

## 長崎県千々石海岸における海岸湧出地下水の拡散解析

草野和郎\* ・ 後藤恵之輔\*\*  
湯藤義文\*\*\* ・ 古本勝弘\*\*

## Analysis of Diffusion for Submarine Springs at Tijiwa Coast in Nagasaki Prefecture

by

Kazuo KUSANO\*, Keinosuke GOTOH\*\*, Yoshifumi YUTOH\*\*\*  
and Katuhiro FURUMOTO\*\*

In Japan, water demand is in increase due to the development of industry, improvement of a living standard, and other reasons in recent years.

The ground water flushes out to the coast or to the sea at Tijiwa Coast in Simabara District, Nagasaki Prefecture. It seems that it is more effective to collect these submarine springs than to develop dam sites for water resources.

In case of investigating water resources by remote sensing, a problem of how the diffusion area on the sea displays on the picture is important to investigate the water resource effectively.

In this study, diffusion of submarine springs at Tijiwa Coast was analyzed with remote sensing data, observed in situ, and practiced by simple numerical analysis.

## 1. まえがき

我が国の水需要は近年、生活水準の向上や産業の発展に伴い、増加傾向にあり、都市部では人口の集中も加わって、水の需要が供給に追いつかなくなってきた所もある。離島などの地理的、地形的に水資源に恵まれない地域においても、水問題は重要である。このような地域では、小期間、雨が降らない状態が続いただけでも、深刻な水不足に見舞われる場合が多い。

水需要は今後も増加していくことが予想されるため、新たな水資源を確保していく必要があるが、我が国の河川による水資源の利用は、河川流路が短く、勾配が大きいという地形的特徴から、不利な状況にある。

長崎県の島原半島<sup>2)</sup>は、各地に地下水の湧水箇所が

あり、地下水の豊富なところとして知られている。しかし、地形上ダムサイトに適した所が少なく、水を透しやすい地質のため、水無し川が多く、河川による水資源開発は困難な状況である。その一方で、地下に浸透した降雨は地下水となり、被圧されて海岸付近で自噴したり海に流れ込んだりしている所がある。ダムによる水資源開発を行うよりも、このように海岸部で湧き出した地下水を利用した方が効果的であると思われる。

本研究では、海岸から地下水が湧出している千々石海岸で、湧水箇所付近の海域をリモートセンシングによる解析と現地調査、さらに簡単な数値シミュレーションによって湧水の海域への拡散範囲を確かめ、リ

平成3年4月30日受理

\*大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate School of Engineering, Division of Civil Engineering)

\*\*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\*\*大学院博士課程海洋生産開発学専攻 (Graduate School of Marine Science and Engineering, Division of Marine Production Research and Development)

モートセンシングによる海岸湧出地下水の探査の法則性を探るものである。

## 2. リモートセンシングによる解析

千々石海岸の海岸部から地下水が湧出している海域を、1987年10月6日観測のランドサットTMデータを用いて解析した。ランドサットのTMセンサ<sup>2)</sup>は、バンド1～7までの7つの電磁波の観測波長帯を持ち、近赤外域であるバンド4（観測波長域0.76～0.90 $\mu\text{m}$ ）を用いれば陸域と海域の水際線を決定でき、熱赤外域であるバンド6（観測波長域10.40～12.50 $\mu\text{m}$ ）を用いれば地表面の温度を測定できる。バンド6の解像度は120m四方で、約0.2 $^{\circ}\text{C}$ の温度差まで判別できる。

一般に、海水の温度が季節ごとに変動しているのに対し、地下水は年間を通じて、ほぼ一定の温度(約17 $^{\circ}\text{C}$ )を保っている。また、地下水は海水よりも密度が小さいため、海岸から海へ放出された地下水は海面に浮上する。このため、湧水箇所付近の海域をバンド6を用いて海面の温度を測定することによって、海岸から地下水が湧出している状況を把握できるものと思われる。

解析に使用したデータの時期は、地下水の方が海水よりも温度が低いことが分かっている。このため、湧水箇所付近の海域で周囲の海面よりも温度の低いところが、海域での湧水の拡散範囲と判断できる。

このため、解析にはバンド4とバンド6を使用し、バンド4で陸域と海域の境界の水際線を決定し、バンド6で湧水箇所付近の低温水域の範囲を調べ、両者を照合することによって地図上での湧水の拡散状況を調べた。

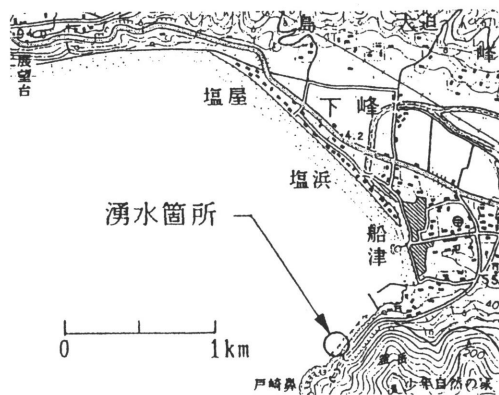


Fig. 1 Location of submarine springs near Tijiwa Coast.

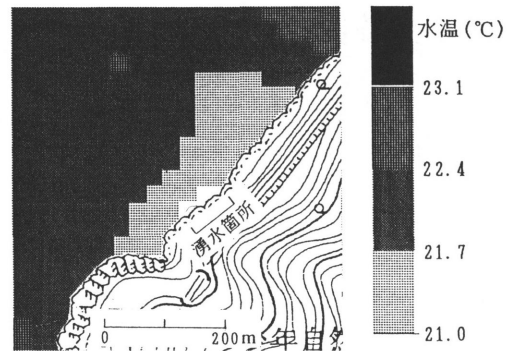


Fig. 2 Distribution of seasurface temperature near the source of submarine springs.

Fig. 1に湧水箇所の位置、Fig. 2にその箇所についてバンド6で解析した結果を、その地域の地形図を重ね合わせたもので示す。海域上で白色の部分が地下水が湧出している近辺の海域である。地下水は海岸線に沿って線状に湧出しており、この時期の地下水の水温は海水よりも低く、海洋上に流出した地下水は、沖合い方向よりも岸に平行に長く広がっているのが分かる。沖合いへの拡散範囲は熱画像上から判断して約80m程度に及んでいる。

## 3. 現地調査の過程と結果

現地の湧水箇所では、約80mの幅で海岸線に沿って線状に海域へ地下水は流出し、満潮時には湧水源そのものが海中に没し、海上からは湧水箇所は確認できないが、干潮時には湧水源は陸上に現れ、海岸線に沿って約80mの幅で線状に海域へ地下水が流出しているのが確認できる。現地調査は、夏、秋、冬の3時期について行い、海洋上で水温と塩分濃度を測定した。

それぞれの調査内容について以下に記す。

### (1) 夏季の現地調査

夏季においては1990年7月20日の午後、現地調査を行った。現地では海岸からの湧水箇所に対して、Fig. 3に示すような格子の節点の円内において観測ポイントを取り、水深方向に50cm間隔で水温と塩分濃度を測定した。

Fig. 4とFig. 5に、Fig. 3に対応したポイントにおける水温と塩分濃度の測定結果を示す。

Table 1に示すように、この時期の地下水の水温は海水に比べ温度が低く、Fig. 4に示すように海域へ拡散した地下水は、冷水塊となり海面上に薄く広がり、

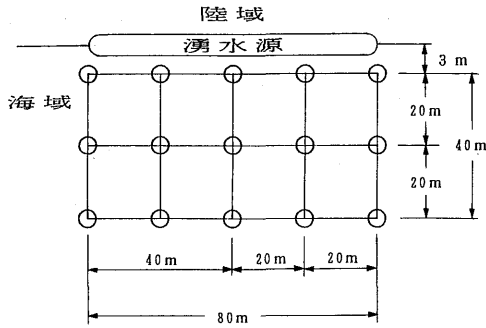


Fig. 3 Points for survey of diffusion carried out in situ on the sea. (Observed in July.)

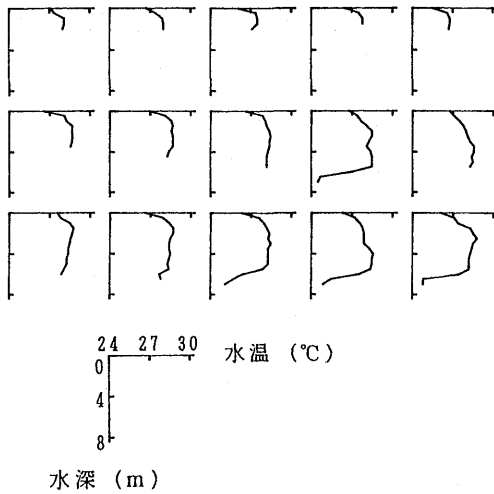


Fig. 4 Distribution of water temperature in each points shown in Fig. 3.

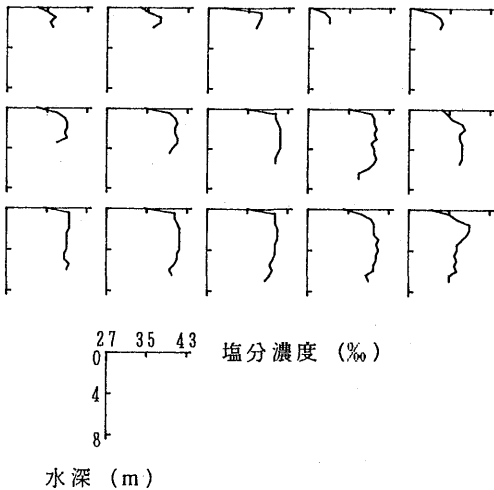


Fig. 5 Distribution of salt concentration in each points shown in Fig. 3.

Table 1 Comparison of water temperature and salt concentration between submarine springs and sea water. (Observed in July.)

	水温 (°C)	塩分濃度 (‰)
湧水	18.9	0.3
現場の標準海水	28.7	39.0

潮流のため海域側から湧水源の方を見て右の方に流れているのが分かる。その冷水塊は沖合いに拡散するにつれ海中に沈み込んでいっている。これは、地下水の方が水温が低いため、海洋中に広がるにつれ塩分濃度による浮力よりも水温による重力の影響の方が卓越してくるためと思われる。拡散範囲は観測格子の領域を越え、沖合い40m以上に及んでいるのが分かる。

(2) 秋季の現地調査

現地調査は秋季を代表して1990年10月15日の午後、実施した。夏季での現地調査では、湧水源から約40m以上拡散していることが判明したので、地下水が湧出している付近の海域において観測格子を約80m四方に拡大し、Fig. 6のように測定ポイント(図の円内)を配置し、水温と塩分濃度を水深方向に1m間隔で測定した。

Fig. 7, Fig. 8に、それぞれFig. 6の測定ポイントに対応した水温と塩分濃度の測定結果を示す。また、湧水箇所から離れた湧水の拡散範囲が及ばない海域の海水の水温を測定したところ、Table 2に示すように地下水の方が海水よりも温度が

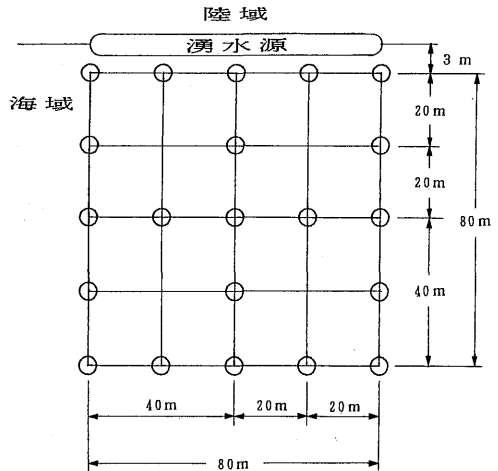


Fig. 6 Points for survey of diffusion carried out in situ on the sea. (Observed in October.)

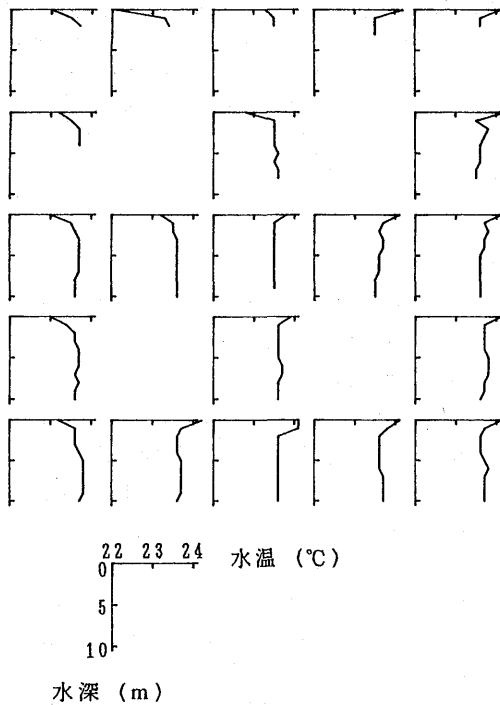


Fig. 7 Distribution of water temperature in each points shown in Fig. 6.

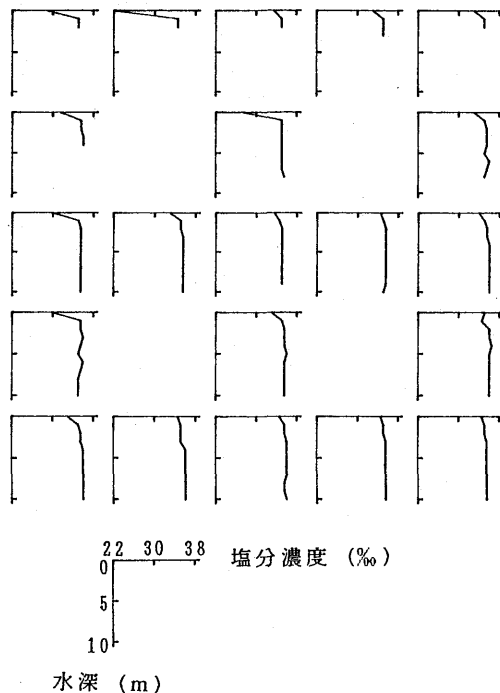


Fig. 8 Distribution of salt concentration in each points shown in Fig. 6.

Table 2 Comparison of water temperature and salt concentration between submarine springs and sea water. (Observed in October.)

	水 温 (°C)	塩分濃度 (%)
湧 水	18.7	0.4
現場の標準海水	24.1	35.0

低かった。このことから、Fig. 7, Fig. 8では地下水は海域側から見て左側に拡散しているのが分かるが、これは潮流の影響と思われる。海域に流出した地下水は、湧水源の近辺で水温と塩分濃度が共に最も低く、夏季における現象と同様、冷水塊となって水表面付近に薄く広がり、沖合いに拡散するにつれ、水温と塩分濃度は通常の海域との差が徐々に少なくなっているのが分かる。湧水の拡散範囲は、沖合いへ約80m程度及んでいることが認められる。

### (3) 冬季の現地調査

冬季では1991年2月18日の午後、現地調査を行った。

調査では、夏季、秋季の現地での水温と塩分濃度の調査結果から、海域へ流出した地下水は水表面で温度躍層を形成し、水深方向への拡散は水表面付近に限られることが分かったため、まず湧水が形成する温度躍層の厚さを測定することとした。Fig. 9に示すように、湧水源からそれぞれ2 m, 5 m, 10m離れた海域において測定ポイント（図の円内）をとり、水深方向への水温と塩分濃度を測定した。Fig. 10, Fig. 11がその測定結果である。測定結果では水表面付近で水温が高く、塩分濃度が低くなっているが、これはTable 3に示すように、調査当日の現場での地下水と標準海水の水温および塩分濃度の測定結果で、地下水の方が海水よりも水温が高くなっているためである。この結果から、海域へ流出した地下水が形成する温度躍層の厚さは水表面下20~30cm程度に及んでおり、湧水源から遠ざかっても温度躍層はほぼ一定の厚さを保っているのが分かる。

次に、海岸から流出している湧水の拡散状況を調べるために、湧水源に対して海域上にFig. 12に示すように測定ポイントをとり、水表面から水深40cm前後までの水温と塩分濃度を水深5cm間隔で測定した。

Fig. 13, Fig. 14に、Fig. 12の測定ポイントに付した番号に対応した水温と塩分濃度の測定結果を示す。ポイント5では水温と塩分濃度はほとんど変化していないが、ポイント4では塩分濃度が水表面付近で若干下がっている。すなわち、このポイントが海域側から見

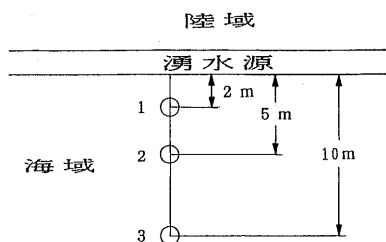


Fig. 9 Points for survey of diffusion carried out in situ near the source of submarine springs. (Observed in February.)

Table 3 Comparison of water temperature and salt concentration between submarine springs and sea water. (Observed in February.)

	水温 (°C)	塩分濃度 (%)
湧水	18.3	0.5
現場の標準海水	12.4	31.0

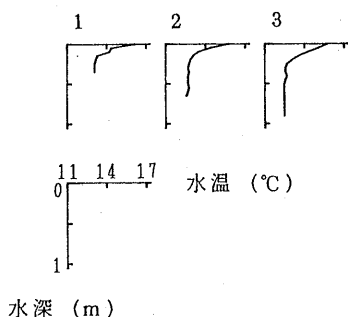


Fig. 10 Distribution of water temperature in each points shown in Fig. 9.

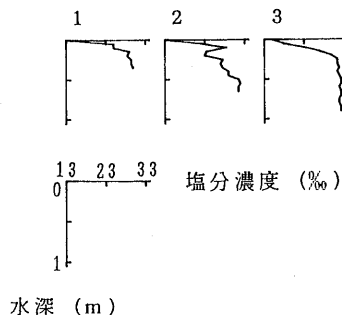


Fig. 11 Distribution of salt concentration in each points shown in Fig. 9.

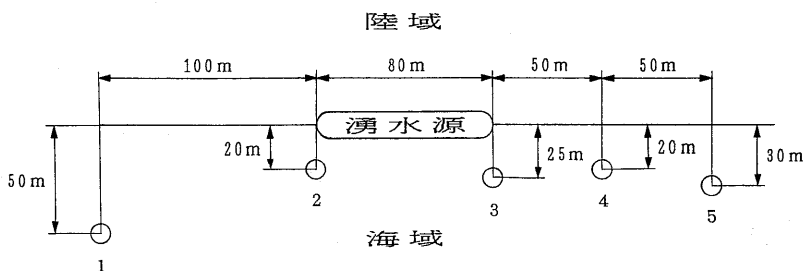


Fig. 12 Points for survey of diffusion carried out in situ on the sea. (Observed in February.)

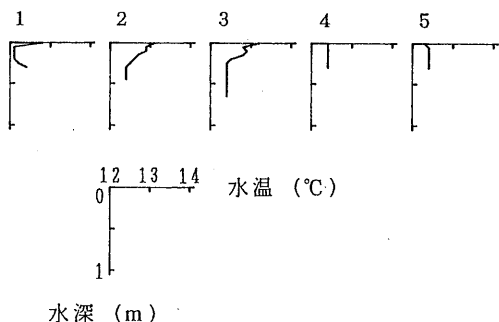


Fig. 13 Distribution of water temperature in each points shown in Fig. 12.

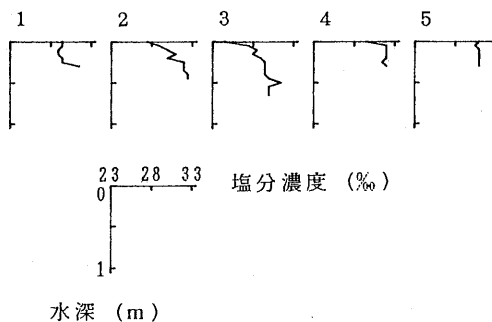


Fig. 14 Distribution of salt concentration in each points shown in Fig. 12.

て右側に湧水が海域上で拡散する限界と考えてよい。ポイント2と3は水表面に近づくほど、水温は高く、塩分濃度は低くなっており、湧水源付近では確実に湧水の拡散の影響範囲内にあることを示している。

ポイント1では、水表面近傍で水温が若干高く、塩分濃度が低くなっており、海域側から見て左側の領域では、ポイント1付近まで湧水の拡散範囲が及んでいるのが分かる。ポイント1とポイント4の測定結果から、海域へ流出した地下水は、海域側から見て左側に拡散しているのが分かる。海域上での拡散範囲は湧水源から沖合いに約50mは拡散していることが認められる。

#### 4. 数値シミュレーション

実際に地下水が海域上でどのように熱拡散するのかを数値実験によって調べるために、2次元の定常シミュレーション解析<sup>9)</sup>を行った。岸と平行にx軸、沖合い方向にy軸をとり、次に示す運動方程式と連続方程式および熱拡散方程式を用いて解析を行った。

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ax \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(Ay \frac{\partial u}{\partial y}) = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ax \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(Ay \frac{\partial v}{\partial y}) = \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial T_u}{\partial x} + \frac{\partial T_v}{\partial y} = D(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2})$$

$$+ D_a \frac{1}{LH}(T_a - T)$$

ここに、Ax, Ayはそれぞれx方向、y方向の渦動粘性係数、u, vはそれぞれx方向、y方向の流速、pは圧力、Tは海域の水温、Taは大気温と現場の標準海水の水温、Dは海域のx, y方向の渦動拡散係数、Daは大気と海域での両方を考慮した熱拡散係数、Lは水中から大気中への熱伝達距離、Hは海域に拡散した湧水の温度躍層の厚さである。

大気温と海水の水温は等しく、Ax, Ayは等しいと仮定した。また、湧水源からの地下水の流出速度は今回測定していなかったため、現場の湧水状況から判断して0.1%と仮定した。

数値計算では、それぞれ7月、10月、2月の現地観測の結果から得られた地下水と海水の水温を上式に代入し、各季節ごとの海域の海岸湧出地下水の、海洋上での熱拡散範囲を差分法により計算した。なお、ランドサットTMデータの1画素が28.5m四方に相当するため、差分格子間隔もこれに合わせた。全格子数は沿

岸方向と沖合い方向にそれぞれ15×15の領域を考え、潮流の影響は考えないものとした。以下に、各季節ごとのデータを用いて数値計算した結果を記す。

##### (1) 夏季の拡散数値計算結果

夏季での拡散の数値計算結果を等値線で表したものを、Fig. 15に示す。ランドサットが温度差を判別できる0.2°Cまでの海域での拡散距離は、沖合い方向では約70m、沿岸方向では約200mに及んでいるのが分かる。個々の計算格子領域で、標準海水より-0.2°C以上温度が格子内の全領域で下がっている格子数は8個で、これはランドサットTM画像上では8画素に相当する面積である。

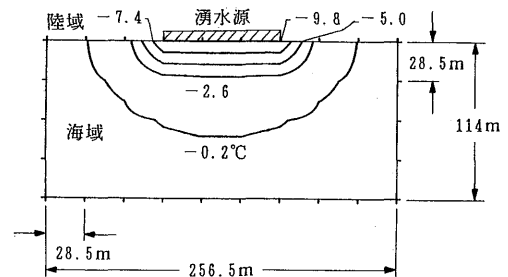


Fig. 15 Distribution of temperature difference on the sea by calculation. (Used data are in July.)

##### (2) 秋季の拡散数値計算結果

秋季での拡散の数値計算結果を等値線で表したものを、Fig. 16に示す。0.2°Cまでの海域上の拡散距離は、沖合い方向では約60m、沿岸方向では約190m前後拡散

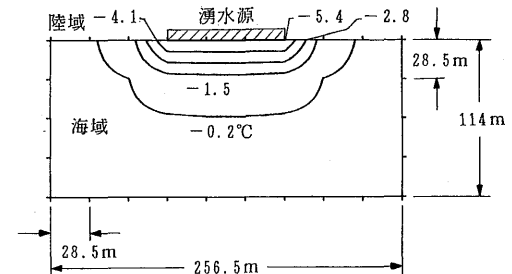


Fig. 16 Distribution of temperature difference on the sea by calculation. (Used data are in October.)

している。個々の計算格子で、28.5m四方の領域が全て周囲の海水と0.2°C以上の温度差があるのは、8個の格子群である。これはランドサットTM画像上で8画素に当たり、夏季において数値計算上、TMデータによって捕えられる画素の数と同じである。これはTMセンサでは、夏季と秋季の拡散範囲は同程度に判別されるということの意味している。

### (3) 冬季の拡散数値計算結果

冬季においては、地下水は海水よりも水温が高くなるが、計算上は温度躍層の厚さが変わるだけで、他の条件は夏季、秋季の場合と同じである。冬季の拡散数値計算結果を等値線で表したものを、Fig. 17に示す。冬季の拡散範囲は秋季の場合とさほど変わっておらず、沖合い方向に約60m前後、沿岸方向に約190m前後である。TMデータ上では拡散範囲は8画素程度に相当し、これも夏季、秋季の場合と同じである。

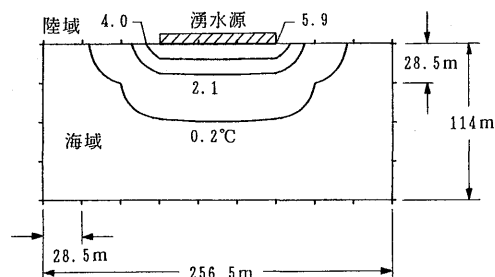


Fig. 17 Distribution of temperature difference on the sea by calculation.  
(Used data are in February.)

## 5. まとめ

長崎県千々石海岸における湧出地下水をリモートセンシングによって探査していく場合、湧水の海洋上での拡散現象の特性として、次のようなことがいえた。

- (1) 海岸湧出地下水の海洋の沖合い方向への拡散範囲は、それぞれリモートセンシングによる調査、現地調査、さらに簡単な数値計算による計算結果から、少しずつ差異は見られたものの、いずれの場合も60~80m程度拡散する。
- (2) 海岸湧出地下水をリモートセンシングによって探査していく場合、熱画像上ではその海洋上での拡散範囲は、一般的に数画素程度しか現れない。
- (3) 数値計算上では、湧水の海洋上での拡散範囲は季

節ごとに若干の変動はあるものの、人工衛星によるリモートセンシングで確認できる拡散範囲は、各季節でほとんど変化がない。

## 6. あとがき

河川等による水資源開発が困難な地域では、海岸から地下水が湧出している箇所を探査することによって、水不足解消を図ることができると考えられる。海岸湧出地下水の湧水箇所の探査には、リモートセンシングが有用であるが、湧水箇所の拡散現象の特徴が得られれば、衛星データを解析するときに湧水箇所を的確に捉えることが可能になる。

本研究では、実際に海岸から地下水が湧出している箇所を、リモートセンシングによる解析、現地調査、さらに簡単な数値計算を行うことによって拡散範囲を調べ、その特徴が幾つか捉えられた。しかしながら、季節ごとに海域上での観測ポイントが異なったため、現地調査では湧水の拡散範囲が明確に捉えられなかった。今後は観測ポイントを一定箇所に固定して観測していき、さらに地下水は季節ごとに湧水源での湧出状況も異なると考えられるため、流量等も測定する必要がある。

水不足が起りやすい離島などでの小規模の湧水箇所を探査するには、さらに解像度の高いセンサの開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 国土庁長官官房水資源部：全国総合水資源計画、(ウォータープラン 2000)、大蔵省印刷局、p. 2, p. 22, 1987. 10.
- 2) 湯藤義文・草野和郎・武政剛弘・後藤恵之輔：長崎県における沿岸海底湧出地下水の実測調査、長崎大学工学部研究報告、第21巻、第35号、pp. 55~59, 1990. 7.
- 3) 和田 明：冷却水放水に伴う流動と熱拡散現象、電力中研技術研究所報告、No. 66033, pp. 1~38, 1966.