

土 木 研 究 所 資 料

下水管渠の流量に関する 基礎的実験報告書

平成9年10月

建設省土木研究所
下水道部下水道研究室

Copyright © (1997) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

下水管渠の流量に関する基礎的実験報告書

下水道部 下水道研究室室長 田 中 修 司 ¹⁾

主任研究員 榊 原 隆 ²⁾

研 究 員 深 谷 渉

交流研究員 今井田 敏 宏 ³⁾

要 旨

下水管渠内の流量を把握することは、下水道計画策定上において、重要な項目の一つである。しかしながら下水道管渠に代表される円管内の流量測定は、測定機器の設置箇所が限定されており、かつ設置そのものが困難であること、下水の流量変動が大きく変動幅の全てを測定できる万能な機器が存在しないこと、下水中の固形物や油分による障害が大きく保守管理が容易でないこと等の多数の困難な問題を抱えている。また円管内の流れの現象については、未だ未解明の部分が多く、特に下水管渠で多く見られる自由水面をもった流れの現象についてはほとんど実験例がないのが現状である。

ここでは、以上の現状や諸問題を踏まえて、とくに下水管渠内の流れの特性を把握することに重点をおき水理実験を行い、水路勾配や管内水深の変化に伴う流速分布の変化について検討した。さらにはそのデータを基にした新しい流量算出法の提案に努めた。

キーワード：下水管渠、流速分布、流量測定法

1) 現 (社)日本下水道事業団計画課長

2) 現 都市局下水道部公共下水道課課長補佐

3) 交流研究員在職期間(平成6年4月から7年3月まで)

まえがき

家庭雑排水や工場排水、雨水等は、各地に張り巡らされた下水管渠網を通して下水処理場へと送られる。各地から集められた汚水は処理場において処理されるが、近年の下水道の普及率増加に伴い、新たに下水処理場を建設する場合や、処理人口の増加に伴う処理能力拡大のため処理施設の増設改築が増加している。また、管路敷設後かなりの年数を経過した管路施設では、耐用性の低下などに伴う機能低下により不明水の発生や、管渠の破損などの維持管理上の問題が発生している。これら下水道計画の策定や、再構築、維持管理においては、新設・増設する処理場の処理能力、ポンプ容量、電気容量の決定、機能低下の原因の究明などの調査手段の1つとして流量測定調査がしばしば実施される。しかしながら下水管渠内における流量測定は、管渠内流れが自由水面流である、腐食性環境下にある、測定機器の設置スペースが限られている等の理由から、簡単に高精度の流量値を得ることが難しい状況にある。よって本報告書では、管渠内の流れの現象を把握し、最終的には簡易に流量を算出できる流量測定方法を提案することを目的とする。



まえがき

目 次

第1章 研究の背景

1.1 下水道における「流量測定」の重要性	1
1.2 流量測定法の現状と問題点	1
1.3 研究の目的及び概要	2

第2章 実験施設の概要

2.1 模型諸元の決定	5
2.2 全体図と各部名称	5
2.3 測定機器の概要	7

第3章 予備実験

3.1 実験ケースと実験条件	9
3.2 実験結果	10
3.3 まとめ	15

第4章 本実験Ⅰ (水路勾配=0)

4.1 実験ケースと実験条件	17
4.2 実験結果	18
4.3 まとめ	30
4.4 1点流速測定法の検討	31

第5章 本実験Ⅱ (水路勾配=1/1000)

5.1 実験ケースと実験条件	35
5.2 実験結果	36
5.3 まとめ	48
5.4 1点流速測定法の検討	49

第6章 本実験Ⅲ (水路勾配=3/1000)

6.1 実験ケースと実験条件	51
6.2 実験結果	52
6.3 まとめ	63
6.4 1点流速測定法の検討	64

第7章 本実験Ⅳ（水路勾配=5/1000）

7.1 実験ケースと実験条件	67
7.2 実験結果	68
7.3 まとめ	77
7.4 1点流速測定法の検討	78

第8章 本実験Ⅴ（水路勾配=10/1000）

8.1 実験ケースと実験条件	81
8.2 実験結果	81
8.3 まとめ	85
8.4 1点流速測定法の検討	85

第9章 管路内の流れ

9.1 流速特性	87
9.2 流量特性	99
9.3 流況	99
9.4 粗度係数	102
9.5 その他	105
9.6 実管渠への適用に際しての留意事項	105

第10章 流量測定方法の検討

10.1 流量測定方法の原理と特徴	107
10.2 流量測定方法に求められる要望	109
10.3 流量測定方法の検討	113
10.4 平均流速算出方法の概要	114
10.5 平均流速算出方法の妥当性	118

第11章 新しい流量測定方法の提案

11.1 1点流速測定法の改良	119
11.2 レイノルズ応力推定法	127
11.3 最大流速測定法	135
11.4 新しい流量測定方法に関するまとめ	140

第12章 流量測定計画論

12.1 流量測定の目的と役割	141
12.2 流量測定計画の立案	142

第13章　まとめ	145
＜参考資料(1)＞　流速計検定実験（その1）（その2）	147
＜参考資料(2)＞　土木研究所以外の流速分布計測例	157
＜参考資料(3)＞　最大流速と平均流速の関係（補足）	163
＜参考資料(4)＞　下水道管路模型によるマンホール部のエネルギー損失の計測	165

第1章 研究の背景

第1章 研究の背景

1.1 下水道における「流量測定」の重要性

下水道は、雨水の排除及び、住宅や商業、工場等からでる汚水の排除・処理を目的としており、生活環境の改善や、貴重な水資源の有効利用として重要な役割を担っている。

国民の生活と密接な関係がある下水道は、平成8年度末で普及率が55%となっており、現在では大都市の下水道整備をほぼ終え、中小の市町村を中心とした整備に移行しつつある。平成8年度末の下水道処理人口は約6,852万人であり、処理水量に換算すると約100億 m^3 以上になる。この処理水量は、約16年前となる昭和55年度（1980年度）の実績と比較して約2倍と急激な伸びを示している。これにより、敷設後からかなりの年数が経過している管路施設では、施設の老朽化や管路断面積の不足が問題となっており、下水道管渠の更新が非常に重要となってきたことが分かる。

更新計画の策定上、重要になる項目は、増補管渠の必要断面積を定めることである。これには、既存管渠における流下水量を把握することが重要な課題となってくる。また、管渠内の下水流量を正確に把握することは、下水処理場の運転管理や管路の維持管理にとっても重要であり、まだ未解明な部分が多い管渠内における流れの現象解明ならびに流量測定法等に関する研究の必要性が高くなってきている。

1.2 流量測定法の現状と問題点

管渠の流量を把握する方法は、大別して2種類に分けることができる。1つは、管渠途中に堰等の構造物を設ける構造物設置型であり、もう1つは流量計等の測定機器を設置する機器設置型である。

構造物設置型は、正確には「流量を測定するための機器を設置するために、新たに管路内に構造物を造るか、もしくは管路の形状等を改造するタイプ」と言うことができる。この構造物設置型を細分化すると、代表的なものとしては、堰式、フリューム式流量計測法が挙げられる。

堰式とは、管路途中に設けた堰（三角堰、四角堰）による水の落差を利用したもので、堰の形状及び寸法とそれを越流する流水の水深（越流水深）の関係から流量を把握するものである。この方式は、測定項目が越流水深だけであるため、実際の流量（実流量）との誤差が小さく、簡単に流量を把握することが可能である。しかしながら管路の途中に堰を設けることは、住宅の密集する市街地等においては設置スペースの確保が大きな問題となり、設置費も膨大となる。また堰の設置にともなう流下能力の低下も危惧される。

フリューム式は、管路の途中に絞り部を設け、絞り前後の圧力差から流量を把握する方式である。この方式は、自由水面流が条件となるが、絞り部による急縮的作用により流れの損失が大きくなり、上流の水位が堰上げられることが予想される。

機器設置型を細分化すると、流量計式、水位計・流速計併用式、ピトー管式、流速計式、水深・勾配測定法（マニング式）に分けることができる。

流量計式は、電磁波やドップラー効果を利用した流量計を用いる方法である。この方法は、測定機器を管路外側に取り付けるタイプと、管内側にセンサーを設置するタイプがある。前者は、電磁流量計がその代表例であるが、流れを乱すことなく精度良く流量を把握することができるが、主に満管流を測定対象にしており、自由水面をもつ下水管路にはあまり適さない。後者は、超音波流量計がその代表例であるが、センサーの設置により流れが乱される、ゴミ等が堆積するなどが危惧され、測定精度にも影響を与えられとされる。

また両者とも、機器本体の価格が非常に高く、また管路外側に設置するため維持管理が困難である等の問題を抱える。

水位計・流速計併用式は、任意地点における管渠内水位と平均流速から流量を把握するもので、水位計と流速計を併用する方法である。平均流速は、その算出方法によって値が異なるため、算出方法の選定を慎重に行う必要がある。また水位計と流速計の2つの機器を管渠内に設置することは、流れに影響を与える、ゴミ等の流下物により機器が破損する恐れがある等の問題を抱える。

ピトー管式は、管路内の動水圧を測定し流速に変換し、水位測定を基に流量を把握する方法である。動水圧から流速に変換する方法によっては、流量の精度が大きく左右されることから、変換方法をよく吟味する必要がある。また機器の構造上、ゴミ等の流下物による破損が起きやすく、維持管理面でも困難を伴う。

流速計式は、満管流時の流速を測定することにより流量を把握しようとするものである。それゆえ、一時的に管路内の流れを満管流にする装置、もしくは常時満管となっている計測室を設ける必要がでてくる。しかしながら下水管渠において、それらの装置・構造物を設置することは事実上困難である。

水深・勾配測定法は、マンニングの式を用いて流量を算出しようとするもので、任意地点における水位とエネルギー勾配の測定を行う必要がある。エネルギー勾配は、水道水かつ実験室規模での測定であればマノメータ等を用いて測定が可能であるが、実管路の場合には多量の固形物を含んだ下水が流下しているためその測定が非常に困難である。またマンニング式中の粗度係数は、管種および管渠内環境（堆積物・付着物）に大きく左右されるため係数の設定が難しい。

以上のように、代表的な流量測定法について概略を記述したが、いずれの方法にしても実質的な問題点として、下水の特徴である水質が大きな障害となっているようである。下水は、ゴミ等の固形物を含むとともに、種々の物質を含んだ特殊な水である。それゆえ精密機器の使用に際しては、その耐用性や適合性を十分に検討する必要がある、測定に支障を来すことが考えられる。またこの現状が、測定機器の高価格化を助長しているとも考えられる。それに加えて、下水管路は地中に埋設するため、構造物・機器の設置スペースや測定機器の維持管理に問題が発生し、これもまた流量測定法に対する障害として大きく立ち塞がっている。

ここまでの現状を踏まえると、流量測定に最も適している方法は、流速計を用いる方法であると考えられる。流速計は、設置スペースが少なく、機器自身の費用も安い。また機器の構造も、流量計等に比べれば単純であり、埋設することを除けば維持管理についてはそれほど問題はないと考えられる。しかしながら、前述したように、流速計式および水位計・流速計併用式では、測定条件や下水中の流下物による損傷等の問題があり実用的でない。よって今後は、流量計測に必要な測定項目を極力少なくし、かつ自由水面でも測定可能な方法の開発が重要となってくる。

1.3 研究の目的及び概要

下水管渠内の流量を把握することは、下水道計画策定上において、重要な項目の一つであることは、前述したとおりである。しかしながら下水道管渠に代表される円管内の流量測定は、測定機器の設置箇所が限定されており、かつ設置そのものが困難であること、下水の流量変動が大きく変動幅を全ての測定が可能、万全な機器が存在しないこと、下水中の固形物や油分による障害が大きく保守管理が容易でないこと等の多数の困難な問題を抱えている。よって流量測定法としては、設置スペースが少なく、維持管理が容易な流速

計を用いた測定が適していると考えられる。

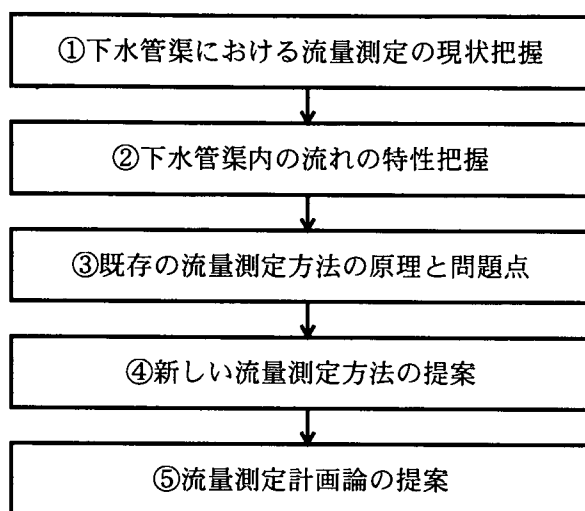
流速計を用いた流量の測定方法としては、満管時の流速を測定する方法と、水位計と流速計を用いる方法が考えられる。しかしながら、いずれも種々の問題を抱える。よって流速計を用いて流量を測定する場合には、測定項目を極力少なくし、かつ自由水面での測定が可能であることが望ましい。

また円管内の流れの現象については、未だ未解明の部分が多く、特に下水管渠で多く見られる自由水面をもった流れの現象についてはほとんど実験例がないのが現状である。

ここでは、以上の現状や諸問題を踏まえて、とくに下水管渠内の流れの特性を把握することに重点をおき水理実験を行い、さらにはそのデータを基にした新しい流量算出法の提案に努めた。

表－1.1に本研究の研究フローを示す。

表－1.1 研究フロー



①下水管渠における流量測定の現状把握

下水道管渠内の流量測定の現状と問題点を把握することで、流量測定の重要性を知り、また下水管渠の流量測定に適した、望まれる流量測定方法の姿を見いだすものである。

②下水管渠内の流れの特性把握

下水管渠内の流量を測定しようとする場合、管渠内の流れの特性をよく理解しておくことが必要である。しかしながら、下水管渠は地下埋設物であり、容易にその中の現象を把握することは難しく、未解明な部分が多く残されている。ここでは、透明アクリル管渠模型を用いて、水理学的な視野から実験的に管渠内の流れの現象を解明するものである。

③既存の流量測定方法の原理と問題点

下水管渠の流量測定に適していると考えられる測定方法について、その原理を把握し、測定上の問題点について検討を行うものである。

④新しい流量測定方法の提案

水理実験で得られた流速分布データと、既存の流量測定方法の問題点を基に、新しい流速算出方法を提案するものである。

⑤流量測定計画論の提案

維持管理に重要な流量は、目的に応じた効率よい測定方法により測定されるべきである。ここでは、目的別に、流量測定の意義や適した方法について述べるものである。

<参考文献>

日本の下水道(平成9年), (社)日本下水道協会, 1996

第2章 実験施設の概要

第2章 実験施設の概要

第1章では、流量測定の実状と問題点について整理し、測定の重要性について理解を深めた。しかしながら、下水道管渠の流量測定に適した測定方法の確立を目指すには、そのバックグラウンドとして、下水道管渠内の流れの特性を把握しておく必要がある。

下水道管渠の流れの特性（現象）を把握するためには、実管渠における種々の計測が望ましいが、下水道管渠が地下埋設物であり測定が難しい、下水という特殊な水質の流れであり計測環境も悪く、計測には危険が伴う、などの種々の問題点より困難である。よって、把握・解明しようとする現象を再現するための実験装置を用いた検討が必要となってくる。ここでは実験を行う際に必要となる、実験施設の諸元決手法及び施設概要等について述べる。

2.1 模型緒元の決定

一般的に、水理模型における模型諸元は、実験目的に対する必要精度、実験施設の構造と性能及び相似性との関係より決められる。しかしながら、縮尺と無関係の本管渠模型では、主に実験施設の規模および実験の効率等を考慮して決定される。その結果、管渠の口径を200mm、管渠長さを12mとした。なお管渠長さは、流速測定位置までの助走区間として管径の25倍の6mを含む12mとし、流れが一様になるように設定した。

2.2 全体図と各部名称

建設省土木研究所水質実験施設内に製作された管渠模型の全体図を図-2.1（参考：写真-1）に示す。管渠模型は大別して、高水槽（量水槽）、透明アクリル管渠及び架台、流量測定用水槽、低水槽（排水槽）の5つの部位からなる。各部位の特徴は以下の通りである。

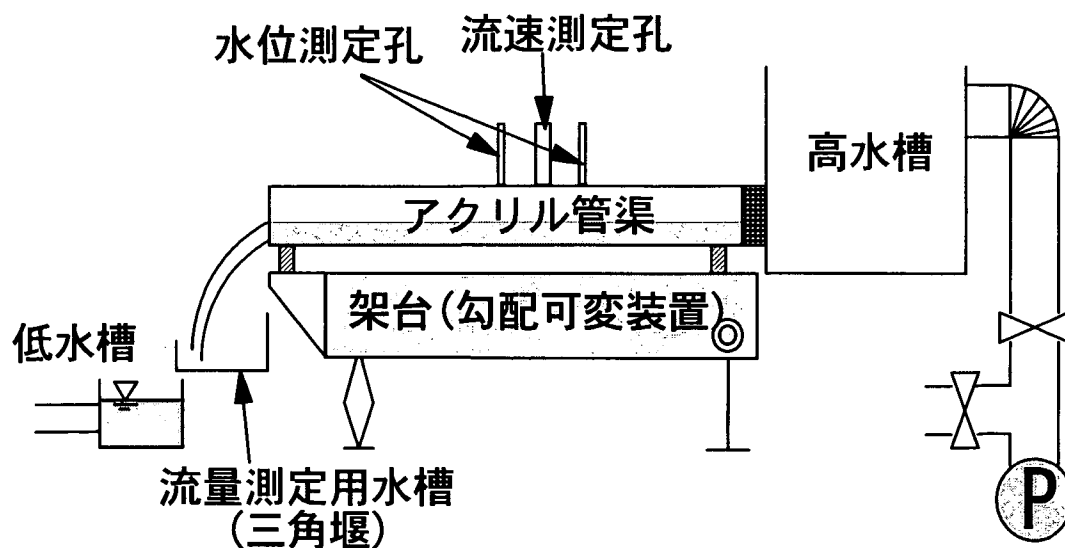


図-2.1 管渠模型全体図

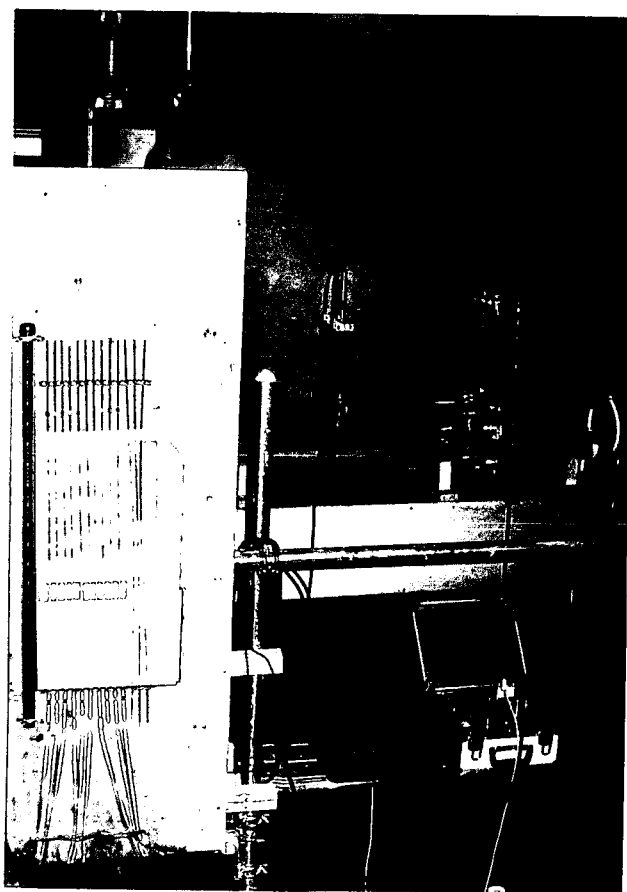
高水槽は、地下水槽から汲み上げた水を溜める水槽である。水槽は、透明アクリル管渠と接続しており、高水槽に水が流入すると管渠を通じて水が流下することになっている。高水槽内に流入する流量を制御するには、水を地下水槽から汲み上げるための水中ポンプ流量を制御する必要がある。本実験施設では、水中ポンプと高水槽を結ぶパイプ途中にバルブを2ヶ所設け、流量が制御できるようにした。

透明アクリル管渠は、口径200mm（管厚5mm）×長さ1mの透明アクリルパイプ12本（全長12m）からなっており、管渠直下には動水勾配測定用の測定孔（マノメータ）が管渠最下流を0mとして最上流12m地点まで、1～2mおきに備え付けてある。

架台は、管渠の勾配が自由に換えられるように、下流側の架台に油圧ジャッキを設置した。これにより、最大傾斜約3°（水路勾配＝水平～1/20）を得ることができる。

流量測定用水槽は、管渠内を流下した水を一旦貯水し、正確な流量を得るための水槽である。水槽には、水槽内の流れを整える整流板が4枚と、流量測定用の堰が設けられている。堰は、流量測定用の三角堰と四角堰の2種類が用意しており、管渠内の流量に応じて堰を交換することとした。

低水槽は、堰を越流した水を一時貯留するための水槽である。ここに溜められた水は、排水管を通じて地下水槽に返送される。



写真－1 実験装置のスポット写真

2.3 測定機器の概要

実験では、種々の測定機器が使用される。とくに使用されるのは以下に述べる流速計である。用いる流速計は、電磁流速計（I型、L型）とプロペラ流速計の3種類である。

（1）電磁流速計（I型）

本流速計は、電気伝導体である水が磁界を横切って流れる時に発生する起電力（ファラデーの法則）を測定することによって流速を計測するものである。流速計は検出部と本体部からなり、検出部は、図-2.2に示すようにセンサー部分が5mm×16mmと超小型であり、全長は約260mmである。X（流下方向）、Y（横断方向）の2成分の流速が測定可能であり、流向も表示される。測定範囲は、±0～200cm/sであり、測定誤差は±1mm/sとなっている。

本体部は、RS232Cケーブルでパソコンと接続することにより、データの自動処理が可能である。

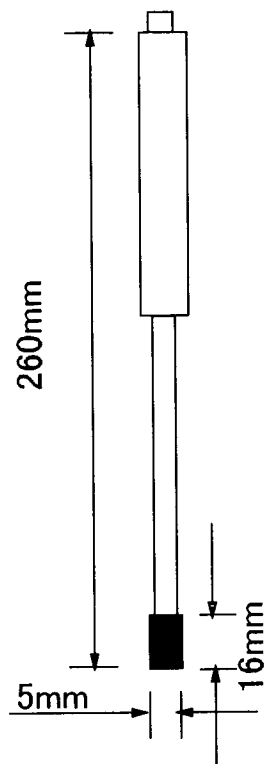


図-2.2 電磁流速計（I型）概要図

（2）電磁流速計（L型）

本流速計は、（1）の電磁流速計と同様に、電気伝導体である水が磁界を横切って流れる時に発生する起電力（ファラデーの法則）を測定することによって流速を計測するものである。流速計は検出部と本体部からなり、検出部は、図-2.3に示すようにセンサー部分が5mm×16mmと超小型であり、全長は約260mmである。X（流下方向）、Y（鉛直方向）の2成分の流速が測定可能であり、流向も表示される。測定範囲は、±0～200cm/sであり、測定誤差は±1mm/sとなっている。

本体部は、RS232Cケーブルでパソコンと接続することにより、データの自動処理が可能である。

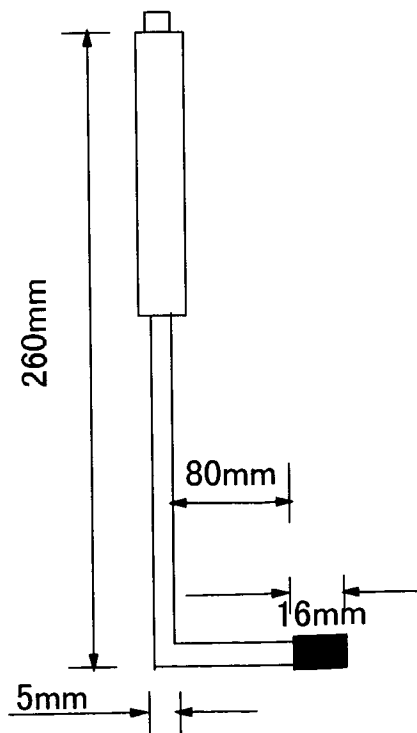


図-2.3 電磁流速計（L型）概要図

(3) プロペラ式流速計

本流速計は、反射光検出方式を採用したタイプである。図-2.4に示すように、検出部となるプロペラ部は、プロペラ径が5mm、全長は約550mmとなっている。また、シャフト部は、上部がφ6mm（筒形）、下部が長径φ3mmの楕円形状となっている。測定範囲は、±3～200cm/sであり、測定誤差は±1mm/sとなっている。

検出部の他に本体部があるが、RS232Cケーブルでパソコンと接続することにより、データの自動処理が可能である。

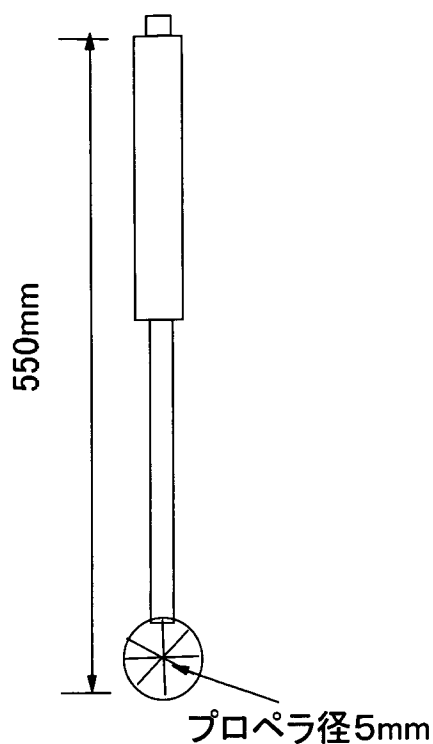


図-2.4 プロペラ流速計概要図

第 3 章 予備実験

第3章 予備実験

第2章において、下水管渠内の流れの特性を把握するための実験装置について述べた。第3章では、管渠模型の出来形を検査するとともに、流れの現象を測定するための機器選定およびキャリブレーションのために行った予備実験について述べる。

3.1 実験ケースと実験条件

本実験は、表-3.1のケース一覧表に示す通り、水路勾配を0/1000とし、水深を2通り（1/2水深・満管）に変化させた定流通水実験とした。実験における測定項目は、流速・流向、管内水位、流量、マノメータ水位、流況観測、水温とした。

流速・流向については、水深方向・横断方向にそれぞれ1～2cmピッチで、電磁流速計及びプロペラ式流速計を用いて測定を行った。プロペラ式流速計については、電磁流速計では測定不可能と考えられる壁面近傍のみの測定とした。1測点当たりの測定時間は1分間とし、電磁流速計は1秒間隔、プロペラ式流速計は10秒間隔でデータを収集した。収集データは、最大値と最小値を削除し平均値を求めた。得られた平均値は、等流速線図（流速コンター図）として整理した。

管内水深は、触針式水位計を用いて、流速測定と平行して自動計測を行った。水位計は、計器先端の検出針が一定速度で昇降する構造になっており、検出針が水面に達するまでの到達時間と速度の関係から、計器高と水面との距離を算出する仕組みになっている。管内水深は、この水位計値を補正して算出した。また管内水深は、定流性を確認するために、最大値及び最小値、平均値を抽出し、水位変動状況を把握した。

流量は、各測点の測定流速から流量を求める方法と、低水槽に設置してある堰を用いて流量を測定する、2種類の方法で把握した。堰による流量測定では、堰の越流水深と堰寸法から実流量（堰流量）を算出した。越流水深は、管内水深測定と同様に、触針式水位計を用いて計測を行った。

粗度係数を得るには、動水勾配が必要となってくる。よって、アクリル管渠にマノメータを設置し（第2章参照）、実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間になる場合は、実験中途にも計測を行った）計測を行い、その値を整理し動水勾配とした。

流況観測は、主流及び編流、渦、波動等の様子や位置について把握するために行った。実験では、流れの形態が視覚的に把握できるように、染料（FLOW-ESSENCE）を高水槽から流した。

水温は、管渠最下流に設置してある流速測定用水槽で実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間になる場合は、実験中途にも計測を行った）計測を行った。

表-3.1 予備実験ケース一覧表

ケース名	実験条件		測定項目	備 考
	設定勾配	設定水深		
予備-1	0/1000	10cm	流速・潤辺・流量・マノメータ・水温	電磁・プロペラ流速計併用
予備-2	0/1000	満 管	〃	プロペラ流速計
予備-3	0/1000	満 管	〃	電磁流速計

3.2 実験結果

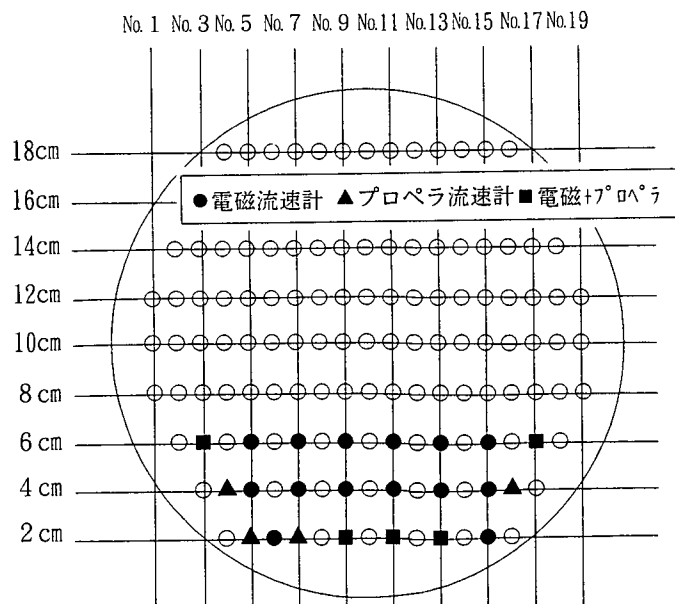
(1) 予備実験－1

本実験は、水路勾配を0/1000、通水時設定水深を10cm（通水中平均水深＝7.8cm）として実験を行った。

流速の測定は、電磁流速計とプロベラ式流速計を用いて行った。それぞれの流速計での測点位置を図－3.1に示す。電磁流速計は、2 cm・4 cm・6 cmの各水深において、横断方向1～2 cmピッチで測定を行った。プロベラ式流速計は、電磁流速計による測定が不可能と考えられる水面及び壁面近傍の測定に用いた。この結果、表－3.2の流速計別流速比較表に示すように、測定水深が2 cmでかつ管壁からの距離が最も遠い測線No.9・No.11のときには、電磁流速計で測定した流速値がプロベラ式流速計での測定結果より若干大きな値を得た。しかし、同じ測定水深でも、測線No.9・No.11と比べると管壁からの距離が近い測線No.13では、電磁流速計での測定値がプロベラ式流速計でのそれを大きく下回った。これは、壁面からの影響を大きく受けていることを表しており、測定水深が2 cmで、かつ測線No.7・No.13より壁面に近いところでの電磁流速計による測定は適さないことを表している。測定水深6 cmの場合も同様に、壁面に近い測線No.3・No.17では、電磁流速計での測定値がプロベラ式流速計のそれを大きく下回り、電磁流速計での測定が適さないという結果になった。また電磁流速計の測定結果によると、測線No.15付近のデータが、周囲の流速と比較して極めて異なる値を示した。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、1 通水平均流量(Q_w)＝8237.8(cm^3/s)となった。堰流量は、実験開始以降減少する傾向にあったが、時間の経過とともにほぼ一定流量を保持するようになった。流量変動は、最大4(cm^3/s)であった。

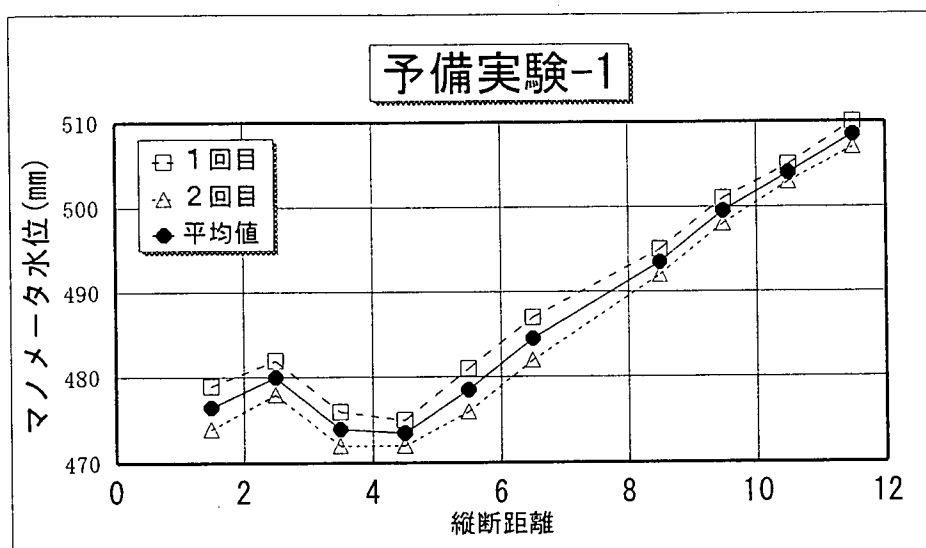
動水勾配の測定結果を図－3.2に示す。マンメータ水位は、1 回目の測定に比べ、2 回目の測定で3～5 mmの水位低下があった。これは、実験中の流量低下に付随するものであると考えられる。マンメータ水位の縦断的傾向（動水勾配）については、流入口及び流出口に近く、流れを大きく乱されていると考えられるマンメータNo.1・No.10を除くマンメータNo.2～No.9区間では、マンメータNo.4から管渠上流（マンメータNo.9）まで約5/1000の同一勾配をとった。その下流、マンメータNo.2～マンメータNo.4間では逆勾配となった。なお、流速測定孔を含むマンメータNo.6～7区間での動水勾配は、約4.5/1000となった。



図－3.1 流速測定位置図（予備実験－1）

表－３．２ 流速計別流速比較表

測定位置	電磁流速計	プロペラ式流速計
測線No.9－水深 2 cm	103.7 cm/s	100.9 cm/s
測線No.11－水深 2 cm	101.3 cm/s	99.1 cm/s
測線No.13－水深 2 cm	34.6 cm/s	92.4 cm/s
測線No.3－水深 6 cm	4.8 cm/s	86.3 cm/s
測線No.17－水深 6 cm	4.5 cm/s	80.3 cm/s



図－３．２ マノメータ測定結果（予備実験－１）

流況について述べる。水面には常時波が発生した。特に上流側での波動が大きかったが、その縦振幅は1～2mm程度であった。管内の流況を詳しく観察するために、高水槽（管路上流端）から染料（FLOW-ESSENCE）を流した。しかしながら管渠流入入口付近での乱れが大きく、染料が水と混合したため十分な流況観察ができなかった。

次に、以上のデータを基に粗度係数の逆算を行った。逆算粗度係数はマンニングの式（ $V = (1/n) \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$ ）より算出できるが、式中の平均流速を代入する際には、代入方法として2つの方法が考えられる。一つは、（実流量／流水断面積）で得た値を平均流速として与える方法である。ここで実流量とは、本実験の堰流量にあたる。本実験では、2種類の機器で流速を測定しており、それぞれ相違した値を得た。よってここでは、粗度係数を逆算することは避けた。残る一つの方法は、（算出流量／流水断面積）で得た値を平均流速として式に代入する方法である。なお算出流量は、 Σ （各測点の流速×その支配面積）で表される。この方法で逆算粗度係数を算出したところ $n = 0.012$ となった。なお式中の動水勾配 I には、マノメータNo.4～9の動水勾配値を用いた。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定した。2回とも17.0℃であった。

(2) 予備実験－2

本実験は、水路勾配を0/1000、通水時設定水深を20cm（満管）として実験を行った。

流速の測定は、図－3.3の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cm・18cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。使用した流速計はプロペラ式流速計で、測点数は全部で57点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－3.4に示す。この図によると、予備実験－1と同様に、横断方向中央部のほぼ6割水深の位置に最大流速（ $V=123.5\text{cm/s}$ ）を持ち、等流速線は遅くなりながら同心円状に外へと広がる傾向にあった。

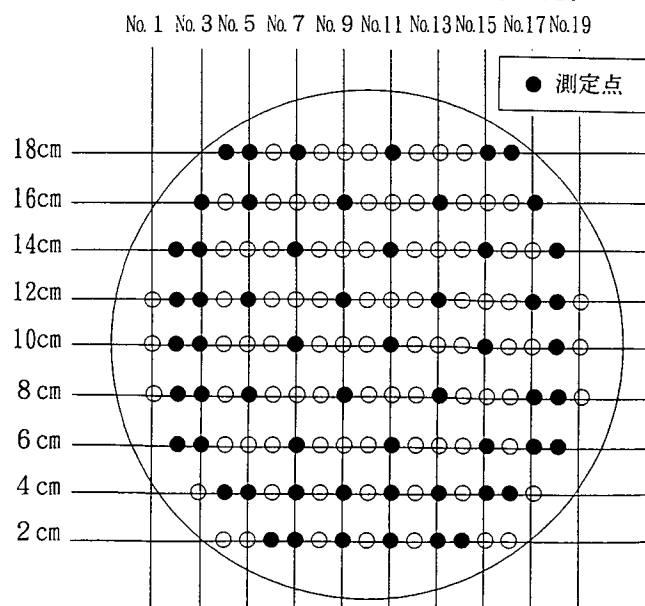
低水槽での流量測定結果は、 $Q_w=31153.6(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、終始安定して定流通水できた。

動水勾配の測定結果を図－3.5に示す。マンメータ水位は、流入口及び流出口に近く、流れを大きく乱されていると考えられるマンメータNo.1・No.10を除くマンメータNo.2～No.9区間で、1回目の測定に比べ、2回目の測定で5～11mmの水位低下があった。満管の場合、管渠内の流れはかなり乱れることが考えられ、マンメータ水位にも多大な影響を及ぼす。実際、マンメータ水位の測定時には、水位が大きく変動し、落ち着くことがなかった。本実験における、マンメータ水位の誤差はここから生まれたものと考えられる。マンメータ水位の縦断的傾向（動水勾配）について述べる。管渠上流（マンメータNo.9）からマンメータNo.5の間では、勾配4/1000から次第に9/1000へと急勾配になった。その下流、マンメータNo.2～マンメータNo.9間では一旦緩勾配になった後、再度急勾配へと変化した。なお、流速測定孔を含むマンメータNo.6～7区間で動水勾配は、7.5/1000であった。

管内の流況を把握するために高水槽から染料（FLOW-ESSENCE）を流した。しかしながら予備実験－1と同様に、高水槽出口付近での乱れが大きく、染料が完全に水と混合したため充分な把握ができなかった。

次に、予備実験－1と同様に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算すると $n=0.010$ となった。この値は、アクリルの粗度係数として一般的に知られている $n=0.008\sim0.012$ を満足している。また各測点の流速から粗度係数を逆算した場合も、 $n=0.010$ と同様の結果が得られた。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、2回とも17.0℃であった。



図－3.3 流速測定位置図（予備実験－2）

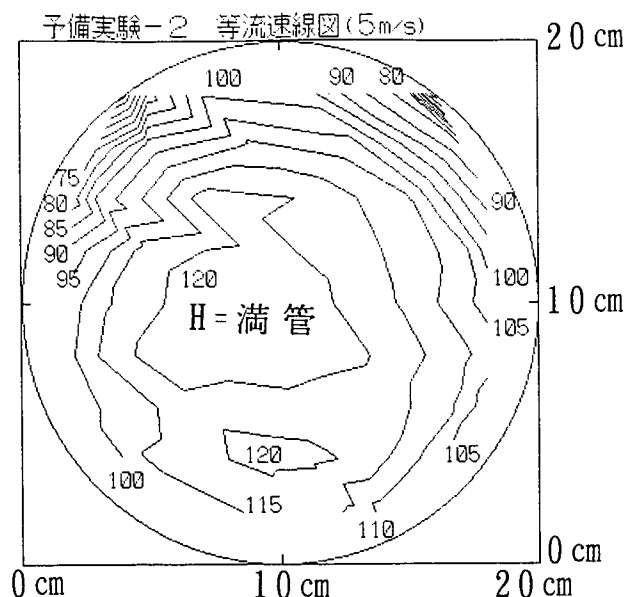


図-3.4 等流速線図 (予備実験-2)

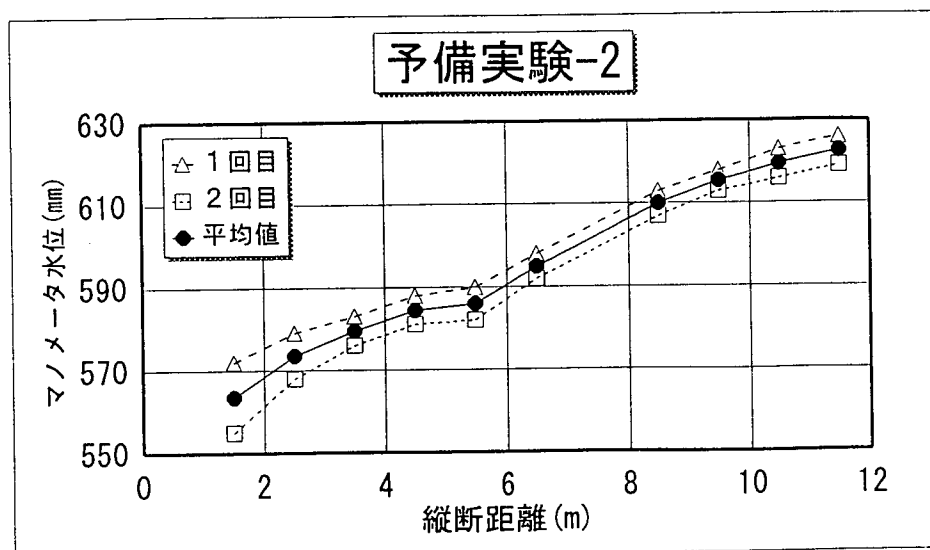


図-3.5 マノメータ測定結果 (予備実験-2)

(3) 予備実験-3

本実験は、水路勾配を0/1000、通水時設定水深を20cm (満管) として実験を行った。

流速の測定は、図-3.6の測点位置図に示すように、3cm・5cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cm・18cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。使用した流速計は電磁流速計で、測点数は全部で57点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-3.7に示す。この図と、予備実験-2で得た等流速線図を比較すると、測線No10付近での流速は、若干電磁流速計の値の方が大きいものの、ほぼ同じ傾向を示した。しかしながら、壁面に近づくほど、予備実験-1と同様にデータの値が乱れる結果となった。

低水槽での流量測定結果は、 $Q_w = 31147.0 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ となった。通水中の流量変化は少なく、終始安定して

定流通水できた。

動水勾配の測定結果を図-3.8に示す。マンメータ水位は、流入口及び流出口に近く、流れを大きく乱されていると考えられるマンメータNo.1・No.10を除くマンメータNo.2～No.9区間で、1回目の測定とほぼ同様の測定結果を得た。マンメータ水位の縦断的傾向（動水勾配）については、管渠上流（マンメータNo.9）からマンメータNo.5の間では、勾配4/1000から次第に8/1000へと急勾配になった。その下流、マンメータNo.2～マンメータNo.4間では一旦緩勾配になった後、再度急勾配へと変化した。なお、流速測定孔を含むマンメータNo.6～7区間での動水勾配は4/1000であった。

次に、予備実験-1と同様に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算すると、一般的に知られているアクリルの粗度係数に近い、 $n=0.011$ を得た。また各測点の流速から粗度係数を逆算した場合も、 $n=0.011$ と同様の結果が得られた。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均は9.1℃であった。

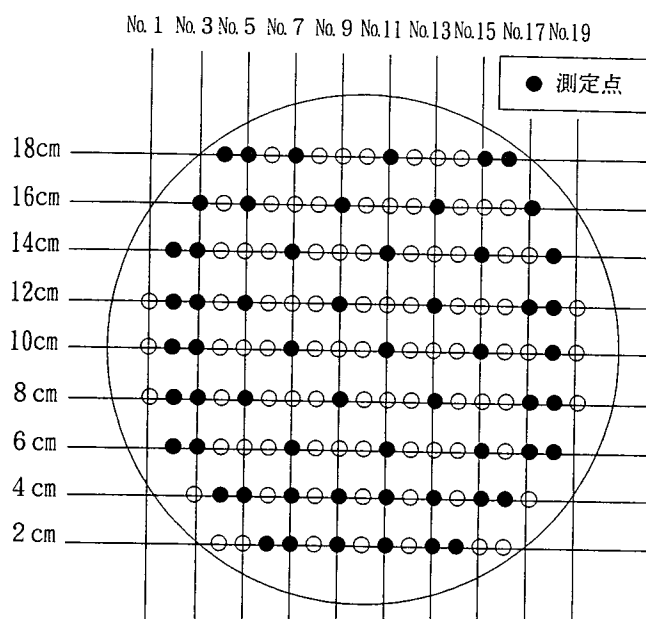


図-3.6 流速測定位置図（予備実験-3）

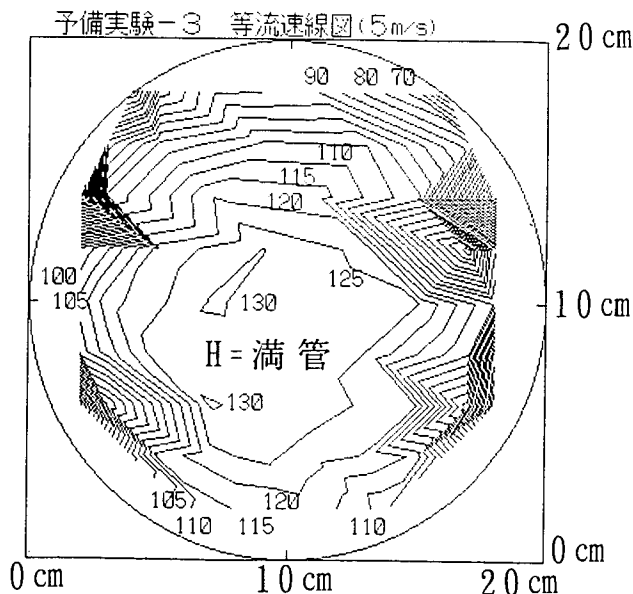
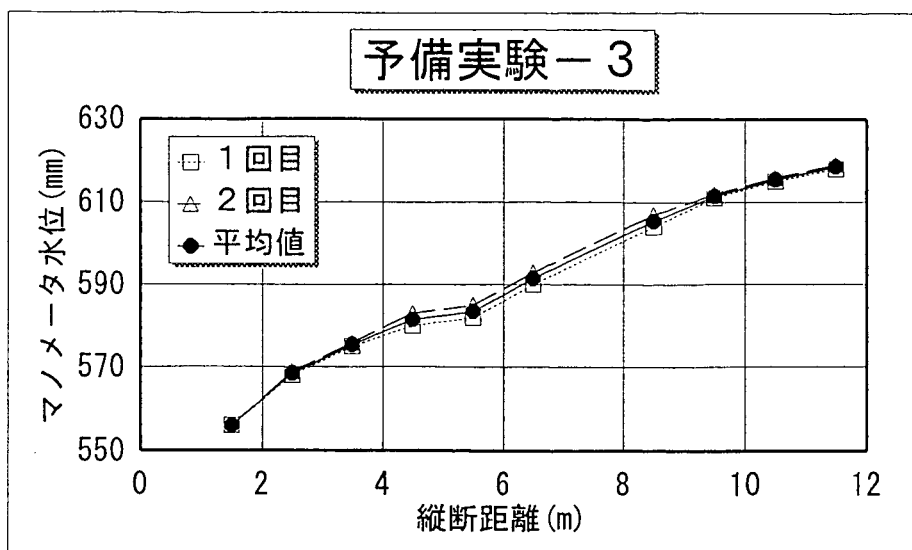


図-3.7 等流速線図（予備実験-3）



図－3.8 マノメータ測定結果（予備実験－3）

3.3 まとめ

（１）２種類の流速計で、水位２ケースの実験を行った。この結果電磁流速計では、どちらのケースについても、壁面近くの流速を測定するには適していなかった。逆にプロペラ流速計は、どの測点においても流速の測定が可能であった。

（２）粗度係数を逆算した結果、いずれのケースについても、アクリル管の粗度係数として一般的な0.008～0.010に近い値を得た。

（３）マノメータの水位差から動水勾配を得たが、流速測定孔付近での水位変動が大きく、急勾配になる傾向が見られた。

第 4 章 本実験 I (水路勾配=0)

第4章 本実験Ⅰ（水路勾配0/1000）

第3章の予備実験により、実験装置の出来形の検査および測定機器のキャリブレーションを行い、模型の特性や測定機器の特徴を把握した。第4章では、これらの情報を基に、流量の違いによる流れの変化を検討するための実験について述べる。ここでは、管渠模型の水路勾配を0/1000として定流通水実験を行った結果について述べる。

4.1 実験ケースと実験条件

本実験は、水深（流量）を一定とする定流通水実験である。本実験Ⅰでは、水路勾配を0/1000、水深はケース毎に3割水深から満管まで2cmピッチで変化させて実験を行った。表－4.1に実験ケース一覧表を示す。なお水深を18cmとした場合の実験については、水面のうねりが大きく、水位の設定ができなかった。

実験における測定項目は、予備実験と同様に、流速、管内水深、流量、マノメータ水位、流況観測、水温とした。

表－4.1 本実験Ⅰケース一覧表

ケース名	実験条件		測定項目
	設定勾配	設定水深	
本実験Ⅰ－1	0/1000	6 cm	流速・潤辺・流量・マノメータ・水温
本実験Ⅰ－2	0/1000	8 cm	〃
本実験Ⅰ－3	0/1000	10 cm	〃
本実験Ⅰ－4	0/1000	12 cm	〃
本実験Ⅰ－5	0/1000	14 cm	〃
本実験Ⅰ－6	0/1000	16 cm	〃
本実験Ⅰ－7	0/1000	満 管	〃

流速については、水深方向・横断方向にそれぞれ1～2cmピッチで測定した。測定機器は、壁面の有無に関係なく流速の測定が可能なプロベラ式流速計を用いた。1測点当たりの測定時間は1分間とし、10秒間隔でデータを収集し平均化した。得られた平均値は、等流速線図（流速コンター図）として整理した。

管内水深は、触針式水位計を用いて自動計測を行った。水位計は、計器先端の検出針が一定速度で昇降する構造になっており、検出針が水面に達するまでの到達時間と速度の関係から、計器高と水面との距離を算出する仕組みになっている。管内水深は、この水位計値を補正して算出した。また管内水深は、定流性を確認するために、最大値及び最小値、平均値を抽出し、水位変動状況を把握した。

流量については、各測点の測定流速から流量を求めた際の比較値として、低水槽に設置してある三角堰を用いて、堰の越流水深から実流量（堰流量）を算出した。越流水深は、管内水深測定と同様に、触針式水位

章参照)、実験開始時と実験終了時の2回(実験が長時間になる場合は、実験中途にも計測を行った)計測を行い、その値を整理し動水勾配とした。

流況観測は、主流及び編流、渦、波動等の様子や位置について把握するために行った。実験では、流れの形態が視覚的に把握できるように、染料及びポリスチレン微粒子を高水槽から流した。

水温は、管渠最下流に設置してある水槽で実験開始時と実験終了時の2回(実験が長時間になる場合は、実験中途にも計測を行った)計測を行った。

4.2 実験結果

(1) 本実験 I-1

本実験ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を6cm(通水中平均水深=4.9cm)として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.1の測点位置図に示すように、2cm・4cm・5cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1~2cmとした。なお測点数は全部で24点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.2に示す。最大流速発生位置は測線No.9~11の水深2~4cm地点であり、最大流速 $V_{max}=8.7.1\text{cm/s}$ であった。この地点は、管渠断面のほぼ中心に当たる。また管路左側の等流速線は外側へ向かうに従って急激に減速する傾向にあるのに対し、管路右側の等流速線はゆっくりと等間隔で減速する傾向にあった。

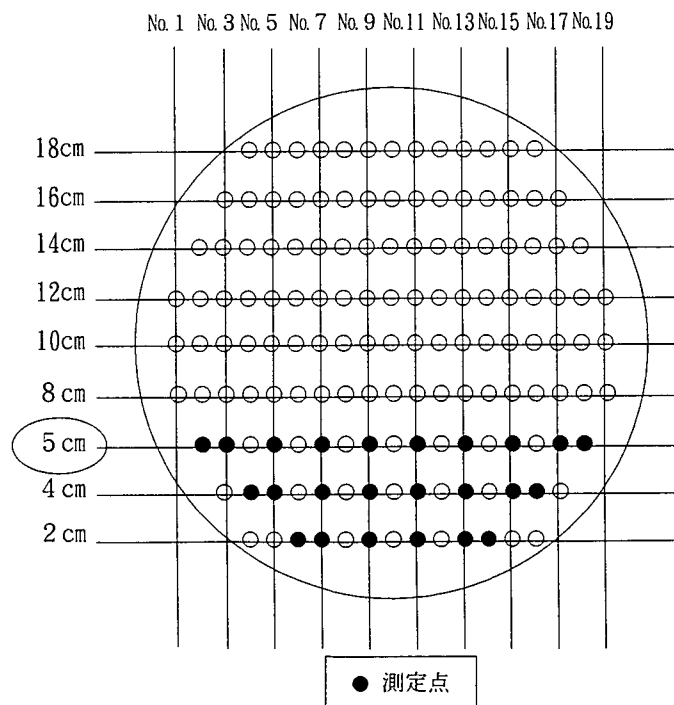


図-4.1 流速測点位置図(本実験 I-1)

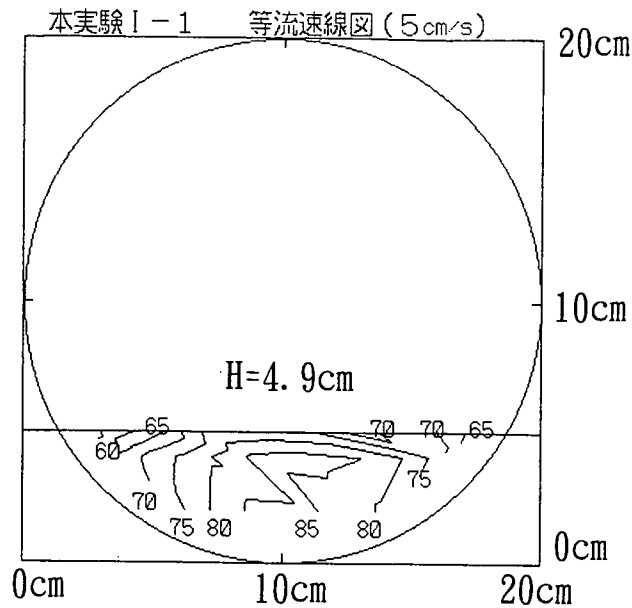


図-4.2 等流速線図 (本実験 I - 1)

低水槽での流量測定結果 (堰流量) は、 $Q_w=4727.2(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=4648(\text{cm}^3/\text{s})$ と、堰流量とほぼ同等の値を得た。

動水勾配の測定結果を図-4.3に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2～No.9区間の縦断的傾向 (動水勾配) は、管渠上流 (マノメータNo.9) からマノメータNo.5の間では、勾配が5.9/1000前後であった。ただし流速測定孔直上流のマノメータNo.7におけるマノメータ水位は、その上下流に比べ低くなった。から次第に8/1000へと急勾配になった。その下流、マノメータNo.2～マノメータNo.4間では逆勾配になった。なお、流速測定孔を含むマノメータNo.6～7区間での動水勾配は、3.5/1000であった。

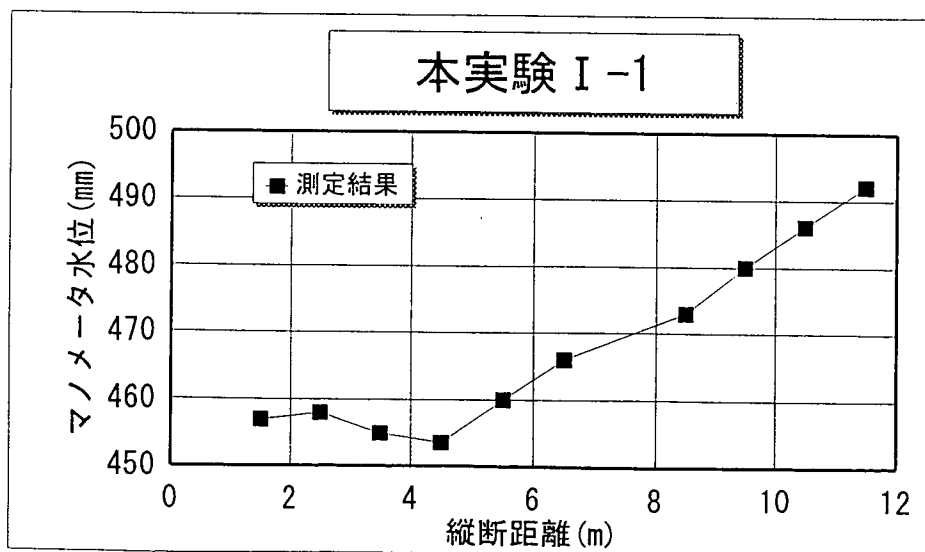


図-4.3 マノメータ測定結果 (本実験 I - 1)

管内の流況を詳しく観察するために、染料及びポリスチレン粒子を流した。染料による流況把握は、予備実験ではうまくいかなかった。そこで、ノズルを用いることにより乱流域を避けて染料を注入することとし、これにより幾分か流況が把握し易くなった。また同様の流況把握として、今回からポリスチレンを使用することとした。これは粒径が0.2mm、水中比重が1.1の水利実験用河床材料で、これに赤色塗料で着色し、高水槽から流すこととした。

染料の先端は、管路中央を若干右側寄りに流れた。ポリスチレン粒子もまた、中央部より若干右側を流下するものが多いが、かなり分散されて流れた。また中央部付近を流れていた粒子は、下流に向けて一直線に流下するのではなく、左右にぶれながら流下する傾向にあった。ただし、もともと側壁付近を流れていた粒子は、細かな動作を繰り返しながら側壁沿いを流れる傾向にあった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合と、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で、ともに同じ値となる $n=0.007$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、2回とも9.3℃であった。

(2) 本実験 I - 2

本ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を8cm（通水中平均水深=7.9cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.4の測点位置図に示すように、2cm・4cm・7.9cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1~2cmとした。なお測点数は全部で39点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.5に示す。これによると、大きな流速が測線No.9と測線No.11の間、かつ水表面及び水深6cmの2箇所が発生していることが分かる。最大流速は測線No.11の水深6cm地点であり、 $V_{max}=109.6$ であった。また最大流速の外側における等流速線は、壁面へ向かうに従って急激に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=10305.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=11310.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となり、堰流量より9.7%大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-4.6に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2~No.9区間の縦断的傾向（動水勾配）は、管渠上流（マノメータNo.9）からマノメータNo.5の間では、マノメータNo.7で若干落ち込んでいるが、概ね8/1000~7/1000の動水勾配を取った。その下流では、マノメータNo.3~マノメータNo.5間では緩勾配、マノメータNo.2~No.3では逆勾配となった。なお、流速測定孔を含むマノメータNo.6~7区間での動水勾配は3.5/1000であった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.008$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0072$ となった。

水温は、実験開始時に測定し、9.4℃であった。

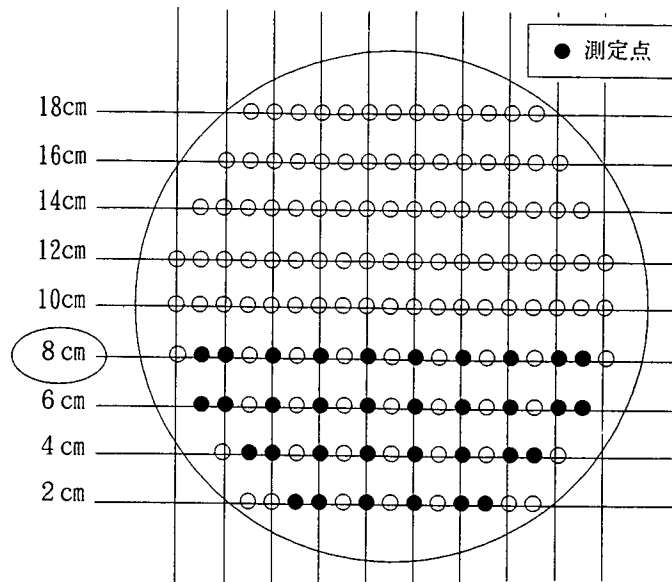


図-4.4 流速測点位置図 (本実験 I-2)

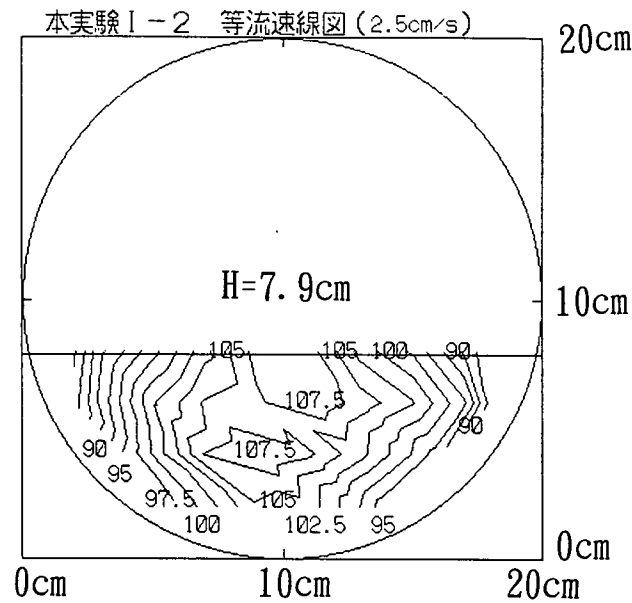


図-4.5 等流速線図 (本実験 I-2)

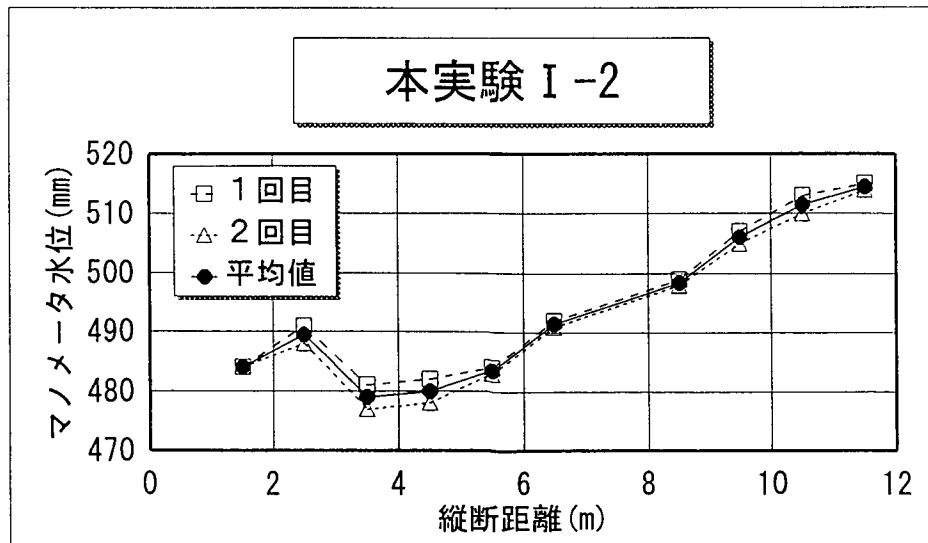


図-4.6 マノメータ測定結果 (本実験 I-2)

(3) 本実験 I - 3

本ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を10cm（通水中平均水深=10.4cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.7の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1~2cmとした。なお測点数は全部で45点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.8に示す。最大流速は測線No.9の水深6cm地点であり、 $V_{\max}=123.3(\text{cm/s})$ であった。等流速線を見ると、大きな流速値を持つ流域が、6割水深付近において横長に広がっている。水表面での流速は、最大流速発生地点から急激に減速する傾向にあった。また水表面中央部における流速が最も速かった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=15602.0(\text{l/s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=17540.0(\text{l/s})$ となり、堰流量より約12.2%大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-4.9に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2~No.9区間の縦断的傾向（動水勾配）について見ると、本実験I-2と同様に、マノメータNo.7で水位が落ち込む傾向にあった。このデータを除くと、マノメータNo.4~No.9の動水勾配は5.1/1000~4.5/1000であった。またマノメータNo.2~No.4では逆勾配、流速測定孔を含むマノメータNo.6~7区間での動水勾配は3.5/1000であった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0086$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0076$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、ともに9.4℃であった。

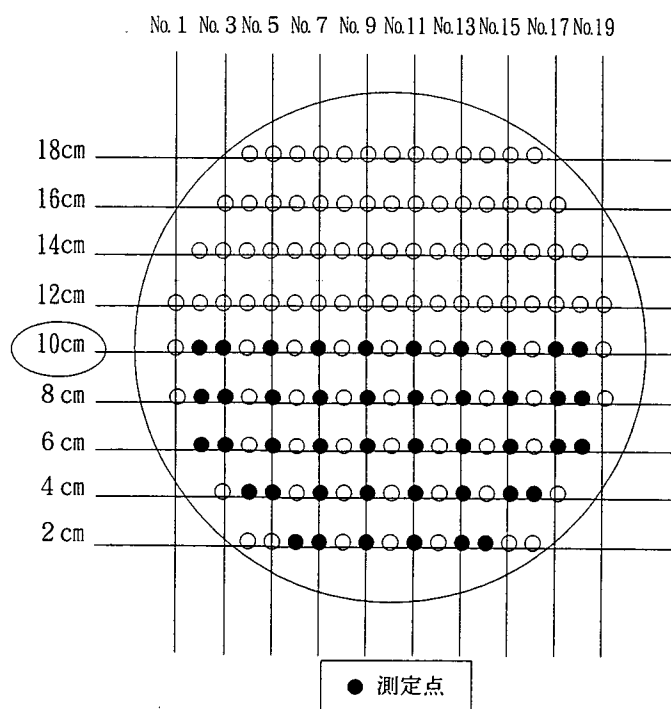


図-4.7 流速測点位置図（本実験 I - 3）

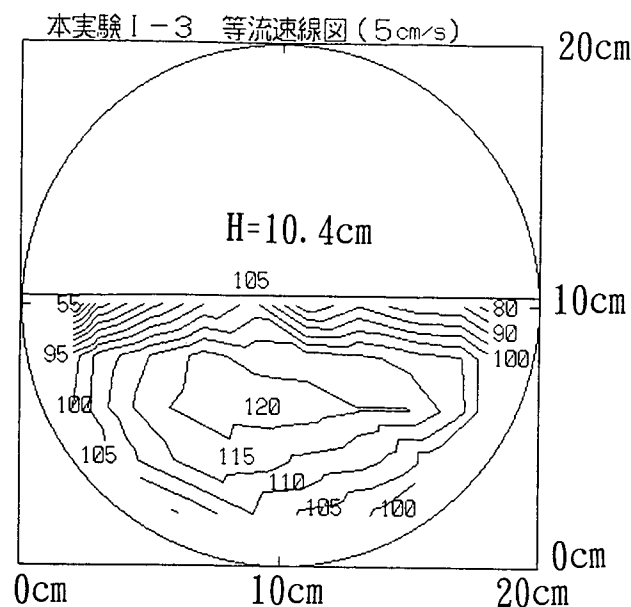


図-4.8 等流速線図 (本実験 I-3)

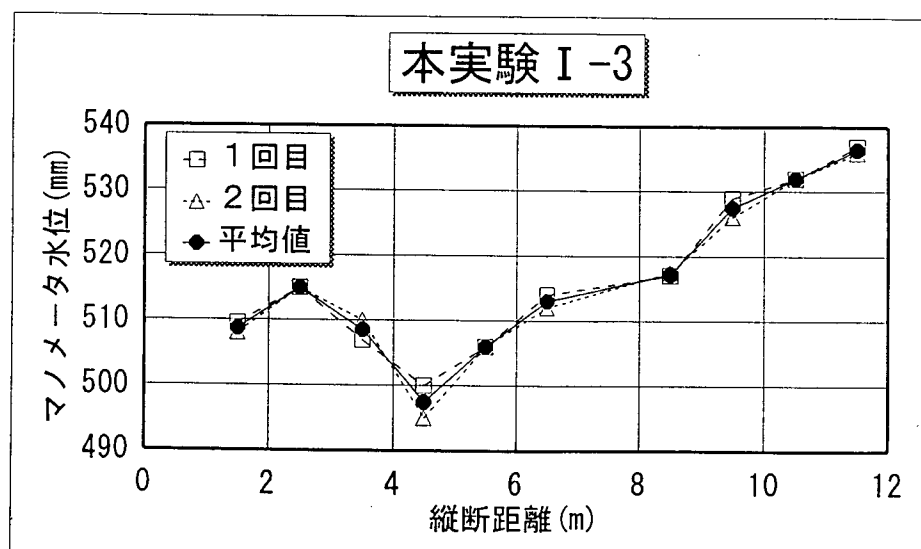


図-4.9 マノメータ測定結果 (本実験 I-3)

(4) 本実験 I-4

本ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を12cm (通水中平均水深=12.2cm) として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.10の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・11cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1~2cmとした。なお測点数は全部で54点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.11に示す。最大流速は測線No.13の水深8cm地点であり、 $V_{max}=124.8$ (cm/s)であった。等流速線を見ると、本実験 I-3と同様、大きな流速値を持つ流域が、6割水深付近において横長に広がっている。水表面の流速は、底面付近の流速が壁面に向かうに従い急激に減速しているのに対

し、ゆっくりと減速する傾向にあった。また水表面中央部における流速が最も速かった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=20532.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=21357.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となり、堰流量より約4.4%大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-4.12に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2～No.9区間の縦断的傾向（動水勾配）について見ると、本実験I-2と同様に、マノメータNo.7で水位が落ち込む傾向にあった。このデータを除くと、マノメータNo.5～No.9の動水勾配は6/1000～3/1000であった。またマノメータNo.4からマノメータNo.5にかけてデータが急変し、逆勾配となった。流速測定孔を含むマノメータNo.6～7区間での動水勾配は2.5/1000であった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合と、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は、同じ値となる $n=0.007$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、9.3℃と9.5℃であった。

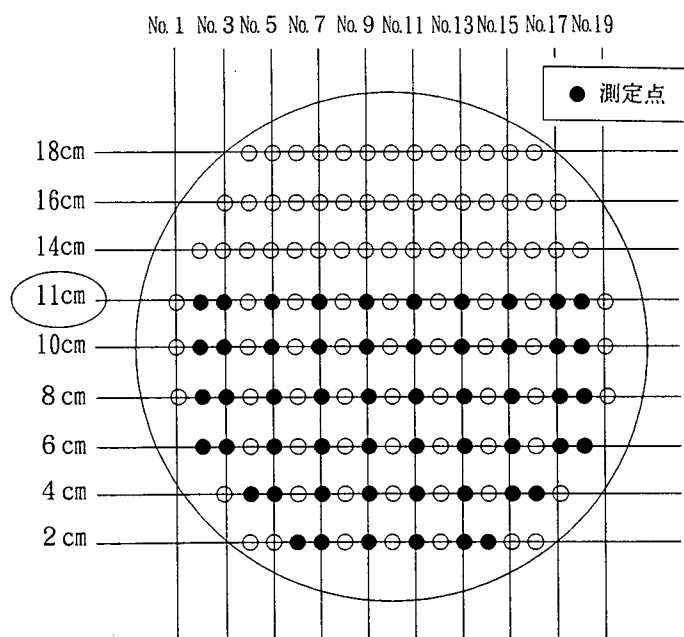


図-4.10 流速測点位置図（本実験I-4）

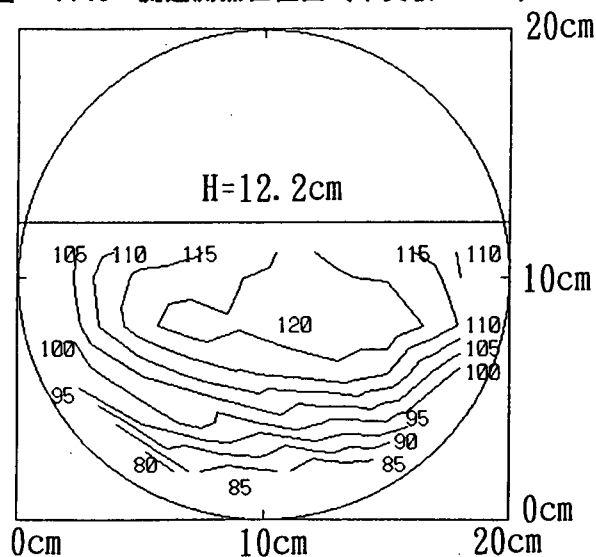


図-4.11 等流速線図（本実験I-4）

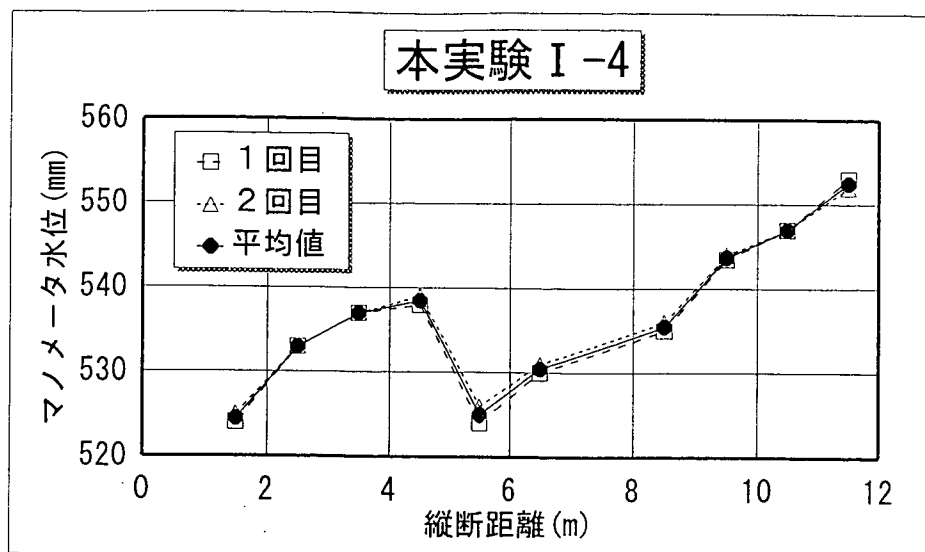


図-4.12 マノメータ測定結果（本実験 I-4）

(5) 本実験 I-5

本ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を14cm（通水中平均水深=13.0cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.13の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・11cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で63点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.14に示す。最大流速は測線No.13の水深10cm地点であり、 $V_{max}=121.3$ (cm/s)であった。等流速線を見ると、大きな流速値を持つ流域が、7～8割水深付近において横長に広がっている。また表面流速は、水表面中央部が最も速く、外壁に近づくにつれ急激に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=21980.0$ (cm³/s)となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=21672.0$ (cm³/s)となり、堰流量の値と近い値を得た。

動水勾配の測定結果を図-4.15に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2～No.9区間の縦断的傾向（動水勾配）について見る。マノメータNo.7からマノメータNo.3にかけて、ほぼ水平勾配をとり、マノメータNo.2で逆勾配となった。マノメータNo.5～No.9の動水勾配は水平～1/125であり、流速測定孔を含むマノメータNo.6～7区間での動水勾配は、1/1000であった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合と、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合とは、同じ値となる $n=0.005$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、9.4℃と9.5℃であった。

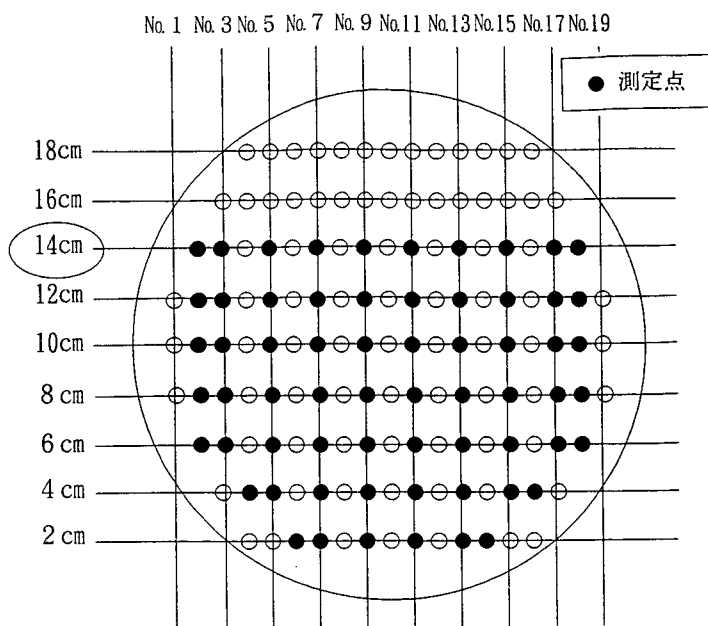


図-4.13 流速測点位置図 (本実験 I-5)

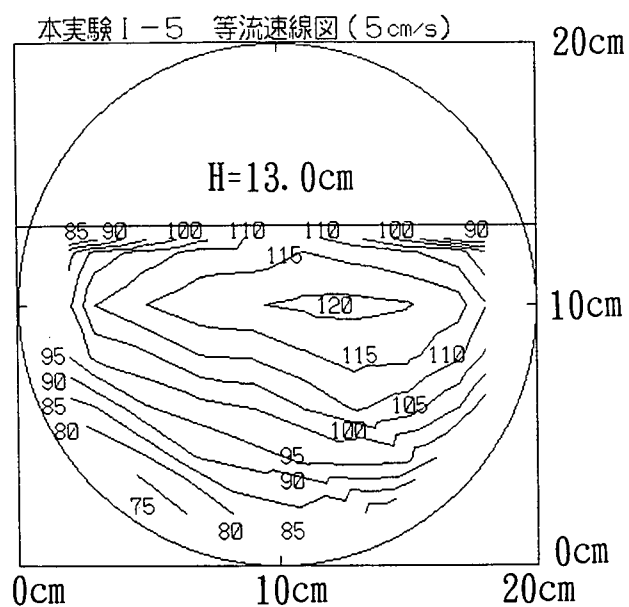


図-4.14 等流速線図 (本実験 I-5)

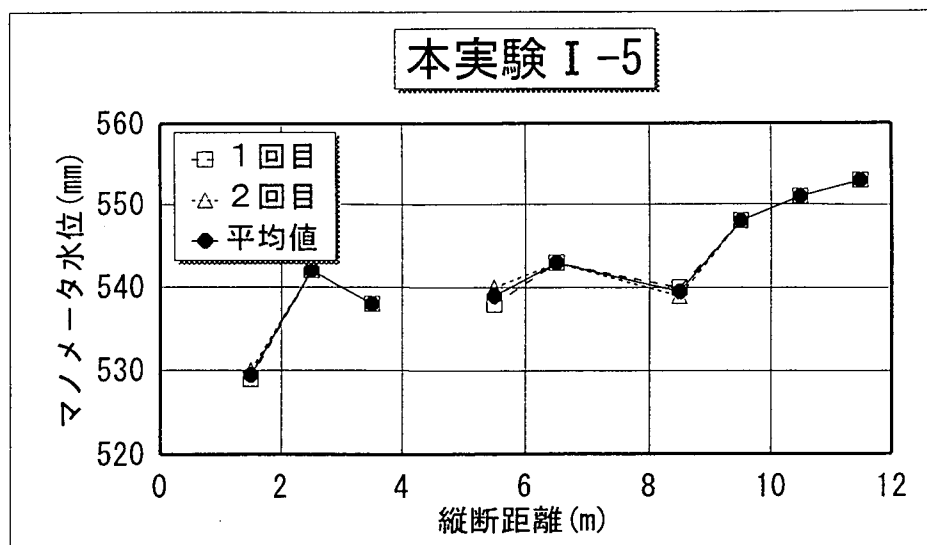


図-4.15 マノメータ測定結果 (本実験 I-5)

(6) 本実験 I - 6

本ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を16cm（通水中平均水深=16.4cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.16の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で72点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.17に示す。最大流速は、ほぼ7割水深位置となる測線No.13の水深12cm地点であり、 $V_{max}=116.5(\text{cm/s})$ であった。この流速は、本実験 I - 5 の最大流速より遅い。等流速線を見ると、大きな流速値を持つ流域が、7～8割水深付近において横長に広がっているが、今までの実験と比較すると、等流速線が同心円状になる傾向にあった。また表面流速は、水表面中央部が最も速いが、最大流速同様、本実験 I - 5 と比較すると流速が遅くなる傾向にあった。

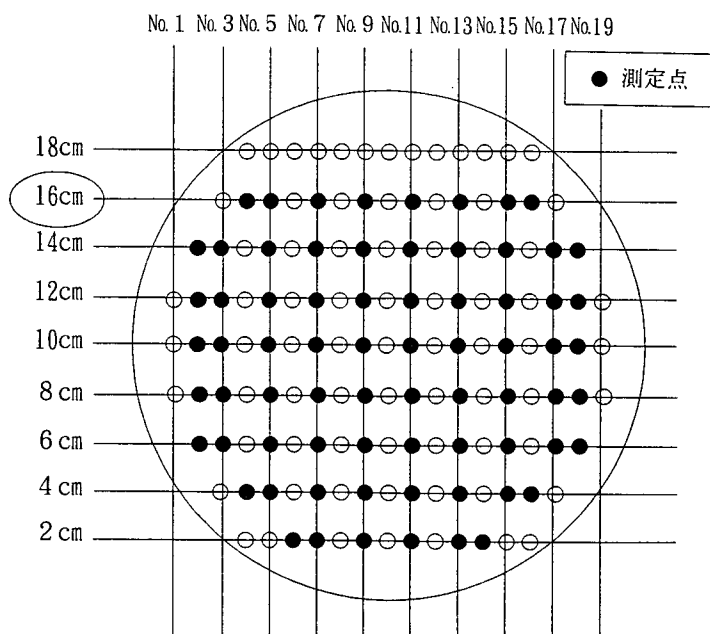


図-4.16 流速測点位置図（本実験 I - 6）

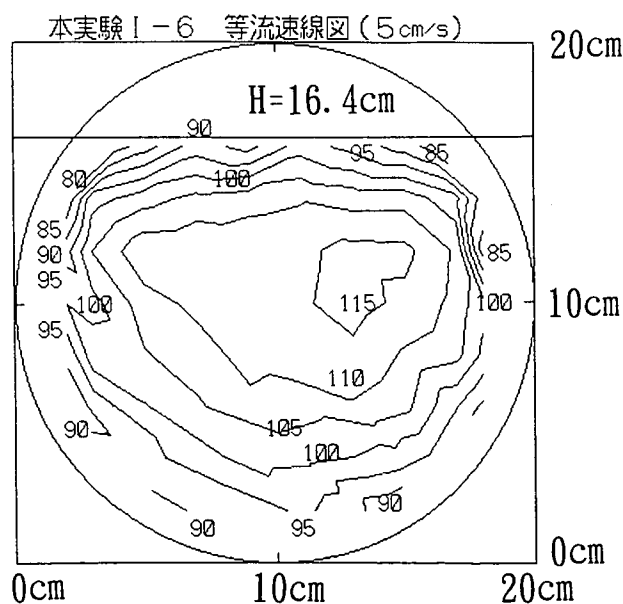


図-4.17 等流速線図（本実験 I - 6）

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=25961.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=27638.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となり、堰流量より約6.2%大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-4.18に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2～No.9区間の縦断的傾向（動水勾配）について見ると、上下流通じてデータの凹凸が激しい。比較的良好なデータが得られた、流速測定孔を含むマノメータNo.6～7区間での動水勾配は1.7/1000であった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。ここで、これまでの粗度係数の算出には、動水勾配としてマノメータNo.2とマノメータNo.9の水位差を用いていた。しかしながら前述したように、マノメータ水位については良い結果を得ることができなかった。よって本実験に限っては、動水勾配としてマノメータNo.6とマノメータNo.7の水位差から求めた値を用いることとした。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合には $n=0.0067$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合には $n=0.0064$ と、各々近い値になった。

水温は、実験開始時と中途、終了時の3回測定し、それぞれ9.2℃、9.3℃、9.3℃であった。

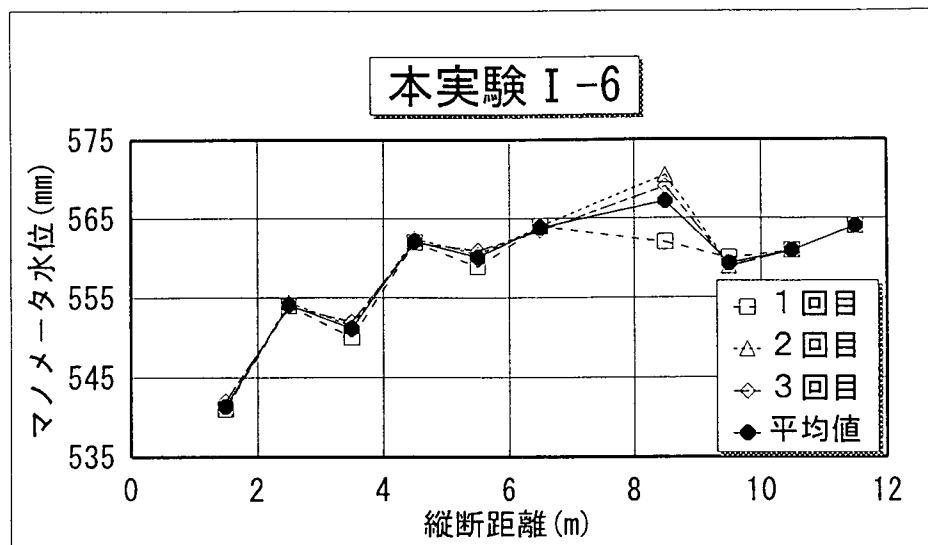


図-4.18 マノメータ測定結果（本実験 I-6）

（7）本実験 I-7

本ケースでは、管路勾配を0/1000、通水時設定水深を20cm（満管）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-4.19の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で78点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-4.20に示す。最大流速は、管の中心より下方となる、測線No.9の水深6cm付近に発生し、 $V_{\max}=143.7(\text{cm}/\text{s})$ であった。この流速値は、本実験 I の中で最も大きく、参考書等で見られる水理特性曲線とは異なる結果を得た。これは、管渠模型の形状に問題があると考えられる。管渠模型は、本報告書第2章で述べたように、流速測定用の測定孔を設けている。この測定孔は、測定効率の向上のため、管渠上部を開口したスリット形状となっている。これにより、管渠を満管状態にしたとしても、実際には開水路流れとなり、流れに多大な影響を及ぼしたと考えられる。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=35927(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また流速分布を基に流量を算出すると $Q_v=39641.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となり、

堰流量より約10.3%大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-4.21に示す。流入口及び流出口近くのマノメータNo.1・No.10を除くマノメータNo.2～No.9区間の縦断的傾向（動水勾配）について見ると、この区間の動水勾配は5.7/1000、流速測定孔を含むマノメータNo.6～7区間での動水勾配は4/1000であった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0075$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0068$ と、各々近い値を得た。

水温は、実験開始時に測定し、9.5℃であった。

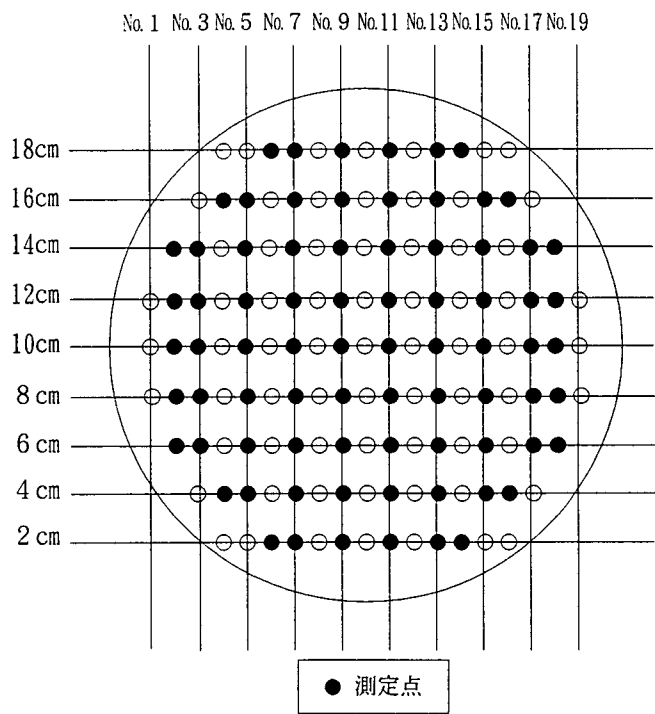


図-4.19 流速測点位置図（本実験Ⅰ-7）

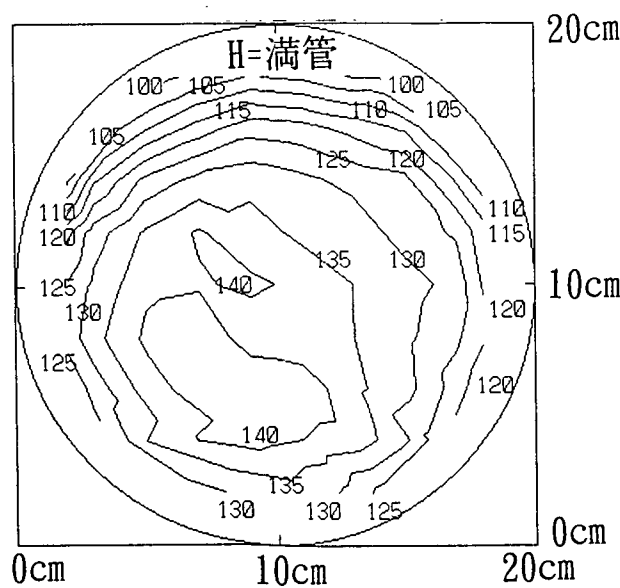


図-4.20 等流速線図（本実験Ⅰ-7）

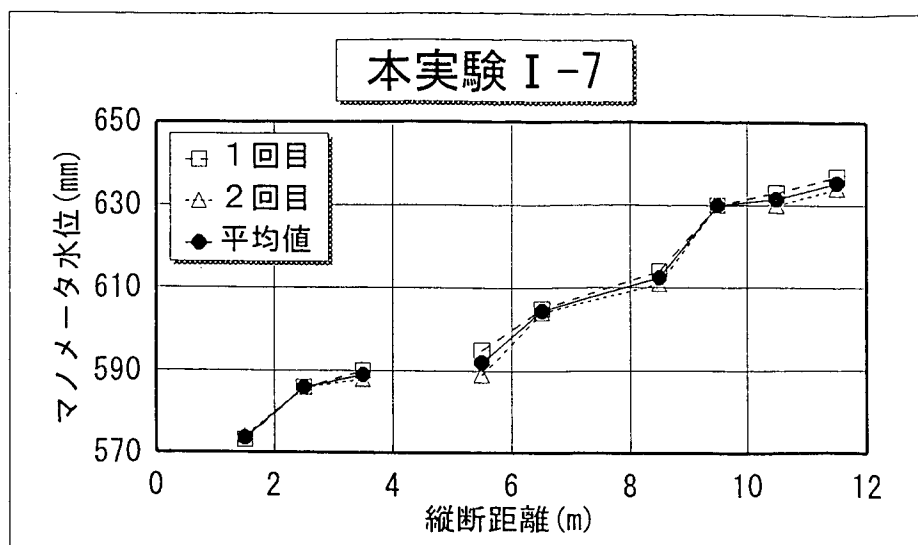


図-4.21 マノメータ測定結果 (本実験 I-7)

4.3 まとめ

表-4.2に、実験結果の一覧表を示す。

表-4.2 実験結果一覧表 (水路勾配 $I=0/1000$)

実験ケース	管内水深 cm	動水勾配	堰流量からの算出			流速分布からの算出		
			堰流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数	計算流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数
本実験 I-1	4.8	3.5/1000	4727.2	80.8	0.0068	4648.0	78.6	0.0070
本実験 I-2	7.9	3.5/1000	10305.0	94.2	0.0076	11310.0	99.3	0.0072
本実験 I-3	10.4	3.5/1000	15602.0	94.9	0.0085	17540.0	106.8	0.0076
本実験 I-4	12.2	2.5/1000	20532.0	102.3	0.0072	21357.0	106.4	0.0069
本実験 I-5	13.0	1.0/1000	21980.0	101.5	0.0046	21672.0	100.1	0.0047
本実験 I-6	16.4	1.7/1000	25961.0	94.5	0.0067	27638.0	100.2	0.0064
本実験 I-7	20.0	4.0/1000	35927.0	114.4	0.0075	39641.0	126.2	0.0068

(1) 粗度係数は、概ね0.005～0.009の範囲内であり、平均すると $n=0.007$ であった。この値は、アクリルの粗度係数として一般的に知られる0.008～0.010より若干小さな値である。

(2) 流速分布は、流量（水位）の変化に伴いその形態を変化させることが明らかとなった。

最大流速の発生地点を流心とすると、流量の少ない場合には流心は5割水深の位置に存在した。流量が多くなると、流心は次第に水面に近づき、6割～7割水深の位置に存在するようになった。また水表面付近には、大きな流速をもった流れの存在が伺える。等流速線は、楕円状を描き、外壁に近づくにつれ急激に減速する傾向にあった。

(3) 平均流速を、堰流量から逆算した場合 (V_w) と、流速分布から逆算した場合 (V_d) について検討した。その結果、本実験 I-1 と本実験 I-5 以外は、 $V_w < V_d$ となった。またこれらの方法で算出された平均流速は、その断面の最大流速 (V_{max}) の 8 割～9 割の値になることが明らかとなった。

(4) 水路が水平勾配の場合、傾斜による加速度は加わらない。よって管路内水深を確保するには、相当量の水を流す必要がある。このため、実験における通水流量は全般的に大きな値となり、結果的に流速値も大きくなった。

(5) 動水勾配は、管内の水位が、満管に対して約 6 割のときに最も緩勾配になる傾向にあった。

(6) 満管時の流れの現象把握は、既存模型の形状では非常に困難であることが明らかとなった。特に、満管時には閉水路流れとなるべきものが、自由水面をもった流れになっていることが、最大の問題となっている。これを解決するには、流速測定孔のスリット部をもっと小さくする、測定装置に工夫を加える等の改良を行う必要がある。

4.4 1点流速測定法の検討

4.4.1 1点流速測定法の概要

流速から流量を得ようとする場合、満管流であれば任意の断面における平均流速を、自由水面流であれば任意の断面における平均流速と管内水深のファクターが必要となる。しかしながら繰り返し述べているように、これらの方法は種々の問題により実用化は困難であることから、測定項目の削減化が必要となっている。

ここで述べる 1 点流速測定法は、1 点の流速から流量を把握しようとするものであり、その方法の概要は次に述べるとおりである。

断面内の任意の位置における流速 (点流速) が、その断面における平均流速 (断面平均流速) と等しいと仮定すると、点流速を測定すれば、自ずと断面平均流速が明らかになることになる。流量を把握するには、断面平均流速の他に管内水深が必要となるが、平均流速が水深の関数で表せると仮定すると、平均流速から水深を算出することが可能となる。よって任意の 1 点の流速測定から、断面平均流速と管内水深が求められ、その結果、流量の把握が可能となるわけである。

4.4.2 1点流速測定法の検討

(1) 測定地点の検討

本実験 I の実験結果を踏まえ、測定地点 (測定測線・測定水深) について検討を行う。

実験結果を振り返ってみる。流心は、ケースによりばらつきはあるものの、概ね測線 No.9 から測線 No.11 の間に存在した。また等流速線は、測線 No.10 を境に左右に線対称となる傾向にあった。これらを考慮すると、1 点流速測定法における流速の測定は、断面の中央部となる測線 No.10 が望ましいと考えられる。

測定地点の決定には、測定測線の他に測定水深が必要である。ここでは、測定水深の検討を行う。

実験では、流心は管内水深のほぼ $1/2$ 水深に現れ、管内水深が大きくなるとその $6 \sim 7$ 割水深に流心が現れる結果を得た。この結果より、点流速＝断面平均流速となる水深は、管内水深の 4 割より下、もしくは 8 割水深より上に存在することが考えられる。しかしながら 8 割水深では、水面に近くなるため流速が急激に減速する、ケースによっては規模の小さい流心の発生が見られる等の問題が懸念されるため、点流速の測定

水深としては適さないと考えられる。

点流速を管内水深の4割以下で測定すると仮定すると、そのポイントとなる地点を決定する必要がある。しかしながら各実験ケースの結果により明らかなように、平均流速＝点流速となる水深にはばらつきがある。水深により点流速測定地点が変化するとすると、水位変動の激しい下水管渠の測定には適さないと考えられる。そこで、ここで述べる1点流速測定法では、水深が変化しても測定地点を固定させることとし、管渠口径の0.1割(0.1D)、0.2割(0.2D)、0.3割(0.3D)の3地点を測定候補地点とした。

(2) 点流速補正係数

前述した3点の点流速測定地点について、点流速補正係数の検討を行った。点流速補正係数(K_p)とは、断面平均流速(V_m)と点流速(V_p)の比を表したもので、 $K_p = V_m / V_p$ で表される。よって K_p が定まれば、点流速から平均流速を算出できることとなる。

各実験ケースについて、点流速測定地点を0.1D、0.2D、0.3Dとした場合で検討を行った。なおここで用いた点流速は、各測定地点付近の流速を基に算出した。また平均流速には、堰流量から逆算した値を用いた。表-4.3に、各実験における点流速補正係数一覧表を示す。図-4.22は、各測定地点での水位/管径(H/D)と K_p の関係を表したものである。

表-4.3 点流速補正係数一覧表

実験ケース	平均流速 $V_m (=V_w)$	0.1D		0.2D		0.3D	
		V_p	K_p	V_p	K_p	V_p	K_p
本実験 I-1	80.8	88.3	0.75	86.7	0.93	—	—
本実験 I-2	89.4	107.6	0.83	110.7	0.81	107.1	0.83
本実験 I-3	94.9	113.2	0.84	117.9	0.80	123.3	0.77
本実験 I-4	102.3	83.3	1.23	98.4	1.04	114.5	0.89
本実験 I-5	101.5	84.3	1.20	91.9	1.10	100.0	1.02
本実験 I-6	94.5	92.7	1.02	102.3	0.92	109.0	0.87
本実験 I-7	114.4	132.9	0.86	141.8	0.81	143.3	0.80

※流速の単位はcm/s

図-4.22に、 K_p と H/D の関係を表したものを示す。測定地点が0.1Dの場合、 K_p は概ね0.8～1.25の値をとった。 K_p は、 $H/D=0.2$ 付近から0.5にかけて一反減少するが、これは点流速測定地点が流心の位置に非常に近づくために、点流速>平均流速となることが起因していると考えられる。その後、 H/D の増加につれ K_p 値も急激に増加する傾向にあるが、これは流心の位置が、1/2水深から水面近くに移動した

ために、平均流速 $\gg$ 点流速となったと考えられる。その後、 $H/D=0.6\sim0.7$ 付近で極大となった後、穏やかに減少する傾向にあるが、これは流心位置が再度管渠中心部に移動したためと考えられる。

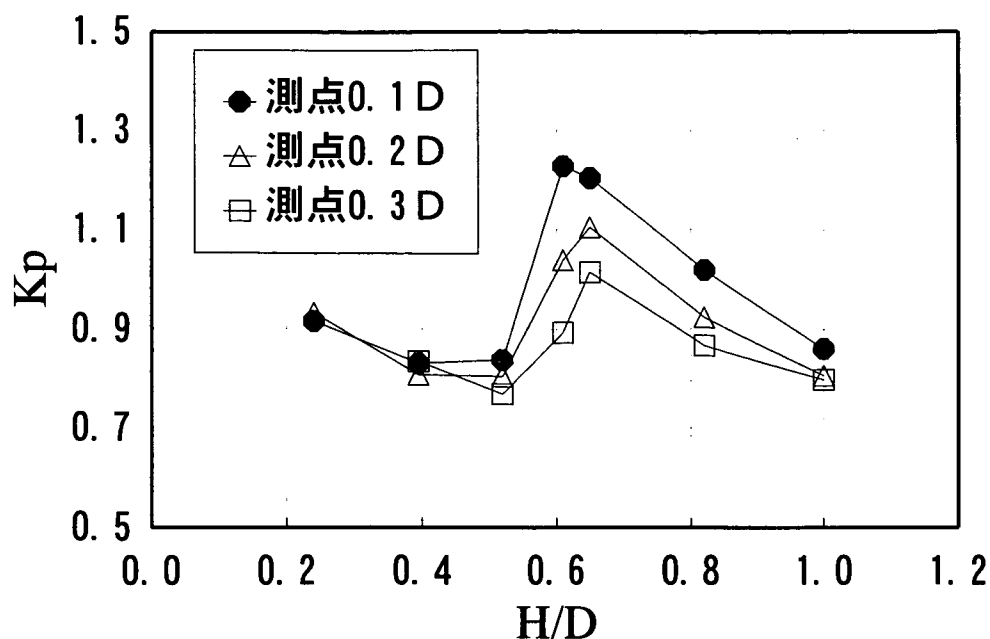


図-4.22 K_p と H/D の関係

測定地点が0.2Dの場合、0.1Dと比較すると K_p の変動幅が少なく、 K_p は概ね0.8~1.1の値をとった。 K_p の変動傾向は、0.1Dの場合と似ており、 $H/D=0.2$ から0.5にかけて K_p は減少傾向にあり、 H/D が約0.5より大きくなると、 $H/D=0.6\sim0.7$ 付近まで増加傾向にあり、極大値を得た後、減少する傾向にあった。

測定地点が0.3Dの場合、 K_p は概ね0.75~1.0の値をとった。0.3Dの場合における K_p 値は、0.2Dよりもさらに低い値となった。

(3) まとめ

本実験Iでは、水路勾配を0/1000として実験を行った。この結果、 H/D と K_p の関係は、測定地点の違いに関わらず、同じような傾向になることが分かった。この傾向は、管渠内の流速分布形態が起因していると考えられ、ここの実験で得た結果はそれをよく反映していると考えられる。

管渠口径の0.1割、0.2割、0.3割の各水深について、測定地点の妥当性の検討を行った。その結果、実験データの大半は、平均流速 $>$ 点流速となり、点流速 $\geq$ 平均流速となったのは、測定地点が0.1Dでありかつ $0.5 < H/D < 0.85$ の場合、測定地点0.2Dでかつ $0.6 < H/D < 0.75$ の場合であった。

1点流速測定法の実用化を考慮すると、点流速は任意の水深に固定された流速計で測定されることが望ましい。それは、維持管理や測定効率、流れの形態（流速分布等）等から明らかである。実験では、測定地点を固定し検討を行い、 K_p は管内水深に応じて変化する結果を得た。よって任意の水深に固定して測定を行うには、 K_p を水深の関数で表すことが必要と考えられる。

以上のように、水平勾配の管路における流れの形態を、簡単な水理実験により検討した。しかしながら実

際の管路は、自然流下式の採用に加え、住宅が密集していることから、場所によって水路勾配が随時変化する。よって実験条件として、勾配を変化させた場合の検討を加える必要があると考えられる。

第 5 章 本実験Ⅱ (水路勾配=1/1000)

第5章 本実験Ⅱ（水路勾配1／1000）

第5章では、本実験Ⅰの実験結果を踏まえ、水路勾配の変化に伴う、管路内の流れの形態の変化について検討するために、管渠模型の水路勾配を1/1000として定流通水実験を行った。

5.1 実験ケースと実験条件

本実験は、水深（流量）を一定とする定流通水実験である。本実験Ⅱでは、水路勾配を0/1000、水深はケース毎に3割水深から満管まで2cmピッチで変化させて実験を行った。表－5.1に実験ケース一覧表を示す。

表－5.1 本実験Ⅱケース一覧表

ケース名	実験条件		測定項目
	設定勾配	設定水深	
本実験Ⅱ－1	1/1000	6 cm	流速・潤辺・流量・マノメータ・水温
本実験Ⅱ－2	1/1000	8 cm	〃
本実験Ⅱ－3	1/1000	10 cm	〃
本実験Ⅱ－4	1/1000	12 cm	〃
本実験Ⅱ－5	1/1000	14 cm	〃
本実験Ⅱ－6	1/1000	16 cm	〃
本実験Ⅱ－7	1/1000	18 cm	〃
本実験Ⅱ－8	1/1000	満管	〃

実験における測定項目は、本実験Ⅰと同様に、流速、管内水深、流量、マノメータ水位、流況観測、水温とした。

流速については、水深方向・横断方向にそれぞれ1～2cmピッチで測定した。測定機器は、壁面の有無に関係なく流速の測定が可能なプロベラ式流速計を用いた。1測点当たりの測定時間は1分間とし、パソコンを通じて1秒おきにデータを収集した。収集データは、BASICプログラムを用いて、平均化等の処理をした。また、流速データの平均値は、等流速線図（流速コンター図）として整理した。

管内水深は、ポイントゲージを用いて、実験開始時および実験終了時（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）に測定した。

流量については、各測点の測定流速から流量を求めた際の比較値として、低水槽に設置してある三角堰を用いて、堰の越流水深から実流量（堰流量）を算出した。越流水深は、管内水深測定と同様に、ポイントゲージを用いて測定した。

粗度係数を得るには、動水勾配が必要となってくる。よって、アクリル管渠にマノメータを設置し、実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）マノメータ水位を読み、その値を整

理し動水勾配とした。なお本実験Ⅱより、流速測定孔直下にもマンメータを加え、マンメータ数を計12本とした。

流況観測は、主流及び編流、渦、波動等の様子や位置について把握するために行った。実験では、流れの形態が視覚的に把握できるように、染料及びポリスチレン微粒子を高水槽から流した。

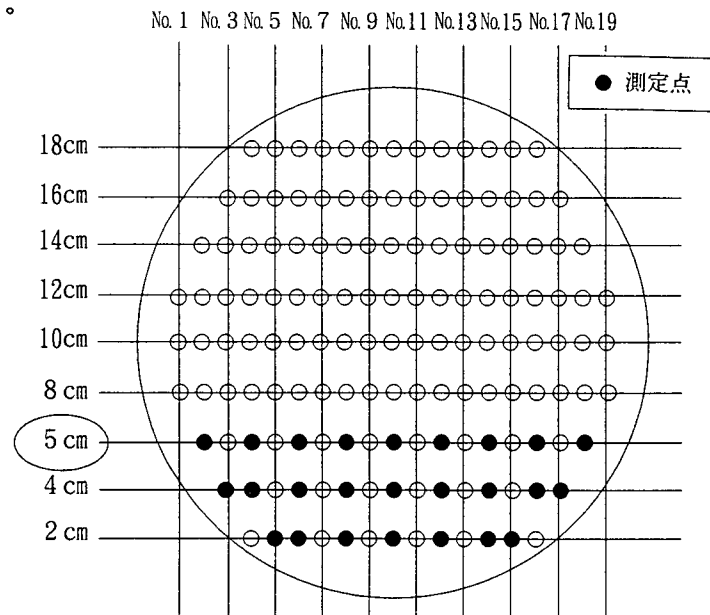
水温は、管渠最下流に設置してある水槽で実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）計測を行った。

5.2 実験結果

(1) 本実験Ⅱ－1

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を6 cm（通水中平均水深＝5.9 cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－5.1の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・5 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で25点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－5.2に示す。



図－5.1 流速測点位置図（本実験Ⅱ－1）

最大流速発生位置は測線No.8～12の水深4 cm付近であり、最大流速 $V_{max}=33.4\text{ cm/s}$ を得た。この地点は、管渠口径の1/4割水深位置に当たる。また等流速線は、外側へ向かうに従って減速する傾向にあり、左右を比較するとほぼ対称となる結果を得た。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=2095.3\text{ (cm}^3/\text{s)}$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=2209.5\text{ (cm}^3/\text{s)}$ となった。

動水勾配の測定結果を図－5.3に示す。マンメータNo.1～4の水位は、その上流と比べると若干低くなっており、背水の影響を受けていることが考えられる。よってこれらのデータを除くと、動水勾配は約1.1/1000（マンメータNo.2～10）となる。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0126$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0121$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、2回とも 20.7°C であった。

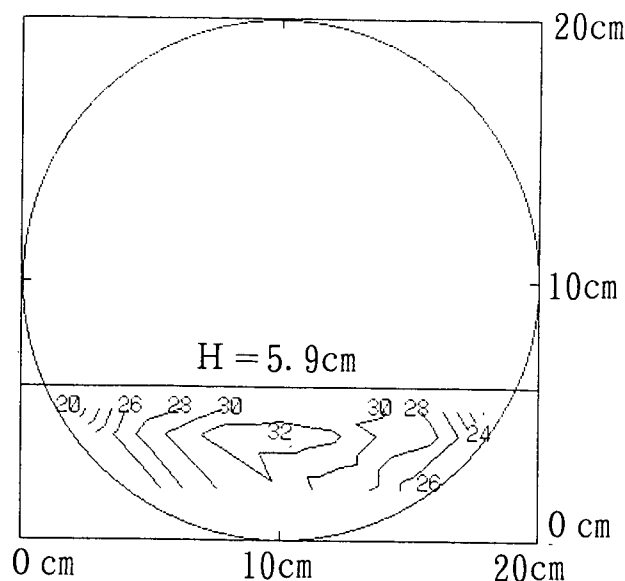


図-5.2 等流速線図 (本実験Ⅱ-1)

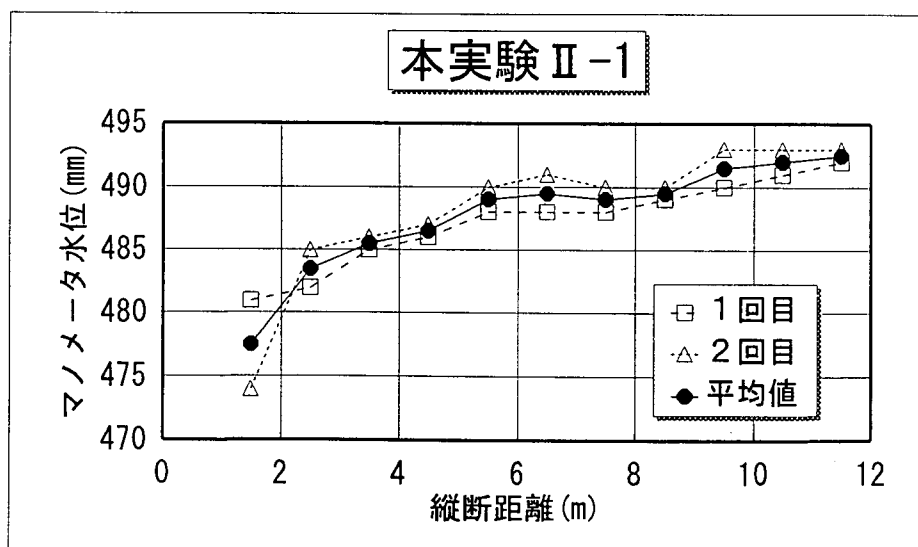


図-5.3 マノメータ測定結果 (本実験Ⅱ-1)

(2) 本実験Ⅱ-2

本実験ケースでは、管路勾配を $1/1000$ 、通水時設定水深を 8 cm (通水中平均水深 $=8.0\text{ cm}$) として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-5.4の測点位置図に示すように、 $2\text{ cm} \cdot 4\text{ cm} \cdot 6\text{ cm} \cdot 7\text{ cm}$ の各水深で行い、横断方向の測定ピッチを $1 \sim 2\text{ cm}$ とした。なお測点数は全部で33点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-5.5に示す。

最大流速発生位置は、測線No10~13の水深 4 cm 付近であり、管渠中心から若干右にずれた位置に存在した。

最大流速 $V_{\max}$ は 44.8 cm/s であった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w = 4392.4 (\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果も、 $Q_v = 4386.6 (\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量と同様の結果となった。

動水勾配の測定結果を図-5.6に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約 $1.1/1000$ （マノメータNo.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合と、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で、ともに同じ値となる $n = 0.011$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、2回とも 20.7°C であった。

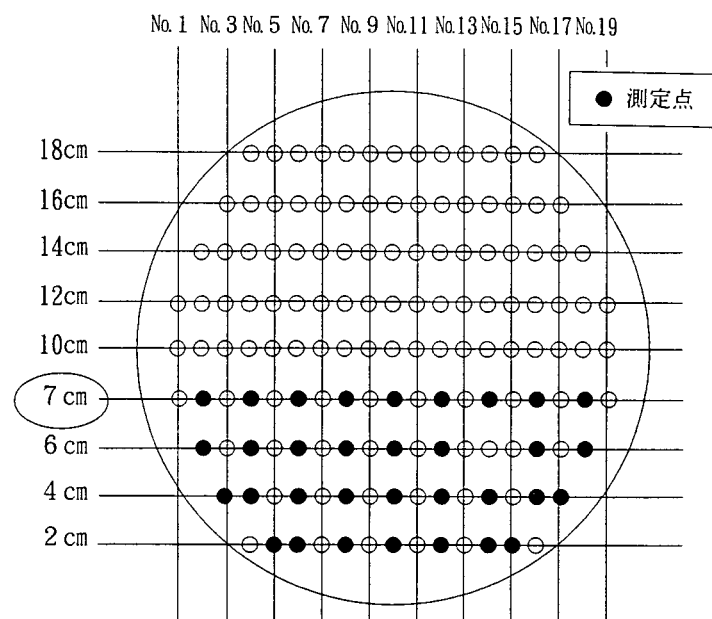


図-5.4 流速測点位置図（本実験Ⅱ-2）

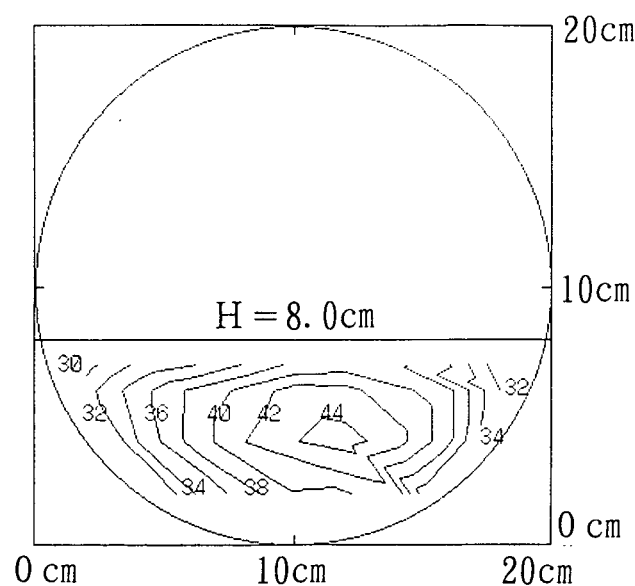


図-5.5 等流速線図（本実験Ⅱ-2）

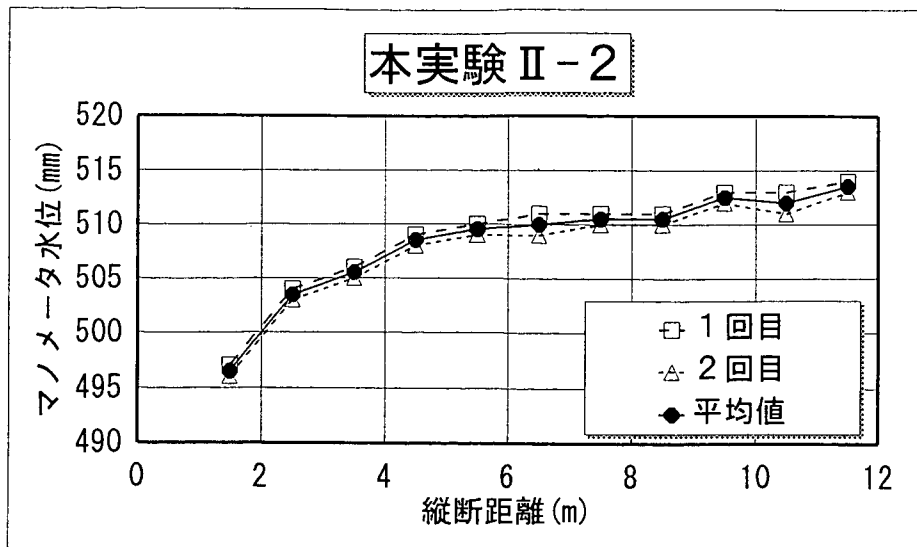


図-5.6 マノメータ測定結果（本実験Ⅱ-2）

(3) 本実験Ⅱ-3

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を10cm（通水中平均水深=10.2cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-5.7の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・9cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で43点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-5.8に示す。

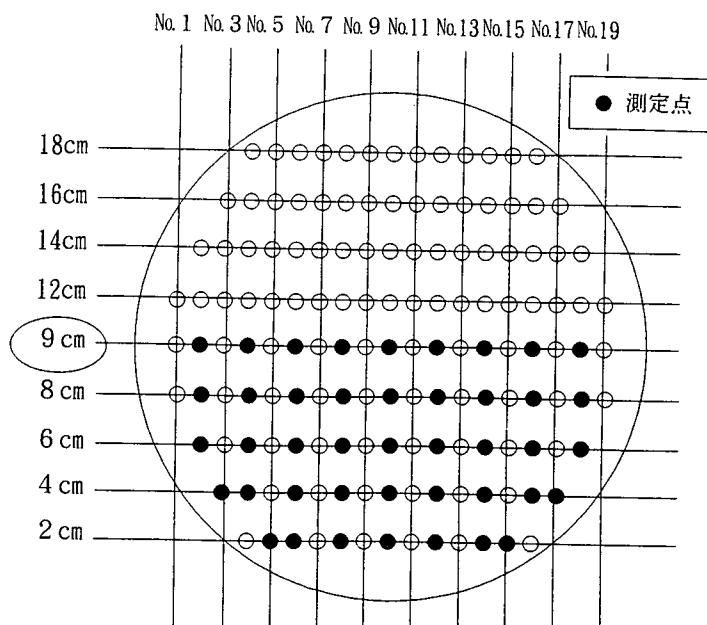


図-5.7 流速測点位置図（本実験Ⅱ-3）

最大流速発生位置は、測線No.10～14の水深5～7cm付近であり、本実験Ⅱ-2同様、管渠中心から若干右にずれた位置に存在した。最大流速 V_{max} は56.2cm/sであった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=7212.3(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ

一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=7616.1(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-5.9に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約1/714（マノメータNo.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0115$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0109$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均水温は22.8℃であった。

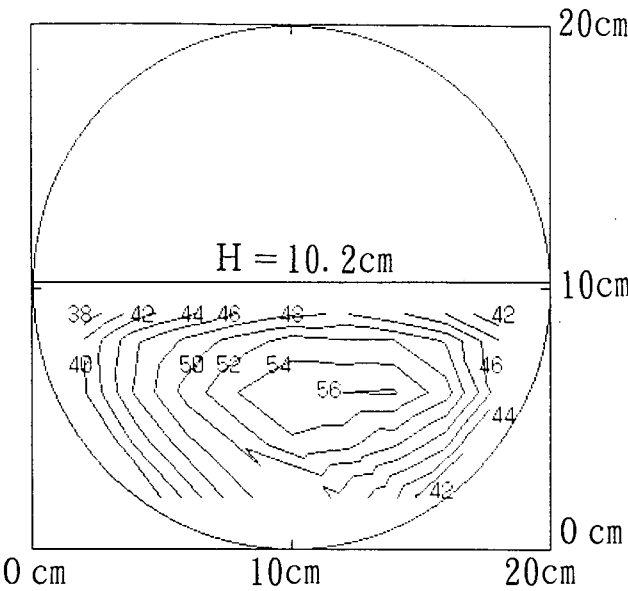


図-5.8 等流速線図（本実験Ⅱ-3）

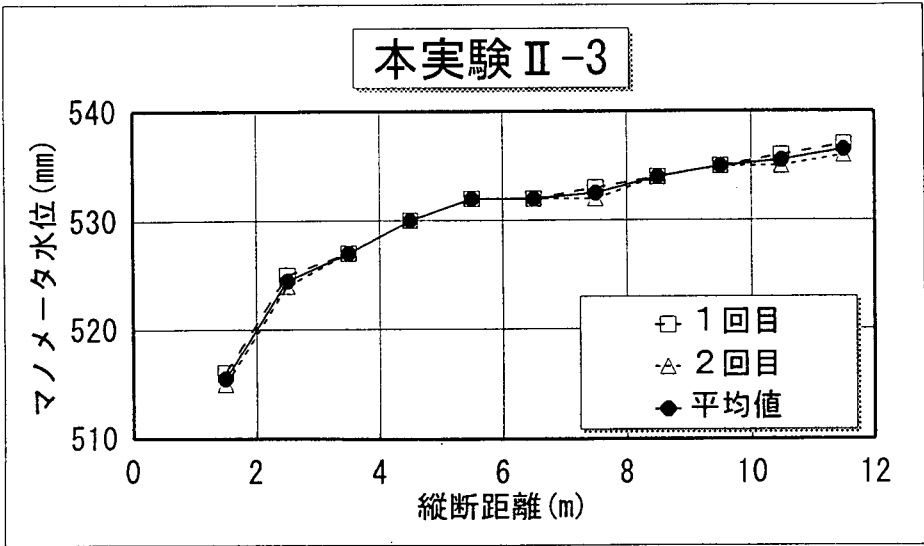


図-5.9 マノメータ測定結果（本実験Ⅱ-3）

(4) 本実験Ⅱ-4

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を12cm（通水中平均水深=12.0cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-5.10の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・11cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で52点である。各測点で測定した流速を

等流速線図に表したものを図－5.11に示す。

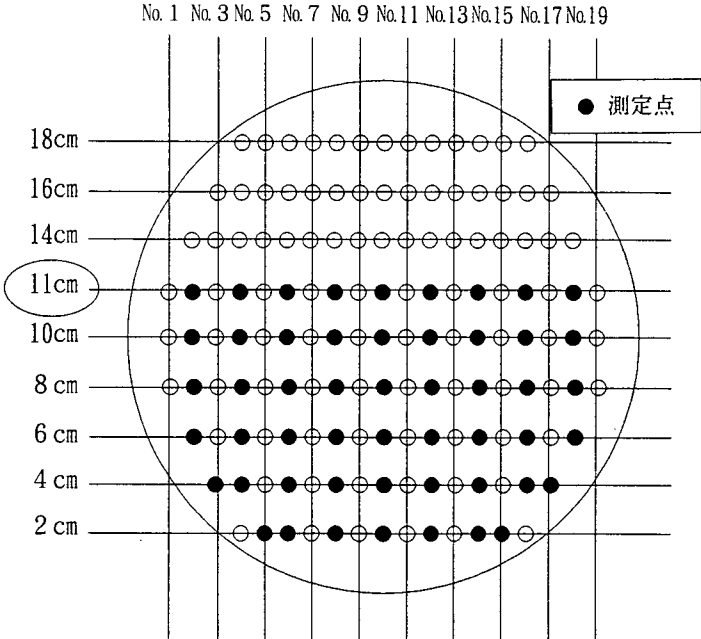
最大流速発生位置は、測線No.9～11の水深8 cm付近であり、最大流速 $V_{max}=65.4\text{cm/s}$ であった。また等流速線は、最大流速発生位置を中心とし、外壁に向かって急激に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=10384.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=10830.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より大きな値となった。

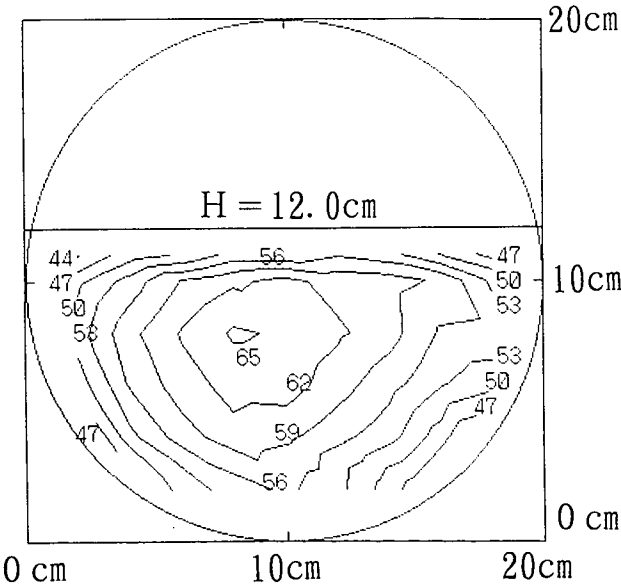
動水勾配の測定結果を図－5.12に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約1.8/1000（マノメータ水位No.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0117$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0112$ を得た。

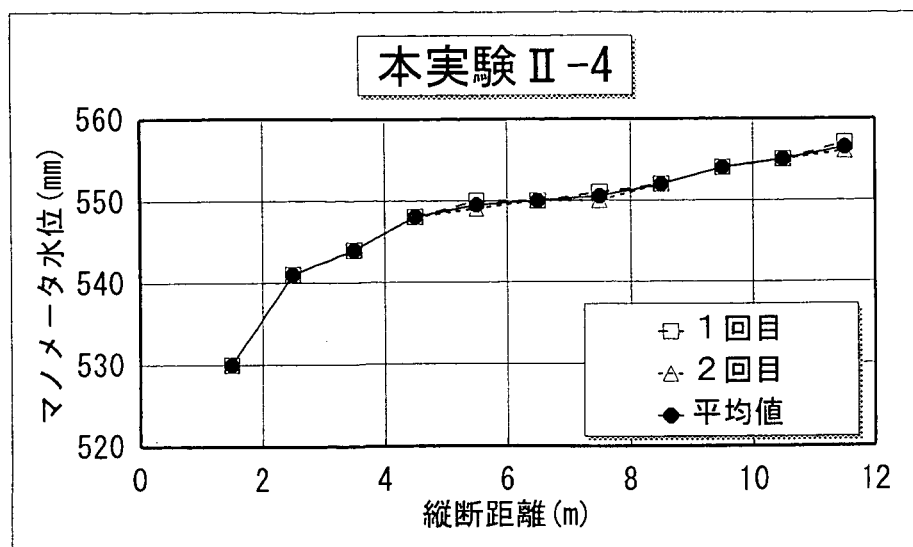
水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均水温は 23.2°C であった。



図－5.10 流速測点位置図（本実験Ⅱ－4）



図－5.11 等流速線図（本実験Ⅱ－4）

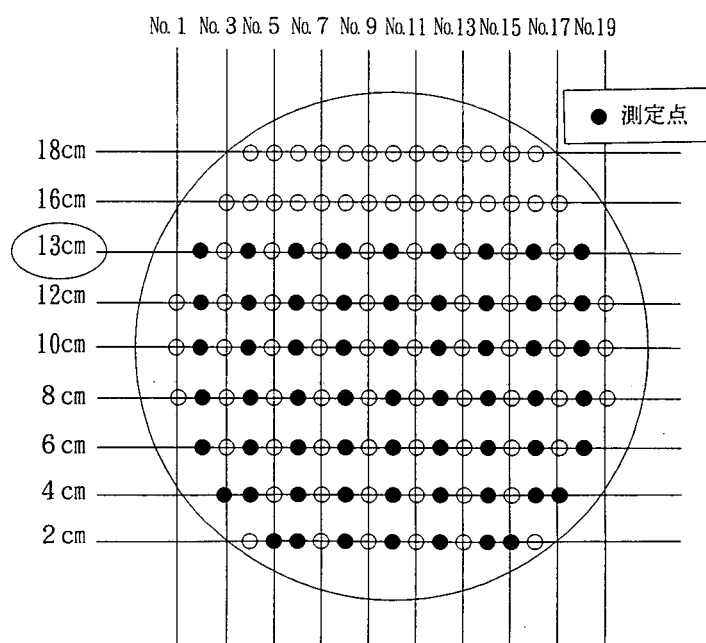


図－5.12 マノメータ測定結果（本実験Ⅱ－4）

（5）本実験Ⅱ－5

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を14cm（通水中平均水深＝13.9cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－5.13の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・13cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で61点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－5.14に示す。



図－5.13 流速測点位置図（本実験Ⅱ－5）

最大流速発生位置は、測線No.9～11の水深8～10cm付近であり、最大流速 $V_{max}=76.4\text{cm/s}$ であった。また等流速線は、測線No.10を境に左右対称となり、外壁に向かい次第に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=15904.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=15003.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より小さな値を得た。

動水勾配の測定結果を図-5.15に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約2.1/1000（マノメータ水位No.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0091$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0097$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均水温は 23.5°C であった。

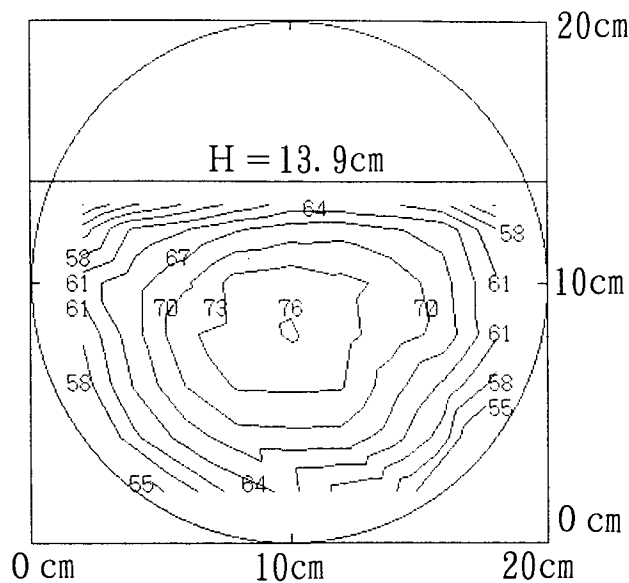


図-5.14 等流速線図（本実験Ⅱ-5）

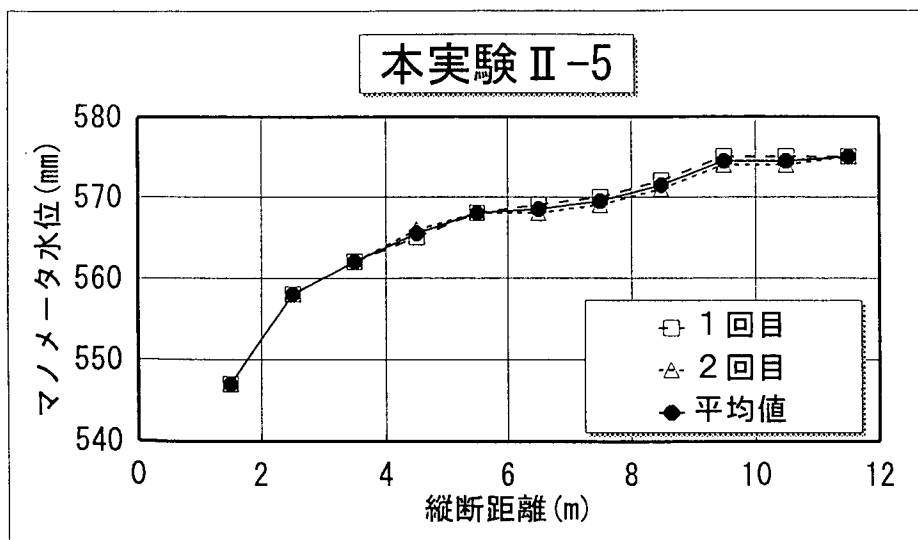
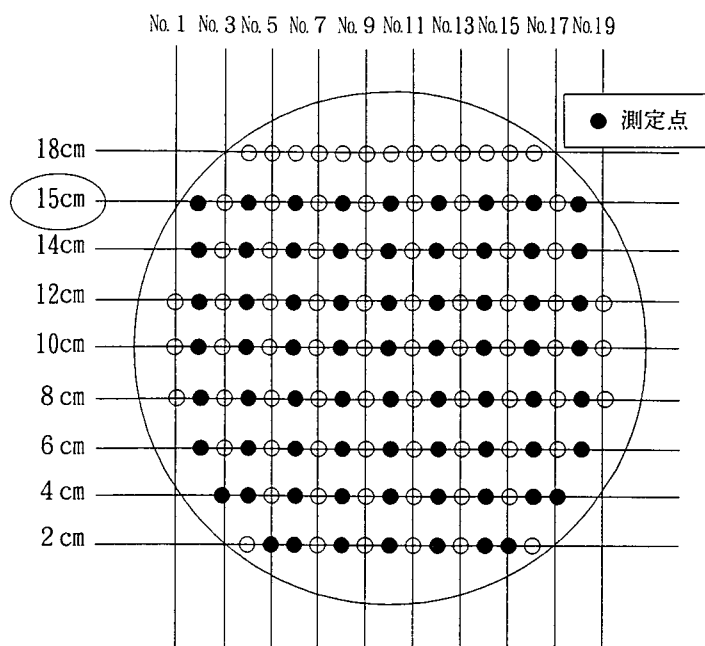


図-5.15 マノメータ測定結果（本実験Ⅱ-5）

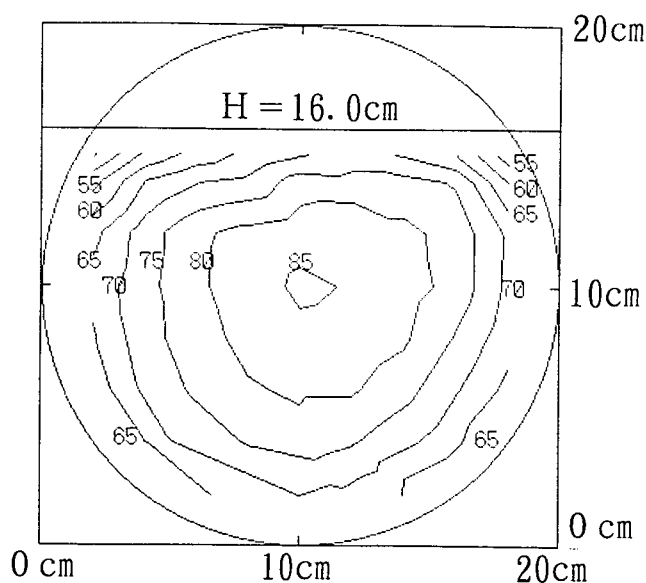
(6) 本実験Ⅱ－6

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を16cm（通水中平均水深＝16.0cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－5.16の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・15cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で70点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－5.17に示す。



図－5.16 流速測点位置図（本実験Ⅱ－6）



図－5.17 等流速線図（本実験Ⅱ－6）

最大流速発生位置は、ほぼ管渠中心部にあたる測線No.9～11の水深10cm付近であり、その最大流速 V_{max} は85.9cm/sであった。また等流速線は、ほぼ同心円状に、外側へ向かうに従って減速する傾向にあった。特に水面付近の流速値の減速が顕著に見られた。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=17914.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=19395.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。

動水勾配の測定結果を図-5.18に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約2.7/1000（マノメータNo.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0121$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0112$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均値は23.9℃であった。

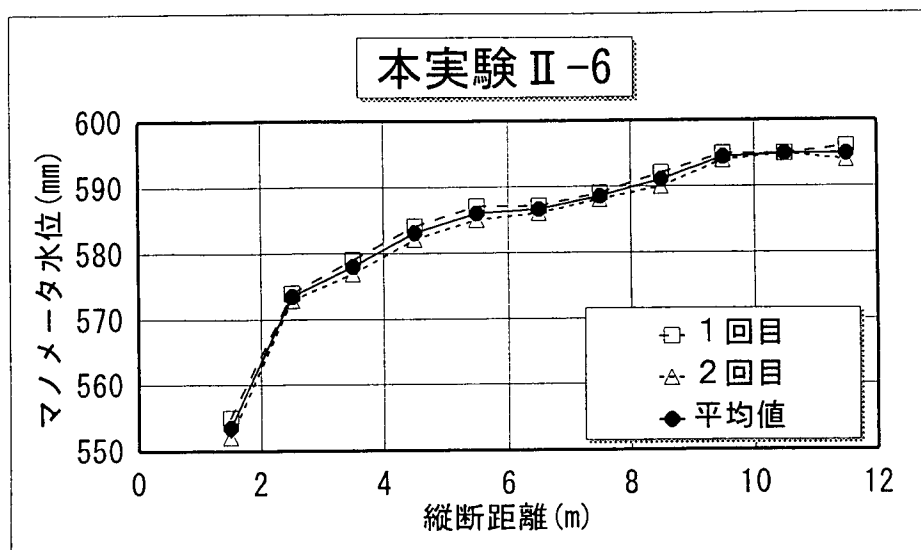


図-5.18 マノメータ測定結果（本実験Ⅱ-6）

（7）本実験Ⅱ-7

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を18cm（通水中平均水深=17.0cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-5.19の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で70点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-5.20に示す。

最大流速発生位置は、ほぼ管路中心部にあたる測線No.8～12の水深10～15cm付近であり、その最大流速 V_{max} は93.8cm/sであった。また等流速線は、外側へ向かうに従って減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=20359.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=22185.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。

動水勾配の測定結果を図-5.21に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約2.9/1000（マノメータNo.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0116$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0107$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、1回目は22.1℃、2回目は22.2℃であった。

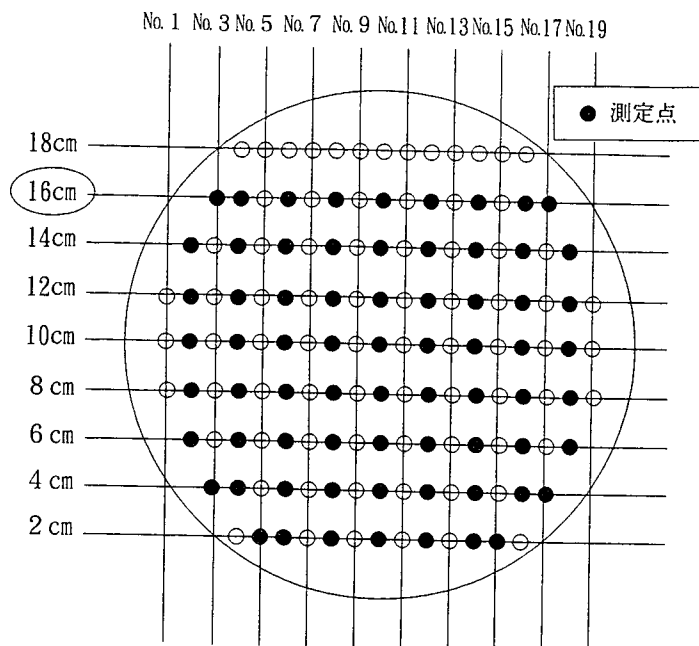


図-5.19 流速測点位置図 (本実験Ⅱ-7)

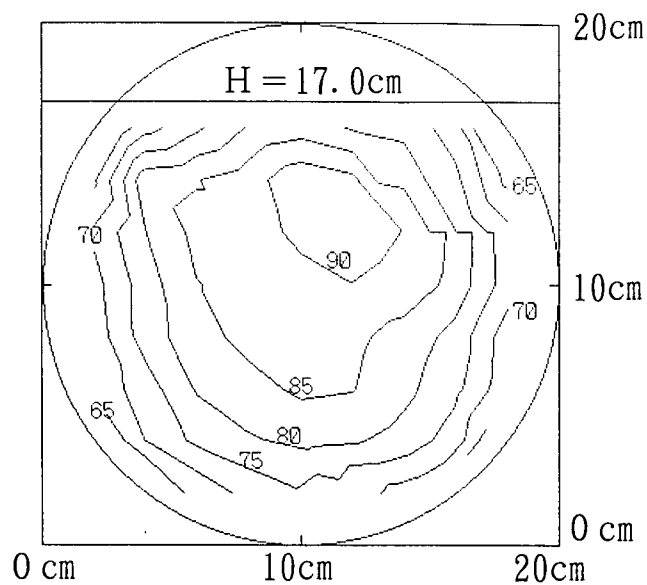


図-5.20 等流速線図 (本実験Ⅱ-7)

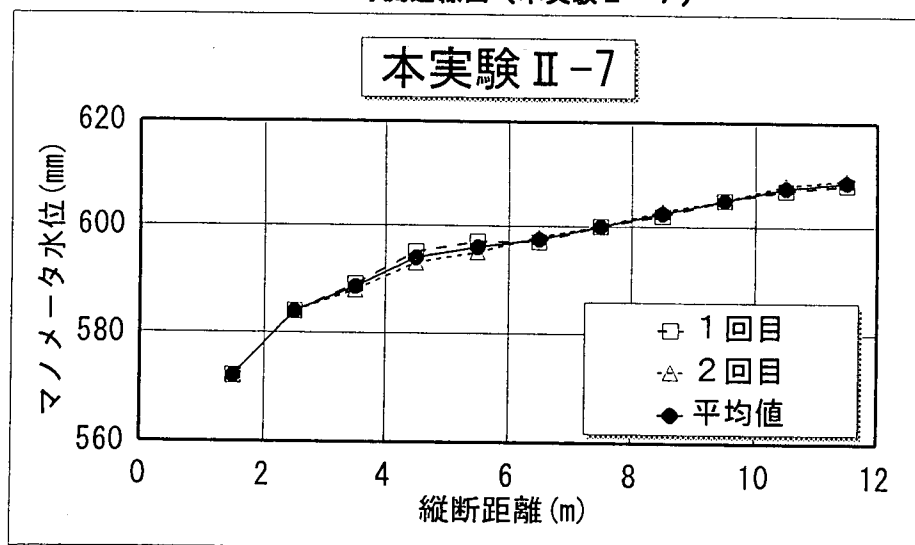
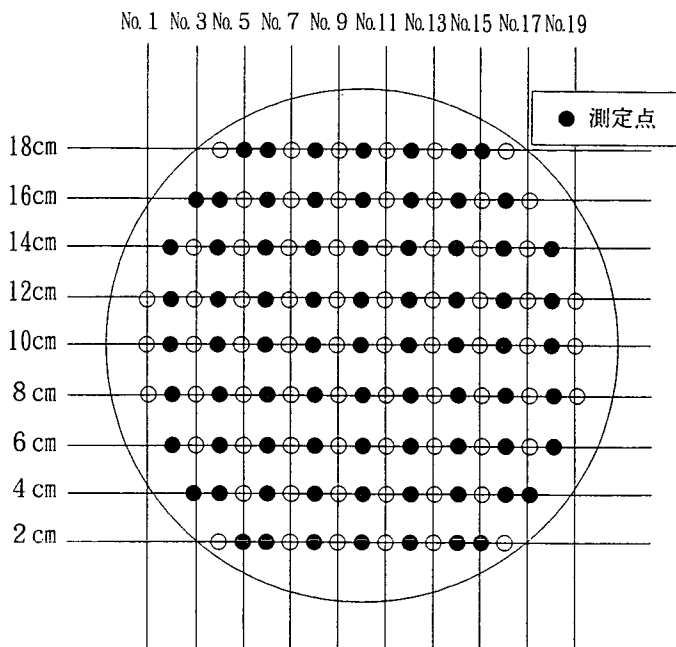


図-5.21 マノメータ測定結果 (本実験Ⅱ-7)

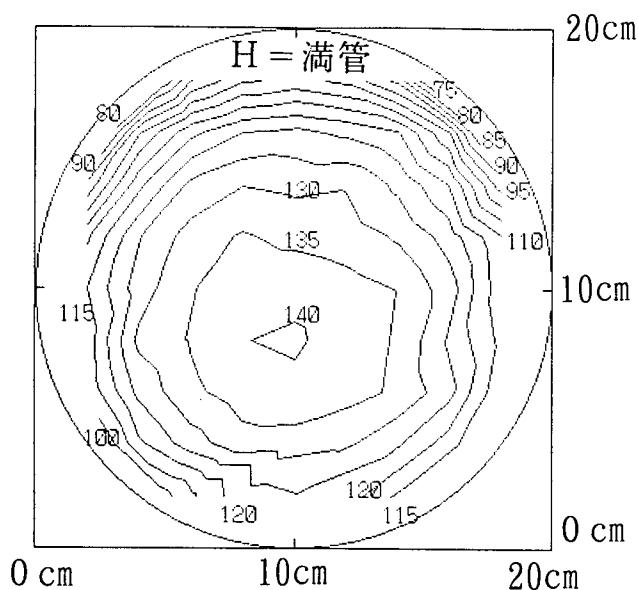
(8) 本実験Ⅱ－8

本実験ケースでは、管路勾配を1/1000、通水時設定水深を20cm（満管）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－5.22の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cm・18cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で77点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－5.23に示す。



図－5.22 流速測点位置図（本実験Ⅱ－8）



図－5.23 等流速線図（本実験Ⅱ－8）

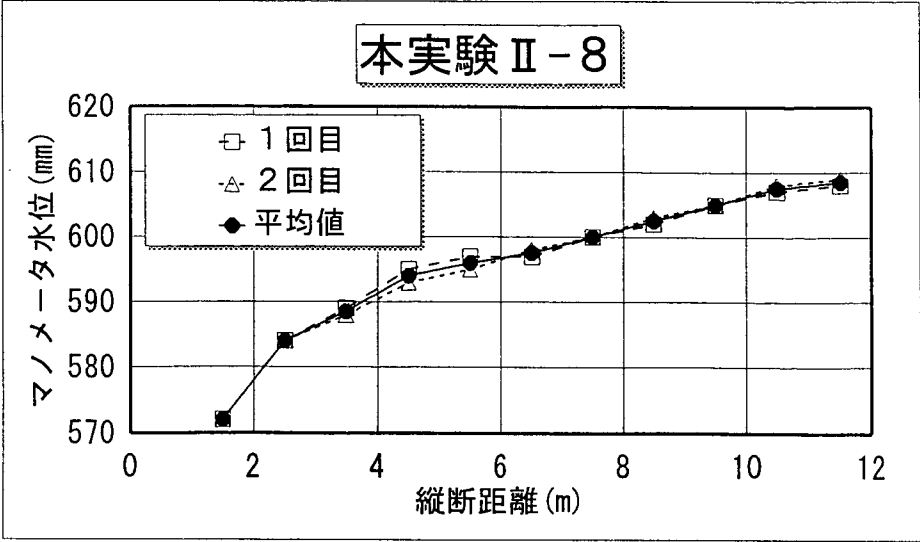
最大流速発生位置は、ほぼ管渠中心部にあたる測線No.8～12の水深8～10cm付近であり、その最大流速 V_{max} は140.9cm/sであった。また等流速線は、外側へ向かうに従って減速する傾向にあるが、管渠下部に比較すると、管渠上部の方が急激に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=34675.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=37579.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。

動水勾配の測定結果を図－5.24示す。縦断的にデータが非常に乱れている。よってほぼ平均と考えられる値を抽出し、動水勾配を算出すると約5.1/1000となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0088$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0081$ を得た。

水温は、実験開始時及中途、そして終了時の2回測定し、1回目は21.1℃、2回目は21.8℃、3回目は21.9℃であった。



図－5.24 マノメータ測定結果（本実験Ⅱ－8）

5.3 まとめ

表－5.2に、実験結果の一覧表を示す。

表－5.2 実験結果一覧表（水路勾配 $i=1/1000$ ）

実験ケース	管内水深 cm	動水勾配	堰流量からの算出			流速分布からの算出		
			堰流量 cm ³ /s	平均流速 cm/s	粗度係数	計算流量 cm ³ /s	平均流速 cm/s	粗度係数
本実験Ⅱ-1	5.9	1.1/1000	2095.3	27.3	0.0126	2209.5	28.5	0.0121
本実験Ⅱ-2	8.0	1.1/1000	4392.4	37.4	0.0109	4386.6	37.4	0.0109
本実験Ⅱ-3	10.2	1.4/1000	7212.3	44.6	0.0115	7616.1	47.1	0.0109
本実験Ⅱ-4	12.0	1.8/1000	10384.0	52.9	0.0117	10830.0	55.2	0.0112
本実験Ⅱ-5	13.9	2.1/1000	15904.0	68.3	0.0091	15003.0	64.4	0.0097
本実験Ⅱ-6	16.0	2.7/1000	17914.0	66.4	0.0121	19395.0	72.0	0.0112
本実験Ⅱ-7	17.0	2.9/1000	20359.0	71.5	0.0116	22185.0	77.9	0.0107
本実験Ⅱ-8	満管	5.1/1000	34675.0	110.4	0.0088	37579.0	119.6	0.0081

(1) 粗度係数は、概ね0.009～0.012の範囲内であった。この値は、アクリルの粗度係数として一般的に知られる値とほぼ一致する。

(2) 流速分布は、流量（水位）の変化に伴いその形態を変化させた。

最大流速の発生地点を流心とすると、流量の少ない場合には流心は5割水深の位置に存在した。流量が多くなると、流心は次第に水面に近づき、6割～7割水深の位置に存在するようになった。またいずれのケースについても、等流速線は同心円状を描いて、外壁に近づくにつれて急激に減速する傾向にあった。

(3) 平均流速を、堰流量から逆算した場合（ V_w ）と、流速分布から逆算した場合（ V_d ）について検討した。その結果、本実験Ⅱ-1と本実験Ⅱ-5以外は、 $V_w < V_d$ となった。またこれらの方法で算出された平均流速は、その断面の最大流速（ V_{max} ）の80～85%の値になることが明らかとなった。

(4) 動水勾配は、管内水深の増加とともに急勾配となる傾向にあった。

5.4 1点流速測定法の検討

(1) 検討概要

本実験Ⅰと同様に、0.1割（0.1D）、0.2割（0.2D）、0.3割（0.3D）の3地点を測定候補地点とし、点流速補正係数 K_p についての検討を行った。

(2) 検討結果

実験Ⅰと同様に、0.1割（0.1D）、0.2割（0.2D）、0.3割（0.3D）の3地点を測定候補地点とし、点流速補正係数 K_p についての検討を行った。表-5.3に、各実験ケースの点補正係数一覧表を示す。

なお図-5.25は、 H/D と K_p の関係を示したものである。

表-5.3 点流速補正係数一覧表

実験ケース	平均流速 $V_m (=V_w)$	0.1D		0.2D		0.3D	
		V_p	K_p	V_p	K_p	V_p	K_p
本実験Ⅱ-1	27.3	31.8	0.86	33.4	0.82	—	—
本実験Ⅱ-2	37.4	39.9	0.94	43.9	0.85	43.0	0.87
本実験Ⅱ-3	44.6	49.7	0.90	53.5	0.83	56.0	0.80
本実験Ⅱ-4	52.9	56.6	0.93	59.7	0.89	63.4	0.83
本実験Ⅱ-5	68.3	64.7	1.06	69.1	0.99	73.6	0.93
本実験Ⅱ-6	66.4	70.0	0.95	78.0	0.85	80.7	0.82
本実験Ⅱ-7	71.5	74.6	0.96	81.5	0.88	85.9	0.83
本実験Ⅱ-8	110.4	124.8	0.88	133.0	0.83	138.5	0.80

※流速の単位はcm/s

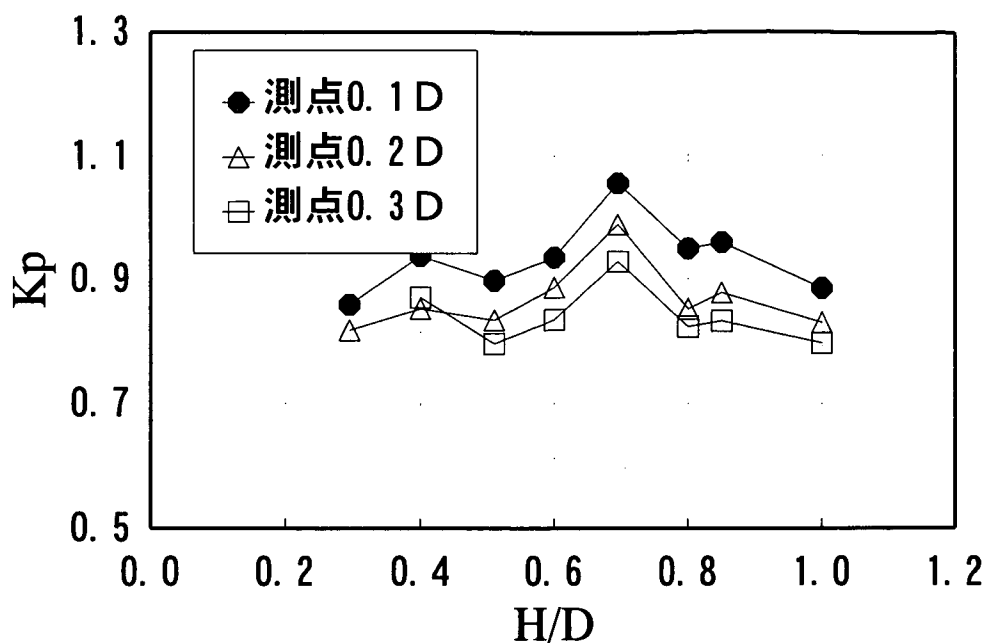


図-5.25 K_p と H/D の関係

図-5.25に、 K_p と H/D の関係を表したものを示す。測定地点が0.1Dの場合、 K_p は概ね0.85～1.10の値をとり、 $H/D=0.7$ 付近で K_p は極大値を得た。

測定地点が0.2Dの場合、 K_p は概ね0.80～1.00の値をとった。 K_p の変動傾向は、0.1Dの場合と酷似しており、 $H/D=0.7$ 付近において K_p は極大値を得た。

測定地点が0.3Dの場合、 K_p は概ね0.80～0.95の値をとった。この場合においても K_p は、 $H/D=0.7$ 付近で極大値を得た。

(3) まとめ

本実験Ⅱでは、水路勾配を1/1000として実験を行った。この結果、点流速補正係数 K_p は、値こそ測定地点毎に違うものの、同じような傾向になることが分かった。これは本実験Ⅰにも共通して言えることである。 K_p が、 $H/D=0.6\sim0.7$ で極大となるのは、 $H/D=0.6\sim0.7$ の場合に最も流下能力が高いことが起因していると考えられる。流下能力の向上は、流量の増加に繋がるが、この増加分は断面内流速に直接反映される。断面内流速が増加した場合、その増加割合は、摩擦の影響を受ける壁面近くよりも、管渠中心部の方が高い。よって測定した点流速は、比較的壁面に近いことから流速の増加割合が低く、その結果、点流速補正係数 K_p が突出したと考えられる。

第 6 章 本実験Ⅲ (水路勾配=3/1000)

第6章 本実験Ⅲ（水路勾配 3／1000）

本実験Ⅰ・Ⅱにおいて、点補正係数Kpの水深による変化傾向は、水路勾配に関わらず酷似する結果が得られた。そこで本実験Ⅲでは、水路勾配をさらに変化させ、水路勾配= 3／1 0 0 0とした場合の、流れの現象並びに、点流速補正係数について検討を行った。

6.1 実験ケースと実験条件

本実験は、水深（流量）を一定とする定流通水実験である。本実験Ⅲでは、水路勾配を3/1000、水深はケース毎に3割水深から満管まで2 cmピッチで変化させて実験を行った。表－ 6. 1 に実験ケース一覧表を示す。

表－ 6. 1 本実験Ⅲケース一覧表

ケース名	実験条件		測定項目
	設定勾配	設定水深	
本実験Ⅲ－ 1	3/1000	6 cm	流速・水深・流量・マノメータ・水温
本実験Ⅲ－ 2	3/1000	8 cm	〃
本実験Ⅲ－ 3	3/1000	1 0 cm	〃
本実験Ⅲ－ 4	3/1000	1 2 cm	〃
本実験Ⅲ－ 5	3/1000	1 4 cm	〃
本実験Ⅲ－ 6	3/1000	1 6 cm	〃
本実験Ⅲ－ 7	3/1000	2 0 cm	〃

実験における測定項目は、流速、管内水深、流量、マノメータ水位、流況観測、水温とした。

流速については、水深方向・横断方向にそれぞれ1～2 cmピッチで測定した。測定機器は、壁面の有無に関係なく流速の測定が可能なプロベラ式流速計を用いた。1 測点当たりの測定時間は1 分間とし、パソコンを通じて1 秒おきにデータを収集した。収集データは、BASICプログラムを用いて、平均化等の処理をした。また、流速データの平均値は、等流速線図（流速コンター図）として整理した。

管内水深は、ポイントゲージを用いて、実験開始時および実験終了時（実験が長時間におよぶ場合は中途に1 回）に測定した。

流量については、各測点の測定流速から流量を求めた際の比較値として、低水槽に設置してある三角堰を用いて、堰の越流水深から実流量（堰流量）を算出した。越流水深は、管内水深測定と同様に、ポイントゲージを用いて測定した。

粗度係数を得るには、動水勾配が必要となる。よって、アクリル管渠にマノメータを設置し、実験開始時と実験終了時の2 回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1 回）マノメータ水位を読み、その値を整理し動水勾配とした。なお本実験Ⅱより、流速測定孔直下にもマノメータを加え、マノメータ数を計12本とした。

流況観測は、主流及び編流、渦、波動等の様子や位置について把握するために行った。実験では、流れの形態が視覚的に把握できるように、染料及びポリスチレン微粒子を高水槽から流した。

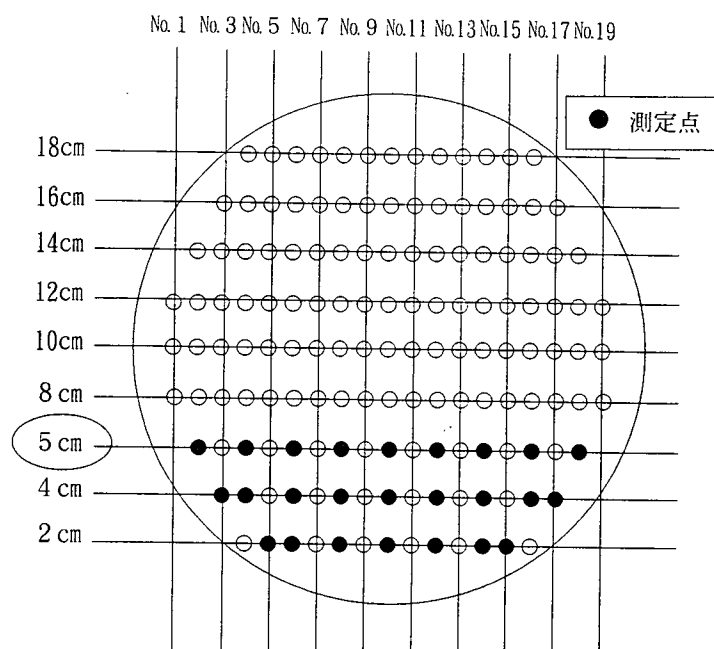
水温は、管渠最下流に設置してある水槽で実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）計測を行った。

6.2 実験結果

(1) 本実験Ⅲ－1

本実験ケースでは、管路勾配を3/1000、通水時設定水深を6 cm（通水中平均水深＝6.0 cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－6.1の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・5 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で25点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－6.2に示す。



図－6.1 流速測点位置図（本実験Ⅲ－1）

最大流速発生位置は測線No.8～12の水深4～5 cm付近であり、最大流速 $V_{max}=63.4 \text{ cm/s}$ を得た。また等流速線は、外側へ向かうに従って減速する傾向にあり、左右を比較するとほぼ対称となる結果を得た。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=3878.7 (\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=4209.9 (\text{cm}^3/\text{s})$ となった。

動水勾配の測定結果を図－6.3に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約2.8/1000（マノメータNo.4～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0114$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0105$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、その平均は20.2℃（1回目20.1℃、2回目20.3℃）であった。

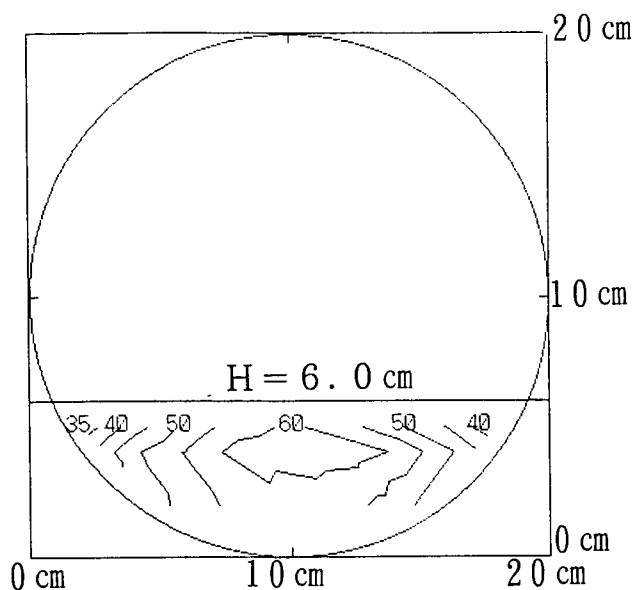


図-6.2 等流速線図（本実験Ⅲ-1）

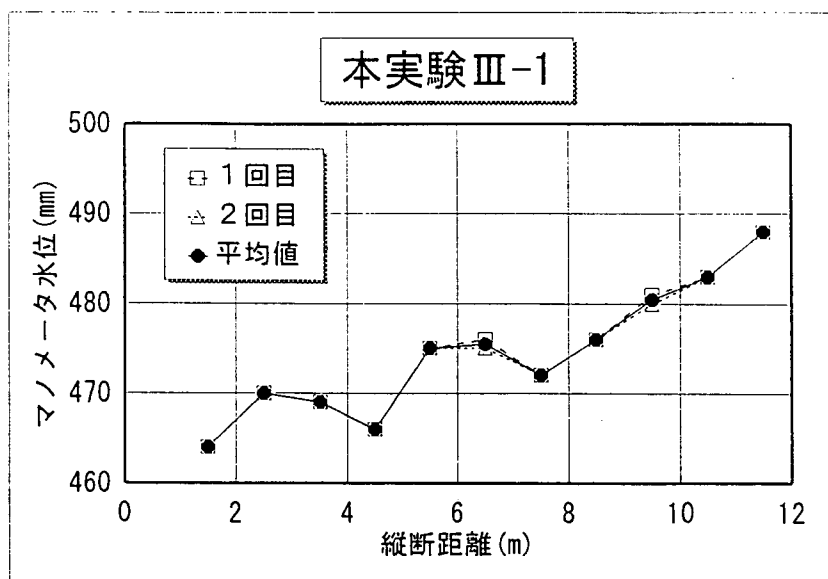


図-6.3 マノメータ測定結果（本実験Ⅲ-1）

（2）本実験Ⅲ-2

本実験ケースでは、管路勾配を3/1000、通水時設定水深を8 cm（通水中平均水深＝8.0 cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-6.4の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・6 cm・7 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で34点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-6.5に示す。

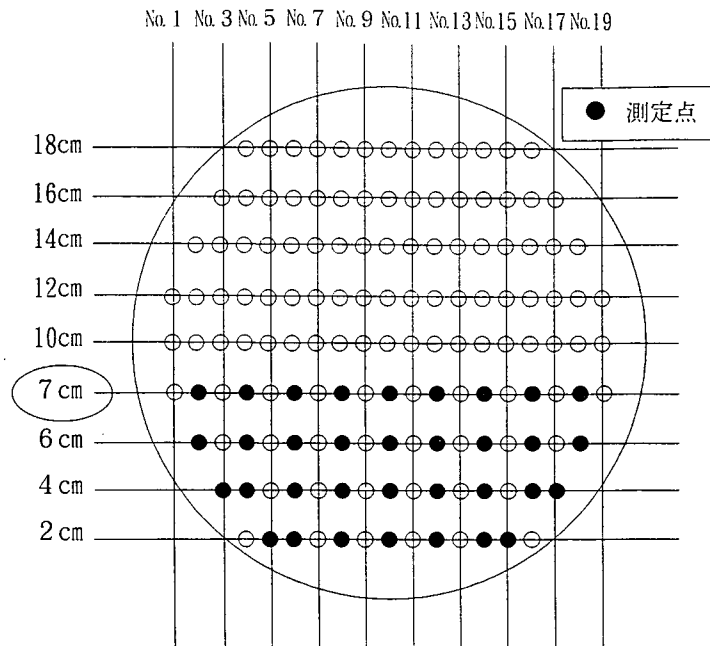


図-6.4 流速測点位置図(本実験Ⅲ-2)

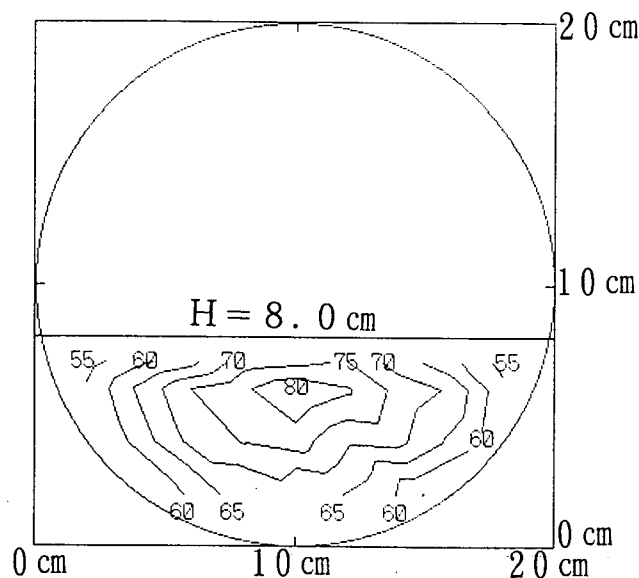


図-6.5 等流速線図(本実験Ⅲ-2)

最大流速発生位置は、測線No.8～12の水深6～7 cm付近で、最大流速 $V_{\max}=84.5\text{cm/s}$ であった。等流速線は、左右にほぼ対称であり、横長の楕円形を描くように、外壁へ近づくに連れて減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果(堰流量)は、 $Q_w=7449.0(\text{l/s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=7823.9(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。

動水勾配の測定結果を図-6.6に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約2.6/1000(マノメータNo.4～10)となった。

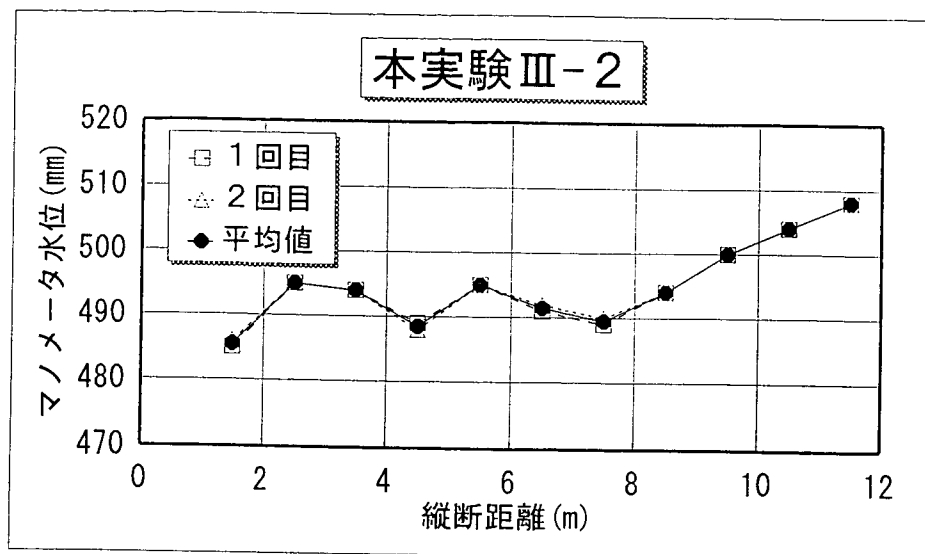


図-6.6 マノメータ測定結果（本実験Ⅲ-2）

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0098$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0094$ となった。

水温は実験開始時及び終了時の2回測定し、その平均は 20.1°C （1回目 20.0°C 、2回目 20.2°C ）であった。

（3）本実験Ⅲ-3

本実験ケースでは、管路勾配を3/1000、通水時設定水深を10cm（通水中平均水深 $=9.91\text{cm}$ ）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-6.7の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・9cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で43点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-6.8に示す。

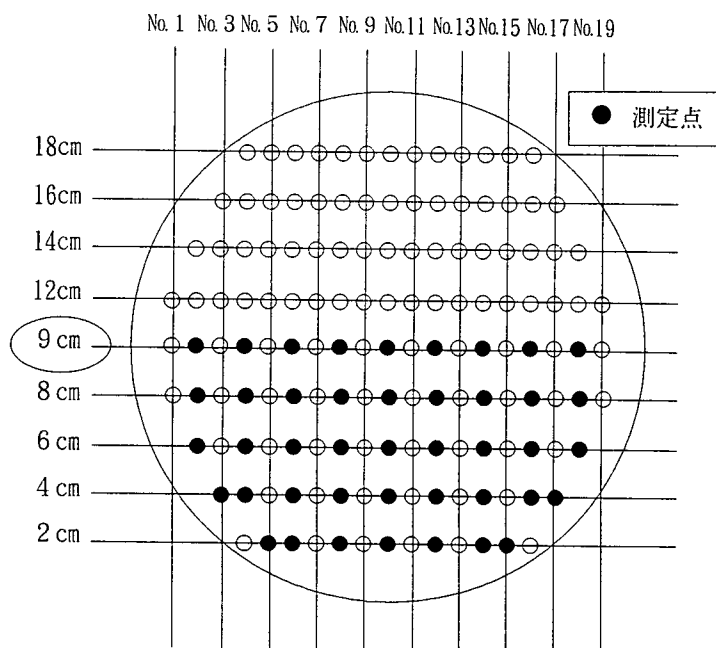


図-6.7 流速測点位置図（本実験Ⅲ-3）

最大流速発生位置は、測線No 8～12の水深5～7 cm付近であり、最大流速 V_{max} は95.9 cm/sであった。等流速線は、左右にほぼ対称であり、横長の楕円形を描くように、外壁へ近づくに連れ減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=11226.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=12026.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-6.9に示す。データの凹凸が激しく、場所によっては逆勾配が発生していた。これは背水の影響を受けていると考えられるが、ここではほぼ平均な値として動水勾配を約1.8/1000とした。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0079$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0074$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時に測定し、その平均は20.1℃（1回目20.2℃、2回目20.0℃）であった。

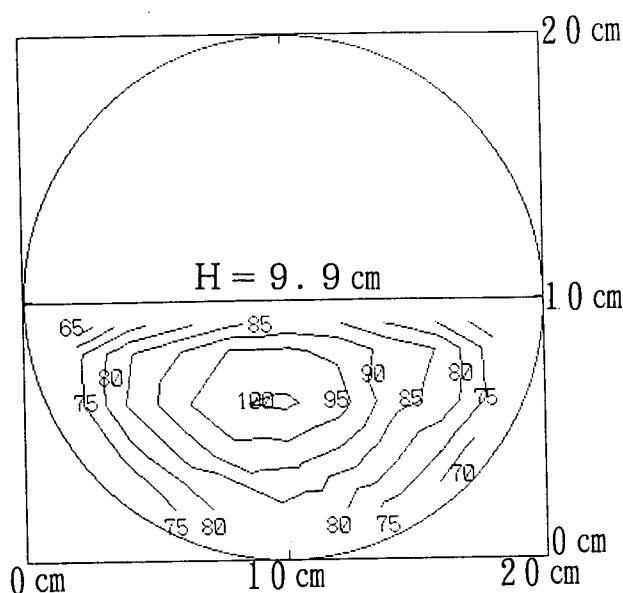


図-6.8 等流速線図（本実験Ⅲ-3）

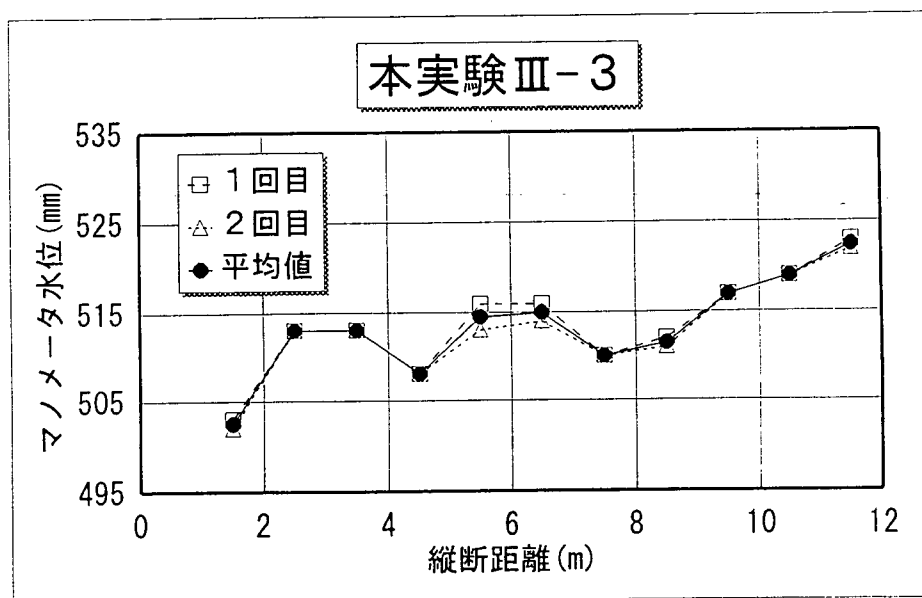
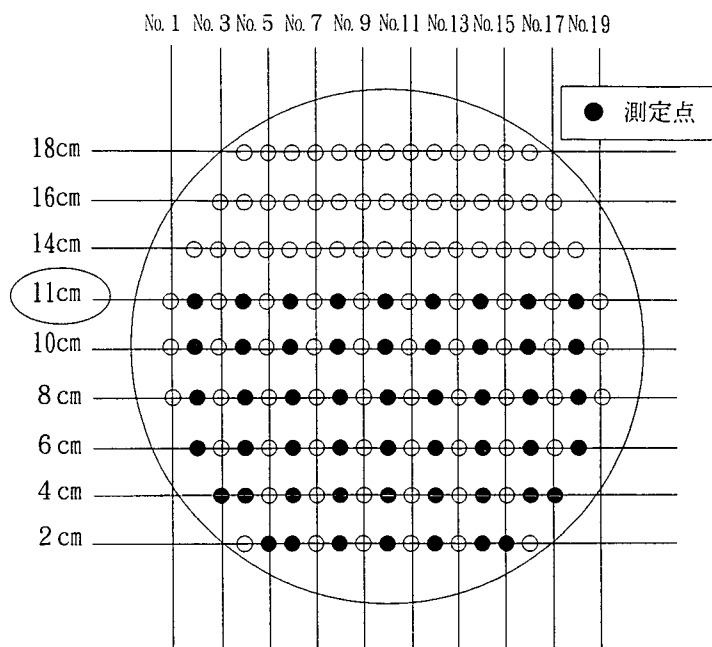


図-6.9 マノメータ測定結果（本実験Ⅲ-3）

(4) 本実験Ⅲ－4

本実験ケースでは、管路勾配を3/1000、通水時設定水深を12cm（通水中平均水深＝12.42cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－6.10の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・11cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で52点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－6.11に示す。



図－6.10 流速測点位置図（本実験Ⅲ－4）

最大流速発生位置は、測線No.8～10の水深8～10cm付近であり、最大流速 V_{max} は96.2cm/sであった。流心は、管渠中央から左側に偏って存在している。また等流速線は、横長の楕円形を描くように、外壁へ近づくに連れ減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=15273.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=15909.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より若干大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図－6.11に示す。流速測定孔の上下流で、水位が大きく変動しているのが分かる。これは背水の影響を受けていると考えられ、これらのデータを除くと動水勾配は約0.6/1000とフラットに近い値となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0048$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0046$ となった。これらの粗度係数は非常に小さい値であるが、これは言うまでもなく測定した動水勾配が非常にフラットであったことが起因する。仮に、動水勾配として水路勾配3/1000を与えると、粗度係数は堰流量逆算時には $n=0.011$ 、流速分布逆算時には $n=0.010$ となる。

水温は、実験開始時及び終了時に測定し、その平均は16.0℃（1回目16.1℃、2回目15.9℃）であった。

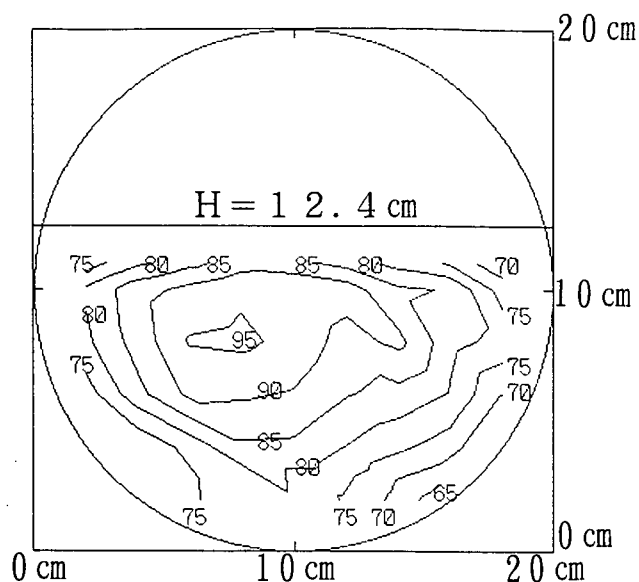


図-6.11 等流速線図 (本実験Ⅲ-4)

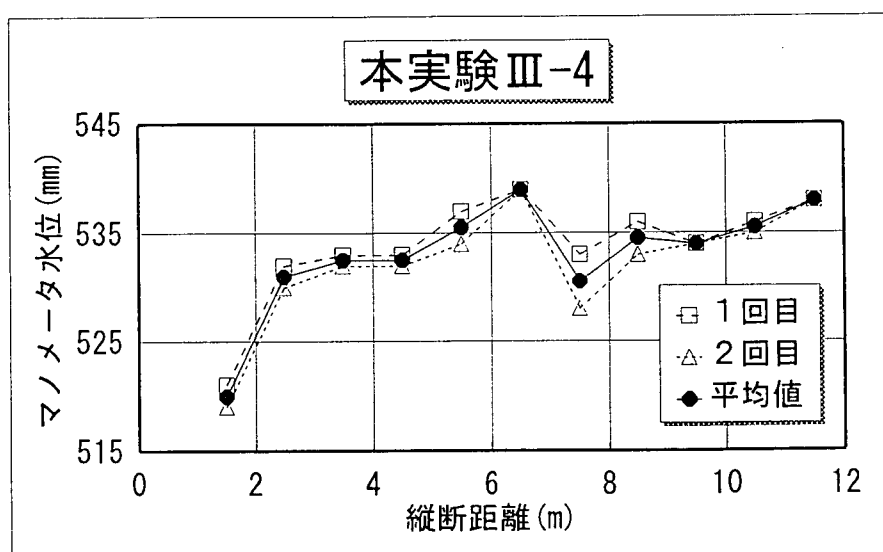


図-6.12 マノメータ測定結果 (本実験Ⅲ-4)

(5) 本実験Ⅲ-5

本実験ケースでは、管路勾配を3/1000、通水時設定水深を14cm (通水中平均水深=13.71cm) として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-6.13の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1~2cmとした。なお測点数は全部で60点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-6.14に示す。

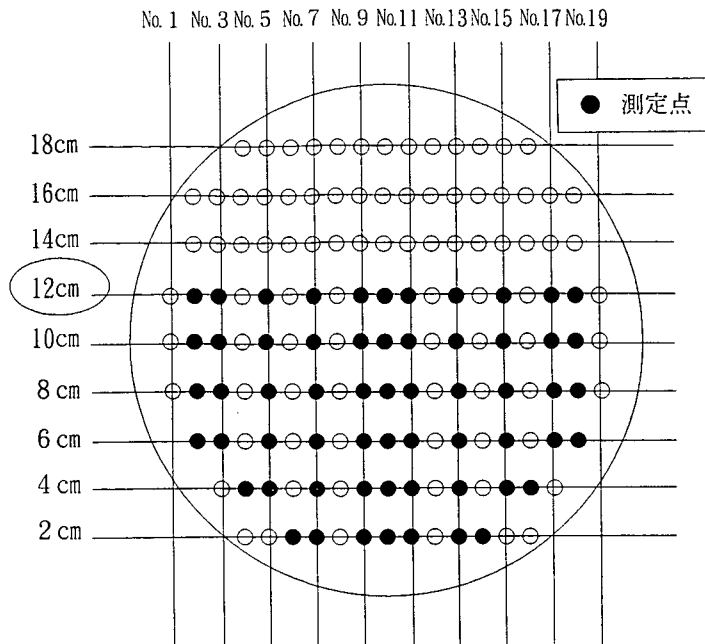


図-6.13 流速測点位置図（本実験Ⅲ-5）

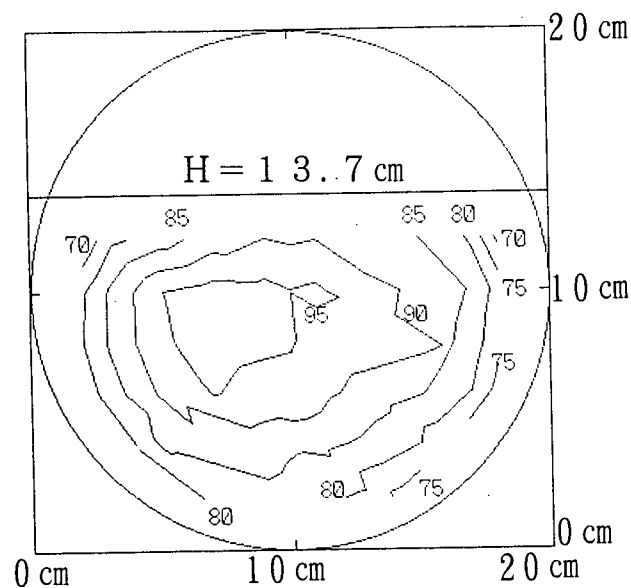


図-6.14 等流速線図（本実験Ⅲ-5）

最大流速発生位置は、測線No.8～10の水深9～10cm付近であり、最大流速 V_{max} は96.7cm/sであった。流心は、管渠中央から左側に偏って存在している。また等流速線は、横長の楕円形を描くように、外壁へ近づくに連れ減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=18338.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=19468.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より若干大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-6.15に示す。マノメータNo.8から上流、及び最下流となるマノメータNo.1付

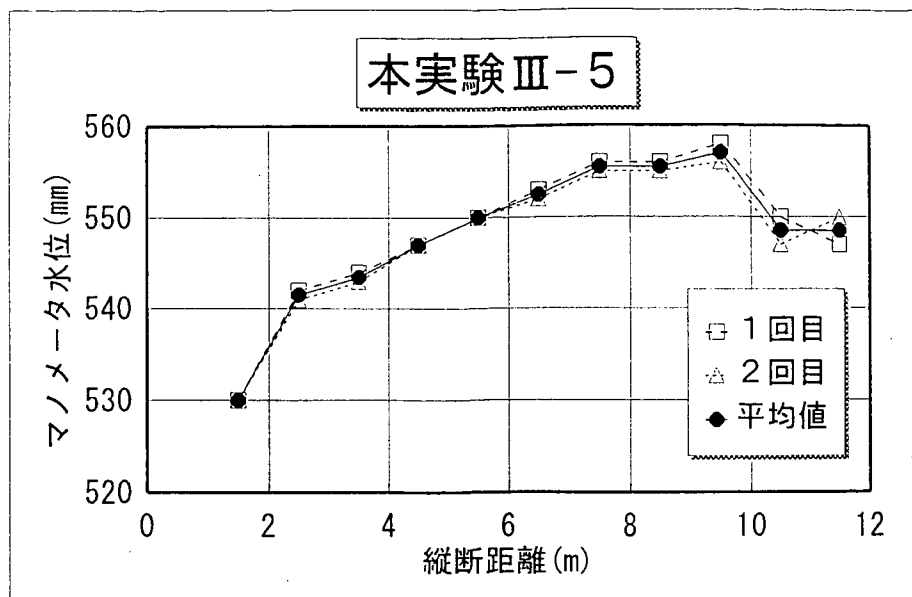


図-6.15 マノメータ測定結果（本実験Ⅲ-5）

近で、水位が大きく変動している。これは背水等の影響を受けていると考えられ、これらのデータを除くと動水勾配は約2.2/1000となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0089$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0084$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時に測定し、2回とも 9.8°C であった。

（6）本実験Ⅲ-6

本実験ケースでは、管路勾配を3/1000、通水時設定水深を16cm（通水中平均水深=16.1cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-6.16の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・15cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で70点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-6.17に示す。

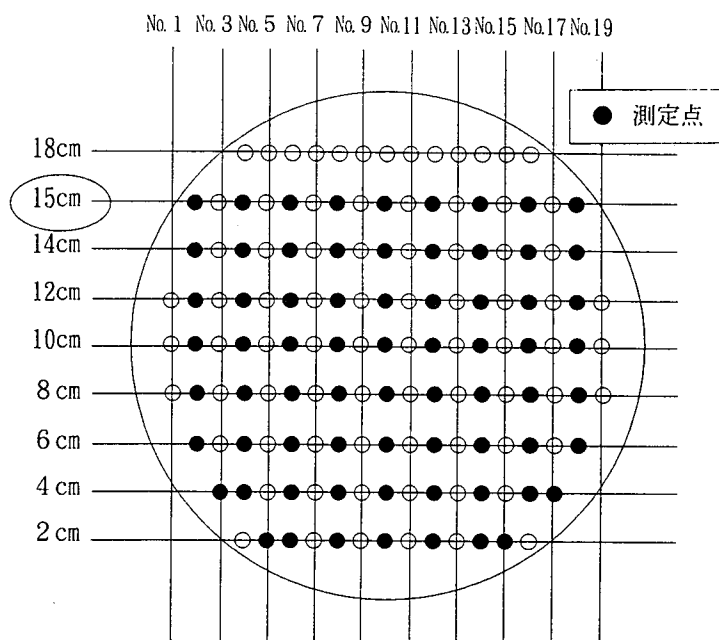


図-6.16 流速測点位置図（本実験Ⅲ-6）

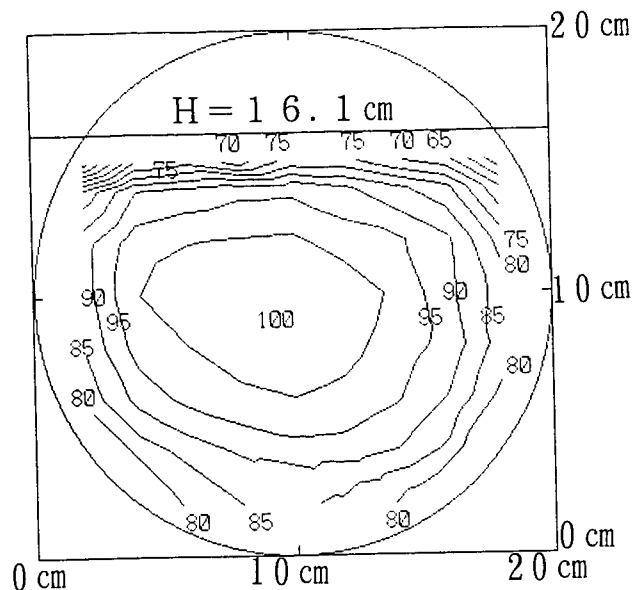


図-6.17 等流速線図 (本実験Ⅲ-6)

最大流速発生位置は、測線No.8～12の水深9～11cm付近であり、最大流速 V_{max} は104.2cm/sであった。流心は、管渠中央から左側に偏って存在している。また等流速線は、ほぼ円形に近い形を描くように、外壁へ近づくに連れ減速する傾向にあった。とくに水表面では、流速が急激に減速した。

低水槽での流量測定結果(堰流量)は、 $Q_w=23114.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=23991.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より若干大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-6.18に示す。背水や管路流入口の損失等の影響を受けていると考えられる、マノメータNo.9から上流、及び最下流となるマノメータNo.1付近のデータを除くと、動水勾配は約3.8/1000となった。

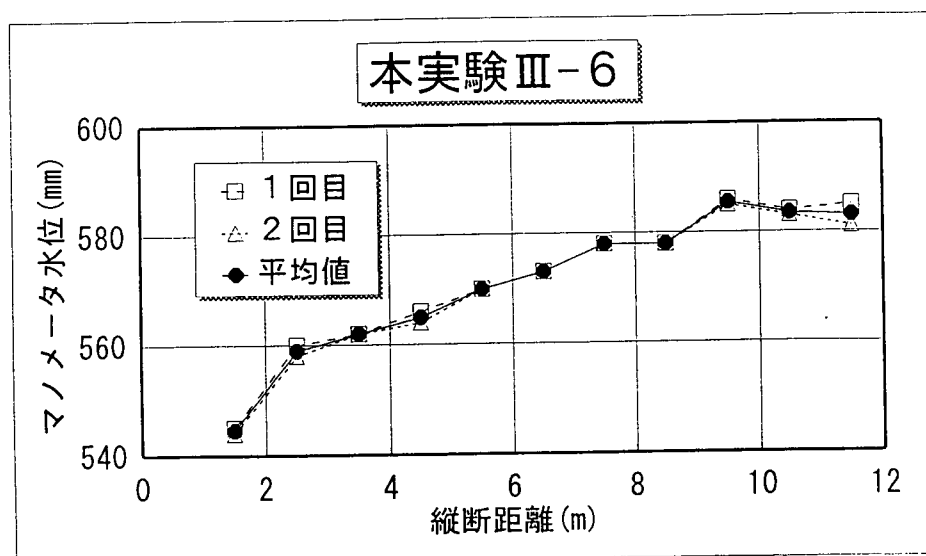


図-6.18 マノメータ測定結果 (本実験Ⅲ-6)

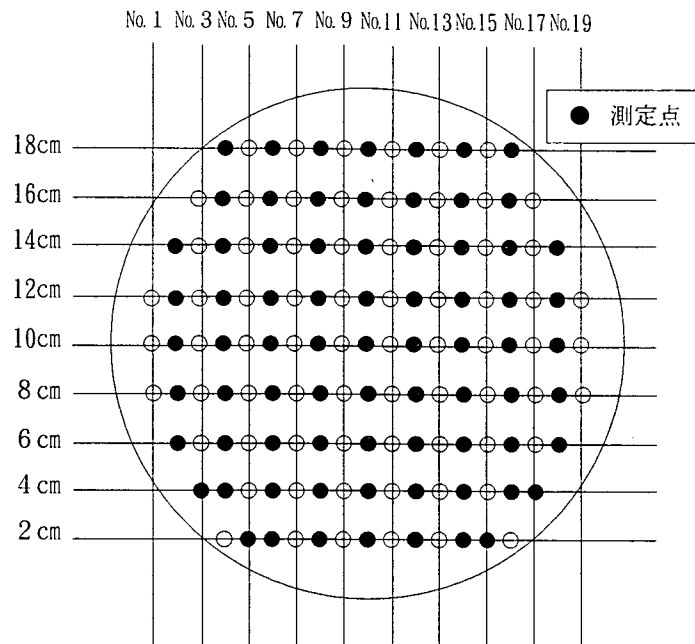
次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0112$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0108$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時に測定し、2回とも 9.7°C であった。

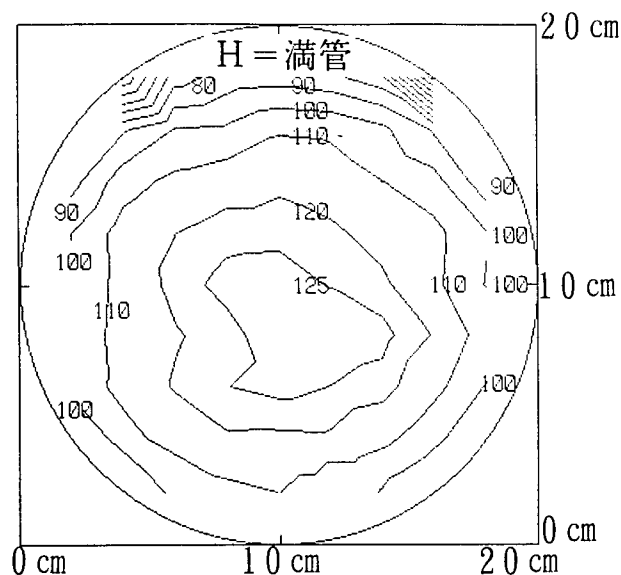
(7) 本実験Ⅲ－7

本実験ケースでは、管路勾配を $3/1000$ 、通水時設定水深を 20cm （満管）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－6.19の測点位置図に示すように、 $2\text{cm} \cdot 4\text{cm} \cdot 6\text{cm} \cdot 8\text{cm} \cdot 10\text{cm} \cdot 12\text{cm} \cdot 14\text{cm} \cdot 16\text{cm} \cdot 18\text{cm}$ の各水深で行い、横断方向の測定ピッチを $1 \sim 2\text{cm}$ とした。なお測点数は全部で75点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－6.20に示す。



図－6.19 流速測点位置図（本実験Ⅲ－7）



図－6.20 等流速線図（本実験Ⅲ－7）

最大流速発生位置は、測線No.9～11の水深8～10cm付近であり、最大流速 V_{max} は128.9cm/sであった。流心は、ほぼ管渠中心に存在し、等流速線は円形に近い形を描くように、外壁へ近づくに連れ減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=31667.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=33634.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より若干大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-6.21に示す。背水や管路流入口の損失等の影響を受けていると考えられる、管路最上流のマノメータNo.11、及び最下流となるマノメータNo.1付近のデータを除くと、動水勾配は約5.7/1000となった。

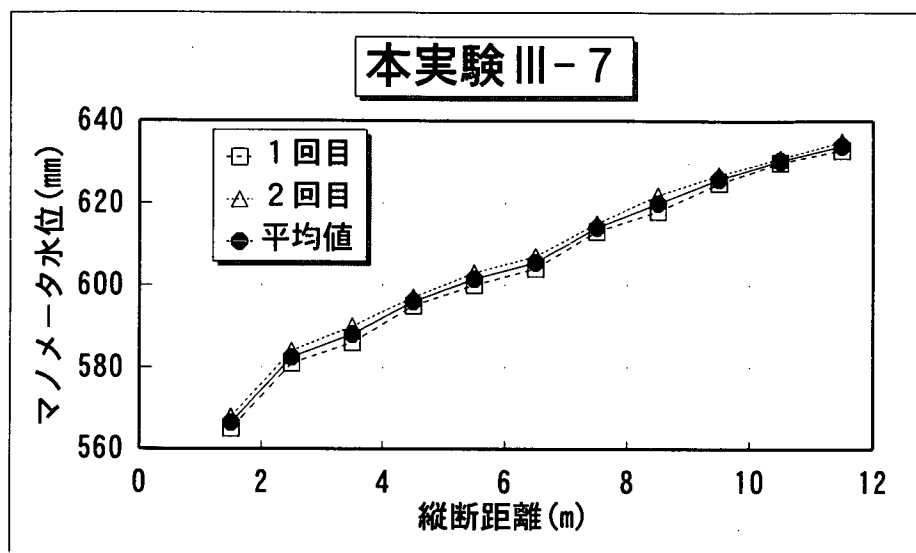


図-6.21 マノメータ測定結果（本実験Ⅲ-7）

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0104$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0098$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時に測定し、2回とも9.2℃であった。

6.3 まとめ

表-6.2に、実験結果の一覧表を示す。

(1) 粗度係数は、本実験Ⅲ-4を除けば、概ね0.008～0.011の範囲内であった。この値は、アクリルの粗度係数として一般的に知られる値とほぼ一致する。

(2) 流速分布は、流量（水位）の違いに関わらず、ほぼ同様の形態を示した。最大流速の発生地点を流心とすると、流心は5割～7割水深の位置に常に存在した。また、いずれのケースについても、等流速線は外壁へ近づくにつれて急激に減速する傾向にあり、横長の楕円形状を示した。

(3) 水路勾配が急になったことで、管内水深が管径の約1/2以上のときに、管路内の流れに射流が発生した。

(4) 動水勾配は、流量が大きいと、上下流にかけて非常に安定した均一勾配が見られたが、流量が少ないと、データにばらつきがあった。特に、流量測定孔付近でデータが突出することが多く、粗度係数などを算出するにあたり、動水勾配の設定が困難であった。

表－6.2 実験結果一覧表（水路勾配 $I = 3/1000$ ）

実験ケース	管内水深 cm	動水勾配	堰流量からの算出			流速分布からの算出		
			堰流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数	計算流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数
本実験Ⅲ-1	6.0	2.8/1000	3878.7	48.9	0.0114	4209.9	53.1	0.0105
本実験Ⅲ-2	8.0	2.6/1000	7449.0	63.5	0.0098	7823.9	66.7	0.0094
本実験Ⅲ-3	9.0	1.8/1000	11226.0	72.3	0.0079	12026.0	77.4	0.0074
本実験Ⅲ-4	12.4	0.6/1000	15273.0	74.5	0.0048	15909.0	77.6	0.0046
本実験Ⅲ-5	13.7	2.2/1000	18338.0	79.9	0.0089	19468.0	84.8	0.0084
本実験Ⅲ-6	16.1	3.8/1000	23114.0	79.9	0.0112	23991.0	84.8	0.0108
本実験Ⅲ-7	満管	5.7/1000	31667.2	100.8	0.0104	33634.0	107.1	0.0098

6.4 1点流速測定法の検討

(1) 検討概要

本実験Ⅰと同様に、0.1割（0.1D）、0.2割（0.2D）、0.3割（0.3D）の3地点を測定候補地点とし、点流速補正係数 K_p についての検討を行った。

(2) 検討結果

表－6.3に、各実験ケースの点補正係数一覧表を示す。なお、図－6.22は、 H/D と K_p の関係を示したものである。

測定地点が0.1Dの場合、 K_p は概ね0.83～1.00の値をとった。 K_p の変動傾向を見ると、本実験Ⅰ・Ⅱでは、水深比（ H/D ）が0.6～0.7の場合に K_p が極大となる傾向であったものが、本実験Ⅲでは明確な極大値を得ることがなかった。

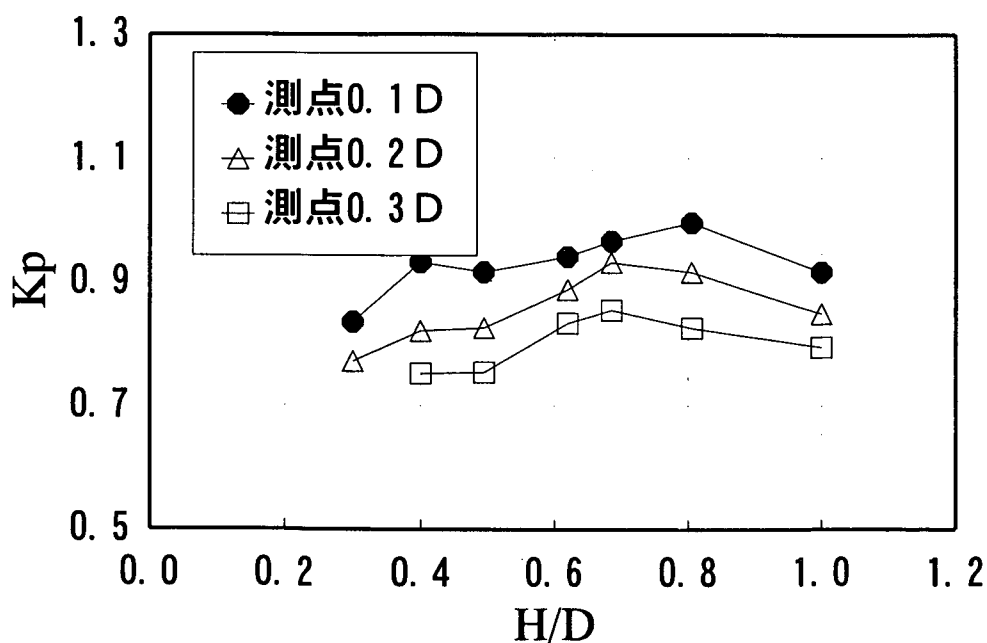
測定地点が0.2Dの場合、 K_p は概ね0.77～0.93の値をとった。 K_p の変動傾向を見ると、 K_p は水深比（ H/D ）が0.6を越える辺りから増加傾向にあるが、本実験Ⅰ・Ⅱに見られるような顕著な増加傾向は見られなかった。

測定地点が0.3Dの場合、 K_p は概ね0.75～0.85の値をとった。 K_p 測定地点0.1D・0.2Dの場合と同様に、 K_p の変動傾向は、極端な変化は見られなかった。

表-6.3 点流速補正係数一覧表

実験ケース	平均流速 $V_m (=V_w)$	0.1D		0.2D		0.3D	
		V_p	K_p	V_p	K_p	V_p	K_p
本実験Ⅲ-1	48.9	58.6	0.83	63.4	0.77	—	—
本実験Ⅲ-2	63.5	68.2	0.93	77.4	0.82	84.5	0.75
本実験Ⅲ-3	72.3	79.0	0.92	87.6	0.83	95.9	0.75
本実験Ⅲ-4	74.5	79.3	0.94	84.0	0.89	89.5	0.83
本実験Ⅲ-5	79.9	82.8	0.96	85.9	0.93	93.6	0.85
本実験Ⅲ-6	85.4	85.8	1.00	93.3	0.92	103.5	0.83
本実験Ⅲ-7	100.8	110.1	0.92	118.8	0.85	126.9	0.79

※流速の単位はcm/s

図-6.22 K_p と H/D の関係

(3) まとめ

本実験Ⅲでは、水路勾配を3/1000として実験を行った。点流速補正係数 K_p は、本実験Ⅰ・Ⅱで見られた特徴的な変動こそ見られなかったが、 H/D の増加とともに点補正係数 K_p が増加し、 $H/D > 0.7 \sim 0.8$ になると K_p が減少し始める傾向は類似するものであった。

第 7 章 本実験Ⅳ (水路勾配=5/1000)

第7章 本実験Ⅳ（水路勾配5／1000）

本実験Ⅰ・Ⅱ・Ⅲにおいて、点補正係数 K_p の水深による変化傾向は、水路勾配に関わらず酷似する結果が得られた。そこで本実験Ⅳでは、さらに水路勾配を大きく変化させ、水路勾配＝5／1000とした場合の、流れの現象並びに、点流速補正係数について検討を行った。

7.1 実験ケースと実験条件

本実験は、水深（流量）を一定とする定流通水実験である。本実験Ⅳでは、水路勾配を5/1000、水深はケース毎に3割水深から満管まで2cmピッチで変化させて実験を行った。表－7.1に実験ケース一覧表を示す。

表－7.1 本実験Ⅳケース一覧表

ケース名	実験条件		測定項目
	設定勾配	設定水深	
本実験Ⅳ－1	5/1000	6 cm	流速・水深・流量・マノメータ・水温
本実験Ⅳ－2	5/1000	8 cm	〃
本実験Ⅳ－3	5/1000	10 cm	〃
本実験Ⅳ－4	5/1000	12 cm	〃
本実験Ⅳ－5	5/1000	14 cm	〃
本実験Ⅳ－6	5/1000	満管	〃

実験における測定項目は、流速、管内水深、流量、マノメータ水位、流況観測、水温とした。

流速については、水深方向・横断方向にそれぞれ1～2cmピッチで測定した。測定機器は、壁面の有無に関係なく流速の測定が可能なプロペラ式流速計を用いた。1測点当たりの測定時間は1分間とし、パソコンを通じて1秒おきにデータを収集した。収集データは、BASICプログラムを用いて、平均化等の処理をした。また、流速データの平均値は、等流速線図（流速コンター図）として整理した。

管内水深は、ポイントゲージを用いて、実験開始時および実験終了時（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）に測定した。

流量については、各測点の測定流速から流量を求めた際の比較値として、低水槽に設置してある三角堰を用いて、堰の越流水深から実流量（堰流量）を算出した。越流水深は、管内水深測定と同様に、ポイントゲージを用いて測定した。

粗度係数を得るには、動水勾配が必要となってくる。よって、アクリル管渠にマノメータを設置し、実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）マノメータ水位を読み、その値を整理し動水勾配とした。なお本実験Ⅱより、流速測定孔直下にもマノメータを加え、マノメータ数を計12本とした。

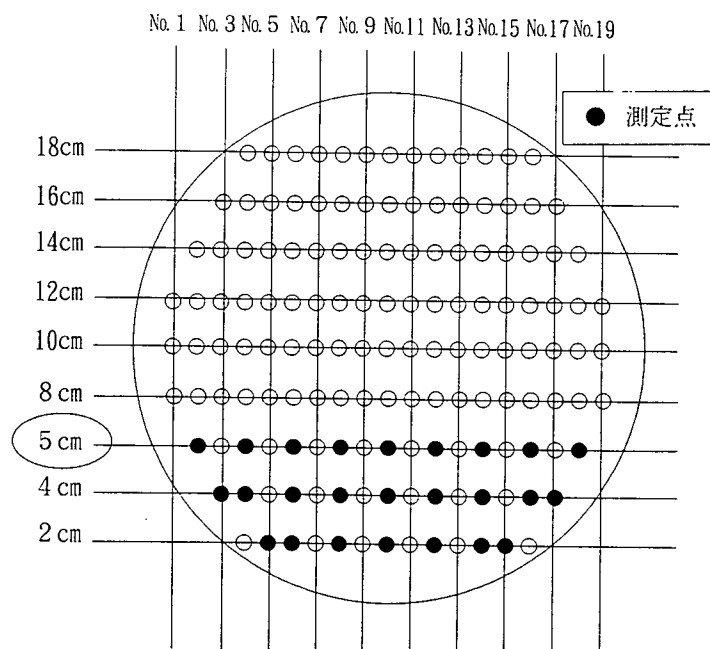
水温は、管渠最下流に設置してある水槽で実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）計測を行った。

7.2 実験結果

（1）本実験Ⅳ－1

本実験ケースでは、管路勾配を5/1000、通水時設定水深を6 cm（通水中平均水深＝6.0 cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－7.1の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・5 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で25点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－7.2に示す。



図－7.1 流速測点位置図（本実験Ⅳ－1）

最大流速発生位置は測線No.8～12の水深4 cm付近であり、最大流速 $V_{max}=105.0\text{ cm/s}$ を得た。この地点は、管渠口径の1/4割水深位置に当たる。また等流速線は、外側へ向かうに従って減速する傾向にあり、左右を比較するとほぼ対称となる結果を得た。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=6592.4\text{ (cm}^3/\text{s)}$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=7199.4\text{ (cm}^3/\text{s)}$ となった。

動水勾配の測定結果を図－7.3に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約5.4/1000（マノメータNo.3～10）となる。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0092$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0085$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、その平均は 24.1°C （1回目 24.0°C 、2回目 24.2°C ）であった。

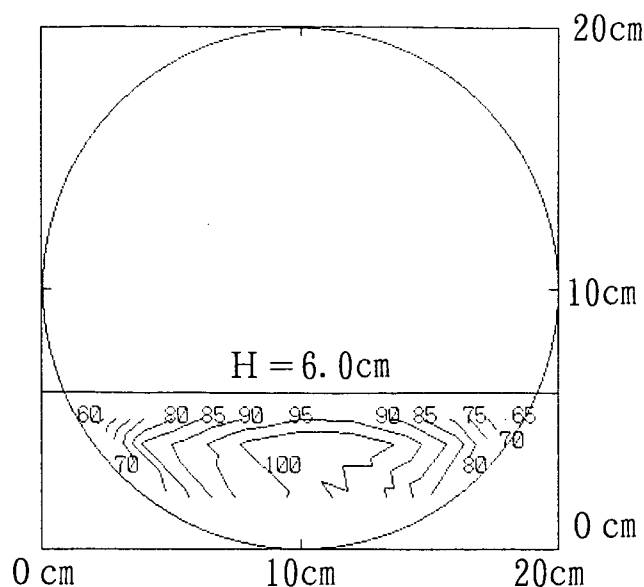


図-7.2 等流速線図 (本実験Ⅳ-1)

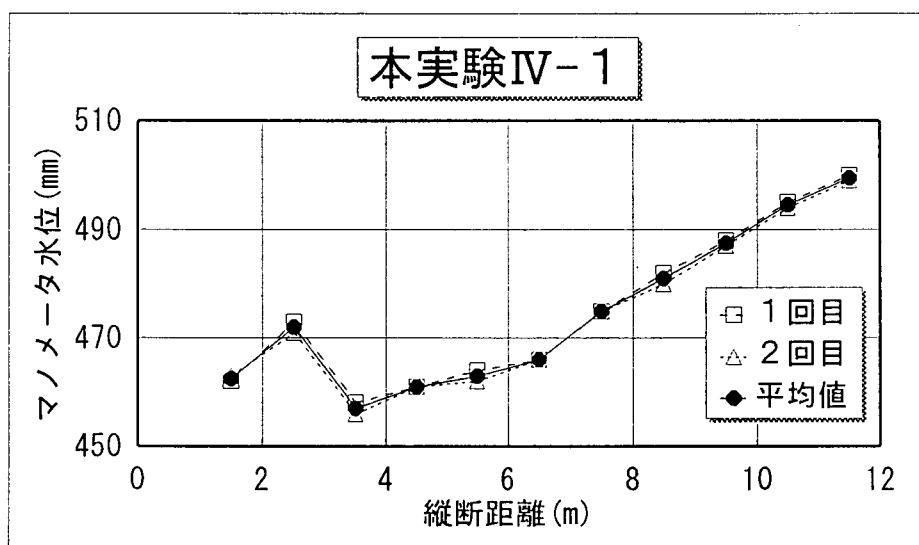


図-7.3 マノメータ測定結果 (本実験Ⅳ-1)

(2) 本実験Ⅳ-2

本実験ケースでは、管路勾配を5/1000、通水時設定水深を8 cm (通水中平均水深=8.0 cm) として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-7.4の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・6 cm・7 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で33点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-7.5に示す。

最大流速発生位置は、測線No.8～12の水深4～6 cm付近であり、本実験Ⅱの同水深の場合と比較すると水表面近くに存在した。なお最大流速 V_{max} は120.6 cm/sであった。

低水槽での流量測定結果 (堰流量) は、 $Q_w=11380.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほ

ば一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=12414.0$ (cm^3/s)となった。

動水勾配の測定結果を図-7.6に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約5.4/1000 (マノメータNo.3~10)となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0092$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0085$ を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、その平均は 24.2°C (1回目 24.2°C 、2回目 24.1°C)であった。

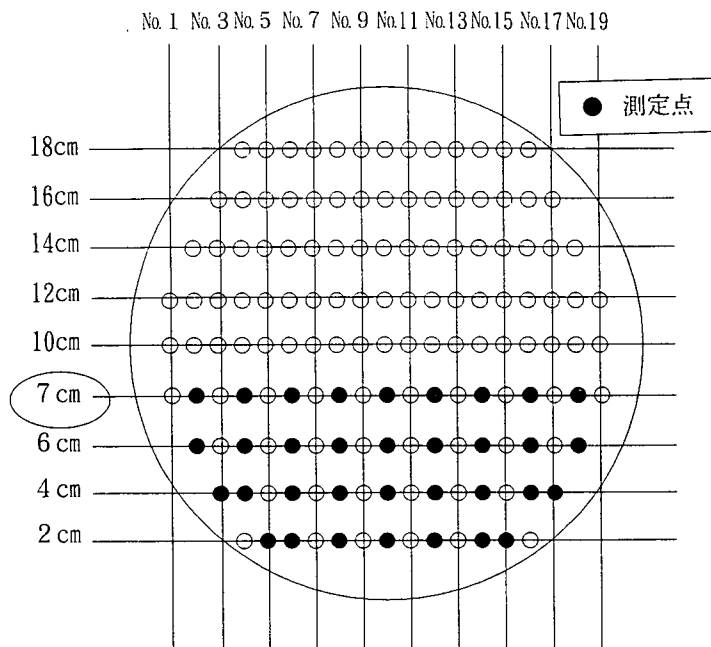


図-7.4 流速測点位置図 (本実験Ⅳ-2)

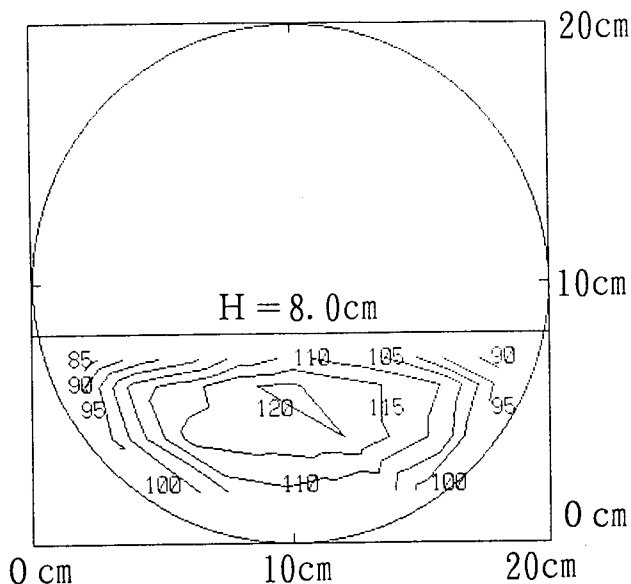


図-7.5 等流速線図 (本実験Ⅳ-2)

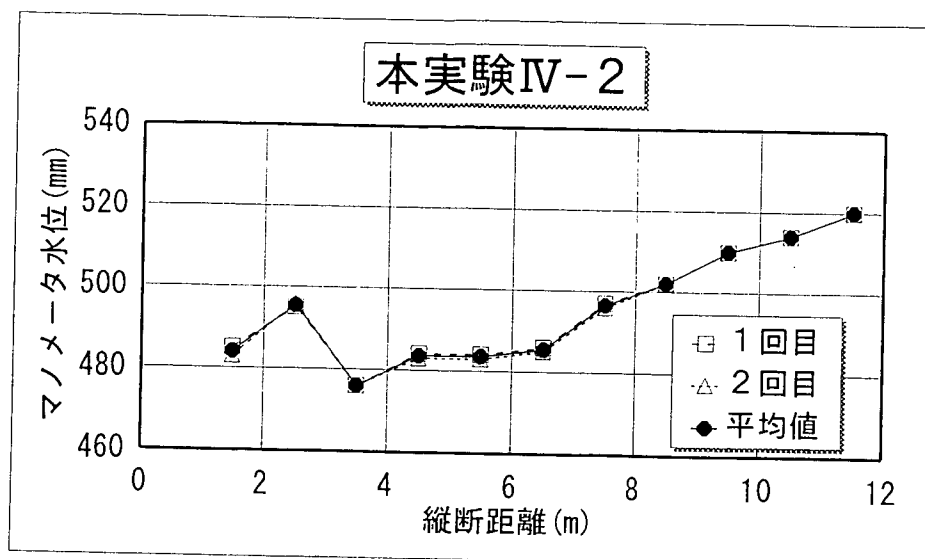


図-7.6 マノメータ測定結果（本実験Ⅳ-2）

(3) 本実験Ⅳ-3

本実験ケースでは、管路勾配を5/1000、通水時設定水深を10cm（通水中平均水深=10.0cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-7.7の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・9cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で43点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-7.8に示す。

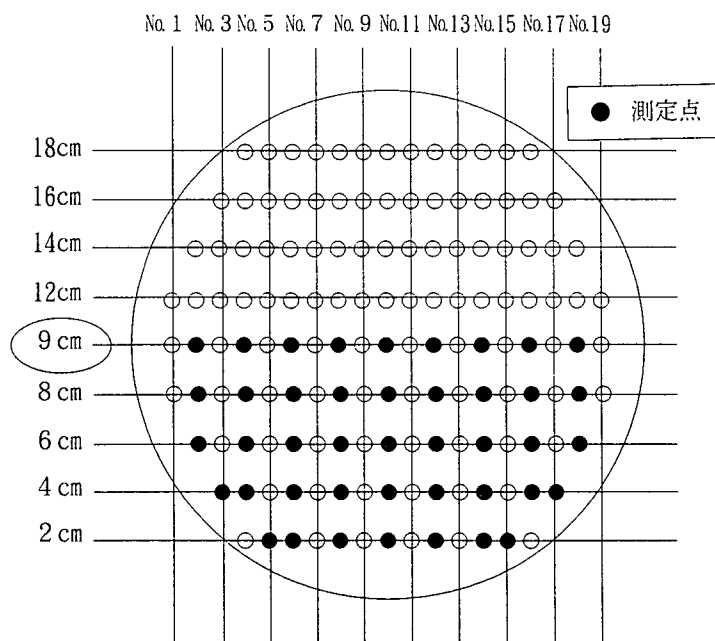


図-7.7 流速測点位置図（本実験Ⅳ-3）

最大流速発生位置は、測線No.10～12の水深6cm付近であり、本実験Ⅱの同水深の場合と同様に、管渠中心から若干右にずれた位置に存在した。最大流速 V_{max} は、136.0cm/sであった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=17498.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v=18950.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-7.9に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約5.3/1000（マノメータNo.4～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0089$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0082$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時に測定し、2回とも24.1℃であった。

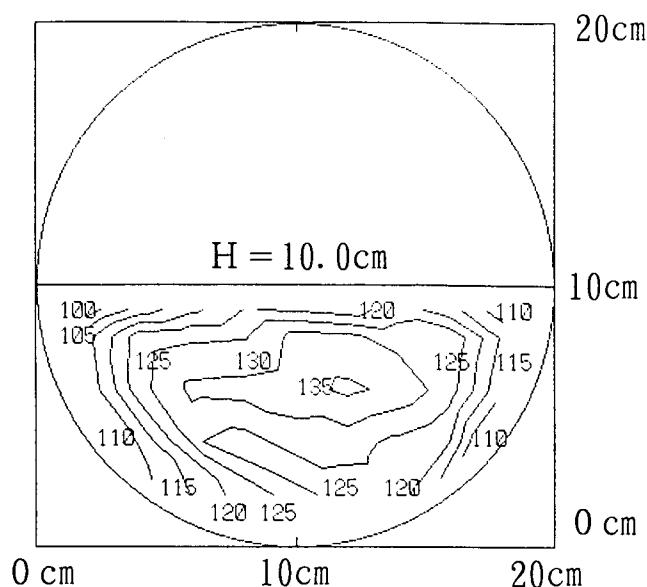


図-7.8 等流速線図（本実験Ⅳ-3）

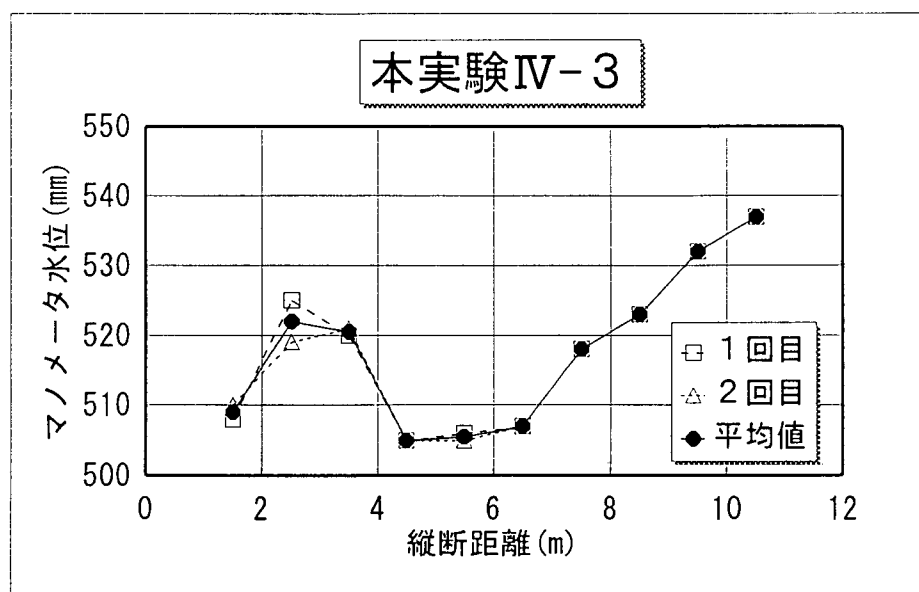


図-7.9 マノメータ測定結果（本実験Ⅳ-3）

(4) 本実験Ⅳ-4

本実験ケースでは、管路勾配を5/1000、通水時設定水深を12cm（通水中平均水深=12.0cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-7.10の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・11cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で52点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-7.11に示す。

最大流速発生位置は、測線No.10~12の水深8 cm付近であり、流心は横に長い楕円状に存在した。なお最大流速は $V_{max}=145.0\text{cm/s}$ であった。また等流速線は、最大流速発生位置を中心とし、外壁に向かって急激に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=22380.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=24428.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図-7.12に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約 $3.7/1000$ （マノメータ水位No.6~10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0098$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0088$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均水温は 24.2°C であった。

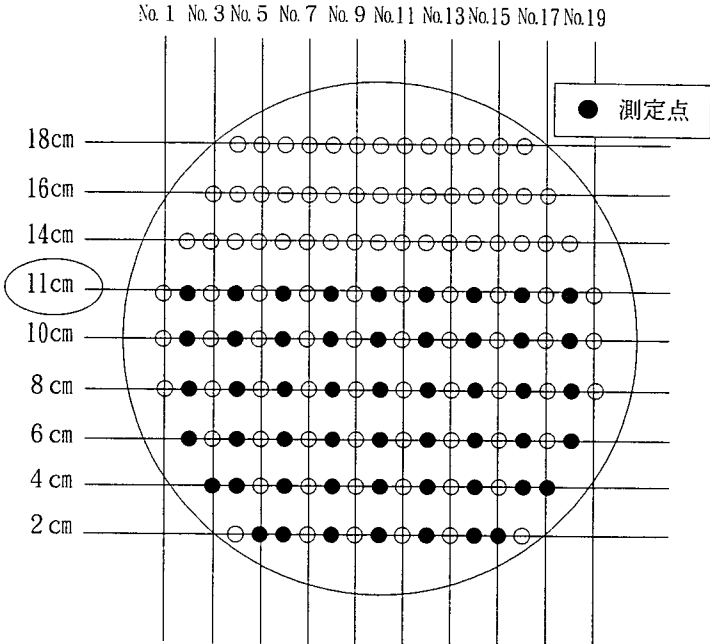


図-7.10 流速測点位置図（本実験Ⅳ-4）

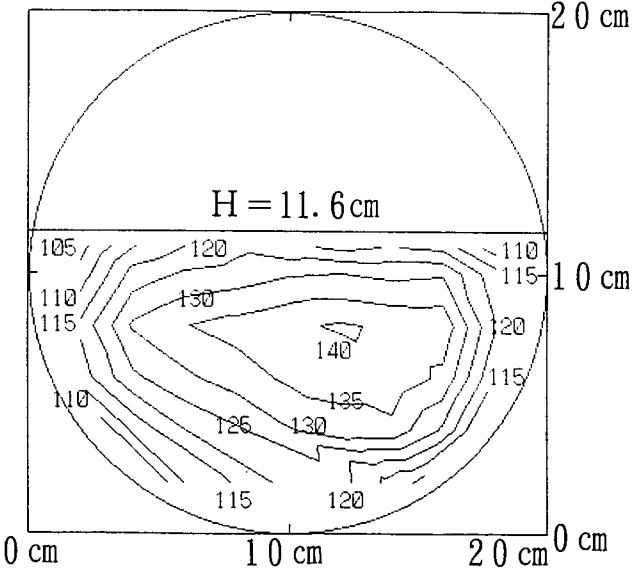


図-7.11 等流速線図（本実験Ⅳ-4）

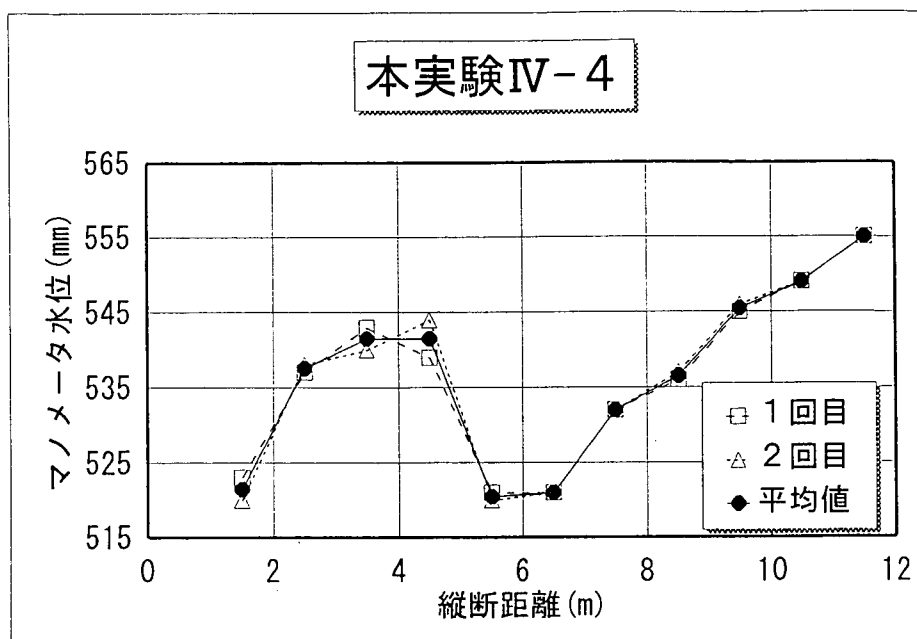


図-7.12 マノメータ測定結果（本実験Ⅳ-4）

(5) 本実験Ⅳ-5

本実験ケースでは、管路勾配を5/1000、通水時設定水深を14cm（通水中平均水深=13.45cm）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図-7.13の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で52点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図-7.14に示す。

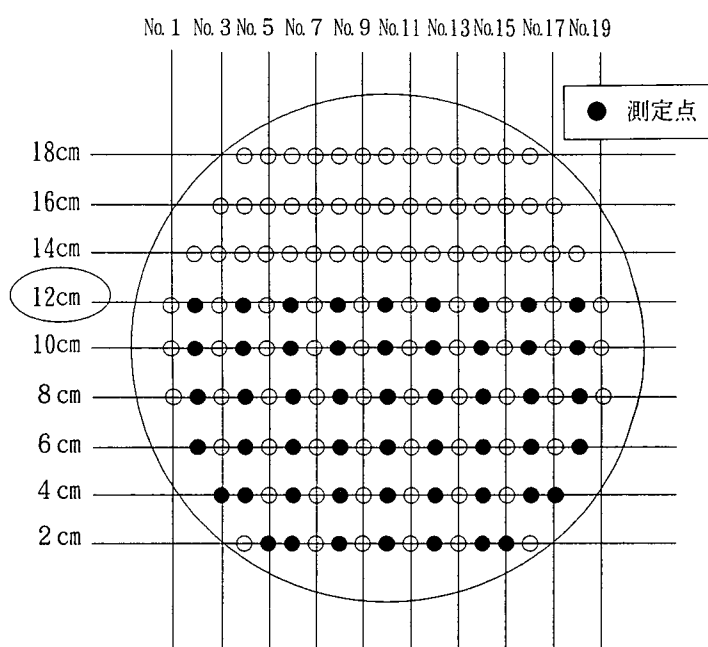


図-7.13 流速測点位置図（本実験Ⅳ-5）

最大流速発生位置は、測線No.10～13の水深10cm付近であり、流心は流下方向に対し若干右寄りに存在した。なお、最大流速は $V_{max}=130.5\text{cm/s}$ であった。また等流速線は、外壁に向かい次第に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=23791.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=23588.0(\text{cm}^3/\text{s})$ と堰流量より大きな値を得た。

動水勾配の測定結果を図-7.15に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約 $6.9/1000$ （マノメータ水位No.6～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0118$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0120$ の値を得た。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、平均水温は 24.1°C であった。

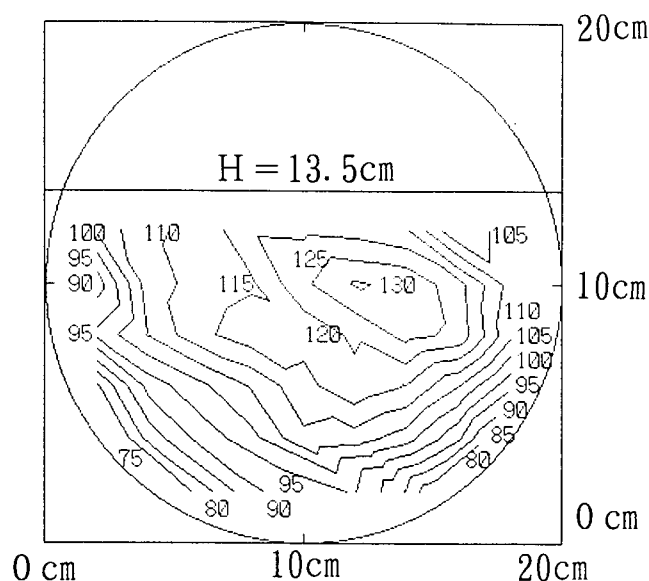


図-7.14 等流速線図（本実験IV-5）

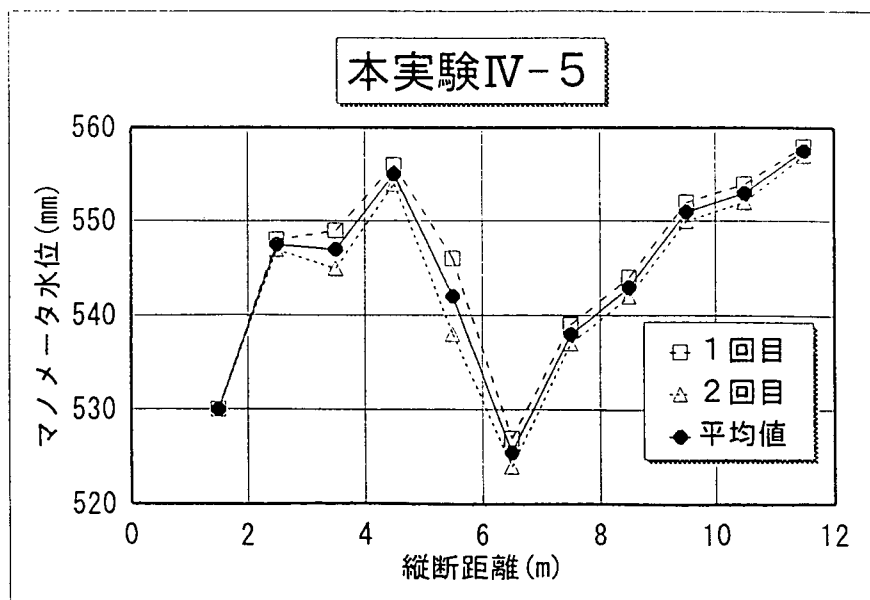
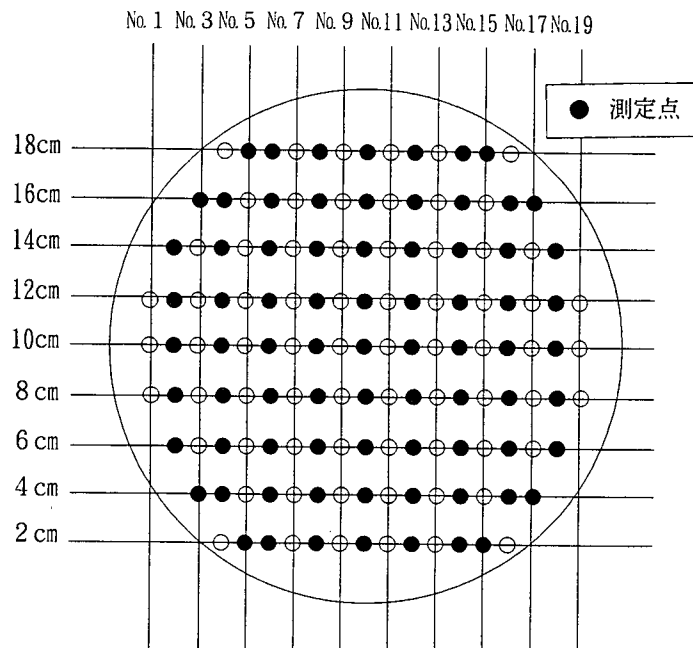


図-7.15 マノメータ測定結果（本実験IV-5）

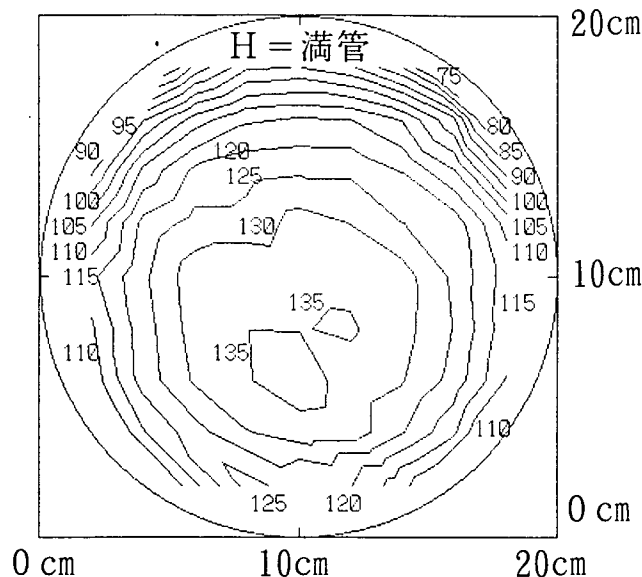
(6) 本実験Ⅳ－6

本実験ケースでは、管路勾配を5/1000、通水時設定水深を20cm（満管）として定流通水実験を行った。

流速の測定は、図－7.16の測点位置図に示すように、2cm・4cm・6cm・8cm・10cm・12cm・14cm・16cm・18cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2cmとした。なお測点数は全部で77点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－7.17に示す。



図－7.16 流速測点位置図（本実験Ⅳ－6）



図－7.17 等流速線図（本実験Ⅳ－6）

最大流速発生位置は、管渠中心部から若干管底に偏った地点である測線No.8～12の水深6～8cm付近であり、その最大流速 V_{max} は137.4cm/sであった。また等流速線は、外側へ向かうに従って減速する傾向にあるが、管渠下部に比較すると、管渠上部の方が急激に減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=34340.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=39537.0(\text{cm}^3/\text{s})$

³/s)となった。

動水勾配の測定結果を図-7.18示す。実験では、縦断的にほぼ一様の動水勾配が得られた。その勾配は約5.1/1000（マノメータNo.2～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0089$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合で $n=0.0083$ を得た。

水温は、実験開始時と終了時の2回測定し、その平均は24.1℃（1回目24.0℃、2回目24.2℃）であった。

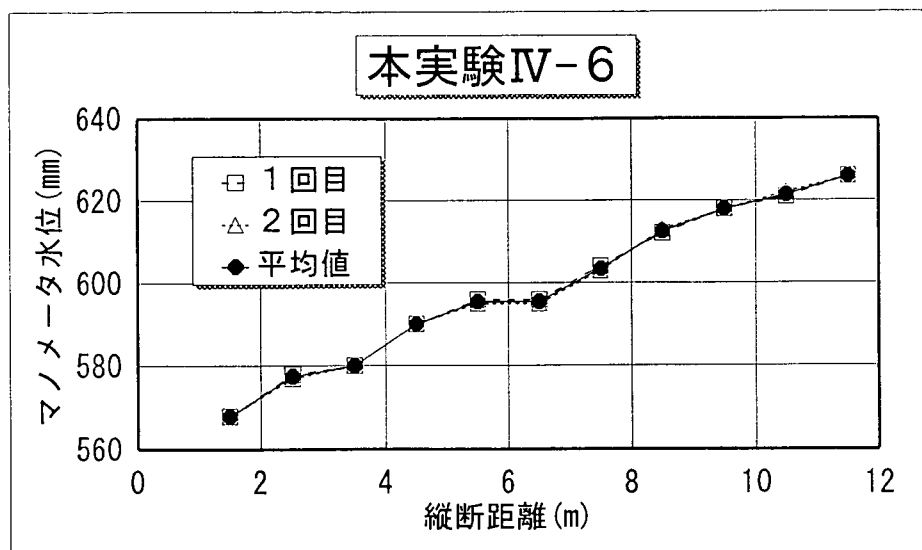


図-7.18 マノメータ測定結果（本実験Ⅳ-6）

7.3 まとめ

表-7.2に、実験結果の一覧表を示す。

表-7.2 実験結果一覧表（水路勾配 $I=5/1000$ ）

実験ケース	管内水深 cm	動水勾配	堰流量からの算出			流速分布からの算出		
			堰流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数	計算流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数
本実験Ⅳ-1	6.0	5.4/1000	6592.4	83.9	0.0092	7199.4	90.8	0.0085
本実験Ⅳ-2	8.0	5.4/1000	11380.0	97.6	0.0092	12414.0	105.8	0.0085
本実験Ⅳ-3	10.0	5.3/1000	17498.0	111.5	0.0089	18950.0	120.6	0.0082
本実験Ⅳ-4	11.6	5.7/1000	22380.0	111.7	0.0098	24428.0	123.6	0.0088
本実験Ⅳ-5	13.5	6.9/1000	23791.0	105.9	0.0118	23588.0	104.5	0.0120
本実験Ⅳ-6	満管	5.1/1000	34340.0	109.3	0.0089	39537.0	116.3	0.0083

(1) 粗度係数は、概ね0.009～0.012の範囲内であった。この値は、アクリルの粗度係数として一般的に知られる値とほぼ一致する。

(2) 流速分布は、流量（水位）の違いに関わらず、ほぼ同様の形態を示した。最大流速の発生地点を流心とすると、流心は5割～7割水深の位置に常に存在した。また、いずれのケースについても、等流速線は外壁へ近づくにつれて急激に減速する傾向にあり、横長の楕円形状を示した。ただし満管時には、同心円状の等流速線を描いた。

(3) 平均流速を、堰流量から逆算した場合（ V_w ）と、流速分布から逆算した場合（ V_d ）について検討した。その結果、本実験Ⅳ-5以外は、 $V_w < V_d$ となった。またこれらの方法で算出された平均流速は、その断面の最大流速（ V_{max} ）の77～82%の値になった。

7.4 1点流速測定法の検討

(1) 検討概要

本実験Ⅰと同様に、0.1割（0.1D）、0.2割（0.2D）、0.3割（0.3D）の3地点を測定候補地点とし、点流速補正係数 K_p についての検討を行った。表－7.3に、各実験ケースの点補正係数一覧表を示す。なお図－7.25は、 H/D と K_p の関係を示したものである。

表－7.3 点流速補正係数一覧表

実験ケース	平均流速 $V_m (=V_w)$	0.1D		0.2D		0.3D	
		V_p	K_p	V_p	K_p	V_p	K_p
本実験Ⅳ－1	83.9	100.8	0.83	105.0	0.82	—	—
本実験Ⅳ－2	97.6	109.4	0.89	119.2	0.85	123.8	0.79
本実験Ⅳ－3	111.5	126.6	0.88	127.4	0.83	133.1	0.84
本実験Ⅳ－4	111.7	122.1	0.91	129.6	0.86	135.9	0.82
本実験Ⅳ－5	105.9	92.8	1.14	108.8	0.99	113.4	0.93
本実験Ⅳ－6	109.3	122.7	0.89	133.1	0.85	137.4	0.80

※流速の単位はcm/s

(2) 検討結果

図－7.19に、 K_p と H/D の関係を表したものを示す。測定地点が0.1Dの場合、 K_p は概ね0.83～1.14の値をとり、 $H/D=0.6\sim0.7$ 付近で K_p は極大値を得た。

測定地点が0.2Dの場合、 K_p は概ね0.82～1.00の値をとった。 K_p の変動傾向は、0.1Dの場合と酷似しており、 $H/D=0.6\sim0.7$ 付近において K_p は極大値を得た。

測定地点が0.3Dの場合、 K_p は概ね0.79～0.93の値をとった。この場合においても K_p は、 $H/D=0.6\sim0.7$ 付近で極大値を得た。

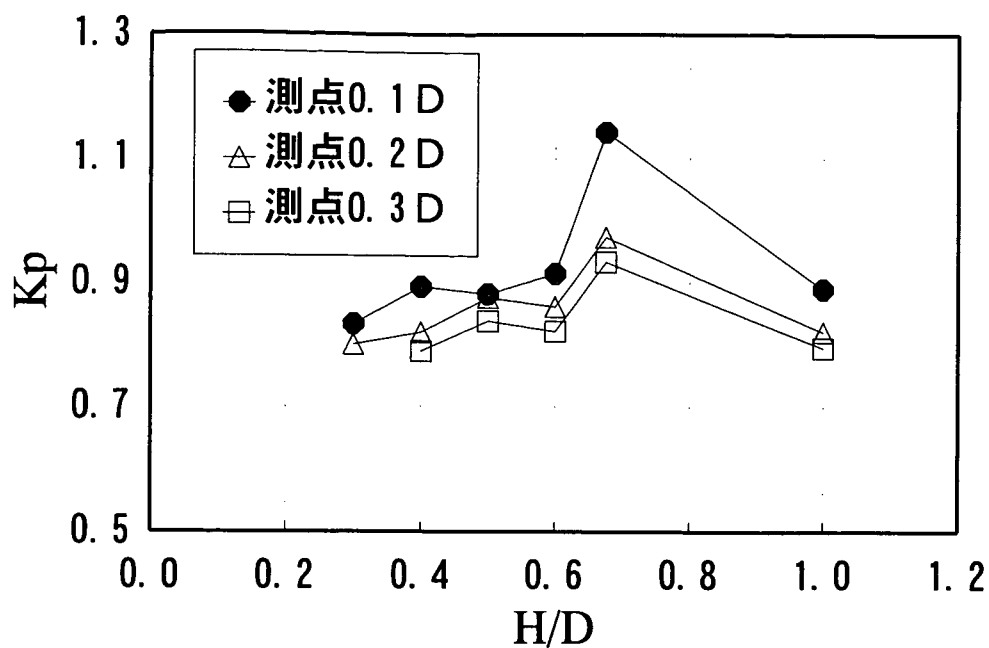


図-7.19 K_p と H/D の関係

(3) まとめ

本実験IVでは、水路勾配を5/1000として実験を行った。この結果、点流速補正係数 K_p は、値こそ測定地点毎に違うものの、他の水路勾配の場合と、同じような傾向になることが分かった。これは本実験Iにも共通して言えることである。 K_p は、 $H/D=0.6\sim0.7$ で極大となるのは、 $H/D=0.6\sim0.7$ の場合に最も流下能力が高いことが起因していると考えられる。流下能力の向上は、流量の増加に繋がるが、この増加分は断面内流速に直接反映される。断面内流速が増加した場合、その増加割合は、摩擦の影響を受ける壁面近くよりも、管渠中心部の方が高い。よって測定した点流速は、比較的壁面に近いことから流速の増加割合が低く、その結果点流速補正係数 K_p が突出したと考えられる。

第 8 章 本実験 V (水路勾配=10/1000)

第8章 本実験Ⅴ（水路勾配10/1000）

本実験Ⅴでは、点補正係数 K_p と水路勾配との関係を把握するために、水路勾配を5/1000として、流れの現象並びに点流速補正係数についての検討を行った。ここでは、水路勾配を本実験の2倍急にさせ、水路勾配=10/1000とした実験を行い、前実験と同様の検討を行った。

8.1 実験ケースと実験条件

本実験は、水深（流量）を一定とする定流通水実験である。本実験Ⅴでは、水路勾配を10/1000、水深はケース毎に3割水深から満管まで2 cmピッチで変化させて実験を行った。表-8.1に実験ケース一覧表を示す。

表-8.1 本実験Ⅴケース一覧表

ケース名	実験条件		測定項目
	設定勾配	設定水深	
本実験Ⅴ-1	10/1000	6 cm	流速・水深・流量・マノメータ・水温
本実験Ⅴ-2	10/1000	8 cm	〃

実験における測定項目は、流速、管内水深、流量、マノメータ水位、流況観測、水温とした。

流速については、水深方向・横断方向にそれぞれ1～2 cmピッチで測定した。測定機器は、壁面の有無に関係なく流速の測定が可能なプロペラ式流速計を用いた。1測点当たりの測定時間は1分間とし、パソコンを通じて1秒おきにデータを収集した。収集データは、BASICプログラムを用いて、平均化等の処理をした。また、流速データの平均値は、等流速線図（流速コンター図）として整理した。

管内水深は、ポイントゲージを用いて、実験開始時および実験終了時（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）に測定した。

流量については、各測点の測定流速から流量を求めた際の比較値として、低水槽に設置してある三角堰を用いて、堰の越流水深から実流量（堰流量）を算出した。越流水深は、管内水深測定と同様に、ポイントゲージを用いて測定した。

粗度係数を得るには、動水勾配が必要となってくる。よって、アクリル管渠にマノメータを設置し、実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）マノメータ水位を読み、その値を整理し動水勾配とした。なお本実験Ⅱより、流速測定孔直下にもマノメータを加え、マノメータ数を計12本とした。

水温は、管渠最下流に設置してある水槽で実験開始時と実験終了時の2回（実験が長時間におよぶ場合は中途に1回）計測を行った。

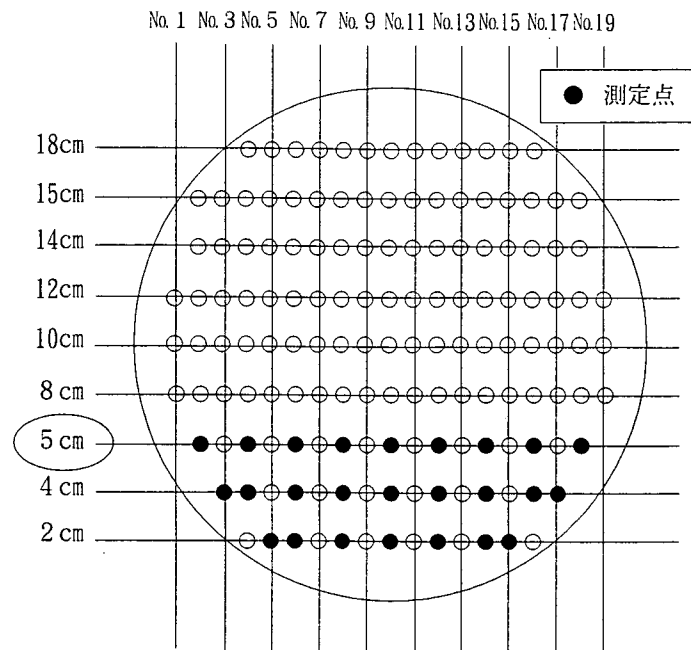
8.2 実験結果

（1）本実験Ⅴ-1

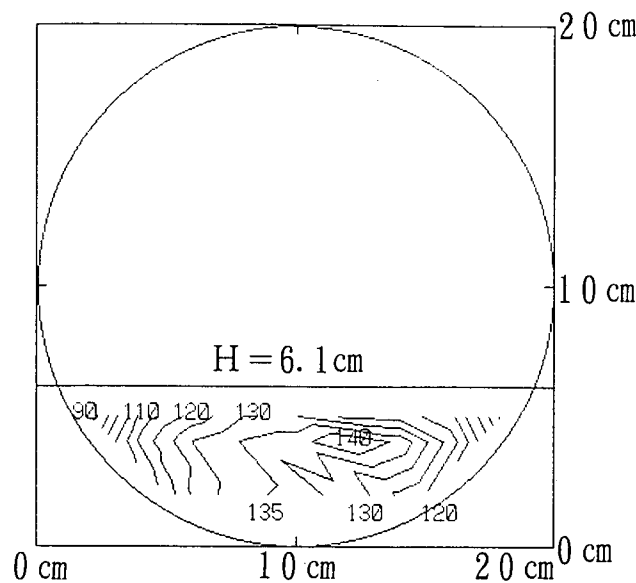
本実験ケースでは、管路勾配を10/1000、通水時設定水深を6 cm（通水中平均水深=6.11 cm）として定流

通水実験を行った。

流速の測定は、図－8.1の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・5 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で25点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－8.2に示す。



図－8.1 流速測点位置図（本実験V－1）



図－8.2 等流速線図（本実験V－1）

最大流速発生位置は測線No.10～13の水深4 cm付近であり、最大流速 $V_{\max}=144.8\text{ cm/s}$ を得た。流心は、若干右に偏る傾向があり、等流速線は外側へ向かうに従って減速する傾向にあった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w=8968.1(\text{cm}^3/\text{s})$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果、 $Q_v=10131.0(\text{cm}^3/\text{s})$ となり、堰から算出した流量より大きくなった。

動水勾配の測定結果を図-8.3に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約11.9/1000（マノメータNo.3～10）となった。

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。その結果、堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0105$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.0093$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、2回とも21.5℃であった。

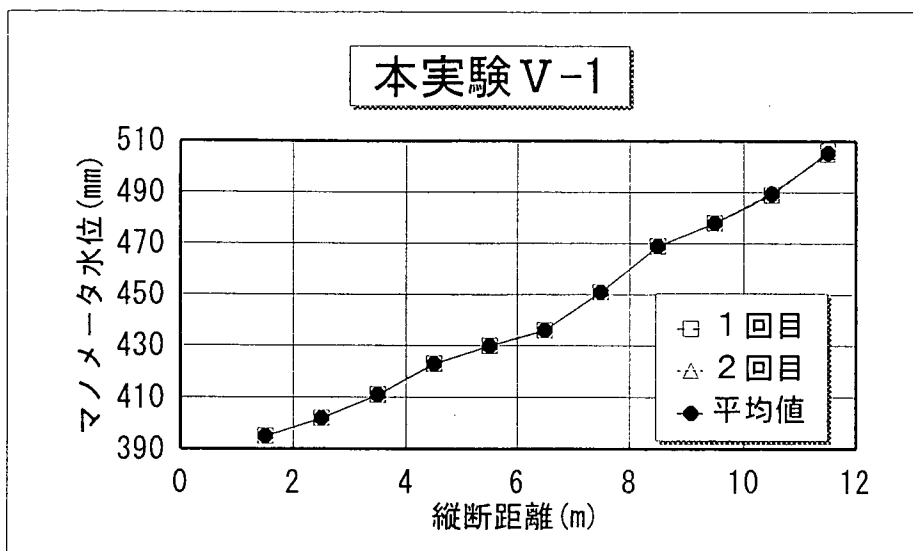


図-8.3 マノメータ測定結果（本実験V-1）

(2) 本実験V-2

本実験ケースでは、管路勾配を10/1000、通水時設定水深を8 cm（通水中平均水深=7.82cm）として定流通水実験を行った。

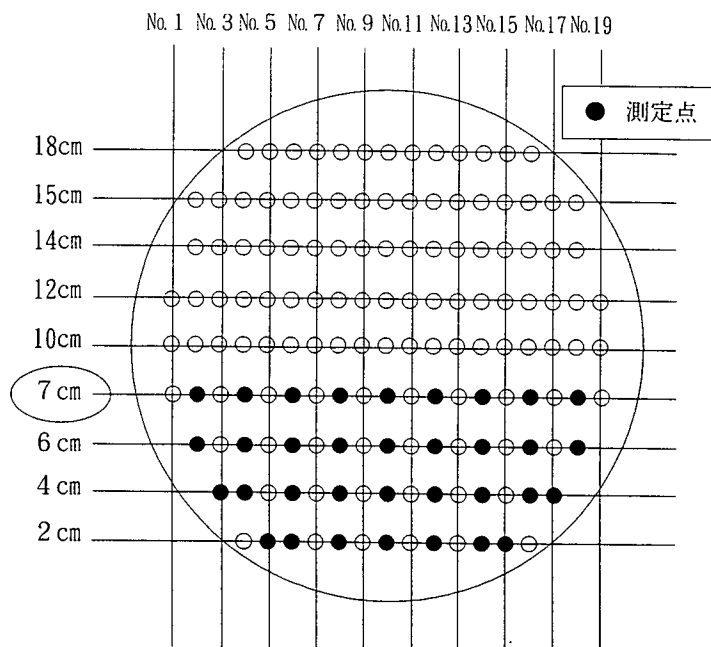
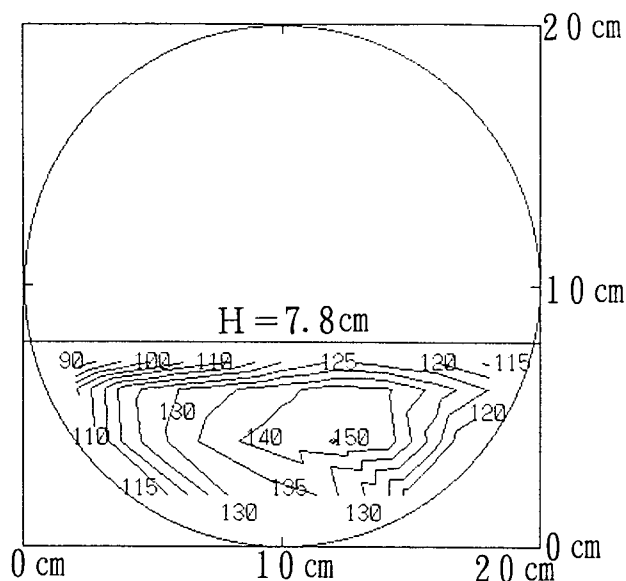


図-8.4 流速測点位置図（本実験V-2）

流速の測定は、図－8.4の測点位置図に示すように、2 cm・4 cm・6 cm・7 cmの各水深で行い、横断方向の測定ピッチを1～2 cmとした。なお測点数は全部で34点である。各測点で測定した流速を等流速線図に表したものを図－8.5に示す。

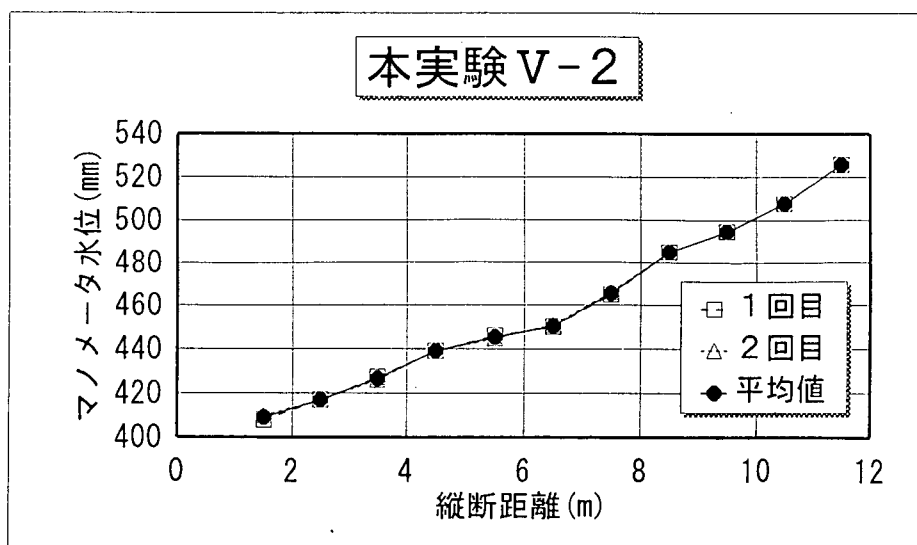


図－8.5 等流速線図（本実験V－2）

最大流速発生位置は、測線No.10～12の水深4 cm付近であり、流心は若干右に偏る傾向にあった。なお最大流速 V_{max} は155.2 cm/sであった。

低水槽での流量測定結果（堰流量）は、 $Q_w = 13906.0 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ となった。通水中の流量変化は少なく、ほぼ一定流量を満足できたと考えられる。また得られた流速分布から流量を算出した結果は、 $Q_v = 15442.0 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ となり、堰から算出した流量より大きな値となった。

動水勾配の測定結果を図－8.6に示す。背水の影響を受けていると考えられるマノメータを除くと、動水勾配は約11.6/1000（マノメータNo.3～10）となった。



図－8.6 マノメータ測定結果（本実験V－2）

次に、逆算粗度係数を2つの方法で算出した。堰流量から粗度係数を逆算した場合は $n=0.011$ 、各測点の流速から粗度係数を逆算した場合は $n=0.010$ となった。

水温は、実験開始時及び終了時の2回測定し、2回とも 21.4°C であった。

8.3 まとめ

表-8.2に、実験結果の一覧表を示す。

表-8.2 実験結果一覧表（水路勾配 $I=10/1000$ ）

実験ケース	管内水深 cm	動水勾配	堰流量からの算出			流速分布からの算出		
			堰流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数	計算流量 cm^3/s	平均流速 cm/s	粗度係数
本実験V-1	6.11	11.9/1000	9.0	110.3	0.0105	10.1	124.6	0.0093
本実験V-2	7.82	11.6/1000	13.9	122.3	0.0107	15.4	135.7	0.0096

(1) 本実験は2ケースのみ行った。これは、急勾配にした場合、下流側における水位の堰上げにより、大きな水位変動が発生し、管内水位の設定が困難となったためである。

(2) 粗度係数は、2ケースとも $n=0.011$ であった。この値は、アクリルの粗度係数として一般的に知られる値とほぼ一致する。

(3) 流速分布は、流量（水位）の違いに関わらずほぼ同様の形態を示した。最大流速の発生地点を流心とすると、流心は5割～7割水深の位置の、中心から若干右に偏った位置に存在した。また、いずれのケースについても、等流速線は外壁へ近づくにつれて急激に減速する傾向にあり、横長の楕円形状を示した。

8.4 1点流速測定法の検討

(1) 検討概要と結果

本実験Iと同様に、0.1割（0.1D）、0.2割（0.2D）、0.3割（0.3D）の3地点を測定候補地点とし、点流速補正係数 K_p についての検討を行った。表-8.3に、各実験ケースの点補正係数一覧表を示す。

表-8.3 点流速補正係数一覧表

実験ケース	平均流速 $V_m (=V_w)$	0.1D		0.2D		0.3D	
		V_p	K_p	V_p	K_p	V_p	K_p
本実験V-1	110.3	136.0	0.81	137.7	0.80	—	—
本実験V-2	122.3	143.3	0.85	152.9	0.80	148.7	0.82

※流速の単位は cm/s

図-8.7に、 K_p と H/D の関係を表したものを示す。 K_p 値は、測定地点が $0.1D$ の場合、 $K_p=0.81$ 、 0.85 ということで、これまでに行った実験の同一水深の K_p 値とほぼ同じ値を得た。

測定地点が $0.2D$ の場合、水深変化に関わらず $K_p=0.80$ となった。この場合も、測定地点 $0.1D$ と同様に、これまでの実験結果と同様の K_p 値を得る結果となった。

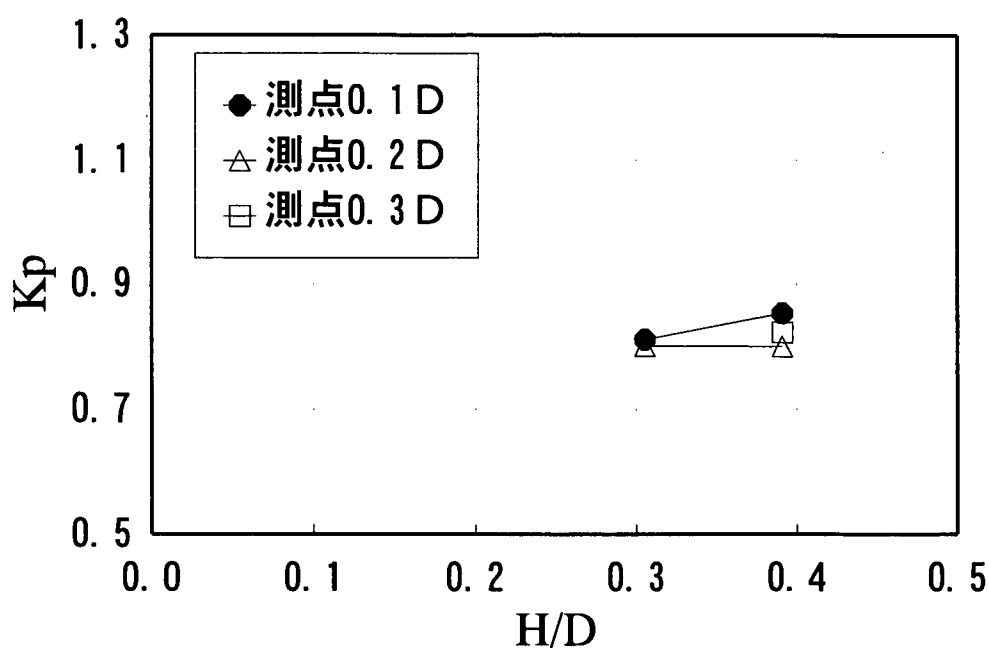


図-8.7 K_p と H/D の関係

(3) まとめ

本実験Vでは、水路勾配を $10/1000$ として実験を行った。水位設定の困難さから、2ケースしか行うことができなかったが、点流速補正係数 K_p の変動傾向は、水路勾配を $0/1000$ 、 $1/1000$ 、 $5/1000$ としたときと、ほぼ同じであると考えられた。よって点補正係数 K_p は、水路勾配にほとんど影響されず、管内水深もしくは他の要因により変化することが明らかとなった。

第9章 管路内の流れ

第9章 管路内の流れ

下水管渠は、地下埋設物であるため、管渠内の流れの様子を見ることはもちろん、推測することも難しい。そこで、第4章から第8章においては、実験装置を用いた水理実験により、実際の下水管渠内の流れを再現し、種々の水理特性について実験的に検討した。ここでは、水理実験で得られた各種データを基に、管路内の流れについて整理することとする。

9.1 流速特性

(1) 流速分布

流速分布の分布形を述べる上で重要なのは、管渠の設置条件と水理条件であると考えられる。しかしながら前者に対しては、実験において水路勾配を変化させた検討を行ったが、同一水深であれば水路勾配に係わらず流速分布形は同じであるという結果を得た。後者の場合、管渠上下流端の条件も関係してくるが、実験では自然放水の形式をとったので、水理条件としては粗度係数や管内水深がここでは該当する。実験では、全ケースを通じて同じ管渠（アクリル管渠）、同じ流体（水）で検討を行ったので、粗度係数や流体諸元（密度や粘性）については、流速分布を決定づける要素としては無視できると考えられる。よって水理条件は管内水深に委ねられる。

実験では、流速分布は管内水深により変化するという結果を得た。管路を横断面で切った場合、流速分布（等流速線図）は図-9.1～5（次頁より）のようになった。流心は、ケースによっては多少左右への偏りがあるものの、管内水深の高低（流量の大小）、水路勾配の緩急に関わらず、断面の鉛直センターライン（測線No.10）近傍に存在した。等流速線は、管内水深が低い場合（ $H/D < 0.6 \sim 0.7$ ）には横長の楕円形を描くが、管内水深が大きくなる（ $H/D > 0.6 \sim 0.7$ ）と同心円に近い形を描いき、満管時にはほぼ同心円状になった。また流心は、管内水深の5割近傍の位置に存在する傾向にあった。

管路を縦断面で切った場合についてみる（図-9.6～10参照）。水路勾配が緩やかな場合、同一水深の流速は、最大流速と最小流速の測定差が最大で40 cm/sであった。一方、水路勾配が急な場合には、同一水深の流速は、最大流速と最小流速の測定差は、緩勾配の場合と比較すると大きくなった。これは、最小流速の発生しうる外壁近くでは、急勾配になるほど流速の減衰効果が高くなるためと考えられる。

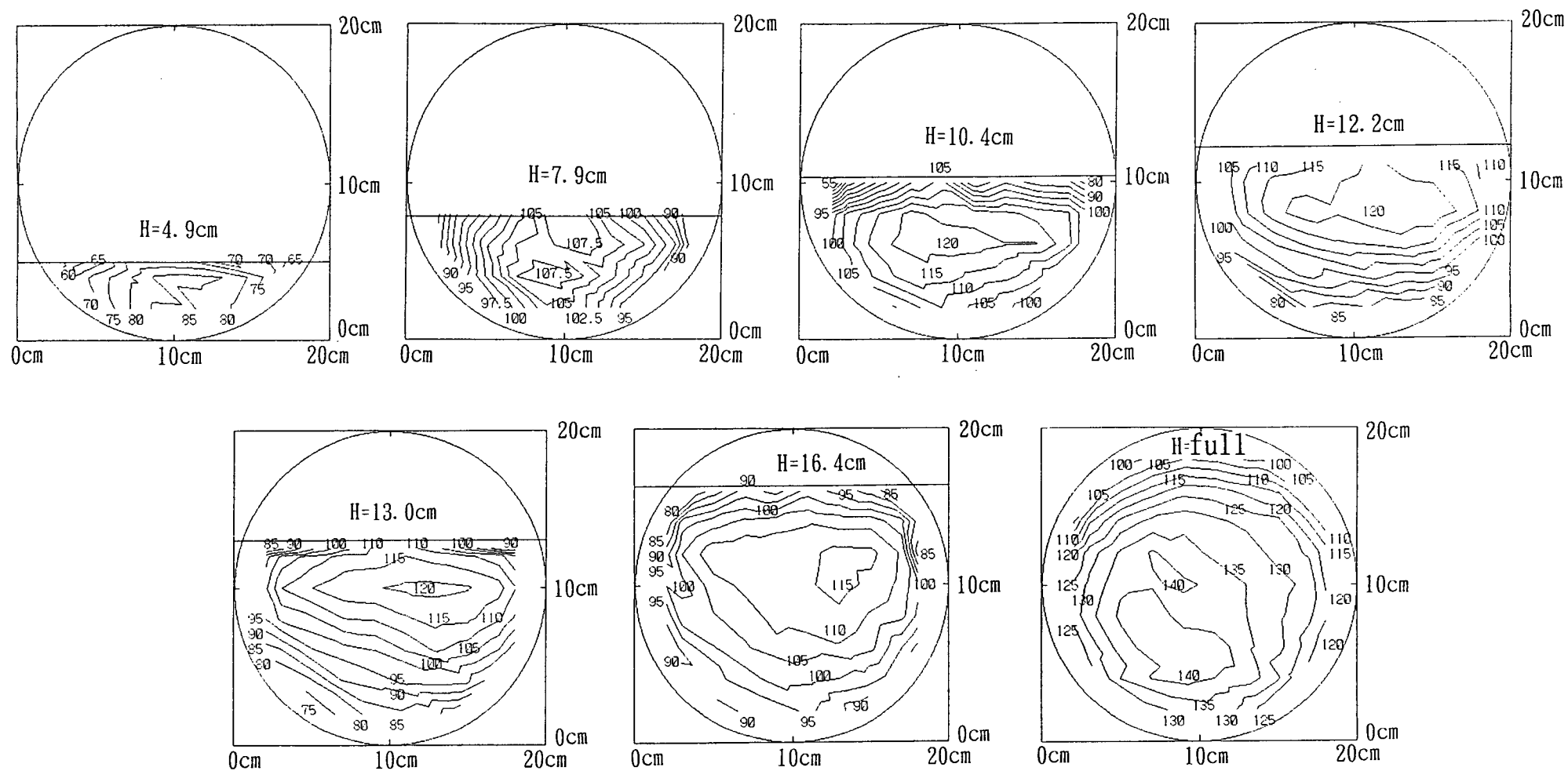
※巻末の参考資料(2)に、土研以外で得られた流速分布形の例を示す。

(2) 平均流速

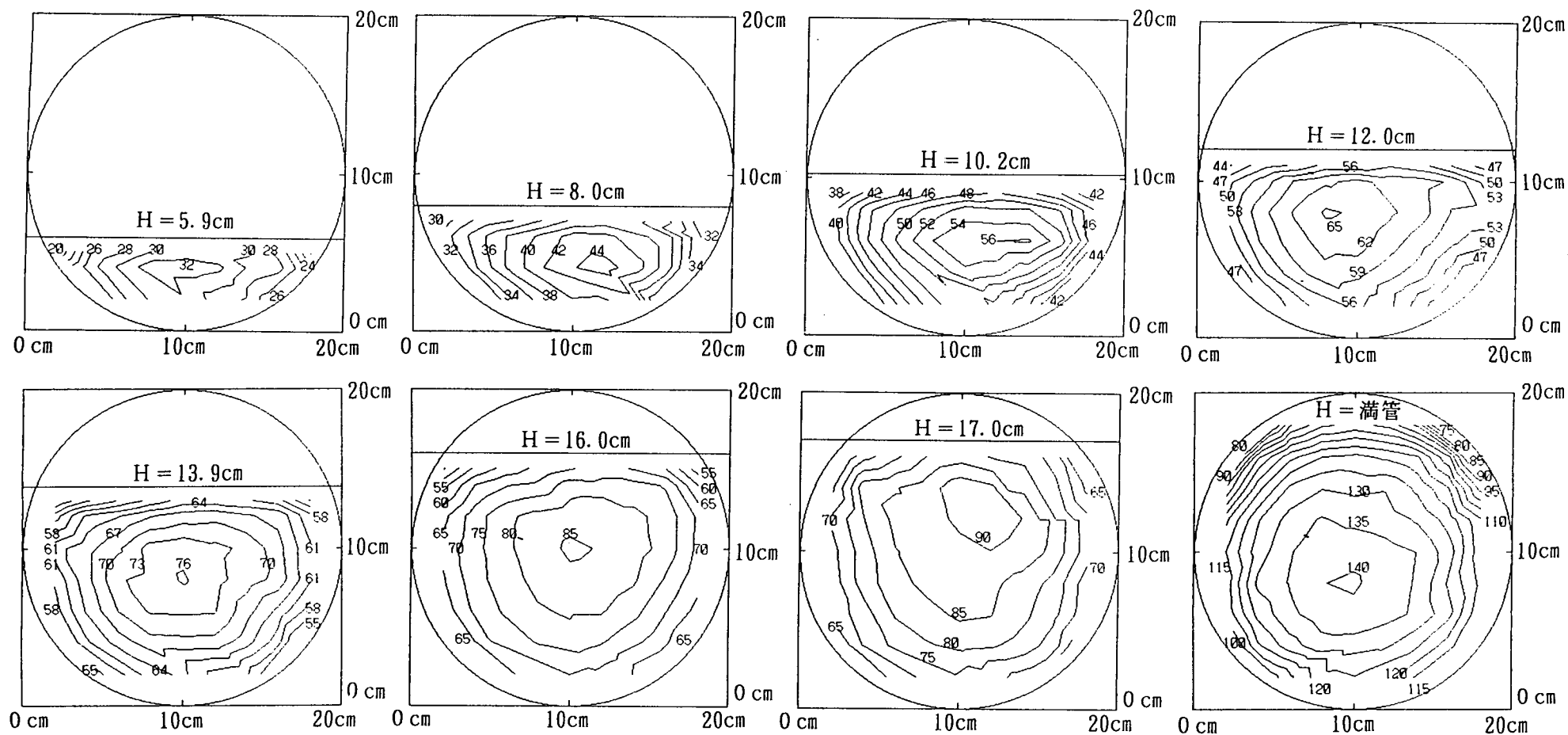
三角堰を用いて測定した実流量（堰流量）に、管内水深（流水断面積）を与えることで、平均流速を算出した（表-9.1参照）。この結果を用いて、管内水深と平均流速の関係をグラフ化すると図-9.11のようになった。

水路勾配0/1000を除くと、グラフ中の下から順に、水路勾配が緩勾配から急勾配へと変化しているのが分かる。つまり、水路勾配が急になるに従い、平均流速は増加する傾向にあった。

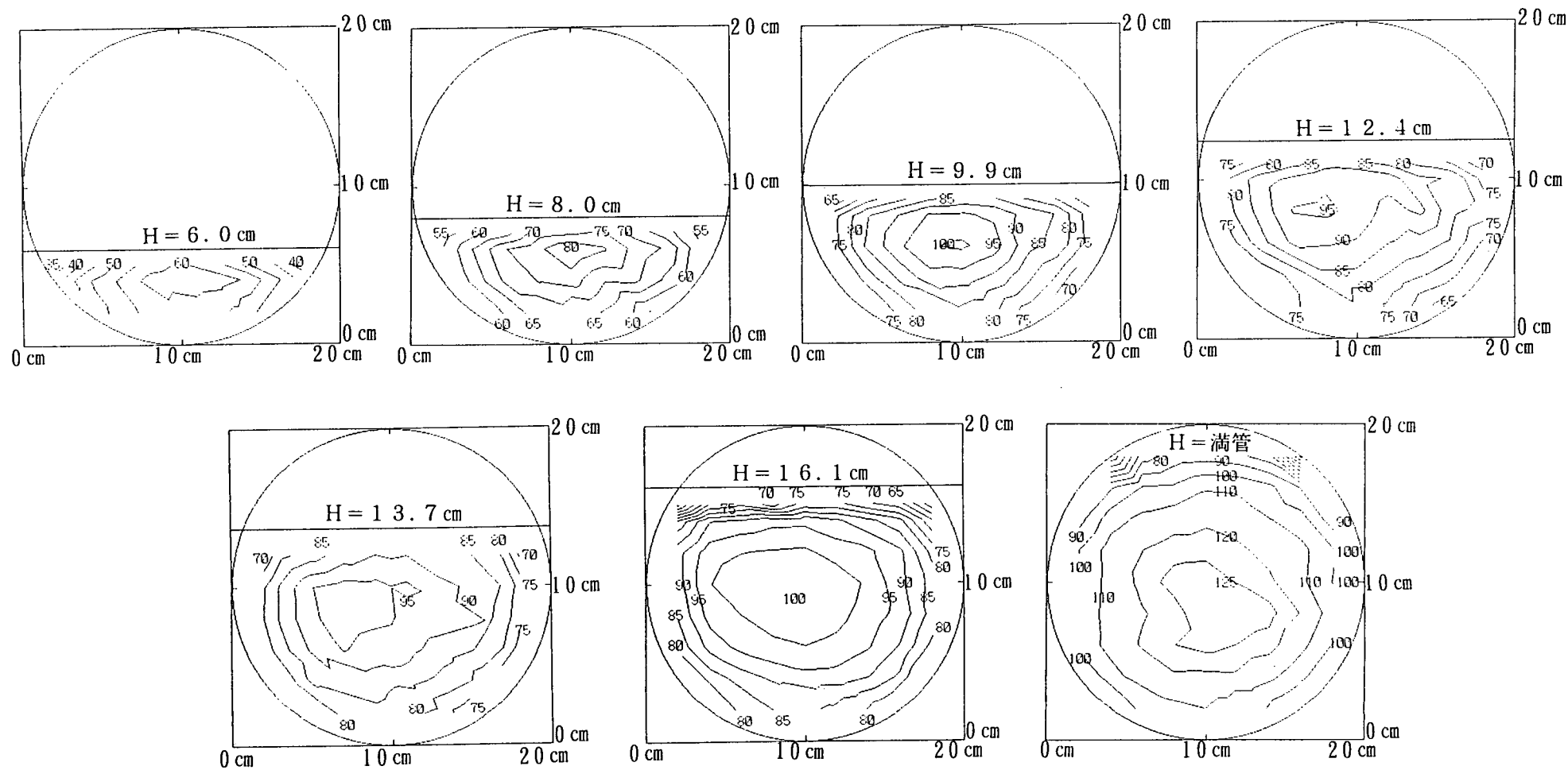
管内水深を指標として見ると、管内水深が増加するに従い、平均流速は収束する傾向が見られた。また、水路勾配が緩やかな場合から急な場合に変化すると、 H/D と平均流速の関係は、べき乗的增加傾向から直線的増加傾向を経て、対数的増加傾向に変化した。またどの水路勾配（ $I = 0/1000 \sim 10/1000$ ）においても、 H/D が満管状態に近づくと、110 cm/sに近い値に収束する傾向が見られた。



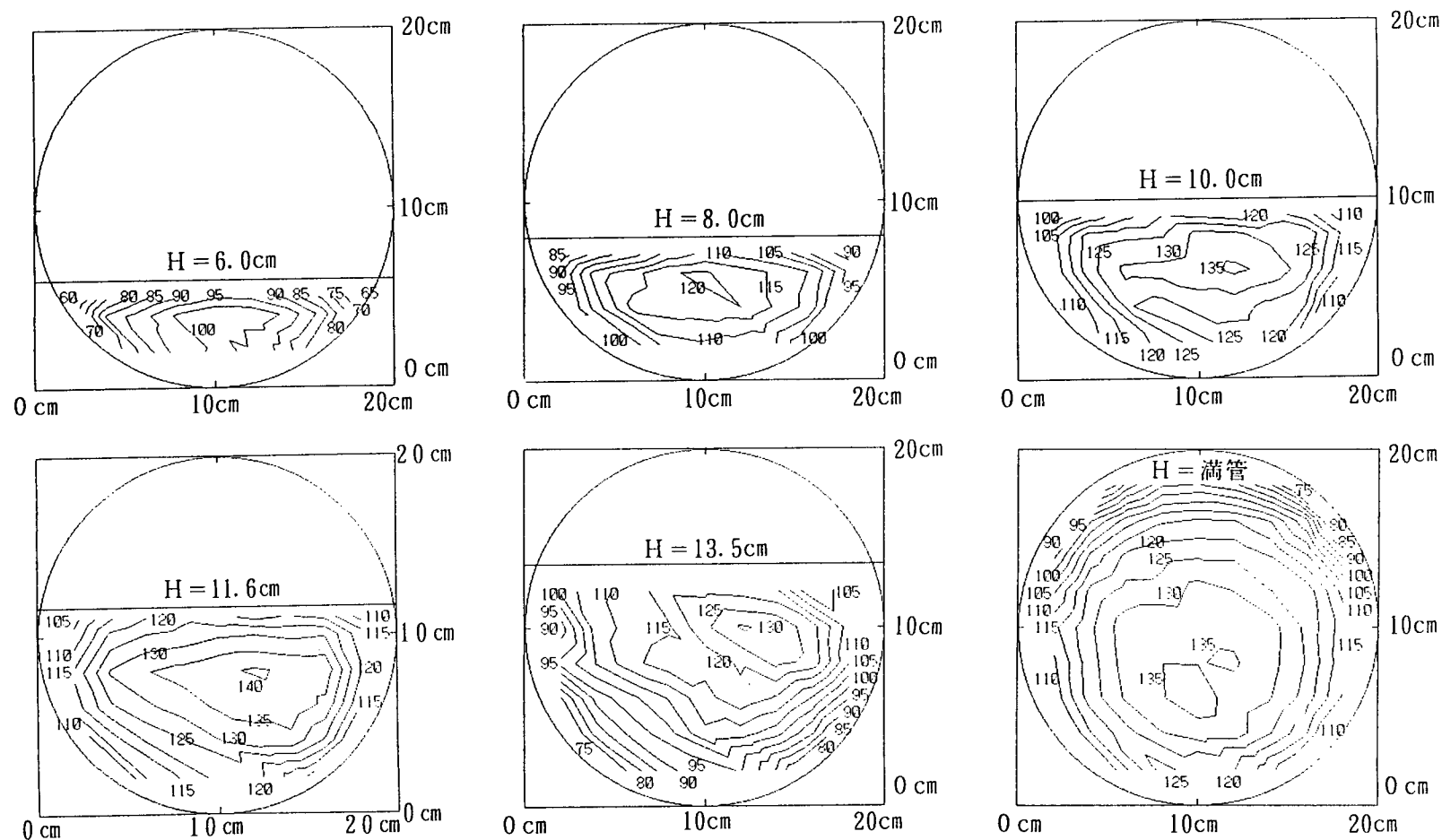
図－9.1 勾配0/1000の流速分布図



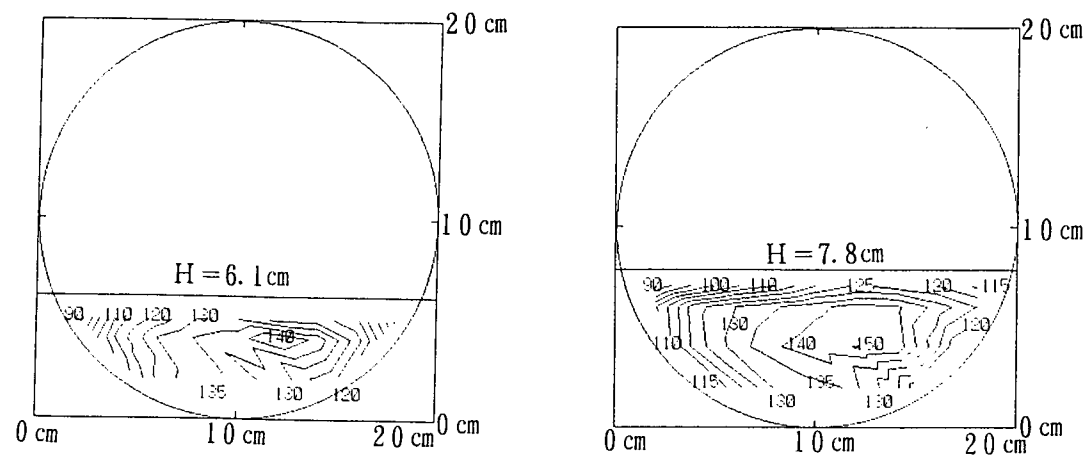
図－9.2 勾配1/1000の流速分布図



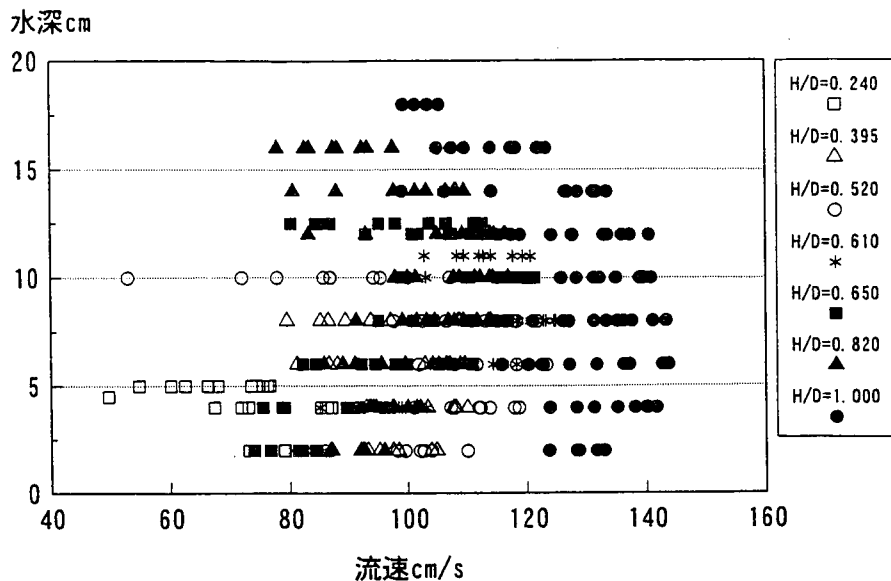
図－9.3 勾配3/1000の流速分布図



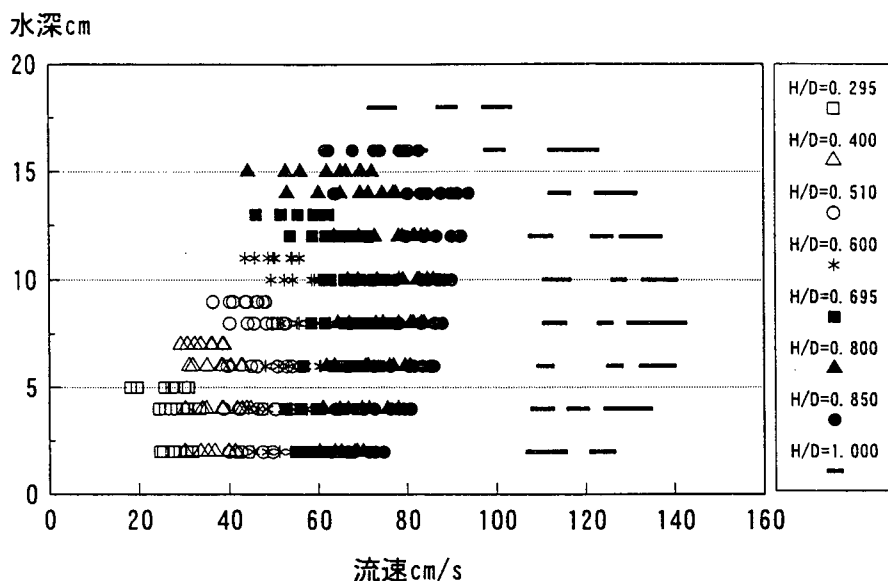
図－9.4 勾配5/1000の流速分布図



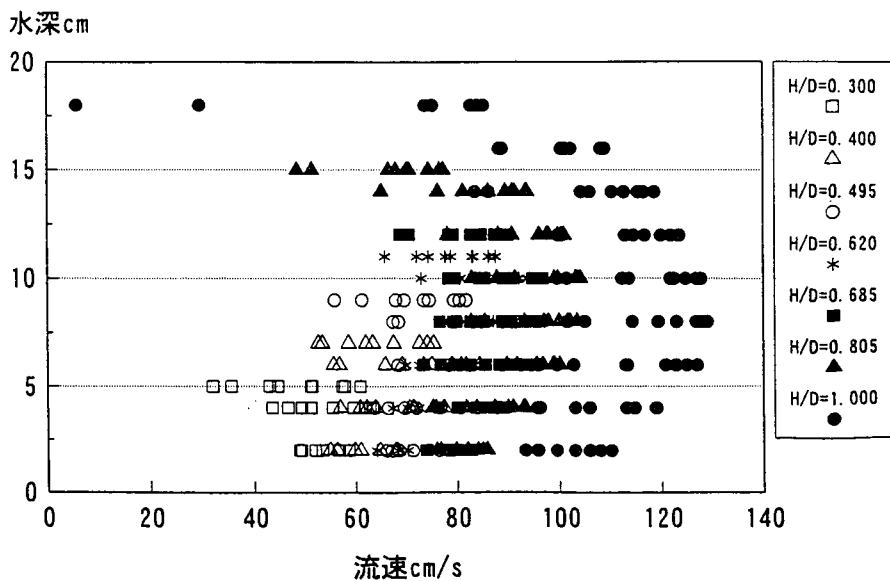
図－ 9. 5 勾配10/1000の流速分布図



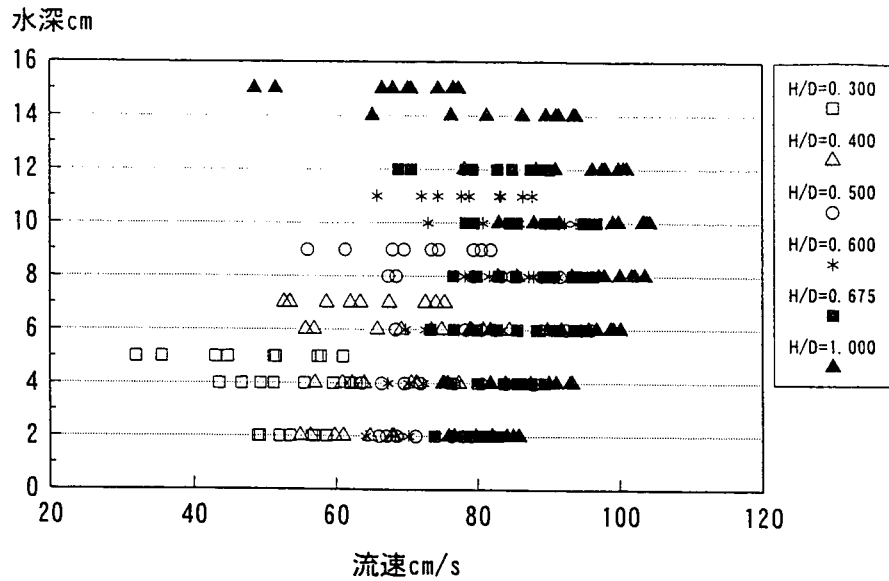
図－9.6 水路勾配 0/1000 の場合の流速分布図（縦断面図）



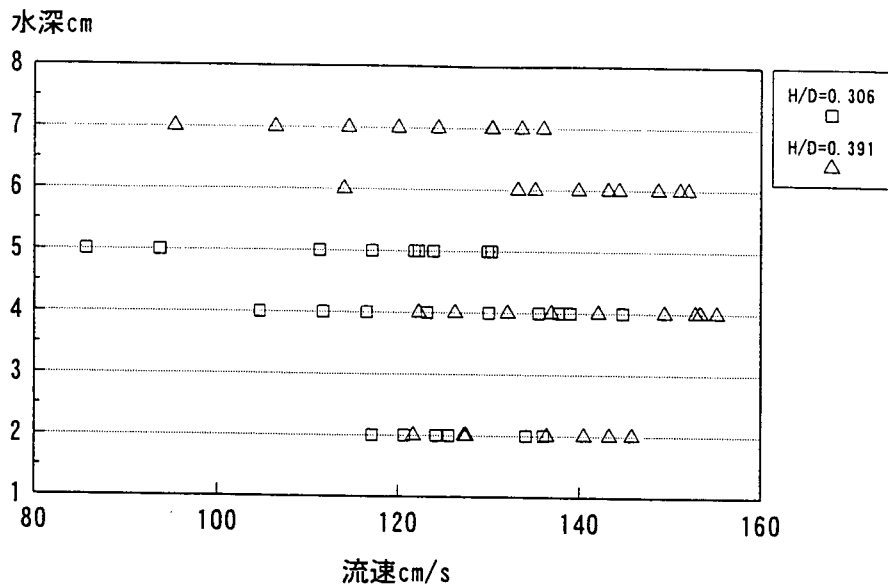
図－9.7 水路勾配 1/1000 の場合の流速分布図（縦断面図）



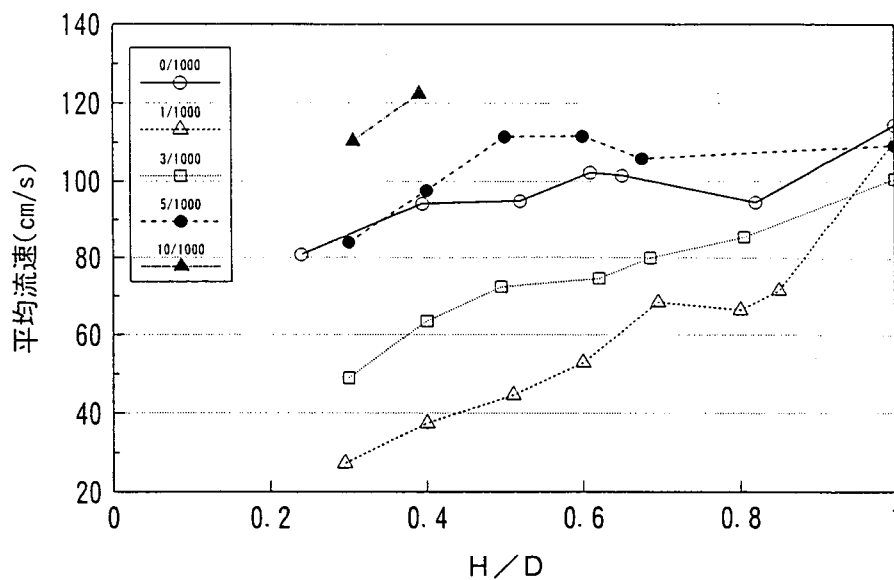
図－9.8 水路勾配 3/1000 の場合の流速分布図（縦断面図）



図－9.9 水路勾配5/1000の場合の流速分布図（縦断面図）



図－9.10 水路勾配10/1000の場合の流速分布図（縦断面図）



図－9.11 平均流速とH/Dの関係

(3) 最大流速

実験全ケースの、最大流速発生位置と流速値をまとめたものを表-9.1に示す。

表-9.1 各実験ケースの最大流速一覧表

実験ケース	管内水深 (cm)	最大流速発生位置		(水深) (管内水深)	最大流速 $V_{\max}$ (cm/s)	平均流速 V_m (cm/s)	$V_m/V_{\max}$
		測線No.	水深				
本実験Ⅰ-1	4.8	No.11	4 cm	0.83	87.1	80.8	0.93
本実験Ⅰ-2	7.9	No.11	6 cm	0.76	109.6	94.2	0.86
本実験Ⅰ-3	10.4	No.9	6 cm	0.58	123.3	94.9	0.77
本実験Ⅰ-4	12.2	No.13	8 cm	0.66	124.8	102.3	0.82
本実験Ⅰ-5	13.0	No.13	10 cm	0.77	121.3	101.5	0.84
本実験Ⅰ-6	16.4	No.13	10 cm	0.61	116.9	94.5	0.81
本実験Ⅰ-7	20.0	No.9	6 cm	0.30	143.7	114.5	0.80
本実験Ⅱ-1	5.9	No.10	4 cm	0.68	33.4	27.3	0.82
本実験Ⅱ-2	8.0	No.12	4 cm	0.50	44.8	37.4	0.83
本実験Ⅱ-3	10.2	No.14	6 cm	0.59	56.2	44.6	0.79
本実験Ⅱ-4	12.0	No.8	8 cm	0.67	65.4	52.9	0.81
本実験Ⅱ-5	13.9	No.10	8 cm	0.58	76.4	68.3	0.89
本実験Ⅱ-6	16.0	No.10	10 cm	0.63	85.9	66.4	0.77
本実験Ⅱ-7	17.0	No.10	14 cm	0.82	93.8	71.5	0.76
本実験Ⅱ-8	20.0	No.10	8 cm	0.40	140.9	110.4	0.78
本実験Ⅲ-1	6.0	No.10	4 cm	0.67	63.4	48.9	0.77
本実験Ⅲ-2	8.0	No.10	6 cm	0.75	84.5	63.5	0.75
本実験Ⅲ-3	9.9	No.10	6 cm	0.61	95.9	72.3	0.75
本実験Ⅲ-4	12.4	No.8	8 cm	0.65	96.2	74.5	0.77
本実験Ⅲ-5	13.7	No.7	10 cm	0.73	96.7	79.9	0.83
本実験Ⅲ-6	16.1	No.10	10 cm	0.62	104.2	85.4	0.82
本実験Ⅲ-7	20.0	No.10	8 cm	0.40	128.9	100.8	0.78
本実験Ⅳ-1	6.0	No.12	4 cm	0.67	104.9	83.9	0.80
本実験Ⅳ-2	8.0	No.10	6 cm	0.75	120.6	97.5	0.81
本実験Ⅳ-3	10.0	No.12	6 cm	0.60	136.0	111.5	0.82
本実験Ⅳ-4	11.6	No.12	8 cm	0.69	140.6	111.7	0.79
本実験Ⅳ-5	13.5	No.12	10 cm	0.74	130.5	105.9	0.81
本実験Ⅳ-6	20.0	No.12	8 cm	0.40	135.6	109.3	0.81
本実験Ⅴ-1	6.1	No.12	4 cm	0.66	144.8	110.3	0.76
本実験Ⅴ-2	7.8	No.12	4 cm	0.51	155.2	122.3	0.79

本実験では、最大流速発生位置は、実験ケースにより相違し、常に中央に存在するのではなく、左右にばらついた。傾向的には、最大流速は、流れ方向に対し若干右に存在する傾向が強く、主に測線No.10～12で見られた。また、最大流速発生位置の左右のばらつきと、水路勾配や管内水深との明確な因果関係は認められなかった。

最大流速発生位置を水深方向にみると、満管状態以外であれば、最大流速は(最大流速/管内水深) $>1/2$ の位置に存在するようである。ただし、最大流速の発生位置付近の流速測定が2cmピッチで行われたため、最大流速発生位置については、1cm近いオーダーでの誤差があることをここに付け加える。

最大流速と平均流速の関係は、図-9.12に示すとおりとなった。このグラフは、縦軸を平均流速/最大流速(V_m/V_{max})、横軸を管内水深/管径(H/D)とし、水路勾配毎にグラフ化したものである。

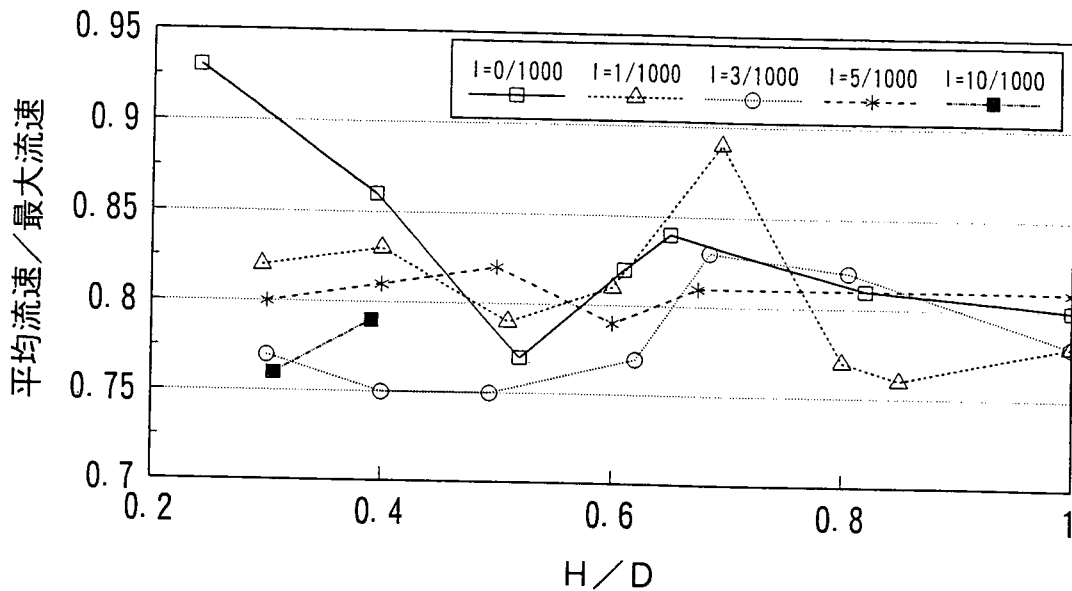


図-9.12 最大流速と平均流速の関係

(※巻末の参考資料(3)に、土研以外の実験データ及び実管渠測定結果から得た同関係図を示す)

最大流速 V_{max} と平均流速 V_m の関係は、満管状態の管水路について一般に次式で表される。

$$\begin{aligned} \cdot \text{層流の場合} \quad & \frac{V}{V_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \\ \cdot \text{乱流の場合} \quad & \frac{V}{V_{max}} = \left(1 - \frac{r}{r_0} \right)^{1/m} \end{aligned}$$

ここに、 r_0 ：円管半径、 r ：円管中心からの距離、 V_{max} ：最大流速、 V ： $r=0$ の流速、である。

層流の場合は、Poiseuille則と呼ばれる流速分布を示し、最大流速と平均流速の関係は $V_m = V_{max}/2$ で表される。

乱流の場合は、通常のレイノルズ数の範囲で考えると $m=7$ をとり、最大流速と平均流速の関係は $V_m = 0.817 \cdot V_{max}$ で表される。なお、それを与える r は $r=0.758$ となる。

上式から導かれた最大流速と平均流速の関係と実験結果とを比較する。実験においては、完全乱流となっており、 $V_m = 0.817 \cdot V_{max}$ が適用される。実験結果を見ると、満管の場合に、どの水路勾配についても $V_m/V_{max} = 0.78 \sim 0.81$ となっており、ほぼ上式に近似する結果を得ることができた。

また、 $H/D < 1$ のとき、 V_m/V_{max} の値はどう変化するかについて検討した。 H/D が小さい(H

$D < 0.4$ ）とき、 V_m/V_{max} の値は0.75～0.95の広範囲でばらついた。しかしながら、 H/D の増加とともに、 V_m/V_{max} の値は0.75～0.85の狭い範囲をとるようになり、満管時には前述したように、 $V_m/V_{max} = 0.78 \sim 0.81$ にまで収束される結果となった。

また水路勾配が急になるほど、 V_m/V_{max} は一定値を取りやすい傾向にあり、一例を挙げると、水路勾配 $= 5/1000$ の場合は、 $V_m/V_{max} = 0.79 \sim 0.81$ となった。

(4) フルード数 (Fr 数)

開水路流における流れの分類として、常流と射流がある。一般に、フルード数 (Fr) を指標として、以下のように流れが分類される。

- Fr < 1 の場合 常 流
- Fr = 1 の場合 (限界水深)
- Fr > 1 の場合 射 流

なおフルード数は次式で表される。

$$Fr = \frac{V}{(g \cdot h)^{1/2}}$$

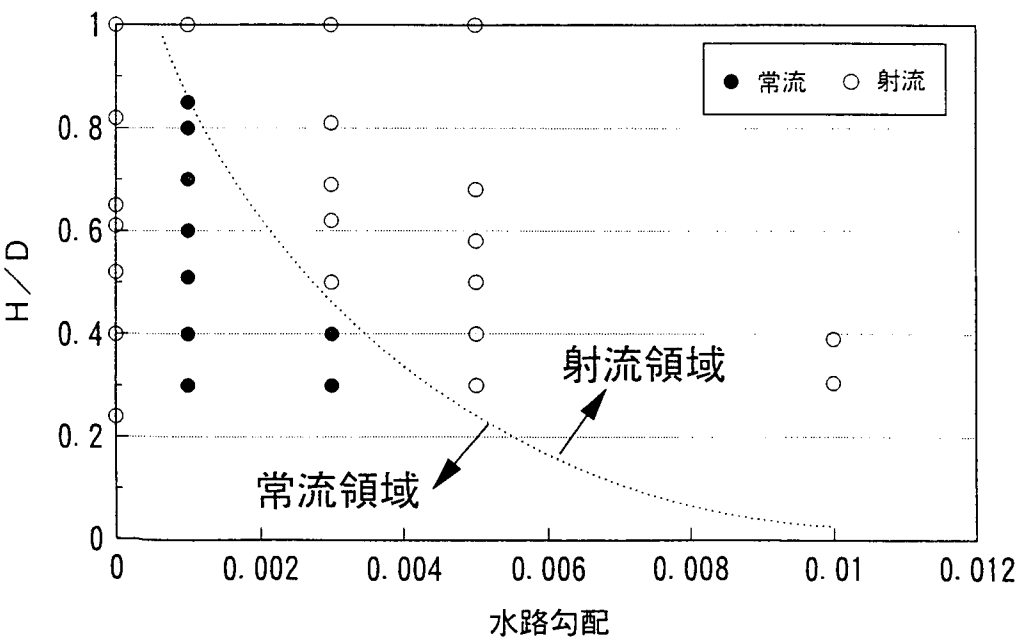
ここに、Fr : フルード数、Vm : 平均流速、g : 重力加速度、R : 径深、である。

常流の場合、流れに変化を与えると、その変化が伝わる速度に比較し、流れに対する相対的な速度 (長波の波速 $\pm \sqrt{g \cdot h}$) の方が流速より大きくなる。よって、その変化による影響は、上流には $\sqrt{g \cdot h} - v (> 0)$ の速度、下流には $\sqrt{g \cdot h} + v (> 0)$ の速度で伝わる。したがって、上流で与えられる状態は下流側の条件に支配される。

一方射流の場合、常流とは逆で、流速が波速より速いために、上流側の条件により下流側の流れの状態が決定されることとなる。

各実験ケースにおけるフルード数の一覧表を表－9.2に示す。

実験では、図－9.13に示すように、水路勾配が1/1000における $H/D < 0.9$ の場合と、水路勾配が3/1000における $H/D < 0.5$ で常流、それ以外の領域及び水路勾配0/1000で射流が発生した。



図－9.13 実験における流れの状態 (常流と射流)

表-9.2 フルード数一覧表

<水路勾配 : 0/1000>

実験ケース	管内水深 (cm)	径 深	F r 数
本実験Ⅰ-1	4.8	2.85	1.53
本実験Ⅰ-2	7.9	4.24	1.46
本実験Ⅰ-3	10.4	5.11	1.34
本実験Ⅰ-4	12.2	5.60	1.38
本実験Ⅰ-5	13.0	5.76	1.35
本実験Ⅰ-6	16.4	6.08	1.22
本実験Ⅰ-7	20.0	5.00	1.63

<水路勾配 : 1/1000>

実験ケース	管内水深 (cm)	径 深	F r 数
本実験Ⅱ-1	5.9	3.35	0.48
本実験Ⅱ-2	8.0	4.29	0.58
本実験Ⅱ-3	10.2	5.07	0.63
本実験Ⅱ-4	12.0	5.54	0.72
本実験Ⅱ-5	13.9	5.01	0.97
本実験Ⅱ-6	16.0	6.08	0.86
本実験Ⅱ-7	17.0	6.06	0.93
本実験Ⅱ-8	20.0	5.00	1.58

<水路勾配 : 3/1000>

実験ケース	管内水深 (cm)	径 深	F r 数
本実験Ⅲ-1	6.0	3.42	0.84
本実験Ⅲ-2	8.0	4.28	0.98
本実験Ⅲ-3	9.9	4.97	1.04
本実験Ⅲ-4	12.4	5.65	1.00
本実験Ⅲ-5	13.7	5.88	1.05
本実験Ⅲ-6	16.1	6.08	1.11
本実験Ⅲ-7	20.0	5.00	1.44

<水路勾配 : 5/1000>

実験ケース	管内水深 (cm)	径 深	F r 数
本実験Ⅳ-1	6.0	3.40	1.45
本実験Ⅳ-2	8.0	4.27	1.51
本実験Ⅳ-3	10.0	5.00	1.59
本実験Ⅳ-4	11.6	5.50	1.52
本実験Ⅳ-5	13.5	5.83	1.40
本実験Ⅳ-6	20.0	5.00	1.56

<水路勾配 : 10/1000>

本実験Ⅴ-1	6.1	3.47	1.89
本実験Ⅴ-2	7.8	4.21	1.90

9.2 流量特性

流量と H/D の関係を表したグラフを、図-9.14に示す。流量は、連続の式 $Q=A \cdot V$ により求められる。流量は、 $H/D=0.6 \sim 0.7$ で若干流量が過大通水されていると考えられる以外は、 H/D の増加とともにほぼ直線的に増加する傾向にあった。また、水路勾配の違いに関わらず、 H/D が満管に近づくにつれ、一定の流量に収束する傾向にあった。また同一水深での流量は、水路勾配が0/1000の場合を除いて、水路勾配が急になるほど大きくなる傾向にあった。

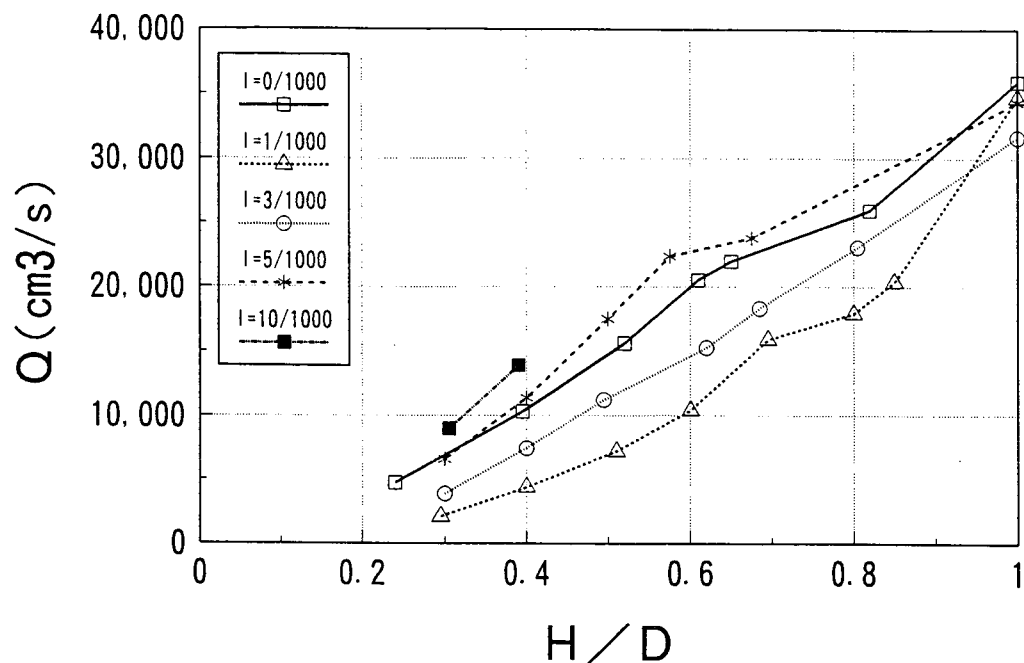


図-9.14 流量特性曲線

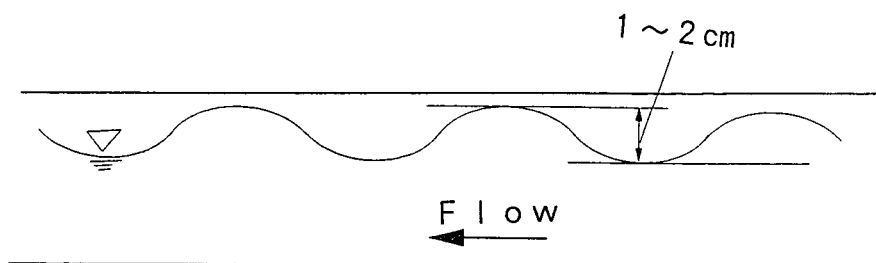
9.3 流況

管路内の流況は、実験装置の規模等の問題もあり、その観察は困難であった。以下に述べるは、実験の合間に流れを見て、とくに気が付いた点・現象について簡単に触れるものである。

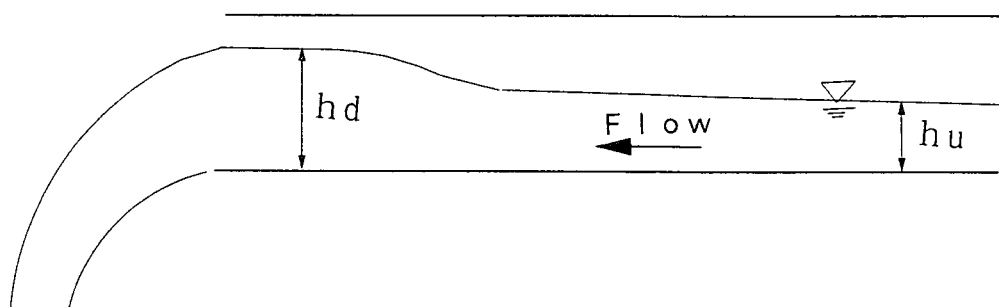
①水面変動

管内水深が小さいときには、水は穏やかに管内を流下した。しかしながら、通水流量が大きくなり、管内水深が満管に近づくと、水面はうねりを発生し始めた（図-9.15参照）。とくに水路勾配が急になると、その現象が顕著に現れ、水路勾配が5/1000や10/1000になると、水位測定が不可能になるくらいにうねりが激しくなった。また、水路勾配が10/1000の場合、管渠最下流の水位が上昇し、スルースゲート出口で発生する跳水にも似た現象が見られた（図-9.16参照）。これは、各実験の動水勾配を見れば分かるが、水路勾配>動水勾配となっており、等流が成り立っていない（不等流）ためであると考えられる。

管渠中央部の流速測定孔は、測定の効率を考慮してスリットが設けてある。スリットは、流下方向に対して垂直に、縦22mm×横200mm×高さ（管頂から）230mmとなっている。しかしながら、このスリットは動水勾配（水面形）に影響を及ぼすことが判明した。管内に流入した水は、閉水路状態で流下するが、このスリット部で瞬間的に開水路状態に変化する。よって、管内の圧力が一時的に解放されることにより、スリット部で水面が上昇する現象が発生すると考えられる。



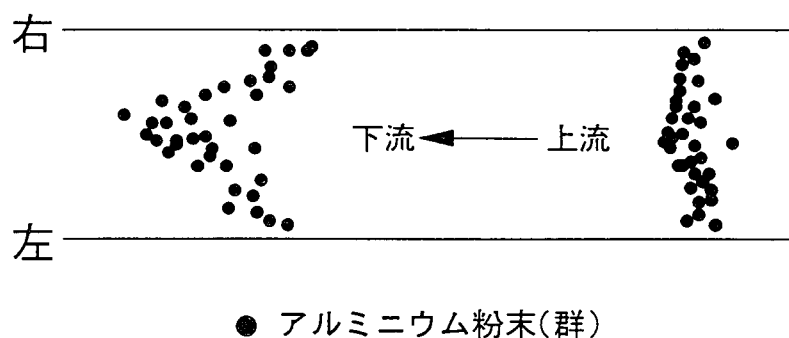
図－9.15 高水深時の管内流況（うねりの様子）



図－9.16 急勾配時の管内流況（下流側の水位上昇）

②水表面流

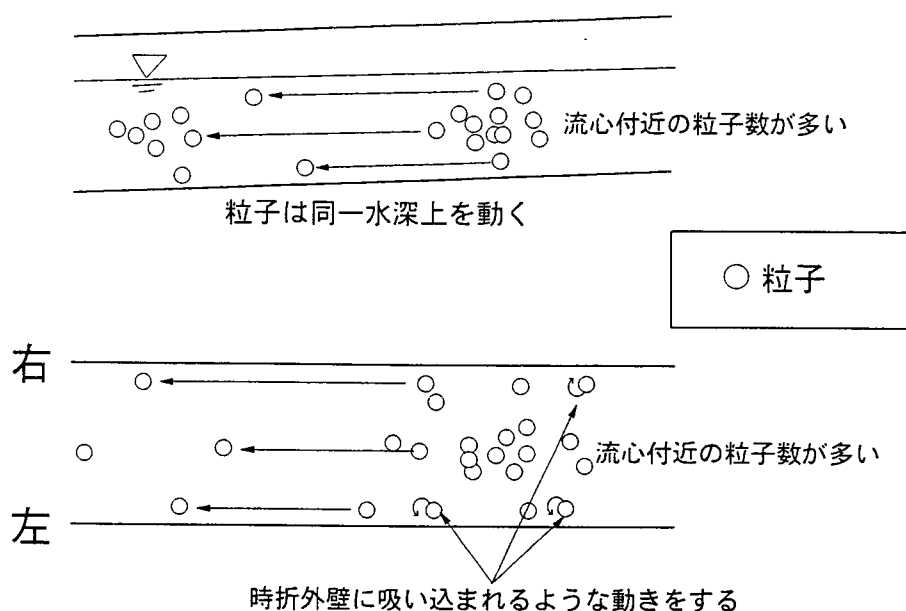
水面の流れの挙動を把握するために、上流からアルミニウム粉末を流した。粉末は、流速の速い中央部を流れるものが多いが、外壁近傍を流下するものも見られた。中央部とその他の部分の粉末流下速度には、それほど明確な（一見して分かるような）違いは見られなかった。しかしながら、水面全幅を一塊で流下していた粉末群は、流下距離を重ねるにつれ、中央部とその他の部分の粉末が徐々に引き離された（図－9.17参照）。



図－9.17 水表面流の様子（アルミ粉末の挙動）

③水粒子の動き

水粒子が、流体中においてどのような運動をしているのかを把握するために、水中比重が1に近い粒子を流下させた。その結果、流心近傍を通る粒子は高速で流下し、底面付近の粒子は緩やかに流下した。粒子は、同一水深を保ちつつ、細かく振動しながら流下する傾向が見られ、渦等による極端な粒子の移動は見られなかった。また粒子は、鉛直方向にまんべんなく分散して流下したが、流れの速い流心付近で比較的多くの数の粒子が流れた。



図－9.18 流水中の粒子の挙動

④水位上昇

実験では、管内水深を2 cmピッチで変化させた。ところが、満管状態に近い、管内水深16 cmや18 cmになると水位設定が非常に困難であった。

水位設定は、管路中央部の水位測定孔で行った。実験開始時には管内水深が、予定していた設定水深とほぼ一致していたが、徐々に管渠最上流から満管になりつつあった。時間の経過とともにその状態が進行し、管内の空気が徐々に下流に押し出される格好となった。しかしながら、管渠最下流で測定している堰流量は安定しており、不定流になっている訳ではないと考えられる。ただし、実験途中でこの現象が発生した場合には、精度上の問題もあり、実験を中断した（現象が発生した水深の実験は行っていない）。

⑤管渠流入口の乱れ

管内の流況を観察するために、管渠上流の高水槽から染料（Flow-Essence）を流した。ところが、管渠への流入口付近で、染料が攪拌され完全混合状態で管渠内を流下した。この理由を含め、流入口で起こりうる現象について以下に述べる。

本実験における流れは、乱流となっており、当然のことながら混合は起こるべくして起きた現象である。

しかしながらそのほかの理由として、流入口における流れの損失も考えられる。流入口の形状によっては、流れに対して大きな損失を与えることが考えられる。流入口の形状としては、一般に、ラッパ形、筒形（単なる接合）、水槽内に筒形が突き出したものの3つ分けられる。本実験で用いた管渠模型では、後者の形状を採用した。高水槽と管渠は、フレキシブル管で接続し、管渠の一部が高水槽内に突き出した形状である。この場合、流入口の損失係数を考えると、実験値等で一般的に知られる0.93～1.00を得ることができる。よって流入口での損失係数は、ほぼ無視でき、流入口が流れに与える影響はほとんどないと考えられる。ところが、流入口付近を観察したところ、管渠への流入直前に水面に渦が発生していた。渦は空気を巻き込むと同時に、流速分布をも変化させると考えられる。よって損失係数の面からは無視し得たとしても、必ずしも流れに与える影響がないとは断言できないと考えられる。

次に挙げるのは、管渠接続部の影響である。管渠1本の長さは何十メートル、何百メートルもあるわけではなく、実験で用いた管渠模型にしる実管渠にしる、数メートルの管渠が多数接続されている。よって、接続面では管渠のズレ等により、流れが微妙に変化することが考えられる。とくに管渠模型は、単にボルト締めただけのものであり、実際、接続部での気泡の発生や筋状の流れの乱れが見られた。

⑥流出口の影響

一般の管渠は、マンホール等で極希に放出形状をとることはあるが、大半は処理場まで管渠でつながれており途切れることはない。実験で用いた管渠模型は、流水を自然放出させているが、これは下流管渠の影響による堰上げや流れの偏りを防ぐためである。しかしながら、流出口を自然放出形状としても、管渠内では背水が発生し水位設定の障害となった。また、実験ケースによっては、流速分布の偏りが見られたが、これは最下流の末端管渠が通水時の振動や圧力により、その位置が微妙にズレたためであると考えられる。これらを考慮すると、測定機器設置場所の下流管渠設置状況は、流れに対する大きな影響力をもちうるということが言える。

以上、流況について得られた簡単な知見を述べた。

流況を観察するにあたっては、染料や金属粉末、微細粒子を使って試行錯誤したが、流況を正確に把握する手段を見いだすことができなかった。よって、流況観察方法の検討を今後行う必要がある。

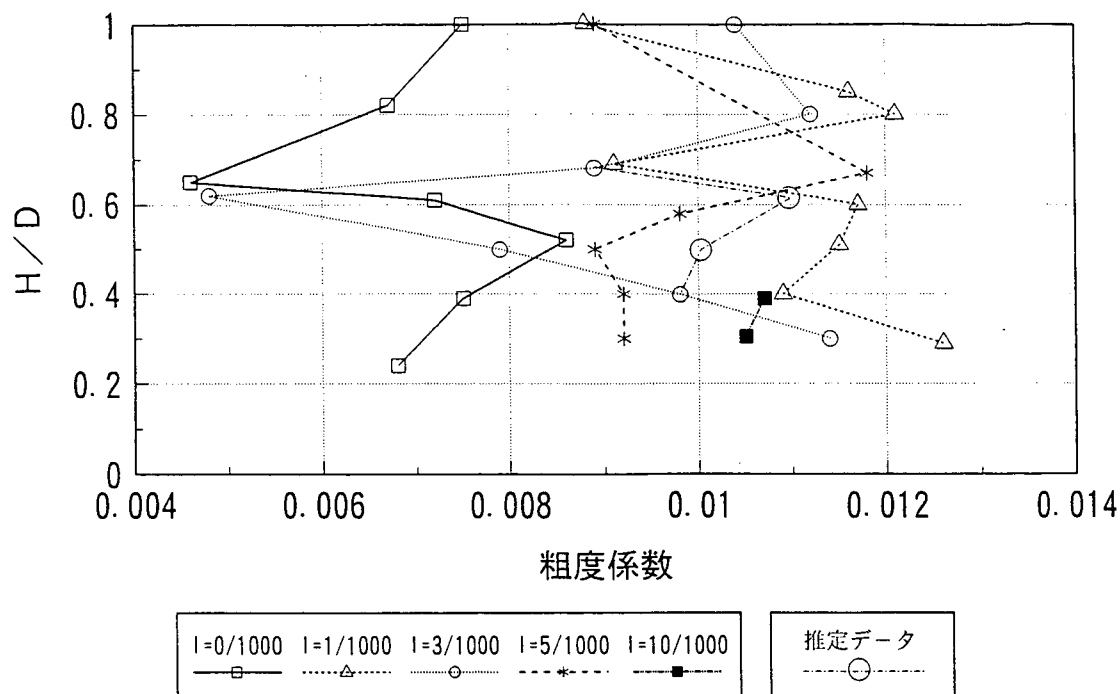
9.4 粗度係数

管路のみならず水路の流れを述べる場合、粗度係数を把握することは欠かすことのできない重要な項目となる。通常、流量の算出時などは、計算の簡便さを考慮し、同一水路における粗度係数を一定とすることが多い。しかしながら粗度係数は、水深により変化することが知られており、より高精度の流量測定を行う場合には、より正確な粗度係数を把握する必要がある。

実験で得られたデータを基に、マンニングの粗度係数を逆算した。実験では、三角堰による流量測定と流速分布から求めた流量の2種類を得た。表－9.3に実験ケース毎の粗度係数一覧表を示す。図－9.19は、粗度係数と H/D の関係をグラフ化したものである。

表－9.3 粗度係数一覧表

実験ケース	管内水深 (cm)	粗 度 係 数		水路勾配
		堰 流 量	流速分布	
本実験Ⅰ-1	4.8	0.0068	0.0070	0 (0/1000)
本実験Ⅰ-2	7.9	0.0075	0.0072	
本実験Ⅰ-3	10.4	0.0086	0.0076	
本実験Ⅰ-4	12.2	0.0072	0.0069	
本実験Ⅰ-5	13.0	0.0046	0.0047	
本実験Ⅰ-6	16.4	0.0067	0.0064	
本実験Ⅰ-7	20.0	0.0075	0.0068	
本実験Ⅱ-1	5.9	0.0126	0.0121	1/1000
本実験Ⅱ-2	8.0	0.0109	0.0109	
本実験Ⅱ-3	10.2	0.0115	0.0109	
本実験Ⅱ-4	12.0	0.0117	0.0112	
本実験Ⅱ-5	13.9	0.0091	0.0097	
本実験Ⅱ-6	16.0	0.0121	0.0112	
本実験Ⅱ-7	17.0	0.0116	0.0107	
本実験Ⅱ-8	20.0	0.0088	0.0081	
本実験Ⅲ-1	6.0	0.0114	0.0105	3/1000
本実験Ⅲ-2	8.0	0.0098	0.0094	
本実験Ⅲ-3	9.9	0.0079	0.0074	
本実験Ⅲ-4	12.4	0.0048	0.0046	
本実験Ⅲ-5	13.7	0.0089	0.0084	
本実験Ⅲ-6	16.1	0.0112	0.0108	
本実験Ⅲ-7	20.0	0.0104	0.0098	
本実験Ⅳ-1	6.0	0.0092	0.0085	5/1000
本実験Ⅳ-2	8.0	0.0092	0.0085	
本実験Ⅳ-3	10.0	0.0089	0.0082	
本実験Ⅳ-4	11.6	0.0098	0.0088	
本実験Ⅳ-5	13.5	0.0118	0.0120	
本実験Ⅳ-6	20.0	0.0089	0.0083	
本実験Ⅴ-1	6.1	0.0105	0.0093	10/1000
本実験Ⅴ-2	7.8	0.0107	0.0096	
粗度係数平均値		0.0094	0.0089	全勾配 勾配0除く
		0.0101	0.0095	



図－9.19 粗度係数と H/D の関係

水路勾配が0/1000以外の場合、粗度係数は水深によって0.009～0.012の範囲で変化することが分かった。水路勾配が3/1000の場合、粗度係数<0.008となるデータが存在するが、これはこのデータを得たときの動水勾配の測定がうまくいかなかったことが起因していると考えられる。仮に、このデータの代わりに動水勾配＝水路勾配としたときの粗度係数をプロット（グラフ中：推定データ）すると、どの水路勾配の場合についても、粗度係数と H/D の関係は同様の傾向を示すこととなった。

H/D が小さいとき、粗度係数は水路勾配により大きくばらつく。 H/D が増加すると、同一水深上の粗度係数は、水路勾配の違いに関わらず近い値をとった。粗度係数が最も高い値となったのは、 $H/D=0.6\sim0.9$ のときであり、満管時には粗度係数は低くなった。

なお、実験における粗度係数の平均値（堰流量から逆算）は、全ケース（30ケース）で0.0094、流れが不等流となった水路勾配0の場合を除いた23ケースにおいては $n=0.010$ となった。

<参考資料：マンニングの粗度係数 n >

水路の種類	粗度係数の範囲	標準値
木 管	0.010～0.014	0.012
コンクリート管	0.013～0.017	0.015
鋼管、鋳鉄管	0.011～0.014	0.013
陶 管	0.011～0.017	0.014
ガラス管	0.009～0.013	0.010
樹脂製管	0.008～0.010	0.009
アクリル管(実験値)	0.007～0.012	0.010

9.5 その他

①測定機器設置状況

実験は、プロペラ流速計を用いて行った。流速計は、流れを妨げないように、胴部を細く、かつ流線型としている。しかしながら実際に実験で使用すると、水表面下の0～1 cmの流速測定に困難であった。その理由として、気泡が流速計シャフト部を通じてがプロペラ部に進入したことが挙げられる。とくに流速計胴部の直上流で空気の大量進入が見られ、空気の一部がプロペラに付着し、測定値に誤差を生じた。

電磁流速計でも同様の現象が見られた。電磁流速計は、胴部が円筒形であり、胴回りはプロペラ流速計よりも太いφ6 mmである。この場合、プロペラ流速計よりも、空気の進入量が多く、水面下0～3 cmでその進入が確認され、空気がセンサー部にまでおよび、誤データを生じる結果となった。

②水温

実験は、実験工程上、夏季と冬季に行った。夏季には24℃近くであった水温は、冬季になると約9℃にまで低下した。流れに影響すると考えられる動粘性係数で見ると、水温25℃で動粘性係数 $\nu = 0.898 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、水温10℃で動粘性係数 $\nu = 1.310 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。つまり、水温25℃に比べ、水温10℃では、約1.5倍の粘性があることが分かる。しかしながら粘性が流れに影響するのは、流速分布の対数則（下式参照）から明らかなように滑面の場合のみである。よって、実験で用いた管渠は、粗面として扱っているため、動粘性係数の影響はほとんど無視し得ると考えられる。

◎流速分布の対数則

$$\text{＜滑 面＞} \quad V_p = u_* \left(5.5 + 5.75 \log \frac{u_* \cdot y}{\nu} \right)$$

$$\text{＜粗 面＞} \quad V_p = u_* \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{k} \right)$$

9.6 実管渠への適用に際しての留意事項

実験で得られた基礎資料を基に、管渠内での流れの現象について述べた。ただし、実験で確認した現象と実管渠での実現象では、管の材質や形状（大きさ）、流下物質（下水）などにより若干異なることが予想される。ここでは、実験で得られた基礎資料を基に、実管渠に対して着目する必要がある事項について述べることとする。

①生物環境を把握する

実験と実管渠の大きな違いは流下物質である。いま、実管渠を下水管として述べると、流下物質となるのは下水となる。下水と実験で用いた水の大きな違いは、粗度係数、粘性、水温、水質、含有物（浮遊物）の有無などである。この内、水質に関しては、流れが物理的要因で変化することを考慮すると、水質は生物あるいは化学的作用に他ならない。よって流れに対する影響は無視できると考えられる。また粘性と水温については、前述したように、流速分布の対数則より、流れに与える影響は無視できることが分かっている。しかしながら下水管の場合には、管内壁に生物による膜（生物膜）が付着することが考えられる。管の粗度係数はほぼ材質により決まるが、生物膜の付着があると材質とは無関係に粗度係数は変化する。よって、実管

渠の粗度係数を決定する際には、管内の生物環境も考慮する必要があると考えられる。

②測定断面の上下流の状況を把握する

流量等の測定をする場合、測定断面の上下流の状況を把握、確認する必要がある。実管渠は、管渠網と呼ばれるように、各地域からの流入が多数有り、また地形によっては曲がりや勾配の変化するところが数多く存在する。もし測定断面の上下流にそのような箇所があった場合、その影響が測定断面に及んでいる可能性がある。よって、これらが各種測定の精度に悪影響を及ぼすとも限らないため、流れが一様となるために必要な管径の25～40倍程度の助走区間の有無などの、測定断面付近の管渠設置状況を的確に把握することが必要となる。

③うねりの影響を考慮する

前述したように、円管内の水面は、管内水深の増加や水路勾配の急勾配化にともなって、より激しく変動する。場合によっては、瞬間的に満管状態になることもある。この現象は、実管渠においても当然ありうる現象であるが、単なる現象として捉えるだけでなく、維持管理上重要な現象であることを認識する必要がある。その意味は以下である。

いま仮に、雨天時における実管渠の水位測定値が、流下能力上危険と考えられる水深に近づいたとする。この時点では、設計上まだ余裕があると考えられるが、これは水位変動を考慮に入れていないためである。すなわち、実際には管渠内の水面において大きなうねりが発生しており、瞬間的ではあるが、下水の流下に危険と考えられる流れの状態になっていることが予想される。この状態が続くと、管渠内の空気の流れが制限されるため、いずれは閉塞状態になることが考えられる。よって、単に水位値のみで管渠内の流下状況を判断することは非常に危険であり、流況及び管渠の敷設状況（水路勾配など）などから管渠内で起きている現象を判断することが必要となる。

④マンホールによる流れへの影響を考慮する

実験において、測定のために設けられた測定孔が、水面勾配に影響を与えたことは、本文 9.3-①で述べたとおりである。管渠模型の測定孔は、測定に必要最小限の大きさで設けられているが、実管渠に布設されているマンホールは、維持管理の面から、作業員が作業できる程度の大きさを確保している。よって、実験で見られた以上の水面変動及び挙動が発生する可能性があると考えられる。また何らかの測定機器をマンホールに設置して測定を行う際には、その周辺で発生している流れの現象を、管渠敷設状況と比較しつつ十分に把握し、その状況下における適正な測定方法を選択することが望まれる。

※巻末の参考資料(4)に、マンホールにおけるエネルギー損失の計測に関する研究成果を示す。

<参考文献>

- 1) 「水理公式集」、土木学会
- 2) 「明解水理学」、日野幹雄

第10章 流量測定方法の検討

第10章 流量測定方法の検討

ここまでは、自由水面流から満管流まで変化する管渠内の流れについて、水理実験を通して得られた知見を述べてきた。ここからは、第1章でも簡単に触れた流量測定方法の現状について、得られた知見を基に、複雑な流れを有する下水管渠内の流量を把握するにはどういった方法が適しているかを、既存の方法と比較しながら検討することとする。

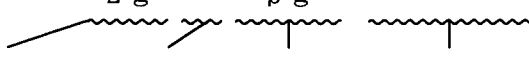
10.1 流量測定方法の原理と特徴

流量測定方法には種々のものが考案されている。それぞれ、測定原理や測定項目、適用条件（水理条件と設置条件など）が異なり、有している特徴も様々である。

ここでは、流量測定方法を測定原理によって分類し、特徴などについて簡単に記した。

(1) ベルヌーイの定理

力学におけるエネルギー保存則を流体に応用させたもので、定常流かつ粘性のない流体にのみ用いられ、次式で表される。

$$\frac{V^2}{2g} + Z + \frac{\rho}{\rho g} = E (=const)$$


速度水頭 位置水頭 圧力水頭 全水頭

上式は、定常流の管路における任意の断面について全水頭Eを考えると、いかなる断面においてもE値は一定となることを表している。

実際の流量測定にこの原理を用いる場合、管路途中に絞り部を設け、流体の流れによって生じる絞り前後の圧力差を測定する。管路を絞ることで、その絞り部を通過する流体の流速が増加し、ベルヌーイの式により圧力が減少する。よって、絞り前後の圧力差と流量には一義的関係が成り立ち、流量が算出できることになる。ただし、管路途中に絞り部を設けることは、大規模な工事を必要とする、測定場所が限られる（同一地点での測定のみ適用）などの欠点をもつ。

・測定方法の代表例～絞り流量計、面積流量計、ベンチュリ計、フリューム

(2) 運動量の法則

ニュートンの運動方程式（ $F = m \cdot dv/dt$ ）を書き換えた運動量保存則を原理に用いている。流量測定に適用する場合は、流体の流れ方向を、曲管や遮水板などを用いて物理的に変化させることにより、流体がもつ運動量を検出して、水位、圧力、流速などに変換し、流量を求める方法が取られる。測定場所に直線部を有する必要があるため、曲管部を利用した測定が可能である。

・測定方法の代表例～ベンド管流量計、ループ管流量計、動圧板流量計

(3) Faraday（ファラデー）の法則

ファラデーの法則は、電気伝導体が電磁場を通過するとき、起電力または電圧が伝導体に誘起され、そ

の量は導体の速度に比例し、このときの起電圧は導体の速度と磁場の方向に相互に直角である、というものである。誘起電力は流体の流速に比例（ $E = Kp \cdot V$ ）するので、誘起電力を検出すれば自ずと流速が分かることとなる。流量は、平均流速と流水断面積の積で表されるが、上述の測定流速は点流速であるから、流量を求める際には、補正係数を与えることにより点流速を平均流速に換算する方法が取られる。

実際の流量測定では、管渠内の流体が導体となる、電磁場は、管渠周囲に巻かれたコイルでつくられる。起電された電圧は、管路壁に設置された電極で測定される。管内部に流れを阻害するセンサー等の設置は必要ないので、流れを乱すことなく流量測定が可能である。

・測定方法の代表例～電磁流量計

（４）ドップラー効果

ドップラー効果とは、周波数の変化を利用したもので、流水中の気泡や浮遊物の粒子に一定周波数を投射し、粒子により反射された超音波を受信することにより流速を算出するものである。よって、諸粒子を多く含む下水の流れを測定するのに適しており、しかも精度のよい計測値が得られる。しかしながら超音波を投射するセンサーを、管内部に設置する必要があるため、流れを阻害する、ゴミや土砂が堆積する等により正確な流量を把握することができないなどの短所を持ち合わせている。また算出した流速は、平均流速に換算する必要があるが、算出流速がどこの流速を測定したのかが分からないため、換算時の補正が難しい。

・測定方法の代表例～超音波式流量計

（５）冷却・加熱作用

流体中におかれた熱源の温度変化を検出することにより、検出値を平均流速に置換し、流量を測定する方法である。

・測定方法の代表例～熱式流量計

（６）重量・体積

流体を升などの容器で採取し、容器の容積や採取重量から流量を測定する方法である。

・測定方法の代表例～容積流量計、（マス式雨量計）

（７）堰式

三角堰や四角堰を管路途中に設置し、堰の越流水深と流量の関係式から流量を算出する方法である。堰の形状により関係式は異なるが、流量係数が一般化されていれば、簡単に高精度の流量を算出できると考えられる。しかしながら、管路途中に堰を設けることは、設置スペースの確保が困難である、流下阻害につながるなどの問題を抱えている。

・測定方法の代表例～堰式流量計

（８）トレーサー法

トレーサー法には、化学トレーサー法と放射線トレーサー法がある。

いずれの場合も、流量の測定方法は、一定量の化合物または放射線物質を連続的に投与し、十分混合された下流側でサンプリングし、濃度の測定を行うものである。流量は、トレーサー投与前後の濃度変化によって、次式により求められ、

$$Q_s = \frac{Q_t(C_t - C)}{C - C_s}$$

ここに、 Q_s ：流量、 Q_t ：トレーサーの流量、 C_t ：注入トレーサー濃度、 C_s ：トレーサー注入前の水中トレーサー濃度、 C ：トレーサー注入後の水中トレーサー濃度 である。

・測定方法の代表例～化学トレーサー法、放射線トレーサー法

(9) Hagen-Poiseulli (ハーゲン・ポアズイユ) の法則

円管の層流流れは、Hagen-Poiseulli流れと呼ばれる。これは、円管内の流速分布が、対数則で表され放物線を描くというものであり、一般的に次式で求められる。

$$Q = \left(- \frac{dp}{dx} \right) \cdot \frac{\pi a^4}{8 \mu}$$

ここに、 Q ：流量、 $(-dp/dx)$ ：圧力勾配、粘性係数： μ 、 a ：管半径 である。

・測定方法の代表例～層流流量計

ここに紹介した流量測定方法の原理は、既存の方法の全てではない。また、紹介した中には、小規模水路実験のみに使用される方法や、現在は主流を離れほとんど使用されることのない方法も含んでいることを、ここに付け加える。

10.2 流量測定方法に求められる要望

(1) 測定目的に関する要望

①測定対象施設

本論では、下水管渠の流量を測定することを目的としており、測定対象施設は下水管渠である。

下水管渠には、円形や卵形、馬蹄形、矩形、バスケットハンドル形、懸垂線形、ゴシック形、放物線形など様々な形状のものがある。また、その大きさも、小さいもので口径150mm、大きいものでは口径5,000mmにおよび、その形状や大きさの全てに適応可能な測定方法が望まれる。

しかしながら、管渠形状の違いは、管渠内の流れを大幅に変化させる。また、管渠口径も同様に、最小断面から最大断面に至るまで、全て同一精度の流量測定を求めることは難しいと考えられる。

②測定対象物質

下水管渠を流下する物質、それは下水である。下水は、油分や気泡、固形物、ゴミ、泥・砂利などが含まれる特殊な水であり、それは地域により多種多様である。よって、粘性や水温、濁度や水質などのような、生化学的に水道水と相違する流体を測定することが可能な方法が望まれる。

③測定対象流れ

下水管渠内の流れは、自由水面流からサーチャージ流にまで変化する。また雨天時などには、各地からの流入下水等により、管内の水位変動が激しくなり不定流が発生する。さらには、管渠底部に堆積物がある場合や、ゴミなどが管内部に付着した場合は、流れに偏流や渦を起こさせる原因となる。よって流量測定は、あらゆる流れの状況下における測定を想定する必要がある。

④測定場所

ここで述べる測定場所は、あくまで測定機器の設置場所であり、測定のための作業員等が待機する場所ではない。本論では、下水管渠の流量測定を前提としている。よって測定場所としては、下水管渠内もしくはマンホール、または特別に設けた計測室等が考えられる。しかしながら、オープンスペースの確保が困難な時世ということもあり、流量測定も省スペース化が望まれるのは言うまでもなく、流量測定のために新たに計測室を設けること、管渠の一部を大幅に改造する等の工事は避けることが望ましい。

(2) 測定機器に対する要望

測定機器は、測定方法により測定項目が違ってくため、一概に性能や構造などについて述べることができない。よって、ここでは全ての測定機器に共通に当てはまる項目について述べることとする。

①機器の構造

・形状

(1)－④で述べたように、測定場所の省スペース化を考慮した場合、設置されるべき測定機器も、より小さい方が望ましい。また、機器の形状も、接触型の場合は、管渠内の流れを阻害しない、障害物と成り得ないものがよい。非接触型であれば、流れへの影響を考慮に入れる必要はないが、よりコンパクトなものがよいと考えられる。

・維持管理（メンテナンス）

維持管理は、常に正確なデータを継続的に得ることを目的に行われる。管渠内に測定機器を設置した場合、下水中の流下物により、機器の設置位置がずれたり、センサーが付着物により誤作動することが考えられる。このような状況が発生すると、正確な管内情報が得られないばかりか、場合によっては誤情報に左右されることにより、下水処理に混乱を招くことにもなりかねない。よって、より高精度のデータを得続けるためにも、測定機器設置後の維持管理が非常に重要となる。

流量測定方法の大半は、電気式の測定機器が用いられる。流量計や水位計、流速計、圧力計などがそれぞれある。人力によって流量を測定する方法も考えられるが、多岐分野に広がりを見せる下水処理事業や、下水道将来性等を考慮すると、中央管理システムによる一括情報収集が望ましく、電話回線を利用したデータ取得や各種機器の自動管理・制御が一般的である。電気式の場合、故障の原因としては、停電や漏電、バッテリーあがりによる機器停止、腐食や流下物によるセンサー部の破損等が考えられる。維持管理としては、事故発生後、直ちに故障の旨を連絡・通報されるような体制が望ましい。また、機器自体の修理が容易であれ

ばなお良い。さらには、機器の故障等が起きないように、また正確なデータを得るために、普段からの保守点検を行うことが重要となるが、管渠内の測定機器の設置状況が即座に確認できる、点検がし易い、故障が少ないなどという面も、測定機器に求められる強い要望といえよう。

・駆動方式

測定機器には電気式のものが多く用いられる。電源は、電力会社による電気供給を受ける場合とバッテリーや発電機などの単独で電気を発生させるものを使う場合が挙げられる。

ポータブル性を重視するならば、持ち運びが便利なバッテリー式が良いと考えられる。ただし、維持管理を怠るとバッテリーあがりにより、測定機器が初期化され誤データが発生したり、またバッテリーの置き場所の確保等が問題視される。

電力会社から電気供給を受ける場合、停電などによる機器停止の可能性は極めて低いと考えられ、安定した測定が行える。しかしながら、測定したい場所の全てに電源元があるとは限らないため、測定箇所が限定されることが考えられる。また、電源を得るための工事等が必要となり、工事費が嵩むと考えられる。

駆動方式については、各々一長一短であり、流量測定の目的により選択するのが望ましい。一例を取ると、長期にわたって同じ地点の流量を持続して測定する場合には、電力会社の電気供給を受けた方が良い。また、短期間、あるいは1度に幾箇所の管渠について流量測定を行う場合にはバッテリー式のものが効率良いと考えられる。

②精度

流量を求める方法には様々な方法があることは、前述したとおりである。どの測定方法を例にとっても、流量を1次的な解として得ることは難しく、一般的には、水深や流速、圧力変化などを求めることで、流量に換算する方法が用いられる。より高精度の測定を目指す場合、測定項目を流量算出のために必要なファクターに変換する作業が最も重要なポイントとなる。この変換作業が、定かな根拠が存在しない経験値や簡単な実験のみで得られた実験値に頼ったものであったり、結果のみにとらわれ理論と相反した方法を採用したものであったり、置換や仮定の繰り返しにより遠回しに流量を算出する場合、精度は大幅に低下する。高精度のデータを得る場合は、正確な実験と、それを裏付ける理論があって初めてなりたつ。よって流量測定には、理論的かつ簡潔な算出過程を原理としたものが望ましい。

③耐食性

下水には、腐食性の物質が溶解している場合がある。この場合、測定機器として、測定対象となる下水に接触するセンサー部などに、電子部品や、腐食防止加工の施していない部品を使用すると、正確なデータが得られないだけでなく、機器自体が腐食により損傷する恐れがある。よって測定機器としては、下水に接触しても問題のない強耐食性のもの、もしくは下水と接触することのない非接触型のものが望ましい。

④耐久性

下水の中には、油分や腐食性物質などの液体の他に、ゴミや排泄物、泥・砂といった固形物が多く含まれ

る。これらが下水管渠内を流下した場合、管渠途中に障害物があると、その障害物によって固形物が捕捉され易くなり、固形物の堆積や停滞、最悪の場合には管渠の閉塞が起り得る。そこで考慮すべきことは、流量測定のための測定機器も、この障害物に成りかねないということである。とくに測定機器を管渠内に設置し、下水と接触して計測を行う場合には、測定機器に固形物が接触、衝突する可能性が高い。このような状況が発生すると、管渠の流下能力に影響を与えるばかりか、正確なデータがとれない、測定機器が破損するなどの2次的、3次的な問題が起こることも考えられる。よって測定機器は、流下物に対して影響の少ない形状をしたもの、あるいは非接触型のものが望ましい。

⑤操作性

測定機器を操作する場合、遠隔操作タイプと直操作タイプが考えられる。遠隔操作タイプは、電話回線等を利用する方法であり、測定場所を離れていても、任意の時刻に、自動的に流量が測定可能なものである。一方、直操作タイプは、作業員が現場で直接測定機器を操作する方法である。測定目的により、いずれのタイプが適しているかは判断に困るが、測定の安全性や効率を考えると、大量のデータをより早く正確に収集でき、かつ遠隔操作が可能なものが最もよいと考えられる。

施工性にも関連するが、測定機器がより軽量化かつコンパクト化されれば、直接操作を行う場合やメンテナンスを行う場合に操作性が向上すると考えられる。

⑥価格（コスト）

価格を、全価格＝機器価格＋設置費と表現し、機器本体にかかる費用を機器価格、機器の設置に係る工事費用などを設置費とする。例えば、堰式の流量測定方法を考えた場合、全価格に占める堰や測定機器（水位計など）自体の価格はそれほどでもないが、堰を設置するために必要となる測定用管渠や計測室の設置費は莫大な金額となり、流量測定に至るまでに多大な労力と時間を消費する。反面、流量計などに見られるように、センサーを取り付けるだけの機器は、全価格に占めるそのほとんどが機器価格となるため、より短い工期で簡単に流量測定を行いたい場合には効果が高いと考えられる。しかしながら、市販されている現在の流量計は高価なものが多い一方、必ずしも正確な流量が把握できるとは限らない。よって、安価な測定機器を用いて簡単に測定できる方法があればいいことはない。

⑦拡張性

測定機器を、単なる測定ためだけのみに使用するのはいらない。できることなら、機器自体に拡張性を持たせ、より有効に使用されることが望ましい。

一例を挙げれば、測定後のデータ処理の一体化である。データ処理方法としては、電話回線を通じてデータを送信する方法や、測定機器自体にデータを蓄積する方法、人為的にデータを収集する方法が挙げられる。測定目的により方法の有効性は異なるが、情報処理のし易さや、事故等発生時のデータ消失、測定作業の簡便化などを考慮すると、データを溜めることなく常時情報が送信されるような方法は高く評価される。このようなデータ処理機能が、測定機器と一体化されれば、より効率的な測定が行えると考えられる。

⑧施工性

下水管渠は、そのほとんどが地中に埋設されている。測定機器を設置する場合、管渠の部分改造や計測室増設を必要とする流量測定方法を採用すると、大規模な管渠工事が行われる。その場合、下水の遮断、仮設管の据え付け、交通規制等、周辺住民の生活に影響を与える。よって、測定機器を設置する場合には、短時間で作業が完了する、あるいは周辺住民の生活に迷惑をかけることのない設置方法が望まれる。また、測定機器についても、設置時の安全性を考えると、軽量かつコンパクトなものが望ましい。

⑨測定の効率性

測定機器を選択するにあたって、測定の効率性は無視できない項目である。いかに高精度の測定機器を用いたところで、1回の測定に莫大な費用や時間、人員を費やすようでは、実際の流量測定に適用は不適切であると考えられる。よって、より効率の良い測定を行うには、求める精度や測定にかかる制約条件(測定場所・人員・費用など)を十分に把握する必要がある、測定機器はそれら測定にかかる諸因子との関係が明確であるものが望ましい。

10.3 流量測定方法の検討

10.1では、各種原理を用いた流量測定方法を紹介した。その流量測定方法に、下水管渠という枠組みの中で、測定に対して加わる10.2で述べたような測定方法への要望を加味すると、条件を満足することのできる測定方法は限られた数に絞られると考えられる。

ここで、流量測定方法の原理と、測定方法に対する要望を照らし合わせながら、求められる流量測定方法の全体像について考えてみる。

①測定項目

流量を把握するための測定方法としては、連続の式を用いることが、最も一般的かつ確実な方法である。したがって、式中に含まれる水位及び平均流速を正確に求めることが、より精度の高い流量を把握することにつながると考えられる。しかしながら、これまでに述べてきたように管渠内の流れは複雑であり、正確な水位や流速、とくに平均流速を得ることは難しい。平均流速を得るには、流水断面における、よりたくさんの流速データを収集し、それを平均化すればよいが、流量変動の激しい下水管渠では、1流量の算出に長時間をかけることは精度の低下につながる。よって、精度の高い流量測定を目指すには、瞬間的に正確な平均流速を算出する必要がある。

②測定機器

測定項目を、水位・平均流速に限定して考える。

水位については、管渠内での水位変動が考えられるが、流速測定と違い、測定結果を直接公式に代入が可能であり、また測定自体もそれほど難しくない。よって、ここでは主に平均流速を算出するための流速計について要点を述べる。

現在、様々なタイプ流速計が、各メーカーから販売されている。前述したように、下水管渠に適した機器

を考えると、大規模な工事の必要が無く、単体で管渠に取り付けられる機器、また下水と直接触れることのない非接触型が望ましい。加えて①で述べたように、瞬間的に平均流速が把握できる機器が望ましい。

以上のように、下水管渠に適した流量測定は、水位および平均流速の測定により求める方法がよく、流速測定に使用される機器性能および平均流速測定方法が重要なポイントである。

しかしながら平均流速を、直接かつ瞬間的に算出することは困難であり、特に測定機器に関しては困難を極める。そこで現在では、正確な平均流速の把握する手段として、間接的に平均流速を算出する方法が一般的に広く用いられており、また下水管渠での測定上の制約を考慮した種々の測定方法が研究されている。よって次に、平均流速算出方法（換算方法）について述べることにする。

10.4 平均流速算出方法の概要

任意の点の流速を、平均流速に換算する方法は種々考案されている。ここでは、各種算出方法（換算方法）について紹介する。

（１）点流速測定法

管渠内の流量を求める方法としては、流量 Q を流水断面積 A と平均流速 V_m の積で表す連続の式がある。ここで流水断面は、水路形状と水深から直接的な把握が可能であるが、平均流速は間接的に把握しなければならない。そこで、山本らは、点流速測定法は、あらかじめ定めた位置における点流速 V_p を測定し、点補正係数 K_p を乗じて平均流速を算出する方法を提案した。点流速 V_p を測定する点は、管渠中心を通る鉛直線上の底から $0.1D$ （ D ＝管径）である。この方法は、流下物の影響や大規模な測定設備スペースを考慮する必要が少なく簡単に流量が把握でき、簡易な不明水調査及び管渠破損個所の推定、ポータブル的な（不定点）流量調査に役立てることができると考えられる。

点流速測定法の測定原理を水理学的に導くと以下の通りとなる。

点補正係数 K_p と点流速、平均流速の関係は次式で表される。

$$V_m = K_p \cdot V_p \quad \text{ゆえに、} K_p = V_m / V_p \dots\dots\dots (1)$$

管渠内の流速分布が、対数則で表されると仮定する。いま測定対象としているのは下水管渠であるため、粗面を考えると、流速分布は対数則により次式で表される。

$$V_p = u_* \cdot (8.5 + 5.75 \log \frac{y}{k}) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u ：点流速、 u_* ：摩擦速度、 y ：点流速測定水深、 k ：粗度高、である。

式(2)を平均化し、平均流速公式の形として表すと、

$$V_m = u_* \cdot (Ar + 5.75 \log \frac{R}{k}) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 V_m ：平均流速、 R ：径深、 k ：粗度高、 Ar ：水路形状や水深に関する変数、である。

また平均流速は、マニング公式として次式で表され、摩擦速度 u_* は式(4)となる。

$$V_m = \frac{1}{n} R^{2/3} I e^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 n ：粗度係数、 I ：エネルギー勾配、である。

$$u_*^2 = g R I_e \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度、 R ：径深、 I_e ：エネルギー勾配、である。

いま、式(1)に、式(2)式(3)を代入すると、式(6)を得る。

$$K_p = \frac{u_* (Ar + 5.75 \log \frac{R}{k})}{u_* (8.5 + 5.75 \log \frac{y}{k})} \quad \dots\dots\dots (6)$$

さらに式(4)、式(5)を代入すると、式(7)が得られる。

$$K_p = \{ 1 + n g^{1/2} R^{-1/6} (8.5 - Ar + 5.75 \log \frac{y}{R}) \}^{-1} \quad \dots\dots\dots (7) \quad (\dots\dots\dots \text{式①})$$

この式(7)が、いわゆる K_p 式である。式から明らかなように、点補正係数 K_p はエネルギー勾配（水路勾配）の項を含んでおらず、 K_p が勾配とは無関係であることを示している。

また式中の Ar は、水路形状や水深によって変化し、次式に示す径深と粗度係数の関係で表される。

$$Ar = \frac{1}{g^{1/2}} \frac{R^{1/6}}{n} - 34.5 \log \frac{R^{1/6}}{n} + 5.75 \log C \quad (C = \frac{K^{1/6}}{n} = 0.0417^{-6}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって平均流速は、あらかじめ測定しておいた粗度係数と水位測定から得られた径深、そして Ar を用いて、式(7)から K_p を算出し、その K_p と点流速 V_p を式(1)に代入することにより求まることになる。

なお、ここでは水路を粗面として計算を行ったが、滑面の場合にも同様の K_p 理論公式が得られる。

また、上記とは別の手段で K_p 理論公式を求めることができる。次式に示すカルマンの対数分布則と、

$$V_p = V_{\max} + u_* \left(\frac{2.3}{K} \log \frac{y}{H} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)を平均化した式(10)の平均流速公式（粗面）を関連づけると、式(7)と同様に水路勾配とは無関係な式(11)を得る。

$$V_m = V_{\max} - \frac{1}{k} \cdot u_* \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$K_p = \left[1 + \frac{1 + 2.3 \log \frac{y}{H}}{2.5 + 2.3 \log \frac{R}{k}} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(2) マニング公式

マニング公式は、水路床の粗さを表すパラメータを含む平均流速算定公式であり、一般に次式で表される（単位は $m \cdot s$ ）。

$$V_m = \frac{1}{n} R^{2/3} I_e^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 V_m ：平均流速、 n ：マニングの粗度係数、 R ：径深、 I_e ：エネルギー勾配、である。

この式は、粗面水路の乱流において成立するものである。平均流速の算出には、測定対象となる管渠の粗度係数を事前に得る必要があるが、生物膜の付着や磨耗等や、水深によって粗度係数が増加する（第9章9.4粗度係数 参照）。また式中のエネルギー勾配を得るためには、縦断的に2点の測定を行う必要があるが、実管渠においては水面の挙動が大きく、値が不安定で測定が難しいと考えられる。

(3) 平均値 n 点法

平均値 n 点法とは、鉛直線上に選んだ n 個の測点について、個々の流速を測定し平均化したものを、平均流速として得る方法である。この方法は、Gauss の平均値法に基づいて誘導されており、従来からある縦平均流速算定式より良い精度を得られることが知られている。

従来法の縦平均流速算定式（1 点法～4 点法）は、次式で表される。

$$1 \text{ 点法: } V_m = V_{0.6}$$

$$2 \text{ 点法: } V_m = \frac{1}{2} (V_{0.2} + V_{0.8})$$

$$3 \text{ 点法: } V_m = \frac{1}{4} (V_{0.2} + 2 V_{0.6} + V_{0.8})$$

$$4 \text{ 点法: } V_m = \frac{1}{5} \{ (V_{0.2} + V_{0.4} + V_{0.6} + V_{0.8}) + \frac{1}{2} (V_{0.2} + V_{0.8}) \}$$

流れの断面における、ある任意の鉛直線を考えたとき、その線上の流速分布は、ある放物線（一般に鉛直流速分布曲線という）を描く。この曲線上の流速を平均した値は縦平均流速と呼ばれ、水深の関数として表される。

上記した式は、フィールドにおける実測や実験による経験式に基づいたもの、あるいは経験式を基に数学的に解いたものである。よって、式中の流速測定位置（V の添字、例えば $V_{0.6}$ は 0.6 割水深位置を指す）は、あくまで平均値であり、測定時の状況（風向や風速、水面勾配など）により変化することが考えられる。ゆえに、常に精度良い測定結果が得られるとは限らない。

平均値 n 点法は、経験に頼らずに合理的に縦平均流速を算出しようとするものである。この方法は、鉛直線上の n 点の流速にそれぞれ重み付けをして、重み付き測定流速の総和と、縦平均流速が等しくなるように考案されたもので次式で表される。

$$\text{平均値 2 点法: } V_m = \frac{1}{2} (V_{0.611} + V_{0.789})$$

$$\text{平均値 3 点法: } V_m = \frac{1}{18} \{ 5 (V_{0.113} + V_{0.887}) + 8 V_{0.500} \}$$

$$\text{平均値 4 点法: } V_m = 0.1739 \cdot (V_{0.069} + V_{0.931}) + 0.3261 \cdot (V_{0.330} + V_{0.670})$$

$$\text{平均値 5 点法: } V_m = 0.1185 \cdot (V_{0.047} + V_{0.953}) + 0.2393 \cdot (V_{0.331} + V_{0.769}) + 0.2844 \cdot V_{0.500}$$

いま、管渠の流量測定にこの平均値法を適用させる。この場合、流速の測定点を、管渠の 1 直径上に設ける方式と、管渠全断面に設ける方式の 2 通りが考えられる。

流速の測定点を、管渠の 1 直径上に設ける方式の場合、変数の変換方法や条件の違いにより、数種類の式が得られるが、その最も代表的な公式は次式で表される（式の誘導については省略する）。

$$2 \text{ 点法: } V_m = \frac{1}{2} (V_{0.46} + V_{0.888})$$

$$3 \text{ 点法: } V_m = \frac{1}{18} \{ 5 (V_{0.336} + V_{0.492}) + 8 V_{0.707} \}$$

$$4 \text{ 点法: } V_m = 0.1739 \cdot (V_{0.263} + V_{0.965}) + 0.3261 \cdot (V_{0.574} + V_{0.819})$$

$$5 \text{ 点法: } V_m = 0.1185 \cdot (V_{0.217} + V_{0.976}) + 0.2393 \cdot (V_{0.480} + V_{0.877}) + 0.2844 \cdot V_{0.707}$$

一方、流速の測定点を全断面に設ける方式は、任意の流速曲面の囲む体積の平均が、断面内に適当に選んだ n 個の点での流速の 1 次結合で表せるように、測点の位置とその重み係数とを選んだものである。一般的

には、同一円周上 8 点の流速を測定し、次式で全断面平均流速が求められる（式の誘導については省略する）。

$$\text{全断面平均値公式：} V_m = \frac{1}{4} V_0 + \frac{3}{32} (V_1 + V_2 + \cdots + V_8)$$

ここで、式中の V の添字は、互いに 45° の角度で交わる 4 本の直径上中心から 0.8165 r（r：管渠半径）の距離の流速である。また、同一円周上の 8 点は管壁に近いため、直交 2 直径上の 4 点での流速の平均が、測定 8 点の流速の平均と等しいとすると、次式的全断面平均値公式を簡略化した公式が得られる（式の誘導については省略する）。

$$\text{全断面平均値簡略 5 点法公式：} V_m = \frac{1}{4} V_0 + \frac{1}{16} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$$

ここまで述べてきた平均値 n 点法は、円管における満管流の場合に適用されるものである。よって次に、下水道管渠の流量測定に対応できる、円形断面開水路の平均流速算定式について述べる。ただし、後述の平均流速算定式で適用可能な管内水深（h）は、0 < h < r/2 の範囲であり、h > r/2 の場合の算定式は導かれていないようである。

水面と平行で、かつ円管の中心を通る直線を X 軸とし、この軸と垂直に交わり円管の外側に接する直線を Z 軸とする。上記した方法と同様に、n 点の流速測定地点を考え、各測定値点流速に重み付けをする。その結果、底面に近い測点の項を省略して、以下の平均値 6 点法が導かれる。

$$V_m = 0.2250 \cdot (V_{0.408 \atop 0.500} + V_{1.592 \atop 0.500}) + 0.2566 \cdot V_{1.000 \atop 0.198} + 0.1404 \cdot V_{1.000 \atop 0.842} + 0.0584 \cdot (V_{0.120 \atop 0.059} + V_{1.880 \atop 0.059})$$

ここに、V_m：平均流速、V_{***}：任意の点の流速（***は測定地点を表し、上段が X 軸方向の管径に対する距離割合で、下段が Z 軸方向の管径に対する距離割合）である。

（4）ベキ乗流速分布式

ベキ乗流速分布式は、管壁の粗滑に関わらず成立する流速分布式であり、次式で表される。

$$\frac{V_p}{V_{max}} = \left(\frac{2 y}{D} \right)^{\frac{1}{N}}$$

ここに、V_p：点流速、V_{max}：最大流速、y：点流速測定水深、D：管径、N：乗数である。

乗数 N は、滑面であれば、レイノルズ数の増加とともに増加し、近似的な式として次式が実験的に得られている。また粗面であれば、N 値は滑面より小さくなる。

$$N = 2 \log_{10} \frac{Re}{10}$$

なお、常用のレイノルズ数の範囲であれば（Re ≈ 10⁵）、一般には n = 7 という値が用いられる。

また上式を積分すると、平均流速と最大流速の関係式が得られ、次式で表される。

$$\frac{V_m}{V_{max}} = \frac{2 n^2}{(n + 1)(2 n + 1)}$$

ここに、V_m：平均流速、V_{max}：最大流速、n：乗数である。

10.5 平均流速算出方法の妥当性

ここでは、10.4で説明した各種平均流速算出法の中で、各種算出結果と実験データを比較し、さらに実際の流量測定への適用可能性を考慮し、その妥当性について検討を行うものである。

(1) 点流速測定法の妥当性

点流速測定法は、固定された1点の流速と、水位測定から流量が算出できる方法である。したがって、複雑な測定機器及びその設置スペースが必要なく、また管底に近い位置での測定なので流下物の影響を受けない。よって、測定精度さえ満足できれば、下水管渠の流量測定に適した方法であることがいえる。

(2) マニング公式からの算出の妥当性

マニング公式から平均流速を算出しようとした場合、粗度係数及びエネルギー勾配を得る必要がある。

本実験において、粗度係数は水深によって変化する傾向にあった。任意の水路勾配における粗度係数は、同じ水路勾配の最小値の概ね1.0～1.3倍であり、流量換算時にも1.0～1.3倍の誤差が発生することが考えられる。また前述したように、管渠の粗度係数は、管渠の材質のみで決定されるのではなく、管内水深や微生物による生物膜の生成などの影響により変化することが考えられるため、粗度係数の決定が難しい。

式中に含まれるエネルギー勾配は、2点以上の測定点を必要とし、さらに水面変動の激しい管渠内では正確な値を得ることは難しい。また、エネルギー勾配を推定する手段については、実験的見地から求められた式を提案するといった研究がなされているが、実管渠との整合性についてさらなる検討が必要と考えられる。

(3) 平均値n点法の妥当性

前述したように（第10章10.4(3)参照）、平均値n点法は、満管時及び管内水深が管径/2の場合に適用されるものである。下水道管渠では、主に自由水面流を取り扱うことが多く、管内水深（ h ）は $0 < h < \text{満管}$ の範囲で変化する。また本法は、より多くの流速測定点を設けることにより、より高い精度の結果を得ることができるが、下水管渠内では種々の問題から、より少ない測定項目・測点数が要求される。よって、下水道に対応させる場合には、算出適用範囲の拡大や、測点の減少に伴う精度向上が望まれる。

(4) ベキ乗流速分布式の妥当性

ベキ乗流速分布式は、満管流における実験結果から得られた実験式であり、開水路での実験結果は報告されていない。よって、下水管渠においてこの式を用いる場合は、さらなる実験を行う必要があると考えられる。

<参考文献>

- 1) 「水理公式集」、土木学会
- 2) 「明解水理学」、日野幹雄

第11章 新しい流量算出方法の提案

第11章 新しい流量測定方法の提案

第10章までに、下水管渠内の流れの特性を把握し、さらに既存の流量測定法の現状と問題点について整理することで、下水管渠の流量測定に必要な条件が明確になった。よって、第11章では新たな流量測定方法の提案を目的とした検討を行うこととした。ここでは、新たな平均流速測定法として、1点流速測定法、レイノルズ応力推定法、最大流速測定法の3手法について検討を行う。

11.1 1点流速測定法の改良

平均流速測定方法の1つである1点流速測定法は、下水管渠の流量測定として、適した特徴をもっている。ここでは、その1点流速測定法を取り上げて、測定精度の向上に努めることとする。

11.1.1 測定原理

1点流速測定法の原理については、既に記述した通りである。ここでは、原理を簡略し述べることとする。

1点流速測定法で用いられる点補正係数 $K_p (=V_m/V_p)$ は、次式(a)～(d)より式①を導く。

$$\begin{aligned} \text{(a) 流速分布の対数則 (粗面)} & \quad V_p = u_* \left(8.5 + 5.75 \log \frac{y}{k} \right) \\ \text{(b) 平均流速公式 (粗面)} & \quad V_m = u_* \left(Ar + 5.75 \log \frac{R}{k} \right) \\ \text{(c) マニング式} & \quad V_m = \frac{1}{n} R^{2/3} I e^{1/2} \\ \text{(d) 摩擦速度 } u_* & \quad u_*^2 = g R I e \end{aligned}$$

$$K_p = \{ 1 + n g^{1/2} R^{-1/6} (8.5 - Ar + 5.75 \log \frac{y}{R}) \}^{-1} \dots\dots\dots \text{式①}$$

ここに、 V_p :点流速、 V_m :平均流速、 u_* :摩擦速度、 y :点流速測定水深、 k :粗度高、 R :径深、 n :粗度係数、 $I e$:エネルギー勾配である。なお式中の Ar は、次式に示す径深と粗度係数の関係で表される。

$$Ar = \frac{1}{g^{1/2}} \frac{R^{1/6}}{n} - 34.5 \log \frac{R^{1/6}}{n} + 5.75 \log C \quad (C = \frac{k^{1/6}}{n} = 0.0417^{-6})$$

したがって平均流速は、予め測定しておいた粗度係数と水位測定から得られた径深、そして Ar を用いて、式①から K_p を算出し、その K_p と点流速 V_p を乗することにより求まることになる。

11.1.2 測定精度

ここでは、管渠模型実験の結果を基に、精度について検討した結果を述べる。

用いた実験データは、既に述べた4通りの水路勾配($I = 1/1000, 3/1000, 5/1000, 10/1000 ; 0/1000$ については不等流のため除外した)において、各々管内水深を細かく(約2 cm間隔)変化させた実験の結果である。

図-11.1に、測点0.1Dの場合における、実験で得られた K_p 値(堰流量から逆算した平均流速/点流速:以後「実 K_p 値」)と K_p 式①より得られた K_p 値(以後「計算 K_p 値」)の比較図を示す。グラフ中のマーカーは水路勾配毎の各実験における K_p 値(以下「実 K_p 値」とする)であり、実線は式①から求めた K_p 値(以下「計算 K_p 値」とする)を示す。なお式中で用いる粗度係数 n には、実験における平均値(全23ケース)である $n = 0.010$ を用いた。また参考までに、測点0.2D及び0.3Dの場合の実 K_p 値と計算 K_p 値の比較図を図-11.2・3に示す。

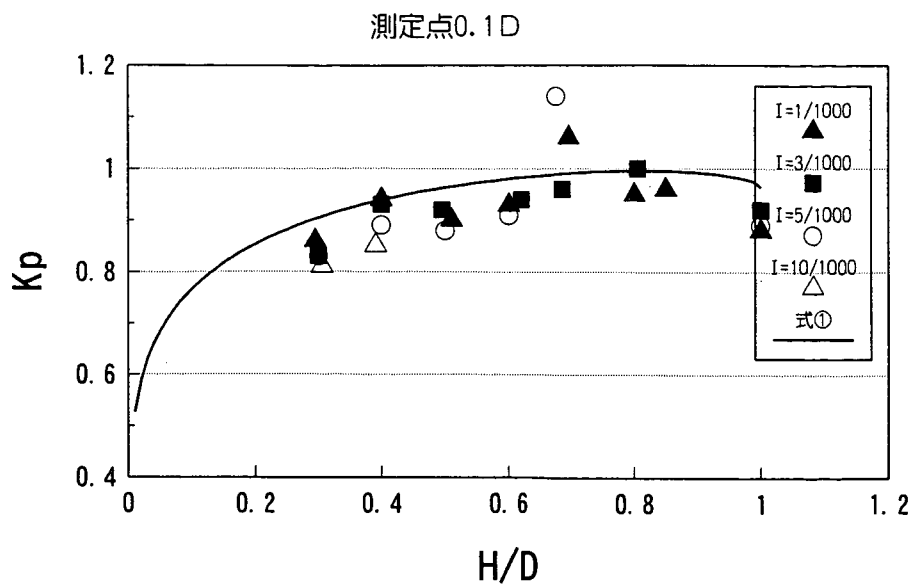


図-11.1 Kp 値の比較図<測点0.1Dの場合>

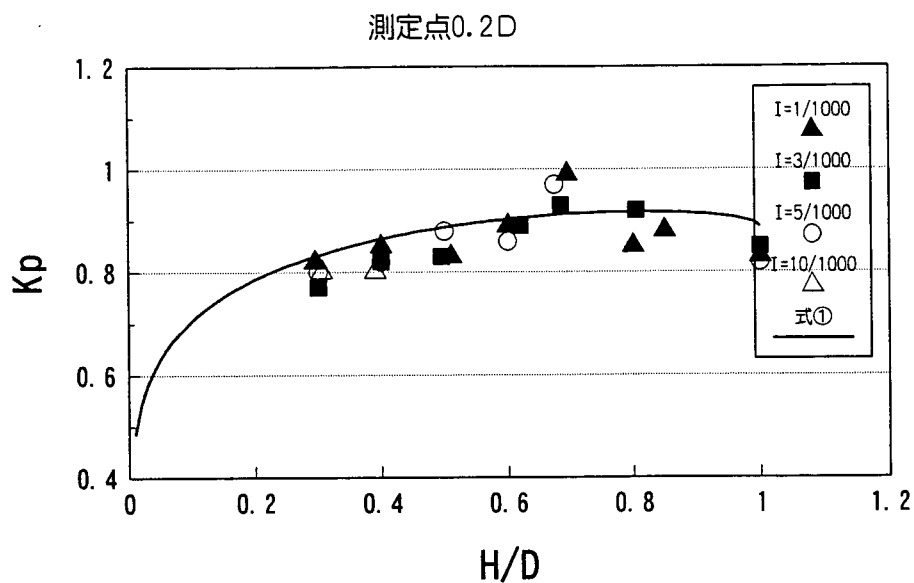


図-11.2 Kp 値の比較図<測点0.2Dの場合>

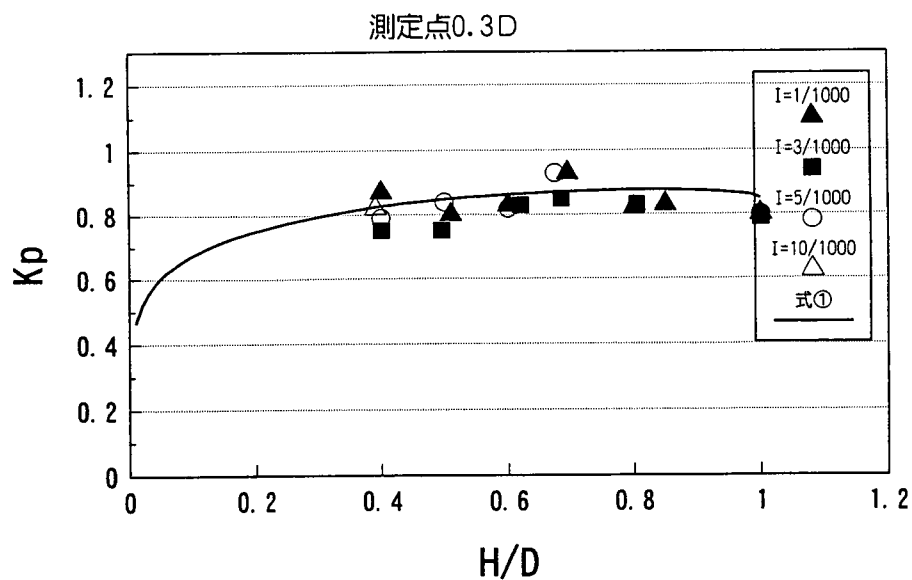


図-11.3 Kp 値の比較図<測点0.3Dの場合>

グラフより明らかなように、Kp式は実Kp値の変動と似た傾向を示しているが一致しない。傾向としては、H/Dが0.7付近で計算Kp値が実Kp値を上回り、その以外の点では下回る結果となった。また、点流速測定点（以下「測点」）が管底から離れると、計算Kp値と実Kp値の差が少なくなる傾向にあった。

Kpの違いを流量の誤差として表すと（最も誤差の大きい測点0.1Dについて述べる）、実際の流量とKp式（計算Kp値）を用いて算出した流量との誤差は、全実験の平均で約7.9%であった（表-11.1 参照）。

また不等流が発生した水路勾配0を除いて考えると、表から明らかなように、各実験ケースにおける管内水深が低い場合（管内水深<6.0cm）において誤差が大きくなる傾向にあり、他の管内水深では誤差との明確な関連は見受けられなかった。

表-11.1 流量誤差一覧表

実験ケース	管内水深 (cm)	流量誤差 (%)	水路勾配
		計算Kp値適用	
本実験Ⅰ-1	4.8	2.6	0/1000
本実験Ⅰ-2	7.9	14.3	
本実験Ⅰ-3	10.4	14.9	
本実験Ⅰ-4	12.2	23.8	
本実験Ⅰ-5	13.0	21.1	
本実験Ⅰ-6	16.4	2.1	
本実験Ⅰ-7	20.0	12.5	
本実験Ⅱ-1	5.9	9.8	1/1000
本実験Ⅱ-2	8.0	3.5	
本実験Ⅱ-3	10.2	8.8	
本実験Ⅱ-4	12.0	5.6	
本実験Ⅱ-5	13.9	5.9	
本実験Ⅱ-6	16.0	5.0	
本実験Ⅱ-7	17.0	4.0	
本実験Ⅱ-8	20.0	10.1	
本実験Ⅲ-1	6.0	12.5	3/1000
本実験Ⅲ-2	8.0	4.2	
本実験Ⅲ-3	9.9	6.9	
本実験Ⅲ-4	12.4	5.3	
本実験Ⅲ-5	13.7	3.1	
本実験Ⅲ-6	16.1	0.3	
本実験Ⅲ-7	20.0	6.9	
本実験Ⅳ-1	6.0	12.6	5/1000
本実験Ⅳ-2	8.0	8.1	
本実験Ⅳ-3	10.0	10.5	
本実験Ⅳ-4	11.6	7.6	
本実験Ⅳ-5	13.5	14.7	
本実験Ⅳ-6	20.0	9.4	
本実験Ⅴ-1	6.1	15.0	10/1000
本実験Ⅴ-2	7.8	12.0	
測定精度平均値		9.1	全勾配 勾配0除く
		7.9	

11.1.3 1点流速測定法の改良

(1) 実現象と対数則の考え方の相違

ここでは、流速分布に関する実現象と対数則の考え方の相違に着目したKp法の改良について述べる。

対数則の流速分布の仮定では、流水断面の流速が最も早いのは水面近くであるが、実際の最大流速は管内水深の4～6割の位置に存在する。よって、従来の対数則から求められた流速分布と、実際の流速分布とは必ずしも一致しない。したがって、このKp法を用いる場合には、実現象に沿った分布形を表す対数則を用いて、新たにKp式を作成、提案する必要があると考えられる。

(2) Kp式の改良

ここでは、式①よりも実際のKp値を正しく表す新たなKp式の作成を目標とし、いくつかの方法でアプローチを試みる。とくに、式①を算出するための流速分布の対数則に着目し、新しい式の誘導を行う。

① ベース式の誘導

ここでは、式①とは式の誘導方法を若干変えた式②を、以下に述べる改良式のベース式として提案する。式①では、流速分布の対数則から得られる平均流速公式(b)からKp式を得るが、平均流速公式の代わりにマニング公式を用いてKp式を導くと、次式の式②が表される。なお式中のkは、粗度係数と粗度高の関係： $n=0.0417 \cdot k^{1/6}$ を用いる。

$$Kp = \{ n g^{1/2} R^{-1/6} (8.5 + 5.75 \log \frac{V}{k}) \}^{-1} \dots\dots\dots \text{式②}$$

式①と式②は式の形は異なるが、同等の精度をもち、描かれるKp曲線も図-11.1～3と同様である。

② 式の改良～最大流速発生位置推定モデルの適用～

式②をベースに、さらに精度良い測定を目指すために、実際の流速分布形に沿うような対数則を用いたKp式を提案する。実際の流速分布形を対数則で表すことは困難であるため、ここでは最大流速の存在する水深より下の部分で、対数則が成立すると仮定し改良を行う。改良には、最大流速発生位置の水深における径深を、従来の径深Rの代わりに与えることが適当であると考えられる。この代わりの径深を仮径深 R_m とすると、対数則の改良としては単純にRが R_m に代わる。式②のKp式も同様で、Rを R_m に代えることになるが、仮径深 R_m を用いるには最大流速の発生位置を把握する必要がある。しかしながら最大流速発生位置を瞬時にかつ正確に測定することは困難であり、また測定できたとしても1点流速測定法の特性上、測定項目の増加などは受け入れ難い。よって、ここに最大流速発生位置推定モデルを作成することとした。

(a) 最大流速発生位置推定モデル① (B市の場合)

図-11.4は、B市の実験から得られた最大流速発生位置推定モデルである。このモデルにおける最大流速発生位置は、 $H/D < 0.3$ の場合は水面、 $0.3 < H/D < 0.4$ では水面から徐々に降下、 $0.4 > H/D$ で水面の5割～6割に存在することとなっている。このモデルを用いてKp曲線を描くと、図-11.5～7となる。どの測点でも、よい一致を示すが、 $0.1D$ の低水位及び各測点の $0.5 < H/D < 0.7$ において、式②によるKp値と実験におけるKp値とで若干のデータの相違が確認される。

最大流速推定モデル(B市)

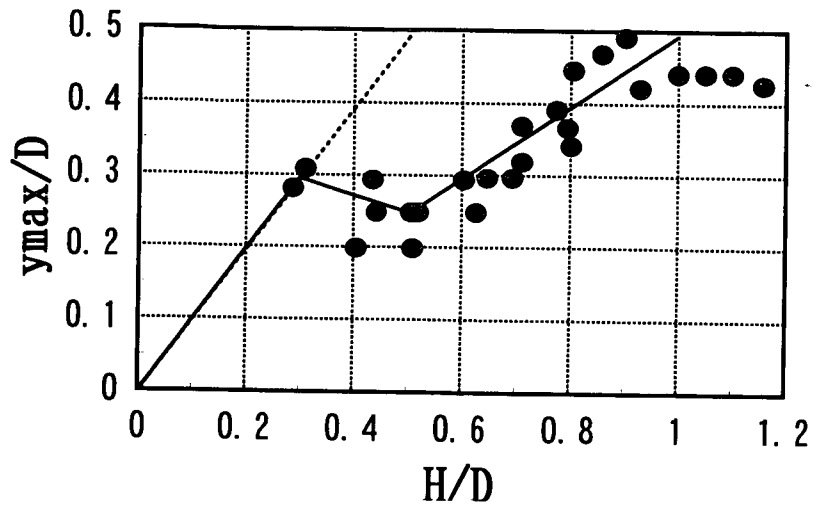


図-11.4 最大流速推定モデル①(大阪市の場合)

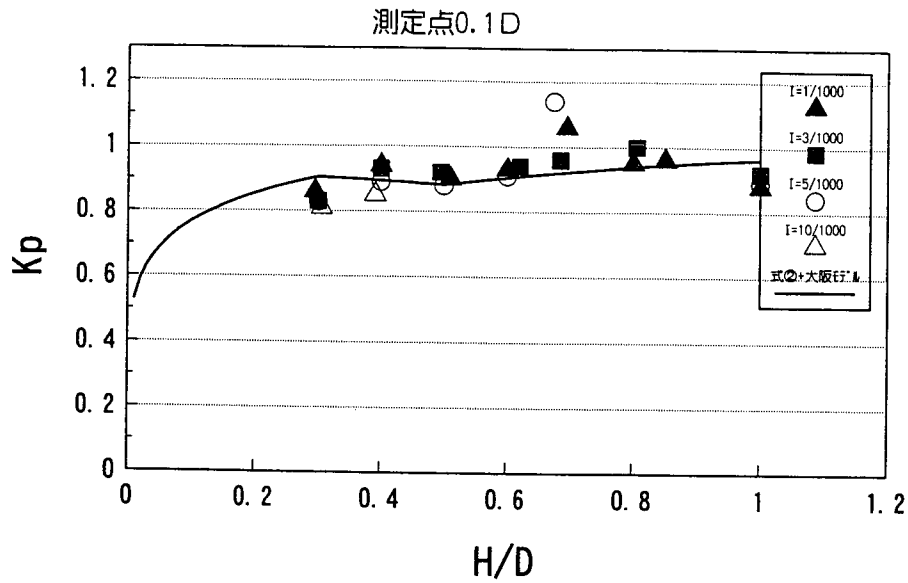


図-11.5 Kp 値の比較図<測点0.1Dの場合>

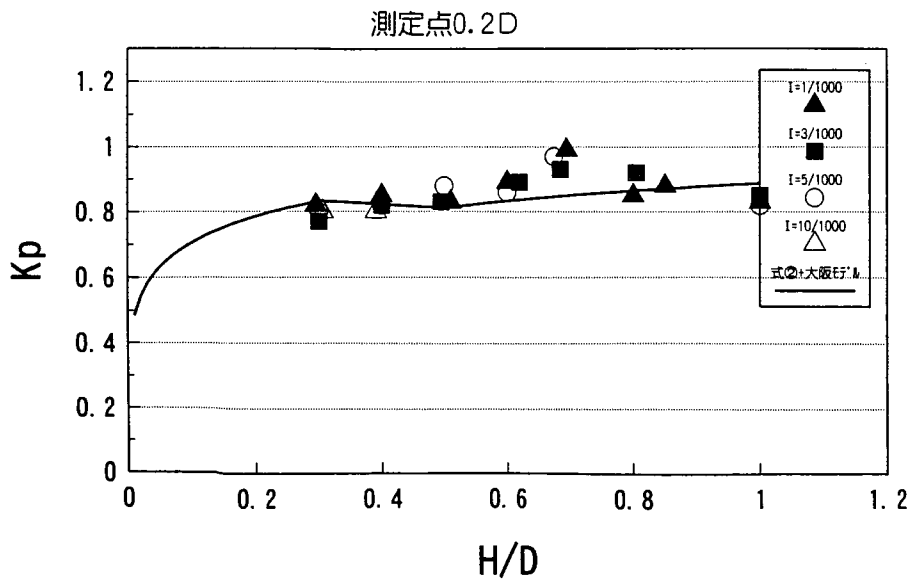


図-11.6 Kp 値の比較図<測点0.2Dの場合>

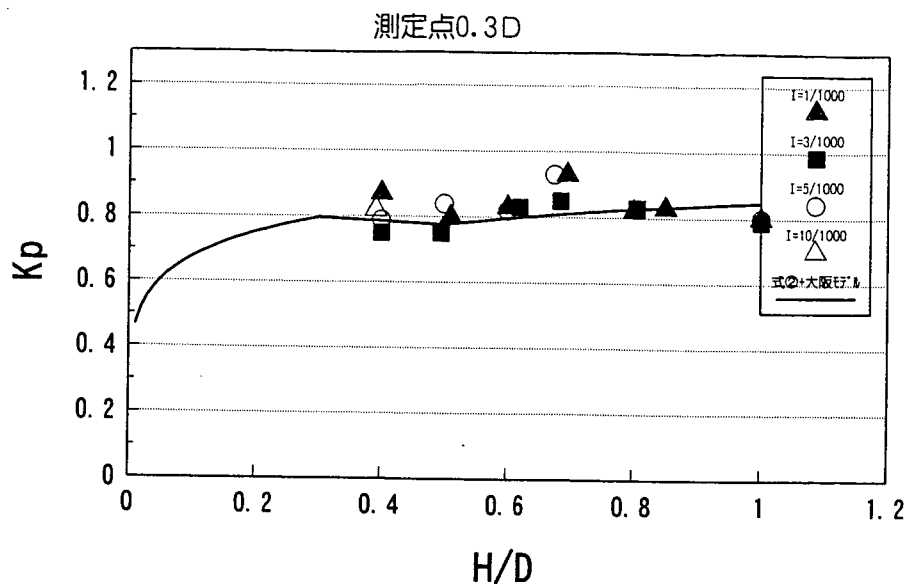


図-11. 7 Kp値の比較図<測点0.3Dの場合>

(b) 最大流速推定モデル②(土研の実験データより)

図-11. 8に示したグラフは、我々が得た実験の結果から作成した最大流速推定モデルである。このモデルにおける最大流速発生位置は、 $H/D < 0.8$ の範囲で、単純に直線として表すと、管内水深の $5/8$ の位置に最大流速が存在することになる。そして、 $0.8 < H/D$ になると最大流速発生位置が下降し、満管時には管径の4割水深位置に存在することになる。

このモデルを用いてKp曲線を描くと、図-11. 9～11に示すKp値の比較図となる。その結果、最大流速推定モデルとして大阪市におけるモデルを用いた図-11. 5～7と比較して、土研のモデルを用いた方が、実Kp値をより適切に表していることが分かる。

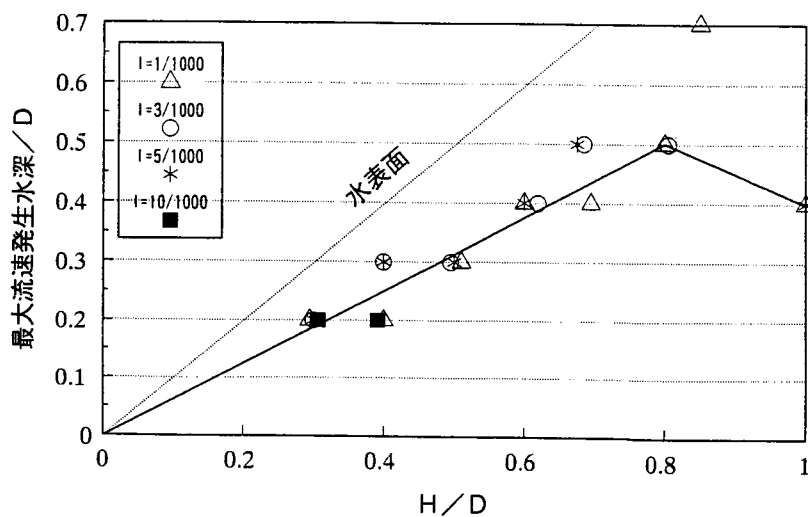


図-11. 8 最大流速推定モデル②(土研の場合)

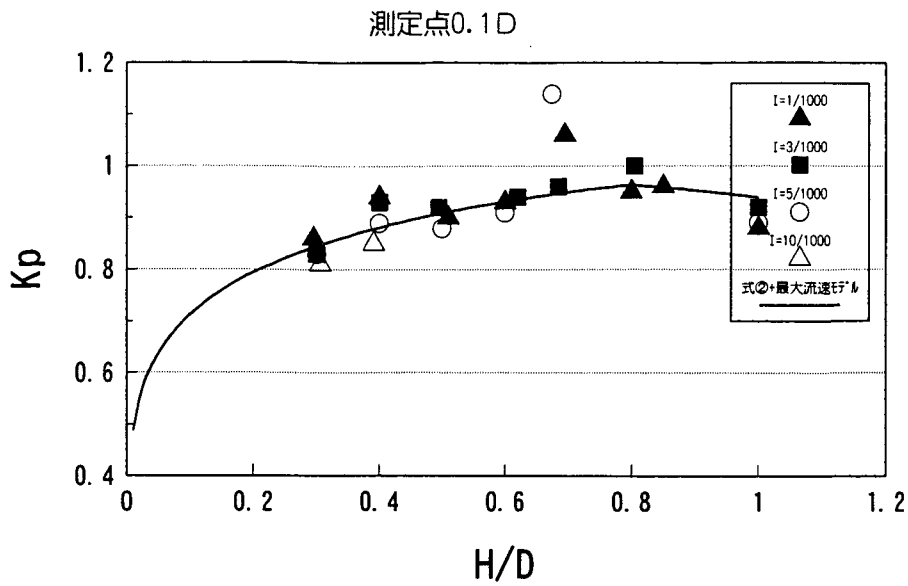


図-11.9 K_p 値の比較図<測点0.1Dの場合>

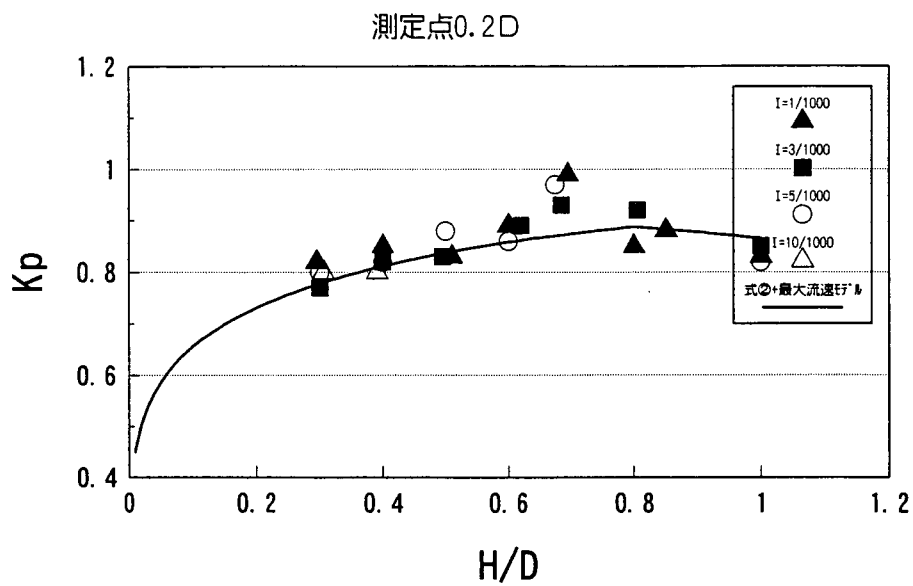


図-11.10 K_p 値の比較図<測点0.2Dの場合>

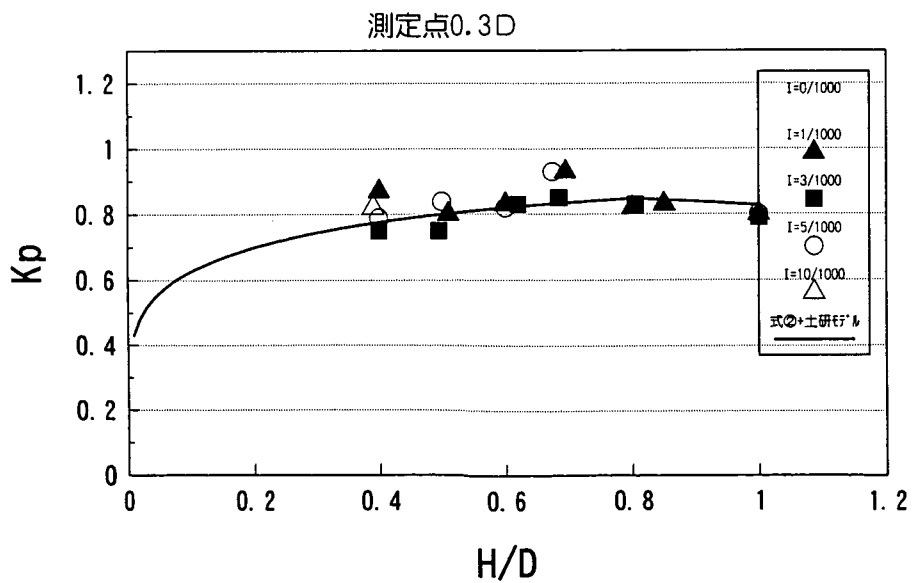


図-11.11 K_p 値の比較図<測点0.3Dの場合>

③従来方法との精度比較

1 点流速測定法の改良として、最大流速発生位置の推定モデルを用いることを提案した。ここでは、それモデルを用いた場合の精度について比較検討を行う。

1 点流速測定法の改良としてモデル①を用いて得られた計算Kp値と点流速（ここでは測点0.1D）から流量を算出し、実験において測定した実流速（堰流量）と比較し、流量誤差を算出した。その結果、従来方法（式①）では実際の流量との誤差が平均で約7.9%であったものが、平均にして約5.7%の誤差での測定が可能になった（表-11.2 参照）。

また同様に、実Kp値との整合性の良い結果を得たモデル②用いたKpの算出式（式②+土研の推定モデル）より流量を算出し、実流量との比較を行った。その結果、従来方法（式①）では実際の流量との誤差が平均で約7.9%であったものが、従来方法の約半分となる平均にして約3.7%の誤差での測定が可能になった。

表-11.2 流量誤差一覧表

実験ケース	管内水深 (cm)	流量誤差 (%)			水路勾配
		モデル①	モデル②	式②適用	
本実験Ⅰ-1	4.8	4.5	12.0	2.6	0/1000
本実験Ⅰ-2	7.9	6.9	5.5	14.3	
本実験Ⅰ-3	10.4	5.4	8.3	14.9	
本実験Ⅰ-4	12.2	35.6	31.6	23.8	
本実験Ⅰ-5	13.0	31.8	28.0	21.1	
本実験Ⅰ-6	16.4	8.2	6.0	2.1	
本実験Ⅰ-7	20.0	10.7	8.4	12.5	
本実験Ⅱ-1	5.9	4.8	1.9	9.8	1/1000
本実験Ⅱ-2	8.0	4.9	6.3	3.5	
本実験Ⅱ-3	10.2	1.9	1.6	8.8	
本実験Ⅱ-4	12.0	3.5	0.5	5.6	
本実験Ⅱ-5	13.9	14.4	11.3	5.9	
本実験Ⅱ-6	16.0	1.0	1.5	5.0	
本実験Ⅱ-7	17.0	1.3	0.0	4.0	
本実験Ⅱ-8	20.0	8.2	5.8	10.1	
本実験Ⅲ-1	6.0	7.7	1.2	12.5	3/1000
本実験Ⅲ-2	8.0	4.2	5.6	4.2	
本実験Ⅲ-3	9.9	3.7	0.8	6.9	
本実験Ⅲ-4	12.4	3.5	0.5	5.3	
本実験Ⅲ-5	13.7	4.8	1.9	3.1	
本実験Ⅲ-6	16.1	5.8	3.4	0.3	
本実験Ⅲ-7	20.0	4.9	2.5	6.9	
本実験Ⅳ-1	6.0	7.8	1.4	12.6	5/1000
本実験Ⅳ-2	8.0	0.1	1.3	8.1	
本実験Ⅳ-3	10.0	0.1	3.2	10.5	
本実験Ⅳ-4	11.6	1.2	1.7	7.6	
本実験Ⅳ-5	13.5	24.2	20.8	14.7	
本実験Ⅳ-6	20.0	7.5	5.1	9.4	
本実験Ⅴ-1	6.1	10.3	4.4	15.0	10/1000
本実験Ⅴ-2	7.8	4.5	2.8	12.0	
測定精度平均値		7.8	6.2	9.1	全勾配 勾配0除く
		5.7	3.7	7.9	

④まとめ

従来の1点流速測定法の基礎となる対数則を改良し、新たな式を提案した。ここでは、対数則で表される流速分布形を、実際の流速分布形に近くなるように、径深を最大流速発生位置の径深に変える方法で行った。その結果、新しい式を用いて算出した補正係数 K_p が、実際の K_p 値と非常に良い整合性を得ることができた。またその結果、流量換算時の測定誤差が、従来の約半分となる約3.7%での測定が可能となった。

以上により、 K_p 法は最大流速発生位置推定モデルの適用により精度の向上が可能である。よって、モデルの最適化が今後の大きな課題となるが、より高い精度を求めるならば、最善策は最大流速発生位置の把握を実際の測定の中で行うことである。最大流速発生位置の測定による把握は、超音波流速計などを用いることにより可能であると考えられる。それは、流水断面中の流速とトレーサーとなる粒子までの到達時間をランダムに測定し、測定された流速から最大流速値を抽出し、同時に最大流速を検出した粒子の位置を、その粒子までの到達時間と超音波の投射速度から距離を逆算する方法である。水位変動の激しい下水管渠では、瞬間流量を測定するのであれば、概ね1～2秒間に1回の測定を行う必要があると考えられる。この時間内に、流速及び最大流速発生位置、水位の各測定に加え、流量への換算を行うには、制御機器における処理能力の高速化が望まれるが、コンピュータの発展が目覚ましい今日では、それほど難しいことではない。

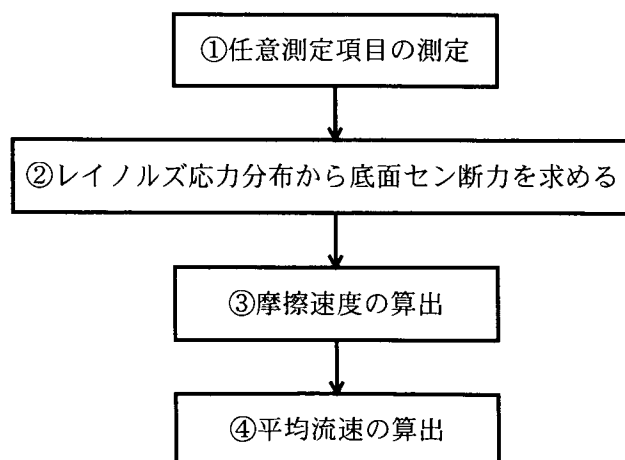
11.2 レイノルズ応力推定法（最大流速発生位置測定タイプ）

11.2.1 測定方法の概要

（1）測定概要（原理）

平均流速を求める一手段として、レイノルズ応力計測法がある。この方法は、レイノルズ応力分布から底面せん断力を算出し、摩擦速度を得、マニング式及び平均流速公式から流量を求めるものである。レイノルズ応力分布を得るには、任意の測点の流下方向と鉛直方向の2成分流速変動分と、それとは異なる測点の2成分流速変動もしくは最大流速発生位置が必要となる。しかしながら、2成分の流速変動分を測定可能な電磁流速計は、下水管渠での使用が困難であり、また管渠内は流れが不安定なため最大流速発生位置も決められた場所に常時存在するとは限らない。そこでレイノルズ分布をモデル化することにより、最大流速発生位置から、底面せん断力が分かるような方法を提案する。

（2）測定フロー



(3) 測定方法

本測定方法の手順を以下に示す。

①任意測定項目の測定

任意測定項目としては、最大流速発生位置の測定及び推定が考えられる。

最大流速発生位置の測定については、超音波流速計などを用いて測定が可能であると考えられる。流水断面中の流速とトレーサーとなる粒子までの到達時間をランダムに測定し、測定された流速から最大流速値を抽出し、同時に最大流速を検出した粒子の位置を、その粒子までの到達時間と超音波の投射速度から距離を逆算する方法である（第11章11.3まとめ 参照）。

最大流速発生位置の推定に関しては、第11章11.3 1点流速測定法の改良の中で示した最大流速発生位置推定モデル図（図-11.8参照）で示したように、水理実験などの結果から回帰式を得ることにより、最大流速のモデル化を行えば、最大流速発生位置が簡単に得られる。

②レイノルズ応力分布もしくは平均せん断力から底面せん断力 τ_{ob} を求める

測定フローから明らかなように、平均流速を算出するためには底面せん断力を求める必要がある。底面せん断力を得るには、レイノルズ応力分布が三角分布を示すことを利用し、多数のレイノルズ応力か、摩擦速度 u_* もしくは最大流速発生位置と任意の点のレイノルズ応力により算出が可能であるが、いま最大流速発生位置は未知であり、また摩擦速度もエネルギー勾配が分からない（測定が困難）ため、底面せん断力も分からない。レイノルズ応力分布は、多数のレイノルズ応力もしくは、任意の点のレイノルズ応力の測定により把握できるが、これらを測定するには多大な労力を要するため、現場での測定には不適である。そこで、最大流速の発生位置からレイノルズ応力分布を得ることとし、ここではレイノルズ応力分布形（管内水深とレイノルズ応力分布の傾きの関係）のモデル化と、平均せん断力と底面せん断力の関係のモデル化による方法を用いることとする。これにより、最大流速発生位置の測定だけで底面せん断力が把握できる。

③摩擦速度の算出

底面せん断力と摩擦速度には次の関係式が成り立つ。

$$\tau_{ob} = u_*^2$$

よって、底面せん断力から摩擦速度が求まる。

また、摩擦速度は次式で表され、

$$u_*^2 = g R I_e$$

さらに、この式を変形すると、エネルギー勾配 I_e が求まる。

$$I_e = u_* / (g \cdot R)^2$$

④平均流速の算出

平均流速を、マニング式もしくは対数則から求められた平均流速公式で求めるとすると、Ⅲで得た式を代入して次式が得られる。

<マニング式の場合>

$$\begin{aligned} V_m &= \frac{1}{n} R^{2/3} I e^{1/2} \\ &= \frac{1}{n} R^{2/3} \{u_*^2 / (g R)\}^{1/2} \\ &= \frac{1}{n} u_* \cdot g^{-1/2} R^{-1/6} \\ &= \frac{1}{n} \tau_{ob}^{1/2} g^{-1/2} R^{-1/6} \end{aligned}$$

<平均流速公式の場合>

$$\begin{aligned} V_m &= u_* (6.25 + 5.75 \log \frac{R}{k}) \\ &= \tau_{ob}^{1/2} (6.25 + 5.75 \log \frac{R}{k}) \end{aligned}$$

11.2.2 レイノルズ応力分布のモデル化

先に述べたように、この測定方法では、レイノルズ応力分布の適正なモデル化、もしくは平均せん断力と底面せん断力の関係のモデル化が必要となる。次に、モデル化を行うために行った水理実験とその結果について述べる。

(1) 実験方法

前述した2種類のモデル化には、レイノルズ応力分布の確認が必要である。正確な分布形が得られないと、適正なモデル化ができないため、実験において、2成分の電磁流速計を用いて、多数のレイノルズ応力を測定することとした。また同時に、管内水深や動水勾配の測定も行った。

実験は、管渠模型(φ200mm, 全長12mアクリル製)を用いた。

水路勾配を1/1000とし、水深を3割水深あたりから約1cmづつ変化させ、低水位から満管状態まで逐次実験を行った。流速(2成分)測定は、管渠断面中心を通る鉛直線上において、管底から1cm毎に水面まで行った。測定には電磁流速計を用い、流下方向と鉛直方向の2成分の流速を1秒間隔で1分間測定し、各測定水深毎の流下・鉛直方向の流速平均値と、流速平均値と1秒間隔で得られた流速値の差をとった値(以下「流速変動値」)を得た。また、流速変動値を用いて、各管内水深毎のレイノルズ応力を算出した。なお、鉛直方向流速は、下向きの流れを正(+)とした。実験ケースの一覧表を表-11.3に示す。

表-11.3 実験結果一覧表

実験ケース	水路勾配	管内水深	測定項目
実験A-1	1/1000	4.8	流量, 動水勾配, 流下・鉛直方向流速, 水温
実験A-2	1/1000	5.9	"
実験A-3	1/1000	7.1	"
実験A-4	1/1000	7.9	"
実験A-5	1/1000	8.8	"
実験A-6	1/1000	9.9	"
実験A-7	1/1000	11.0	"
実験A-8	1/1000	11.8	"
実験A-9	1/1000	13.1	"
実験A-10	1/1000	15.0	"
実験A-11	1/1000	16.3	"
実験A-12	1/1000	20.0	"

(2) 実験結果

実験で得られた流速データから、最大流速発生位置、最大流速を抽出し、平均流速と最大流速の関係、レイノルズ応力分布と水理条件（水路勾配や水位など）の関係について検討した結果について述べる。

表－11. 4 に、実験時の水理諸元（動水勾配、堰流量、粗度係数、水温）を整理した結果を示す。なお、動水勾配は背水や管渠流入口による影響を受けないと考えられる範囲（No.3～10）での計算結果、粗度係数は堰流量からの逆算による値である。

表－11. 4 実験時水理諸元一覧表

実験ケース	水路勾配	管内水深	動水勾配	堰流量	平均流速	粗度係数	水 温
実験 A－1	1/1000	4. 8 cm	1. 3/1000	1948cm ³ /s	33. 6cm/s	0. 010	20. 2℃
実験 A－2	1/1000	5. 9 cm	0. 9/1000	3038cm ³ /s	39. 2cm/s	0. 008	20. 2℃
実験 A－3	1/1000	7. 1 cm	1. 4/1000	4596cm ³ /s	46. 0cm/s	0. 009	20. 2℃
実験 A－4	1/1000	7. 9 cm	1. 3/1000	5720cm ³ /s	49. 6cm/s	0. 010	19. 6℃
実験 A－5	1/1000	8. 8 cm	1. 3/1000	6795cm ³ /s	51. 0cm/s	0. 010	19. 5℃
実験 A－6	1/1000	9. 9 cm	1. 9/1000	8769cm ³ /s	56. 5cm/s	0. 010	19. 6℃
実験 A－7	1/1000	11. 0 cm	1. 9/1000	10922cm ³ /s	61. 7cm/s	0. 010	19. 5℃
実験 A－8	1/1000	11. 8 cm	1. 4/1000	11849cm ³ /s	61. 4cm/s	0. 008	19. 5℃
実験 A－9	1/1000	13. 1 cm	2. 0/1000	13710cm ³ /s	62. 9cm/s	0. 011	19. 6℃
実験 A－10	1/1000	15. 0 cm	3. 3/1000	18452cm ³ /s	73. 0cm/s	0. 012	19. 5℃
実験 A－11	1/1000	16. 3 cm	3. 1/1000	22584cm ³ /s	82. 4cm/s	0. 010	17. 2℃
実験 A－12	1/1000	満 管	5. 1/1000	33683cm ³ /s	107. 2cm/s	0. 009	17. 2℃

①流速変動幅（乱れ）について

水路勾配 $I = 1/1000$ のおける、各管内水深毎の流下方向・鉛直方向の流速平均値と流速変動幅、レイノルズ応力を表－11. 5 の流速測定結果一覧表に示す。また、各実験ケース毎の流速値の変動グラフを、図－11. 13に示す。

ここで、流速変動幅は、流速変動値の絶対値の平均値であり、この値が大きいほど鉛直方向の乱れ成分が大きいことを示す。またレイノルズ応力は、流下方向と鉛直方向の流速変動値の積で表されるが、この場合鉛直方向流速は上向きの流れを正（＋）とするため、得られた測定結果を逆符号として計算を行った。

表-11.5 流速測定結果一覽表

A-01					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	39.88	1.90	-1.41	0.90	1.15
2	42.61	1.90	-2.54	0.98	1.20
3	44.13	1.21	-2.83	0.75	0.64
4	43.04	1.28	-2.37	0.74	0.20

A-02					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	44.95	2.31	-1.76	1.12	1.76
2	48.28	2.26	-3.04	1.19	1.44
3	49.88	1.94	-3.32	1.06	1.14
4	50.39	1.63	-3.31	0.97	0.65
5	47.17	1.23	-1.84	0.79	0.25
5.5	43.97	1.16	0.33	0.71	0.06

A-03					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	48.98	2.78	-1.92	1.14	1.97
2	52.42	2.63	-2.93	1.36	2.35
3	55.64	2.45	-3.37	1.17	1.52
4	58.31	1.98	-3.89	1.07	0.92
5	57.25	1.63	-3.57	0.93	0.50
6	54.49	1.33	-2.43	0.92	0.17
6.5	50.61	1.35	-0.87	0.95	0.33

A-04					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	52.26	3.17	1.73	1.31	-1.73
2	57.28	3.04	3.00	1.42	-3
3	60.00	2.51	3.27	1.31	-3.27
4	62.56	2.49	3.71	1.10	-3.71
5	62.71	1.79	3.31	1.17	-3.31
6	61.41	1.57	2.85	0.98	-2.85
7	55.29	1.39	1.17	0.94	-1.17
7.5	50.79	2.03	-0.80	1.04	0.8

A-05					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	55.81	2.94	-1.70	1.23	2.03
2	61.68	3.01	-3.11	1.49	2.65
3	64.16	3.07	-3.34	1.47	2.40
4	67.63	2.52	-4.10	1.22	1.37
5	68.63	1.96	-3.74	1.12	0.67
6	67.90	1.79	-3.84	1.18	0.89
7	66.21	1.62	-3.86	1.14	0.57
8	56.70	2.37	-0.47	1.22	1.38
8.3	51.98	2.86	3.66	3.24	0.76

A-06					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	60.92	2.80	-2.17	1.39	1.90
2	66.58	3.24	-3.41	1.51	3.00
3	69.80	3.09	-4.04	1.49	2.41
4	71.77	2.97	-4.26	1.63	2.78
5	74.51	2.66	-4.33	1.47	1.96
6	74.80	2.34	-4.27	1.39	0.96
7	74.95	2.12	-4.63	1.40	0.69
8	72.61	2.17	-3.54	1.27	0.75

A-07					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	63.73	3.49	-2.16	1.53	3.07
2	70.08	3.57	-3.53	1.71	2.98
3	73.58	3.08	-3.98	1.64	2.26
4	76.60	2.88	-4.34	1.64	1.91
5	78.48	2.61	-4.11	1.60	1.92
6	79.86	2.46	-4.06	1.58	1.81
7	81.08	2.40	-4.19	1.55	1.67
8	78.79	2.09	-3.84	1.42	0.68
9	76.89	2.10	-2.72	1.46	0.78
10	70.91	3.08	-0.66	3.23	-0.08

A-08					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	52.61	2.93	-1.82	1.25	1.98
2	71.48	3.87	-3.74	1.69	3.49
3	75.76	3.75	-3.90	1.76	3.58
4	79.47	3.22	-4.73	1.74	2.51
5	81.87	2.71	-4.81	1.70	1.87
6	83.02	2.47	-5.65	1.60	1.52
7	84.15	2.56	-4.72	1.74	1.42
8	84.36	2.29	-5.42	1.61	0.86
9	83.28	2.04	-5.24	1.64	1.04
10	79.06	1.64	-4.57	1.64	1.34
10.5	75.29	3.06	-3.39	1.80	2.51

A-09					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	67.62	3.66	-2.56	1.57	2.76
2	73.77	3.91	-3.73	1.83	4.02
3	77.95	3.91	-4.30	1.96	3.65
4	80.73	3.66	-4.61	1.87	3.46
5	83.81	3.24	-4.71	2.06	3.06
6	84.41	3.49	-4.73	1.93	3.38
7	86.37	3.20	-4.87	1.87	2.12
8	88.50	2.82	-4.69	1.85	2.17
9	90.62	2.96	-4.68	1.83	3.27
10	90.02	3.36	-4.51	1.87	2.09
11	85.41	3.69	-4.86	2.27	7.10

A-10					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	73.79	4.75	-2.96	1.76	4.81
2	77.66	5.05	-4.26	1.92	5.74
3	84.48	6.15	-4.53	1.86	4.70
4	83.31	5.52	-5.07	2.00	4.96
5	84.18	4.88	-5.15	2.06	5.18
6	86.11	4.23	-5.22	2.09	4.03
7	88.93	3.66	-5.95	2.10	2.23
8	90.93	3.77	-6.46	2.16	2.00
9	93.45	3.44	-6.68	2.18	1.44
10	98.37	3.68	-7.89	2.06	3.54
11	99.26	3.19	-8.17	2.11	3.51
12	98.36	3.14	-6.42	2.46	3.94
13	99.63	6.50	-9.62	5.07	-4.96

A-11					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	80.2	4.80	-2.86	1.94	4.42
2	87.79	4.70	-4.59	2.19	5.35
3	91.82	4.54	-4.56	2.27	5.88
4	94.69	4.27	-5.44	2.27	5.00
5	96.83	2.52	-5.15	1.22	2.99
6	99.53	3.38	-5.35	2.09	2.38
7	99.44	3.04	-5.20	1.93	1.28
8	100.46	2.87	-4.97	2.12	0.62
9	101.39	2.71	-5.54	2.10	0.87
10	102.54	2.33	-5.38	2.00	0.14
11	102.99	2.30	-5.57	2.02	-0.80
12	109.15	3.21	-5.63	1.86	0.97
13	107.16	3.24	-4.99	1.74	-0.17
14	104.61	3.17	-5.20	1.72	0.23
14.5	101.04	3.43	-4.87	1.90	0.29

A-12					
測定水深 cm	流下方向流速		鉛直方向流速		V/H比 応力
	流速平均値	流速変動幅	流速平均値	流速変動幅	
1	111.83	7.73	-4.19	2.61	10.97
2	118.11	6.66	-5.89	2.78	9.94
3	130.62	7.47	-6.82	2.82	11.25
4	127.9	5.70	-6.23	2.51	4.22
5	131.25	5.37	-6.36	2.49	4.75
6	135.29	3.81	-6.08	2.57	1.93
7	134.6	4.58	-6.30	2.61	1.63
8	134.23	4.09	-6.28	2.61	2.85
9	135.7	3.83	-6.63	2.60	0.58
10	133.67	4.30	-6.17	2.82	0.83
11	134.33	4.60	-6.22	2.52	-0.11
12	132.13	4.93	-6.23	2.64	0.10
13	132.19	6.41	-6.06	2.93	1.32
14	132.89	7.00	-5.82	2.73	1.44
15	131.76	7.27	-5.65	2.65	0.39
16	128.27	7.51	-5.48	2.80	-3.64

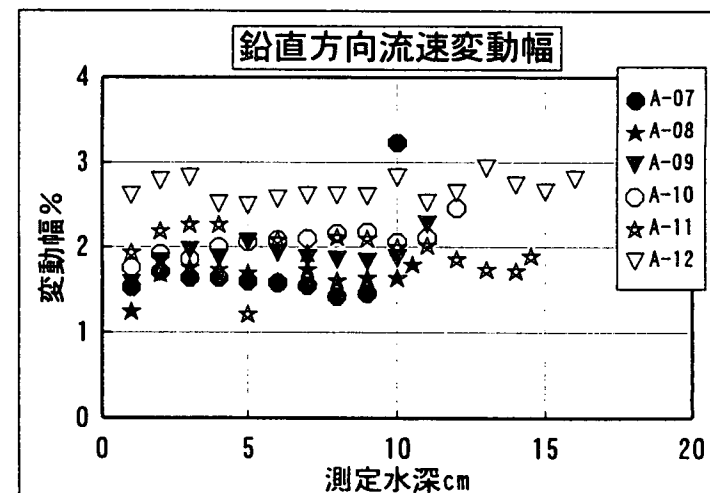
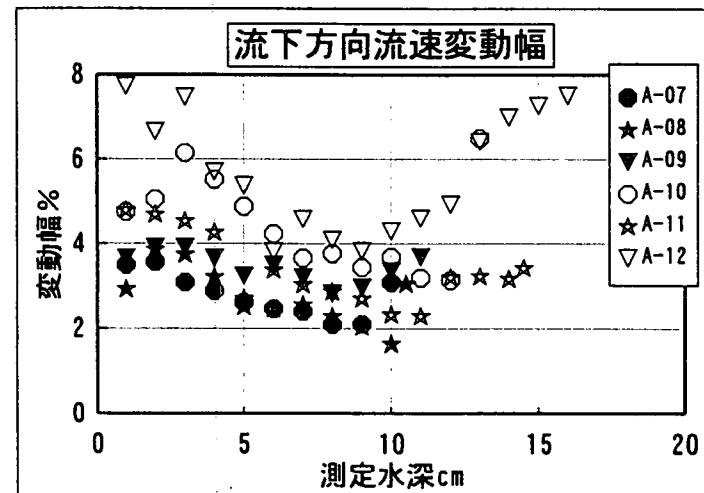
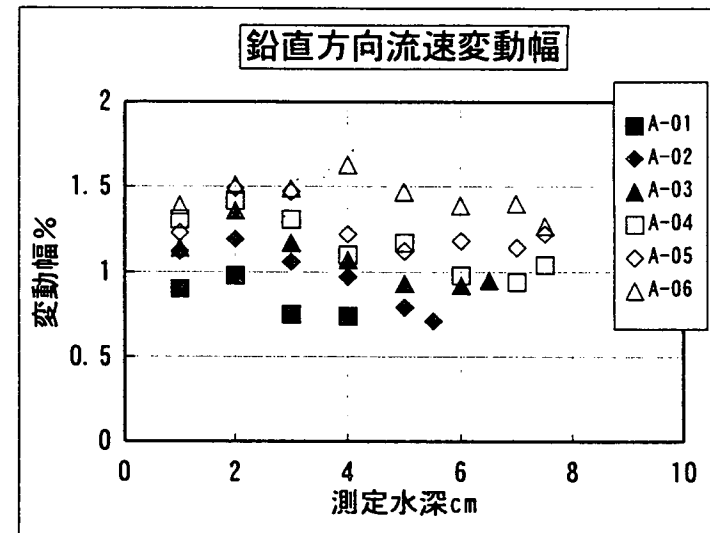
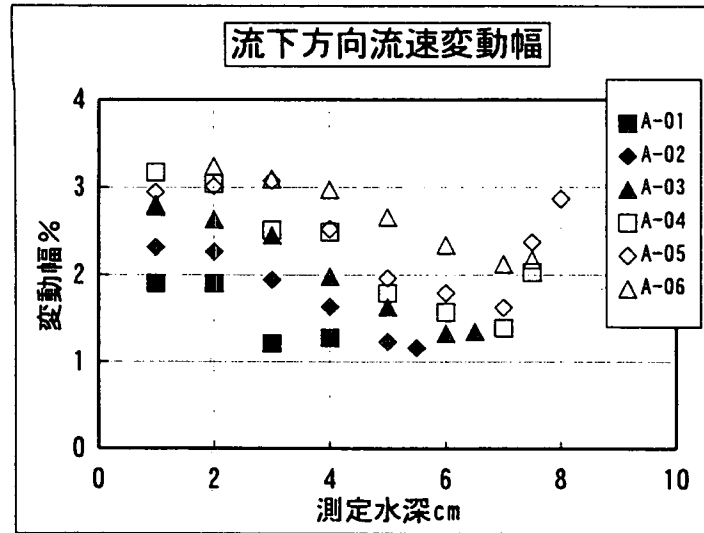


図-11.13 流速値変動グラフ

流速変動幅は、 H/D が増加するほど大きくなる傾向にあった。これは、流速平均値と流速値変動幅の比が概ね一定（流下方向流速の場合、流速変動幅が流速平均値の約4%）であることから明らかなように、 H/D の増加に伴い流速が速くなったために、相対的に変動幅も大きくなったものと考えられる。また、測定水深が壁面（管底）に近い場合と水面付近の場合で、流速変動値が大きくなる傾向にあった。これは、管底では壁面、水面では空気による摩擦抵抗が大きく、流れが乱されやすいためと考えられる。

②レイノルズ応力～レイノルズ応力分布のモデル化～

得られた流下方向及び鉛直方向の流速変動値から、レイノルズ応力を求めた（表-11.5参照）。また、各実験ケース毎のレイノルズ応力分布図を図-11.14に示す。

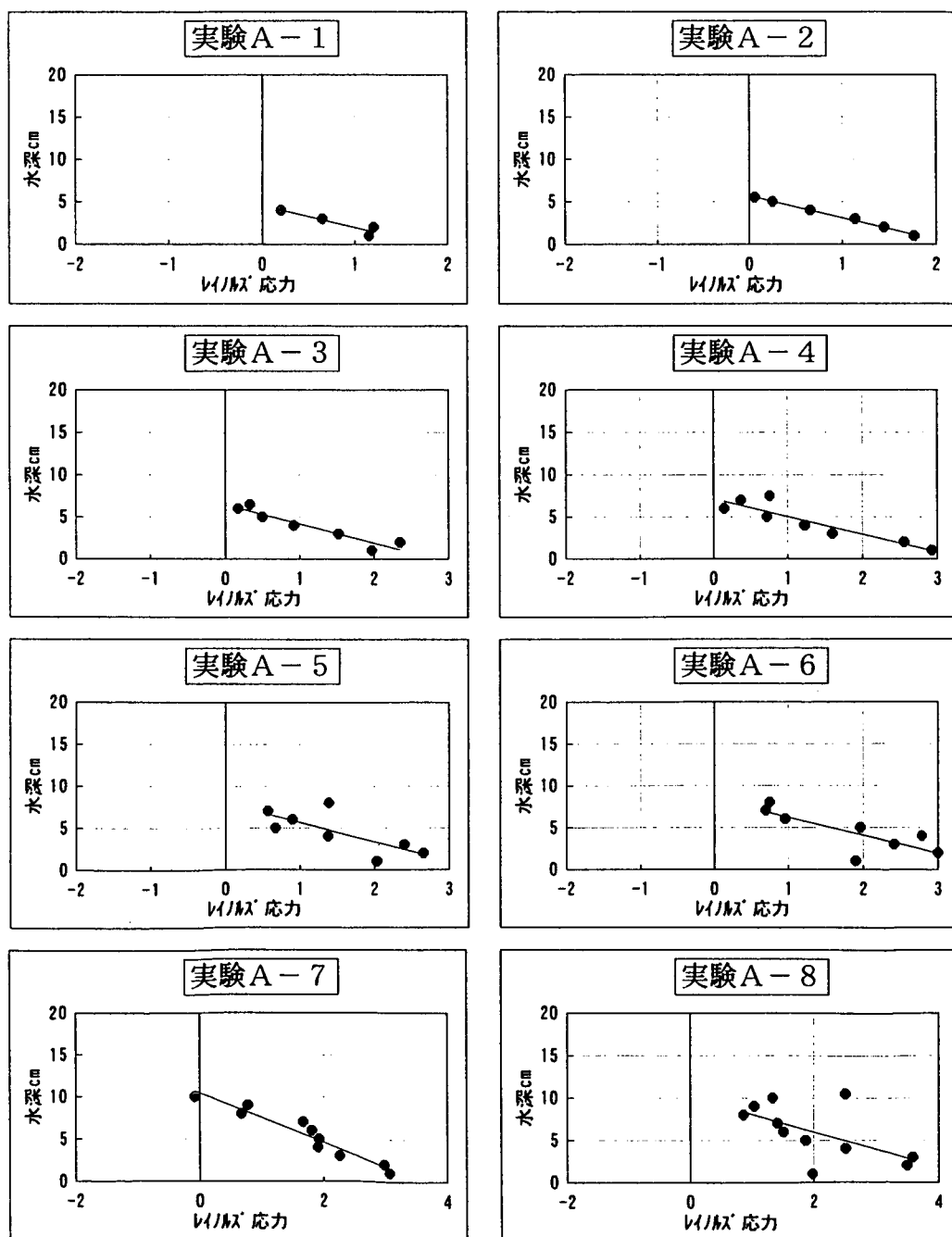


図-11.14 レイノルズ応力分布図

レイノルズ応力は、管内水深の変化に関わらず、いずれのケースにおいても、一般的に知られる三角形分布を示した。なお図中の実線は、レイノルズ応力分布を基に算出した1次回帰線である。

ここで、管内水深と回帰線との関係をみてみると図-11.15が表される。この図は、縦軸を回帰線の傾き、横軸を管内水深としたものである。

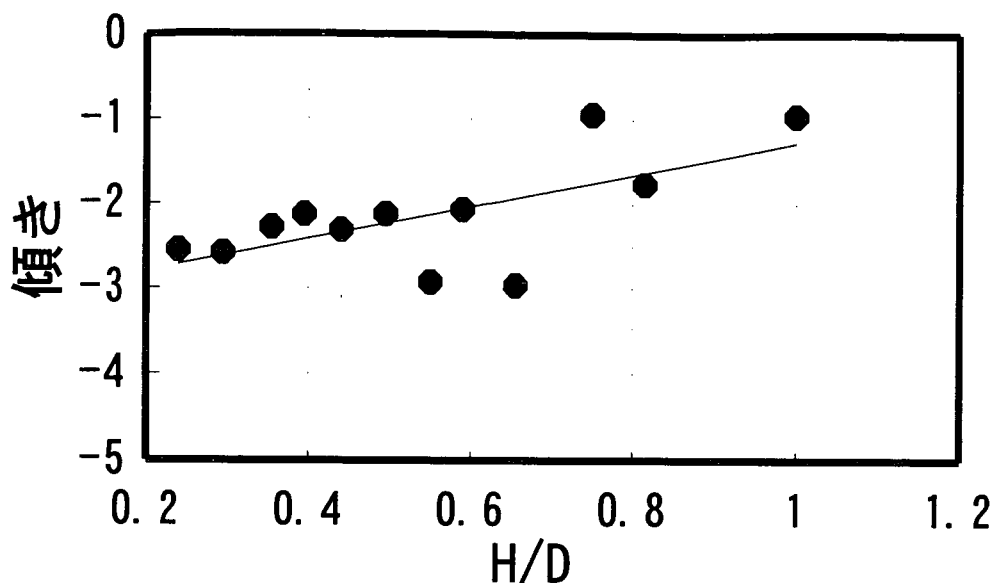


図-11.15 管内水深と回帰線の関係

図より明らかなように、回帰線の傾きの分布は、管内水深の増加に伴い直線的に増加する傾向にある。ここで、回帰線の傾きの分布をさらに1次回帰線で示すと、図中の実線となる。

この回帰線によって、レイノルズ応力の傾きが得られ、その結果底面せん断力が分かり、平均流速が求められることになるが、今回の実験においては、水路勾配や粗度係数を変化させた場合について検討を行っていないため、その明確なモデル化まで到達していない。よって、回帰線のモデル化には、水路勾配及び粗度係数を変化させた検討を行う必要があると考えられる。

③平均せん断力と底面せん断力の関係

②では、レイノルズ応力分布のモデル化を試みたが、ここでは平均せん断力と底面せん断力の関係をモデル化することにより、管内水深と平均せん断力から底面せん断力を得る方法について述べる。

平均せん断力は、 $\bar{\tau} = \rho g R I$ ($\bar{\tau}$:平均せん断力, ρ :流体密度, g :重力加速度, R :径深, I :動水勾配) で通常表される。図-11.16に、管内水深と底面せん断力/平均せん断力の関係をグラフ化したものである。ここで、底面せん断力は、実験により得られたレイノルズ応力分布から推定した。図からも分かるように、底面せん断力/平均せん断力は、SIN関数で表現される。この結果(傾向)は、同様の実験を行った、Repl ogle&Chowや小石川らのデータにも見ることができる。ただし、モデル化を行うには実験データが少なすぎると考えられるため、ここではモデル化の可能性を示唆するにとどめることとする。

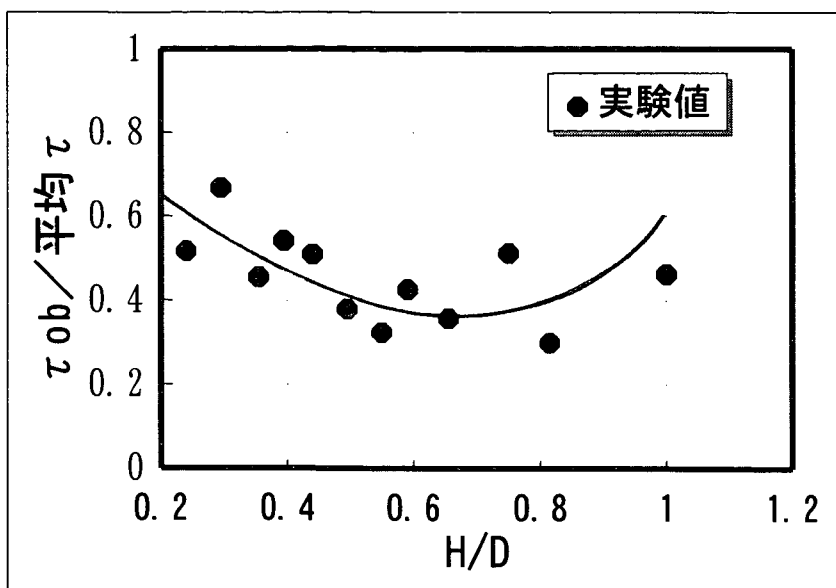


図-11.16 平均せん断力と底面せん断力の関係

11.2.3 まとめ

実験により、レイノルズ応力の傾きと水深の関係のモデル化、及び平均せん断力と底面せん断力の関係のモデル化を試みたが、実験数の不足や諸々の問題により実現しなかった。しかしながら、レイノルズ応力の傾きが水深により随時変化する傾向が見られた、底面せん断力／平均せん断力と管内水深の関係はSIN関数で表現ができる、などの知見が得られたことは注目に値すると思われる。よって、実験を重ねることにより、これら底面せん断力を求めるためのモデルの作成ができれば、新しい流量測定法の誕生も可能であると思われる。

11.3 最大流速測定法

11.3.1 測定方法の概要

第9章9.1(3)において、平均流速と最大流速の比 (V_m/V_{max}) は、水路勾配に係わらず、 H/D が小さい ($H/D < 0.4$) 場合には $V_m/V_{max} = 0.75 \sim 0.95$ 、 $H/D > 0.4$ の場合には $V_m/V_{max} = 0.75 \sim 0.85$ 、 H/D が満管に近づくと $V_m/V_{max} = 0.78 \sim 0.81$ に収束される結果となったことを報告した。

最大流速測定法は、この結果を基に提案した方法であり、最大流速に簡単な補正係数を乗ずることで平均流速を求めようとするもので、ベキ乗流速分布式の開水路版ともいえる方法である。

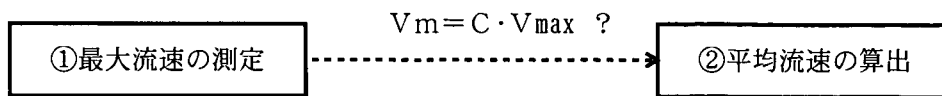
(1) 測定概要 (原理)

乱流における、最大流速と平均流速の関係は、ベキ乗流速分布式より、満管時には $V_m = 0.817 \cdot V_{max}$ (乗数 $N = 7$: 第10章参照) で表されることが知られている。

そこで本測定方法では、開水路においてもこのような補正係数による補正が可能であるとして、最大流速の測定から、平均流速を換算しようとするものである。

(2) 測定フローと測定方法

<測定フロー>



①最大流速の測定

超音波流速計などを用いて、流水断面中の流速をランダムに測定する。さらに、測定された流速から、最大流速を抽出する。

$$V_m = C \cdot V_{\max}$$

ここに、 V_m ：平均流速、 $V_{\max}$ ：最大流速、 C ：平均流速換算係数とする。

②平均流速の算出

最大流速と平均流速の関係式から、平均流速を算出する。

11.3.2 平均流速換算式

ここでいう平均流速換算式は、最大流速を平均流速に換算するための関係式である。次に、最大流速と平均流速の関係を明確にするために行った水理実験及び結果と、関係式を導くための検討結果について述べる。

(1) 実験方法

実験は、レイノルズ応力分布のモデル化で行った水理実験とともに、2成分の電磁流速計を用いた流速測定と、管内水深、動水勾配等の測定を行った。

水路勾配は0、1/1000、3/1000、5/1000、10/1000の5通り、水深を3割水深付近から1～2cmづつ変化させ低水位から満管状態まで逐次実験を行った。流速(2成分)測定位置はセンターライン上の測点(1割水深毎)で、測定には電磁流速計を用い、流下方向と鉛直方向の2成分の流速を測定することとした。

実験ケースの一覧表を表-11.6に示す。

(2) 実験結果

実験で得られた断面鉛直センターライン上の流速データから、最大流速の発生位置と最大流速を抽出し、平均流速と最大流速の関係について、水理条件(水路勾配や水位など)別に整理検討した結果を述べる。

表-11.7に、実験時の水理諸元(動水勾配、堰流量、粗度係数、水温)を整理した結果を示す。なお、動水勾配は背水や管渠流入口による影響を受けないと考えられる範囲($N_d 3 \sim 10$)での計算結果、粗度係数は堰流量からの逆算による値である。

表-11. 6 実験結果一覧表

実験ケース	水路勾配	管内水深	測定項目
実験A-1	1/1000	4. 8	流量, 動水勾配, センターライン上流速, 水温
実験A-2	1/1000	5. 9	"
実験A-3	1/1000	7. 1	"
実験A-4	1/1000	7. 9	"
実験A-5	1/1000	8. 8	"
実験A-6	1/1000	9. 9	"
実験A-7	1/1000	11. 0	"
実験A-8	1/1000	11. 8	"
実験A-9	1/1000	13. 1	"
実験A-10	1/1000	15. 0	"
実験A-11	1/1000	16. 3	"
実験A-12	1/1000	20. 0	"

表-11. 7 実験結果一覧表

実験ケース	水路勾配	管内水深	動水勾配	堰流量	平均流速	粗度係数	水温
実験A-1	1/1000	4. 8 cm	1. 3/1000	1948cm ³ /s	33. 6cm/s	0. 010	20. 2℃
実験A-2	1/1000	5. 9 cm	0. 9/1000	3038cm ³ /s	39. 2cm/s	0. 008	20. 2℃
実験A-3	1/1000	7. 1 cm	1. 4/1000	4596cm ³ /s	46. 0cm/s	0. 009	20. 2℃
実験A-4	1/1000	7. 9 cm	1. 3/1000	5720cm ³ /s	49. 6cm/s	0. 010	19. 6℃
実験A-5	1/1000	8. 8 cm	1. 3/1000	6795cm ³ /s	51. 0cm/s	0. 010	19. 5℃
実験A-6	1/1000	9. 9 cm	1. 9/1000	8769cm ³ /s	56. 5cm/s	0. 010	19. 6℃
実験A-7	1/1000	11. 0 cm	1. 9/1000	10922cm ³ /s	61. 7cm/s	0. 010	19. 5℃
実験A-8	1/1000	11. 8 cm	1. 4/1000	11849cm ³ /s	61. 4cm/s	0. 008	19. 5℃
実験A-9	1/1000	13. 1 cm	2. 0/1000	13710cm ³ /s	62. 9cm/s	0. 011	19. 6℃
実験A-10	1/1000	15. 0 cm	3. 3/1000	18452cm ³ /s	73. 0cm/s	0. 012	19. 5℃
実験A-11	1/1000	16. 3 cm	3. 1/1000	22584cm ³ /s	82. 4cm/s	0. 010	17. 2℃
実験A-12	1/1000	満 管	5. 1/1000	33683cm ³ /s	107. 2cm/s	0. 009	17. 2℃

表-11. 6 に、各実験ケースにおけるセンターライン上の測定流速から、最大流速を抽出した結果の一覧表を示す。なお実験A-10については、測定結果では最大流速は表面に存在したが、表面の乱れが大きく、また空気の混入も時折あったため（測定には直接影響はなかった）、このデータを除いた。

実験結果より、最大流速発生位置と最大流速を得た。その結果、水深／管内水深は、第9章9.1の最大流速一覧表（表-9.1 参照）に示す値と同様に、概ね6割水深位置に最大流速水深が存在することが分かった。また平均流速／最大流速は、概ね0.70～0.80の範囲であり、水深との関係は見受けられずにばらついた。この値は、先に示した $V_m/V_{max}=0.85$ 前後より、かなり小さな値であり、また変動幅も比較的大きい。これは、流速測定を1cm間隔で行ったため、2cm間隔での測定に比べて、より正確な最大流速とその位置が明

らかになったためと考えられる。

ここで、水理学的見知から、補正係数Cについて考えてみる。

補正係数Cを式で表すと、 $C = V_m(\text{平均流速}) / V_{\max}(\text{最大流速})$ 、である。

いま最大流速を流速分布の対数則より求めたとすると次式で表される。ここに、 k :カルマン定数(=0.4)、 H :管内水深、 ks :粗度高、 Ar :水路形状や水深に関する変数である。

$$V_{\max} = u_* \left(\frac{1}{k} \ln \frac{H}{ks} + Ar \right)$$

この最大流速の式とマニング式を、先に示した補正係数Cの式に代入すると、最大流速と平均流速の関係式となる次式が導かれる。

$$C = \frac{V_m}{V_{\max}} = \frac{R^{1/6}}{n * g^{1/2} \{2.5 * \ln(H/ks) + Ar\}}$$

この式についてグラフ化したものを、図-11.17の中の実線で示す。上の式で算出した曲線は、急な右下がりの傾向を示している。実験における補正係数Cの値は、管内水深に関わらず0.8前後であったことから、値はもちろん、傾向についても整合性が得られなかった。そこで、先に述べた1点流速測定法の中で実施した改良法と同様な方法で、流速分布の対数則の改良を行った（最大流速の発生位置を考慮して式中のパラメータを以下のように変更した。 $H \rightarrow$ 最大流速発生水深、 $R \rightarrow$ 最大流速発生水深を水面と仮定したときの径深）。その結果、図-11.17の中の点線で示されるような曲線となった。先の実線と同様に、計算より求まるC値は、実際のC値（0.8前後）と大きく異なった。しかしながら、管内水深に関わらず、大きく変化しない傾向は、実際のC値の表す傾向と似ていると考えられる。

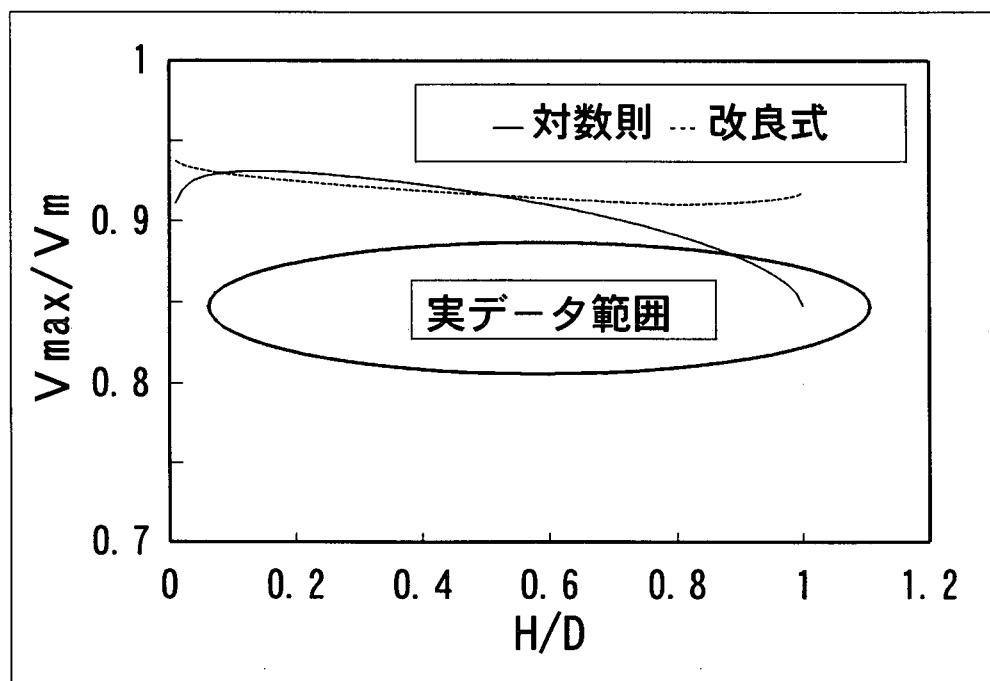


図-11.17 補正係数Cと管内水深の関係

本測定法を用いた場合の、流量の精度について検討してみる。平均流速換算式では、最大流速と平均流速の関係より補正係数となる補正係数Cを定めることとしている。この補正係数Cは、平均流速／最大流速を指し、実験に置いては管内水深に関わらずほぼ一定であった。しかしながら、C値を一定と考えると、実験結果（図－9.12, 表－11.7, 参考資料(3)）より明らかなように、この値は最大値と最低値を比較すると約1.2倍の違いがある。これを流量の誤差で表すと、実際の流量（堰流量）と計算による流量の差も同様に1.2倍、つまり20%の誤差を含むことになる。ただし、実験においては鉛直・水平方向ともに1～2cm間隔の測定であったが、実際の測定では、ランダムに多数点の流速を測定し、最大流速を得ることが可能であるとすると、測定原理が正しければ、この誤差は小さくなると考えられるが、その精度は6割水深流速測定法（平均流速の発生すると考えられる6割水深位置での流速測定法）や、多数点流速平均化法（流速を多数測定したものの平均値を平均流速とする方法）と大差ないと思われる。

また、補正係数Cが一定ではないとすると、流速分布の対数則を利用した補正係数Cの算出が考えられる。しかしながら前述したように、現在の検討段階では、実際のC値と大きな相違があり、さらに検討を重ねる必要があると考えられる。

表－11.6 実験結果一覧表

実験ケース	管内水深 cm	最大流速位置 水深cm	水 深 管内水深	最大流速 Vmax cm/s	平均流速 最大流速
実験A－1	4.8 cm	3 cm	0.63	44.1	0.76
実験A－2	5.9 cm	4 cm	0.68	50.4	0.78
実験A－3	7.1 cm	4 cm	0.56	58.3	0.79
実験A－4	7.9 cm	5 cm	0.63	62.7	0.79
実験A－5	8.8 cm	5 cm	0.57	68.6	0.74
実験A－6	9.9 cm	6 cm	0.61	75.0	0.75
実験A－7	11.0 cm	7 cm	0.64	81.1	0.76
実験A－8	11.8 cm	8 cm	0.68	84.4	0.73
実験A－9	13.1 cm	9 cm	0.69	90.6	0.69
実験A－10	15.0 cm	11 cm	0.73	99.3	0.74
実験A－11	16.3 cm	12 cm	0.74	109.2	0.75
実験A－12	満 管	11 cm	0.55	134.3	0.80
平均値	－	－	0.64	－	0.76

11.3.4 まとめ

最大流速の測定結果に、簡単な補正係数を乗じて平均流速を推定する方法について、実験的に検討を行った。この結果、実験では、最大流速から平均流速を推定するための定数（平均流速／最大流速）を見いだすことはできなかった。また、この方法では、最も乱れの多い、流れの大きく変化する（最大流速位置が移動する）点の流速を測定しようとしているため、手法を確立したとしても、精度としてはそれほど期待できる画期的なものにはならないと考えられる。

11.4 新しい流量測定方法に関するまとめ

下水管渠の流量測定に適した流量測定方法を確立するために、管渠模型を用いた水理実験により、円管内における流れの特性の把握を行い、また実際に行われている流量測定の現状を把握するために、測定現場やメーカー等から測定方法や機器仕様等の情報を得た。その得られた実験結果や測定機器に関する情報を基に、下水道管渠の流量測定に有効と考えられる測定方法をいくつか提案した。その中で、1点流速測定型流量算出法の改良を行うことで、高精度の流量が得られる結果を得ることができた。この測定法は、任意の点流速と補正係数(平均流速/点流速)から平均流速を算出し流量を得るものである。この方法を用いた場合、実際の流量と実験結果から算出した流量の誤差は7.9%であった。そこで、さらに精度を向上させるために、補正係数を得る課程で用いられる流速分布の対数則の径深の定義を改め、最大流速発生水深の径深を用いると、より正確に実際の補正係数を表すことが明らかになった。この改良により、流量誤差が3.7%に減少した。ただしこの流量測定法の実用に関しては、精度の比較検討を同一管渠上において行っているため、実際の現場における検証を行う必要があると考えられる

<参考文献>

- 1) 「明解水理学」、日野幹雄
- 2) 「下水管渠内における流量測定に関する調査」、城居ほか、第31回下水道研究発表会論文集、1994.7
- 3) 「超音波による下水・排水流量の一測定方式」、山本ほか、計測自動制御学会論文集、vol. 14、No 5

第12章 流量測定計画論

第12章 流量測定計画論

下水道における流量測定は、各下水道施設毎に違った、それぞれの重要な役割を担っている。したがって、それぞれの役割に応じた、適した手法を用いた流量測定計画の基に、測定が実施されなければならない。

流量測定の重要性については、第1章1.1において簡単に述べた。ここでは、さらに詳しく流量測定の目的と役割、そしてその利用方法について述べ、各役割に適した流量測定計画について論じることとする。

12.1 流量測定の目的と役割～「流量測定」から何が分かるか～

流量を測定する目的には大きく分けて、ポンプ場や処理場における適切な運転管理のためと、管路施設を維持管理していく上の基礎データを収集するために行われる。

ここでは、流量測定の目的と役割について、ポンプ場における運転管理、下水道施設の維持管理、下水管路施設の再構築、の3通りに分けて述べることとする。

(1) ポンプ場における適切な運転管理のため

ポンプ場においては、流入下水水量の変動に対応して、適切なポンプの運転台数や回転数の決定、弁の開度調節が行われる。とくにポンプ場もしくは処理場等が何らかの影響で異常増水した場合には、流入水を効率よく、かつ安全に処理を行うために、沈砂池の水位上昇限度、流入ゲートの操作時期の判断や、場内監視箇所の特定制などを適切かつ迅速に行う必要がある。そのためには、流入下水水量の変動を常時監視し、定期的な流量の測定を行う必要がある。また収集されたデータの解析により、雨水の混入（分流式下水道の場合）や浸入・浸出水などの早期発見が可能となる。

(2) 管路施設の維持管理のため

管路施設の維持管理において、管路に関わる基礎データ（水位の時間変動、粗度係数、流量、水質など）を蓄積することは非常に重要なことである。とくに流量に関しては、管路施設において発生する不明水の浸入・浸出、管路の破損、流下能力の不足などの重要な問題の早期発見や原因究明、事故防止に役立てられる。

(3) 下水管路施設の再構築・改築のため

下水道の整備が着々と進む現在、人口の増加や産業の発展に伴う課程雑排水や工場排水の増加などによる、下水管路下流における流下断面の不足が問題となっている。流下断面の不足は、流下能力の不足、とくに降雨時の流下能力の不足（合流式下水道の場合）による、下水の滞留に伴う臭気や堆積物の発生を誘発する。よって、流下不足による諸問題の発生を防止・抑制するためにも、既設の下水管路における流下能力を把握しておく必要がある。また、下水管路施設の再構築・改築を行うべきかの判断基準としても、既存管路の正確な流量の把握が重要な項目となる。また、下水管路施設の再構築・改築を行う際には、新規増補管渠断面を決定する必要がある。この場合、必要断面積は、再計算された計画人口や計画処理水量などが決定されるが、既存の管路における流量は、その地域特有の流量変動を把握する意味でも重要な情報となるため、正確な流量測定を行うことが望まれる。

12.2 流量測定計画の立案～精度、頻度、測定場所（範囲）など～

流量測定は、それぞれの役目に応じた、最適な流量測定計画に基づき行われるべきである。その計画の主な、求められる精度がどれくらい必要なのか、それをどれくらいの頻度で行えば良いのか、測定を行う場所はどこか、また範囲はどのくらいかを決定することである。

ここでは、流量測定計画を立案するために必要な要素である、精度、測定頻度、測定場所（範囲）などについて考えてみる。

12.2.1 流量測定計画の構成

流量測定計画の決定に関して重要となる要素は、前述したように、精度、測定頻度、測定場所（範囲）であり、これらにより流量測定計画が構成される。

精度とは定性的な要素であり、流量値に求められる精度と、測定機器に求められる精度に分けられ、測定目的に応じて必要精度を設定する必要がある。大抵の場合、流量値は直接流量計等により測定されるため、前者と後者は同様の意味を持つ。

測定頻度は、時間や回数により表され、さらに求める流量に関する測定頻度と、測定機器に求める頻度で大別できる。前者は、目的としている（測定しようとしている）流量、例えば時間平均流量や瞬時流量を得るためのに必要な測定の時間間隔及び回数である。後者は、前者の流量を得るために測定機器に要求する、測定の時間間隔及び回数である。それぞれは、求められる測定精度により決定される。また、測定を行う労力との関係も考慮する必要がある。

測定場所とは、実際に測定を行う位置や範囲を指す。位置や範囲は、測定目的に応じて決められ、1カ所のみでの測定である場合、数カ所の流量を測定し合計や平均化を行う場合に分けられる。また、労力や測定場所の交通状況との関係も考慮される。

これら要素の全ては、それぞれが強いつながりをもっており、相互関係なくしては適した流量測定計画が立案できない。しかしながら、これら要素も流量目的無しには決まらない。つまり、いかに測定目的を明確にし、何を知りたいのか、そのためには何を（測定する）必要があるのかを十分に検討する必要がある。

12.2.2 目的別流量測定計画

（1）ポンプ場のための流量測定計画

ポンプ場における適切な処理を行う際の運転操作には、急激な水位上昇に対応しうる間隔での流量測定が必要となる。水位上昇に関わる要因としては集中豪雨等による雨水の流下と考えられるが、降雨観測としては、最低10分間隔で測定可能な雨量計を用いる必要があり、下水道における雨水流下に対応するには、降雨観測と同様に10分以下の間隔での流量測定が必要であると考えられる。

ポンプ場の流量測定は、ポンプ場に入る直前の流入管や処理場内送水管における固定測定である。よって、縦断的にわたる多数の地点の流量を測定する必要がない。また、流れの状態が満管流もしくはそれに近く、安定した流れの場合が多いため、ポンプ場などの大半で用いられる電磁流量計やフリューム式流量計により十分な精度の測定が行われると考えられる。

(2) 管路施設（維持管理）のための流量測定計画

管路施設においては、維持管理上の問題点の原因解明調査のために流量測定を用いることが多い。主な調査例をあげると、地下水や雨水、不法排水の混入による不明水の発生箇所の特定を行う不明水調査、管路施設の老朽化や耐久性の低下に伴う管路の破損や変形を推定するための管路敷設状況調査等である。

このような調査においては、目的が異なるとしてもほぼ同様の調査方法が採用されることが多い。その調査方法は至って単純であり、大きく分けて2通りある。

1つは、テレビカメラ調査及び目視調査であり、ロボット（小型カメラ搭載無人車）や作業員が、管渠の中に入り、管渠内部の状況（傷や破損など）を調査するものである。本方法は、確実に破損箇所を見つけだすには最善の方法であるが、経済面と安全面での問題が大きい。ここでは、詳細を省く。

2つ目は、蓄積データとの比較である。任意のポイントにおいて調査を行う場合、蓄積データが存在すれば、調査時流量と蓄積データの比較により、流量の増減が確認できる。増減が見られた箇所においては、その箇所から徐々に上流に坂か上り不明水箇所を特定する。ただしこの場合、周辺の住環境変化（人口の増減や店舗増築など）や調査時の天候などを考慮して調査を行う必要がある。流量測定の精度については、下水流下方式（合流管・分流通）や管径などにより一概にはいえない。つまり、小口径管渠（とくに分流式）は元来流量が少ないため、不明水を発見しようとする場合は小さいオーダーの流量測定が必要となる。一方、大口径管渠では流量が多く水位の変動も大きい。よって、小さいオーダーの測定を行っても、流量の変動分なのか、不明水量なのかの判断が難しい。したがって、それほど高精度の測定機器を用いる必要はない。またその精度により使用する測定機器も異なる。

測定機器は精度や測定手法により異なるが、原因箇所の特定という目的であれば、不定点調査（決められた箇所のみでの測定ではなく、その時々に応じて測定・調査箇所は変化する調査）が予想されるため、ポータブル的な測定機器が望ましいと考えられる。測定機器には様々な種類があるが、詳しくは、本報告書もしくは「下水道管路施設における浸入水防止対策指針」を参照されたい。

(3) 管路施設の再構築・改築のための流量測定計画

前述したように、管路施設の再構築・改築のためには、既存管渠の流下能力を把握する必要がある。この場合、改築等を行おうとする箇所の、日変動や季節変動を把握する必要があるため、用いる測定機器としては、長期に設置が可能であり、かつ防水性、耐腐食性に優れた機種が望ましい。また流量の日変動を把握する場合、その時間変動（時間最大流量と時間最小流量の比）は流下方式や季節により異なるが、概ね2～3倍であると考えられ、その変動を正確に把握するために必要な精度は、変動格差2倍を1日の時間24hrで割り、 $2/24 \div 1/20$ 、つまり有効数字2桁を得ることが可能なものでなければならない。流量の季節変動を把握する場合は、一般に日平均流量と日最大流量の比が1.2～0.4と言われていることから、必要最小精度は最小変動量1.2を年間の日数365日で割り、さらに日最小流量の把握も考慮して $1/2$ を乗じ、 $1.2/365/2 \div 1/1000$ 、つまり有効数字3桁を得ることが可能な測定機器が望ましいと考えられる。

第13章 まとめ

第13章 まとめ

本報告書「下水管の流量に関する基礎的実験報告書」では、従来、下水道管渠内では困難であると言われてきた流量測定に関して、より簡単に、より高精度に測定するための測定方法を確立することを目的に、既存流量計の調査および種々条件による水理実験により検討を重ねた。本研究では、いままでは十分に把握されていなかった自由水面をもった円管内流れの特性を把握した上で、流量を算出するための平均流速換算式として一点流速測定法に着目し、下水管渠内の流れの特性を十分に考慮した測定方法に改良することを試みた。その結果、1点の流速測定と水位測定から、高精度の平均流速を得ることが可能になった。本報告書の概要を以下に示す。

第1章は、研究の背景について述べた。ここでは、流量測定は、下水道計画の策定や施設の維持管理において非常に重要なパラメータであるが、その一方で、下水対応の流量測定器がない、測定設備の設置スペースがない、流れを阻害する恐れがある等の様々な問題を抱えている、という現状と問題点に詳しく述べた。さらに、本研究への取り組み方を明確にし、効率よく研究を進めるために作成した研究計画について述べた。

第2章では、本研究の基礎データを得るために行った水理実験に用いられる、実験施設について述べた。ここでは、実験施設の寸法だけでなく、設計数値の根拠についても触れ、また実験で使用された流速計の概要についても述べた。

第3章～第8章は、下水管渠内の流れの特性を把握するために実施した水理実験の結果について述べた。第3章は、本実験に入る前の予備的実験として、実験条件の決定および種々測定機器の適用性の検討、実験施設の出来型検査を行った結果について述べた。各種検討の結果、電磁流速計を用いると管壁近くや水面付近で大きな誤差が生ずることが明らかになり、本実験では管壁等の影響をほとんど受けないプロペラ流速計を用いることとした。

第4章から第8章までは、本実験で得られた実験データについて述べた。本実験では、水路勾配を、0（第4章）、1/1000（第5章）、3/1000（第6章）、5/1000（第7章）、10/1000（第8章）と順に変化させ、さらに各々の水路勾配において、管内水深を2 cm間隔で変化させ、水深毎の流速分布形の違いを検討した。また流況についても染料等を流下させて観察した。

第9章では、水理実験で得られた結果を基に、管路内の流れを把握する上で重要な、流速分布、流量特性、流況、粗度係数などについて詳しく解説した。流速分布の測定結果からは、管内水深が浅い場合、いままでは水面にあるとされてきた流心が、水面より下に発生することがあるということが分かった。また流速分布形は、水路勾配に関わらずほぼ一定であることも分かった。流況観察では、染料や粒子、アルミニウム粉末を流下させ、水表面や流心、管壁近くの流れを観察した。その結果、粒子等が流心に集中する傾向は観察できたものの、染料が急激な攪拌により拡散してしまった、目視では個々の粒子の動きが捉えにくかったなどの問題により明確な結果が見いだせなかった。粗度係数は、管内水深により変化するといわれていたが、本実験ではその明確な傾向はなく、データのばらつきは多少あったがほぼ一定であると考えられた。

また、これら本実験で得られた知見を、実管渠に適用させる際の留意事項を付け加えた。本実験は、下水ではなく普通の水を用いた、実験施設の形状（敷設）パターンが一通りであった、などの実験場の制約から、現場で見られる種々条件が考慮されていない。そこで、生物膜、管路敷設状況、水面変動、マンホール形状

に関する考察を行い、実際の現場にも本研究の成果が生かされるようにした。

第10章では、既存の流量測定方法について検討した結果を述べた。ここでは、既存の流量測定方法の原理と特徴を整理し、下水管渠で用いるためには、流下能力を阻害しない（流れを乱さない）ようにするために非接触もしくは極小センサーを用いる、不定点調査でも使用可能なポータブル式計測器を用いる、簡単な操作で計測が可能である、測定項目が少ない、平均流速から流量を換算する、などの諸条件が必要とした。これら諸条件を把握した上で、流量を算出する手段として平均流速算出法に着目し、その妥当性について机上での検討を行った。

第11章では、新しい流量測定方法として、水理実験から得られた知見と、既存の流量測定方法の整理・検討結果から、1点流速測定法、レイノルズ応力推定法、最大流速測定法について検討した。その結果、1点流速測定法については、従来からある流速分布の対数則を用いた方法を、最大流速を考慮した式形に修正することで、より高い精度で平均流速を得ることが可能になった。この方法は、流速分布形（とくに流心）が管内水深に変化するという下水道管渠の実現象が、流速分布の対数則では十分に考慮されていないということから考案したもので、最大流速の位置を水面と仮定することで高い再現性を得る流速分布式が得られる結果となった。レイノルズ応力推定法は、レイノルズ応力分布から底面せん断力を算出する方法であり、モデル化の可能性を明示したが、2成分流速計を用いることが前提となり、現段階では即適用は困難である。最大流速測定法は、実験結果から得られた、平均流速／最大流速＝constの関係から考案した方法であるが、その傾向にはかなりばらつきがあり、一概に先の関係が適用できるとは言い難いという結果となった。また、水理学的見知から、先の関係を示したが、実験結果との明確な整合性が得られなかった。

第12章では、流量測定を、下水道というシステムの中で、いかに広くかつ効率よく用いるかについて述べたものである。ここでは、流量測定は、下水道の設計、処理場・ポンプ場等維持管理、各種調査、など様々な面で利用可能であるが、利用の際には、綿密な流量測定計画を立案し、測定目的に応じた機器の選択、データ採取頻度・間隔を設定する必要があるとして、種々調査における計画の立案方法と調査例を示した。

また巻末には参考資料（1）として、本研究を進める過程で得られた知見として、流速計検定実験の結果について添付した。これは、従来からゴミを含まない水であれば、外部（水路壁面や水面など）からの影響をほとんど受けず流速の測定が可能であるとして精密実験用にと提供されてきたプロペラ流速計が、測定水深や水面の影響を受けて、計測値に誤差を生ずるという現象を、実験的に検討したものである。

参考文献（2）には、今後の流量に関する研究で役立てられるように、土研以外から収集した数々の流速分布測定事例を記載した。

また、最大流速と平均流速の関係として、土研以外のデータを用いて整理した結果を参考資料（3）に示した。

参考文献（4）には、管渠の流下能力を把握するために重要な、マンホール部におけるエネルギー損失の計測結果を掲載した。

＜参考資料(1)＞

流速計検定実験（その1）

1. はじめに

数ある流速計の中でも、プロペラ式流速計は古くから知られるものであり、主に精密な計測を要する水理実験などで使用される。プロペラ式流速計による流速測定には、プロペラの回転数が流れの速さに比例するという原理を用いた、プロペラの回転数を直接測定し速度に換算する直接測定法と、プロペラに照射する光とその反射の強さから回転数を算出し流速に換算する間接測定法がある。現在、水理実験において使用される流速計は、流れに影響を与えないために小型化が進められており、後者の間接測定法を用いる場合が多い。

直接・間接測定方法の両者においては、求められた回転数を流速に換算することが必要となる。この場合、流速と回転数は比例するから、換算式は1次式で表される。この換算式は通常、流速計検定試験により個々の流速計毎に求められるが、水面付近や壁面近くにおける換算式の適用に関しては、摩擦や水面の影響を考慮する必要があると考えられる。よって、プロペラ式流速計を用いた精密な水理実験を行うためには、流速計の測定値に影響を与える因子について検討を行い、場合によっては何らかの補正を加える必要があると考えられる。

2. 流速検定

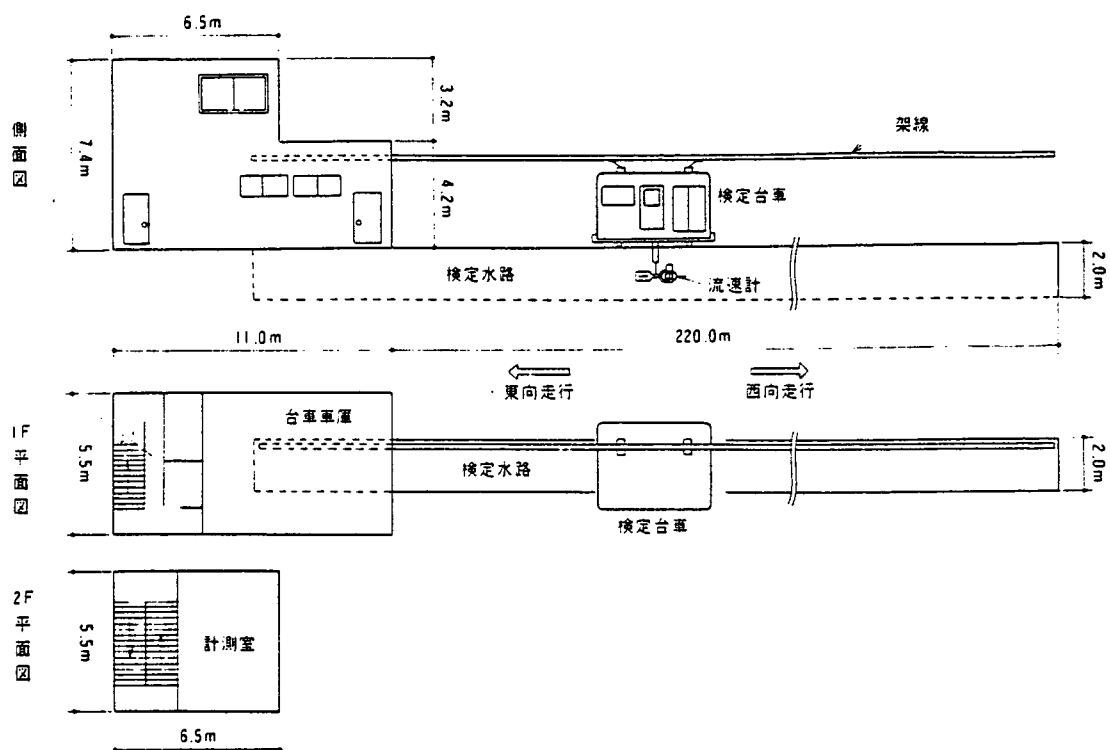
ここでは、簡単な流速検定を実施し、水面が流速計の測定値に及ぼす影響を把握するために、水面付近の流速値（回転数）の出力変動について検討を行った。

通常の流速計の検定は、十分な幅をもった水路（静水状態）において行われ、流速計を固定した検定台車を任意の速度で走行させ、プロペラの回転数と走行速度の関係から換算式（検定線）を求める。このときの流速計の固定は、流速計の種類により異なるが、通常、河川の流量観測等で用いられる流速計は流速計を水面から30cm降下させた位置、水理実験等で用いられる小型流速計はプロペラ中心部を水面から5～10cm降下した位置で行われる。また、走行速度は、測定可能な最低流速から最大流速の間の幾点かの設定で検定が行われる。ここでは、特に水面付近における流速計の測定値の出力変動を知るために、測定水深がプロペラ式流速計による流速測定値にどのような影響を及ぼすかを流速検定実験を通じて検討した結果を述べる。

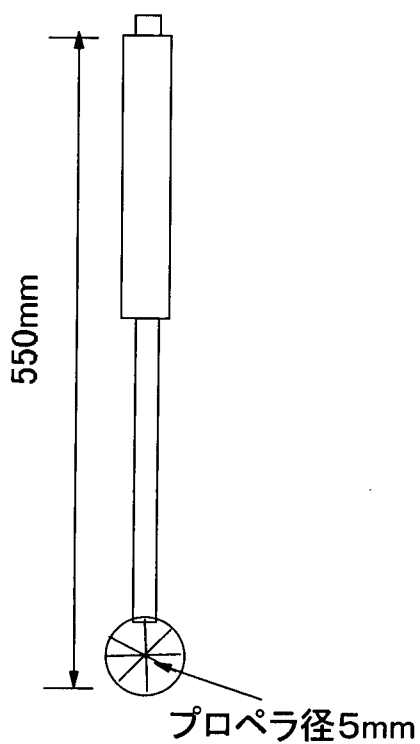
①実験方法

土木研究所内にある流速計検定施設（水文研究室所有：図－1参照）を用いて実験を行った。実験は、任意の水深に設定された検定水路（静水状態）中に、流速計を固定した検定台車を任意の速度で走行させ、その速度と流速計が示す測定値（回転数）と比較することで行った。検定のケースは、全45ケースであり、検定台車の走行速度を3通り（50・100・150cm/s）とし、また流速計の固定位置を水面から5ミリ単位で降下させる（水面～水面下10cm）こととした。なお、水面（測定水深0cm）とは、プロペラ中心部が水面と重なる位置のことを指す。

検定の対象とした流速計は、プロペラ径が5ミリの小型プロペラ式流速計（図－2）であり、測定時間を30秒（1秒間隔）とした。なお、使用した流速計は、使用後半年以上経過し、検定を要するものであった。



図－1 流速計検定施設概略図



図－2 プロペラ流速計

②検定ケース

表－1 に実験ケース一覧表を示す。なお、ここでの測定水深は、流速計のプロペラ中心（軸）が水面上にあるときを0（零）とし、以下鉛直方向の上を＋とする。

表－１ 実験ケース一覧表

走行速度＝50 cm/s		走行速度＝100 cm/s		走行速度＝150 cm/s	
検定ケース	測定水深	検定ケース	測定水深	検定ケース	測定水深
検定１－①	0 cm	検定２－①	0 cm	検定３－①	0 cm
検定１－②	-0.5 cm	検定２－②	-0.5 cm	検定３－②	-0.5 cm
検定１－③	-1 cm	検定２－③	-1 cm	検定３－③	-1 cm
検定１－④	-1.5 cm	検定２－④	-1.5 cm	検定３－④	-1.5 cm
検定１－⑤	-2 cm	検定２－⑤	-2 cm	検定３－⑤	-2 cm
検定１－⑥	-2.5 cm	検定２－⑥	-2.5 cm	検定３－⑥	-2.5 cm
検定１－⑦	-3 cm	検定２－⑦	-3 cm	検定３－⑦	-3 cm
検定１－⑧	-3.5 cm	検定２－⑧	-3.5 cm	検定３－⑧	-3.5 cm
検定１－⑨	-4 cm	検定２－⑨	-4 cm	検定３－⑨	-4 cm
検定１－⑩	-4.5 cm	検定２－⑩	-4.5 cm	検定３－⑩	-4.5 cm
検定１－⑪	-5 cm	検定２－⑪	-5 cm	検定３－⑪	-5 cm
検定１－⑫	-5.5 cm	検定２－⑫	-5.5 cm	検定３－⑫	-5.5 cm
検定１－⑬	-6 cm	検定２－⑬	-6 cm	検定３－⑬	-6 cm
検定１－⑭	-8 cm	検定２－⑭	-8 cm	検定３－⑭	-8 cm
検定１－⑮	-10 cm	検定２－⑮	-10 cm	検定３－⑮	-10 cm

③実験結果

実験結果を、表－２に示す。ここで、走行速度とは検定台車の30秒間の平均速度、測定値は30秒間（1秒間隔）測定した流速の測定値の平均値を指す。また図－２～４に、走行速度別の測定水深と測定値の関係を示す。

走行速度が50cm/sの場合（図－２参照）、水面を基準とし測定水深が降下するにともない測定値／走行速度が増加し、測定水深＝3 cmで測定値／走行速度＝0.94を得た。また、測定水深がさらに降下すると測定値／走行速度も低下し、測定水深＝5 cmで測定値／走行速度＝0.90を得、その後は概ね0.90前後で安定した。

走行速度が100cm/sの場合（図－３参照）、走行速度が50cm/sの場合と同様な傾向を示した。測定水深が水面から徐々に降下するにともない測定値／走行速度が増加し、水面との距離が約3 cmのところで測定値／走行速度＝0.95となった。さらに測定水深が降下すると測定値／走行速度も低下し、5 cmより下の測定水深において測定値／走行速度が0.94前後で安定した。

走行速度が150cm/sの場合（図－４参照）でも同様の傾向であった。0＜測定水深＜3 cmにおいては測定値／走行速度が増加傾向にあり、測定水深＝3 cmで0.97を得る。3＜測定水深＜4 cmでは減少傾向にあり、測定水深＞4 cmにおいて測定値／走行速度＝0.96でほぼ安定した。

表-2 実験結果一覧表

実験ケース	測定位置	走行速度	測定値	走行速度・測定値	測定値／走行速度
1-①	0	-	-	-	-
1-②	-0.5	50	42.5	7.5	0.85
1-③	-1	51	45.8	5.2	0.90
1-④	-1.5	52	46.1	5.9	0.89
1-⑤	-2	52	47.6	4.4	0.92
1-⑥	-2.5	52	47.7	4.3	0.92
1-⑦	-3	52	48.9	3.1	0.94
1-⑧	-3.5	52	48.8	3.2	0.94
1-⑨	-4	51	47.0	4.0	0.92
1-⑩	-4.5	52	46.2	5.8	0.89
1-⑪	-5	52	46.1	5.9	0.89
1-⑫	-5.5	52	47.1	4.9	0.91
1-⑬	-6	52	46.6	5.4	0.90
1-⑭	-8	52	46.9	5.1	0.90
1-⑮	-10	53	47.0	6.0	0.89
2-①	0	-	-	-	-
2-②	-0.5	101	92.7	8.3	0.92
2-③	-1	102	95.2	6.8	0.93
2-④	-1.5	102	95.1	6.9	0.93
2-⑤	-2	102	96.1	5.9	0.94
2-⑥	-2.5	102	97.0	5.0	0.95
2-⑦	-3	102	97.0	5.0	0.95
2-⑧	-3.5	102	96.8	5.3	0.95
2-⑨	-4	102	95.9	6.1	0.94
2-⑩	-4.5	102	95.6	6.4	0.94
2-⑪	-5	102	95.0	7.0	0.93
2-⑫	-5.5	102	96.2	5.8	0.94
2-⑬	-6	103	96.4	6.6	0.94
2-⑭	-8	103	97.0	6.1	0.94
2-⑮	-10	103	97.3	5.7	0.95
3-①	0	-	-	-	-
3-②	-0.5	150	143.1	6.9	0.95
3-③	-1	152	145.2	6.8	0.96
3-④	-1.5	152	145.4	6.6	0.96
3-⑤	-2	152	147.6	4.4	0.97
3-⑥	-2.5	152	147.4	4.6	0.97
3-⑦	-3	152	147.5	4.5	0.97
3-⑧	-3.5	152	146.9	5.1	0.97
3-⑨	-4	152	146.1	5.9	0.96
3-⑩	-4.5	152	145.9	6.1	0.96
3-⑪	-5	152	145.8	6.2	0.96
3-⑫	-5.5	152	146.4	5.6	0.96
3-⑬	-6	152	146.7	5.3	0.96
3-⑭	-8	152	146.6	5.4	0.96
3-⑮	-10	153	146.6	6.4	0.96

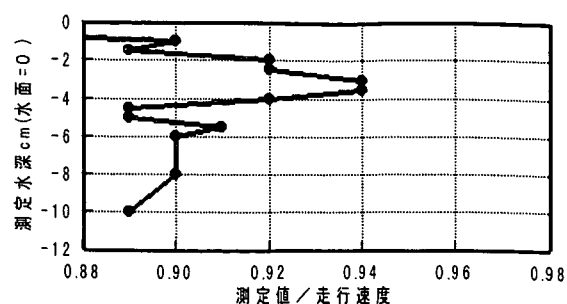


図-2 測定水深と測定値の関係
<走行速度50cm/s>

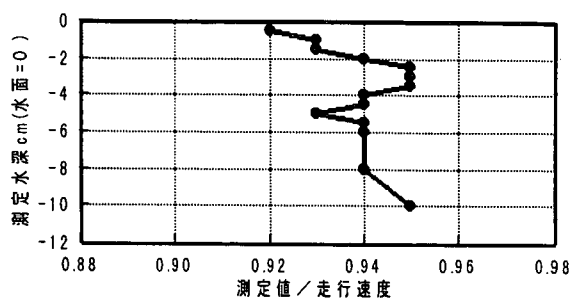


図-3 測定水深と測定値の関係
<走行速度100cm/s>

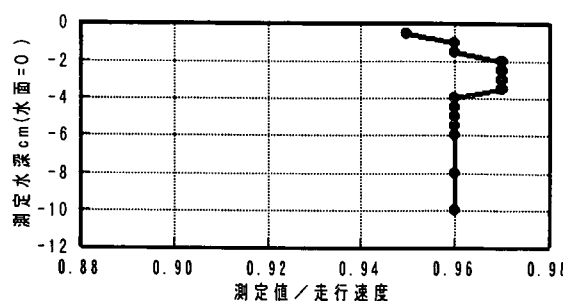


図-4 測定水深と測定値の関係
<走行速度150cm/s>

3. まとめと考察

本流速検定実験で明らかになった点を以下に述べる。

- ・流速測定水深が5～10cmの範囲では、走行速度に対する測定値（測定値／走行速度）が最も安定した。

通常の流速計の検定は、水面から5～10cmの位置で行われる。この測定位置は、今回行った3通りの走行速度における実験に通じていえるが、測定値／走行速度が最も安定しており、回転数と流速の関係を導くのに適した水深といえる。またこの安定性は、測定水深がさらに水面から遠ざかっても（測定水深＞10cm）保持されると考えられる。

- ・水面付近（0＜測定水深＜2cm）は、測定値が過小評価される。

測定水深が0から2cmくらいの水面付近では、通常の検定を行った場合に、実際の流速よりも小さな値が測定値として得られるため、流速を過小評価していることになる。

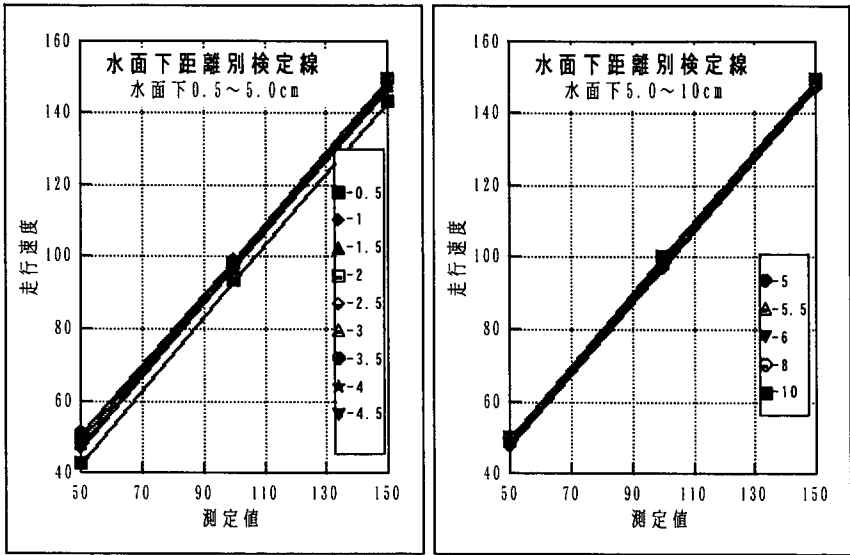
- ・2＜測定水深＜5cmの範囲における測定値は、過大評価される。

水面付近とは逆に、2＜測定水深＜5cmの範囲では、通常の検定を行った場合に、実際の流速よりも大き

な値が測定値として得られるため、流速を過大評価していることになる。

以上のことをまとめると、通常の検定方法により調整された流速計を用いて、水面から5 cm以内の流速を計測する場合には、何らかの補正を加えるが必要になる。よって、プロペラ式流速計を用いる場合には、水深に応じた検定線を作成（図－5 参照）、もしくは回転数と水深の項を含む2次式を提案し流速を算出する（検定線を水深毎に作成するということは、測定水深を明確にするということに他ならないが、本流速検定実験で取り上げたプロペラ式流速計は本来、ポータブル的な使い道をされるため、測定水深を測る行程を含むことは好ましくない）か、水面近く（測定水深<5 cm）では測定を行わないなどの対策が必要となる。

以上のように、プロペラ式流速計の使用にあたっては水深毎の流速誤差を考慮する必要があるが、これにはプロペラの径や形状による測定水深と測定値の関係等も明確にする必要がある。また、今回実施した実験は、①屋外にある施設を用いており、風による影響（水面の波立ちの発生）を受けやすい、②河川調査用の流速計（全長30cm程度のプライス式流速計など）を対象にした検定施設であり、高精度の小型流速計対応ではない、などの問題があり、実験データに誤差を含んむ可能性が高いと考えられる。よって、高精度小型流速計の精度に関する検討を行う場合には、外部の影響を受けにくい専用の検定施設で、種々タイプの流速計による比較検討を行う必要があると考えられる。



図－5 流速検定線

流速計検定実験（その２）

１．はじめに

流速計検定実験（その１）において、土木研究所内の流速計検定施設を用いた検討を行った。その結果、施設上の問題により、実験データに誤差を含んでいる可能性はあるが、流速計出力値は測定水深により変化する傾向があることが分かった。ここでは、流速計メーカーが所有する専用の検定施設を用いて、流速検定実験（その１）と同様の実験を行った結果を述べることとする。

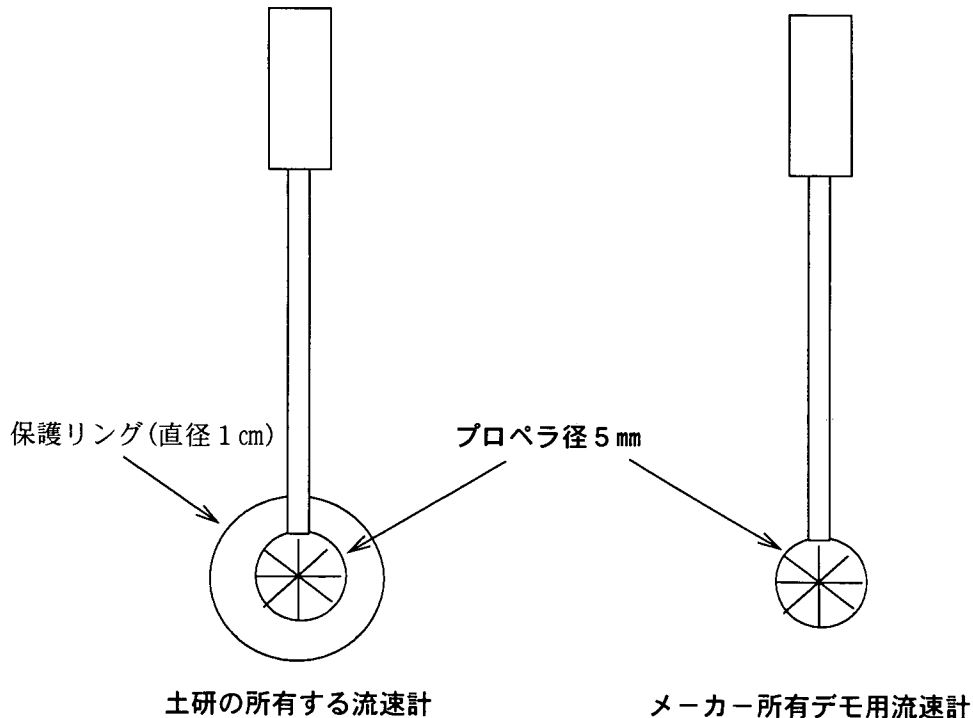
２．実験概要

①検定施設

検定には、水路幅30cm、水路深さ20cm、水路長10mの矩形水路を用いた。検定水路は屋内にあり、風などによる外部から影響がほとんど無視できると考えられる。

②検定用流速計

検定を行った流速計は、流速検定実験（その１）で用いたプロペラ流速計（プロペラ径5mm）と、同メーカーが所有するデモ用プロペラ流速計（プロペラ径5mm）である。２つの流速計の構造上の大きな違いは、保護リングの有無であり、前者が保護リング付き、後者が保護リング無しである（図－１）。



図－１ 検定用プロペラ流速計概念図

③検定方法

検定は、流速計の位置を水面から（0 cm）から0.5 cmピッチで7 cmまで下降させて行った。台車速度は、各流速計位置（測定水深）において、約9 cm/sから約150 cm/sまで少しずつ変化（11回程度）させて、流速計の示す出力値（パルス数）を読み、各測定水深毎の検定線を作成した。また、台車速度を3パターン（50・100・140 cm/s）に固定し、測定値（出力値から同一検定線を用いて流速値としたもの）と測定水深の関係を調べた。なお、本実験における測定水深＝0 cmは、プロペラが完全に水没する位置を示す（前実験と異なるので注意）。

3. 実験結果

各測定水深毎の実験結果を表－1に示す。表中の、正方向とは流下方向（下流方向）、逆方法とはその逆（上流方向）を指す。また、係数A, Bは検定線の傾きと切片を指す。

検定線の傾きに注目すると、測定水深が水面（0 cm）に近いほど急になった。この傾向は、正方向及び逆方向のいずれの測定でも現れた。また、測定水深が3 cm以上になると、検定線の傾きが安定した。

測定台車速度毎の測定値と測定水深の関係を、図－2に示す。また、比較のために、同じ流速計メーカーのデモ用流速計を用いて、同じ実験を行った結果を、図－3に示す。グラフより明らかになったことを以下に述べる。

①実測値と台車速度の関係

通常の流速計は、測定機器1台につき検定線1本を備えている。今回の実験で用いた流速計も然りである。その1本の検定線を基に流速計からでる出力値を流速計に換算すると、グラフ横軸の実測値（もしくは測定値）が求まる。機器の性能上、実測値と台車速度は同値でなければならず、 $\text{実測値} / \text{台車速度} = 1$ （理想値）となることが望ましい。しかしながら、現実的に $\text{実測値} / \text{台車速度} = 1$ とすることは不可能であり、 $\text{実測値} / \text{台車速度} \neq 1$ となるのが一般的で、理想値とこれの差は、普通、誤差と呼ばれる。今回の実験における誤差を見ると（土研所有の流速計の場合）、先に述べた検定線の傾きと同様に、測定水深が水面（0 cm）から3, 4 cmの間において、誤差が非常に大きくなり、水面に近づくほど誤差がさらに大きくなる傾向にある。なお、この傾向は、台車速度に関係なく、同様の傾向が見られた。

比較のために実施した、デモ用流速計を用い同実験結果からも同様のことがいえる。デモ用流速計では、 $0 \text{ cm} \leq \text{測定水深} \leq 2, 3 \text{ cm}$ の範囲で誤差が大きく、とくに測定水深が水面に近いほど誤差が大きくなる傾向にあった。

②台車速度による誤差

実験では、台車速度を3パターン（50, 100, 140 cm/s）変化させて、台車速度による誤差の変化傾向を検討した。その結果、台車速度が速いほど、実測値と台車速度の誤差が少なく、台車速度が遅くなると誤差が大きくなる傾向にあった。この傾向は、土研所有流速計、デモ用流速計のいずれでも見られた。

表-1 実験結果一覧表

測定水深=0.0cm				測定水深=3.0cm				測定水深=6.0cm			
正方向 A=0.180,B=3.0		逆方向 A=0.188,B=3.0		正方向 A=0.160,B=3.0		逆方向 A=0.168,B=3.0		正方向 A=0.159,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0	
台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数
8.8	26	8.7	25	9.3	30	9.0	30	9.4	31	9.1	31
19.5	84	19.5	83	20.2	94	20.0	92	20.4	95	20.1	92
28.5	136	28.4	132	29.2	149	29.1	145	29.4	151	29.2	146
38.1	179	38.0	175	38.9	209	38.8	203	39.1	211	38.9	205
48.0	229	47.9	223	49.0	270	48.8	262	49.2	275	48.9	265
59.5	284	59.4	286	60.6	342	60.4	331	60.8	346	60.6	336
70.8	350	70.6	348	71.9	413	71.7	399	72.1	419	71.8	403
78.5	404	78.4	388	79.8	463	79.6	446	79.9	469	79.6	451
90.6	477	90.3	461	91.9	542	91.6	521	92.0	548	91.7	525
99.4	536	99.2	511	100.8	602	100.5	575	100.9	608	100.6	581
139.8	807	140.2	778	141.0	867	140.7	825	141.4	870	140.8	828
測定水深=0.5cm				測定水深=3.5cm				測定水深=6.5cm			
正方向 A=0.174,B=3.0		逆方向 A=0.179,B=3.0		正方向 A=0.159,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0		正方向 A=0.158,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0	
台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数
9.1	29	9.0	27	9.4	31	9.1	30	9.4	31	9.1	31
19.9	90	19.7	87	20.3	95	20.1	92	20.4	95	20.1	92
28.8	139	28.7	135	29.3	150	29.1	146	29.4	150	29.2	146
38.4	182	38.2	177	39.0	211	38.8	203	39.1	211	38.8	204
48.3	224	48.1	225	49.1	272	48.8	263	49.1	274	48.9	265
59.8	301	59.6	296	60.6	344	60.4	332	60.6	346	60.4	335
70.9	367	70.8	360	72.0	416	71.7	401	72.1	418	71.8	403
78.8	419	78.6	408	79.7	465	79.6	449	79.9	469	79.6	451
90.9	496	90.7	481	91.9	545	91.7	523	92.0	549	91.7	524
99.5	552	99.4	536	100.8	605	100.5	579	100.8	607	100.4	579
140.4	820	140.3	798	141.1	869	140.9	830	141.5	872	141.2	831
測定水深=1.0cm				測定水深=4.0cm				測定水深=7.0cm			
正方向 A=0.170,B=3.0		逆方向 A=0.174,B=3.0		正方向 A=0.159,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0		正方向 A=0.158,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0	
台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数
9.1	29	8.9	28	9.4	31	9.0	30	9.5	32	9.2	31
19.9	92	19.8	89	20.3	95	20.1	92	20.4	96	20.1	93
28.9	146	28.8	142	29.3	150	29.1	146	29.4	151	29.2	146
38.5	189	38.3	185	39.0	211	38.8	204	39.1	212	38.8	204
48.4	244	48.3	236	49.1	273	48.8	264	49.1	274	48.8	265
59.9	317	59.8	306	60.7	345	60.4	335	60.7	347	60.4	334
71.2	385	71.0	377	72.0	417	71.7	402	72.0	418	71.7	402
79.0	434	78.9	419	79.8	468	79.6	450	79.8	468	79.5	451
91.1	509	90.9	496	92.0	548	91.8	525	91.6	546	91.5	523
100.0	564	99.8	553	101.1	607	100.6	581	101.4	607	100.6	581
140.6	825	140.4	810	141.1	867	140.7	829	141.4	871	141.2	832
測定水深=1.5cm				測定水深=4.5cm							
正方向 A=0.168,B=3.0		逆方向 A=0.172,B=3.0		正方向 A=0.158,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0					
台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数				
9.2	30	9.0	29	9.4	31	9.1	31				
20.1	94	19.8	90	20.3	95	20.1	93				
29.0	142	28.8	139	29.4	150	29.1	146				
38.6	195	38.5	189	39.1	212	38.8	204				
48.6	254	48.4	246	49.1	274	48.9	265				
60.2	324	60.0	318	60.7	346	60.5	335				
71.4	394	71.2	383	72.1	418	71.8	403				
79.3	440	79.0	427	79.9	471	79.6	452				
91.3	516	90.9	501	92.0	549	91.7	526				
100.1	572	99.8	556	100.9	607	100.6	582				
140.7	838	140.6	815	141.1	868	140.9	828				
測定水深=2.0cm				測定水深=5.0cm							
正方向 A=0.167,B=3.0		逆方向 A=0.170,B=3.0		正方向 A=0.159,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0					
台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数				
9.3	30	9.0	30	9.4	32	9.1	30				
20.1	94	19.9	91	20.3	96	20.1	92				
29.1	146	28.9	143	29.4	151	29.2	145				
38.7	199	38.5	197	39.1	212	38.8	204				
48.7	260	48.5	256	49.2	274	48.9	265				
60.3	329	60.0	324	60.7	347	60.5	334				
71.5	398	71.3	391	72.1	419	71.9	403				
79.2	445	79.1	437	80.0	470	79.7	451				
91.4	522	91.1	510	92.1	548	91.8	526				
100.4	577	100.2	565	101.0	608	100.6	581				
141.0	857	140.6	820	141.2	871	140.9	832				
測定水深=2.5cm				測定水深=5.5cm							
正方向 A=0.162,B=3.0		逆方向 A=0.169,B=3.0		正方向 A=0.159,B=3.0		逆方向 A=0.166,B=3.0					
台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数	台車速度cm/4パルス数				
9.3	31	9.0	29	9.4	31	9.2	31				
20.2	94	20.0	92	20.4	96	20.1	92				
29.2	148	29.0	144	29.4	151	29.2	146				
38.9	206	38.7	200	39.1	212	38.9	205				
48.9	266	48.7	259	49.2	275	49.0	266				
60.5	337	60.2	328	60.9	348	60.6	336				
71.7	406	71.4	394	72.1	419	71.9	403				
79.4	457	79.1	439	80.0	470	79.7	452				
91.7	538	91.5	516	92.1	549	91.8	525				
100.7	596	100.4	571	101.0	608	100.7	581				
140.9	862	140.7	825	141.4	868	141.0	830				

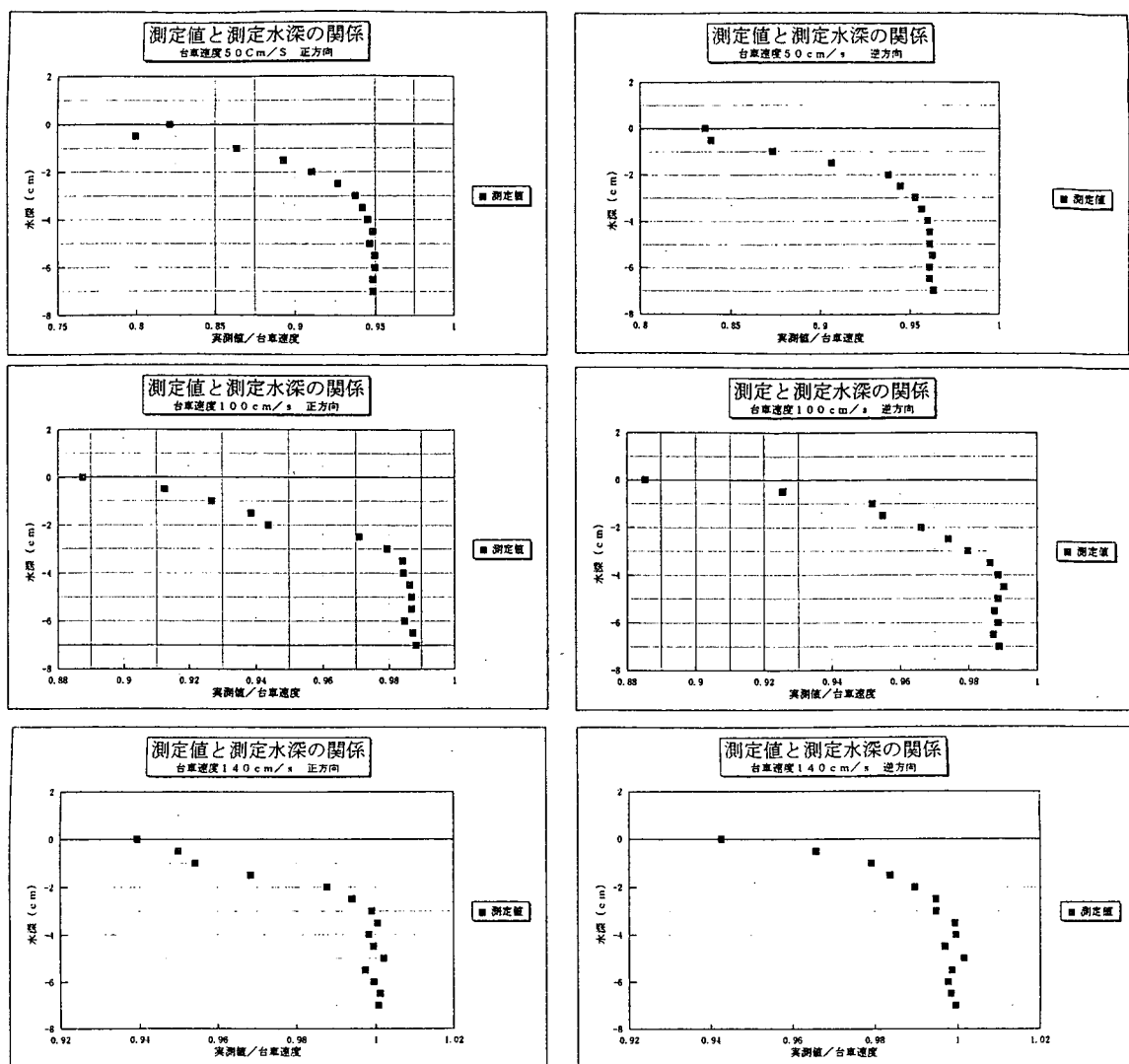


図-2 測定台車速度毎の測定値と測定水深の関係（土研所有流速計の場合）
標準品

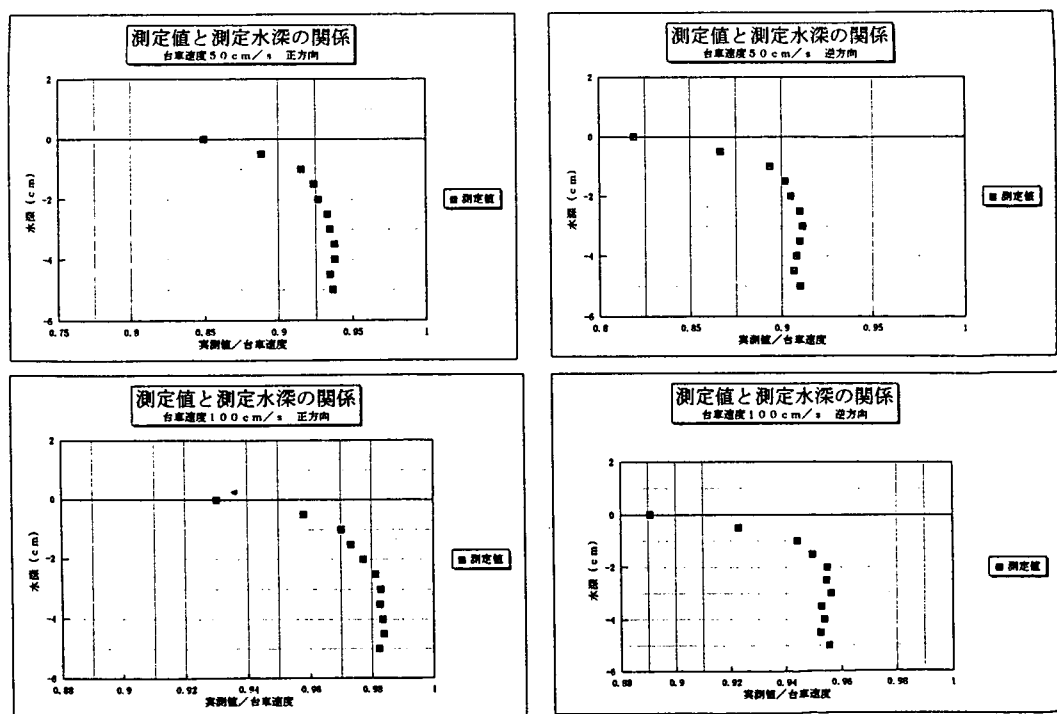


図-3 測定台車速度毎の測定値と測定水深の関係（メーカー所有デモ用流速計の場合）

4. まとめと考察

流速検定実験（その1）において検定施設場上の問題点が明らかになったため、専用施設を用いた補足実験を行った。

実験の結果、①測定水深が水面に近いほど（ $0\text{ cm} \leq \text{測定水深} \leq \text{約 } 3\text{ cm}$ ）、流速計の表示する値（測定値）の誤差（真値との差）が大きくなる、②台車速度（もしくは実際の流速）が小さいほど、測定誤差が大きくなる、などのことが分かった。これら①及び②の原因については、本データのみから明確にすることは難しい。①に関して分かる事実をあえて述べるとすれば、土研所有の流速計の方が、デモ用の流速計に比べ誤差が大きくなった原因は、土研所有の流速計の保護リングの影響が大きいためであると考えられる。とくに水面付近では、保護リング及びその接続部（溶接部）により流れが乱されたと考えられる。ただし、先に述べたように、保護リングが無い場合（デモ用流速計）でも同様の傾向が見られるが、この原因は不明である。

以上のように、従来通り、測定機器1台に対し検定線1本であると、測定水深が水面に近い場合や実流速が遅い場合に、より大きな誤差を生ずることが明らかになった。よって、より精密な計測を求める場合には、水深や実流速に応じた検定線が必要になる。この検定線の数、求められる計測精度によって異なることが考えられる。つまり、求める精度が高いほど、より多くの水深毎に検定線を作成する必要があるということである。

＜参考資料(2)＞

土木研究所以外の流速分布計測例

まえがき

下水管渠内の流速分布は、下水管渠内が腐食環境下にある、下水は固形物・油分を多く含む、水位の変動が激しい、などの問題により、機器の制約面、作業の安全面からその計測が困難な状況にある。そのため、下水管渠内の流速分布については、その計測例が極めて少ない。土木研究所においてはこれら問題を加味し、下水道管渠の模型における水道水の通水実験を実施することにより、下水管渠内の流速分布を再現することとし、その結果については本報告書において述べた。ここでは、土木研究所以外で計測された、流速分布の事例について紹介することとする。

流速分布計測例の紹介

(1) 機器メーカーA社による測定例

①測定状況

管 種：ヒューム管

管 径：800mmおよび870mm

測定場所：直管部（上下流に10D以上の直線部を有する）

管内状況：スカムおよび堆積物無し

測定機器：電磁流速計

測定項目：水位、流速（鉛直・水平方向ともに10cmメッシュ）

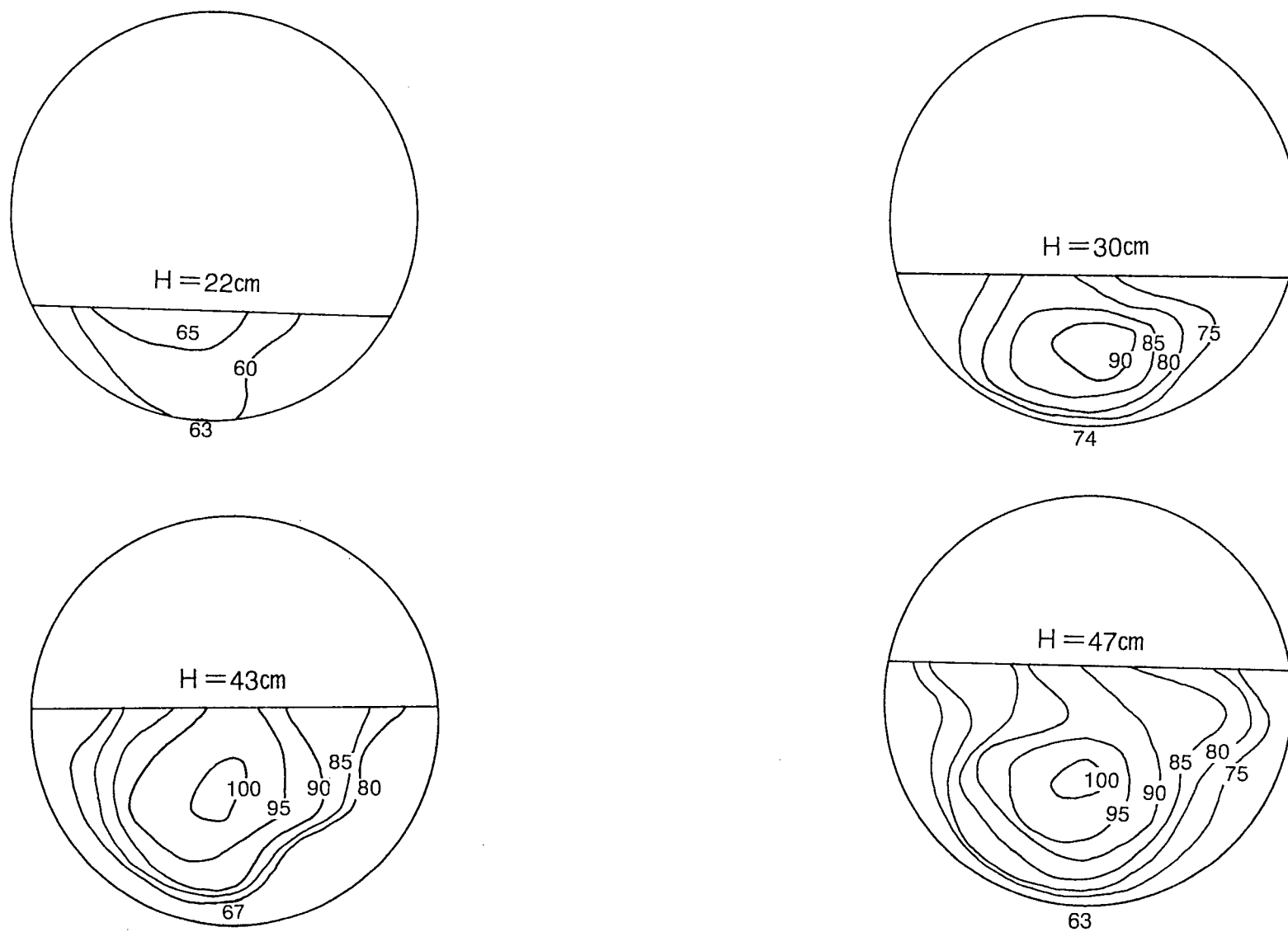
備 考：晴天時に測定。

表面流速は、水面下約1.5cm

マンホール内計測ではなく、管路内計測。

②流速分布計測例

流速分布の計測例を、図-1・2に示す。図-1は、管径800mmの下水管渠、図-2は、管径870mmの管渠における流速分布を示す。



図－1 管径800mmの下水管渠における流速分布計測例

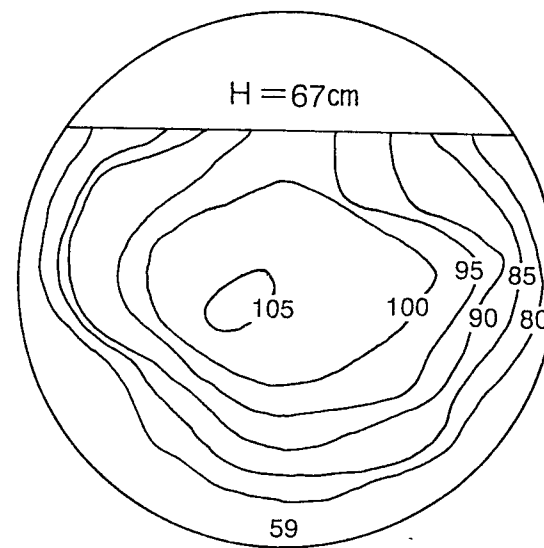
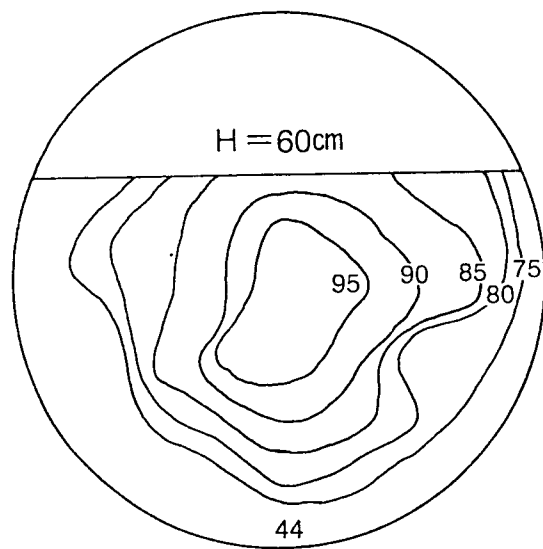
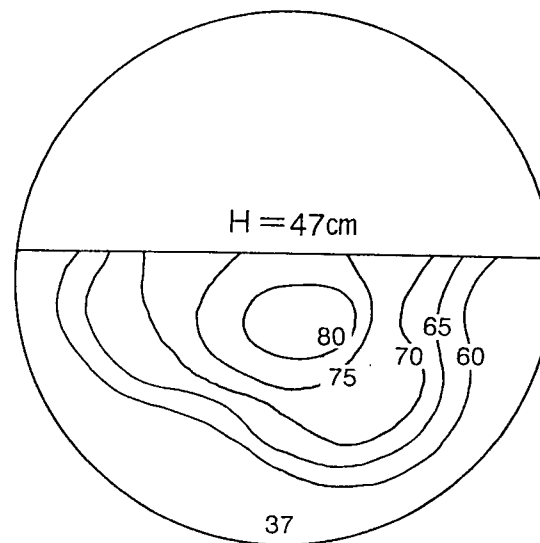
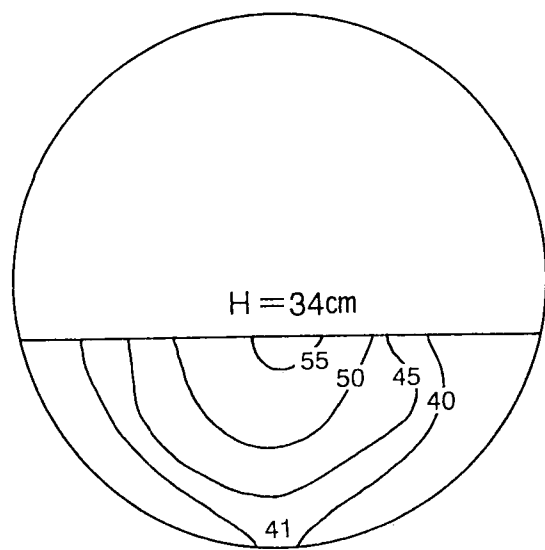


図-2 管径870mmの下水管渠における流速分布計測例

(2) B市による測定例

①測定状況

管 種：塩化ビニル管（管渠模型）

管 径：200mm

測定場所：12m直線管渠の中央部

測定機器：電磁流速計

測定項目：流量、水位、動水勾配、流速（測定メッシュは、鉛直方向1 cm以下、水平方向2.5 cm）

備 考：水路勾配を3パターン(0/1000, 1/1000, 1.5/1000)に変化

②流速分布計測例

流速分布の計測例を、図-3～5に示す。図-3は、水路勾配が0/1000の場合、図-4は、水路勾配が1/1000の場合、図-5は、水路勾配が1.5/1000の場合の流速分布である。

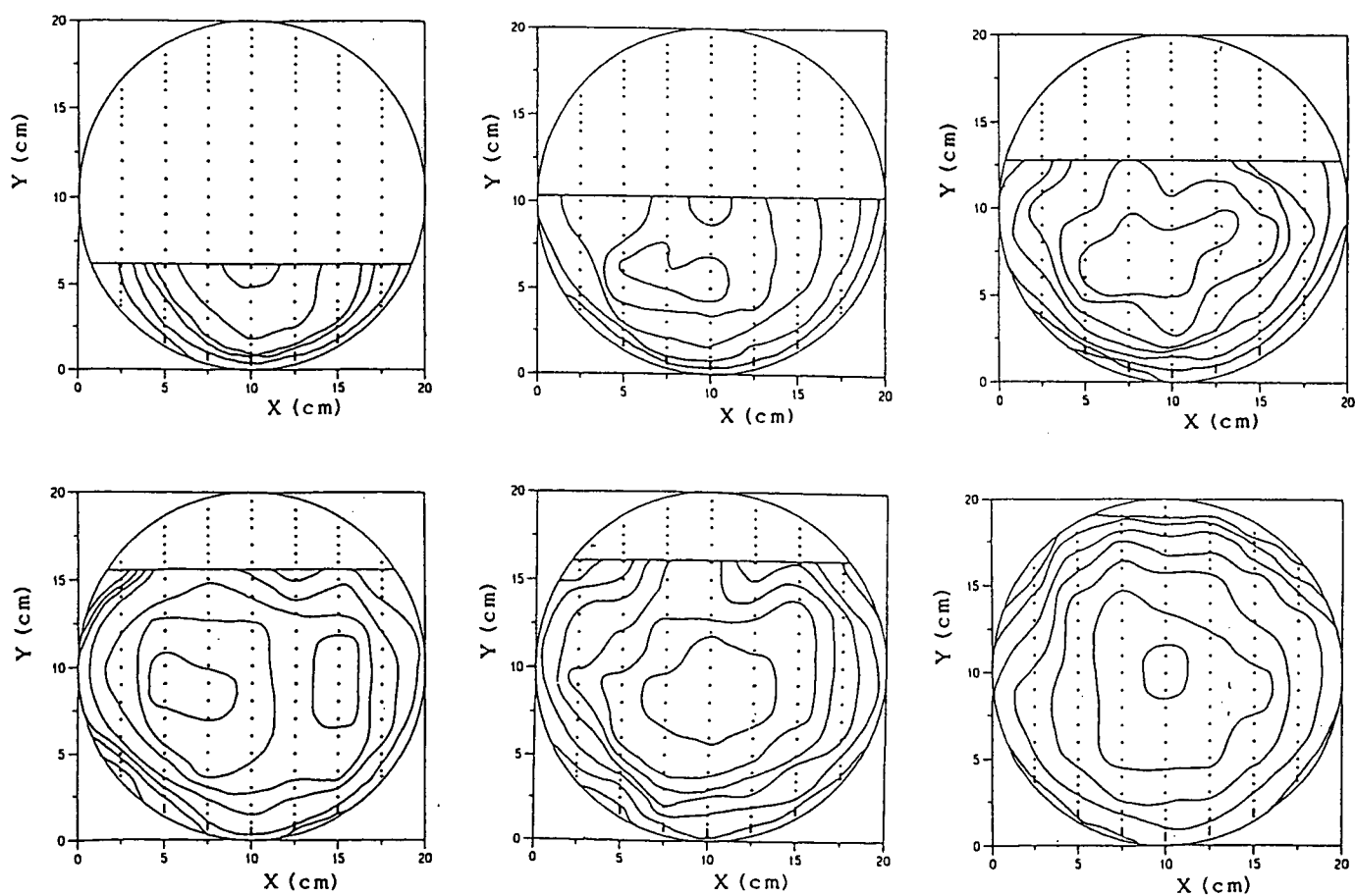


図-3 水路勾配=0/1000の場合の流速分布

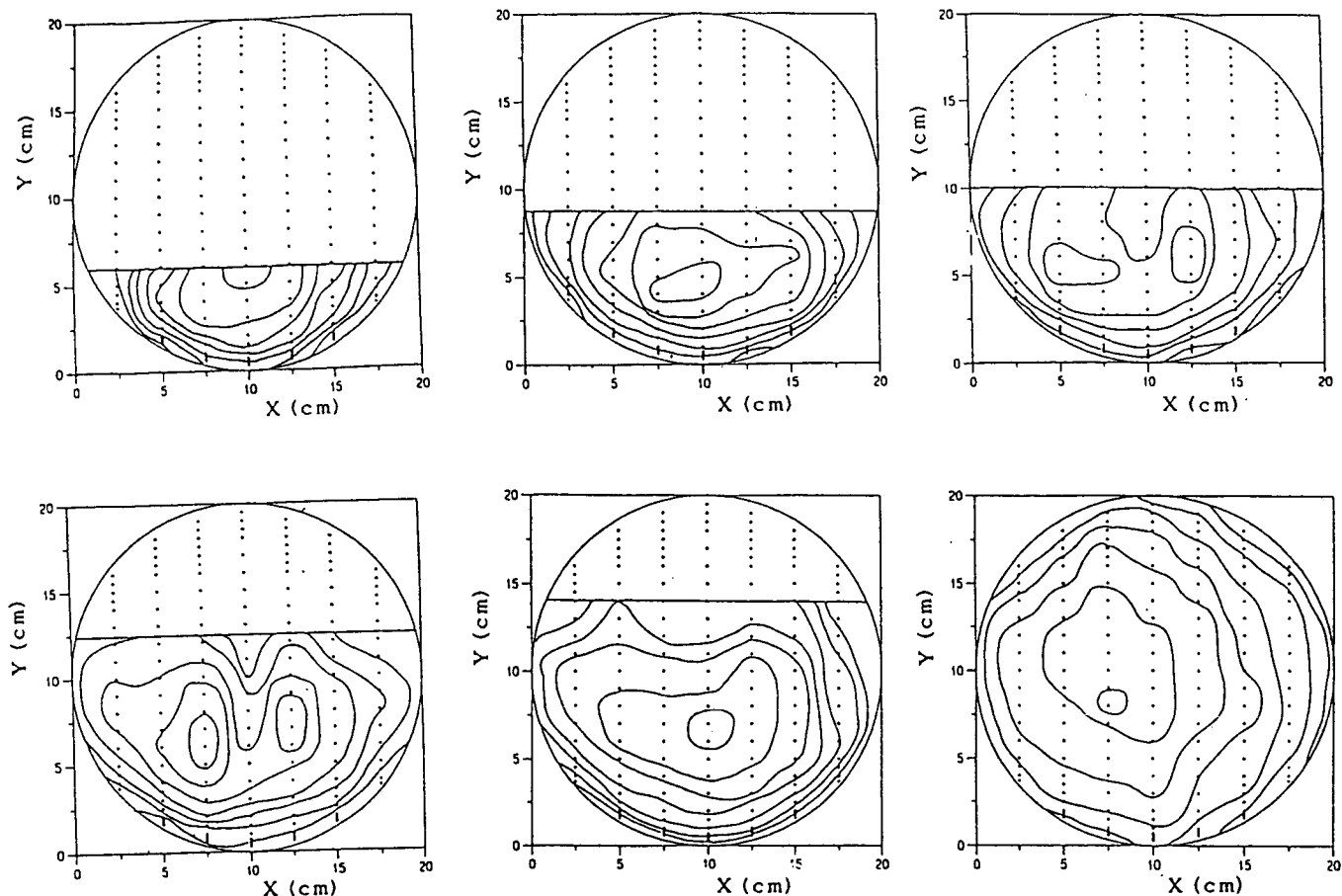


図-4 水路勾配=1/1000の場合の流速分布

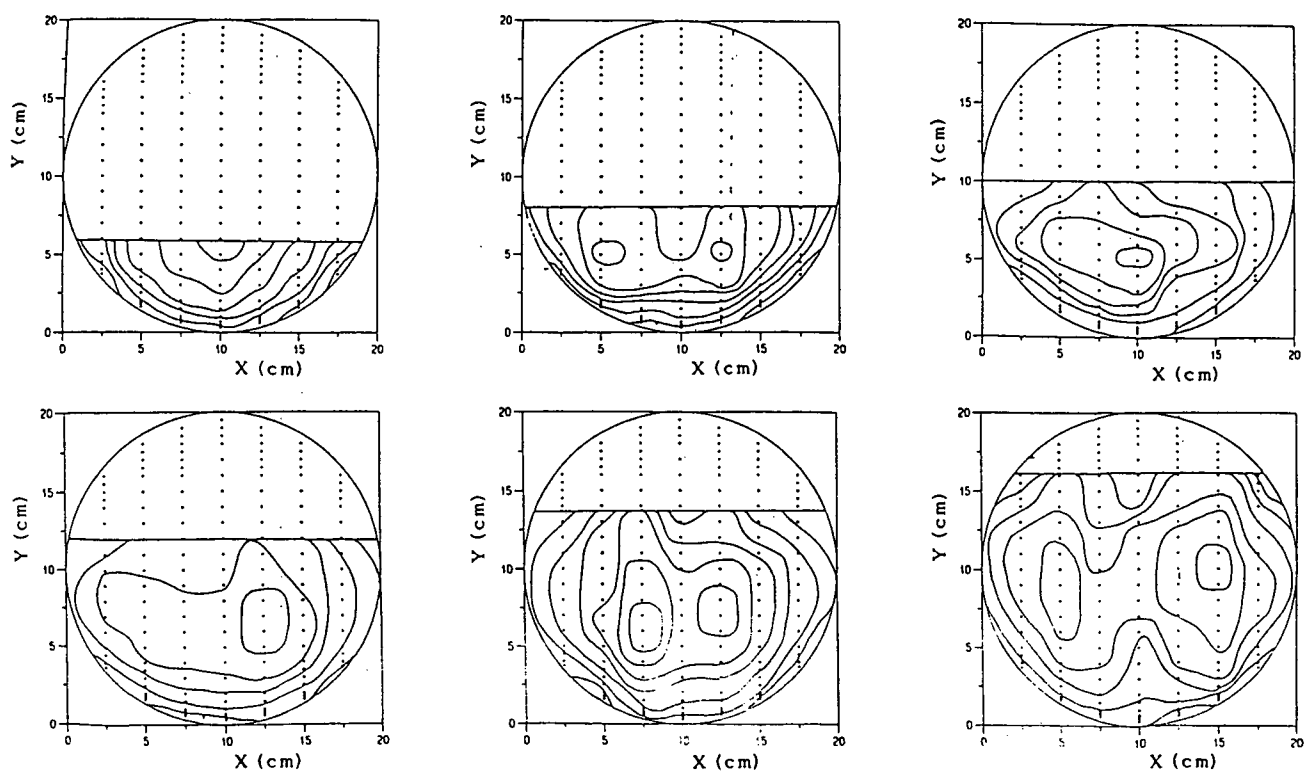


図-5 水路勾配=1.5/1000の場合の流速分布

＜参考資料（3）＞

最大流速と平均流速の関係（補足）

最大流速と平均流速との関係について、本報告書では土木研究所における実験データについてのみ論じてきた。ここでは土研データに加え、土木研究所以外で行われた実験データ及び実管渠における測定結果をグラフにプロットした。図-1に、最大流速と平均流速の関係図を示す。

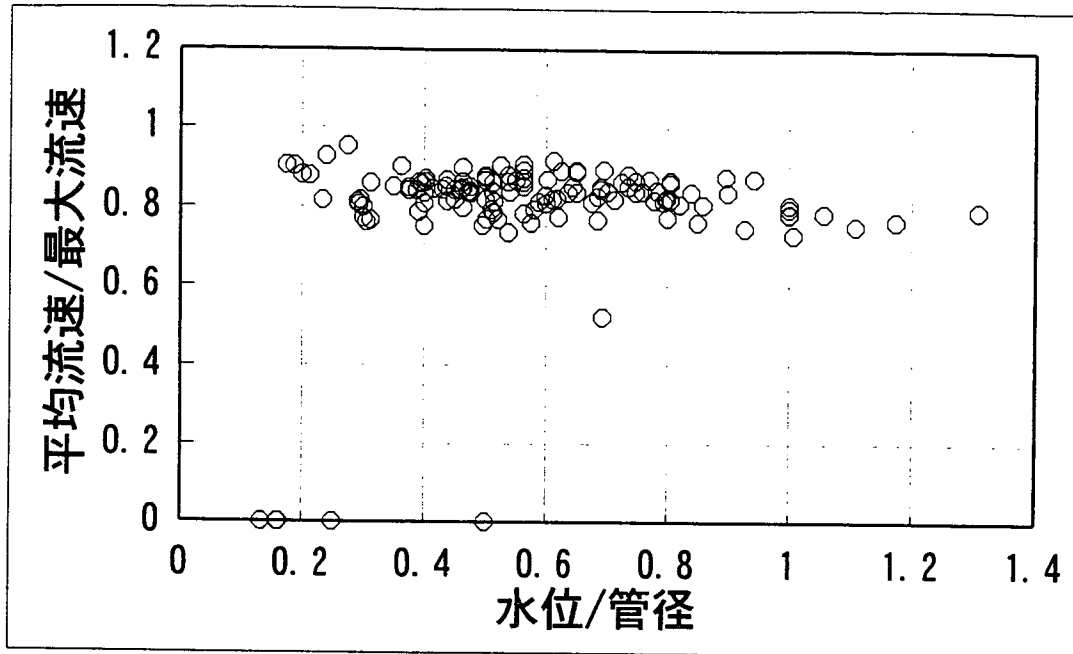


図-1 最大流速と平均流速の関係

土木研究所以外のデータとして、自治体およびメーカー等で行われた模型実験データ（塩化ビニル管、 ϕ 200mm）およびメーカーによる実管渠測定データ（ヒューム管、 ϕ 800及び ϕ 870mm）など、計113ケースの測定データを加えた。なお、最大流速に関する全データを、表-1に示す。

表-1 最大流速に関する全データ一覧表

No	水位 cm	管径 cm	水位/管径	最大流速 cm/s	平均流速 cm/s	平均/最大	水路勾配 %	データ区分 模型1実管2
1	6.24	20	0.312	33.0	25.3	0.767	0/1000	1
2	8.60	20	0.430	23.0	19.4	0.845	0/1000	1
3	10.28	20	0.514	22.5	18.3	0.814	0/1000	1
4	12.72	20	0.636	17.0	14.2	0.836	0/1000	1
5	13.85	20	0.693	26.7	13.9	0.521	0/1000	1
6	15.94	20	0.797	19.0	15.6	0.821	0/1000	1
7	18.55	20	0.928	21.5	16.1	0.747	0/1000	1
8	21.12	20	1.056	25.2	19.8	0.784	0/1000	1
9	23.47	20	1.174	27.0	20.7	0.766	0/1000	1
10	26.15	20	1.308	32.7	25.9	0.792	0/1000	1
11	15.56	20	0.778	34.9	28.5	0.818	0/1000	1
12	17.18	20	0.859	35.5	28.6	0.806	0/1000	1
13	22.16	20	1.108	32.0	24.1	0.753	0/1000	1
14	5.81	20	0.291	42.0	34.1	0.812	1/1000	1
15	8.72	20	0.436	47.0	40.1	0.853	1/1000	1
16	10.00	20	0.500	47.0	41.3	0.879	1/1000	1
17	12.36	20	0.618	52.5	43.2	0.822	1/1000	1
18	14.02	20	0.701	50.1	42.0	0.839	1/1000	1
19	15.98	20	0.799	48.0	39.5	0.822	1/1000	1
20	17.99	20	0.900	48.0	40.2	0.837	1/1000	1
21	20.14	20	1.007	49.8	36.4	0.730	1/1000	1
22	5.86	20	0.293	52.5	42.3	0.806	1.5/1000	1
23	8.04	20	0.402	52.5	45.3	0.863	1.5/1000	1
24	10.03	20	0.502	67.5	51.9	0.769	1.5/1000	1
25	11.97	20	0.599	55.0	45.6	0.829	1.5/1000	1
26	13.69	20	0.685	68.9	52.9	0.767	1.5/1000	1
27	16.09	20	0.805	50.3	41.1	0.817	1.5/1000	1
28	36.00	80	0.450	98.0	80.3	0.819		2
29	28.00	80	0.350	88.0	74.9	0.851		2
30	52.00	80	0.650	127.0	112.8	0.888		2
31	31.00	80	0.388	81.0	68.2	0.842		2
32	6.00	24	0.250	52.0			0/1000	1
33	6.00	24	0.250	55.0			1/1000	1
34	6.00	24	0.250	57.0			2/1000	1
35	6.00	24	0.250	78.0			3/1000	1
36	6.00	24	0.250	101.0			4/1000	1
37	12.00	24	0.500	87.0			0/1000	1
38	12.00	24	0.500	94.0			1/1000	1
39	12.00	24	0.500	95.0			2/1000	1
40	29.50	220	0.134	84.0				2
41	29.40	220	0.134	85.0				2
42	19.40	120	0.162	40.0				2
43	19.20	120	0.160	37.0				2
44	73.00	87	0.839	112.0	93.9	0.838		2
45	67.00	87	0.770	105.0	91.3	0.870		2
46	63.00	87	0.724	97.0	83.7	0.863		2
47	66.00	87	0.759	104.0	87.3	0.839		2
48	60.00	87	0.690	97.0	81.9	0.844		2
49	60.00	87	0.690	96.0	81.6	0.850		2
50	62.00	87	0.713	99.0	81.1	0.819		2
51	65.00	87	0.747	97.0	84.0	0.866		2
52	64.00	87	0.736	105.0	89.4	0.851		2
53	70.00	87	0.805	109.0	93.8	0.861		2
54	69.00	87	0.793	116.0	94.4	0.814		2
55	70.00	87	0.805	114.0	98.9	0.868		2
56	68.00	87	0.782	111.0	93.5	0.842		2
57	65.00	87	0.747	109.0	91.3	0.838		2
58	56.00	87	0.644	91.0	77.4	0.851		2
59	47.00	87	0.540	83.0	69.6	0.839		2
60	40.00	87	0.460	70.0	59.1	0.844		2
61	36.00	87	0.414	61.0	51.6	0.846		2
62	34.00	87	0.391	55.0	47.4	0.862		2
63	35.00	87	0.402	56.0	48.8	0.871		2
64	41.00	87	0.471	73.0	61.2	0.838		2
65	64.00	87	0.736	108.0	95.2	0.881		2
66	78.00	87	0.897	126.0	110.5	0.877		2
67	82.00	87	0.943	121.0	105.6	0.873		2
68	45.00	80	0.563	92.0	79.4	0.863		2
69	43.00	80	0.538	100.0	86.4	0.864		2
70	37.00	80	0.463	95.0	82.1	0.864		2
71	31.00	80	0.388	81.0	68.2	0.842		2
72	41.00	80	0.513	99.0	85.4	0.863		2
73	36.00	80	0.450	98.0	80.3	0.819		2
74	41.00	80	0.513	105.0	88.0	0.838		2
75	41.00	80	0.513	99.0	77.9	0.787		2
76	30.00	80	0.375	91.0	76.6	0.842		2
77	36.00	80	0.450	91.0	76.8	0.844		2
78	38.00	80	0.475	92.0	76.9	0.836		2
79	37.00	80	0.463	95.0	75.9	0.799		2
80	43.00	80	0.538	96.0	70.7	0.736		2
81	40.00	80	0.500	105.0	91.1	0.868		2
82	38.00	80	0.475	99.0	83.2	0.840		2
83	43.00	80	0.538	105.0	92.4	0.880		2
84	44.00	80	0.550	109.0	94.5	0.867		2
85	38.00	80	0.475	99.0	84.3	0.852		2
86	46.00	80	0.575	106.0	80.6	0.760		2
87	47.00	80	0.588	101.0	82.1	0.813		2
88	45.00	80	0.563	106.0	92.5	0.873		2
89	45.00	80	0.563	108.0	84.7	0.784		2
90	49.00	80	0.613	99.0	90.8	0.917		2
91	35.00	80	0.438	98.0	79.9	0.815		2
92	37.00	80	0.463	99.0	84.0	0.848		2
93	40.00	80	0.500	105.0	91.9	0.875		2
94	30.00	80	0.375	92.0	78.1	0.849		2
95	22.00	80	0.275	66.0	62.9	0.953		2
96	25.00	80	0.313	82.0	70.5	0.860		2
97	28.00	80	0.350	88.0	74.9	0.851		2
98	17.00	80	0.213	65.0	57.1	0.878		2
99	15.00	80	0.188	59.0	53.3	0.903		2
100	16.00	80	0.200	62.0	54.6	0.881		2
101	14.00	80	0.175	54.0	48.9	0.906		2
102	37.00	80	0.463	108.0	97.2	0.900		2
103	29.00	80	0.363	89.0	80.3	0.902		2
104	35.00	80	0.438	104.0	90.4	0.869		2
105	45.00	80	0.563	116.0	105.3	0.908		2
106	52.00	80	0.650	127.0	112.8	0.888		2
107	50.00	80	0.625	112.0	99.8	0.891		2
108	52.00	80	0.650	120.0	107.1	0.893		2
109	45.00	80	0.563	114.0	101.7	0.892		2
110	45.00	80	0.563	109.0	92.9	0.852		2
111	42.00	80	0.525	112.0	101.4	0.905		2
112	7.10	30.4	0.234	132.0	107.8	0.817	7/1000	1
113	18.30	30.4	0.602	198.9	172.9	0.869	7/1000	1
114	4.80	20	0.240	87.1	80.8	0.928	0/1000	1
115	7.90	20	0.395	109.6	94.2	0.859	0/1000	1
116	10.40	20	0.520	123.3	94.9	0.770	0/1000	1
117	12.20	20	0.610	124.8	102.3	0.820	0/1000	1
118	13.00	20	0.650	121.3	101.5	0.837	0/1000	1
119	16.40	20	0.820	116.9	94.5	0.808	0/1000	1
120	20.00	20	1.000	143.7	114.5	0.797	0/1000	1
121	5.90	20	0.295	33.4	27.3	0.817	1/1000	1
122	8.00	20	0.400	44.8	37.4	0.835	1/1000	1
123	10.20	20	0.510	56.2	44.6	0.794	1/1000	1
124	12.00	20	0.600	65.4	52.9	0.809	1/1000	1
125	13.90	20	0.695	76.4	68.3	0.894	1/1000	1
126	16.00	20	0.800	85.9	66.4	0.773	1/1000	1
127	17.00	20	0.850	93.8	71.5	0.762	1/1000	1
128	20.00	20	1.000	140.9	110.4	0.784	1/1000	1
129	6.00	20	0.300	63.4	48.9	0.771	3/1000	1
130	8.00	20	0.400	84.5	63.5	0.751	3/1000	1
131	9.90	20	0.495	95.9	72.3	0.754	3/1000	1
132	12.40	20	0.620	96.2	74.5	0.774	3/1000	1
133	13.70	20	0.685	96.7	79.9	0.826	3/1000	1
134	16.10	20	0.805	104.2	85.4	0.820	3/1000	1
135	20.00	20	1.000	128.9	100.8	0.782	3/1000	1
136	6.00	20	0.300	104.9	83.9	0.800	5/1000	1
137	8.00	20	0.400	120.6	97.5	0.808	5/1000	1
138	10.00	20	0.500	136.0	111.5	0.820	5/1000	1
139	11.60	20	0.580	140.6	111.7	0.794	5/1000	1
140	13.50	20	0.675	130.5	105.9	0.811	5/1000	1
141	20.00	20	1.000	135.6	109.3	0.806	5/1000	1
142	6.10	20	0.305	144.8	110.3	0.762	10/1000	1
143	7.80	20	0.390	155.2	122.3	0.788	10/1000	1

＜参考資料(4)＞

下水道管路模型によるマンホール部のエネルギー損失の計測

まえがき

本資料は、平成5年度から平成8年度までに実施された「下水管渠の流量に関する研究」の一環として行われた「マンホール部のエネルギー損失の計測実験」の実験結果を、平成6年度より土木研究所に交流研究員として本研究に携わった、復建調査設計(株)の今井田敏宏氏がとりまとめたものである。

1. 実験の目的と背景

管路の流下能力を把握することは、下水道計画の策定及び維持管理において重要な事項の一つである。特に既存の管路施設の更新計画において、新規の増補管路の必要流量を決定する際には、既存管路施設の流下能力を正確に把握する必要がある。

一般的な下水道管路網は、tree構造をした管路の集合体であり、ある区間ごともしくは管径の異なる管の接合点には必ずマンホールを設けることとなっている。マンホールの機能は、①管路の点検清掃等の維持管理スペースとしての機能、②傾斜地等における管路の急勾配布設を緩和するための段差としての機能、③上流からの水流を円滑に下流側に流下させる機能、が要求される。しかし、実際のマンホールにおいて、管路の平面的な折れ曲がり、縦断的な段差、枝線からの流入水の落下、流量増加時のマンホール内における渦流の発生等、マンホール内において種々のエネルギーの損失がみられる。マンホールにおけるエネルギーの損失は開水路流・管路流のいずれにおいてもみられるが、管路の流下能力の計算で用いられる損失項目にはマンホール損失が考慮されていないものが多い。これは、マンホールにおけるエネルギー損失の値が、流れの状態によって大きく変化するといわれており、モデル化が困難であるためと考えられる。

そこで、より正確な管路施設の流下能力の計算を行うための基礎データとすることを目的として、下水道管路模型を作成しマンホールにおけるエネルギー損失を測定したので、その結果を報告する。

2. 実験模型の概要

2.1. 実験模型

実験装置(図-2.1)は、管路模型(図-2.2)・揚水ポンプ・高架水槽・下流側水槽(写真-2.1)で構成される。管路模型(写真-2.2)は、直線の管路で縮尺1/10、内径200mm、延長18.50mのものを製作した。管路模型の勾配は、変更可能なものとした。マンホール模型(図-2.3, 写真-2.3)はインバートを有するタイプで、管路模型中に5m間隔に4箇所設けた。マンホールの形状及び寸法は、下水道施設設計指針に従うものとし、内径2000mm管路の中間点として標準的に用いられる6号マンホールとした。管路模型の上流側には高架水槽を、下流側には下流側水槽を設けた。高架水槽は、揚水ポンプによる水の供給を受けて管路模型に安定した水量を供給することを目的として設置した。管路模型への供給水量の調節は、高架水槽と管路模型の間の導水管路に設けたバルブを操作することで行った。下流側水槽には、水槽出口に高さ調節の可能な越流堰があり、管路模型内の水位を調節する機能をもたせた。

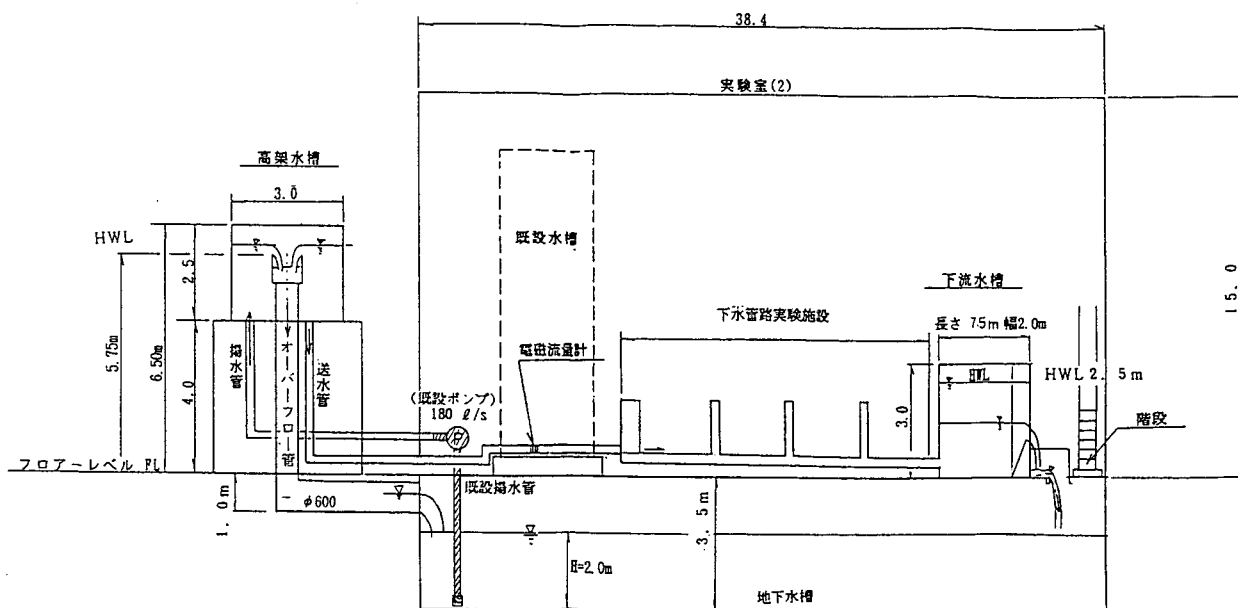


図-2.1 実験装置全体図

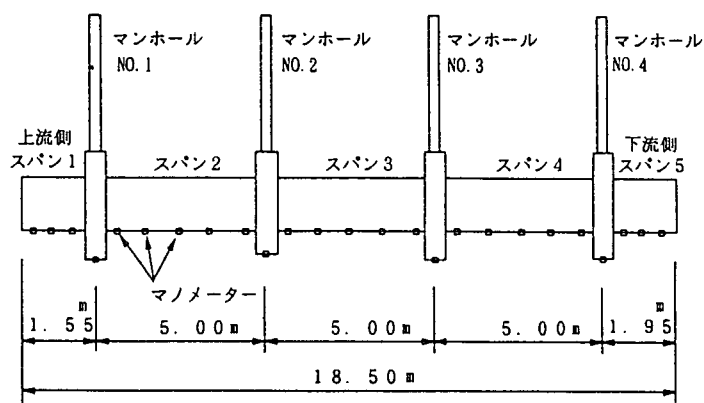


図-2.2 管路模型側面図

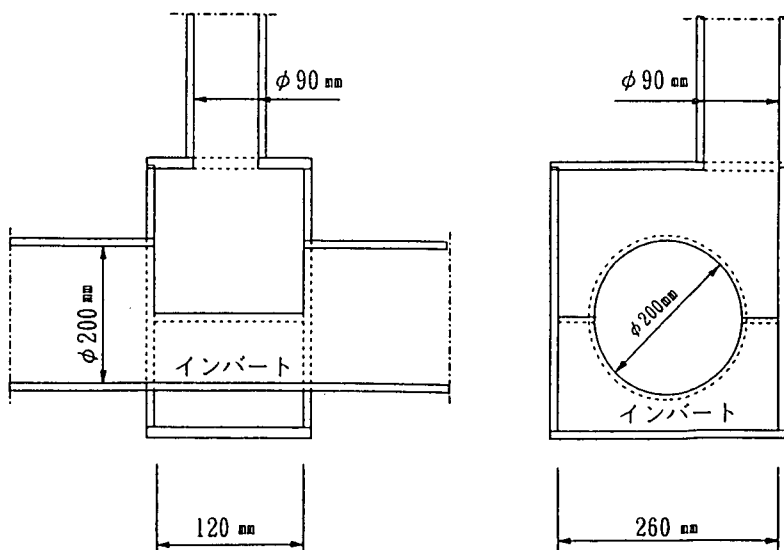


図-2.3 マンホール模型詳細図

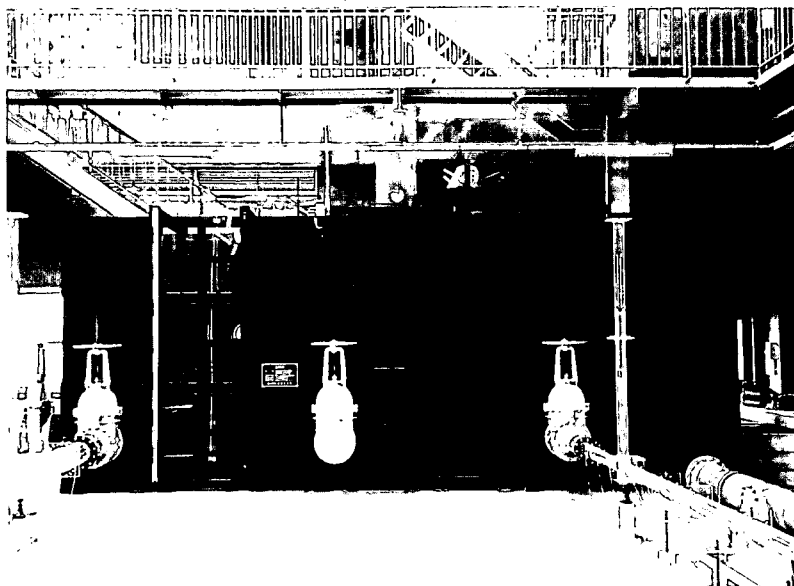


写真-2.1 下流側水槽

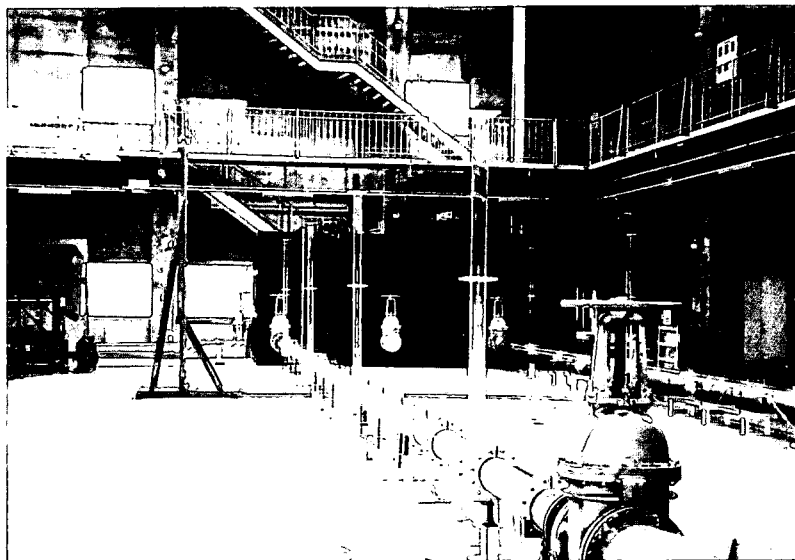


写真-2.2 管路模型全景

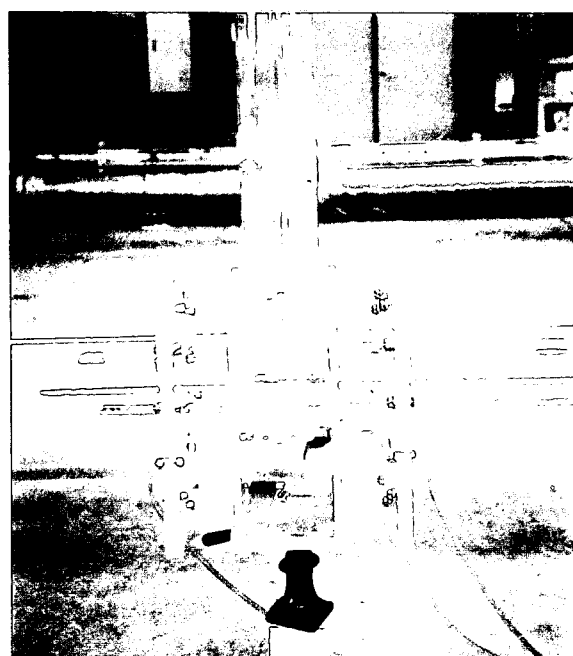
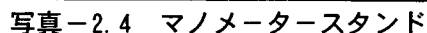
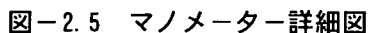


写真-2.3 マンホール模型

流量の計測装置として、管路模型の上流側の導水管路部に電磁流量計を設けた。また、管路模型区間における損失水頭を計測することを目的として、管路模型区間にマノメーター(図-2.4, 図-2.5, 写真-2.4)を0.20~1.00m間隔で38本設置した。マノメータの番号は、上流端を201として下流に向かって順次238までの番号を用いた。



3. 実験の概要

3.1 実験模型の制約

実験ケースは、フルードの相似則より設定した。実際の下水道施設の管径や流速の計画諸元とフルードの相似則等による制約について、表－3.1、表－3.2にまとめる。

表－3.1 下水道施設の計画諸元と模型実験施設の制約

項目	実物の規模	模型規模	縮尺の決定要因
縮尺		$S=1/10$	
管径	$\phi 2000\text{mm}$ $\phi 1000\text{mm}$	$\phi 200\text{mm}$ $\phi 100\text{mm}$	$\phi 200\text{mm}$ で流速 0.19m/s の時 $Re=38000$ $\phi 100\text{mm}$ で流速 0.19m/s の時 $Re=19000$ $Re>2300$ となり十分乱流領域にある
流速	最小 0.6m/s 最大 3.0m/s	最小 0.19m/s 最大 0.95m/s	
粗度 係数		アクリル樹脂 $n=0.008\sim 0.010$	$n=0.009$ と仮定すると 縮尺 $S=1/10$ で $n=0.013$ となる

表－3.2 フルード相似則に基づく諸元の縮率

項 目	次 元	縮 率	$L_r=10$ の場合
長 さ	L	L_r	$1:10 = 1/10 = 0.1$
面 積	L^2	L_r^2	$1:100 = 1/100 = 0.01$
体 積	L^3	L_r^3	$1:1000 = 1/1000 = 0.001$
流 量	L^3T^{-1}	$L_r^{5/2}$	$1:10^{5/2} = 1/316.2 = 0.03162$
流 速	LT^{-1}	$L_r^{1/2}$	$1:10^{1/2} = 1/3.162 = 0.3162$
圧 力	$ML^{-1}T^{-2}$	L_r	$1:10 = 1/10 = 0.1$
粗度係数	$L^{-1/3}T$	$L_r^{1/6}$	$1:10^{1/6} = 1/1.468 = 0.681$
時 間	T	$L_r^{1/2}$	$1:10^{1/2} = 1/3.162 = 0.3162$

3.2 実験計画

実験は、下水道管路が管路流の状態にある場合のマンホールにおけるエネルギー損失の値を定量的に把握するとともに、マンホール内の流速や水位の影響、さらにはマンホール接続形態等の構造上の影響を受けるかどうかを明らかにすることを目的とした。本実験では、管路模型の勾配は水平とした。それぞれの実験ケースについて、管路模型区間の水位低下量を38本のマノメーターを用いて記録した。各実験ケースの水位設定は、最下流に設置したマノメーターの水位で行うものとした。模型内の水位は、模型の管底からの水位である。実験は、再現性を評価するためにそれぞれのケースについて2回ずつ行うものとした。マノメーター水位は、目視にて0.5mm単位で読みとり記録した。

4. 2方向流れマンホールにおけるエネルギー損失

4.1 実験概要

ここでは、様々な接続形態をもつマンホールの内、最も基本的な接続形態である、上下流の2本の管路接続で、かつ2本の管渠直径が同一の2方向流れマンホールにおけるエネルギー損失を計測することを目的とし、表-4.1に示す模型内の水位と流速の組み合わせとした。マンホールの接続形態については、図-2.3、写真-2.3を参照されたい。

表-4.1 模型内水位と流速の組み合わせ

項目	実験条件	決定根拠
水位 (cm)	20, 30, 40, 120	管径の1倍、1.5倍、2.0倍、5.0倍
流速 (m/s)	0.16, 0.32, 0.63 0.95, 1.26	実際の下水道管路内の流速の 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0m/sに対応

4.2 実験ケース

実験ケースは、前述の実験計画で示した手順で行い、表-4.1に示す合計40ケースを、平成6年8月に実施した（本実験1）。ここで、この本実験1において得た実験データを整理した結果、管路部粗度係数やマンホール損失係数の計算結果にかなりのばらつきがあることが分かった。計算結果にばらつきが発生する原因として、次のものが考えられた。

①マノメーターの表示精度の問題

②模型内の流速を上げていくと下流側水槽内の波が大きくなる。これが管路模型内の水位変動ひいてはマノメーター水位を変動させている。

これらへの対応策として、次の様な実験装置の改良を行った。

①マノメーター水位の読み取りのためのマノメータースタンドを管路模型に近付けることで、マノメーターチューブの延長を短縮しマノメーターの精度を向上させる。また、マノメーターチューブに空気抜き装置等を設置していたが、それらを撤去し、シンプルなマノメーターチューブとした。

②管路模型から下流側水槽に流入する部分に、下流側水槽の水面変動抑制と管路模型内の水面変動抑制のために多孔質の水流分散材を設置した。水流分散材は、ヘチマロンを束ねたものを用いた。

これらの改良により、下流側水槽とマノメーターの水面変動はかなり抑制することが出来た。

これらの改良を行った後、平成7年1月に第2回目の実験（本実験2）を行った。

本実験2は、実験計画に沿って、模型内の水位と流速を変化させた、表-4.2に示す20ケースの実験を2回ずつ、合計40ケース行った。模型内流速の設定は、実施設内流速の設計基準に従って決定した。これによると、管路内の計画最小・最大流速はそれぞれ、 $V_{min}=0.6\text{m/s}$ 、 $V_{max}=3.0\text{m/s}$ とされている。しかし実施設では、流れが管路流の状態で動水勾配が大きくなった場合、計画最大流速を超過する可能性もある。そこで、今回の実験では、実施設内流速 $V=4.0\text{m/s}$ のケースも行うものとした。

表-4.2 実験ケース

ケース	模型内水位 (cm)	模型内流速 (m/s)	模型内流量 (l/s)	実施内流速 (m/s)
1	20	0.16	5.03	0.50
2	20	0.32	10.05	1.00
3	20	0.63	19.79	2.00
4	20	0.95	29.85	3.00
5	20	1.26	39.58	4.00
6	30	0.16	5.03	0.50
7	30	0.32	10.05	1.00
8	30	0.63	19.79	2.00
9	30	0.95	29.85	3.00
10	30	1.26	39.58	4.00
11	40	0.16	5.03	0.50
12	40	0.32	10.05	1.00
13	40	0.63	19.79	2.00
14	40	0.95	29.85	3.00
15	40	1.26	39.58	4.00
16	120	0.16	5.03	0.50
17	120	0.32	10.05	1.00
18	120	0.63	19.79	2.00
19	120	0.95	29.85	3.00
20	120	1.26	39.58	4.00

4.3 計測データの整理方法

実験によって得られたマンメーター水位から、マンホールにおける損失水頭と損失係数を、次のような方法で計算した。

①管路部の動水勾配線の決定(図-4.1)

図-2.2に示すスパン1からスパン5の管路部における動水勾配線を、回帰計算等によりそれぞれ求めた。この時、動水勾配線は直線で流体の速度水頭($\alpha \cdot V^2 / 2g$)は一定値をとると仮定している。ただし、ケース1, 2, 6, 7, 11, 12, 16, 17の流速が比較的小さいケースは、マ

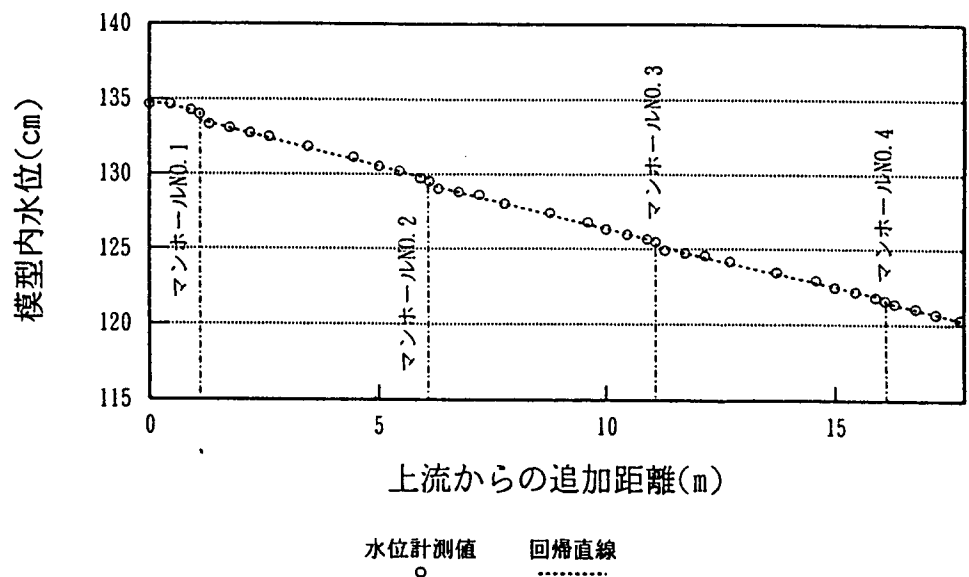


図-4.1 模型内水位低下図

ノメーターの読みとり水位差に占める読みとり誤差が大きくなり正確なマンホール損失水頭を算出するのが困難と考えられたが、参考までに計算を行った。

②管路部の粗度係数の計算

管路部の粗度係数は、動水勾配線の傾きから次式を用いて算出した。なお、動水勾配線の傾きは回帰計算

による回帰直線の傾きを用いた。

$$n = R^{2/3} \cdot I^{1/2} / V$$

ここに、 n :粗度係数

R :径深(m)

I :動水勾配

V :模型内平均流速(m/s)

③マンホール損失係数の計算

前述の方法で得られた動水勾配線をマンホール部分まで延長し、マンホール部分において生じる段差をマンホール損失水頭とした。これらのマンホール損失水頭から、次式を用いて損失係数を算出した。

$$K_m = \Delta h \cdot 2g / V^2$$

ここに、 K_m :マンホール損失係数

Δh :マンホール損失水頭(m)

g :重力加速度(=9.8m/s²)

V :平均流速(m/s)

4.4 実験結果

4.4.1 管路部の粗度係数

模型内平均流速と管路部分の粗度係数との関係について、計測データの整理を行った。管路部分とは、マンホールからマンホールの間の管路区間のことで、図-2.2に示すように上流側からスパンN0.1として最下流側がスパンN0.5としている。今回の実験によって分かったことを整理する。

①本実験1の実験結果から(図-4.2、4.3参照)

- ・ 模型内の平均流速が $V=0.16$ m/sの場合、ばらつきが大きく $n=0.000\sim0.021$ であった。粗度係数の計算値に明確なまとまりが見いだせないほど分散していた。平均値は、 $n=0.0092$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.32$ m/sの場合、ばらつきはやや小さくなり $n=0.0076\sim0.0174$ であった。粗度係数の計算値にも明確なまとまりが見られ、 $n=0.008\sim0.012$ の周辺に集中的に分布した。平均値は、 $n=0.0105$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27$ m/sと比較的速い場合、ばらつきはかなり小さくなり、 $n=0.0077\sim0.0127$ であった。粗度係数の計算値にも明確なまとまりが見られた。また、管路部粗度係数のばらつきは、流速が大きくなるほど小さくなった。この時の粗度係数の平均値は $n=0.0090$ であった。それぞれの流速と粗度係数の平均値と標準偏差値を、表-4.1にまとめる。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27$ m/sと比較的速い場合、管路部粗度係数は流速が速くなるほどやや小さくなる傾向がみられた。

②本実験2の実験結果から(図-4.4、4.5参照)

- ・ 模型内の平均流速が $V=0.16$ m/sの場合、ばらつきが大きく、 $n=0.000\sim0.028$ であった。粗度係数の計算値に明確なまとまりが見いだせないほど分散していた。強いて挙げれば、 $n=0.008\sim0.013$ の周辺に弱いまとまりがあるようである。平均値は、 $n=0.0087$ であった。

- ・ 模型内の平均流速が $V=0.32\text{m/s}$ の場合、ばらつきはやや小さくなり、 $n=0.000\sim0.014$ であった。粗度係数の計算値にも明確なまとまりが見られ、 $n=0.009\sim0.012$ の周辺に集中的に分布した。平均値は、 $n=0.0093$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、ばらつきはかなり小さくなり、 $n=0.006\sim0.011$ であった。粗度係数の計算値にも明確なまとまりが見られた。また、管路部粗度係数のばらつきは、流速が大きくなるほど小さくなった。このときの粗度係数の平均値は、 $n=0.0090$ であった。それぞれの流速と粗度係数の平均値と標準偏差値を、表-4.2にまとめる。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、図-4.6, 図-4.7からスパンNO.1の管路部粗度係数が他のスパンとくらべて小さかった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、管路部粗度係数は、流速が速くなるほどやや小さくなる傾向がみられた。

③本実験1と本実験2の実験結果から

- ・ 本実験2で、模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、スパンNO.1の粗度係数がやや小さくなる傾向が発生したが、本実験1と本実験2の実験結果は、ほぼ同様の実験結果となった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、実験模型管路部の粗度係数は、 $n=0.009$ 周辺にまとまって分布しており、一般的なアクリルの粗度係数 ($n=0.009$) といわれている値と同様の値を示した。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、管路部粗度係数は、流速が速くなるほどやや小さくなる傾向がみられた。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、管路部粗度係数のばらつきは、流速が大きくなるほど小さくなった。

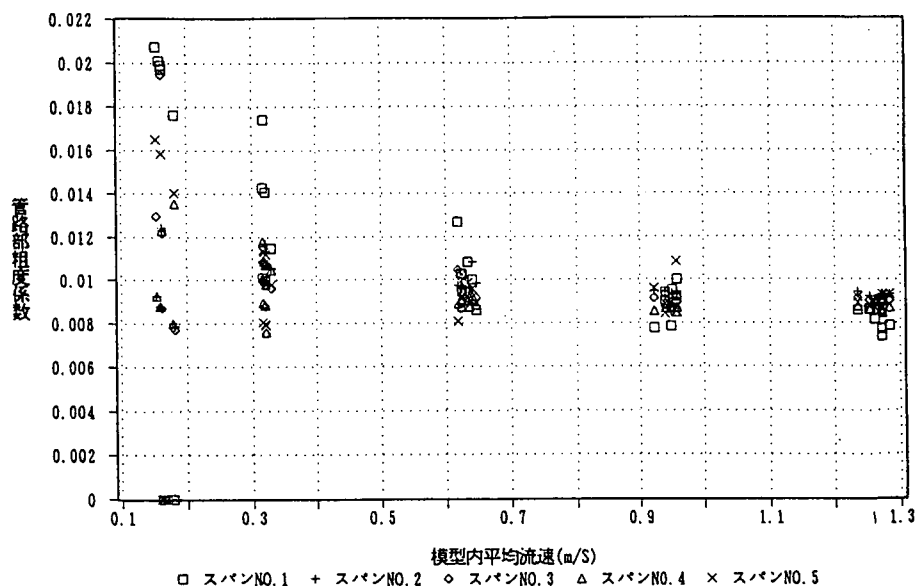


図-4.2 管路部粗度係数図(本実験1、全データ)

模型内平均流速－粗度係数

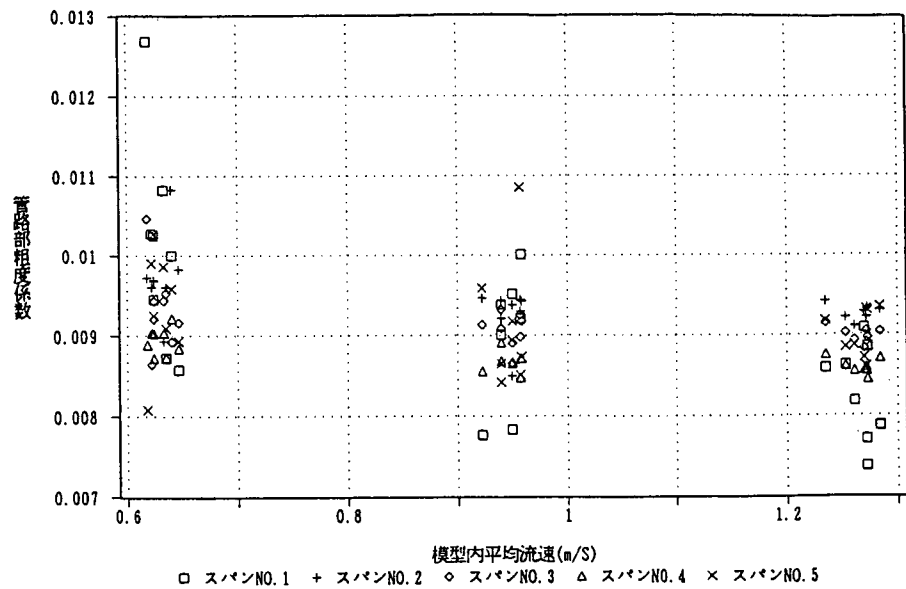


図-4.3 管路部粗度係数図(本実験1、 $V > 0.63 \text{ m/s}$) 模型内平均流速-粗度係数

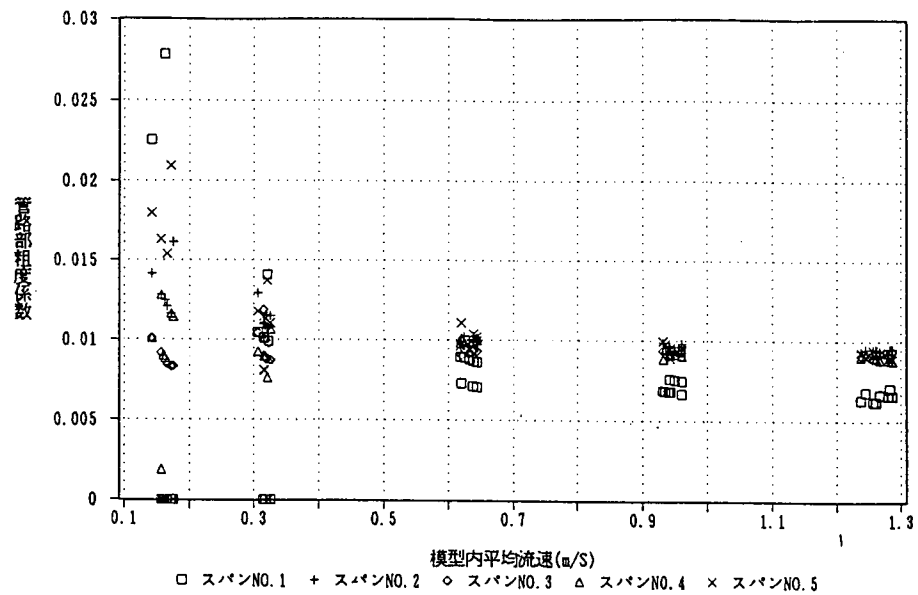


図-4.4 管路部粗度係数図(本実験2、全データ) 模型内平均流速-粗度係数

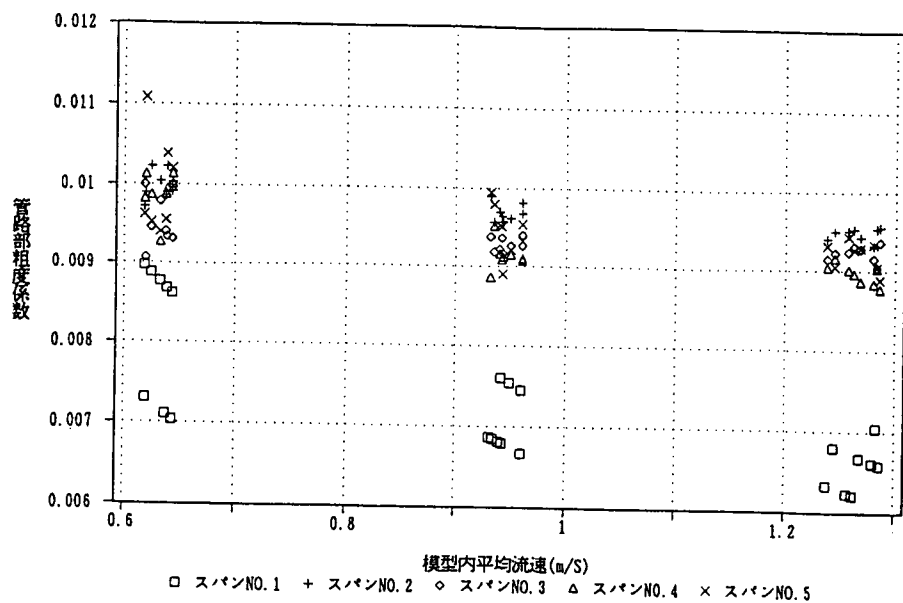


図-4.5 管路部粗度係数図(本実験2、 $V > 0.63 \text{ m/s}$) 模型内平均流速-粗度係数

表－4.1 管路部粗度係数の平均値・標準偏差値の集計表(本実験1)

分類	種別	模型流速 m/s	模型水深 cm	管路部粗度係数計測値						標準偏差値
				NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	平均値	
流速	平均値	(全体)		0.0110	0.0095	0.0096	0.0085	0.0086	0.0094	0.0009
		V=0.16m/s		0.0147	0.0084	0.0108	0.0065	0.0058	0.0092	0.0032
		V=0.32m/s		0.0127	0.0106	0.0096	0.0099	0.0098	0.0105	0.0011
		V=0.63m/s		0.0101	0.0097	0.0093	0.0089	0.0094	0.0095	0.0004
		V=0.95m/s		0.0090	0.0093	0.0091	0.0087	0.0091	0.0090	0.0002
		V=1.27m/s		0.0083	0.0093	0.0090	0.0086	0.0090	0.0088	0.0003
		V>0.63m/s		0.0091	0.0094	0.0091	0.0087	0.0092	0.0091	0.0002
	標準偏差値	(全体)		0.0047	0.0018	0.0019	0.0027	0.0037		
		V=0.16m/s		0.0086	0.0036	0.0038	0.0053	0.0075		
		V=0.32m/s		0.0025	0.0006	0.0010	0.0013	0.0015		
		V=0.63m/s		0.0012	0.0005	0.0005	0.0002	0.0006		
		V=0.95m/s		0.0007	0.0003	0.0002	0.0001	0.0007		
		V=1.27m/s		0.0006	0.0001	0.0001	0.0001	0.0003		
		V>0.63m/s		0.0012	0.0004	0.0004	0.0002	0.0006		
水位	平均値	(全体)		0.0110	0.0095	0.0096	0.0085	0.0086	0.0094	0.0009
			H=20cm	0.0097	0.0088	0.0101	0.0083	0.0078	0.0089	0.0009
			H=30cm	0.0119	0.0094	0.0095	0.0090	0.0090	0.0097	0.0011
			H=40cm	0.0097	0.0093	0.0091	0.0095	0.0088	0.0093	0.0003
			H=120cm	0.0126	0.0103	0.0096	0.0073	0.0089	0.0098	0.0017
	標準偏差値	(全体)		0.0047	0.0018	0.0019	0.0027	0.0037		
			H=20cm	0.0047	0.0030	0.0032	0.0030	0.0040		
			H=30cm	0.0044	0.0005	0.0012	0.0005	0.0038		
			H=40cm	0.0043	0.0007	0.0009	0.0017	0.0034		
			H=120cm	0.0047	0.0013	0.0010	0.0037	0.0037		
	平均値	V>0.63m/s	(全体)	0.0091	0.0094	0.0091	0.0087	0.0092	0.0091	0.0002
			H=20cm	0.0089	0.0096	0.0091	0.0087	0.0092	0.0091	0.0003
			H=30cm	0.0094	0.0093	0.0091	0.0088	0.0092	0.0092	0.0002
			H=40cm	0.0091	0.0095	0.0090	0.0087	0.0091	0.0091	0.0002
			H=120cm	0.0091	0.0094	0.0093	0.0087	0.0091	0.0091	0.0002
	標準偏差値	(全体)		0.0012	0.0004	0.0004	0.0002	0.0006		
			H=20cm	0.0008	0.0006	0.0002	0.0002	0.0008		
			H=30cm	0.0010	0.0002	0.0003	0.0002	0.0006		
			H=40cm	0.0006	0.0002	0.0002	0.0002	0.0005		
H=120cm			0.0018	0.0004	0.0006	0.0001	0.0005			

表－4.2 管路部粗度係数の平均値・標準偏差値の集計表(本実験2)

分類	種別	模型流速 m/s	模型水深 cm	管路部粗度係数計測値						
				NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	NO. 5	平均値	標準偏差値
流速	平均値	(全体)		0.0070	0.0106	0.0089	0.0093	0.0094	0.0090	0.0023
		V=0.16m/s		0.0063	0.0126	0.0067	0.0093	0.0088	0.0087	0.0061
		V=0.32m/s		0.0068	0.0112	0.0099	0.0091	0.0094	0.0093	0.0028
		V=0.63m/s		0.0082	0.0100	0.0095	0.0099	0.0100	0.0095	0.0007
		V=0.95m/s		0.0071	0.0097	0.0093	0.0091	0.0095	0.0089	0.0010
		V=1.27m/s		0.0066	0.0095	0.0092	0.0090	0.0092	0.0087	0.0011
		V>0.63m/s		0.0073	0.0097	0.0093	0.0093	0.0095	0.0090	0.0009
	標準偏差値	(全体)		0.0055	0.0015	0.0021	0.0015	0.0044		
		V=0.16m/s		0.0110	0.0019	0.0039	0.0031	0.0090		
		V=0.32m/s		0.0054	0.0007	0.0010	0.0008	0.0040		
		V=0.63m/s		0.0008	0.0002	0.0003	0.0003	0.0005		
		V=0.95m/s		0.0004	0.0001	0.0001	0.0002	0.0003		
		V=1.27m/s		0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002		
		V>0.63m/s		0.0009	0.0002	0.0002	0.0004	0.0005		
水位	平均値	(全体)		0.0070	0.0106	0.0089	0.0093	0.0094	0.0090	0.0023
			H=20cm	0.0071	0.0109	0.0086	0.0094	0.0079	0.0088	0.0031
			H=30cm	0.0052	0.0102	0.0082	0.0096	0.0099	0.0086	0.0023
			H=40cm	0.0063	0.0106	0.0093	0.0090	0.0082	0.0087	0.0022
			H=120cm	0.0093	0.0108	0.0097	0.0091	0.0115	0.0101	0.0018
	標準偏差値	(全体)		0.0055	0.0015	0.0021	0.0015	0.0044		
			H=20cm	0.0077	0.0020	0.0030	0.0008	0.0040		
			H=30cm	0.0036	0.0008	0.0027	0.0009	0.0048		
			H=40cm	0.0034	0.0012	0.0002	0.0026	0.0046		
			H=120cm	0.0055	0.0016	0.0007	0.0006	0.0030		
	平均値	V>0.63m/s	(全体)	0.0073	0.0097	0.0093	0.0093	0.0095	0.0090	0.0009
			H=20cm	0.0072	0.0097	0.0092	0.0094	0.0094	0.0090	0.0009
			H=30cm	0.0070	0.0098	0.0093	0.0093	0.0098	0.0090	0.0011
			H=40cm	0.0071	0.0098	0.0093	0.0094	0.0096	0.0090	0.0010
			H=120cm	0.0077	0.0096	0.0095	0.0092	0.0094	0.0091	0.0007
	標準偏差値	(全体)		0.0009	0.0002	0.0002	0.0004	0.0005		
			H=20cm	0.0007	0.0002	0.0001	0.0004	0.0004		
			H=30cm	0.0008	0.0002	0.0001	0.0005	0.0007		
			H=40cm	0.0008	0.0003	0.0001	0.0005	0.0003		
			H=120cm	0.0009	0.0002	0.0003	0.0003	0.0001		

4.4.2 マンホール損失係数

(1) 模型内平均流速とマンホール損失係数の関係

模型内平均流速とマンホール損失係数との関係について、計測データの整理を行った。マンホール番号は、図-2.2に示すように上流側からマンホールN0.1として最下流側がマンホールN0.4としている。今回の実験によって分かったことを整理する。

①本実験1の実験結果から(図-4.6、図-4.7参照)

- ・ 模型内の平均流速が $V=0.16\text{m/s}$ の場合、ばらつきが大きく $K_m=-0.395\sim0.657$ であった。マンホール損失係数の計算値に明確なまとまりが見いだせないほど分散していた。平均値は、 $K_m=0.155$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.32\text{m/s}$ の場合、ばらつきはやや小さくなり $K_m=-0.046\sim0.211$ であった。マンホール損失係数は、前述の範囲に平均的に分布しており、分布の集中がみられなかった。平均値は、 $K_m=0.062$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、ばらつきはかなり小さくなり $K_m=0.005\sim0.156$ であった。マンホール損失係数は、前述の範囲にまんべんなく分布していた。また、マンホール損失係数のばらつきは、流速が大きくなるほど小さくなった。それぞれの流速とマンホール損失係数の平均値と標準偏差値を、表-4.3にまとめる。
- ・ 模型内の平均流速が $V=1.27\text{m/s}$ の場合のマンホール損失係数の分布は、N0.1マンホールが比較的大きい方に、N0.4マンホールが比較的小さい方に多く分布している。

②本実験2の実験結果から(図-4.8、図-4.9参照)

- ・ 模型内の平均流速が $V=0.16\text{m/s}$ の場合、ばらつきが大きく $K_m=-0.628\sim0.486$ であった。マンホール損失係数の計算値に明確なまとまりが見いだせないほど分散した。平均値は、 $K_m=-0.005$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.32\text{m/s}$ の場合、ばらつきはやや小さくなり $K_m=-0.076\sim0.115$ であった。マンホール損失係数は、前述の範囲に平均的に分布しており、分布の集中がみられなかった。平均値は、 $K_m=0.029$ であった。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.63\sim1.27\text{m/s}$ と比較的速い場合、ばらつきはかなり小さくなり $K_m=0.011\sim0.117$ であった。マンホール損失係数は、前述の範囲にまんべんなく分布した。また、マンホール損失係数のばらつきは、流速が大きくなるほど小さくなった。それぞれの流速とマンホール損失係数の平均値と標準偏差値を、表-4.4にまとめる。
- ・ 模型内の平均流速が $V=0.95, 1.27\text{m/s}$ の場合のマンホール損失係数の分布は、N0.1マンホールが比較的大きい方に、N0.4マンホールが比較的小さい方に多く分布している。

③本実験1と本実験2の実験結果から

- ・ マンホール損失係数のばらつきは、模型内の平均流速が大きくなるほど小さくなった。
- ・ マンホール損失係数と模型内流速の間に、明確な相関を見いだすことは出来なかった。
- ・ 模型内平均流速が $V>0.63\text{m/s}$ の場合、マンホール損失係数は本実験1では平均値 $K_m=0.056$ 、標準偏差値 $\sigma=0.011$ 、本実験2では平均値 $K_m=0.049$ 、標準偏差値 $\sigma=0.018$ であった。
- ・ 本実験1と本実験2の実験結果は、N0.3, N0.4マンホールの損失係数の平均値にやや不一致な点があ

るものの、全体的な傾向としてはほぼ同様の実験結果と判断できる。

表-4.3 マンホール損失係数の平均値の集計表(本実験1)

分類	種別	模型流速 m/s	模型水深 cm	マンホール損失係数					
				NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	平均値	標準偏差値
流速	平均値	(全体)		0.079	0.062	0.091	0.076	0.077	0.010
		V=0.16m/s		0.139	0.091	0.189	0.201	0.155	0.043
		V=0.32m/s		0.061	0.064	0.062	0.061	0.062	0.001
		V=0.63m/s		0.055	0.050	0.093	0.045	0.061	0.019
		V=0.95m/s		0.066	0.051	0.057	0.040	0.053	0.009
		V=1.27m/s		0.076	0.055	0.054	0.034	0.055	0.015
		V>0.63m/s		0.066	0.052	0.068	0.040	0.056	0.011
		(全体)		0.072	0.102	0.132	0.121		
		V=0.16m/s		0.127	0.214	0.260	0.215		
		V=0.32m/s		0.060	0.063	0.071	0.080		
	標準偏差値	V=0.63m/s		0.036	0.026	0.037	0.022		
		V=0.95m/s		0.017	0.029	0.009	0.018		
		V=1.27m/s		0.010	0.008	0.009	0.012		
		V>0.63m/s		0.026	0.023	0.029	0.019		
水位	平均値	(全体)	(全体)	0.079	0.062	0.091	0.076	0.077	0.010
			H=20cm	0.043	0.034	0.124	0.095	0.074	0.037
			H=30cm	0.061	0.067	0.048	0.071	0.062	0.009
			H=40cm	0.106	0.065	0.104	0.036	0.078	0.029
			H=120cm	0.108	0.082	0.087	0.104	0.095	0.011
			(全体)	0.072	0.102	0.132	0.121		
			H=20cm	0.041	0.154	0.189	0.099		
			H=30cm	0.066	0.069	0.038	0.144		
			H=40cm	0.063	0.076	0.107	0.086		
			H=120cm	0.088	0.081	0.134	0.134		
	標準偏差値	(全体)	0.066	0.052	0.068	0.040	0.056	0.011	
		H=20cm	0.067	0.047	0.089	0.065	0.067	0.015	
		H=30cm	0.050	0.050	0.065	0.027	0.048	0.013	
		H=40cm	0.065	0.050	0.067	0.033	0.053	0.014	
		H=120cm	0.081	0.061	0.051	0.034	0.057	0.017	
		(全体)	0.026	0.023	0.029	0.019			
		H=20cm	0.026	0.020	0.045	0.011			
		H=30cm	0.026	0.009	0.019	0.005			
		H=40cm	0.013	0.012	0.010	0.008			
		H=120cm	0.024	0.037	0.011	0.016			

表-4.4 マンホール損失係数の平均値の集計表(本実験2)

分類	種別	模型流速 m/s	模型水深 cm	マンホール損失係数						
				NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4	平均値	標準偏差値	
流速	平均値	(全体)		0.019	0.088	0.034	-0.005	0.034	0.058	
		V=0.16m/s		-0.137	0.253	-0.034	-0.102	-0.005	0.190	
		V=0.32m/s		0.033	0.040	0.054	-0.011	0.029	0.046	
		V=0.63m/s		0.060	0.060	0.067	0.020	0.052	0.021	
		V=0.95m/s		0.068	0.040	0.041	0.039	0.047	0.015	
		V=1.27m/s		0.073	0.046	0.043	0.029	0.048	0.016	
		V>0.63m/s		0.067	0.049	0.050	0.029	0.049	0.018	
		(全体)		0.146	0.116	0.063	0.061			
	標準偏差値	V=0.16m/s		0.267	0.175	0.099	0.044			
		V=0.32m/s		0.057	0.032	0.052	0.053			
		V=0.63m/s		0.015	0.027	0.029	0.012			
		V=0.95m/s		0.010	0.012	0.010	0.021			
		V=1.27m/s		0.003	0.008	0.002	0.007			
		V>0.63m/s		0.012	0.019	0.022	0.016			
水位	平均値	(全体)	(全体)	0.019	0.088	0.034	-0.005	0.034	0.058	
			H=20cm	-0.011	0.056	0.022	0.006	0.018	0.055	
			H=30cm	0.079	0.110	0.036	-0.013	0.053	0.059	
			H=40cm	0.047	0.076	0.031	-0.002	0.038	0.044	
			H=120cm	-0.038	0.110	0.047	-0.011	0.027	0.073	
			標準偏差値	(全体)	0.146	0.116	0.063	0.061		
				H=20cm	0.166	0.033	0.092	0.053		
				H=30cm	0.080	0.137	0.050	0.054		
				H=40cm	0.038	0.110	0.057	0.059		
				H=120cm	0.203	0.139	0.036	0.073		
	平均値	V>0.63m/s		(全体)	0.067	0.049	0.050	0.029	0.049	0.018
			H=20cm	0.069	0.065	0.070	0.045	0.062	0.020	
			H=30cm	0.066	0.041	0.047	0.029	0.046	0.016	
			H=40cm	0.067	0.043	0.042	0.018	0.042	0.019	
			H=120cm	0.065	0.046	0.042	0.025	0.045	0.015	
			標準偏差値	(全体)	0.012	0.019	0.022	0.016		
				H=20cm	0.015	0.024	0.032	0.021		
				H=30cm	0.008	0.018	0.009	0.004		
				H=40cm	0.014	0.012	0.012	0.014		
				H=120cm	0.008	0.008	0.006	0.005		

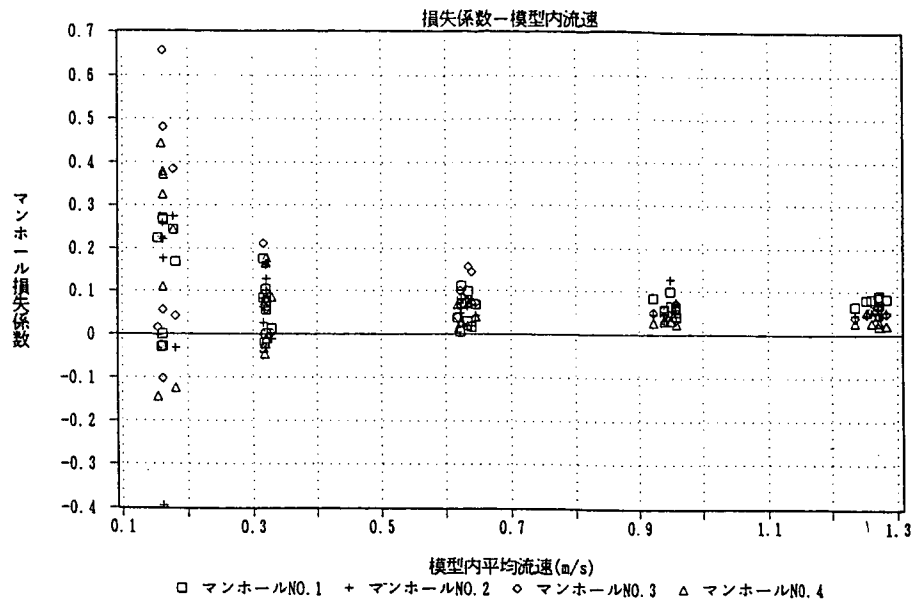


図-4.6 マンホール損失係数分布図(本実験1、全データ) 損失係数—模型内流速

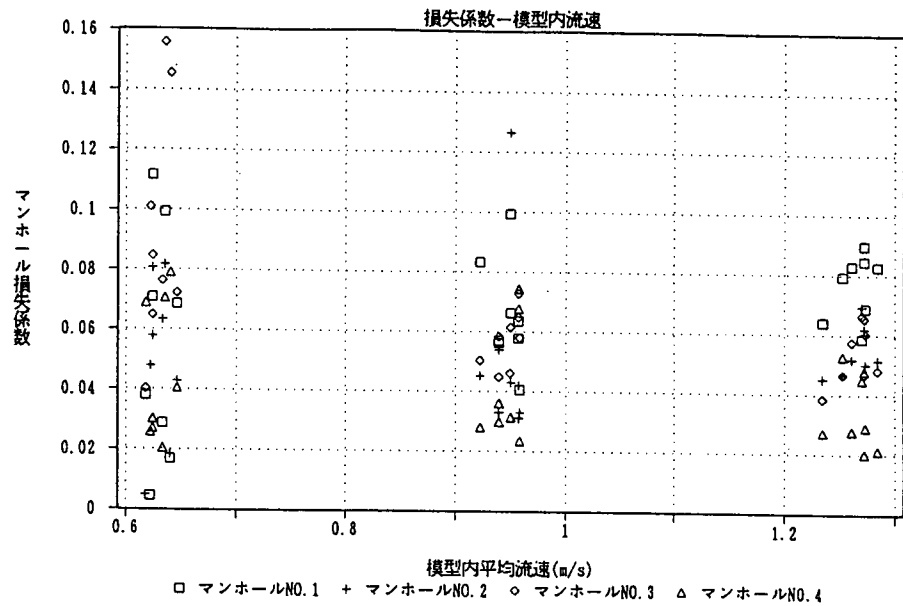


図-4.7 マンホール損失係数分布図(本実験1、 $V > 0.63 \text{ m/s}$) 損失係数—模型内流速

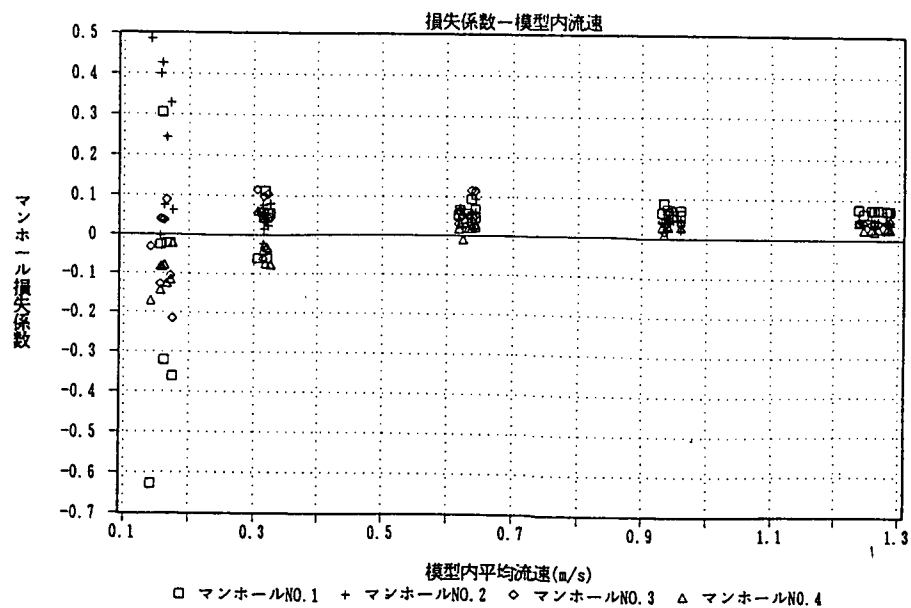


図-4.8 マンホール損失係数分布図(第2回目、全データ) 損失係数—模型内流速

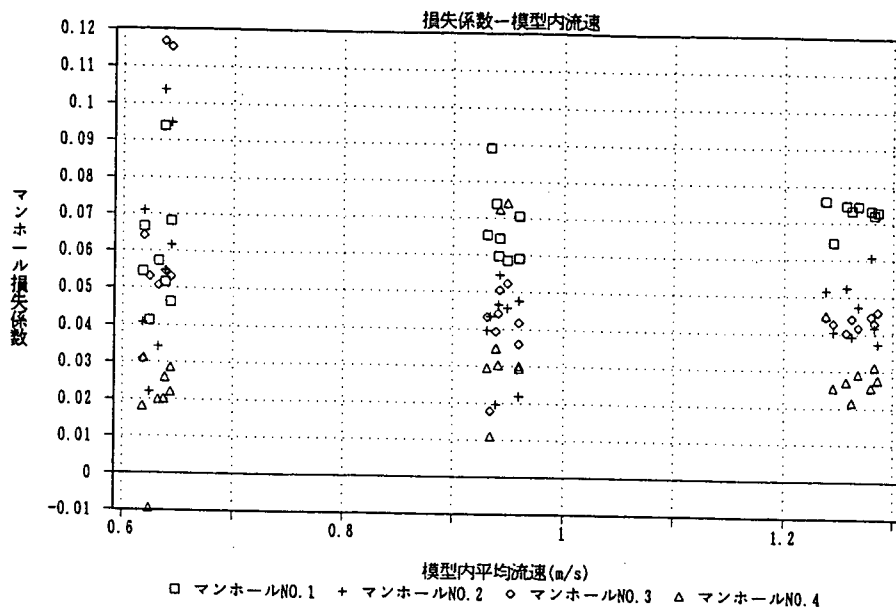


図-4.9 マンホール損失係数分布図(本実験2、 $V > 0.63 \text{ m/s}$)

損失係数—模型内流速

(2) 既往の損失係数との比較～既往の文献調査より～

マンホールに関する水理学的検討は、そのほとんどが水理模型を用いた損失係数の測定という形で行われている。マンホールは、会合管渠数、管径比、管底レベル、流量等の変数が多く、これらを組み合わせると実験条件は膨大な量となる。既往の研究を大別すると、会合する管渠数が2本と3本の場合に分けられる。このうちマンホールで3本の管渠が会合する場合の実験は、直線のメインルートのマンホールに、横方向 90° から枝線が流入するという条件のものが大半である。また、これらの実験のほとんどは管路流の状態で定常流の条件下で行われたものである。マンホールで4本以上の管渠の会合する条件下の実験データはこれまでに発表されていない。なお、マンホールで3本の管渠が会合するケースについては、この後の 5.3 方向マンホールにおけるエネルギー損失 で述べることとする。

ここで、マンホールが2本の管渠の中間点の場合の既往の研究結果を紹介する。

宇井と安川は、接続段差がそれぞれ0 cm、5 cm、15 cmの3種類のマンホール模型を用いて実験を行い、管路流状態でのマンホール損失係数を測定した。その結果、損失係数は接続段差に依存しそれぞれ $K_m = 0.35$, 0.72, 2.18であると報告している。また、流量によってマンホール内に渦が発生し損失係数が急激に増大する領域があることを指摘している¹⁾。

松本は、開水路流れ及び管路流の状態で円形及び矩形のマンホール模型を用いて、マンホール上下流の管径比と接続角度を変更して損失係数の測定を行った。その結果、マンホールにおける損失水頭が数10 cmにも達するケースがあること、および在来の水理公式集により急拡・急縮・屈折の条件を組み合わせで計算した損失水頭が測定値の40～70%に過ぎなかったことを報告している²⁾。

渡辺は、マンホール上下流で管径が等しく段差のない内径15 cmのマンホール模型を用いた実験の結果、損失係数は Re に関係なくほぼ $K_m = 0.076$ であるという結果を得ている³⁾。

村上と桜井は、マンホール上下流で管径(5cm)が等しく段差のない内径6cm、7.5cm、9cm、10cm、12cmの5種類のマンホール模型を用いた実験の結果、損失係数はほぼ $K_m=0.13\sim0.21$ であるという結果を得た⁴⁾。

楠田と荒尾は、開水路流れ及び管路流の状態で円形のマンホール模型を用いて、マンホール上下流の管径比と接続角度を変更して損失係数の測定を行った。その結果、次のことが報告されている。

- ①マンホール上下流の管径が同一でマンホールにおける折れ曲がりや段差がない場合の損失係数は、マンホール内の水深にかかわらずほぼ一定の値をとるとしており、その値は概ね $K_m=0.2\sim0.4$ 程度となっている。
- ②直線流れの場合、マンホールにおける接続段差が下流側管径を越えない範囲では、損失係数は段差の増加のともない直線的に増加する。この時、損失係数の値は概ね $K_m=2.0$ 前後で変動する。また、損失係数の最大値は、下流側管径に対する段差の大きさが1.5程度の時に発生している。
- ③90° 曲がり流れの時、マンホールにおける接続段差が小さい範囲でも $K_m=1.5$ 程度の値を示す。損失係数の最大値は、下流側管径に対する段差の大きさが0.5程度の時発生している⁵⁾。

B. C. Yenは、文献6)7)でマンホール損失水頭に関する諸外国の研究成果をよくまとめている。それらの中に、直線接続のマンホールに90° 横方向からの流入を受ける接続形態のマンホールにおける損失係数の計測データが収録されている。これによれば、接続管径が全て同一で段差がなく、横流入管からの流入水量がない場合の直線方向の損失係数は、概ね $K_m=0.1\sim0.5$ 程度の値が報告されている。

以上の既往のマンホールエネルギー損失に、筆者らが実施した実験結果を加えた図を、図-4.10に示す。

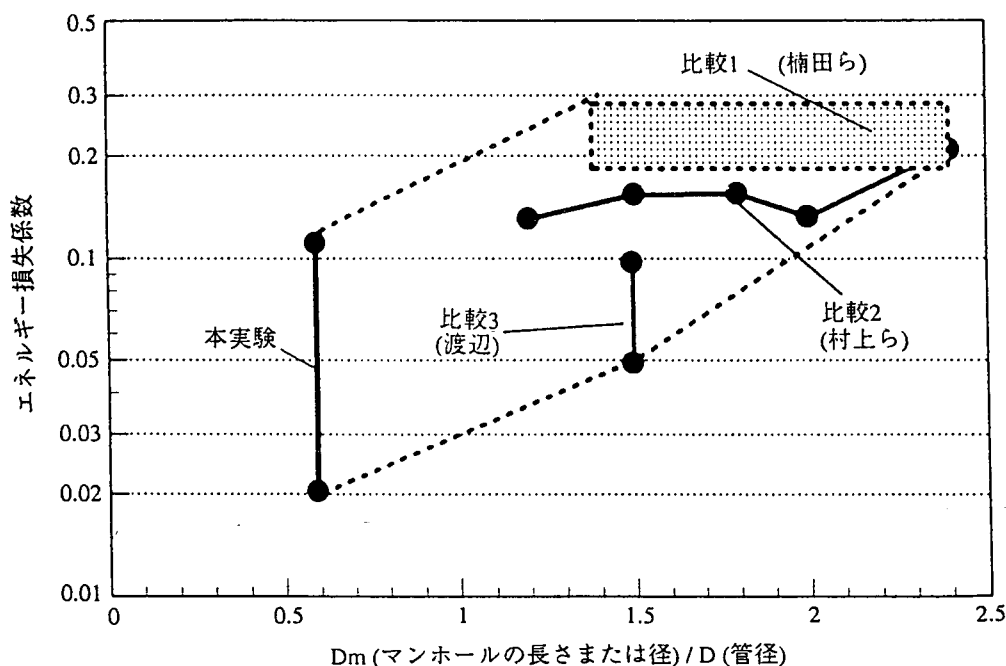


図-4.10 報告されているエネルギー損失係数
(エネルギー損失係数に対するマンホール長さの影響)

4.4.3 急拡大・急縮による損失係数

(1) 急拡大・急縮による損失係数

マンホールの損失係数として、既往の急拡大・急縮による形状損失係数を考慮し、それらの損失係数を計算

する。図-4.11に、マンホール模型寸法詳細図を示す。

急拡による損失係数 $K_{se}=\{1-(A1/A2)\}^2=0.18$

急縮による損失係数 $K_{sc}=0.21$ (D1/D2=0.77で表7-3より補間)

合計(マンホール損失) $K_m=K_{se}+K_{sc}=0.41$

ここに、 $A1=\pi \times 0.20^2/4=0.0314m^2$

$A2=0.26 \times 0.15 + \pi \times 0.20^2/4/2=0.0547m^2$

$D2=(4 \times A2/\pi)^{0.5}=0.26m$

$D1/D2=0.20/0.26=0.77$

表-4.5 急縮による損失係数

D1/D2	0.6	0.7	0.8	0.9
K_{sc}	0.38	0.29	0.18	0.07

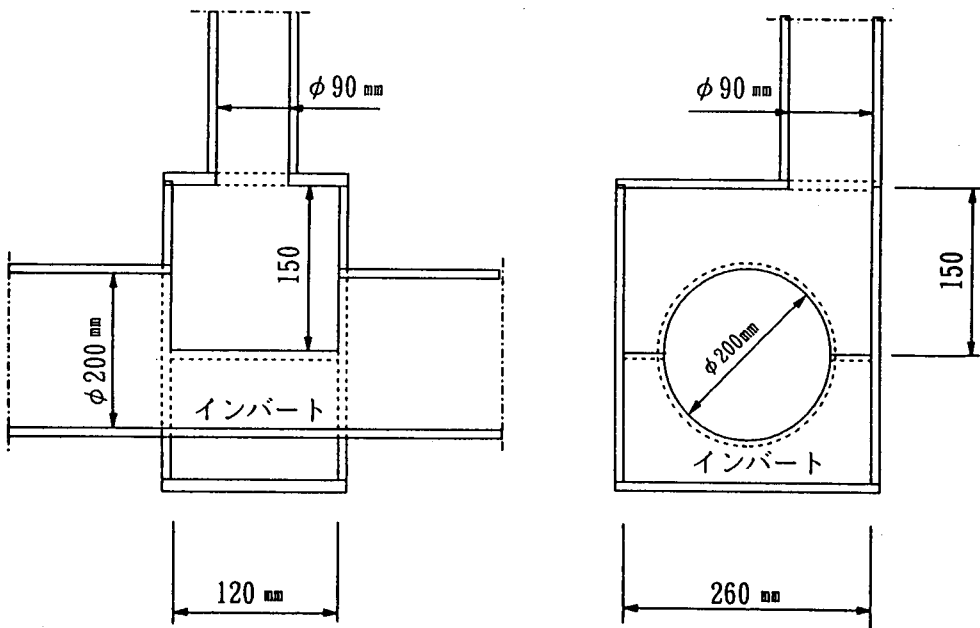


図-4.11 マンホール模型寸法詳細図

(2) 既往の損失係数との比較

今回の実験結果では、マンホール損失水頭は概ね $K_m=0.04\sim0.08$ 程度の値である。既往の研究成果の中で、今回の実験条件と近似した条件で行われた実験の損失係数は、 $K_m=0.35^{1)}$ 、 $K_m=0.076^{3)}$ 、 $K_m=0.13\sim0.21$

⁴⁾ $K_m=0.2\sim0.5$ ⁵⁾ $K_m=0.1\sim0.5$ ⁶⁾ である。一方、急拡・急縮の損失係数を用いたマンホール損失係数の計算

では $K_m=0.41$ となっている。これらを今回の実験結果と比較すると、一様に大きい損失係数となる。

<参考文献>

- 1) 宇井, 安川, 管路接続用チャンバーによるエネルギー損失, 第31回水理講演会論文集, 1987
- 2) 松本, マンホールの損失水頭を考慮した下水管渠の設計について, (財)建設技術研究所報, 1984
- 3) 渡辺, 都市下水道流域の流出解析と流出抑制に関する基礎的研究, 学位論文, 1989
- 4) 村上, 桜井, 下水道マンホールの水理に関する検討, 重点領域研究「自然災害」研究報告集01601011, 都市域における異常出水の予測とその流出抑制工法に関する研究 1990
- 5) 楠田, 荒尾他, 雨水管マンホール部の流れの特性に関する研究, 第48回年次学術講演会論文集, 1993
- 6) B. C. Yen Urban drainage hydraulics and hydrology: from art to science, Proc. of the fourth international conference on urban storm drainage, 1987
- 7) B. C. Yen et al., Advances in hydrosience, Academic Press, England, 1986
- 8) 水理公式集, (社)土木学会, 1985
- 9) 土木研究所資料第3294号, 平成5年度下水道関係調査研究年次報告書集, 平成6年10月, 建設省土木研究所
- 10) 岩佐義朗, 水理学, 朝倉書店

4.5 考察

4.5.1 管路部の粗度係数～模型内平均流速と粗度係数の関係～

管路部の粗度係数について、とくに模型内平均流速と粗度係数の関係について以下に考察する。

- ①管路部粗度係数の計算値のばらつきは、模型内平均流速が大きくなるほど小さくなった。模型内の平均流速が大きくなると、動水勾配が大きくなり隣合うマノメータの表示水位差が大きくなる。そのため、マノメータ表示水位に占める誤差の影響を受け難くなるためと考えられる。
- ②管路部粗度係数は、流速が大きくなるとやや小さくなる傾向がみられた。前項で示したが、流速が大きくなり Re 数が大きくなると、摩擦損失係数つまり管路粗度係数計算値がやや小さくなった。模型内流速が、 $V=0.63\text{m/s}$ から $V=1.27\text{m/s}$ になると、計算上の粗度係数は水温 9°C で $n=0.00926$ から $n=0.00862$ へ、水温 21°C で $n=0.00896$ から $n=0.00836$ へそれぞれ $\Delta n=0.0006$ 程度減少した。今回の実験では、本実験1(水温 21°C)は模型内平均流速が $V=0.63\text{m/s}$ の場合、平均粗度係数が $n=0.0095$ 、 $V=1.27\text{m/s}$ の場合、 $n=0.0088$ であった。本実験2(水温 9°C)では、 $V=0.63\text{m/s}$ の場合、 $n=0.0095$ 、 $V=1.27\text{m/s}$ の場合は $n=0.0087$ と、流速の増加とともに粗度係数が減少する傾向を再現することが出来た。粗度係数の減少量も、 $\Delta n=0.0007\sim 0.0008$ と既往の計算式による値と同様の減少量であった。
- ③アクリル模型の粗度係数は、概ね $n=0.008\sim 0.010$ 程度と言われているが、今回の実験結果でも管路部の平均粗度係数は $n=0.009$ 周辺の値となっており、ほぼ妥当な値ということが出来る。

4.5.2 マンホール損失係数

(1) 模型内平均流速とマンホール損失係数の関係

マンホール損失について、とくに模型内平均流速とマンホール損失係数の関係について以下に考察する。

- ①マンホール損失係数の計算値のばらつきは、模型内平均流速が大きくなるほど小さくなった。模型内

の平均流速が大きくなると、動水勾配が大きくなり隣合うマンメータの表示水位差が大きくなる。そのため、マンメータ表示水位に占める誤差の影響を受け難くなるためと考えられる。

- ②マンホール損失係数は、模型内平均流速が $V > 0.63\text{m/s}$ の場合、概ね $K_m = 0.02 \sim 0.08$ 周辺に多く分布した。マンホール損失係数の平均値は、 $K_m = 0.049$ である。マンホール損失係数と模型内平均流速の間に、明確な相関関係は見いだせなかった。

(2) 既往のマンホール損失係数との比較

前項、既往の損失係数との比較で述べたが、既往の実験研究成果によれば、管路流の状態にあるマンホール損失係数は、 $K_m = 0.35$, $K_m = 0.076$, $K_m = 0.13 \sim 0.21$, $K_m = 0.2 \sim 0.5$, $K_m = 0.1 \sim 0.5$ 等が報告されている。また、マンホールにおいて、管路における急拡大と急縮の損失係数をあてはめた場合、マンホール損失係数は $K_m = 0.41$ となる。これらのマンホール損失係数は、今回の実験で得られた値 $n = 0.040 \sim 0.055$ と比較するとかなり大きい値であった。ここでは、これらの原因について考察する。

- ①マンホール損失係数 $K_m = 0.35$ は、インバートがない円形マンホール(直径15cm)に内径10cmの管路が接続されている模型で計測されたものである。マンホール損失係数は、マンホールの形状によって影響を受けるが、インバートがないためにやや大きめの値になったと考えられる。
- ②マンホール損失係数 $K_m = 0.076$ は、インバートのある円形マンホール(直径15cm)に内径10cmの管路が接続されている模型で計測されたものである。マンホール損失係数は、今回の実験と近似した値となった。
- ③マンホール損失係数 $K_m = 0.13 \sim 0.21$ は、インバートのある円形マンホール(直径6~12cm)に内径5cmの管路が接続されている模型で計測されたものである。マンホール損失係数は、マンホールの形状によって影響を受けるが、 $(\text{マンホール直径})/(\text{接続管径}) < 2.0$ では、 $K_m = 0.15$ 程度の値となった。今回の実験とはマンホール形状が異なっている。インバートは設けてあるが、マンホール損失係数はやや高めの値となった。
- ④マンホール損失係数 $K_m = 0.2 \sim 0.5$ は、インバートのある円形マンホール(直径7~12cm)に内径5cmの管路が接続されている模型で計測されたものである。今回の実験とはマンホール形状が異なっている。インバートは設けてあるが、マンホール損失係数はやや高めの値となっている。
- ⑤マンホール損失係数 $K_m = 0.1 \sim 0.5$ は、マンホール直径や接続管径等は不明である。この模型には、横からの流入パイプが接続されているため(流入水量はない)、マンホール損失係数は大きくなっていると考えられる。
- ⑥管路の急拡大・急縮による損失係数を用いて計算した値は $K_m = 0.41$ と大きい。管路の急拡大部や急縮部の損失係数は、急拡大及び急縮前後の管路断面は一樣という条件で行われている。今回の実験で用いたマンホールは、管路が急拡大して急縮するまでのマンホールの長さが0.12mと短い。このため、今回の実験で得られた損失係数はかなり小さい値となっているが、マンホールの長さを長くすればその値に近づくと考えられる。

4.6 まとめ

4.6.1 管路部の粗度係数

- ①アクリル模型の粗度係数は、概ね $n=0.008\sim0.010$ 程度と言われている。今回の実験結果では、管路部の平均粗度係数 $n=0.009$ 周辺の値を再現することが出来た。
- ②管路部粗度係数は、流速が大きくなるとやや小さくなる傾向がみられた。流速が大きくなり Re 数が大きくなると、管路粗度係数の計算値がやや小さくなった。模型内平均流速が、 $V=0.63\text{m/s}$ から $V=1.27\text{m/s}$ に上昇すると、粗度係数の計算値は $\Delta n=0.0006$ 程度減少した。今回の実験では、粗度係数の減少量が $\Delta n=0.0007\sim0.0008$ となり、流速の増加とともに粗度係数が減少する傾向を再現することが出来た。
- ③水温変化による粗度係数の変化を計測することが出来た。水温が 9°C から 21°C に上昇すると、粗度係数の計算値は $\Delta n=0.0003$ 程度小さくなった。今回の実験では、模型内平均流速が $V>0.63\text{m/s}$ の時、水温上昇による粗度係数の減少量が管路スパン $N0.2\sim N0.5$ で $\Delta n=0.0002\sim0.0006$ となり、水温上昇により粗度係数が減少する傾向を再現することが出来た。
- ④管路部粗度係数のばらつきは、模型内平均流速が大きくなるにしたがって小さくなった。
- ⑤第2回目の実験を行う直前に、熱伸縮によってアクリル模型管路が縮み、スパン $N0.1$ の区間で破断した。これを補修して第2回目の実験を行ったが、補修により模型内面に不陸が発生し、それがマノメーター水位に影響してスパン $N0.1$ の粗度係数だけが $n=0.0075$ 程度の小さい値となった。

4.6.2 マンホール損失係数

- ①今回の実験に用いたマンホールの損失係数は、模型内平均流速が $V>0.63\text{m/s}$ の場合、 $K_m=0.02\sim0.08$ の値をとった。平均値は、 $K_m=0.049$ であった。
- ②今回の実験に用いたマンホールを直線区間の中間マンホールとして用いた場合、模型内平均流速が $V>0.95\text{m/s}$ であればマンホール損失係数は $K_m=0.040\sim0.055$ の値となった。
- ③マンホール損失係数と模型内平均流速の間に、明確な相関関係は見いだせなかった。
- ④マンホール損失係数の値は、管路内の流速分布の影響を受けると考えられる。
- ⑤今回の実験により得られたマンホール損失係数は、既往の損失係数の値と比べて同程度もしくはかなり小さい損失係数となった。
- ⑥マンホール損失係数のばらつきは、模型内平均流速が大きくなるにしたがって小さくなった。

4.7 今後の課題

今回の実験は、直線区間の中間マンホールの損失係数を把握することを目的として行った。その結果、マンホール損失係数は管路内の流速分布の影響を受ける事が分かった。そこで、今後の検討課題としてマンホール近傍の管路内の流速分布を計測し、マンホール損失係数と管路内流速分布の関係を明らかにしていく必要がある。また、マンホール損失係数は、マンホールの形状やマンホールと管路の接続形態によって変化することが知られている。今後、これらについても代表的マンホール形状や接続形態を考慮して実験を行い、損失係数を把握していく必要がある。管路流のマンホール損失係数の把握も必要であるが、それと並行して開水路流の損失係数の把握も行っていく必要がある。

5. 3 方向マンホールにおけるエネルギー損失

2 方向流れマンホールにおけるエネルギー損失について、種々検討を行った。今後の課題としては、マンホール形状や管渠との接続形態によるマンホール損失係数の違いを把握する必要があると考えられるが、これらについての実験報告は、2 方向のそれに比べて極めて少ない。ここでは、3 方向流れマンホールにおけるエネルギー損失を把握するために実施した実験について報告する。

5.1 模型の概要

実験装置は、図-5.1に示すように管路模型、揚水ポンプ、高架水槽、下流側水槽で構成される（実験装置のベースは、2 方向マンホール実験用のもの）。管路模型は、管径 2 m および 1 m の管渠を想定し、その 1/10 の縮尺の内径 0. 2 m、および 0. 1 m のものを透明アクリルを用いて製作した。後述の 3 方向マンホールに対して上流側からの $\phi 0. 2\text{m}$ の主流をスパン 1、 $\phi 0. 1\text{m}$ の横流入をスパン 2、 $\phi 0. 2\text{m}$ の下流側をスパン 3 とした。マンホール模型は 2 方向のものと 3 方向のものから成る。このうち 3 方向マンホール模型は、図-5.2 に示すようにインバートを有し、管底接合するタイプである。高架水槽は、揚水ポンプによる水の供給を受け管路模型に安定した水量を供給することを目的として設置した。管路模型への供給水量の調節は、高架水槽と管路模型の間の導水管路に設けたバルブの操作により実施した。下流側水槽の出口には越流高さの調節が可能な越流堰があり、これにより管路模型内の水位が調節可能である。

流量の計測装置として、それぞれの管路模型の上流側の導水管路部に電磁流量計を設けた。また、管路模型区間におけるピエゾ水頭を計測するため、管路模型区間にマノメーターを 0. 20 ~ 1. 00 m 間隔で設置した。

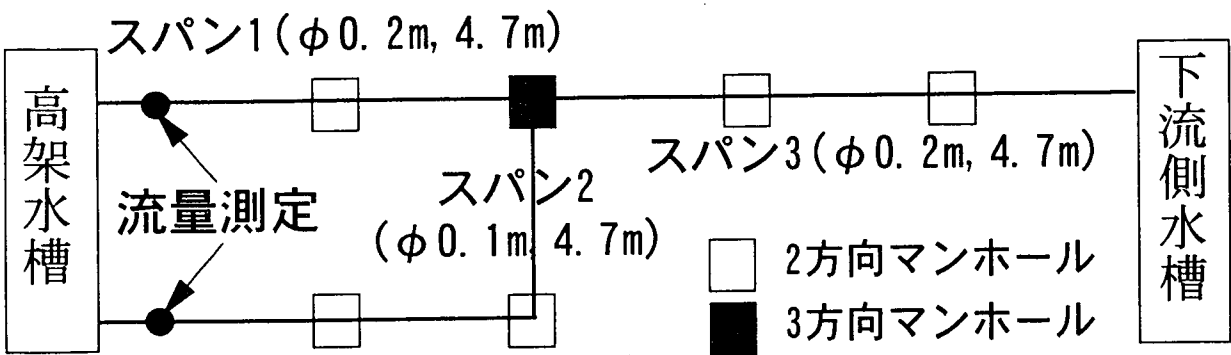


図-5.1 管路模型平面図

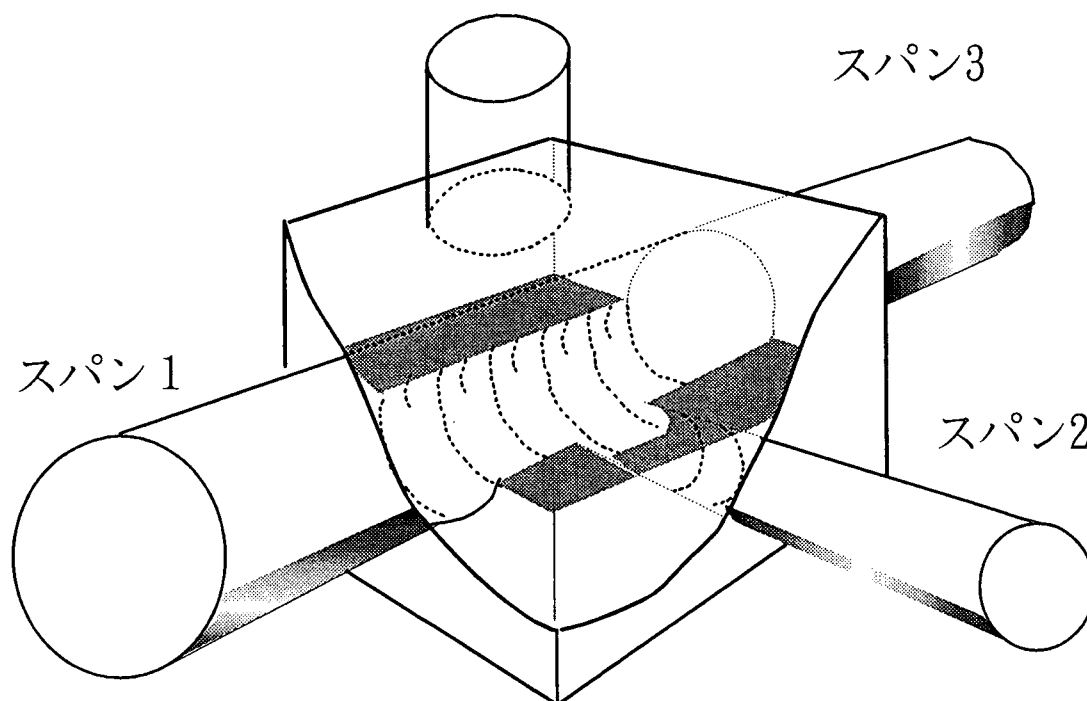


図-5.2 3方向マンホール模型

5.2 実験概要

1) 実験条件と計測

実験条件は、管路流状態のマンホールにおけるエネルギー損失量の把握、およびエネルギー損失に対する流速、水位、および全体流量に対する横流入量比の影響の明確化を目的として設定した。すなわち表-5.1に示すように水位を2通り、各水位に対し流速を2通り、横流入量比を6通り、計24通りの実験ケースを設定した。水位設定は、最下流に設置したマンメーターの水位を用いて行った。模型内の水位は $\phi 0.2\text{m}$ の管路の管底を基準とした。管路模型の勾配はゼロとした。データ計測は、模型管路部のピエゾ水頭と模型内流量及び水温について行った。模型管路部の水位低下は、各実験ケースごとにマンメーターの水位を 0.5mm 単位で読みとり記録した。マンメーターの水位は、流速が 1.26m/s の場合大きな変動がみられた。このときは変動水位の平均値を読みとることとした。一方、流速が 0.63m/s の場合は、隣合うマンメーター水位の差分が小さいため間欠的に読みとった。模型内流量の計測は、電磁流量計により実験開始時と終了時の2回行い、その平均値をとった。水温は、下流側水槽の出口において流量と同様に、試験開始時と終了時の2回計測を行った。

表-5.1 模型内水位と流速の組み合わせ
(Q_2 : スパン2の流量, Q_3 : スパン3の流量)

ケース名	水位 (m)	流速 (実物流速 m/s)	流量 Q_3 L/s	横流入流量比 Q_2/Q_3
A 0, 2, 4, 6, 8, 10	0.4	0.63 (2.0)	20	0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
B 0, 2, 4, 6, 8, 10	0.4	1.26 (4.0)	40	0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
C 0, 2, 4, 6, 8, 10	0.3	0.63 (2.0)	20	0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
D 0, 2, 4, 6, 8, 10	0.3	1.26 (4.0)	40	0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

2) 損失係数の算出

得られたマノメーター水位に対し必要な補正を行った後、マンホールにおける損失水頭と損失係数を、次のような方法で計算した。

・圧力水頭 h_i

各スパンにおけるピエゾ水頭の値から回帰計算により動水勾配線をそれぞれ求めた。このとき、動水勾配線は直線と仮定した。次に各スパンの動水勾配線をそれぞれ3方向マンホールの中心まで延長し、圧力水頭 h_i を外挿により求めた。

・速度水頭 $v_i^2/2g$

各スパンの流量から流速 v_i をもとめ、速度水頭 $v_i^2/2g$ を計算した。

・損失係数 K_{ij}

損失係数を次式で定義した。

$$K_{ij} = \{ (v_i^2/2g + h_i + z_i) - (v_j^2/2g + h_j + z_j) \} / (v_j^2/2g)$$

ここに、 K_{ij} :マンホール損失係数、 g :重力加速度($=9.8\text{m/s}^2$)、 z :位置水頭、 i :マンホールの上流側スパン名、 j :マンホールの下流側スパン名、である。

5.3 実験結果および考察

横流入量比を横軸に、損失係数を縦軸に示したグラフを図-5.3、図-5.4に示す。図-5.3は損失係数として K_{13} を、図-5.4は K_{23} をとった。

K_{13} の場合、 $Q_2/Q_3=0.0$ では値は0.1前後となった。今回使用した3方向マンホールの長さ D_m は0.36mであり、 $D_m/D=1.8$ となる。図-4.9にみられるように、いくつかの実験結果より判断すると、2方向流れで $D_m/D=1.8$ の場合のエネルギー損失係数は0.1から0.3の間の値をとると考えられる。3方向流れであっても $Q_2=0$ の場合は2方向流れの結果を援用できると仮定すると、今回の結果は妥当なものと考えられる。 $Q_2/Q_3=0.2$ および0.4では、損失係数は0.25から0.30の間となった。このとき実験ケースによる違いは殆どみられなかった。しかし、 $Q_2/Q_3=0.6$ 以上では、ケースにより損失係数にばらつきがみられた。このときの水位あるいは流量（流速）の影響は明らかにできなかった。

K_{23} の場合、 $Q_2/Q_3=0.0$ ではスパン1からの圧力がスパン2に影響し、損失係数はマイナスの値をとった。 Q_2/Q_3 の増加に従い、下に凸の加速度的な増加をみせた。このときは流量や水位による差異はみられなかった。

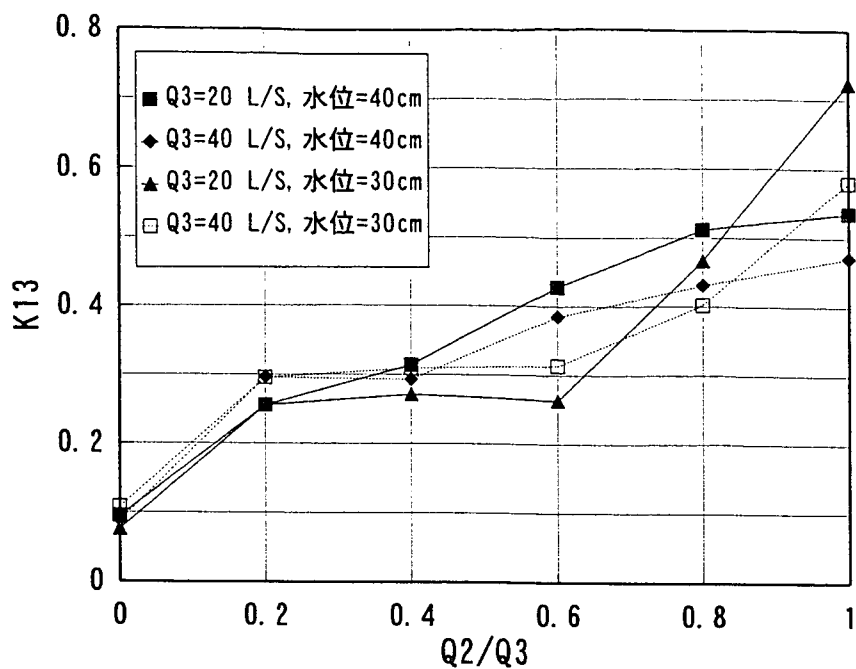


図-5.3 横流入量と損失係数の関係
(損失係数=K13の場合)

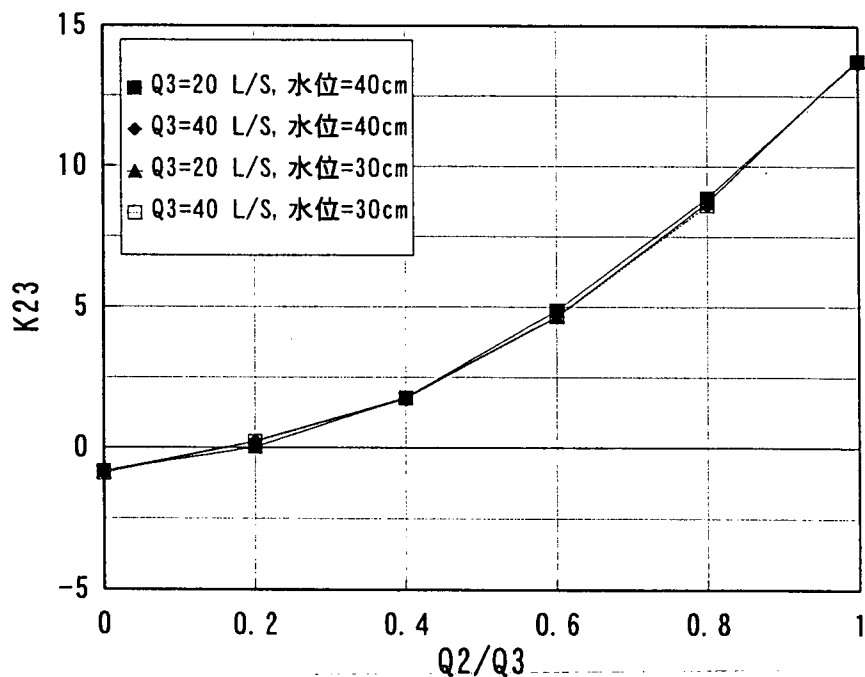


図-5.4 横流入量と損失係数の関係
(損失係数=K23の場合)

5.4 今後の課題

3方向マンホールのエネルギー損失を計測し、流入量比と損失係数の関係を考察した。適当な横流入流量比としては管径比から考えると0.2前後である。この流量比付近の実験を詳細にする必要があると思われた。また設定した流入量比から考えて、下流側のスパン3の管径を大きくすべきであると考えられた。また横流入量のスパン2の上流側の流れの安定化を図ることが必要と考えられた。さらに、横流入条件として、今回の90度以外に60度など他の角度による実験も必要と考えられた。

<参考文献>

B. C. Yen et al., Advances in hydrosience, Academic Press, England, 1986

6. まとめ

管路模型を用いて、基本的な接続形態である2方向マンホール、実験事例の極めて少ない3方向マンホールにおけるエネルギー損失の計測した。その結果、下水道の設計や維持管理において重要な基礎データとなりうるエネルギー損失係数を得た。しかしながら、このエネルギー損失係数は、管渠の接続本数や接続管渠の管径比、接続角度、接合パターン(管頂接合, 管底接合, 水面接合など)、下水の流入比(流速比)などの様々な条件に左右されることが考えられる。よって、より正確な流下能力の把握には、さらなる検討を加える必要があると考えられる。