

指宿港海岸における温泉地下水の熱輸送を考慮した浸透流解析について

峯村 浩治*・蛭川 愛志**・甲斐 信治***・雪丸 敏昭****・小野 信幸*****

* (一財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (一財)沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省 九州地方整備局 鹿児島港湾・空港整備事務所 所長

**** 前 国土交通省 九州地方整備局 鹿児島港湾・空港整備事務所 海岸課 課長

***** 株式会社 エコー 環境解析部 部長

指宿港海岸では、侵食対策として突堤・離岸堤・養浜を用いた面的防護による越波防護機能の確保のための海岸整備事業が進められている。指宿の砂浜海岸は、自然湧出する豊富な温泉を利用した砂むし温泉が重要な観光資源となっており、養浜整備に対する砂むし温泉への影響が懸念される。本研究は、養浜砂投入による砂むし温泉への影響を評価することを目的として、現地調査による地下水位と砂層内温度を対象に、Dtransu-3Dを用いた再現性を検証した。

キーワード：砂むし温泉，地下水流動，養浜砂，熱輸送，浸透流解析

1. はじめに

指宿港海岸は、薩摩半島南東部に位置する延長約1.8kmの湾曲した砂浜海岸である(図-1)。本海岸は、大型台風に伴う高潮、高波の影響により、砂浜の侵食が進行して、砂浜の持つ消波機能が消失した結果、浸水被害が発生している状況にある。このため、砂浜の再生による高波時の防護機能の回復、高潮・高波による越波・浸水被害の軽減を目的に、平成26年度より突堤・離岸堤・護岸・養浜を組み合わせた面的防護工法による侵食対策施設の整備が進められている^{1),2),3),4)}。整備に当たっては、当該地域の重要な観光資源である天然砂むし温泉を含む温泉地下水環境を保全することが重要な課題となる。このため、砂むし温泉のメカニズムを把握するとともに、予測可能な砂層内地下水流動の基礎モデルの構築を行った。



図-1 指宿港海岸の位置

2. 指宿の地熱構造と地下水流動の特性

2.1 温泉地下水と砂むし

指宿温泉は火山地域の地下に存在するマグマ溜まりからの熱を熱源とする火山性温泉である。その温泉が海

岸の砂浜内に地下水として流入し、汀線付近に自然湧出する。この温泉の地下水により蒸された砂による温熱効果を得る砂浴が砂むし温泉である(図-2)。現在、この砂むし温泉は、大潮時の干潮時に大きく露出した砂浜の前浜斜面において砂浜の表層付近が高温となる干潮から1時間程度のわずかな時間しか利用できない。このとき砂浜の表層を30cm程度床掘した面の温度が50°C程度であることが砂むし温泉の適温とされている。



図-2 指宿港海岸における砂むし温泉の状況
(出典：指宿市HPより)

3. 現地調査による地下水と砂中温度の特性地

3.1 下水の特性分析

温泉地下水は、塩化物イオン濃度が高く、塩化物泉源であると判断される。また安定同位体分析から、海水(塩水性地下水)が混合した湖沼水であると考えられる³⁾。

3.2 地下水位の時間変化と温度の分布

現地調査³⁾による温泉地下水の水位及び温度の変動特

性を以下に示す。地下水の温度は、砂むし温泉が実施される北側は70℃の高温水が広がり、突堤付近を境に低温域が広がり、さらに南側では温度が高くなっている(図-3)。この低温域は潮位に依らず常に20℃程度となっており海水温に近い温度で安定している。

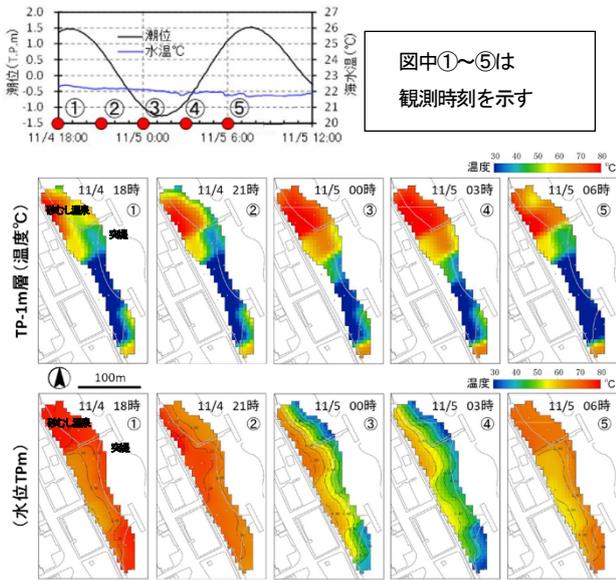


図-3 異なる潮位条件における水位と温度の平面分布

高温水の滲出する箇所における潮位変動と砂中温度の関係性については、上げ潮時に、砂中への海水浸透による温度低下が見られ、下げ潮時に、低温水の海側への押し出しによる全体的な温度上昇が見られた。上げ潮時には海水に押し上げられた高温水が砂浜内に留まり、下げ潮時には砂浜内の高温水が沖側へ流出することが考えられる(図-4)。また大潮期に、満潮に掛けて低温水が砂層中に流入する様子が現地調査³⁾により確認されている。これは、海面の上昇に比べて砂層内の流動が遅れるため陸向きの動水勾配となる時刻において低温度の海水が空隙の多い砂層内に急激に浸透するためだと考えられるが、現地での追加調査により詳細を確認する必要がある。

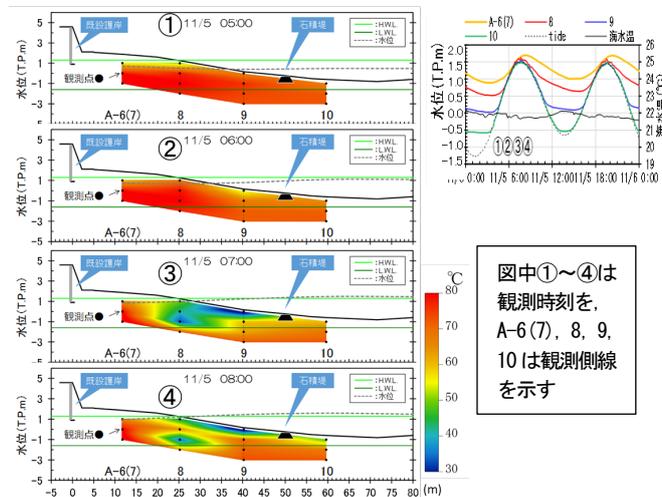


図-4 上げ潮時における砂浜内の温度の時間変化

3.3 熱輸送を含む地下水解析モデル

地下地盤内では、伝熱、流動に伴う移流・拡散、対流、放射の形態により熱輸送が行われる。熱輸送を含む地下水流動解析としては、地熱発電における影響検討、農作物への土壌熱伝導、地下帯水層の蓄熱システム等の評価モデルが存在しているが、潮位変動を受け変動する砂浜内地下水の流動を、熱輸送を考慮して検討した研究は無い。

ここで、浅野ら⁵⁾は、平成5年に指宿市が実施した温泉地下水流動の観測結果に基づき、地下水流動を図-5に示すような形で模式的に捉えている。これによれば対象とする温泉地下水の流動は、次節以降で述べるように対象領域の地質構造モデルを用いることで、山地斜面に沿った地下水流と、それが指宿港海岸に到達する流れで表現可能となる。このため、地下水の熱輸送のうち移流・拡散のみを考慮して溶質輸送と同じ形式で扱った解析モデルにより現地適用性について検討することとした。

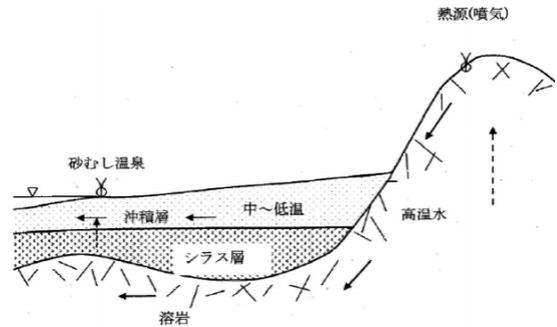


図-5 指宿の地質構造と地下水流動の模式図

4. 浸透流・熱輸送解析モデルの構築

4.1 計算モデル

計算モデルは、砂層表面での飽和・不飽和の浸透流解析、移流分散解析モジュールとのカップリングにより温泉水の熱輸送解析が可能なモデルとして、岡山大学西垣教授、三菱マテリアル(株)、(株)ダイヤコンサルタント共同開発のDtransu-3D・EL (Density dependent Transport Analysis Saturated-unsaturated porous media - 3 Dimensional Eulerian Lagrangian method)⁶⁾をベースとして用いた。

Dtransu-3D・ELの浸透流の支配方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho K_r K_{ij}^S \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_r K_{i3}^S \right) + \rho q = \rho (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 $i, j, i3$ は x, y, z 方向成分の総和規約表示、 ρ は流体密度、 K_r は比透水係数、 K^S は飽和透水係数、 φ は圧力水頭、 q はソース項、 β は飽和、不飽和でそれぞれ1、0とする有効指標、 S_s は比貯留係数、 C_s は比水分容量をそれぞれ表す。

式(1)における透水係数は、地質毎に設定するものとし、その値は、現地砂の物性や既往の情報を基に、後述する定常浸透流解析で地下水位の再現性を確認して設定した。

4.2 熱輸送解析について

Dtransu-3D・ELの熱輸送の支配方程式を式(2)に示す。

$$R\theta \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \theta V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} + Q_c \quad (2)$$

ここで、 R は遅延係数(本検討では1)、 θ は体積含水率、 T は温度、 D_{ij} は分散テンソル、 V_i は地下水実流速、 Q_c はソース項をそれぞれ表す。分散テンソルは式(3)から式(8)のように表現される。

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{V_x V_x}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_y V_y}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_z V_z}{\|V\|} + D_{diff} \tau \quad (3)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{V_y V_y}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_x V_x}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_z V_z}{\|V\|} + D_{diff} \tau \quad (4)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{V_z V_z}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_x V_x}{\|V\|} + \alpha_T \frac{V_y V_y}{\|V\|} + D_{diff} \tau \quad (5)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_x V_y}{\|V\|} \quad (6)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_y V_z}{\|V\|} \quad (7)$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_z V_x}{\|V\|} \quad (8)$$

ここで、 V_x, V_y, V_z は x, y, z 方向の実流速ベクトル、 $\|V\|$ は実流速の絶対値、 D_{diff} は熱拡散係数、 τ は屈曲率、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長をそれぞれ表す。熱拡散係数は水の物性値である $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ を全層に設定した。式(3)から式(5)の右辺第一項から第三項までが地下水流動による機械的分散(移流分散)であり、右辺第四項が分子拡散による分散となる。

分散長は、地下水の移流に伴う物質移行のバラつきを示す値であり、一般的に縦分散と横分散の比は10:1程度と考えられているが、本検討では熱輸送解析結果の再現性の観点から、縦分散長を20m、横分散長を10mとして全層に設定した。

Dtransu-3D・ELでの熱輸送解析では、温度を直接解くわけではなく、水の溶質として解くこととなるため、浸透流解析と異なり飽和・不飽和領域を区別して解くことができない。そこで、本研究で構築したモデルでは、不飽和層における断熱的な効果は、温度変化緩衝境界を地表面に設定することで表現した。

4.3 地質構造モデルの構築

地下水は、山地の尾根や河川で分断された閉じた水系に降雨が浸透して海域まで流達するものとして、図-6の黒線で囲む範囲を広域モデルとして、また潮位変動の影響を受ける詳細領域として指宿港海岸周辺の領域を調査地モデルとして2つの計算領域を設定して用いた。

各領域の地質は、過去に実施されているボーリング調

査結果(図-6の黒点)やNEDO地質図⁹⁾に基づき設定した。また、領域内の標高データは、海岸の浅深測量結果、国土地理院の数値標高データに基づき作成した。構築した地質構造モデルを図-7に示す。

広域モデルでは最上部はT.P.+400m程度で設定し、最下部は砂層・シラス層の最下部より十分深いT.P.-30m程度として沿岸海域を含めて作成した。地層構成は図-5を反映して、基盤の上にシラス層、砂層が順に重なる3層構造の地質構造でモデル化した。



図-6 計算範囲とボーリング調査地点

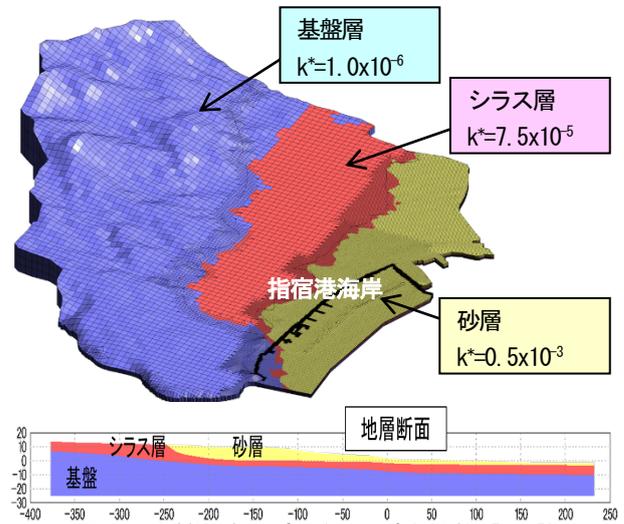


図-7 地質構造モデル(k^* : 透水係数 [m/s])

5. 温泉地下水の再現性の確認

5.1 陸域浸透流(定常地下水位)の再現

調査地モデルにおける初期境界条件として、地下を流下する浸透流を、広域モデルを用いた定常状態での解析を実施した。定常の浸透流解析では、陸上境界に降雨による地下浸透量を、海側境界に海水面として平均潮位をそれぞれ設定した。降雨の地下浸透量は、指宿での1976年から2018年の降雨量から算定した日平均降水量6.8mmの概ね

3分の1が浸透するものとして、降水量2.1mmを地表面に与えた。また、海側境界は指宿港海岸の平均潮位(T.P.+0.2m)を与えた。

広域モデルによる定常的な浸透流解析の水位を、図-6中の黒点で示すボーリング孔内水位と比較したのが図-8である。ボーリング地下水位と解析値は概ね一致しており、相関係数0.966と高い相関を示している。これにより、地質モデルと透水係数が適切に設定されていることを確認した。

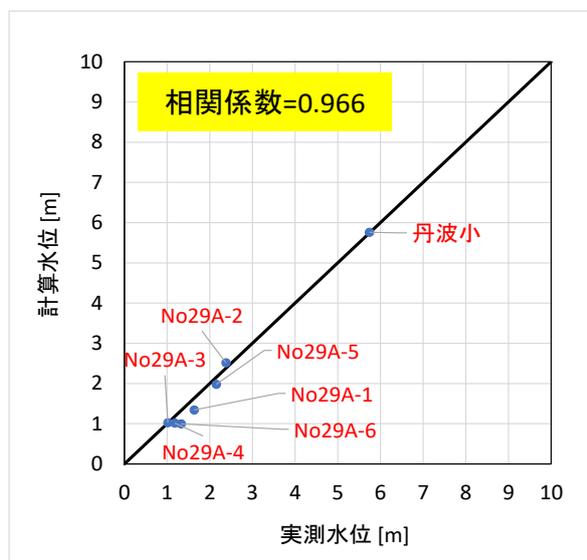


図-8 定常的な地下水位再現性の検証

5.2 浸透流解析による変動地下水の再現

海岸付近の調査地モデルに対し、広域モデルの計算結果を陸側境界条件、潮位変動に伴う水位変化を海側境界条件とした非定常浸透流の解析を実施した。非定常浸透流解析は、2017年11月5日0時から6日12時までの1.5日を再現期間とし、期間中は降雨がなかったため、陸上境界からの地下浸透量は0とした。

図-9は、2017年11月6日1時40分の干潮時と、2017年11月5日7時40分の満潮時における観測値との比較を行った平面分布である。現地観測で得られた地下水位の空間分布は、干潮時には砂浜形状に対応して水位勾配が大きくなっており、満潮時は海面に応じて地下水位も上昇することで水位勾配が緩やかな分布であった。解析結果はこの特徴を良好に再現している。

図-10は、図-9中のA地点およびB地点における地下水位の時系列を比較したものである。満潮時には水没することにより潮位で満たされるが、干潮時には潮位よりも遅れて地下水位が低下し、潮位よりも地下水位が高い状態が続く。解析による地下水位は、以上の特徴と良く捉えており、地下水位の時間変化特性についても、良好に再現していることが確認された。

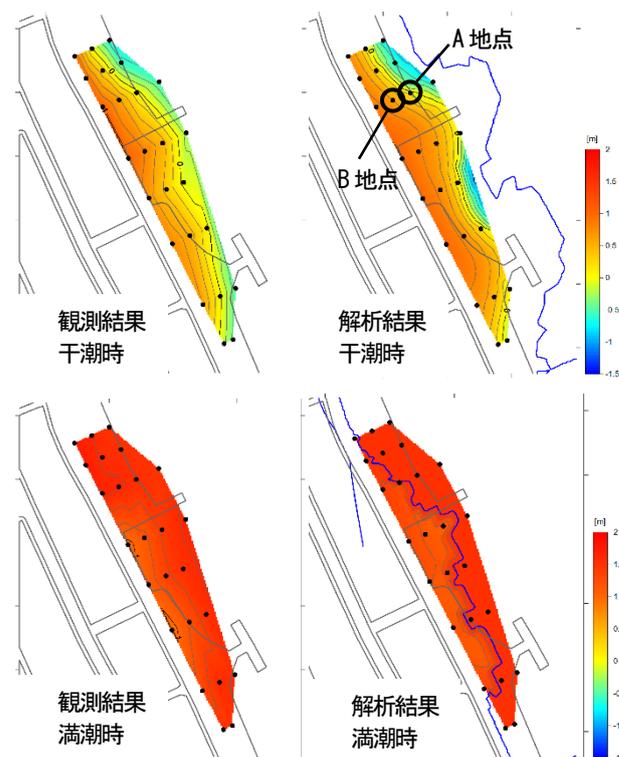


図-9 地下水位空間分布
(干潮：2017/11/6 1:40, 満潮：2017/11/5 7:40)

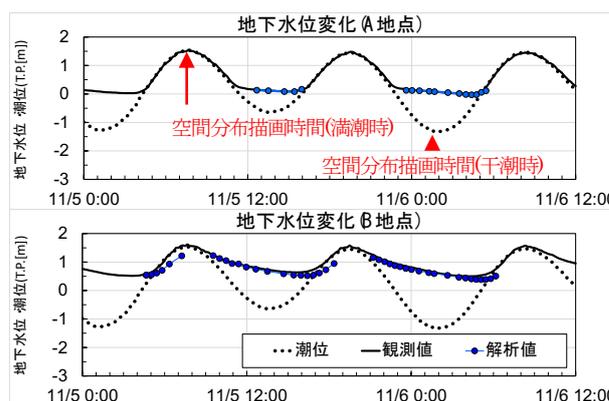


図-10 地下水位時系列(図-9のAおよびB地点)

5.3 熱輸送解析による砂浜内温度の再現

(1) 時間変化の再現性について

熱輸送解析では、調査地モデルの陸側境界から85℃の温泉水を流入させ、シラス層上面に85℃、地表面に再現対象期間である11月の平均気温の15.6℃、海面下に11月平均水温の23℃をそれぞれ境界条件として与えた。また地中温度の初期条件は、定常浸透流解析結果を用いた150日間の助走計算後の値を設定した。熱輸送解析の計算期間は、非定常浸透流解析と同一とし、陸側境界条件及び海側境界条件は非定常浸透流解析による水位を与えた。

図-11に、図-9中のA地点におけるT.P.+0.0m(上層)とT.P.-2.0m(下層)の砂中温度時系列を示す。上層の観測結果では潮位変動に伴う温度の急変が見られ、上げ潮時に急激に温度が低下し、下げ潮時には上昇する傾向がある。一方、下層では上層に比べて温度変動は小さく、潮位によ

らず高温を保っている。上層では潮位の上昇に伴い砂層中に冷たい海水の流入による冷却効果で砂中温度が低下すること、また潮位の下降により地下水水位が卓越するため、地下水の高温が砂層中に広がることから温度が上昇するが、下層では海水浸透の影響が小さいために温度変化が小さいと考えられる。熱輸送解析では、上層の温度上昇のタイミングが遅れるものの砂中温度の時間変化特性を概ね良好に捉えられている。

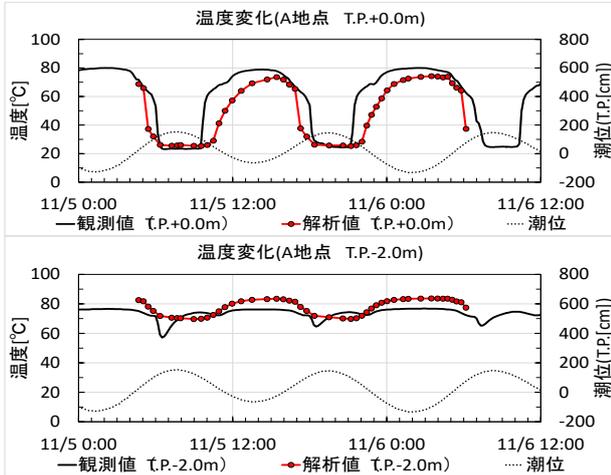


図-11 砂中上層と下層の温度時系列(図-9のA地点)

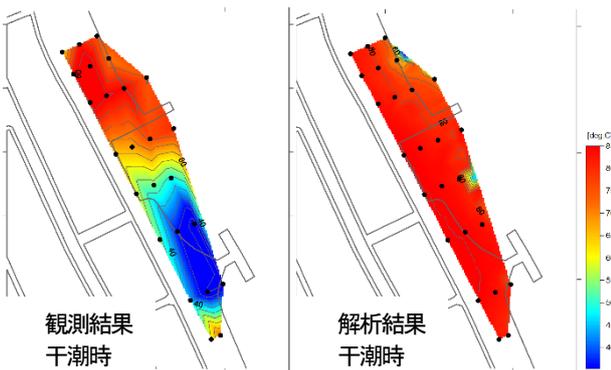


図-12 T.P.+1.0m層における砂中温度空間分布
(干潮：2017/11/6 1:40)

(2) 空間分布の再現性について

図-12は、2017年11月6日1時40分の干潮時におけるT.P.+1.0m平面の砂中温度の水平分布であり、現地観測値と解析結果を比較したものである。現地観測された砂中温度の空間分布では、北側の高温域と南側の低温域が明瞭に分かれて分布していることが確認されている。しかし、解析結果からはこのような特徴が見られず、領域全体で砂中温度が高い結果となっている。これらは陸側から流入する地下水の温度を一様に設定していることや、海岸砂を加熱する砂層下部の熱源の深さを一様に設定していることが要因だと考えられる。

これらの条件は、現地では平面的なばらつきを持って分布しているものと考えられるため、現地調査により砂層内の深部における温度分布特性を詳細に把握する必要がある。

6. おわりに

指宿港海岸侵食対策における温泉地下水の予測モデルの再現状況について述べた。熱輸送を溶質輸送として扱うことで概ね現地の地下水温度分布を表現することができたが、局所的な低温域の再現に課題を残した。

今後は、砂層内における熱分布を現地観測により充実させて、温度分布特性を把握することにより、計算の熱源深度の条件設定に反映して砂層内に温度分布の再現性の向上を図る予定である。

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾・空港整備事務所発注の「指宿港海岸整備検討業務」の成果の一部をまとめたものである。業務実施にあたっては、指宿港海岸侵食対策施設整備検討委員会(委員長：鹿児島大学 浅野特任教授)の各委員、及び関係各所から貴重なご指導をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾・空港整備事務所：平成26年度 指宿港海岸整備検討業務 報告書，2015.
- 2) 国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾・空港整備事務所：平成27年度 指宿港海岸整備検討業務 報告書，2016.
- 3) 国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾・空港整備事務所：平成28年度 指宿港海岸整備検討業務 報告書，2017.
- 4) 国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾・空港整備事務所：平成29年度 指宿港海岸整備検討業務 報告書，2018.
- 5) 浅野敏之，川上弘次，北出徹也，田中信夫：指宿海岸における砂浜浸透流に関する現地観測，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 68, No. 2, pp. I_486-I_490, 2012.
- 6) 西垣誠，菱谷智幸，橋本学，河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水の数値解析手法に関する研究，土木学会論文集No. 511, III-30, pp. 135-144, 1995.
- 7) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合センター：5万分の1地質図幅 15鹿児島，<https://www.gsj.jp/Map/JP/geology4-15.html>.

