

地下水位低下の前浜地形変化におよぼす影響

柳嶋 慎一* ・ 加藤 一正**・ 片山 忠***
磯上 知良****・ 村上 裕幸****

1. はじめに

柳嶋ら(1990)は、荒天時のバーム侵食限界レベルは遡上した海水が前浜へ浸透した後に浜から浸出するレベルと一致することを明らかにした。このことは、荒天時に地下水位を下げることににより前浜の侵食を減少させることができる可能性を示唆している。

前浜の地下水位を強制的に下げることににより前浜への砂の堆積を促進させるサブサンドフィルター工法は、土屋・河田(1980)、河田・Larsen(1984)によって実験的に検討されている。現地での調査はウェルポイント工法を用いた Chappell ら(1979)の1例のみであり、しかも静穏時に1日間調査しただけである。

本研究は、現地海岸において荒天時にウェルポイント工法により強制的に地下水位を下げて、バーム侵食過程を調査したものであり、地下水位低下時のバーム侵食の実態の把握ならびに浜に遡上した海水の浜への浸透量の解析を通して、侵食対策としてのサブサンドフィルター工法の可能性を検討したものである。

2. 波崎海洋研究施設における現地調査

ウェルポイント工法を用いて地下水位を強制的に下げる現地調査は、茨城県の鹿島港と銚子のほぼ中間の砂浜海岸にある波崎海洋研究施設(図-1、以後 HORF と呼ぶ)で 1990 年 9 月から 11 月に実施した。

図-2 は、ウェルポイント地点・観測地点の位置と、本論文で使用する平面座標(座標値は m 単位に対応する)を示したものであり、図-3 は $X=0$ m の断面図である。ウェルポイントは地盤高 D.L. +2.4 m のバーム上に、汀線と平行に沿岸方向 1 m 間隔で 100 本、ストレーナーのレベルが D.L. -2 m になるように打設した。揚水ポンプは中央に 1 台設置し、ポンプ吐き出し口に設置した三角せきの水位を測定して揚水量を求めた。地下水位の平面分布を測定するために、簡易井戸(ライザーバ

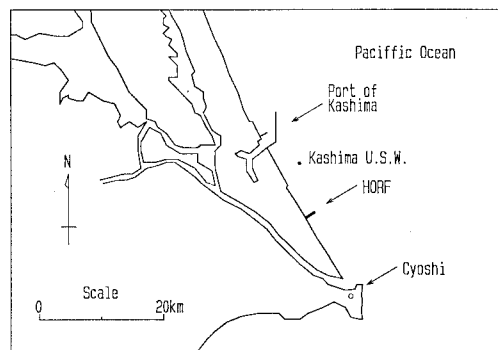


図-1 観測地点(波崎海洋研究施設)

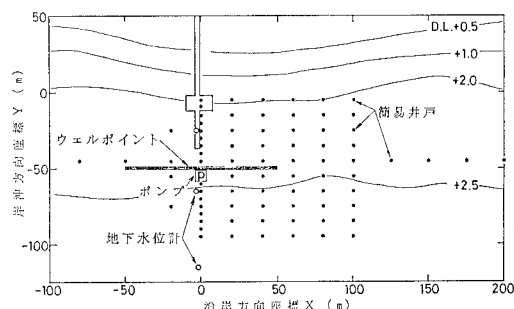


図-2 計測機の配置図

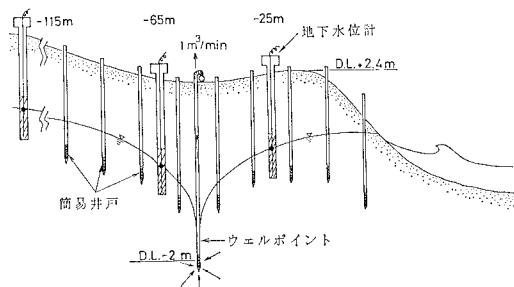


図-3 調査概略図

イプ、内径 38 mm、長さ 2.7~3.6 m を使用)を岸沖方向 10 m 間隔、沿岸方向 20 m 間隔で設置した。測定地点が $X \geq 0$ の範囲で高密度になっているのは、地下水位の分布が $X=0$ の軸を中心に左右対称になると考えられ

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室長
*** 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長
**** 元運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室

たためと、測定作業能率の向上を計ったためである。地下水位はパイプ上端から紐付きフロートを挿入することによって測定した。また、地下水位測定時には、前浜の平面地形 ($0 \leq X \leq 200$) もレベル・スタッフを用いて測定した。これらの測定を、荒天時の5日間に約3時間間隔で行った。要した時間は20~40分/回であった。なお、 $X=0$ m 測線上の3箇所(前浜; $Y=-25$ m, バーム中央; $Y=-65$ m, 後浜; $Y=-115$ m) の地下水位は、地下水位計により1時間毎に測定した。

汀線付近の波形の測定は、 $Y=80$ m 地点に取り付けた空中発射式超音波波高計を用いて、毎正時をはさむ約20分間に0.3 sのサンプリング間隔で行った。得られたデータを平均して水位を求め、入射波の波高 H_S と長周期波の波高 H_L ・周期 T_L はスペクトル解析を行い、その結果得られた周波数スペクトル $S(f)$ を用いて、それぞれ次式によって求めた。

$$H_S = a \cdot \left[\int_{f_c}^{\infty} S(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$H_L = a \cdot \left[\int_0^{f_c} S(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$T_L = \sqrt{m_0/m_2} : \text{ただし, } m_n = \int_0^{f_c} f^n S(f) df \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 f は周波数、 f_c は 0.033 Hz (=30 s) であり、係数 a の値は、4.0 とした。

観測時の沖波は、海底面レベル D.L. -23.4 m に設置した超音波式波高計(U.S.W., 図-1)によって、偶数正時をはさむ20分間測定されている。

降雨量は自記式雨量計によって HORF 屋上で測定した。

地下水位を強制低下させる調査は、1990年9月13日より開始し、高波浪の来襲を待った。そして、10月21日から25日の間に台風第9023号が通過した。このときの波浪は大きくて、海浜への長周期波の遡上が予想以上に高く、ポンプにトラブルが生じて揚水を停止せざるを得なかった。台風通過後にポンプを復旧して再び地下水位を下げた後、11月8~9日の海が静穏で小潮時の潮位変動が少ない(潮差29 cm)時間帯をねらって揚水を停止し、地下水位が上昇する様子を同様に観測した。

3. 荒天時の地下水位の変化と前浜地形変化

図-4 は、台風通過前後の沖波有義波高・周期の経時変化である。有義波高は21日から徐々に増大し、23日22時に極大波高5.6 mとなり、その後は少しずつ減衰した。有義周期は、21日の6秒から少しずつ長くなり、23日17時から24日8時頃まで13~14秒の状態が続き、その後は徐々に短くなった。図中の矢印は地下水位の平面分布および、海浜地形測量を実施した時刻を示している。

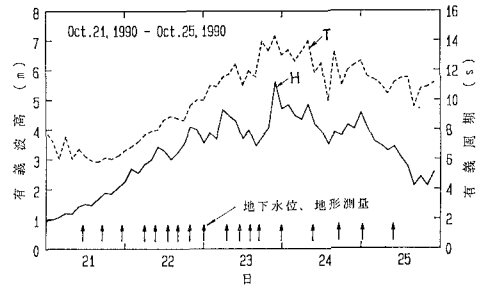


図-4 観測時の沖波の経時変化

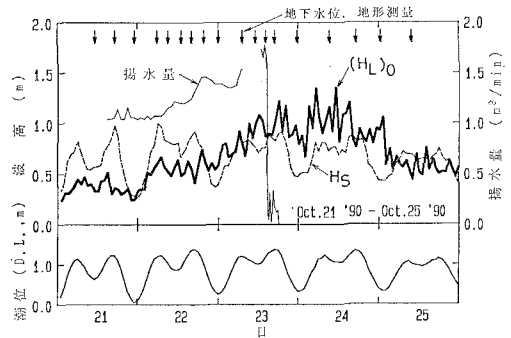


図-5 汀線付近の長周期波高、入射波高、揚水量、潮位の経時変化

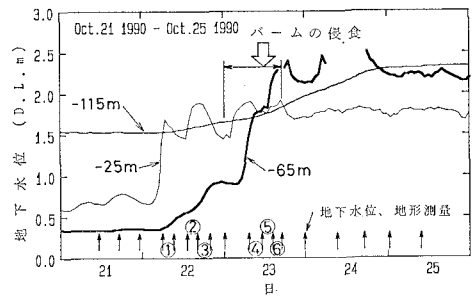


図-6 地下水位の経時変化

る。

図-5 は、式(1)、(2)で計算した入射波の波高(H_S)と長周期波の波高を汀線位置の波高に換算した(加藤ら、1989)波高(H_L)₀、HORF 先端の潮位、揚水量の経時変化である。揚水量が不連続になっているのは、揚水ポンプは作動していたにもかかわらず、記録計のトラブルが生じて測定できなかったためである。

図-5 によると、入射波の波高は、波高計設置地点の水深に規定されるため、沖波波高が大きくなっても、1 m 以上にはならない。一方、長周期波の波高は22日から大きくなり、23日後半から24日には1 m 以上になった。

ポンプ揚水量は最初にはほぼ 1.05 m³/min で一定であったが、22日7時以後徐々に増大し23日14時に最大(1.8

m^3/min) になった。しかし、23日14時30分頃、ポンプに現場での復旧不可能なトラブルが発生した。揚水量の漸増は、長周期波の波高の増大と対応している。これは浜へ遡上した海水が浸透して地下水位が上昇し、ポンプ効率が向上したためと考えられる。同様に、揚水量が22日夜半にわずかに減少傾向を示しているのは、潮位の低下に伴い地下水位も降下してポンプ効率が悪くなったためである。

図-6は、 $X=0\text{ m}$ の測線上で水位計によって測定した地下水位の経時変化である。21日の地下水位は、海に最も近い -25 m 地点で潮位に対応した変化が認められるものの、平均すれば他の2地点と同様にほとんど変化していない。なお、 -65 m 地点の水位が低いのはウェルポイント($Y=-50\text{ m}$)の効果である。ところが、22日3時頃から地下水位の上昇が始まり、特に -25 m 地点の

上昇は急激であり短時間に約 1 m 上昇して地表レベル近くまで達した。ほぼ1日後に、 -65 m 地点の水位が急激に約 1.5 m 上昇し、結果として3地点のうちでは最も高くなった。全体を通して、後浜の -115 m 地点の水位は、常に単調でゆっくりと約 0.8 m 上昇した。このように沖側から水位が上昇したことは、長周期波の遡上が高くなったことと対応しており、また、浜への海水の浸透量が揚水量より多かったことを示している。

なお、期間中の雨量は、合計 5 mm であったので、降雨による地下水位の上昇は無視できる。

さて、図-7は、揚水の効果が安定していた10月21日の地下水位の平面分布である($X<0\text{ m}$ の範囲は、左右対称を考慮して表示)。周囲からの流入のため、地下水面は中央部がくぼんだ三次元の形状をしている。したがって、沿岸方向に離れた2地点の海浜断面の変化を比較することによって、地下水位の低下が海浜変化に及ぼす効果を調べることが可能になる。ここでは、 $X=20\text{ m}$ と $X=100\text{ m}$ の測線の比較を行う。

図-8は、 $X=20\text{ m}$ の測線の断面変化である。断面は「く」の字型の形状で侵食が進行するものの、10月23日14時過ぎからなだらかになり、最後には一様勾配(0.022)になった。23日の14時頃には $X=65\text{ m}$ 地点の地下水位がすでに相当上昇しており(図-6参照)、さらにその後揚水ポンプが停止している。一方、図-9に示した地下水位のもともと高かった $X=100\text{ m}$ の測線の断面変化を

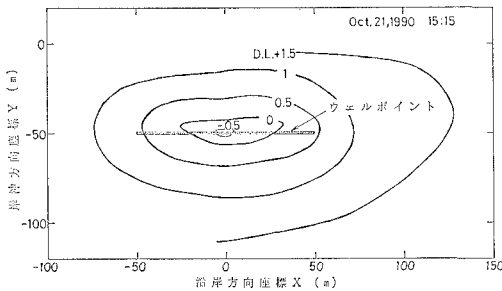


図-7 地下水位の平面分布

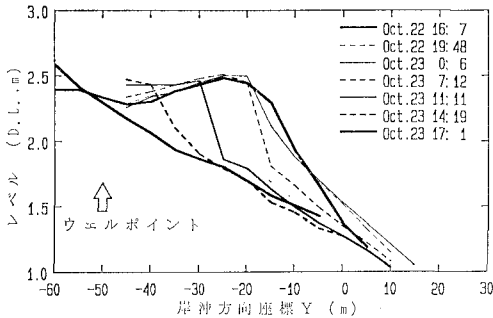


図-8 断面変化 ($X=20\text{ m}$)

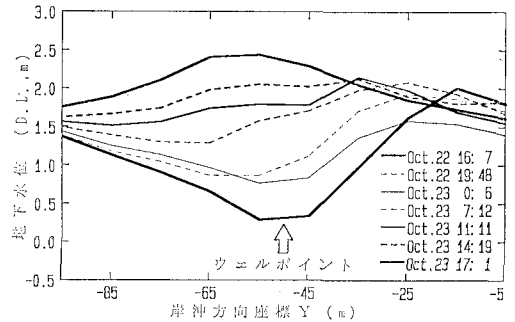


図-10 地下水位の変化 ($X=20\text{ m}$)

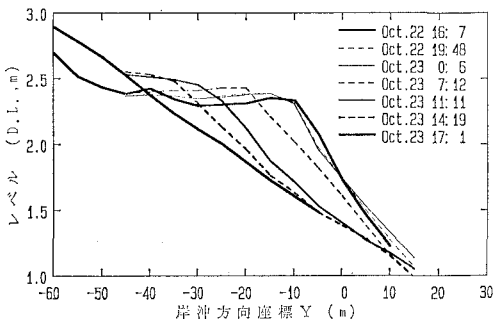


図-9 断面変化 ($X=100\text{ m}$)

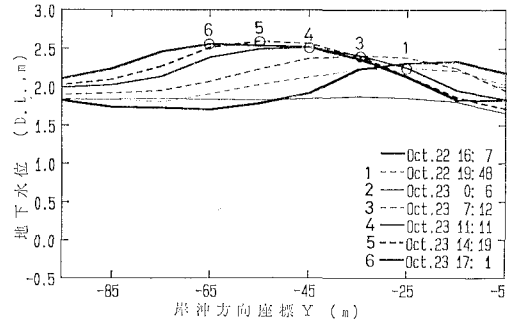


図-11 地下水位の変化 ($X=100\text{ m}$)

見ると、一様勾配を保ちつつ徐々に勾配がゆるやかになる侵食が生じていることが分かる。そして、最終勾配は0.026であり、 $X=20$ mの最終勾配とほぼ同じである。

これらの測線に沿った地下水位の変化を簡易井戸で観測したデータを基に調べることにする。図-10は、 $X=20$ mの地下水位の変化である。最初の地下水位は、ウェルポイントの所が最も低かったが、時間とともに徐々に上昇し、最後には $Y=-60$ m付近をピークとする凸状になった。地下水位のピーク位置は、ポンプが停止するまでは、 $Y=-25\sim-35$ mにあった。なお、23日の0時6分の地下水位が $Y>-55$ mの範囲で一時的に低下している時は、ちょうど干潮の時間帯であった。

図-11は、 $X=100$ mの測線の地下水面の変化である。地下水面は、干潮時を除いて、早い時間から凸状になっており、そのピーク地点(○印)は時間とともに陸側に移動している。

図-12は、両測線の代表時間について断面地形と地下水位を重ねて示したものである。 $X=20$ mでは、地下水位の浸出レベルが「く」の字型断面の屈曲点にほぼ一致しており、それより沖側の地下水位は飽和状態になっていて、岸側は不飽和状態である。一方、 $X=100$ mでは、地下水位のピーク地点より沖側で飽和状態になっており、ピーク位置の岸側への移動距離と侵食量が対応しているようである。このことを確認するために、図-13

に、地下水位のピーク位置(図-11参照)と断面地形上のD.L. +2.3 m, +2.0 mの位置(図-9参照)の関係をプロットしたものである。この図より、地下水位のピーク地点の後退と前浜の後退はおおむね平行になっていることが分かる。

つまり、 $X=20$ mの測線において、高いレベルの部分が侵食されにくく、「く」の字型で後退していたときは、ウェルポイントの効果によって地下水位が下がっていた。しかし、地下水位が上昇し、さらには揚水が停止した後には高いレベルの部分も侵食を受け、断面は一様勾配になった。

4. 長周期波の波高と浸透流量の関係

揚水ポンプのトラブルがあったものの、地下水位を下げることによって前浜の侵食を軽減出来ることが分かった。しかし、例えば、揚水ポンプが停止していなくても、浜への海水の浸透量がポンプの揚水能力以上であったため、時化の最後まで侵食を軽減することは出来なかったと考えられる。そこで、地下水位低下を維持するに必要なポンプ容量を求める資料を得るために、浜への浸透流量を数値シミュレーションで計算し外力との関係を調べることにする。

数値シミュレーションでは、Kinzelbach(1990)の反復交互方向陰解法モデルを用い、 $-100\text{ m} \leq X \leq 100\text{ m}$ 、 $-115\text{ m} \leq Y \leq -5\text{ m}$ の範囲について、沿岸方向10 m、岸沖方向5 mの格子間隔で三次元、非定常地下水位計算を行った。帯水層は地下水位面からD.L. -20 mまでの厚さとした。貯留係数は、水理公式集(1985)を参考に、0.3とした。

最初に、静穏時に揚水を止めて観測した地下水位の自然復旧を再現する計算を行って砂の透水係数を決めた。この計算では、揚水停止直前に測定した地下水面を初期条件とし、4辺の境界の水位を固定(境界に相当する地点の地下水位は、小潮でかつ静穏であったため観測期間中変化していなかった。)し、かつ自由境界とした。図-14は、 $(X, Y) = (0\text{ m}, -50\text{ m})$ 地点の計算値と観測値の比較である。透水係数を 2.28×10^{-4} m/sとした計算値と

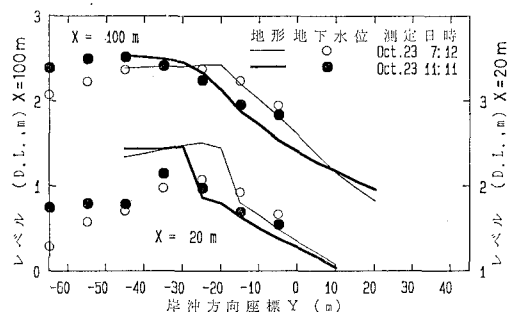


図-12 地形変化と地下水位の変化

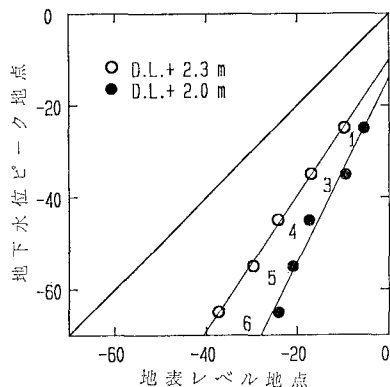


図-13 地下水位ピーク地点と地表レベル地点の関係

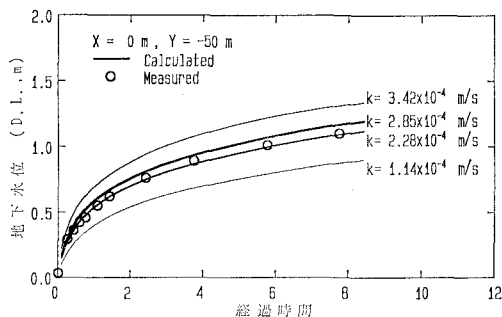


図-14 自然復旧地下水位の観測値と計算値の比較例

観測値がよく一致している。しかし、計算対象範囲全体の再現性を調べ、透水係数としてはむしろ 2.85×10^{-4} m/s が妥当であると判断した。なお、今回得られた透水係数は、柳嶋ら(1990)が用いた値の2.5倍となっている(ただし、透水係数を変えても、柳嶋らが得た結論には影響を及ぼさない)。

次に、図-6に①から⑥で示した期間の地下水位変化を再現する計算を行って、遡上した海水の浜への浸透流量を推定した。この計算では、各期間の最初の実測地下水位面を初期条件とし、4辺の境界条件は各期間の最初と最後に測定した地下水位を内そうして計算ステップ毎に変化させた。境界はすべて自由境界とした。浜への海水の透水を再現するために、浜から海水が浸出する位置(沖側)から加藤ら(1989)の方法で計算した波の遡上位置(岸側)までの範囲に上方から海水を入れた。そして、各期間の最後の実測地下水面に計算地下水面が一致する海水浸透流量を求め、以下のように外力と比較した。

バーム地形の侵食が生じた10月22日～23日には、汀線での長周期波の波高が増大している(図-5参照)。このようなときの長周期波の遡上高さは、加藤ら(1989)によって、汀線での水位を基準に、

$$R_L = 0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31 \text{ (m)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となることが示されている。したがって、遡上した時の浜上の海水量を三角形分布と仮定して計算し、長周期波の周期 T_L で割ると、平均遡上流量が次のように求める。

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{(H_L)_0}{2} \cdot \frac{0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31}{\tan \beta} \cdot \frac{1}{T_L} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\tan \beta$ は前浜勾配である。式(4)で計算される流量と推定した浸透流量を比較することにする。ただし、観測時には地下水位が上昇し、汀線での水位レベルよりも高い位置から浸出していた。この範囲の砂浜内は飽和状態になっており、遡上した海水は砂中に浸透しない。そこで、飽和状態の範囲に対応する遡上流量を式(4)か

ら差引いて比較することにした。なお、この計算では、 $(H_L)_0$ 、 T_L 、 $\tan \beta$ として各期間内の測定値の平均値を用いた。

図-15は、推定した浜への浸透量と海水の遡上量の関係をプロットしたものである。なお、図中○印内の数字は、図-6に①～⑥で示した計算期間に対応している。両者は多少ばらつきがあるものの海水の遡上流量と浜への浸透流量は比例する。つまり浜への浸透流量は長周期波の波高の自乗に比例する。

5. おわりに

得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 強制的に地下水位を下げるにより、バームの侵食量が減少した。
- (2) 浜への海水の浸透量は、汀線での長周期波の波高の2乗に比例する。

今回の調査においては、時化終了まで地下水位を下げた状態を保つことができなかった。今後、数値シミュレーションにより揚水量や、止水矢板等の最適平面配置の検討を行い、その結果をもとに現地調査を実施する予定である。

なお、鹿島港の波浪データの使用では、鹿島港工事事務所、当所海象調査研究室のご協力をいただいた。現地調査の計画、実施にあたっては、元横浜調査設計事務所調査課長守屋義一氏をはじめとする調査課の皆様のご協力を得た。現地観測においては、当所波浪研究室池田直太技官、元波浪研究室立石義博技官、井上浩司氏(復建調査設計KK)、土屋貴史氏(KKエコー)および漂砂研究室栗山善昭主任研究官、中村聡志技官の協力を得た。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良(1989): 荒天時のバーム地形の侵食、長周期波に注目した現地観測、海岸論文集、第36巻、pp. 354-358。
- 河田恵昭・L. H. Larsen (1984): 漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果、第31回海岸工学講演会論文集、pp. 267-271。
- 土屋義人・河田恵昭(1980): 浜漂砂に及ぼす吸水の影響について、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 270-274。
- 土木学会編(1985): 水理公式集、p. 375。
- 柳嶋慎一・加藤一正・村上裕幸(1990): バーム形成に関する現地調査、海岸論文集、第37巻、pp. 359-363。
- Chappell, J., I. G. Eliot, M. P. Bradshaw and E. Lonsdale (1979): Experimental control of beach face dynamics by watertable pumping, Eng. Geol., 14, pp. 29-41。
- Kinzelbach, W. (1990), 上田年比古監訳: パソコンによる地下水解析、森北出版、286 p。

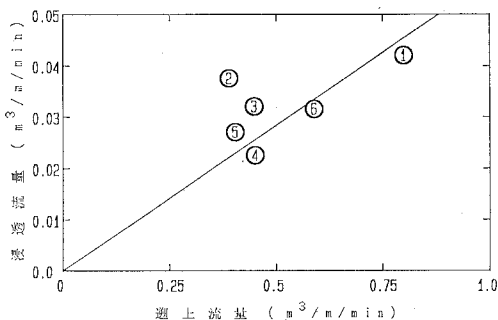


図-15 海水の遡上流量と浸透流量の関係