地球温暖化による海面上昇がゼロメートル地帯の地下水環境に 及ぼす影響に関する実験的研究*

増岡健太郎**・藤縄克之***・古川正修****・
長野宇規*****・渡辺紹裕*****

Experimental studies for identifying the impacts of sea-level rise caused by global warming on groundwater environment in areas below sea-level *

Kentaro MASUOKA **, Katsuyuki FUJINAWA ***, Masanao FURUKAWA ****,
Takanori NAGANO ***** and Tsugihiko WATANABE *****

Abstract

According to IPCC, global warming may bring about rise in mean sea-level by 9cm - 88cm at the end of 21st century. Because the Japanese archipelago is surrounded by sea and important socio-economic activities concentrate in areas below sea-level, it is prerequisite to predict influences of sea-level rise on groundwater systems in coastal aquifers. By conducting laboratory experiments, impacts of sea-level rise on coastal groundwater systems were investigated together with the effect of conservative measures. These experiments are specially characterized by the domain of glass-beads with inclined surface, which allows surfacial ponding of water and installation of an impermeable barrier in the domain to set back salt water intrusion. By these experiments, it is revealed that the sea-level rise causes acceleration of salt-water intrusion in coastal aquifers and inundation of low-lying areas, and that impermeable barriers are effective for preventing salt water intrusion but at the expense of inundation.

Key Words: Salt water intrusion, Surface seepage, Areas below sea-level, Sea-level rise, Inclined-surface experiments

* 2003年度日本地下水学会春季講演会において一部発表

** 大成建設(株)技術センター ()
Technology Center, Taisei Corporation

*** 信州大学工学部
Faculty of Engineering, Shinshu University

**** 国際航業(株)
Kokusai Kogyo Co., LTD.

***** 総合地球環境学研究所
Research Institute for Humanity and Nature

要 旨

IPCCによれば、地球温暖化により21世紀末には平均海面が9 cm ~88cm 上昇する。日本列島は海に囲まれ、重要な社会経済活動がゼロメートル地帯に集中しているため、海面上昇が海岸帯水層中の地下水システムに与える影響を解明する必要がある。本研究では、海面上昇が海岸地下水システムに与える影響および保全対策の効果を調べるため、室内実験を実施した。実験では特に表面湛水が可能なようにガラスビーズ充填域の表面を傾斜させるとともに、充填域内部に塩水浸入を抑止できるように不透水壁を設置した。これらの実験より、海面上昇が海岸帯水層への塩水浸入とゼロメートル地帯での地表面湛水を加速させること、不透水壁は塩水浸入防止に効果的である一方、地表湛水が発生することが明らかになった。

キーワード：塩水浸入、地表浸出、ゼロメートル地帯、海面上昇、傾斜面実験

1. はじめに

IPCC 第3次評価報告書(2001)によれば、1990年から2100年までの間に地球の平均地上気温は1.4~5.8℃ 増加し、それに伴う極地域の氷床の融解や海水の膨張により地球の平均海面水位は9 cm ~88cm 上昇すると予測されている。

海面の上昇は、標高の低い島嶼や沿岸低地帯の水没、氾濫の危険性の増大、海岸の侵食、河川での塩水遡上、生態系の絶滅、さらには地下水の塩水化や陸域への塩水浸出など自然環境にさまざまな影響をもたらす。また、海面上昇がもたらす影響は自然環境のみにとどまらず、防災システムや交通施設などのインフラ、社会経済システムなど広範囲におよぶ。

環境庁(1994)によれば、現在の我が国のゼロメートル地帯(満潮水位より低い地帯)の総面積は861km²、蓄積されている総資産は54兆円、居住人口は200万人であり、海水面が1 m 上昇すると、影響を受ける総面積は2,339km²、総資産は109兆円、人口は410万人に達すると推定されている。首都圏、近畿圏、中部圏など、我が国の経済基盤を支え、多くの国民が居住する沿岸域を高潮や津波などから守るためには、防潮堤のかさ上げなどを含めたインフラ整備が必要となる。

しかし我が国では、村下(1982)が地下水の塩水化に関する実態を報告している程度で、帯水層を経由して防潮堤下部から内陸部に浸出してくる浸出水や地下水の塩水化についてはほとんど知見が集積されていない。一方、海面上昇の脅威に曝

されているオランダでは、応用地球科学研究所(TNO)が中心となり「21世紀の水管理計画」の一環として地下水環境に関するデータベースの構築や数値解析手法を用いた予測を開始している(TNO, 2003)。また、Essink and Schaars (2002)は、密度依存地下水流解析コードMOCDENS3Dを用いて、地球温暖化が海面下に位置するオランダ・ラインランド地域の地下水システムに与える影響を予測したりしている。

未知な現象の解明や数値解析モデルの妥当性の検証に砂箱などを用いた実験が有効であるが、本研究では、海面上昇がゼロメートル地帯における海岸帯水層中の地下水システムに及ぼす影響を俯瞰的に理解し、数値解析手法開発時のベンチマークとして利用するために、水槽にガラスビーズを充填して一連の塩水浸入実験を実施した。特に、実験で解明したい要点は、次の2点である。

①細川ら(1989)は、被圧帯水層を想定した実験装置を用いて塩水浸入実験を実施している。しかし、ゼロメートル地帯を想定して充填試料上面を傾斜させ、地表湛水が発生するような設定で行った塩水浸入実験は著者の知る限り皆無である。そこで本研究では、充填試料上面を開放した水平面実験と傾斜面実験を実施し、塩水浸入および湛水地表水と浸透流との交流を明らかにする。

②宮古島では地下ダムが建設されて水資源の確保や海岸地域における塩水浸入阻止に役立てられている。このような基盤の浅い島嶼などでは、基盤で完全止水する地下ダム方式が機能するが、地下ダム方式は基盤が深い場合などには技術面や費

用面で必ずしも有効とは限らない。このような完全止水方式に代わる方法として、基盤まで止水しない不完全貫入壁の効果を検討する。

2. 塩水浸入に用いた実験装置

2.1 実験水槽

図1に塩水浸入実験に用いた装置の概要を示す。水平面実験用装置は、水槽内部にガラスビーズを充填し、試料上面を水平にしたものである。また、傾斜面実験用装置は、ゼロメートル地帯における海面上昇が地表への地下水の浸出と湛水排除の影響を調べるために試料上面を傾斜させたものである。

図2は実験水槽本体の詳細図で、装置本体の正面と背面には厚さ10mmの透明アクリル板を使用した。試料充填部の高さは400mm、幅は700mm、奥行きは20mmで、左側に淡水槽(図1の⑨)、右側に塩水槽(図1の⑩)を設け、試料充填槽と塩水および淡水槽との境には金網を貼り付けたアルミパンチ板(図1の⑪)を設置した。なお、傾斜面実験では、ゼロメートル地帯の塩水浸入現象とその対策を検討するため、ゼロメートル地帯における防潮堤を想定して塩水槽側のアルミパンチ板上部150mmにビニールテープとアルミテープを

巻いて不透水構造とした(図1の⑥)。なお、水漏れを防止するため、ジョイント部には溝を設け、ナイロン製のチューブを挟み、さらにグリースを塗布した。

水槽の前面パネルと後面パネルには上端より下端方向に長さ350mm、幅1.5mm、奥行き3.0mmのスリットを設け、不完全貫入止水壁による塩水浸入阻止効果を調べる実験においては、防水用にグリースを塗布したのちアルミ製板(図1の②)を挿入した。なお、貫入壁深度を変化させて多段階で実験を行うため、貫入壁設置部は可動式とした。

淡水槽の水位が正確に制御できるようにマリオット(図1の③)を通して充填槽内部に淡水を補給するが、淡水の流出により塩水槽の塩分が低下しないように、塩水槽余水吐(排水口)より高い位置に設置した大型の塩水補給タンクから塩水槽下部にとりつけた給水口に塩水が十分に補給できるようにした。したがって、塩水槽の塩水は排水口を水面とする静水圧分布をとらないため、以下では塩水槽の条件を排水口の位置で表すことにする。なお、塩水槽の水位を段階的に変えるため、塩水槽下部より300mm、350mm、380mmの位置を中心に排水口を設置した。

なお、資料充填槽の前面には、外径2.1mm、内径1.5mmのステンレス管を、試料充填槽左端より25mmおよび350mmの位置に、試料充填槽下端より25mmの位置を始点として鉛直方向に50mm間隔で8個ずつ設け、淡水の流線を観察するためのトレーサ注入孔とした。また、傾斜面実験では、トレーサ孔と同様のステンレス管を、水

①試料充填槽 ②不完全貫入壁 ③淡水マリオット ④塩水タンク
⑤トレーサ注入孔 ⑥遮水壁 ⑦湛水排水孔 ⑧余水吐
⑨淡水槽 ⑩塩水槽 ⑪アルミパンチ板

図1 実験装置概略図

Fig. 1 Plan of experimental device

図2 実験水槽図

Fig. 2 Plan of experimental aquarium

槽裏面の試料充填槽下端より330mm上方に試料充填部右端より130mmの範囲で4個設け、斜面上部の湛水を排水した。

2.2 試料

実験には、平均粒径0.6mmのガラスビーズを用いた。なお、新しく購入したガラスビーズは強い疎水性を示したため、実験に先立ち、洗剤で十分に洗浄した。

用いたガラスビーズの物性値を表1に示す。なお、間隙率は別途作成した直方体容器を用い、本実験と同様に落下法で試料を充填して測定した値、透水係数も本実験と同様に落下法を用いて鉛直カラムに試料を充填し、定水位法により測定した値である。一方、縦分散長は、透水係数を測定したガラスビーズ充填カラムに塩水トレーサを流し、得られた破過曲線を用いて求めた値、横分散長は本実験で観測されたトレーサ雲の縦横比より求めた値である。

2.3 実験水

淡水には密度 0.999g/cm^3 の水道水を使用し、塩水には水道水に食塩を溶解させたものを用いた。なお、水平面実験では、予備実験において塩水の密度を通常の海水の密度と同程度としたところ、塩水浸入の規模が小さく、塩水浸入の変化がとらえにくかったため、塩水密度を 1.058g/cm^3 に調整した。しかし、傾斜面実験では、塩水密度を通常の海水密度と同程度とした場合でも、塩水浸入の変化を十分にとらえることができたため、塩水密度は 1.030g/cm^3 に調整した。また、塩水浸入状況を可視的に計測するため、試料への吸着が無く、低濃度でも識別が可能なウラニン（別称フルオレッセンソーダ、 $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$ ）を用いて塩水を着

色した。

一方、淡水の流動状況を調べるため、後述の各実験で定常状態に達した後、充填槽パネル前面のトレーサ注入孔よりウラニンを溶解させた淡水を注入し、流線を測定した。

3. 実験方法

実験装置本体への試料充填に際しては、いずれの実験も落下法により試料が均一になるように細心の注意を払った。なお、水平面実験では試料上面を水平に、また傾斜面実験では試料上面が淡水槽境界位置で水槽下部より400mm、塩水槽境界位置で水槽下部より300mm（試料上面の勾配は1/7）となるように、傾斜をつけて試料を充填した。また、試料充填後のアクリル板の変形を防止するため、万力を用いてアクリル板上面中央部を固定した。

各実験の準備段階では、試料充填槽内に気泡が残らないよう、淡水でゆっくりと試料を飽和させていき、ついで塩水槽下部より塩水を少量ずつ注入して塩水槽内の淡水を塩水と置換させた。

水平面実験では計6種類の、また傾斜面実験では計7種類の実験を実施した。実施した各実験の条件を表2に示す。まず、水平面実験では、最初に不完全貫入壁のない状態で、塩水水位を低い状態から高い状態へと段階的に変化させ、定常状態に達した後、各塩水水位での塩水浸入状況を調べる実験（A、B、C）を実施した。ついで、塩水槽排水口が最も高い状態（水槽下部より380mm）で、不完全貫入壁の深度を350mmから300mm、250mmへと段階的に引き上げ、各塩水水位で定常状態到達後の塩水浸入状況を調べる実験（D、E、F）を実施した。

一方、傾斜面実験では、最初は不完全貫入壁を設置せず、塩水槽排水口が300mmと最も低い状態（ケースG）で実験を行い、定常状態になった後にトレーサを注入して流線の観測を行った。ケースGの実験終了後、塩水槽排水口を350mmの位置に移し、やはり定常状態になった後にトレーサで流線の観測を行った（ケースH）。ケースHの実験終了後、今度は止水壁内側の湛水排水孔を開け、傾斜面下部の湛水を部分的に排水し

表1 試料の物性値
Table 1 Characteristics of glass beads

間隙率 (-)	0.378
透水係数 (mm/s)	3.35
縦分散長 (mm)	1.097
横分散長 (mm)	0.022

て、定常状態になった後にトレーサで流線の観測を行った（ケースI）。さらに、ケースIの実験終了後、塩水槽排水口を380mmの位置に移し、定常状態になった後にトレーサで流線の観測を行った（ケースJ）。

そして最後に、不完全貫入壁を設置した一連の実験を行った。まず、350mm位置の塩水槽排水口を開口し、さらに湛水域排水孔を開いた状態で、実験（ケースK）を行い、実験終了後、貫入壁深度を段階的に変化させて、ケースLおよびケースMの実験を行った。

また、電気伝導度計などを用いて塩淡遷移領域を正確に測定することは困難なことから、本実験ではデジタル写真をもとに塩淡境界部を判別することとし、水平面実験、傾斜面実験ともにデジタルカメラを用いて塩水侵入の経時変化を記録した。具体的には、塩水侵入が定常状態に達した後、計16のトレーサ孔からウラニンを注入し、適当な時間間隔でアクリルパネル上のトレーサ雲の先端部に当たる部位にマーカを貼りつけていき、最後にデジタルカメラで水槽全体を撮影し、パソ

コンに各画像をとりこんでマーカの位置を特定し、流線を描いた。

4. 実験結果と考察

4.1 水平面実験

1) 不完全貫入壁が無い場合

図3(a)、(b)、(c)に、それぞれケースA、B、Cに対する実験結果を示す。なお、図中の●は不定時間におけるトレーサの移動状況をマーキングしたもので、実線はマーキング点を内挿して求めた流線で、破線は目視による塩淡境界である。ケースAのように低位置の排水口を開口した場合には、塩水侵入は発生しなかった。ただし、このケースでも塩水槽下部で淡水の流れは塩水にブロックされるため、塩水槽に沿って上昇する淡水の流れが発生している。排水口を50mm上げたケースBでは塩淡界面は試料充填域下部で約80mm程度充填槽内に浸入し、排水口をさらに上げて380mmとしたケースCでは塩淡界面は試料充填域下部で約330mmも充填槽内に浸入してい

表2 実験種類と条件

Table 2 Conditions of experiments

	Case	淡水水位 (mm)	塩水排水口 (mm)	不完全貫入 壁深度 (mm)	排水 操作	塩水密度 (g/cm ³)
水平面実験	A	400	300	—	無し	1.058
	B	400	350	—	無し	1.058
	C	400	380	—	無し	1.058
	D	400	380	350	無し	1.058
	E	400	380	300	無し	1.058
	F	400	380	250	無し	1.058
傾斜面実験	G	380	300	—	無し	1.030
	H	380	350	—	無し	1.030
	I	380	350	—	有り	1.030
	J	380	380	—	有り	1.030
	K	380	350	350	有り	1.030
	L	380	350	300	有り	1.030
	M	380	350	250	有り	1.030

る。このように、塩水槽におけるわずかな塩水水位の上昇により、塩水くさびは大きく拡大することが分かる。なお、ケースBとCで塩水浸入領域の面積を比較すると、CではBの10倍以上にもなっている。また、図3より塩水楔が大きくなるにつれて、上昇流も卓越してくることが分かる。

2) 不完全貫入壁が有る場合

境界条件がケースCと同一で、不完全貫入壁を

設置したケースD、E、Fの実験結果をそれぞれ図4(a)、(b)、(c)に示す。なお、塩水排水位置(380mm)から水槽下部までの距離を基準とする不完全貫入壁の貫入深度は、ケースDで87%、ケースEで74%、ケースFで61%である。

図3(c)と比較することにより、貫入壁が塩水浸入阻止効果を有し、貫入壁深度が大きくなるほどその効果が大きくなることがわかる。なお、淡

(a) ケース A 実験結果図

【塩水排水口 300mm, 貫入壁無し】

(b) ケース B 実験結果図

【塩水排水口 350mm, 貫入壁無し】

(c) ケース C 実験結果図

【塩水排水口 380mm, 貫入壁無し】

図3 水平面実験結果【ケースA～C】

Fig. 3 Results of experiments with flat surface
[Case A ~ C]

(a) ケース D 実験結果図

【塩水排水口 380mm, 貫入壁深度 87%】

(b) ケース E 実験結果図

【塩水排水口 380mm, 貫入壁深度 74%】

(c) ケース F 実験結果図

【塩水排水口 380mm, 貫入壁深度 61%】

図4 水平面実験結果【ケースD～F】

Fig. 4 Results of experiments with flat surface
[Case D ~ F]

水の流れは貫入壁左側でいったん降下して貫入壁を回り込んだ後、反転して上昇流となっている。

試料充填部と塩水槽の境界から塩水楔先端までの長さを塩水浸入長とし、不完全貫入壁の貫入深度と最大塩水浸入長との関係を示したものが図5である。不完全貫入壁の貫入深度が大きくなるほど、塩水浸入長は小さくなる。一方、図6は貫入率と塩水浸入領域の大きさを比較したものである。塩水浸入領域では不完全貫入壁の貫入深度が

図5 不完全貫入壁の深度と最大塩水浸入長の関係
Fig. 5 Relationship between length of imperfect barrier wall and maximum length of salt-water intrusion

図6 不完全貫入壁の深度と塩水浸入領域の関係
Fig. 6 Relationship between length of imperfect barrier wall and area of salt-water intrusion

大きすぎると淡水による塩水のフラッシュ効果が小さくなり、塩水浸入領域は逆に増加してしまうことがわかる。

4.2 傾斜面実験

1) 不完全貫入壁および湛水排水が無い場合

図7 (a) および (b) に、それぞれケース G、Hの実験結果を示す。塩水排水口が300mmと低い位置にあるケース Gでは、ケース Aと同様に試料充填域下部には塩水楔は発生しなかった。しかし、試料充填部と塩水槽の境界上部に設けた遮水壁の内側には水槽下部より320mmの位置まで地表水が湛水した。淡水の流線をみると、試料上部では淡水は傾斜面に浸出し（最上部の2本の流線を参照）、上から3本目の流線は淡水面に向かって一旦上昇するものの、淡水域下部で反転降下して塩水槽へ流出している。

(a) ケース G 実験結果図

【塩水排水口 300mm, 排水無し, 貫入壁無し】

(b) ケース H 実験結果図

【塩水排水口 350mm, 排水無し, 貫入壁無し】

図7 傾斜面実験結果【ケース G、H】

Fig. 7 Results of experiments with inclined surface [Case G, H]

ケースGで定常状態に到達した後に、塩水排水孔の位置を300mmから350mmに変化させたケースHでは、試料上面の底部は塩水槽排水位置より下部に位置することになる。その結果、約130mm程度の塩水浸入が発生し、遮水壁内側には水槽下部より362mmの位置まで地表湛水が発生した。一方、淡水の流線をみると、試料左上部に大規模な上昇流が発生して試料表面に浸出しており、いったん斜面上に湛水した淡水も再び充填槽内へ浸入する流れが発生している。また試料右下部では塩水楔による上昇流もみられ、試料中間部ではケースGと同様に蛇行した流れが見られる。

2) 不完全貫入壁が無く湛水排水が有る場合

図8(a)および(b)に、それぞれケースI、Jの実験結果を示す。ケースIは、ケースHの斜面上の湛水を遮水壁内側に設けた排水孔より排水し

(a) ケースI実験結果図

【塩水排水口 350mm, 排水有り, 貫入壁無し】

(b) ケースJ実験結果図

【塩水排水口 380mm, 排水有り, 貫入壁無し】

図8 傾斜面実験結果【ケースI、J】

Fig. 8 Results of experiments with inclined surface [Case I, J]

た場合である。塩水は試料内部に深く浸入するとともに、試料表面にも浸出している。すなわち、湛水の一部を排水孔より排水したことにより、遮水壁内側のポテンシャルが低下し、さらなる塩水浸入を誘発して浸入域が拡大したことがわかる。また、マリOTTから供給される淡水は塩水槽へは流出せず、全て湛水排水孔から排水されている。ちなみに、遮水壁内側の排水孔からの排水量は $1.096\text{cm}^3/\text{sec}$ であった。また、塩淡界面にそってケースHより顕著な淡水の上昇流が発生していることがわかる。

図8(b)は、塩水槽の排水口を380mmに上げたケースJの実験結果である。なお、本ケースでは、トレーサによる流線観察を行っていないため、塩淡境界線のみ示してある。塩水は充填槽底部でケースIより約100mm深く試料内部に浸入しており、遮水壁内側の湛水排水孔での排水量はケースIより大幅に増加して $1.969\text{cm}^3/\text{sec}$ であった。本ケースは、塩水面の上昇が塩水浸入を誘発して浸入領域を拡大させ、試料表面への浸出量も著しく増大することを示している。マリOTTから供給される淡水はケースIと同様に塩水槽へは流出せず、全て湛水排水孔から排水されている。なお、淡水水位も塩水面の位置もいずれも380mmであり、高さ330mmの位置で湛水排水が行われなければ浸透流は塩水側から淡水側へ向かうが、湛水排水を行ったことにより、淡水も塩水もすべて試料上部の斜面から流出していることに注意したい。

3) 不完全貫入壁および湛水排水がある場合

最後に、斜面湛水を排水した結果塩水浸入領域が非常に大きくなったケースIの境界条件で、不完全貫入壁を設けた実験であるケースK、L、Mの実験結果を図9(a)、(b)、(c)にそれぞれ示す。なお、ケースIは、ケースHの斜面上の湛水を遮水壁内側に設けた排水孔より排水した場合で、塩水排水位置(350mm)から水槽下部までの距離を基準とする不完全貫入壁の貫入深度は、ケースKで86%、ケースLで72%、ケースMで58%である。

ケースK、L、MでもケースD、E、Fと同様に不完全貫入壁の設置により塩水浸入領域は大幅に縮小している。しかし、遮水壁内側の斜面では湛

水排水孔位置まで湛水するだけでなく、不完全貫入壁の上流側斜面にも淡水が貯留する結果となった。ちなみに、不完全貫入壁上流部の貯留淡水水位は、ケース K で 372mm、ケース L で 370mm、ケース M で 368mm であり、不完全貫入壁の設置深度が深いほど貯留淡水水位は大きくなること

分かった。

なお、今回は不完全貫入壁を地上部まで延長させたため貫入壁上流部に湛水が発生したが、今後は貫入壁上部が地下にある場合の塩水浸入阻止効果や湛水状況も検討する必要がある。

5. おわりに

地球温暖化に伴う海面上昇が、ゼロメートル地帯の地下水環境に与える影響を調べるため、平均粒径 0.6mm のガラスビーズを充填した水槽を用いて塩水浸入実験を実施した。実験においては、試料上面を平坦にした場合と傾斜させた場合、塩水浸入阻止のための異なる貫入深度を持つ止水壁を用いた場合と用いない場合、および傾斜面実験では遮水壁の内側に湛水排水孔を設けた場合と設けない場合のケース分けを行った。本実験的研究により得られた知見を以下に要約する。

1) 水平面実験より、塩水面の上昇は塩水浸入領域を拡大させるが、不完全貫入壁により塩水浸入を緩和させることができる。

2) 傾斜面実験より、塩水面が上昇するとゼロメートル地帯では地表湛水量が増大する。

3) 傾斜面実験で、地表湛水を排水すると、塩水浸入が誘発されて塩水浸入領域が拡大する。

4) 傾斜面実験で、不完全貫入壁を設置し、地表湛水を排水すると、塩水の浸入は軽減できるが貫入壁の内側にも地表湛水が発生する。

本報では、矩形の水槽を用いた均質な多孔体に対して行った塩水浸入実験の結果をとりまとめたものであるが、複雑な地層構造をもつ首都圏などの被害想定地域に対して海面上昇が塩水浸入現象と関連する環境問題にもたらすと考えられる影響は基本的には同質である。ただ、このような現実の問題を詳細に分析し海面上昇の影響を予測するには、精度の高い充分な現地データと精密な数値解析モデルが必要となる。現在、本研究で実施した実験結果をベンチマークに、塩水浸入解析のための密度依存地下水流の数値解析手法を開発しているところであり、今後は地中海に面したトルコのチュクロバ平野に開発中の数値解析モデルを適用する予定である。

(a) ケース K 実験結果図

【塩水排水口 350mm, 排水有り, 貫入壁深度 86%】

(b) ケース L 実験結果図

【塩水排水口 350mm, 排水有り, 貫入壁深度 72%】

(c) ケース M 実験結果図

【塩水排水口 350mm, 排水有り, 貫入壁深度 58%】

図9 傾斜面実験結果【ケース K ~ M】

Fig. 9 Results of experiments with inclined surface [Case K ~ M]

謝 辞

本研究は、大学共同利用機関法人人間文化研究機構総合地球環境学研究所の研究プロジェクト「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」の一環として実施したものである。また、実験の実施に当たっては信州大学の豊田富晴技官より有益な助言をいただいた。ここに、記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

環境庁地球環境部監修 (1994): 地球環境の行方. 中央法規, 81~95.
村下敏夫 (1982): 本邦における地下水の塩水化. 地質調査書月報, 33, 479~530.

細川土佐男・舩井和朗・神野健二・上田年比古・伊藤敏朗 (1989): 被圧帯水層における塩水混合域の分散特性に関する実験及び数値解析による検討. 第33回水理講演会論文集, 193~198.

IPCC (2001): Technical Summary, Climate change 2001; Impacts, adaptation, and Vulnerability.

TNO (2003): Salinisation of the Dutch groundwater flow system-Modeling density-dependent groundwaterflow in coastal areas. Spetial Information, 1-6.

Essink, G.O. and F. Schaars (2002): Impact of climate change on the groundwater system of the water board of Rijnland, The Netherlands. Proceedings of the 17th Salt water intrusion meeting, Delft, the Netherlands.

(受付: 2004年5月21日、受理: 2004年12月4日)