

## 寄稿

## 瀬戸内海中央部の備讃瀬戸における水温と塩分の長期変動

山本昌幸

## The Long-term Variations in Water Temperature and Salinity in Bisan-Seto, the Central Seto Inland Sea

Masayuki YAMAMOTO

The long-term variations in water temperature and salinity in Bisan Seto were analyzed using the monthly data measured at the fourteen stations from 1966 to 2002 and the daily average water temperature observed by the automatic measurement sensor with the buoy in Yashima Bay from 1975 to 2002. Thirty-six month running means of the water temperature and salinity gradually increased during the whole investigated period. The annual average water temperature and salinity gained 0.81°C and 0.79 psu for 37 years, respectively. The water temperature from December to May showed significant increasing trend, while the water temperature in other months did not show significant increasing trend. However, the number of days when daily average water temperature exceed 25°C for a year risen since 1995.

**Key words:** water temperature, salinity, long-term variation, Seto Inland Sea

## はじめに

近年、地球温暖化による気温の上昇（環境庁編，2002）とそれに伴う海面上昇や黒潮流量の変化などによる海洋環境の変化が水産業へどのような影響をもたらすか議論されている（朴，2001；岸田，1994）。岩手県越喜来湾（澤田・早川，1997）や瀬戸内海の広島湾（樽谷ら，2002）、愛媛水試が調査を行っている海域（宇野ら，2002）では水温・塩分が上昇していることが報告されている。瀬戸内海の中央部に位置する備讃瀬戸は外洋水の影響を受けにくく、平均水深が約16mと浅い（環境庁水質保全局，1999）ため、気温の上昇に伴い広島湾や愛媛県海域と同様に水温が上昇している可能性がある。本海域は、潮流が強いため、周年にわたって温度躍層が出現せず、表層から底層にかけて水温がほぼ一定となること（武岡，1998）から、水温の上昇によって、底層に棲み高水温に弱いカレイ類やマアナゴなど（志茂ら，2000；棚野・長野，1996）に摂餌低下や呼吸障害などが起こっている可能性がある。また、水温・塩分は海洋生物の増殖や成長などに大きな影響を与えるものであり、これらの長期変動を知ることは海洋生物の再生産

活動を調査する上で有益な情報となる。

そこで、1966年から2002年までほぼ毎月観測されている水温・塩分、1975年から2002年まで香川県屋島湾においてほぼ毎日測定されている水温および水温・塩分の変動に影響を及ぼす気温・降水量を解析し、備讃瀬戸における水温・塩分の長期変動を調べ、水温上昇による生物への影響を検討した。

## 資料と解析方法

## 調査海域

播磨灘と燧灘に挟まれる備讃瀬戸には多くの島が散在し、水深20m以浅に瀬や洲が発達している一方、水深40m以上の海域も点在している。表層水温は、2月に最低（1972年から1996年までの平均値9.0°C）となった後に上昇し、9月に最高（26.8°C）となり、その後、下降する。潮流は速いところでは2.5ノット以上となり、上げ潮時には東から西へ流れ、下げ潮時には西から東へ流れる（日本海洋学会沿岸海洋研究部会編，1985）。本海域では、ブリ類、マダイ、ノリ、カキなどの養殖が行われ、漁船漁業では小型底びき網、建網やいかなご込網など多様な漁業によってイカナゴ、ヒラメ、カレイ類、エビ類、マアナゴ、マダコなどが年間約1万5千トン漁獲されている（小川，2001）。

## 解析資料

1966年1月から2002年12月までの毎月の水温・塩分は、

2003年3月26日受付，2003年5月8日受理

香川県水産試験場

Kagawa Prefectural Fisheries Experimental Station, Yashima-higashi,

Takamatsu, Kagawa 761-0111, Japan

m-yamamoto@niji.or.jp

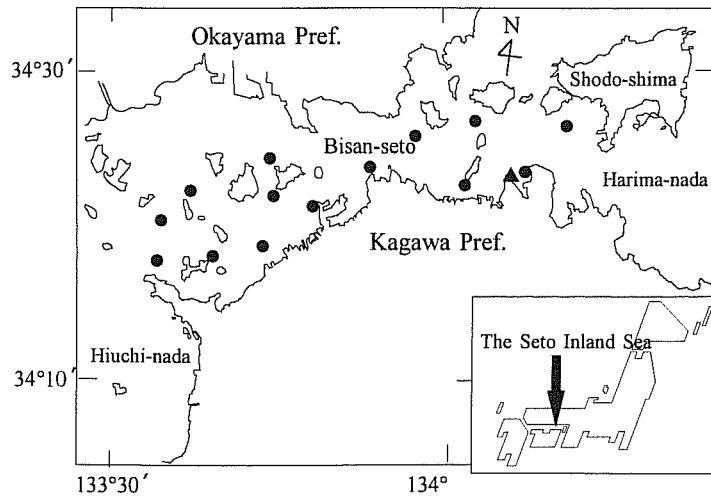


Figure 1. Location of the fourteen monthly monitoring stations (●) and the daily monitoring buoy (▲) in Bisan-seto, the Seto Inland Sea.

香川県水産試験場が原則として毎月上旬に備讃瀬戸海域14点 (Fig. 1) で測定したのものをを用いた。なお、水温は、春秋の水温上昇・下降期には観測日の遅延によって水温の測定値が大きく変化するため、測定月と前月の水温差と測定間隔日数との間に1次式が成立すると仮定して、測定月1日の水温に補正した。

1975年1月1日から2002年12月31日までの毎日の水温は、香川県屋島湾 (Fig. 1) のブイに設置してある水温自動測定装置によって観測された水深1mの日平均水温 (1988年までは3時間間隔で測定したものの平均値, 1989年以降は30分間隔で測定したものの平均値) をを用いた。ただし、1976年、1980年、1989年、1990年は欠測日が30日以上あった。

1966年から2002年までの毎月の平均気温と合計降水量は、香川県高松地方気象台で測定したのものをを用いた (高松地方気象台編集, 1967-1994; 高松地方気象台編集, 1995-1999; 日本気象協会四国支店, 1999-2003)。

解析方法

水温、塩分、気温、降水量の長期変動をみるため、36ヵ月移動平均値を用いた。なお、水温および塩分は水深10m層の14点の平均値を用いた。また、水温・塩分の変化量を推定するため、年平均値と測定年の回帰直線を最小二乗法によって求め、F検定によって回帰式の有意性を検定した。

屋島湾の水温自動測定装置によって観測された水温については、マコガレイ (高橋ら, 1987) やマアナゴ (五利江・大谷, 1997) の摂餌が低下するとみられる水温25°C以上の日数の経年変化をみた。

結果

水温の長期変動

水深10m層における1966年から2002年までの水温および

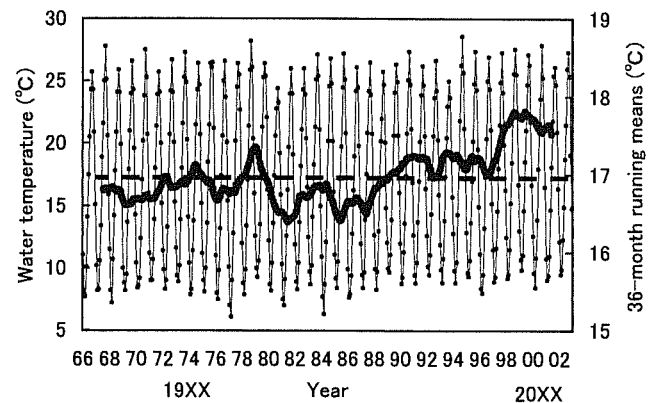


Figure 2. Long-term variations in water temperature (10m) from 1966 to 2002. The smooth connected curve and dashed line show the 36-month running means and total mean (16.99°C), respectively.

36ヵ月移動平均を Fig. 2 に示す。水温の最高値は1996年9月に28.6°C、次いで1978年9月の28.2°C、2000年9月の27.9°Cとなった。一方、最低値は1976年3月に6.1°C、次いで1984年3月の6.3°C、1981年3月の7.0°Cとなった。移動平均をみると、平均水温に比べて1960年代はやや低め、1970年前半は同程度からやや低め、1970年後半は高め、1980年代は低め、1990年代は高めとなり、1990年後半から上昇傾向が顕著であった。調査期間全体の移動平均には有意な増加傾向がみられた (Spearmanの順位相関,  $r_s=0.63, p<0.01$ )。

測定年  $Y$  (年) と年平均水温  $WT_y$  (°C) の回帰直線を最小二乗法によって求めたところ、次式を得た。

$$WT_y = 0.0226Y - 27.83 \quad (n=37, R^2=0.22).$$

この回帰係数に関してF検定を行った結果、危険率1%水

**Table 1.** Recent trends of water temperature, salinity and air temperature in each month from 1966 to 2002 (Spearman's correlation coefficient by rank test).

Month	Water temperature		Salinity		Air temperature	
	<i>n</i>	<i>r<sub>s</sub></i>	<i>n</i>	<i>r<sub>s</sub></i>	<i>n</i>	<i>r<sub>s</sub></i>
JAN.	37	0.54**	37	0.12	37	0.48**
FEB.	37	0.46**	35	0.21	37	0.30*
MAR.	37	0.57**	33	0.14	37	0.60**
APR.	37	0.47**	37	0.34*	37	0.55**
MAY	37	0.41**	37	0.36*	37	0.66**
JUNE	37	0.11	37	0.30*	37	0.61**
JULY	37	0.08	37	0.41**	37	0.47**
AUG.	37	0.15	37	0.34*	37	0.50**
SEP.	37	0.27	37	0.44**	37	0.50**
OCT.	37	0.17	36	0.31*	37	0.65**
NOV.	37	0.13	37	0.28*	37	0.44**
DEC.	37	0.29*	36	0.18	37	0.51**

\*\*,\* Significant difference was found at  $P<0.01$ ,  $P<0.05$ , respectively.

準で有意であった。水温の上昇量は1966年から2002年までの37年間で約0.81°Cと見積もられた。

各月の水温の経年変化をみると、1月から5月および12月については有意な上昇傾向がみられた (Table 1)。しかし、6月から11月については相関係数が正になっているものの、帰無仮説が棄却されず、これらの月の水温が上昇しているとは認められなかった (Table 1)。

#### 高水温日数の推移

屋島湾の水温自動測定装置で観測された水温と備讃瀬戸の水温との関係を見るため、1998年1月から2002年12月の屋島湾の水温自動測定装置によって観測された毎月1日の日平均水温  $WTd$  (°C) と備讃瀬戸14点 (水深10m) の平均水温  $WTm$  (°C) の回帰式を求めたところ、

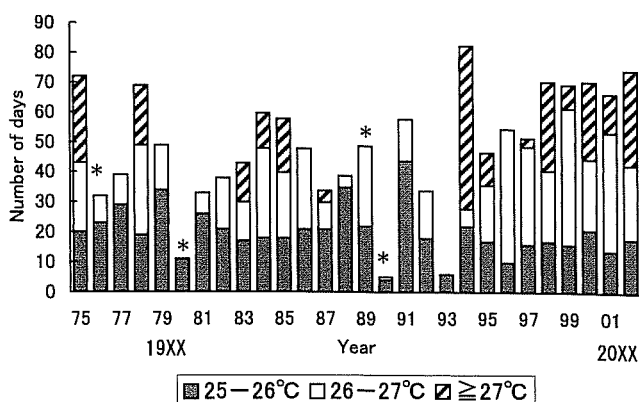
$$WTm = 1.0022WTd \quad (n=60, R^2=0.99, P<0.01),$$

となった。屋島湾の日平均水温は備讃瀬戸の平均水温に比べ、若干低いもののほぼ一致していた。

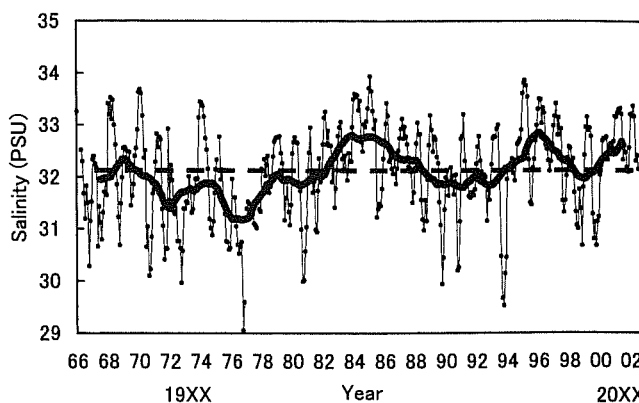
屋島湾の水温自動測定装置によって日平均水温が25°C以上と観測された日数の経年変化をみると、1975年から1993年 (19年間) には水温25°C以上となった日数が年平均41日であったのに対し、1994年から2002年には66日と25日増加した。また、1997年以降は水温が27°C以上となる日が常に出現していた (Fig. 3)。

#### 塩分の長期変動

水深10m層における1966年から2002年までの塩分および36ヵ月移動平均を Fig. 4に示す。移動平均をみると、平均塩分に比べて1960年代は同程度、1970年代は低め、1980



**Figure 3.** Number of days when water temperature observed by the automatic measurement sensor with the buoy in Yashima Bay exceeded 25°C from 1975 to 2002. In 1976, 1980, 1989 and 1990 no observation days exceeded 30th (\*).



**Figure 4.** Long-term variations in salinity (10 m) from 1966 to 2002. The smooth connected curve and dashed line show the 36-month running means and total mean (32.11 psu), respectively.

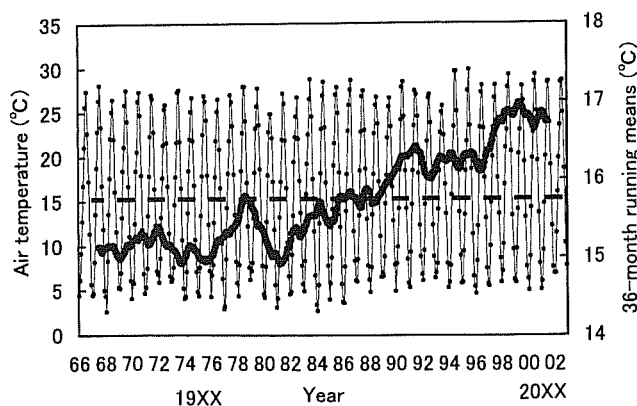
年代は高め、1990年代前半はやや低めとなり、1990年後半は高めに推移した。調査期間全体の移動平均には有意な増加傾向がみられた (Spearmanの順位相関,  $r_s=0.46$ ,  $p<0.01$ )。

測定年  $Y$  (年) と年平均塩分  $S_y$  (psu) の回帰直線を最小二乗法によって求めたところ、次式を得た。

$$S_y = 0.0211Y - 9.73 \quad (n=37, R^2=0.18),$$

この回帰係数に関して  $F$  検定を行った結果、危険率1%水準で有意であった。塩分の上昇量は1966年から2002年までの37年間で約0.79 psuと見積もられた。

各月の水温の経年変化をみると、4月から11月については有意な上昇傾向がみられた (Table 1)。しかし、その他の月については相関係数が正になっているものの、帰無仮説が棄却されず、これらの月の塩分が上昇しているとは認められなかった (Table 1)。



**Figure 5.** Long-term variations in air temperature from 1966 to 2002. The smooth connected curve and dashed line show the 36-month running means and total mean (15.74°C), respectively.

#### 気温の長期変動

1966年から2002年までの気温および36ヵ月移動平均をFig. 5に示す。移動平均をみると、平均気温に比べて1960年代から1970年代前半は低め、1970年代後半は低めから同程度、1980年代は低めから同程度となり、1990年以降は高めに推移した。移動平均には有意な増加傾向がみられた (Spearmanの順位相関,  $r_s=0.63$ ,  $p<0.01$ )。

測定年  $Y$  (年) と年平均気温  $T_y$  (°C) の回帰直線を最小二乗法によって求めたところ、次式を得た。

$$T_y = 0.0529Y - 89.27 \quad (n=37, R^2=0.63).$$

この回帰係数に関して  $F$  検定を行った結果、危険率1%水準で有意であった。年間気温の上昇量は1966年から2002年までの37年間で約1.90°Cと見積もられた。

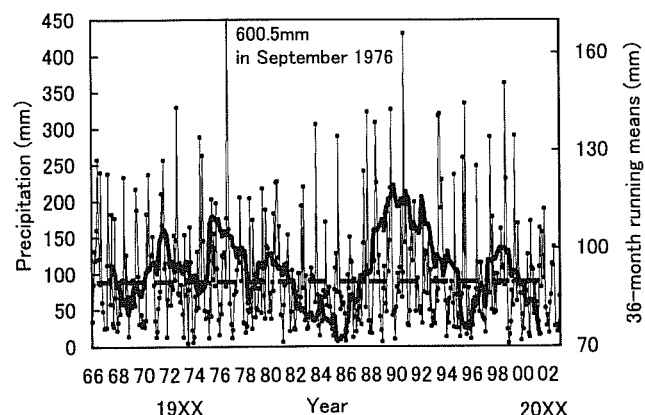
各月の気温の経年変化をみると、いずれの月も有意な上昇傾向がみられた (Table 1)。

#### 降水量の長期変動

1966年から2002年までの降水量および36ヵ月移動平均をFig. 6に示す。移動平均をみると、平均降水量に比べて1960年代と1970年代はやや多め、1980年代は少なめ、1990年代前半は多めとなり、1990年代終わりから減少傾向にあった。調査期間全体の移動平均には有意な増減傾向は認められなかった (Spearmanの順位相関,  $r_s=-0.01$ ,  $p=0.84$ )。

#### 考察

備讃瀬戸の水温・塩分は上昇していた。広島湾でも同様に水温・塩分が上昇しており、1972年から2000年まで (29年間) の広島湾の水温・塩分の上昇量は、それぞれ約0.8°Cと約0.7 psu (樽谷ら, 2002) と本研究の結果とほぼ一致した。また、宇野ら (2002) の愛媛県海域における1972年から2001年の水温・塩分の解析結果によると、水温は燧灘、伊予灘、豊後水道いずれにおいても上昇傾向に



**Figure 6.** Long-term variations in precipitation from 1966 to 2002. The smooth connected curve and dashed line show the 36-month running means and total mean (92.57 mm), respectively.

あったが、塩分は備讃瀬戸の西に隣接する燧灘でのみ上昇傾向がみられた。これらのことから、水温と塩分の年平均の上昇は瀬戸内海中央部の共通した現象といえる。

気温はいずれの月においても有意な上昇傾向がみられたが、水温は1月から5月および12月にのみ有意な上昇傾向がみられた。燧灘においても、周年の気温の上昇傾向がみられ、水温の上昇傾向が1月から3月および10月から12月にみられた (宇野ら, 2002)。これらの結果は、外海からの影響が小さい内湾域の水温は、夏季に太陽からの短波放射、冬季に気温の関与が大きいこと (柳, 2001) を支持している。

塩分の年平均値は上昇傾向にあった。内湾域の塩分は海面の降水量と蒸発量、河川からの流量に大きく影響される (柳, 2001)。降水量には長期変動傾向はみられなかった。また、蒸発量については本研究では調べていないが、燧灘の蒸発量に変動傾向がみられなかったこと (宇野ら, 2002) から、本海域の蒸発量にも大きな変動傾向があったとは考えにくい。これらのことから、海面過程による塩分上昇の可能性は低いものと推察された。河川流量は調べていないが、広島湾 (樽谷ら, 2002) と播磨灘 (眞鍋ら, 1994) では、塩分と河川流量に相関がみられることから、今後、瀬戸内海中央部の塩分と河川流量との関係を検討する必要がある。

本研究によって、冬季の水温上昇傾向と1990年代後半の高水温期の増加が明らかとなった。水温の温暖化によって、海洋生物にどのような影響が及ぼされるか検討する。まず、養殖業についてみると、冬季の水温上昇によって低水温を理由に行われていなかった新魚種の養殖への可能性が広がる。しかし、ノリ養殖については、秋季の水温下降の遅れに伴い、1997年後半以降、ノリ網の本張を開始する時期が例年より遅れていた (藤原・山賀, 1998-2002)。

今後もこの傾向は続くものと考えられることから、本張開始時期の遅れを想定したノリ養殖の生産・販売計画が求められる。

次に、プランクトンについてみると、1988年に高知県で赤潮発生が確認されたアサリ、カキ、真珠などの二枚貝を斃死させるヘテロカプサ *Heterocapsa cricularisquama* は10°C以下の低水温になると増殖できず死滅するが、冬季の水温の上昇によって栄養細胞の越冬数が増加しているものと推察されている(松山, 2001; 今井, 2001)。また、近年、瀬戸内海においてクラゲ増加が報告されている(四国新聞社, 2000; 上, 1998; 上, 2002)が、この原因として冬季の温暖化によるクラゲの越冬数の増加があげられている(上, 2002)。これらのように、これまで冬季の冷え込みによって増加が抑えられていた水産業にとって好ましくないプランクトンが、冬季の水温上昇によって増加していると推察された。

魚はある一定の水温までは水温の上昇に伴い摂餌量が増加し、成長が速くなることが知られている(川本, 1959)。このことから、温暖化によって高水温を好む魚類の成長が良くなることが考えられる。また、本海域では冬季の低水温のときに天然・養殖の越冬マダイの大量斃死が確認されたが(吉松, 1978)、近年ではみられなくなった。

1994年後半以降、水温25°C以上の日が2ヵ月以上続くことが珍しくなくなった。高水温についての飼育実験によるとマコガレイ(高橋ら, 1987)、マアナゴ(五利江・大谷, 1997)、ヒラメ(志茂ら, 2000)は25°C以上になると摂餌が低下した。また、水温25°C以上の日が83日続いた1994年には本海域を中心に香川県下でメバル、マコガレイ、アカガイ、ヒラメなど養殖魚・天然魚に斃死がみられ(山賀, 1995; 詳細な斃死数については香川水試未発表)、本海域の東に隣接する播磨灘ではイカナゴが減少した(堀, 1996)。これらのことから、近年の高水温期間の増加によって、高水温に比較的弱い魚に大きなストレスがかかり、摂餌低下および生理障害が起っていると推察された。天然海域での夏季の高水温化による摂餌低下や生理障害の知見はほとんどされていない。今後、本海域において天然海域における魚類の高水温と摂餌・生理障害の関係の研究が望まれる。

今回は37年間の資料を用いて行ったが、長期変動を論じるためには、より長期の資料の蓄積が不可欠であり、今後とも現在行われている海洋調査が継続される必要がある。

## 謝 辞

37年以上にわたって海洋観測業務に携わってきた香川県水産試験場の職員の皆様、水温・塩分データの整理をして頂いた幡 香里氏、越冬マダイの斃死についての情報をはじめとする有益な御助言を頂いた吉松定昭博士に深謝する。また、本報の御校閲を賜り、適切なお助言を頂いた匿

名の査読者の方々にお礼申し上げる。

## 引用文献

- 朴 恵淑(2001) 地球温暖化が日本付近の海洋・水産業へ及ぼす影響と諸問題。水産海洋研究, 65, 161-166。
- 藤原宗弘・山賀賢一(1998-2002) 平成9~12年ノリ養殖概況。平成9-12年度香川県水試事業報。
- 五利江重昭・大谷徹也(1997) 飼育条件下におけるマアナゴの成長。水産増殖, 45, 485-488。
- 堀 豊(1996) 1993, 1994年度の播磨灘の特異な水温、塩分環境について。兵庫水試研報, 33, 39-50。
- 今井一郎(2001) 沿岸海洋の富栄養化と赤潮の拡大。海と環境, 日本海洋学会編, 講談社, 東京, 203-211。
- 環境省編(2002) 平成14年度版環境白書。ぎょうせい, 東京, 98。
- 環境庁水質保全局監修(1999) 平成10年度瀬戸内海の環境保全(資料集)。瀬戸内海環境保全協会, 兵庫, 2。
- 川本信之(1959) 魚類生理生態学。恒星社厚生閣, 東京, 121-133。
- 岸田 達(1994) 地球温暖化と水産業。水産と環境, 清水 誠編, 恒星社厚生閣, 東京, 81-89。
- 眞鍋武彦・反田 實・堀 豊・長井 敏・中村行延(1994) 播磨灘の漁場環境と植物プランクトンの変動。沿岸海洋研究ノート, 31, 169-181。
- 松山幸彦(2001) 広島湾におけるヘテロカプサ赤潮とカキ養殖, 発生環境, 今後の課題。水産海洋研究, 65, 291-292。
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編(1985) 瀬戸内海。日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, 東京, 607-722。
- 日本気象協会四国支店(1999-2003) 気象週報。日本気象協会四国支店, 香川。
- 小川泰樹(2001) 瀬戸内海の漁獲量(1952-1999年の灘別魚種別漁獲統計)。瀬戸内水研, 広島, 153-156。
- 澤田明利・早川康博(1997) 越喜来湾における栄養塩類の平均的季節変化と経年変化。日本誌, 63, 152-159。
- 四国新聞社編(2000) 連鎖の崩壊。四国新聞社, 香川, 171-173。
- 志茂 繁・秋本 泰・高浜 洋(2000) 海洋生物の温度影響に関する文献調査。海生研研報, 2, 1-351。
- 高松地方気象台編集(1973-1994) 昭和47~平成5年香川県気象年報, 日本気象協会高松支部。
- 高松地方気象台編(1995-1999) 平成6年~10年香川県気象年報, 日本気象協会四国センター。
- 高橋豊美・富永 修, 前田辰昭(1987) マガレイおよびマコガレイの摂餌と生存に及ぼす水温の影響。日本誌, 53, 1905-1911。
- 武岡英隆(1998) 瀬戸内海の海水の運動。瀬戸内海の自然と環境, 柳 哲雄編, 瀬戸内海環境保全協会, 神戸, 57-84。
- 樽谷賢治・高辻英之・内田卓志(2002) 広島湾における水温・塩分の長期変動特性。第31回南海・瀬戸内海洋調査技術連絡会議事録, 瀬戸内水研, 116。
- 榎野元秀・長野泰三(1996) 養殖魚等異常海況影響対策試験。平成7年度香川県水試事業報, 83-84。
- 上 真一(1998) 瀬戸内海の生物。瀬戸内海の自然と環境, 柳 哲雄編, 瀬戸内海環境保全協会, 神戸, pp. 130-150。
- 上 真一(2002) 瀬戸内海生態系の変化: クラゲが魚を駆逐する? 公開シンポジウム「瀬戸内圏の環境・技術研究の現状と未来」, 広島大学, 5。
- 宇野奈津子・秋山秀樹・斉藤勉・瀬藤 聡(2002) 愛媛県海域における水温・塩分の長期変動傾向について。第31回南海・瀬戸内海洋調査技術連絡会議事録, 瀬戸内水研, 112-115。
- 山賀賢一(1995) 夏期高水温による垂下飼育アカガイのへい死状況。平成6年度香川県水試事業報, 45。
- 柳 哲雄(2001) 沿岸海洋学, 第2版。恒星社厚生閣, 東京, 52-76。
- 吉松定昭(1978) 昭和51年度冬季の異常低水温による養殖マダイの浮上へい死について。栽培技研, 7, 13-20。