

海岸帯水層における塩水侵入の潮汐に起因する 時間変動特性に関する調査研究

FIELD RESEARCH ON THE TIDE-INDUCED VARIATION OF SALINE WATER
INTRUSION INTO A COASTAL AQUIFER

加納 未知¹・唐 心強²・藤原 拓³・大年 邦雄⁴
Michi KANO, Xinqiang TANG, Taku FUJIWARA and Kunio OHTOSHI

¹学生員 高知大学大学院生 農学研究科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

²学生員 理修 愛媛大学大学院生 連合農学研究科 (〒790-8566 愛媛県松山市樽味3-5-7)

³正会員 工博 高知大学助手 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)

The time-dependent mechanisms of saline water intrusion into a coastal aquifer were investigated through systematic field observation that covers the duration of more than half of the tidal cycle. The investigation included three measurements for water table height, vertical distribution of electric conductivity at various testing wells and water levels of the tidal river at a few selected bridge points. It was found that the mixing region between the fresh-saline water bodies is fairly dynamic, and it shifts the depth corresponding to the variation of sea water level. The tide-induced variations of saline water intrusion were analyzed with relation to the variations of sea water level and groundwater level at various testing wells. The mean depths of a mixing region at testing wells appeared more shallowly than the depth predicted by the Ghyben-Herzberg's law.

Key Words: coastal aquifer, tide-induced variation of saline water intrusion, field observation

1. はじめに

過剰揚水に起因する海岸地下水の塩水化は、代表的な地下水障害の一つであり、全国の沿岸施設園芸地域で問題となっているところも少なくない。将来的には地球温暖化の進行にともなう海面上昇により塩水化はさらに助長されることが推測され、その対策は急務といえる。

従来から、この沿岸域における海水侵入機構を解明するために多くの研究が行われてきた。ガイベン-ヘルツベルグの法則(以下G-H則とする)を基礎とした解析的な検討では、淡塩境界面と地下水面が潮汐にともない同振幅・同位相で変動する¹⁾という結果が示されている。さらに数値解析により、淡塩混合領域における塩分濃度10%を示す深さが、50%および90%の塩分濃度を示す深さよりも変動が大きいくこと、また、混合領域の変動には地質構造が大きく関与していること²⁾が示されている。

しかし、G-H則が適用できない非正常場における潮汐に起因する塩水侵入の変動については、十分な知見が集

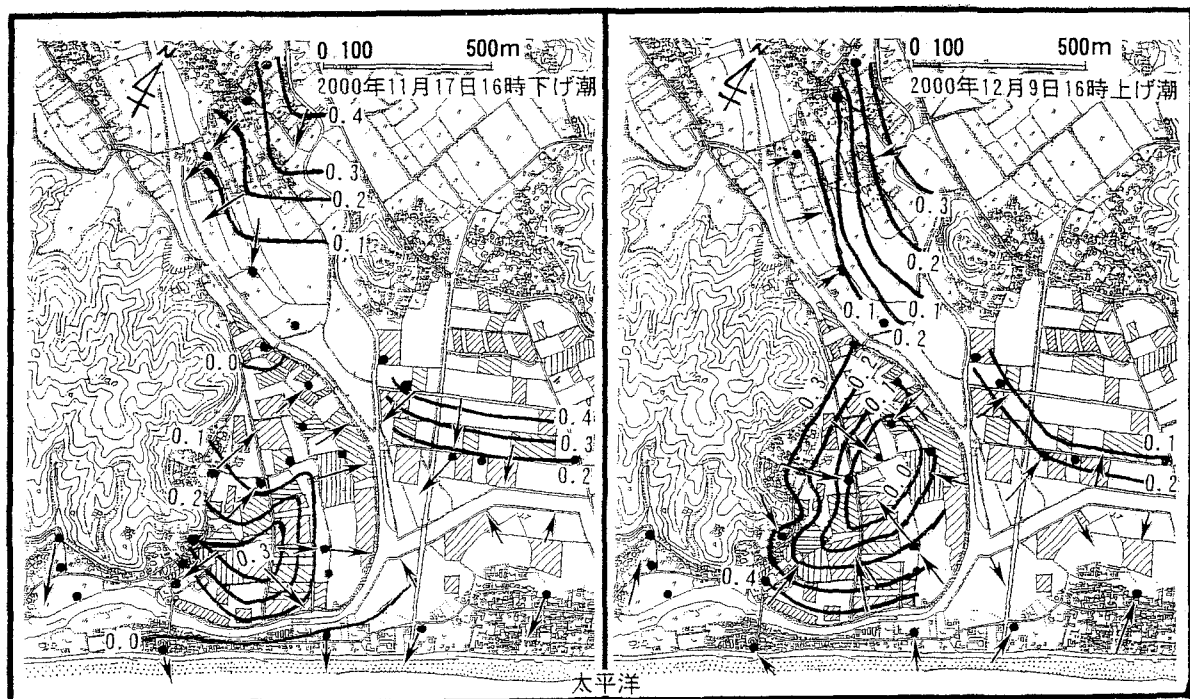
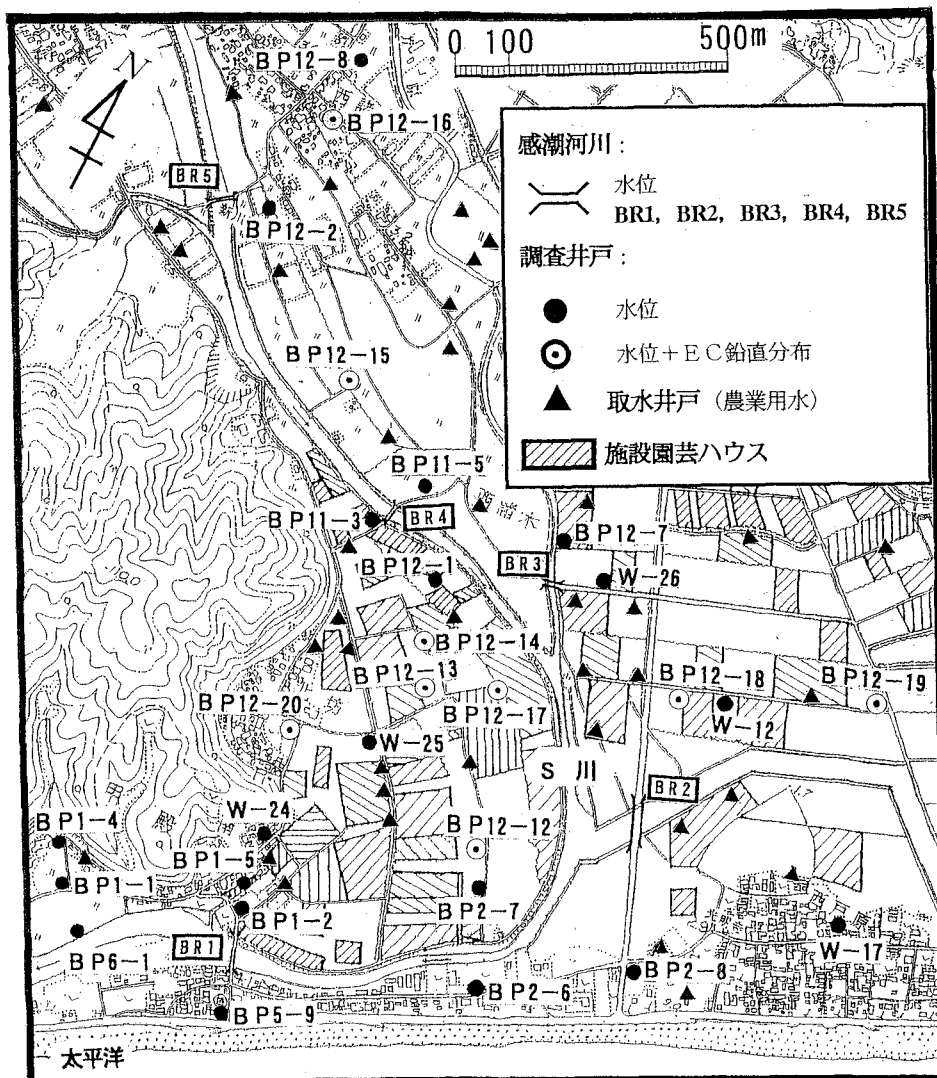
積されているとはいえない現状にある。

本研究では、海岸付近の施設園芸地域内に配置された多数の観測井戸において地下水位と電気伝導率(EC)鉛直分布の観測を、また調査地域内を流れる感潮河川の水位観測を、それぞれ半潮汐周期以上にわたり実施した。ここでは2000年11月から2001年7月までに行った観測結果をもとに、潮汐に起因する淡塩境界の時間変動特性について実証的に検討する。

2. 調査概要

(1) 調査地域

図-1に調査地域の概要と観測地点を示す。調査対象地域の高知県春野町は、太平洋に面した施設園芸の盛んな地域である。この地域では、農業用水のほか、生活用水、水産加工用水にも地下水を使用しており、近年における長期的な汀線の後退傾向と複合して慢性的な地下水の塩水化が進行している。また、この地域内を流れるS川は



感潮河川であり、BR4橋地点までは確実に塩水が遡上していることが確認されている。したがって、本地域の地下水は、海および感潮河川から潮汐の影響を強く受けているものと考えられる。

この地域の地下水流動方向について、2000年11月17日の下げ潮時と2000年12月9日の上げ潮時に行った地下水位の多点連続観測に基づき推定した結果を図-2に示す。同図より、下げ潮時と上げ潮時では地下水の流動方向が変化していることがわかる。なお、対象地域の地質は、表層は薄い砂質土壌でその下は河成砂礫層であると推定されている。

(2) 調査方法

全長にストレーナを配置した井戸において、地下水位と電気伝導率(EC)の鉛直分布を1～2時間間隔で測定した。また同時に、30～60分間隔で感潮河川の水位測定を行った。表-1に調査日の潮汐条件および測定項目などの調査概要を取りまとめている。

表-1 調査の概要

	調査日	測定項目・地点
第1回	2000年11月25日 満潮(06:00)～ 満潮(17:20) 潮位差：104cm・ 110cm	<水位>BR1, BR4, BR5, BP11-3, BP11-5, W26, BP12-8 <EC> 図1の○地点 (6:00～21:13)
第2回	2001年5月26日 満潮(7:19)～ 満潮(21:01) 潮位差：174cm・ 179cm	<水位>BR1, BR4, BR5, BP11-3, BP11-5, W26, BP12-8 <EC> 図1の○地点 (6:30～23:00)
第3回	2001年7月7日 干潮(13:05)～ 満潮(19:49) 潮位差：154cm	<水位>BR3, BR4, BR5, BP11-3, BP11-5, W26, BP12-8 <EC> 図1の○地点 (12:00～23:00)

3. 結果および考察

(1) 電気伝導率(EC) 鉛直分布

図-3にBP12-12地点におけるEC鉛直分布と、地下水位・河川水位(BR4)・潮位の経時変化を示す。EC鉛直分布は潮位と強く連動していること、また淡塩境界は混合層を形成しており、海岸不圧帯水層を淡水領域・混合領域・塩水領域の三層に区分できることが追認できる。

そこで、EC鉛直分布は正規分布の累積分布関数の形状で近似できることから³⁾、図-4に模式的に示すように淡水のEC値(ECf)と塩水のEC値(ECs)の中間値(ECm)を示す深さをZmと定義し、ECm+1.5σのEC値を示す深さをZs、ECm-1.5σのEC値を示す深さをZfと定義する。こ

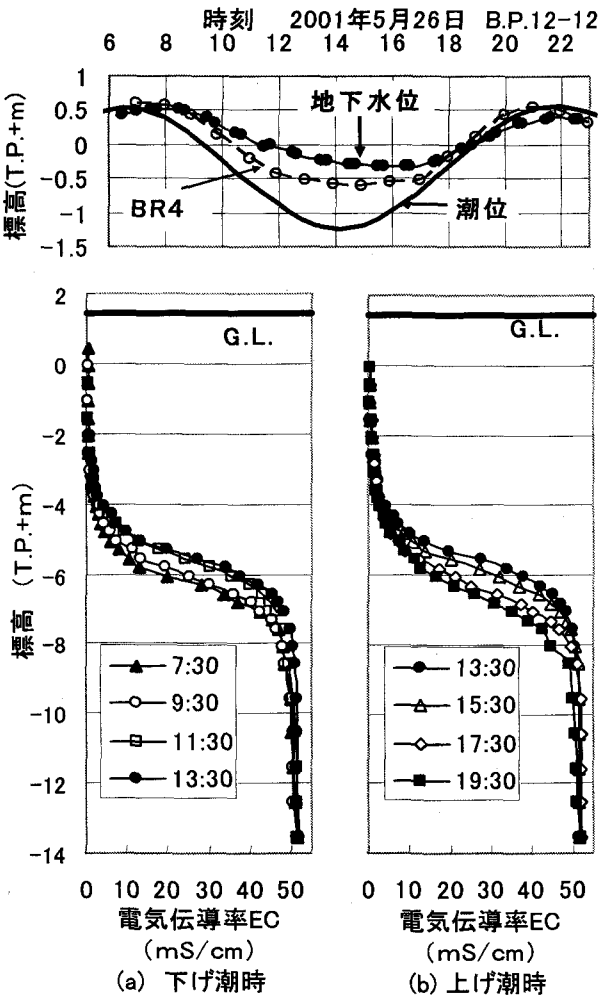


図-3 水位およびEC鉛直分布の経時変化

れらの代表深さをを用いて、Zfより浅い領域を淡水領域、ZfからZsまでの領域を混合領域、Zsより深い領域を塩水領域と定義する。なお、σは正規分布を適用した場合の標準偏差である。

Zf・Zm・Zsの各代表深さの変動が淡塩境界の変動特性を表すので、これら3つの代表深さの変動を各観測地点について以下検討する。

(2) 淡塩境界の変動

図-5は、BP12-12とBP12-14地点の地下水位および各淡塩境界代表深さの時間変動を示したものである。図より、各代表深さの変動幅がそれぞれ異なっており、混合層の厚みは時間により変化することがわかる。また、BP12-12地点では、地下水位と各淡塩境界代表深さはほぼ逆位相で変動していることがわかる。しかし、他の観測地点ではその限りでなく、ほぼ同位相となる地点(BP12-14)や明確な位相関係を示さない地点もあり、場所により異なった挙動を示すことがわかった。

つぎに、地下水位変動振幅(Ag)と潮位変動振幅(As)の比(Ag/As)、また各淡塩境界代表深さ(Zf・Zm)の変動振幅(Azf・Azm)と潮位変動振幅の比(Azf/As・

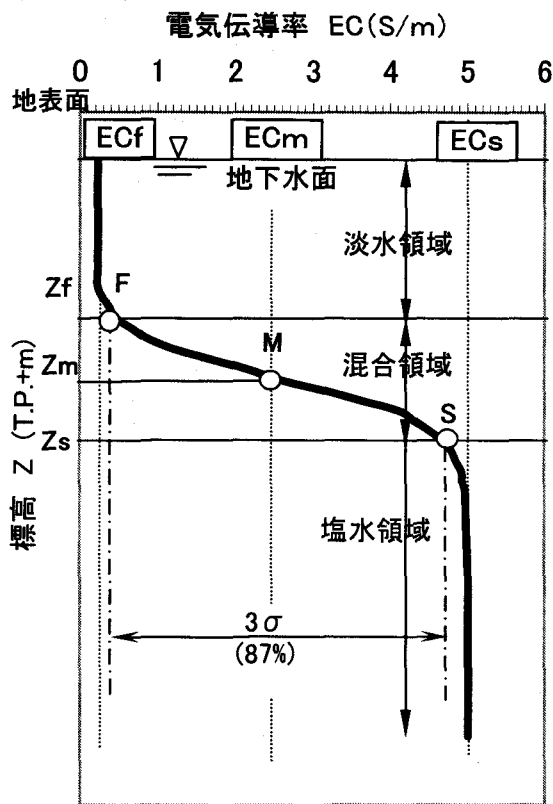


図-4 淡塩境界代表深さの定義

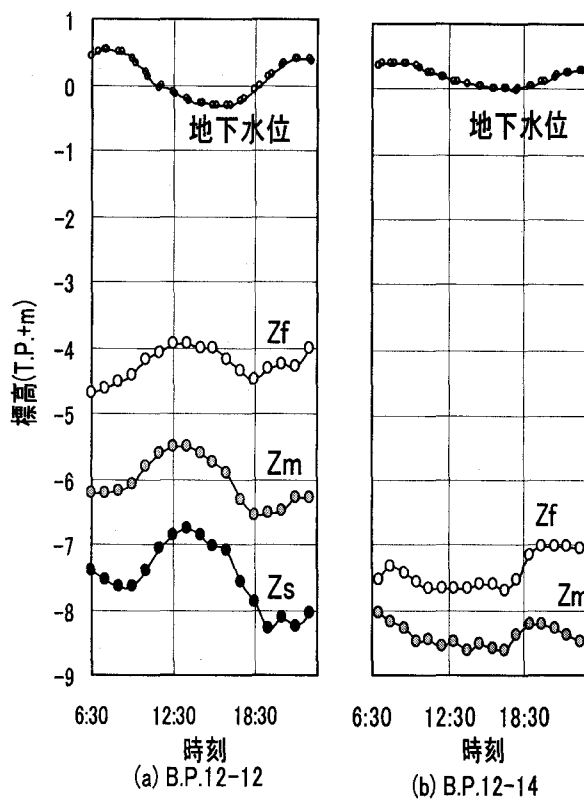


図-5 地下水位および代表深さの時間変動 (第3回調査)

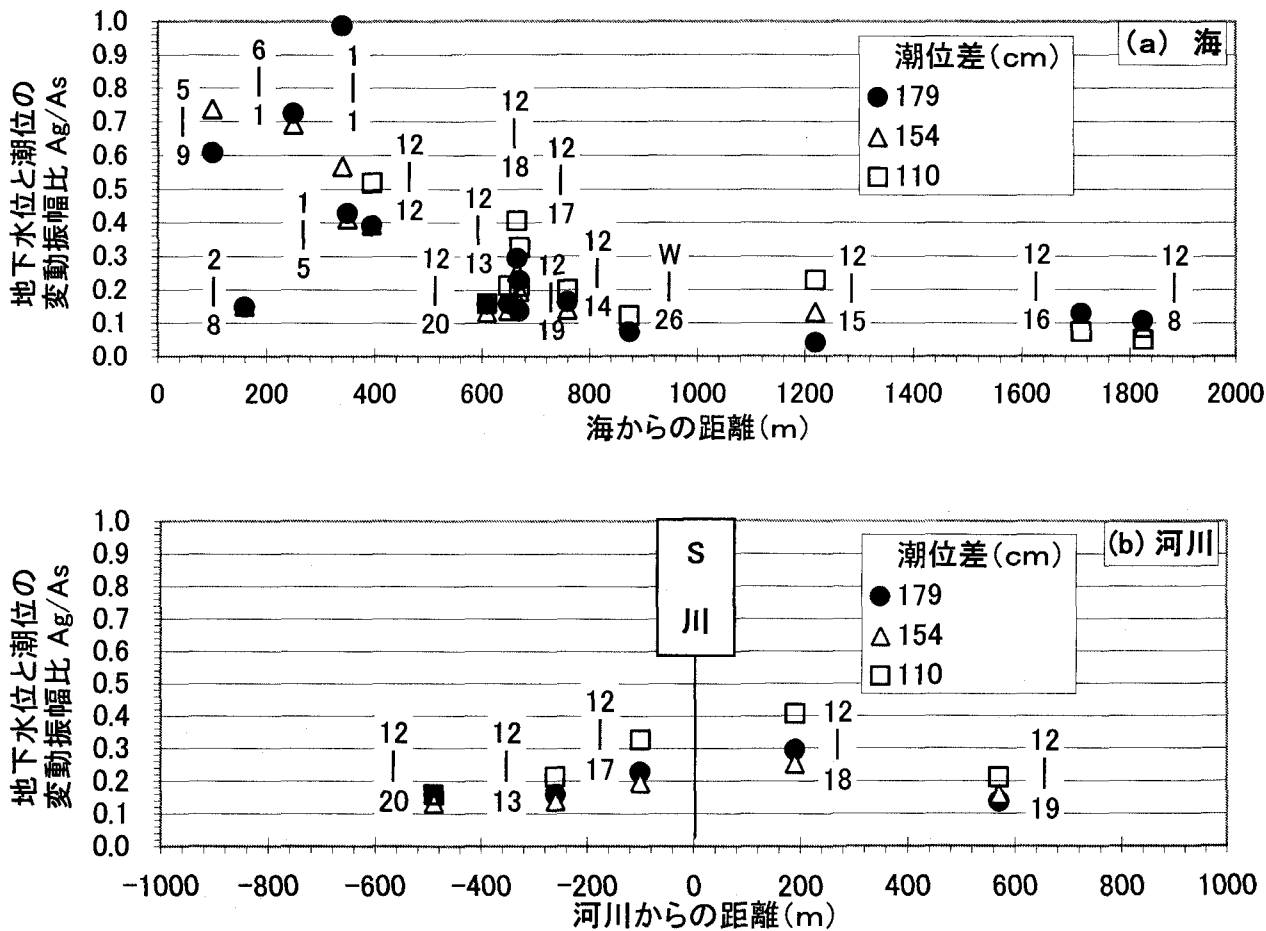


図-6 Ag/As と海および河川からの距離との関係

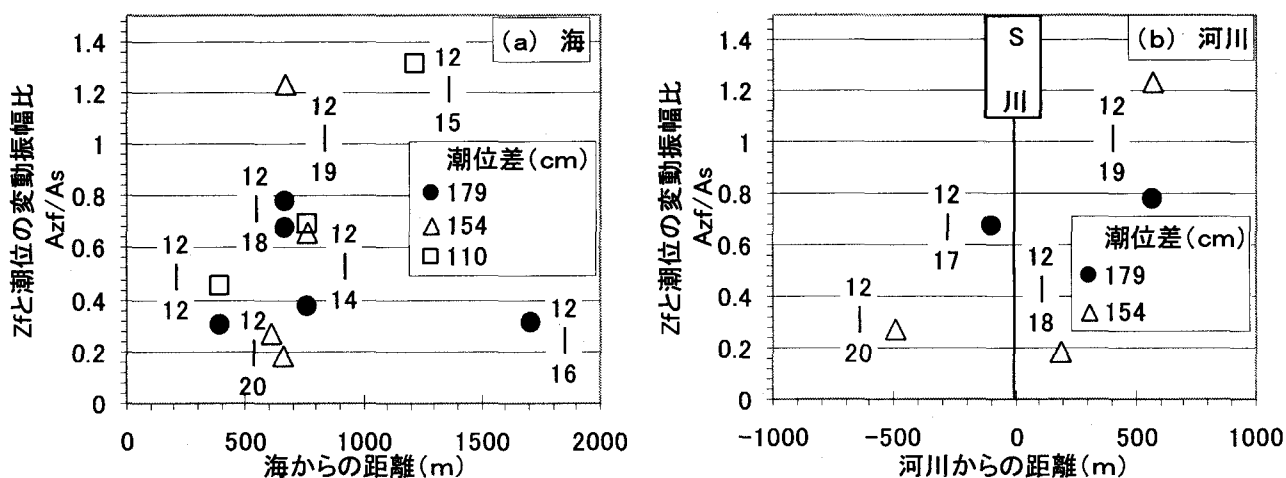


図-7 Azf/As と海および河川からの距離との関係

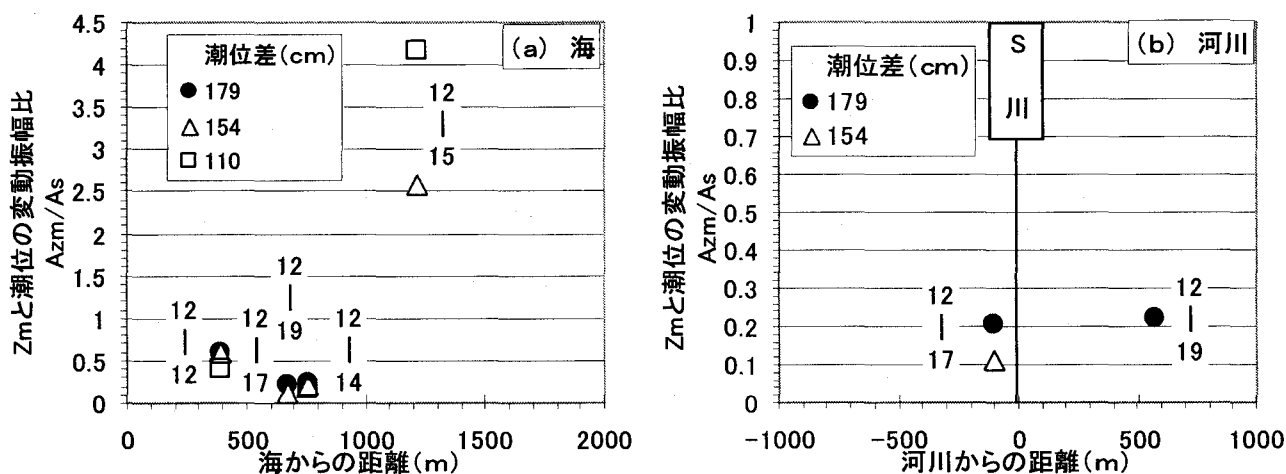


図-8 Azm/As と海および河川からの距離との関係

Azm/As が、海あるいは感潮河川からの距離に対してどのような対応を示すかについて検討した。図-6に地下水位、図-7に Zf 、図-8に Zm についての検討結果を示している。感潮河川からの距離については、海からの距離がほぼ一定でS川に垂直な測線を設定し、その測線上にある地点の観測値を用いて検討を行っている。また河川からの距離は、測線上のS川を基点に東側を正、西側を負としている。なお、図中に併記している番号は、図-1に示した観測地点番号であり、ここでは第1回から第3回の観測結果を用いている。

図-6(a)より、海から遠く離れるにつれ、地下水位と潮位の変動振幅比(Ag/As)は指数関数的に減衰しており、従来の知見を裏付ける観測結果を示している。しかし、海から近いにもかかわらず振幅比が小さい地点(BP2-8)、あるいは海からの距離に比べ振幅比が大きい地点(BP1-1)も見受けられる。前者のBP2-8地点については、過去の調査においても特異な特性を示しており、あたかも宙水のような挙動を示す地点である。後者については、図-1に示すようにBP1-1の地点が感潮河川近くに位置することから、河川の影響を強く受けているためと考えら

れる。

一方、図-6(b)に示した河川からの距離に対する振幅比については、感潮河川から離れた地点ほど地下水位と潮位の変動振幅比が小さくなっていることが見てとれ、感潮河川が周辺の地下水に与える影響も無視できないことがわかる。

図-7および図-8において、G-H則が適用できるならば、地下水位と同じように距離に対して指数関数的に減衰する傾向を示すと考えられる。しかし、淡塩境界代表深さと潮位の変動振幅比($Azf/As \cdot Azm/As$)は、海や河川からの距離に対して明確な変化特性を示していない。これは、本調査対象地域の地下水位が潮位より低くなる時間帯もあり、さらにG-H則の適用条件である平衡状態とはなっていないためと考えられる。

また図より、淡塩境界代表深さの変動が、潮位の変動よりも大きい地点(BP12-19・BP12-15)があることが見てとれる。BP12-15地点では、ボーリング調査から淡塩境界代表深さが現れる付近の地質構造が砂質土であることがわかっている。淡塩境界の時間変動速度には透水係数および間隙率が大きく関係するものと考えられるた

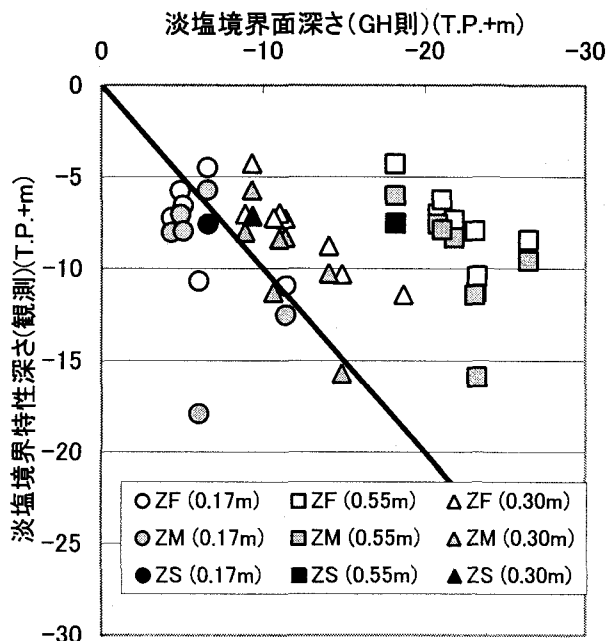


図-9 G-H則淡水塩境界深さと観測値平均代表深さ

め、その場がもつ地質構造との関連に基づいた検討が今後必要である。

また、図-6・7・8で示した各変動振幅比は、地点ごとにはほぼ一定であり、調査日による大きな変化はないことがわかる。

(3) 淡水境界の平均深さ

従来、淡水境界深さの推定にはG-H則が広く用いられている。よって、観測地点ごとにG-H則を用いて推定した淡水境界深さと、観測による各淡水境界代表深さとの関係を図-9に示して比較する。前述したように本調査対象地域はG-H則の適用場ではないが、地下水位、潮位、および各淡水境界代表深さの時間平均値を用いて計算した。凡例の○印は第1回の、□印は第2回の、また△印は第3回の調査であることを示し、併記した括弧内には、その日の地下水位と潮位の時間平均値の差を各点について平均した値を示している。

観測で得られた淡水境界代表深さの時間平均値は、G-H則から算出した値より小さい値をとる傾向にあり、本調査地域の地下水にはG-H則に基づいて推定した値より浅い位置まで塩水が侵入してきていることがわかる。調査日ごとの比較からは、地下水位と潮位の差が小さい日ほどG-H則に近い値をとることがわかる。これは、この地域の各淡水境界代表深さの平均深さが調査日により大きく変わっていないことが原因であり、水位差の大きい日ほど推定値と観測値の間に差が生じているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、海岸付近の施設園芸地域内に配置された多数の観測井戸において地下水位と電気伝導率(EC)鉛直分布観測結果をもとに、潮汐に起因する淡水境界の時間変動特性について検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 海岸帯水層への塩水侵入は、潮汐の影響を敏感にかつ顕著に受けて時間的に大きく変動することが実証された。
- (2) 淡水境界は混合領域を形成しており、EC鉛直分布図から混合領域の代表深さを定義した。
- (3) その代表深さと地下水位の変動は地点により異なり、ほぼ同位相／逆位相の関係にあることが示された。
- (4) 本調査地域には感潮河川が存在しており、地下水位と潮位の変動振幅比に河川からの距離も影響していることがわかった。
- (5) 淡水混合領域の代表深さと潮位の変動振幅比が海からの距離および感潮河川からの距離に対してどのような関係があるかを検討したが、明確な対応関係を見出すことができなかった。淡水境界の時間変動特性の検討には、帯水層の地質構造(透水係数および間隙率)に関する定量的な情報が必須であり、今後、この観点からの検討を行う予定である。
- (6) 海岸地下水は潮汐の影響を受けて流動方向が変化するとともに海面よりも地下水位が低くなる時間帯もあるので、厳密にはG-H則を適用できない。それらの時間平均値を用いることによってG-H則を拡張適用した場合、淡水境界深さの観測値はG-H則より算定される深さよりも浅いことがわかった。
- (7) 上記(6)の結果は、沿岸地域における地下水管理に重要な示唆を与えるものと考えられる。

謝辞：本研究は「財団法人 日本生命財団」の補助を受けて実施したものであることを明記し、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岸 洋介, 井内 国光: 潮汐変動に伴う地下水位および淡水境界面の変動について, Jap. J. Limnol, Vol.45, No.1, pp.61-68, 1984.
- 2) 小路 順一, 粉井 和郎, 神野 健二, 国武 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.
- 3) Todd, D. K. : Groundwater Hydrology, 2nd edition, Chapter 14, John Wiley & Sons, pp.494-521, 1980.

(2001.10.1受付)