

地下水涵養施設による塩水侵入制御

THE SEAWATER INTRUSION CONTROL BY GROUNDWATER RECHARGE FACILITY

宮城 昌和¹・風間 聡²・沢本 正樹³

Masakazu MIYAGI, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

¹ 学生員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

² 正会員 工博 東北大学大学院 環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

³ フェロー 工博 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

The effect of a detention-infiltration facility to groundwater salinity intrusion is examined by observation and using MODFLOW. MODFLOW is the model for groundwater analysis. MODFLOW was applied in Eastern Sendai area. By observation, it was confirmed that there are salinity intrusion. Utility of detention-infiltration facility was confirmed. Furthermore, when infiltration facility is installed over the seawater wedge, it cannot decrease saltwater effectively. Therefore, it is needed to monitor seawater wedge before installing infiltration facility. The optimum surface area and depth of infiltration facility is less than 0.6 km² and 12m, respectively. Increasing saltwater by land-use change can decrease by installing infiltration facility. The graphs of this result are useful indices to install an infiltration facility.

Key words: artificial recharge, MODFLOW, groundwater protection, land-use change

1. はじめに

地下水は貴重な水資源として認識され，地下水資源の保全と開発のバランスが必要となっている．しかし，バランスが崩れた過剰な揚水による地下水位の低下および地球温暖化による海面上昇に起因する沿岸帯水層への塩水侵入が問題となっている^{1) 5)}．また，モンスーン地帯では乾季において地下水涵養が減少するため塩水侵入がみられる⁶⁾．それらの対策として，地下ダム⁷⁾による塩水侵入防止や浸透施設からの人工涵養による塩水侵入防止対策⁸⁾が実施および研究されている．特に欧米では人工涵養による塩水侵入防止のための浸透施設の設置事例が多く⁸⁾，また浸透施設や自然涵養による塩水侵入への影響についての研究が盛んに行われている⁹⁾．しかし，浸透施設からの地下水涵養が塩水侵入に及ぼす影響について定量的に評価されているとはいえない．特に周辺地域の土地利用形態に応じた浸透施設による涵養と塩水侵入との関係についてはあまり理解されていない．

そこで，本研究では浸透施設の規模や設置条件が塩水侵入に与える影響を定量的に把握するために，数値モデルを用いて解析し考察を行った．また，土地利用の変化による浸透量の減少が塩水侵入に与える影響を定量的に求め，浸透施設を設置することにより地下水資源を保全できるかを考察した．本論文では浸透施設は浸透池や水路を指すこととする．

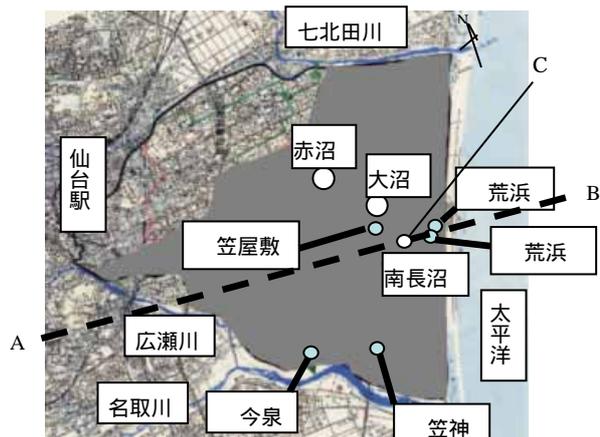


図-1 対象領域

2. 研究対象地域及び実測結果

対象領域は，図-1に示した仙台東部地域である．この領域は，海岸に近い標高の低い沖積平野である．そのほとんどが水田や畑である．この地域の地下水は，数十年前までは豊富にあったが，現在では水位低下が見られる．また，それに起因する地下水の塩水化が認められている．以前は水道が整備されていなかったため，地下水を使用していた．しかし，現在では水道が整備されたこと，また地下水水質が海水侵入により悪化したこともあり，地下水はほとんど用いられていない．この領域において実測を行い，地下水および塩水化の状況を把握する．実測地点は，図-1に示した5地点である．ただし，井戸は井戸ではなく，動力で揚げた地下水を測定した地点である．塩分は電気伝導度を測定することによって求める．法的な効力はないが，農業用水水質基準では電気伝導度

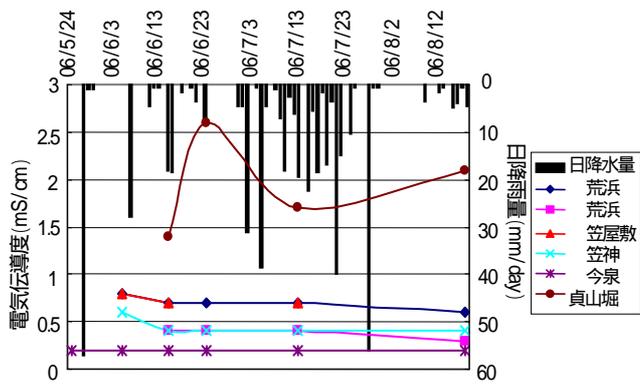


図-2 電気伝導度の実測値

が約 0.8mS/cm 以下となっている．実測は 5 月 25 日から 8 月 18 日の期間定期的に行われた．

図-2 に実測結果，図-3 に井戸の取水深度を示す．井戸 と は約 5m しか離れてないが 取水深度が異なっているため電気伝導度の値が異なった．これは，地下水の塩水混合層がみられることを示している．また，取水深度はほぼ等しいが，海に近い井戸 ，海から約 2km 離れた井戸 を比較すると，電気伝導度の値は井戸 ，井戸 の順で小さくなり，海から約 4km 離れた井戸 は取水深度が -2m であるが電気伝導度の値は最も小さくなった．海から離れるにつれて塩分濃度が低下することがわかった．6 月 5 日の実測値はそれ以降の実測値より大きくなっている．これは梅雨になり降雨量が増加したため，降雨の浸透によって塩水侵入が抑えられたことを示している．しかし，降雨の後に地下水が反応するまでの期間はよくわかっていない．また，4 月上旬から 9 月上旬まで稲作のための灌漑用水が付近の名取川から取水されており，涵養が多くなっている．そのため，降雨が少ない夏季においても，塩水侵入が抑えられていることがわかった．また，井戸 と を比較すると海からの距離はほぼ等しいが，取水位置が深い井戸 では電気伝導度の値が高くなっている．

3. 解析方法

(1) 解析モデル

本研究では，USGS が開発した地下水解析モデル MODFLOW¹⁰⁾を用いた．MODFLOW はさまざまな解析ができるようにパッケージに分類されている．その中で本研究では SEAWAT¹¹⁾を用いた．SEAWAT は密度流を考慮した三次元地下水流動解析および地下水溶質輸送モデルである．地下水流動解析モデルはダルシー則，質量保存則に基づいており，透水係数・涵養量・拡散係数・標高・間隙率・貯留量・蒸発散量等を入力することにより，地下水位と帯水層への流入・流出量を出力するものである．このモデルでは降雨などの涵養は直接地下水面に与えられると仮定しているため，不飽和領域は計算していない．基礎式は以下のように与えられる．

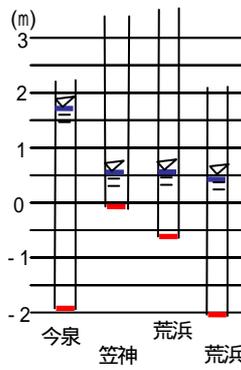


図-3 取水深度

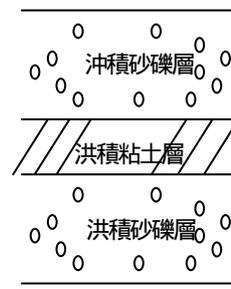


図-4 仙台東部地域の地質



図-5 沖積砂礫層の標高図

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q_s \quad (1)$$

ここで， K_x, K_y, K_z はそれぞれ x, y, z 方向の透水係数(m/s)， t は時間(s)， h は水頭(m)， H は標高(m)， θ は有効間隙率(%)， q_s は単位面積あたりの地下水系へ影響を及ぼす水量(s^{-1})， C は溶質の濃度(kg/m^3)である． S_s は貯留係数(m^{-1})である． ρ は流体の密度(kg/m^3)， ρ_f は淡水の密度(kg/m^3)， ρ_s は海水の密度(kg/m^3)である ρ は以下の式で導かれる．

$$\rho = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial C} C \quad (2)$$

塩分流動解析のために地下水溶質輸送モデルを用いる．このモデルは地下水に溶けている物質の流れを移流・拡散方程式を用いて再現するものである．基礎式は以下のように与えられる．

$$\frac{d(\theta C)}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + R_n \quad (3)$$

ここで， v_i はダルシー流速 (m/s)， C_s は地下水へ流入・流出する濃度(kg/m^3)， R_n は遅延係数(吸着係数) ($kg/m^3/s$)である．

D_{ij} は分散係数 (m^2/s) で，以下のように与えられる．

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L \frac{v_x'^2}{|V|} + \alpha_{TH} \frac{v_y'^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{v_z'^2}{|V|} + D_m \\ D_{yy} &= \alpha_{TH} \frac{v_x'^2}{|V|} + \alpha_L \frac{v_y'^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{v_z'^2}{|V|} + D_m \\ D_{zz} &= \alpha_{TV} \frac{v_x'^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{v_y'^2}{|V|} + \alpha_L \frac{v_z'^2}{|V|} + D_m \quad (4) \\ D_{xy} &= D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x' v_y'}{|V|} \\ D_{xz} &= D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_x' v_z'}{|V|} \\ D_{yz} &= D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_y' v_z'}{|V|} \end{aligned}$$

ここで， v_i' は平均間隙流速(m/s)であり $v_i' = v_i / \theta$ で計算される． $|V| = \sqrt{v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2}$ (m/s)， α_L は縦方向分

表 - 1 解析におけるパラメータの値

| | |
|------------------------|---------------------------------|
| 貯留係数 S_s | 0 m^{-1} |
| 透水係数 $K_x = K_y = K_z$ | 0.001 m/s |
| 間隙率 θ | 30% |
| 縦方向分散長 α_L | 1.0 m |
| 横方向分散長 α_{TH} | 0.1 m |
| 鉛直方向分散長 α_{TV} | 0.01 m |
| 拡散係数 D_m | $0.000005 \text{ m}^2/\text{s}$ |

散長(m), α_{TH} は横方向分散長(m), α_{TV} は鉛直方向分散長(m), D_m は分子拡散係数(m^2/s)である. 本研究では, 土粒子などによる吸着, 脱着の影響は小さいため遅延係数は無視する.

(2) 仙台東部地域への適用

仙台東部地域の地層は図 - 4 に示すように 沖積砂礫層, 洪積粘土層, 洪積砂礫層, 基盤岩から成っている¹²⁾. 粘土層は不透水層なので, 仙台東部地域は 2 層の帯水層から成っていることがわかる. 本研究では, 生活用水や農業用水によく用いられる不圧帯水層である沖積砂礫層のみ解析を行うことにする. また, 仙台東部地域における沖積砂礫層の底部までの深度の分布は 図 - 5 に示すように, 内陸から海にいくにしたがって, 深度が深くなっている.

MODFLOW では地質に起因するパラメータが必要である. 地下水流動解析においては, 貯留係数, 透水係数, 地下水, 溶質輸送解析においては, 拡散係数, 分散係数, 遅延係数, 間隙率のパラメータが必要である.

表 - 1 にそれぞれパラメータの値を示す. 対象領域が大きいためパラメータは実験値ではなく文献や観測値との同定により決定した. 透水係数, 間隙率は文献¹³⁾を参照し, 分散長, 拡散係数(m^2/s)は観測値との同定により値を決定した. 感度分析を行った結果, 拡散係数は分散長より感度が高いことが分かり, 同定の際に拡散係数は分散長より詳細に決定した. また, 既存の研究より一般的な傾向として横方向, 鉛直方向分散長はそれぞれ縦方向分散長の 0.1, 0.01 倍以下となっている¹¹⁾. 遅延係数は結果への影響が小さいため考慮しない.

対象エリアをメッシュサイズ $200\text{m} \times 200\text{m}$, メッシュ数 60×50 , 層の数 23, 各層の厚さは標高-2m まで 0.5m それ以降は 2.0m とし, 地下水は不圧地下水として考慮する.

海域を境界条件とした. 海域は, 既知水頭境界とし一定の値を与えた. その値は仙台海岸の平均潮位である 0m とした.

解析に用いた降水量は, 仙台における年平均降水量 $1.24\text{m}/\text{year}$ を用いた. 浸透量は蒸発散および水田からの浸透量を考慮した. 蒸発散量は Hamon 式より可能蒸発散量を計算し, その値とした. 水田からの浸透量は $2\text{mm}/\text{day}$ とした. 降水量, 蒸発散量および浸透量は図 - 6 に示す.

対象領域には海岸と平行に貞山堀という水路がある. 北は七北田川, 南は名取川の河口とつながっており, 海からの塩水の影響を受ける. 貞山堀からの浸透を考慮し,

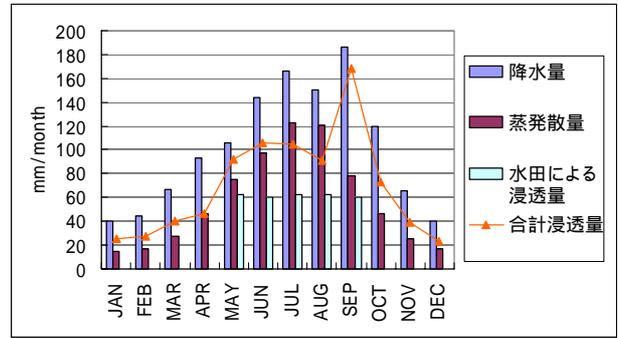


図 - 6 平均降水量, 蒸発散量, 浸透量

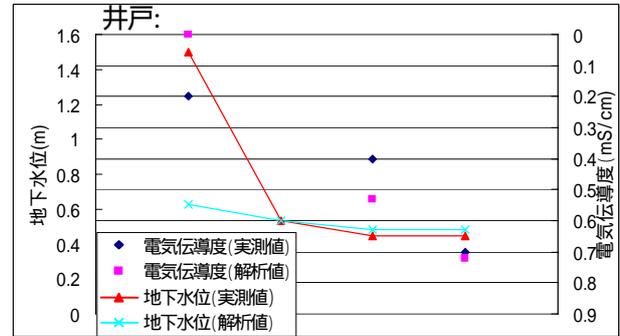


図 - 7 実測値と解析値の比較

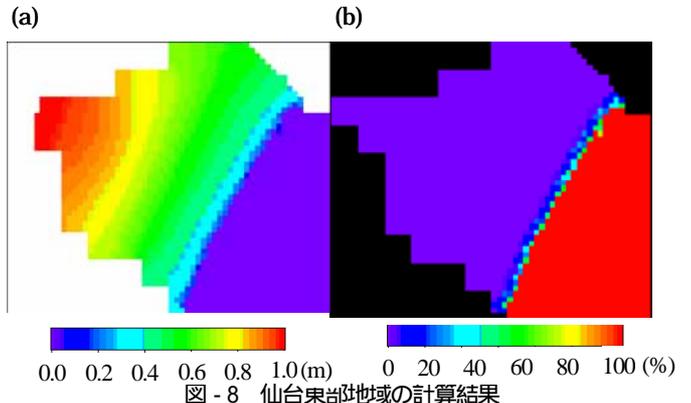


図 - 8 仙台東部地域の計算結果

(a) 水位分布図, (b) 塩水侵入分布図
その電気伝導度の値は平均実測値である $2.0\text{mS}/\text{cm}$ を用いた.

4. 結果と考察

(1) 地下水位解析

解析した地下水位と実測した地下水位を比較した図を図 - 7 に示す. 井戸 において, 実測値と異なった. この理由は, 井戸 付近は水田であり, また近くに河川があるため浸透量が増加していることが考えられ, 水位が上昇していることが挙げられる. しかし, 概ね地下水位を再現できた. 図 - 8(a) に仙台東部地域の地下水位分布図を示す.

(2) 塩水侵入解析

解析した塩分濃度と実測した塩分濃度を図 - 7 に示す. 解析結果は実測結果とほぼ等しい. しかし, 井戸 は実測値からやや差がある. 井戸 における実測値は河川か

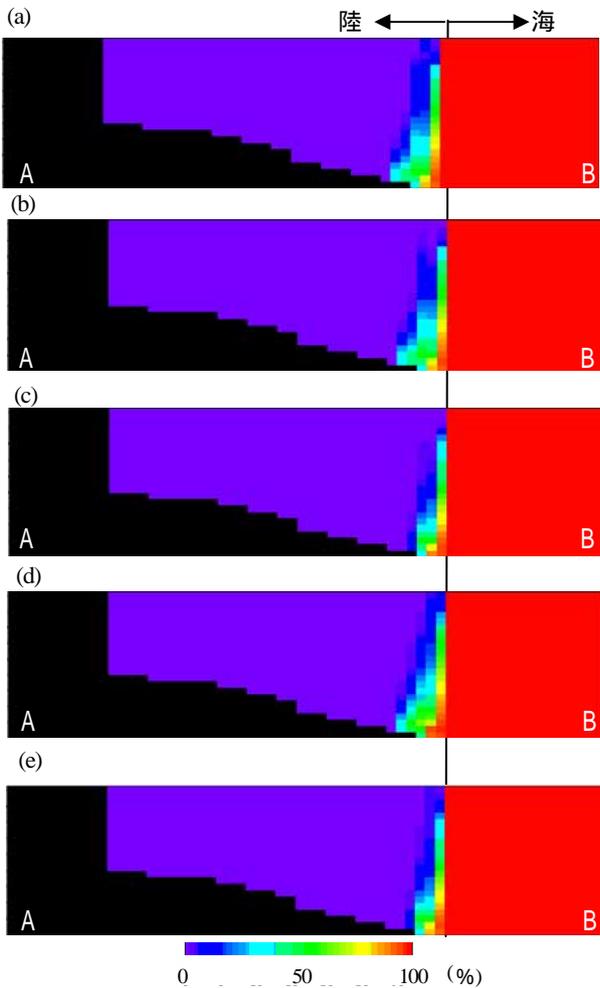


図-9 断面図

(a)塩水分布再現図,(b)南長沼の浸透を考慮,(c)貞山堀の塩分濃度を0%とした場合,(d)貞山堀の塩分濃度を0%とし、南長沼の浸透を考慮,(e)貞山堀が存在しなかった場合

ら取水しているこの付近における用水路の電気伝導度の値と等しいので、塩水侵入の影響を受けていないといえる。したがって、解析値は概ね正しいといえる。図-8(b)に標高-5mにおける仙台東部地域の塩分分布、図-9(a)に図-1に示した破線における断面の塩分分布を示す。海岸付近からの塩水楔を再現できた。

5. 浸透施設による涵養が塩水楔に及ぼす影響

(1)浸透施設のモデル化

浸透施設のモデル化は浸透施設の水位、浸透施設の透水係数、浸透施設の底部の標高、浸透施設が占めるメッシュを設定することにより行った。本研究では浸透施設からの地下水涵養の長期的な影響を調べることを目的としているため、浸透施設の下部は飽和状態とし、不飽和帯は考慮していない。そのため浸透施設からの浸透が直接地下水涵養することと仮定した。浸透施設からの浸透量は以下のダルシーの法則より計算した。

$$\begin{cases} q = -C(h_1 - R_{bot}) & h > R_{bot} \\ q = -C(h_1 - h) & h \leq R_{bot} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 q は浸透量(m^2/s)、 C は浸透施設底部の透水係数(m/s)、 h_1 は浸透施設の水位(m)、 R_{bot} は浸透施設の底部の標高(m)である。 C は飽和帯の透水係数より低い値を用いた。また、透水係数の値は一定とした。

(2)溝渠法による涵養が塩水楔に及ぼす影響

対象領域である仙台東部地域には、海に沿って平行に貞山堀という水路がある。近年、貞山堀に氾濫対策のための水門を設ける計画が進められている。現在は水門がないため、海水の影響を受けているが、水門設置後、その影響を制御できると考えられる。したがって、水門設置後、海からの影響がなくなると仮定し、それに伴う地下水への影響について調べる。電気伝導度が 2 mS/cm から 0 mS/cm に変化するとした場合、地下水への影響および塩水侵入に与える影響についてシミュレーションにより考察する。これは溝渠法と呼ばれる⁹⁾地下水涵養法の一つである。

結果を図-9(b)に示す。結果を比較すると、貞山堀の下方では塩水が押し出され塩分濃度0%であることがわかったが、塩水楔に大きな変化はみられなかった。また、貞山堀より内陸側に塩水が残るかたちとなることが分かった。ここからわかることは、塩水楔上に浸透施設がある場合、塩水を押し出す効果はあるが、内陸側に塩水が残留するということである。そのため、内陸側の塩水制御を行う必要がある。そこで、内陸側に浸透施設を設置し地下水涵養させることにより、内陸側の残留塩分が除去できるかを考察した。その結果を図-9(c)に示すように、内陸部の浸透施設を利用することにより残留塩分を除去することができ、塩水侵入抑制効果が増幅されることが分かった。浅層における塩分濃度約50%以下の割合が減少しているが、深層における塩分濃度約50%以上の割合には変化がなかった。

また、貞山堀が存在しなかった場合について解析を行った。結果を図-9(d)に示す。貞山堀が存在しなかった場合、階段状に塩水楔が侵入していることが分かる。したがって、海水の影響を受ける貞山堀があることにより貞山堀付近で塩水濃度が増加していることが分かった。

(3)浸透池法による涵養が塩水楔に及ぼす影響

対象領域である仙台東部地域には、図-1に示すように灌漑用のため池が点在している。ため池は水を貯留することを目的としている。しかし、減反政策により水田が減少しているため、ため池を再活用する動きが見られる。そこで、本研究では、沿岸域におけるため池の貯留水を浸透施設として利用した場合、これが塩水侵入へ与える影響について調べた。この方法は浸透池法とよばれる⁹⁾。図-1に示した破線AB上にある南長沼を浸透施設とみなし、一定の水深1.5mを与え、池底の透水係数を $1.25 \times 10^5\text{ m/s}$ とすることでモデル化し解析を行った。大きさは1メッシュサイズの 0.04 km^2 とした。その結果を図-

9(e)に示す。図-9(a)と比較すると塩水楔が抑えられ、淡水層が増加したことが認識された。

次に、塩水楔を抑制するために効果的な浸透池について考察を行った。塩水侵入抑制効果はモデルを用いたシミュレーションにより調べた。浸透池のモデル化は前述した方法で行った。考察する項目は、浸透池の水位と地下水位の差(水位差)、浸透池における水深、浸透施設の設置位置(海からの距離)、浸透池の表面積である。

塩水が押し出された効果を評価する方法は、4章(2)節で示した結果を基準とし、塩分濃度0%の領域が増加した分を比較することで行う。

図-10(a)に浸透池水位と地下水位の差を様々に変化させた浸透施設を設置した場合の結果を示す。浸透池における水位と地下水位の差が大きくなるにつれて塩分減少量が大きくなる比例関係が見られた。

一点において浸透池の水深のみ変化させた場合の塩水侵入抑制効果の変化を調べた結果を図-10(b)に示す。水深が大きくなるほど塩水侵入抑制効果は大きくなり、塩分減少量0.0085km³に漸近する。水深12m以上になるとその塩分減少量は増加しないので、浸透施設の最適深度は約12m以下であることがわかった。また、図-10(a)における結果と比較すると、図-10(a)における変化量は約0.03km³であるが、図-10(b)における変化量は約0.0085km³であるので、浸透施設の深度による塩水侵入抑制効果はあまり大きくないことがわかった。

浸透施設の表面積が塩水侵入抑制に及ぼす影響を調べた結果を図-10(c)に示す。浸透施設の表面積が大きくなるにつれて塩水侵入抑制効果が大きくなり、塩分減少量0.045km³に漸近することがわかった。面積は0.6km²以上になると、塩分減少量は増加しないので、浸透施設の最適な表面積は0.6km²以下であることがわかった。

図-11に浸透施設の設置位置に関して、海からの距離を様々に変化させた場合の結果を示す。浸透施設の位置が海から離れるにつれて塩水を押し出す効果が減少していることがわかる。塩水を押し出す効果は浸透施設による地下水位上昇に起因するが、浸透施設による地下水位上昇の場合、その影響は局所的であり、海から離れるとその効果が減少することが原因であるといえる。また、海から800mの地点では塩分減少量が低下している。これは、塩水楔が1000m付近まで伸びており、塩水楔上に浸透施設があると塩水を海側と内陸側に押し出す流れが生じ、塩水を押し出す効果が小さくなるということが原因である。

また、面積0.16km²・水位差0.2mのグラフと面積0.04km²・水位差0.4mのグラフはほぼ一致しており、面積が0.12km²小さいことによる塩分減少量の低下は水位差が0.2m大きくなることで代用できることがわかった。図-11を利用することにより、浸透施設の設計を行う際の簡単な塩水抑制効果の指標として活用できる。

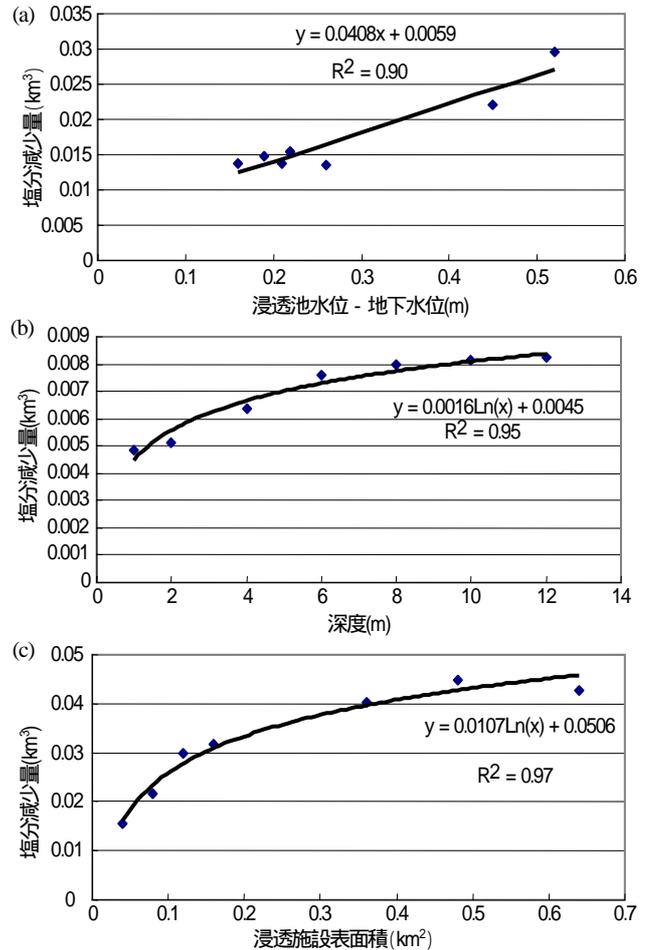


図-10 浸透施設の塩水侵入抑制効果

(a) 浸透施設水位と地下水位の差の影響、(b) 浸透施設の設置位置の影響、(c) 浸透施設表面積の影響

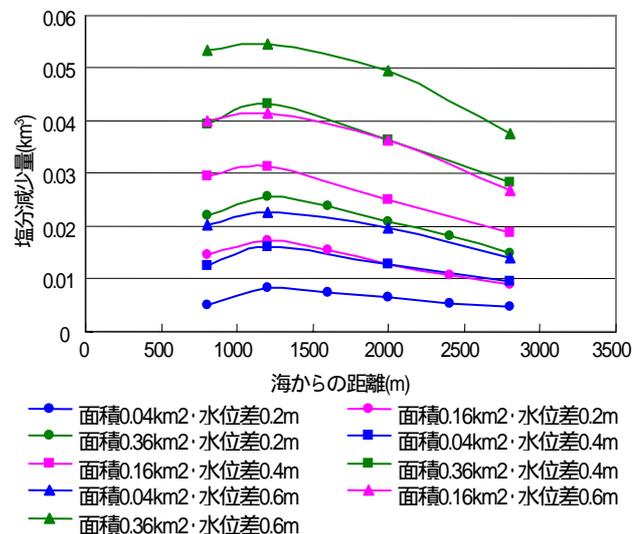


図-11 浸透施設の塩水侵入抑制効果

(4) 土地利用変化が及ぼす影響

対象領域における土地利用は水田であり、これまでの計算では、全領域から浸透すると仮定していた。本節では土地利用が浸透領域である水田から不浸透領域である市街地に変化した場合および畑地に変化した場合について考察する。土地利用が水田から市街地に変化した場合、降水や水田からの浸透が一切なくなるものとした。水田

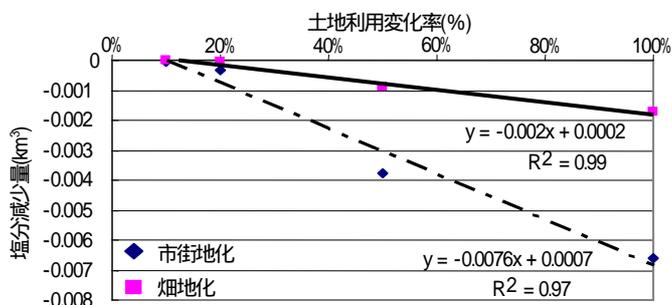


図 - 12 土地利用変化による塩分増加

から畑地に変化した場合、水田からの浸透量 2mm/day がなくなるとした。土地利用の変化は上流側から変化するとした。この結果を図 - 12 に示す。土地利用変化率は水田から市街地または畑地に変化した割合のことを示す。塩分減少量は海岸線 1km あたりの減少量を示し、値が負であることは塩分が増加したことを示している。土地利用変化率と塩分減少量には線形の関係がみられた。図 - 11 と図 - 12 を利用することにより、土地利用変化による増加した塩水を抑えるための浸透施設の設計について簡単に推定することができる。例えば、土地利用が 50% 変化した場合、10km の海岸線をもつ領域の塩分減少量は 0.03km³ であり、塩分が増加した分を、海から 2400m 地点に面積 0.16km² で水位差が 0.6m の浸透施設もしくは面積 0.36km² で水位差が 0.4m の浸透施設を設置することで土地利用によって失われた水資源を保全することができる。

6. 結論

地下水流動解析モデル MODFLOW を用いて、塩水侵入について再現および解析を行った。そして、ため池や堀などといった浸透施設による塩水侵入の制御が及ぼす影響を定量的に解析することができた。また、仙台東部地域の塩水侵入状況を把握できた。以下に本研究の成果を列挙する。

- ・ 貞山堀が付近の塩水侵入を助長していることが分かった。
- ・ 塩水楔上にある浸透施設は、塩水を押し出す効果はあるが、内陸部に塩水を残存させることになる。そのため、塩水楔より内陸の浸透施設と組み合わせた塩水制御が必要となる。したがって、塩水楔の状態を実測により把握し、浸透施設の設置場所の選定を見極める必要がある。
- ・ 浸透施設の最適な表面積が 0.6km² 以下であり、最適な深度は 12m 以下であることが分かった。また、浸透池の水位と地下水位の差が大きいほど塩水侵入抑制効果は大きくなることが分かった。
- ・ 図 - 11 と図 - 12 を利用することにより浸透施設を設置する際の塩水侵入抑制効果の簡単な指標として活用できる。

モンスーン地帯の発展途上国ではデータが集積されていなくモデル化が困難であるので、浸透施設の設置および土地利用変化による塩水侵入への影響が簡素に把握で

きる図 - 11 および図 - 12 を活用することは有効であると考えられる。本研究の結果より浸透施設は乾季のモンスーン地帯における塩水侵入を抑制することに有効であることが示唆される。しかし、モンスーン地帯においては浸透施設からの蒸発により水資源の減少が大きく、浸透施設の有効性について今後さらなる検討をする予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり地球環境研究総合推進費から援助を受けました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 村下敏夫：本邦における地下水の塩水化，地質調査所月報，Vol.33, No.10, pp.479-530, 1982.
- 2) 神野健二，広城吉成：地球温暖化と地下水塩水化，水環境学会誌，Vol.29, No.2, pp.22-26, 2006.
- 3) 工藤真，風間聡，沢本正樹：世界の小島嶼の地下水資源評価，土木学会東北支部技術研究発表会，pp.184-185, 2006.
- 4) S., Priyantha, Ranjan, So, Kazama and Masaki, Sawamoto : Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers, *Journal of Environmental Management*, Vol.80, issue 1, pp.25-35, 2006.
- 5) 藤縄克之，増岡健太郎，長野宇規，渡辺紹裕：海面上昇がゼロメートル地帯に及ぼす影響を予測するための塩水浸入数値解析モデル，土木学会論文集，No. 790/ 35, pp.35-48, 2005.
- 6) Subhrendu, Gangopadhyay and Ashim, Das, Gupta : Simulation of salt-water encroachment in a multi-layer groundwater system, Bangkok, Thailand, *Hydrogeology Journal*, Vol.3, No.4, pp.74-88, 1995.
- 7) 中川啓，初井和朗，内田一平：塩水侵入阻止型地下ダム貯留域内の残留塩分の挙動 水工学論文集 第 48 巻 pp.367-372, 2004.
- 8) 建設省河川局河川計画課：地下水人工涵養の現況と課題，(社)地下水技術協会，p.239, 1988.
- 9) A. Mahesha and S.H. Nagaraja : Effect of natural recharge on sea water intrusion in coastal aquifers, *Journal of Hydrology*, Vol.174, pp. 211-220, 1996.
- 10) Alen, W. Harbaugh, Edward, R. Banta, Mary, C. Hill, and Michael, G. McDonald : MODFLOW-2000, *The U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model User Guide To Modularization Concepts And The Groundwater Flow Process*, U.S.geological survey, 2000.
- 11) Weixing, Guo, and Christian, D. Langevin : *User's Guide To SEAWAT, A Computer Program For Simulation Of Three-dimensional Variable-density Ground-water Flow*, Techniques of water-resources investigations of the U.S.geological survey, 2002.
- 12) (社)地盤工学会東北支部：東北地方の地盤工学，p.23, 1999.
- 13) Mary, P. Anderson and William, W. Woessner : 地下水モデル 実践的シミュレーションの基礎，p.23, 共立出版, 1994.