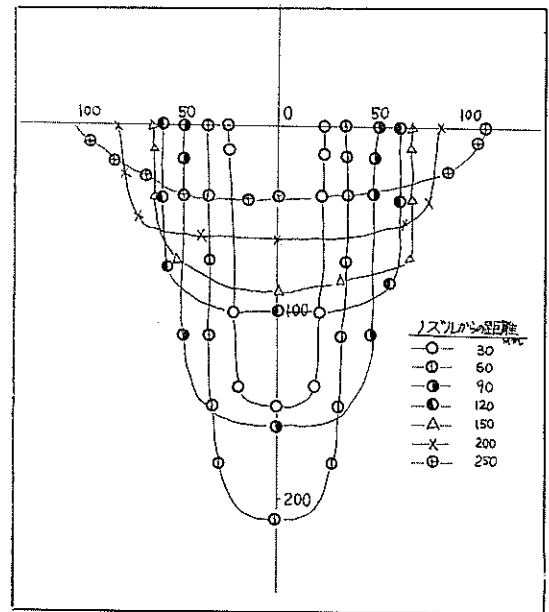
2) ノズルを固定させた場合の掘削実験結果

ノズルを固定させて, ノズルと試料との距離を変えることにより, その深さ, 掘削形状がどのように変化するかを調査したのがこの実験の目的である。



図一21 ノズルからの距離と貫入深さの関係

図一21はモルタル, A, B, C, Fのグループをノズルからの距離を変化させることにより60秒間掘削した結果で, ノズルからの距離に対応する掘削深さの関係を図示したものである。



図一22 掘削形状断面図 (Bグループモルタル)

図一22, 23はモルタルBグループ, Aグループの掘削された形状を描いたものである。これら3つの図と先に示した噴流の速度分布の図一6と比較対照しながら観察してみるなら, 圧縮強度の比較的高いA, B, Cのグループ(圧縮強度が55kg/cm²以上のもの)では, ノズルからの試料の距離が遠ざかる程, その掘削径が大になり, 掘削深さが浅くなる。現象は図一6からも明らかのように, 噴流の構造を考えてみた場合極めて当然な結果で噴流の拡散現象にほぼ対応する掘削形状となる。しかし掘削深

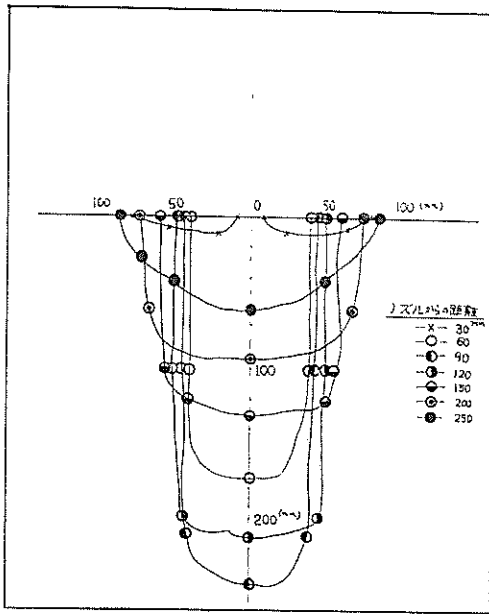


図-23 掘削形状断面図 (Aグループモルタル)

さについて調べてみるなら、各試料によってそれぞれ異なる極大値を生ずるノズルと試料との距離が存在してくる。すなわちBグループモルタル試料では、 $l=60\text{mm}$ で最大掘削深さ230mmを生じ、モルタルAグループでは $l=90\text{mm}$ で最大掘削深さ250mmを生じ、更にモルタルCグループでは $l=50\text{mm}$ で最大値を生じている。そして極大値を生ずる位置からノズルが遠のくと今度は各々の曲線に沿ってその掘削深さが減少していく。しかし逆にノズルが試料に近づいていくと、やはり掘削深さが減少していき、極端に近づくと、例えば $l=30\text{mm}$ 前後、すなわち噴流の構造上の区分では、A領域に属する位置では、ノズル口直下で噴流が最高の圧力をもつところでありながら、ほとんど掘削されず、その周囲が図-24に示すように極く薄く掘削されるだけである。この現象はA、B、Cのモルタルグループのいずれにも観察された。ところが圧縮強度の低いFグループのモルタル(圧縮強度 34kg/cm^2 前後のもの)では、上に述べたような現象は全然みられず、掘削深さはノズルと試料との距離が近づけば、近づく程増大する傾向がある。

以上はモルタルA、B、C、Dのグループモルタルを1分間噴射を行った場合の実験結果であるが、これらの結果から掘削形状を判断するのはあまり意味がなく、更に噴射時間を長くした場合の実験を行ってみた。

図-25は、モルタルAグループを1分間、2分間、3分間掘削した場合の実験結果である。これから観察すると、ノズルからの各距離における試料の掘削深さは時間

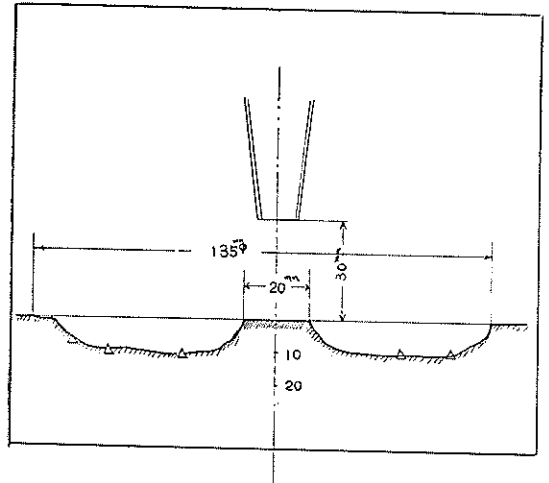


図-24 ノズルを試料に近づけた場合の掘削図

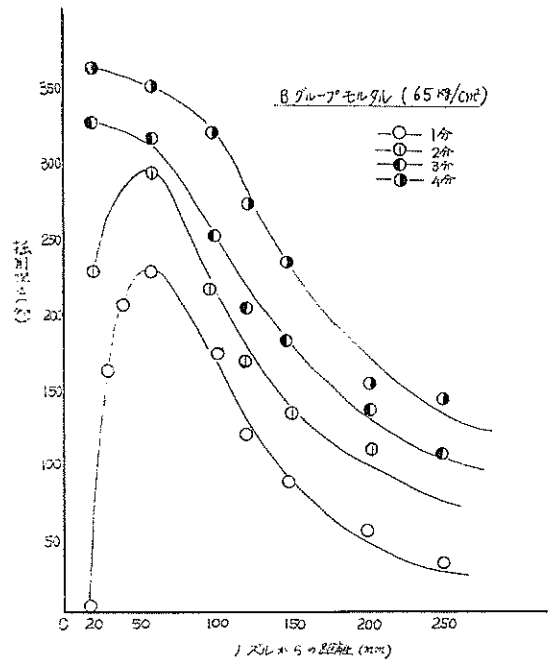


図-25 掘削深さと時間の関係

と共に各々一定量ずつ増加していく傾向が見られて、しかも3分間、4分間の掘削の場合には1分間掘削の際に観察されたノズル直下では全然掘削されないという現象はみられず、ノズルが試料に近づけば近づく程、掘削深さが増大する傾向がある。すなわち1分間掘削では $l=30\text{mm}$ 前後の距離では、ノズルの直下では掘削されないが、次第に3分、4分と時間が増加すると共に周囲から掘削され、遂には中心附近も掘削が開始されると思われる。

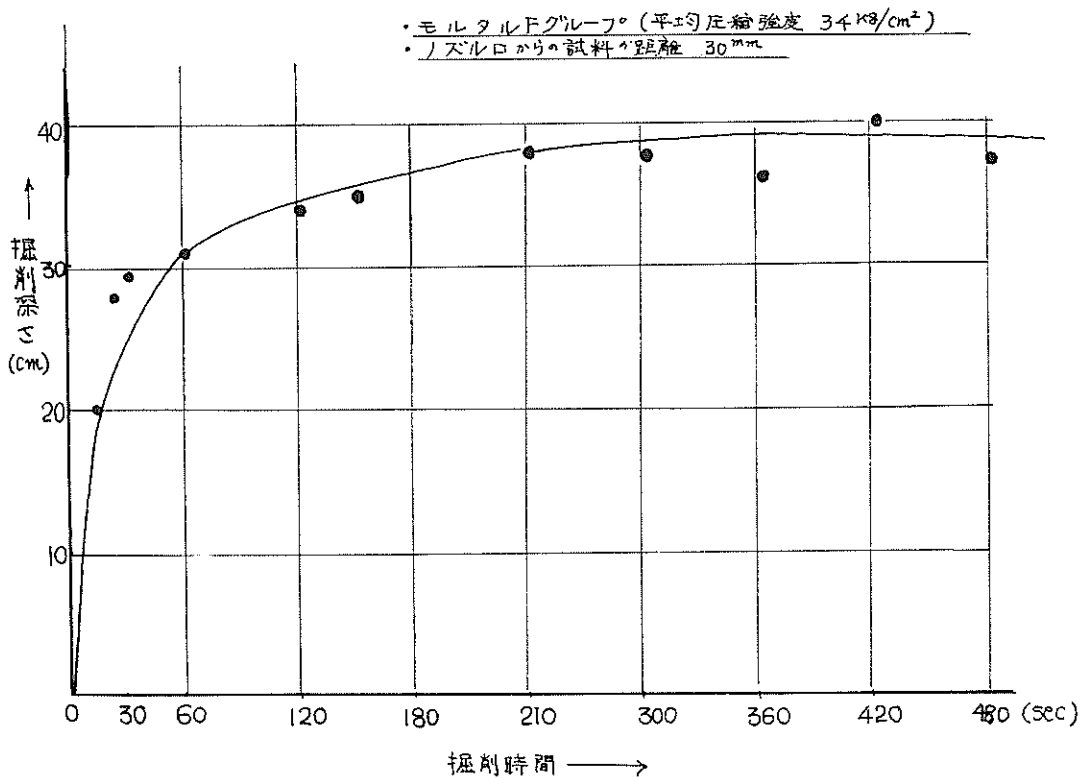


図-26 掘削深さと時間の関係

次に図-26は、モルタルFグループについて、ノズルからの距離 $l = 30\text{mm}$ において、30秒、60秒、120秒、300秒、400秒間の掘削深さを調査した結果である。この図からも判断出来るが、掘削深さは最初の秒間に急激に進行して、そのあとなだらかに進んで行く。この図からも明らかなように、掘削深さは時間と共に進行して行くが必ずある限界にたつする。これは当然のことで、ノズルから遠ざかるにつれて噴流の圧力が減少してある圧力以下ではどんなに長時間噴射しても破砕が生じないであろう。またこの図でわかるように、500秒前後で最大掘削深さにたつしていると思われる。

X	P	X/R	P/P ₀	X	P	X/R	P/P ₀	X	P	X/R	P/P ₀
1	43.9	1.5	1.00	20	11.4	30.8	0.26	39	2.4	60.0	0.05
2	43.9	3.1	1.00	21	10.2	32.3	0.23	40	2.4	61.5	0.05
3	43.9	4.6	1.00	22	9.7	33.8	0.22	41	2.4	63.1	0.05
4	43.9	6.2	1.00	23	8.9	35.4	0.20	42	2.4	64.6	0.05
5	43.5	7.7	0.99	24	8.1	36.9	0.18	43	2.0	66.2	0.05
6	41.8	9.2	0.95	25	7.7	38.5	0.18	44	2.0	67.7	0.05
7	38.6	10.8	0.88	26	7.7	40.0	0.18	45	1.6	69.2	0.04
8	34.5	12.3	0.79	27	6.5	41.5	0.15	46	1.6	70.8	0.04
9	31.3	13.8	0.71	28	5.7	43.1	0.13	47	1.6	72.3	0.04
10	27.2	15.4	0.62	29	5.5	44.6	0.13	48	1.4	73.8	0.03
11	24.3	16.9	0.55	30	5.3	46.2	0.12	49	1.3	75.4	0.03
12	21.5	18.5	0.49	31	4.9	47.7	0.11	50	1.1	76.9	0.03
13	19.1	20.0	0.44	32	4.9	49.2	0.11	51	1.1	78.5	0.03
14	17.5	21.5	0.40	33	4.1	50.8	0.09	52	1.0	80.0	0.02
15	15.8	23.1	0.36	34	3.9	52.3	0.09	53	0.9	81.5	0.02
16	14.6	24.6	0.33	35	3.7	53.8	0.08	54			
17	13.4	26.2	0.31	36	3.7	55.4	0.08	55			
18	12.7	27.7	0.29	37	3.3	56.9	0.08	56			
19	11.8	29.2	0.27	38	3.3	58.5	0.08	57			

表-10 13mmφノズル中心流圧測定表

- x : 噴流の中心軸上におけるノズルからの距離 (cm)
- P : 中心流圧 (kg/cm²)
- R : ノズル半径 6.5mm
- P : ノズル出口圧力 (kg/cm²)

いまこの最大掘削深さ $L\text{mm}$ の平均値 $L/2$ にノズルからの距離 $l\text{mm}$ を加えた距離 $(L/2 + l)\text{mm}$ における噴流の中心流圧を $P\text{kg/cm}^2$ として、試料の圧縮強度と比較してみるならば、この場合 $L = 380\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$ より $L/2 + l = 220\text{mm}$ であるから、ここにおける噴流の中心流圧は、表-10、及び図-27から 9.7kg/cm^2 で、モルタル試料自体の圧縮強度 33kg/cm^2 のわずか $1/3$ 以下である。しかもここで考える中心流圧はあくまで広い静止した水中内に噴出させられた場合の我々が測定したときの

値であり、この場合のように掘削された穴の中での中心流圧は、はねかえりの水流、その他掘削された破片等などの影響によりかなりこの値より低い値であると考えられる。それにもかかわらず、かなり高い圧縮強度の試料

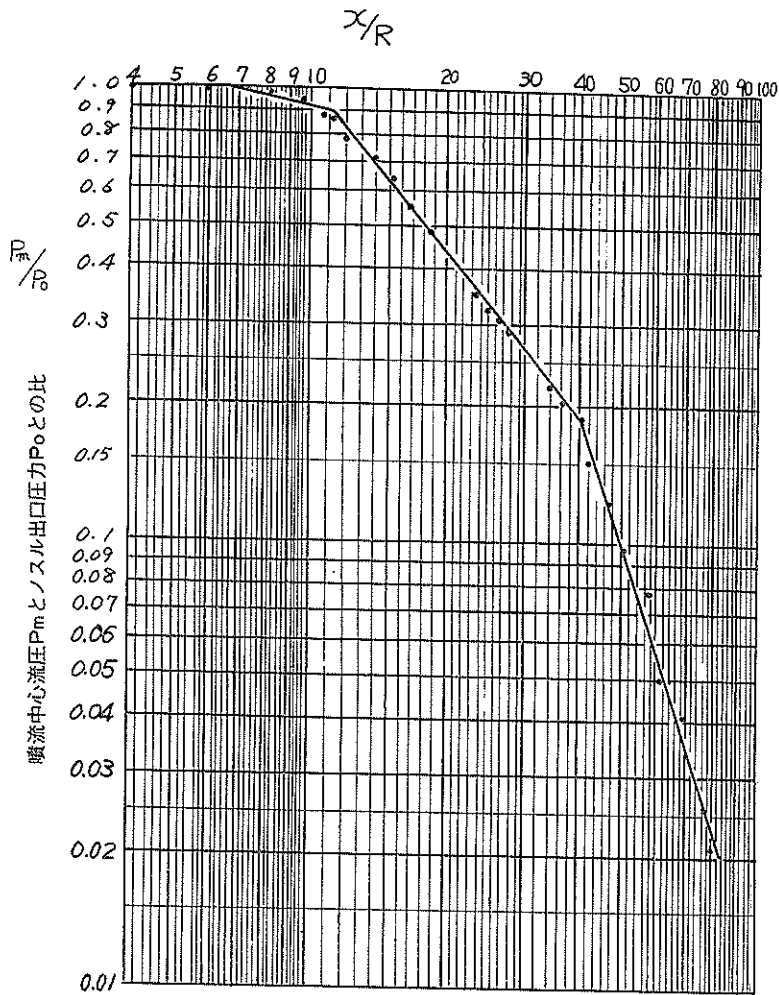


図-27 中心軸上の流圧変化の状況

がこのように掘削されているのである。

次にモルタルの圧縮強度の変化にともなって、掘削深さがどのように変化するのかを調査する実験を行った。すなわち、モルタル試料 A, B, C, D, E, F グループのそれぞれ圧縮強度の異ったものをノズルより60mmの距離から、2分間掘削させた結果が図-28である。これによれば、掘削深さは圧縮強度の増加にともない多少のばらつきはあるが、ほぼ直線的に減少すると考えられる。殊に注目すべきことは、ノズルから最短距離60mmで、圧縮強度 90kg/cm²前後のモルタル試料が120mm程掘削されていることである。しかもこれは、2分間というわずかな掘削時間で行なわれたことであるから掘削時間を長くすることにより、更に掘削深さが増大すると考えられる。この事実から考えてみても、我々の製作したモルタルに関しては、少なくとも噴流の圧力の2倍までの数

の圧縮強度をもつモルタル試料の破壊が可能であると思われる。

また掘削径と噴射時間との関係を調査してみると、図-29よりはっきりわかるようにノズルより定まった距離における掘削径は時間と共に全然変化しない。(掘削深さには、はっきりした時間による影響がある)

次に掘削径とノズルからの距離との関係を調査したのが図-30である。これからわかるように掘削径は噴流の拡散の幅と対応して増大していくが、試料の圧縮強度とは無関係であった。

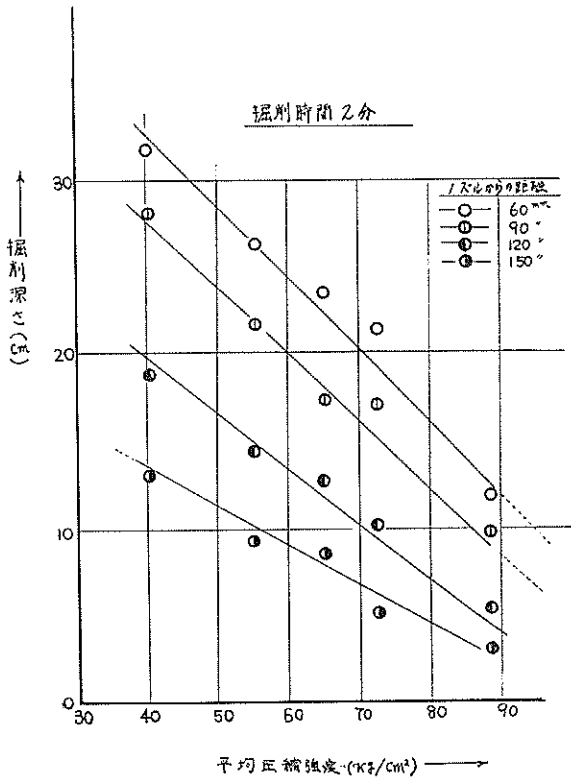


図-28 圧縮強度と掘削深さの関係

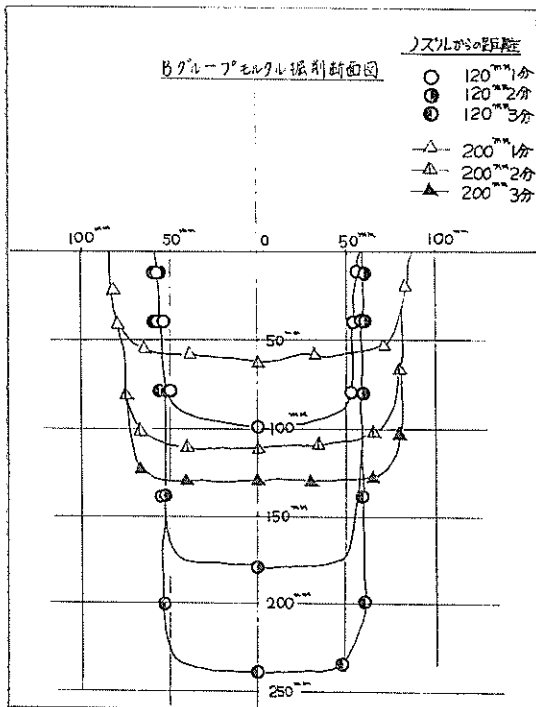


図-29 時間変化による掘削形状の変化

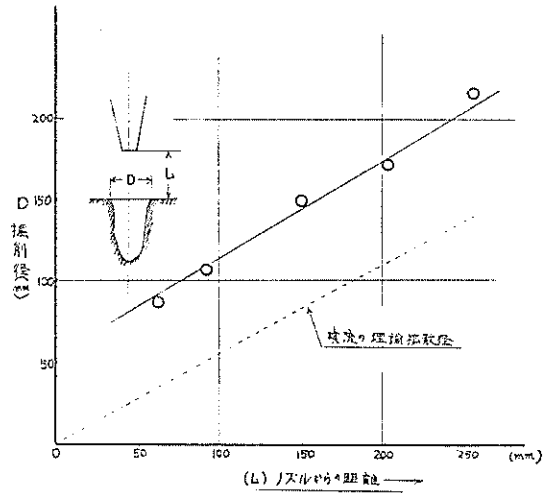


図-30 掘削径のノズルからの距離による変化

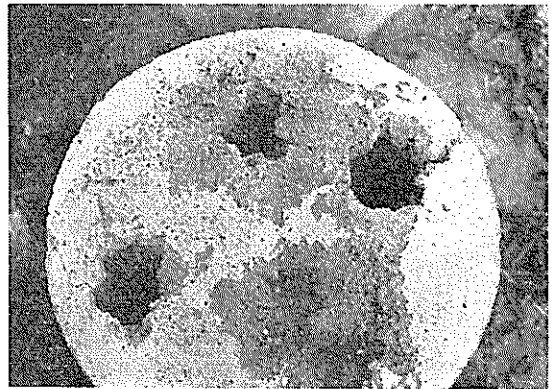


写真-1 ノズル固定による実験結果

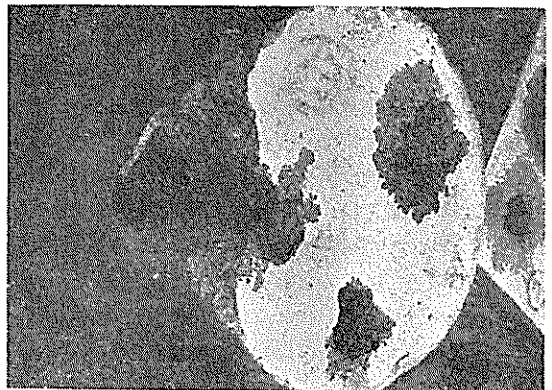
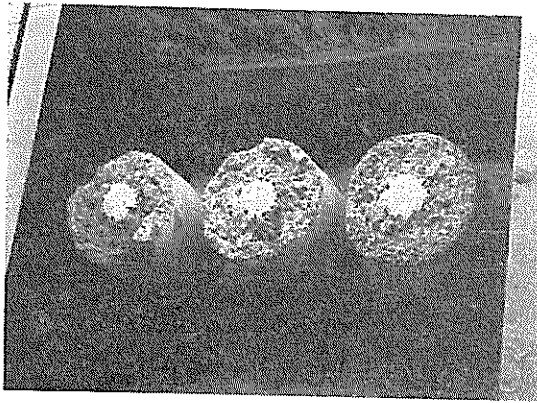


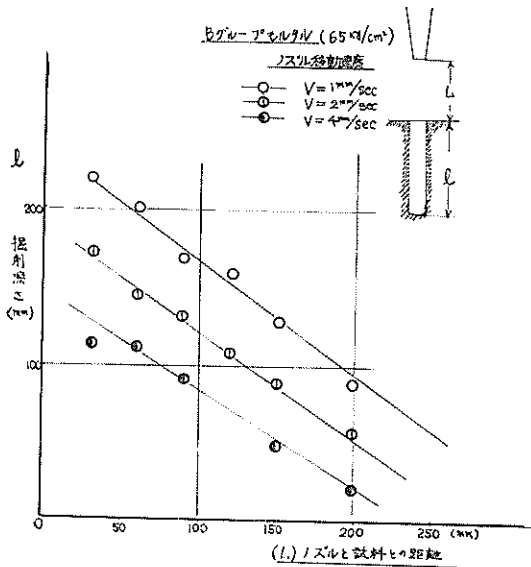
写真-2 ノズル固定による実験結果



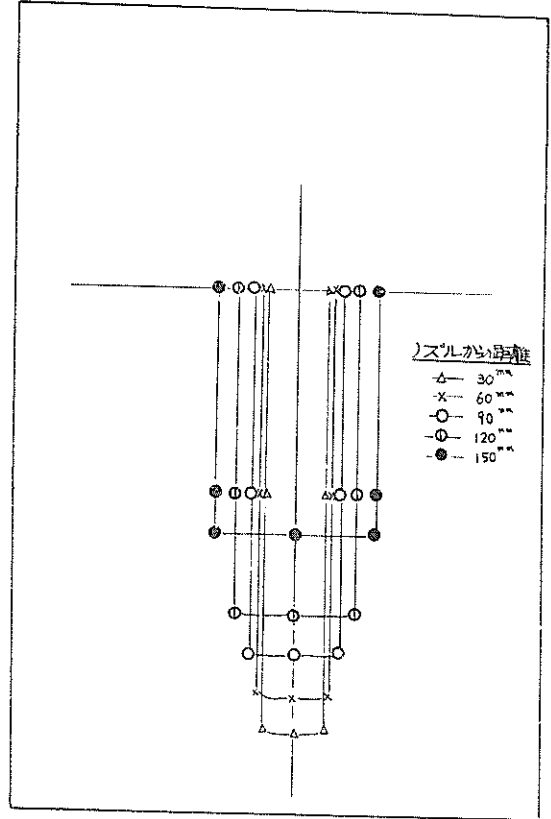
写真—3 ノズルを極端に試料に近づけた場合の掘削結果

3) モルタル試料移動掘削実験結果

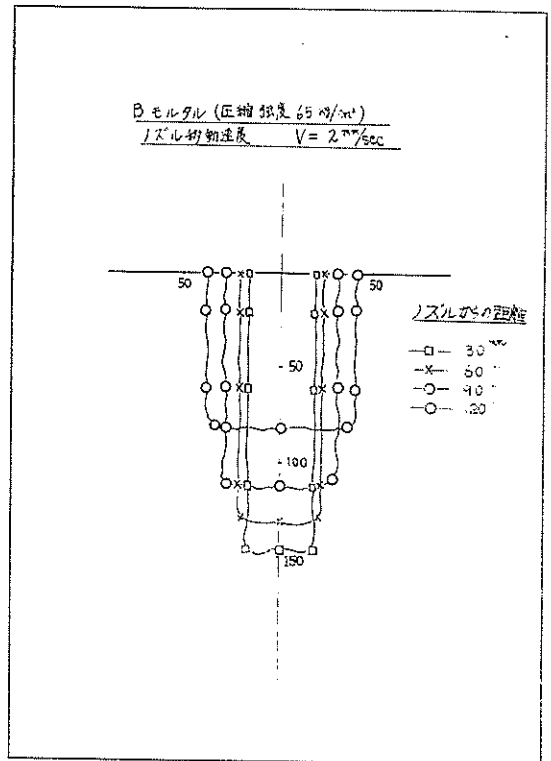
いまで示した実験結果は、ノズルを固定させて噴射時間、試料とノズルとの距離、試料の圧縮強度等を変化させて、掘削させたものだが、これらの結果の実際の応用への効果は薄い。なぜなら噴流による掘削を実際の浚渫に応用するにあたり、ノズルを一箇所に固定させるだけでは意味がなく、時間と共にノズルを移動させ掘削させることにより掘削量を増大させることが必要である。そこで我々は、次に示すようにノズル固定の場合に使用した同一グループのモルタル試料を使用してノズル移動掘削実験を行った。



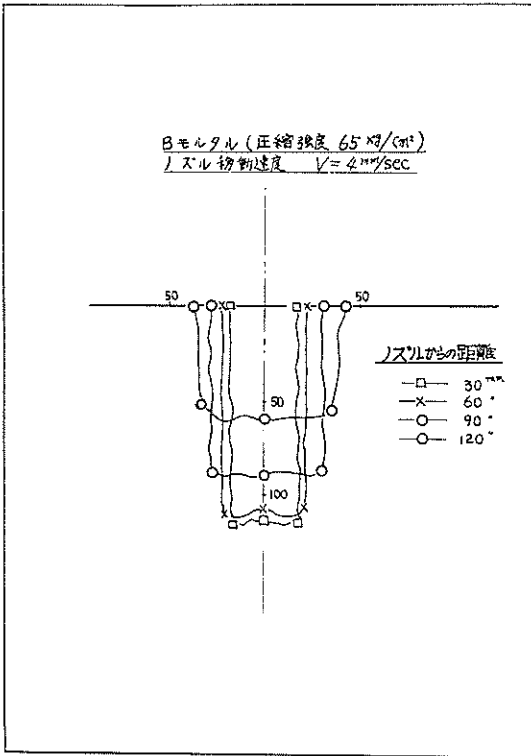
図—31 掘削深さとノズルからの距離との関係



図—32



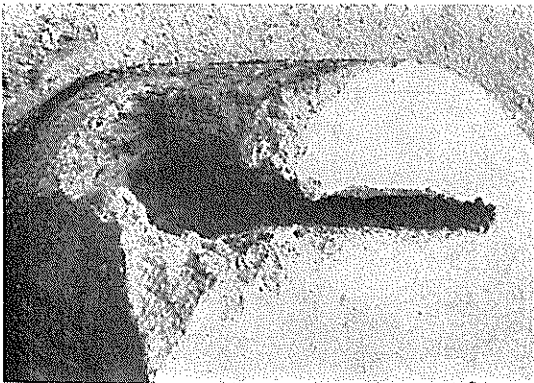
図—33



図—34

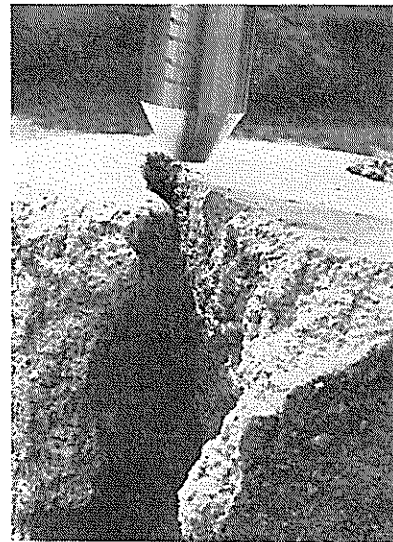
図—31は、モルタルBグループをノズルと試料との距離 L を変化させた場合、ノズル移動速度によりその掘削深さがどのように変化するかを調査した結果である。また図—32, 33, 34等は、これらによって掘削された溝の横断面を描いたものである。当然のことながら、この掘削実験によって、掘削形状は溝状の穴が生じて、その溝の深さはノズルと試料との距離が遠のく程、また移動速度が大になるにつれて浅くなっていき、またその傾向はノズルを固定させた場合の掘削実験と比較すると、固定の場合、ある曲線に沿って減少するのに対し、この場合は、はっきりした直線に沿う減少を示している。また掘削される形状は図—32, 33, 34および写真に示すように、ノズル移動速度が $V = 1 \text{ mm/sec}$ のときは、直線的な掘削跡が生ずるが、移動速度の増加とともにその形状が次第に荒くなり、壁面に凹凸が生じてくることが観察される。

また殊に著しい掘削現象として、このノズル移動掘削の際には、先にノズルを固定させた場合に見られたような、ノズルが極端に試料に近づいた場合図—24に示すように全然掘削されないという現象は見られず、ノズルと試料との距離 $L = 30 \text{ mm}$ の場合にも瞬間的に掘削されることが確かめられた。すなわち、ノズルを少しでも移動させれば、 $L = 30 \text{ mm}$ でも掘削可能である。これらの2つの掘削現象の相違について、ここでははっきりした理論的な精密な結論は出せないが、 $L = 30 \text{ mm}$ の近距離でノズ



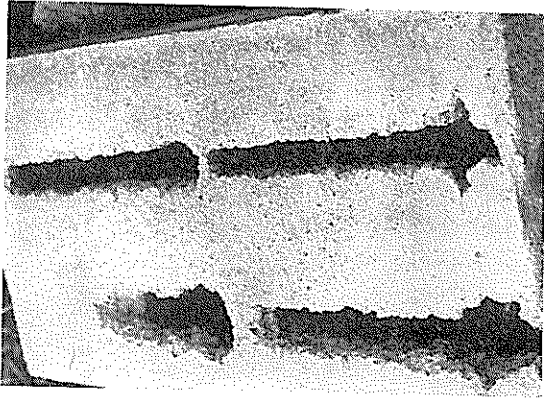
写真—4

ル固定の場合と移動の場合において、ノズルから噴出させられた後の水流の方向が両者の場合かなり異なっている。ノズル固定の場合、試料表面に衝突して噴出された

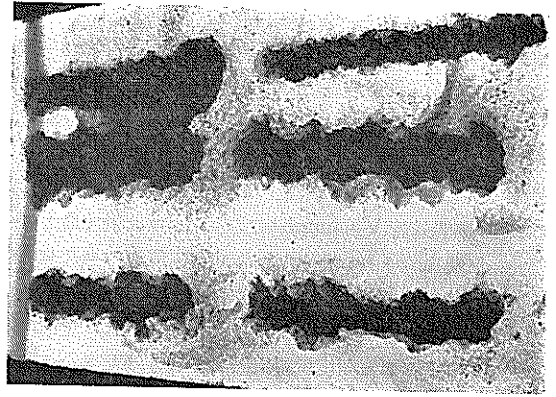


写真—5

方向と全く逆方向にはねかえる水流の影響が多分に考えられるが、移動掘削の場合は、試料に衝突しはねかえった水流は常にノズル移動方向と逆の方向に流れているた



写真—6

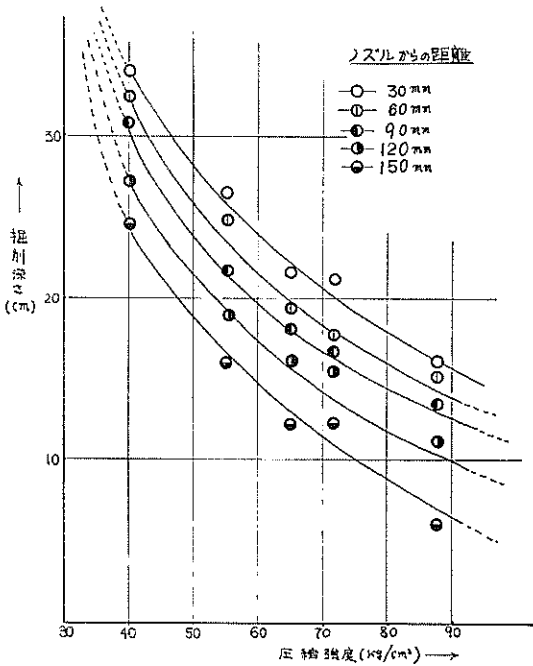


写真—7

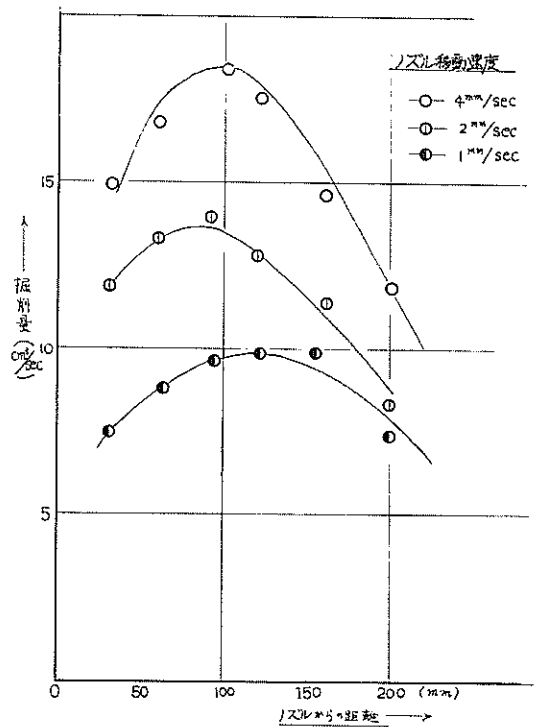
め、はねかえりの水流の影響が少ない。また、ノズルの移動する前に、すでに掘削されているところがあり、その点とノズルとの距離は30mm以上であり、はねかえりの水の影響が少なくなっていると考えられる。以上のことからこのように二つの掘削現象の差が生ずると思われる。なお、この掘削現象の相違については別の機会でご

に詳しく実験し解析する予定である。

図—35は移動速度 $V=1\text{mm/sec}$ のときの、掘削深さの変化をノズルからの距離と圧縮強度との両面から調査した結果を図示したものである。この図からもわかるように、移動速度が一定の時、掘削深さは各試料ではノズル



図—35 掘削深さと圧縮強度の関係

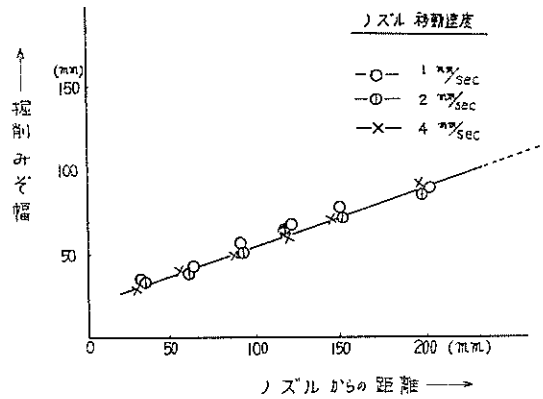


図—36 移動速度と掘削量の関係

からの距離に対応してほぼ同一の割合で減少していくことがわかる。

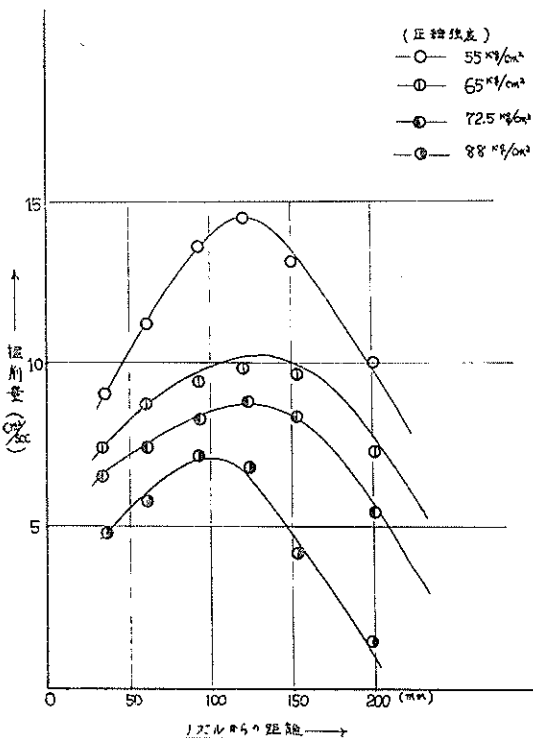
図—36は、モルタル試料Bグループ（圧縮強度65.5kg/cm²）による、移動速度 $V=1$ mm/sec, 2 mm/sec, 4 mm/sec のそれぞれの速度のときの、毎秒あたりの掘削量とノズルからの距離との関係を示した例である。この図から、毎秒あたりの掘削量の最大値を生ずる条件を求めると、移動速度 $V=4$ mm/sec, $L=90$ mm 前後で最大掘削量、毎秒18ccである。すなわち、掘削深さの点においては $L=90$ mm の場合は、 $L=30$ mm のときよりかなり浅いが、掘削される溝幅が広がるので、ノズルを極端に近づけるよりある程度試料表面から遠ざけた場合に、掘削量の増大が期待されると思われる。しかし、これはノズル移動速度がわずか3通りだけの場合の掘削量について調査した結果で、移動速度 $V=4$ mm/sec を超えた場合については行っていないので、はっきりした結論は出せないが、移動速度の増加にともない掘削量が増加するとは考えられない。必ずある最適のノズル移動速度があると思われるが、これも各試料によってかなり異ってくるであろう。ここに示したのは極く限られた一例である。

次に図—37は、各モルタルの圧縮強度が変化した場合の掘削量の変化を移動速度 $V=1$ mm/sec のときの結果を示したものである。この図から判断すると、掘削量はノズルからの距離により異なり、やはりノズルを試料に近づけても必ずしも掘削量が増大するとは限らず、ノズルからのある距離において最大値をとる。すなわち、各圧縮強度のモルタルグループで $L=120$ mm 前後で最大の掘削量を得る。



図—38 ノズル移動速度と掘削みぞ幅の関係

図—38は、モルタルAグループの溝幅を各移動速度により、どのように変化するかを調査した結果である。これによれば溝幅は、やはり噴流の拡散現象に対応するからノズルからの距離に比例して増加するが、移動速度とは全く関係がなかった。



図—37 掘削量と圧縮強度の関係

4) ノズルに首振り運動を与え、かつ移動させて掘削させた実験結果

更に実際の噴流による深溝への応用方法の試みとして、次のような方法を試みた。すなわち図—39に示すように、ノズルを試料に対する垂直軸に対して左右15°ずつ首を振らせ、かつ試料を首を振る面に対し垂直に移動させることにより、ノズル先端を図—40に示すようなジグザグの軌跡を描くような掘削方法をモルタルEグループ（圧縮強度 40.5kg/cm²）を使用して実施した。ただし今回の実験では、首振り速度は一定（20mm/sec）とし、ノズルの移動速度（試料の送り速度） $V=1$ mm/sec, $V=2$ mm/sec の2通りの方法で行った。

そして図—39でノズルが試料に対して垂直のときの試料とノズルとの距離 L と、試料の移動速度 V を変化させた場合の掘削形状、掘削深さ、掘削量などを調査した。この方法による本来の掘削の目的は図—39に示すように

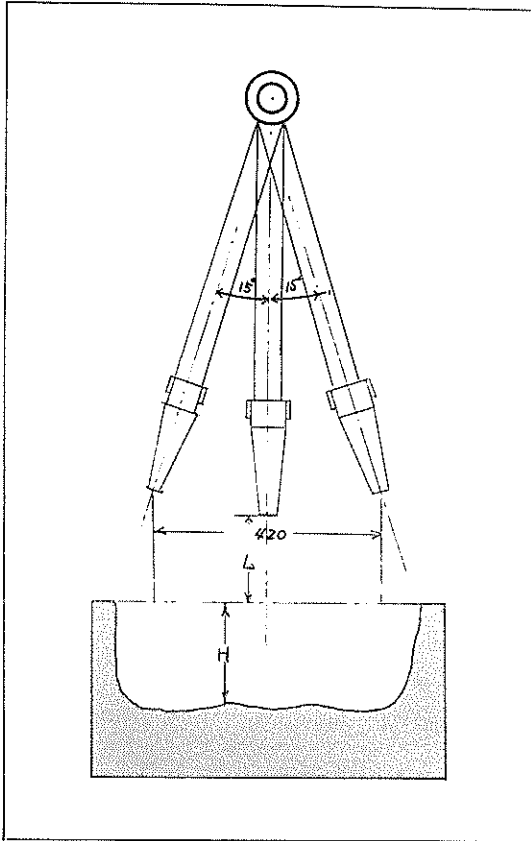


図-39

幅 D' 、深さ H の溝を形成させようとするのが目的で、一本のノズルを用いて広範囲の掘削を試みたもので、単なる移動掘削の際に生じた細く深い溝を作るのではなく、更に実際の浚渫への応用の一つとして実験を行ったものである。

図-41, 42, 43, 44等は $L=30\text{mm}$, 60mm , 90mm , 120mm の場合における移動速度 $V=2\text{mm/sec}$ 、モルタルグループの掘削実験結果である。これらの図から考察するなら、その掘削形状はノズル先端の移動軌跡に対応して溝の両側に周期的な山を生じ、本来の溝掘りの目的を果さないが、 $L=60\text{mm}$ になると、その山が消えてノズルの軌跡が残らない溝が形成された。これはいままでの実験に示されているように、ノズルから試料の距離が遠ざかるにつれ、噴流が拡散されるからであろう。しかし $L=90\text{mm}$ になると山が再び生じて来るが、それは細くなだらかに形成される。 $L=120\text{mm}$ になると更に長くなり、その傾向が大になる。この現象は拡散される幹がノズルから遠のくに従い大になるが、同時に圧力が減少するからであろうと考えられる。

更に移動速度 $V=1\text{mm/sec}$ と遅くすると、今度ははっきりした完全な溝が図-45, 46等にも示すように生じてくる。すなわち、ノズル先端の移動の軌跡に応じた掘削跡が残らず、この実験本来の目的とした掘削が可能となった。

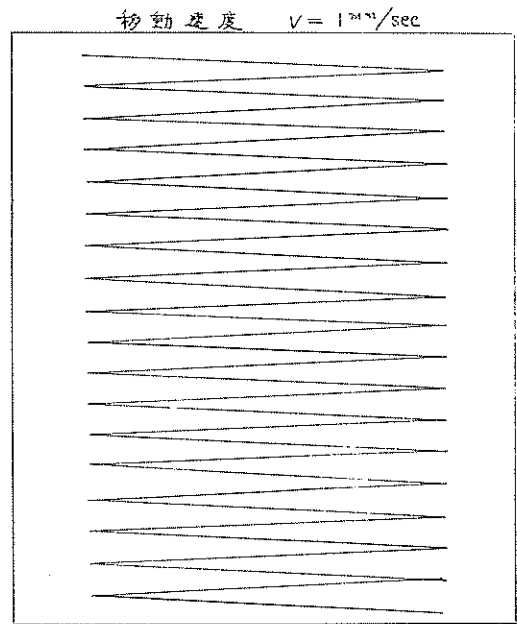
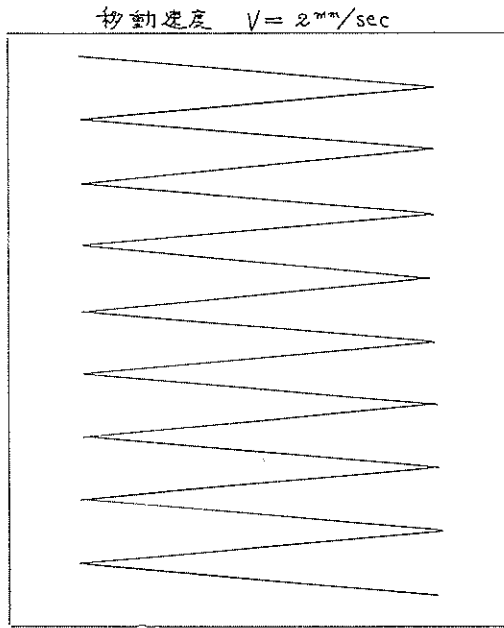
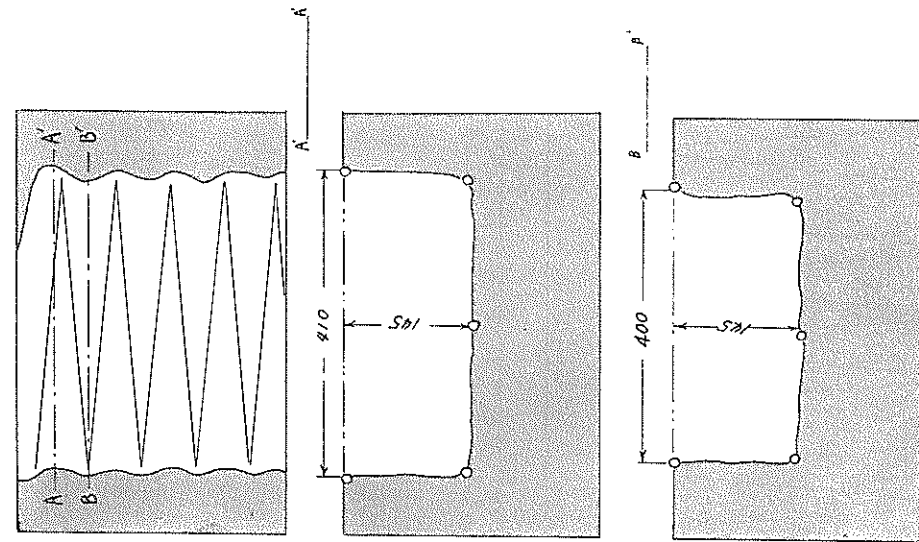
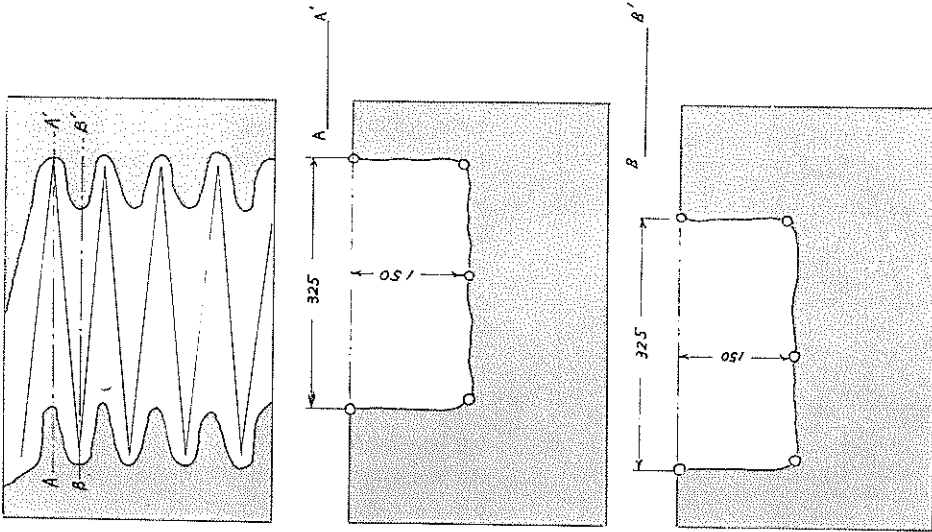


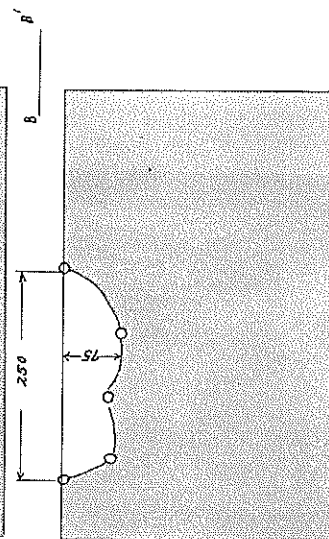
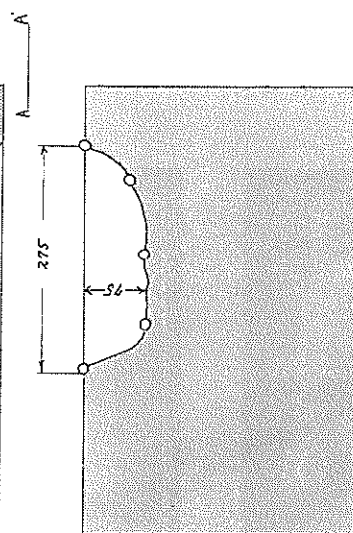
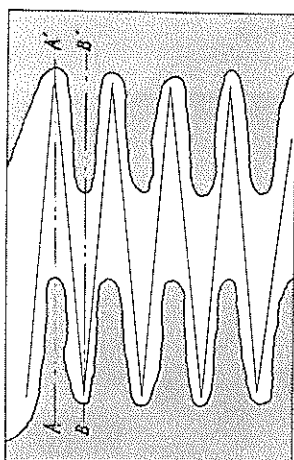
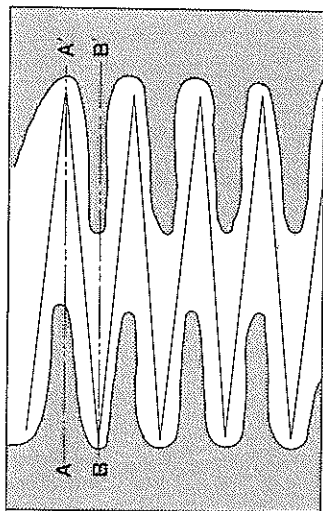
図-40 ノズル先端移動軌跡



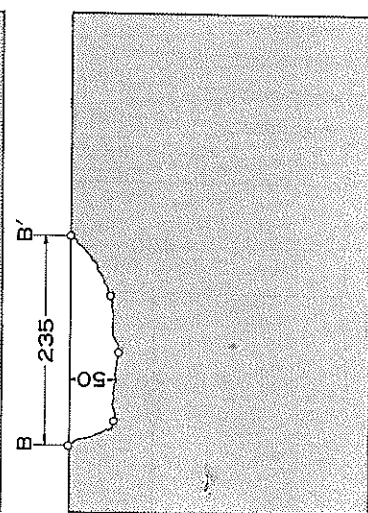
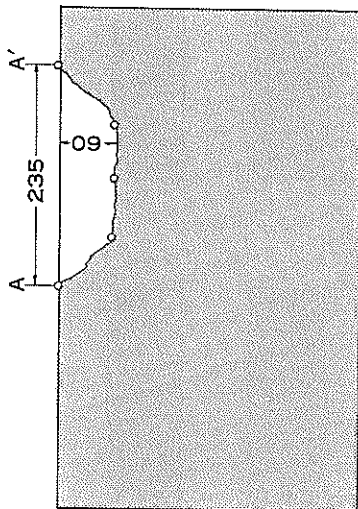
图—41



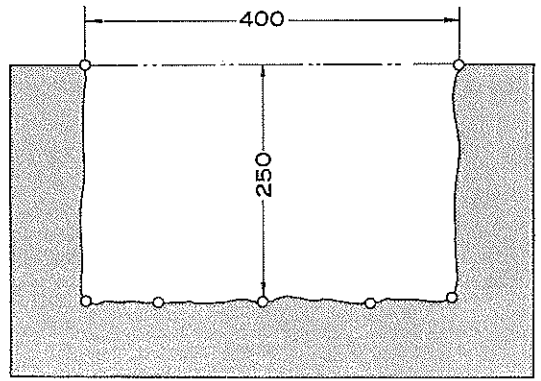
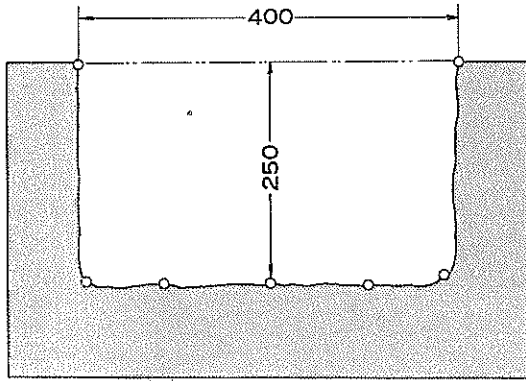
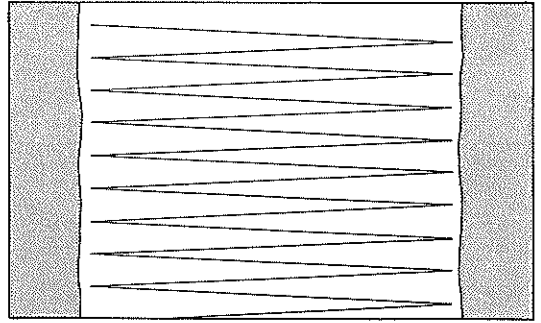
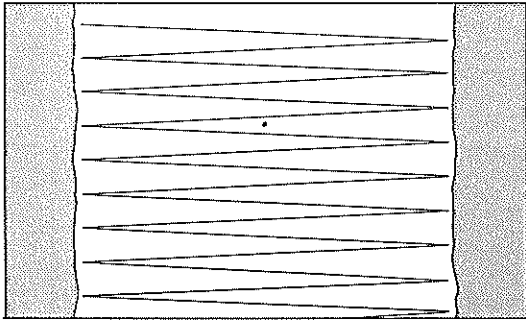
图—42



图—43

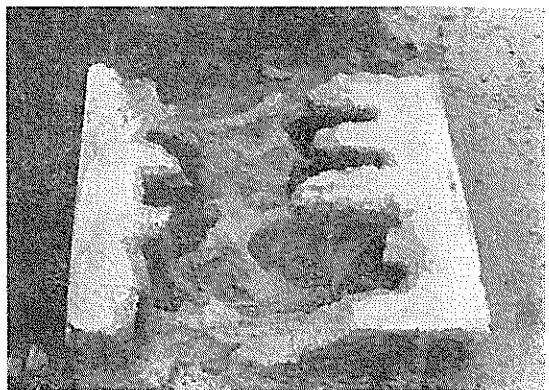
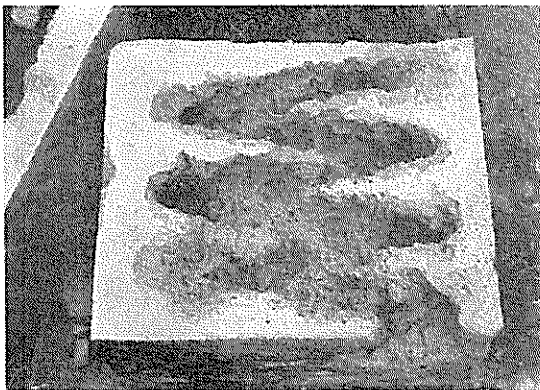


图—44



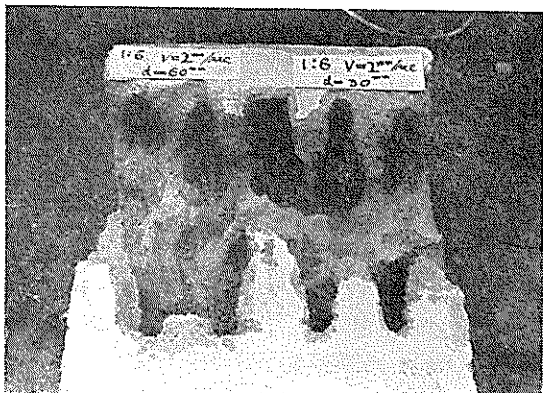
图—45

图—46

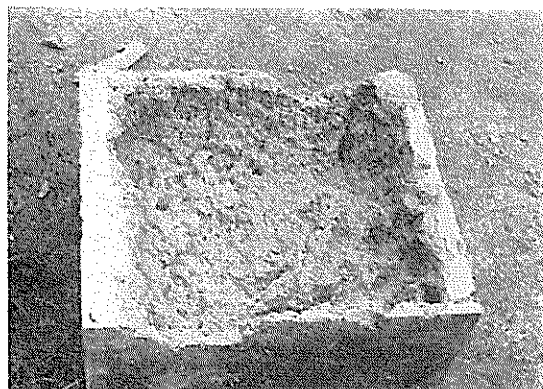


写真—8

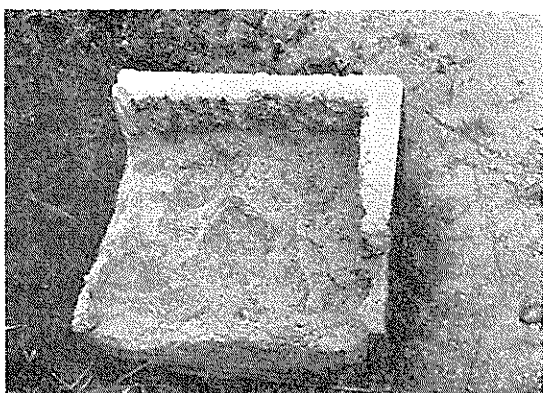
写真—9



写真—10

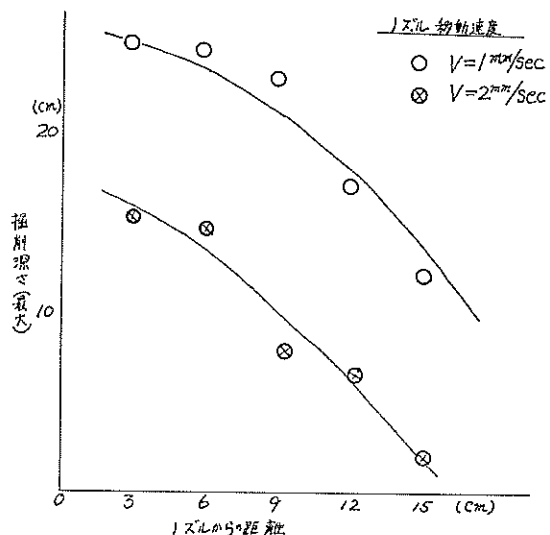


写真—11



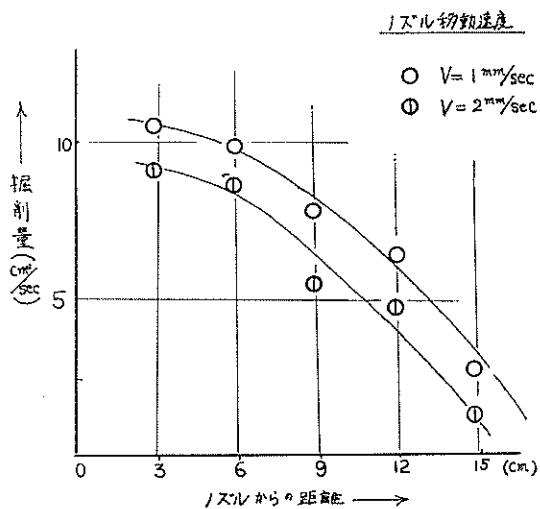
写真—12

図—47は、各ノズルからの距離に対応する掘削深さを $V = 1 \text{ mm/sec}$, $V = 2 \text{ mm/sec}$ の場合について示したものである。これからわかるように掘削深さは、ある曲線に沿って減少し、単純な移動掘削の場合のように直線的に減少せず、かなり異なってくるのがわかる。



図—47

次に掘削量について調査してみると、図—48は各距離に対応する掘削量を $V = 1 \text{ mm/sec}$, 2 mm/sec の場合について示したものである。これらの場合、試料とノズルとの距離が近づくほど、掘削量が増大する傾向が観察され、また直線掘削の場合と比較してその単位時間あたりの掘削量は少なく $L = 30 \text{ mm}$ の場合せいぜい 11 cc/sec 前後である。これはもちろん、 $L = 30 \text{ mm}$ とはノズルが試料面に垂直の場合の距離であり、実際はノズルが首振り運動の軌跡の端に来る場合は、ノズル先端と掘削される試料面との距離は遠ざかっていて 30 mm 以上はあるし、往路、復路の際に2度にわたり掘削される点があるだろうから、単位時間あたりとしては、掘削量につ



図—48

いてみてみれば単純掘削の場合に比較すると小となるのであろう。

以上はモルタルグループのみについて行った実験結果であるから、他の圧縮強度をもつ試料について果して適応されるかどうかは推しはかれないが、少なくともこのグループの圧縮強度 (40.5kg/cm^2) より大なるものについては同様な現象が起るのではないだろうか。

4. ま と め

以上、ノズル固定の場合、ノズル移動の場合、ノズルに首振り運動を与える場合などについて、各圧縮強度のモルタルについての掘削実験を行ったが、これらの掘削結果から噴流の構造との対応、すなわち噴流のA、B、Cの各領域での掘削の特徴などははっきり確認出来なかった。わずかに、噴流の拡散現象からそれに対応する掘削現象が認められることと、ノズル固定の場合、圧縮強度 55kg/cm^2 以上のものの試料については、A領域に属するノズルからの距離で、先に述べた現象が生じたことが確認出来た。しかしこれは先に述べた噴流の基本的構造とはおよそかけはなれた特殊な条件における掘削結果であり、我々はこのような特定の条件にある噴流の構造を更に別な解析装置を作り、検討してみなければならない。また噴流の破砕能力を調べた結果から、今回のモルタルによる実験によれば、噴流の圧力の少なくとも2倍の数の圧縮強度をもつモルタル試料の破砕が可能であった。しかし、これらの結果は、特定のノズル、特定の試料、及び特定の条件を与えた時の一例を示したにすぎない。どのようなノズルを用いどてのような岩石に対し、どういふ条件を与えれば最大の掘削効果が得られるのかを、今後調査しなければならない。特に今回使用したモルタル試料は、実験室内で製作したもので、ある程度粗雑なところもあり、またその種別をあくまで単に圧縮強度のみにより整理したが噴流の破砕現象を考察する場合、圧縮強度を基準としてその破砕能力を判断するには疑いところもあると思われたが今回はとりあえずこれを基準とした。そして同一の圧縮強度をもつ他の天然岩石を使用した場合に、果して同程度の破砕能力を期待出来るかどうかとも調査しなければならない。実際、今回の実験結果からでも観察されたが、モルタル試料を構成している一つ一つの固結したセメントと砂の粒子の破壊された状況から考えてみると次のことが考えられる。すなわち、単に水流により、各々の粒子が分離、又は剝離された跡と思われる掘削のされ方、または粒子と粒子との間に高圧水が入り込んだため水くさびの作用により、大きな粒子の固まりとして試料本体から分離して掘削されたと考

えられるもの、或いは圧力水が直接に試料に衝突し、衝撃作用により試料の表面、及び内部に破砕、分離が生じたと考えられる掘削され方など、各種の掘削のされ方が考えられる。(事実ソビエト連邦などの学者によると、水力掘削の基本的な原理は高圧水が岩石の粒子の間に入り込み、それが水くさびの作用をなして破壊されるとしている。)すなわち、これらの掘削過程が順次に、または同時に作用して実験結果に示す掘削結果が得られたものと思われる。従って、この現象は試料を構成する粒子の大小、又は固結状態によってかなり異ってくると考えられ、事実ソビエト連邦においては石炭掘削などの噴流による掘削実験では、その試料の破砕強度は圧縮強度を基準としない別の方法による試験法がなされている。以上のことから、この噴流による岩石に対する破砕能力をこの実験結果からだけから判断するのは誤りであり、我々のここに示した例は特定な条件を与えた場合の破砕能力を示したにすぎない。

我々が今回この範囲の圧縮強度 ($34\text{kg/cm}^2 \sim 88\text{kg/cm}^2$) のモルタル試料に制限して使用した理由は、この範囲より低い圧縮強度のモルタルを使用すると、掘削され破砕された試料の粒子の大部分が噴流の強い流れで水中に拡散され、実験後には測定すべきデータ掘削跡はもとより、試料そのものがほとんど水中に消失してしまうからであり、一方これより高い圧縮強度のモルタルに対しては全く破壊が行なわれないため、やはり測定用データとして採用出来なかったからである。

次に実際の噴流による硬土盤、岩盤などの破砕への応用にあたり問題となるのはその掘削方法である。いままで示して来たように、我々は種々の掘削方法を試みたが、それぞれの目的及び対応の岩石、土砂に応じて異なってくるであろう。その一つとして、岩盤などを直線的に掘削して、各ブロックに分けて、それをグラフバケットですくう方法。また一つは、やはり岩盤に溝をつけてグラフバケット等のつめがかかる程度の掘削を行い、グラフバケットによる掘削の補助的な手段として使用すること。また、その他、種々の水中施工機械を用いることにより、その応用方法によりかなりの浸透効果が期待出来ると思われる。これらの諸問題については、今後の研究報告でその結果を述べる予定である。

最後に本報告を作成するにあたり、実験方法及び解析方法については機材部主任研究官岩田氏に、そして噴流についての理論計算については、流体輸送研究室長八木氏に丁寧な御指導をいただきましたことを、深く感謝いたします。

参 考 文 献

1. The Theory of Turbulent Jets.
Abramovich
2. Boundary Layer.
Schlichting
3. Free Jets.
Hinze
4. “噴流に関する研究” 建設省土木技術研究所報告
5. Investigation of The Turbulent Mixing Region
Formed by Jets. A. M. Kuethe
6. “ジェット掘削に関する研究” (その1)
鉛直ジェットによる海底土砂の切り崩しについて
港湾技術研究所報告 3 卷 5 号
松田任, 岩田尚生
7. “高圧水による石炭掘削について”
資源技術試験所報告 山門憲雄
(1968. 5. 1 受付)

附 録

(1) A領域の区域について

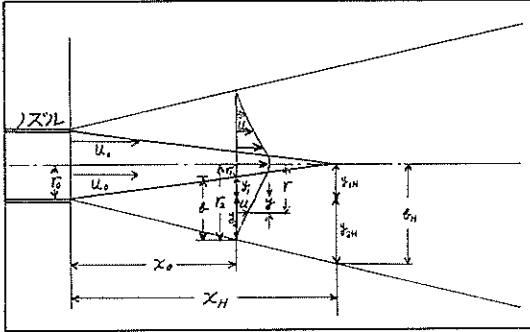


図-49

A領域の大きさについて、Abramovich が解いた方法を示す。非圧縮流体 ($\rho = \text{const}$) の3次元軸対照噴流においては図-49から運動量保存側から

$$\pi \cdot u_0^2 \cdot r_0^2 = \int_{r_1}^{r_2} u^2 \cdot 2\pi \cdot r \, dr + \pi u_0^2 \cdot r_1^2 \dots (1-1)$$

ここに

r_0 : ノズル出口半径, r_1 : $X = X_0$ におけるコアの半径

r_2 : $X = X_0$ における外部境界層半径

y : $X = X_0$ におけるy座標

r : $r = r_0 - y, y_1 : y_1 = r_0 - r_1,$

$y_2 : y_2 = r_0 - r_2, u : y = r$ における速度

いま (1.1) を変形すると

$$1 - \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{2}{r_0} \cdot \left(\frac{u}{u_0}\right)^2 \cdot \frac{r}{r_0} \, dr \dots (1-2)$$

一方ノズル出口速度を u_0 , A領域における境界層における速度を u としたときに、Schlichting は次の関係を導いた。すなわち

$$\frac{u_0 - u}{u_0} = f(\eta) = (1 - \eta^{1.5})^2$$

$$\left(\text{ここに } \eta = \frac{y - y_2}{b}\right)$$

これを变形して

$$\frac{u}{u_0} = 1 - f(\eta), \dots (1-3)$$

また $b = r_2 - r_1, \gamma = r_0 - y_1, r_2 = r_0 - y_2,$

$r = r_0 - y, -dr = dy, d\eta = dy/b$

より (1-3) 式を (1-2) 式に代入して、また

$$r_1/r_0 = 1 - y_1/r_0, \, d\eta = -b \cdot d\eta$$

$$r = (r_0 - y_2) - (y - y_2)$$

の関係から、(1-2) 式は、

$$1 - \left(1 - \frac{y_1}{r_0}\right)^2 = 2 \int_0^1 (1 - f(\eta))^2 \cdot \left[\frac{(r_0 - y_2) - (y - y_2)}{r_0^2}\right] \cdot b \cdot d\eta$$

となり、更に変形すると

$$= 2 \int_0^1 (1 - f(\eta))^2 \cdot \left[\frac{br_0}{r_0^2} - \frac{b^2 \cdot y_2}{r_0^2 b} - \frac{b^2}{r_0^2} \cdot \frac{y - y_2}{b}\right] \cdot d\eta$$

$$= 2 \int_0^1 (1 - f(\eta))^2 \cdot \left[\frac{b \cdot r_0}{r_0^2} - \frac{b^2 \cdot y_2}{r_0^2 \cdot b}\right] d\eta$$

$$- 2 \int_0^1 (1 - f(\eta))^2 \cdot \frac{b^2}{r_0^2} \cdot \eta \cdot d\eta$$

$$= 2 \left(\frac{b}{r_0} - \frac{b^2 \cdot y_2}{r_0^2 b}\right) \int_0^1 (1 - f(\eta))^2 \cdot d\eta$$

$$- 2 \cdot \frac{b^2}{r_0^2} \int_0^1 (1 - f(\eta))^2 \cdot \eta \, d\eta$$

いま、 $A = \int_0^1 (1 - f)^2 d\eta, B = \int_0^1 (1 - f)^2 \cdot \eta \cdot d\eta$ とおき

$$\frac{y_2}{b} = 1 - \frac{y_1}{b} \text{ だから、更に上式を变形すると、}$$

$$= 2 \left[\frac{b}{r_0^2} - \frac{b^2}{r_0^2} \left(1 - \frac{y_1}{b}\right)\right] \cdot A - 2 \frac{b^2}{r_0^2} \cdot B$$

上式の右辺、左辺整理してまとめると、

$$\frac{y_1^2}{r_0^2} - 2 \cdot \frac{y_1}{r_0} \left(1 + \frac{b}{r_0} A\right) + 2 \frac{b}{r_0} \left(A + \frac{b}{r_0} (A - B)\right)$$

$$= 0 \dots \dots \dots (1-4)$$

一方、噴流の幅 b は距離 X に比例して増加することはすでに知られているから

$$b = cX$$

また境界層のA領域の終点において $y_1 \rightarrow r_0$ として (1-4)式を r/b について解くと、

$$\frac{r_0}{bH} = \sqrt{0.214} \dots \dots \dots$$

これと (1.4) 式から

$$X_H = X/r_0 = \frac{1}{C \sqrt{0.214}}$$

多くの実験によれば $C = 0.27$ であるから

$$X_H = 8 \dots \dots \dots$$

(2) B領域について

ここに示すのは abramovich による計算であり、図-50に示すように、C領域を特徴づける線とA領域を特徴づける直線との交点までを一応のB領域にしようとする考え方である。一般に等圧噴流に関しては、運動量保存則から次の関係が成立する。

$$\int_0^M u \, dM = \int_0^M u_0 \cdot dM_0 \dots \dots \dots (2-1)$$

ここに M は、噴流の任意の断面を毎秒通過する流体の量で、 M_0 はノズル出口における同量、また $dM = \rho \cdot u \, dF,$

$dM_0 = \rho_0 u_0 dF_0$ で F_0, F はそれぞれ任意, 及びノズル出口断面積である。いま (2-1) 式を変形すると,

$$\left(\frac{u_m}{u_{0m}}\right)^2 \cdot \int_0^1 \frac{\rho}{\rho_{0m}} \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 \cdot \frac{dF}{F} = \frac{F_0}{F} \int_0^1 \frac{\rho_0}{\rho_{0m}} \cdot \left(\frac{u_0}{u_{0m}}\right)^2 \cdot \frac{dF_0}{F_0} \dots\dots\dots (2-2)$$

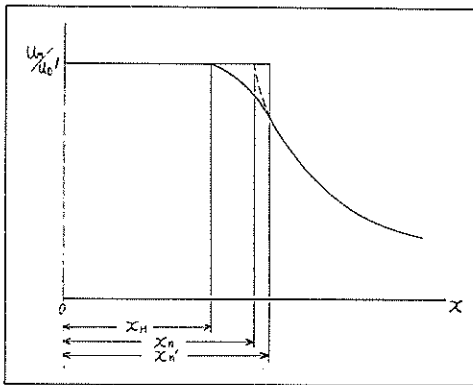
ここで

- u_{0m} = ノズル口における軸速度,
- u_0 = ノズル口における速度
- u_m = 任意断面での軸速度
- u = 任意断面での速度
- ρ = 任意断面での密度
- ρ_{0m} = ノズル出口での密度

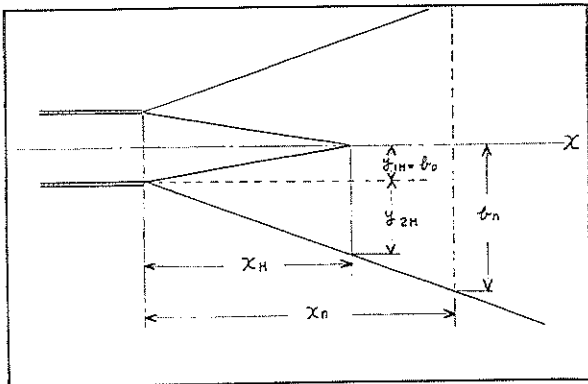
いま, $A = \int_0^1 \frac{\rho}{\rho_{0m}} \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 \cdot \frac{dF}{F}$ とおくと

多くの実験によれば, B領域, C領域での軸相対速度は u/u_m は,

$$\frac{u}{u_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{\gamma}\right)^{1.5}\right]^2 = (1 - \xi^{1.5})^2$$



図—50



図—51

と表わされて確かめられており, また,

$$\frac{dF}{F} = \frac{2\pi y dy}{\pi r^2} = 2 \cdot \frac{y}{r} d\left(\frac{y}{r}\right) = 2\xi \cdot d\xi$$

であるから

$$\therefore A = \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 \cdot \frac{dF}{F} = 2 \int_0^1 (1 - \xi^{1.5})^4 \cdot \xi \cdot d\xi = 0.134$$

となる。そして先に示した考え方において, B領域の終点で, $u_{0m} \cong u_m$, また $u_0 = u_{0m}$ であり, $\rho_{0m} = \rho$ と考えると,

$$\frac{u_m}{u_{0m}} = 1, \int_0^1 \frac{\rho_0}{\rho_{0m}} \left(\frac{u_0}{u_{0m}}\right)^2 \cdot \frac{dF_0}{F_0} = 1$$

としてよいため, (2-2) 式より

$$\therefore \frac{F_{\Pi}}{F_0} = \frac{1}{A}$$

そして,

$$\frac{F_{\Pi}}{F_0} = \frac{\pi r^2}{\pi \gamma_0^2} = \left(\frac{\gamma_{\Pi}}{\gamma_0}\right)^4$$

$$\therefore \frac{\gamma}{\gamma_0} = \sqrt[4]{\frac{1}{A}} \dots\dots\dots (2-3)$$

次に図—51から, 次の関係が求まる。

$$\gamma_{\Pi} = \gamma_0 - y_{2\Pi} \dots\dots\dots (2-4)$$

ここに $y_{2\Pi} < 0$ は, 遷移領域の終りの位置での噴流の境界から噴流中心軸までの距離である。そして

$$y_{2\Pi} = \frac{y_{2\Pi}}{y_{2H}}, \quad y_{2H} = \frac{X_{\Pi}}{X_H} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot y_{1H}$$

そして, $y_{1H} = \gamma_0$ とおくと

$$y_{2\Pi} = \frac{X_{\Pi}}{X_H} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \gamma_0$$

これを (2-4) 式に代入して

$$\gamma_{\Pi} = \gamma_0 - \frac{X_{\Pi}}{X_H} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \gamma_0$$

$$\therefore \frac{X_{\Pi}}{X_H} = \frac{y_1}{y_2} \left(1 - \frac{\gamma_{\Pi}}{\gamma_0}\right) \dots\dots\dots (2-5)$$

また図—51で

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{y_{1H}}{y_{2H}} = \frac{y_{1H}}{y_{1H} - b_H} = \frac{1}{1 - \frac{b_H}{y_{1H}}} = \frac{1}{1 - \frac{b_H}{\gamma_0}} \dots\dots\dots (2-6)$$

一方A領域の計算から

$$\frac{b_H}{\gamma_0} = \frac{1}{\sqrt{0.214}}$$

そして (2-3) と (2-6) を (2-5) に代入して

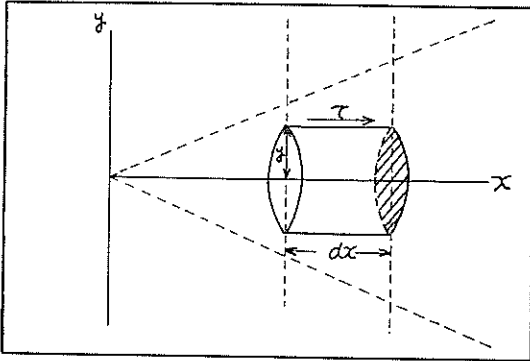
$$\therefore \frac{X_{\Pi}}{X_H} = \frac{\sqrt{0.214}}{1 - \sqrt{0.214}} \cdot \frac{1 - \sqrt{0.134}}{\sqrt{0.134}} = 1.5$$

すなわち, ここで定義するB領域とはA領域の $1/2$ の長さとなる。すなわち理論A領域の区域は $X_H = 8\gamma$ であるから

$$8\gamma_0 \leq X_{\Pi} \leq 12\gamma_0$$

となる。

(3) C領域について



の Tollmien の解

いま噴流に垂直な任意の平面を考えると、その面を単位時間に通過する流体の持つ運動量は、流れの速度を u 、その平面上の微小面積を ds とすると

$$\int_0^b \rho u^2 ds$$

で与えられる。そしてこれはどの平面をとっても一定でなければならない。すなわち、

$$\int_0^b \rho u^2 ds = \text{const}$$

ところが、円形噴流では、

$$\int_0^b \rho u^2 ds = \int_0^{\pi} \rho u^2 2 \pi y dy$$

であり、いまこれを変形すると

$$u_m^2 \cdot x^2 \int_0^{\pi} \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 2\pi \left(\frac{y}{x}\right) d\left(\frac{y}{x}\right) = \text{const} \dots (3-1)$$

ここで u_m は、考えられた断面の中央での速度で、 x は与えられた断面と噴流の等速度直線を延長した交点との距離である。(Tollmien は、これらの直線をC領域の範囲から延長し、その交点を座標原点にすると、C領域では噴流はあたかも無限にせまい点から発生するかのよう構成されるとしている)。

多くの実験によれば、上に定義した原点より任意の位置での噴流の幅 b を、噴流軸心より垂直に y の位置における速度を u とすると、

$$\frac{u}{u_m} = f\left(\frac{y}{b}\right)$$

となる相似性が確められる。すなわち噴流の各断面での速度分布は相似となるのである。

一方乱流噴流では、各点での速度成分は時間平均値に加えることの、不規則変化値に分解される。すなわち、

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v'$$

また変動速度 u' の平均値は、

$$\bar{u}' = l_1 \cdot \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (l_1: \text{混合距離に比例する常数})$$

そして縦方向(流れの方向に直角の方向)の速度成分 v' は流れの方向の速度変動平均に比例するが、反対符号をもつ、すなわち

$$-v' \sim \bar{u}', \quad \text{すなわち} -v' \sim l_1 \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

次に噴流の成長(噴流の境界層の厚さが増加する割合)は縦方向速度により決る。

$$\frac{db}{dt} \sim v' \sim l_1 \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \dots (3-3)$$

噴流の各々の断面の速度分布の相似性から、

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \sim \frac{u_m}{b} \dots (3-4)$$

さて、自由流れの各断面での、境界層の相似性から流れの各断面での無次元の混合距離は各々等しい。

$$\frac{l_1}{b_1} = \frac{l_2}{b_2} = \dots = \text{const} \dots (3-5)$$

(3-3), (3-4), (3-5) 式によって

$$\frac{db}{dt} \sim \frac{l}{b} \cdot u_m \sim u_m \dots (3-6)$$

ところが、噴流の成長の割合は

$$\frac{db}{dt} = \frac{db}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \sim \frac{db}{dx} \cdot u_m \dots (3-7)$$

(3-6), (3-7) 式と比較すると

$$\frac{db}{dx} = \text{const}$$

$$\therefore b = x \cdot \text{const} \dots (3-8)$$

よって式 (3-2) は次のように変形することも可能である。

$$\frac{u}{u_m} = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

従って、

$$\int_0^{\frac{y}{x}} \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 \frac{y}{x} \cdot \frac{dy}{x} = \int_0^{\frac{y}{x}} f\left(\frac{y}{x}\right)^2 \cdot \frac{y}{x} \cdot d\left(\frac{y}{x}\right)$$

ところがこの積分値は一定である。ゆえに式 (3-1) は、次のように表わされる。

$$u_m^2 \cdot x^2 = \text{const} \dots (3-9)$$

従って3次元噴流の各断面の中央における速度は原点からの距離に逆比例する。

$$u_m = \frac{m}{x} \dots (3-10)$$

ところが3次元軸対照流れの速度成分は、流れの函数を利用して次のようになる。

と表わされる。

次に函数 $F(\eta)$ 、及び $F'(\eta)$ をここで求めなければな

らない。図—52において、X軸に対称な長さ dx, 径 2y なる微小流体を仮定して運動方程式を作る。

この表面積 $2\pi y dx$ の内部を横切って輸送される運動量は $2\pi\rho uv y dx$ であり、この表面外の運動量は次の割合で変化する。すなわち、

$$-2\pi\rho d \int_y^\infty u^2 y dy$$

これが切線方向の力 $\tau \cdot 2\pi y dx$ を生じさせる。ここで τ は、乱流せん断応力で

$$\tau = -\rho \cdot c^2 \cdot x^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \dots\dots\dots (3-11)$$

である。よってこれから運動量の式を作ると

$$uv + \frac{1}{y} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_y^\infty u^2 \cdot y \cdot dy + c^2 \cdot x^2 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots (3-12)$$

次に

$$uv = \frac{m^2}{x^2} \cdot \frac{F'(\eta)}{\eta} \left\{ F'(\eta) - \frac{F(\eta)}{\eta} \right\} \\ = -\frac{m^2}{x^2} \cdot \frac{1}{\eta^2} F'(\eta) \{ \eta \cdot F'(\eta) - F(\eta) \} \dots\dots\dots (3-13)$$

$$\frac{1}{y} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_y^\infty u^2 y dy = \frac{m^2}{y} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} \int_\eta^\infty \frac{F'(\eta)}{\eta} d\eta \\ = \frac{m^2}{y} \left(-\frac{y}{x^2} \right) \cdot \frac{1}{\eta^2} \cdot F'(\eta) \cdot \eta \dots\dots\dots (3-14)$$

$$u = \frac{1}{y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot u = -\frac{1}{y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

ここに

$$u = u_m \cdot f(\eta), \quad \eta = y/x \text{ であり } \therefore dy = x \cdot d\eta$$

$$\phi = \int u y dy = u_m \cdot x^2 \int f(\eta) \cdot \eta \cdot d\eta$$

また $u_m = m/x$ だから

$$\therefore \phi = m \cdot x \cdot \int f(\eta) \cdot \eta \cdot d\eta$$

いま、 $\int f(\eta) \cdot \eta \cdot d\eta = F(\eta)$ とおくと、 $\phi = mx F(\eta)$ と表わせる。そして、

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = mx \cdot \frac{1}{x} \cdot F'(\eta) = m \cdot F'(\eta)$$

$$\therefore u = \frac{1}{y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{1}{y} \cdot m \cdot F'(\eta) = \frac{m}{x} \cdot \frac{F'(\eta)}{\eta} \\ = u_m \cdot \frac{F'(\eta)}{\eta}$$

同様に

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = m \cdot F'(\eta) \cdot \left(-\frac{y}{x^2} \right) \cdot x + m \cdot F(\eta)$$

よって

$$v = -\frac{1}{y} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{m}{y} \left\{ F(\eta) - \frac{y}{x} \cdot F'(\eta) \right\}$$

$$= \frac{m}{x} \left\{ F'(\eta) - \frac{x}{y} F(\eta) \right\} \\ = \frac{m}{x} \left\{ F'(\eta) - \frac{F(\eta)}{\eta} \right\}$$

また

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial y} \cdot \frac{\partial u}{\partial \eta} = \frac{m}{x} \cdot \frac{1}{x} \left\{ \frac{F''(\eta) \cdot \eta - F'(\eta)}{\eta^2} \right\} \text{ より} \\ c^2 x^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = c^2 x^2 \cdot \frac{m^2}{x^4} \left\{ \frac{F''(\eta) \cdot \eta - F'(\eta)}{\eta^2} \right\}^2 \\ = c^2 \cdot \frac{m^2}{x^2} \cdot \frac{1}{\eta^2} \left\{ \frac{F''(\eta) \cdot \eta - F'(\eta)}{\eta} \right\}^2 \\ = c^2 \cdot \frac{m^2}{x^2} \cdot \frac{1}{\eta^2} \left\{ F''(\eta) - \frac{F'(\eta)}{\eta} \right\}^2 \dots\dots\dots (3-15)$$

(3-13), (3-14), (3-15) の式を (3-12) に代入して、

$$\therefore c^2 \left\{ F''(\eta) - \frac{F'(\eta)}{\eta} \right\}^2 = F(\eta) \cdot F'(\eta) \dots (3-16)$$

ここで実験常数 C を除くため、 $\varphi = \eta/c^{2/3}$ とおくと

$$u = \frac{m}{x} \cdot \frac{F'(\varphi)}{\varphi}, \quad v = \frac{\sqrt[3]{c^2}}{x} \left\{ F'(\varphi) - \frac{1}{\varphi} F(\varphi) \right\}$$

となり、(3-16) 式は、

$$\left\{ F''(\varphi) - \frac{1}{\varphi} F'(\varphi) \right\}^2 = F(\varphi) \cdot F'(\varphi) \dots\dots (3-17)$$

となる。いま $Z = \ln[F(\varphi)]$ として、 $z' = Z$ とおくと、(3-17) は

$$Z' = \frac{1}{\varphi} Z - Z^2 - \sqrt{Z}$$

となる。これを諸々の境界条件から求めると、

$$Z = z' = \frac{2}{\varphi} - 0.4\varphi^{1/2} - 0.4\varphi^2 + 0.00082\varphi^{7/2} + 0.00015\varphi^4 \\ + \dots\dots\dots \\ \therefore z = \int Z d\varphi = \ln\varphi^2 - 0.27\varphi^{1.5} - 0.01\varphi^3 + 0.00018\varphi^{4.5} \\ + 0.000025 \cdot \varphi^{4.5} + \dots\dots\dots$$

となって求まる。よって $F(\varphi) = e^z$, $F'(\varphi) = z' \cdot e^z$ から u, v は次のように表わされる。

$$\frac{u}{u_m} = \frac{F'(\varphi)}{\varphi}, \quad \frac{1}{a} \cdot \frac{u}{u_m} = F'(\varphi) - \frac{1}{\varphi} F(\varphi)$$

このようにして得られたのが Tollmien の解である。