

感潮河川周辺域の不圧帯水層における 塩水侵入の変動特性

VARIATIONS OF SALT WATER INTRUSION IN A UNCONFINED AQUIFER NEAR THE TIDAL RIVER

安元 純¹・上荒磯 聡²・六車 麗子²・藤原 拓³・大年 邦雄⁴
Jun YASUMOTO¹, Satoshi KAMIARAI², Reiko MUGURUMA²,
Taku FUJIWARA³, and Kunio OHTOSHI⁴

¹学生員 愛媛大学大学院 連合農学研究科 (〒790-8566 松山市樽味3丁目5番7号)

²非会員 高知大学 農学部生産環境工学科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

³正会員 工博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

⁴正会員 工博 高知大学教授 農学部生産環境工学科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

Salt water intrusion in a coastal aquifer varies corresponding to the sea level and rainfalls. The influence of tidal river might be added to the behavior of salt water intrusion when the aquifer locates near the tidal river. Consequently it is easy to understand that the behavior of salt water bodies in such a situation will be quite complicated. The present study describes the findings about the salt water intrusion on the basis of the long-term field measurements conducted near a tidal river. Following findings were obtained: 1) The interface of fresh-salt water bodies in an aquifer consists of a wide mixing zone. 2) The depth of mixing zone varies cyclically and more largely during a spring tide than a neap tide. 3) Rainfalls may have the possibility to uplift the upper mixing zone remarkably for a short period after the rainfall event. Such possibility has to be verified in the future.

Key Words : *variation of salt water intrusion, unconfined aquifer, tidal river, field measurement*

1. 緒論

沿岸地域における地下水の塩水化は、今後の地球温暖化に伴う海面上昇の影響を大きく受ける現象として注目されており、地下水の持続的利用の観点から重要な問題である。

地下水中の塩水の挙動は、雨量や地形・地質構造等の場の特性や揚水等の人間活動などに影響されるが、特に沿岸部では潮汐の影響が大きいことが知られている。海岸地下水を利用する場合、安定的に淡水を取水することが出来るかどうかは肝要である。この場合、淡塩境界の変動が重要なポイントとなる。

これまで、潮汐に伴う海岸帯水層への塩水侵入の変動特性に関する研究は多く行われている。例えば小路ら¹⁾は、潮汐に伴う混合領域の変動について観測と数値計算を行い、潮汐に伴う影響は減衰率が大きく、影響範囲は海岸から約60mとそれほど内陸部までは及ばないことを示している。また、Cartwrightら²⁾は砂浜における帯水層中の塩水の挙動について、大潮時から次の大潮時にかけて連続観測を行い、潮汐に伴う影響に比べ高潮のようなイベントの影響が卓越することを示している。

一方、本研究の調査対象地域である河川感潮域では、帯水層中の塩水は海岸から約1500m地点においても潮汐に伴う変動がみられる。著者らのこれまでの研究³⁾により、河川感潮域における淡塩境界の変動は感潮河川の水位変動(塩水遡上)の影響を強く受けることがわかっているが、地下水中の塩水の挙動はさまざまな要因が絡み合っているため複雑で、研究例も少ないため、その変動特性は十分把握されているとはいえない。

そこで本研究では、河川感潮域において、小潮から次の小潮にかけての15日間にわたり、調査井戸における地下水位と淡塩境界の連続観測、および感潮河川水位の連続観測を行った。この観測で得られた詳細な観測結果に基づき、河川感潮域における淡塩境界の変動特性について検討した。また、本観測期間中にまとまった降雨があったことから、降雨が淡塩境界の変動特性に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 現地調査

(1) 調査地域概要

調査対象地域は、図-1に示す高知県春野町の沿岸地域

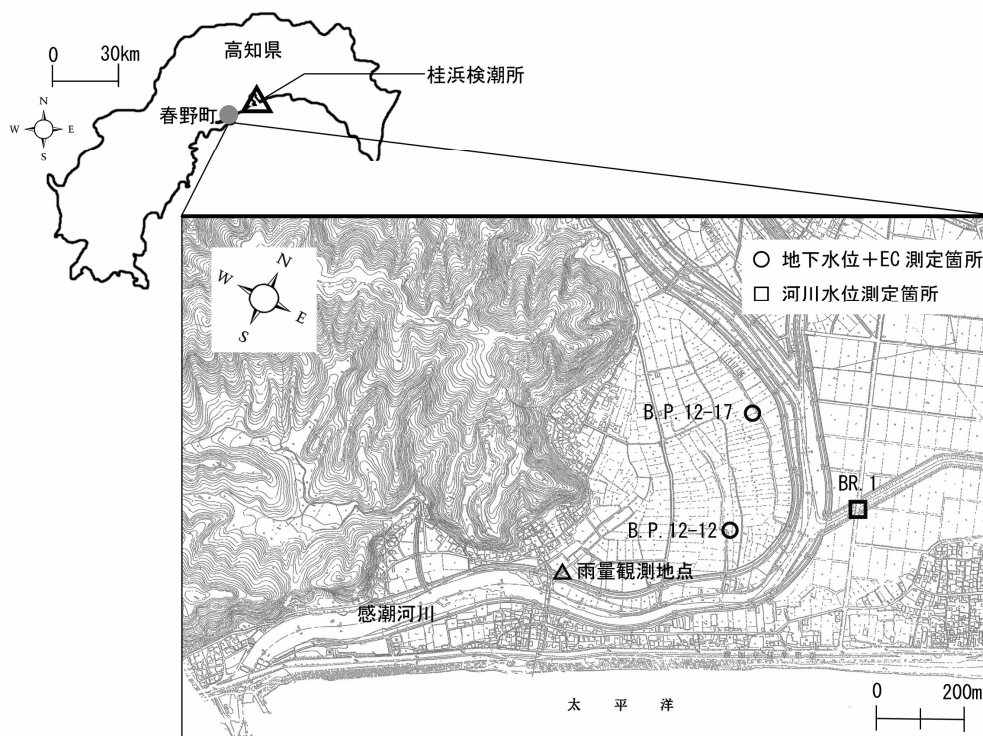


図-1 調査地域概要および観測体制

である。本地域は太平洋に面した県内有数の施設園芸地域で、灌漑用水の大部分を地下水に依存しているため、多量の揚水による地下水の塩水化が顕在化しつつある地域でもある。また、本地域は地域内を貫流する新川川の感潮域となっており、地下水位および帯水層内の淡塩境界は、潮汐に伴う感潮河川の水位変動（塩水遡上）の影響を強く受けている³⁾。

(2) 調査方法

観測井戸はB.P.12-12、B.P.12-17の2地点である。B.P.12-12地点は、汀線から397m、直近の感潮河川から119mの距離にあり、B.P.12-17地点は、汀線から758m、直近の感潮河川から108mの距離にある。両地点の地質構造は類似しており、主にシルト混じり礫、シルト混じり砂で構成されている。

調査方法は、各観測井戸において自記水位計（水圧式水位検出器 DS-1型、オサシテクノス(株)）および自記式の電気伝導率（EC）計（COMPACT-CT、アレック電子株式会社）を鉛直方向に11点設置し、それぞれ連続観測を行った。EC計の設置深度は淡塩混合領域を確実に捉えるように設定した。なお、サンプリング間隔は、地下水位およびEC共に10分とした。

感潮河川の水位は、両観測井戸のほぼ中間に位置するBR.1地点で代表し、そこに設置されている自記水位計の観測値を用いた。また、潮位は桂浜検潮所の観測値を用いた。雨量観測は、図-1に示した地点に転倒ます型自記雨量計（池田計器製作所 RT-5型）を設置し行った。

調査期間は、2005年8月12日から8月29日までであり、

13日の小潮（上弦）から27日の小潮（下弦）までを挟んだ期間を対象とした。

3. 結果および考察

(1) 日雨量・潮位・河川水位

観測期間内における日雨量R、潮位Hおよび感潮河川水位hrの経時変化を図-2に示している。

潮位は、調査開始時には小潮で潮位変動も小さく日潮不等がみられ、潮差は最小で0.3mであった。大潮時には潮位変動が大きく、最大大潮の20日には潮差が1.99mであった。

感潮河川の水位は潮汐に連動しており、満潮時には潮位とほぼ一致している。干潮時の河川水位は、小潮時には潮位に近い値を示すが、大潮時にはその差が大きくなる現象がみられる。これは、干潮に伴い潮位が河床標高よりも低くなった場合、潮位の低下に河川水位は追随せず、河川は自己流量による水位を示すためである。そのため、潮位が比較的低い位置まで下降する大潮時には、潮位と河川水位との差が大きくなる。

調査期間内において、20日に46(mm/day)、21日に112(mm/day)のまとまった降雨があった。降雨直後の22日に河川水位の上昇がみられ、25日にも河川水位の急激な上昇がみられる。この25日の河川水位の上昇の原因は特定されていないが、降雨に伴う山側からの地下水流出、あるいは新川川に流入する吾南用水の増水によるものと考えられる。

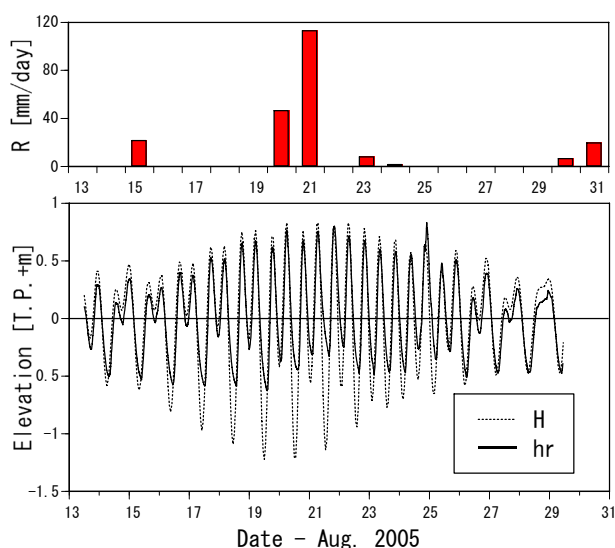


図-2 調査期間内の日雨量Rおよび潮位Hと感潮河川水位hr

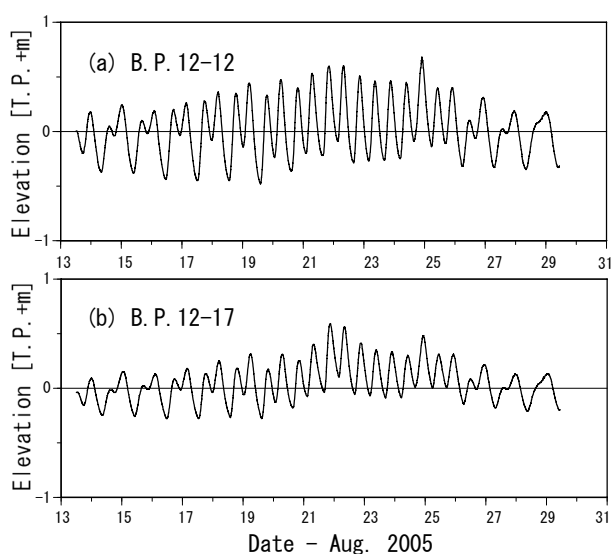


図-3 地下水位hfの経時変化 (a)B.P.12-12, (b)B.P.12-17

(2) 地下水位の変動

前述した観測井戸 (B.P.12-12, B.P.12-17) における地下水位hfの経時変化を図-3に示している。

両地点とも、地下水位は潮位または河川水位に連動した応答がみられる。著者らは、これまでの調査研究³⁾により、本地域の地下水位は潮位変動よりも直近に位置する感潮河川の水位変動の影響を強く受けていることを明らかにしており、図-2の河川水位と図-3の地下水位の変動が類似していることから同様の傾向が伺える。したがって以下では、降雨および河川水位と地下水位との関係に着目した検討を行う。

20日から21日にかけて降った降雨後から地下水位の上昇がみられる。これは、降雨に伴い背後の山側からの地下水流出成分によって全体的に地下水位が上昇したと考えられる。河川水位との関係でみると、満潮時には河川水位が地下水位よりも高くなり、遡上した塩水を含む河

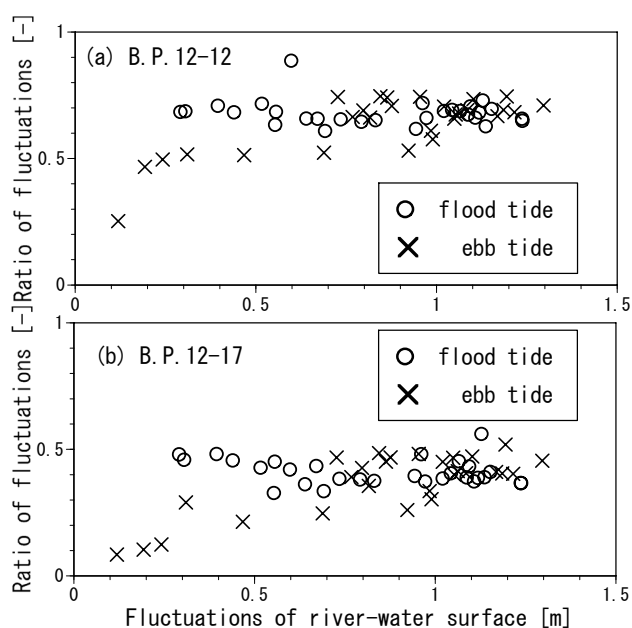


図-4 河川水位変動量に対する地下水位変動量の比と河川水位変動量との関係 (a)B.P.12-12, (b)B.P.12-17

川水が地下水へ流入しやすくなっている。一方干潮時には、地下水位が河川水位よりも高くなり、地下水は河川に流出している。このような地下水流向の変化が、本地域における淡塩境界の変動に強く影響しているものと考えられる。

地下水位の変動特性を検討するため、河川水位の変動量と対応する地下水位の変動量との関係に着目した。

図-4は、縦軸に河川水位に対する地下水位の変動量の比をとり、横軸に河川水位の変動量をとって、両者の関係を調べたものである。なお、上げ潮時 (flood tide) の変動量と下げ潮時 (ebb tide) の変動量を区別して表示している。上げ潮時および下げ潮時ともに、河川水位に対する地下水位の変動量の比はほぼ一定値を示している。両地点を比較すると、(a)のB.P.12-12で平均値が約0.7、(b)のB.P.12-17で平均値が約0.4となっており、当然ながら河川上流側に位置するB.P.12-17の方が地下水位の変動が抑制されたものとなっている。

(3) 淡塩境界の変動

a) 各深度におけるEC値の経時変化

ここで、淡塩境界の変動について検討する。図-5の(a)にB.P.12-12, (b)にB.P.12-17それぞれにおける各代表深度での電気伝導率 (EC) の経時変化を示す。なお、地下水位hfおよび地下水位と河川水位との差 (hf-hr: この値の正負により地下水流向を推定) の経時変化も併示している。

(a)の B.P.12-12 地点をみると、EC 値は地下水位に応答した周期的な変動がみられる。各深度における EC 値は、満潮時に地下水位が上昇すると EC 値は減少するという地下水位の変動とは逆位相的な特性を示している。

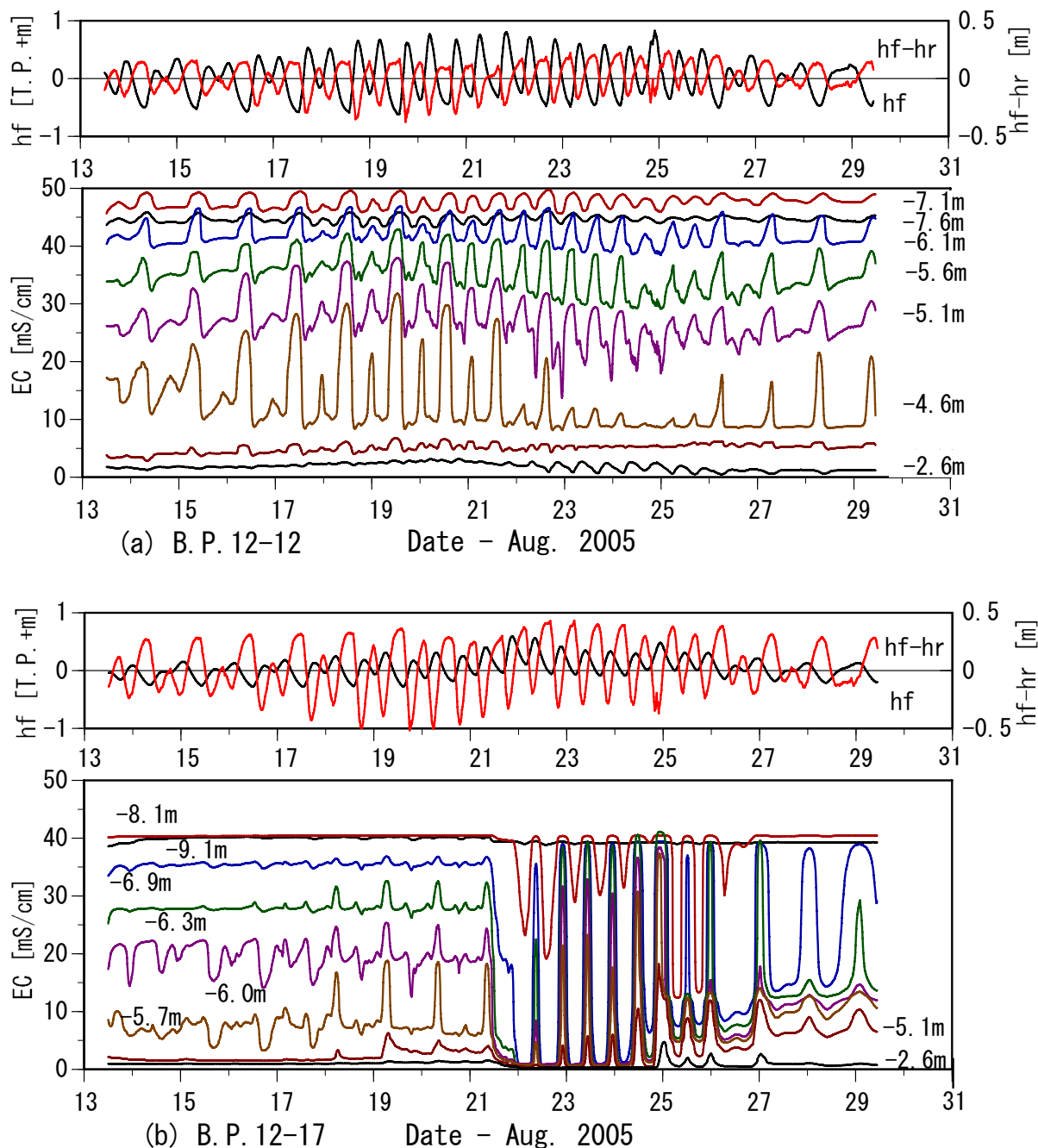


図-5 深度別EC値、地下水位hfおよび地下水位と河川水位との差 (hf-hr) の経時変化 (a) B.P.12-12, (b) B.P.12-17

その変動特性は降雨前後で大きな違いはみられないが、20日の降雨後から標高-4.6(T.P.+m)におけるEC値の変動が抑制されており、その後徐々に回復している。これは降雨に伴う地下水位の上昇により淡塩境界が押し下げられたことによるものであろう。また、標高-7.1(T.P.+m)のECが標高-7.6(T.P.+m)よりも高い値を示しており、深度の浅い位置のECが深い位置に比べ高くなる箇所がみられた。この原因としては、本地域への地下水の塩水侵入が海からの塩水侵入に加え、地表部の河川からの塩水侵入によるものも存在するため、塩分濃度に局所的な逆転が起きているのではないかと推測される。しかし、断定するには至っておらず、今後、断面2次元における

分散モデルによる数値解析により検討を行う予定である。

(b)のB.P.12-17地点においても、EC値は地下水位に応答した周期的な変動がみられるが、両者の変動は全体的には同位相の傾向が強い。また、本地点は降雨前後でEC値の変動に顕著な違いがみられる。降雨直後の干潮時には最下端(T.P.-9.1m)を除く各深度におけるEC値がほぼ0に近い値を示した。これは、降雨に伴う河川流量の増加により河川への塩水遡上距離が短くなり、通常境界に存在していた塩水がなくなったためと考えられる。その後徐々にEC値の増加がみられる。これは、河川への塩水遡上の範囲が回復してきたことによるものであろう。日潮不等により潮位変動の小さい期間はECの変動

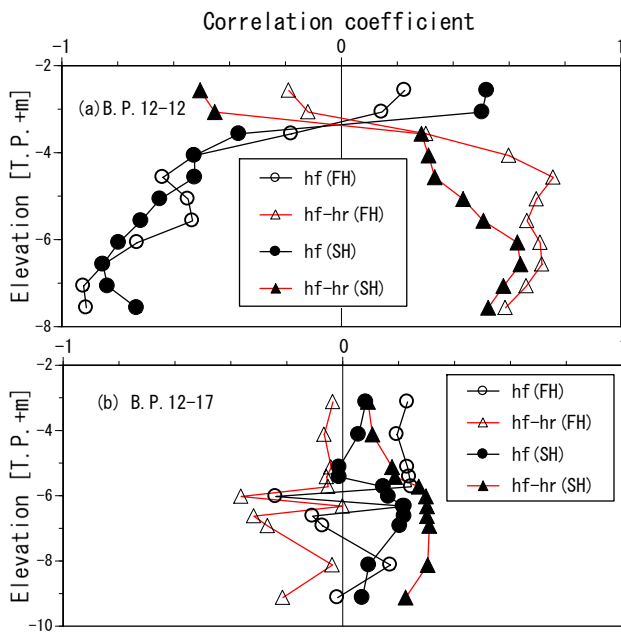


図-6 地下水位hfおよび地下水位と河川水位の差(hf-hr)に対する深度別ECの相関関係 (FH: 降雨前), (SH: 降雨後) (a) B.P.12-12, (b) B.P.12-17

も小さい。この原因としては、潮差の小さい時は、河川水位が地下水位により低くならず、地下水流向の変化が起きないためであると推測される。

b) 淡塩境界の変動要因

本地域のような河川感潮域における淡塩境界の変動に対しては、感潮河川の水位変動に起因する地下水位の変動だけでなく、両者の水位差の変化に対応する地下水流向の変化も考慮する必要がある。また、上述したような降雨の影響もある。

そこで、観測期間を20日の降雨を境にして前半(FH: First Half)と後半(SH: Second Half)に分割し、地下水位hfおよび地下水位と河川水位との差(hf-hr)と、各深度におけるEC値との相関係数をそれぞれ求めた。図-6にその結果を示している。

図-6(a)に示したB.P.12-12地点においては、地下水位、および地下水位と河川水位との差に対する各深度におけるEC値との相関係数は全体的に大きな差はみられず、両者ともに比較的大きな値(強い相関)を示した。傾向としては、深度が深いほど相関は強く、深度が浅いほど弱くなる。つまり、塩分濃度が大きいほど相関は強いようである。標高-3.1(T.P.+m)および-2.6(T.P.+m)の深度においては相関係数の符号に逆転がみられた。この深度に対応するEC値は約2(mS/cm)と小さく、塩水ではなく淡水の挙動を示していると考えられ、この深度付近の地下水が淡水あるいは塩水としての挙動を示す境界付近であるといえる。一方、本地点においては降雨前後で相関係数に大きな変化はみられなかった。

図-6(b)に示したB.P.12-17地点においては、地下水位

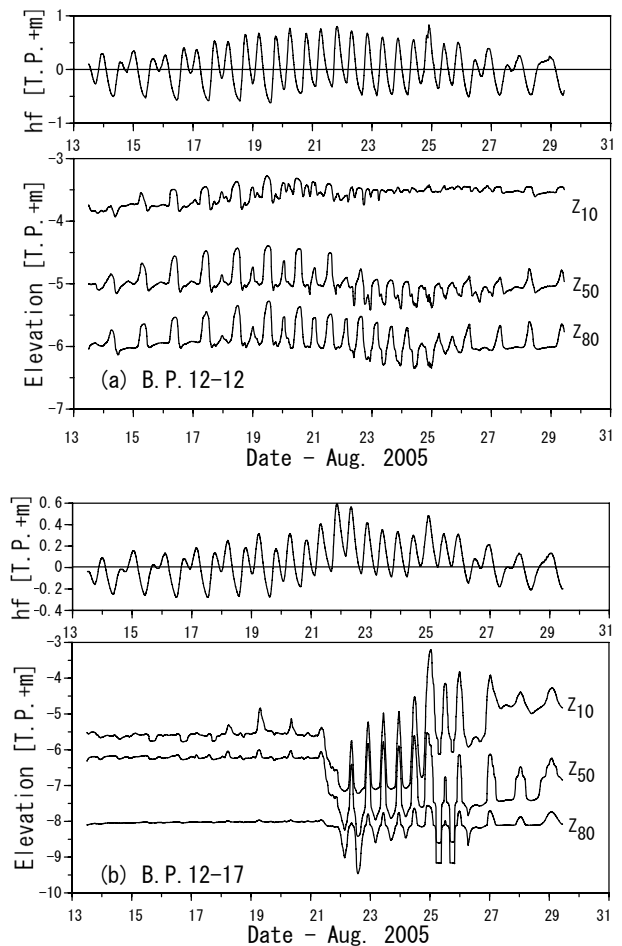


図-7 淡塩混合領域の各代表深さ(Z_{10} , Z_{50} , Z_{80})と地下水位の経時変化 (a) B.P.12-12, (b) B.P.12-17

および地下水位と河川水位との差に対する各深度におけるEC値との相関係数は共に相関が弱く、それぞれの淡塩境界との対応は不明瞭な結果となった。

c) 淡塩混合領域の変動特性

淡塩境界の混合領域を代表する特性値として、海水のEC値である50(mS/cm)に対し10%, 50%, 80%に相当するEC値を示す深度を、便宜上、混合領域の上端、中間、下端に対応する代表深さと定義した。なお、各代表深さの表記はそれぞれ Z_{10} , Z_{50} , Z_{80} とした。ここでは、これらの代表深さを用いて淡塩混合領域の変動特性について検討する。図-7に各代表深さの経時変化を示す。

図-7(a)のB.P.12-12地点をみると、全体的な傾向として、潮位変動が大きい大潮時ほど変動が大きい。また、各代表深さの変動に着目すると、混合領域の下端である Z_{80} の変動が最も大きく、以下順に Z_{50} , Z_{10} となった。降雨後の22日から26日にかけて Z_{50} , Z_{80} に下降がみられた。これは、降雨に伴い地下水位が全体的に上昇したことによるものであろう。 Z_{10} については、降雨前は地下水位とは逆位相的な変動特性を示していたが、20日の降雨後を境に変動が小さくなり、時には同位相的な変動を示した。これは降雨によって淡塩混合領域の上端が希釈され、

Z_{10} が淡水の挙動に引きずられたものと推測される。

図-7(b)のB.P.12-17地点をみると、降雨前は明確な変動特性は検出できないが、傾向としては、淡塩混合領域上端の Z_{10} の変動がやや大きい。降雨前は各代表深さと地下水位は同位相的な変動を示したが、降雨後には各代表深さの変動が非常に大きくなっている。降雨後の22日から26日にかけて混合領域上端および中間の Z_{10} 、 Z_{50} で急激な下降がみられ、その下降量の平均値は約2m、最大値は25日の上げ潮時に約3mを示した。また、このときの Z_{10} の高さに着目すると、降雨前は平均値にして約-5.7(T.P.+m)付近にあるが、降雨後に一旦下降した後徐々に上昇し、25日で平均-4.8(T.P.+m)、最大で-3.3(T.P.+m)と急激な上昇がみられた。他の代表深さにおける降雨後の平均的な高さについては、 Z_{50} で下降がみられ、 Z_{80} で降雨前とほぼ一定値となった。しかし、両代表深さ共に降雨後の変動は大きく、降雨前に比べ最大高さに大きな上昇がみられた。このことは、地下水を利用するという観点からは大きな意味をもつであろう。従来、降雨は地下水を涵養し、淡塩境界を押し下げるとの考えられている。しかし、今回の観測結果によると、感潮河川近傍では、降雨が淡塩混合領域の上端の急激な上昇を引き起こしている。この原因としては、降雨に伴い河川と地下水との交流が活発になり、混合領域の攪拌を引き起こしたためではないかと考えられるが、今後、観測および数値解析を通じてさらに検討していく予定である。

4. 結論

本報では、小潮時から次の小潮時にかけての15日間の地下水位および淡塩境界の混合領域の連続観測により、感潮河川周辺域における地下水の塩水侵入の変動特性について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 小潮から大潮にかけて河川水位の変動幅が増大するとともに、感潮河川周辺域における地下水への塩水侵入の変動は大きくなることが確認された。
- (2) 感潮河川近傍の観測井戸（B.P.12-17）において、降雨による影響を非常に強く受ける地点が存在することが示された。その影響は大潮時の河川水位変動幅の増大に伴う影響より強い。
- (3) 小潮にみられる潮位の日潮不等時は、淡塩境界の変動に抑制がみられた。この原因としては、日潮不等により通常の干潮時に起こる河川水位が地下水位に比べ低くなる現象がみられず、地下水の流向の変化が起こらな

かったためと推測される。このことより、本地域における淡塩境界の変動特性は、感潮河川の水位変動に伴う地下水流向の変化の影響を強く受けていることが示された。

(4) 淡塩境界の混合領域の上端、中間、下端に対応する代表深さをそれぞれ Z_{10} 、 Z_{50} 、 Z_{80} と定義し、淡塩混合領域の変動特性について検討を行った。

その結果、地下水位と淡塩境界の変動が逆位相的な変動を示すB.P.12-12地点においては、感潮河川の水位変動に伴う淡塩境界の変動は、混合領域下端（ Z_{80} ）ほど変動が大きい。換言すると、塩分濃度が高い地点ほど変動が大きいことが示された。混合領域上端部（ Z_{10} ）は淡水の挙動に引きずられる傾向にあり、その特性は降雨後に顕著にみられた。

(5) 一方、B.P.12-17地点において、降雨により淡塩境界の混合領域の各代表深さともに非常に大きな変動がみられ、特に混合領域上端（ Z_{10} ）は、降雨前の平均高さから最大で2.4m上昇した。このように、感潮河川近傍では、降雨が淡塩境界の上端部を急激に上昇させている可能性がある。この原因としては、降雨に伴い河川と地下水との交流が活発になったことが、混合領域の攪拌を引き起こしたのではないかと推測している。

以上のように、感潮河川周辺域における地下水中の塩水は、潮汐に伴う感潮河川の水位変動の影響に加え、降雨によって非常に大きな変動を示す地点の存在が示された。降雨は地下水を涵養し淡塩境界を押し下げる効果があるが、感潮河川近傍では、混合領域を攪拌し、塩水を逆に引き上げる可能性もあることが示唆された。このことは、地下水を利用するという観点からは重要な問題であり、今後、感潮河川を組み込んだ数値解析により検討していく。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、オサシテクノス（株）の松山直樹氏および種田工務の種田作氏に便宜を図って頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小路順一， 舩井和郎， 神野健二， 國武昌人：沿岸帯水層における海水侵入と分散の数値解析，農業土木学会論文集，No.204， pp.159-166， 1999.
- 2) Cartwright, N., Li, L. and Nielsen, P.: Response of the salt-freshwater interface in a coastal aquifer to a wave-induced groundwater pulse: field observations and modeling, *Advances in Water Resources*, 27, pp.297-303, 2004.
- 3) 安元 純， 芝 洋輔， 藤原 拓， 大年邦雄：海岸帯水層における塩水侵入深の時間変動特性に感潮河川の水位変動が及ぼす影響，地下水学会誌，Vol.46， No.4， pp.299-313， 2004.

(2005. 9. 30受付)