

# 松花湖の成層流動シミュレーションのための 計算条件設定について

ASSUMPTION OF CALCULATION CONDITIONS FOR NUMERICAL  
SIMULATION OF STRATIFIED FLOW IN SONGHUA LAKE, CHINA.

小島崇<sup>1</sup>・何春光<sup>2</sup>・盛連喜<sup>3</sup>・石川忠晴<sup>4</sup>・中村恭志<sup>5</sup>  
Takashi KOJIMA, Chunguang HE, Lianxi SHENG, Tadaharu ISHIKAWA  
and Takashi NAKAMURA

- <sup>1</sup>学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)  
<sup>2</sup>非会員 工博 東北師範大学講師 環境科学研究所 (5268, Changchun City, China)  
<sup>3</sup>非会員 工博 東北師範大学教授 環境科学研究所 (5268, Changchun City, China)  
<sup>4</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)  
<sup>5</sup>正会員 工博 東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

The importance of the water resource has risen worldwide. China is not an exception. In Japan, the reservoir managers are using the numerical simulation to advanced management. In the foreseeable future, Chinese reservoir's managers will need advanced management by numerical simulation. But, it is difficult to acquire information necessary for the numerical simulation according by economical or social reason. Then, we presumed unknown data from easy data to obtain in this study. These data were substituted for the numerical simulation model. Then after, the numerical result was compared with the result of the field observation result. As a result, if we can acquire the data of weather forecast, we have been possible to obtain the meteorological data. And if few data is supplemented, we have been understood that numerical simulation is possible to calculate.

**Key Words :** Reservoir, Numerical Simulation, CIP-Soroban, Meteorological forecast, China

## 1. はじめに

中国ではダム貯水池の水質悪化が顕在化しつつあり、汚染の機構を把握し対策を講じていく上で、また合理的な管理を実行していく上で、現象の時空間的な把握が重要と考えられている。しかし中国は貯水池数が世界最大の国であり、また規模の大きな貯水池も多いため、現地計測のみで状況を詳細に把握するには限界がある。

そこで、数値シミュレーションの併用が有効であると考えられるが、そのためには、地形、流量、気象条件などのデータを必要とする。これらは日本国内では容易に入手でき、それを前提として計算手法が高度化されているが、データの乏しい外国では、何らかの工夫をしないと計算手法を活かせないことが多い<sup>1)</sup>。

筆者らは、中国吉林省にある松花湖の水質保全に関す

る共同研究において、まず同湖の水温成層状態を数値シミュレーションするために必要な入力条件を決定する必要があった。しかし、中国ではそれに用いることのできるデータが少なく、あったとしても有料で且つ高価なことが多く、日本と同様に入手することが困難であった。そのため、気象データの推定方法として篠原らの方法<sup>2)</sup>や宮岡の方法<sup>3)</sup>などについて検討をしたが、推定に実測気象データが必要とされ適用が困難であった。また、衛星画像を用いた方法では通年の推定が困難であった。

そこで、Global Spectral Model(GSM)やFinal Global Data Assimilation System(FNL)に代表される客観解析データの利用が考えられるが、途上国及び中国内陸部では観測データが不足している点と、局地的な解析データの信頼性についても問題とされている点<sup>4) 5)</sup>から、本研究では無料で入手可能なデータをできるだけ組み合わせる数値シミュレーションに必要なデータを作成することを試みた。

このような作業は対象とする現象の性質や現地の状況によって異なるから、普遍的な方法は存在しない。しかし、それら個別の検討結果の集積が、今後の海外での日本人研究者・技術者の活動の参考になると考え報告する。

松花湖は松花江上流部に日本が戦時中に建設した高さ91mの豊満ダムによって形成される貯水池であり、図-1(google Earthより)に示すように湛水延長は約120kmある。総貯水容量は125億 $m^3$ であり<sup>5)</sup>、現在でも吉林省最大の水源として機能している。なお松花湖は寒冷地にあるため、毎年11月末から4月始まで全面結氷している。

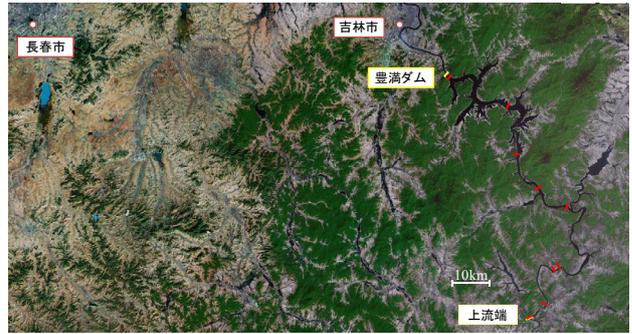


図-1 松花湖と豊満ダム。赤線：地形計測断面位置。

## 2. 数値計算に必要なデータの作成

本研究では、貯水池内の現象のベースをつくる水温成層をシミュレーションしている。計算モデルには、貯水池の流動および水温成層を良好に再現可能なモデルとして、著者らが開発したCIP-Soroban法に基づく鉛直二次元貯水池モデル<sup>5)</sup>を用いた。モデルの詳細は小島ら(2008)に記述されている。計算期間は2006年の非結氷期(4月始め~10月末)とした。この年には水温分布について若干の現地データが得られている。この貯水池モデルは、以下に述べるような地形、気象、流入量に関する時間データを必要とする。

### (1) 地形データの作成

#### a) 本体の地形データの作成

鉛直二次元モデルでは、縦断距離 $x$ と標高 $z$ の関数として貯水池幅 $B(x,z)$ が必要とされる。なお本研究では縦断格子解像度 $\Delta x$ を2000mに設定しているの、約60断面のデータが必要とされる。

松花湖の深淺測量データは2断面しか存在しなかった。そこで共同研究者の東北師範大学が、2008年8月にハンディ魚群探知器(本多電子工業製、PS-7FL)を用いて水深を計測した。ただし松花湖の湛水延長は120kmあるため、時間の制約から8断面しか計測できなかった。また横断面内の計測点数も必ずしも十分でなかったため、以下の式を用いて断面形状を規格化し、データを内挿した。

$$B_{x,z}/B_{x,ws} = 1 - (h_{x,z}/h_{x,gs})^\alpha \quad (1)$$

ここに、 $B$ : 貯水池の幅、 $h$ : 水深である。添え字は座標を表しており、 $ws$ : 水面、 $gs$ : 最大水深を意味している、指数 $\alpha$ は断面ごとに最小二乗法によって決定した。水面幅 $B_{x,ws}$ はGoogle Earthの画像上で計測した。図-2に補間結果を示す。必ずしも十分表現できない部分もあるが、概ね一致している。関数形を複雑にしても計測断面の間の補間が困難になるため、以下では式(1)を用いた。なお計測断面以外の断面では、最大水深 $h_{x,gs}$ と指数 $\alpha$ が線形に変化すると仮定し、計測断面の値を内挿補間した。また水面幅 $B_{x,ws}$ については、それぞれの断面についてGoogle Earthの画像上で計測した。

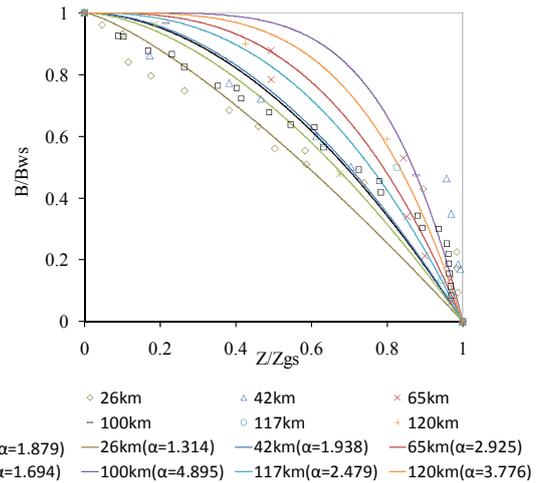


図-2 地形の観測結果と式(1)による補完結果の比較。プロット：観測点、実線：推定値、凡例：ダムからの距離

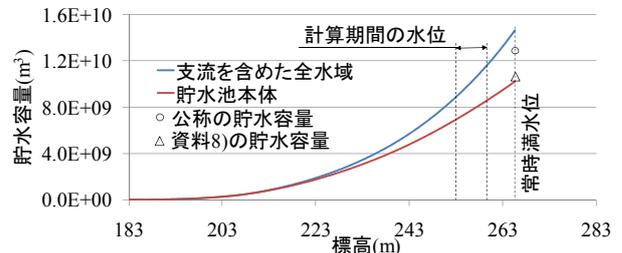


図-3 作成地形と貯水容量の関係

#### b) 入江の形状データの作成

松花湖には大小の支川があり入江が多いが、鉛直二次元モデルでは接続する貯水池本体部分と同じ水位を仮定し、連続条件式により貯留効果のみを考慮する。そこで、貯水池本体の縦断距離 $x$ と標高 $z$ の関数として入江奥行き $y'(x,z)$ を入江ごとにデータ化する必要がある。ここではGoogle Earthから平面形を求め、深さ方向には三角形の谷地形を想定した。松花湖の貯水容量は公称125億 $m^3$ となっているが、2004年の資料<sup>6)</sup>では108億 $m^3$ とされている。松花湖は支流が多いため貯水容量はそれを含めるか否かで大きく異なる。また、支流のどこまでを松花湖の範囲としているかは示されていない。そこで、支流を含めた場合と含めない場合についてV-H曲線を作成した。その結果を図-3に示す。前述した総貯水量の2つの値は常時満水位における計算体積の間に入っている。このことから前述の地形の仮定は体積的に概ね妥当と考えられる。

## (2) 気象データの作成

本モデルで必要とされる気象データは気温、日射量、雲量、風速・風向である。元来は1時間ごとのデータが望ましいが、中国では計測地点の密度が低く、またデータが公開されていないことが多い。入手可能な場合でも時間データは極めて高額なため、本研究では日データを用いることとした。しかし、それでも入手できるものは少なかった。

そこで、できるだけ無料のデータベースを使用することとしたが、それらは月平均値であった。一方、日単位の情報として新聞に掲載された主要都市の新聞天気予報(以下天気予報)がある。これらは大学図書館などで閲覧できる。本研究では東北師範大学図書館に保存されている長春日報に記載される長春の天気予報を使用した。長春は豊満ダムの約100km西方にある吉林省の省都である。

解析が一通り進んでから、種々のコネクションを経由して、豊満ダム北方16kmにある吉林の気温、日照時間および風速のデータを入手できたが、これには相当の労力と費用もかかっており、通常は入手しにくいものである。本研究では、無料データをできるだけ使用した方法について記述し、後に入手したデータで精度を確認する。

### a) 気温

豊満ダムから約16km北にある吉林の月平均気温 $T_m$ (添え字 $m$ は月平均であることを示す)と、長春日報に記載される長春の日最高气温 $T_{high}$ および日最低气温 $T_{low}$ の予報値を用いた。後者の平均値をさらに一ヶ月平均し、 $T_m$ とのズレ $\Delta T$ を月ごとに求め、それを線形内挿して各日の $\Delta T$ を求め、次式によって吉林の日平均気温の時系列とした。

$$T_j = (T_{high} + T_{low}) / 2 + \Delta T \quad (2)$$

事後に入手した日平均気温と、上記の方法で得られた結果を図-4に比較する。推定値は実測値と概ね一致しており、その相関も $R^2=0.965$ となっていた。このような方法で日平均気温を推定可能であることがわかった。なお、吉林と豊満ダムには60mの標高差があるので、気温減率を考慮する必要がある。しかし、地域によって傾向が異なると考えられるが、現地の資料がないため、一般的な $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}^7$ を用いて補正し貯水池シミュレーションに用いた。

### b) 日射量と雲量

日射量と雲量の日データは存在しなかった。そこで長春の天気予報を用いて推定する方法を検討した。なお長春と豊満ダムの距離は前述のように100kmあるが、途中は概ね平原であり、衛星の雲画像によれば、天気の変化の空間スケールに比べて2地点はほとんど同一地点とみなせる事から日単位の天気はほぼ共通していると考えてよいと思われる。

日射量および雲量と天気との相関性を調べるために、長春および豊満ダムと同緯度にある北海道の旭川の気象デ

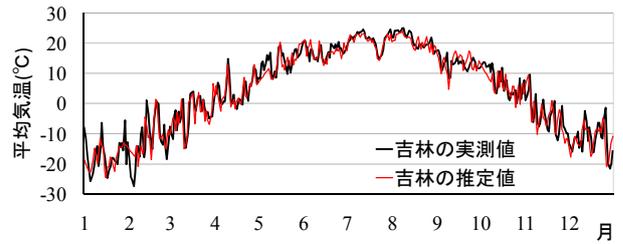


図-4 気温の実測値と推定値の比較

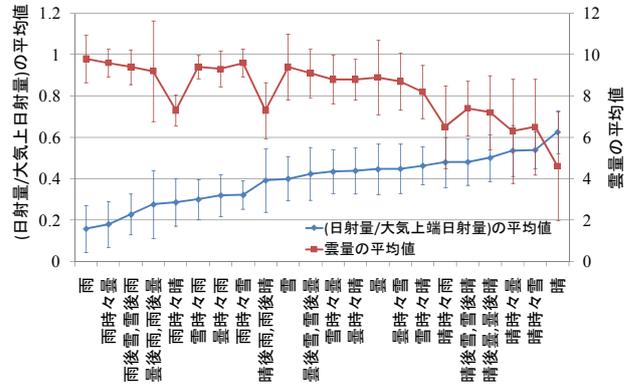
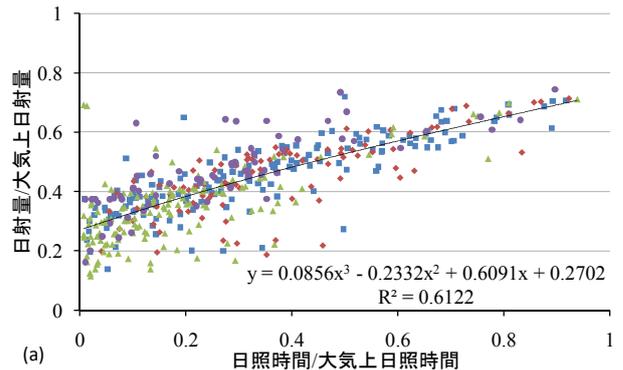
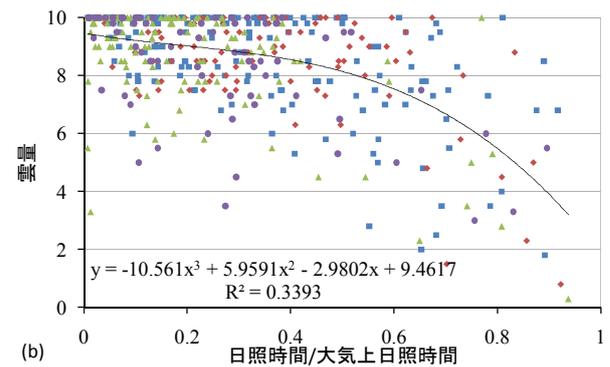


図-5 旭川の実測天気と日射量の透過率、雲量の平均値の関係。

青線：日射量，赤線：雲量，エラーバー： $\sigma$



(a)



(b)

■ 曇 ● 曇時々晴 ▲ 曇時々雨 ● 曇時々雪 — 3次近似曲線

図-6 日照時間と日射量、雲量の相関図(主に曇りの場合)。

(a) 日射量と日照時間の相関，(b) 雲量と日照時間の相関。

ータを解析した。図-5青線は、旭川の実測天気と大気上面値で基準化した日射量との相関を、図-5赤線は天気と雲量データとの相関を示している。天気区分は“悪い順”に並べている。天気が良くなると日射量は単調に増大し、雲量は概ね単調に減少する。そこで、この図をも

とに、天気予報から日射量と雲量の推定が概ね可能であると考えた。厳密には旭川と豊満ダムでの大気透過度の違いを考慮した補正が必要となるが、それに必要な資料は存在しないので、後の解析では図-5をそのまま用いた。

次に、吉林の日照時間データを活用する方法も検討した。まず旭川の気象データについて、日照時間を各日の大気上面日照時間で基準化し、基準化した日射量および雲量との相関を天気区分（晴れ，曇り，・・・）ごとに調べた。その結果を“主に曇り”であった日について図-6(a), (b)に示す。図中の実線は「曇」，「曇時々晴」，「曇時々雨」，「曇時々雪」のデータから作成した3次の回帰曲線である。日射量については高い相関関係が認められるが、雲量の方はかなり散らばっている。これは原理的に仕方ないところである。図-7(a), (b)は、2つの方法で推定した旭川の日射量と雲量を同地点の実測値と比較した結果である。日射量，雲量とも，推定値（赤と青）に比較して実測値（黒）の触れ幅が大きい，これは推定に用いる相関関係を天気概況ごとにまとめて作成しているからである。

### c) 風向・風速

新聞の天気予報には、風向と風速ランクが“2-3級”という形式で記載されていた。風速ランクと風速の関係は表-1に示すとおりである。なおこの風速が日平均値か日最大値かは定かでない。吉林の日平均風速データが入手された時点で両者を比較したところ（図-8の青線と黒線）大きく異なることがわかった。

すなわち、離れた地点の風予報値を用いる場合、貯水池に近接する地点での実際の風の情報を多少でも加味しないと非常に異なった結果となる恐れがある。そこでa)の気温の場合と同じように、月平均値を一致させるように補正した結果を図-8の赤線で示している。実測値との差は依然として小さくないが、後の貯水池シミュレーションではこの時系列を用いる。

### (3) 流入量データ

長期間の流動シミュレーションを行う上では流量の収支をとっておくことが非常に重要である。収支が合っていないと、長期間計算の間に水位が大きく異なってしまうからである。松花湖の流出部は豊満ダム一箇所であり、その放流量 $Q_{out}$ とダム近傍の湖水位は連続的に計測されている。一方流入河川水量は5地点で計測されており、そこより上流の流域面積は全流域面積(41600km<sup>2</sup>)の85%(35400km<sup>2</sup>)，残流域は15%(6200km<sup>2</sup>)である。これらのデータはダム管理者から提供された。図-9に松花湖の流域図をGoogleMap上に示す。なお、流入水温データも同時に提供された。計測データの整合性と残留域からの流量を以下のように検討した。図-10(a)は、報告されている流入量 $Q_{in}$ と流出 $Q_{out}$ の差（赤線）と、湖水位の変動から算出した湖水体積 $\Delta V$ （青色）を比較している。これらの差が理論的には残留域からの流入量 $Q_{in}$ である。

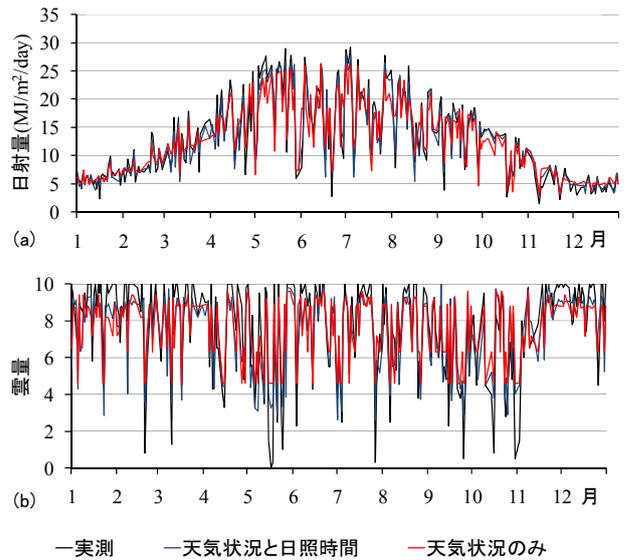


図-7 旭川の通年日射量，雲量の実測値および推定値の比較。(a)日射量，(b)雲量。

表-1 風速ランクと風速の対応表。

1-2級	0.3-3.3m/s
2-3級	1.6-5.4 m/s
3-4級	3.4-7.9 m/s
4-5級	5.5-10.7 m/s
5-6級	8.0-13.8 m/s
6-7級	10.8-17.1 m/s

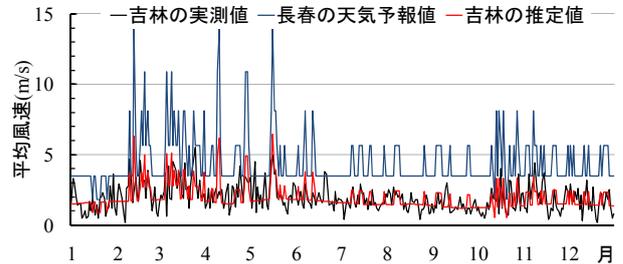


図-8 風速の実測値と推定値の比較。

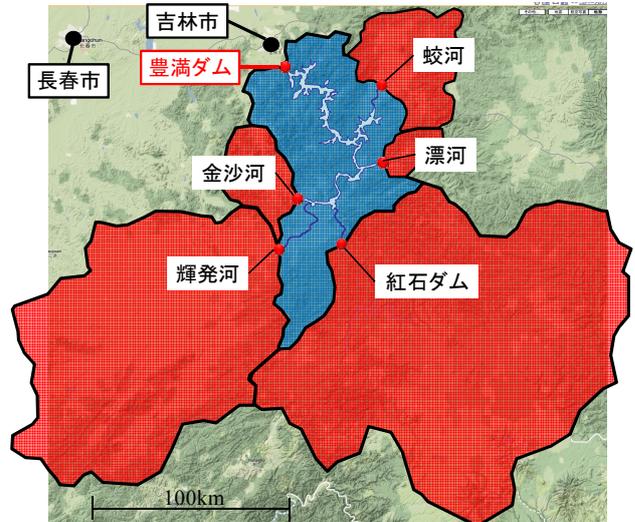


図-9 松花湖流域図。赤：流入量が得られている流域，青：流入量が得られていない残流域，赤点：流量観測点。

$$Q_{in} = \Delta V - (Q_{kn} - Q_{out}) \quad (3)$$

そこで式(3)に基づき $Q_{in}$ を推定した結果が下段の黒線である。ときどき負の値になることがわかる。その場合には $Q_{in}=0$ とし、一年間の残流域からの流量総量が同じになるよう、正の部分の流量に補正定数0.85を乗じた。その結果が図-10(b)の黄線である。計算に代入する既知の流量、残流域からの流量、ダムからの放流量と総流入量を図-11に示す。なお残留域からの流入は、3本の大きな支川に流域面積に応じて比例配分した。

以上の結果の算定精度を調べるために、Thiessen法<sup>8)</sup>を用いて流域内の雨量データから流域ごとの降雨時系列を推定し、年間の累積降雨と累積流入量の関係に大きな矛盾がないかどうかを流域ごとにチェックした。図-12には比流量の単位で各流域の降水量と流出量を示している。流量計測流域と残流域の流出率が同オーダであることから、上に求めた流入量時系列に大きな問題はないものと思われる。

### 3. 数値計算モデルへの代入と検証

#### (1) 計算条件

前章で求めた時系列データを鉛直二次元モデルに代入し、非結氷期の水温分布を計算し、現地観測データと比較する。ここでは、表-2に示す2通りの条件で計算した。(a)は入手できたデータを最大限に利用するもの、(b)は必要最小限のデータを用いたものである。なお、本鉛直二次元モデルでは、貯水池主軸方向の風成分を与えるので、長春での風向と貯水池主軸の成す角度を用いて風速を補正している。各データを図化した結果を図-13(a)、(b)に示す。(a)に比較して(b)では、夏期の日射量が低下していることがわかる。

#### (2) 計算結果

ダムから42km遡った地点で多項目水質形 (Alec電子製, AAQ) を用いて4回 (6月, 8月, 9月, 10月) の水温計測がなされた。測定器自体の計測最大深度は約45mであるが、船上計測設備とのケーブルの接続の都合上観測範囲は40m程度となっている。

まず、同地点における全期間の計算結果を図-14(a)、(b)にカラーコンターで示す。(a)、(b)は表-2に示した計算条件に対応している。入手データを最大限に利用した(a)では、5月中旬から水温成層が形成され、その厚さは約5mである。6月下旬から表層水温が上昇するとともに中下層の水温も徐々に上昇する。これは、日射量が増大するとともに、河川からの流入水が中層に浸入するためと考えられる。7月、8月の表層水温は25℃付近まで上昇し、底層との水温差は10℃以上となる。8月の下旬か必要最小限のデータを用いた(b)でも、水温成層の消

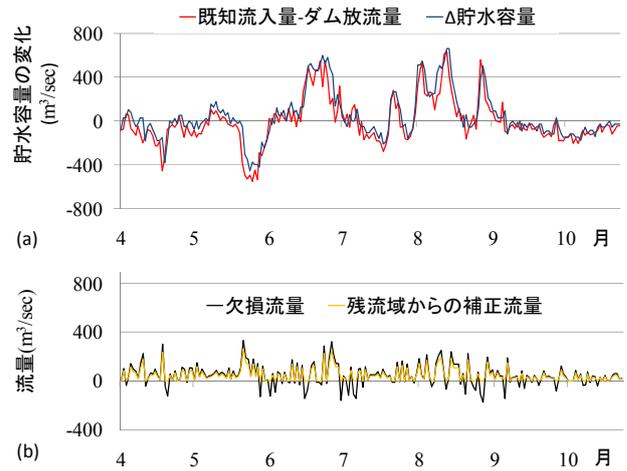


図-10 残流域からの流量の推定。(a)貯水量の単位時間あたりの変化、(b)欠損流量と残流域からの補正流量。

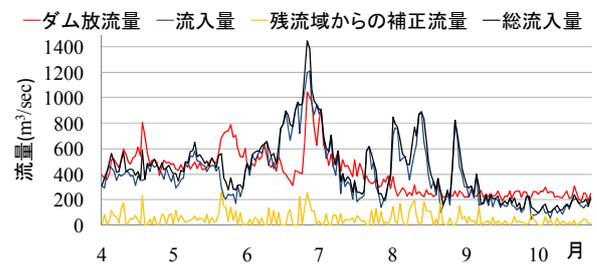


図-11 計算に代入する流量データおよび総流入量の時系列。

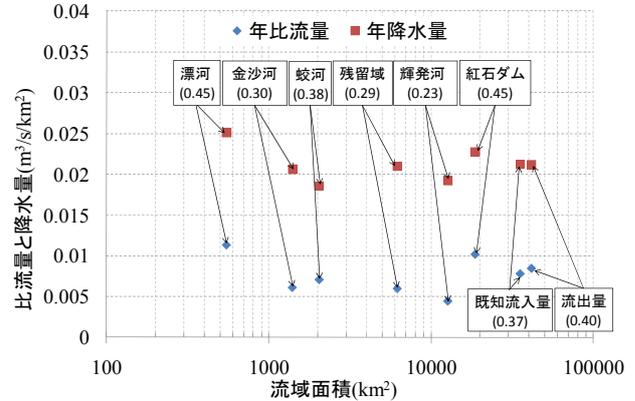


図-12 計算に代入する流量データおよび総流入量の時系列。□内は流域名および流出率。

表-2 計算条件

	(a)入手データを最大限利用	(b)必要最小限のデータ
気温	吉林气象台日平均気温	長春予報最高、最低気温 +吉林气象台月平均気温
日射量	吉林气象台日照時間 +長春新聞天気予報	長春新聞天気予報
雲量	吉林气象台日照時間 +長春新聞天気予報	長春新聞天気予報
風速	吉林气象台日平均風速	長春新聞予報風速 +吉林气象台月平均風速
風向	吉林气象台風向	吉林气象台風向

長はほぼ同様である。ただし7月から9月にかけて表層水温が若干低くなっている。また、図中の黒の実線は観測水位を示しており、8月から9月にかけて計算水位と2～3mのずれが生じているが、これは支川や入江の地形の仮定の誤差によっていると考えられる。

シミュレーション結果と観測結果の水温鉛直分布の比較を図-15に示す。2つのシミュレーション結果の差は小さく、観測結果に比較して6月および8月の表層の蓄熱量が過小に評価されているが、それ以降に生じる鉛直混合過程は良好に再現されている。特に(b)の計算で用いている気象データの多くが長春の新聞天気予報によっていることからすれば、上記の一致度は満足すべきものであると思われる。また現地観測結果との比較で6月と8月には水温成層の下層の水温分布に誤差が生じている。この原因としては、支流からの流入水温が不明なため本川と同じ値を代入していること、支川・入江での熱収支を計算していない事が考えられる。そのような状況を考えれば、本論文で用いた入力データ作成法は、少なくともpilot studyの段階では十分実用的ではないかと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、中国吉林省にある松花湖を対象に、不足している入力データ（地形、水文、気象）を入手可能な情報から作成し、水温成層の長期間数値シミュレーションを行なった。特に気象データについては、日射量と雲量について、同緯度にある日本の旭川気象台のデータから作成した相関式を用いて推定するなど、やや大胆な推定方法を採用した。しかし計算結果は観測結果と意外によく一致しており、本研究で提案したアプローチは意味のあるものであると考えられた。実際に詳細なデータの入手が容易でない国においては、特にPilot Studyなどで実用的であると言えるだろう。

#### 参考文献

- 1) 趙聯芳, 吉田圭介, 石川忠晴, 二木敬右: 鎮江市内江の流動計算のための長江水理条件の導出, 水工学論文集, 第52巻, pp.1051-1057, 2008.
- 2) 篠原慶規, 小松光, 大槻恭一: 最高, 最低気温から全天日射量を推定する方法, 水文・水資源学会誌, 第20巻5号, pp.462-469, 2007.
- 3) 宮岡健吾, 日照時間のデータを用いた日射量の推定, 筑波大学水理実験センター報告, 24号, pp.117-120, 1999.
- 4) 早坂忠裕: 大気は太陽放射をどれだけ吸収するのか?, 天気, 42(11), pp.789-797, 1995.
- 5) J.F. Mejia, J.Murillo, J.M. Galvez and M.W. Douglas: Accuracy of the NCAR global tropospheric analysis (FNL) over central South America based upon upper air observations collected during the SALLJEX. Proceedings of 8 ICSHMO, pp.1759-1764, 2006.

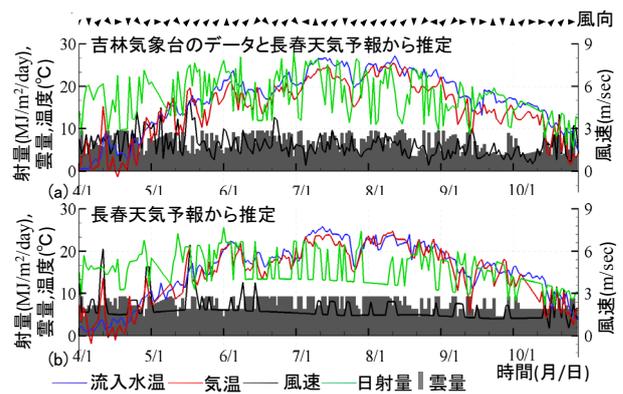


図-13 入力した気象条件. 風向右向き: 主流方向. (a) 吉林気象台のデータと長春天気予報から推定した気象データ, (b) 天気予報のみから推定した場合.

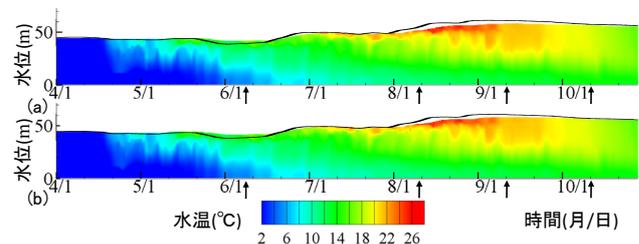


図-14 水温鉛直分布の時系列変化(ダムから42km上流). (a) 吉林気象台のデータを用いた場合, (b) 天気予報のみから推定した場合. 実線: ダム観測水位. 上矢印: 現地観測期間.

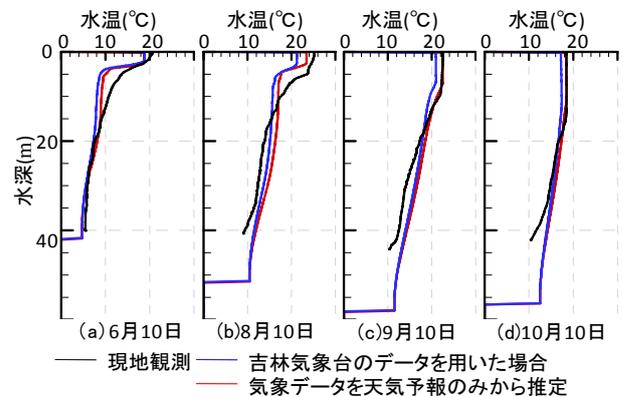


図-15 水温鉛直分布の比較(ダムから42km上流).

- 6) 内田弘四: 豊満ダム, 大豊建設株式会社, 1979.
- 7) 小島崇, 中村恭志, 石川忠晴: 水温成層を考慮した貯水池内流動解析に向けたCIP-Soroban法に基づく鉛直2次元数値流動モデルの開発, 水工学論文集, 第52巻, pp.1039-1044, 2008.
- 8) 于力, 南条吉之, 石飛裕, 耿春梅, 王霞, 孙福生, 朴春植, 刘迟, 李迎赞: 松花湖水体富美化状況的観測と評価, 北方環境, 第29巻第4期, pp.73-76, 2004.
- 9) 気象科学事典, 日本気象学会, 東京書籍, 1993.
- 10) 水理公式集, 2.流域と流出過程, 土木学会, 昭和60年版, p.142.

(2009. 9. 30受付)