

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

WATER LEVEL FLUCTUATION CAUSED BY TYPHOON IN LAKE NAKAUMI AND ITS EFFECTS ON WATER ENVIRONMENT

福岡捷二¹, 上原浩², 黒川岳司³, 鈴木篤⁴, 肥田幸子⁵

Shoji FUKUOKA, Hiroshi UEHARA, Takeshi KUROKAWA, Atsushi SUZUKI, Sachiko HIDA

¹ フェロー 工博, Ph.D 広島大学教授 工学部第四類地域環境工学講座 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

² 学生員 広島大学大学院 工学研究科環境工学専攻博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³ 学生員 広島大学大学院 工学研究科環境工学専攻博士課程後期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁴ 正会員 工修 建設省中国地方建設局出雲工事事務所所長 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原5-1)

⁵ 正会員 (株) 東京建設コンサルタント (〒171-0014 東京都豊島区池袋2-43-1)

The water level in the Lake Nakaumi is predominated by that of the Japan Sea, and is affected not only by tide but also by meteorological factors. In this paper, we have studied effects on water environment of the Lake Nakaumi by typhoons. Firstly, we have classified the typhoons according to the tracks following toward Japan and have shown the water level fluctuations in the Lake Nakaumi while typhoons pass Japan. Secondaly, we have evaluated the water exchange while typhoon9719 has passed near the Lake Nakaumi. This study shows four types of typhoons depending on their tracks. The water levels in the Lake Nakaumi are effected by the type of typhoon. It is also observed that the volume of water exchange by the typhoon9719 in Lake Nakaumi is nine times as large as that of during ordinary condition.

Key Words : Lake Nakaumi, Typhoon, Water Level, Wind, Water Exchange

1. 序論

山陰地方のほぼ中央, 日本海沿岸に面して東西に並んで存在する中海, 宍道湖では水産資源が豊富であり, 周辺住民の生活の糧となっている。しかし, 近年における中海, 宍道湖の水質悪化は水域に住む生物の生息環境を悪化させている。アオコや赤潮の発生は悪臭を放ち, 景観を損なうなど水環境を大きく低下させる。このような事態を解決するために早急な水質改善が求められている。著者らはこれまで中海における流動, 水質の現地観測を行い, 潮汐や気象作用を外力とする様々な条件下での流れ場を明らかにしてきた。しかし, それらは観測を行った時に生じていた流れ場に関する考察であって, 観測が行われていない時の流れ場はどのようなものかを説明するまでに至っていない。本研究ではこのことを検討するために中海, 宍道湖の流れと日本海の水位変動の関係を外力条件から検討していく。

中海, 宍道湖は日本海と連結しているため, 日々の潮汐による日本海の水位変動の影響を受けるが, 気象変化の影響も大きく受けることが分かっている²⁾。気象変化に伴う日本海の水位変動は, 気圧配置を考慮に入れた日本周辺の気象場から考える必要がある。気象変化の代表として台風が挙げられる。台風は数日~週の時間スケールで日本海の水位を変化させる。この水位変化により生じる流れの影響は中海全体に及ぶだけでなく, 宍道湖にまで達する。さらに, 台風は強風を数日にわたって継続させ, 降雨をもたらす。このように台風は複数の強い外力を伴うため, 中海, 宍道湖の流れ場を明らかにするには, まず台風通過に伴う水位変動を明らかにする必要がある。

本研究では, まず台風の移動経路を考慮に入れて台風を分類し, その結果と日本海の水位変動の関係を明らかにする。そして, 台風通過時の中海, 宍道湖における水位変動と水交換, 水質変化について検討し, 台風が中海, 宍道湖の水環境に与える影響を評価する。

2. 台風が美保関の水位変動に及ぼす影響

(1) 中海, 宍道湖の地形特性

図-1に中海, 宍道湖周辺の概略を示す。中海, 宍道湖は斐伊川水系であり, 宍道湖は大橋川(幅200m, 長さ7.6km)を通じて中海と, 中海は境水道(幅400m, 長さ8.7km)を通じて日本海と連結している。大橋川, 境水道の規模はともに中海(水面積80km²), 宍道湖(同80.3km²)に比べ小さい。このため, 日本海の水位変化は中海, 宍道湖と時間的に遅れて伝播する。その遅れは美保関水位に対し中海が2~3時間, 宍道湖が7~8時間である⁹⁾。

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。これによって, 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。台風の接近は急激な気圧変化や強風をもたらすが, 水位と気圧の関係は個々の台風特性によって異なってくる。特に, 台風の移動経路によって日本海の水位変動は様々な形態をとる⁹⁾。そこで, まず台風の接近に伴う日本海(美保関)の水位変動を台風の移動経路や速度等の特性を考慮に入れて, 分類, 検討する。

(2) 台風通過に伴う美保関の水位変動

台風は一般に夏~秋にかけて多く日本に接近する。日本に接近する台風の強さや大きさ, 移動経路は多種多様である。まず過去の台風の移動経路を調べ, 分類し, これらと美保関の水位変動の関係を検討する。

a) 台風の移動経路の分類

通常, 台風は北緯10~20°付近の太平洋上で発生する。その後北上して日本に接近し, そのうち年に2~3個上陸する。台風の移動経路は季節によって特徴がある。ここでは1990~1997年の8年間, 日本に影響を及ぼした台風について移動経路と美保関の水位変動の関係を調べた⁹⁾。この間, 台風は48個日本に接近した。図-2に示すように類似した移動経路や水位変動を起こす台風についてまとめると, 4種類に分類することができる。移動経路, 美保関での水位と気圧変化, 中海での風向風速などを分類の基準とし, 類似したものを同一分類に入れている。これらの中で美保関の水位変動に大きな影響を与えている台風はType1とType2であると考えられる。Type1は日本海を南西から北東へ進む経路, Type2は日本の南から接近し, 上陸する経路である。

b) 台風の経路がType1の場合の美保関の水位変動

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-3に9429号の移動経路と(a)深浦, (b)美保関, (c)長崎の水位と気圧, (d)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

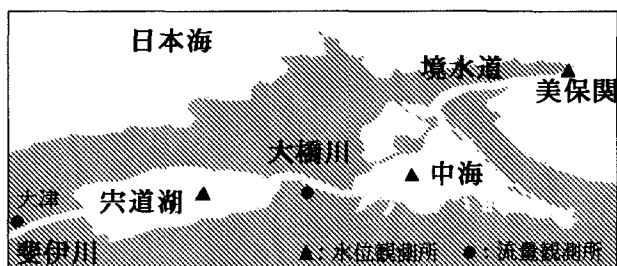


図-1 中海, 宍道湖周辺概略

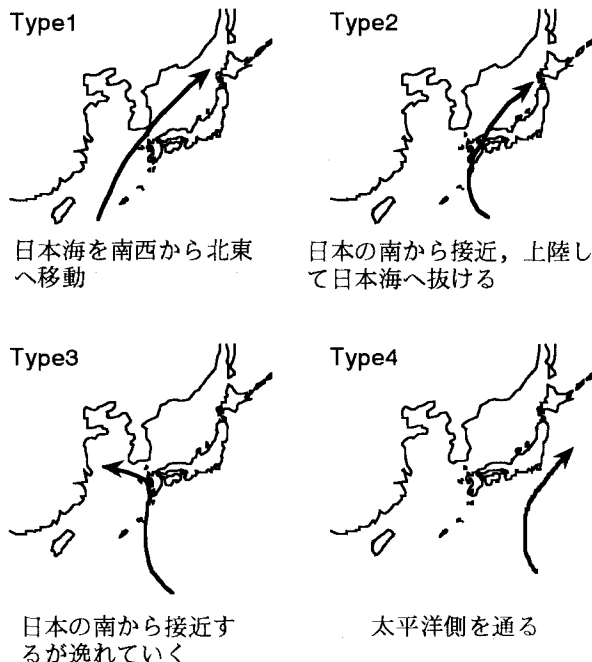


図-2 台風の移動経路分類

1990~97年に日本に接近した48個の台風から

均された値である。台風がType1の経路をとるとき全観測点で水位は上昇する。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3.4m/s(=122km/h)で, これは台風(約40~60km/h)よりも遅いため気圧低下ピーク(台風最接近時)よりも水位上昇ピークが遅れるのである。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することが分かる。

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する場合があった。図-4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号の風向風速を比較し

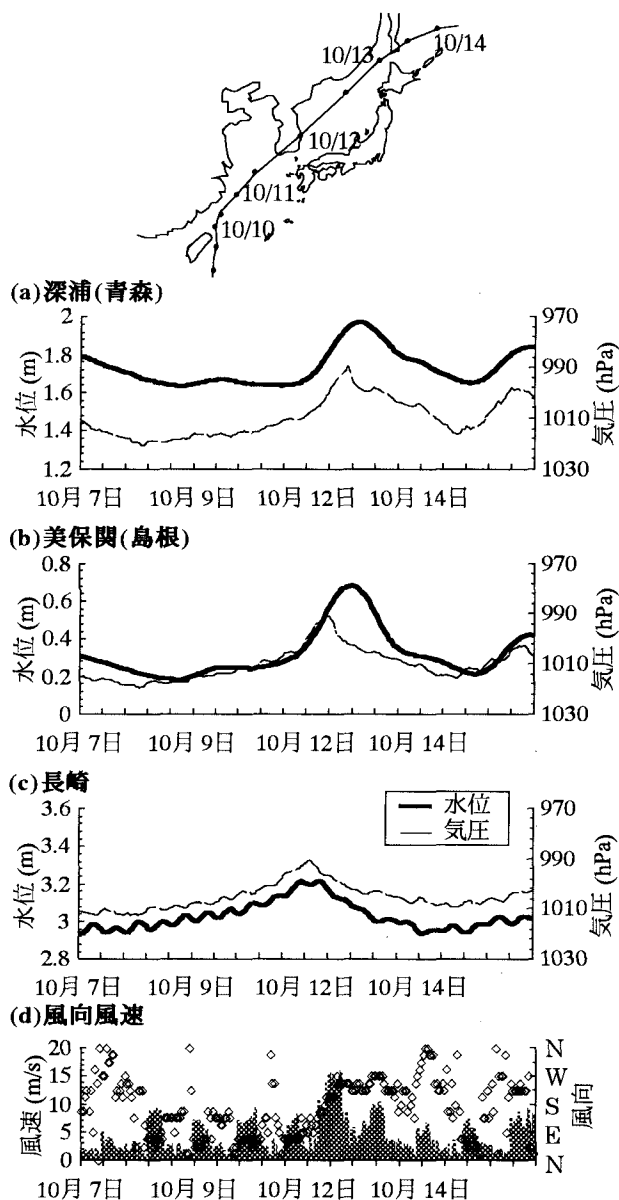


図-3 台風9429号の移動経路，および日本海の水位，中海の風向風速の経時変化
1994年10月7日～10月16日(Type1)

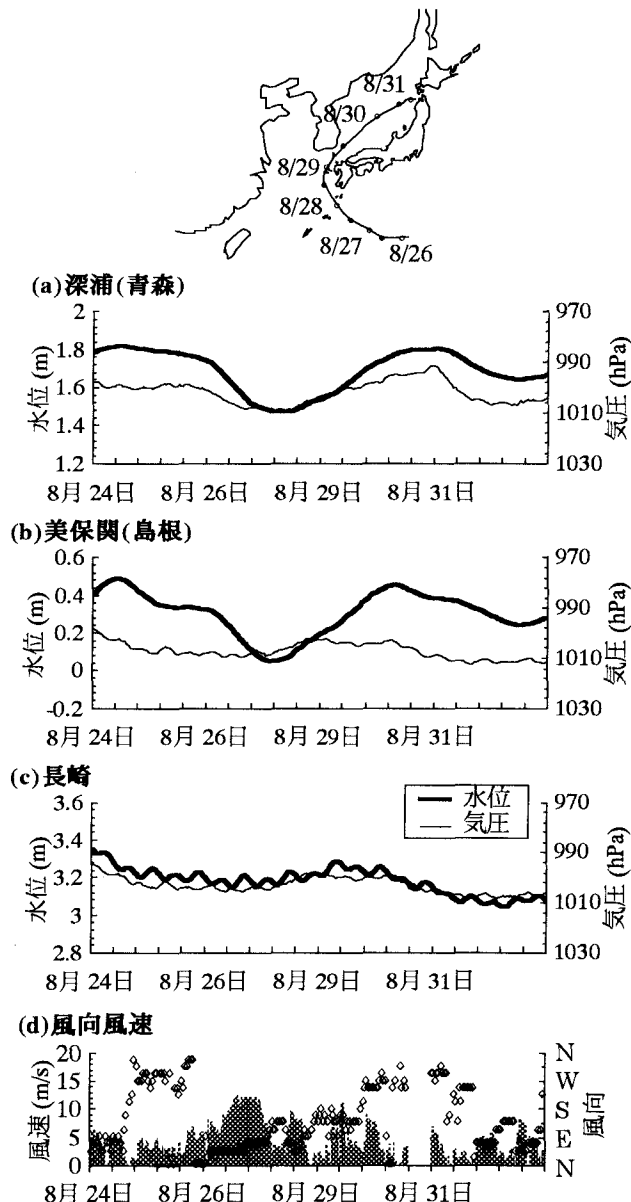


図-4 台風9113号の移動経路，および日本海の水位，中海の風向風速の経時変化
1991年8月24日～9月2日(Type1)

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る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，九州の南から北上して来るためである。このように台風が日本海を通る場合でも，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。Type1は1990～1997年の間の48個のうち9個あったが，水位が低下するケースは2個あった。

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

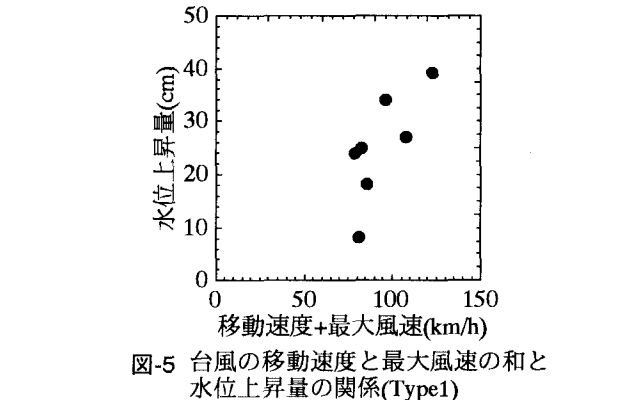


図-5 台風の移動速度と最大風速の和と水位上昇量の関係(Type1)

低下，他の外力要因との関係について考察する。水位上昇は陸棚波の伝播によるものと考えられていることから，陸棚波はどのような外力要因によって発生するかを考えてみる。外力要因には気圧，風，そして台風の移動

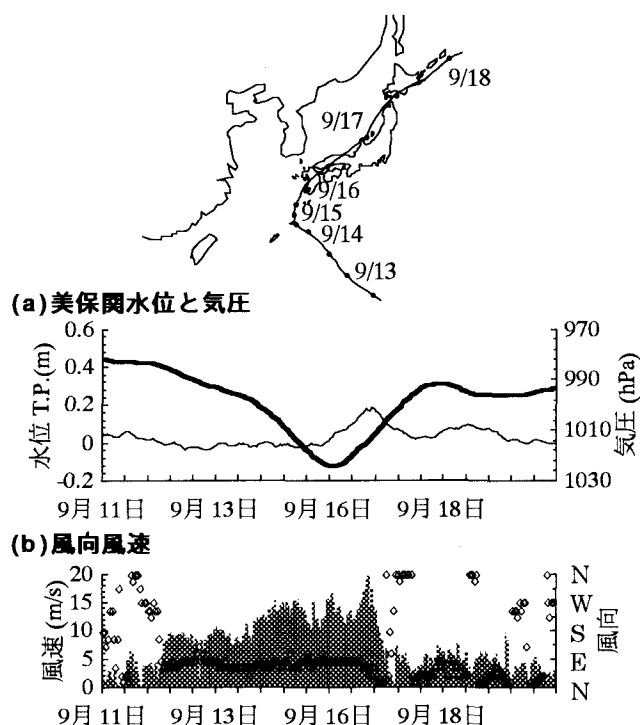


図-6 台風9719号の移動経路, および美保関の水位, 中海の風向風速の経時変化
1997年9月11日～9月20日 (Type2)

速度が挙げられる。これらの関係を図-5に示す。横軸は台風の速度に中心付近の最大風速を加えたものである。この理由は台風の日本海進行時には、気圧低下による海面の吸い上げの他に、台風の移動に加えて風により海水流動が生じるためと考えられる。これら2つには強い相関があり、台風がType1の経路をとるときの美保関での水位上昇量は気圧低下に加え、台風の移動速度と最大風速が支配的であると考えられる。

c) 台風の経路がType2, 3の場合の美保関の水位変動

9719号を例に考察する。図-6に移動経路と(a)美保関の水位と気圧, (b)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けている。このように台風接近時に美保関で水位が低下するのは、移動経路が若干異なっても台風が日本の南から接近し、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。

d) 台風の経路がType4の場合の美保関の水位変動

Type4の台風は18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-7は9512号時のもので、台風は中海から遠く離れているにもかかわらず美保関の水位は

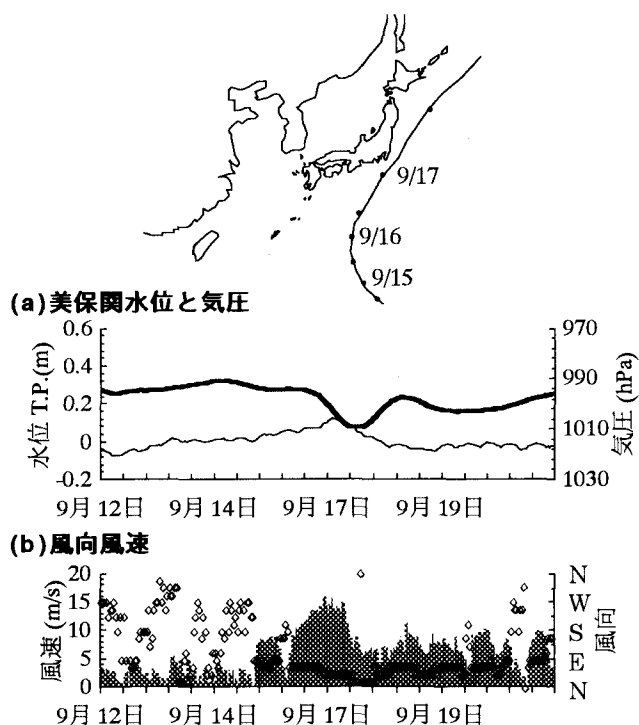


図-7 台風9512号の移動経路, および美保関の水位, 中海の風向風速の経時変化
1995年9月12日～9月21日 (Type4)

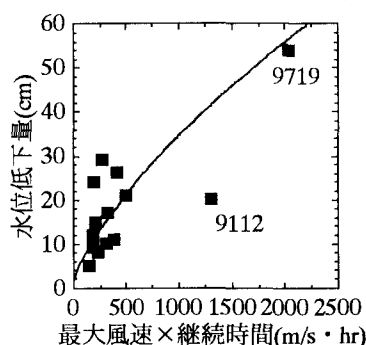


図-8 台風の最大風速と継続時間の積と美保関水位低下量の関係

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調べ、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-8である。この図から、最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。

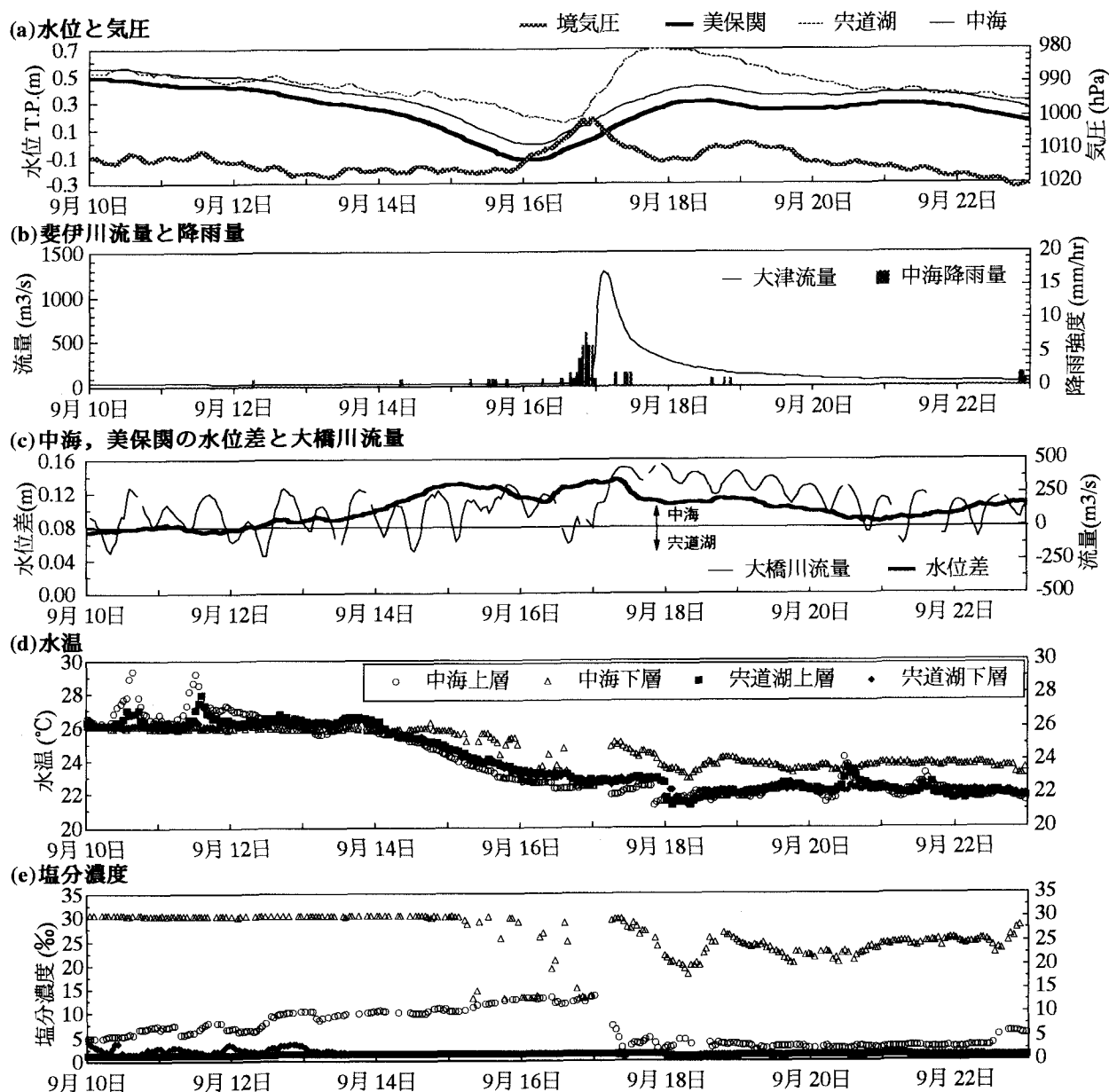


図-9 9719号通過時の水位と気圧，斐伊川流量と降雨量，中海—美保関の水位差と大橋川流量，および中海，宍道湖の水温と塩分濃度の経時変化
1997年9月10日～9月22日

3. 台風9719号の通過に伴う中海，宍道湖の水位変動と水環境の変化

中海，宍道湖は斐伊川から淡水，日本海から海水の流入を受けている。これらは水域の水環境にとって重要な要素であり，流動場とともに水質場を決める。台風通過時には大規模な水位変動，降雨による河川流量の増加が見込まれ，各水域の水交換が促進される。これは水域の水質変化をもたらす，水質管理上，重要な情報である。ここでは，台風9719号がもたらした中海，宍道湖の水環境の変化について検討する。

(1) 日本海と中海，宍道湖の水位変動

図-9は9719号通過時の(a)美保関，中海，宍道湖の水位

と境港の気圧，(b)斐伊川流量(大津観測所)と中海湖心降雨量，(c)中海，美保関の水位差と大橋川流量，(d)水温，(e)塩分濃度の経時変化である。9719号の経路はType2であり，強い東風が吹き続ける(図-6(b))ため美保関水位は低下する。9719号が属するType2は日本に接近する台風の中で比較的頻度が高く，中海ではよく起こる現象である。9/14から美保関水位の低下に追従して中海，宍道湖の水位が低下する。しかし宍道湖では日本海水位変動の伝播が遅いため，宍道湖と中海で徐々に水位差が生じ，9/15以降大橋川を介して宍道湖の水は中海へ流れる。その後9/16に台風が最接近し，降雨をもたらした結果，斐伊川流量が増加する。これにより宍道湖水位が上昇し，9/16～20にかけて中海水位より常に高い状態が続く。大橋川を通じて水が中海へ大規模に流れ込む。このとき中海と美保関の水位差が台風接近前の8cmから12cmになる

ことから、宍道湖からの洪水流入が中海水位を上昇させたことが分かる。しかし、その上昇量(4cm)は美保関(約40cm)に比べて小さく、中海水位は以前の美保関水位の低下から上昇への変化に追従している。中海水位は平常時はもとより²⁾、河川洪水時においても日本海の水位変化に支配されている。

(2) 中海、宍道湖における水交換

次に、9719号時における中海、宍道湖の水交換について、河川や外海からの流入、降雨量から考察する。ここでは現象を簡単に捉えて、中海、宍道湖は完全混合の水域と考え、中海には河川と日本海の両方から流入、宍道湖は河川流入のみとする。交換率をパラメータとして用い、中海、宍道湖の水環境に与える台風の影響を評価する。交換率は次式で表される。

$$\alpha = Q / V$$

Q: 総流入量(m³)、V: 総水容量(m³)である。斐伊川の平均年流入量は 1.26×10^9 m³、中海、宍道湖の総水容量は 4.37×10^8 m³、 3.66×10^8 m³であり、各々の年平均交換率は $\alpha_{\text{中海}}=2.89$ 、 $\alpha_{\text{宍道湖}}=3.45$ となり、中海、宍道湖では4ヶ月、3.5ヶ月で交換が行われている。ここで、9719号通過時の河川流入量と降雨量、外海水流入量から、9719号の交換率を求める。図-9から台風通過期間(9/16~19)の河川流入量と降雨量から中海、宍道湖への流入量を、9/16~9/18の中海水位上昇期に外海から中海へ流入した外海水量を求め、交換率を計算すると、 $\alpha_{\text{中海}}=0.28$ 、 $\alpha_{\text{宍道湖}}=0.24$ となる。また、台風通過のない平常時(潮汐を考えず河川流入のみ)4日間の交換率は、 $\alpha_{\text{中海}}=0.03$ 、 $\alpha_{\text{宍道湖}}=0.04$ である。9719号時と平常時を比較すると、9719号時の方が平常時より各々約9倍、6倍大きい。1個の台風通過4日間での交換量は、平常時の約1ヶ月分に相当する。

(3) 中海、宍道湖における水質の変化

ここでは9719号通過時の中海、宍道湖における水質変化について検討する。図-9より9/12まで気圧変化が小さく気象状態は安定しているため、中海、宍道湖の水温、塩分濃度の変化は小さい。中海では上下層の塩分濃度差が大きく、強固な密度躍層が形成されている。9/14以降、台風による強い東風のため中海では混合が生じ、上層塩分濃度が上昇するが下層はほとんど変化しない。台風通過後、河川流量の増大により中海、宍道湖で水温が低下し、最終的に中海では水温は上層で約4℃、下層で約3℃低下している。宍道湖でも両層ともに4℃低下した。また、中海では大橋川の中海への流入量が増加した9/17~9/18の1日間で上下層ともに塩分濃度が約10%低下している。その後、台風最接近時の9/17から美保関水位、河川流量、各水域の水位関係など台風がもたらした影響がなくなり、それらが通常状態に戻る9/21まで約5日間かかっている。しかし、水温や塩分濃度といった湖内水質状

態は台風通過から1週間経った9/23においても台風接近以前の状態には戻らず、新たな水質場が形成されている。

以上のように、台風の通過が中海、宍道湖の水環境に及ぼす影響は大きい。また台風は夏~秋にかけて通過することが多いため、この時期における水域の水質場を考える場合、重要な外力要因であると考えられる。

4. 結論

本研究では日本に接近する台風を移動経路について分類し、それと中海の水位変動の関係について考察した。さらに、台風通過時の中海の水位変動と水質変化、水交換について検討した。これらによって次のような知見を得ることができた。

(1) 日本に接近する台風は、移動経路について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る。

(2) 台風がType1の経路をとるとき、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。

(3) Type2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。

(4) 台風通過による中海、宍道湖の水交換、水質変化について、日本に接近する頻度の高い経路である9719号を例として検討した。台風通過時の4日間の中海、宍道湖の水交換率は各々0.28、0.24であり、通常時の0.03、0.04に比べ約9倍、6倍大きい。これは平常時の1ヶ月分の交換量に相当する。また、台風通過による水温、塩分濃度の変化は台風通過後1週間経過しても台風通過以前の状態に戻らず、新たな水質場を形成する。夏~秋にかけての台風の通過は中海の水環境の変化を考える上で、重要な外力要因として扱う必要がある。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 日比野忠史：連結水系での流動・気候・気象の変化が流れに及ぼす影響、第32回水工学に関する夏期研修会講義集、Aコース、pp.A-7-1-20、1996。
- 3) 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, 24(4), 178-190, 1968b。
- 4) 気象年鑑1990年版~1998年版、気象庁監修、日本気象協会編。

(1999.9.30受付)