

7. 北海道沿岸域における淡水性地下水の 海底湧出に関する一考察

田原 康博^{1*}・森 康二¹・吉田 堯史¹・山田 正²・登坂 博行³

¹㈱地圏環境テクノロジー（〒101-0063東京都千代田区神田淡路町2-1）

²中央大学大学院理工学研究科（〒112-8551東京都文京区春日1-13-27）

³東京大学工学系研究科システム創成学専攻（〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1）

* E-mail: tawara@getc.co.jp

北海道を対象とした統合型流域モデリングに基づく数値シミュレーションの結果から、沿岸域における地下水流動パターンを可視化し、陸域から海域への淡水性地下水の湧出および海域から陸域への塩水侵入の状況について、沿岸域の地形・地質的特徴との関係を検討した。さらに、奥尻島沿岸域を例とし、防潮堤等の海岸構造物が陸域・海域間の地下水流動へ与える影響に着目した数値実験を行った結果、陸域にかん養した淡水性地下水の海底湧出量に対して、防潮堤の整備はほとんど影響を与えないことが示唆された。

Key Words : coastal area, groundwater, sea water intrusion, density flow, Okushiri island, Hokkaido

1. はじめに

沿岸域地下水に関する研究は古く、塩水化や淡水性地下水の海底湧出、地盤沈下、河道内の塩水遡上、温暖化による海面上昇、超長期の海水準変動の淡水・塩水混合領域への影響予測、海岸構造物による流動阻害の影響など多岐にわたる。これらは、いずれも平野部に暮らす人々にとって、生活基盤ともなる健全な水循環の維持・保全と密接に関係するものである。海底を含めた沿岸域の地下水流動は、陸側からの淡水と海側からの塩水の密度差に起因した相互干渉によって特徴付けられ、地域の地形的、地質的特性が反映されたものとなる。沿岸域地下水の挙動を知ることは、例えば、地域固有の水循環の特徴を捉え、利用可能な淡水資源量を把握する等のニーズに対して極めて重要である。このことは、周囲を海に囲まれた我が国のみならず、モンスーンアジア沿岸域諸国における持続可能な水資源開発・管理の面でも重要である。

著者らは、これまで日本列島をカバーする水循環モデル（国土水循環モデルと呼ぶ）の開発に取り組んできている¹⁾。本モデルは、地上・地下連成系をベースとした統合型流域モデリング²⁾により、水、空気、熱、塩分の同時輸送挙動を解析するものであり、沿岸域の地下水流動を理解するための1つの示唆を得ることができるもの

である。

本研究では、このうちの北海道地域の解析結果を用いて、沿岸域における地下水流動の可視化とその特徴に対して考察を与えると共に、奥尻島沿岸域を対象とし、防潮堤等の海岸構造物が淡水性地下水の海底湧出に与える影響について数値実験を行った結果を示す。

2. 手法

北海道沿岸域における地下水流動状況の把握には、国土水循環モデルのシミュレーション結果¹⁾を用いた。本モデルは、日本列島の主要な陸域と近海域をカバーする約 77 万 km²にわたる領域を水平解像度 500m、垂直分解能は深度に応じて変化させた 1m~500m で格子分割した 3 次元水循環モデルである。計算格子には、我が国の気象条件、地形標高、土地利用・被覆、地下地質等に関する最新データが組み込まれている。地下地層の 3 次元構造は、20 万分の 1 地質図をベースに岩石毎の水理的性状に着目して再区分し、さらに深度毎に風化弛みの程度を仮定して水理物性分布が与えられている。また、第四系が厚く堆積する主要な平野域は、文献に基づき帯水層構造が組み込まれている。本研究では、水、空気、熱、塩分の同時輸送過程を考慮した平衡状態の解析結果を用いて検討を行った。

3. 北海道沿岸域の地下水流動状況の推定

上述の国土水循環モデルによる解析結果から、北海道全域における湧出域分布図（地表面を上向きに通過する地下水フラックスが計算された地域）を作成した（図-1）．これを見ると、山地の沢筋や河道周辺、低平地で湧出域となることが示されている．また、一部の海域でも湧出域が確認でき、比較的広い範囲において陸域から海底への淡水性地下水の湧出が示唆される．石狩川、天塩川等の一級河川河口域や陸側に標高の高い山地が存在しない沿岸域では海底へ淡水性地下水が湧出する傾向は弱くなっている．

図-1に示した北海道の5地域(①-①'~⑤-⑤'断面)について、地下水流動と塩分濃度の鉛直断面分布を示した(図-2)。このうち①-①'、②-②'及び⑤-⑤'の各断面では、海岸から5km~10km程度沖合まで塩分濃度の低い範囲が発達し、陸域にかん養した淡水性地下水が遠方の海底まで湧出する地域であることが示唆される。日高山脈を横切る②-②'断面は、標高の高い山地が海岸付近に接近するため、陸域の水理ポテンシャルが高く、海域への淡水フラックスが顕著になったものと解釈される。一方、③-③'や④-④'断面は塩水が陸域の深部に侵入する地域

であることを示唆している。これらの地域は、いずれも沿岸陸域に高い山地が存在せず、塩水の押込みが反対に顕著になったためである。このような沿岸域の地下水流動の地域毎の特徴は、地形や地下地質構造の影響を強く受けるが、海底地質を含めた詳しい地質データが得られていることは少ない。本解析結果は、陸域地質を海側に単純に延長した分布を仮定しているため、今後、現地調査データ等を用いて結果の検証を進めていく必要がある。

4. 海岸構造物による淡水性地下水の海底湧出量変化に関する数値実験

(1) 数値実験モデルの概要

防潮堤等の海岸構造物が陸域・海域間の地下水流動へ与える影響を検証するための数値実験モデルを構築した。本数値実験では、奥尻島南部沿岸域（松江地区）を対象とし、格子サイズを数10cm～1mに精緻に分割した鉛直及び水平断面に着目した2次元モデルを用いて、防潮堤建設前後における陸域にかん養された淡水性地下水の海底湧出量変化に着目した検討を行った。モデル構築に必要な情報は国土交通省ウェブサイト³⁾より入手した。

鉛直断面2次元モデルでは、陸側にあたる北側のモデ

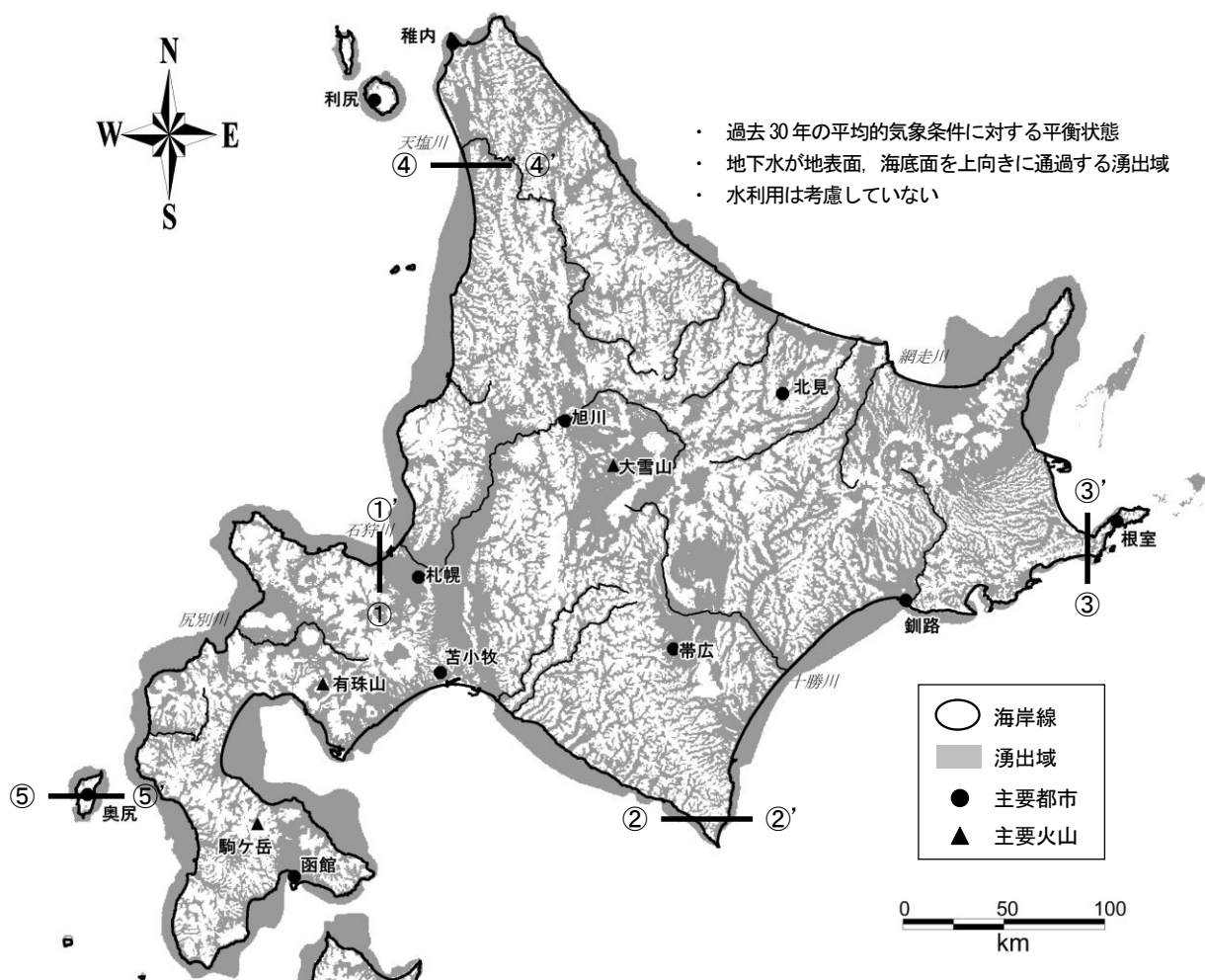


図-1 北海道全域の湧出域分布（国土水循環モデルによる解析結果）

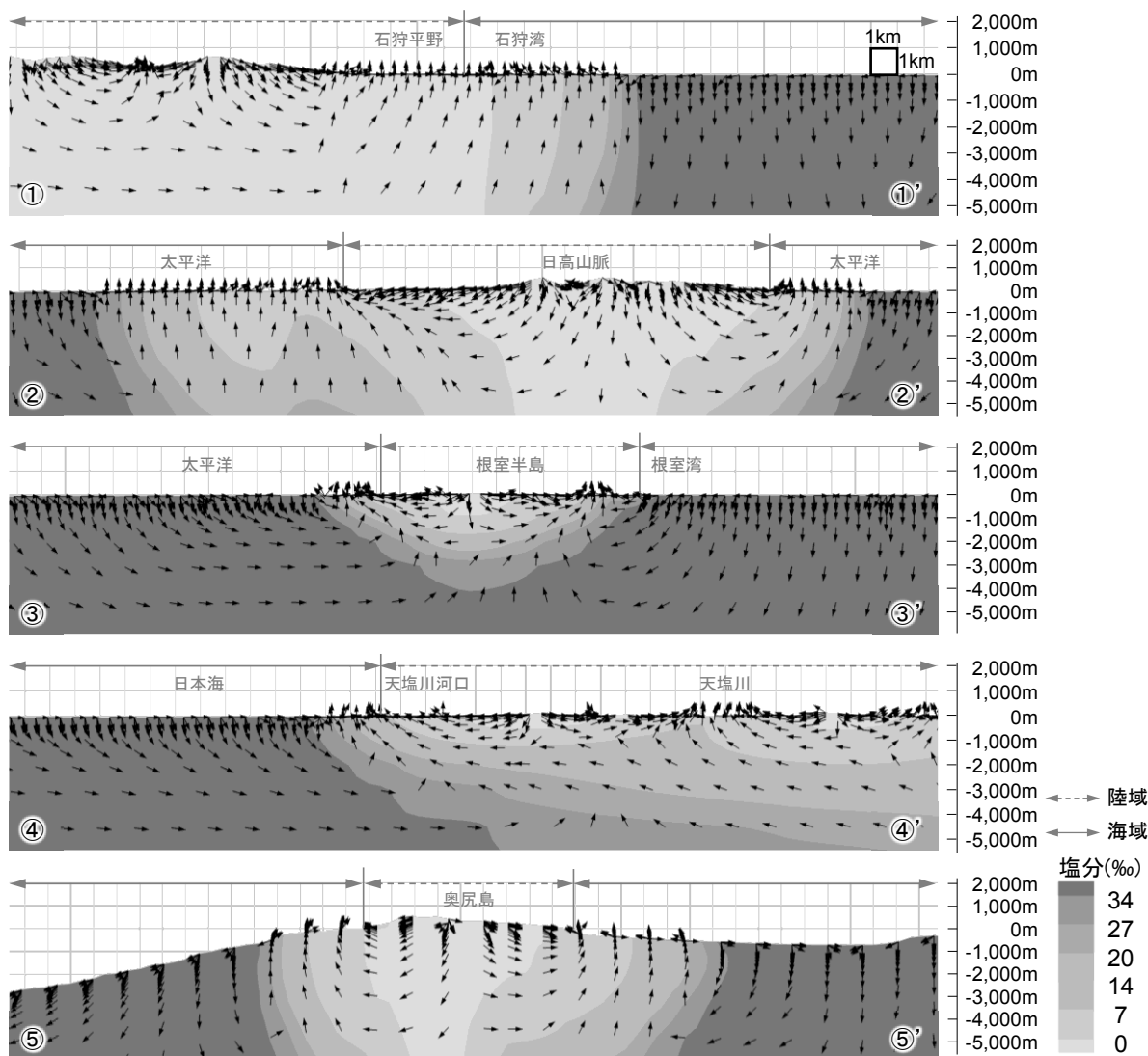


図-2 北海道沿岸域における地下水流動と塩分濃度分布の解析結果（背景色の濃淡は地下水中の塩分濃度、矢印は地下水の3次元流動方向をそれぞれの断面へ投影表示したものである。）

ル化範囲を海岸線より900mとした。陸側北端には標高70m程度の平坦な中位段丘面があり、海に向かって緩やかな地形勾配を呈する。海岸線より100m程度離れた所には比高30m程度の海食崖があり、海食崖の下には幅50m程度の狭い平坦面（波食台）が見られる。海域は海岸線より600mまでを含め、モデル底面は標高-150mとした。地下地質構造は既存資料を参考にし、厚さ5m程度の中位段丘堆積物とその下の厚さ20m程度の松江玄武岩、水理基盤として花崗岩を設定した。松江玄武岩と花崗岩に関しては、上層に緩み・風化部を設けた。地表面より1m～3mには表土を設け、風化火山灰や風化残留土、崩積土、海浜堆積物、難透水の道路舗装、やや締め固められた宅地の表土を表現した。

図-3に防潮堤の断面構造模式を示す。本体は堤頂標高10.8mのコンクリート製で花崗岩を基礎としている。堤体背後には側道の盛土が添えられ、表面は道路舗装および裏面保護工で遮水されている。降雨時に堤体背後で発

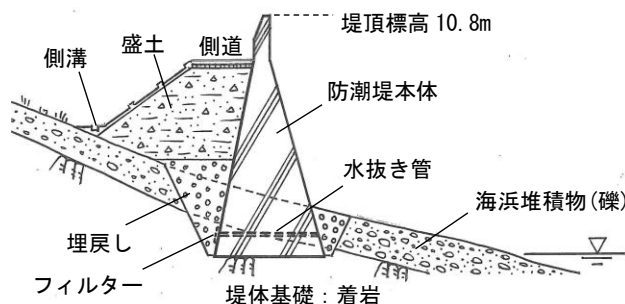


図-3 防潮堤の構造

表-1 地質及び構造物の透水係数

地質・構造物	透水係数 (m/s)
表土	10^{-4}
海岸構造物	防潮堤本体 10^{-11} , 側道 10^{-11} , 盛土 10^{-6} , 埋戻し 10^{-4} , 水抜き管 10^{-2}
中位段丘堆積物	10^{-5}
松江玄武岩	$10^{-5} \sim 10^{-6}$
花崗岩	$10^{-7} \sim 10^{-9}$

生ずる表流水は側溝に集められ排水される。堤体背面の水圧発生を防ぐため、本体底部に内径15cmの水抜き管が設けられている。透水係数は表-1のとおり仮定した。海水位は標高0m、塩分濃度34‰の水位・濃度固定境界に設定し、塩水密度を $1,025\text{kg/m}^3$ とした。モデル上面は大気圧境界、側面および底面は不浸透境界とした。降水条件は、蒸発散量を差し引いた日量1.15mmの有効降水量を与え、平衡状態の解析結果を防潮堤の有無で比較検討した。

水平断面2次元モデルでは、海岸線より陸側30mの範囲の表土をモデル化対象とし、地表面から深度3mの範囲を解析領域とした。鉛直2次元断面モデルと同様に、海岸線より10m程度離れた陸側に幅6mの防潮堤を設け、防潮堤内には1.5m間隔で設置された水抜き管を考慮した。地形勾配や透水係数等の解析条件については、上述の鉛直2次元断面モデルと同一とした。なお、上流域から表土内に流入する地下水に関しては、鉛直2次元断面モデルの解析結果から得られた地下水流動量を境界条件として与えた。

(2) 淡水性地下水の海底湧出量の解析結果

図-4(a)に防潮堤建設前の地表面～深度30m程度における沿岸域の地下水流動と塩分濃度の解析結果を示す。図-4(b)は海岸付近を拡大したものである。この結果によると、陸域にかん養された淡水性地下水は、海岸付近における地表面～深度3mの地下浅部では表土中を移動し、海岸線付近で湧出する。深部を移動する淡水性地下水は、海側へ向かうほど流体密度差が顕著となり、次第に湧昇流に転じて海底に湧出する。

図-5(a)には同様に防潮堤建設後の地下水流動と塩分濃度を示した。防潮堤建設後であっても、淡水性地下水は水抜き管内部を移動することができるため、流動阻害の影響は限定的である。構造物を迂回する流動経路が現れるが、それによる経路の変化はわずかである。地下浅部の地層を介した淡水性地下水の海底湧出量（陸域・海域間の淡水フラックス）は、防潮堤の奥行長さ100m当たり、防潮堤の建設前後でそれぞれ $100.9\text{m}^3/\text{d}$ 、 $100.8\text{m}^3/\text{d}$ であった。

図-5(b)に、防潮堤建設後の表土内の水平面内における地下水流動経路の解析結果を示す。これより、陸域でか

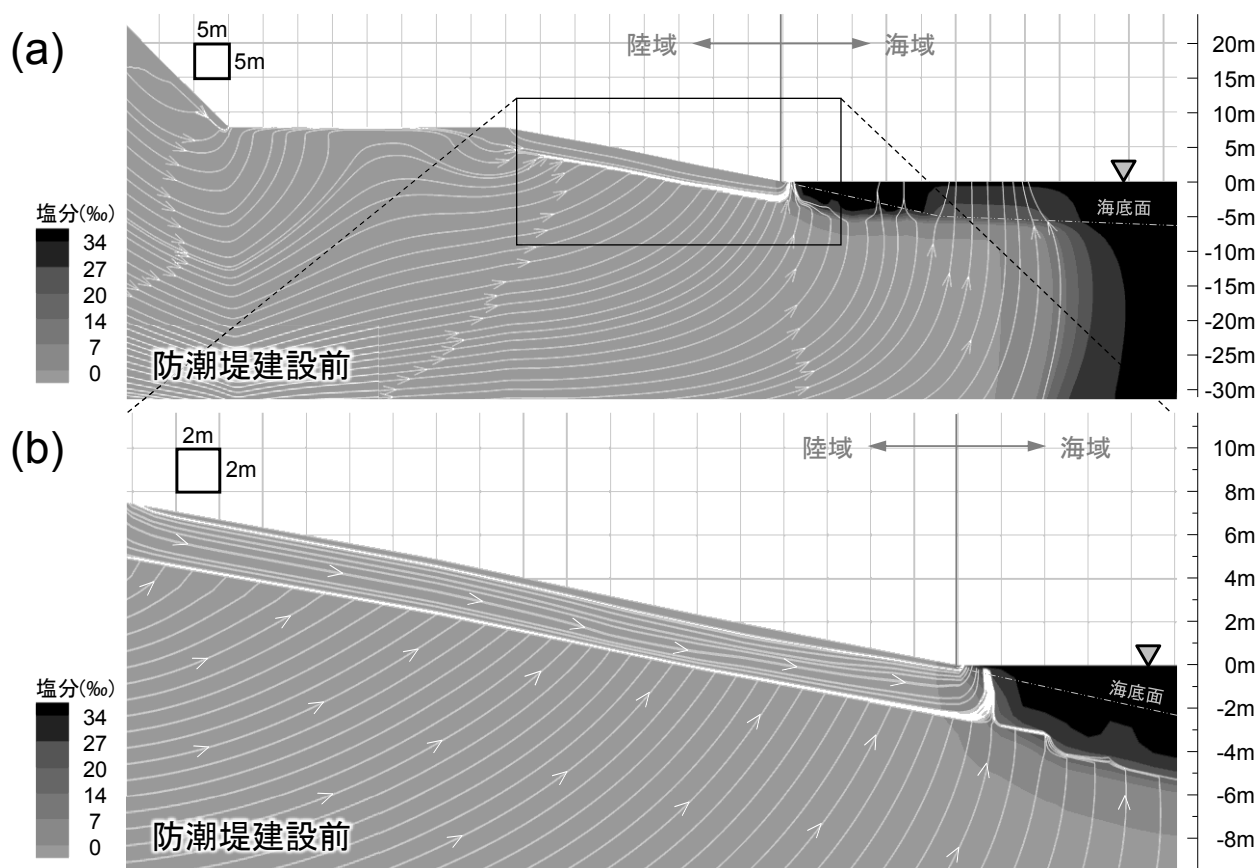


図4 奥尻島南部沿岸域を対象とした地下水流動状況の解析結果（鉛直断面2次元モデルによる数値実験結果：
(a)図は防潮堤建設前の地下水中の塩分濃度（背景色の濃淡）と陸域にかん養した淡水性地下水の流跡線（矢印），
(b)図は海岸付近の拡大図を示す）

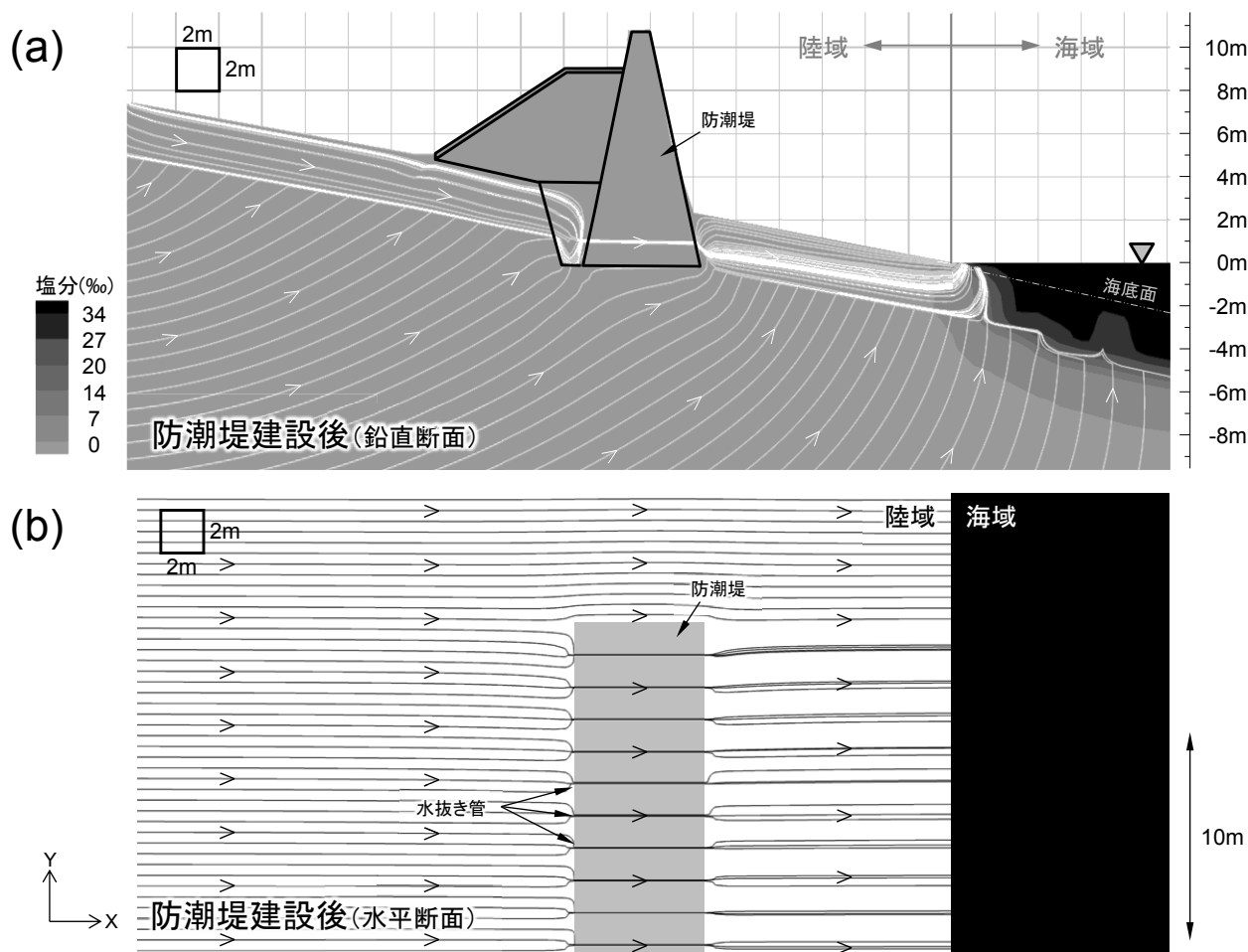


図-5 防潮堤建設による地下水流動変化の解析結果（鉛直及び水平断面2次元モデルによる数値実験結果：
 (a)図は防潮堤建設後の地下水中の塩分濃度（背景色の濃淡）と陸域にかん養した淡水性地下水の流跡線（矢印），
 (b)図は表土中の水平面内の淡水性地下水の流跡線（矢印）を示す）

ん養された淡水性地下水は、1.5m間隔で配置された水抜き管内部及び構造物端を迂回する流れとなり、わずかな流動経路の変化が生じるものの、ほとんど影響を受けることなく海底へ流出できることが示されている。

以上に述べた鉛直及び水平断面モデルによる解析結果では、陸域からの淡水性地下水は、防潮堤内に設置された水抜き管や構造物周囲を迂回する流れを通じて海域へ流出するため、海底湧出量に対して防潮堤の整備はほとんど影響を与えないことが示された。

5. 結言

北海道を対象に沿岸域における地下水流動パターンを可視化し、その特徴を考察した。本稿では統合型流域モデリングに基づいた数値シミュレーションの結果を用い、陸域から海域への淡水性地下水の湧出および海域から陸

域への塩水侵入の状況について、沿岸域の地形・地質的特徴との関係を検討した。

また、奥尻島沿岸域を例とし、防潮堤が淡水性地下水の海底湧出へ与える影響に着目した数値実験を行った。その結果では、構造物による地下水流動経路の違いは生じるものの、防潮堤建設前後で海底湧出量はほとんど変わらないことが示された。

参考文献

- 1) 多田和広, 森康二, 田原康博ほか：日本列島の水循環解析, 土木学会第23回地球環境シンポジウム, 2015.
- 2) 森康二, 田原康博, 多田和広, 山田正ほか：流体・熱・化学物質・土砂の同時輸送過程を考慮した統合型流域モデリング, 土木学会第23回地球環境シンポジウム, 2015.
- 3) <http://www.mlit.go.jp/hkb/> (2015/7/9 閲覧)