

2007年夏季有明海における溶存酸素濃度の時空間変動

Temporal and Spatial Variation of Dissolved Oxygen in Ariake Bay

五十嵐 学¹・杉野拓之²・増田龍哉³・滝川 清⁴・矢北孝一⁵・岩永 豊⁶・今村義郎⁶

Manabu IGARASHI, Hiroyuki SUGINO, Tatsuya MASUDA, Kiyoshi TAKIKAWA
Kouichi YAKITA, Yutaka IWANAGA and Yoshirou IMAMURA

To remedy the various environmental degradations, it is necessary for its factor to clear widely in Ariake Bay. The cluster analysis as to the temporal variation pattern of dissolved oxygen and the principal component analysis as to its spatial variation pattern were carried out in order to group the dissolved oxygen at the bottom in summer, 2007 in Ariake Bay. As a result, the dissolved oxygen was grouped to 4 patterns by both analyses. The cluster analysis suggested that the continuance of hypoxic water differed from each groups. The principal component analysis suggested that the development- disappearance process of hypoxic water was captured widely.

1. はじめに

有明海では、貧酸素水塊の形成などの環境悪化が慢性化し、その改善策が求められている。それに応えるためには、広域的に環境悪化の要因を明らかにすることが必要である。貧酸素水塊については、これまで深山ら（2005）や徳永ら（2009）などのように、諫早湾や有明海北西部といった有明海の中の局所的な領域における貧酸素に関する研究は盛んに行われており、それらの領域で起こる貧酸素化現象の要因解明は進みつつある。しかし、有明海の広域に渡って生じる貧酸素化現象の形成要因は明らかになっておらず、滝川ら（2003）や九州農政局（2008）などによる調査・研究が行われているものの、未だ少ない現状にある。また、溶存酸素濃度（以下、DO）分布は時期や場の特性に応じて異なり、その分布の形成要因も様々な因子が複雑に絡み合うため、その形

成要因の解明に当たっては、DOの時空間変動を捉えることが望ましい。

本研究では、2007年夏季に有明海で観測された底層のDOを対象に、クラスター分析を用いた時間変動分布の類型化と主成分分析を用いた平面分布の類型化（水越ら、1999；山本ら、2004）を行った。クラスター分析を用いた解析では、底層のDOの時間変動分布を類型化した後に、主成分分析を用いた解析では、底層のDO分布を類型化した後にそれらの形成要因の考察を行った。本研究は、これら2つの解析によって2007年夏季有明海におけるDOの時空間変動の要因を水質構造から明らかにすることを目的とした。

2. 観測データの概要

2007年7月23日～9月28日の期間において、図-1に示す16地点で観測された水質データを用いて分析・考察を行った。表-1に観測データの諸元を示す。

クラスター分析および主成分分析は、底層のDOを説明変量とし、それが3mg/Lを下回る（以下、貧酸素状態）

表-1 観測データ諸元

観測機関	九州農政局, 水産庁, 環境省, 西海区水産研究所
観測期間	2007年7月23日～9月28日
観測間隔	1時間
観測地点	図-1参照
観測項目	溶存酸素濃度（表底層）, 水温（表底層）, 塩分（表底層）, クロロフィルa（表底層）
観測水深	表層（地点S1, S6: 水面下-0.5m, その他地点: 水面下-1.0m）, 底層（海底面上+0.2m）

- 1 正会員

工修

東亜建設工業(株) 技術研究開発センター水圏・環境技術グループ研究員（元熊本大学特定事業研究員）
- 2 学生会員

熊本大学大学院自然科学研究科
- 3 正会員

博(工)

熊本大学大学院先端機構特任助教
- 4 フェロー

工博

熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター教授
- 5 正会員

熊本大学工学部技術部
- 6

九州農政局整備部農地整備課

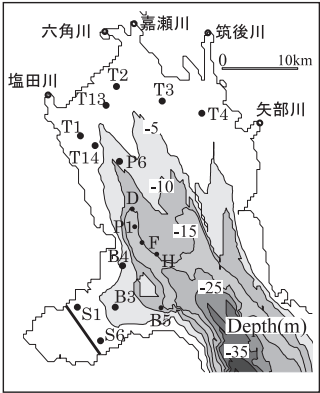


図-1 観測地点位置図

地点が1地点でも出現した場合、その日の全地点のデータを用いて行った。なお、底層DOの欠測時刻のデータについては、その時刻における全地点のデータを欠測扱いとし、分析には用いていない。その結果、分析に供した1地点あたりのデータ数は、全データ数（1632）の約68%である1112となった。

3. クラスタ分析によるDOの時間変動分布の類型化

(1) クラスタ分析の概要

Ward法によるクラスタ分析の結果、図-2に示す樹形図が得られた。図中破線の切断線により、16地点はグループ1（D, P1, B5, F, H）、グループ2（P6, B3, B4, T1, T13, T14）、グループ3（S1, S6）、グループ4（T2, T3, T4）の4つのグループに分類された。

考察に用いる水質データは、各グループ内で地点毎に平均した。図-3～図-6にそれぞれDO、水温、塩分およびクロロフィルa（いずれも表底層）を示す。なお、表層のDOは10地点（D, P1, B5, F, H, P6, B3, B4, S1, S6）、表底層のクロロフィルaは5地点（B5, B3, B4, S1, S6）の観測データのみ取得されているため、それらについては各地点が属するグループ内での平均を示した。また、図-7に示す密度成層強度は、Simpsonら（1974）を参考に、16地点で観測された表底層の密度を基に求めた。これは、成層状態にある水柱の完全混合に必要な単位体積当たりのエネルギーを意味する。併せて図-8に潮位（大浦）の経時変化を、図-9に筑後川の日平均流量と佐賀気象台における日雨量の経時変化を示す。

(2) 分類されたグループの特徴

a) グループ1

グループ1は、水深がT.P.-12～-22mであり、本研究の分析対象地点の中では比較的水深が深く、いずれの地点も西岸の海底水道に沿って分布している。河川の河口から離れているため、スパイクノイズ状の急激な塩分低下は見られないものの、表層では8月上旬の筑後川の出水時に塩分が約20PSUまで低下した。底層には低水温・高塩分の外洋水と思われる水塊が流入・滞留している様子

が確認され、7～8月の密度成層強度は $10 \sim 20 \text{ J/m}^3$ の値で推移し、ピーク時には 40 J/m^3 を超すなど他のグループに比べて大きい期間が多かった。クロロフィルaは、表層、底層共に $40 \mu\text{g/L}$ 程度の値を示す時期も見られたが、ほとんどの期間で $5 \mu\text{g/L}$ 前後の値を示した。

DOは、表層、底層共に他のグループに比べて変動幅が小さくなった。また、表層では貧酸素状態となった期間はなく、底層では8/26～8/29にかけて貧酸素状態が継続していたが、その値が 1 mg/L を下回することはなかった。グループ1では、7～8月にかけて底層に低水温・高塩分の水塊が確認され、他グループと比較してDOが大きいことから、外洋水が底層に継続的に流入しやすく、成層強化と酸素供給が同時に行われていることが推察された。

b) グループ2

グループ2は、水深がT.P.-2～-12mであり、有明海奥部西側の干潟縁辺域を含む領域から諫早湾口にかけて分布している。グループ1と同様にスパイクノイズ状の急激な塩分低下は見られなかった。底層の水温は比較的安定して推移し、期間によってはグループ3や4より 4°C 程低い値を示した。密度成層強度は、グループ1と比較すると同程度の値を示している期間が多く、ピークを示す時期もほぼ同じであったが、ピークから強度が低下する時期は本グループの方が早かった。クロロフィルaは、表層、底層共に $80 \mu\text{g/L}$ 程度の値を示す時期も見られたが、ほとんどの期間で $5 \sim 10 \mu\text{g/L}$ 前後の値を示した。

DOは、表層ではグループ1と同様の分布を示しているが、底層では8/19～9/1にかけて貧酸素状態が継続し、最小値で 0.4 mg/L を示した。グループ2では、水温・塩分がグループ1と類似した傾向を示したことから、底層に外洋水が流入していると考えられる。これは、同時期・近傍地点における徳永ら（2009）の報告と矛盾しない。

c) グループ3

グループ3は、水深がT.P.-3m程度であり、諫早湾奥に位置している。塩分は、表層、底層共に時期によってはスパイクノイズ状の急激な塩分低下が見られた。これは、グループ3に属する地点S1, S6の近傍に排水門があり、降水時の排水によるものと考えられる。底層の水温は、表層のそれと同様の分布傾向を示した。密度成層強度は、時期によっては 20 J/m^3 程度の値を示すことがあるものの、ほとんどの期間では $0 \sim 5 \text{ J/m}^3$ の値で推移した。クロロフィルaは、表層、底層共に他のグループと比較して大きな値を示し、ピーク時には $376 \mu\text{g/L}$ を示した。

DOは、表層、底層共に他のグループに比べて変動幅が最も大きくなった。また、表層では8/29～8/31にかけて、底層では8/25～9/1にかけて貧酸素状態が継続した。特に底層は8/19～8/24にかけても貧酸素状態が継続しており、DOが 0 mg/L となる無酸素状態の期間も確認され

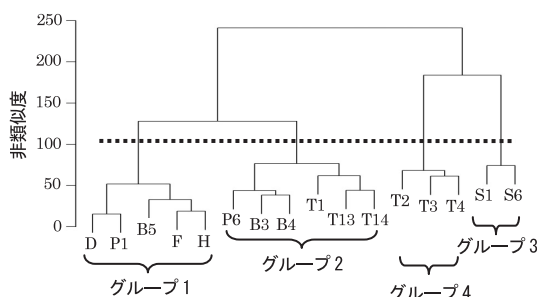


図-2 底層DOに対するクラスタ分析結果（樹形図）

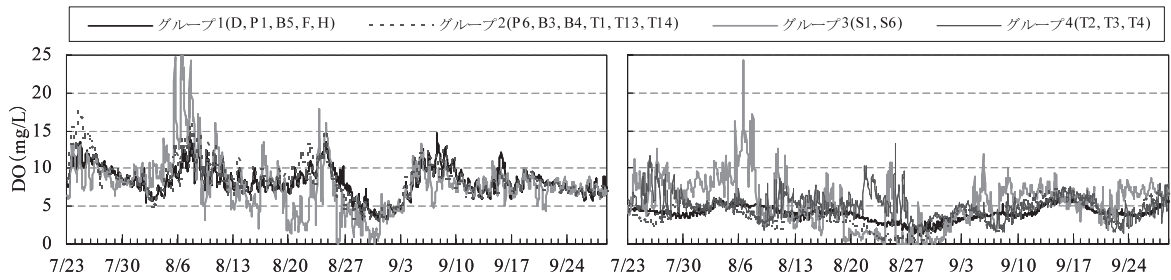


図-3 グループ別のDOの経時変化 (左: 表層, 右: 底層)

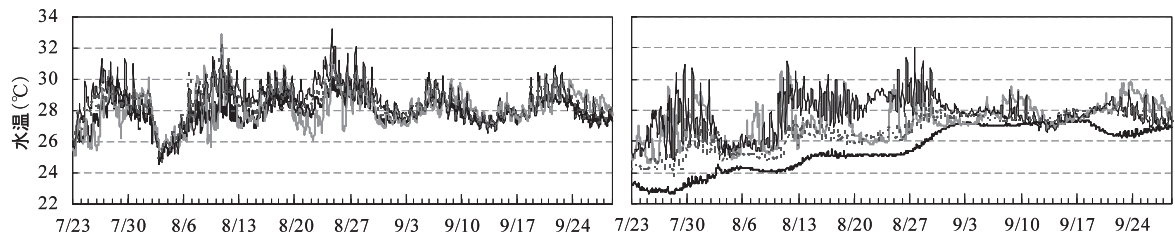


図-4 グループ別の水温の経時変化 (左: 表層, 右: 底層)

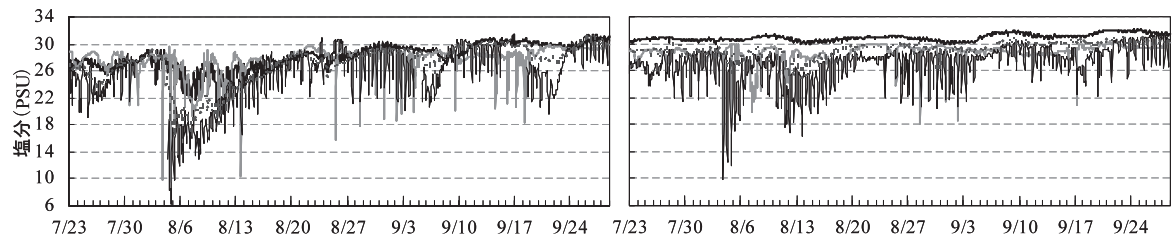


図-5 グループ別の塩分の経時変化 (左: 表層, 右: 底層)

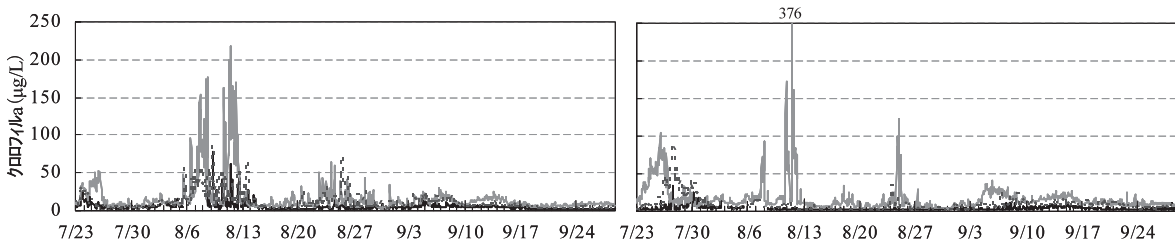


図-6 グループ別のクロロフィルaの経時変化 (左: 表層, 右: 底層)

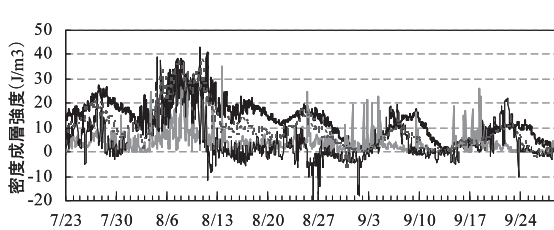


図-7 グループ別の密度成層強度の経時変化

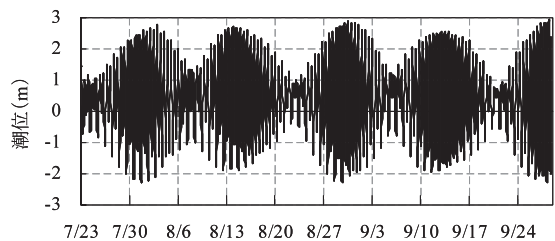


図-8 潮位の経時変化 (大浦)

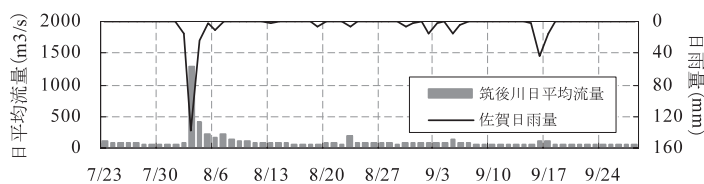


図-9 筑後川の日平均流量および佐賀気象台の日雨量

た。前述のクロロフィル a の傾向を踏まえ、グループ3では植物プランクトンの増加に伴いDOが過飽和になりやすく、その結果、沈降・堆積する有機物量が増加し、貧酸素状態に陥りやすいと考えられる。

d) グループ4

グループ4は、水深がT.P.-2~3mであり、筑後川などの河口に位置している。そのため、塩分は表層、底層共にスパイクノイズ状の急激な塩分低下が繰り返し現れる分布となった。底層の水温は、表層のそれと同様の分布傾向を示した。密度成層強度は、ほとんどの期間で 10J/m^3 の値で推移し、混合状態を意味するマイナスの値を示す期間が約1/3出現した。これは、前述の通りグループ4は河口に位置し、河川水の流入による混合が生じやすいためと考えられる。

底層のDOは、8/27~8/29にかけて貧酸素状態が継続していたが、その値が 1mg/L を下回ることには無かった。グループ4では水深が浅く、河川水の流入による混合が生じやすいためと考えられる。

4. 主成分分析によるDO分布の類型化

(1) 主成分分析の概要

主成分分析は、分析対象データが底層DOのみであり、単位が統一されているため、データの分散をそのまま用いる分散共分散行列により行った。その結果、累積寄与率が約77%となった第1~第3の主成分を解析対象とし、それぞれの主成分得点を求めた。各主成分の寄与率はそれぞれ約49%、約16%、約12%である。

本研究のように、各地点における底層のDOを説明変量

とする場合、第1~3主成分得点は式(1)より得られる。

$$Z_n = \sum_{i=1}^p a_{n,i} x_i \quad (n=1, 2, 3) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p :説明変量の数(地点数)、 $a_{n,i}$:固有ベクトル、 x_i :説明変量(各地点における底層のDO)、 Z_n :第 n 主成分得点である。式(1)より、主成分得点は、地点毎に得られる固有ベクトルとその地点における底層DOとの累積和であることから、主成分毎に得られる固有ベクトルの分布によって、主成分の大まかな特徴を把握できることが分かる。

図-10に第1~第3主成分の固有ベクトル分布を示す。第1主成分の固有ベクトル分布は、全領域で正となり、第1主成分得点は貧酸素状態である地点が少ないほど正に卓越し、貧酸素状態である地点が多いほど負に卓越する。このことから、第1主成分は貧酸素状態の地点数の指標であることが分かった。一方、第2主成分の固有ベクトル分布は北東部で正となり、ここから南西部にかけて負となった。第3主成分の固有ベクトル分布は諫早湾口から塩田川河口付近までの西岸に近い領域で正となり、ここから東岸にかけて負となった。また、諫早湾奥でも負であった。すなわち、第2および第3主成分得点が正に卓越する際には、固有ベクトルが正の地点でDOが高くなる傾向にあり、固有ベクトルが負の地点でDOが低くなる傾向にある。このことから、第2、第3主成分は地域分布特性の指標となることが分かった。

(2) DO分布の類型化の方法

各主成分の指標の意味を踏まえ、第1主成分得点(正または負)と第2または第3主成分得点(正または負)

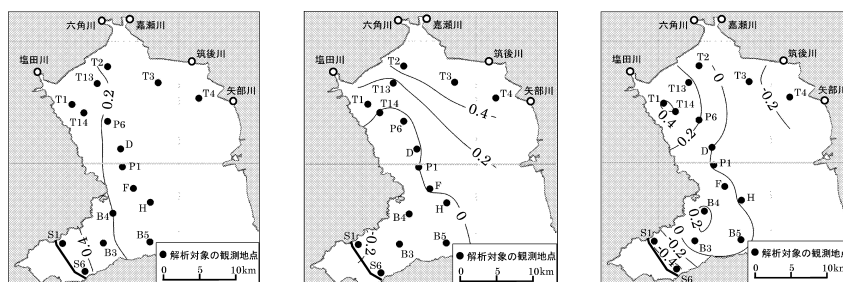


図-10 固有ベクトル分布 (左から、第1主成分、第2主成分および第3主成分)

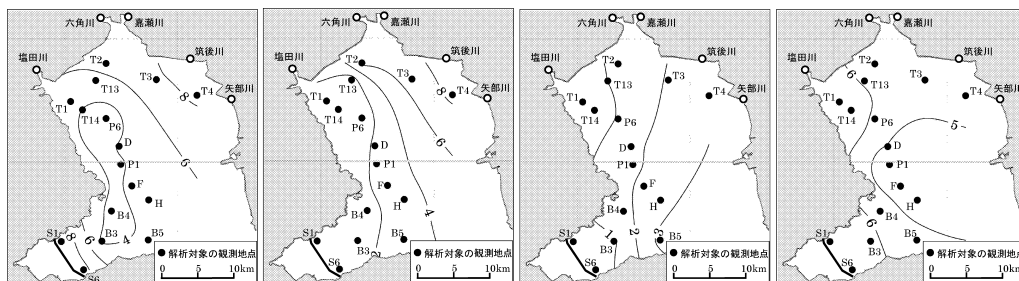


図-11 DOの分布パターン (左から、A、B、CおよびDパターン)

との組み合わせから、観測期間中の底層DOを4つのDO分布に類型化した。具体的には、①各主成分得点の標準偏差 σ (第1主成分: 5.19, 第2主成分: 2.97, 第3主成分: 2.58, 平均値は各主成分いずれも0) を求めて $\pm\sigma$ を閾値とした。②各主成分の得点が閾値を上回る場合 (閾値が正の場合) と下回る場合 (閾値が負の場合) をデータ取得時刻毎に判定した。③そのうち、同一のデータ取得時刻で前述の組み合わせが多く出現する組に関して、データ取得時刻に対応する底層DOを地点毎に平均した。図-11に、A, B, CおよびDパターンのDO分布を示す。

(3) 類型化されたDO分布の特徴

a) Aパターン

Aパターンは、7/23～29のデータが約82%を占め、小潮から中潮に向かう時期であった。P6で貧酸素状態となり、DOが4.0mg/L以下となったB3, B4, P1, P6, T14などグループ1やグループ2に属する地点では、塩分成層は発達せず、底層の水温が他地点と比較して低く、密度成層強度が大きくなった。Aパターンが生じた期間では、流れの減少による底層への酸素供給量の低下に加え、外洋水の流入などにより低水温・高密度の水塊が底層に存在し、水温成層が発達していたと考えられる。

b) Bパターン

Bパターンは、8/21～27のデータのみで占められ、小潮から中潮に向かう時期であった。T2, T3, T4以外の地点でDOが0.9～3.2mg/Lとなり、貧酸素状態の地点が多く出現した。それらの地点のうち、水深が深いB3, B4, B5, D, F, H, P1, P6などグループ1の地点やグループ2に属する地点では、7/23から継続して水温成層が発達していた。一方、水深の浅いS1, S6, T1, T13, T14などグループ2に属する地点やグループ3の地点では、密度成層強度は小さかった。水深が浅く、密度成層強度が小さい地点でもDOが低下した要因として、8/3の降雨に伴う筑後川の河川流量の増加 (1294m³/s) が考えられる。これに伴い、地点によっては8/16まで低塩分となり、密度成層強度も増加した。さらに、河川出水により栄養塩が供給され、植物プランクトンの増殖・枯死に伴い有機物が増加したことも推察された。Bパターンが生じた期間では、流れの減少による底層への酸素供給量の低下や水温成層の発達に加え、河川流量の増加に起因する塩分成層の発達および有機物の蓄積が生じていたと考えられる。

c) Cパターン

Cパターンは、8/27～29のデータが約85%を占め、この期間は中潮から大潮に向かう時期であった。全地点のDOは0.5～3.3mg/Lとなり、ほとんどの地点で貧酸素状態となった。この期間では、S1, S6およびP6地点の表層においても貧酸素状態となった。また、大潮期に向か

うにつれて密度成層強度は小さくなり、T1, T2, T3, T4, T13, T14などグループ2に属する水深の浅い地点およびグループ4の地点では、密度成層強度が負を示し混合状態になっていた。この直前の期間に出現したBパターンにおいて、多くの地点で底層が貧酸素状態となっていたことから、流れの増加により海水混合が卓越し、底層の貧酸素水塊が移動・湧昇したと考えられる。

d) Dパターン

Dパターンは、9/10～12, 17, 26～28のデータで占められ、貧酸素状態の地点は出現しなかった。この期間では、水温・塩分成層の発達などの特徴はみられず、2007年夏季の平常時に生じる分布であると考えられる。

5. おわりに

本研究の結果、クラスター分析を用いた解析では、類似した時間変動を示す観測地点が4つのグループに類型化され、グループによって貧酸素の継続時間が異なることなどを示し、それらの要因が明らかになった。主成分分析を用いた解析では、底層のDO分布が4つのパターンに類型化され、貧酸素水塊の発達・消失の過程を空間的に捉え、その過程が生じた要因が示された。以上の解析から、2007年夏季有明海におけるDOの時空間変動の要因が水質構造より明らかになった。今後は、DO分布の形成要因の1つと考えられる、風に駆動される流れを考慮した解析や他年度のデータを含めた解析を行い、より精細な検討を進めることが必要であると考えられる。

謝辞: 本研究は、貧酸素水塊漁業被害防止法対策事業 (水産庁) 並びに有明海・八代海再生重点課題対策調査 (環境省) による調査結果を西海区水産研究所からご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 九州農政局 (2008): 「有明海の再生に向けた新たな取組」環境変化の仕組みの更なる解明のための調査報告書。
- 滝川 清・田中健路・外村隆臣・西岡律恵・青山千春 (2003): 有明海の過去25年間における海域環境の変動特性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1001-1005.
- 徳永貴久・児玉真史・木元克則・柴原芳一 (2009): 有明海灣奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No.1, pp.1011-1015
- 深山顕寛・磯部雅彦・鯉渕幸生 (2005): 有明海奥部における貧酸素水塊の動態に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.951-955.
- 水越祐一・里村雄彦 (1999): 京都府の冬型降水分布に関する統計的解析, 天気, 第46巻, pp.205-218.
- 山本宗尚・上野健一 (2004): 主成分分析を用いた若狭湾周辺における冬季降水量の主変動解析, 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.5, pp.503-514.
- Simpson, J. H. and J. R. Hunter (1974): Fronts in the Irish Sea, Nature, vol.250, pp.404-406.