

大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構

Generation and Breakdown Mechanisms for Anoxic Layers in Ohfunato Bay

日比野 忠史¹, 豊田 政史², 深和 岳人³

Tadashi Hibino, Masashi Toyota, Gakuto Fukawa

¹正会員 工博 主任研究官 運輸省港湾技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 研究官 運輸省港湾技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 防衛庁技官 防衛施設庁 (〒107-0052 港区赤坂9-7-45)

The water quality and physical process within bays are strongly affected by climatic phenomena such as regional air pressure distributions, ocean currents and typhoons. The present study reveals that the water mass inside Ohfunato Bay is strongly related to the sea level along the Pacific coast over a scale of 3,000km from Nemuro (Hokkaido) to Naha (Okinawa). Low salinity water associated with the Oyashio ocean current intrudes in Ohfunato Bay from April to October in the average year. Finally, it was found that low salinity water is carried by typhoon from ocean into Ohfunato Bay.

Key Words : Pressure Distribution, Oyashio, Typhoon, Thermocline, Oceanic intrusion

1. はじめに

大船渡湾は昭和35年チリ津波により甚大な被害を受け, 昭和42年には津波防波堤が設置された. 湾口部には高さ約20mのマウンドが設置され, 湾内外が分離された形状にある. 夏季には湾内で温度躍層の形成や有機泥によるバクテリア等の活性化が起こるために, 底層に貧酸素水塊が形成される. 温度躍層の形成には気温上昇のみならず, 湾外水の影響が大きい. 内湾域の水環境に対する海洋運動の影響, さらには, 気候の変動や温暖化など地球規模の現象による変化の程度をどう考えていくか. 沿岸環境保全のために, どれだけ自然力を利用することが可能であるか. これらの問題に対しては外洋から内湾域にいつ, どのような性質の海水が流入し, これによってどのように内湾での水構造が変化しているかを知ることが重要となる¹⁻³⁾.

本研究は自然力を利用して港湾域の水質管理を行うことを目指し, このために地球規模の流れ場と地球温暖化, 気候変動との結びつきや港湾域に地球規模の流れ場がどのような外力として働くのか等の局域に対するグローバルな場の働きを明確にすることを目的としている.

本論文では大船渡湾(北緯39° 02', 東経141° 44')を対象として貧酸素水塊の形成・消滅機構に時空間

スケールの異なる外力がどう影響を及ぼしているかを検討している. 大船渡湾は, 黒潮, 親潮の影響を受ける閉鎖性の内湾であり, 長軸方向が約7km, 幅1~2km, 最大水深約40m, 平均水深約20mの空間スケールを有している. 湾口部には津波防波堤のためのマウンドが設置され, 湾内と湾外を分離している. 湾口の開口部は幅約200m, 水深約15mである.

2. 大船渡湾周辺での流れ場の特性

(1) 三陸沖への親潮の南下状況

親潮系の冷水は通常3月から5月にかけて沿岸よりの分枝が三陸沖に南下し, 9月から10月にかけて北上する. **Fig.1**には日本周辺沿岸域での水位の年較差および大船渡湾の外観, **Fig.2**には大船渡湾中央(湾口から約3.5km) 27mの水深で観測された塩分と根室と那覇の水位差の経時変化が示されている. **Fig.2**から毎年3月頃~9月中旬と1995年12月~1996年2月中旬に低塩分の海水が湾内に流入しているのがわかる. 大船渡湾での塩分は親潮系の冷水が三陸沖に南下する3月頃から8月頃にかけて低下しており, 大船渡での塩分低下は親潮系の冷水が流入したものと考えられる. また, 1995~1996年冬季の塩分低下は1995~1997年の観測のうち, この期間にのみ観測されている. この冬は**Fig.3**に示すようにPNA

型 (Pacific/North American pattern) の大気変動パターンが現れており、東日本から北日本では平年より海面気圧が低くなっている。PNA型の大気変動パターンと親潮の異常南下の関係については多くの報告が行われており、このパターンが現れた冬には親潮の異常南下が起こることが報告されている⁹⁾。

(2) 親潮系冷水の南下と水位との関係

Fig.2から4月中旬～9月中旬の塩分低下は根室と那覇の水位差と良い関係にあることがわかる。さらに、1995～1996年冬季の塩分低下は、大気変動パターンと深い関係にある。Fig.4にFig.1に示した日本沿岸海域での水位の11年間の平年値(1987年～1997年)との偏差を示している。1995年11月～1996年1月頃まで気圧が平年より低くなった東日本と北日本の各沿岸域では平年に比較して約5%の水位上昇がみられている。グローバルな大気変動パターンが日本海沿岸域の水位に影響を与え、これらの現象が比較的規模の小さい大船渡湾においても湾内水質に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

(3) 根室および那覇の水位変化特性

上述のように気圧配置と水位の間には密接な関係があることがわかる。また、日本沿岸域での水位の年較差は北で小さく、南で大きくなっている (Fig.1)。

Fig.5には(a)根室、(b)大船渡、(c)那覇での気圧と水位の関係が示されている。図には1987年から1997年までの11年間の日平均値が15日間で移動平均した関係が示されている。図中の◎は2～6月、●は1月、●は3/15～5/15と9/15～10/15の期間の値を示している。図から気圧に対する水位の変化はヒステリシスを描いてお

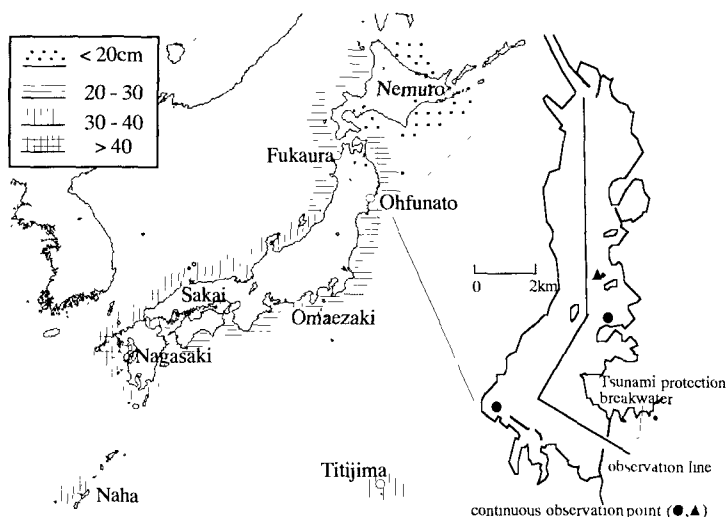


Fig. 1 Range of sea level distribution around Japan and Plan of Ohfunato Bay

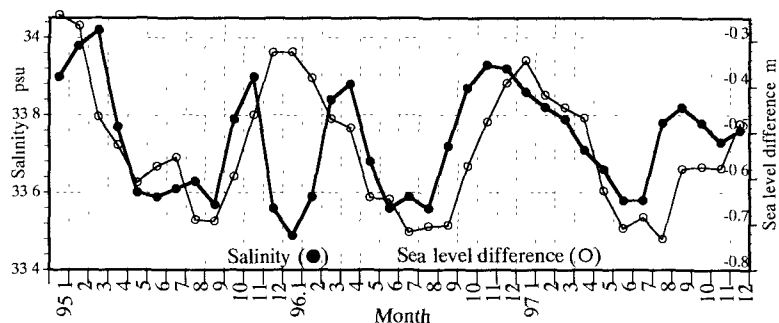


Fig. 2 Salinity variation at center of Ohfunato bay and Sea level difference between Nemuro and Naha (Nemuro - Naha)

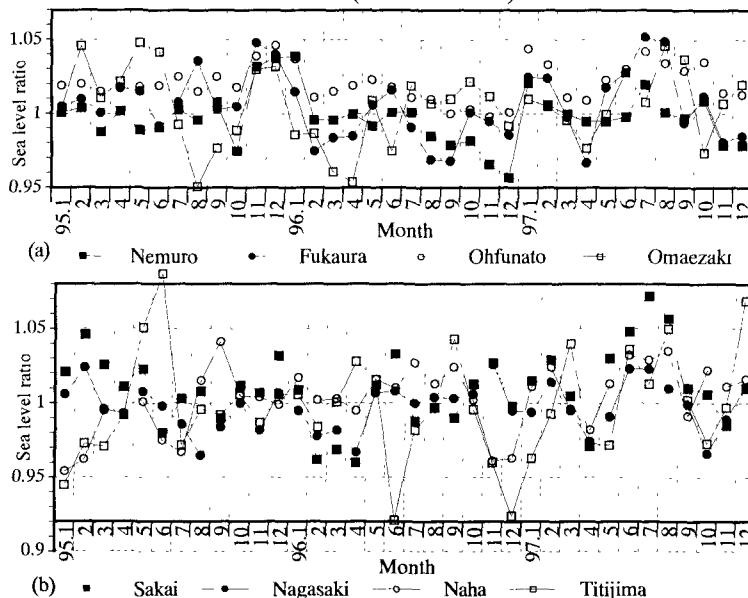


Fig.4 Sea level factor (Average monthly sea level divided by longterm average from 1987 to 1997)

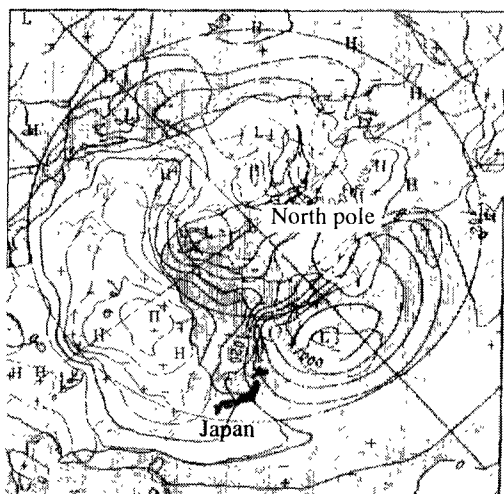


Fig.3 Weather map (atmospheric pressure at sea surface) from Dec. 1995 to Feb. 1996. Solid lines show isobars and hatched areas show regions where atmospheric pressure is lower than the long term average.

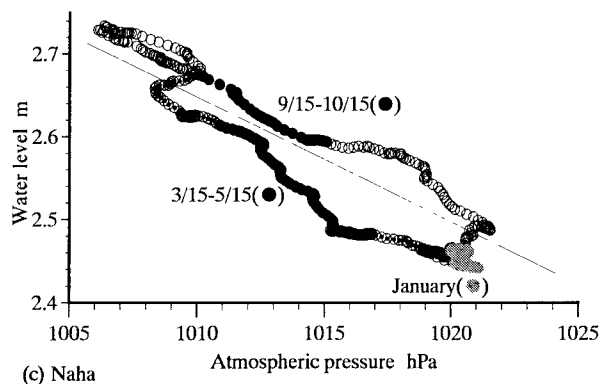
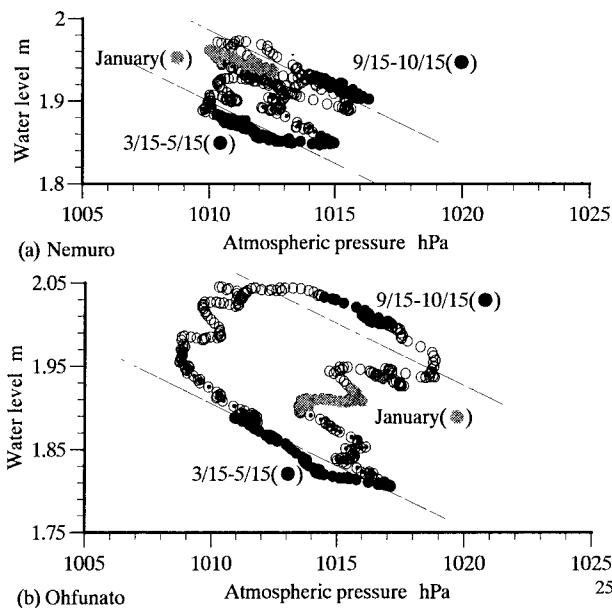


Fig.5 Relationship between Water level and Atmospheric pressure for coastal Japan (two weeks moving averaged data, average of 11 years from 1987 to 1997, ● show the period from February to June.)

り、気圧～水位関係は季節によって変化する範囲が決まっていることがわかる。ヒステリシスの形状は南北方向に変化しており、高緯度に位置する根室ではヒステリシスは明確に現れず、つぼみがすばんだ形状になっている（気圧約7hPa、水位約14cmの変動量）。緯度が低くなるにつれヒステリシスが明確に現れ、那覇では水位の上昇線と下降線は同一線上に近づいている（根室での1月と7月の値を斜め方向に開いていくと大船渡、さらに伸ばすと那覇の形になる）。なお、気圧～水位関係がヒステリシスを描くのは夏型と冬型の気圧配置が全く逆の分布になるためである¹⁾。図から3月中旬から5月中旬にかけて根室では約0.04mの水位上昇であるのに対し、那覇では約0.15mの水位上昇があり、このことによって3月頃から根室と那覇の間に水位差が生じ始めることがわかる。ちなみに、1997年はエルニーニョが非常に強まった年であり、大船渡湾での塩分は1月頃から7月頃までなだらかに低下し、8月には上昇している。さらに、1997年は日本海沿岸海域の水位が夏季には全観測地点で3～5%上昇しており、父島では前年の12月に水位が約8%低下している（Fig.4）。

3. 大船渡湾での水構造の年変動

Fig.6には大船渡湾中央での水面下10mと27mでの(a)水温・気温、(b)塩分および(c)溶存酸素（DO）の経時変化（1997年）が示されている。1997年の大船

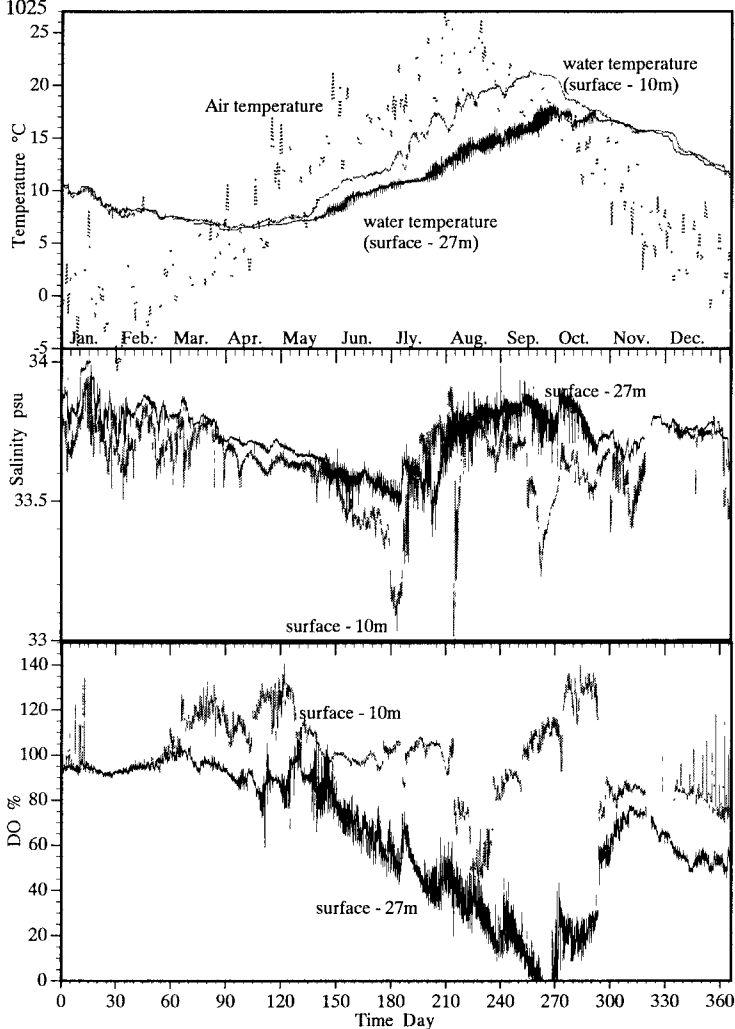


Fig.6 Water temperature, Salinity and DO variations for Ohfunato bay in 1997

渡湾における水構造の変化は以下のように起こっている。まず、3月中旬頃から塩分の低下が起こり、気温が水温よりも高くなる頃に、温度躍層ができ始め、躍層の形成後、底層の溶存酸素量が低下する。温度躍層は塩分が3月初旬の濃度に回復する頃が最も強く、温度躍層が弱くなり始めた頃に溶存酸素量

も増加し始める。

(1) 温度躍層の形成機構

温度躍層の形成は親潮系の冷水塊（低塩分）の湾内への流入と気温の上昇による海水温の上昇の寄与が大きいと考えられる。Fig.7は親潮系の冷水塊が流入し始めた1998年4月に観測した満潮期の塩分と水温の断面分布を示されたものである。断面はFig.1の観測測線に沿ってとっている。図の6km地点に防波堤が設置されており、マウンドによって湾内と湾外が分離されている。湾外から塩分33～33.5psu、水温5.5～6℃の水塊が湾内に流入している。水塊は5～15mの層に流入しており、湾内の水温は湾口部から湾奥に、上層から中層に向かって低下していることがわかる。さらに、8月頃までは外海から低温・低塩分の海水（夏季に向かって水温は上昇、塩分は低下していく）が上～中層に浸入され続ける。このため、下層水塊は中層水塊と混合できず、温度躍層は徐々に強まっていく。

Fig.8に1997年9月1日と1998年8月20日に湾中央で観測された塩分、水温および溶存酸素のプロファイルが比較されている。1998年の貧酸素化は1997年ほど顕著に現れていない。さらに、塩分・水温とも1997年に比較して低く、密度成層は弱くなっている（水深10mで水温は約2℃、塩分は0.5psu低い）。1998年と1997年の水温や塩分プロファイルの差異は湾内に流入する湾外水の性質によるものとして考えることができる。1998年の観測では、春から夏季にかけての親潮系冷水塊の大船渡湾への流入が1995～

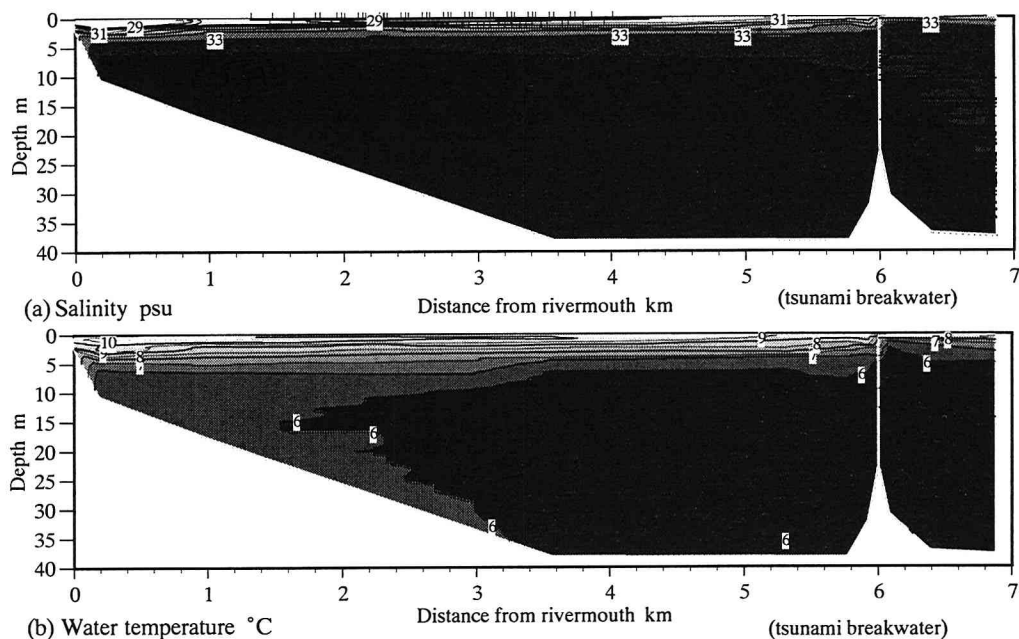


Fig.7 Salinity and Water temperature distribution during a flood tide (date)

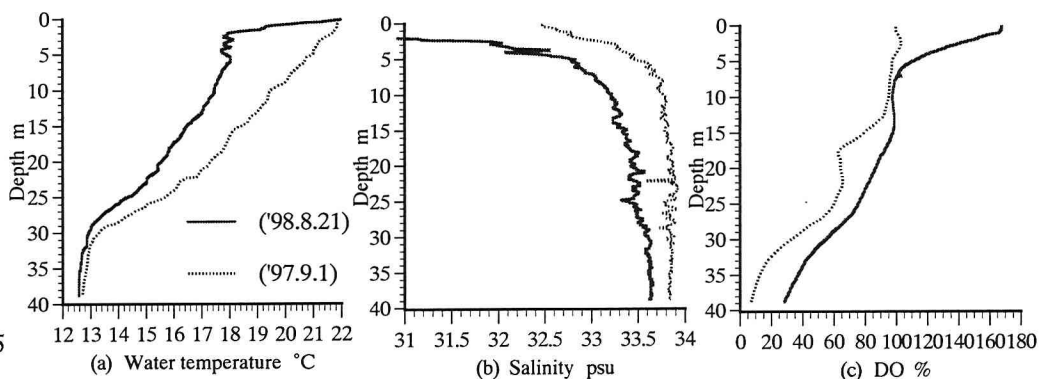


Fig.8 Comparison of Water temperature, Salinity and DO profiles for 1997 and 1998

1997年の観測結果とは異なっている。1995～1997年に比較して低塩分33～33.5psuの湾外水が4月初旬に湾内に流入したが、それ以降塩分は低下せず、その変化量は約0.2psuでしかない（過去3年間の観測では約0.4psu）。このため湾内の温度躍層は平年に比較して弱くなっている。1998年は梅雨、台風等、異常な気象状態が続く、これら異常気象の影響が大船渡湾内の水質に影響を及ぼしているものと考えられる。これらの現象からも異常気象によって港湾域に流入する外海水の性質が変わり、湾内での水質環境、ひいては生態環境に変化が現れることが予想される。すなわち、ローカルな港湾域での水質を考える上でもグローバルな見地から沿岸環境を考えることが必要である。

(2) 貧酸素水塊の消滅機構

Fig.9に1997年9月1日から11月9日に観測された大

船渡湾での水位・気圧・日降雨量、塩分（水深10mと27m）・溶存酸素（27m）、水温プロファイルの経時変化を示している。日降雨量には父島での観測値もあわせて示している。図から以下の特徴的な現象が現れていることがわかる。①塩分の低下と大船渡湾での降雨量との関係が弱く、父島での降雨量との関係が強い、②湾内上層での塩分が低下した後、均一化した20m以浅の水温が数日の内に再び成層化している、③水深27mの塩分が上昇する時期に溶存酸素が急激に上昇している、④10月5日（49日）頃にも③と同様の現象が起きている、⑤半日周潮に伴って水温・塩分・DOが振動しており、振動幅は下層ほど大きい。⑤の現象は下層ほど水温勾配が大きいことや内部潮汐が主な原因である⁷⁾。

a) 台風による淡水塊の輸送

9月18日の水深10mの塩分の低下は①の現象から陸域からの淡水の流入ではなく、湾外からの淡水の流入であると考えられる。Fig.10に9月に発生したTY9719とTY9720の移動経路を示した。小笠原高気圧が発達している期間は台風はTY9719のような移動経路を通過する。小笠原高気圧が勢力を弱めると台風はTY9720のような経路を通過する。台風がTY9720のように太平洋を北上する場合には、台風の移動に伴って多量の暖かい淡水が大船渡に運ばれてくるものと考えられる。小笠原高気圧と大船渡湾における貧酸素水塊の消滅とは密接な関係があると考えられる。

b) 温度躍層と貧酸素水塊の消滅機構

上述の②の現象が湾内での水塊の釣り合いのみで考えた場合、一度消滅した温度躍層が再度形成されるためには、躍層を保存した水塊が風等の外力により湾内のどこかに移動し、数日後にもとの場所に戻る必要がある。外湾とのインターアクションを考慮せず湾内みの現象として考えることは困難である。Fig.11は貧酸素水塊の消滅機構について説明した図である。台風によって運ばれる海水（降雨）は塩分が低く、

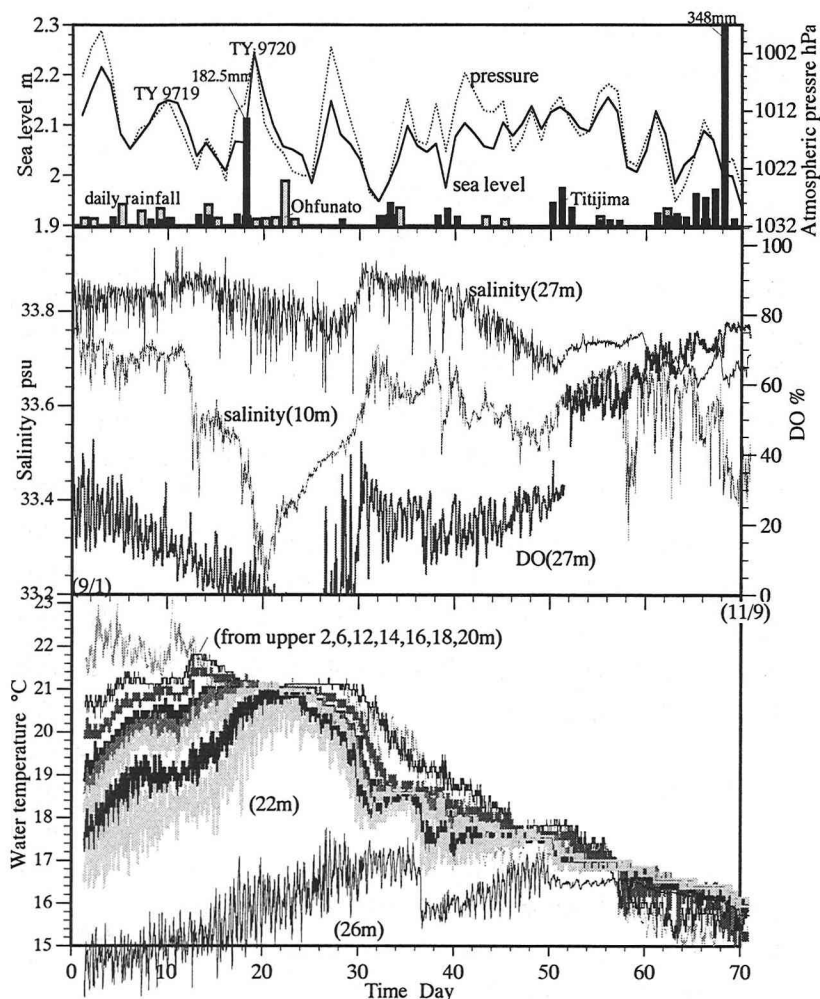


Fig.9 Sea level, Atmospheric pressure, Daily rainfall, Salinity, DO and Water temperature variation at Ohfunato bay (1997.September.1 - November.9)

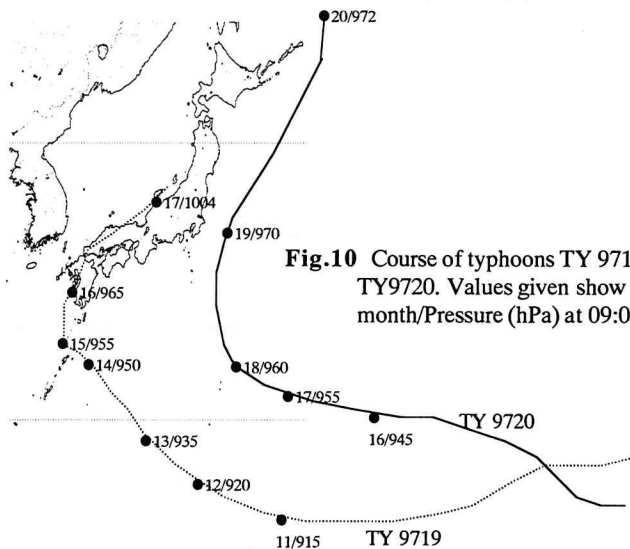


Fig.10 Course of typhoons TY 9719 and TY9720. Values given show Day of month/Pressure (hPa) at 09:00JST.

湾内水に比較して水温は暖かい。この水塊は湾内の上～中層に浸入し、水深20数m以浅にある湾内水の水温を上昇させる（Fig.10のTY9720による場合には22m付近の湾内水を約2℃上昇させている）。これに伴って中層以浅の温度躍層は消滅し、中層以浅での水温は均一化している（Fig.11(a)）。この時

点では底層の貧酸素水塊に与える影響は小さい。

台風による大船渡湾への淡水輸送の影響がなくなると、淡水が流入して変化した湾内の水構造（低塩分、暖水温）に比較して高塩分、冷水温の外海水が湾内へ流入することになる。この外海水は内湾水に比較して重いために、流入した外海水は中層以深に侵入すると考えられる。高密度の外海水が湾内の中層以深へ侵入することによって中層水塊の温度は低下し、再度温度躍層が形成されることになる。さらに、外海水は豊富に溶存酸素を含んでいるため、この海水により底層貧酸素水塊に溶存酸素を供給し、貧酸素水塊を消滅させる要因となる（Fig.11(b)）。

点では底層の貧酸素水塊に与える影響は小さい。

4. おわりに

本論文では大船渡湾における温度（密度）躍層とこれに伴う貧酸素水塊の形成および消滅機構について検討し、貧酸素水塊の形成・消滅は湾域のローカルな現象のみによって起こるのではなく、グローバルな大気の運動や海流等の外力に密接に関連していることを明らかにした。

(1)大船渡湾へは3月頃から8月頃にかけて三陸沖に南下した親潮系の冷水が流入している。大船渡湾への親潮起源の冷水塊（低塩分）の流入は日本周辺海域の水位と密接に関連しており、特に根室と那覇の水位差とよく対応している。また、冬季においても冬型の気圧配置が強まる場合（PNAパターン）には東日本・北日本で水位が上昇し、親潮起源の冷水塊の流入が観測されている。

(2)大船渡湾での温度躍層（貧酸素水塊）の形成は(1)に記述した冷水塊の流入と密接に関連している。低塩分・低水温の水塊は湾内5～15mの層に侵入するが、この時、上～中層付近の水塊から熱を奪い水温を低下させることによって温度躍層が形成され始める。8月頃までは外海から低温・低塩分の海水（夏季に向かって水温は上昇、塩分は低下していく）が上～中層に侵入され続けるため、温度躍層は徐々に強まっている。

(3)温度躍層（貧酸素水塊）の消滅は小笠原高気圧が弱まった後に太平洋を北上する台風によって運ばれ

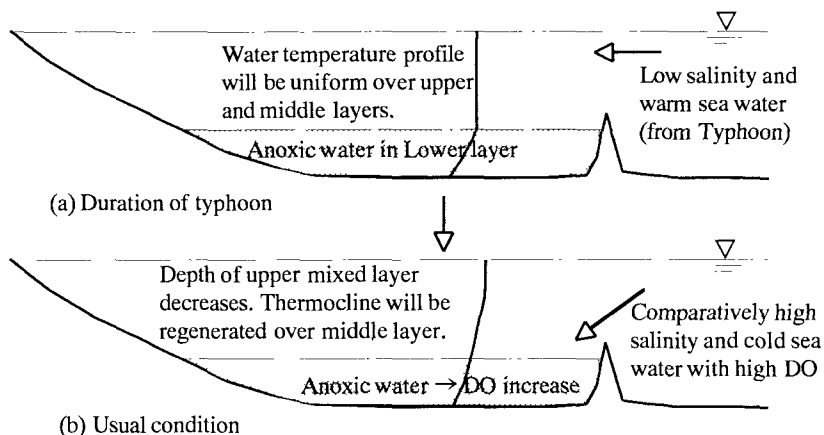


Fig.11 The mechanism of anoxic layer breakdown due to intrusion of fresh water during a typhoon

る低塩分・暖水温の海水が湾内に侵入することによって促進される。低塩分・暖水温の海水は湾内上層から中層水塊の水温を上昇・均一化させる。その後、台風の影響がなくなると、湾内中層水に比較して高塩分・冷水温で溶存酸素を多量に含む外海水が湾内へ流入し、貧酸素水塊に酸素を供給している。

(4)大船渡湾のようにローカルな湾域の水質環境を考える場合においてもグローバルな大気・海洋の場を考えることが重要である。

謝辞： 本研究は運輸省第二港湾局の測量試験費によって行われた。また、1995年～1997年の水温、塩分、溶存酸素のデータは岩手県水産技術センターから提供を受けている。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 日比野忠史：連結系汽水域での流動 - 気候・気象の変化が流れに及ぼす影響 -, 1996年度(第32回)水工学に関する夏季研修会講義集, Aコース, pp.A-7-1-20, 1996.
- 2) Hiroichi TSURUYA, Tadashi HIBINO : A study of anoxic water structures generated in deep bay enclosed by tsunami breakwaters, *COASTAL ENVIRONMENT* 98, pp.373-382, 1998.
- 3) 日比野忠史, 福岡捷二, 池内幸司：季節および日々の気圧配置の変化に伴う閉鎖性汽水湖内部での流れ場の特性, 土木学会論文集, No.579/II-41, pp.93-103, 1997.
- 4) 関根義彦：北太平洋の親潮及び亜寒帯循環の異常南下, 海の研究 Vol.1, No4, pp.153-165, 1992.
- 5) 村上和男, 山田邦明：我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因, 土木学会海岸工学論文集[39](2), pp.1026 - 1030, 1992.
- 6) 長坂, 鶴谷, 村上, 浅井, 西守：大船渡湾の成層と貧酸素水塊に関する現地観測, 土木学会海岸工学論文集[44](2), pp.1066 - 1070, 1997.
- 7) 豊田政史, 日比野忠史, 西守男雄：大船渡湾での海水交換機構と自然力を利用した水質管理手法の検討, 土木学会水工学論文集, 第43巻, 1999.
- 8) 気象年鑑 1997年版, 気象庁監修, 日本気象協会編.

(1998.9.30受付)