日本列島における海底地下水湧出量の分布

伊藤 成輝^{*1}・丸井 敦尚^{*2}

Distribution of quantities of submarine groundwater discharge on the Japanese Islands

Narimitsu ITO^{*1} and Atsunao MARUI^{*2}

Abstract

Submarine groundwater discharge (SGD) is considered to be the sustainable water resource, and also the important factor of the water cycle. Methods to evaluate the quantity of SGD can be divided into mathematical analysis and in-site survey, and in the case of wide area study, like the Japanese Islands, the macro evaluation by perennial water balance budget is suitable for the initial study. However, the evaluation of runoff using the River Discharge Year Book of Japan has several problems such as the uncertain accuracy of measurement, the existence of an inconsiderable area between the lowest flow gauge and river mouth, and unavailability of river flows in basins except for Class A rivers. In this paper, we calculated perennial water balances of 10 years in 204 regions on the Japanese Islands. It was the first time to make a distribution map of SGD in Japan. As there existed 144 regions where the flow data were insufficient, the runoff in each area was estimated by the multiple linear regression analysis between the river flows and the recharges, divided by the geology of the basins where it was judged to be similar geologically by cluster analysis using area ratios of 43 geological classifications.

Key words: coastal area, SGD, GIS, multiple linear regression analysis, cluster analysis
キーワード：沿岸域, SGD, GIS, 重回帰分析, クラスタ分析

I. 序 論

海底地下水湧出 (Submarine Groundwater Discharge: SGD) の量 (以下, SGD 量) は, 河川による流出の数%~10%程度と世界的に推定されており, 水循環を形成する重要な要素である (谷口, 2001)。また, 近年の都市化や地球温暖化によって, 長期的な渇水が懸念されており (Watson et al., 1998), SGD が有望な水資源として位置付けられるようになってきた。すなわち, SGD 量

を種々の時間的・空間的スケールで評価する必要性が出てきた。

SGD 量の評価法は, 数値解析と現地調査に大別できる。ただし, 評価法の選択にあたっては, 一般の自然地理現象と同様に, 評価対象とする現象に最も適したスケールを選択することが重要で, 時間的・空間的スケールを細かく取れば取るほど現象の本質が明らかになるとはいえない (菅原, 1972)。よって, 日本列島のような広域を対象とした場合, マクロ的な評価が可能な水収支に

*1 産総研 地質調査総合センター (株式会社ニュージェック) AIST, Geological Survey of Japan (NEWJEC Inc.)

*2 産総研 地質調査総合センター AIST, Geological Survey of Japan

よる評価が最初のステップとなる。水収支の評価期間を1年として、深部浸透と貯留量変化を無視すれば、SGD量は年間水収支式(1)で算出できる(Zektser and Dzhamalov, 2006)。

$$SGD = P - E - R \quad (1)$$

ここに、P: 降水量, E: 蒸発散量, R: 流出である。

年間水収支法による既往の広域研究として、Pluhowski and Kantrowitz (1964) がニューヨーク州ロングアイランドのサフォーク郡パビロンアイスリップ地区でSGD量を44mm/yrと評価した例がある。国内でも、安倍川流域で175mm/yr、熊本県不知火で430 - 624mm/yrとした研究例がある(Taniguchi et al., 2005; Taniguchi et al., 2006)。

しかし、式(1)は、いずれの項も誤差を含んでいる。実測値が得られるのはPとRだけであり、Eは実測値が得られない。Rについては流量観測所が河口部に少ないという根本的問題がある(梶根, 1987)。これら各項を独立に推定する限り、年間水収支法で流域単位のSGD量を高精度に評価するには限界がある。しかし、複数の流域を対象に、P, E, Rを各流域で一定の方法で評価し、それらの誤差が正規分布すれば、式(1)で求まる「SGD」なる値の誤差も正規分布すると考えられる。すなわち、各流域でSGD量の区間推定を示せば、流域間の相対比較が可能である。

全国を対象に、P, E, Rを比較可能な手法について概観すると、Pは、気象庁による全国約1300地点のアメダス再統計値とティーセン法(Thiessen, 1911)により、任意領域の値を全国で統一的に与えることができる。ただし、アメダスのような網羅的な観測システムであっても、観測点の密度と観測精度が有限である以上、真のPを求めることはできない。

Eは、ソーンスウェイト法(Thorntwaite, 1948)による可能蒸発散量に蒸発散比(例えば0.7)を乗じた値とすれば、Pと同様にアメダス再統計値から、任意領域で統一的に評価できる。わが国におけるソーンスウェイト法による月値は、季節的

に冬から春にかけて過小、夏から秋にかけて過大になるが、年値は小型蒸発計蒸発量の約0.7で妥当な値を示すとされる(梶根, 1987)。ソーンスウェイト法は、主要な入力パラメータが月平均気温であり、Eを推定する他の手法(例えば、ペンマン法やモートン法)に比べて便宜的で低精度とされる。しかし、横浜と鹿児島における予測値の差をこれら3手法で比較すると、ソーンスウェイト法とモートン法がほとんど同じだったが、ペンマン法が約50mm/yr大きくなった研究例がある(近藤, 1994)。入力パラメータ数が多いペンマン法やモートン法は、ソーンスウェイト法より高精度の予測法であるが、地域間の相対比較で必ずしも優位でないことを示している。ペンマン法やモートン法は、例えば風速のような気温以外のパラメータが必要であり、ソーンスウェイト法に比べて、それらの観測密度が低くなることもその一因となる。

Rに関するアメダスに匹敵する全国規模のデータベースは、国土交通省の流量年表であり、一級河川における全国約380ヶ所の年平均流量を得ることができる。これらのうち最下流の観測流量を用いて、一級河川103流域のRを算出し、流域毎の(P-E)とともに、式(1)に代入すると、103流域のSGD量は-1716 ~ 546mm/yrに分布し、全国での面積加重平均が-310mm/yrとなった(伊藤・丸井, 2007)。SGD量が見かけ上負の値を示したのは、Rが過大評価された可能性を表しており、流量観測の精度上の問題を否定できない。また、最下流の流量観測所が一般に河口から内陸部に位置するため、河口までの流量増減が考慮できない問題点もある(Taniguchi et al., 2003)。最下流観測所から河口までの距離は、流域によって異なるため、たとえ観測流量が正確としても、Rの評価精度も流域毎に異なっている。また、流量年表には、一級河川以外の中小流域のデータがなく、Rが評価できない領域も存在する。よって、全国を対象としたRの網羅的な評価には、P, Eに比して、解決すべき課題が多い。

そこで筆者らは、複数の流量観測所を有する一

級河川流域において、観測流量とそれぞれの上流域における地質別の (P-E) を重回帰分析し、最下流観測所から河口までの流量増減を推定した (伊藤・丸井, 2008)。重回帰分析は、複数の独立変数による一次式 (重回帰式) で従属変数の変動を予測する手法であり、アフリカや東南アジアのような流量データが不十分な地域で流量予測に用いられた実績がある (Touazi et al., 2004; 手計・吉谷, 2006)。ここで、地質別の (P-E) を独立変数としたのは、河川流量と地質要因の相関が強いことに基づいている (虫明ほか, 1981)。

本論文では、SGD 量の全国分布評価を目的として、流量観測所が 2 ヶ所に満たないか、流量データが存在しないために単独で重回帰分析ができなかった区域で R を予測した (以下、一級河川流域を「流域」、それ以外を「領域」、両者の総称を「区域」と呼ぶ)。重回帰分析のためのデータは、地質の類似度が高い流域をクラスター分析で抽出して用いた。SGD 量の全国分布は、区域毎の評価の他に、複数区域の平均化による海岸線単位長

当たりの量も示した。

SGD 量の全国分布は、他の社会条件を考慮すれば、沿岸域開発の地点選定に応用可能である。SGD 量が小さな地点は、地下水による海域への物質移行量も小さく、二酸化炭素の地中貯留や高レベル放射性廃棄物の地層処分施設建設に有利である。逆に、SGD 量が大きな地点は、地下水による水資源開発に有利である。本論文では、渇水発生状況を考慮した区域別の水資源開発適性についても述べた。

Ⅱ. 方 法

1. 地質の類似度による区域の分類

流量データが不十分な一級河川流域以外の区域は、一級河川流域間に 1 領域を基本として 101 領域に区分し、便宜的な領域番号を与えた (Fig. 1)。区分済みの一級河川 103 流域を加えると、全国は 204 区分されたことになる。流量データが不十分な 144 区域は、流量と地質別の (P-E) の重回帰

Fig. 1 Area division of Hokkaido district. The numbers indicate areas where data of river flow are insufficient. Alphabets mean Class A River Basins; A: Teshiogawa (天塩川), B: Rumeigawa (留萌川), C: Ishikarigawa (石狩川), D: Shiribetsugawa (尻別川), E: Shiribeshitoshibetsugawa (後志利別川), F: Mukawa (鵜川), G: Sarugawa (沙流川), H: Tokachigawa (十勝川), I: Kushirogawa (釧路川), J: Tokorogawa (常呂川), K: Yubetsugawa (湧別川), L: Shokotsugawa (渚滑川)。

Fig. 1 (continued) Area division of Tohoku district. A: Abukumagawa (阿武隈川), B: Natorigawa (名取川), C: Kitakamigawa (北上川), D: Mabechigawa (馬淵川), E: Takasegawa (高瀬川), F: Iwakigawa (岩木川), G: Yoneshirogawa (米代川), H: Omonogawa (雄物川), I: Koyoshigawa (子安川), J: Mogamigawa (最上川), K: Akagawa (赤川).

Fig. 1 (continued) Area division of Kanto district. A: Kujigawa (久慈川), B: Nakagawa (那珂川), C: Tonegawa (利根川), D: Arakawa (荒川), E: Tamagawa (多摩川), F: Tsurumigawa (鶴見川), G: Kanogawa (狩野川), H: Fujigawa (富士川).

Fig. 1 (continued) Area division of Hokuriku district. A: Arakawa (荒川), B: Aganogawa (阿賀野川), C: Shinanogawa (信濃川), D: Sekikawa (関川), E: Himekawa (姫川), F: Kurobegawa (黒部川), G: Joganjigawa (常願寺川), H: Jintsugawa (神通川), I: Shogawa (庄川), J: Oyabegawa (小矢部川), K: Tedorigawa (手取川), L: Kakehashigawa (梯川).

Fig. 1 (continued) Area division of Chubu district. A: Abegawa (安倍川), B: Oigawa (大井川), C: Kikugawa (菊川), D: Tenryugawa (天竜川), E: Toyokawa (豊川), F: Yahagigawa (矢作川), G: Shonaigawa (庄内川), H: Kisogawa (木曽川), I: Suzukagawa (鈴鹿川), J: Kumozugawa (雲出川), K: Kushidagawa (櫛田川), L: Miyagawa (宮川).

Fig. 1 (continued) Area division of Kinki district. A: Shingugawa (新宮川), B: Kinokawa (紀ノ川), C: Yamatogawa (大和川), D: Yodogawa (淀川), E: Kakogawa (加古川), F: Ibogawa (揖保川), G: Kuzuryugawa (九頭竜川), H: Kitagawa (北川), I: Yuragawa (由良川), J: Maruyamagawa (円山川).

Fig. 1 (continued) Area division of Chugoku district. A: Sendaigawa (千代川), B: Tenjingawa (天神川), C: Hinogawa (日野川), D: Hiikawa (斐伊川), E: Gounokawa (江の川), F: Takatsugawa (高津川), G: Sabagawa (佐波川), H: Ozegawa (小瀬川), I: Otagawa (太田川), J: Ashidagawa (芦田川), K: Takahashigawa (高梁川), L: Asahigawa (旭川), M: Yoshiigawa (吉井川).

Fig. 1 (continued) Area division of Shikoku district. A: Shigenobugawa (重信川), B: Hijikawa (肱川), C: Shimantogawa (四万十川), D: Niyodogawa (仁淀川), E: Nakagawa (那賀川), F: Yoshinogawa (吉野川), G: Dokigawa (土器川).

Fig. 1 (continued) Area division of Kyusyu district. A: Ongagawa (遠賀川), B: Matsuuragawa (松浦川), C: Honmyogawa (本明川), D: Rokkakugawa (六角川), E: Kasegawa (嘉瀬川), F: Chikugogawa (筑後川), G: Kikuchigawa (菊池川), H: Shirakawa (白川), I: Midorigawa (緑川), J: Kumagawa (球磨川), K: Sendaigawa (川内川), L: Kimotsukigawa (肝属川), M: Oyodogawa (大淀川), N: Omarugawa (小丸川), O: Gogasegawa (五ヶ瀬川), P: Banshogawa (番匠川), Q: Onogawa (大野川), R: Yamakunigawa (山国川).

分析を行うために、地質の類似度が高い流域とグループ化した。

区域間の地質の類似度は、クラスター分析で評価した。クラスター分析は、データ間の類似度で、同じような性質をもつデータを分類する。各区域の地質分布は、200 万分の 1 日本地質図の 43 地質区分 (Table 1) に対する区域内の面積比を用いて、地質番号 i に対する 43 変量データ $r(i)$ ($i=1,2, \dots, 38, 39, 100, 110, 120, 130$) で定量化した。面積比を用いたことで、区域毎の地質の類似度を流域面積の大きさに関係なく比較できた。

クラスター分析には、凝集型階層手法 (水田ほか, 2005) を用いた。凝集型階層手法は、最初に各個体をそれぞれ 1 つのクラスターと設定した

後、最も近い 2 つのクラスターを結合させて新たなクラスターとし、全体が 1 つのクラスターとなるまで同様の操作を繰り返す。クラスター間の距離は、2 つのクラスターそれぞれに属する個体間のすべての組合せでの距離の平均を利用する群平均法 (水田ほか, 2005) で計算した。すなわち、ある区域 m と n との距離 d は、

$$d^2 = (r_m(1) - r_n(1))^2 + (r_m(2) - r_n(2))^2 + \dots + (r_m(130) - r_n(130))^2 \quad (2)$$

とした。分析結果は、デンドログラム (樹形図) で表現し、最下層ですべてのクラスターに分かれていたのが、近いクラスター同士で順に結合していき、最後には 1 つにまとまる過程を表現した。

Table 1 Legends of Geological Map of Japan 1:2,000,000
(Geological Survey of Japan, 2003)

Index	Notes
1	Holocene sedimentary rocks
2	Middle Middle Miocene to Late Late Pleistocene sedimentary rocks
3	Middle Eocene to early Middle Miocene sedimentary rocks
4	Early Cretaceous to Early Eocene sedimentary rocks
5	Middle Jurassic to Early Cretaceous sedimentary rocks
6	Early Triassic to Early Jurassic sedimentary rocks
7	Permian sedimentary rocks
8	Silurian to Carboniferous sedimentary rocks
9	Undefined
10	Paleocene to early Middle Miocene accretionary complexes: Mainly sedimentary rocks
11	Early Cretaceous to Late Cretaceous accretionary complexes: Mainly sedimentary rocks
12	Late Triassic to Early Cretaceous accretionary complexes: Mainly sedimentary rocks
13	Permian Accretionary complexes: Mainly sedimentary rocks
14	Devonian to Carboniferous accretionary complexes: Mainly sedimentary rocks
15	Early Cretaceous to Middle Eocene accretionary complexes: Mainly sedimentary rocks
16	Late Oligocene to early Early Miocene accretionary complexes: Mafic igneous rocks
17	Late Triassic to Late Jurassic accretionary complexes: Mafic igneous rocks
18	Permian accretionary complexes: Mafic igneous rocks
19	Cambrian to Holocene accretionary complexes: Ultra-mafic igneous rocks
20	Late Jurassic to Late Cretaceous accretionary complexes: Mafic igneous rocks
21	Middle Middle Miocene to Holocene volcanic rocks
22	Middle Eocene to early Middle Miocene volcanic rocks
23	Early Cretaceous to Early Eocene volcanic rocks
24	Late Late Miocene to Holocene pyroclastic flow
25	Middle Middle Miocene to Pliocene plutonic rocks
26	Middle Eocene to early Middle Miocene plutonic rocks
27	Early Cretaceous to Early Eocene plutonic rocks
28	Early Jurassic plutonic rocks
29	Permian plutonic rocks
30	Silurian to Carboniferous plutonic rocks
31	Pre-Silurian plutonic rocks
32	Middle Eocene to Early Early Miocene metamorphic rocks: Low to medium pressure type
33	Early Jurassic to Early Eocene metamorphic rocks: Low to medium pressure type
34	Permian to Early Jurassic metamorphic rocks: Low to medium pressure type
35	Pre-Silurian metamorphic rocks: Low to medium pressure type
36	Early Cretaceous to Early Eocene metamorphic rocks: High pressure type
37	Middle Triassic to Middle Jurassic metamorphic rocks: High pressure type
38	Carboniferous metamorphic rocks: High pressure type
39	Pre-Silurian metamorphic rocks: High pressure type
100	Water area
110	Carboniferous to Paleogene accretionary complexes: Exotic basalt blocks
120	Carboniferous to Paleogene accretionary complexes: Exotic limestone blocks
130	Carboniferous to Paleogene accretionary complexes: Exotic chert blocks

2. 各区域での R の重回帰分析と SGD の算出

ある区域と他の流域とのグループ化は、得られたデンドログラムに基づいてクラスターを順次拡大させ、流量データを有する流域の数が 2 以上になった時点で終了した。流量と地質別の (P-E) との重回帰分析は、同一グループの流域における最下流の観測流量とその上流域の地質別の (P-E) を用いた。各データには、10 年分 (1993～2002 年) の年値が用いられた。ただし、観測流量が (P-E) を上回る流域では、観測流量が過大評価されているとして、両者が等量になるように補正した。データが不十分な区域の R は、得られた流量の重回帰式に、当該区域における地質別の (P-E) を代入して予測した。全国の区域毎の SGD 量は、それぞれで予測された R を式 (1) に代入して求められた。

重回帰分析では、予測対象の区域内に存在しない地質別の (P-E) を独立変数として最初から採用せず、R の予測時において独立変数に 0 が代入されないようにした。基本的な分析手法は、流量観測所を複数有する流域と同様である (伊藤・丸井, 2008)。

採用する独立変数の数は、変数増減法 (水田ほか, 2005) で決定し、各区域で式 (3) のような重回帰式を得た。

$$R = a_0 + a_1 (P-E)_1 + a_2 (P-E)_2 + \dots + a_i (P-E)_i \quad (3)$$

ここに、 a_i : 偏回帰係数、 $(P-E)_i$: 地質番号 i への (P-E) である。予測値の信頼区間 $\tilde{R}$ は、

$$\tilde{R} = \hat{r}_n \pm t(n-p-1, \alpha/2) \times K \quad (4)$$

$$K = \sqrt{(1 + 1/n + D^2/n) \cdot V} \quad (5)$$

$$D^2 = A \cdot B^{-1} \cdot A^T \quad (6)$$

によって求めた。ここで、 n : サンプル数、 p : 変数の数、 $t(n-p-1, \alpha/2)$: 自由度 $n-p-1$ 、有意水準

α の t 値、 K : $\hat{r}_n$ の標準偏差、 D^2 : マハラノビスの汎距離、 V : 誤差分散、 A : 平均値ベクトル、 B^{-1} : 平方和・積和行列の逆行列、 A^T : 平均値ベクトルの転置行列である。平均値ベクトルは、各独立変数の予測用入力値と平均値との差よりなる 1 行 p 列のベクトルである。

なお、SGD は、海岸線を通して海域に流出する現象であり、区域単位より海岸線区分単位の方が相対比較に向いている。流域の平面形状は、河口に向かって狭まり、特に大流域であれば、単位面積当たりの SGD 量が小さくても、海岸線単位長当たりの SGD 量が大きくなるからである。そこで、複数区域における SGD 量の面積加重平均を海岸線延長で除した値を海岸線単位長当たりの SGD 量とした相対比較も行った。

3. 水資源開発の適性評価

区域毎の地下水による水資源開発適性は、SGD 量と渇水発生状況をそれぞれ 1～5 点で得点化し、その積で評価した。SGD 量の得点は、全国の全区域で算出された SGD 量を 5 段階のレンジに区分して与えた。渇水発生状況の得点は、1986～2005 年における全国の上水道の減・断水年数 (国土交通省土地・水資源局水資源部, 2006) を、0 年、1 年、2～3 年、4～7 年、8 年以上に区分し、それぞれを 1～5 点とした。

Ⅲ. 結 果

1. 地質の類似度による区域の分類

地質の類似度によるクラスター分析によって、全国 204 区域を 15 クラスターで分類した (Fig. 2)。例えば、クラスター 1 は、天塩川、石狩川、十勝川、利根川および信濃川等の大流域が含まれ、堆積岩類の分布率が高いクラスターである。逆に、クラスター 15 は、西南日本外帯に位置する区域が多く含まれ、付加コンプレックスが広く分布する地質の特徴を示す。また、12 区域 (馬淵川、小矢部川, 19004, 11025, 16003, 17003, 16005, 黒部川, 9907, 梯川, 19005, 16007) は、15 クラ

Fig. 2 Dendrogram by cluster analysis of geological ratios in 204 areas.
The alphabets indicate the connecting points between figures.

スターに含まれず、地質の偏りが大きいことを示した。これらのうち、小矢部川流域を除く 11 区域は、流量データが不十分な区域であった。

流量データが不十分な全国 144 区域を、それぞれ少なくとも 2 流域以上とグループ化すると、上記の 11 区域は、8 区域以上とのグループ化が必要となった。地質の類似度が高くないと、重回帰分析の精度が低くなるため、以降の分析は、これらを除外した 133 区域で行うこととした。

2. 領域 17001 における SGD 量評価のケーススタディ

領域 17001 は、近畿地方の紀ノ川流域と新宮川流域に挟まれた領域であり (Fig. 1, Kinki district), 地質の類似度によって、安倍川、小丸川および大淀川の 3 流域とグループ化された。古第三紀と白亜紀の堆積岩類の付加コンプレックス (地

質番号 10, 11) が占める面積比は、領域 17001 : 67.9%, 安倍川 : 75.5%, 小丸川 : 76.2%, 大淀川 : 44.4% であった。

領域 17001 に分布しない地質は、地質番号 5 ~ 9 のジュラ紀以前の堆積岩類, 14 と 15 の堆積岩付加コンプレックス, 16, 18 および 20 の苦鉄質火成岩類付加コンプレックス, 21 ~ 24 の火山岩類, 27 ~ 31 の白亜紀以前の深成岩類, 32 ~ 34 と 37 ~ 39 の変成岩類および 120 と 130 の異地性岩体であり、これらの地質別 (P-E) は、重回帰分析用データから除外した。また、領域 17001 に分布しても、安倍川、小丸川および大淀川に分布しない地質番号 3, 4, 12, 13, 17, 26, 35, 36 の (P-E) も、重回帰分析の対象とならないので除外した (Table 2)。

重回帰式の独立変数は、変数増減法によって、 $(P-E)_{10}$ と $(P-E)_1$ を用いるのが最適と判定された。

Fig. 2 (continued) Dendrogram by cluster analysis of geological ratios in 204 areas.
The alphabets indicate the connecting points between figures.

Fig. 2 (continued) Dendrogram by cluster analysis of geological ratios in 204 areas. The alphabets indicate the connecting points between figures.

古第三紀の堆積岩類付加コンプレックス（地質番号 10）への $(P-E)_{10}$ は、3 流域で最も大きな比率を占め、流量決定への寄与度が大きいことを示している。 $(P-E)_1$ は、完新世における堆積岩類（地質番号 1）への $(P-E)$ であり、河道に沿って分布するために、流量決定への寄与が大きかったと考えられる。

得られた重回帰式は、下式のとおりであった。

$$\hat{r} = 1.350 (P-E)_{10} + 5.311 (P-E)_1 - 1.638 \quad (7)$$

ここに、 $\hat{r}$: 流量の理論値、単位: m^3/s である。重回帰式の回帰精度を示す決定係数 R^2 は 0.995 であり、偏回帰係数が有意でない確率は全て 0.001 未満であった。

領域 17001 の R は、各年の $(P-E)_1$ と $(P-E)_{10}$ を式 (7) に代入して求められ、領域 17001 の面積である $3341 km^2$ で mm/yr 単位に換算すると、年平均値と 95 % 信頼区間は $586 mm/yr$ [478 ~ $694 mm/yr$] となった (Table 3)。

3. 全国を対象とした評価

流量データが不十分な 133 区域の SGD 量を、前節で示した領域 17001 と同様の方法で評価した。得られた予測値とその 95 % 信頼区間幅は、それぞれ [-1876, 12860] と [0, 12289] のレンジ内に分布した。予測値の精度を示す 95 % 信頼区間幅について、外れ値を決定する閾値を、上位 1/4 から 3/4 までの範囲の 1.5 倍に最も近い値とすると（水田, 2005）、 $2812 mm/yr$ 以上となる 11 区域（領域 11011, 16009, 16008, 16011, 17002, 11017, 16010, 13004, 櫛田川, 北川, 番匠川）が外れ値となった。評価対象は、これらを除く 122 区域とし、すでに評価済みの 60 流域（伊藤・丸井, 2008）を加えた全国 204 区域中 182 区域で SGD 量を算出すると、面積加重平均が $40 mm/yr$ となった。 $(P-E)$ の面積加重平均は $1,250 mm/yr$ であり、SGD 量はその 3.2 % に相当した。既往研究（谷口, 2001; Burnett and Dulaiova, 2003）は、全世界的な SGD が海洋への全流出の数 % ~ 10 % と推定しており、本研究での評価結果は妥当だったといえる。ただし、面積加重平均 ($40 mm/yr$) の 95 % 信頼区間は $-131 \sim 211 mm/yr$ であり、SGD 量の絶対評価が現状で難しいことを示している。

SGD の相対比較は、評価対象とした 182 区域での SGD 量の単純平均値である x_0 ($50 mm/yr$) と標準偏差 σ ($386 mm/yr$) を用いた 5 段階のレンジで行った (Fig. 3)。平均値を含む中央のレンジは、 $x_0 - 0.5 \sigma \leq SGD \leq x_0 + 0.5 \sigma$ なる範囲とし、その他のレンジは 1.0σ ずつ上下させている。最大レンジは SGD 量が $644 mm/yr$ 以上、上位から 2 番目のレンジは $248 mm/yr$ 以上を示す区域である。SGD 量は、東北日本で少なく、西南日本で多くなる傾向を示した。

海岸線単位長当たりの SGD 量を評価するために、全国の海岸線を、日本の大分水界（高橋・阪口, 1976）に基づいて北海道を 4 区分、本州を 3 区分（日本海側 1 と太平洋側 2）、四国を 2 区分、九州を 4 区分し、さらに、国土交通省の地方行政区分に基づいて、3 区分だった本州を 10 区分に細分化した（東北:2, 関東:1, 北陸:1, 中部:2,

Table 2 Data set of multiple linear regression analysis for R in the area “17001”

River Basin	Year	R (m ³ /s)	(P-E) _i (m ³ /s)							
			1	2	10	11	19	25	100	110
Abegawa	1993	37.5	0.9	0.0	31.5	0.0	0.8	0.0	0.0	0.9
	1994	18.3	0.5	0.0	19.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.6
	1995	25.0	0.6	0.0	19.8	0.0	0.5	0.0	0.0	0.6
	1996	5.4	0.0	0.0	5.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	1997	6.7	0.0	0.0	6.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	1998	13.1	0.0	0.0	12.8	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
	1999	23.3	0.0	0.0	18.2	0.0	0.7	0.0	0.0	0.8
	2000	25.8	0.0	0.0	20.1	0.0	0.8	0.0	0.0	0.9
	2001	27.2	0.8	0.0	28.9	0.0	0.7	0.0	0.0	0.9
	2002	6.4	0.0	0.0	6.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Omarugawa	1993	51.6	0.0	1.0	34.6	11.3	0.0	2.1	0.6	0.5
	1994	15.1	0.0	0.3	10.2	3.3	0.0	0.6	0.2	0.2
	1995	21.2	0.0	0.4	14.3	4.7	0.0	0.9	0.2	0.2
	1996	25.9	0.0	0.5	17.4	5.7	0.0	1.1	0.3	0.3
	1998	29.3	0.0	0.6	19.7	6.4	0.0	1.2	0.3	0.3
	1999	44.9	0.0	0.9	30.2	9.8	0.0	1.9	0.5	0.5
	2000	26.9	0.0	0.5	18.1	5.9	0.0	1.1	0.3	0.3
	2002	28.5	0.0	0.6	19.1	6.3	0.0	1.2	0.3	0.3
Oyodogawa	1993	277.5	22.9	0.0	115.2	0.0	14.2	0.0	0.0	15.0
	1994	71.1	5.9	0.0	29.5	0.0	3.6	0.0	0.0	3.8
	1995	102.6	9.2	0.0	46.3	0.0	5.7	0.0	0.0	6.0
	1996	117.9	9.7	0.0	48.9	0.0	6.0	0.0	0.0	6.4
	1997	133.9	11.0	0.0	55.6	0.0	6.8	0.0	0.0	7.2
	1998	121.2	10.0	0.0	50.3	0.0	6.2	0.0	0.0	6.5
	1999	180.9	14.9	0.0	75.1	0.0	9.2	0.0	0.0	9.8
	2000	146.6	12.7	0.0	63.7	0.0	7.8	0.0	0.0	8.3
	2001	91.0	10.2	0.0	29.6	0.0	6.3	0.0	0.0	4.1
	2002	123.0	10.1	0.0	51.0	0.0	6.3	0.0	0.0	6.6

Table 3 Data of (P-E)_i to predict SGD and predicted R and SGD in the area “17001” exp.: expectation, con. intv.: confidence interval.

Year	(P-E) _i (m ³ /s)		predicted R (m ³ /s)		predicted SGD (mm/yr)			(P-E) _{all} (mm/yr)	
	10	1	exp.	95% con. intv.	exp.	95% con. intv.			
1993	77.0	6.2	135.3	122.4	148.1	818.5	697.1	939.9	2095.4
1994	30.7	2.5	52.9	42.5	63.3	335.3	237.4	433.2	834.5
1995	48.8	3.9	85.1	74.2	96.1	524.3	420.9	627.8	1327.8
1996	34.0	2.7	58.8	48.4	69.3	370.1	271.6	468.6	925.3
1997	63.3	5.1	110.9	99.1	122.8	675.8	564.3	787.3	1723.1
1998	78.4	6.3	137.7	124.7	150.6	832.5	709.9	955.0	2131.8
1999	65.0	5.2	113.9	102.0	125.8	693.1	580.5	805.7	1768.1
2000	54.6	4.4	95.5	84.2	106.7	584.9	478.6	691.2	1485.9
2001	51.5	4.1	89.9	78.8	101.0	552.4	447.7	657.1	1401.1
2002	44.1	3.6	76.8	66.0	87.6	475.3	374.0	577.0	1200.5
avg.	54.7	4.4	95.7	84.2	107.1	586.2	478.2	694.3	1489.3

Fig. 3 The quantities of SGD in areas on the Japanese Islands. In non-color areas, they were not evaluated because of their low accuracy of multiple linear regression analysis.

近畿：2，中国：2）。全国で20区分された海岸線単位長当たりのSGD量は，近畿の日本海側と太平洋側，四国の瀬戸内海側，九州の日本海側と東シナ海側で大きくなり，北海道の日本海側と太平洋側東岸，東北の日本海側で小さくなった（Fig. 4）。山本・帆足（1983）によれば，日本の地域別流出係数（涵養と流出の比）は，中部・北陸以北で大きく，それより西南では小さくなるとされており，SGD量が近畿以西で大きくなる傾向と一致した。また，日本の気候区分（前島，1967）によると，関東・中部・近畿より西南は梅雨現象が明瞭な地域，東北・北陸以北は後期梅雨のみが明瞭な地域，北海道は梅雨現象が不明瞭な地域とされ，梅雨現象がSGD量を決定する一要素の可能性がある。

4. 水資源開発の適性評価

SGDによる水資源開発の適性は，関東の荒川流域，中部の矢作川流域，四国の瀬戸内海側（重信川，土器川両岸），九州の東シナ海側（嘉瀬川，

遠賀川西岸）で高くなった（Fig. 5）。SGD量の全国分布と比較すると（Fig. 4），近畿日本海側と太平洋側，四国瀬戸内海側，九州日本海側～東シナ海側は，SGD量が大きかったが，渇水発生状況の得点が小さかったために，開発適性が低くなった。逆に，関東と中部は，SGD量が大きくなかったが，渇水発生状況の得点が高く，開発適性が大きくなった。

IV. 考 察

1. 地下水流動シミュレーションによる領域17001におけるSGD予測の妥当性

領域17001のSGD量を地下水流動シミュレーションで計算し，重回帰分析による予測と比較した。シミュレーションによるSGD量は，涵養量と地下水から河川への流入量との差に等しいとした（伊藤・丸井，2008）。境界条件は，海水位を海拔-1m，河川水位を地表から-1mで固定し，流域界を不透水境界とした。解析コードは，USGS

Fig. 4 The quantities of SGD on coastlines on the Japanese Islands. Coastlines were divided into 20 sections.

Fig. 5 The priorities for water resources development by SGD on the Japanese Islands. In non-color areas, these were not evaluated by lack of predicted quantities of SGD.

開発の MODFLOW-2000 (Harbaugh, 1990) を用い、有限差分法による飽和定常解析を行った。水理地質モデルの座標系は、平面直角座標系（日本測地系）を用い、標高データは、国土地理院の数値地図 1km メッシュ（標高）を用いた。モデル原点は、北緯 33 度 20 分、東経 135 度（日本測地系）とした。流域内の解析メッシュは $500 \times 500\text{m}$ とし、モデルグリッド間の標高は、Natural Neighbor 法 (Watson, 1999) で補完した。モデルでの地質は、表面の地質をモデル底部まで延長し、深度方向に単一層で構成されたとした。透水係数は、新第三紀 N2 ～完新世の堆積岩類（地質番号 1,2）とそれ以外の地層との比が 10:1 となるように設定した。間隙率は全地層で一定値 (0.3) とした。

それぞれの 1993 ～ 2002 年の予測値を比較すると、両者は同一解にならなかったが、原点を通らない直線で両者を近似すれば、決定係数がほとんど 1 になった。パラメータの設定によって両者が同一解になることを示しており、重回帰分析による予測結果は、地下水流動シミュレーションが与える解の一つであったことを示す。

2. クラスター単位での比較

SGD 量と地質分布との相関を評価するために、地質の類似度で区分したクラスター 1 ～ 15 の SGD 量と地質別の (P-E) を比較した。地質別の (P-E) を、堆積岩類、付加コンプレックス、火山岩・深成岩類に 3 区分すると、SGD 量と堆積岩類への (P-E) は弱い逆相関を示した ($R^2=0.2736$)。付加コンプレックスと火山岩類・深成岩類への (P-E) とは無相関であった。また、年代別に区分すると、SGD 量は新第三紀 (N2) 以降の地質への (P-E) と弱い逆相関があり ($R^2=0.2776$)、白亜紀～新第三紀 N1 および三畳紀～ジュラ紀への (P-E) とは無相関であった。

堆積岩が広く分布するクラスター 1 は、堆積岩類への (P-E) が全体の 55% であり、新第三紀 (N2) 以降の地質への (P-E) が 71% を占め、SGD 量の面積加重平均は見かけ上負の値となる -39mm/yr

であった。地質分布の特徴が明らかに異なるクラスター 15 では、堆積岩類への (P-E) が全体の 18%、新第三紀 (N2) 以降の地質への (P-E) が 27% で小さくなったが、SGD 量はクラスター 1 より大きな 393mm/yr を示した。

よって、SGD 量は、新しい堆積岩類の面積比と逆相関を示す可能性が高い。概念的には、透水性が高い新しい堆積岩類が海域に面していれば、SGD が発生しやすくなると考えられるが、ここでは逆の傾向が得られた。理由の一つとして、地下水を集める得水河流は沖積低地に多く分布し、失水河流は台地に多く見られる傾向（樫根, 1987）との関連が挙げられる。すなわち、沖積低地を形成するような新しい堆積岩類に含まれる地下水は、海域より河川に向かって多く流出し、SGD に寄与していない可能性がある。

V. 結 論

年間水収支を用いて SGD 量の全国分布を初めて地図化するために、流量データが不十分な 122 区域について、地質の類似度が高い他の流域とグループ化し、流量と地質別の (P-E) の重回帰分析から R を予測した。すでに評価済みの一級河川 60 流域を加えた 182 区域における SGD 量の面積加重平均は 40mm/yr で、(P-E) の全国平均である 1250mm/yr の 3.2% と計算された。ただし、SGD 量の 95% 信頼区間は $-131 \sim 211\text{mm/yr}$ で、現状では絶対評価が困難であり、区域間の差を相対評価できる精度にとどまった。ただし、重回帰分析による R の予測結果は、地下水流動シミュレーションが与える解の一つであると示された。

全国の海岸線を 20 区分したときの海岸線単位長当たりの SGD 量は、近畿の日本海側と太平洋側、四国の瀬戸内海側、九州の日本海側と東シナ海側で大きく、北海道の日本海側と太平洋側東岸、東北の日本海側で小さくなった。全国的に見ると、SGD 量は西南日本で大きく、東北日本で小さくなる傾向があった。また、区域毎の SGD 量と渇

水発生状況から水資源開発の適性を評価すると、関東の荒川流域、中部の矢作川流域、四国の瀬戸内海側（重信川，土器川兩岸），九州の東シナ海側（嘉瀬川，遠賀川西岸）で高くなった。

地質の類似度で15区分したクラスター毎のSGD量と地質別の（P-E）を比較すると、SGD量と新第三紀（N2）以降の堆積岩類への（P-E）は弱い逆相関を示した。理由の一つとして、沖積低地を形成するような新しい堆積岩類に含まれる地下水は、海域より河川に向かって多く流出し、SGDに寄与していない可能性を挙げた。

謝 辞

立正大学の高村弘毅学長と鈴木裕一教授には、貴重な討論をしていただいたことを感謝します。なお、本研究は、産総研と株式会社ニュージェックとの共同研究に基づいて実施されたものであり、本論文の内容は、伊藤（2008）による学位論文の一部を加筆修正したものである。

文 献

伊藤成輝・丸井敦尚（2007）：年間水収支による全国一級河川の海底地下水湧出量の試算とその問題点。地質ニュース，**640**, 51-57。
 伊藤成輝・丸井敦尚（2008）：河川流出の重回帰分析による一級河川60流域の海底地下水湧出量評価。地質ニュース，**641**, 28-36。
 伊藤成輝（2008）：日本列島の海底地下水湧出量の分布とその評価。立正大学大学院 平成20年論文博士学位請求論文。
 榎根 勇（1987）：水文学。自然地理学講座3，大明堂，272p。
 近藤昭彦（1994）：複数の手法によるモンスーンアジアの蒸発散量推定値の比較。日本水文科学会誌，**24**, 1, 11-30。
 国土交通省土地・水資源局水資源部（2006）：18年版水資源白書。日本の水資源，国立印刷局，260p。

菅原正巳（1972）：流出解析法。共立出版，257p。
 高橋 裕・阪口 豊（1976）：日本の川。科学，**46**, 488-499。
 谷口真人（2001）：地下水と地表水・海水との相互作用－4. 海水と地下水との相互作用。地下水学会誌，**43**, 3, 189-199。
 手計太一・吉谷 純一（2006）：社会変動を考慮した河川流量予測モデルの構築。水文・水資源学会誌，**19**, 3, 171-182。
 前島郁雄（1967）：地理学図説。古今書院，115p。
 水田正弘・山本義郎・南 弘征・田澤 司（2005）：S-PLUSによるデータマイニング入門。森北出版，192p。
 虫明功臣・高橋 裕・安藤義久（1981）：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果。土木学会論文報告集，**309**, 51-62。
 山本 功・帆足又十郎（1983）：河川包蔵水力調査。電力土木，**185**, 7, 3-19。
 Burnett, W. C. and Dulaiova, H. (2003): Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, **69**, 1-2, 21-35。
 Harbaugh, A. W. (1990): A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *USGS Open-File Report*, 90-392。
 Pluhowski, E. J. and Kantrowitz, I. H. (1964): Hydrology of the Babylon-Isip Area Suffolk County Long Island, New York. *USGS Water-Supply Paper* 1768。
 Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E. and Turner, J. V. (2003): Assessment methodologies for submarine groundwater discharge. *Land and Marine Hydrology*。
 Taniguchi, M., Ishitobi, T. and Saeki, K. (2005): Evaluation of time-space distributions of submarine ground water discharge. *Ground*

- Water*, **43**, 3, 336-342.
- Taniguchi, M., Ishitobi, T., Shimada, J. and Takamoto, N. (2006): Evaluations of spatial distribution of submarine groundwater discharge. *Geophysical Research Letters*, **33**, 6.
- Thiessen, A. H. (1911): Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, **39**, 1082-1084.
- Thornthwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, **38**, 55-94.
- Touazi, M., Laborde, J. P. and Bhiry, N. (2004): Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria. *Journal of Hydrology*, **296**, 1-4, 179-191.
- Watson, D. (1999): The natural neighbor series manuals and source codes. *Computers & Geosciences*, **25**, 4, 463-466.
- Watson, R. T., Zinyowera, M. C. and Moss, R. H. (1998): The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. Cambridge University Press, 527p.
- Zektser, I. S. and Dzhamalov, R. G. (2006): Submarine Groundwater. Taylor & Francis, London, 466p.
- (受付：2007年9月25日)
- (受理：2010年3月3日)
-
- この論文に対する「討論」を2010年9月30日まで受け付けます。