

小規模養殖場の環境変動と養殖魚の斃死率

安田秀一*¹・杉原滋彦*²・千手智晴*³・高橋幸則*⁴

Environmental Variations Concerned with the Mortality Rate of Yellowtails in a Small-Scale Culture Field

Hidekazu Yasuda*¹, Shigehiko Sugihara*², Tomoharu Senjyu*³, and Yukinori Takahashi*⁴

Field experiments focusing on the variation in dissolved oxygen were carried out from July to September, 2000, in a small-scale culture field to elucidate the cause of the mass death which often took place there. These experiments revealed that the concentration of the dissolved oxygen(DO) widely changed with the diurnal or shorter period though it also changed over the period of several days. Currents affecting on the environmental variations were rather curious. The M2 current was very small and the components with the periods of 17.1 hours and 21.2 hours(the inertia period)were clearly recognized although M2 and S2 were fairly dominant regarding the tides.

The mortality rate of each fish in the culture field varied day by day. It has been recognized from examination that the high mortality rate of yellowtails that was major component well corresponded to the deficiency of DO, which occurred with the period of several days. We couldn't elucidate the cause of the DO variation with this period of several days though it was recognized that the short-term variation of one day or less was induced by the current changes.

1 はじめに

養殖技術の進歩に伴って養殖場からの漁獲高は増え続けてきたが、最近では養殖場の汚染のために、赤潮や病気などが頻発するようになり、養殖場によっては生け簀が削減されるなど、養殖魚介類へのダメージが問題となっている。下関市北部に隣接する豊浦郡豊浦町黒井で営まれている養殖場でも、例年のように代表的な養殖魚であるハマチの大量斃死が発生しているが、その原因は、主にブリの連鎖球

菌症によるものであることがわかってきた¹⁾。この発症は、例年夏から秋にかけて多いことから、当初は、水温が高くなることに原因があるのではないかとされていたが、最近の魚病学の室内実験から、海水中の溶存酸素量の減少に伴う免疫力の低下によるものではないかと報告されている²⁾。

養殖場の魚介類の管理においては、水質の調査に基づいて、その対策の検討や調査がされることが多いが^{3), 4)}、変動の大きい沿岸海域にも関わらず、時系列的なデータに着目して養殖場内の環境調査を系統的に実施した例はあまり

2001年10月16日受付. Received Oct. 16, 2001

* 1 水産大学校水産情報経営学科 (Department of Fisheries Information and Management, National Fisheries University)

* 2 水産大学校海洋生産管理学科 (Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University)

* 3 九州大学応用力学研究所 (Research Institute of Applied Mechanics, Kyushu University)

* 4 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University)

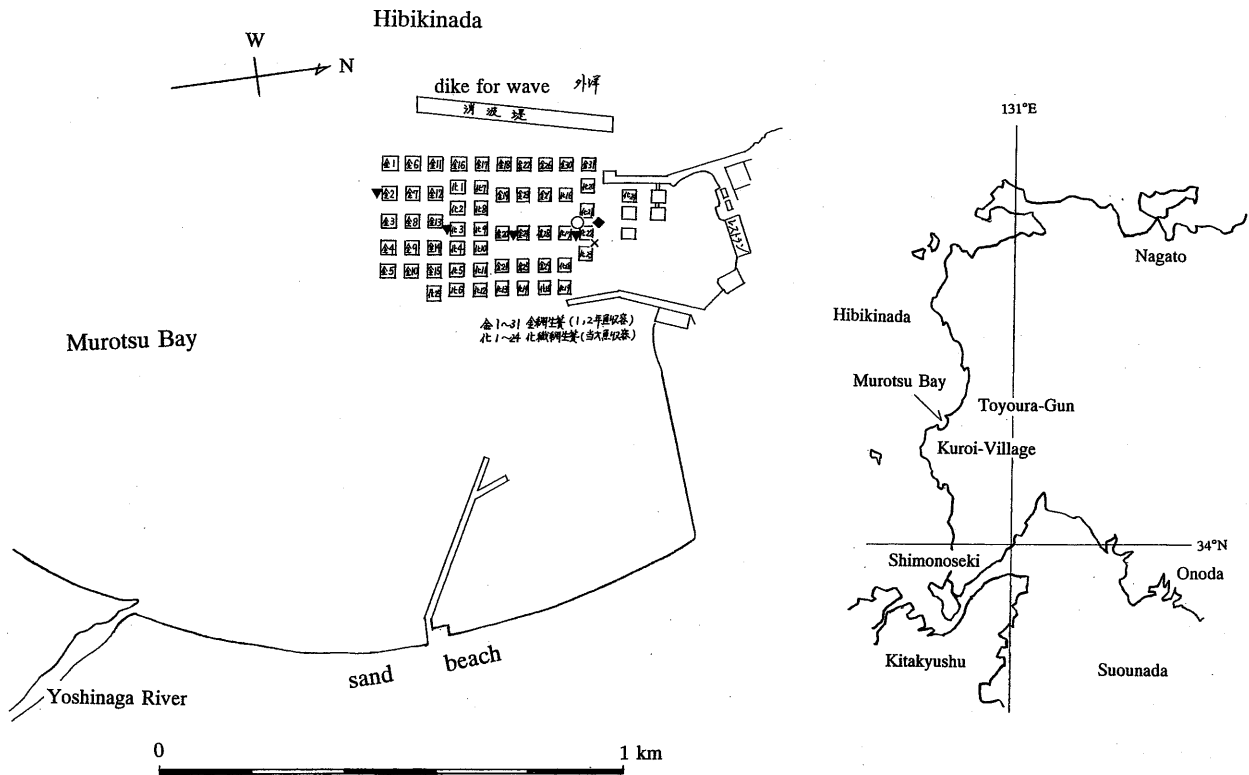


Fig. 1. Location of Kuroi culture field and distribution of fish preserves.

ないようである。本研究では、溶存酸素に関わる室内実験結果と、この養殖場におけるこれまでの報告に基づいて、養殖場内の溶存酸素の変動に着目して係留系を設置し、2000年の7月中旬から9月下旬まで海洋環境調査を実施した。その観測結果の解析によって、溶存酸素の変動などに関する新たな知見が得られたのでここに報告する。

2 観測内容

黒井養殖場はFig. 1のように響灘に面する小内湾である室津湾の北部に位置し、生け簀は図中のように配置されている。養殖場内の平均水深は、生け簀の高さの2倍程度の7mから8mとかなり浅く水域の容積が小さいことから、溶存酸素(以下DOで表記)の低下を引き起こしやすい環境といえるかもしれない。この研究における観測内容は下記の通りである。

- (1) 毎週1度のCTDによる多項目の各層観測
 [▼印 4 測点; 2000年7月11日～9月26日
 (約2.5ヶ月間)]
- (2) CTDによる1時間毎の昼夜観測
 [○印; 9月12日10時～9月13日11時(25時間)]

- (3) DO計の係留による海底上1mのDO、水温、塩分の1時間毎の連続測定
 [×印; 7月18日～9月21日(約2ヶ月間)]
- (4) C/Tタワーの係留による海底上0.5m、1m、1.5m、2mにおける流れと濁度および海底上2.2mにおける水温、塩分、水圧(潮位)の10分毎の連続測定
 [◆印; 9月5日～9月25日(20日間)]

CTDはアレック電子製のクロロテック(型番ACL208-PDK)と呼ばれるもので、水温、塩分、濁度、溶存酸素、クロロフィルaの鉛直分布が測定できる。DO計はアレック電子製ADO-8Mで、測定間隔はバッテリーとメモリーの容量から1時間毎にし、8月17日にはバッテリーとメモリーパックの交換を行っている。C/Tタワーは、海底近傍の流れと濁度、更に水温、塩分、水圧(潮位)の時間変動を測定する装置で、これについては文献^{5), 6)}に詳細を記している。この観測では10分間隔ごとのバーストモードで測定し、各時刻におけるデータは、1秒毎に20個のデータを測定して20秒間平均値を基本データとした。

ハマチなどの養殖魚の斃死は、例年夏の終わりから初秋のDOが下がる頃にかけて生じることが多いことから、DOに係わる環境変動の概要を把握するために(1)の観測を実施した。

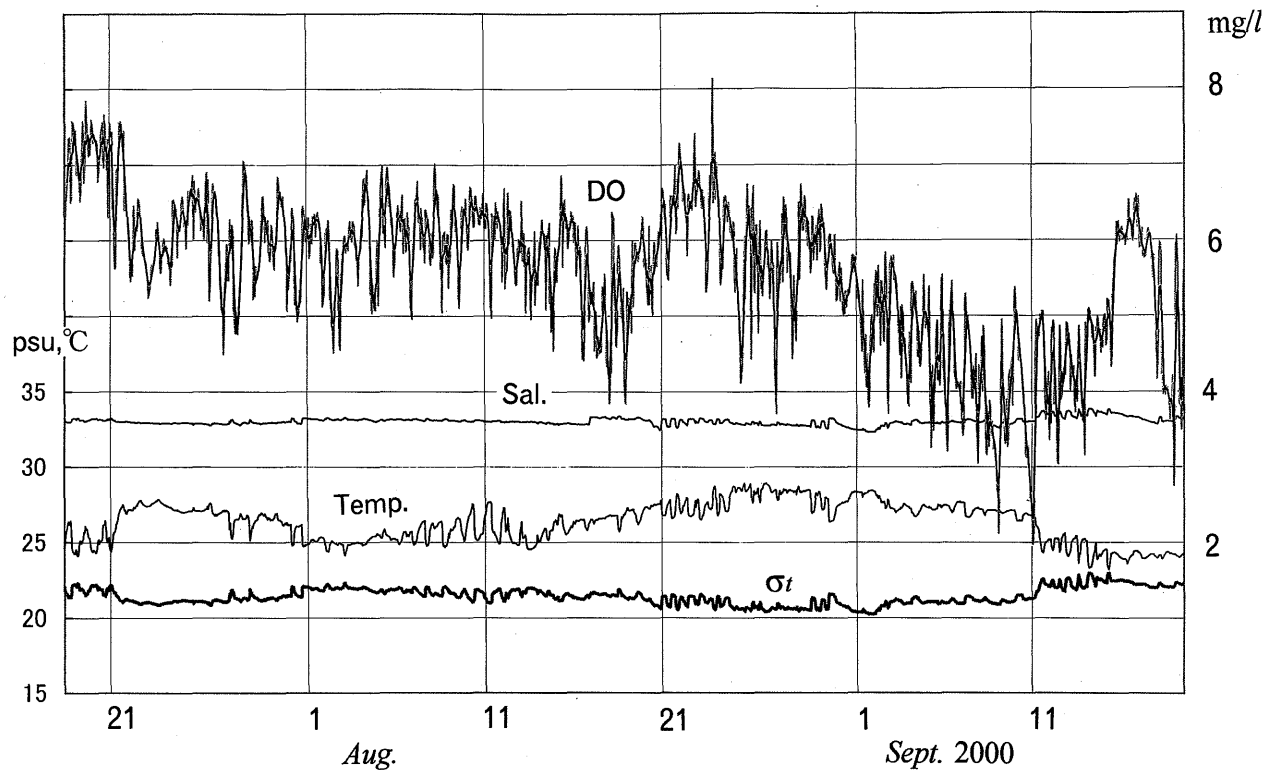


Fig. 2. Variations with time of DO measured every hour(light and thick line) and 6 hour running averaged DO(deep and thin line) at the level of 1 meter above the sea floor. Temperature and salinity, the sensors of which are installed on the DO meter, are also drawn here.

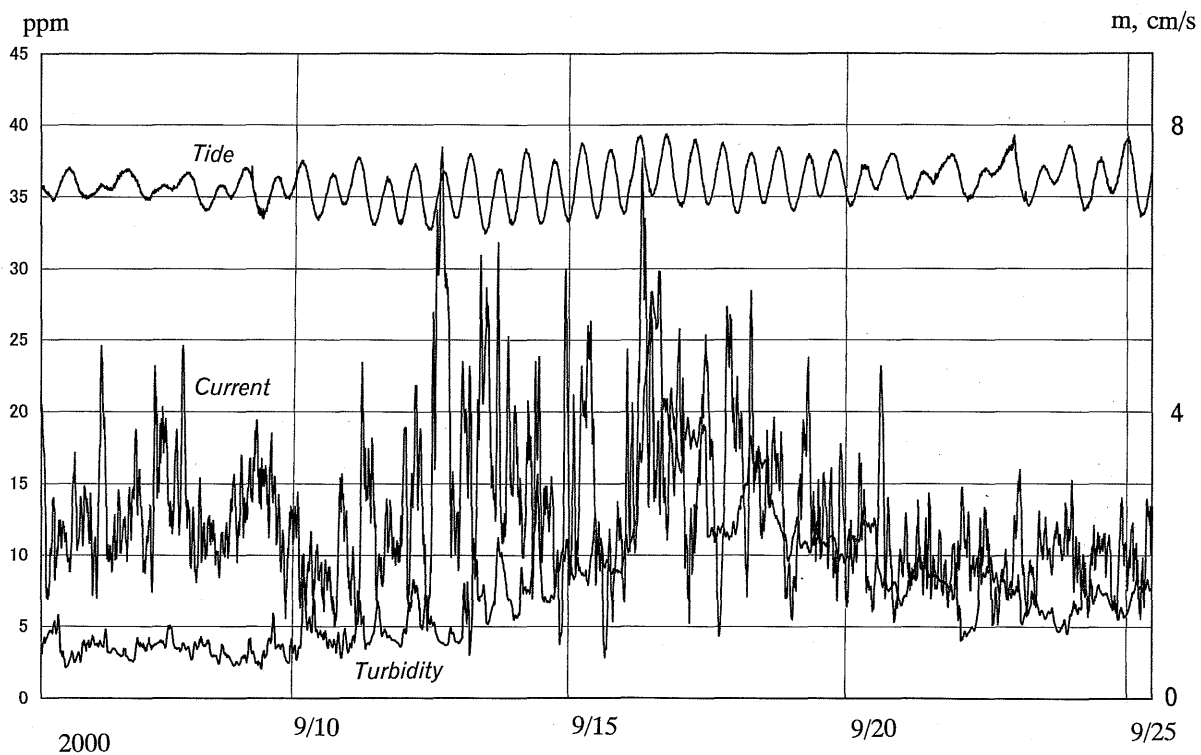


Fig. 3. Variations with time of the current speed at the level of 2 meters, water pressure(tidal level)and turbidity at the levels 0.5 and 2 meters above the sea floor.

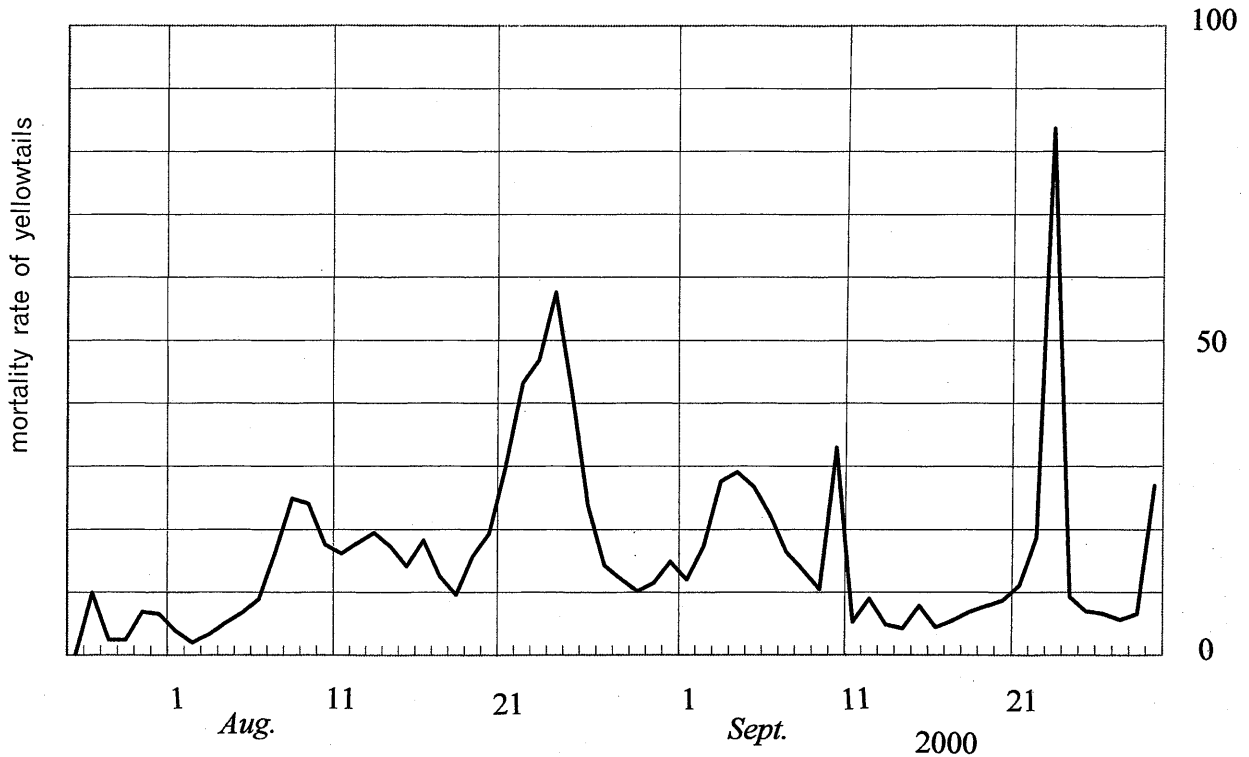


Fig. 4. Diurnal variation of yellowtails' mortality rate.

Period	Tides		Tidal Currents(B+ 2 m)		
	Amplitude	Phase Lag	Amplitude	Orientation	Phase Lag
Residual	712.5 cm		1.86 cm/s	170°	
MS _f (14.8d)	12.3	313°	0.86	75	61°
O ₁ (25.8h)	10.5	120	0.17	85	136
K ₁ (23.9h)	6.6	211	0.44	242	41
[21.2h]	0.4	328	0.45	227	99
[17.1h]	0.8	269	0.61	230	23
M ₂ (12.4h)	28.3	30	0.12	160	100
S ₂ (12.0h)	18.3	258	0.30	260	153

Table 1. Harmonic constants of tidal level and currents at the level of 2 m above the sea floor.

また、ハマチの大量斃死は、例年、9月の中頃前後に頻発していることから、その頃の様子を詳細に把握するために、養殖場内で(2)の観測を行った。

(3)と(4)は、メモリーやバッテリーの容量と作業上の都合から、大量斃死が発生する可能性の高い時期を、過去の情報に基づいて設定し実施したもので、(4)に関しては、海水中のDOの低下は、海底に堆積した有機物（餌や排泄物など）の再懸濁に係わっているのではないかと予測に基づいて行った。

3 観測結果

週一度のCTD観測によると、大雨の時やその直後は、部分的に上層で低塩分の測点もあったが、それ以外の時には4測点の水温や塩分は、水平的にはほとんど一様で、鉛直的には各測点で多少の変動が認められた^{7), 8)}。

Fig. 2 は、DO計による観測期間中の溶存酸素の変動を描いたもので、短周期の変動が激しいことから、6時間の移動平均をとって細い実線で表した。DOの値は右の縦軸に表した。

これを見ると、1日程度かそれより短い周期の大きな変

動があることがわかる。また少し長い目で見ると、8月中旬には一時的に4.2~4.5mg/lまで低下し、その後一旦上昇し、8月末から9月10日頃まで徐々に低下し、10日前後においては2mg/l近くまで下がっている。9月中旬の後半からはDOは急激に回復し、数日間6mg/l程度に維持されて、さらに再び4mg/l以下に急激に低下するという現象が認められる。

9月16日には台風14号が対馬海峡を北上し、13日から15日までの3日間にかけて計40mmの降雨があった⁷⁾が、この台風による南風が養殖場の海水の鉛直混合を促進し、DOを上昇させたものと考えられる。

8月下旬頃のDOの緩やかな回復は、台風のような風ではなく、8月17日から21日までの4日間で計100mmの降雨⁷⁾に対応しているようであるが、降雨とDOの回復の関連性については原因はよくわからない。

なお、文献^{7), 8)}によると、Fig. 2のようなDOの時間変動は空間的な変動よりもかなり大きいことから、Fig. 2のようなDOの変動は、養殖場内全体にわたるものと思われる。また、移動平均で消えた短周期の大きな変動については、別の機会に議論する。

Fig. 3は、C/Tタワーで得られた海底上2mの流速値と濁度、および潮位の変動を描いたものである。左の縦軸は濁度の濃度(ppm)、右は流れ(cm/s)と潮位(m)の数値を示している。

潮位のデータによると、秋の大潮と呼ばれる9月の中旬においては、日潮不等の目立たないきれいな正弦波を示しているが、この期間以外においては日潮不等がかなり目立っている。潮差は大きいときには約1mあるが、流れの強さは必ずしも潮差の大きさに対応しているようには見受けられない。

濁度は赤外後方散乱方式で測定しており、真の濁度を表しているわけではないが、相対的な値として定性的な傾向は十分に表していると考えられる。ちなみに観測期間中の濁度の平均値は、海底上2m、1m、0.5mのそれぞれにおいて、7.80ppm、8.14ppm、11.31ppmであった(海底上1.5mのセンサーは9月20日頃から異常値を示したのでここでは省いた)。Fig. 3の中には描いていないが、平均値からもわかるように、濁度は海底に近い方で高くなっており、ここに見られる変動は、再懸濁によるものであろうと考えられる。しかしながら、再懸濁は強い潮流で引き起こされることが知られている^{6), 9), 10)}が、この図をみると、濁度は流れの強さに対応しているようには認められない。流れの強さが数cm/sであることから、そのような流れが

再懸濁を引き起こすとは考えにくい。なお、台風14号の通過時には、このデータの流れは大きな影響を受けていないように見えるが、底層の濁度はかなり高くなっており、気象擾乱に伴う底泥の再懸濁が推察される。

4 斃死率(ハマチ)の推移

黒井養殖場には、Fig. 1のように生け簀があり、ハマチやブリ、タイが養殖されているが、死亡率は当歳魚[その年の3月から4月にかけて稚魚として採られた一歳未満の魚]が高いことから、Fig. 4には観測期間中における当歳魚(ハマチ)の1日毎の斃死率[(斃死匹数/当日までの生存匹数)×100%]を表した。

それによると、8月下旬前半の斃死率の上昇は、8月中旬後半のDOの低下に影響を受けたものと推測される。8月末からのDOの漸減は9月上旬の斃死率に反映されているものと見なすこともできる。9月10日前後のDOの低下は、観測期間中でも最低値になっていることがわかるが、斃死率は8月下旬のものほど高くはない。9月半ばのDOの急上昇とその後の急低下は9月下旬の斃死率の急上昇に対応づけることができそうである。

このような両図の比較から、DOの低下は斃死率の上昇に関わりがあるといえるが、さらに、DO低下の速さが遅い場合には斃死率は抑制され(9月10日を除いたその前後10日間)、急激に低下する場合には斃死率は高くなりやすい(8月23日頃)ことがうかがえる。養殖ハマチの観察から、DOが高い場合には食欲が盛んで、ハマチの酸素消費量が高くなり、DOが低くなると食欲が落ちて酸素消費量が減少することが知られている¹¹⁾が、前記のDOの変化率と斃死率の関係はこの観察結果から説明することができる。

つまり、DOがゆっくりと減少する場合には食欲も徐々に落ちて酸素摂取量も減り、低いDOの中でも耐えることができるが、DOの急激な低下の場合には酸素要求量が減らないままに酸素が不足することとなって斃死に至ると考えられることができる。

5 観測データの解析

流れは、弱いながらも数cm/s程度のものが認められる。流速センサーによって得られた15日間(9月5日~9月20日)の「海底上2mの流れ」と圧力センサーによる「潮位」の調和解析結果をTable 1に記す。表に示した調和常数の

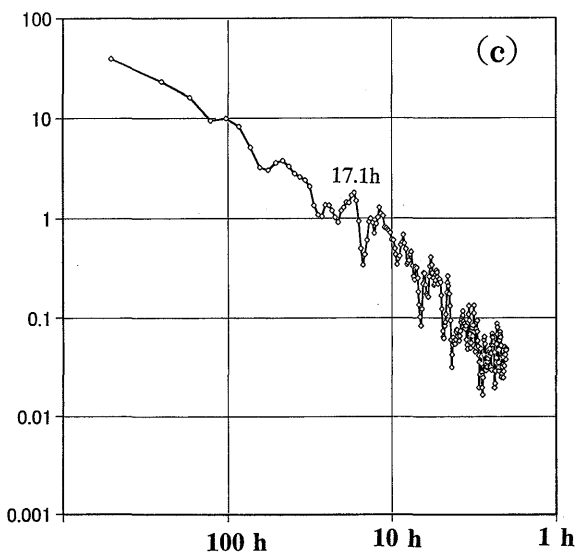
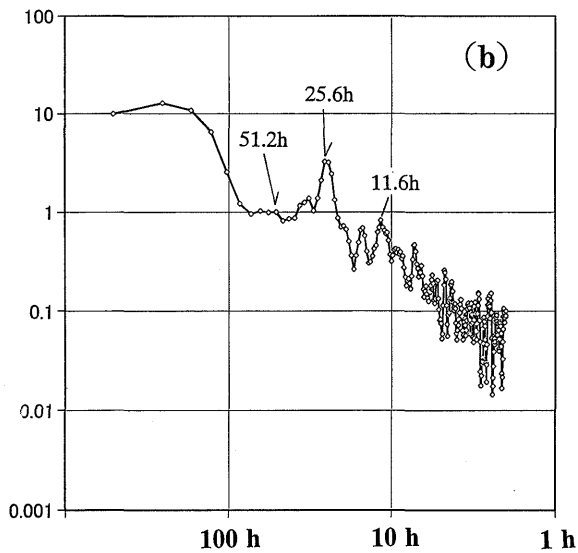
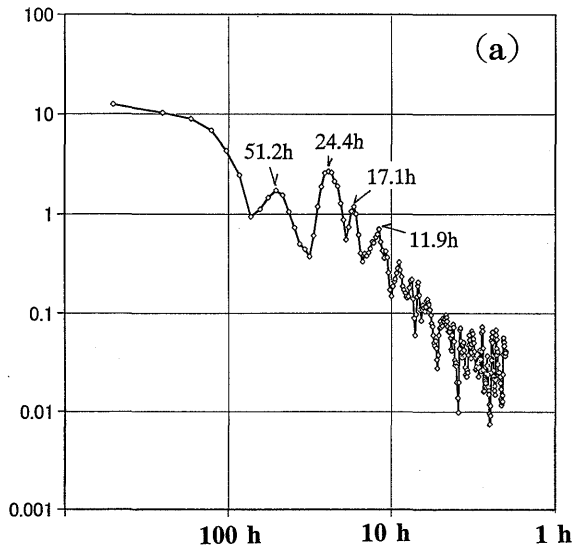


Fig. 5. Spectra of DO in the first(a), middle(b) and last periods(c) of the observation duration.

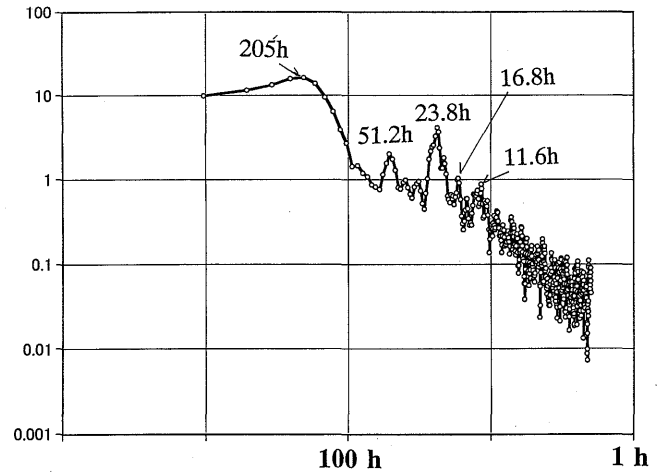


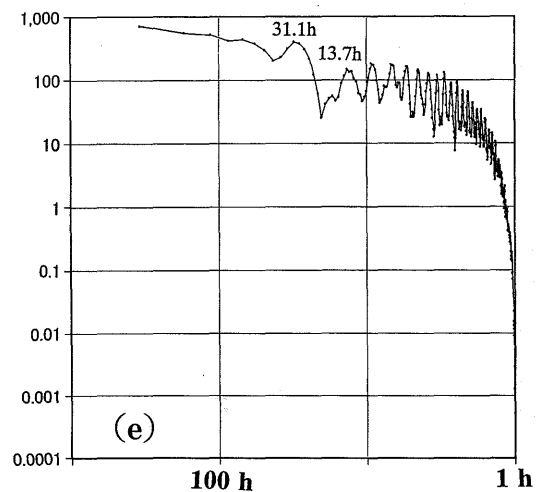
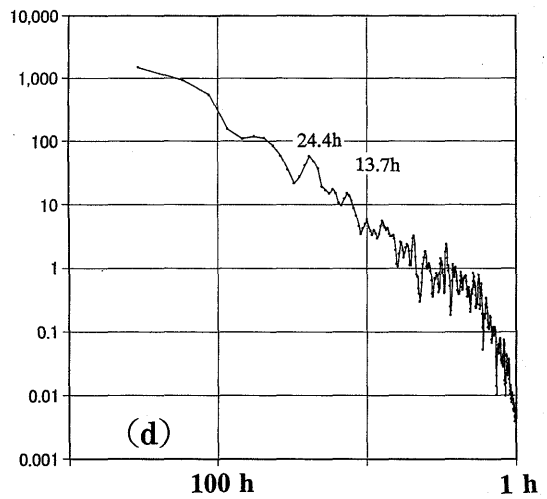
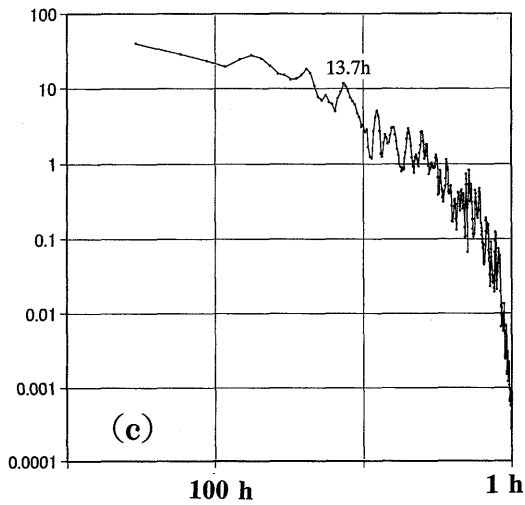
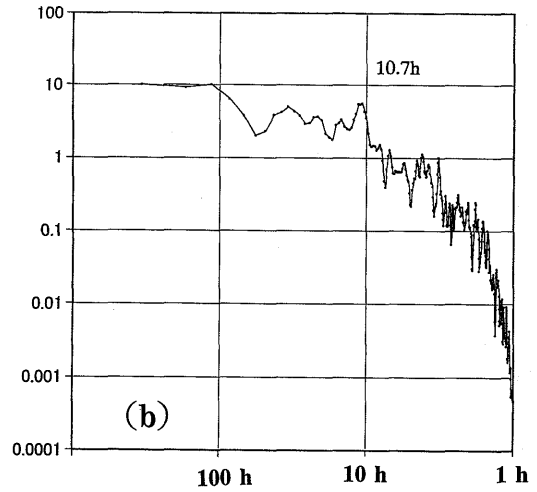
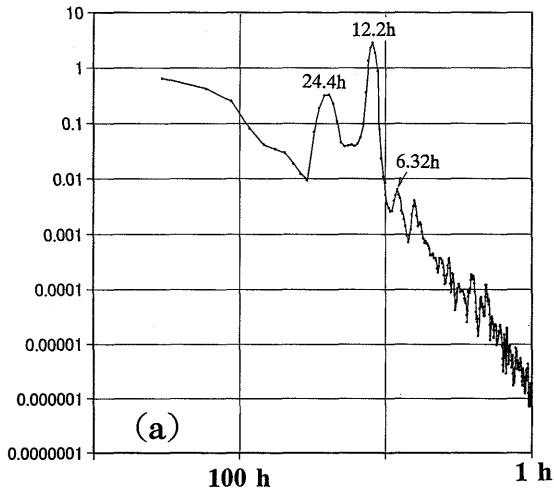
Fig. 6. Spectrum of DO over the first and middle periods.

振動周期は、流れまたは潮位において、数値がある程度の大きさをもって有意であると思われるもののみを取り上げたが、一般の内湾や内海でみられる観測結果のように流れと潮位の振幅が対応しているようには見受けられない。

例えば潮汐については、M2成分(周期12.4時間)やS2成分(周期12.0時間)が優勢であるにもかかわらず、流れにはほとんど現れず、逆に、21.2時間や17.1時間の周期ところには、潮位は目立たないが流れにはピークが出るという、一見不可思議な様相を呈している。この傾向はO1成分(周期25.8時間)とK1成分(周期23.9時間)の間にも認めることができる。つまりO1成分の潮汐はK1成分の2倍近くあるにもかかわらず、流れについては、逆にK1成分の方が3倍近く大きくなっている。流れの中で優勢な、K1成分と21.2時間周期成分および17.1時間周期成分のそれぞれの方に注目すると、3成分ともほとんど同じ方向に振動している。このことから、これら3つの成分については、値は小さいものの有意な流れであるといえる。因みにこの21.2時間の周期はこの緯度における慣性周期に相当するが、17.1時間についてはその成因は不明である。

流速センサーについては、海底上1.5mのセンサーは不調であったが、0.5mと1.0mのセンサーの傾向も、ここに挙げた2.0mのものと同様であった。

Fig. 5はDO計で測定された溶存酸素のスペクトル(FFT)をとったものである。このデータは2ヶ月分あることから、512時間(21日8時間)毎の3つの期間に分けて順に(a), (b), (c)に表した。つまり、(a)は7月18日から8月8日まで、(b)は8月8日から8月29日、(c)が8月29日から9月20日までのものである。これらを見ると、全体的に、1日や半日のところにスペクトルのピークがあるが、流れと同



じように(a)と(c)においては、17.1時間のところにもピークが認められる。さらに、議論の余地は残るが、2日程度の変動もあるのではないかとと思われる。

さらに長周期の変動を調べるために、7月18日から8月29日までの1024時間(42日16時間)のデータからスペクトルを求めFig. 6に描いた。これを見ると205時間の変動があるのではないかとみることができる。これが養殖魚の斃死に関わる変動周期と思えるが、この点については、今後、さらに長い期間の観測データの解析を行う必要がある。

Fig. 7は、Fig. 3に示したC/Tタワーのデータから求めた、潮位(a)と、海底上2.0m、0.5mの流れのスピード(b)、(c)と濁度(d)、(e)のスペクトルである。生データは10分間毎にとっているが、解析に際しては1時間の移動平均をとってFFTで処理している。解析に用いたデータ期間は10分間の2048個を用いたため、14.2日となっている。

このデータ期間のために、M2成分とS2成分の分離がうまくできないが、潮位(水圧)に注目すると、半日付近には明瞭なピークがあり、さらに1日のピークもシャープに

Fig. 7. Spectra of the tidal level(a), the current speed at the levels of 2.0 m(b) and 0.5 m(c) above the sea floor and turbidity at the levels of 2.0 m(d) and 0.5m(e) above the sea floor.

示されている。

流れについては、文献^{6), 10)}のように、濁度との関連性を検討するために、方向性を無視してスピードに着目して解析したが、その場合には、M2などの半日成分の流れは6時間周期の4分の1日成分に反映される。しかしながら、調和解析結果のところでも述べたように、Fig. 7の(b)と(c)においても、潮位の変動に対応する流れは認められない。従って、文献^{6), 10)}のような、流れと濁度の関連性はこの結果からは見いだせないが、さらに高周波の変動についても、流れと濁度の変動は対応していないように見受けられる。

濁度の(d)と(e)をみると、(d)に比べて、海底近くの(e)は、高周波でも大きな変動があることを示しており、0.1から0.5h⁻¹の周波数のところでは規則的なピークが現れているようにも見受けられる。高濁度は、底泥の巻き上りを示すことが多いが、そのような場合には底泥による溶存酸素の消費¹⁰⁾も考えられ、この点については今後の課題としたい。

6 おわりに

閉鎖性水域に設けられた一般の養殖場においても、夏から秋にかけて養殖魚介類の斃死がたびたび報告されているが、本研究では地元の山口県豊浦町黒井漁業協同組合の養殖場を観測フィールドとして、魚介類の斃死の原因解明を目的に、酸素濃度変化などの環境変化に関する観測調査を実施した。それによって明らかになった主な事項は、次のとおりである。

- (1) 1日当たりのハマチの斃死率は、海水中の溶存酸素濃度(DO)の減少と係っており、特に急激な減少のときに高くなることが示された。DOの緩慢な減少においては、養殖魚はかなり低いDOにおいても耐えられるようである。
- (2) DOは多様な周波数で大きく変動しており、1日と半日の他に、17.1時間のところにもピークが認められた。
- (3) 潮位については、M2成分やS2成分が優勢であったが、流れについては、それらの成分よりも、慣性周期の21.2時間や、DOの変動にも現れる17.1時間の変動が目立った。つまり、潮位と流れの変動周期は一致していない。
- (4) DOと流れの変動については、17.1時間周期のところで一致しているが、台風などの気象の影響は養殖場内のDOの回復に大いに貢献していることが示された。

DOの急激な低下が養殖魚の斃死率を高くしていることが示されたが、急激な低下の原因解明のためには、さらに長期間の観測が必要と思われる。また、潮位には現れない、流れの21.2時間や17.1時間周期変動の発生については、響灘海域の流体现象の特徴の一つとして、今後さらに詰めていく必要がある。

この観測は黒井漁業協同組合の当時養殖部長であった濱崎浩氏をはじめ多くの組合員の惜しみない協力によってなされたもので、さらに同組合からは養殖場内のハマチ斃死の資料提供をいただいた。ここに篤く謝意を表すとともに、この研究報告が今後の養殖事業のお役に立つことを願う次第である。

現場の観測においては、当時、海洋生産管理学科資源環境計画学講座の卒論生であった小林直君と松田龍信君に手伝っていただいた。また学内および学外の両査読者には、投稿原稿を懇切丁寧に読んでいただき大変有意義なコメントをいただいた。この査読報告によって、著者の思い違いによる記述や表現の曖昧さによる誤解などを防ぐことができた。両名の査読者と労を執っていただいた編集委員会の担当者および当時卒論生の両君にも深甚なる謝意を表す次第である。

文 献

- 1) 高橋幸則：水産の研究，7-6(37)，62-70(1988)。
- 2) 福田 穰，他5名：魚病研究，32(1)，43-49(1997)。
- 3) 橋高二郎：日本水産学会誌，26，230-238(1960)。
- 4) 原田輝男：近畿大学水産研究所報告，1，1-275(1966)。
- 5) 安田秀一，他8名：中国工業技術試験所報告，41，59-66(1993)。
- 6) H. Yasuda, Y. Takasugi and T. Higo : *J. Coastal Res., special issue 25*, 31-40 (1997)。
- 7) 松田龍信：平成12年度水産大学卒業論文「夏季の黒井村養殖場における海洋構造と養殖魚の死亡に関する研究」海洋生産管理学科(2001)。
- 8) 小林 直：平成12年度水産大学卒業論文「黒井村養殖場における流れと海洋構造の日変化」海洋生産管理学科(2001)。
- 9) L. P. Sanford and M. L. Chang : *J. Coastal Res., special issue 25*, 3-18(1997)。
- 10) T. Senjyu, H. Yasuda, S. Sugihara and M.

- Kamizono : *J. Oceanogr.*, **57**, 15-27 (2001).
11) 門脇秀策 : 地域漁業研究, **39**(1), 13-27(1998).