

第13回ヤマセ研究会プログラム

領域気候モデル用の 湖沼水温モデル

田村 美紗, 大泉 三津夫
(気象大学校)

発表内容

- 研究の背景・目的
- 強制復元法モデル
 - ・モデルの概念
 - ・結果
- 多層熱伝導モデル
 - ・モデルの概念
 - ・結果
 - ・猪苗代湖の熱収支・渦拡散の季節特性の再現実験
 - ・パラメータの感度実験
- 結論と今後の課題

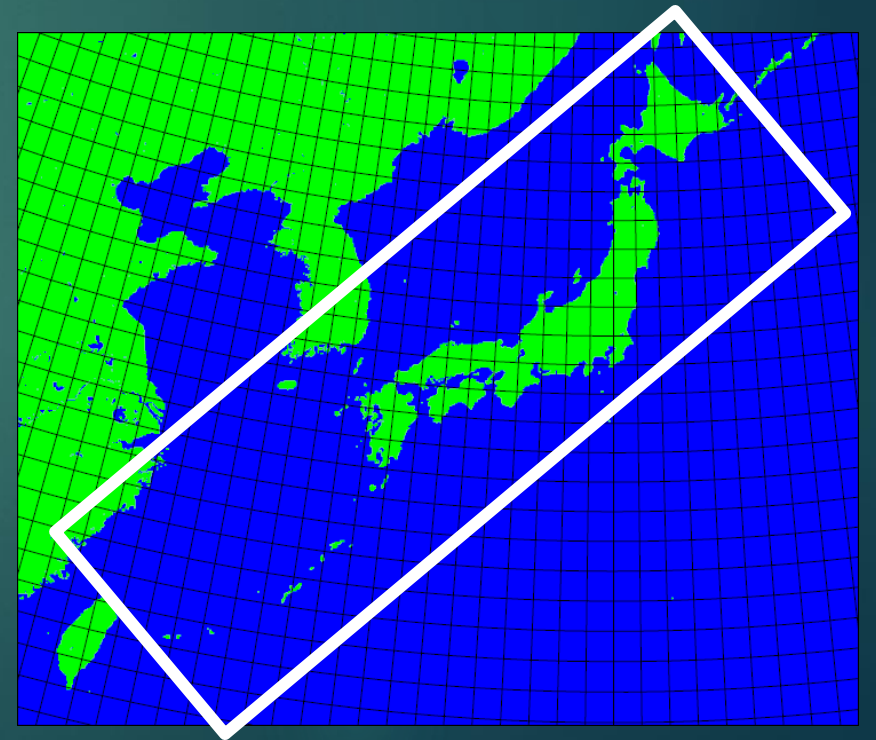
研究の背景・目的

領域気候モデル NHRCM

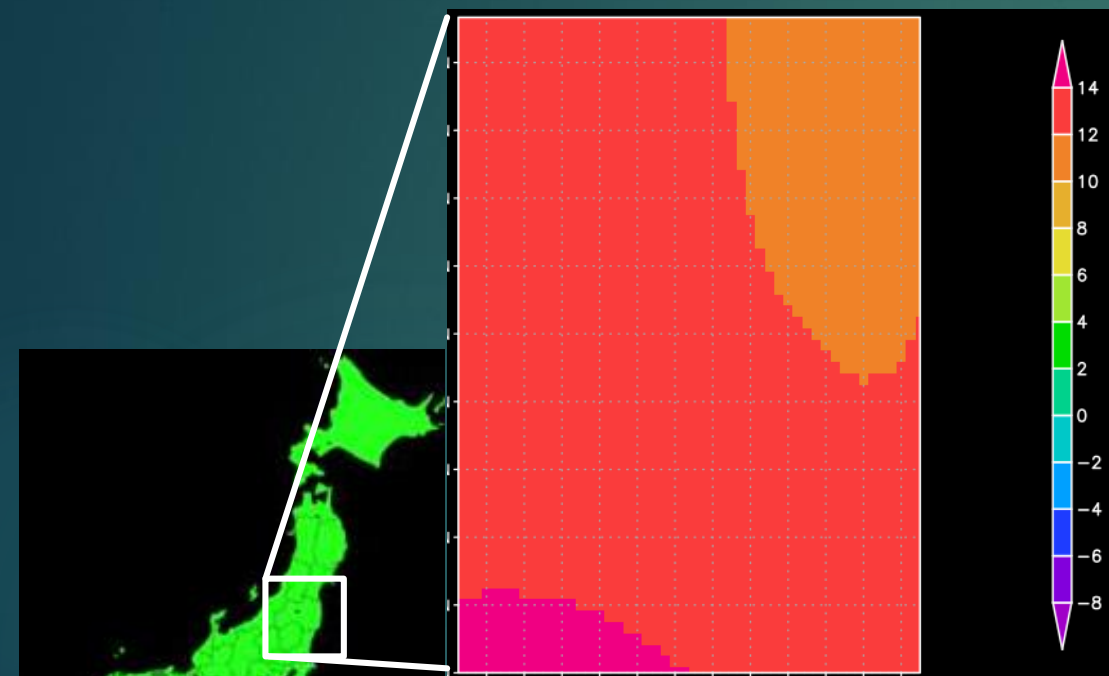
非静力学領域気候モデル (Sasaki et al., 2008)

(**N**on**H**ydrostatic **R**egional **C**limate **M**odel)

日本付近の気候変動の将来予測計算

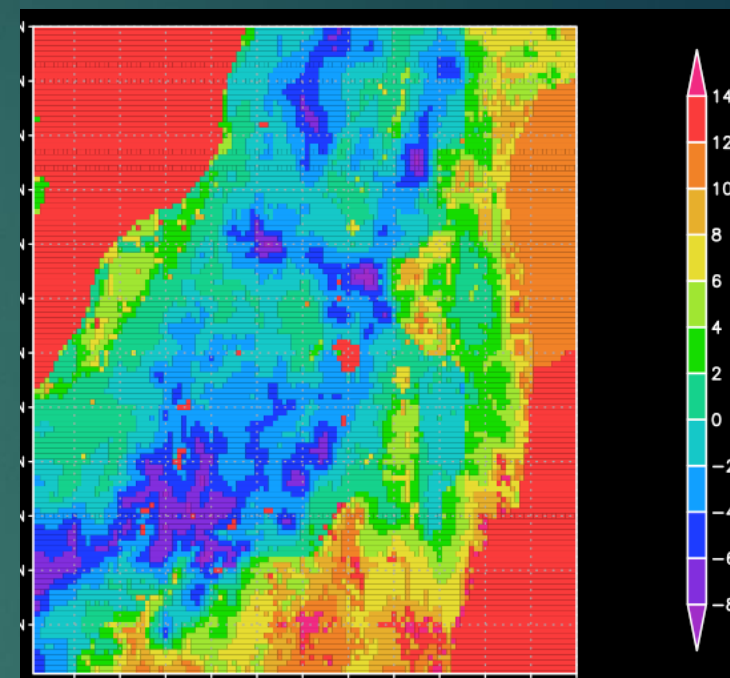


2016年以前のNHRCMの地表面温度初期値、境界値の作成例



陸域にも
仮想的なSSTを作成

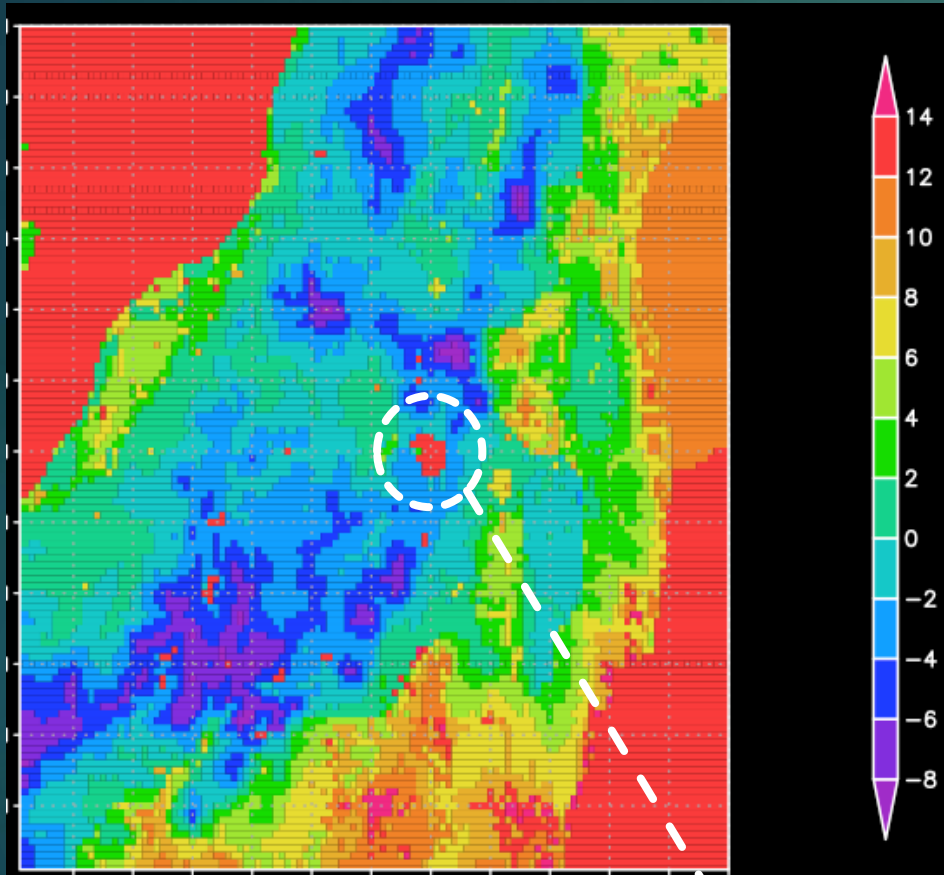
陸を重ねる



陸の表面温度の初期値・境界値
：アウターモデルから作成

湖沼の表面温度の初期値・境界値
：SSTから作成

2016年以前のNHRCMの地表面温度初期値・境界値

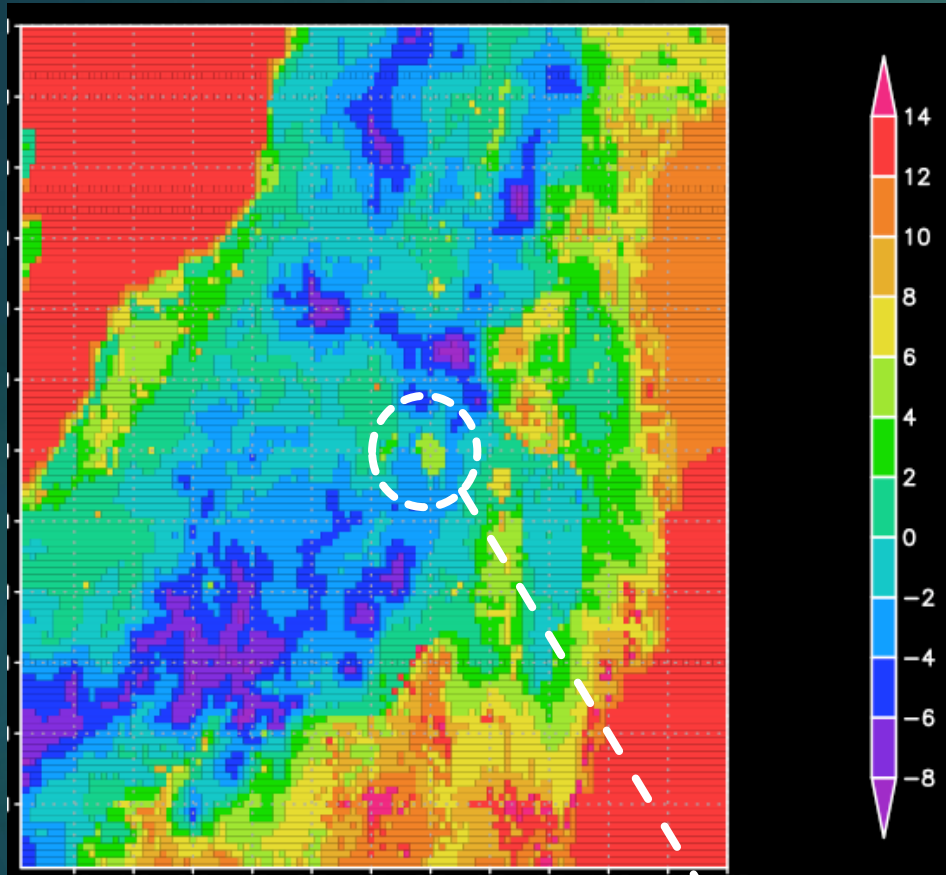


2009年1月15日

猪苗代湖

- NHRCM では、湖水面温度には SST が与えられていた。

2016年以降のNHRCMの地表面温度初期値・境界値



2009年1月15日
湖水面温度を修正後

猪苗代湖

2016年以降は、応急措置として
緯度・標高・月から湖水面温度を修正

湖沼熱モデルが予報モデルに組み込まれていないため、湖水温は

- 積分期間中は一定値
- 次回の SST 更新まで直線内挿



湖水温の日変化を与えられない

問題点の整理

湖沼モデルが予報モデルに組み込まれていない

湖水面温度の日変化を与えられない

湖水面温度に誤差

その湖水面温度から計算される顕熱・潜熱フラックスに誤差

大気モデルの予測値に悪影響を及ぼす

研究目的

湖沼の熱予報モデルを構築し、
陸面モデルに組み込む



大気モデルの下部境界条件である
湖水面温度の再現性を向上。

大気モデルの予測値に悪影響を与えないようにする。

(あくまで湖水面温度の予測が主目的。

湖内部の水温の予測については
湖水面ほどの精度は求めない。)

湖を2層構造と仮定した簡便なモデル。
計算機資源が少なくて済む

強制復元法モデル

- モデルの概念
- 結果

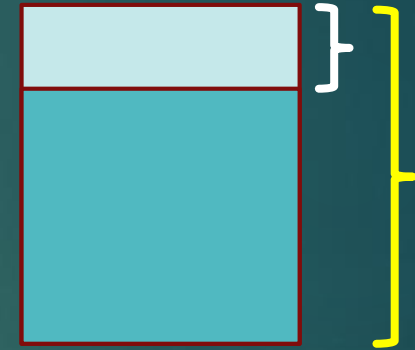
琵琶湖の水面近傍の水温を
精度よく再現
(田中・他(1994),(1998))

2つの強制復元法モデル

強制復元法モデル

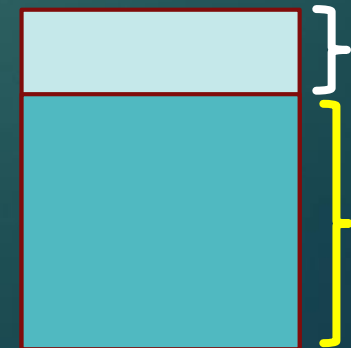
SiBUC水体モデル

SiBUC (田中ら(1994),(1998)) 中の水体モデル。
湖を薄い「上層」と
上層を含んだ「**全層**」に分ける



SiB水体モデル

気象庁GSMのSiBを水体モデル用に改良したモデル。
湖を薄い「上層」と
上層を除く「**下層**」に分ける



実験条件

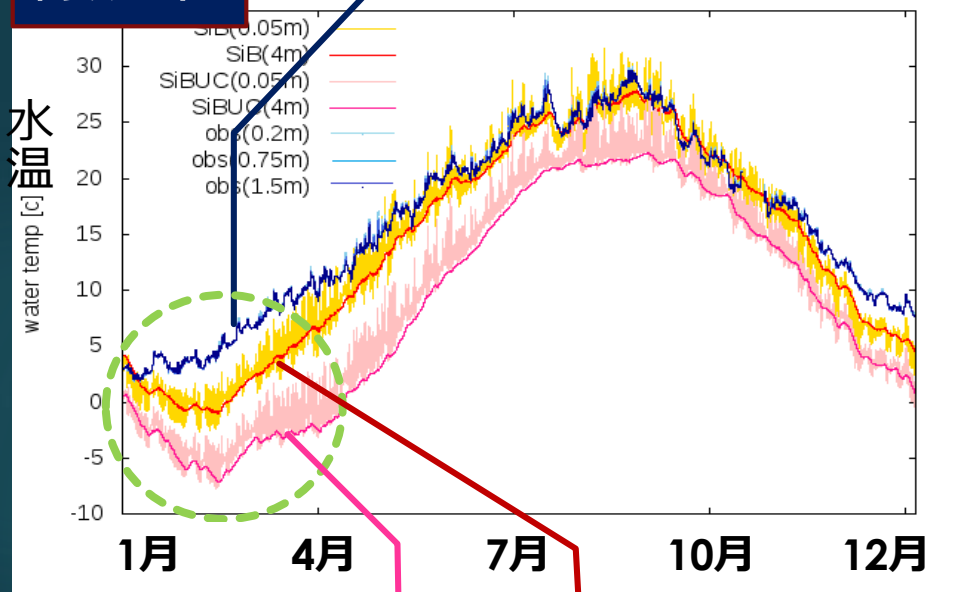
- 対象湖：霞ヶ浦(平均水深4m)・猪苗代湖(平均水深50m)
- 大気強制力：気圧、水蒸気圧、気温、風速、
下向き短波・長波放射の毎時のデータ
- 再現期間：2000～09年（霞ヶ浦）、2005～09年（猪苗代湖）
（図示期間：2006年（霞ヶ浦）、2009年（猪苗代湖））
- モデルの積分時間間隔：1800 秒
- 層の厚さ：上層 0.1 m
- 水温初期値：全層一律 4 °C (∵計算初期日が1月1日)
- 初期値の影響が残らないように、助走ラン期間(7年間)を設ける

結果 (強制復元法モデル)

実測値(0.2m, 0.75m, 1.5m)
※ 水深に依らずほぼ同じ水温

霞ヶ浦

Kasumigaura_2006



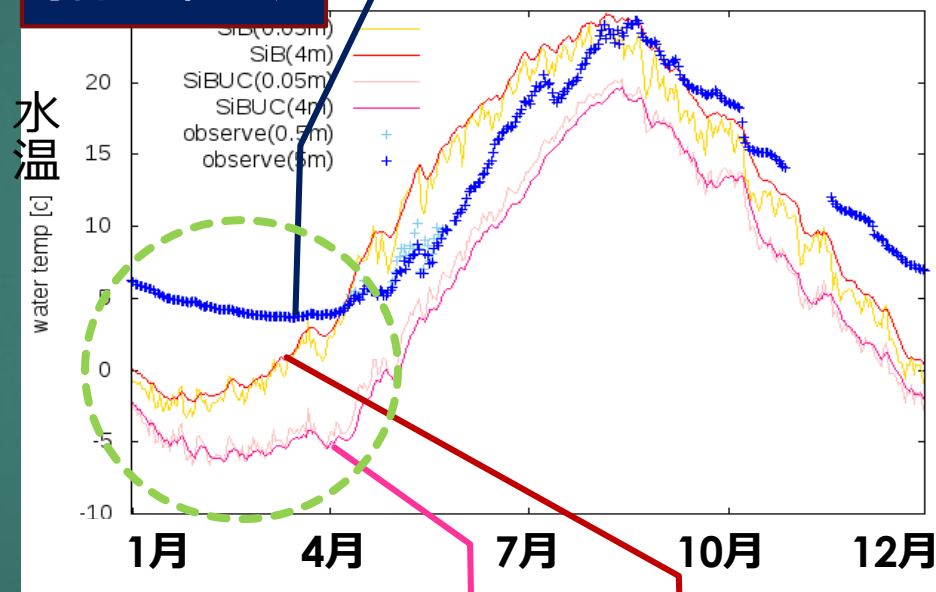
SiBUC水体モデル
(0.05m, 4m)

SiB水体モデル
(0.05m, 4m)

実測値(0.5m, 5m)

猪苗代湖

Inawashiro_2009



SiBUC水体モデル
(0.05m, 4m)

SiB水体モデル
(0.05m, 4m)

横軸：期間 (1年間)
縦軸：水温[°C]

※ ↑ 実測データに合わせ、日平均している

SiBUC水体モデル・SiB水体モデルどちらも精度悪い

強制復元法モデルの精度が悪い理由

- ▶ 2層構造と簡略化するからには、湖1つ1つに対するチューニングが必須。
- ▶ しかし、今回は、霞ヶ浦と猪苗代湖とで共通のチューニングパラメータを用いた。

本研究の目的

湖沼熱モデルを領域気候モデルに組み込んで
全国の湖に一括して適用したい

全国の湖に対して共通のチューニングパラメータを使える
モデルを構築する必要あり

湖を多層構造で表現するモデル

多層熱伝導モデル

- モデルの概念
- 結果
- 猪苗代湖の熱収支・渦拡散係数の推定
- パラメータの感度実証

池田湖の水温を精度よく再現
(Momii and Ito(2008))

多層熱伝導モデル

- モデルの概念
- 結果
- 猪苗代湖の熱収支・渦拡散の季節特性の再現実験
- パラメータの感度実験

多層熱伝導モデル

第k層の熱容量

$$\frac{A_{k-1} + A_k}{2} \rho_w c_w \Delta z_k \frac{T_k - T'_k}{\Delta t}$$

$$= \boxed{A_{k-1}(Q_{k-1,k} + I_{k-1})} - \boxed{A_k(Q_{k,k+1} + I_k)}$$

第k層に入るフラックス 第k層から出ていくフラックス

A : 水平断面積

$\rho_w c_w$: 単位体積あたりの熱容量

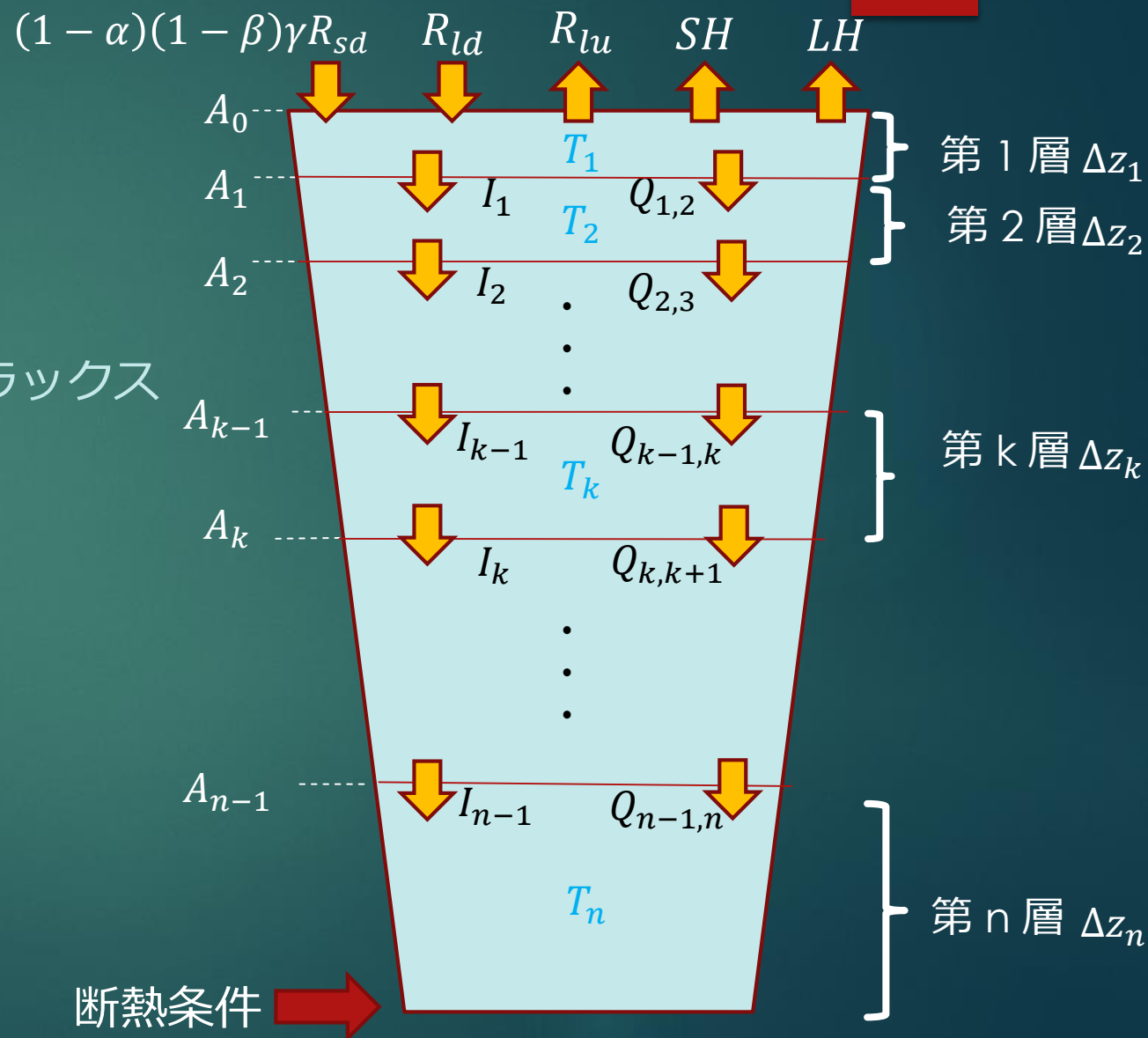
Δz : 層の厚さ

T' : 前時間の水温

Q : 熱フラックス (熱伝導は分子拡散 + 渦動拡散)

I : 日射による湖水中への放射フラックス

時間積分法 : クランク・ニコルソン法



渦動拡散率 K の算出法

海洋や湖で用いられる一般的な式：

$$k = k_0 \times (1 + aRi^b)^{-c}$$

k_0 : 中立条件での渦動拡散率

(摩擦速度(風速)・水深・緯度から求まる)

↑ 摩擦速度 = $A \times$ 風速 (A : 係数)

Ri : リチャードソン数 = 密度の深度分布 / 摩擦速度(風速)

a, b, c : 係数

実験条件

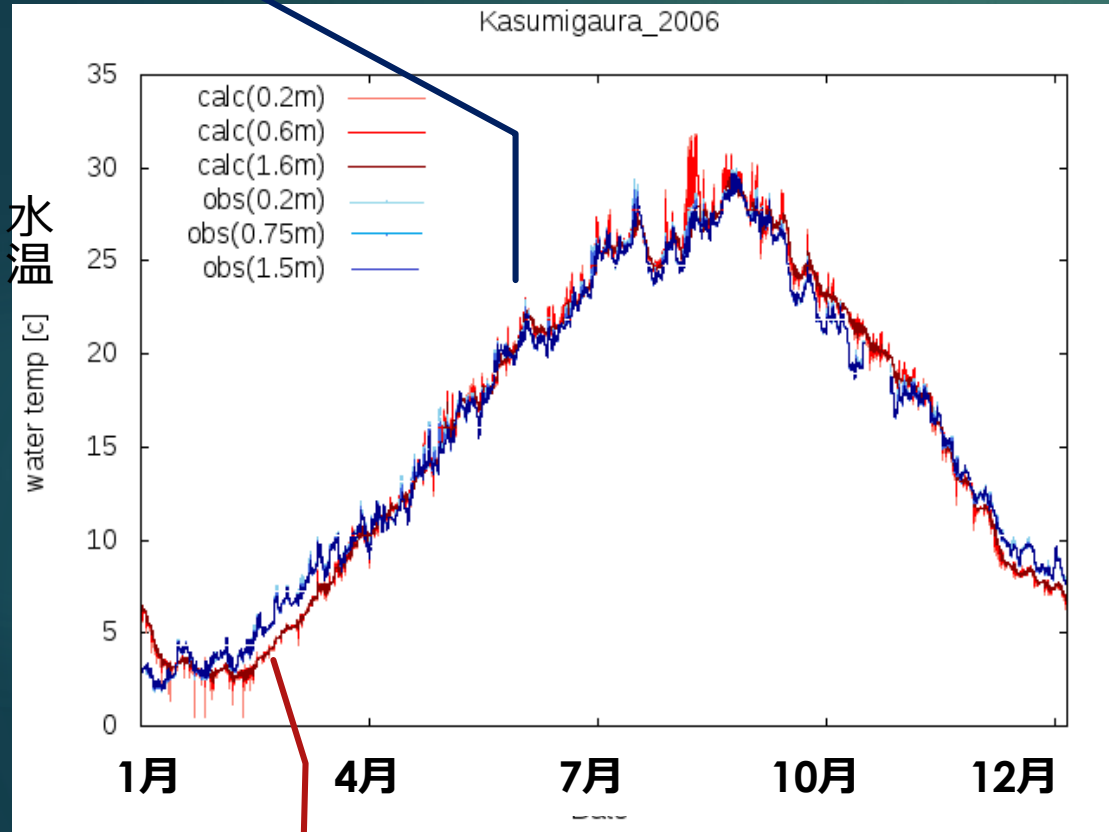
- 対象湖：霞ヶ浦(平均水深4m)・猪苗代湖(平均水深50m)
- 大気強制力：気圧、水蒸気圧、気温、風速、
下向き短波・長波放射の毎時のデータ
- 再現期間：2000～09年（霞ヶ浦）、2005～09年（猪苗代湖）
（図示期間：2006年（霞ヶ浦）、2009年（猪苗代湖））
- モデルの積分時間間隔：1800 秒
- 層の厚さ：上層 0.05 m, 公比1.5
9層（霞ヶ浦）、15層（猪苗代湖）
- 水温初期値：全層一律 4 °C (∵計算初期日が1月1日)
- 初期値の影響が残らないように、助走ラン期間(7年間)を設ける

多層熱伝導モデル

- モデルの概念
- **結果**
- 猪苗代湖の熱収支・渦拡散の季節特性の再現実験
- パラメータの感度実験

結果（霞ヶ浦）

実測値(0.2m, 0.75m, 1.5m)
※ 水深に依らずほぼ同じ水温



多層熱伝導モデル(0.2m, 0.6m, 1.6m)
※ 水深に依らずほぼ同じ水温

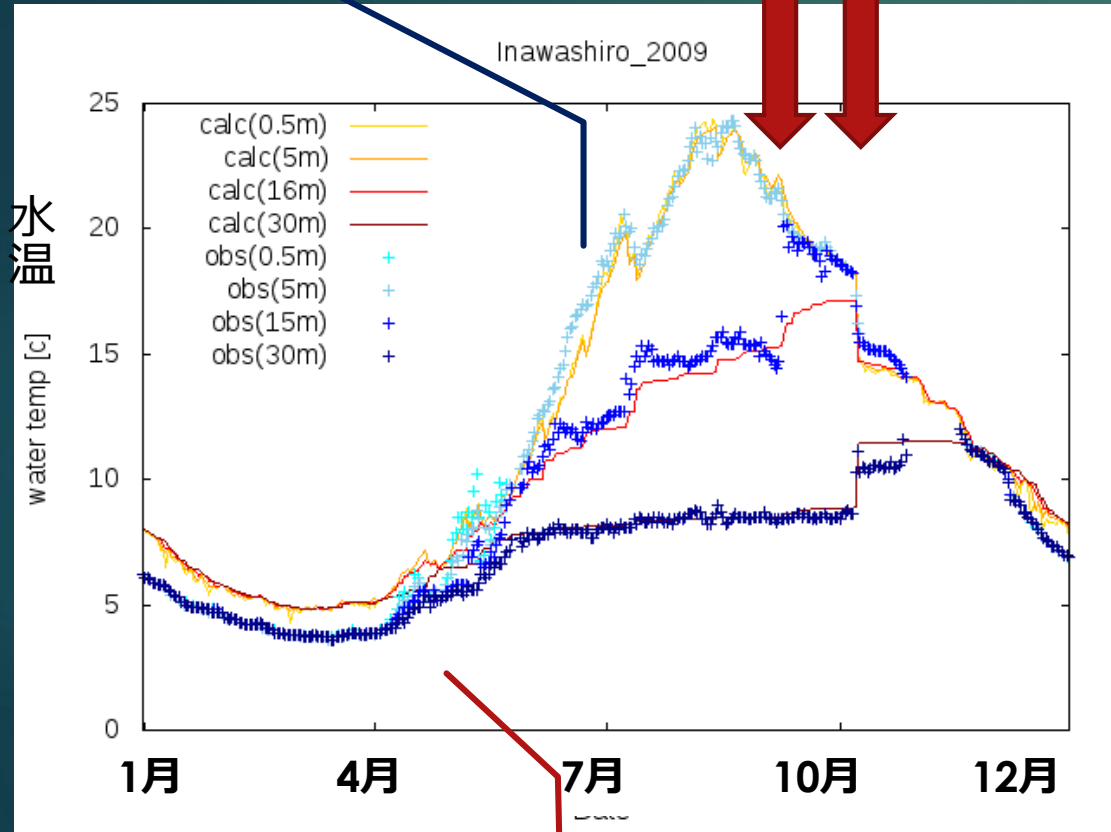
▶ 冬季に 1~2 °C のバイアスが存在するものの、水温の季節変化を精度よく再現できている。

横軸：期間（2006年）
縦軸：水温[°C]

結果 (猪苗代湖)

実測値
(0.5m, 5m, 15m, 30m)

台風12号 台風18号



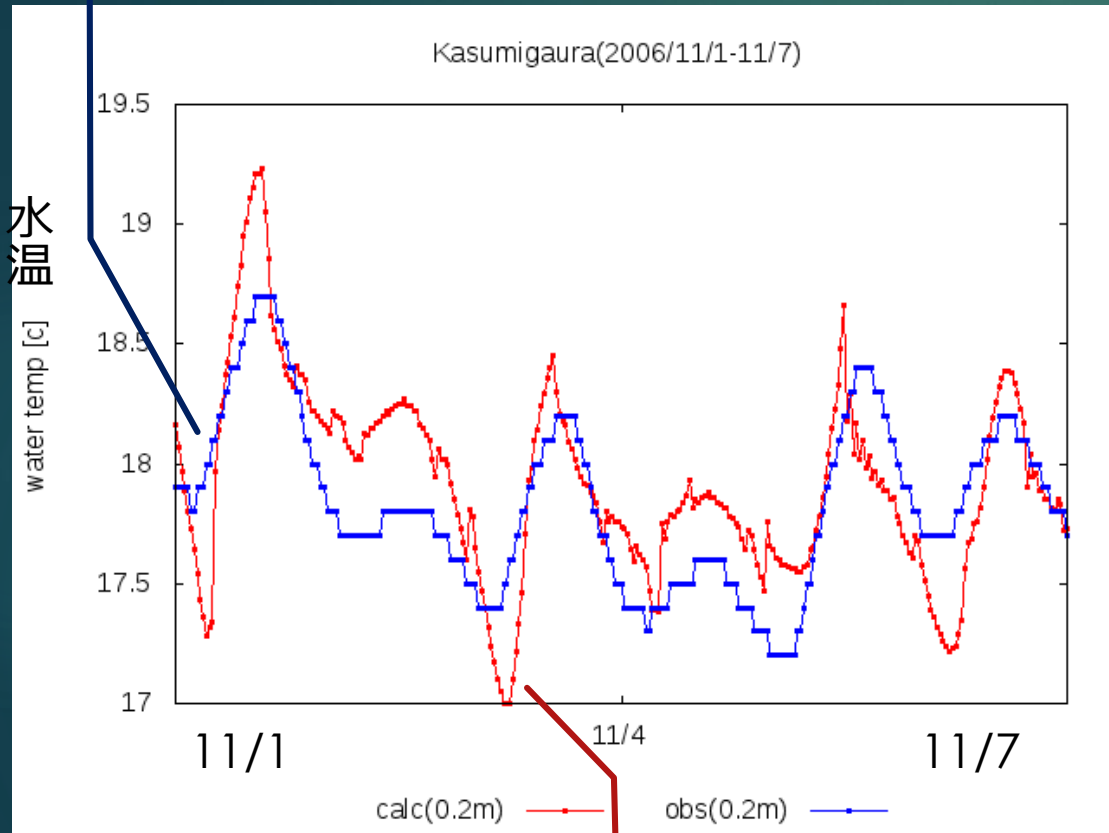
- ▶ 冬季において 1~2 °C の高温バイアスがかかっているものの、水温の季節変化を精度よく再現できている。
- ▶ 台風による湖の攪拌で生じる水温変動もおおよそ再現できている。

多層熱伝導モデル
(0.5m, 5m, 16m, 30m)

横軸：期間 (2009年)
縦軸：水温[°C]

水温日変化の再現性 (水面近傍)

実測値 (0.2m)



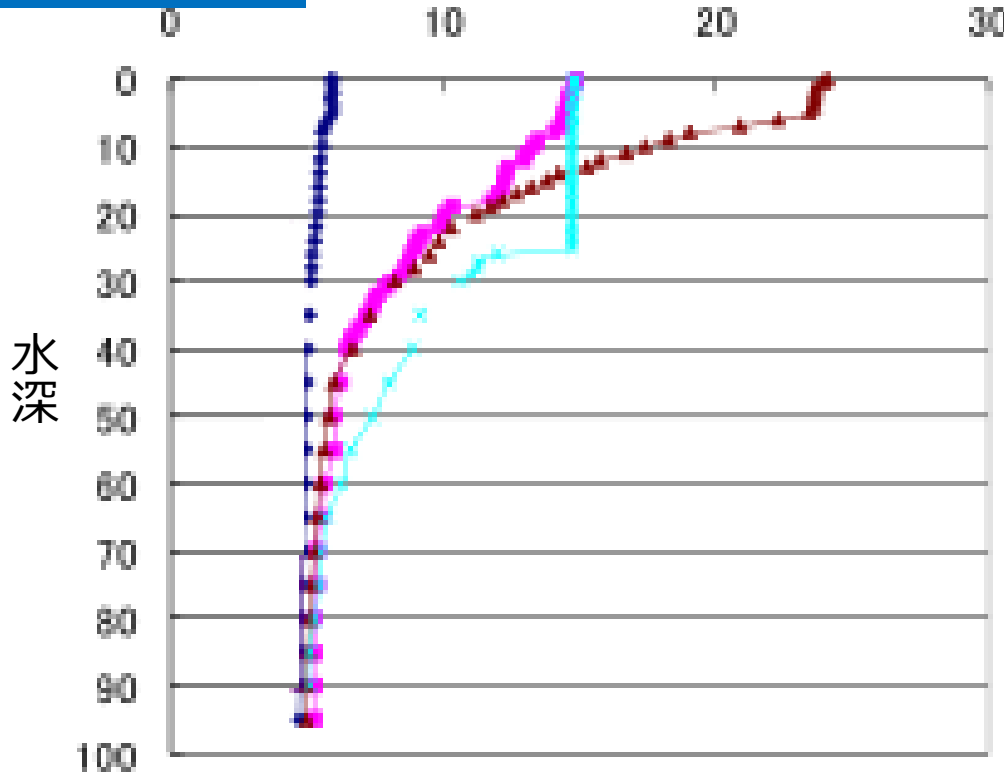
多層熱伝導モデル(0.2m)

- ▶ 水温計算値は実測値よりも振幅がやや大きい (0.5°C程度)
- ▶ 水温日変化を比較的良く再現

横軸：期間 (2006/11/1~11/7)
縦軸：水温[°C]

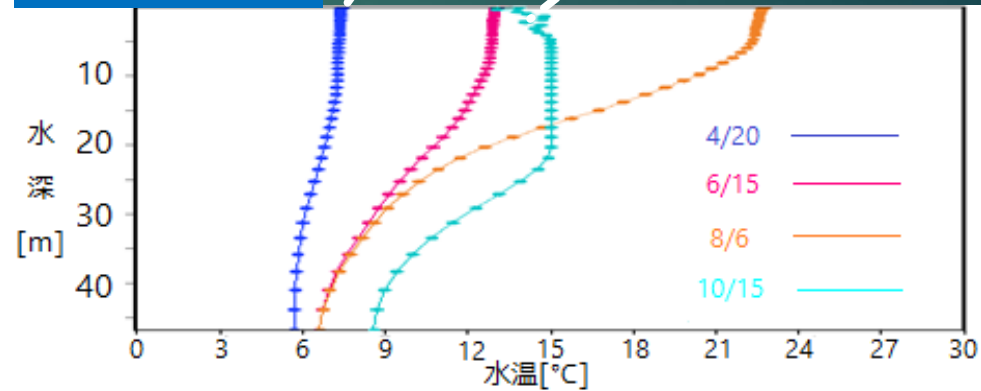
水温深度分布の再現性

水温実測値



湖心（最大水深100m）の結果

水温計算値



平均水深50mの結果

横軸：水温[°C]
縦軸：水深[m]

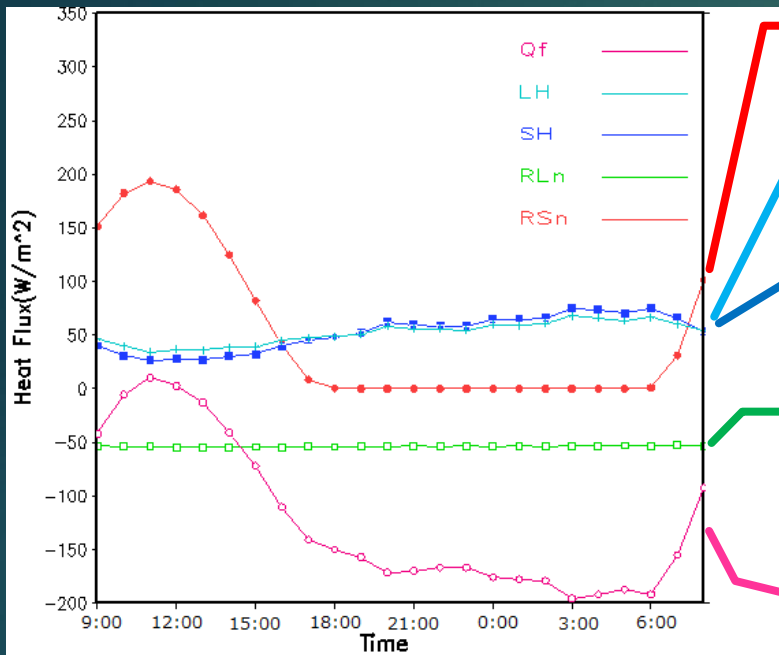
混合層や躍層を再現できている。

平成 21 年度猪苗代湖水質モニタリング
調査事業報告書 (2010)

多層熱伝導モデル

- モデルの概念
- 結果
- 猪苗代湖の熱収支・渦拡散の季節特性の再現実験
- パラメータの感度実験

湖水面の熱収支の季節特性 (冬季)



正味短波放射

潜熱

顕熱

正味長波放射
(下向き正)

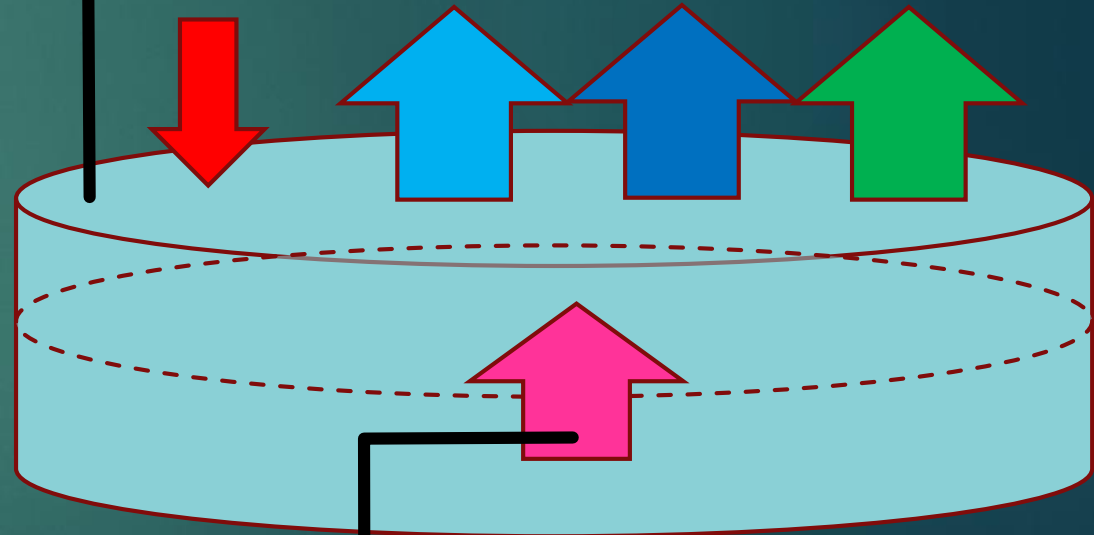
1層目から2層目への
熱輸送

冬季(1,2,3月平均)

横軸：時間 (24時間)

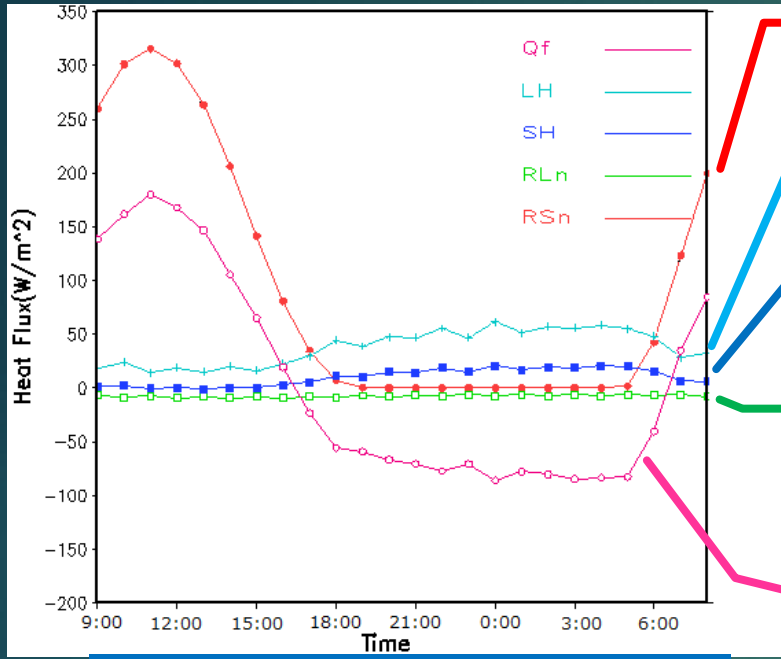
縦軸：フラックス[W/m²]

湖面での熱収支は
マイナス



2層目→1層目へ熱輸送

湖水面の熱収支の季節特性 (夏季)



正味短波放射

潜熱

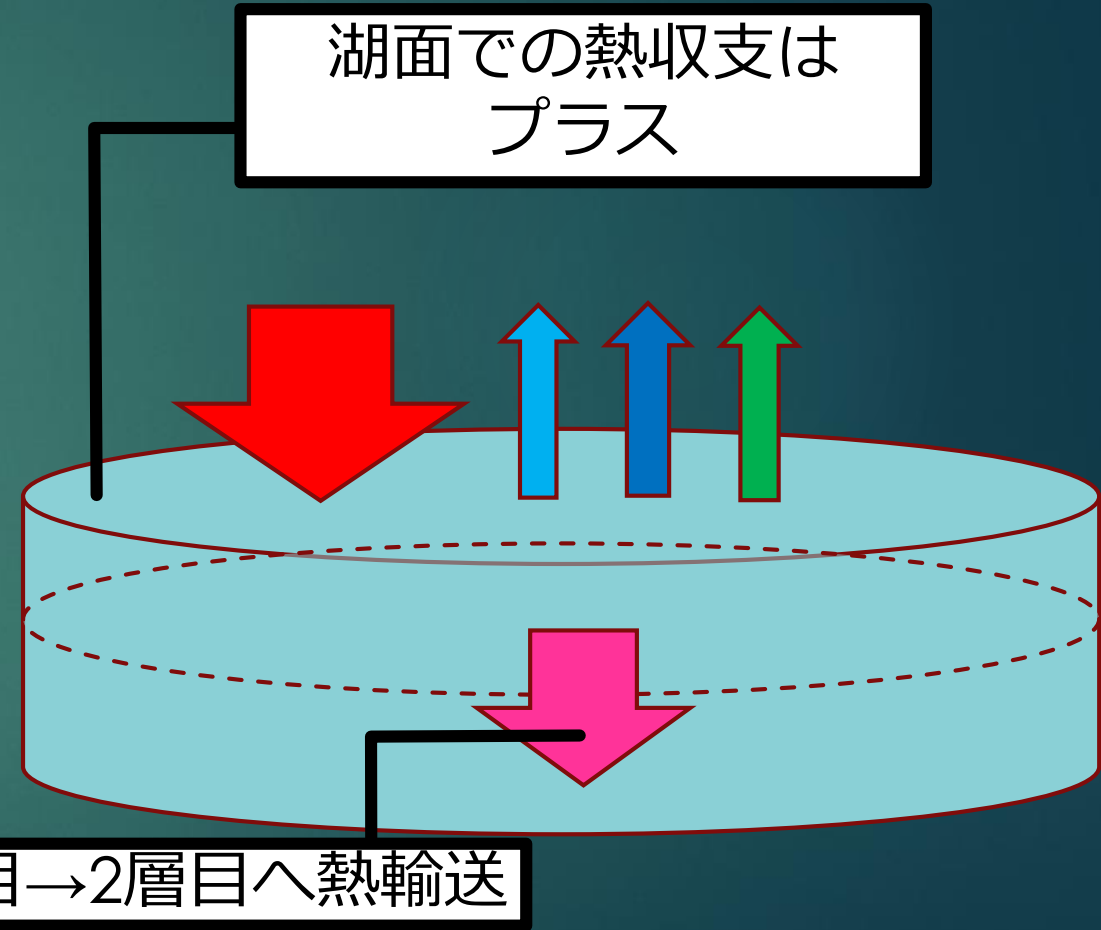
顕熱

正味長波放射
(下向き正)

1層目から2層目への
熱輸送

夏季(7,8,9月平均)

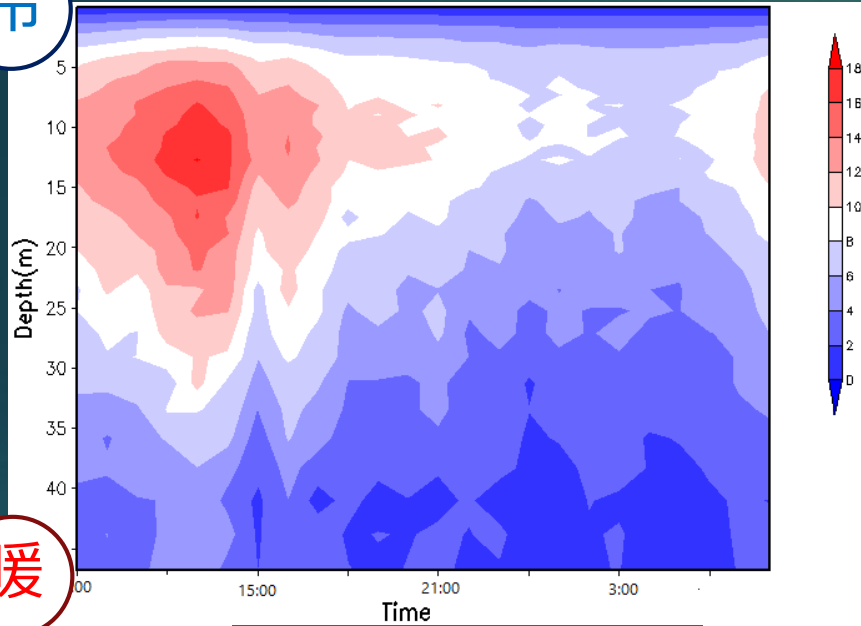
横軸：時間 (24時間)
縦軸：フラックス[W/m²]



冬季・夏季ともに、深い湖での一般的な振る舞いを確認できた。

湖内の渦拡散の季節特性 (猪苗代湖)

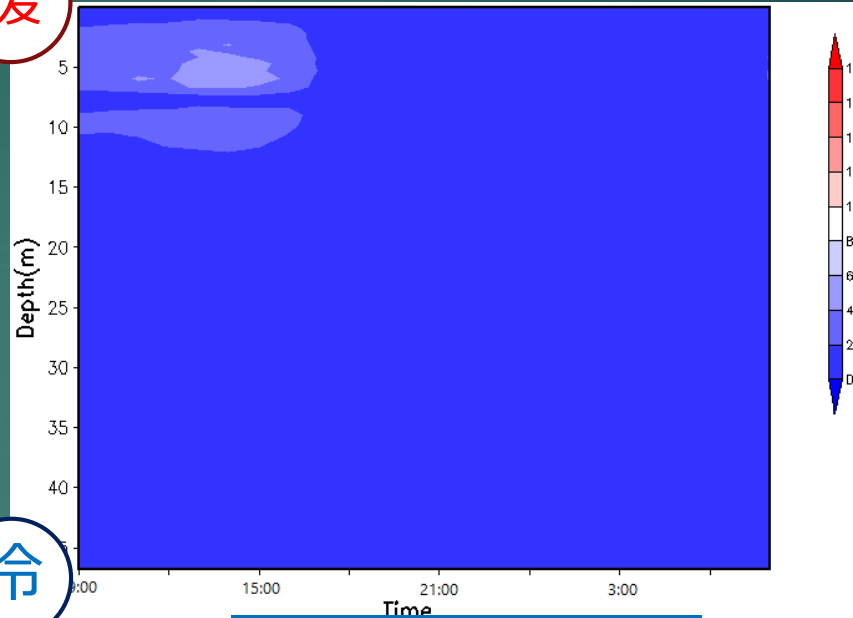
冷



冬季(1,2,3月平均)

湖内：不安定
熱移動活発

暖



夏季(7,8,9月平均)

湖内：安定
熱移動抑制

横軸：時間 (24時間)
縦軸：深さ
カラー：渦動拡散係数
(暖色ほど熱移動活発)

冬季・夏季ともに、深い湖での一般的な振る舞いを確認できた。

多層熱伝導モデル

- モデルの概念
- 結果
- 猪苗代湖の熱収支・渦拡散の季節特性の再現実験
- パラメータの感度実験

再掲

渦動拡散率 K の算出法

Momii and Ito (2008)より

$$k = k_0 \times (1 + aRi^b)^{-c}$$

k_0 : 中立条件での渦動拡散率

(水深・緯度・摩擦速度から求まる)

Ri : リチャードソン数 = 密度の深度分布 / 摩擦速度

a, b, c : 係数

不安定時の熱移動は
渦動拡散に依る

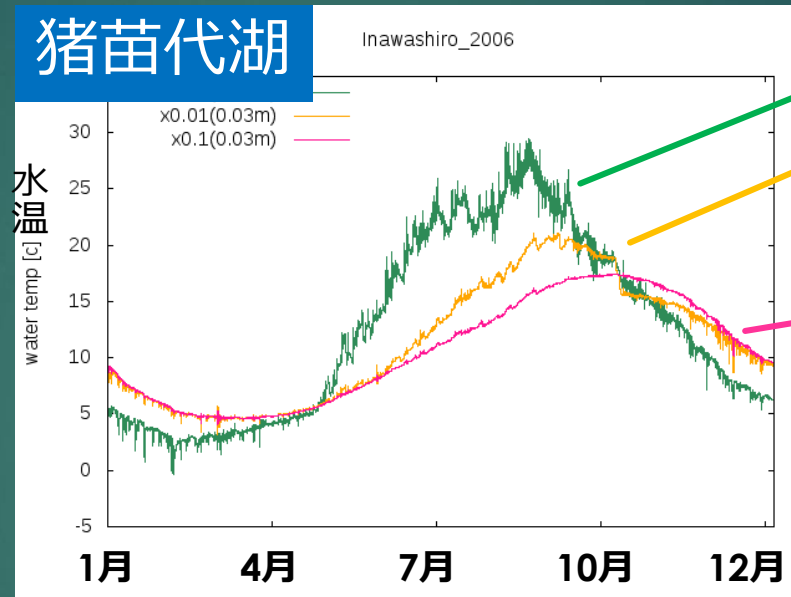
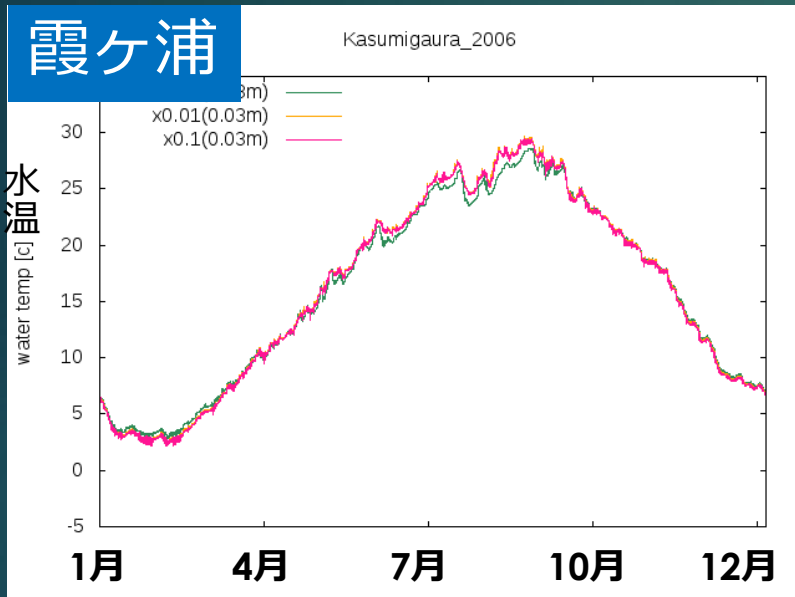
渦動拡散は摩擦速度に依る



不安定時の熱移動は
摩擦速度に依る

感度実験の例 (摩擦速度)

$$\text{摩擦速度} = A \times \text{風速}$$



$A = 0.001$

$A = 0.01$

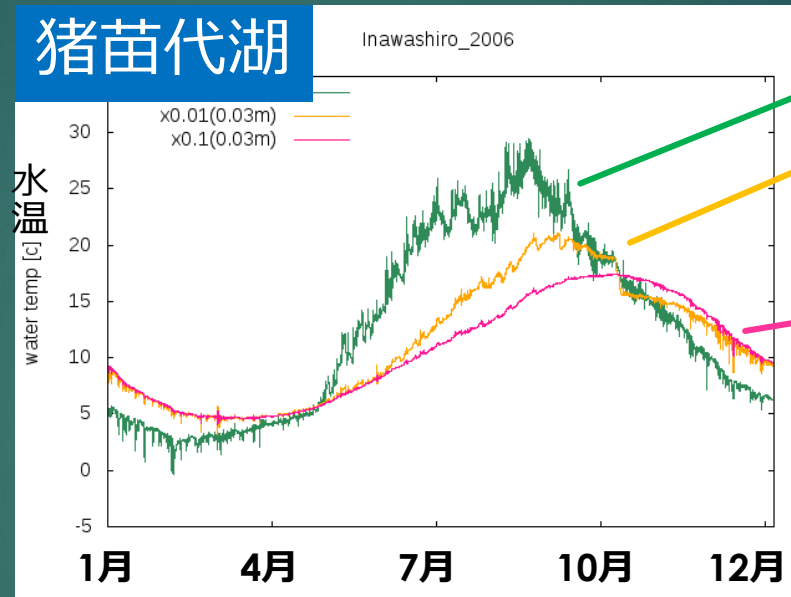
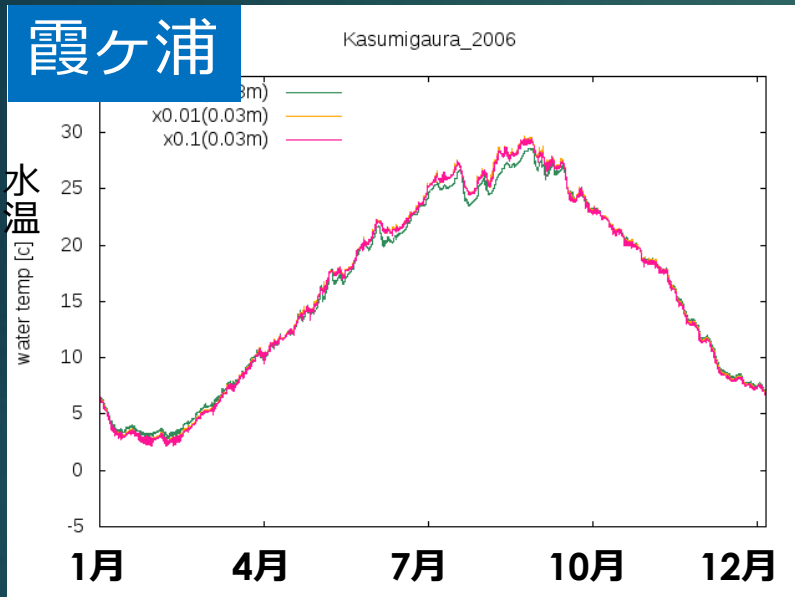
$A = 0.1$

横軸：期間 (2006年)
縦軸：水温[°C]

- 両湖ともに、摩擦速度が大きいほど、水温計算値の変動が小さい。
(摩擦速度 大 \rightarrow 渦動拡散係数 大 \rightarrow 対流が活発 \rightarrow 水温変動 小)
- 結合モデルに組み込む際のパラメータ調整の指標が与えられた。

感度実験の例 (摩擦速度)

$$\text{摩擦速度} = A \times \text{風速}$$



A = 0.001

A = 0.01

A = 0.1

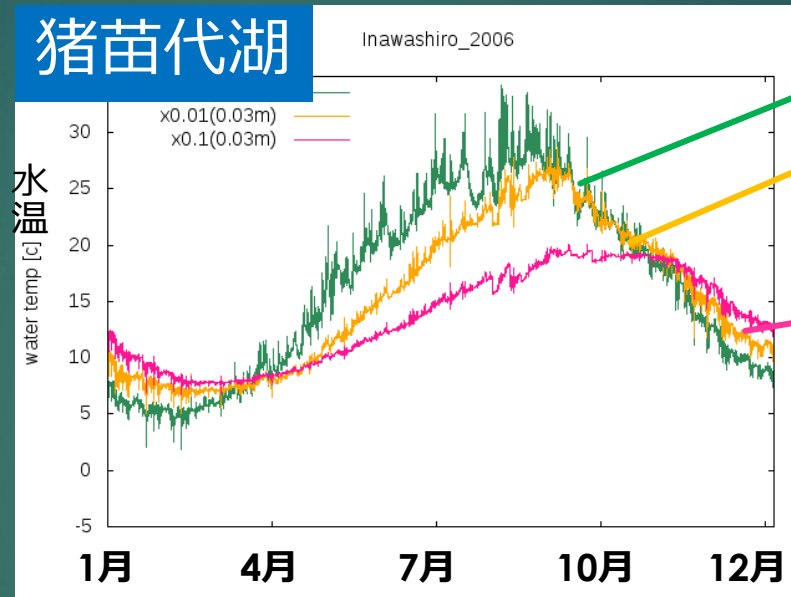
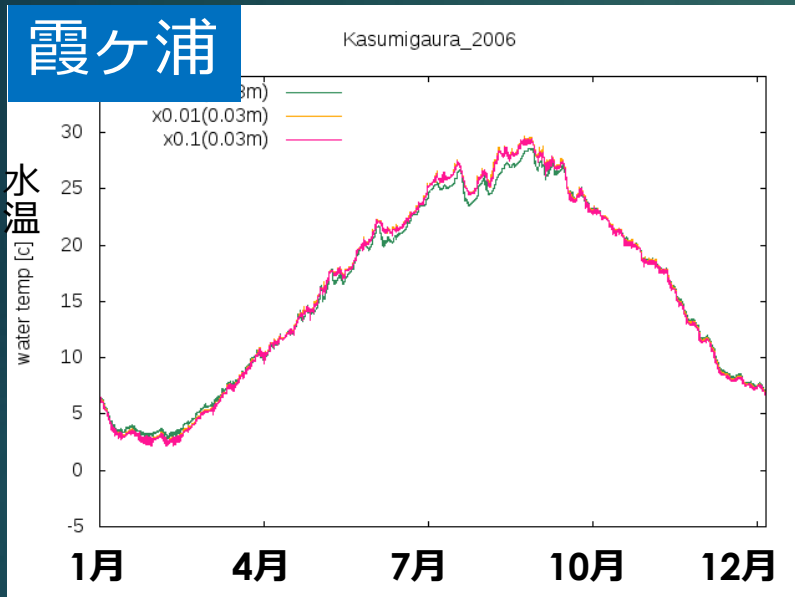
横軸：期間 (2006年)
縦軸：水温[°C]

摩擦速度が水温計算結果に及ぼす効果：猪苗代湖 > 霞ヶ浦

- 湖の場所の違いによる影響 (大気強制力の違いによる影響)
- 湖の浅深の違いによる影響 (湖内熱輸送機構の違いによる影響)

感度実験の例 (摩擦速度)

$$\text{摩擦速度} = A \times \text{風速}$$



A = 0.001

A = 0.01

A = 0.1

横軸：期間 (2006年)
縦軸：水温[°C]

※ 仮想的に両湖に同一の大気強制力を与えた

摩擦速度が水温計算結果に及ぼす効果：猪苗代湖 > 霞ヶ浦

- 湖の場所の違いによる影響 (大気強制力の違いによる影響)
- 湖の浅深の違いによる影響 (湖内熱輸送機構の違いによる影響)

結論



結論

- ▶ 多層熱伝導モデルは水温の再現性がよかった。
- ▶ 湖の平均水深を与えさえすれば、湖に依らず湖水面温度の日変化や季節変化を精度よく表現できる。
 - ➔ 天気予報や季節予報に貢献

結論

- ▶ 水深の深い猪苗代湖で、熱収支・渦拡散の季節特性を調べたところ、一般的に確認されている振る舞いが再現できた。
- ▶ 感度実験で、霞ヶ浦と猪苗代湖とでパラメータの感度が異なっていたが、これは湖の浅深の違いによる湖内熱輸送機構の差による影響である。

今後の課題

今後の課題

- ▶ 多量の降雪水による表面水温の変化
- ▶ 湖沼の結氷過程の導入
- ▶ 結合モデルへの組み込み

謝辞

福島県環境創造センター 調査・分析部環境調査課の
吉田安伸主任には猪苗代湖の水温観測データを提供して
いただきました。

ここに心より感謝を申し上げます。

参考文献

- ▶ Bhumralkar, C. M., 1975: Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model, *J. Appl. Meteorol.*, 14, pp.1246-1258
- ▶ Dake, J. M. K. and Harleman, D. R. F., 1969: Thermal stratification in lakes: analytical and laboratory studies. *Water Resour. Res.*, 5(2), pp.484-495
- ▶ Deardorff, J. W., 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, 83, pp.1889-1903
- ▶ Henderson-Sellers, B., 1985: New formulation of eddy diffusion thermocline models, *Appl. Math. Modell.*, 9, pp.441-446
- ▶ Hondzo, M. and Stefan, H. G., 1991: Three case studies of lake temperature and stratification response to warmer climate *Water Resour. Res.*, 27(8), pp.1837-1846
- ▶ Hostetler, S. W. and P. J. Bartlein., 1990: Simulation of Lake Evaporation with Application to Modeling Lake Level Variations of Harney-Malheur Lake, Oregon, *Water Resour. Res.*, 26(10), pp.2603-2612

参考文献

- ▶ Kondo, J. and J, Xu., 1997: Seasonal Variations in the Heat and Water Balances for Nonvegetated Surfaces, *J. Appl. Meteorol.*, 36, pp.1676-1695
- ▶ Lee, T. M. and Swancar, A. 1997: Influence of evaporation, ground water, and uncertainty in the hydrologic budget of Lake Lucerne, a seepage lake in Polk Country, Florida, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper., 2439, pp.22-23
- ▶ McCormick, M. J. and Scavia, D., 1981: Calculation of vertical profiles of lake-averaged temperature and diffusivity in Lakes Ontario and Washington. *Water Resour. Res.*, 17(2), pp.305-310
- ▶ Momii, K. and Ito, Y. 2008: Heat budget estimates for Lake Ikeda, Japan, *J. Hydrol.*, 361, pp.362-370
- ▶ Munk, W. H. and Anderson, E. R. 1948: Notes on the Theory of the Thermocline, *J. Mar. Res.*, 7, pp.276-295
- ▶ Sasaki, H. Kurihara, K. Takayabu, I. and Uchiyama, T. 2008: Preliminary Experiments of Reproducing the Present Climate Using the Non-hydrostatic Regional Climate Model. *SOLA.*, 4, pp.25-28

参考文献

- ▶ 有田正光, 1998: 水圏の環境, 東京電気大学出版社, pp.20-22, pp.108-275
- ▶ 伊藤祐二, 靱井和朗, 2010: 気象変化が深い湖の湖面蒸発量, 水温, 熱収支に及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, No.269, pp.93-103
- ▶ 近藤純正, 1994: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, pp.57, pp.89-91, pp.163
- ▶ 佐藤信夫, 1989: 生物圏と大気圏の相互作用, 数値予報課報告別冊第 35 号, 気象庁予報部, pp.4-73
- ▶ 田中賢治, 池淵周一, 1994: 都市域・水体をも考慮した蒸発散モデルの構築とその琵琶湖流域への適用, 京都大学防災研究所年報, 第 37 号 B-2, pp.299-313
- ▶ 田中賢治, 中北英一, 池淵周一, 1998: 琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.79-84

参考文献

- ▶ 田中賢治, 石岡賢治, 中北英一, 池淵周一, 2001: 水田・湖面における熱収支の季節変化, 京都大学防災研究所年報, 第 44 号 B-2, pp.427-443
- ▶ 中村由行, 高津治, 1993: 閉鎖性水域における密度成層のモデル化, 海岸工学論文集, 40, pp.981-985
- ▶ 福島県環境センター, 2010: 平成 21 年度猪苗代湖水質モニタリング調査事業報告書.
- ▶ 靱井和朗, 2003: 池田湖の蒸発量の推定, 水文・水資源学会誌, 16(2), pp.142-151