

低気圧および台風の移動形態の違いが 汽水湖の流動・水質場に与える影響

福岡捷二¹・黒川岳司²・上原 浩³・三浦 心⁴・船橋昇治⁵

¹フェロー 工博, Ph.D 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 呉工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南2-2-11)

³正会員 工修 パシフィックコンサルタント(株) 水工技術本部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

⁴正会員 工修 (株)建設技術研究所 東京本社河川部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

⁵正会員 工修 国土交通省中国地方整備局出雲工事事務所長 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原5-1)

低気圧や台風がもたらす海水位変化、風、降雨は、汽水湖の流動・水質場の重要な外力であるが、様々な移動形態をとるため与える影響も一様でない。そこで、低気圧や台風を移動経路で分類し、中海の流動の特徴を移動形態との関係から明らかにし、水質場に与える影響を考察した。この結果、次の知見を得た。①低気圧は2種類、台風は4種類の移動経路に分類でき、特に日本海低気圧や台風Type1, 2による水位変動は特徴的で、これは移動速度や風速による。②台風通過に伴う水交換は、海水流入より河川流入の影響が大きいため、降雨量の多いType2台風時に水環境が大きく変化する。③台風や低気圧に伴う密度分布の変化は1週間程度で回復するが、濁質分布は生化学的な影響を受け数週間その影響が残る。④中海・宍道湖の流動・水質変化の把握には、低気圧や台風が持つ水交換力の正しい評価が必要である。

Key Words : connected brackish waters, typhoon track, low atmospheric pressure, water level change, wind, precipitation, water exchange, water environment

1. はじめに

わが国を代表する汽水湖である中海、宍道湖は貴重な生態系を有し、水産資源に恵まれている。近年、アオコや赤潮が発生するなど水域に棲む生物の生息環境が悪化している。このような事態に対し早急な水質改善が求められているものの、汽水湖の流動・水質変化は複雑で、現状では効果的な対策を立てることが難しい。福岡ら^{1,2}は、これまで中海における流動、水質の現地観測を行い、気象・海象・水文場との関係から、流動に対して支配的な外力や、水質環境にとって重要な流動現象を検討し、外海と接している汽水湖においては気象変化が流動、水質場を支配していることを明らかにしている。つまり、汽水湖の流動、水質場を把握するには、気象～流れ場～水質環境という関係から検討する必要がある。このような気象変化から水域の流動・水質場を解明しようとする国内外の研究は、極めて少ないようである。

気象変化によってもたらされる水位変化、風、降雨の特徴は様々である。例えば台風は、経路や速度も様々

で、雨台風や風台風などの俗称もあるように台風が及ぼす影響は個々で異なる。そこで、福岡ら³は、まず台風を移動経路によって分類することで、台風に伴う日本海の水位変動の特徴を明らかにした。

本研究では、この研究を発展させ、台風の移動経路による分類に加え、移動速度との関係からも検討し、台風がもたらす水位変動、風、降雨について分類、整理する。同様の検討を低気圧についても行うことで、日々の気象変化による外力の特性を明確にするとともに、台風の特異性を明らかにする。そして、低気圧や台風の接近に伴う流動、特に水域間での出入特性を移動経路との関係から時空間的に明らかにする。さらに、水質環境に与える影響を評価する。汽水湖では密度躍層が流れ場や水質環境を特徴付けていることに着目して、低気圧や台風の通過に伴う密度や濁度の鉛直分布の変化過程を検討し、水質場との関係を考察する。

最後に、中海・宍道湖の流動・水質変化を把握するには、低気圧や台風がもたらす水交換力を正しく評価することが必要であることを示す。

表-1 中海, 宍道湖の諸元

	水面面積(km ²)	湖岸延長(km)	貯水量(億m ³)	平均水深(m)	平均水位(T.P.m)
中海	86.2	81	4.7	5.4	+0.2
宍道湖	79.1	45	3.6	4.5	+0.3

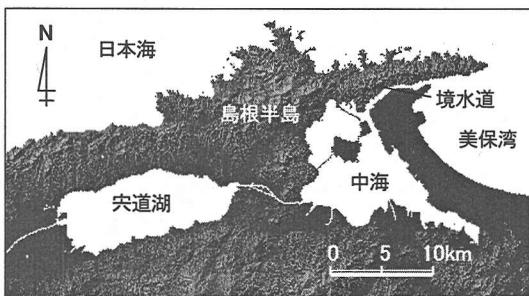


図-1 中海, 宍道湖の周辺地形

2. 中海, 宍道湖の地勢・地形および水質環境の特徴

(1) 中海, 宍道湖の地勢・地形の特徴

中海, 宍道湖の諸元は表-1の通りである。中海, 宍道湖は、図-1に示すように、中国山地を源として斐伊川（淡水）→宍道湖（低塩分汽水）→大橋川（平均川幅約170m, 長さ7.6km）→中海（高塩分汽水）→境水道（平均川幅約420m, 長さ8.7km）→美保湾（内湾）→日本海（海洋）と連なる斐伊川水系の中にある。大橋川, 境水道の規模はともに中海, 宍道湖に比べ小さい。このため、日本海の水位変化は時間的に遅れて中海, 宍道湖へ伝播する。その遅れは美保閑水位に対し中海が2~3時間, 宍道湖が7~8時間である^{1,4)}。

中湖, 宍道湖は、北部が標高200m以上の島根半島, 南部が内陸地によって挟まれ、東西方向は低地で結ばれている。そのため、東西方向の風が卓越しやすい²⁾。

日本海は太平洋、東シナ海と4つの狭い海峡（対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡、間宮海峡）で連結されている。そのため日本海の水位は気圧変化や風などの外力が加えられたとき太平洋側とは異なる応答を示す。特に、台風の接近・通過は急激な気圧変化や強風をもたらし、水位と気圧の関係は個々の台風の特性によって異なることが明らかにされている⁵⁾。

(2) 中海, 宍道湖の水質環境の特徴

中海, 宍道湖では、斐伊川から淡水が流入する一方、美保湾から境水道を通じて海水が逆流入することで、

淡水域から海域にいたる典型的な塩分推移帯が形成されている。中海, 宍道湖における水質の水平分布の特徴は、同一水系でありながら宍道湖, 中海, 美保湾の各水域で、それぞれ強い独自性を持ち、水質の違いが大きいことである。中海では密度躍層がほぼ全域で年間を通じて水深2~6m付近に存在し、安定した成層構造を有している^{1,6)}。宍道湖では中海ほど強固ではない密度躍層が湖底近くに存在している。また、このような密度躍層は上下層間の物質輸送を妨げるため、下層部はDOが供給されにくく、貧酸素化しやすい傾向にある。下層水の貧酸素化は底泥からの栄養塩溶出を促進し、富栄養化を増長させるという悪循環を生じさせている。

また、水質の鉛直構造は、淡水・海水の流出入や栄養塩の供給などの作用を持つ気象外力によって、変化を受けやすいという特徴を持っている。

3. 低気圧および台風の移動形態の特徴

気象変化のうち、低気圧や台風は海水位の変化や風、降雨をもたらすため汽水湖内の流動・水質場に与える影響が大きい。しかし、低気圧や台風による海水位の変化は、移動経路や速度など移動形態に応じて特徴が異なることが明らかにされている^{5,7)}。台風や低気圧の経路の統計的研究は以前から行われ、台風の移動予測は今日でも重要な研究課題である^{8,9)}。また、風や降雨についても検討する地点の低気圧・台風との位置関係が重要であることから、移動経路と風や降雨などの関係は、各地域において統計的な調査が数多く行われている^{10,11)}。

したがって、風や降雨などの気象現象の特徴を把握するには、各地点毎で地勢・地形などの条件を踏まえて低気圧・台風の移動形態との関係を検討する必要がある。中海・宍道湖においては、流動・水質変化の外力となる外海の水位変動・風・降雨と、それらをもたらす低気圧・台風の移動形態との関係を検討することが特に大切である。そこで、中海・宍道湖での流動・水質変化を検討、評価するために、水位変化・風・降雨などを支配する低気圧や台風の移動形態を分類しておく。はじめに低気圧の移動について一般的な特徴を簡単にまとめ、次に台風の移動経路を分類する。そして、台風の移動速度についても検討を加える。

(1) 低気圧、台風の移動経路の分類

図-2に示すように、わが国に影響を及ぼす低気圧は、黄海付近で出現して日本海を発達しながら通過する日本海低気圧と、東シナ海付近で出現して本州の南方洋

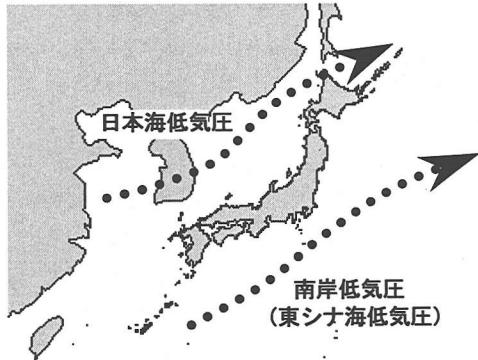


図-2 溫帶低気圧の平均的な通過経路（1958～1987 年の秋季（9～11 月）における低気圧の出現頻度の極大を結んでいる）¹²⁾

上や太平洋岸沿いに進行する南岸低気圧（または東シナ海低気圧）の 2 つに大別される¹²⁾。いずれの低気圧も気圧の谷の前面での南西風によって流されるため、北東に進む傾向がある¹³⁾。出現頻度は季節ごとに異なり、冬季から春季にかけては南岸低気圧の方が日本海低気圧よりも多いが、秋季に入ると日本海低気圧が多くなる¹⁴⁾。

台風は、平均的に見ると、1 年間に約 27.8 個の台風が発生し、このうち 5.3 個の台風が本土に接近し、2.8 個が本土に上陸する¹⁴⁾。しかし、年ごとのばらつきも大きく、また、個々の台風の強さや大きさ、移動速度や経路は様々である。磯崎¹⁵⁾は移動経路によって日本海の水位変動は色々な形態をとることを示している。そこで、台風を移動経路によって分類する。

ここでは、1990～1998 年の 9 年間で発生し、わが国に影響を及ぼした 54 個の台風¹⁶⁾を用いた。本土への上陸の有無や進行方向を主な基準とし、美保関での水位と気圧変化、中海での風向・風速なども考慮して分類した。これによると、図-3 に示すように 4 種類に分類することができる³⁾。Type1 は、本土に上陸せず、あるいは九州北部をかする程度で、日本海を南西から北東に移動する。Type2 は、日本の南から接近、上陸し、本土を横断して日本海へ抜ける。Type3 は、日本から南に接近するが、その時の気圧配置の影響などにより大陸方向に逸れていく。Type4 は、太平洋側を通り、本土に上陸しても再び太平洋側に抜ける。

表-2 に Type 別の月別発生個数を示す。7 月はやや Type1, Type2 が多く、8 月では各 Type の発生数に差がない。9 月になると Type2 と Type4 が増える。大まかに言えば、秋に向かうにつれて台風経路は日本海側から太平洋側にシフトする。また、月発生数が最も多いのは 9 月で全体の約 4 割を占めている。

台風経路のうち、中海に大きな影響を与えるのは、

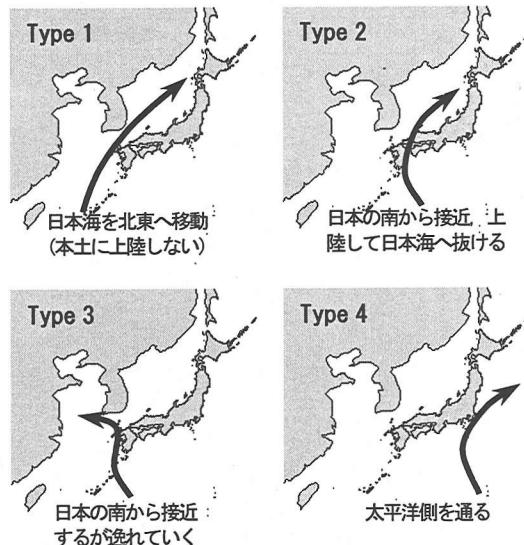


図-3 台風移動経路の分類³⁾ (1990～1998 年に日本に影響を及ぼした 54 個の台風について整理)

表-2 月別台風通過個数 (1990～1998 年)

	6月	7月	8月	9月	10月	11月	計
Type1	0	3	3	3	1	0	10
Type2	0	4	3	9	1	1	18
Type3	0	1	3	1	0	0	5
Type4	3	2	3	8	2	1	19
その他	0	0	2	0	0	0	2
計	3	10	12	21	4	2	54

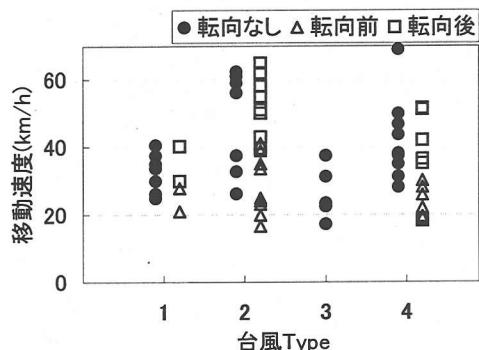


図-4 台風 Type 別の移動速度 (わが国付近で転向した台風については転向前後に分けて表示している)

中海に接近しやすい Type1 と Type2 である。ただし、Type2 では急激に勢力を弱めることが多い、温帶低気圧化することも多い。これは、台風は北上して冷たい海域に入ったり上陸したりすると、エネルギー源であ

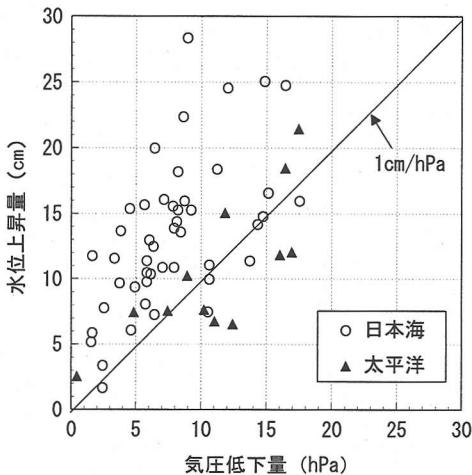


図-5 低気圧通過時の気圧低下量と水位上昇量の関係

る水蒸気の補給が絶たれるためである。過去の資料¹⁶⁾においても、1951年～1981年の30年間で上陸した台風約90個のうち、九州と四国になみの強さ（中心気圧990hPa以下）で上陸したものがそれぞれ10個以上あるが、中国地方には1度もない。

(2) 台風の移動速度の特徴

図-4に1990～1998年におけるType1～4の52個の台風を移動速度について、Type別に分類したものと示す。台風の移動速度は、中海・宍道湖からおよそ1000km以内（中海・宍道湖～沖縄間程度の距離）にある時の平均速度を台風経路図¹⁵⁾から算出した。なお、台風は転向することも多く、転向後速度が大きくなる傾向にあることから、わが国付近（中海・宍道湖からおよそ1000km以内、つまり沖縄以北）で転向した台風については転向前と後で区別して表示している。台風が転向後に急に速度が増すのは偏西風速の方が偏東風速よりずっと大きい¹³⁾ためである。

偏東風や偏西風およびその中に位置する亜熱帯高気圧の位置や強さが季節的に変化する。夏季は転向点が低緯度となりやすいため、比較的夏季に多く発生するType1は転向後にわが国の南西から接近する割合が高い。Type1は1990～1998年の間に10個あったが、わが国付近で転向するケースは2個で、いずれも転向前の方が遅い。ただし、転向の有無にかかわらずType1の移動速度は全般的に遅い。Type2は夏季から秋季にかけて多いため、転向点がわが国付近となるケースが多く、半数以上を占めている。また、転向前後の速度差が大きいことも特徴のひとつである。

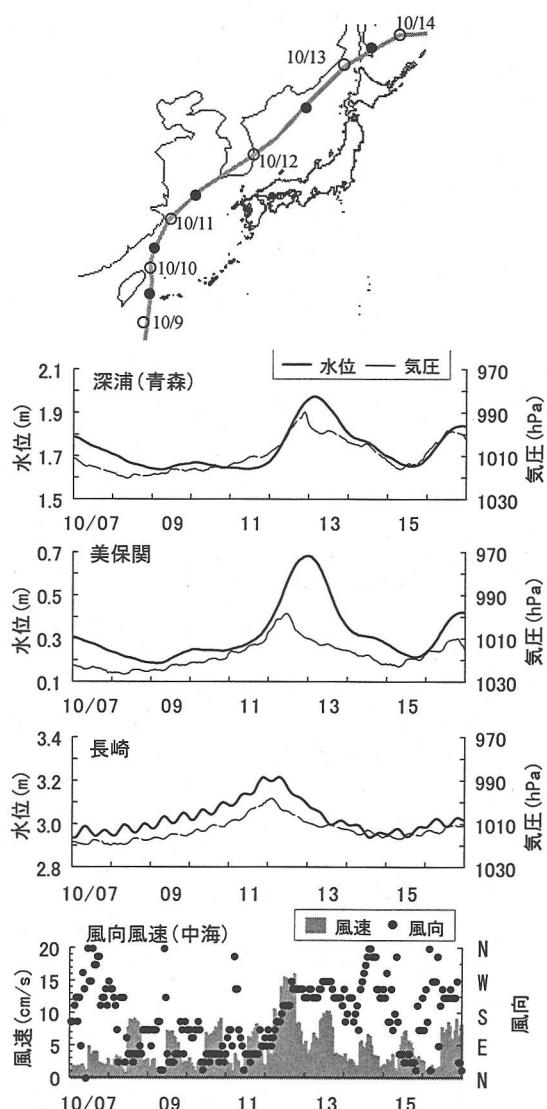


図-6 台風9429号（Type1）の移動経路と日本海の水位と気圧、風向風速の経時変化
(1994/10/7-10/16)

4. 低気圧および台風の移動形態と風、水位変動、降雨との関係

(1) 移動形態による中海の風と水位変動特性の違い

a) 低気圧の場合

日本海低気圧と南岸低気圧の移動経路の違いから、気圧と水位の関係について検討する。1990年～1997年秋（9～11月）の各低気圧通過時の中海における気圧低下量と水位上昇量の関係を図-5に示す。なお、水位上昇量は低気圧通過中の水位の最低値と最高値の

差を表す。図中の $1\text{cm}/\text{hPa}$ は静的条件下における気圧低下量に対する水位上昇量の割合である。日本海低気圧の場合、ほとんどのプロットの位置が $1\text{cm}/\text{hPa}$ のラインより上部にあり、低気圧通過時には $1\text{cm}/\text{hPa}$ より大きくなる。これは、日本海側に位置する美保関では、気圧低下に伴う吸い上げによって海面が上昇とともに、低気圧の移動によって、例えば、次項 b) で挙げる陸棚波などのように海面上昇が波動となって伝わる海水流動の影響を受けることが原因であると推測される。一方、南岸低気圧では $1\text{cm}/\text{hPa}$ のライン上に乗りやすい。これは太平洋側を通過する場合、本州により日本海と隔てられているため、低気圧が日本海を通過する場合に比べて海水流動の影響を直接的に受けず、静的な気圧変化による影響で水位が決まるためと考えられる。

b) 台風の経路が Type1 の場合

Type1 の経路は、太平洋高気圧の発達する夏の時期に多く、太平洋高気圧の外縁を台風が進むとき、この経路をとりやすい。このときの水位変動を 1994 年 29 号台風（以後 9429 号と記す）を例に考察する。図-6 に 9429 号の移動経路と深浦（青森）、美保関、長崎の水位と気圧、および中海での風向風速の経時変化を示す。水位は 25 時間で移動平均された値である。なお、水位軸と気圧軸の割合は、静的条件下における気圧変化量に対する水位変化量である $1\text{cm}/\text{hPa}$ に対応させている。

このとき全観測点で水位は上昇している。その上昇量は大きく、美保関で約 40cm であった。また、美保関において気圧低下ピーク時と水位上昇ピーク時にタイムラグがあることが分かる。9429 号ではそれは約 12 時間であった。この理由を磯崎⁹⁾は日本海入り口において外力が与えられ、山陰沿岸の陸棚地形から陸棚波が発生し、それが山陰沿岸を伝播するためであると考察している。その伝播速度は $3 \sim 4\text{m/s}$ ($=11 \sim 14\text{km/h}$)^{5), 17)}、これは台風（約 $20 \sim 60\text{km/h}$ ）よりも遅いために気圧低下ピーク（台風最接近時）よりも水位上昇ピークが遅れることになる。また、長崎、深浦では気圧低下ピークとほぼ同時刻に水位上昇ピークが生じている。このことから美保関が位置する山陰沿岸地域の水位変化は他の日本海沿岸地域とは異なる変化を示すことが分かる。

このように美保関で水位が上昇することは Type1 の経路をとるときほぼ同様であったが、この経路を通ったにも関わらず異なる水位変化をとる場合があった。図-7 は 9113 号時のものである。経路は 9429 号と同様に日本海を通っているが、台風接近時に美保関、深浦では水位が大きく低下している。これに対し、長崎では大きな水位変化はない。ここで、9429 号と 9113 号

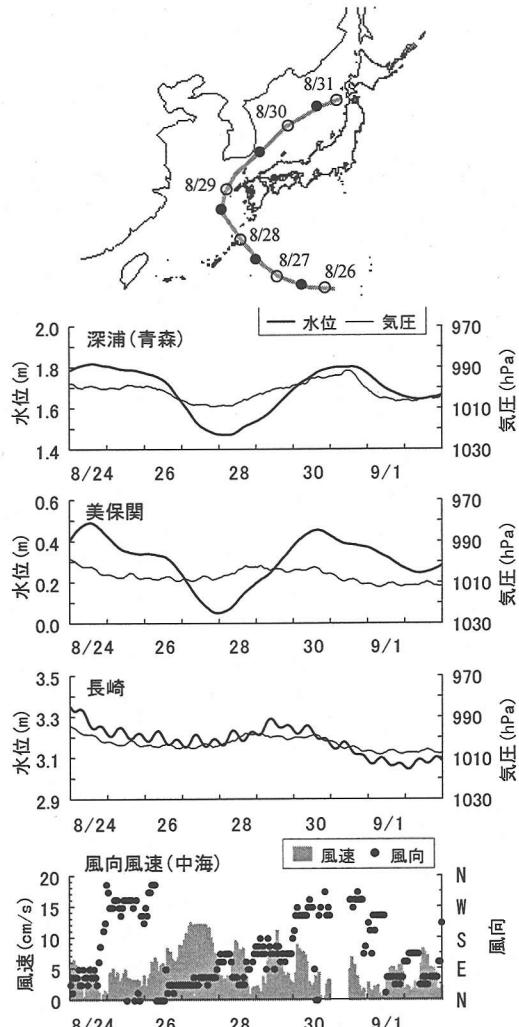


図-7 台風 9113 号 (Type1) の移動経路と日本海の水位と気圧、風向風速の経時変化
(1991/8/24~9/2)

の風向風速を比較してみると、9429 号時は最大風速が 15m/s の西風、一方、9113 号時は 10m/s 以上の北東風が約 1 日間吹き続けている。その強風によって日本海では南西向きに流れが生じ、これにコリオリ力の作用が加わって山陰沿岸から離れる向きに海水流動が生じたため美保関では水位が低下したと考えられる³⁾。9113 号時にこのような強い東風が吹き続けた理由は、9429 号が九州の南西から移動する場合と異なり、九州付近に転向点を持っており、太平洋側からゆっくり接近しているためである。このように台風が日本海を通過する場合でも、日本に接近するときの経路によって風速、風向が異なり、日本海ではそれに応じた海水流動が生じるため、美保関水位変化の形態が異なってくる。

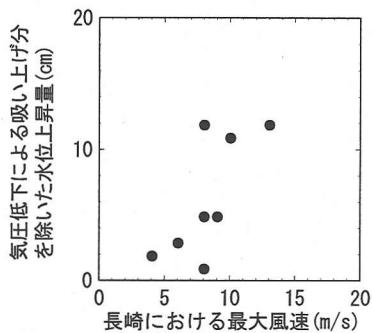


図-8 長崎における最大風速と気圧低下による吸い上げ分を除いた水位上昇量の関係 (Type1)

Type1は1990～1998年の間に10個であったが、水位が低下するケースが2個あり、これはいずれもわが国付近で転向したケース(図-4)であった。つまり、わが国付近で転向する場合、太平洋側の南東から比較的遅い速度で接近してくるため、東風が長時間吹き続けやすくなり、水位低下の原因となると考えられる。

次に、水位が低下する特別な場合を除き、一般的なType1の台風通過により水位上昇する台風について、気圧低下以外の外力要因との関係について考察する。

図-8に日本海入り口付近の長崎における台風通過時の最大風速と、全体の水位上昇量から静的条件下で期待される気圧低下による吸い上げ量を差し引いたものの関係を示す。気圧低下による静的な吸い上げ効果以外の水位上昇の原因のひとつとして陸棚波の伝播によるものが考えられているが^{5),7)}、美保関での水位上昇は、陸棚波発生の原因となる日本海入り口付近での最大風速に関係が深いことがわかる。

c) 台風の経路がType2, 3の場合

9719号を例に考察する。図-9に移動経路と美保関の水位と気圧、中海での風向風速の経時変化を示す。期間前半、台風接近につれ気圧変化は小さいが水位は大きく低下し、台風通過後水位は上昇する。経路がType2のとき、美保関では気圧変化によらない水位変化をする。これは前述の9113号時の水位変化と同様である。9719号時の風向風速を見ると、9113号時と同様に強い東風が数日間吹き続いている。このように台風接近時に美保関で水位が低下するのは、移動経路のTypeにかかわらず、台風が転向点をわが国付近に持ち日本の南からゆっくり接近することで、日本海に強い東風が吹き続けたときであると考えられる。また、Type3の場合の美保関の水位変動について、強い東風が吹き続けたならば、Type2と同様に水位の低下が見られた。

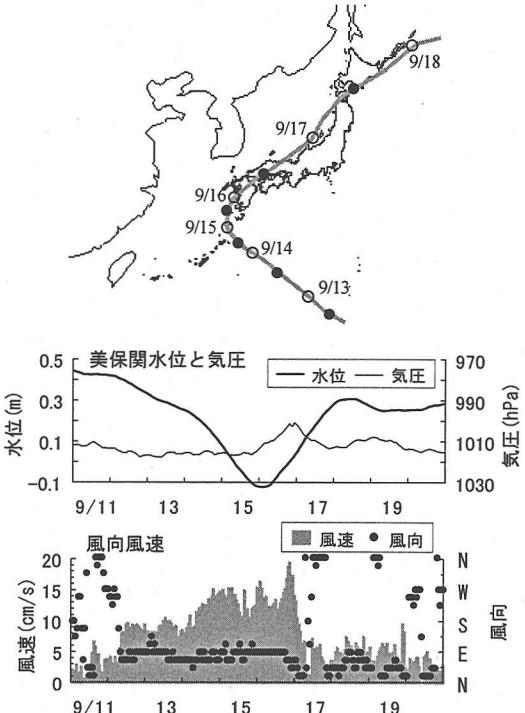


図-9 台風9719号 (Type2) の移動経路と日本海の水位と気圧、風向風速の経時変化
(1997/9/11～9/20)

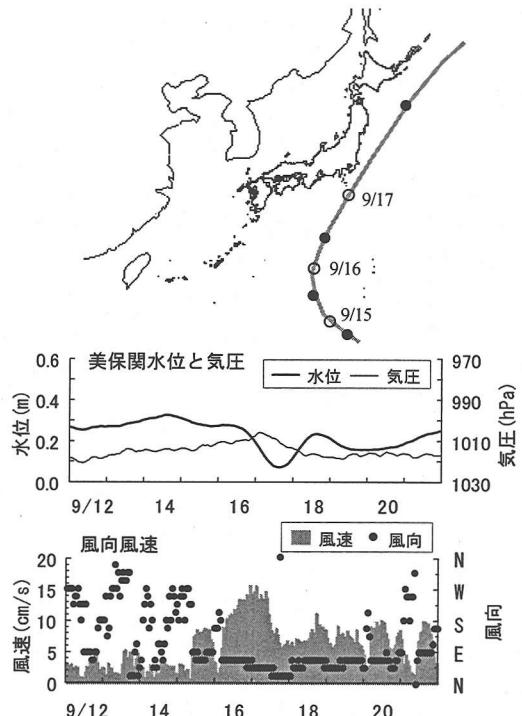


図-10 台風9512号 (Type4) の移動経路と日本海の水位と気圧、風向風速の経時変化
(1995/9/12～9/21)

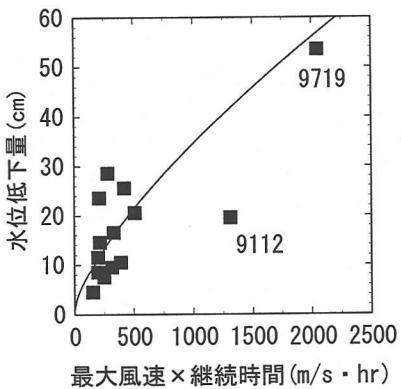


図-11 台風の最大速度と継続時間の積と美保関水位低下量の関係³⁾

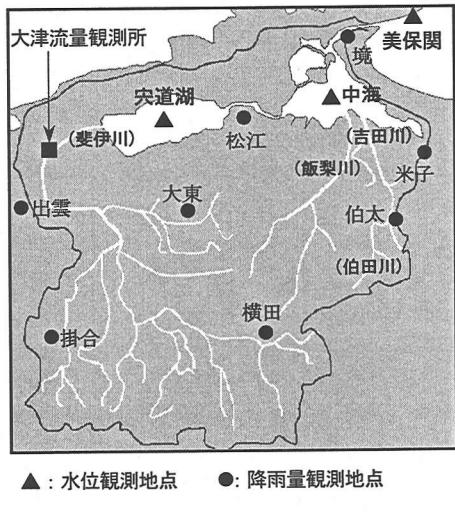


図-12 中海周辺の水位観測点と斐伊川流域の降雨量観測地点

d) 台風の経路が Type4 の場合

Type4 の台風は 19 個あったが、日本海から遠く離れているため、美保関の水位変化に明確な台風の影響は見られない。しかし、この経路の場合にも美保関の水位が低下した台風が 3 個あった。図-10 は 9512 号時のもので、台風は中海から遠く離れているにも関わらず美保関の水位は低下している。風向風速を見ると Type2 と同様、10m/s 以上の強い北東風が吹き続けている。このことからも台風接近に伴う強い東風が吹き続けることによって日本海では海水流動が生じ、美保関の水位を低下させることが分かる。経路が Type4 の場合、美保関水位はほとんど台風の影響を受けないが、日本海で強い東風が吹き続ければ水位低下が生じる場合がある。

ここで、台風接近時の美保関水位の低下と東風の強

表-3 台風通過期間の降雨量

Type	台風	台風期間	松江降雨量 (mm)
Type1	9007	7/11~7/12	15
	9015	9/2~9/3	15
	9109	7/28~7/30	10
	9113	8/28~8/30	1
	9219	9/23~9/25	19
	9307	8/9~8/11	12
	9429	10/11~10/12	2
	9503	7/23~7/24	5
	9711	8/8~8/9	1
	9809	9/30~10/2	14
平均値±標準偏差			9.4±6.7
Type2	9014	8/22~8/23	52
	9028	11/30~12/1	64
	9117	9/13~9/14	56
	9119	9/27~9/28	16
	9210	8/7~8/9	31
	9211	8/18~8/20	40
	9304	7/25~7/26	26
	9305	7/27~7/28	84
	9306	7/29~7/30	0
	9313	9/3~9/4	134
平均値±標準偏差			61.4±45.2
Type3	9112	8/21~8/24	12
	9209	8/3~8/5	3
	9407	7/24~7/27	8
	9413	8/10~8/12	0
	9806	9/18~9/19	20
平均値±標準偏差			8.6±7.9
Type4	9011	8/9~8/10	6
	9019	9/18~9/20	107
	9020	9/29~9/30	14
	9021	10/6~10/8	92
	9114	8/30~8/31	1
	9118	9/18~9/19	2
	9203	6/29~6/30	10
	9230	11/30~12/1	0
	9311	8/26~8/27	3
	9314	9/8~9/9	1
	9320	10/7~10/8	16
	9512	9/16~9/17	0
	9605	7/10~7/11	0
	9606	7/18~7/20	28
	9617	9/21~9/22	0
	9621	9/30~10/1	0
	9707	6/19~6/20	4
	9708	6/27~6/28	116
	9805	9/15~9/16	49
平均値±標準偏差			23.6±38.4

さの関係について調べた。中海での風向風速から各台風の最大風速と台風の影響と思われる強い東風の継続時間を探べ、それらの積と美保関の水位低下量の関係をプロットしたものが図-11 である。この図から、最

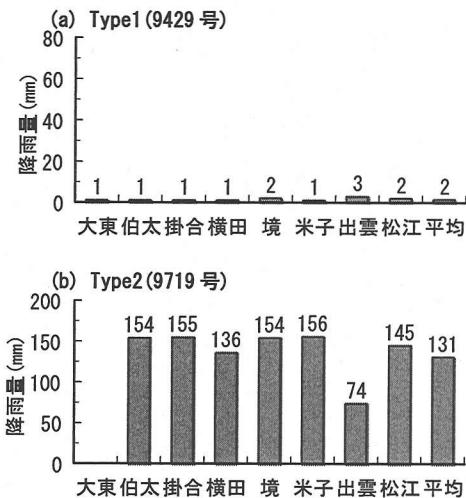


図-13 台風通過時の斐伊川流域降雨分布

大風速と継続時間の積は美保関の水位低下量に関係していると思われる。9112号が外れているのは、移動経路が異なっていた(Type3)ためと考えられる。これらから台風接近時に美保関で水位が低下するのは台風の移動経路に加え、東風の強さと継続時間が効いていることが分かる。

(2) 移動形態による降雨特性の違い

ここでは降雨量データを用い、低気圧および台風の移動経路による降雨特性の違いを検討する。

図-12に中海・宍道湖周辺の水位、気圧、風向風速および斐伊川流域における降雨量観測地点を示す。8地点の観測所のうち、大東、伯太、掛合、横田は山間部に、出雲、松江、米子、境は平野部に位置している。中海に流入する主な河川は宍道湖を介して流入する斐伊川本川と中海へ直接流入する飯梨川、吉田川、伯太川である。

表-3に1990~1998年におけるType1~4の52個の台風について、台風通過期間における松江気象台の降雨量を示す。Type1は降雨量が最大で20mm以下と少ないが、Type2は最大で150mmに達している。平均値で比較してもType1が9.4mmに対し、Type2は61.4mmと大きい。これは、Type2の移動経路が中海に近いため、台風に伴う雨雲の影響を受けやすいが、Type1は中海から離れているため雨雲の影響は小さいためと考えられる。一方、Type3、4は台風が中海から離れて通過するため降雨量は少ない。しかし、Type4で移動経路が比較的中海に近い場合、降雨量が多い時がある。このように、Type1台風は、外海水位上昇と

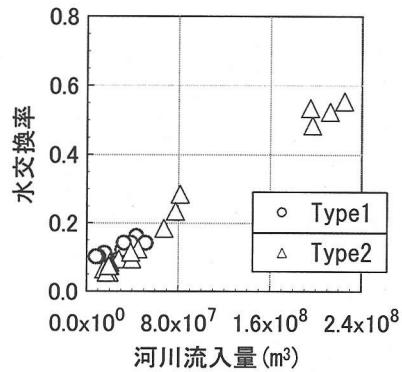


図-14 台風通過時の河川流入量と水交換率

西風をもたらすが、Type2台風は接近前の東風の連吹と外海水位低下とともに、通過時に多量の降雨ももたらす。これら2種類の台風は日本海に抜けるという点では類似しているが、上陸する、しないによって各台風がもたらす外力の特徴は全く異なる。

次に、台風通過時の斐伊川流域における降雨分布を気象観測所で得られた降雨量のデータをもとに検討する。図-13に図-6に示したType1(9429号)と図-9に示したType2(9426号)通過時の斐伊川流域における降雨量分布を示す。また、流域平均値も示している。両者を比較すると、Type2がType1に比べて降雨量が明らかに多いことが、この図からもわかる。Type1は平均的に降雨量が少なく、各地点での降雨量の差は小さい。Type2は降雨量が多く、各地点で降雨量に差がある。特に、9719号時の出雲での降雨量は他地点に比べ半分程度である。しかし、斐伊川流量の源である山間部での降雨量に大きな差はない。これらのことから、多量の降雨をもたらすType2の台風通過時には斐伊川流域において降雨量に分布ではなく、流域全体に平均的に降雨があることが分かる。

5. 低気圧および台風通過に伴う海水、河川水流入と水質環境に及ぼす影響

(1) 宍道湖・中海における水交換率の算出

低気圧、台風の移動形態によって外力条件が決まったとき、湖内の水質変化はどの程度であるのかについて、まず水交換率を用いて評価する。

中海・宍道湖は2成層の水域であるが、台風通過時には強風を伴うなど搅乱が大きい。ここでは現象を簡単に捉え、完全混合の水域と考える。河川水と外海水の両方から流入を受けるとして、台風通過期間の水交換率を次式のように定義する。

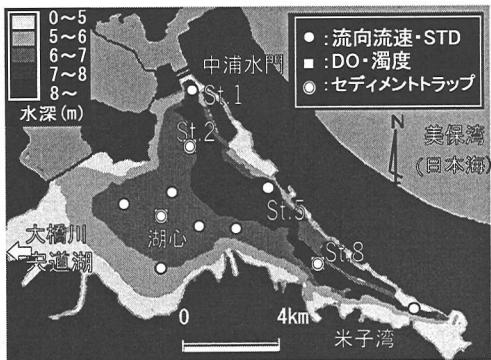


図-15 水深分布と観測点

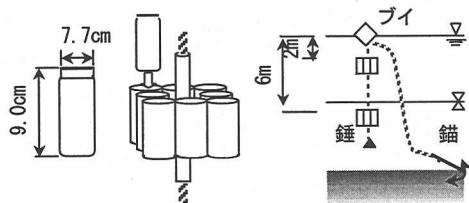


図-16 セディメントトラップ

$$\alpha = Q/V$$

$$Q : \text{総流入量 (m}^3\text{)} = (\text{河川流入量}) + (\text{降雨量}) \\ + (\text{外海水流入量})$$

$$V : \text{総水容量 (m}^3\text{)}$$

中海、宍道湖の総水容量は $4.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $3.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ である。外海水流入量は、低気圧や台風の通過により生じた水位上昇量に湖水面積を乗じて算出する。河川水流入量は図-3に示す大津観測所の流量を用いる。ここで、大津観測所の流量は斐伊川本川流域からである。斐伊川本川以外の流域面積は、小さくないことから、この流域からの斐伊川本川流域に対する流域面積比を用いて河川流入量は算出する。面積比を用いることができる理由は、図-13 から流域の降雨量分布に大きな偏りがないためである。宍道湖・中海に流入する河川の全流域面積は 1903 km^2 、このうち、斐伊川本川流域面積は 912 km^2 で、面積比は 2.09 となる。大津流量に 2.09 を乗じた量を湖に流入する河川流量とする。また、降雨量は松江気象台で観測された降雨量に湖水面積を乗じる。これらを用いて、水交換率を算出する。

図-14 に台風通過時の河川流入量と水交換率の関係を示す。Type1 は外海水流入を伴うものの、水交換率は大きくない。これに対し、Type2 では降雨量が多いため、河川流入量が大きく、水交換率も大きくなる。

中海では、Type2 に伴う河川水流入量増加の水交換率に与える影響が、外海水流入より大きいことを表している。

また、斐伊川年平均流量 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ を用いると、平常時1日の中海、宍道湖の水交換率はそれぞれ 0.020 , 0.024 となる。ここで、日本海では天文潮の振幅が小さいため、天文潮に伴う外海水の流入は考えないこととした。このことから、一つの台風通過に伴う水交換率は、Type1 や Type2 の少雨の場合で平常時の約 10 日分に相当し、多くの降雨を伴う Type2 の場合で約 1 ヶ月分に相当することがわかる。

このように、河川からの淡水流入量の増加が台風や低気圧通過による水交換を支配していることから、この時は湖内塩分が急激に低下し、水環境が急変するものと考えられる。

(2) 低気圧および台風通過時の湖内流動・水質変化を捉えるための現地観測

1997～1999 年の台風が多く去来する秋季の半月～1 ヶ月間において、図-15 に示す湖内 10 地点(○, ◎: 湖心を除く)で、上下層の流向流速、水温、塩分、DO の連続的な観測を行った。また中海湖心においては年間を通じて水位、気象、水質のモニタリングを行っている。

さらに、1999 年の観測では、湖内 4 地点(□)の鉛直方向 4 点において濁度についても観測を行った。また適時各観測地点において STD を用いて密度の鉛直分布を測定した。濁質の採取を目的としてこれらの観測と同時に 10 月 2 日から 1 週間程度の期間を 2 回、湖内 3 地点(◎)の上、下層にセディメントトラップ(図-16)を設置した。またセディメントトラップの設置、回収時に鉛直方向 4 点について採水を行った。

(3) 低気圧および Type1 台風通過時の外海水流入と湖内 DO 分布の変化

中海では夏から秋に下層水が貧酸素化すると、底泥からの溶出を助長するため、これが富栄養化の一因となっている²⁾。ここでは、特に下層 DO の挙動を外力条件～流れとの関係から検討する。図-17 に Type1 台風 9809 号通過時の美保関水位、気圧、風向風速、河川流量、流速ベクトルの経時変化を示す。気圧低下とともに水位が上昇し、St.02 下層で湖内へ向かう大きな流れがあることから、外海水が流入している。図-18 に(a)9807 号通過時と、(b)1997 年の観測結果から低気圧通過時の St.02, 08 における DO の経時変化を示す。なお、この低気圧は南岸低気圧であったので気圧低下に対して 1 cm/hPa の水位上昇を生じていたことは確認されている。Type1 台風と同様に、低気圧通過時に

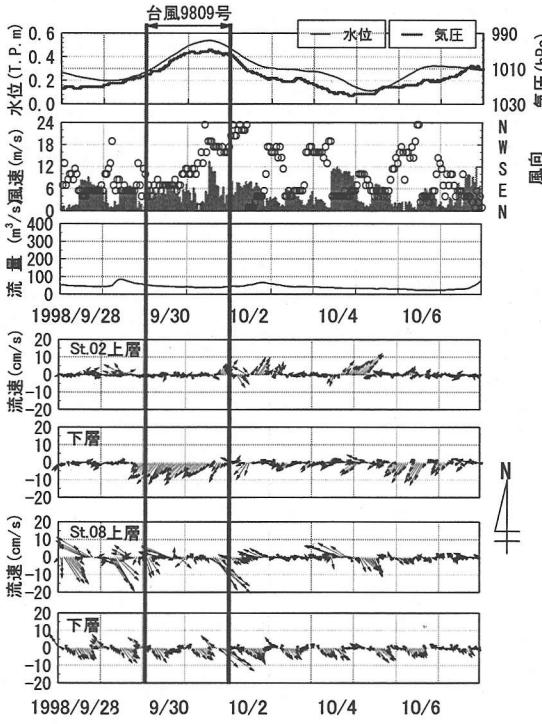


図-17 9809号(Type1)通過時の水位、気圧、風速、風向、河川流量およびSt.2, St.8の流速ベクトルの経時変化

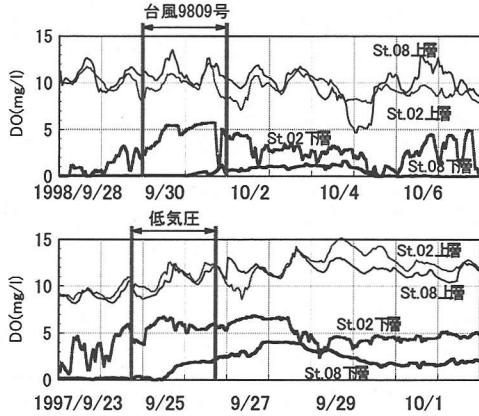


図-18 9809号(Type1)および1997年低気圧通過時のSt.2, St.8のDOの経時変化

も水位上昇するため、外海水が流入し、両期間で米子湾のSt.8下層DOを上昇させている。通過後に1998年では下層DOは徐々に減少し、約5日間で両地点ともに再び貧酸素状態に戻る。一方、1997年では両地点とも貧酸素化していない。通常、この時期の下層DOは消費される傾向にあるが、(b)1997年には下層DOの酸素消費が遅かった。この原因として、低気圧以前に去來した台風(Type2)の影響が考えられる。

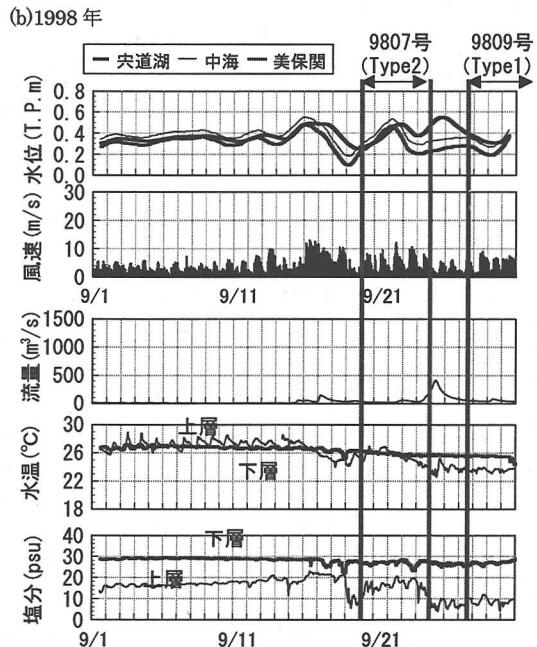
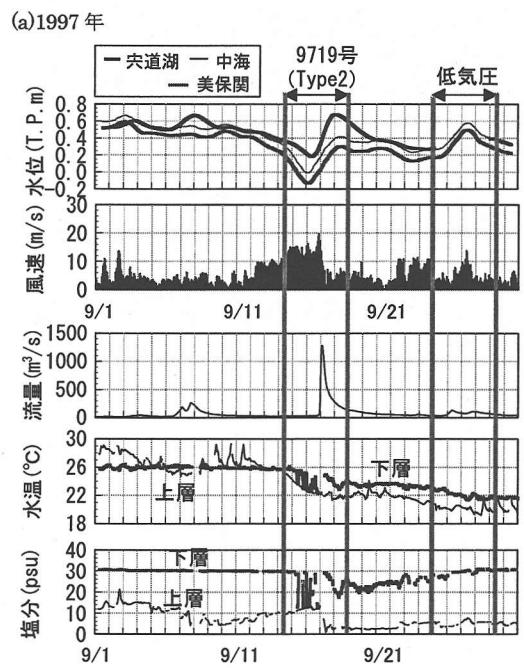


図-19 Type2台風通過時の水位と河川流量、中海湖心における風速、水温、塩分の経時変化

(4) Type2台風通過による湖内水質環境の変化

図-19に図-18に示した9809号、低気圧通過前に去來した台風通過時の水位と河川流量、中海湖心における風速、水温、塩分の経時変化を示す。(a)1997年を見ると、低気圧の前にType2の9719号が去來している。

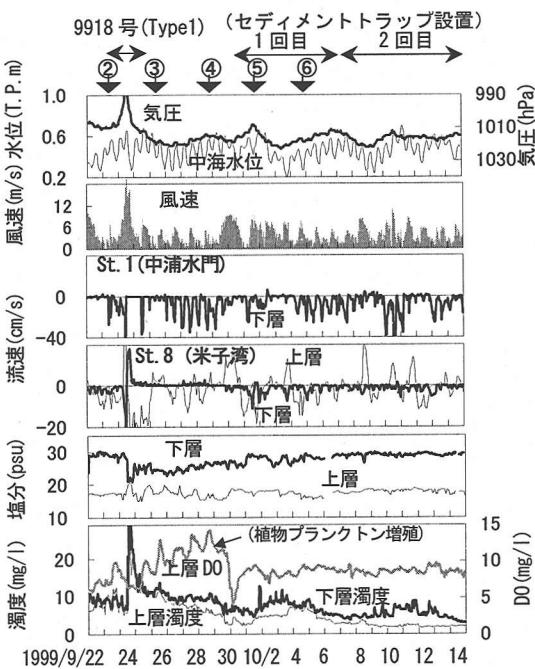


図-20 気圧、水位、風速、St.1, 8 での流速、塩分、St.5 での濁度と DO の経時変化(①～⑥は図-21に対応)

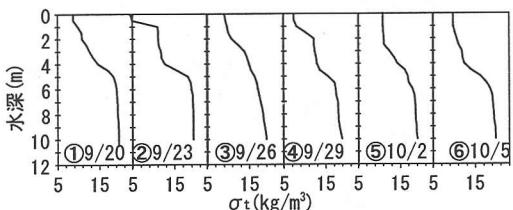


図-21 St.8 における σ_t の鉛直分布の変化

この時、中海水位が低下し、河川流量も増加したことから、宍道湖～中海で数日間にわたって水位差が生じている。これより、中海には、宍道湖から淡水が流入し続けた。さらに、10m/sを越える強風の連吹がある。このため、下層では水温、塩分を大きく低下した。特に下層では水温が通過前に比べて4°C低下している。これにより、9719号以前に形成されていた夏季の水環境が変化し、図-18(b)に示したように、低気圧通過後の下層における酸素消費などDOの挙動に影響を与えたと考えられる。一方、9809号前には9807号が去来しているが、風、河川流入の大きさは9719号に比べて小さく、下層における夏季の水環境がそのままの状態で残っているため、図-18(a)のようにType1台風によって回復した下層DOは、消費され貧酸素状態になると考えられる。

(5) 低気圧および台風通過に伴う鉛直密度分布の変化

図-20にType1の台風9918号通過時を含む1999/9/22～10/15における気圧、水位、風速、St.1, 8での主流軸流速、湖心での塩分、St.5での濁度とDOの経時変化を示す。この9/24に通過した9918号はType1で降雨は多くなかったが、強い台風で中海・宍道湖の近くを通過したため、風速15m/sを越える強風と急激な気圧変化に伴う中浦水門(St.1)下層からの外海水流入が生じている。さらに、9918号通過時に2つの低気圧が通過している。また、図-21にこの期間中のSt.8における密度 σ_t の鉛直分布の変化を示す。

9918号通過以前(①, ②)は上下層間で密度分布が大きく異なるが、強風を伴った9918号の通過とともに全体の密度勾配が緩やかになり(③), やがて気象が平穏となると再び成層度が徐々に回復している(④～⑥)。この時、強風となるのは9918号通過時のみであるが、海水流入は9918号通過時以外でも気圧が低下傾向にある時には生じている。この海水流入を受けて、下層塩分は9918号通過後に上昇傾向にある。これらのことから、9918号通過時のような非常に強い風を伴う場合のみ躍層は緩やかになるが、海水流入は成層を安定化させる働きを持つことで、気象平穏時において成層が安定化に向かうことがわかる。

また、図-20、図-21で示した例はType1台風の場合であるが、多量の降雨を伴うType2台風では上層に河川水が流入するため、Type1よりもさらに台風通過後の成層安定化が起こりやすいと言える。

(6) 濁質分布の変化と水質環境に及ぼす影響

9918号通過時(9/24)の強風に対応して、濁度も著しく上昇している(図-20)。図-22に9918号通過前後での流れと濁度の鉛直分布を示す。上層の濁度が上昇しているが、これは強風に伴って25cm/sを越える強い吹送密度流が生じ、上下層間の混合によって底泥が巻き上げられたためである。

濁質は、密度(塩分、水温)と異なり、生物化学的反応と密接に関係する。図-20に示す上層DOは9918号通過後に著しく高い値を示しているが、これは上下層の混合に伴う下層から上層への栄養塩の供給によって生じた植物プランクトンの増殖を示唆している。このように強風に伴う底泥の巻き上げによる濁質分布の変化の影響は、はじめに上層に顯れることがわかる。

植物プランクトンの増殖は、やがて死滅し沈降することで下層へと影響が及ぶ。図-23にセディメントトラップ(図-16)によって捕獲した濁質の沈降物量と有機物、無機物の割合を示す。9918号の通過、植物プランクトン増殖を経た後採取した1回目において沈降物

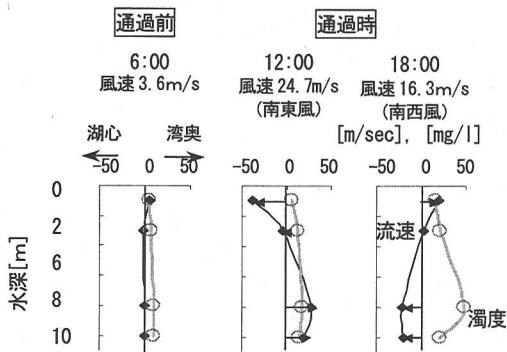


図-22 St.8 における台風通過時(9/24)の湾軸方向流速と濁度の鉛直分布の変化

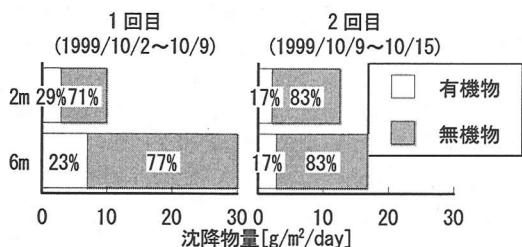


図-23 St.8 における沈降物量と組成成分(パーセンテージは沈降物中の有機物、無機物の各割合を示す)

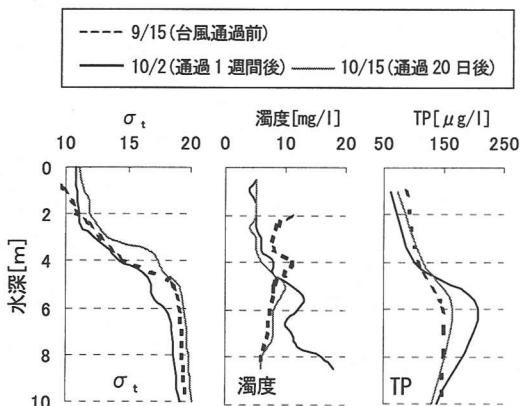


図-24 St.8 における台風通過前後の σ_t 、濁度および TP の鉛直分布

量、有機物の割合とともに2回目に比べて高い値を示している。これは、増殖・死滅した植物プランクトンが、1週間程度は沈降過程にあり、濁質が下層に移行していることを示している。また有機物含有量が高いことから、沈降途中でDOの消費にも影響を及ぼしているものと推測される。

福岡ら²⁾は、密度躍層内下部に高濁度層が形成され

ることが示している。図-24にSt.8における9918号通過前後の密度、濁度、全リン(TP)の鉛直分布を示す。この時も、躍層内下部で濁度が高くなっている。また、TPも濁度に対応して躍層内下部で上昇しているが、9918号通過直後の方がより顕著である。これは、上層で増殖・死滅し沈降する植物プランクトンの一部が、躍層内下部に集積したものと考えられる。20日後には通過前の状態に近くなっている。台風という気象変化の濁質分布に及ぼす影響は、上層での植物プランクトンの増殖、死滅・沈降、躍層内下部への集積・分解のプロセスを経て、2~3週間程度で収まることがわかる。

以上のことから、中海の水質環境にとって、低気圧や台風が持つ水交換能力は、水質を改善する方向に作用していると言える。これは、低気圧、台風の移動経路の種類によらない。Type2台風のように多量の降雨をもたらす場合でも、海水の流入とともに、夏季に形成された悪化した水質構造を解消し、後の下層での貧酸素化の進行を緩和させる働きを持つからである(図-18、図-19)。また、低気圧や台風は強風を伴うため、一時的に上下層の混合が起きて水質が悪化(上層での濁質の増加)するが、これは2~3週間かけて沈降・分解の過程を経ることから、連続的に台風などが来すれば、上層の濁質を系外へ放出することになる。成層に関しても、上層水質には成層が維持されているほうが望ましいが、1週間程度で回復することから、連続的に来しても完全に破壊される可能性は少ない。

また、天文潮に関しては、河川流入水の外海への流出、気圧変化に伴う海水流入とのバランスから、平均的に見ると海水が流入する傾向にある。しかし、天文潮は低気圧や台風時の海水流入とは異なり、緩やかであるため、浄化効果は湖心付近に限られると推測され、例えば、閉鎖性の強い米子湾を浄化する機能はあまり期待できない。このことに関しては、今後の詳細な検討が必要である。

6. おわりに

本研究では、汽水湖の外力として重要な低気圧および台風を移動形態によって分類し、これらが中海にもたらす水位変動、風、降雨について、その特徴をまとめ、低気圧や台風の接近に伴う流動から中海の水質環境に与える影響を考察した。

この結果、以下に列記するような知見が得られたが、これらの知見のなかには、従来の研究においても個別に明らかにされているものもある。しかし従来は、水理・水質現象を引き起こす外力となる気象変化との関係は明確にされておらず、一つの気象じょう乱で生じ

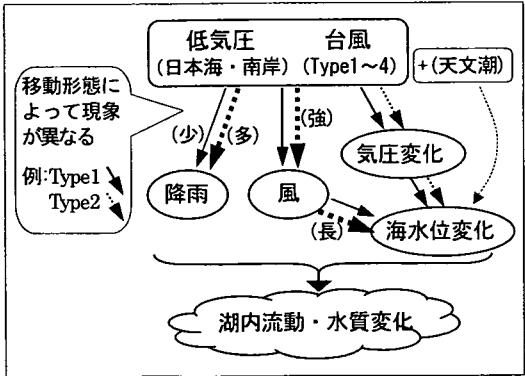


図-25 低気圧・台風の移動形態と湖内の流動・水質変化との関係

る種々の現象の相互関係については十分に考察されてこなかったために、汽水湖内で起こる流動・水質変化を一連の現象として正しく評価することが困難であった。これに対し、本研究では、図-25に示すように、ローカルな流動・水質変化の原因としてグローバルな気象条件から着目し、特に移動形態を分類し、移動形態の違いによる水位変化、風、降雨の特徴を明らかにすることで、海水流入、河川水流入、界面混合など個々の現象の相互関係を把握している。今後、水質保全の方策を検討する上で、湖内で起こる流動、水質変化を正確に評価することが必要不可欠であるが、本研究で用いた考え方・手法を用い、数値解析などによってより定量的な検討を進めることで正しい評価が可能となると考えられる。

最後に、本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- ①日本周辺を通過する低気圧の経路は日本海側と太平洋側に大別される。太平洋側を通る場合、美保関の水位低下は概ね1cm/hPaに従うが、日本海側を通る場合、水位低下量は1cm/hPaより大きくなる。
- ②台風の移動経路は4種類に分類できる。これらが美保関の水位に与える影響は各々異なり、その中でも経路Type1とType2の台風が美保関水位に大きな影響を与えていている。
- ③台風がType1の経路をとると、美保関の水位は上昇する。その水位上昇量は台風が日本海に侵入するときの台風の移動速度と風速に関係する。しかし、台風が日本の南から接近すると、日本海での風系が異なるため、美保関では水位が低下する場合がある。
- ④Type2の経路をとると、台風接近時に美保関では水位が低下する。これは、台風が日本の南から接近するため日本海では強い東風が吹き続け、海水流動が生じることが原因である。そして、美保関の水位低下量は東風の強さと継続時間により決まる。

- ⑤台風通過時の降雨量は、Type1の台風では少ないが、Type2では多い。
- ⑥台風通過期間における中海の水交換率は、海水流入よりも河川流入の影響を大きく受けるため、降雨量の多いType2台風時に大きくなる。この結果、Type2台風時には、水温、塩分が急激に低下し、湖内水環境が大きく変化する。
- ⑦台風や低気圧に伴う水質構造の変化について、密度分布は1週間程度で回復するのに対し、濁質の分布は生化学的な影響を受けるため数週間その影響が残る。
- ⑧中海・宍道湖の流動・水質変化を把握するには、低気圧や台風が持つ水交換能力を正確に評価することが重要であり、そのためには移動形態による海水位変化、風、降雨の特徴の違いを考慮した検討が必要である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 福岡捷二、黒川岳司、日比野忠史、鈴木篤、中村剛、上原浩：中海における気象変化に伴う流れと貧酸素水塊の挙動、土木学会論文集、No.636/VII-13, pp.61-79, 1999.
- 3) 福岡捷二、上原浩、黒川岳司、鈴木篤、肥田幸子：台風通過に伴う中海の水位変動とそれが中海の水環境に及ぼす影響、水工学論文集、第44巻, pp.1185-1190, 2000.
- 4) Ishitobi, Y., Kamiya, H. and Itogawa, H.: Tidal, Meteorological and Hydrological Effects on the Water Level Variation in a Lagoon, Lake Shinji, *Jpn. J. Limnol.*, Vol.54, No.1, pp.69-79, 1993.
- 5) Isozaki, I.: An Investigation on the Variations of Sea Level due to Meteorological Disturbances on the Coast of the Japanese Islands (II), Storm surges on the coast of Japan Sea, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol.24, No.4, pp.178-190, 1968b.
- 6) 近藤邦男、清家泰、橋谷博：汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割、陸水学雑誌、第55巻, pp.44-60, 1994.
- 7) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学、東海大学出版会、1993.
- 8) 三好利庵、都成与是夫：台風経路の統計的研究、気象庁研究時報、第10巻、6号, pp.513-516, 1958.
- 9) 上野充：台風移動に関する最近の研究成果、気象、第40巻, pp.14-19, 1996.
- 10) 田中虎治：台風の経路と大分の風と雨について、気象庁研究時報、第13巻、7号, pp.558-562, 1961.
- 11) 糸山真一：低気圧の経路と大分県の雨量分布、気象庁研究

- 時報, 第 13 卷, 7 号, pp.563-569, 1961.
- 12) Chen, S., Kuo, Y. H., Zhang, P. Z. and Bai, Q. F.: Synoptic Climatology of Cyclogenesis over east Asia, 1958-1987., *Mon. Wea. Rev.*, Vol.119, pp.1407-1418, 1991.
- 13) 小倉義光:一般気象学(第2版), 東京大学出版会, 1999.
- 14) 国立天文台編:理科年表 平成 12 年, 丸善, 1999.
- 15) 日本気象協会編:気象年鑑 1990 年版~1998 年版, 大蔵省印刷局.
- 16) 国立天文台編:理科年表 平成 3 年, 丸善, 1990.
- 17) 柳哲雄, 磯田豊, 児玉理彦:山陰沿岸の長周期波, 京大防災研究所年報, 第 27 号 B-2, pp.611-620, 1984.

(2001. 7. 4 受付)

EFFECTS OF THE LOW ATMOSPHERIC PRESSURE AND THE TYPHOON ON FLOW AND WATER QUALITY FIELD IN A BRACKISH LAKE

Shoji FUKUOKA, Takeshi KUROKAWA, Hiroshi UEHARA,
Shin MIURA and Shoji FUNABASHI

The seawater level change, wind and rainfall by the low atmospheric pressure or typhoon are the important external forces acting in a brackish lake. In order that they may take various transfer types, the influence on a brackish lake is not uniform. Then, we classified the low atmospheric pressure and the typhoon according to the transfer course. And we clarified the relation between their transfer types and the flow in Lake Nakauri. The following results were obtained; (1) On the transfer course, a low atmospheric pressure can classify into two types and a typhoon can classify into four types. The water level change by Type 2 typhoons is characteristic. (2) Since the water exchange accompanied by typhoon passage is greatly influenced by inflow of river water, the water environment changes suddenly by the Type2 typhoon with much precipitation. (3) The change in the density distribution is recovered in about one week. On the other hand, since the turbidity distribution is biochemistry-influenced, its influence remains several weeks. (4) It is necessary to accurately evaluate water exchange ability that the low atmospheric pressure and typhoon have in order to grasp flow and water quality change of Lake Nakauri.