野見湾の内部潮汐による海水交換と水止まりによる貧酸素水塊発生に関する研究

山本 潤¹・田中 仁²・佐伯 信哉³

¹正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

(元(独)水産総合研究センター 水産工学研究所)

E-mail:juny@ceri.go.jp

²フェロー会員 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail:tanaka@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

³正会員 (株)荒谷建設コンサルタント 四国支社 (〒790-0045松山市余戸中2丁目1-2)

E-mail:shinya.saeki@aratani.co.jp

養殖の盛んな閉鎖性の内湾である高知県の野見湾では、夏よりも秋に湾内の水質が悪化するケースが多い。それは地元養殖漁業者らの間で漁業被害をもたらす「秋の水止まり」として警戒されている。著者らが観測したところ、夏には潮位差10mを上回る内部潮汐が発生し、これに伴い湾内底層に外海由来の低温・高塩分の水塊が流入していることがわかった。一方、秋には湾内流速が夏に比べ減少し、夏には見られなかった貧酸素水塊が捉えられた。内部潮汐を再現させる計算によって上記現象を検証すると、内部潮汐が野見湾の海水交換に大きく寄与していること、夏は内部潮汐による海水交換によって湾内水質が維持されるが秋には海水交換が不足して貧酸素水塊が発生すること等が明らかとなった。

Key Words : internal tide, slack water, seawater exchange, anoxic water, Nomi Bay

1. はじめに

野見湾は高知県の須崎湾の湾口東側に位置し、海域面積は約4km²、平均水深は18m程度である。ほぼ全域が野見漁港区域に指定されており、湾奥に漁業集落を有し、湾全体が静穏な海面養殖漁場として高密度に利用されている。高知県下で有名な海面養殖漁場であり、タイ、ハマチ、カンパチ、シマアジなど300~400万匹の魚類養殖が行われている。しかし、漁場老朽化によりここ数年で赤潮、貧酸素化、感染症が多発するようになり、平成元年から平成10年までの10年間の総被害額は約10億円にも上っている¹⁾。こうした問題は全国の閉鎖性内湾を利用した養殖漁場でよく見られ、各地でそれぞれ対策が求められている。当地域では、養殖密度の規制や生餌からドライペレット使用への指導を行う等の汚濁負荷低減の努力がなされている他、現状の漁業被害を低減する対策として、貧酸素水塊等の発生初期段階での餌止めや養殖生簀の湾外退避が行われている。

閉鎖性の内湾では、一般的に、夏期には水温上昇により有機物が腐敗しやすく、水質が悪化する例が多い。また、躍層により上下層の混合が阻害され、底層で貧酸素水塊が発生する。やがて秋期になると密度成層が破壊さ

れ上下層の混合が促進されると言われている。しかし、野見湾では夏よりも秋に湾内の水質が悪化してハマチが斃死するケースが多く、夏には内部潮汐による海水交換があるが、秋になるとその内部潮汐が起きなくなり、海水交換が悪くなって水質が悪化する事態が懸念されている。それは地元養殖漁業者らの間で漁業被害をもたらす「秋の水止まり」として経験的にも知られ、警戒されている。

内部潮汐の観測事例としては、野見湾²⁾以外にも、浦ノ内湾³⁾、東京湾^{4) 5)}、五ヶ所湾⁶⁾、英虞湾⁷⁾、アメリカ南西部サンディエゴ周辺の陸棚⁸⁾、フランス北西部のビスケー湾⁹⁾、オーストラリア北西部ダンピア周辺の陸棚¹⁰⁾等があり、内部潮汐がそれぞれの海域の流動や水質環境に多大な影響を及ぼしている旨報告されている。例えば、湾内外の海水交換を引き起こしている他に、内部潮汐の碎波に伴う上下層の混合、発生した湧昇流による有光層への底層の栄養塩供給、強い流れによる海底堆積物の輸送等が示唆されている¹¹⁾。内部潮汐は、成層場における潮汐と地形変化によって発生するものが一般的であるが、気圧変動や風の作用による鉛直運動、太陽放射等による浮力付加、海流の変動、躍層の変化、各層毎の流れ成分の不安定性、流れと地形の干渉等によって発生し、主に

図-1 観測地点

図-2 計測機器の配置例(2004年観測時)

外海で生じて湾内に影響するとともに、成層の強弱に応じて季節的に変動する¹²⁾とも言われている。一方、内部潮汐の計算例としては、Baines¹³⁾が陸棚端における内部潮汐波の発生を特性曲線法を用いて解析しており、近年では日本沿岸の広域的な領域を対象とした八木ら¹⁴⁾の方法や五ヶ所湾を対象として多層レベル密度流モデルの開境界の各層毎に、観測結果から得られた水温振幅を与えるモデルを用いて内部潮汐を再現した武内¹⁵⁾の方法、英虞湾を対象に σ 座標系の流動モデルを用いて開境界に水温と塩分の鉛直分布の観測値を与える上野¹⁶⁾の方法等が知られている。

著者らは野見湾において2001～2004年に流況や水質変動等の観測を行い、夏に発生する内部潮汐や、秋に生じる湾内水の停滞する現象、内部潮汐の発生以前の春から初夏の状況等を観測した。本稿では、これらの現地観測結果から野見湾での内部潮汐と水止まりの状況を示すとともに、内部潮汐による海水交換量の増大と湾内水質維持、「水止まり」現象とそれに伴う貧酸素水塊の発生について、それらを再現する数値計算によって検証し、流動と水質変動機構の解明を試みた。

なお、本論文は既に発表された論文^{17),18),19)}にその後得られた成果を加え、総合的な検討を行ったものである。

2. 現地観測の方法

図-1 に示す野見湾の湾口部、湾中央部、湾奥部等に連続観測用の係留系(図-2)を設置した。それぞれの地点において鉛直方向に1m間隔で水温計、概ね3m間隔で塩分計を配置した。この他、2004年の観測では、生物付着対策を施したワイパー式DO計11台、蛍光光度式DO計2台、水中照度計5台、クロロフィル・濁度計11

台を適宜配置した。2001年は7月12日、2002年は9月25日、2003年は5月27日、2004年は3月16日に観測を開始し、それぞれ約40日間、10分間隔で連続観測を行った。湾口部及び湾中央部、湾奥部には超音波ドップラ流速計(ADCP)を設置し、流速分布を同様に計測した。同時に採水・採泥、垂下式水質計による水温、塩分、DO、クロロフィル、濁度の鉛直分布の多点観測を行った。水質分析は、COD、全窒素、全リン、クロロフィル等、底質分析は、強熱減量、COD、硫化物、全リン、全窒素等を行った。分析は(財)茨城県薬剤師会公衆衛生検査センターに委託した。水質変動の経年変動等のデータ全般の検証には、2002年に当地域に設置された水質自動モニタリング装置である野見湾漁場環境情報システム¹⁾が配信しているデータを用いた。なお、塩分の観測値については、特に表層付近において生物付着による出力低下が著しく、設置及び中間メンテナンス直後の数日間のデータしか使用できなかった。

3. 現地観測の結果と考察

(1) 水温変化から見た内部潮汐の発生状況

図-3(a)に2001年夏の観測期間中の潮位を示す。横軸の一日盛りが1日である。潮汐差は小潮で約1m、大潮で約2m程度である。(b)～(d)に夏の水温鉛直分布の経時変化を示す。この図で水温20～30℃を濃淡で表記して、内部潮汐の発生状況を表現した。図中の濃淡の境界線、すなわち等温線の上下変化を見ることにより、躍層の上下運動が確認できる。躍層の動きと横軸の目盛との関係から、内部潮汐の周期は約1日と半日程度の二成分と見られる。その潮位差は縦軸の目盛から概ね5～10m程度、湾口部で頻繁にそれを上回り、表面潮汐と比較し内部潮

図-3 水温鉛直分布の経時変化 (2001年)

汐の潮位差が格段に大きいことがわかる。このことは、後述する内部潮汐による海水交換量が表面潮汐によるものと比較し、大きいことを示唆している。また、(a)との関係から、内部潮汐と表面潮汐の位相は合っており、内部潮汐の振幅の大小と表面潮汐の大潮・小潮は無関係である。

(2) 内部潮汐の挙動

図4に水温と流速の鉛直分布を示す。横軸はすべて時間(日)で、観測開始当初の7月14日から3日分を表示した。これは後述する数値計算で再現する期間でもある。(b)と(d)は、湾口部及び湾奥部での ADCP により計測した湾軸方向流速の鉛直分布の時系列データの一例である。縦軸は底面に設置した ADCP からの高さとし、一目盛は5mである。図中の色は湾内方向流速を正にとり、±20cm/sを上下限として濃淡で表現した。水温鉛直分布の経時変化からわかる内部潮汐の挙動と流れとの関係論を論じるために、(a)と(c)に図-3から一部抜粋した水温鉛直分布の湾口部と湾奥部のデータも併せて示す。

(a)と(c)の水温経時変化図において、底層に低温水が見られる時間帯を比較すると、湾口部から湾奥部に向かい数時間のタイムラグが見られる。すなわち、湾口から湾内に流入した外海水が数時間の間に中央部を通過して湾奥に達したことが示唆される。

(a)と(c)で底層に低温水が見られる時間帯には、(b)と(d)で底層に湾内方向への流れが卓越していることが確

図-4 内部潮汐の挙動

認できる。また、(a)と(c)で底層の水温が上がって表層と底層の水温差が小さくなる時は、(b)と(d)の底層にお

図-5 夏と秋の水温鉛直分布比較

いて湾外方向への流れが卓越していることがわかる。さらに、(b)と(c)より、底層で湾内方向の流れがある時は、表層では湾外方向へ、底層で湾外方向の流れがある時は、表層では湾内方向へそれぞれ逆向きの二層流が生じていることがわかる。このことは、後述する図-8(c)においても確認できる。

(3) 秋の水止まりの状況

夏と秋の水温鉛直分布の経時変化の一例を図-5に示す。(a)は夏、(b)は秋の観測値である。横軸は日付で(a)は2001年7月12日から、(b)は2002年9月25日からそれぞれ10日分表示した。縦軸を水深とし、水温20～30℃を濃淡で表示した。(a)では、前述のとおり、内部潮汐の存在を確認できたが、(b)に示すように、秋になると表層から底層まで水温差がなく、時間的にも約26℃程度で一定であることが明らかである。このことは、躍層が完全に消滅し、夏に見られた内部潮汐が秋には存在しないことを意味する。流速については後節で述べる。なお、底層の水温のみに着目すると、夏よりも秋の方が水温が高いことが判明した。それは後述する図-7(c)と(d)を見比べても明らかである。このことは、夏よりも秋の方が底質の酸素消費速度が大きく、秋の方が底層の貧酸素化が起きやすい状況にあることを意味する。

図-6に夏と秋の1日毎のT-Sダイアグラムを示す。横軸は塩分、縦軸は水温である。凡例は水温・塩分計の設置水深であり、水深毎に濃淡で形を変えた印を付けた。図

図-6 夏と秋のT-S曲線

図-7 水温の経時変化

中の斜線は等密度を表す σ_t 曲線であり、図中の左上が軽く、右下が重いことを意味する。この分布から、1日あたりの水塊の挙動を見ることができる。(a)は2001年夏のデータである。夏には表層では水温が高く塩分が低い状態であり、底層では外海水の特徴である水温が低く塩分が高い状態と表層水と同等の状態との間を行き来してい

図-8 季節毎の流速の経時変化

の様子が見られる。これは、底層に外海水が流入してきたため、高塩分、低温を意味する右下方向に値が広く分布したものと考えられる。

(b)より、秋では表層から底層まで水温と塩分は変化せず一定値となることがわかる。また、(c)の降雨時には表層のみ一時的に塩分濃度が低下しているが、中層や底層はほとんど変化していないことがわかる。

(4) 季節毎の水温変化

図-7は湾中央部における(a)春、(b)初夏、(c)夏、(d)秋の表層、中層、底層の水温の経時変化を比較したものである。夏には表層と底層で約 10°C 程度の水温差が生じ、中層以下で内部潮汐に伴う大きな変動が見られた。秋では全層でほぼ同じ水温となり、内部潮汐に伴う変動はなく、表層のみ僅かに日変動を示しながら冬に向かい全層で徐々に水温が低下した。春は全層で同じ水温であったものが、徐々に上昇しはじめた。表層と底層とで温度差はあまり見られない。初夏は水温が上昇する過程において、徐々に表層と底層の水温差が生じ始め弱い躍層が形成されるが、すぐに元の等密度に戻る状態を数回繰り返し、やがて夏の成層状態となった。この時期は、冬の状態から夏の内部潮汐が起きる成層期に至る遷移段階であり、6月後半以降は混合状態に戻ることなく夏期の成層状態となった。これらの水温の経時変化図から、内部潮汐は7月頃にはじまり、9月に終わることがわかる。

(5) 季節毎の流れの状況

図-8に季節毎の湾口部における表層と底層の湾軸方向流速の経時変化を示す。左側が湾内方向を正にした湾軸

方向流速の折線表示であり、右側がその鉛直分布であり、濃淡で $\pm 20\text{cm/s}$ を表示した。(c)に示す夏には内部潮汐に伴う流れが顕著であり、前述の通り、二層流を形成している。また、それらは概ね半日程度の周期で交互に繰り返している。特に、底層の流速は $\pm 20\sim 40\text{cm/s}$ 程度であることがわかる。一方、(d)の秋ではその流速が $\pm 5\text{cm/s}$ 程度以内に小さくなり、湾内水が停滞する「水止まり」と呼ばれる現象が生じていることが確認できる。なお、(a)に示す春でも流況は秋と同様であることがわかる。

2003年初夏には最低気圧 955hPa の台風6号が九州の西海上を北上し、対馬付近から日本海を北北東に通過した。この台風及び前線の影響で九州から近畿地方にかけて広い地域で大雨・暴風となった。野見湾ではこの影響が(b)の6月19日午後に見られ、表層から 30cm/s 程度の流速で流入し、中・底層から流出する状態が継続した。6月19日午後の流速値は、(c)に見られる通り、夏の内部潮汐とほぼ同等であり、継続時間も同様であった。なお、台風来襲時を除けば、初夏の水温は春と夏の間様の様相を呈し、僅かではあるが内部潮汐に伴う弱い二層流が見られはじめる。これらの流速の経時変化図からも、前節と同様に、内部潮汐は7月に明確となり始め8月に最大となつて9月に終わることが確認された。

(6) 水質底質分析結果

図-9に水質分析結果を示す。COD、全窒素、全リンとともに、環境基準²⁰⁾の類型C、類型4の値を縦軸の上限にとった。CODについては、夏に表層の一点で若干高めの値を示したが、底層の方が低く、一時的に給餌の影響

図-9 水質分析結果

表-1 底質分析結果

採取日：2001年7月12日

採取場所	湾口部	湾中央部	湾奥部	北側枝湾	南側枝湾(西)
水分 (%)	24.0	33.9	32.4	29.8	33.5
強熱減量 (%)	4.5	7.4	6.3	6.0	7.5
硫化物 (mg/g)	0.13	0.46	0.42	0.35	0.23
全窒素 (mg/g)	0.72	2.9	1.6	1.9	1.8
全りん (mg/g)	0.61	11.0	1.9	6.1	2.6
COD _{sed} (mg/g)	5.6	14.0	15.0	11.0	17.0
C/N比 (—)	47	11	13	17	13

分析結果は乾燥試料当たりの値

を受けた可能性がある。それを含めても、CODは概ね環境基準の類型Aに属し、良好な状態を維持していると言える。全窒素と全リンは同基準の類型3から4に属しており、富栄養状態の湾であることがわかる。(b)と(c)から、全窒素と全リンの年変動の傾向として、夏よりも秋に高くなる傾向が共通して見られる。

底質の分析結果を表-1に示す。水産用水基準の底質の項目²¹⁾によれば、野見湾の底泥汚濁の特徴として、湾中央部から湾奥部にかけて広範囲(湾中央、南枝湾、湾奥部)において底泥汚濁がやや進行している状態にある。また、同基準の合成指標²²⁾では、底質の判断基準の各要素の基準値が、(1)COD: 20.9mg/g, (2)強熱減量: 7.99%, (3)泥分含有率: 64.9%, (4)全硫化物: 0.51mg/g, (5)底層のマクロベントス群集の多様度2.69ビット等であり、これらの合成指標が負で底層水のDOが4.3mg/l以上であれば「正常な底質」、その逆が「汚染された底質」とであると判断される。このうち観測データのない(3)と(5)を除く項目で、いずれも観測値が基準値を下回っており、合成指標は概ね負であると考えられる。底層水のDOについては後述するが、夏はほぼ飽和状態であるため、少なくとも夏は「正常な底質」とであると判断される。

さらに、貧酸素化が慢性的に発生する英虞湾の底質²³⁾

図-10 夏と秋のDOの違い

と比較しても、野見湾の底泥汚濁状況はそれほど深刻な状況にないことが明らかになった。これより、野見湾の貧酸素化は、一般に貧酸素化の要因と言われる底泥汚濁に起因しているのではない可能性が高い。底泥汚濁以外の貧酸素化要因としては、魚類養殖の給餌による魚類の活性の増大や残存物質により水中の酸素消費が増大している可能性が上げられる。

(7) 秋の貧酸素水塊の発生

図-10に、溶存酸素濃度の時系列データを示す。横軸一目盛は1日で、(a)は7月13日から、(b)は9月28日から10日間を表示した。縦軸はDOmg/lである。(c)には、参考のために同期間の湾中央部表層の流速を示す。(a)では湾内底層においても高い値を維持しており、夏の観測期間中に貧酸素水塊の発生は認められなかった。(b)では湾口部底層では高い値を維持していたが、湾中央部底層において貧酸素状態が度々認められた。(b)の湾中央底層では、日中に低下し夜間に回復する傾向が見られた。これは、給餌時刻や養殖魚の活性、表層水の冷却による鉛直混合等が影響した可能性がある。それならば、夏でも同様の傾向を示さなければならないが、その傾向は見られなかった。夏には内部潮汐による海水交換があるため、湾中央底層のDOは、常に外海と同様である湾口部底層のDOに極めて近くなるからであると思われる。その根拠は以下のことから示される。(b)の湾中央底層の貧酸素状態が外海水の流入によって急激に回復する現象が何度か発生した。それらは(c)の矢印で示したように、秋には概して流速が小さくなっているものの、僅かながら外海から湾奥方向への5~10cm/s程度の弱い流れが底層で認められており、貧酸素の回復がその時間帯の直後

図-11 計算格子図

に見られる．このことから，外海水の若干の流入でも一時的に貧酸素の回復をもたらしたと言え，さらに，底層で20～40cm/s程度の湾内方向流速が生じている夏には，その流れが存在する限りDOの高い状態を維持できる可能性があることを示唆している．この効果は次章で扱われる．

4. 数値計算による海水交換の検証

(1) 計算方法

野見湾の流況や海水交換，水質変動等に及ぼす内部潮汐の役割を明らかにすることを目的に，数値計算による検討を行った．野見湾を図-11 のとおり 50m×50m，鉛直 2mの格子に切り，マルチレベルモデルで現象を再現した．平均海面をx-y平面として，南北方向にx軸，東西方向にy軸，鉛直方向にz軸をとり，それぞれ北向き，西向き，上向きを正とした．図中の縦・横軸にはメッシュ数を示した．計算プログラムは日本造船学会のMECモデル²⁴⁾の一部を引用して次の通り作成した．N.S.の運動方程式(1)，(2)は水平方向のみを陽解法で解き，鉛直方向は静水圧近似とし，鉛直流速は連続式(3)より求めた．時間ステップはCFL条件を満たすように1.5秒とした．潮位は図-3(a)の観測値を各時間ステップ毎に沖側の開境界に入力した．水温，塩分，DOは，それぞれ(4)～(6)の移流拡散式で解いた．それらの初期値として，観測結果の再現計算開始時における値を用いた．計算は満潮時から開始しているため，流速の初期値は0.0m/sとした．内部潮汐を再現するため，境界条件として，湾口で観測した水温と塩分濃度の鉛直分布の時系列値を鉛直及び時間的に補間し，開境界へ逐次入力する武内¹⁵⁾や上

野¹⁶⁾らの手法を用いた．さらに，貧酸素水塊の発生を再現するために，DOについても同様に入力するとともに，全体の初期条件としても使用した．

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + \quad (1)$$

$$f \cdot v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

$$- f \cdot u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_m \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

$$+ A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial x} - v \frac{\partial S}{\partial y} - w \frac{\partial S}{\partial z} \quad (5)$$

$$+ A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -u \frac{\partial D}{\partial x} - v \frac{\partial D}{\partial y} - w \frac{\partial D}{\partial z} \quad (6)$$

$$+ A_c \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left(\frac{\partial D}{\partial z} \right) \right\}$$

$$+ D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5$$

$$D_1 = 2.78 \cdot 10^{-5} \cdot \left\{ \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) - 1 \right\} / 2 \quad (\text{mg/l/s}) \quad (7)$$

$$D_2 = 4.72 \cdot 10^{-6} \cdot \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right\} / 2 \quad (\text{mg/l/s}) \quad (8)$$

$$\cdot \exp \left(-\frac{1.7}{D_s} z \right)$$

$$D_3 = k \cdot (D_{\text{SAT}} - D) \times \frac{1}{\Delta z_s} \quad (\text{mg/l/s}) \quad (9)$$

$$D_4 = -1.67 \times 10^{-6} \quad (\text{mg/l/s}) \quad (10)$$

$$D_5 = \frac{-1.56 \times 10^{-5}}{\Delta z_B} \quad (\text{mg/l/s}) \quad (11)$$

ここで、 u , v , w , p , ρ , f , T , S , D , A_m , K_m , A_c , K_c は、それぞれ、 $x \cdot y \cdot z$ 方向の流速、圧力、海水密度、コリオリのパラメーター、水温、塩分濃度、溶存酸素濃度、水平・鉛直渦動粘性係数、水平・鉛直拡散係数である。各種係数は、堀江²⁵⁾、村上²⁶⁾等が用いている値を参考に、ここでは、底面の抵抗係数を 0.0026 とし、水平方向の渦動粘性係数はリチャードソンの 4/3 乗則に基づいて本計算で用いる格子幅に適切と考えられる $1.0\text{m}^2/\text{s}$ とし、拡散係数を $0.1\text{m}^2/\text{s}$ とした。鉛直方向の渦動粘性係数及び拡散係数については、成層が発達し鉛直混合が妨げられた状態と考えると、それぞれ 1.0×10^5 , $1.0 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$ に設定した。DO計算においては、主に高知県水産試験場による野見湾での観測値^{27), 28)}を用いた。 $D_1 \sim D_5$ は、養殖魚の呼吸、植物プランクトンによる酸素生産、表層での再曝気、水中の酸素消費、底質の酸素消費を指す。単位水塊あたりの養殖魚の呼吸による消費量 D_1 (mg/l/s)は、養殖魚類の総呼吸量推算値 $4,802\text{kg/h}$ を湾内容積 $4.8 \times 10^7\text{m}^3$ で割り、日中に負のピークが来る三角関数を乗じることにより式(7)のとおり算出した。ただし、 n は計算ステップ数、 N は1日あたりの計算ステップ数である。光合成による酸素生産量 D_2 (mg/l/s)も同様に、高知水試が明暗瓶によって得た 0.017mg/l/h に対し、日中に正のピークが来るように三角関数を乗じ、さらに、水深 z による光の減衰の影響を負の指数関数的に考慮した式(8)とした。その際に用いる透明度 D_3 は照度の観測結果から 6.0m とした。水中の酸素消費速度 0.006mg/l/h 、底質の酸素消費速度 0.056g/h/m^2 は一定として計算に用いた。大気からの溶入量 D_4 (mg/l/s)は、観測期間中の風速の平均値(約 2m/s)から、藤原²⁹⁾と同様の手法により物質移動係数 k として 3.35×10^6 を求め、式(9)により算出した。 D_{SAT} は飽和溶存酸素濃度、 Δz_s , Δz_b はそれぞれ表層と底層の層厚である。

なお、以上の値は主に夏の通常の天候時を想定した係数の設定であるが、3.(3)で言及したように底層の水温は夏より秋の方が高く、本来ならば、特に底層の酸素消費速度について秋の方が大きい値として設定される。しかし、秋の貧酸素水塊の発生が「水止まり」によるものであることを証明するためには、この係数を夏と同条件にしておき、内部潮汐の有無による流況の違いのみを詳細に見積もる必要がある。上記の理由から、夏と秋の酸素消費に関する係数は同じものを用いた。

(2) 計算結果の再現性の確認

図-12は湾中央部と湾奥部の水温の計算値と観測値を比較したものである。内部潮汐によって特に水深5m以深の水温が大きく変動しているが、計算結果はその現象を精度良く再現していることがわかる。ただし、下段の湾奥部では計算結果が平滑化されたものとなっており、

図-12 計算結果の確認 (夏の水温)

図-13 計算結果の確認 (夏の流速)

境界から離れる程、再現した内部潮汐が弱まって湾奥部で誤差が生じていることは否めない。

図-13は湾奥部における流速の計算値と観測値を比較したものである。底層の湾外方向流速の計算結果が観測

(a) 2001年夏のDO

(b) 2002年秋のDO

図-14 計算結果の確認(DO)

値を下回っており、湾奥部での内部潮汐の挙動が過小評価されているが、傾向として計算結果と観測結果は一致しており、内部潮汐に伴う二層流が概ね再現できていることが確認できる。

図-14は夏と秋のDOの計算結果と観測値である。DOについては水温や流速と比べると計算精度が劣る。計算の誤差は、湾内各点で一定に設定した酸素消費速度が実際には不均一であることや給餌に伴う急激な酸素消費が生じること等の影響によるものと考えられ、これ以上の精度向上を行うには、全ての生簀の管理と給餌状況の把握が必要となる。以下、この計算方法、各種係数を用いて内部潮汐の有無による海水交換や貧酸素水塊の発生について検討する。それぞれの計算条件はまとめて表-2に示す。

(3) 計算結果と考察

図-15には、計算開始時に図-11のように湾内全層に配置しておいたマーカーの残留率を逐次カウントし、湾内水の残留率を表した結果を示す。なお、マーカーは各時間ステップ毎にその位置における流速(u , v , w)を用いて三次元的に移動させており、粒子拡散は考慮していない。図中には、内部潮汐が発生しないように境界の水温・塩分を固定して、表面潮汐だけを発生させて計算を行った結果も併せて示す。計算結果から、湾内水の全容積に対する一日あたりの外海水との交換率は、夏の内部潮汐ありの場合で0.281、夏の内部潮汐なしの場合0.0735、

表-2 計算ケース一覧

図-15

凡例名称	初期値	境界条件
夏の内部潮汐あり	夏の水温・塩分	夏の水温・塩分時系列値
夏の内部潮汐なし	夏の水温・塩分	夏の水温・塩分初期値固定
秋の水止まり	秋の水温・塩分	秋の水温・塩分時系列値

図-16

凡例名称	初期値	境界条件
夏の内部潮汐あり	夏の水温・塩分・DO	夏の水温・塩分・DO時系列値
秋の水止まり	秋の水温・塩分・夏のDO	秋の水温・塩分・夏のDO時系列値

酸素消費・生産速度：全て共通

図-15 湾内水の残留率

図-16 内部潮汐の有無によるDOの違い

秋の水止まりの場合0.0568である。夏には内部潮汐によって大きな海水交換量が得られたが、秋では「水止まり」が生じて湾内水が停滞し、海水交換量が大幅に減少していることがわかる。また、内部潮汐がなければ、海水交換が少ないことも確かめられた。これは秋の水止まりを再現したものによく似ており、秋の水止まりは内部潮汐が完全に止まった状態であるといえる。

図-16には夏と秋の現況を再現する計算において、どちらも夏のDOを初期条件・境界条件として比較計算した結果を示す。まず、境界となる湾口部のDOは夏・秋共に表層から底層まで概ね高い値を示す観測結果が得られている。次に、秋には湾内流速が小さくなり、海水交換量が大幅に減少する計算結果が先に得られている。この状況において湾内のDO収支を計算すると、夏には湾口部の高いDOを示す水塊が湾内底層へと大量に流入す

図-17 DO消費と生産速度の把握

るため、湾中央部の DO は湾口部の水塊の影響を受け、底層でも貧酸素化は生じない。一方、秋には夏と同じ酸素消費の条件かつ同じ境界の DO を用いているが、外海から高い DO の水塊が流入しなくなるため、結果として湾内底層で貧酸素化が生じていることが図-16 からわかる。

5. 湾内の酸素収支から見た内部潮汐の役割

(1) 養殖漁場内で必要とされる DO

DO の許容限界として、原田³⁰⁾は DO 飽和度で約 70% がブリの摂餌活性の限度と推定している。井上³¹⁾は原田の実験資料に基づき、DO が 5.7mg/l 以上あればブリは安全であるが、4.3mg/l 以下になると摂餌量が減少し、2.8mg/l 以下になると斃死すると総括している。また、平田³²⁾は鹿児島東町の海面養殖漁場で実施した調査結果から、DO 減少率（養殖漁場外の DO 最大値に対する養殖漁場内の DO 最小値の差の割合）と養殖魚斃死率との間に強い相関があることを示している。さらに、平田らは門脇³³⁾の実験から、給餌日の DO 消費量（平均 315mg/kg/h）は無給餌日（平均 188mg/kg/h）より 1.7 倍も多く、DO 消費のピークは摂餌の 2～3 時間後に見られることを示している。

(2) 湾内の酸素収支

図-17 は溶存酸素収支計算における各項の寄与度の概略を確認するために、それぞれの消費・生産速度を時系列で表示したものである。ただし、この図では底質の酸素消費と表層再曝気による酸素供給を水柱平均値に換算して表示しているため、両者は過小に表示されている。この図から、野見湾の酸素収支では養殖魚の呼吸の占める割合が大きく、過密養殖が直接的に貧酸素状態を引き起こしていることが明らかである。その不足分を補うものは、光合成と再曝気及び海水交換による酸素の供給と

図-18 湾内の酸素収支（日平均）

なる。

図-18 には (a) 内部潮汐がある場合と (b) ない場合、及び (c) 後者において養殖量を現況の 1/3 に規制した場合の湾内の酸素収支を示す。数値は式(7)～(11)で用いた酸素消費・生産速度の日平均値を用いている。養殖魚の呼吸量は日中に 4,802kg/h のピークとなる湾内の養殖魚類の総呼吸量推算値の一日平均の 2,401kg/h を使い、(c) はその 1/3 とした。水中の酸素消費・生産速度はそれぞれ単位体積あたりの係数 0.006mg/lh と 0.017mg/lh に湾内水の全容積 $4.8 \times 10^7 \text{m}^3$ を乗じた 288.0kg/h、816.0kg/h とし、全ケースで一定とした。同様に底質の酸素消費も全ケースで 229.6kg/h、表層での再曝気による酸素供給は 337.0kg/h とした。一方、外海の DO を水温 26℃、塩分 34psu での飽和

状態である 6.53mg/l と想定し、呼吸によって前節で示したブリの斃死限界である 2.80mg/l まで酸素を消費できると考え、海水交換に伴う外海からの酸素供給は、この差に図-15で得られた湾内水の全容積に対する一日あたりの外海水との交換率 0.281 （内部潮汐あり）と 0.0735 （内部潮汐なし）の時間平均を乗じて、それぞれ 2079.4kg/h 、 421.8kg/h とした。

この図から、(a)内部潮汐がある場合には養殖魚の呼吸による酸素消費が大きいものの、内部潮汐による外海からの酸素供給がそれを補い、全体として酸素供給が消費を上回るため養殖漁場は良好な状態を維持できる。ところが、(b)内部潮汐がない場合には外海からの酸素供給が極端に減少するため、その他が同値でも全体の供給と消費のバランスが崩れ消費過多となり、貧酸素水塊発生に至る状況となったことが明らかである。このため、内部潮汐がない状況で湾全体の酸素供給と消費が平衡するためには、試行の結果、(c)養殖量を現況の $1/3$ 程度以下にしなければならないという計算結果が得られた。

このことは内部潮汐が酸素収支から見た湾内養殖可能性を約3倍程度に高めていることを意味する。経済的な理由から漁業者らが養殖筏数・養殖密度を増やす傾向にあるため、養殖量を現況の $1/3$ 程度に抑制すべきところであるが、夏には内部潮汐による海水交換があるため湾内の酸素収支が平衡して問題とならず、彼らの賛同を得にくい。しかし、内部潮汐が弱まる秋頃には湾内の酸素収支が消費過多となって湾内が貧酸素化することが明らかである。

なお、ここでは水中と底質の酸素消費を一定としたが、養殖量の違いによる残餌や排泄物による水中及び底質の酸素消費の変化まで考慮すれば、養殖量抑制の効果はさらに大きく算出される。貧酸素水塊発生の初期段階での餌止めや生簀の湾外避難等の対策が実際に当地域で行われており、一時的にはそれが有効であるが、前述の通り、養殖密度の規制措置が十分理にかなったものであるため、漁業者らのより一層の理解と協力を得る必要があると言える。

6. おわりに

本研究では、夏の内部潮汐や秋の水止まり、貧酸素水塊等を捉える現地観測を行い、それらを再現する数値計算を行ってきた。これにより、内部潮汐の季節変化やその特徴について考察するとともに、秋の水止まりと貧酸素化の因果関係を解明してきた。本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 野見湾の内部潮汐は7月にその存在が明確となり始め、7月後半から8月に顕著となり、9月には終わる

ことが確認された。内部潮汐の潮位差は概ね $5\sim 10\text{m}$ 程度で、 10m を上回ることもある。その位相は野見湾の表面潮汐と無関係であり、他所で生じて野見湾に影響したものと考えられる。内部潮汐は二層流を形成し、その流速は $20\sim 40\text{cm/s}$ に達した。

- (2) 秋には表層から底層まで水温と塩分がほぼ一定となり、時間的にも変動しない。流速が 5cm/s 程度と小さくなって湾内水が停滞する「水止まり」が生じている。
- (3) 内部潮汐による海水交換量は、表面潮汐のみによる海水交換量の数倍に達する。このため、夏は湾内の酸素消費が多くても、内部潮汐により湾外の高いDOの水が湾内底層に流入しており、湾内のDOは概ね高い値を維持している。
- (4) 秋には湾口部底層のDOが概ね高い値を示していたが、湾内水の停滞によって外海水が湾内に入らず、湾内の酸素消費過多により、貧酸素化が生じた。当地域で湾内の貧酸素化が通常予想される夏ではなく秋に生じる理由は、夏には内部潮汐による海水交換があるが、秋になると海水交換不足を生じるからである。
- (5) 内部潮汐は、酸素収支から見た湾内の養殖可能性を約3倍程度に高めている。内部潮汐の存在を前提とした養殖量では、内部潮汐が存在する夏には湾内の酸素収支は平衡しているが、内部潮汐が弱まる秋頃には湾内の酸素収支が消費過多となることが明らかとなった。

謝辞：本調査・研究は、数値計算等の基礎部分が運営費交付金「閉鎖性水域における流動・水質変動機構の定量的評価手法の開発」、現地観測等の現場応用的部分が水産基盤整備調査費委託「漁港水域における水質・底質改善技術の開発」により行われた。

本調査を進めるにあたり、須崎市水産課、高知県水産試験場、高知県漁港課・水産振興課、野見漁業協同組合、大谷漁業協同組合の方々には多大なる協力を頂いた。観測現場では(株)荒谷建設コンサルタント四国支社が適切に作業を行った。紙面にて心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 上野成三、永田良助、山崎英活、中山哲殿：赤潮・貧酸素をリアルタイムに観測する野見湾漁場環境情報システム(nomi BAY WATCH SYSTEM)の開発、海岸工学論文集、第49巻、pp. 1531-1535, 2002.
- 2) 萩野静也：成層した内湾の漁場水理環境に関する研究、水工研技報、No.14, pp.1-49, 1993.
- 3) 宇景志浩、木村晴保：成層期の浦の内湾の海水混合と水塊形成に及ぼす内部波の役割、海岸工学論文集、第33巻、pp. 606-610, 1986.
- 4) 上野成三、灘岡和夫、勝井秀博、大谷英夫：密度成層期の東京湾で発生する密度・流動・水質場の急変現象と内部波に関する現地観測、海岸工学論文集、第40巻、pp. 246-250, 1993.

- 5) 日向博文, 八木宏, 灘岡和夫, 斉藤輝彦, 田淵博嗣: 夏季東京湾における内部潮汐の基本特性について, 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp.426-430, 2000.
- 6) 藤原建紀, 高橋鉄哉, 阿保勝之, 杜多哲: 内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換, 海岸工学論文集, 第 42 卷, pp. 1111-1115, 1995.
- 7) 杜多哲, 阿保勝之: 内部潮汐の sill 越えによる英虞湾への湾外低温水の侵入, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp. 1166-1170, 1997.
- 8) Lerczak, J. A., Winant, C. D. and Hendershott, M. C. : Observations of the semidiurnal internal tide on the southern California slope and shelf, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. C3, pp.1-13, 2003.
- 9) Pichon, A. and Correard, S. M. : Internal tides modeling in the bay of Biscay comparisons with observations, *Acta for a special volume on the 8th Symposium of the Bay of Biscay*, pp.1-38, 2002
- 10) Peter, E. Holloway. and Paul, G. Chatwin. : Internal Tide Observations from the Australian North West Shelf in Summer 1995 : *Journal of Physical Oceanography*, Vol.31, No.5, pp.1182-1199,2001.
- 11) 日比谷紀之: 内部潮汐波の発生・伝達機構, 沿岸海洋研究ノート, 第 25 巻, 第 2 号, pp.177-190, 1988.
- 12) 宇野木早苗, 久保田雅久: 海洋の波と流れの科学, 347p., 東海大学出版会, 1996.
- 13) Baines, P.G. : On internal tide generation, *Deep-Sea Research*, vol. 29, No. 3A: 307-338, 1982.
- 14) 栃木謙一, 八木宏, プリラシド: 日本沿岸の内部潮汐波強度の推定, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.416-420, 2003.
- 15) 武内智行: 内部潮汐を考慮した湾の流況予測シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.1141-1145, 1996.
- 16) 上野成三, 灘岡和夫, 高山百合子, 勝井秀博: 内部潮汐を考慮した英虞湾の流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.466-470, 1999.
- 17) 山本潤, 中山哲蔵, 時吉学, 宮地健司: 野見湾における夏期の流況と水質変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.1086-1090, 2002.
- 18) 山本潤, 時吉学, 佐伯信哉, 上野成三: 閉鎖性内湾における秋期の水止まり現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.941-945, 2003.
- 19) 山本潤, 佐伯信哉: 野見湾での初夏の流況と水質変動及び赤潮発生を捉える現地観測, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 951-955, 2004.
- 20) 環境庁(現環境省): 水質汚濁に係る環境基準について, 別表 2, 生活環境の保全に関する環境基準, 環境庁告示第 59 号, 改正平 15 環告 123, 2003.
- 21) 日本水産資源保護協会: 水産用水基準(1995 年版), 68p., 1995.
- 22) 日本水産資源保護協会: 水産用水基準(2000 年版), 96p., 2000.
- 23) 上野成三, 灘岡和夫, 片倉徳男, 勝井英博, 山田二久次: 英虞湾の真珠養殖漁場における底泥の汚濁流動層に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.1046-1050, 2000.
- 24) 日本造船学会: ME C モデルワークショップ (第 1 回), 日本造船学会海洋環境研究委員会海洋モデル検討専門委員会, 107p., 2000.
- 25) 堀江毅: 沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 港湾技研資料, No. 360, pp.1-222, 1980.
- 26) 村上和男: 海水密度の分布を考慮した流れの数値計算法, 港湾技研資料, No. 665, pp.1-33, 1990.
- 27) 高知県水産試験場: 魚類養殖環境自家汚染防除技術開発試験-3-, 昭和 51 年度指定調査研究総合助成事業研究報告書, 48p., 1977.
- 28) 高知県水産試験場: 平成 9 年度高知県水産試験場事業報告書, 第 95 巻, 333p., 1999.
- 29) 藤原正幸, 久保敏, 山本正昭: 砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境, 水産工学研究所技報, 水産算土木第 15 号, pp.17-30, 1993.
- 30) 原田輝雄: ブリの養殖に関する研究, pp.1-291, 近大農紀要 3, 1965.
- 31) 井上裕雄: 養殖漁場環境の管理. 浅海養殖と自家汚染 (日本水産学会編), pp.88-108, 恒星社厚生閣, 1977.
- 32) 平田八郎, 門脇秀策: 2. 適正利用基準. 2. 酸素収支. 海面養殖と養魚場環境 (日本水産学会編), pp.28-38, 恒星社厚生閣, 1990.
- 33) 門脇秀策, 加世堂輝男, 中菌貫幸: 給餌・無給餌によるハマチ群の見かけの酸素消費量, pp.173-178, 鹿大農紀要 3, 1981.

(2006. 1. 20 受付)

STUDY ON WATER EXCHANGE DUE TO INTERNAL TIDES AND ANOXIC WATER FORMATION BY AUTUMN SLACK WATER IN NOMI BAY, JAPAN

Jun YAMAMOTO, Hitoshi TANAKA and Shinya SAEKI

Internal tides were observed during summer in Nomi Bay in Kochi Prefecture, Japan, where extensive aquaculture has been carried out, and DO was sufficiently high even at the bottom. Meanwhile, slack water and anoxic water formation were observed during autumn. It is generally well known that anoxic water forms in summer due to strong stratification in vertical direction and it disappears in autumn. Contrary to this general expectation, however, the water quality in Nomi Bay was worse in autumn than that in summer. Thus, the effect of the internal tide is quantitatively investigated using a numerical model. It is concluded that internal tides enhance the exchange of seawater, being helpful for maintaining the good water quality of the inner area in Nomi Bay.