

真鶴地域の水文地質と地下水収支

長瀬和雄¹、粟屋 徹¹、横山尚秀¹、杉山茂夫¹、上田敏夫²、
井上博明²、藤崎克博³、新藤静夫⁴、大木靖衛⁵

Hydrogeology and groundwater balance
in Manazuru district

Kazuo NAGASE, Toru AWAYA, Takahide YOKOYAMA, Shigeo SUGIYAMA, Toshio UEDA,
Hiroaki INOUE, Katuhiro FUJISAKI, Shizuo SHINDO and Yasue OKI

Abstract

The Manazuru district located at the eastern foot of the Hakone volcano is dominated by the steep slope and valley of the Iwasawa river bounded by the ridges and the Manazuru peninsular. The population of Manazuru is about ten thousands, most of which are working for fishing industry, stone mining and manufacturing. Recently, many tourist facilities of hotels, resort apartments and restaurants have been constructed in the coastal area. The waterworks bureau supplies well water to the area. During holiday seasons the bureau have to operate excessive discharge of the groundwater due to large water need that might cause the intrusion of saline water into the fresh water system. Evaluation of sustainabl discharge of groundwater strongly demands detail undesanding of the groundwater system based on hydrogeology of the volcano and the numerical simulation of the groundwater balance.

By means of the electrical logging three major aquifers are recognized in the lava flows classified as OS₂ after Kuno's nomenclature. Rainfall of the area averages 2,045 mm a year. The run-off coefficient of the Iwasawa River is 13%, comparatively small amount of which indicates that the infiltration capacity of the area is very large. Immediately after rainfall, the rainwater infiltrates into the second aquifer in OS₂ lava flows. The groundwater flows very rapidly through the second aquifer out to Sagami Bay. The concentration of tritium in the groundwater is nearly the same as in the rainwater. After

¹ 神奈川県温泉地学研究所 神奈川県足柄下郡箱根町湯本997 〒250-03

² サンコーコンサルタント株式会社 東京都江東区亀戸1-8-9 〒136

³ 地質コンサルタント 東京都日野市多摩平4-11 〒191

⁴ 千葉大学理学部 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 〒263

⁵ 新潟大学積雪地域災害研究センター 新潟県新潟市五十嵐二ノ町8050 〒950-21

神奈川県温泉地学研究所報告 第25巻、第1号、19-30、1994

rainfall, a large quantity of groundwater must flow through the aquifer in the Iwasawa River area. On the other hand, in the Ridge-Peninsula area, the quantity of recharge water is so small that groundwater flow is very low. Therefore, the water table is immediately affected by tidal variations of Sagami Bay, followed by salt water enters these aquifers up to several hundreds of metres from the coast. At such times, the concentration of Cl^- is over several hundred mg/l in the second and the third aquifers in OS₂.

Behaviour of the groundwater flows have been modelled in the Valley area and the Ridge-Peninsula area. Simulations were computed for several cases. Under the Iwasawa River Valley area, in the worst cases in the first aquifer, salt water intrudes 500m inland. In a year with average precipitation, however, about 1.65×10^6 m³/year fresh groundwater in the second aquifer flushes salt water out and emerges via springs in the bottom of Sagami Bay. In the Ridge-Peninsula area, salt water intrudes into the second and third aquifers due to insufficient freshwater recharge.

1. はじめに

真鶴町は箱根古期外輪山の東麓に位置している。火山体は地下水の宝庫と言われており、真鶴地域の地下水については、火山体の地下水として非常に豊富であるという見方と、それを否定する見方がある。地下水の量が少ない見方の根拠として、水井戸掘削時に深さ100mの孔底のビットの先で、火花が飛び散るのが見られたり、相模湾の海洋潮汐の影響が海岸から1km内陸で明白にみられ、海水面と地下水面の標高差が殆ど無いなどの事実が報告されている。真鶴町は生活用水等を総て地下水に依存している。筆者等は、1989（平成元）年から1992（平成4）年の間、真鶴地域の地下水調査の資料の収集、整理、調査の実施、解析、取りまとめに携わってきた。水収支調査の手法により、第四紀中期の箱根火山外輪山溶岩においても、地下水の量は多いが、透水性がよく、水循環が非常に早いという火山体の地下水の性質が明らかになったので、ここに報告する。この調査は三木邦之町長はじめ、町職員の方々に負うところが大きく、ここに感謝の意を表する。

2. 水文地質

調査地域は箱根古期外輪山の東麓に位置し、地形から岩沢川の谷地域と、星ヶ山から真鶴半島に続く尾根・半島地域の2地域に区分される。この地域に分布する古期外輪山を形成する岩石は、久野（1966）により OS₂と命名されている。その後、この OS₂は、神奈川県教育委員会（1980）により、上位の最大30～40mの厚さの安山岩質溶岩類（OS₃）と、残りの複数の未区分の溶岩流群と火山碎屑物および岩脈等（OS₂）に二分されている（図1）。この地域では、OS₂の溶岩流群の境界部分、岩さい状溶岩部分に透水性の良い所があり、帯水層となっている。また、半島の地下には寄生火山星ヶ山に向かう規模の大きな岩脈の存在が確認されていて、尾根・半島地域の地下水に海水の影響を強く与える等この地域の地下水の流れに大きな規制を加えている。

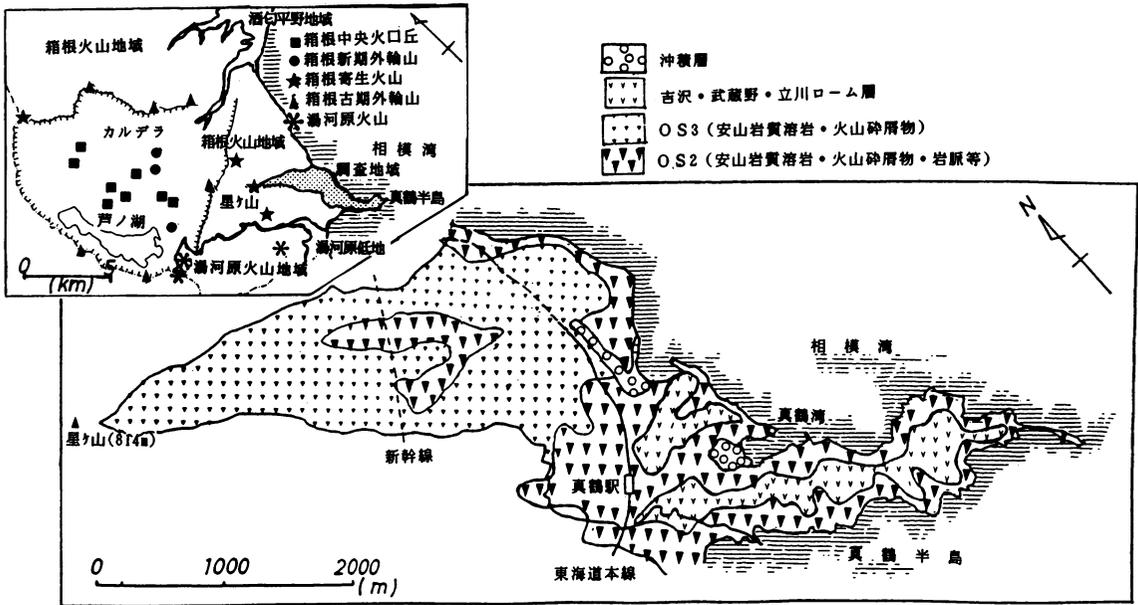


図1 真鶴地域の地質図
Fig. 1 Geological map of Manazuru district

図3は調査井戸 (No.107、図2) の電気検層結果 (比抵抗検層、温度検層、電導度検層) である。この井戸では岩さい状溶岩とその境界部分が帯水層となっている。水温11℃の冷たい地表水を注入しながら行う温度検層の結果から標高-60~-70m (深度108~118m) 付近に、注入水が岩石の中に浸透していく透水性のよい部分 (第二帯水層) があることがわかる。揚水試験により、この部分から1m前後の水位低下で1,000ℓ/minを超える地下水 (電導度1,000μS/cm前後) が揚水される (透水係数 7×10^{-2} cm/sec)。注入前の孔内の水温変化から、標高2~-9m (深度46~57m) のローム混じり火山礫層も、帯水層と考えられる (第一帯水層)。また、電導度検層の結果から、深度120~130m (標高-72~-82m) の岩さい状溶岩には塩分を高濃度に含んだ、電導度3,400μS/cmに達す

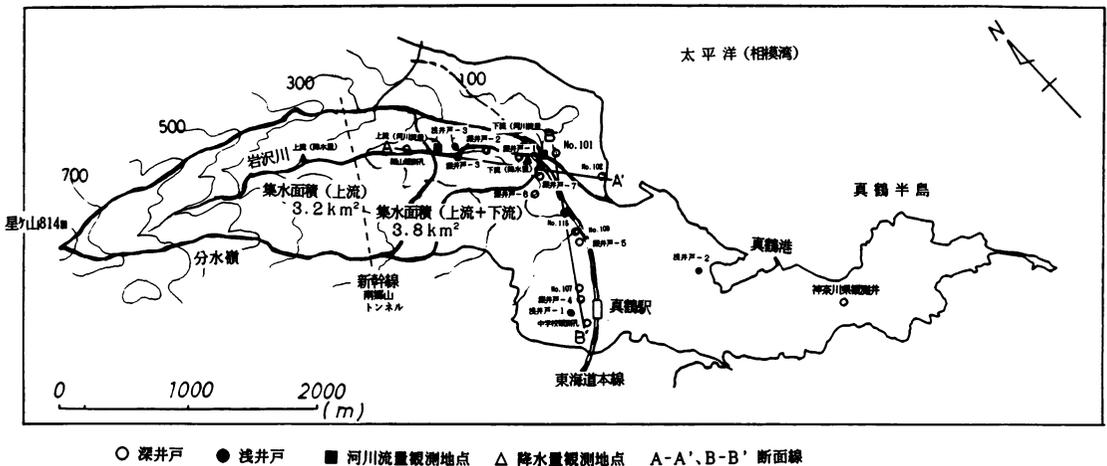


図2 調査位置図
Fig. 2 Map of observation points

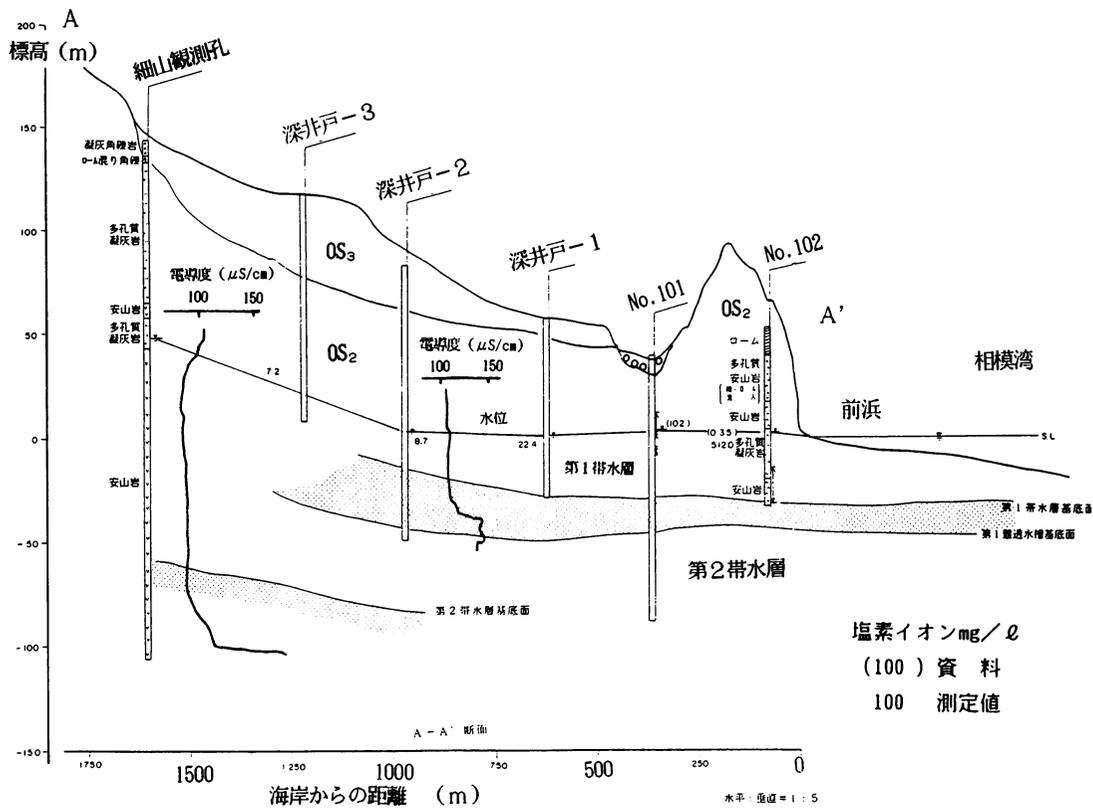


図4 水文地質断面図A-A'
Fig. 4 Hydrogeological section A-A'

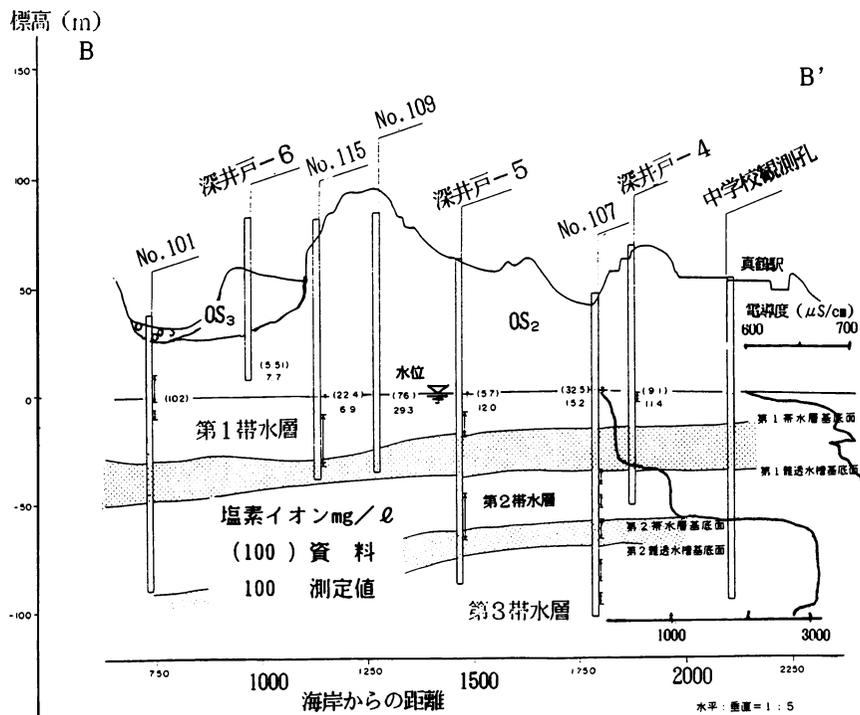


図5 水文地質断面図B-B'
Fig. 5 Hydrogeological section B-B'

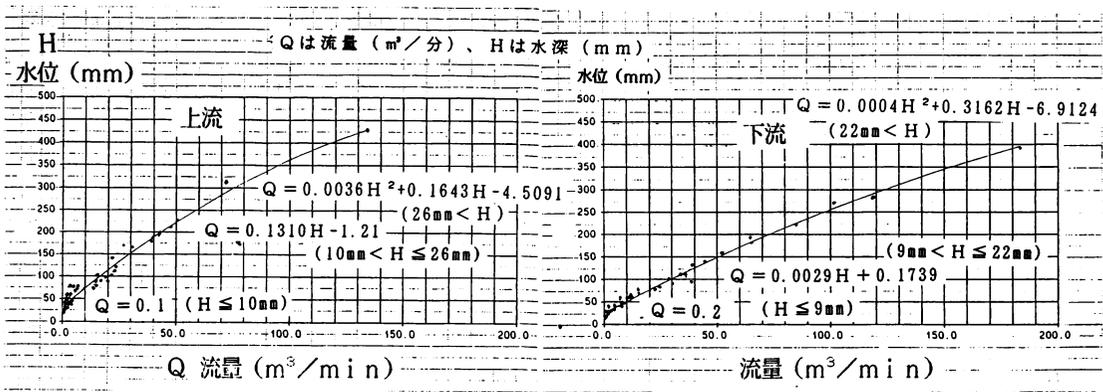


図6 H-Q曲線
Fig. 6 Hydrograph of Iwasawa River (H-Q line)

な流出特性を示す。岩沢川流域の地質から判断し、この地域の地下水の流動解析は、大略OS₂の地下水を論ずればよい。河川流量の変化からハイドログラフの分離を行い、基底流量を求めると11万m³/年となる。

また、1991年1月1日から12月27日まで103回の降水について流出率を計算したところ、13%となって、予想外に小さな値となった。

図8は、1991年6月から12月の期間の細山観測孔、深井戸-2、中学校観測孔の水位変化(図2に位置、図4、5に深さ示す)、降水量、真鶴湾の潮汐、気圧(温地研)を示す。地下水の水位変化は

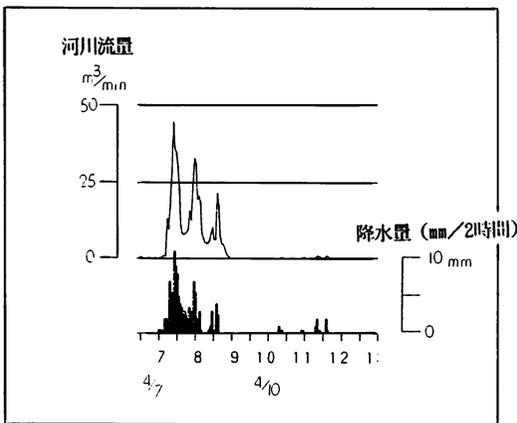


図7 岩沢川の流出特性
Fig. 7 Discharge hydrograph of Iwasawa River

表1 トリチウム濃度
Table 1 Concentration of Tritium in well-water (16th, May, in 1991)

採水地点	トリチウム濃度	
	pCi/g	TR
深井戸-1	30.7±0.6	9.5±0.2
深井戸-2	24.2±0.5	7.5±0.2
深井戸-3	29.6±0.5	9.1±0.2
深井戸-4	36.1±0.6	11.1±0.2
深井戸-5	33.1±0.6	10.2±0.2
深井戸-6	23.4±0.5	7.2±0.2
深井戸-7	13.8±0.4	4.2±0.1
浅井戸-1	14.2±0.4	4.4±0.1
浅井戸-2	31.2±0.4	9.8±0.2
浅井戸-3	20.0±0.4	6.2±0.2
南郷山トンネル湧水(湯河原側)	28.7±0.5	8.9±0.2

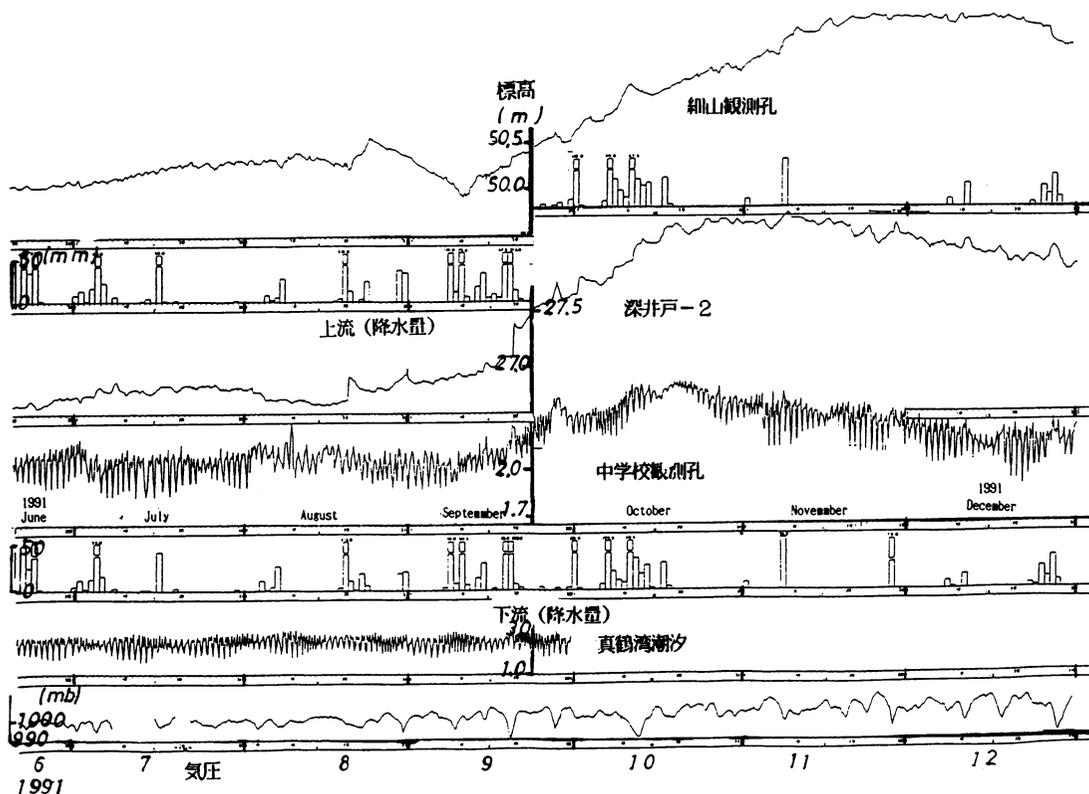


図8 地下水位、降水量、真鶴湾潮汐、気圧の観測結果

Fig. 8 Observations of water table, precipitation, Manazuru Bay tides and atmospheric pressure

10月から11月を最高とする年周期の変化をする。この水位変化のパターンは、神奈川県下の他の地域の深井戸の水位変化のパターンとほぼ一致する。尾根一半島地域にある中学校観測孔の水位変化は、真鶴湾の潮汐の影響を直接反映した変化をする。これに対し岩沢川流域の細山観測孔、深井戸-2の水位には潮汐の影響は全く現れない。岩沢川地域が地下水の集まる水文地質構造であるのに対し、尾根一半島地域は地下水が発散する構造であることに起因する。表1に地下水のトリチウム濃度（1991年5月16日採水）を示す。それらの濃度は、深層地下水および浅層地下水とも4～10TRの間であって、現在の降水の値と有意の差はない。

神奈川県西部地域における降水量の観測は、小田原（気象庁）、箱根（気象庁）、湯河原消防署、小田原城カントリークラブ、湯河原カントリークラブで行われている。平均降水量は小田原で2045mm/年、1/20確率で起きる渇水年の降水量は1387mm/年である。

ソンスウエイト法でこの地域の蒸発散量を求めると、798mmとなる。図9、10は、これらのデータをもとに作成した岩沢川流域の平水年と渇水年の水収支モデルである。

4. シミュレーション

水収支調査のデータに基づいて、この地域の地下水の塩水化シミュレーションを行った。シミュレーションはダルシー流と質量保存則に基づいた基本式、

$$\frac{\partial (\epsilon \rho)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{K \rho}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho g \right) \right] - q \rho + R \rho^* \quad (i, j = x, y, z)$$

ただし、 P ：流体の圧力 t ：時間 ϵ ：有効間隙率 ρ ：流体の密度

ρ^* ：涵養水の密度 K ：透過度 ($k = K \rho g / \mu$) μ ：流体の粘性係数

g ：重力加速度 R ：涵養強度 q ：揚水強度 k ：透水係数

浸透流速 q_i は、ここで計算された地下水頭から、ダルシーの法則により

$$q_i = - \frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho g_j \right) \quad (i, j = x, y, z)$$

これから、平均間隙流速 v_i は

$$v_i = \frac{q_i}{\epsilon} \quad (i = x, y, z)$$

以上の地下水流動計算で、平均間隙流速 v_i を求めたあと、塩素イオン濃度分布基本式

$$\frac{\partial (\epsilon \rho c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\epsilon \rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial (v_i \epsilon \rho c)}{\partial x_i} + R \rho^* c^* - q \rho c \quad (i, j = x, y, z)$$

ここで、 c ：塩素イオン濃度 c^* ：涵養水塩素イオン濃度

D_{ij} ：分散係数

を解いて、塩素イオン濃度を計算した。

計算は、シミュレーション対象地域を図11に示すように岩沢川地域と尾根一半島地域に分け、図12、図13に示すようなモデルにより行った。水収支調査で明らかになったように、平水年で $1.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ /年に達する大量の地下水が海底へ流出している、帯水層の透水性は大きい。シミュレーションによっても、透水性（透水係数）は $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ($4 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$) と大きな数値を使わざるを得ず、火山岩帯水層の透水性の大きい事を裏付けた。

図14はシミュレーションの予測結果で、現在の岩沢川地域の地下水揚水量 $1,191 \text{ m}^3$ /日、尾根一半島地域の地下水揚水量 205 m^3 /日 を続けた場合の平水年および20年に一度の確率でおきる渇水年における岩沢川地域と尾根一半島地域の地下水の塩素イオン濃度の分布である。渇水年における塩素イオンの高濃度水塊の内陸への進行は、岩沢川地域、尾根・半島地域とも、平水年に比べ、それほど顕著ではない。図15は、計画揚水量（岩沢川地域 $2,159 \text{ m}^3$ /日、現況比181%、尾根一半島地域 550 m^3 /日、同268%）で揚水した場合および岩沢川地域の水道水源で最大の揚水（ $3,290 \text{ m}^3$ /日、276%）をした場合の平水年と渇水年の塩素イオン濃度の分布の予測結果である。岩沢川地域は、計画揚水量の場合であっても計算では水道水源（深井戸-1）まで塩水化の影響はおよばない。しかし、水道水源で施設能力いっぱいの揚水をする、渇水年には、水道水源（深井戸-1）の第一帯水層に、塩水の漸移帯が到達する計算結果となった。

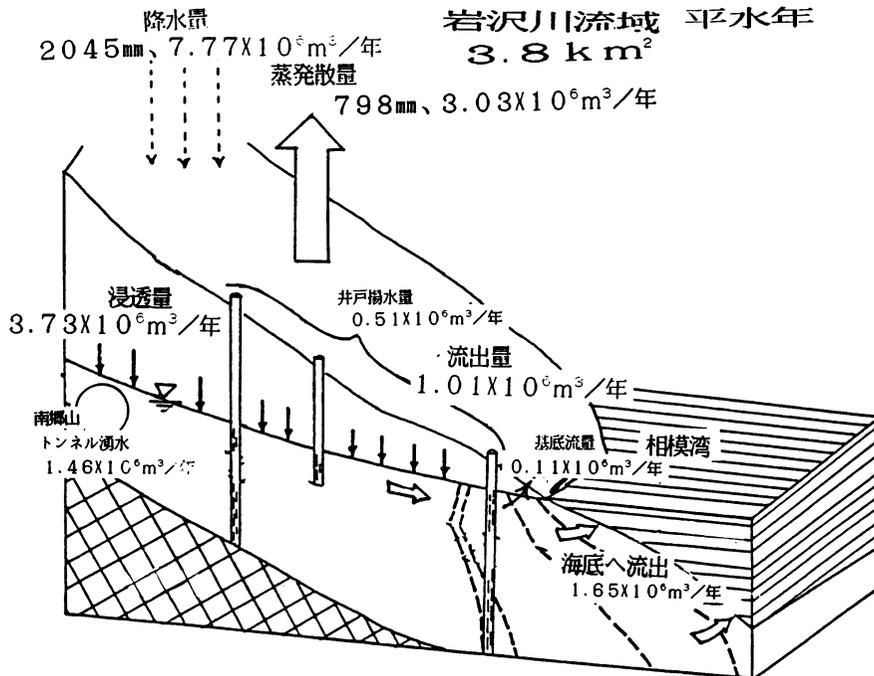


図9 岩沢川流域の水収支（平水年）

Fig. 9 Groundwater balance in a usual precipitation year in the Iwasawa River area

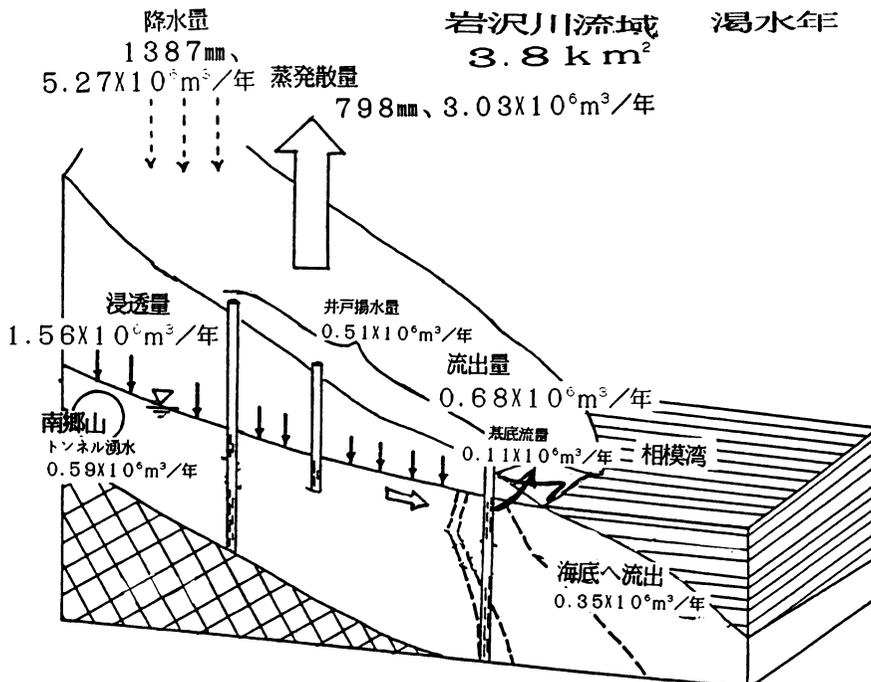


図10 岩沢川流域の水収支（渇水年）

Fig.10 Groundwater balance in the driest year in the past 25 years in the Iwasawa River area

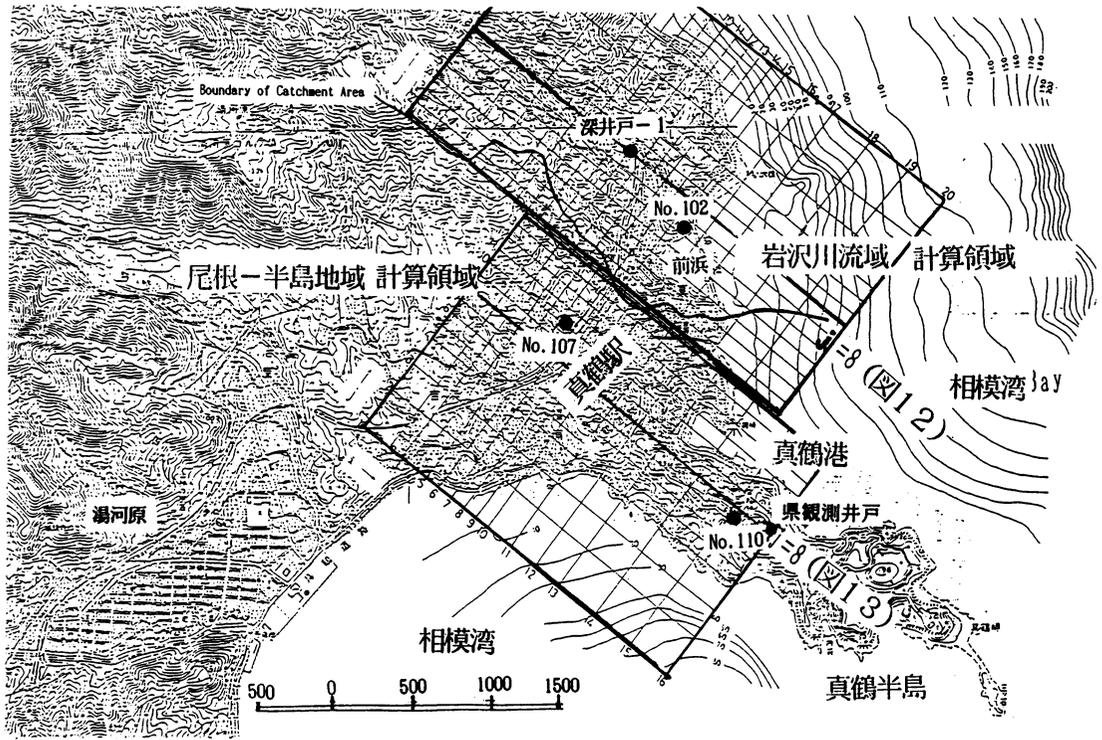


図11 地下水シミュレーションモデルの範囲
Fig.11 Simulation Model area

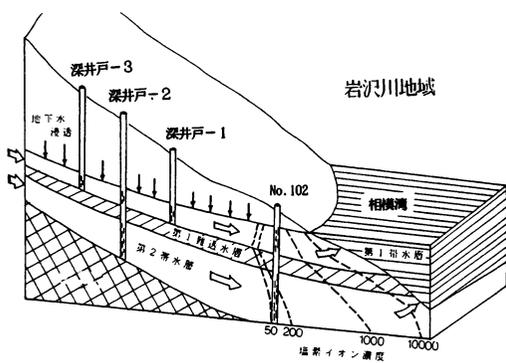


図12 岩沢川地域の塩素イオン濃度分布模式図
Fig.12 Iwasawa River area chloride density distribution

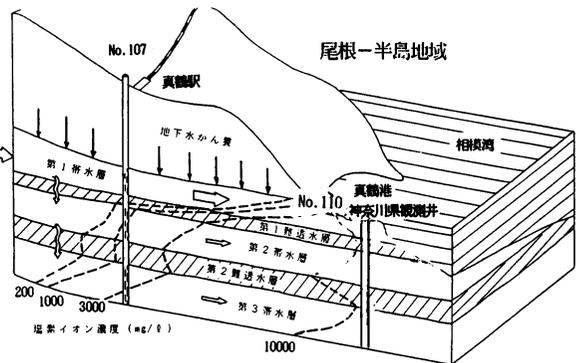


図13 尾根一半島地域の塩素イオン濃度分布模式図
Fig.13 Ridge-Peninsula area chloride density distribution

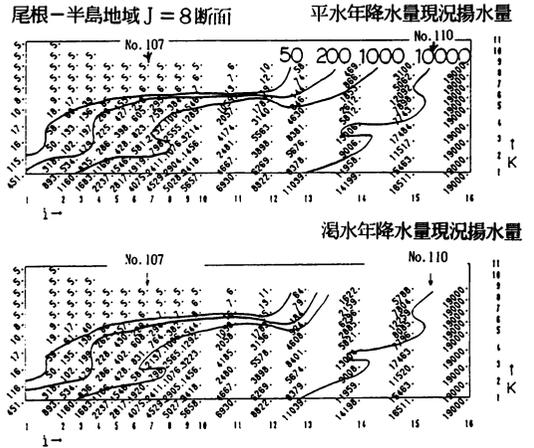
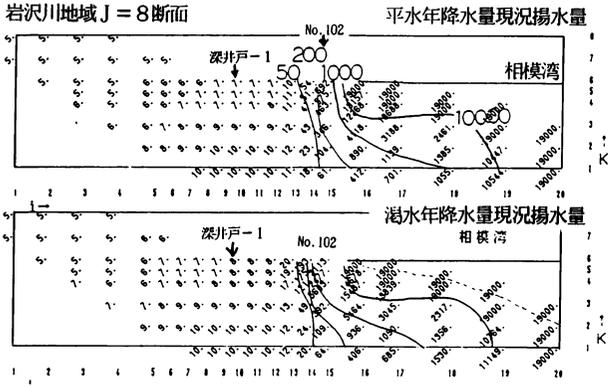


図14 シミュレーションによる予測結果比較図
(現在の揚水量で地下水を使用している場合
の塩素イオン濃度、mg/l)

Fig.14 Result of simulation in section J8
(Using present water yield)

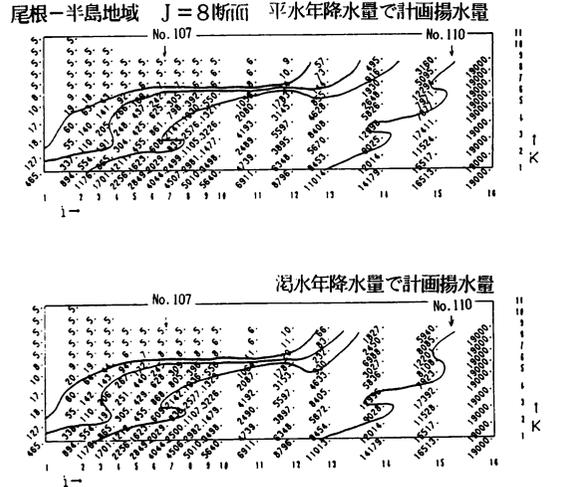
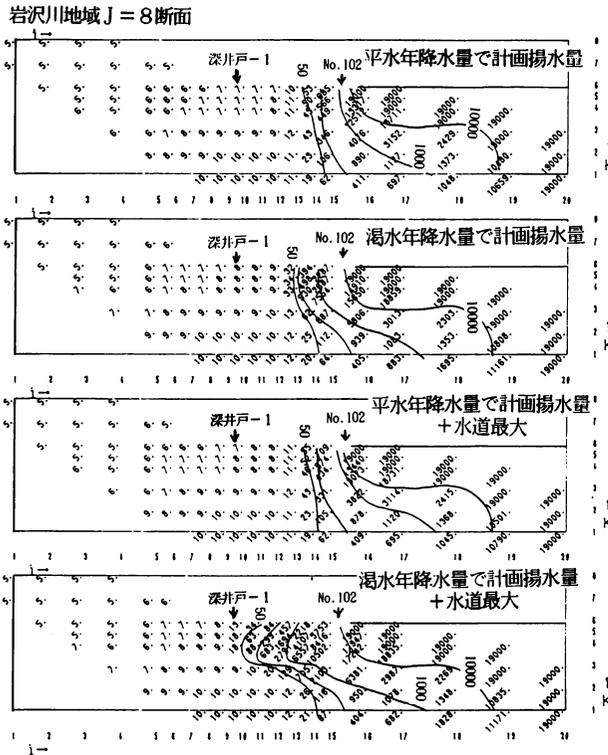


図15 シミュレーションによる予測結果比較図
(計画揚水量で地下水を使用する場合
と水道施設100%稼働した場合の
塩素イオン濃度、mg/l)

Fig.15 Result of simulation in section J8
(Fully utilizing water plant)

5. まとめ

- (1) 揚水試験や電気検層の結果、箱根古期外輪山溶岩 OS₂は、岩さい流や溶岩の一部で透水係数が、 7×10^{-2} cm/sec と、大きな値を示した。シミュレーションによっても透水性の大きいことが確かめられ、透水係数が最も大きなセルでは、 4×10^{-1} cm/sec を使用した。
- (2) 水収支調査の結果、平水年における地下水の海底への流出は 1.65×10^6 m³/年にも達することが計算された。
- (3) 水収支シミュレーションの結果、20年に1度の確率で起きる渇水年には、計画揚水量に水道施設目いっぱい揚水量が重なると、地下水の塩水化が町の水源井におよぶ危険が計算された。この地域では、水需要の全てを地下水に依存しているため、今後、地下水の利用量がいろいろな形で増大することが予想されるので、この地域の地下水の保全のため、地下水揚水量や塩素イオン濃度、地下水位の変化等の地下水環境の把握が必要である。また、岩沢川流域の地下水は、今回の調査で滞留時間が短いことが確かめられ、利用することのできる地下水量が多いとはいえないので、地下水の開発や利用を規制する必要がある。

参考文献

久野 久(1966)熱海図幅地質説明書、地質調査所。

小鷹滋郎、平野富雄(1976)真鶴町における地下水調査孔の掘さく、神奈川温研報告、7巻、3号、105-114。

神奈川県教育委員会(1980)神奈川県地質図。

真鶴町地下水資源等総合調査委員会(1990)真鶴町地下水資源等総合調査委員会報告書。

真鶴町地下水保全調査委員会(1992)真鶴町地下水保全調査報告書。

伊藤 彰(1992)真鶴町の地下水事情、地下水技術、34巻、10号、1-22。

NAGASE K., AWAYA T., YOKOYAMA T., and SUGIYAMA S.(1993)Groundwater flows in andesite rocks - a case study of the Old Somma in the Hakone mountainlands、Memoires of the XXIVth Congress International Association of Hydrogeologists, 274-280.

粟屋 徹、長瀬和雄、横山尚秀、杉山茂夫、平野富雄(1993)真鶴の地下水の水質と水系区分、日本地下水学会秋季講演会講演要旨。

長瀬和雄、粟屋 徹、横山尚秀、杉山茂夫、上田敏夫、井上博明、藤崎克博、新藤静夫、大木靖衛(1993)箱根古期外輪山(真鶴地域)の地下水、日本地下水学会秋季講演会講演要旨。