

# 糸島半島における水循環機構の解析

## ANALYSIS OF THE HYDROLOGIC CYCLE MECHANISM IN ITOSHIMA PENINSULA

野村哲裕<sup>1</sup>・堤敦<sup>2</sup>・神野健二<sup>3</sup>・広城吉成<sup>4</sup>

Tetsuhiro NOMURA, Atsushi TSUTSUMI, Kenji JINNO and Yoshinari HIROSHIRO

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院工学府 都市環境システム工学専攻 (〒819-0395福岡市西区元岡744)

<sup>2</sup>正会員 工博 (株)エスジー技術コンサルタント (〒840-0805 佐賀市神野西4-19-25)

<sup>3</sup>正会員 工博 九州大学教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

<sup>4</sup>正会員 工博 九州大学准教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

Land use change results in an adverse environmental impact on the surface-subsurface water systems. In coastal areas, especially, decrease of groundwater recharge due to land development may induce saltwater intrusion phenomenon. Therefore, it is important to evaluate the hydrologic cycle mechanism in coastal areas. In the present study, coupled groundwater recharge model and quasi three-dimensional two-phase groundwater flow model was applied for the Itoshima peninsula to simulate surface-subsurface water flow. The calculated groundwater levels and the river discharge agree well with the observed values. The amount of surface runoff, actual evapotranspiration, groundwater recharge and groundwater discharge to sea were estimated using water balance analysis. More over saltwater intrusion was estimated by the numerical simulation.

**Key Words :** *hydrologic cycle ,saltwater intrusion , water balance, groundwater recharge model, quasi three-dimensional two-phase groundwater flow model*

### 1. はじめに

近年,地球温暖化の影響と思われる異常気象により,定量的水循環系の不安定化が懸念され,水資源に対する安定的確保の重要性が叫ばれている.特に,島嶼部では沿岸域で地下水塩水化が問題になっている地域も多く,地球温暖化による海面上昇の影響がより地下水塩水化を深刻なものとし,今後は水資源の維持・管理・確保が特に重要となる.本研究の対象地域である福岡県北西部に位置する糸島半島は縄文海進時から鎌倉時代に至るまで,島嶼部であったため,低地部の一部は当時海面下にあった.そのため,地下水の塩水化状況は,現在も島嶼部であった当時と大きな差異はないと推測される.当該地域の農業用水は地下水が主な水源であるため,地下水塩水化は重要な問題である.

糸島半島では現在九州大学新キャンパスの移転事業が進行中である.移転に伴い,新キャンパス周辺を含む糸島半島全域では,今後研究機関や人口が増加し,土地利用形態の変化が予想され,流域の水環境に影響を及ぼすことが懸念される.例えば,土地利用が農地からアスファルトなどの不浸透域になると,雨水によ

る地下水への涵養量が減少し,大雨時に河川のピーク流量が増加する等の問題が生じる.また,糸島半島の約65%の面積を占める志摩町では上水道を100%福岡地区水道企業団に依存しており,渇水時対策として,飲料用水および農業用水の十分な水資源確保とその管理が重要となる.上記のような問題を総合的に検討するためには,蒸発散,表面流出,地下水流動,塩水侵入といった一連の現象を同時に評価する数値モデルを用いなければならない.従来,このようなモデルを用いた水循環解析は,九州大学新キャンパス周辺のみ狭い領域を対象として解析が行われてきた<sup>1)2)</sup>.しかし,今後人口が増加し,都市化することを考慮すれば,将来的に比較や検討を行うために,糸島半島の水循環機構の現状を明らかにする必要がある.そこで本研究では,解析領域を拡大し,糸島半島全域を対象とし,数値モデルは地下水涵養モデルと準3次元淡塩2相地下水流動モデルとの結合モデルを用いた.当該地域の実測値と比較することによって本モデルの妥当性を検討し,糸島半島の水循環機構の現状を明らかにすることを目的とした.

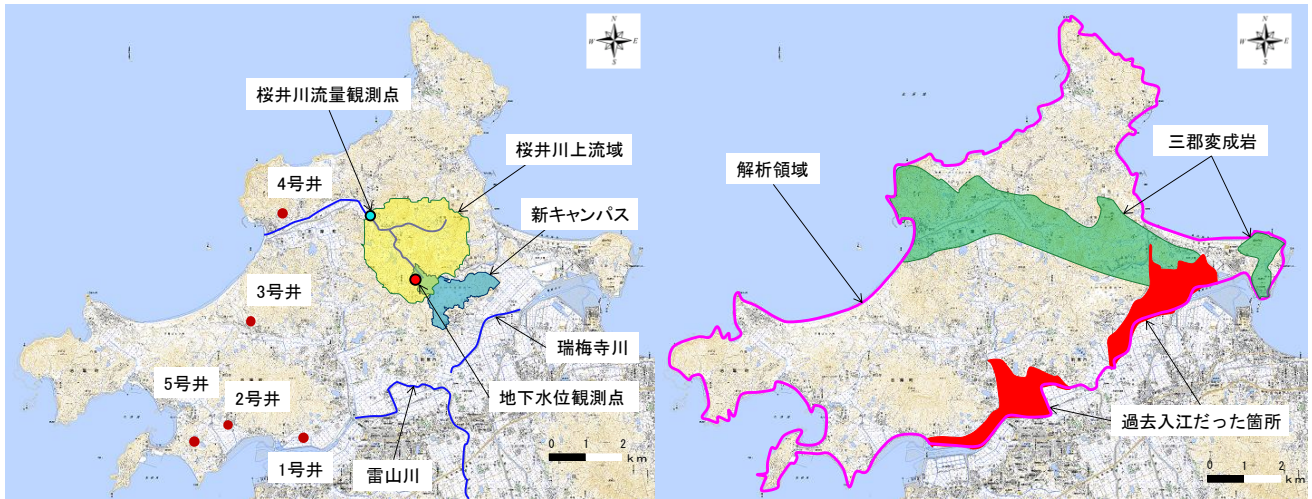


図-1 糸島半島の概要図

## 2. 研究対象領域の概要

図-1 に糸島半島の概要図を示す。糸島半島は福岡県西北部に位置し、玄海灘に突出した半島である。鎌倉時代までは四方を海に囲まれており、その後埋め立てられ、現在のような地形となった<sup>3),4)</sup>。糸島半島および周辺地域の基盤岩は古生代の主に砂質・泥質片岩よりなる三群変成岩であるが、山地・丘陵地のほとんどは、これら三群変成岩に貫入する中生代の花崗岩である。なお、図-1 より、三群変成岩は、糸島半島の上半部を、西北西から東南東に帯状に横切って分布している。また、糸島半島の土地利用は森林が全体の54%、農地が28%、市街地が13%、裸地が4%、水面が1%を占めている<sup>5)</sup>。

また、本モデルの妥当性を検証するため、桜井川の河川流量データを用いた。自記水位計を用いて河川水位を観測し、別途に作成した水位流量曲線により流量を求めた。図-1 に桜井川の河道とその集水域を示す。桜井川は流路長 5.57km、流域面積 12.6km<sup>2</sup> の二級河川である。観測期間は2006年の3月から8月である。なお、本研究では感潮域より上流域を対象とし、その集水面積は5.84km<sup>2</sup> である。さらに塩水侵入の状況を確認するため、1号井から5号井の電気伝導度調査のデータを用いた。

## 3. 使用する数値モデル

本研究で使用した数値モデルは、降雨による地下水涵養量を算出する地下水涵養モデルと淡水相と塩水相の地下水の流れを同時に計算できる準3次元淡塩2相地下水流動モデル<sup>6)</sup>を併用した。ここで言う準3次元とは、淡水相と塩水相にわけて計算することにより、淡塩境界の高さ方向の変化をみることで、その計算格子間隔は50m×50mとし、鉛直方向は、上部の淡水相と下部の塩水相との2

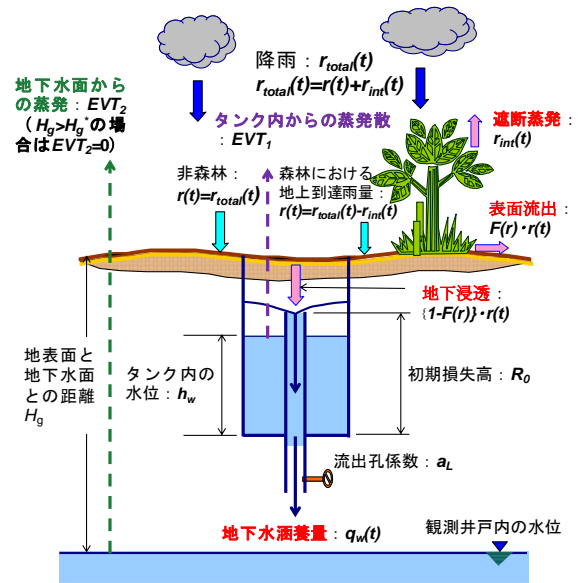


図-2 地下水涵養モデルの概念図

層にわけ、非混合モデルとして扱っている。各格子で土地利用、地盤標高、水理基盤面について整理した。土地利用は国土交通省平成9年1/10土地利用区分図を元に整理した。計算領域内の総格子数は31167個である。また、境界条件は、解析領域の周囲を海域に囲まれているため、淡水位、塩水位ともに平均潮位を与えた。南側の境界は瑞梅時川および雷山川であるが、過去は入江であり、現在も感潮域であることから、海域に面するものとして扱った。なお、計算期間は1991年から2006年とし、降水量および気温データは最寄りの前原アメダス地点のものを使用した。

### (1) 地下水涵養モデル

図-2に地下水涵養モデルの概念図、表-1に土地利用区分毎のパラメータを示す。パラメータは堤ら<sup>7)</sup>の値を参考に決定した。参考文献<sup>7)</sup>では解析領域の大部分が花崗岩であり、一部は片岩である。片岩のデータ数は少なく、今後検討する必要があるが、今回はそのデータを用いた。

表-1 地下水涵養モデルのパラメータ

	土地利用	$n_e$ (-)	$a_L$ (1/hr)	$R_0$ (mm)	$r_{1/2}$ (mm/hr)	$F_\infty$ (-)
(1)	森林	0.2	0.14	17.0	16.0	0.3
(2)	農地	0.2	0.36	8.7	7.7	0.2
(3)	市街地	0.2	0.20	13.0	3.4	0.3
(4)	水面	0.2	0.36	8.7	7.7	0.2
(5)	裸地	0.2	0.29	10.3	4.4	0.3

先ず、降雨は表面流出量  $F(r) \cdot r(t)$ 、地下浸透量  $\{1-F(r)\} \cdot r(t)$  に分離される。ここで  $t$  は時間を表わす。なお、森林の格子では、遮断蒸発量  $r_{im}(t)$  を考慮する。この場合、降雨量を  $r_{total}(t)$  とすると、地表面に到達する降雨量  $r(t)$  は  $r(t) = r_{total}(t) - r_{im}(t)$  となる。土地利用が森林以外の格子では  $r(t) = r_{total}(t)$  となる。そして、地表面に到達した降雨量  $r(t)$  の一部が表面流出量  $F(r) \cdot r(t)$  として直接河川へ流出し、残りが地下浸透量  $\{1-F(r)\} \cdot r(t)$  となる。ここで、表面流出率  $F(r)$  は降雨強度によって変化するものと仮定し、地表面に到達する1時間当たりの降雨量  $r(t)$  を用いて式(1)で表される。

$$F(r) = \frac{r(t)}{r(t) + (r)_{1/2}} \cdot F_\infty \quad (1)$$

なお、 $F_\infty$  は土地利用状況によって、変化するものとし、その値は技術資料<sup>8)</sup>を参考に決定した。 $(r)_{1/2}$  は  $F = F_\infty / 2$  となるときの  $r(t)$  の値である。

次に、タンク内に入った地下浸透量は初期損失高  $R_0$  を超えるまではタンク内に貯留され、水位が  $R_0$  を超えると、流出孔係数  $a_L$  を乗じて、地下水面への涵養が開始される。ここで、 $R_0$  は降雨が地表面から地下水面までの不飽和帯を通過する過程で生じる損失高を表している。降雨がタンク内に貯留されている間はタンク内から、可能蒸発散強度による蒸発散量  $EVT_1(t)$  を考慮する。なお、タンク内が空になった場合、地表面と地下水面との距離  $H_g$  が設定した最低距離  $H_g^*$  よりも小さい場合に限り、地下水面から上方に向かう水分の補給が維持されると考え、後述の式(6)に示す地下水流動モデルの基礎式の吸い込み項である  $EVT_2(t)$  は(2)式で表し、これ以外の場合は常に(3)式で表す。以下に地下水涵養モデルの基礎式を示す。(4)式はタンク内の水位  $h_w(t)$  を表し、(5)式は地下水への涵養量  $q_w(t)$  を表す。

$$EVT_2(x, y, t) = EVT_{gh} - EVT_1(t) \quad (2)$$

$$EVT_2(x, y, t) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dh_w(t)}{dt} = \{1 - F(r)\} \cdot r(t) - q_w(t) - EVT_1(t) \quad (4)$$

$$q_w(t) = a_L \cdot \{h_w(t) - R_0\} \times Y\{h_w(t) - R_0\} \quad (5)$$

ここで、 $EVT_{gh}$ (mm/時)は地表面からの時間当たりの可能

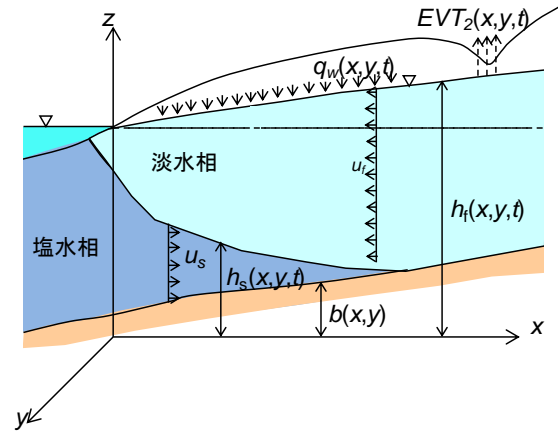


図-3 地下水流動モデルの概念図

蒸発散量である。 $Y\{h_w(t) - R_0\}$  は  $h_w(t) \geq R_0$  のとき1をとり、 $h_w(t) \leq R_0$  のとき0をとるステップ関数である。

#### a) 可能蒸発量の算定

本研究対象域では、蒸発散量の推定に必要な気象要素の測定が行われていないので、ハモン式により可能蒸発散量を推定した。ハモン式<sup>9)</sup>は式(6)により表される。使用した日平均気温データは前原アメダス地点のものである。

$$E_p = 0.14D_0^2 P_t \quad (6)$$

ここで、 $E_p$  は可能蒸発散量(mm/day)、 $D_0$  は日照時間(1日12時間を1とする)、 $P_t$  は日平均気温( $^{\circ}C$ )に対する飽和絶対湿度( $g/m^3$ )である。

#### b) 遮断蒸発量の算定

本研究の解析領域は約半分を森林が占めているため、その水循環系を解析するうえで森林地点による遮断蒸発量は、大きなウェイトを占める。そこで、近藤ら<sup>10)</sup>が全国66地点の気象官署を対象に、1986年から1990年の5年間の日平均気象データを用いて求めた遮断蒸発量の中で、研究対象地域に最も近い福岡県の結果を用いた。この結果を基に、遮断蒸発量  $I_M$  (mm/月) と月降水量  $r_M$  (mm/月) との関係近似し、式(7)のように定めた。

$$\frac{I_M}{r_M} = \frac{48}{r_M + 96} \quad (7)$$

(2) 準3次元淡塩2相地下水流動モデル

図-3に準3次元淡塩2相地下水流動モデルの概念図を示す。地下水流れは準一様流の水平流動と仮定し、全て不圧地下水とした。淡水層と塩水層の2層にわけて計算することで、淡塩境界の高さ方向の変化もみることができ、(9)式の**b**により、地形の起伏も考慮して計算を行った。以下に基礎式を示す。

a) 淡水領域

$$n_e \frac{\partial(h_f - h_s)}{\partial t} = - \frac{\partial\{(h_f - h_s) \cdot u_f\}}{\partial x} - \frac{\partial\{(h_f - h_s) \cdot v_f\}}{\partial y} + q_w(x, y, t) - EVT_2(x, y, t) \quad (8)$$

b) 塩水領域

$$n_e \frac{\partial h_s}{\partial t} = - \frac{\partial\{(h_s - b) \cdot u_s\}}{\partial x} - \frac{\partial\{(h_s - b) \cdot v_s\}}{\partial y} \quad (9)$$

ここで、 $h_f$  は淡水位、 $h_s$  は塩水位、 $n_e$  は有効空隙率、 $b$  は基準面からの水理基盤の高さである。地下水涵養モデルより求めた地下水涵養 $q_w(x, y, t)$ は湧き出し項に、地下水面からの蒸発量 $EVT_2(x, y, t)$ は吸い込み項になる。また、 $u_f, v_f$ は淡水相中における水平方向及び鉛直方向の流速成分、 $u_s, v_s$ は塩水相中における流速成分であり、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} u_f &= -k \frac{\partial \phi_f}{\partial x}, v_f = -k \frac{\partial \phi_f}{\partial y} \\ u_s &= -k \frac{\partial \phi_s}{\partial x}, v_s = -k \frac{\partial \phi_s}{\partial y} \\ \phi_f &= h_f, \phi_s = \frac{\rho_f}{\rho_s} \cdot h_f + \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \cdot h_s \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\rho_f$  : 淡水の密度、 $\rho_s$  : 塩水の密度、 $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$  である。

4. 結果と考察

先ず、本モデルの妥当性を検証するため、桜井川上流域において河川流量と地下水位の変動についての再現計算を行った。透水係数を試行錯誤的に変化させて、各節点毎に適切な透水係数を求め、計算値を算出した。続いて本モデルを用いて水収支解析を行い、妥当性を確認するとともに、糸島半島全域での水収支解析を行った。さらに、海域への地下水流出量を算定し、塩水侵入の状況を確認した。

(1) モデルの妥当性の検証

a) 桜井川上流域における河川流量（比流量）

図-4に桜井川上流域における河川流量の実測値と結合

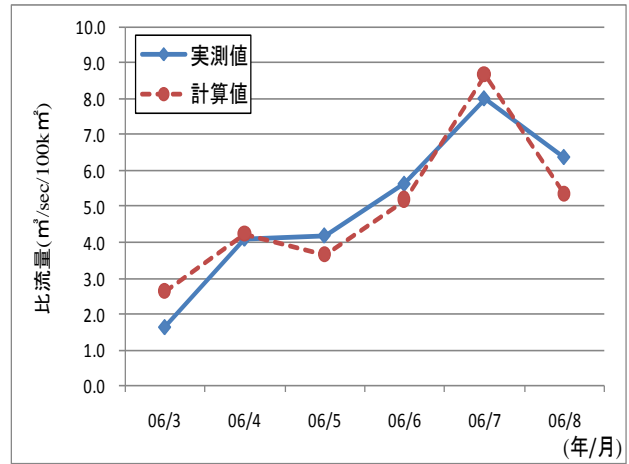


図-4 河川比流量の実測値と計算値の比較

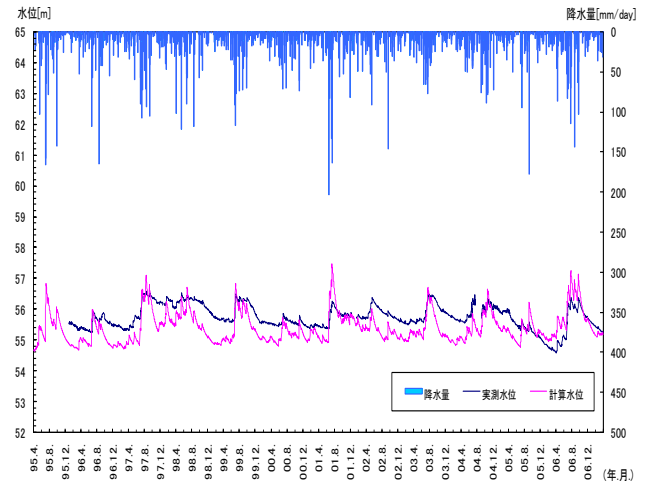


図-5 地下水位の実測値と計算値の比較

表-2 桜井上流域における水収支

対象領域	桜井川上流域	
年降水量：2104mm/年		
ハモン式による可能蒸発散量：818mm/年		
(a) 涵養成分	地下水涵養量： $q_w$	1,398 (8,470,663)
(b) 蒸発散成分	遮断蒸発量： $r_{int}$	221 (1,335,058)
	タンク内からの蒸発： $EVT_1$	310 (1,891,309)
	地下水面からの蒸発： $EVT_2$	52 (317,091)
	実蒸発散量： $r_{int} + EVT_1 + EVT_2$	583 (3,543,458)
(c) 流出成分	表面流出量： $q_r$	177 (1,072,957)
	河床・窪地からの	1,089
	地下水流出量： $Q_{riverout}$	(6,589,964)

単位はmm/年、括弧内の値はm³/年

モデルにより求めた計算値との比較を示す。河川流量を比流量に直し、縦軸が比流量、横軸が年月を表す。河川流量の実測データは2006年の3月から8月まで存在し、それぞれ月流量について整理した。河川流量の計算値 $Q_r$ は式(11)により表される。

$$Q_r = q_r + q_{riverout} \quad (11)$$

$q_r$ は涵養モデルより求まる表面流出量、 $q_{riverout}$ は河床・窪地からの地下水流出量(以下、湧き出し量と表記)を川の全長について加算したものであり、流動モデルにより求まる。図-4より、月によって多少誤差は見られるものの、実測値と計算値は比較的一致している。

### b) 桜井川上流域における地下水位

図-5に桜井川上流域内に存在する地下水位観測点における地下水位の時系列変動と計算値の比較を示す。図-5より、実測値の方が計算値より若干高いが、降雨に対する立ち上がり、水位ともに実測値と概ね一致した。

### c) 桜井川上流域における水収支解析

桜井川上流域を対象として水収支解析を行った。その結果を表-2に示す。ここで、表面流出量 $q_r = F(r) \cdot r(t)$ とすると、地下水涵養量 $q_w$ と $q_r$ はともに涵養モデルより求まる。表-2より、実蒸発散量583mm/年(27.8%)はタンク内からの蒸発量 $EVT_1$ と土地利用が森林の格子でのみ考慮する遮断蒸発量 $r_{int}(t)$ と地下水面からの蒸発量 $EVT_2$ との合計値である。なお、括弧内は降水量に対する割合である。ここで、可能蒸発散量は818mm/年であり、実蒸発散量は、可能蒸発散量に対して71.3%であるため、一般的な値と言われている可能蒸発散量の70%に近い値を示している<sup>11)</sup>。また、計算値の表面流出量177mm/年(8.4%)は、実測値に対して図解法<sup>12)</sup>により求めた値206mm/年(9.8%)と概ね近い値を示した。図解法は、ハイドログラフから表面流出量を求める方法である。この方法は流量を対数にとり、降雨に対して上昇を始める点と流量低減部の第2折点を結んだ線分上の総流量を表面流出量とするものである。以上のように、河川流量、地下水位、水収支の観点から、桜井川上流域における本モデルの妥当性を検討し、良好な結果が得られた。

## (2) 糸島半島における水循環機構の現況

### a) 糸島半島における水収支解析

結合モデルを用いて糸島半島全域を対象に、水収支解析を行った。その結果を表-3に示す。表-3より、表面流出量は198mm/年(9.4%)、実蒸発散量は569mm/年(27.0%)、涵養量1429mm/年(67.9%)となった。ここでも、実蒸発散量は可能蒸発散量の7割に近い値を示している。

また、水収支の観点から、式(10)より海域への地下水流出量 $q_{seacout}$ を推定した。

$$q_{seacout} = q_w - q_{riverout} - \Delta S - EVT_2 \quad (12)$$

ここで、 $q_w$ は地下水涵養量、 $q_{riverout}$ は流動モデルより求まる湧き出し量、 $\Delta S$ は流域内貯留水の変化量、 $EVT_2$ は

地下水面からの蒸発量である。なお、計算の結果 $\Delta S$ は0.135となり、ほとんど0に近かったので0とみなした。式(8)より、 $q_{seacout}$ は221mm/年(18,582,214m<sup>3</sup>/年)となった。これは河川流出量(表面流出量+湧き出し量)と海域への地下水流出量を合わせた、陸域から海洋への全流出量に対して、13.7%に相当する。

### b) 海域への地下水流出量

沿岸域の各格子において地下水流出量 $Q_{seacout}$ を式(13)より算定した。

$$Q_{seacout} = k \cdot (h_f - h_s) \cdot i_x \cdot dy + (h_f - h_s) \cdot i_y \cdot dx \quad (13)$$

ここで、 $k$ は帯水層の透水係数、 $i_x$ はx方向の動水勾配、 $i_y$ はy方向の動水勾配、 $dx$ 、 $dy$ は各格子におけるx、y方向の長さである。その結果、各格子で求めた $Q_{seacout}$ を合計した海域への全地下水流出量は276mm/年(22,992,652m<sup>3</sup>/年)となり、陸域から海洋への全流出量の16.4%に相当した。この値は水収支より求めた地下水流出量 $q_{seacout}$ と比較的近い値だと確認できた。なお、地下水の用水量に

表-3 糸島半島における水収支(2006年)

対象領域		糸島半島全域
年降水量：2104mm/年		
ハモン式による可能蒸発散量：818mm/年		
(d) 涵養成分	地下水涵養量： $q_w$	1,429 (119,358,038)
(e) 蒸発散成分	遮断蒸発量： $r_{int}$	175 (14,576,980)
	タンク内からの蒸発： $EVT_1$	304 (25,540,387)
	地下水面からの蒸発： $EVT_2$	90 (7,548,130)
	実蒸発散量： $r_{int} + EVT_1 + EVT_2$	569 (47,665,497)
(f) 流出成分	表面流出量： $q_r$	198 (16,547,089)
	河床・窪地からの 地下水流出量： $Q_{riverout}$	1,208 (100,775,825)

単位はmm/年、括弧内の値はm<sup>3</sup>/年

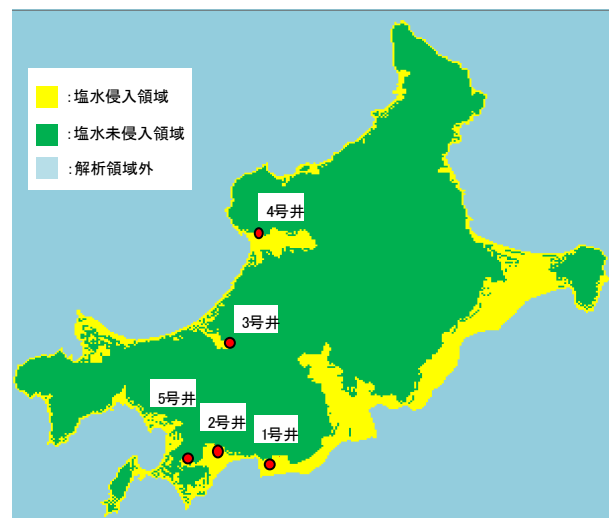


図-6 塩水侵入状況の計算結果

については、堤ら<sup>1)</sup>の値を参考にすると、年間1,500,000m<sup>3</sup>程度と推定される。これは海域への地下水流出量に対して小さいので、無視できるものとした。

### c) 塩水化の検討

図-6に糸島半島における塩水侵入状況の計算結果と1号井~5号井までの位置(赤丸)を示す。図-6で黄色で示した部分が塩水侵入している領域であり、緑の部分は塩水未侵入の領域である。塩水楔の位置は塩水位と水理基盤面が等しくなった格子とした。志摩町が過去に行った電気伝導度調査によると、5号井以外は塩水化しているとの報告がある<sup>13)</sup>。今回の計算結果は5号井以外が塩水化しており、塩水化している井戸は計算結果と一致している。また、標高が低く沖積層が広がっているところでは比較的塩水化が進行しているため、今後も注意深く見守っていく必要がある。

## 5. まとめ

本研究は地下水涵養モデルと準3次元地下水流動モデルとの結合モデルを用いて、本モデルの妥当性の検証、糸島半島の水循環機構の現況を明らかにすることを目的に行った。その結果、以下のような知見が得られた。なお、計算結果は全て水頭で表している。

- (1) 桜井川上流域における2006年の3月から8月までの河川流量の実測値の月データと計算値は月によって多少誤差があるものの、比較的一致した。
- (2) 桜井上流域内に存在する地下水位観測点の実測値の日データと計算値は実測値の方が計算値より若干高く推移しているが、概ね一致した。
- (3) 結合モデルを用いて水収支解析を行った結果、桜井川上流域における表面流出量177mm/年、地下水涵養量1398mm/年、実蒸発散量583mm/年となり、表面流出量は実測値に対して図解法により求めた値206mm/年と同程度の値を示し、実蒸発散量も一般的な値といわれる可能蒸発散量の7割に近い値であった。
- (4) 結合モデルを用いて水収支解析を行った結果、糸島半島における表面流出量198mm/年、地下水涵養量1429mm/年、実蒸発散量569mm/年となった。さらに水収支の観点から海域への地下水流出量を推定したところ、221mm/年となった。
- (5) 流動モデルを用いて、沿岸域での各格子において海域への地下水流出量を算出したところ、276mm/年となった。この値は水収支より求めた地下水流出量221mm/年と比較的近い値となった。
- (6) 塩水侵入について検討した。計算結果はNO.1号からNO.5号井までの井戸の中、NO.5を除く、4本の井戸で地下水の塩水化がみられた。この結果は電気伝導度調査と一致した。また、低平地では塩水化が進行

しているため今後注意深く見守る必要がある。

(1)~(3)より、桜井川上流域において河川流量、地下水位を実測値と計算値を比較し、水収支の観点から表面流出量、実蒸発散量を検討した結果、良好な値が得られ本モデルの妥当性が確認できた。

(4)~(6)より、糸島半島における表面流出量、地下水涵養量、実蒸発散量、湧き出し量、さらに海域への地下水流出量を明らかにすることで糸島半島の水循環機構の現況を明らかにした。また、塩水侵入の計算結果も電気伝導度調査の結果と一致した。

今後は、糸島半島は都市化することが予想されるため、土地利用形態を変化させ、流出成分の変化について予測を試みたい。

### 参考文献

- 1) 堤敦, 神野健二, 森牧人, 広城吉成: 表流水-地下水水循環の解析-九州大学新キャンパス建設地を対象として-, 土木学会論文集, No.747/II-65, pp.29-40, 2003.
- 2) 堤敦, 神野健二, 森牧人, 広城吉成: 遮断降雨を考慮した雨水の地下水涵養モデル, 水工学論文集, 第47巻, pp.277-282, 2002.
- 3) 馬場崎正博, 宋豚方, 河口洋一, 朴崎燦, 島谷幸宏: 福岡市今津干潟の歴史的変遷と再生について, <http://www.pref.shiga.jp/d/biwako/symposium2006/files/6.pdf>
- 4) 前原市: 「伊都検定」, <http://www.city.maebaru.fukuoka.jp/city/shoutoku/itoken>.
- 5) 村上拓彦: 糸島半島の土地利用: 九州大学教育研究プログラム・研究拠点形成プロジェクト「糸島地域における健全な水循環系の構築(平成15-16年)報告書(代表 神野健二)」
- 6) 上田年比古, 藤野和徳, 平野文昭, 神野健二: 地下水塩水くさびの侵入に関する数値解, 水道協会雑誌, 第561号, pp.21-28, 1981.
- 7) 堤敦, 才田進, 神野健二: 風化花崗岩地帯における地下水涵養モデルのパラメータの特性, 水工学論文集, 48巻, pp.379-384, 2004.
- 8) 文部科学省大臣官房文教施設部技術課: 平成9年3月 文部省土木設計資料, p.47, 1997.
- 9) 水理公式集 平成11年版, 第1編, p18.
- 10) 近藤純正, 中園信, 渡辺力, 桑形恒男: 日本の水文気象(3)-森林における蒸発散量-, 水文・水資源学会誌, 第5巻, 4号, pp.8-18, 1992.
- 11) 社団法人 農業土木学会 改訂五版 農業土木ハンドブック, p852.
- 12) 丸山利輔, 三野徹: 地域環境水文学, 朝倉書店, pp.62-63, 1999.
- 13) 志摩町全域の水源地調査業務 総括報告書, 1988.

(2009. 9. 30投稿)