

陸奥湾海況予報高度化調査

Ⅱ 陸奥湾における貧酸素水塊の消長

松原 久・今井美代子・三津 谷正・中村 俊毅

1. はじめに

陸奥湾の底層で8月から10月に発達する貧酸素水塊は、底刺網漁業や籠漁業に時として被害をもたらしてきた。この貧酸素水塊は、冬季に形成された底層水が春～夏季の成層期に酸素供給源（海面・外海水）から遮断され、生物学的あるいは化学的酸素消費により次第に発達して形成さえる¹⁾。また、この貧酸素水塊は、極底層に2mほどの厚さで存在し、風や潮汐などに起因する流れによって移動するものとされる²⁾。

ここでは、貧酸素水塊とそれを取り巻く海水の水温・塩分等から、水塊配置構造を推定し、貧酸素水塊の消滅時期について考察する。

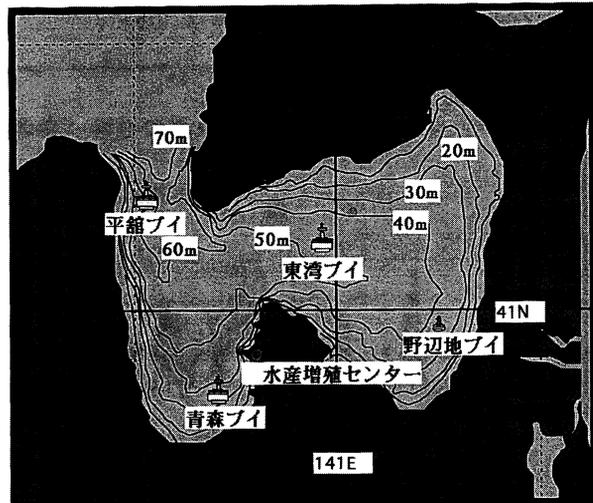


図1 陸奥湾における東湾ブイの位置

2. 材料と方法

陸奥湾に設置されている3基のテレメータブイ〔海況自動観測装置〕のうち、貧酸素水塊を感知すると多い湾中央部の東湾ブイの1996年データを使用した。東湾ブイは水深49mの地点に位置し（図1）、観測層は、海上、1m層、15m層、30m層、底層（海底上1m）であり、溶存酸素は30m層と底層で観測している。解析には、貧酸素化の始まる8月から貧酸素水塊の消滅する11月まで、30m層・底層の水温・塩分・溶存酸素について毎時データを使用した。明らかに測定器の障害によって考えられる異常塩分値については削除した。比重は水温・塩分から σ_t を算出して使用した³⁾。

3. 結果

底層の溶存酸素（図2）は、8月上旬には7～8ppmであったが大きな変動を繰り返しながら徐々に低下し、9月22日には最低値2.71ppmに達した。その後、溶存酸素は5～6ppmまで回復したものの10月10日には4ppmを下回るまで急低下し、さらに7ppmまで急上昇して回復した直後、10月16日には2.78ppmまで急低下した。しかし10月17日には7ppmまで急上昇し、その後緩やかな上昇を続けて低下することはなかった。この間、30m層の溶存酸素は、常に6ppm異常を維持し、貧酸素状態になることはなかった。

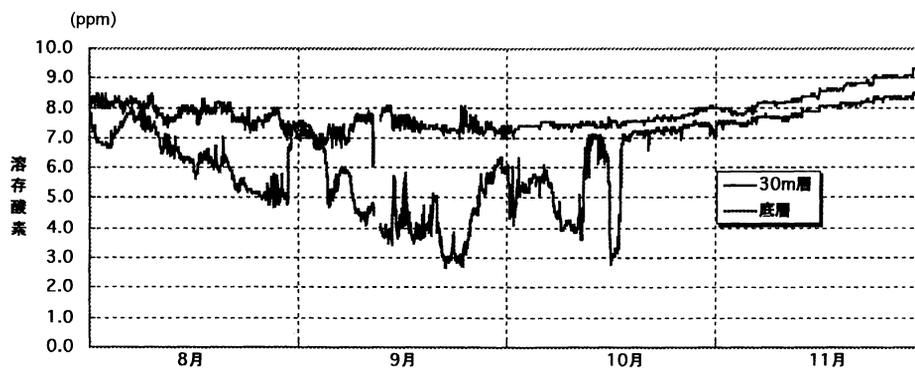


図2 溶存酸素の推移

はなかった。この間、30m層の溶存酸素は、常に6ppm異常を維持し、貧酸素状態になることはなかった。

底層水温（図3）は、8月上旬には11～12℃であったが大きな変動を繰返

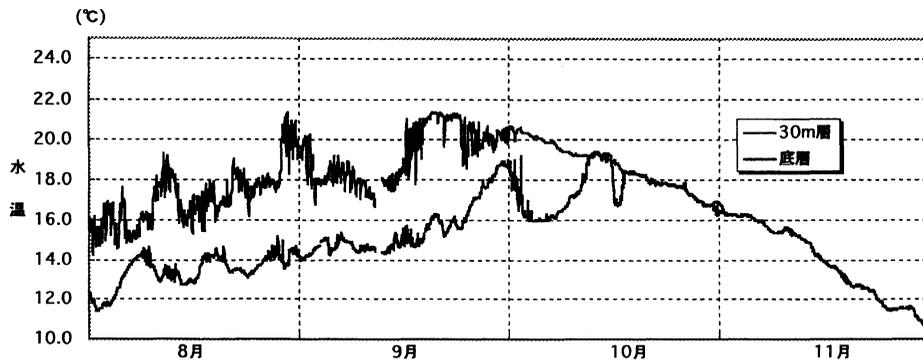


図3 水温の推移 (参考: 30m層水温)

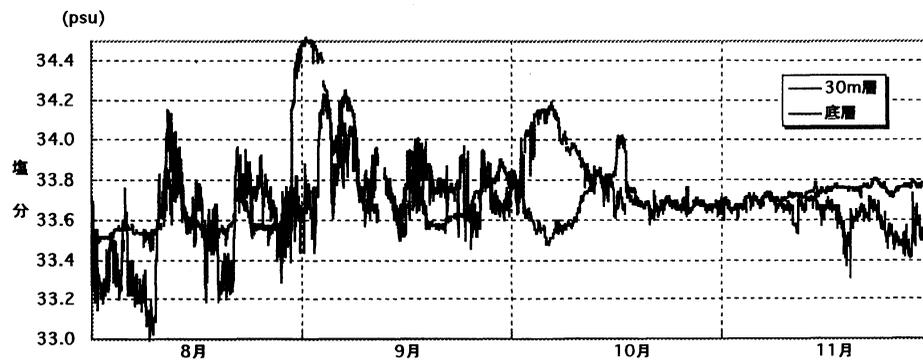


図4 塩分の推移 (参考: 30m層塩分)

しながら徐々に上昇し、10月13日には最高値 19.43°Cに達した。10月16日には一時的な急低下はみられたものの10月17日には18°C台まで回復した後、11月末の10°C台まで大きな変動もなく低下した。この間、30m層水温は、9月20日のピーク (21.37°C) を過ぎる頃まで小さな変動が多かったものの、低下時期には小さな変動も少なく10月17日以降は底層水温と

同じであった。

また、底層塩分 (図4) は、8月上旬の 33.5psu台から11月末の 33.8psuまで徐々に上昇する基調ではあったものの、時折34psu以上の塩分が観測された。30m層塩分は8月上旬の33.2psu台から9月中旬の33.6psu台まで細かな変動をしながら上昇したが、その後は11月末まで33.6psu前後で小さく変動しているのみだった。30m層塩分は10月中旬から11月上旬まで底層塩分とほぼ同じ値で推移した。

4. 考察

①水塊の分類

底層の水温・塩分から σ_t を算出し、層の溶存酸素と σ_t の変動 (図5) から水塊を区別し、A~H'とマークした。溶存酸素の急低下により水塊が交替したと考えられた直後の低溶存酸素側の水塊 (以後低酸素水塊と呼ぶ) をそれぞれA~Hとし、それに続いて交替したと考えられる水塊 (以後その他水塊と呼ぶ)

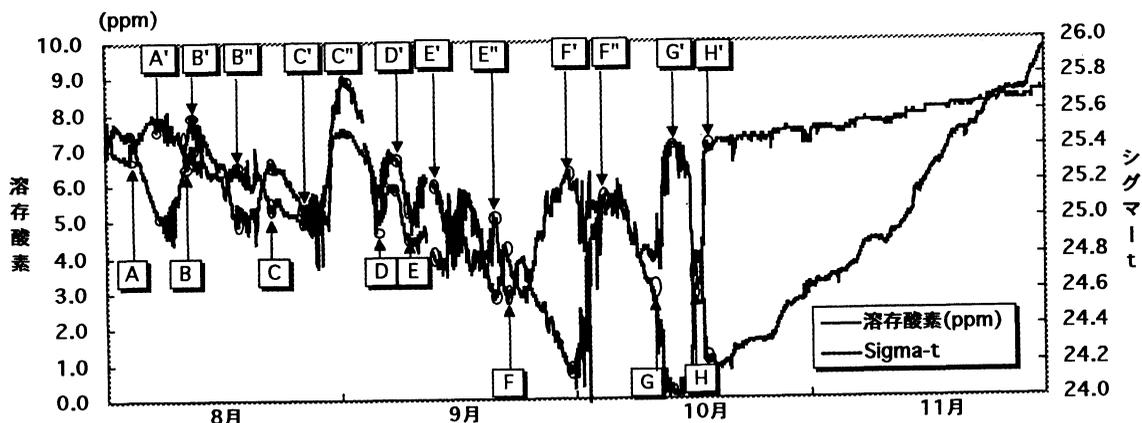


図5 水塊の分類 (底層の溶存酸素濃度と比重)

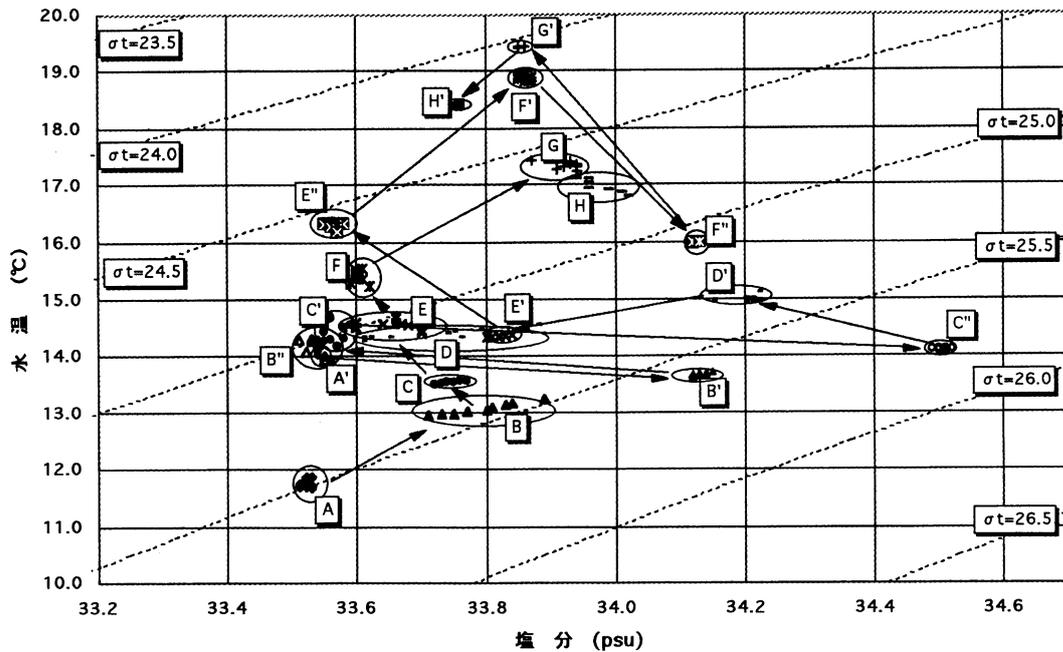


図6 水塊のT-Sダイアグラム (水温と塩分)

表1 水塊の組成 (平均値)

水塊名	先頭日時	溶存酸素(ppm)	塩分(psu)	水温(°C)	Sigma-t	
低酸素水塊	A	8月03日 13:00	6.73	33.52	11.77	25.48
	B	8月11日 07:00	6.60	33.80	13.07	25.45
	C	8月22日 03:00	5.41	33.75	13.53	25.31
	D	9月04日 21:00	4.89	33.72	14.38	25.12
	E	9月09日 07:00	4.47	33.66	14.56	25.03
	F	9月21日 18:00	2.85	33.60	15.40	24.81
	G	10月10日 14:00	4.03	33.92	17.34	24.61
	H	10月16日 03:00	2.96	33.98	16.98	24.74
その他水塊	A'	8月07日 11:00	7.62	33.54	14.06	25.05
	B'	8月11日 22:00	7.10	34.13	13.66	25.59
	B''	8月17日 17:00	6.41	33.54	14.13	25.03
	C'	8月27日 12:00	5.42	33.57	14.45	24.98
	C''	9月01日 00:00	7.47	34.51	14.08	25.79
	D'	9月06日 23:00	5.90	34.20	14.98	25.36
	E'	9月12日 10:00	3.95	33.82	14.36	25.20
	E''	9月20日 04:00	5.04	33.57	16.26	24.59
	F'	9月29日 16:00	6.29	33.86	18.89	24.18
	F''	10月04日 07:00	5.62	34.13	15.98	25.08
	G'	10月13日 10:00	7.09	33.85	19.42	24.04
	H'	10月18日 00:00	7.06	33.76	18.40	24.22

ぶ)には「'」あるいは「''」を付けた。9月中旬のデータ(E' ~ E''間)は変動が複雑であったため、考察から除外した。

このようにして分類した水塊のデータから、特徴的なデータセット(水温・塩分・溶存酸素・ σ_t)を1水塊10個ずつ選んでT-Sダイアグラムにプロット(図6)した。各水塊データセットの出現時および各項目の平均値を表1に示した。

②低酸素水塊の変遷

低酸素水塊だけを拾ったT-Sダイアグラム(図7)から、低酸素水塊は底層センサーにかかわった水塊全体(図5)に比較して変動が小さかった。低酸素水塊は、貧酸素水塊の核になる低温低塩分のAから、やや高塩分のBに交代し、徐々に低塩分化しながら、C→D→E→Fへと変遷した。次に観測されたG・Hは高塩分であった。この間、水温はGまで徐々に昇温し、Hでやや低下した。溶存酸素はFの2.85ppmまで徐々に低下し、Gで4.03ppmに上昇したが、Hで再び2.96ppmに低下した。

これらのことから、Bは高塩分の外海水から影響を受けた低酸素水塊であり、低塩分低温のAと混合しながら、低酸素化が進行してFに至るものの、再び外海水の影響を受けてG・Hに変化したものと推察できる。

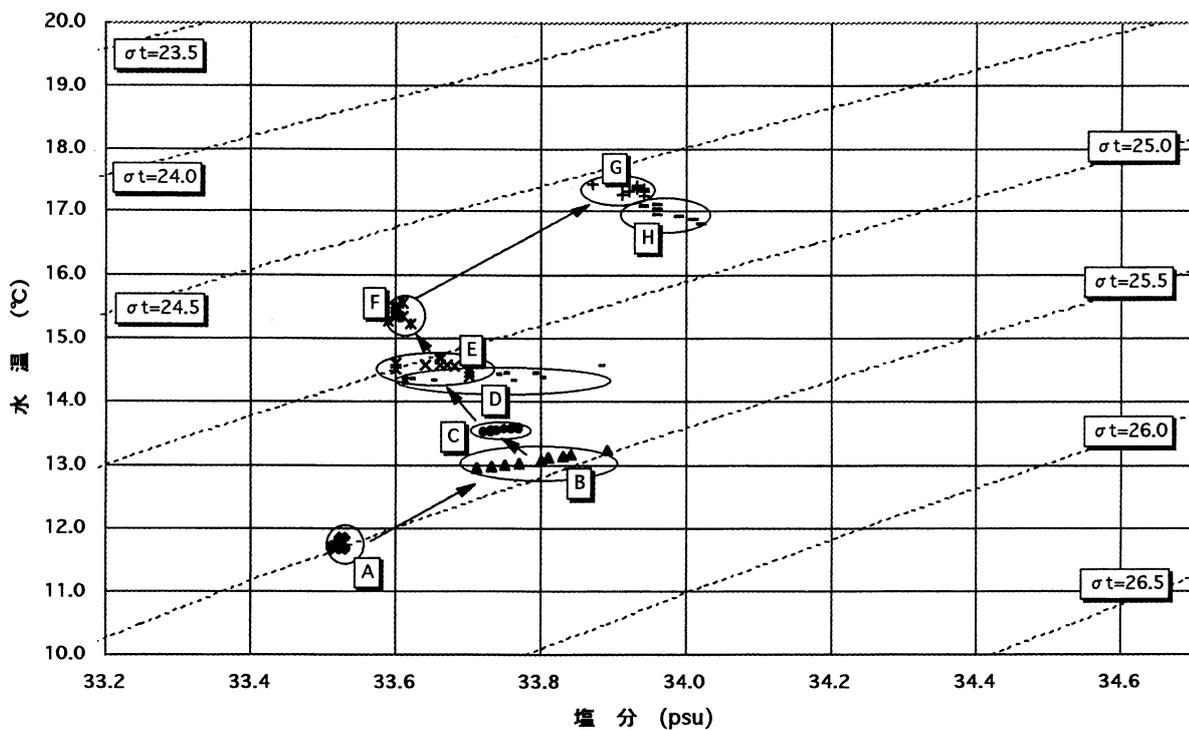


図7 低酸素水塊の変遷 (T-Sダイアグラム)

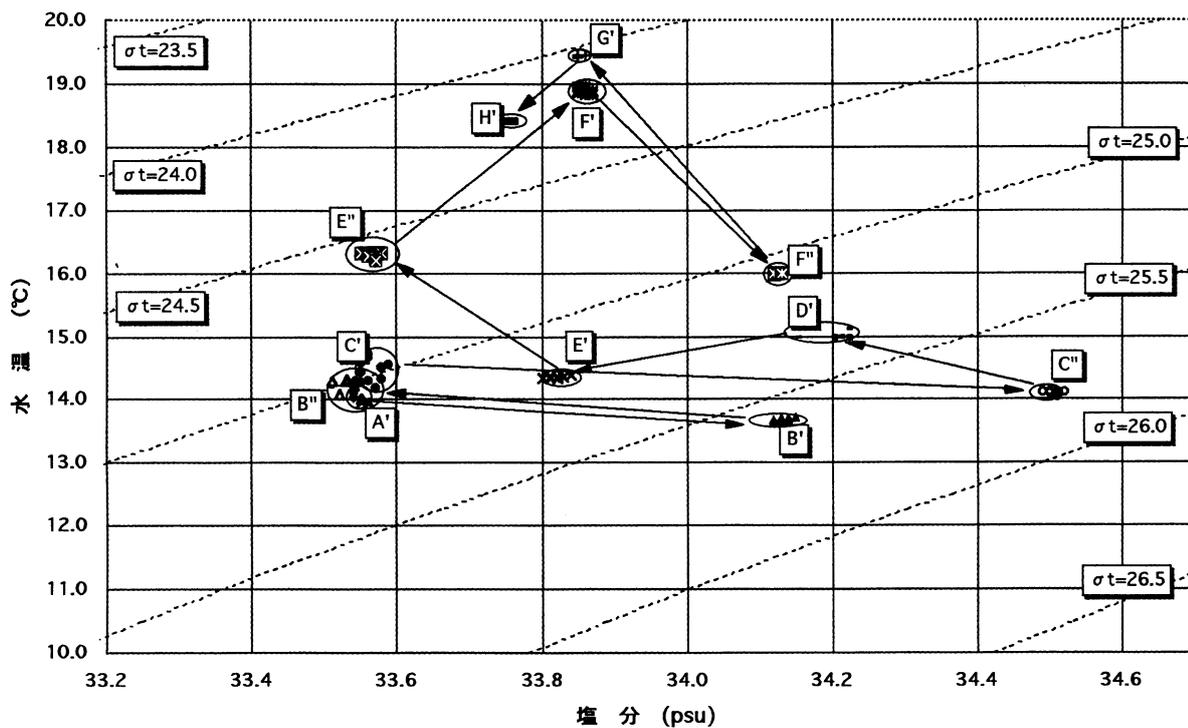


図8 その他水塊の変遷 (T-Sダイアグラム)

③その他水塊の変遷

その他水塊だけを拾ったT-Sダイアグラム(図8)から、その他水塊は塩分濃度で、33.6psu以下の湾内固有水と、34.0psu以上の外海由来水、これらの中間の混合水に分けることができる。

湾内固有水と考えられるA'・B''・C'・E''は、C'まで水温塩分ともほぼ同じであり、E''もC'から27日ほど経過して2℃ほど水温が高いだけなので、同じ水塊と考えられる。A'・B''・C'・E''は、低酸素水塊より比重が小さかったものの、時間の経過に従って低酸素化していた。

外海由来水と考えられるB'・C''・D'・F''は、常に更新されていると推定できること、観測時期の違いなどにより、B'・C''+D'・F''の3つに分けることができる。8月中旬に侵入してきたB'は、その境界面でやや高塩分の低酸素水塊Bの生成に影響したと考えられる。D'は9月1日に侵入してきたC''の一部が取り残されて低塩分化・低酸素化・高水温化したものと考えられる。F''は、Fとの境界面でやや高塩分の低酸素水塊G・Hの生成に関与したものと考えられる。

混合水としたE'・F'・G'・H'はそれぞれ生成過程が異なると考えられる。

E'は、外海由来のC''が、外海からの更新を遮断され、湾内水との混合により、次第に低塩分化・低酸素化したもので、C''・D'の延長線上にあるものと考えられる。F'は、高い溶存酸素濃度、高水温、中位の塩分濃度から、F'が観測されるまでに出現した水塊とは全く異なる水塊であり、低酸素水塊と関わりをもたない外海由来水と考えられる。G'は溶存酸素・σ_tの経時変化図(図5)から、鉛直混合水の先駆けとも考えられるが、塩分濃度がH'より高いことから、F'と鉛直混合水の一部が混合してできた水塊と考えられる。H'は鉛直混合水に他ならない。

④東湾ブイ底層センサー付近における水塊交代

東湾ブイ底層センサーで毎時観測された水温・塩分・溶存酸素および比重の推移を、一つの現象としてダイレクトに理解するためには、立体的な水塊の交代としてとらえる必要がある。そこで非常に大胆ではあるが、①～③で述べた水塊の交代状況を観測結果に矛盾しない様注意しながら、図9を作成した。

⑤貧酸素水塊の発達過程

貧酸素水塊は、冬季に形成された底層水が春～夏季の成層期に酸素供給源(海面・外海水)から遮断され、生物学的あるいは化学的酸素消費により次第に発達して形成される¹⁾。また、貧酸素化は発達時期に高水温の外海水が貧酸素水塊の上層に流入、滞留することにより貧酸素水塊上層の温度躍層を強固にし、助長される²⁾。

貧酸素水塊の発達過程として、以上の見解が主流であった。

しかしながら、1996年8～11月に観測された低酸素水塊は、一様な水温・塩分値を維持しているわけではなく、時折高塩分化したのも観測された。

このことから、貧酸素水塊は冬期に形成された比重の重い底層水が核となって酸素低下するものの、時折侵入する外海系底層水とその境界面で混合して塩分濃度の上昇を示し、中でも比重の重い水塊が、酸素消費源である海底⁴⁾と広く接触することにより貧酸素水塊として発達するものと考えられた。

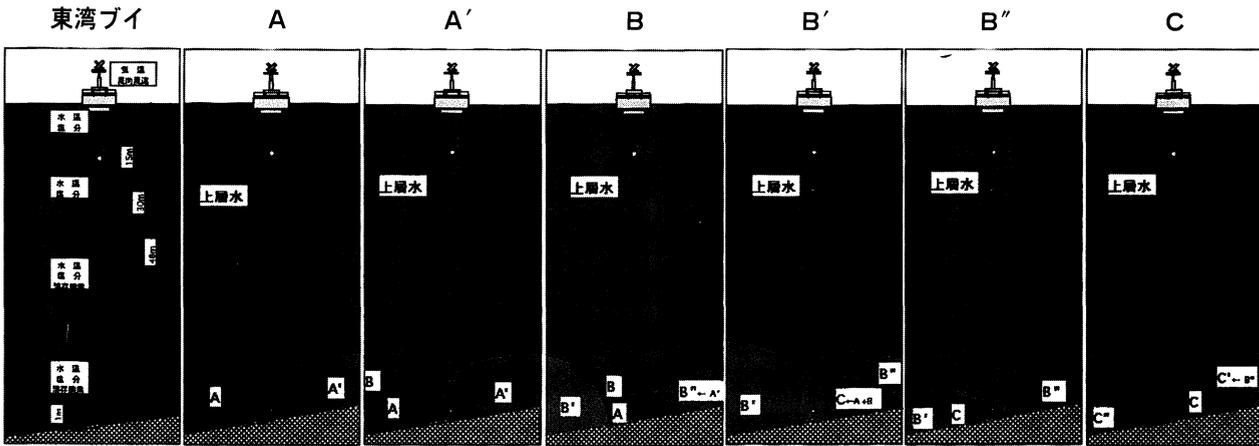
⑥貧酸素水塊の分布

貧酸素水塊は、湾内の上層水より比重が重く、外海系底層水より比重が軽い、また外海系底層水の移動にともない移動あるいは上昇することから、外海系底層水の縁辺部に分布しているものと考えられる。

1978年に発生した貧酸素水塊による魚類への死が、水深40m層前後の狭い範囲に集中していた²⁾ことは、貧酸素水塊がより比重の重い外海系水の縁辺部に分布するという仮説を裏付けるものと考えられる。

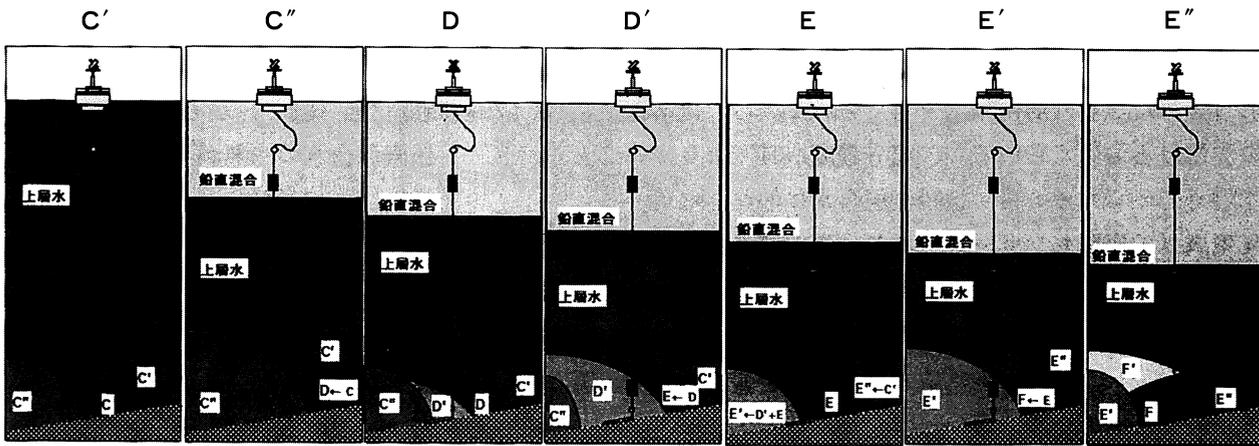
しかしながら、1978年の第4回調査(図10)結果は、湾中央部に貧酸素水塊が存在し、東西に離れるにしたがって酸素濃度が上昇する分布を示している。また、部分的には大島沖の底層で塩分が34.124psuでありながら、溶存酸素濃度2.12ppmを示した。これらのことは、貧酸素水塊が必ずしも外海系底層水の縁辺部に集中して分布するわけでないことを示している。

東湾ブイ



B''はA'とほぼ同じ水温塩分組成であることからA'が酸素低下したものである
AはBと混合してCとなる

B''はさらに酸素低下してC'となる。



Cは少し移動してC'がセンサーを覆う
外海から、高塩分・高酸素濃度のC'が近づく

Cは低塩分水と混合して塩分幅の広い低酸素水塊Dとなる。
外海からの高塩分・高酸素濃度のC'がセンサーを覆う。

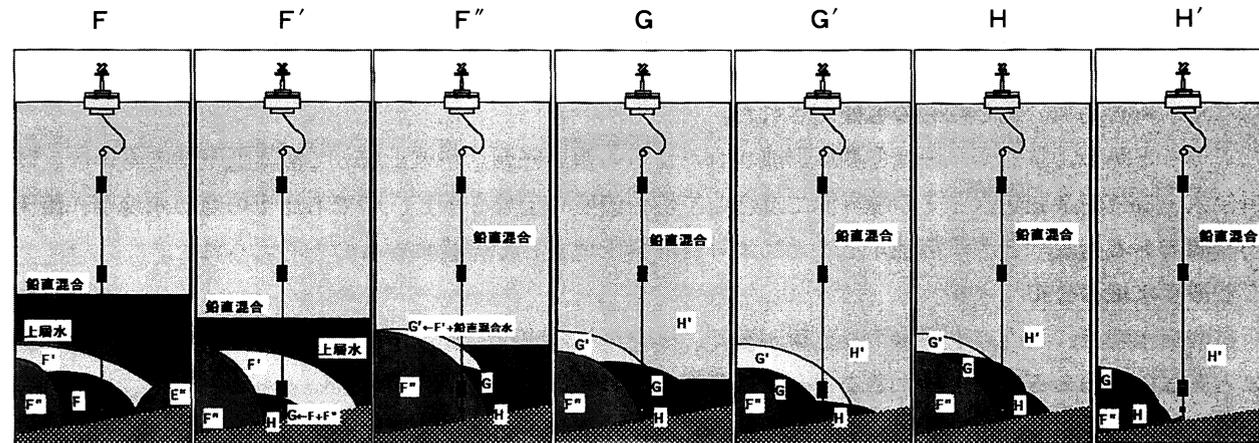
C'が後退し、センサーはDが覆う
C'とDが混合してD'となる

外海水系が盛り返して高酸素高塩分のD'がセンサーを覆う
D=E

外海水系が後退してEがセンサーを覆う
D'とEが混合してE'になり、低酸素化が進む。
Eの上層にはE'' (=C')

外海水系が再び盛り返してE'がセンサーを覆う
Eはさらに低酸素化・高温化・低塩分化してFとなる。

E'が後退してE''がセンサーを覆う
高塩分・高水温・高酸素濃度の外海水F'が、Fの上層に流入



Fが移動してきてセンサーを覆う。
E'と交代して高塩分・高酸素濃度のF'が近づく。
鉛直混合は30m層に達する

F'が進出してセンサーを覆う
F'より高塩分・低水温の外海水F''が低層から近づく
鉛直混合が30m層に達する
FはF''と混合してGになる
GとF''との境界でHができる

F''が進出してセンサーを覆う
鉛直混合が底層に近づく
F''と鉛直混合水が混合してG'となる。

F''が後退して上層のGがセンサーを覆う
鉛直混合が海底に近づく

鉛直混合が海底に達し、F''が後退して、センサーはG'に覆う

外海水系の勢いが増し、それに押されてHがセンサーを覆う

外海水系が後退し、センサーは鉛直混合水H'に覆われる。
G'は、より重くなった鉛直混合水H'に巻き込まれ、消滅

図9 東湾ブイ底層センサー周辺における水塊の交代

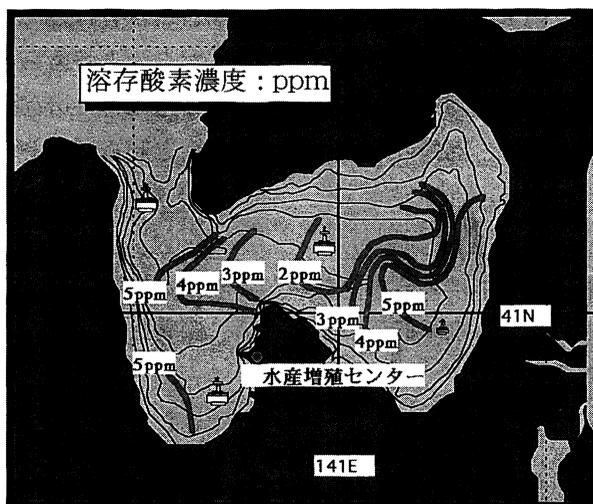


図10 貧酸素水塊の水平分布 (1978年第4回調査結果より)

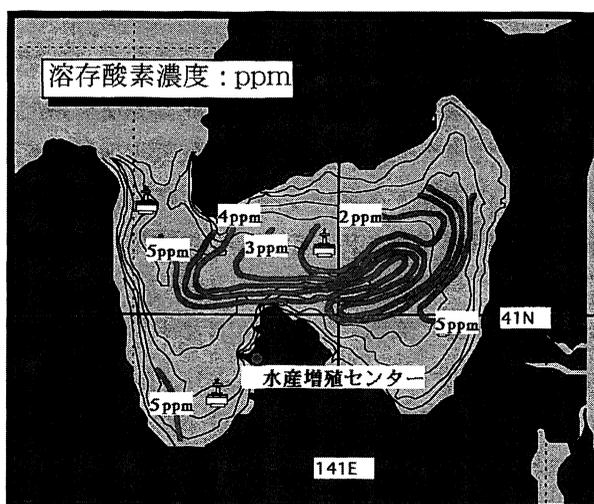


図11 貧酸素水塊の水平分布 (1978年第4回調査結果より)
(東湾中央部の高酸素濃度を外海由来と仮定した場合)

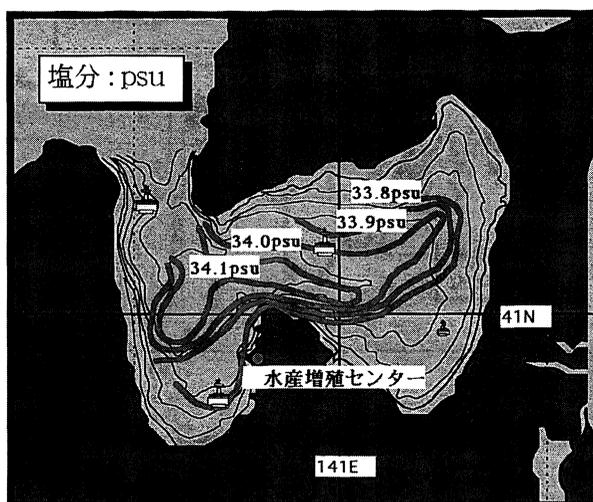


図12 底層塩分の水平分布 (1978年第4回調査結果より)

このことをここまで検討した結果の延長線上で考察した場合、後者は外海系底層水が貧酸素水塊と一部混合して高塩分のまま底層でさらに酸素低下して西に移動したものと考えられる。さらに、前者については強引ではあるが貧酸素水塊が外海底層水の縁辺部に分布する考え方で溶存酸素の等値線図を書き換えると図11が得られる。この等値線図は、塩分の等値線図（図12）と照らし合わせると必ずしも無意味ではないものと考えられる。

⑦貧酸素水塊の消滅

貧酸素水塊の消滅は、外海系底層水による水平混合が貧酸素水塊に対し酸素を補給することにより更新する2)。また、海面からの放熱による水温低下にともない、深層に進む鉛直混合が底層に達することにより貧酸素水塊は巻き込まれて消滅する。

以上のことは、1996年のデータも指示するところであった。しかしながら貧酸素水塊が観測されなくなった10月17日に貧酸素水塊が消滅した確証はなく、東湾ブイの底層センサーを鉛直混合水が覆ったに過ぎない。貧酸素水塊は別の位置に移動し、存在している可能性がある。最後に観測された貧酸素水塊はその比重から、鉛直混合水の下層にあるものと考えられ、東湾ブイの位置より水深の深いところへ移動したものと推測できる。

⑧貧酸素水塊の消滅確認

東湾ブイの位置から移動し、観測できなくなった貧酸素水塊の存在は確認することができない。そこで、海況自動観測ブイのデータをもとに貧酸素水塊の存在を推測する方法を検討した。

鉛直混合水の比重が貧酸素水塊の比重を上回った場合、貧酸素水塊は鉛直混合水に巻き込まれて消滅する。このことを利用して、東湾ブイの底層で水温がほぼピークに付近く9月後半以降観測された貧酸素水塊のうち、比重の最も重い貧酸素水塊を消滅させるのに必要な比重に鉛直混合水が達した時点を貧酸素水の消滅と考える。

東湾ブイ底層の溶存酸素の比重の推移（図13）から、9月後半以降観測された貧酸素水塊のうち、比重の最も重い貧酸素水塊は、9月21日に観測されたF（ σ_t 24.81、溶存酸素 2.85ppm）であった。東湾ブイでの鉛直混合水の比重は、10月中旬以降水温が直線的に低下することに伴って直線的に重くなり、 σ_t 24.81は11月7日に超える。東湾ブイにおける鉛直混合水の比重は、陸奥湾全体を代表するものではないものの、青森ブイ・平舘ブイにおける鉛直混合水の比重と比べてみても大差はない。

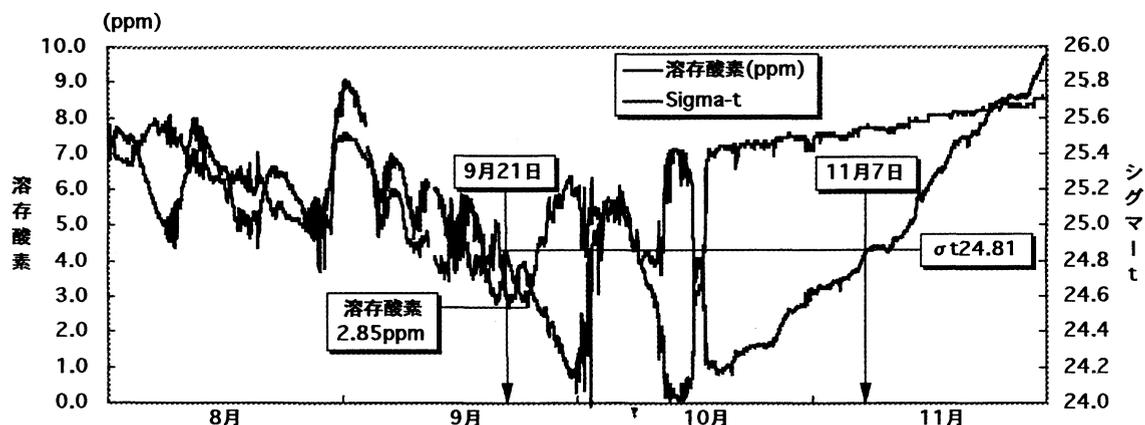


図13 貧酸素水塊消滅時期の推定（1996年）

以上のことから、 σ_t 24.81以下の水塊が消滅したのは、概ね11月7日と推定できる。

ここで、水塊F以上に比重の重い貧酸素水塊の存在については議論していない。その水塊の存在を否定することはもちろんできないため、このことについては今後の課題となる。しかしながら、このような水

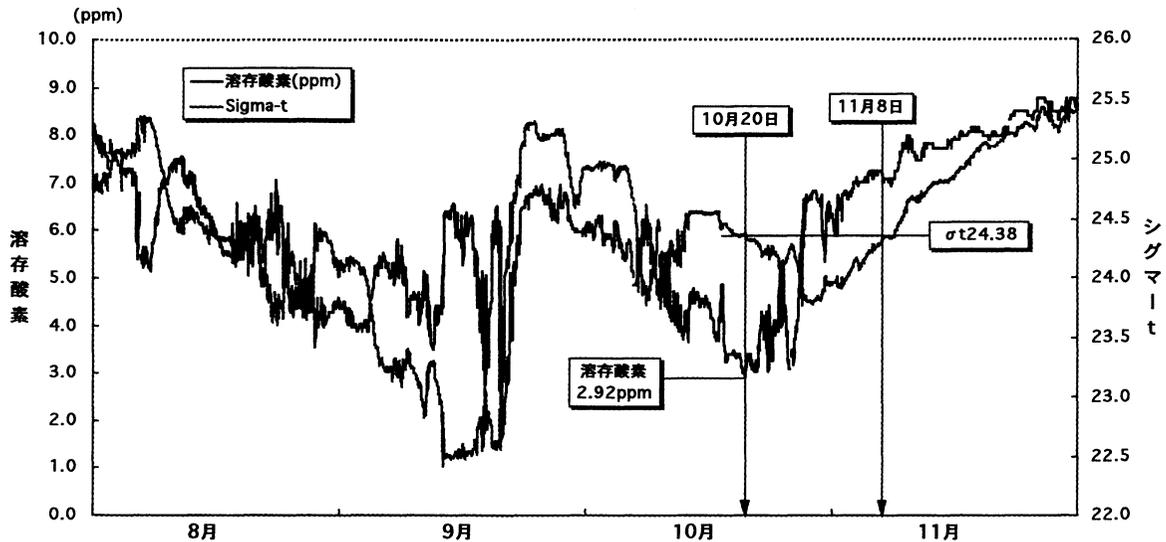


図14 貧酸素水塊消滅時期の推定（1995年）

塊が存在したとしても、その上面には酸素濃度の高い鉛直混合水が接していることが推定され、また外海系底層水にも接していることが推定されることなどから、レベルの高い貧酸素状態を維持しているとは考えにくい。

いずれにしても、東湾ブイで貧酸素水塊を観測できなくなった10月17日から11月7日までの間、貧酸素水塊が湾内の残っている可能性を否定することはできない。

⑨1995年の貧酸素水塊の消滅

貧酸素水塊の消滅確認の方法が毎年活用できるか1995年のデータで検証を試みた。

1995年8月～11月の東湾ブイ底層における溶存酸素（ppm）と比重（ σ_t ）の推移（図14）を示した。これによると、東湾ブイの底層で低い溶存酸素濃度がみられなくなるのは、10月28日であった。9月後半以降観測された貧酸素水塊のうち、比重の最も重いものは、10月20日に観測された溶存酸素が2.92ppmで比重が σ_t 24.83の水塊であった。

比重と溶存酸素の上昇状況から、鉛直混合水は10月28日から東湾ブイの底層センサー覆っているものと考えられる。そこで鉛直混合水が、最も重い貧酸素水塊の比重 σ_t 24.83を上回る日は、グラフから11月8日と読み取れる。

5. おわりに

貧酸素水塊消滅の情報を早く漁業者に提供するため本検討を行ったが、結果的に推定できた貧酸素水塊の消滅は11月10日前後と遅く、漁業者の脳裏から貧酸素水塊に対する警戒心が消滅して、さらに日を経た時期になった。本報告は、むしろ漁業者が忘れた頃まで貧酸素水塊が存在する可能性を示唆する結果となった。

参考文献

- 1) 田村真通（1992）：青森県水産増殖センターだより第59号、6－8
- 2) 昭和53年夏季陸奥湾に発生した魚介類の異常へい死に関する調査：青森県水産増殖センター（1981）
- 3) 海洋観測指針（気象庁編）：財団法人日本気象協会（1990）
- 4) 水産用水基準（1995年版）：社団法人日本水産資源保護協会、70－72