

海岸帯水層における塩水侵入深の時間変動特性に 及ぼす感潮河川の影響

安元 純*・芝 洋輔**・藤原 拓***・大年邦雄***

Effects of tidal river on the temporal variation of saltwater intrusion in a coastal aquifer

Jun YASUMOTO *, Yohsuke SHIBA **,
Taku FUJIWARA *** and Kunio OHTOSHI ***

Abstract

Dynamics of saltwater intrusion in a coastal aquifer near the tidal river is dependent on the temporal variations of both sea and river water levels. Composite effects of sea and tidal river, however, are difficult to isolate quantitatively on the basis of the field measurements conducted under ordinary conditions. In this study, special conditions were created in which the variation of water level of a tidal river was kept to be fixed by closing the river gates for a certain time. Field measurements were performed to investigate the spatial and temporal variations of saltwater intrusion in an aquifer. The contribution of tidal river to saltwater intrusion was isolated by comparing the acquired data with the data obtained under the ordinary conditions. The observations were verified by numerical simulation based on the sharp interface between fresh and saline groundwater and some suggestions were pointed out on the practical operations of river gates.

Key Words: Field Survey, Coastal Aquifer, Saltwater Intrusion, Tidal River, Numerical Simulation, Freshwater-Saltwater Interface Model

要 旨

河川感潮域においては、潮汐に伴う海面および感潮河川の水位変動が海岸帯水層への塩水侵入の時空間変動特性に影響を及ぼしていると考えられる。しかし、これらの要因を定量的に分離するのは通常の調査では困難である。本研究では、河口水門を閉じて感潮河川の水位を一定時間固定し、そのことが地下水への塩水侵入に及ぼす影響を観測により検討した。河川水位の固定化に伴って地下水位および淡塩境界の変動が抑制されること、河川近傍ほど抑制程度の大きいことがわかった。また、淡塩境界面モデルを用いた数値計算により観測結果を検証するとともに、河川水位を固定する時間長と地下水への影響持続時間長との関係について検討した。

キーワード: 現地調査、海岸帯水層、塩水侵入、感潮河川、数値解析、淡塩境界面モデル

* 愛媛大学大学院連合農学研究科 ()
The United Graduate School of Agricultural Sciences, Ehime University

** 高知大学大学院農学研究科
Graduate School of Agricultural Sciences, Kochi University

*** 高知大学農学部
Faculty of Agriculture, Kochi University

1. はじめに

太平洋に面した沿岸部に位置する高知県春野町内の施設園芸地域を流れる新川川では、河口部に設置されている放水路が太平洋からの波浪等により土砂が堆積・閉塞し放水路としての機能低下を起こしており、毎年土砂撤去に多大な工費と労力を要している。そこで、河口閉塞に対する維持管理対策の一環として、放水路の水門の開閉操作により河川流を利用した河口閉塞砂のフラッシュアウトを目的とした現地実験（以下、フラッシュ実験）を高知県伊野土木事務所と共同で行うこととなった。本実験は、新川川が感潮河川であることを利用して、河口放水路の水門を大潮の満潮時過ぎに閉門することにより河川へ遡上した塩水を一定時間貯留し、干潮時に水門を開門し、干満差によりついた水位差を利用して堆積土砂をフラッシュするものである。

しかし、同地域は汀線の後退や地下水の過剰揚水により地下水の塩水化障害が顕在化しつつある。また、本地域のような河川感潮域においては、地下水への塩水侵入の時間変動特性は潮汐に伴う感潮河川への塩水遡上の影響も強く受けていることが大年ら（2001）や加納ら（2002）により示されている。そのため、フラッシュ実験により、河川に塩水を通常時よりも長時間貯留することは、地下水の塩水化を助長する可能性がある。そこで、フラッシュ実験時の地下水への塩水侵入のモニタリングが不可欠であると考えられる。

また、これまで潮汐に伴う海岸帯水層への塩水侵入の時間変動特性の研究については、岸（1984）や柿沼（1986）、近年では小路（1999）、内山（2001）らにより行われている。一方、感潮河川への塩水遡上の研究についても多数の報告がみられるが、潮汐に伴う海岸帯水層への塩水侵入の時間変動特性に感潮河川が及ぼす影響について検討された例は無い。本地域のような河川感潮域において、持続的な地下水利用の指針を作成するためには、感潮河川の及ぼす影響を把握しておく必要がある。しかし、通常の調査による観測結果から感潮河川の及ぼす影響を分離するのは極めて困難である。一方、フラッシュ実験により、潮汐に伴い変動している感潮河川の水位が一定時間固定

された場合、本地域の地下水位および帯水層内の淡塩境界の時間変動特性は通常時とは異なることが予測される。

そこで本研究では、フラッシュ実験と並行して地下水調査を行い、実験に伴う地下水への塩水侵入の影響をモニタリングするとともに、その結果を通常時の観測結果と比較しフラッシュ実験の影響を抽出することで、本地域の地下水への塩水侵入の時間変動特性に感潮河川が及ぼす影響について検討する。さらに、淡塩境界面モデルを用いた数値解析により観測結果を検証し、感潮河川の水位を固定する時間長と地下水への影響持続時間長との関係についても検討し、今後フラッシュ実験を行う上での提案を行う。

2. 調査地域の概要

2.1 調査地域

調査対象地域は、土佐湾に面した高知県春野町の甲殿・諸木地区である。図1に調査地域および観測井戸の配置を示す。図中に斜線で示した部分が施設園芸ハウスとなっており、本地域は県内でも有数の施設園芸地域である。そのため、多くの地下水を灌漑用水として利用しており、地下水の塩水化障害が顕在化しつつある。地域内には、感潮河川である新川川が存在しており、本河川に囲まれた西側の甲殿地区では、東側の諸木地区に比べ、塩水が浅いところにあることがこれまで行った調査結果により明らかとなっている（大年ら、2001）。

また、地質は四万十帯の砂岩と頁岩を基盤岩とし、基盤岩を覆う未固結堆積物は、河成砂質土・礫質土を主体としており、一部では後背湿地性の粘性土、あるいは縄文海進等による浅海性の粘性土の堆積等が部分的に認められるものの、不圧帯水層と推定される（高知県伊野土木事務所、2000）。

2.2 地下水の流向

2001年5月26日に行った多点での地下水位観測に基づき、本地域の地下水の流向を推定したものが図2である。左の図(a)は、ほぼ満潮時刻である21時における地下水の推定流向である。河川水

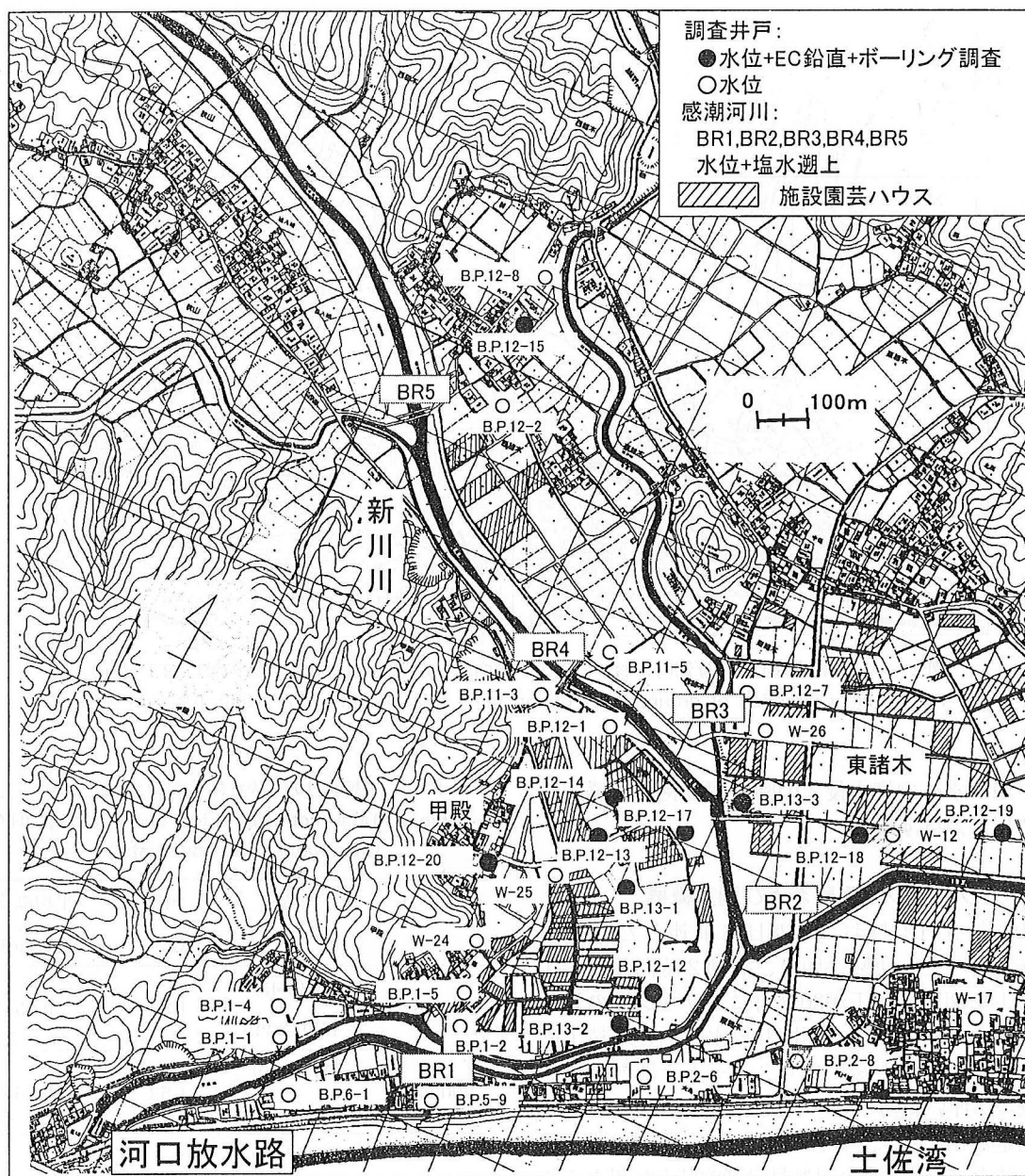


図1 調査地域および観測井戸の配置

Fig. 1 Surveying field and locations of measurement

位が地下水位よりも高く、河川水が地下水へ流入していると推定される。一方、右の図 (b) はほぼ干潮時刻である14時における推定流向である。地下水位が河川水位よりも高く、地下水が河川に流出していると推定される。

本地域においては、潮汐に伴う感潮河川の水位変動によって地下水の流向が変化し、上げ潮時には感潮河川を遡上してきた塩水が地下水へ侵入していると考えられる。

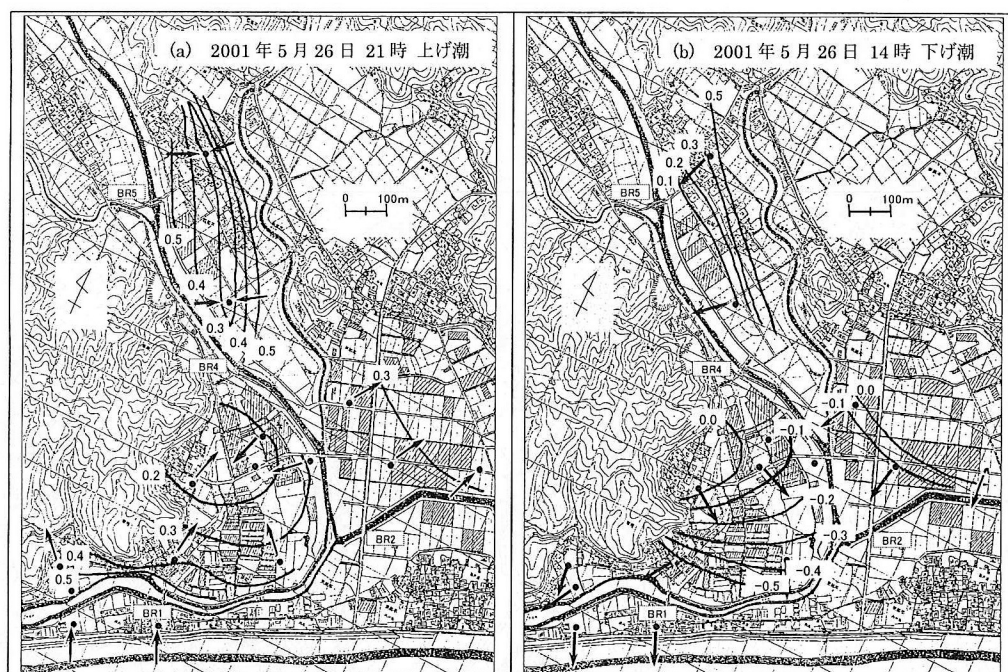


図2 上げ潮時および下げ潮時における地下水流向の推定結果 (水位等値線の単位:T.P.+m)
Fig. 2 Flow direction of groundwater during flood tide and ebb tide (Unit: T.P.+m)

3. 地下水への塩水侵入の時間変動特性に感潮河川が及ぼす影響

3.1 フラッシュ実験および調査概要

2002年5月27日および28日に前述したフラッシュを行った。実験手順は、満潮2時間後に全4ゲートを閉門し、干潮30分前にフラッシュの対象となる1ゲートのみを開門し放水路内の堆積土砂をフラッシュした後、残り3ゲートを開門した。

潮汐に伴い変動している感潮河川の水位が一定時間固定された場合、本地域の地下水位および帯水層内の淡塩境界の時間変動特性は通常時とは異なることが予測される。これを通常時との比較を行うことによって感潮河川の水位変動が本地域の地下水への塩水侵入に及ぼす影響について検討する。

調査日の潮汐条件を Table 1 に示す。本表に示すとおり、2001年5月26日に行った調査日が時期、潮差および平均潮位とも今回の実験日とほぼ等しいことから、その日の調査結果を通常時の変動として本実験日の調査結果との比較に用いた。

調査は図1に示す観測井戸において、満潮時刻

表1 各調査日の潮汐条件 (HW:満潮、LW:干潮)
Table 1 Tidal conditions for each survey (HW: High water, LW: Low water)

調査日	干満時刻	潮差 (m)	平均潮位 (T.P.+m)
2002.5.27	HW (5:45)	1.80	-0.255
	~ LW(12:29)		
2002.5.28	HW (6:19)	1.82	-0.261
	~LW (13:09)		
2001.5.26	HW (7:14)	1.80	-0.266
	~LW(14:08)	1.74	
	~HW(20:57)		

から実験後に河川水位および地下水位が通常の変動に漸近するまでの約12時間にわたって、地下水位および電気伝導率 (EC) の鉛直分布の測定、ならびに地域内の橋 (BR1~BR5) を利用した感潮河川の水位測定を連続的に行った。また、水門に最も近いBR1において河川水のEC鉛直分布の連

続観測も行った。なお、EC の計測には、P102型 水温・電気伝導度計 (CTIサイエンスシステム株式会社) を用いた。

3.2 結果および考察

(1) 感潮河川への塩水遡上

実験時 (2002.5.27) および通常時 (2001.5.26) における河川水位の経時変化を図3に示した。なお、両観測結果を比較するため、満潮時刻からの経過時間で表示した。図を見ると、通常時は潮汐に応答した変化がみられる。一方、実験時も調査開始時は下げ潮に連動し河川水位が下降している。しかし、その後河口の全ゲートを閉門した満潮2時間後から約6時間後までは自己流量による上昇が若干見られるものの、ほぼ一定水位となった。1ゲート開門した約6時間後から水位は徐々に下降し、全ゲート開門した約9時間後以降は急激な下降が見られる。その後、通常の上げ潮による河川水位の上昇軌道に漸近している。

次に、BR1地点での河川水 EC 値の経時変化を

標高 (T.P. + m) ごとに区分して図4に示した。図を見ると、表層の T.P. +0.2~+0.0m では全ゲートを閉門した時点から EC 値が徐々に小さくなっている。これは、河川の自己流により河川水面付近で塩水が希釈されたためと考えられる。一方、T.P. -0.5~-1.0m では全ゲートが閉まっている間は EC 値に変化はみられず、本地点の河床に約25 (mS/cm) と海水の1/2程度に相当する高濃度の塩水が貯留される結果となった。

(2) 地下水位および淡塩境界の時間変動特性

ここでは、感潮河川の水位を一定時間固定したことが地下水位および淡塩境界の時間変動特性に及ぼす影響について検討する。

図5の(a)、(b)、(c)に、B.P.12-12、B.P.12-14、B.P.12-15各地点における通常時 (2001.5.26) および実験時 (2002.5.27) の EC 鉛直分布の観測結果と、同地点における地質柱状図を併示した。なお、横軸は満潮時からの経過時間を示している。図を見ると、淡塩境界は混合領域を形成しており、帯水層を淡水領域、混合領域、塩水領

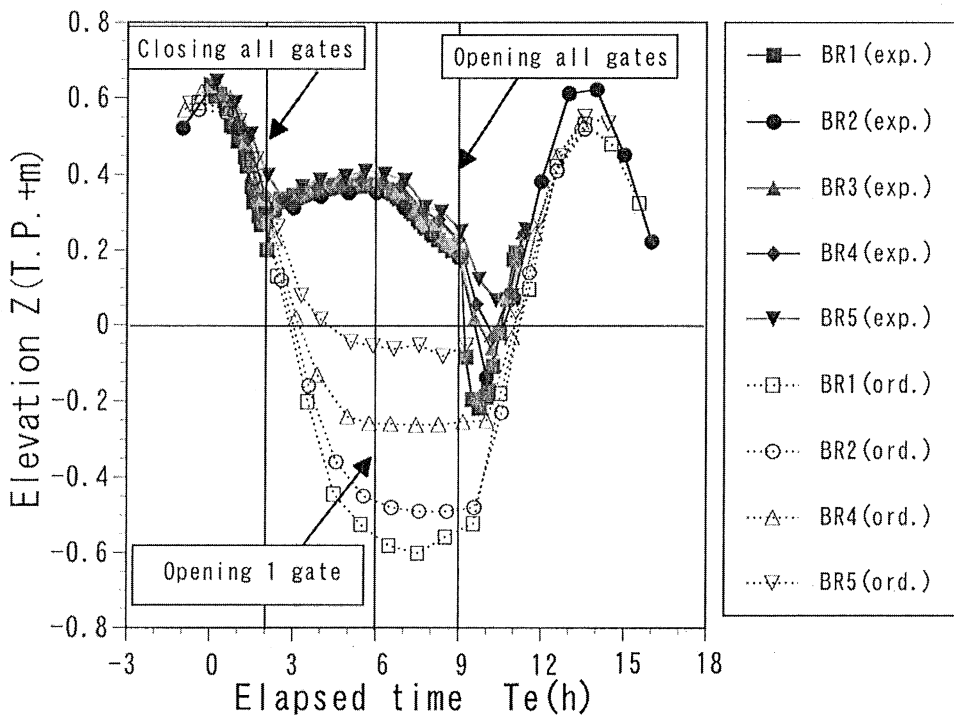


図3 河川水位の通常時 (ord.) と実験時 (exp.) の比較

Fig. 3 Comparison of river water level between ordinary and experimental conditions

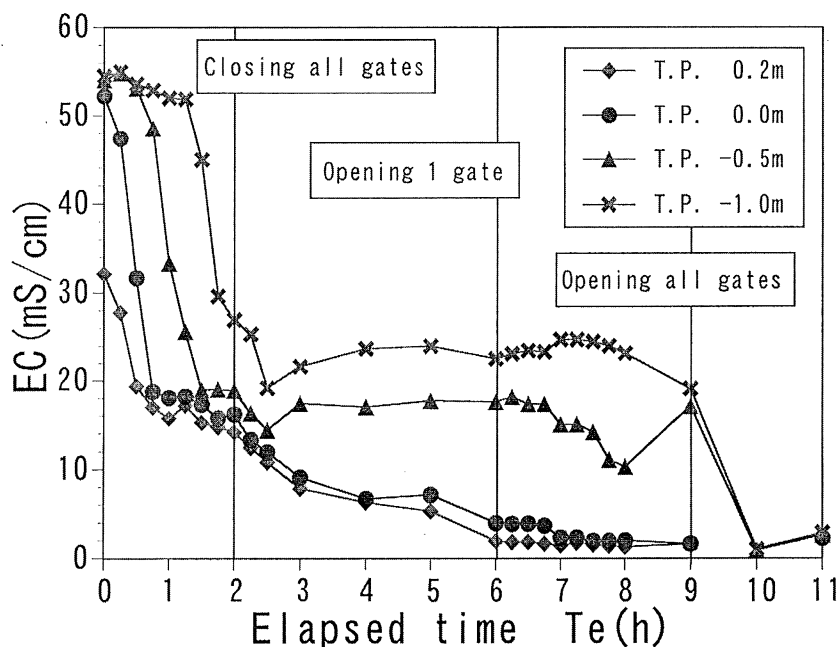


図4 実験時における河川 (BR1) への塩水遡上

Fig. 4 Intrusion of saline wedge to the river(BR1) under experimental conditions

域の3領域に区分できることがわかる。通常時の結果を見ると、ECの鉛直分布に時間的な変動がみられ、混合領域は潮汐に連動して時間的に変動していることがわかる。地点ごとに見ると、図(a)のB.P.12-12は海岸線からの距離が約335m、感潮河川からの距離が約110mと両方に比較的近く、潮汐に伴う変動も大きい。図(b)のB.P.12-14は海岸線から約725m、感潮河川から約185mと両方から比較的離れており、潮汐に伴う変動も小さい。図(c)のB.P.12-15は海岸線から約1175mと海からある程度離れているにもかかわらず混合領域の変動はかなり大きい。これは本地点が感潮河川に近いため、塩水遡上に伴う感潮河川の水位変動の影響を大きく受けているためと考えられる。また地質柱状図をみると、混合領域の変動の大きいT.P. -11~-17m付近が火山灰混じり砂となっている。火山灰混じり砂にはシラスのように比較的透水性が高い土壌も存在する。またボーリングデータによると、本地層付近で貝殻片の混入が認められている。このことから、本地層付近の透水性が高くなっている可能性が考えられ、本地点での混合領域の変動が大きい一因ではないかと

推測される。

一方、実験時の結果をみると、通常時と比べ混合領域の時間変動が小さくなっている。これは、フラッシュ実験により感潮河川水位が一定時間固定されたためと考えられる。つまり、本地域における潮汐に伴う淡塩境界の時間変動は感潮河川の水位変動によるものが大きいと考えられる。

そこで、通常時および実験時における淡塩境界の混合領域の変動特性を詳細に検討するため、ECの鉛直分布の観測結果をもとに、混合領域を図6のように定義した。

まず、地下水面付近の平均EC値を $(EC)_f$ 、海水のEC値である50 (mS/cm) を $(EC)_s$ とし、その中間値を $(EC)_m$ とした。Todd (1980) によればECの鉛直分布が正規分布の積算関数で近似できることから、ECの観測誤差を考慮した上で、正規分布積算関数全体の約87% (3σ) に相当する区間を混合領域と定義した。そして、 $(EC)_m$ が示す深さを Z_m 、 $Z_m - 1.5\sigma$ が示す深さを Z_f 、 $Z_m + 1.5\sigma$ が示す深さを Z_s と定義した。以下では、これら Z_f 、 Z_m 、 Z_s が淡塩境界の混合領域を代表する特性深さとし、通常時と実験時との比較検討に用いる。

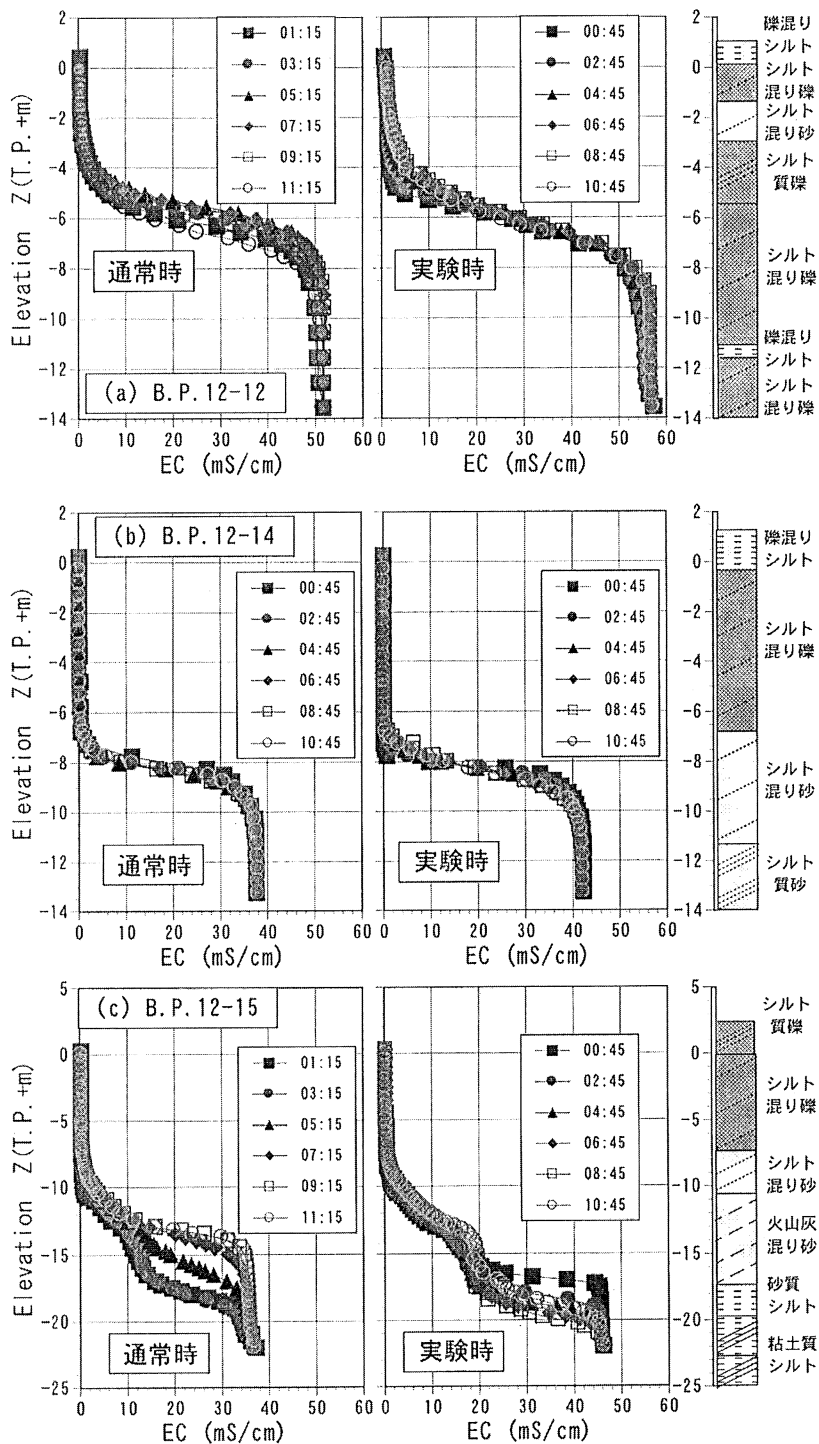


図5 電気伝導率 (EC) の鉛直分布の通常時と実験時の比較

(a) B.P.12-12、(b) B.P.12-14、(c) B.P.12-15

Fig. 5 Comparison of vertical electric conductivity between ordinary and experimental conditions

(a) B.P.12-12, (b) B.P.12-14, (c) B.P.12-15

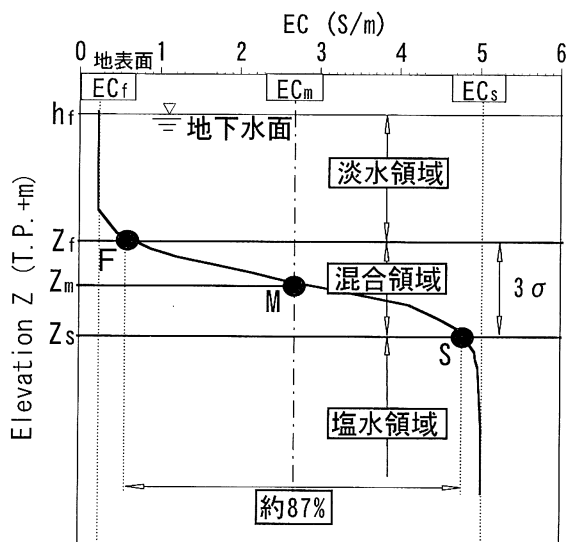


図6 淡塩境界の混合領域の定義図

Fig. 6 Definition of mixing zone of fresh-salt water interface

図7の(a)にB.P.12-12、(b)にB.P.12-14における実験時(2002.5.27)と通常時(2001.5.26)の観測結果を示す。図には、潮位 H 、地下水位 h_f 、直近の河川水位 h_r および淡塩境界の各特性深さ Z_f 、 Z_m 、 Z_s を併示している。図(a)のB.P.12-12では、破線で示した通常時には潮汐により河川水位が変動し、それに連動して地下水位も変動している。また、それに伴い淡塩境界の各特性深さも変動しており、地下水位と各特性深さは逆位相の変動特性を示している。一方、実線で示した実験時を見ると、全ゲートを閉門した間に河川水位が固定され、それにより地下水位も若干の下降はみられるが通常時と比較するとその変動は大きく抑制された。淡塩境界の各特性深さについては、全ゲートを閉門した間に、 Z_f には上昇がみられ、 Z_m 、 Z_s については若干の上昇はみられたもののほぼ一定値を示した。これは、本地点の潮汐に伴う地下水位および淡塩境界の変動には、潮位変動による直接的な伝播に比べ、感潮河川の水位変動による伝播が卓越していることを示している。 Z_f に上昇がみられた要因としては、図4に示したように、河口水門を閉門したことにより Z_f に相当するEC値(約3.5mS/cm)よりも高濃度(約25mS/cm)の塩水が本地点付近の河床部に通常時よりも高水

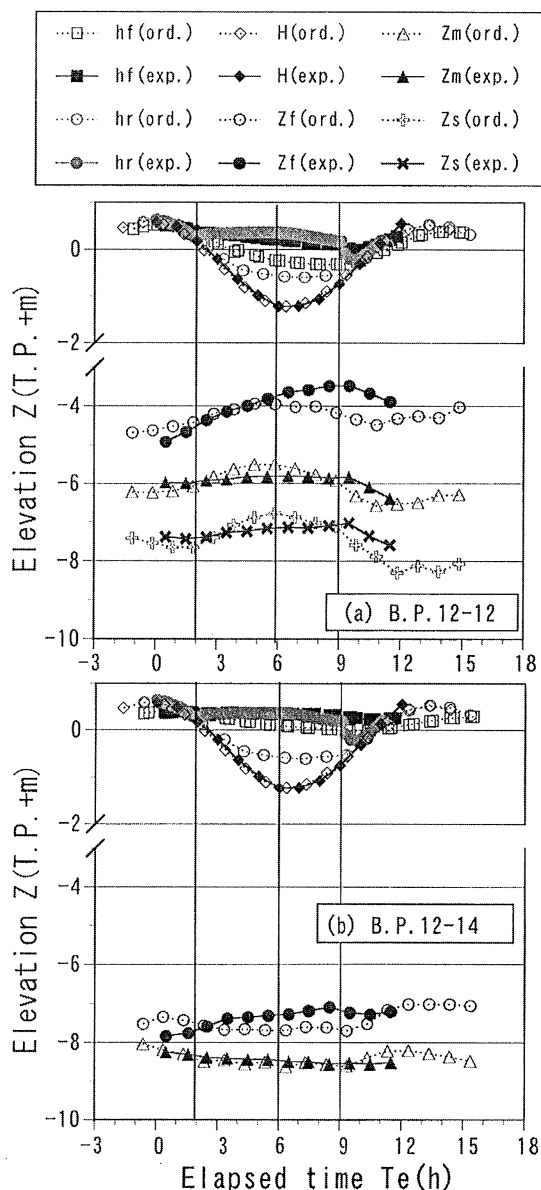


図7 地下水位および淡塩境界の通常時と実験時の比較

Fig. 7 Comparison of groundwater and river water between ordinary and experimental conditions

位で長時間貯留されたことにより、 Z_f が上昇したものと推測される。

次に図(b)のB.P.12-14を見ると、通常時には地下水位の変動はB.P.12-12と同様に河川水位と連動して変動している。淡塩境界については通常

時は B.P. 12-12 とは逆に、地下水位と同位相で変動している。一方、実験時には B.P. 12-12 と同様に地下水位および淡塩境界の各特性深さの変動は抑制される結果となった。これにより、本地点のように海岸線より離れた潮位変動の影響を直接受けにくい領域においても、感潮河川の影響を受けて淡塩境界が変動することが認められた。淡塩境界の各特性深さに着目すると、 Z_f は B.P. 12-12 と同様に上昇傾向を示したが、 Z_m については若干の下降が見られた。これまでにを行った塩水遡上調査および図 4 に示した観測結果より、本地点付近の河床部に貯留された塩水の EC 値は、B.P. 12-12 地点付近の河床部と同様に、 Z_f に対応する EC 値と比べると大きい、 Z_m に対応する EC 値よりは小さくなっていることが推測される。つまり、B.P. 12-12 地点と同様に塩水が河床に貯留されたことにより Z_f は上昇するものの、本地点では Z_m に相当する塩水よりは薄いため、 Z_m に下降がみられたのではないかと推測される。

(3) 変動振幅比を用いた定量的評価

今回比較を行った 2001 年 5 月 26 日は、Table 1 に示すように時期や潮差、平均潮位が実験日とほぼ等しい。そのため、両観測日は河川水位および地下水位の変動振幅比については、フラッシュ実験の影響が無かった場合ほぼ等しいと考えられる。なお、ここでは変動振幅比を潮汐の振幅（潮差の半分）に対する、各観測値の観測期間中の振幅（変動幅の半分）の比と定義する。

そこで、式 (1) に示すように、河川水位、地下水位および淡塩境界それぞれに対する変動振幅比の通常時と実験時との差をとり、その値をフラッシュ実験による影響度 I と定義する。

$$I_p = (A_p/A_t)_0 - (A_p/A_t)_1 \quad (1)$$

ここで、 I は影響度を表し、下付の p にはそれぞれ河川水位 h_r 、地下水位 h_f 、淡塩境界の各特性深さ Z_f 、 Z_m 、 Z_s などのパラメータが入る。 A_p は各パラメータにおける変動振幅、 A_t は潮位の変動振幅である。なお、括弧外の下付きの 0 は通常時を表し、下付きの 1 は実験時を表している。

この (1) 式による影響度はフラッシュ実験により変動振幅比がどれだけ抑制されたのかを表している。実験による河川水位、地下水位、および淡

塩境界に対する影響度を比較することにより、それぞれの関連性を定量的に検討し、また、各地点における感潮河川の影響度合いについて考察する。

ここで各影響度を示す前に、通常時 (2001.5.26) の各観測地点における地下水位 h_f および淡塩境界の代表特性深さ Z_f 、 Z_m 、 Z_s それぞれの変動振幅比 A_p/A_t を図 8 に示すこととする。地下水位および淡塩境界の変動振幅比の大小は、海岸からの距離および感潮河川からの距離、地質条件に規定されると考えられる。図 1 に示した観測井戸の配置を参照すると明らかであるが、地下水位に関しては海岸線および感潮河川からの距離が近いほど大きな値を示している。しかし、淡塩境界の各特性深さをみると、地下水位の変動振幅比が大きな地点が必ずしも大きな変動を示していない。海岸線からの距離というより、むしろ感潮河川からの距離が比較的近いところで大きな値を示すようである。また、地質条件等の場の特異性の影響も大きいと考えられる。例えば、B.P. 12-15 のように海からの距離が離れており、地下水位の変動振幅比も大きくない地点において非常に大きな値を示している。これは、本地点が感潮河川に近いということに加え、図 5 に示したように淡塩境界が存在する付近の地質の透水性が比較的高く、短時間の潮汐周期の間でも追従性が高いためと推測される。

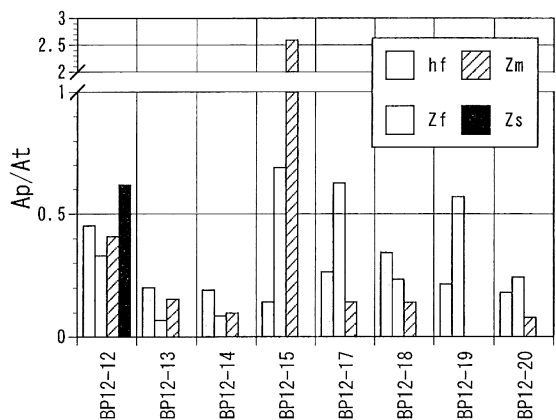


図 8 各観測井戸における変動振幅比 (通常時)

Fig. 8 Amplitude ratio at each observation well (ordinary conditions)

図9の(a)に、縦軸に河川水位に対する影響度 I_{hr} を、横軸に河道距離をとった図を示す。影響度は下流側ほど大きく上流に行くにしたがって減少している。その値は下流側で約0.2、上流側では約0.05となった。当然ではあるが、河口に近いほど実験の影響を強く受けており、上流ほどその影響が小さいことを示している。

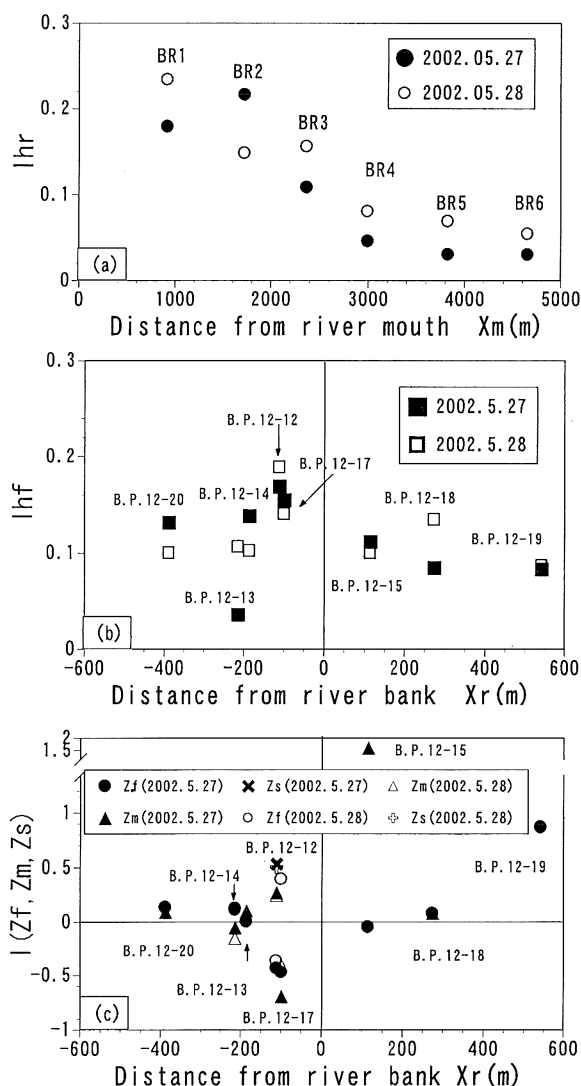


図9 影響度 (a) 河川水位、(b) 地下水位、(c) 淡塩境界

Fig. 9 Degree of influence (a) river water level, (b) groundwater table and (c) interface

次に、地下水位に対する影響度について考察する。図9の(b)に地下水位に対する影響度 I_{hf} を、感潮河川からの距離に対してプロットした図を示す。なお、河川からの距離は、観測井戸から河川護岸までの最短距離をとったもので、右岸側(甲殿地区)の距離を負に、左岸側(東諸木地区)の距離を正とした。図を見ると、影響度は河川近傍ほど大きく、河川からの距離の増大とともに減少する傾向にある。また、その値に着目すると、感潮河川付近の地点で影響度は約0.2となっており、これらの観測井戸が分布するBR1~BR3付近の河川の影響度 I_{hr} の値とほぼ等しくなっている。これは本地域の潮汐に伴う地下水位の変動は感潮河川の水位変動に応答したものであることを示している。

同様の解析を淡塩境界についても行った。その結果を図9の(c)に示す。図の縦軸には淡塩境界の混合領域の各特性深さそれぞれに対する影響度 I (Z_f , Z_m , Z_s) を、横軸には感潮河川からの距離をとった。影響度は河川近くで大きな値を示しており、その値は他点と異なったEC鉛直分布を示すB.P.12-15を除いても、地下水位と比較すると大きな値であり、約0.5~0.7範囲で変動している。これは、図8に示したように、通常時、感潮河川近傍では地下水位の変動振幅比に比べ淡塩境界の変動振幅比が大きいためである。影響度が負の値を示しているのは、河川水位の固定化に伴い通常時より大きく変動したことを示している。この負を示した地点は、B.P.12-17の Z_f , Z_m 、他には図5で示した Z_f に大きな上昇が見られたB.P.12-12とB.P.12-15であった。図1に示すとおり、この3地点はいずれも感潮河川から100m付近に分布していることから、フラッシュ実験により感潮河川に滞留した塩水の影響を比較的強く受けていることが考えられる。また、地下水位の場合に比べ河川近傍では影響度の値も大きくなっている。

以上の結果より、本地域における潮汐に伴う地下水位および淡塩境界の時間変動特性は感潮河川の水位変動の影響が卓越しており、特に淡塩境界は感潮河川近傍で比較的強く影響を受けていることが示された。

4. 淡塩境界面モデルによる数値解析

数値解析により、今回得られた観測結果を検証するとともに、境界水位を固定する時間長と地下水への影響持続時間長との関係について検討し、フラッシュ実験の影響がどの程度持続するのか検討する。

4.1 計算概要

本解析では、図10に示す鉛直断面を対象に淡塩境界面モデルを用いて、海水面に水位変動を与えた状況で、今回行った現地実験のように水位変動を一定時間固定し、そのことが地下水位および淡塩境界にどのような影響を及ぼすのか検証する。

フラッシュ実験時の河川水は鉛直方向に濃度分布を持ち、本計算のモデル場とは異なる。しかし、本論文の目的はフラッシュ実験が地下水の塩水化を助長し地下水利用の妨げになることはないか検討することにある。そのため海側境界条件として塩分濃度が鉛直方向に一樣である場を与えることによって、実際の感潮河川より地下水利用の観点からはより厳しい条件設定となり、その結果は安全側を見込んだ結果となる。

なお、解析場は水平基盤上の不圧帯水層で、均質・等方性であり、Dupuitの近似が適用できると仮定する。

Bear & Verruijt (1998) によれば、図10に示すような不圧帯水層において、地下水の連続式およびDarcy 則を考慮すれば、地下水位 h_f と淡塩境界面 h_s の満たす基礎方程式は次のようになる。

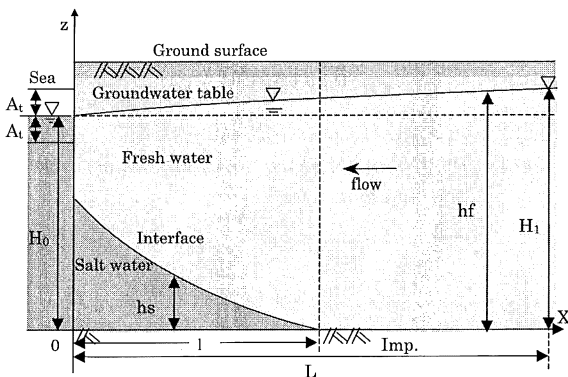


図10 解析場の模式図

Fig.10 Schematic diagram of analytic domain

$$(l < x \leq L)$$

$$\frac{\lambda}{k} \frac{\partial h_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h_f \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$(0 \leq x \leq l)$$

$$\frac{\lambda}{k} \frac{\partial}{\partial t} (h_f - h_s) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h_f - h_s) \frac{\partial h_f}{\partial x} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\lambda}{k} \frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h_s \left(\alpha \frac{\partial h_f}{\partial x} + (1 - \alpha) \frac{\partial h_s}{\partial x} \right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 k は透水係数、 λ は有効間隙率であり、 $\alpha = \rho_f / \rho_s$ (ρ_f : 淡水密度、 ρ_s : 塩水密度) である。

境界条件には式(5)、(6)を用い、海水面が平均水位の周りを振幅 A_t 、周期 T で変動させた状態で、今回行った現地実験のように、海側境界での海水面の変動を一定時間固定し、通常の変動軌道に戻すという操作を行った。

$$h_f(0, t) = H_0 + A_t \sin \omega t \quad (5)$$

$$h_f(L, t) = H_1 \quad (6)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad T = 44,700 \text{ sec } (M_2 \text{ 分潮周期}) \quad (7)$$

また、固定時間長を図11に示すように変化させ、一潮汐周期内の固定時間の長短による影響についても検討を行う。本計算の計算条件を Table 2 に

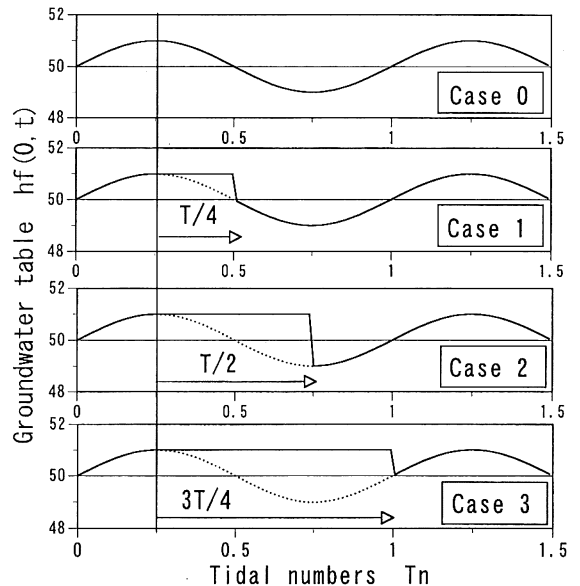


図11 各計算における海水面の固定時間

Fig.11 Fixed interval for each simulation

表2 本計算に用いたパラメーター値
Table 2 Parameter values used in the simulation

パラメータ	記号	値
平均海面位	H0	50.0(m)
陸側境界水位	H1	51.5(m)
帯水層長	L	2000.0 (m)
潮位振幅	At	1.0 (m)
透水係数	k	2.0×10^{-2} (cm/sec)
有効間隙率	λ	0.1

示す。

4.2 結果および考察

図12の縦軸に地下水位 h_f および淡塩境界面 h_s 、横軸に潮汐数 T_n を示す。破線が Case 0(海水面の変動を固定しない通常時)、実線が Case 2(海水面の水位変動を満潮位から $T/2$ 固定した場合) の計算結果を示す。Case 0において、 $X=25\text{m}$ および 50m における計算結果を見ると、地下水位および淡塩境界は同振幅、同位相で変動している。この結果は、岸ら (1984) が同様の基礎方程式を用いて導いた解析の結果と一致している。Case 2 では海水面を固定した結果、地下水位、淡塩境界とも若干の上昇が見られたもののほぼ一定値を示し、固定解放後に通常の変動軌道上に漸近する結果となった。地下水位および淡塩境界面に若干の上昇が見られた原因としては、海水面を満潮位に一定時間固定したことで、潮位変動による動的平衡状態から動水勾配 $1/4000$ の静的平衡状態に移行する過程で徐々に塩水くさびが侵入し、それに伴い淡塩境界が上昇し、それに地下水位が連動したものと考えられる。このことが、図7の (b) に示した B.P.12-14の観測結果で淡塩境界の特性深さ Z_i に上昇がみられた要因ではないかと推測される。

次に、一潮汐周期内における海水面の固定時間が潮位変動振幅比に与える影響、つまり、3章で述べた影響度について検討する。図13に地下水位 h_f 、淡塩境界面 h_s それぞれに対する影響度 $I(h_f, h_s)$ を縦軸に、海側境界からの距離 X を横軸にとった図を示す。Case 2,3では影響度は境界

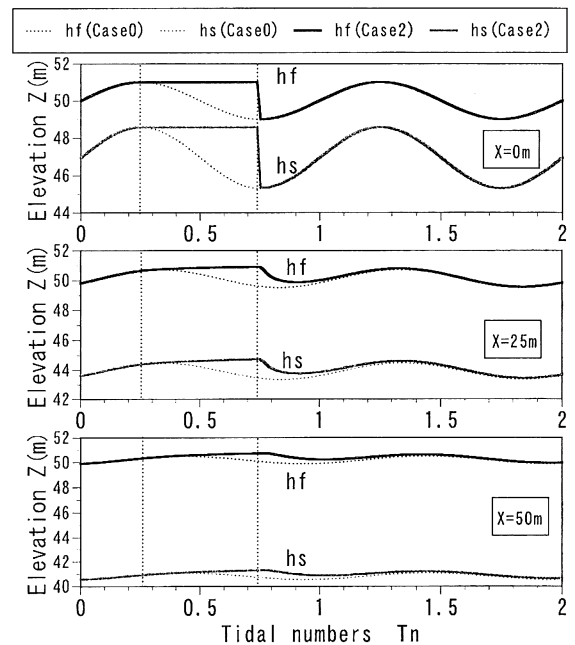


図12 地下水位および淡塩境界面の経時変化

Fig.12 Temporal variations of groundwater table and interface

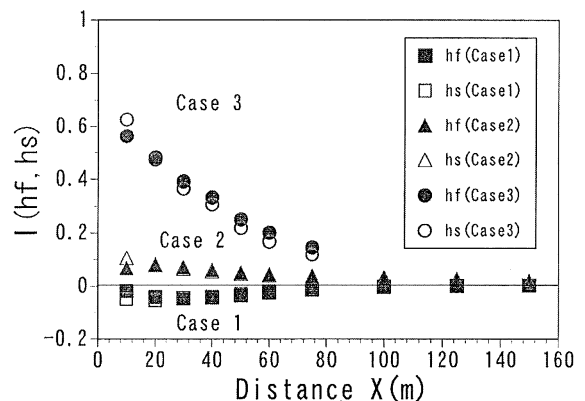


図13 地下水位および淡塩境界面への影響度

Fig.13 Degree of influence to groundwater table and interface

に近いほど大きく、その値は海側境界から遠ざかるとともに徐々に減衰しており、100m 付近以降では非常に小さな値となった。本計算の解析場のように水平基盤上の帯水層が均質・等方性であるならば、影響度は海側境界の近傍ほど大きい値を

示すことがわかった。図9に示した観測結果においても感潮河川近傍ほど影響度が大きな値を示す傾向がみられるものの、淡塩境界についてはばらつきがみられる。これは、調査地域の帯水層は不均一であり、変動境界である感潮河川に貯留される塩分濃度も一様ではないことによると考えられる。一方、固定時間が $T/4$ と短い Case 1 では、影響度が負の値を示しており、海水面の固定化により潮位変動振幅比が拡大される結果となった。この要因としては、上述した海水面の固定化に伴う地下水位および淡塩境界面上昇に加え、固定時間が短いと最低潮位を示す軌道を通る前に通常の変動軌道に漸近するため、通常より変動振幅が拡大されたためと考えられる。これは、観測結果で影響度に負の値がみられたことは要因が異なっており、本モデルでは観測結果でみられた河川水の固定化に伴う Z_i の上昇により変動振幅が通常時を上回る現象は再現できなかった。

最後に、地下水位および淡塩境界面それぞれに対し、海水面の変動を一定時間固定した影響がどの程度持続するのか検討した。そこで、下記の式(8)により影響持続時間 T_i を定義した。

$$T_i = T \left[\{ (h_f, h_s)_0 - (h_f, h_s)_1 \} \geq 0.05m \right] \quad (8)$$

ここで、 $(h_f, h_s)_0$ は海水面を固定しない通常時における h_f 、 h_s の水頭、 $(h_f, h_s)_1$ は海水面固定時における h_f 、 h_s の水頭である。つまり、地下水位 h_f および淡塩境界面 h_s の Case 0 (通常時) と Case 1～3 (海水面固定時) との差が $0.05m$ 以上の場合に影響があるとし、影響の出始めから終わるまでの時間を影響持続時間 T_i と定義した。この $0.05m$ という値は、潮位の変動振幅 $1m$ の 5% に相当する。これにより、実験による影響持続時間長に対する固定時間の長短による影響、およびその持続時間が海側境界からの距離にしたがってどのような変化するかについて考察する。

図14に、縦軸を影響持続時間 T_i と潮汐周期 T との比を、横軸に海側境界からの距離をとった図を示す。図を見ると、Case 1～Case 3 にかけて値が増大しており、固定時間長の増大にともない影響持続時間も増大していることがわかる。Case 3 に着目すると、地下水位は海側境界からある程度離れた $200m$ 地点で、また、淡塩境界面

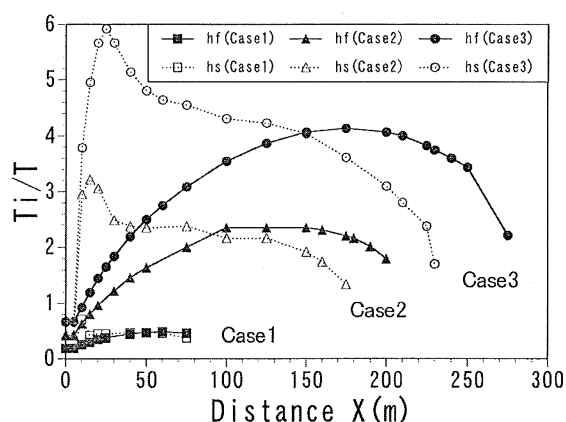


図14 海水面固定による影響持続時間

Fig.14 Continuance time under the influence of fixed sea level

は境界近傍の $20m \sim 50m$ 地点で影響持続時間が最長となっている。この傾向は Case 1 および Case 2 でも同様に見られる。影響持続時間の最大値に着目すると、Case 3 の固定時間 $3T/4$ における最長時間は地下水位で約 $4T$ 、淡塩境界面で約 $6T$ といずれも 3 日以内となっている。今回のフラッシュ実験により感潮河川水位が固定された時間を、全水門開門までの約 7 時間と考えたとしても、Case 2 と Case 3 の固定時間の間であることから、その影響はさほど長時間持続するものではないといえる。このことより、フラッシュ実験は年間 1～2 回程度の頻度で行われることから、地下水への塩水化を助長するものではないことがいえる。

5. まとめ

本研究では、河口に堆積した土砂の放出を目的に行われたフラッシュ実験が地下水の塩水化に及ぼす影響をモニタリングするとともに、本地域のような河川感潮域において、潮汐に伴う海岸帯水層への塩水侵入の時間変動特性に感潮河川の水位変動が及ぼす影響について検討を行った。

方法は、フラッシュ実験により感潮河川の水位が一定時間固定されることから、その間の地下水位および淡塩境界の挙動を観測し、通常時に行った観測結果と比較することで、それぞれに対する

感潮河川の水位変動の影響について検討した。また、数値計算により観測結果を検証するとともに、河川水位を固定する時間長と地下水への影響持続時間長との関係について検討し、フラッシュ実験の影響がどの程度持続するのか検討した。

以下に得られた知見を示す。

- 1) 河口水門を閉門することにより、感潮河川の水位変動が固定され、それに伴い地下水位の変動も通常時と比べ大きく抑制される結果となった。これにより、本地域の地下水位の時間変動特性は、潮汐に伴う海面変動よりも感潮河川の水位変動が支配的であることが示された。
- 2) 淡塩境界についても、ほとんどの地点で変動が抑制されたことから、海岸線より離れた潮位変動の影響を直接受けにくい領域においても、通常、感潮河川の影響を受けて淡塩境界が変動していることが認められた。また、河川近傍の地点で淡塩境界の混合領域の上端である Z_t が上昇、または他の地点では Z_m が下降するなど、場所より異なる特性を示した。これは、河川に滞留した塩分濃度が地点ごとに異なっていたことが要因であると推測される。
- 3) 潮位に対する変動振幅比の通常時と実験時との差を、河川の水位変動を固定したことによる影響度と定義したところ、BR2~3付近の河川水位と地下水位の影響度がほぼ等しかったことから、本地域の地下水位の変動は感潮河川の水位変動によるものが大きいことが認められた。
- 4) 水平基盤上の均質・等方性の不圧帯水層を解析場とした淡塩境界面モデルを用いた数値解析により、海側境界に与えた海水面の変動を一定時間固定した結果、地下水位および淡塩境界面はほぼ一定値を示すものの若干の上昇が見られた。これは、海水面を満潮位に一定時間固定したことで、潮位変動による動的平衡状態から静的平衡状態に移行する過程で徐々に塩水くさびが侵入し、それに伴い淡塩境界が上昇し、それに地下水位が連動したためと考えられる。このことが、観測結果 (B.P.12-14) で淡塩境界の特性深さ Z_t に上昇がみられた要因であると推測される。
- 5) 数値解析において、地下水位および淡塩境界に対する影響度は海側境界ほど大きな値を示

し、海側境界からの距離にしたがって減衰する傾向がみられた。このことから、観測結果で淡塩境界にばらつきがみられたのは、河川に滞留した塩分濃度が地点ごとに異なっていること、および調査地域の帯水層の不均一性によるものと推測される。

- 6) 数値解析による結果をもとに、本論文で定義した影響持続時間により、一潮汐周期内においては海水面変動の固定時間が長いものほど海水面の変動を固定した影響は持続し、地下水位では海側境界からある程度離れた地点で、淡塩境界面では境界近傍で最も長く影響が持続する結果となった。
- 7) しかし、いずれの影響持続時間も3日以内となっており、本手法によるフラッシュ実験は、年に1~2回の頻度であれば、地下水の塩水化を助長するものではないと言える。

以上の結果より、本地域のような河川感潮域においては、全体的な地下水への塩水侵入は海からのものと考えられるが、潮汐に伴う時間変動特性は海からの直接的なものよりも、感潮河川に遡上する塩水による影響が卓越していることが今回の実験により明らかとなった。

謝 辞

本研究は(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業によって実施しました。また、フラッシュ実験および調査を共同で行った高知県伊野土木事務所に感謝の意を表す。

参考文献

- 岸 洋介・井内国光 (1984) : 潮位変動に伴う地下水位および淡塩境界面の変動について。陸水学雑誌、45 (1)、61-68。
- 柿沼忠男・井内国光・井上温人 (1986) : 島しょ部における地下水汚染に関する研究 (I) — 興居島における地下水への海水侵入 —。陸水学雑誌、47 (1)、37-51。
- 小路順一・初井和郎・神野健二・国武昌人 (1999) : 沿岸帯水層における海水侵入と分散の数値計算。農業

- 土木学会論文集、204、159-166.
- 内山雄介 (2001): 砂浜海岸帯水層における潮位変動に伴う循環流の形成機構. 土木学会論文集、670/II-54、37-48.
- 大年邦雄・藤原 拓・石井将幸・唐 心強 (2001): 海岸帯水層における塩水侵入の時空間変動特性に関する研究. 農業土木学会論文集、215、99-109.
- 加納未知・唐 心強・藤原 拓・大年邦雄 (2002): 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. 水工学論文集、46、217-222.
- 椿東一郎 (1974): 「水理学Ⅱ」、森北出版、252-254.
- 高知県伊野土木事務所 (2000): 新川川広域河川改修水文調査委託業務 報告書 高知県吾川郡春野町甲殿～弘岡下、広域基幹第10-14号.
- Todd, D.K. (1980): Groundwater Hydrology, 2nd edition. Chapter 14, John Wiley & Sons, 494-520.
- J, Bear and V, Arnold (1998): Modeling Groundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publishing Company, 196-208.
- (受付: 2004年4月5日、受理: 2004年9月11日)