

伊勢湾の水文環境への温暖化影響について

Climate Change Impact on the Hydrologic Environment of Ise Bay

鈴木靖・佐藤嘉展・本間基寛・道広有理⁽¹⁾・Sergey M.Varlamov⁽²⁾

Yasushi SUZUKI, Yoshinobu SATO, Motohiro HONMA, Yuri MICHIIHIRO⁽¹⁾ and Sergey M.Varlamov⁽²⁾

(1) 一般財団法人日本気象協会

(2) 独立行政法人海洋研究開発機構

(1) Japan Weather Association

(2) Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Synopsis

For the purpose of an integrated watershed environment management, a coupled river runoff and ocean circulation model is developed. Climate change impact on the hydrologic environment of Ise Bay is assessed by the model. Future climate change of rain fall amount and air temperature from 15 CMIP3 models are used as an atmospheric boundary conditions, and climate change of river discharge and water temperature from Hydro-BEAM prediction are also used as a river mouth boundary condition. Future SST in Ise Bay increases by about 3°C in August, while 2°C in February. Coastal areas are more strongly influenced.

キーワード: 伊勢湾, 海面水温, 将来予測, CMIP3

Keywords: Ise Bay, SST, climate change impact, CMIP3

1. はじめに

伊勢湾の水温・流況・塩分・濁度・栄養塩等の水文環境は、地球温暖化により様々な影響を受けることが考えられる。東京湾や大阪湾と伊勢湾を比較すると、伊勢湾の容積は河川流入量の約2年分であり、東京湾(約7年)、大阪湾(約5年)よりも河川水の影響が大きい。伊勢湾に流入するおもな河川の年平均流量は、木曾川 298 m³/s、長良川 223 m³/s、揖斐川 119 m³/s、宮川 74 m³/s などである (Fig. 1)。洪水時には木曾川の流量は1万 m³/s 以上にもなり、木曾三川(木曾川・長良川・揖斐川)から伊勢湾へと流入する河川水の影響は無視できない。河川水は淡水であること、融雪期は河川水温が低いこと、夏季の河川水は流量も少なく高温になりやすいことなどの影響により、流入する河川水と海水との密度差が大き

くなり、伊勢湾内の成層状態の発達に大きな影響を与える。また洪水時には大量の土砂が河川から供給され、湾内の濁りや底質環境などにも影響を及ぼす。

鈴木ら(2010)は、河川源流域から沿岸部までの流域圏の水と物質循環を統合的に評価するツールとして、河川と海洋を結合した流域圏統合モデルを開発し、東京湾への河川水の影響について検討した。また、鈴木ら(2012a, 2012b)は河川海洋結合モデルを木曾三川流域から伊勢湾に適用した。2003年4月の大雨出水時の事例解析を行い、木曾三川から伊勢湾内へと流出する浮遊土砂の拡散計算結果は湾内西岸を南下することを示した。MODIS衛星観測による伊勢湾内の濁度の拡がりをよく再現し、河川海洋結合モデルは十分な精度を有することを明らかにした。

地球温暖化により伊勢湾の水文環境は様々な影響を受け、特に水温の変化は魚介類の生息環境に重要

気象観測データは、1 km メッシュ上に、距離の 2 乗の重みを利用して内挿補間するとともに、気温の高度補正も考慮する。出力されるデータは、河川流量・水温等の 1 時間ごとの計算値である。

2.2 3次元海洋循環モデル

3次元海洋循環モデル RIAMOM を用いる。モデルの概要を Table 2 に示す。RIAMOM は流体力学のプリミティブ方程式を数値計算するモデルである (Lee and Yoon, 1994)。基本方程式は、運動方程式・連続の式・静水圧近似式・トレーサの移流方程式からなり、予報変数は流速 3 成分・圧力 (海面高度)・水温・塩分である。モデルは、静水圧平衡のもとでのブシネスク近似を仮定し、3 次元、非線形、自由水面のプリミティブな Navier-Stokes 方程式を解くものである。

海表面を通した境界条件として入力する気象データは、海面気温・風・気圧・湿度・総雲量及び低層雲量・太陽放射熱であり、気象庁 MSM GPV データを与えた。湾口の外洋境界条件として、潮汐変化と広域海洋モデルの境界値を与える。ここでは国立天文台の潮汐モデル (<http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index.html>) と JAMSTEC の JCOPE2 モデル (Miyazawa et al., 2009) による再解析データを与えた。また、木曾三川河口における境界条件として、河川流量および河川水温の 1 時間ごとの計算値を与えた。伊勢湾内は、水平 1/72 度 (約 1.4 km)、鉛直 60 層の 3 次元のメッシュに分割して計算した。出力されるデータは、各メッシュにおける流速 3 成分、水温、塩分および表層の海面高度である。

3. 現在気候の再現

3.1 計算条件

現在気候の再現実験は、三重県水産研究部による湾内観測データが得られている 2004 年を対象とした。2004 年は台風の上陸数が 10 個と、過去最多となった年である。東海地方は台風 21 号 (9 月 29 日～30 日)、台風 23 号 (10 月 20 日～21 日) が相次いで通過し、大雨による土砂災害や浸水被害を各地にもたらした。

Hydro-BEAM による木曾三川の流出計算は、流域を 1 km メッシュで区切って河道網を作成し、気象庁アメダスおよび気象官署の 1 時間ごとの降水量・気温・風速・気圧・水蒸気圧・日射量を 1 km メッシュに内挿補間し、外力条件として与えた (佐藤ら, 2011)。木曾三川河口における 1 時間ごとの河川流量・水温が出力され、RIAMOM の河川境界条件として与えられる。伊勢湾の流動場と水温の計算は、前月から 15

日間のスピニングアップを含めて月別に行った。

3.2 計算結果の検証

Fig. 2 には三重県水産研究部による定点観測の位置図を示す。湾奥から湾口にかけて 16 か所の定点が設定され、月 1 回の観測が行われている。観測要素は、各層の水温・塩分・流向・流速・濁度・DO・pH・クロロフィル a・プランクトン等である。ここでは、湾内における河川の影響の違いに着目し、木曾三川河口部の湾奥 (地点 2) と湾口 (地点 18) の 2 地点を検証地点とした。

各月の計算結果から観測日に対応するデータを抽出し、月別の計算結果と観測値を Fig. 3 に示す。上から順に、海面水温、表層の塩分濃度と流速が図示されている。計算値は海洋モデル RIAMOM の表層第一層 (層厚 2 m) の平均値である。

海面水温の計算値は、2 月から 3 月にかけて最も低く、その後夏場にかけて水温が上昇し 9 月に水温が最も高くなっている。観測値も概ね同様な季節変化を示すが、夏場の水温ピークは湾奥 (No.2) の観測値では 8 月に出現しており、計算値のピークは観測値よりも 1 か月遅くなっている。湾奥においては 6 月から 8 月にかけての計算値は観測値よりも約 1°C 程度低め、9 月から 12 月にかけて計算値は約 1-2°C 程度高めとなっており、1 月から 4 月にかけて計算値は観測値よりも約 5°C 程度高めとなっている。この冬季の計算値の高温バイアスは湾口 (No.18) においても同様で、伊勢湾全体の水温計算値が冬季は高めとなっている。湾口においては冬季以外でも 1-2°C 程度の高温バイアスが現れている。湾口の高温バイアスが年間を通して現れていることは、外洋境界条件として与えた JCOPE2 再解析値に水温バイアスが含まれている可能性を示唆する。

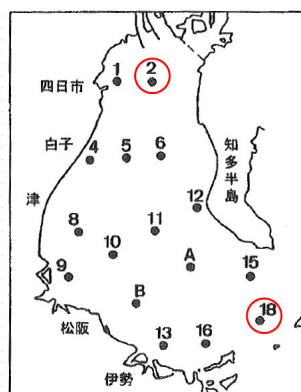


Fig. 2 Observation points and selected validation points (circle).

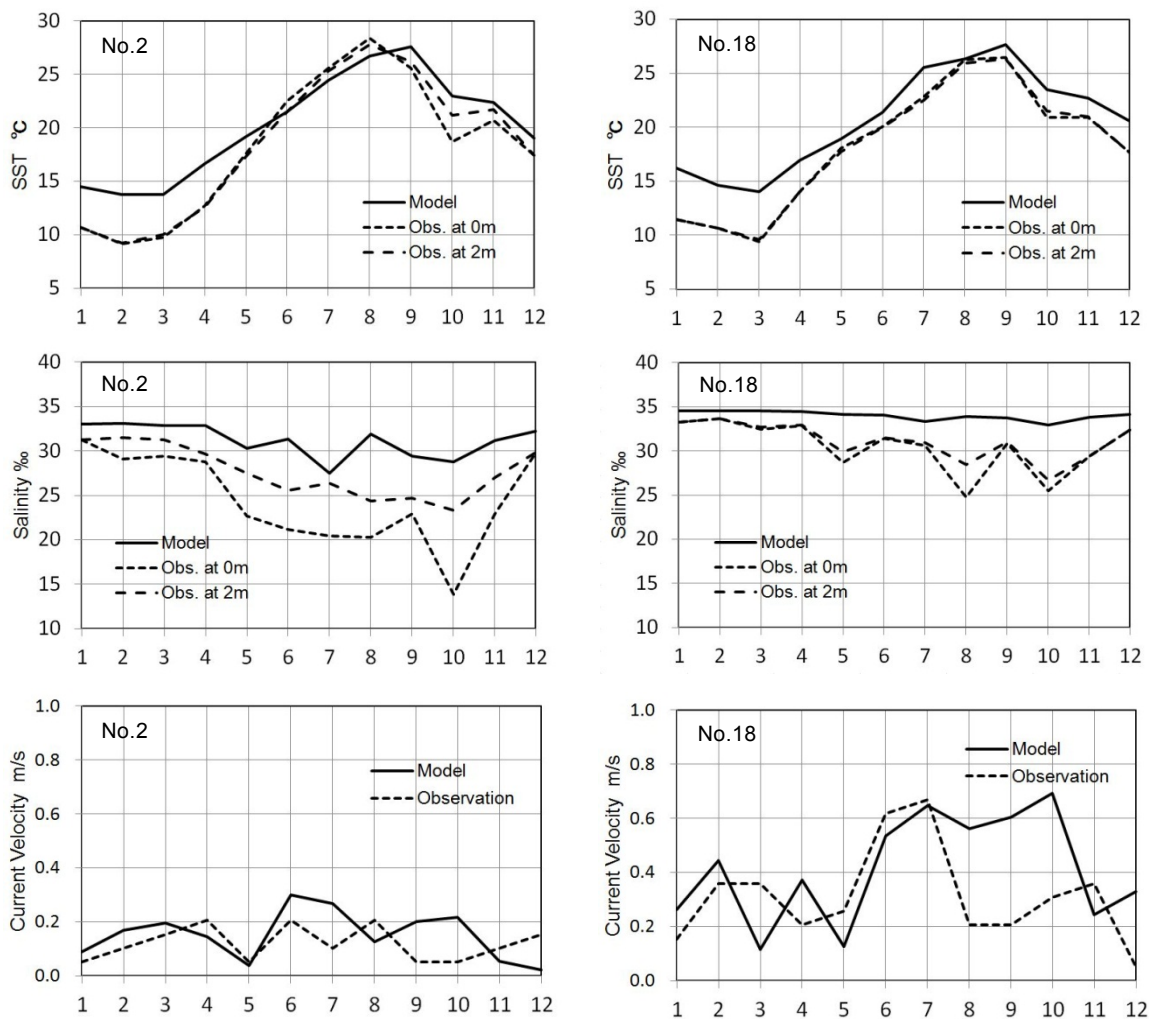


Fig. 3 Comparison of monthly sea surface temperature (SST), salinity and surface current velocity from model results with observations at point No.2 (left) and No. 18 (right).

また、冬季の5°Cにも及ぶ高温バイアスは、冬季の表層からの冷却が十分ではなく、モデルの乱流混合過程等の問題ではないかと考えられる。

表層の塩分濃度の計算値は1年を通して観測値よりもかなり高めとなっている。湾奥（No.2）の観測値は河川流量が少ない冬季の塩分濃度が高く、河川流量が増える5月から10月にかけて顕著に塩分濃度が低下しているのに対して、計算値は観測値に比べて変化の幅が小さめである。観測値は水深0mと2mでは塩分濃度が大きく変化し、密度が小さく軽い河川水が薄い層になって流出していることがわかる。モデルの鉛直層を表層付近ではもっと薄く設定する必要があることと、塩分濃度の鉛直混合過程が大きめとなっていることが課題である。湾口（No.18）においては観測値の塩分濃度は湾奥よりも高くなり、河川水の影響が小さくなっている。塩分濃度の計算値は湾口においても高めのバイアスを示している。

流速に関しては、湾奥（No.2）では流速が弱く、

湾口（No.18）では流速が強くなるという観測値の傾向をモデルでもおおむね再現している。また流速のオーダーもほぼ妥当であるといえる。

4. 将来気候の予測

4.1 気候変化シナリオ

将来気候予測実験はCMIP3のA1Bシナリオに対する100年後の予測計算を行った。CMIP3の気候変動情報データベース <http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/>（道広ら，2011）から木曾三川流域および伊勢湾周辺の降水量と気温の将来変化量を設定した。CMIP3の現在気候は1980年から1999年まで、将来気候は2080年から2099年までの各20年間である。現在気候再現性でスクリーニングした15モデルのマルチアンサンブルにより求めた、月別の降水量・気温の将来変化量をTable 3に示す。海面水温の将来変化量はデータベース化されていないため、CMIP3データから

Table 3 Future climate change value of precipitation, air temperature and sea surface temperature.

Month	Precip. ×α	Air temp. +β°C	SST +γ°C
1	1.038	3.249	2.075
2	1.071	3.445	2.076
3	1.057	3.126	2.101
4	1.027	2.870	2.033
5	1.065	2.933	1.976
6	1.039	2.939	1.981
7	1.109	2.787	1.947
8	1.129	2.953	1.923
9	1.067	3.133	1.923
10	0.991	3.081	1.991
11	0.913	2.963	1.986
12	0.955	3.158	2.028

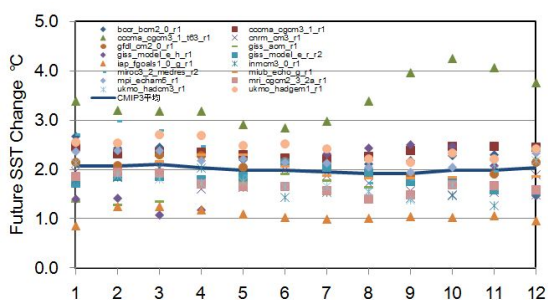


Fig. 4 Future SST changes from CMIP3 models at open ocean near Ise Bay.

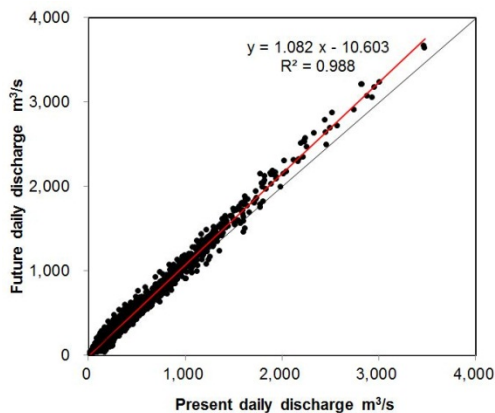


Fig. 5 Relation between present and future daily discharge of Kiso river.

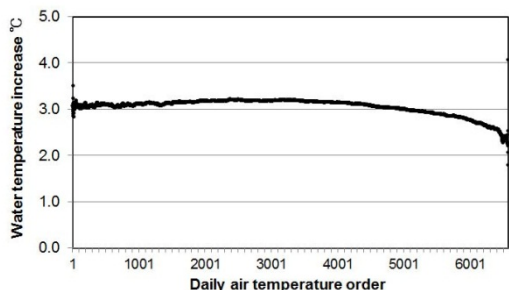


Fig. 6 Future water temperature increase of Kiso river by model in relation to daily air temperature.

伊勢湾沖合の北緯 33.5 度，東経 138.0 度の直近 4 メッシュの海面水温を抽出平均し，各モデルの海面水温将来変化量を解析した．Fig. 4 に図示するように，海面水温の上昇量はモデルによってばらつきが大きく，約 1°C から 4°C のばらつきがある．これらのアンサンブル平均をとると，海面水温の将来変化量は年間を通して約 2°C となる．こうして求めた月別の海面水温の将来変化量を Table 1 に示す．

河川の流量と水温の将来変化量は，Hydro-BEAM の現在再現計算と将来予測計算のモデル計算値の差から設定した．Fig. 5 には木曾川の日流量の現在と将来の関係を示す．現在再現計算は 1983 年から 2000 年まで，将来予測計算は CMIP3 の A1B シナリオに対する 2083 年から 2100 年までの各 18 年間の計算結果である．図示のように将来の河川流量は現在の約 1.08 倍となる．河川水温に関しては，Hydro-BEAM による現在と将来の水温計算値の差分をとり，18 年間の日平均気温の大きい順にならべかえたものを Fig. 6 に示す．図示のように，気温の順位と河川水温の差分との間には Fig. 6 に示すような分布曲線が描かれる．この日平均気温に対する分布曲線をもとに，河川水温上昇量として将来の変化量を設定した，

4.2 計算手法

前項で求めた大気（降水量・気温），外洋（海面水温），河川（流量・水温）の外力の将来変化を，気候変化量として現在気候再現実験時の外力に上乗せすることにより将来予測計算を行う（道広ら，2012）．気候変化量を上乗せする手法は，現在の観測値に気候変化量を加えた仮想的な将来観測値を設定することになるため，気候モデル出力を直接用いる際には避けられないバイアス補正の問題を回避することができる．

外洋境界条件は海水温の鉛直分布を与える必要がある．ここでは海面水温の将来変化量を表層から海底まで一様に与えることとし，JCOPE2 再解析値の鉛直分布に，Table 1 に示す海水温変化を一律に加えて設定した．

4.3 将来予測計算結果

Fig. 7 には伊勢湾の海面水温の分布を示す．1 月，4 月，7 月，10 月の各月平均の海面水温の現在気候再現値（左図），将来気候予測値（中央図），および将来変化量（将来－現在）（右図）を各々示す．また，Fig. 8 には木曾三川河口部の湾奥（No. 2）と湾口（No. 18）の 2 地点について，海面水温，表層の塩分濃度および流速の月別値の将来予測を現在と比較して示す．

伊勢湾の海面水温は河口部を除く湾全体では，現

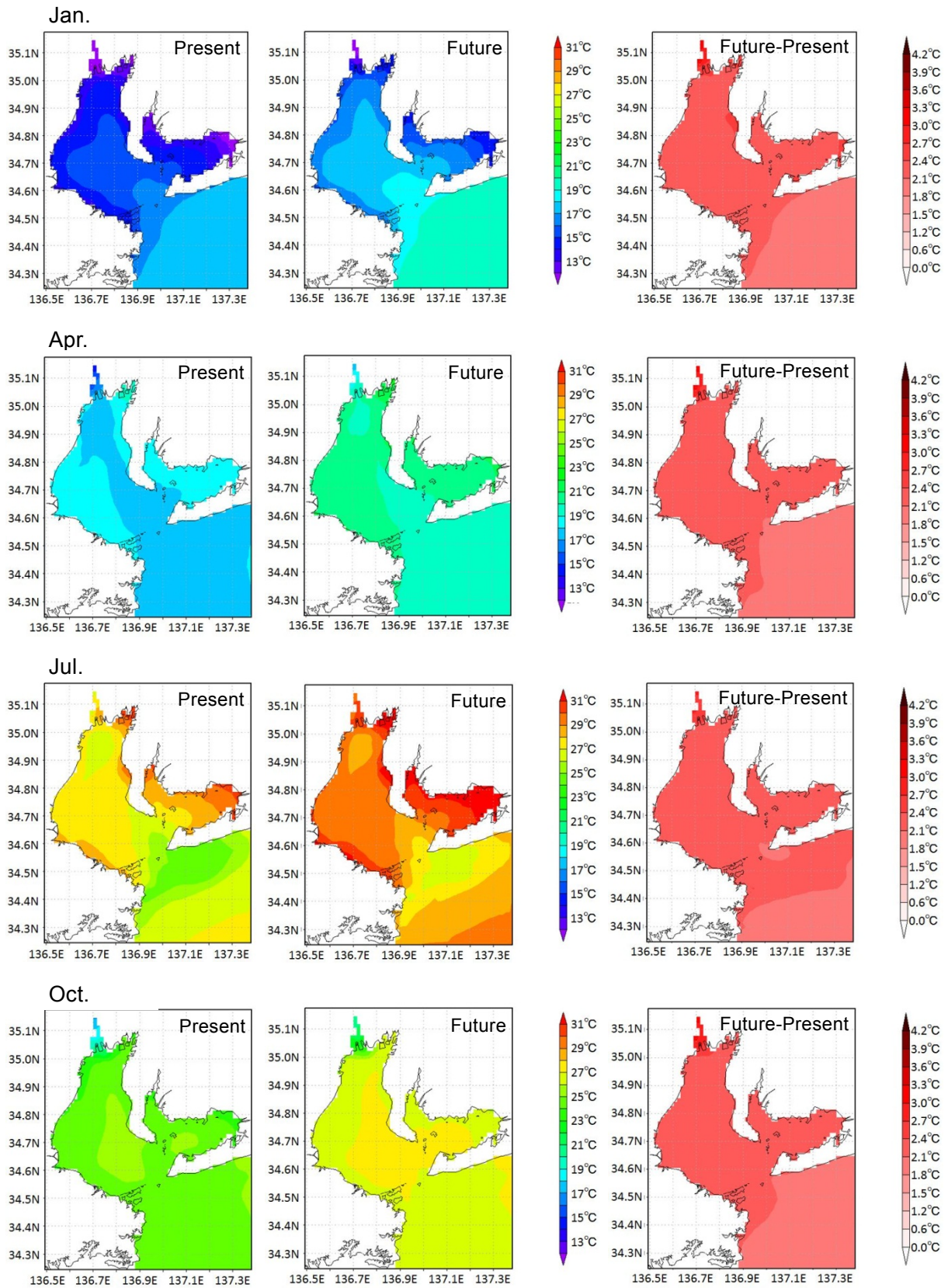


Fig. 7 Monthly mean SST distribution in January, April, July and October under the present and future climate conditions, and SST difference between present and future.

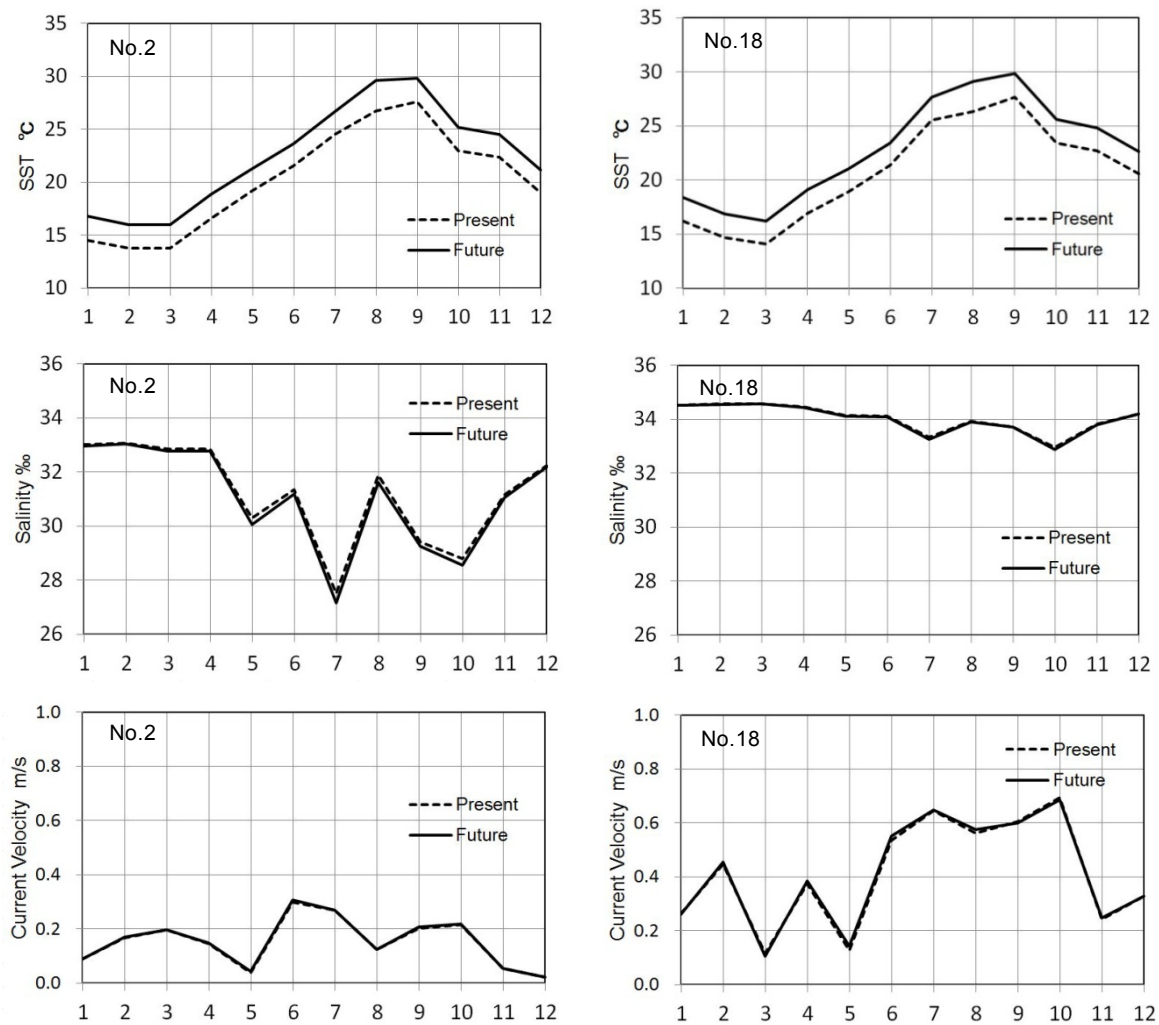


Fig. 8 Future projections of monthly sea surface temperature (SST), salinity and surface current velocity at point No.2 (left) and No. 18 (right) compared with present model results.

Table 4 Monthly mean values of future river discharge of Kiso-sansen rivers, present and future SST and SST increase (future – present) at the point No.2, No.18 by the model.

Month	Discharge m ³ /s	SST °C (No. 2)			SST °C (No. 18)		
		Present	Future	Increase	Present	Futute	Increase
1	384	14.53	16.77	2.24	16.22	18.37	2.15
2	474	13.78	16.00	2.22	14.66	16.86	2.20
3	484	13.76	15.95	2.19	14.06	16.24	2.18
4	620	16.61	18.85	2.24	16.93	19.15	2.22
5	1159	19.20	21.30	2.10	18.93	21.05	2.12
6	970	21.53	23.64	2.11	21.40	23.46	2.06
7	558	24.48	26.68	2.20	25.53	27.69	2.16
8	761	26.75	29.62	2.87	26.34	29.14	2.80
9	1176	27.62	29.79	2.17	27.67	29.86	2.19
10	1479	22.98	25.19	2.21	23.46	25.63	2.17
11	496	22.38	24.53	2.15	22.72	24.82	2.10
12	533	19.03	21.18	2.15	20.57	22.64	2.07

在気候において1月は約15°C、4月は約17°C、7月は約27°C、10月は約24°Cと計算されている。将来気候予測によると、海面水温は約2°C以上上昇する。海面水温の上昇量は夏季以外は約2.1°C~2.2°Cであり、夏季は2.8°C~2.9°Cと上昇量が大きくなっている。またFig. 7の水温上昇量の分布によると、木曾三川の河口部を中心に沿岸部での上昇量が湾中央部よりも顕著であることがわかる。Table 4によると、湾奥(No. 2)の水温上昇量は、湾口(No. 18)よりも0.1°C弱大きくなっている。木曾三川河口部は湾奥(No. 2)よりもさらに沿岸部に位置し、上昇量は大きく、3°C以上の上昇が計算されている。

沿岸部や三河湾での昇温が顕著であり、冬季よりも夏季の水温上昇が高いこと、また、湾内よりも沿岸部での昇温量が高いことが特徴的である。これは、水深の浅い沿岸部や三河湾では、気温上昇や日射による水温上昇が効果的に行われることに起因するものと考えられる。夏場は成層がより発達し、海面付近の上下混合が少なくなるため、より高温となりやすいことも影響していると考えられる。

将来の夏季の海面水温は伊勢湾全体で30°C近くにも達し、沿岸部では場所によっては30°Cを超えるところも出現する。魚介類などの水産生物は生息に適した水温に敏感であることから、伊勢湾の将来の水文環境変化は魚介類の生息に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

Fig. 8によると、海面水温以外の塩分濃度や流速に関しては、現在と将来で海面水温ほどの大きな変化は見られない。塩分濃度は湾口(No. 18)ではほとんど変化がないが、湾奥(No. 2)では将来の塩分濃度は年間を通じて若干低下する。湾奥での変化が大きいことは河川水の影響が考えられる。将来の河川流量の増加(Fig. 8)が主要な要因と考えられるが、将来気候における水温上昇と成層状態の発達により河川水が現在よりもより薄い層となって湾内に拡がっていく可能性も考えられる。

5. おわりに

地球温暖化A1Bシナリオ下の気候モデルによる大気と海洋の将来変化予測を用いて、河川海洋結合モデルによる現在気候再現実験と将来気候予測実験を行い、伊勢湾の水温等水文環境の現在気候再現性の検証と、その将来予測について調べた。その結果、以下の結論が得られた。

現在気候の再現実験は、三重県水産研究部による湾内観測データが得られている2004年を対象とした。海面水温の計算値は観測値と同様な季節変化を再現し、2月から3月にかけて最も低く、その後夏場にか

けて水温が上昇するが、夏場の水温ピークは湾奥の計算値は観測値よりも1か月早めとなっている。また、湾奥、湾口ともに、1月から4月にかけての計算値は観測値よりも約5°C程度高である。モデルの冬季高温バイアスは、冬季の表層からの冷却が十分ではないことに起因し、モデルの乱流混合過程等の問題ではないかと考えられる。湾口においては冬季以外でも1-2°C程度の高温度バイアスが現れている。湾口の高温度バイアスが年間を通して現れていることは、外洋境界条件として与えたJCOPE2再解析値に水温バイアスが含まれている可能性を示唆する。表層の塩分濃度の計算値は1年を通して観測値よりもかなり高めとなっている。湾奥の観測値は河川流量が少ない冬季の塩分濃度が高く、河川流量が増える5月から10月にかけて顕著に塩分濃度が低下しているのに対して、計算値は観測値に比べて変化の幅が小さめである。モデルの鉛直層を表層付近ではもっと薄く設定する必要があることと、塩分濃度の鉛直混合過程が大きめとなっていることが課題である。湾口においては観測値の塩分濃度は湾奥よりも高くなり、河川水の影響が小さくなっている。流速に関しては、湾奥では流速が弱く、湾口では流速が強くなるという観測値の傾向をモデルでもおおむね再現している。

将来気候予測実験はCMIP3のA1Bシナリオに対する100年後の予測計算を行った。CMIP3の気候変動情報データベースから木曾三川流域および伊勢湾周辺の降水量と気温の将来変化量を設定した。海面水温の将来変化量はCMIP3データから伊勢湾沖合のメッシュを抽出し、各モデルの海面水温将来変化量を解析した。また河川の流量と水温の将来変化量は、Hydro-BEAMの現在再現計算と将来予測計算のモデル計算値の差から設定した。

伊勢湾の海面水温は将来気候予測によると、湾全体で約2°C以上上昇する。上昇量は夏季以外は約2.1°C~2.2°Cであり、夏季は2.8°C~2.9°Cと上昇量が大きくなっている。また沿岸部での上昇量が湾中央部よりも顕著であることがわかった。木曾三川河口部の水温上昇量は3°C以上と計算されている。沿岸部や三河湾での昇温が顕著であり、冬季よりも夏季の水温上昇が高いこと、また、湾内よりも沿岸部での昇温量が高いことが特徴的である。これは、水深の浅い沿岸部や三河湾では、気温上昇や日射による水温上昇が効果的に行われることに起因するものと考えられる。将来の夏季の海面水温は伊勢湾全体で30°C近くにも達し、沿岸部では場所によっては30°Cを超えるところも出現する。魚介類などの水産生物は生息に適した水温に敏感であることから、伊勢湾の将来の水文環境は魚介類の生息に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

伊勢湾の水文環境の将来変化を予測するためには、気温や外洋水温の上昇が重要な要素であるが、魚介類の生息域として重要な沿岸部での水文環境への温暖化影響を評価するためには、河川水の影響を定量的に評価することも重要であるといえる。

今後は、具体的な適応策立案のためには定量的な将来予測が必要とされる。本研究で用いた手法は、大気・海洋・河川の各気候変化外力の将来変化量を月別に入れてその影響を調べるといふ、大まかな将来変化傾向を推定する手法である。温暖化シナリオや気候モデル個々の不確実性が大きい現状では、アンサンブル平均により不確実性を減らし、温暖化の大局的な影響を調べる目的にかなった実用的な研究手法であるといえる。しかしながら、予測精度の向上を図り、時空間的により詳細な将来気候予測を得るためには、気候海洋モデルの力学的ダウンスケーリングによる海洋境界条件の直接ネスティングや、河川モデルの水温計算プロセスの精度向上など、取り組むべき課題はまだ多いといえる。

参考文献

- 伊勢湾環境データベース：伊勢湾流域の概要 河川流量， <http://www.isewan-db.go.jp/about/index.asp>, 2013年5月28日閲覧。
- 国立天文台：NAO.99b 潮汐予報システム， <http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index.html>, 2013年5月28日閲覧。
- 佐藤嘉展・小尻利治・道広有理・鈴木靖 (2011)：マルチ気候モデルと貯水池操作を考慮した分布型水文モデルの木曾三川流域への適用，京都大学防災研究所年報，第54号B，pp. 757-769。
- 鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理 (2010)：河川流出が東京湾の水域環境に及ぼす影響について，京都大学防災研究所年報，第53号B，pp. 743-749。
- 鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理・Sergey M.Varlamov (2012a)：河川海洋結合モデルによる伊勢湾の河川流出水の影響について，土木学会論文集B3 (海洋開発)，Vol. 68, No. 2, pp. I_1001-I_1006。
- 鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理・本間基寛・Sergey M.Varlamov (2012b)：流域圏統合モデルによる伊勢湾への河川水の影響評価，京都大学防災研究所年報，第55号B，pp. 511-517。
- 三重県科学技術振興センター水産研究部 (2005)：漁況海況予報関係事業結果報告書 (漁海況データ集)，292pp。
- 道広有理，鈴木靖，佐藤嘉展 (2011)：気候変動情報データベースの開発とその利用，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 67, No. 2, pp. I_1211-I_1215。
- 道広有理，佐藤嘉展・鈴木靖 (2012)：流域スケールの水文解析に向けたGCM出力の活用方法の検討，土木学会論文集B1 (水工学)，Vol. 68, No. 3, pp. 125-135。
- Kojiri, T. (2006)：Hydrological river basin environment assessment model (Hydro-BEAM), Watershed Models, ed. by V. P. Singh & D. K. Frevent, Taylor & Francis, CRC Press, USA, pp. 613-626。
- Lee, H. C., and J. H. Yoon (1994)：On the free surface OGCM. Proc. of fall meeting the Japan Oceanogr. Soc., pp. 225-226。
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009)：Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr. 65, pp. 737-756..

(論文受理日：2013年6月7日)