

II-37

ダム貯水池の水面変動特性の計測と解析

北海道大学 正会員 長谷川和義 正会員 藤田 睦博  
 学生員 橋本 雄  
 北海道開発局 正会員 石田 享平 正会員 高瀬 貞雄

1 はじめに

ダム流入流量を精度よく推定することは、ダム操作運用にとって最も重要な課題である。その時刻までの流入流量が正しく推定されなければ、目的にかなう操作は難しくなる。一方、この問題は水文学研究にとっても重要である。広流域を対象にした各種流出予測モデルは、公表されたダム流入量データによってチェックされることが多く、その精度の向上が期待される。

現在、本邦ダムの大部分で用いられている流入量推定法は、貯水池の水位変化から貯留分流入量を推定し、これに放流量を加えて流入量とするものである。しかし、貯水池水位の計測は思いのほか難しい。しばしば発生する静振(セイシュ)や風波により、真の静水面水位が隠されてしまうためである。ダム操作や流入ハイドログラフ推定の上では、1cmオーダーの水位差が問題であり、10cmオーダーの水面変動の中からこれを精度よく推定しなければならない。したがって、静水面水位を正しく評価するためには、貯水池における水面振動の実際について詳しく観測し、その振動機構について理解を深めることが必要である。

本研究は、北海道開発局豊平川ダム統管理事務所が、定山溪ダムにおいて実施している5カ所の水位同時計測の記録から、セイシュ周期・振幅・継続時間を解析し、ついでこれらの周期成分を除去した風波変動につき、スペクトル特性を明らかにしようとするものである。



図1 定山溪ダム貯水池平面図

2 定山溪ダムの概容と水位計測法

定山溪ダムは、豊平川水系小樽内川に建設された総貯水量8230万 $m^3$ 、湛水面積2.3 $km^2$ 、堤高117.5mの重力式コンクリートダムである。図-1に示すように、貯水池(札幌湖)はほぼ北西-南東方向に長辺をもつ長方形であり、堤体の400m近傍で折れている。滝の沢流入点から上流で貯水池幅が急縮しており、この点が貯水池主要域の境界になっていることが分かる。図-2は、貯水池最深部の縦断形状であり、水深がほぼ直線的に変化する様子を示している。図-3は、主な地点における横断形状である。側岸の傾斜はきつく、1.5ないし2割の勾配をもつ。

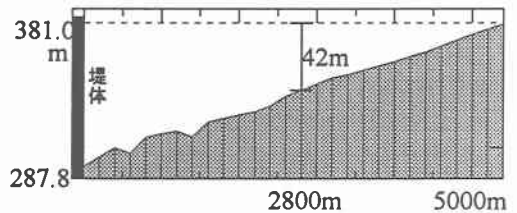


図2 定山溪ダム貯水池の縦断形状

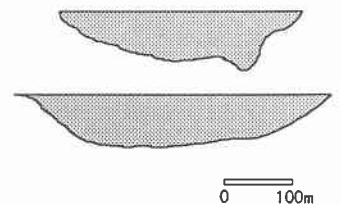


図3 ダムから400mにおける横断面(上)と同1000mのもの(下)

1994年7月から、ダム統管理事務所の手によって図中のNo.1からNo.5の地点に圧力式水位計が設置され、同時水位が計測され始めた。圧力計センサーは、ほぼ水面下5mになるように固定されているが、水位が大きく変わる時期にはこれに合わせて固定位置を変えている。計測時間間隔は2秒

Properties of water surface oscillation in a dam reservoir observed from the data of multiple water guages, by K.Hasegawa, M.Fujita, T.Hashimoto, K.Ishida and S.Takase.

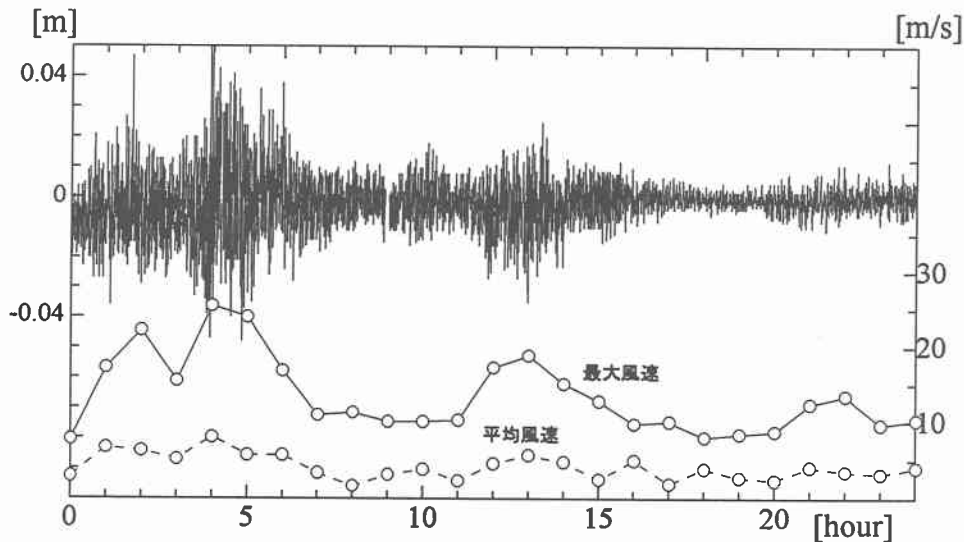


図4 94年10月13日No.1地点における0:00~24:00の水位および風速記録

であるが、1秒ごとにサンプルし、ロガーに記録して毎日定時に回収している。また、定山溪ダム管理所には風向、風速、気圧などの気象観測装置があり、毎時データとしてまとめられている。

### 3 セイシュ現象の検出

5カ所の水位同時計測データから、定山溪ダム貯水池にセイシュの生ずることが初めて見いだされた。図-4は、1994年10月13日0時から24時までのNo.1地点の水位記録を示すものである。この日は台風29号の通過に伴い、未明から最大15~25m/sの東南東風ないし東の風が吹き続けた。7時から12時にかけて一時弱まるが、その後15~19m/sの南南西風ないし西風に転じ、さらに16時から北北東ないし北西風に変わっている。図に見られるように、水位変動はこれらに対応して生じており、特に、貯水池の長辺方向に強風が吹き続けた午前3時から5時にかけて最大振幅の振動が起こっている。この日のダム放流量は $1.84\sim 1.88\text{m}^3/\text{s}$ でほぼ一定しており、推定流入量は、14:00まで $1.73\sim 1.96\text{m}^3/\text{s}$ であって放流量とほぼバランスしている。

水面の周期変動の特徴を見るために13日0時から30分ごとに水位データを切り取り、No.1地点を中心に各地点データとの相互相関を調べた。図-5(a)~(e)は水位変動の一例で、0時~0時30分を示す。図-6(a)は、そのNo.1における自己相関係数であり、ほぼ210秒周期の変動が明瞭に現れている。図-6(b)~(e)は、それぞれ、No.2~No.5のNo.1に対する相互相関係数である。No.2、No.3地点において、No.1と同位相・同一周期の水位変動が認められる一方、No.4、No.5地点では逆位相・同一周期の変動が確認できる。

考えられる解釈は、この時間帯に、No.3とNo.4の間に節をもつ単一周期のセイシュが発生したということであろう。同様の振動特性は、乱れが大きくなるものの1時00分までのデータ、および5時00分~8時30分のデータについていえる。ところが、風の強くなる1時00分から5時00分のデータに関しては、図-7(a)~(e)に一例を示すように、80秒程度のより短周期の変動が卓越している。図-8は、No.1地点の自己相関ならびにNo.1と他地点との相互相関を見たものであるが、80秒周期の変動が、No.2、No.3で逆位相、No.4で同位相、No.5で再び逆位相となって現れている。これは、No.1、2間、およびNo.3、4間、さらに4、5間に節をもつ高モードのセイシュと見ることができよう。

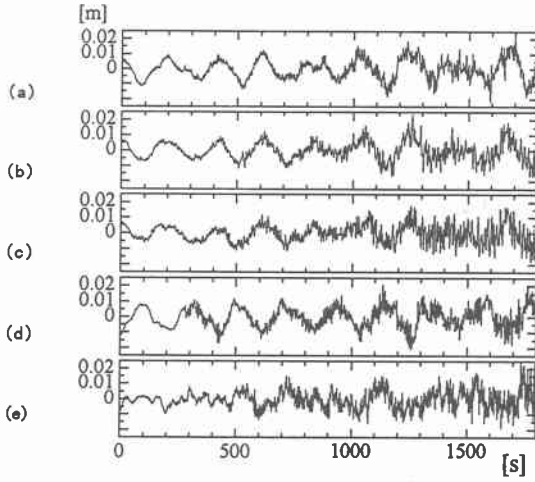


図5 94年10月13日0:00~0:30における水面変動

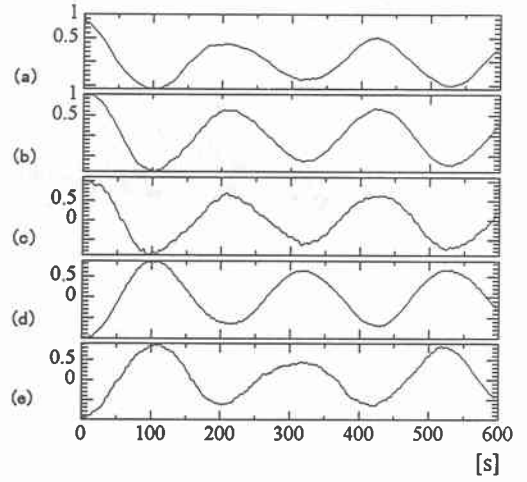


図6 94年10月13日0:00~0:30における自己相関係数および相互相関係数

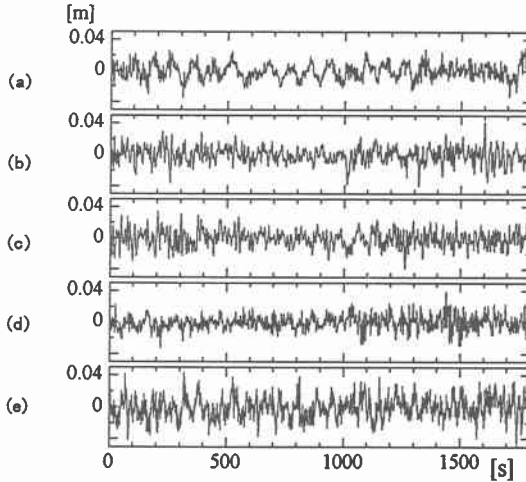


図7 94年10月13日2:30~3:00における水面変動

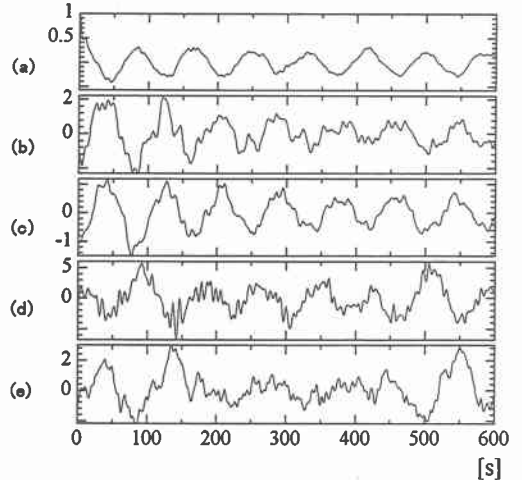


図8 94年10月13日2:30~3:00における自己相関係数および相互相関係数

長辺 $a$ 、短辺 $b$ をもつ長方形貯水池に対するセイシュの理論周期 $T$ は、次式で表される。

$$T=2/\sqrt{gh\{(m/a)^2+(n/b)^2\}} \quad (2)$$

ここに、 $g$ :重力加速度、 $h$ :平均水深、 $m$ : $a$ 方向の波のモード数、 $n$ : $b$ 方向の波のモード数。いま、セイシュが長辺方向にのみ起こっているものとする。貯水池の端部を滝の沢流入地点にとると $a=2800m$ であり、この間の最深水深の平均をとると $h=67m$ である。これらの数値を上式に入れ、モード1 ( $m=1$ )、2 ( $m=2$ )、および3 ( $m=3$ )の線を描くと図-9となる。プロット点は、上記の相関係数の周期から読みとった実測値である。2時00~3時00のデータが $m=3$ の線の近傍にきており、他は $m=1$ の線の近くにまとまっている。これらの結果からみてもセイシュの発生は明らかであり、強風時に高モード波が起きることが確認される。

#### 4 風波の特徴

前述のように、水位計の圧力センサーは水面下5mほどのところに設置されており、特に短周期の水面振動に対する応答が鈍くなるものと考えられる。紙数の関係で、波動場における圧力と速度ポテンシアルの関係から導かれる圧力—水面波特性の結果のみを記すと、以下ようになる。

$$p = \rho g D + C \rho g \eta, \quad C = \cos\{k(h-D)\} / \cosh(kh) \quad (2)$$

ただし、 $p$ :水深Dにおける圧力、 $\eta$ :静水面を基準とした水面波波形(上向き正)、 $\rho$ :水の密度、 $k=2\pi/\lambda$ :波数、 $\lambda$ :波長、 $h$ :水深である。すなわち、上式右辺第2項の $\rho g \eta$ にかかる係数Cが静水圧分布を歪ませる働きをする。式に見られるように、Cは波数、水深、測定深さの関数であり、図-10に示すように無次元波数および測定深さが大きいほど小さくなる。今の場合、セイシュに関しては無次元波数 $kh$ が0.15~0.45程度であり、圧力計による水位変動推定値にほとんど誤差が生じないが、波長の短い風波に関する推定値については波高が小さく観測されることになる。しかし、Cは線形フィルターであり波数の変化は起こらないので、分散関係を通じた振動数についても変化は生じないものと考えられる。したがって、ここでは直接、圧力計の時系列データを解析する。

はじめに、時系列からセイシュによる正弦波振動を除去する。先の時系列を7.5分ごとに4つに分け、Fourier解析をおこなって主要周期と振幅の最適値を求める。図-11は、図-5のデータに対する解析結果であり、基本周期を450秒として450 $m$ ( $m=1,2,\dots$ )秒ごとの振幅を示している。このような当てはめ的な波数解析によれば、各セイシュ波は図に示すように、225秒、150秒、112秒、90秒、75秒などの主要周期をもって表され、各7.5分間ごとにその振幅が微妙に異

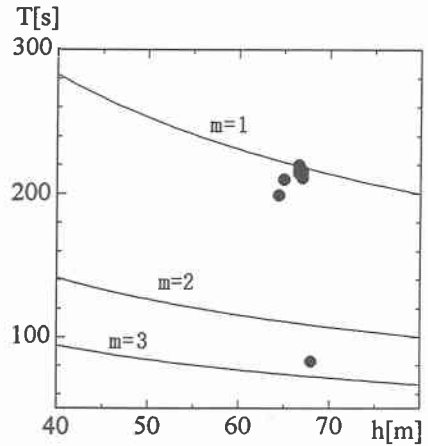


図9 T~hの関係

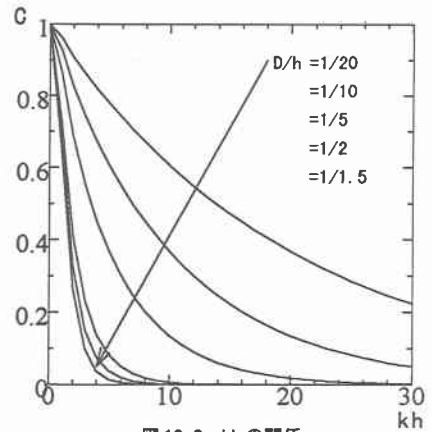


図10 C~khの関係

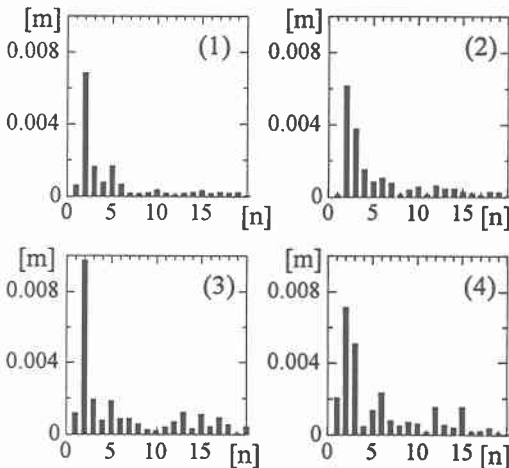


図11 94年10月13日0:00~0:30の波高解析結果

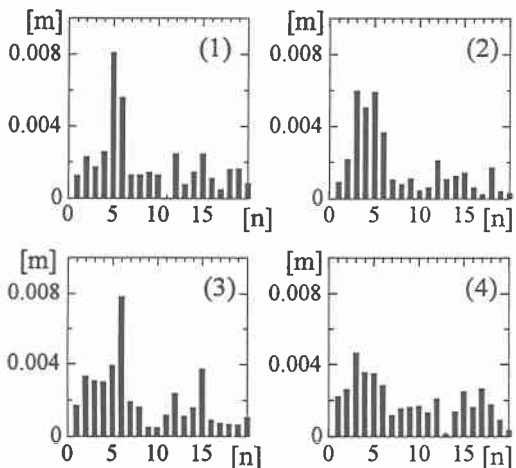


図12 94年10月13日2:30~3:00の波高解析結果

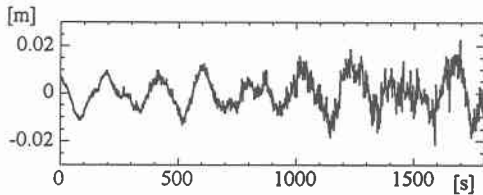


図13 No. 1の水面変動 (94年10月13日0:00~0:30)

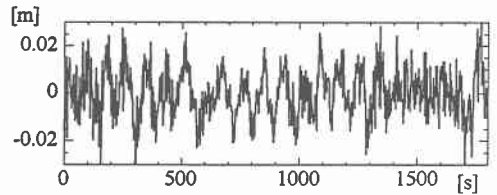


図14 No. 1の水面変動 (94年10月13日2:30~3:00)

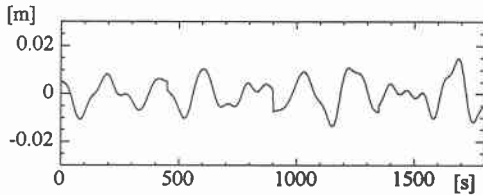


図15 フーリエ解析によりセシシュを表現したもの  
(94年10月13日0:00~0:30)

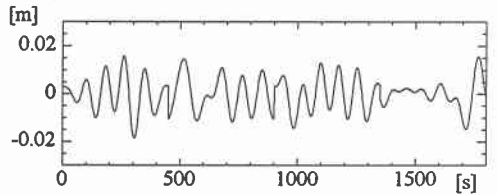


図16 フーリエ解析によりセシシュを表現したもの  
(94年10月13日2:30~3:00)

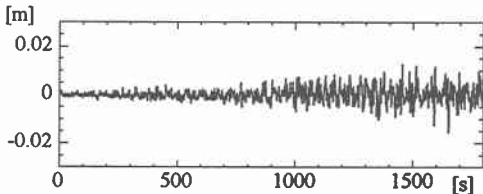


図17 セシシュ成分を取り除いた波高  
(94年10月13日0:00~0:30)

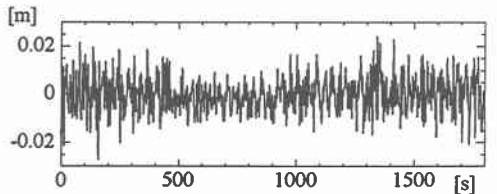


図18 セシシュ成分を取り除いた波高  
(94年10月13日2:30~3:00)

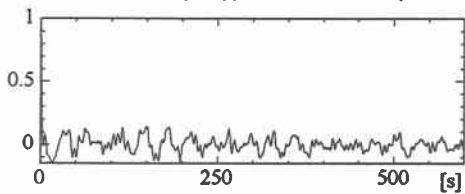


図19 セシシュ成分を取り除いた後の波高の自己相関  
(94年10月13日0:00~0:30)

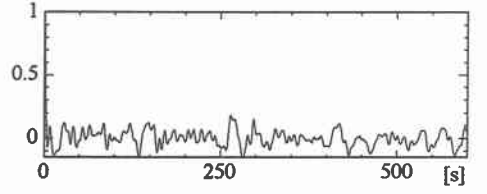


図20 セシシュ成分を取り除いた後の波高の自己相関  
(94年10月13日2:30~3:00)

なっている。データを分けたのはこのためであり、一つにまとめて扱うと少数の成分波でセシシュを表現することが不可能になる。これら複数ピークが存在は、貯水池境界の複雑さの反映であり、特に滝の沢流入点から上流の開放境界の影響が大きいものと考えられる。図-12は、図-7のデータに対する解析結果で、主要周期の振幅分布を示す。いま、上述の6種類の成分波を選び、各成分振幅をあててセシシュ振動を表現すると図-15,16中の曲線となる。これらの曲線成分を除去した結果が図-17,18であり、風波による水面振動を表している。*Roesner & Yevjevich* の周期成分除去に関する自己相関係数の信頼限界検定では、95%水準で33秒周期波がやや限界を超えるが、これ以上の高周波成分は限界内に収まっていることが確かめられた。図-21,22は、これらについてスペクトルをとったものである。ただし、図中の3種類の線は、異なるウィンドウに対応している。0:00~0:30、および2:30~3:00のいずれの結果も互いに非常に似た形になっており、風波特性の普遍性を示唆している。

吹送距離が不十分で完全な発達に至らない風波のスペクトルに関して *Phillips* は、ピークより高周波数側の一部に普遍平衡領域の存在を認め、次式で表されることを示している。

$$P(f) = \beta g^2 f^5 \quad (3)$$

ここに、 $P$ : スペクトル密度、 $f$ : 周波数、 $\beta$ : 係数である。図-21、22は、この関係が非常に明瞭に認められる。

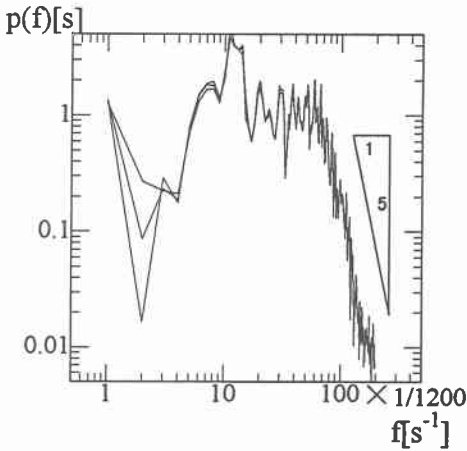


図21 セイシュ成分を取り除いた波高のスペクトル (94年10月13日0:00~0:30)

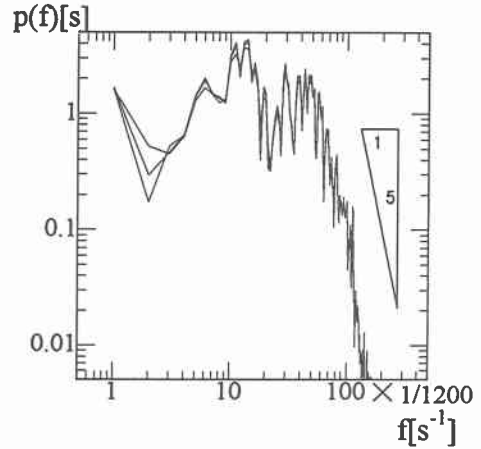


図22 セイシュ成分を取り除いた波高のスペクトル (94年10月13日2:30~3:00)

## 5 まとめ

定山溪ダム貯水池における5カ所の圧力計データを解析して、以下の結果を得た。

- (1) 貯水池の長辺方向に風速 $10m/s$ 以上の風が吹き続けた日に、周期約210秒のセイシュの発生が確認された。この周期は、堤体～滝の沢流入点間を波長 ( $l = 2800m$ ) とし、平均水深を $67m$ としたときの単一モードセイシュの理論周期にほぼ一致する。
- (2) 同方向の最大風速がおおよそ $20m/s$ を越えた時間帯に、周期80秒程度の高モードのセイシュが認められた。
- (3) 圧力計による水位計測は、水面波の無次元波数が大きいほど、また測定点の深さが深いほど変動の振幅を小さめに評価することになる。しかし、波数の変化は起こらない。
- (4) セイシュ振動を除去した振動時系列に関しスペクトル解析をおこなうと、上記のいずれのセイシュ発生時についてもほぼ同一のスペクトル密度関数が得られる。高周波数側で、 $-5$ 乗則の成立していることが確かめられた。

## 6 おわりに

貯水池水面振動の基本的性質が明らかにされたので、これらを手がかりに静水面標高の推定に進みたいと考える。周波数領域法、実時間法、あるいはよりプリミティブな方法などが想定されるが、実用にたえる方法を見いだしたい。

### 参考文献

- 日野幹雄：「流体力学」、朝倉書店、1992。  
 水理公式集、土木学会、1980。