

水資源開発に向けた海岸湧出地下水の 衛星リモートセンシング調査

長崎大学工学部	正 員	後藤恵之輔
同 上	学生員	七條哲彰
同 上		桑原敏行
同 上		藤田 徹
近畿大学九州工学部		森 正寿
(株)建設技術研究所	正 員	中山比佐雄

1. はじめに

大規模河川のない長崎県は水資源に恵まれておらず、特に島原・県央地区の水資源開発¹⁾が急務となっている。このため長崎県では、海岸湧出地下水を新たな水資源として活用するため、地下水の海岸湧出地点の調査を同地区において行っている。調査内容は、実際に潜水調査等を行い湧出地点を探るものであるが、この方法で全地区を調査するには、費用、時間の面で無理があると言える。

海底から湧出した地下水は淡水のため、海水より密度が低く海表面に浮上する。そこで、本研究では現地における潜水調査の結果を参考に、人工衛星を利用した湧出水のリモートセンシング調査を行い、地下水の海岸湧出箇所を見出すことを目的とする。

2. 島原半島の地質と地下水

2.1 地形・地質²⁾

雲仙火山は島原半島の中央部に位置し、その周辺に扇状地状のなだらかな火山山麓が広がっている。半島の南部には標高200~300mの丘陵地帯があり口之津丘陵と呼ばれている。また、この半島の中央部には、図-1に示すように東西方向に走る断層地形(雲仙地溝帯)があり、北側のものを千々石断層、南側を深江断層と名付けている。この雲仙地溝帯の範囲が島原半島で地下水が最も豊富な地域であり、島原市内や深江扇状地の湧水群もこの地溝帯内に含まれる(図-2参照)。

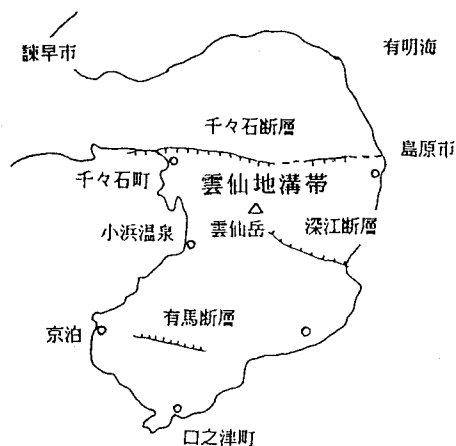


図-1 島原半島の断層

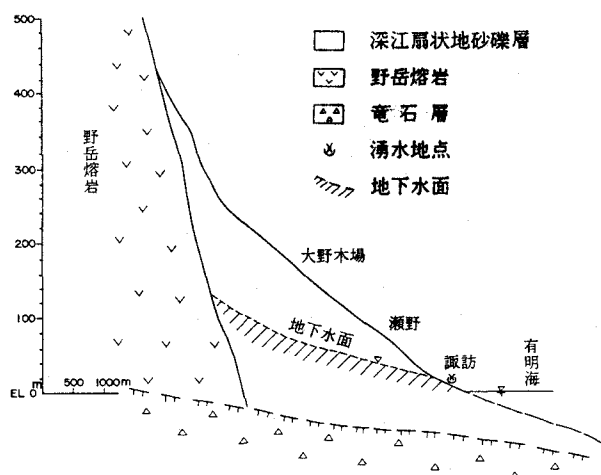


図-2 深江扇状地の水理地質断面図³⁾

2.2 地下水²⁾

雲仙火山は、厚い火砕流堆積物を主要な帯水層にもつ九州の他の火山地帯とは、若干異なる水文地質条件をもっている。すなわち、前期更新世の口之津層群およびその相当層の厚い泥岩を不透水性基盤として、その上面構造に支配されて、これを覆う火山噴出物中に地下水が賦存されている。とくに、東西の断層によって落ち込んだ

地溝帯状の地域は、厚い雲仙火山噴出物およびその崩壊物が堆積し、基盤岩の深度も深くなっている。

雲仙火山噴出物中の地下水は、火山山麓を形成する竜石層とその相当層に賦存されるもので、層圧100~150mに達する火山砂礫を主体とした地層で、最上部は風化帯や砂礫層で不圧地下水を胚胎し、下部の泥流中には被圧地下水を含んでいる。山麓末端部では-50~-60mに広い平坦面をもつ不透水性基盤があり、この上面構造の谷地形に支配されて被圧地下水が賦存される。この上面構造は地表の傾斜方向と一致し、埋没谷の中心に近いほど被圧度も高い傾向にある。

島原市周辺の地域では、海岸付近または標高10~20mの線上に並んで湧水が分布しており、島原市宇土の湧水は42,000m³/dayにも達する。半島西側も同様で、千々石扇状地末端部では標高10~30mの線に沿って湧水地点が並んでおり、湧出量は20,000m³/dayである。また、半島南部の口之津層群中の帯水層は、南串山町田平、京泊付近に限られる。また、この口之津層群を東西に横切る有馬断層などによって盆状構造が形成される地域にも、被圧地下水が存在する。

3. 解析の概要

3.1 解析方法

将来の水不足解消のため、直接海へ流出する地下水を水資源として利用するためには、海岸部における地下水の湧出箇所を発見することが重要である。しかし、現在の地下水調査法では、長い海岸線を調査するのに莫大な費用と労力を要してしまう。そこで、地下水が直接海へ流出する地点を発見する方法として、海水と地下水の温度差および密度差を利用する熱赤外線映像による探査法がある。これは、飛行機を用いたりリモートセンシングでは既に試みられている手法⁴⁾である。本研究では、この飛行機の代りに人工衛星を用いて、海岸湧水箇所をさらに広域に効率良く探査する手法を開発しようとするものである。

今回の解析に供したのは、ランドサットTMデータである。ランドサットに搭載されているTM(セマティックマッパー)の熱赤外域であるバンド6は、0.2℃以上の温度分解能を有する。このため、海水と海へ流出した地下水との間に0.2℃以上の温度差があれば、直接映像として得ることができる。一般に、海水の温度が季節ごとに変化するのに対して、地下水は年間を通じてほぼ一定温度を保っていることが知られている。また、地下水は淡水のため、海水よりも密度が小さいことから海面に浮上する。したがって、海水表面の温度をとらえることによって、海岸からの湧出地下水の発見が可能になるはずである。

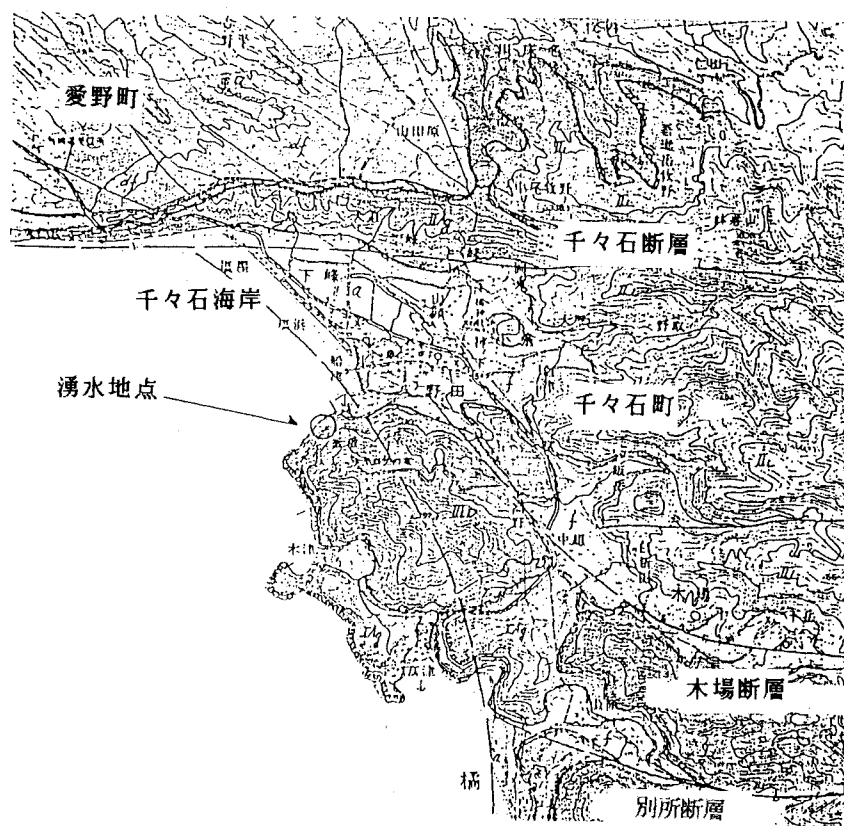


図-3 潜水調査により湧水が確認された地点

本研究では、衛星リモートセンシングによる海岸湧出地下水の探査を、以下の方針に従い解析を進める。

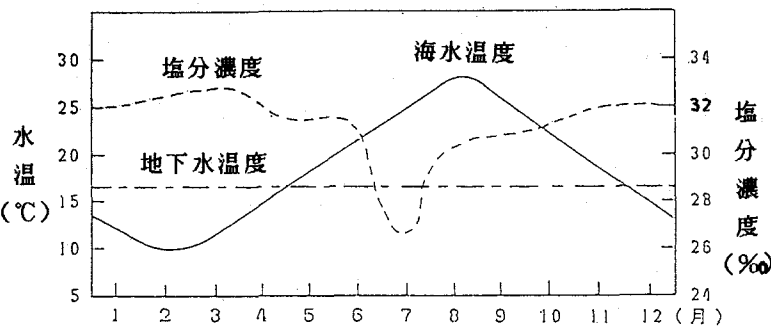
- (1)潜水調査により、海岸湧出水が確認された島原半島千々石海岸付近において、周辺海域の温度差をTMの熱赤外域のバンドにより行うと同時に、他のバンドにおける海岸湧出水の反射特性についても、調査を行う。
- (2)この結果から得られる温度特性および反射特性に基づいて、島原半島全域を対象として地下水の海岸湧出箇所を探査する。

図－3に県の調査により湧水の確認された千々石海岸の位置を示す。

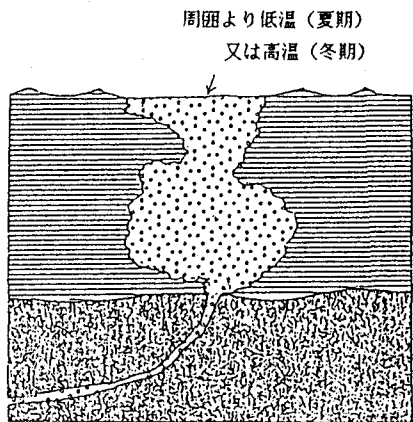
3. 2 海岸湧出地下水の特徴

本研究で対象としている島原半島周辺の海域の海水温度は、2月で9～10℃、8月では28℃と年間で約20℃の変動があるのに対し、島原市内の地下水や湧水の水温は年間を通じほぼ17℃と一定である。参考として、島原市沖約800m、海面下1mの海水温度および塩分濃度の1年間の変化⁵⁾を図－4に示す。

また、地下水は海水よりも比重が小さいため海面上に浮上してくる。したがって、湧出する地下水は海面に温度差として現れ図－5に示すように、海面の温度分布を調べることで地下水の湧出箇所を見つけることができる。



図－4 島原市沖の月別平均海水温度と塩分濃度



図－5 地下水の海域への湧出

4. ランドサットデータの概要

ランドサットは地球の資源探査、環境の観測などを目的としたアメリカの人工衛星で、1972年に1号衛星が打ち上げられて以来、現在は5号衛星が観測を続けている。

ランドサットに搭載されているセンサーは、1～3号が マルチスペクトルスキャナー (MS S) とリターンビームビジコンカメラ (RB V)、4, 5号が MSS とセマティックマッパー (TM) である。これらのセンサーは地球から反射または放射される電磁波を観測するが、そのセンサーの諸元を表－1に示す。

TMには1～7のバンドがあり、可視光線～熱赤外線を観測することができる。バンド1～5、7は解像度30m、バンド6は120mである。本研究では、熱赤外領域(10.40μm～12.50μm)のバンド6を用いて海面の温度分布を調べることとした。

解析するランドサットのデータは磁気テープに

表－1 ランドサットセンサーの諸元

バンド	TM	MSS
1	0.45～ 0.52μm	0.5～0.6μm 0.6～0.7 0.7～0.8 0.8～1.1
2	0.52～ 0.60	
3	0.63～ 0.69	
4	0.76～ 0.90	
5	1.55～ 1.75	
6	10.40～12.50	
7	2.08～ 2.35	
地表分解能	30m(バンド1～5,7) 120m(バンド6)	80m(バンド4～7)
データ転送速度	83Mb/S	15Mb/S
量子化レベル	256	64
重量	227kg	81kg
大きさ	1.1×0.7×2.0m	0.35×0.4×0.9m
電力	320watts	42watts

CCT値として記録されている数値であり、直接には温度を表していない。そこで、リモートセンシング技術センターによる補正式でCCT値を補正した後に、対応する温度に換算した。

補正式は次のとおりである。

$$Y = 0.5932X + 45.12$$

ただし X：補正前のCCT値

Y：補正後のCCT値

図-6に補正後のCCT値と温度との関係を示す。ただし、実際の島原市沖の水温は、これから得られる値よりも5℃程度高いようである。

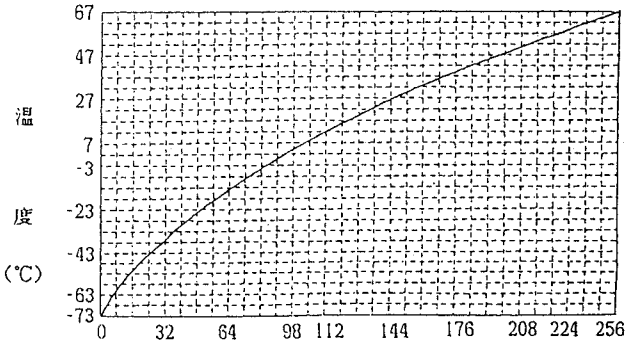


図-6 補正後CCT値と温度の関係

5. ランドサットデータの解析

5.1 解析に供したデータ

今回解析に供したランドサットデータは観測日が1985年8月29日、1987年9月4日、同10月6日のもので、いずれも観測した衛星はランドサット5号、バスーロウは113-37、観測時刻は午前10時17分である。これらデータの概要を表-2に示す。

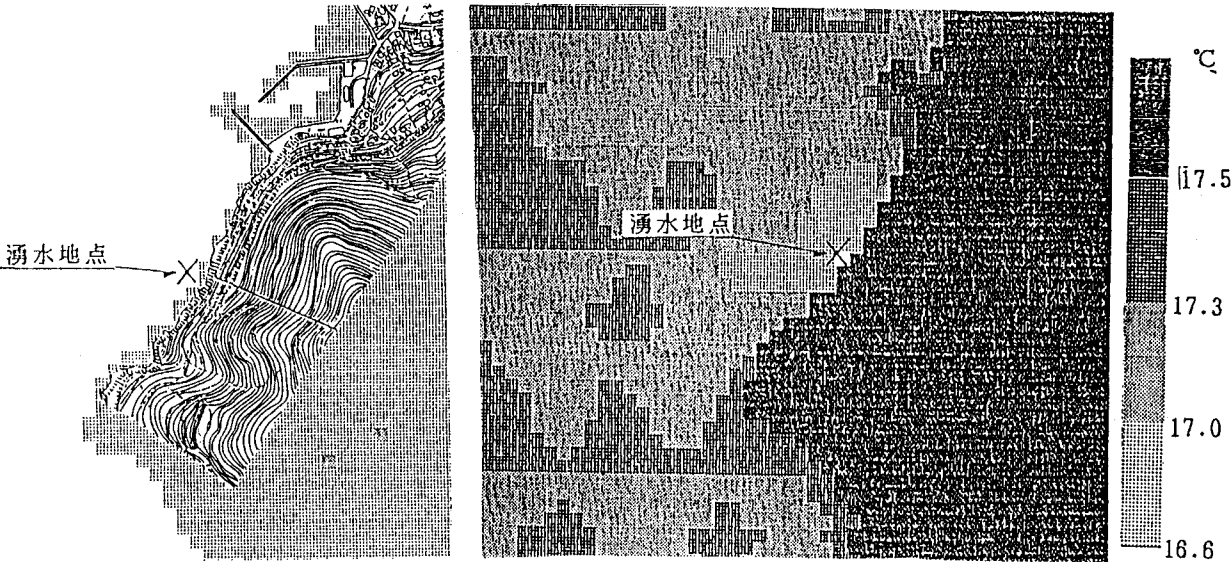
5.2 バンド6の解析結果

バンド6は波長が10.4～12.5μmであり、常温における地表面温度分布を得ることができるバンドである。解析に使用するシーンは8,9,10月のデータであるが、この時期を図-4の島原市沖の月別平均水温のグラフで見ると、8,9,10月においてはいずれも、地下水温が海水温より低くなっていることが読み取れる。そこで、1987年9月4日のデータを例として、バンド4による陸域と海域の分離と、その場所のバンド6による海水温の状況を図-7に示す。この結果を見れば、湧水地点付近の水温は、周囲の海水温よりも低くなっていることが明らかに認められる。

表-2 使用したランドサットデータの概要

衛星	ランドサット5号
センサー	TM
バスーロウ	113-37
リサンプリング法	キュービックコンボリューション
地図投影法	UTM
補正モード	バルク
フォーマット	BIL
記録密度	6250bpi

図-3に示した、潜水調査による湧水の確認地点(×印)より、少しずれた



(a) バンド4による水陸分離画像

(b) バンド6による海水温の状況

図-7 島原半島千々石海岸(図-3)の水陸分離画像と海水温の状況(1987年9月4日観測データ)

地点に温度の低い地点が表れている他時期のデータもあるが、これはそのランドサットデータ観測時における湧水地点の潮の流れや、湧水量などによって違いが表れているものと考えられる。しかし、結果としては総じて良好な結果が得られたものと言える。

5.3 バンド6以外の解析結果

ランドサットのTMは、バンド6以外にバンド1, 2, 3, 4, 5, 7がある。沿岸水と淡水の減衰定数を比較すると、波長が0.35~0.70あたりの可視域では、沿岸水の減衰定数が、淡水の減衰定数に比べて大きいことが、分っている。その波長帯は、バンド1~3の波長帯と一致しており、したがってバンド1~3においては、海水と淡水の違いがCCT値に現れるはずである。湧水は淡水なので、周囲の沿岸水よりも減衰定数は小さい。よって湧水地点は、その波長帯域の吸収が少なく、バンド1~3においては周囲より高いCCT値を示すことが考えられる。

バンド1~5および7の解析結果の一例として、1985年8月29日のバンド3（可視域）、バンド5（近赤外域）、バンド7（中間赤外域）の解析結果を、図-8に示す。それぞれのシーンにおいて、湧水による低水温域が示した特徴を以下に述べる。

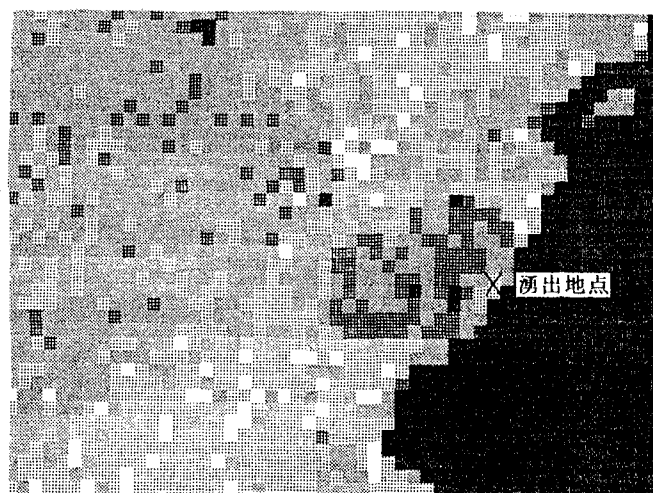
図-8に示した1985年8月29日、および1987年10月6日のデータにおいては、1~3のバンドにおいて、湧水地点では周囲の海域よりも高いCCT値が認められた。ただし、1987年9月4日のデータにおいては、周囲の沿岸水域と違いが認められなかった。

バンド4, 5, 7においては湧水のためと思われるCCTの高い地域が、ほぼ全シーンにおいて確認された。

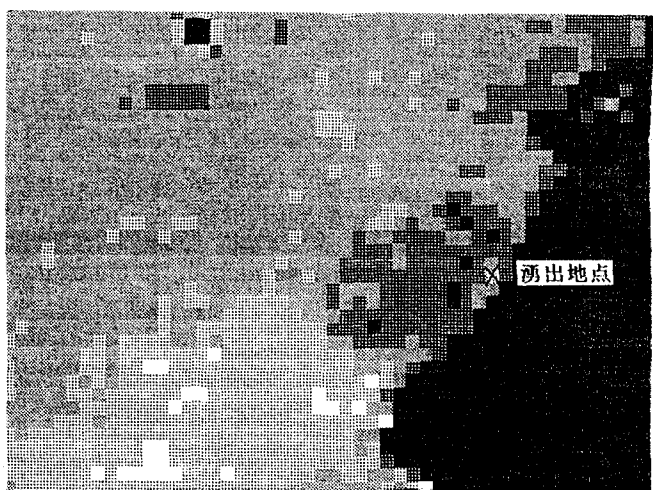
以上の結果から得られた湧水地点における、各バンドのCCT値の特徴を表-3にまとめて示す。

表-3 湧水地点の各バンドのCCT値の特徴

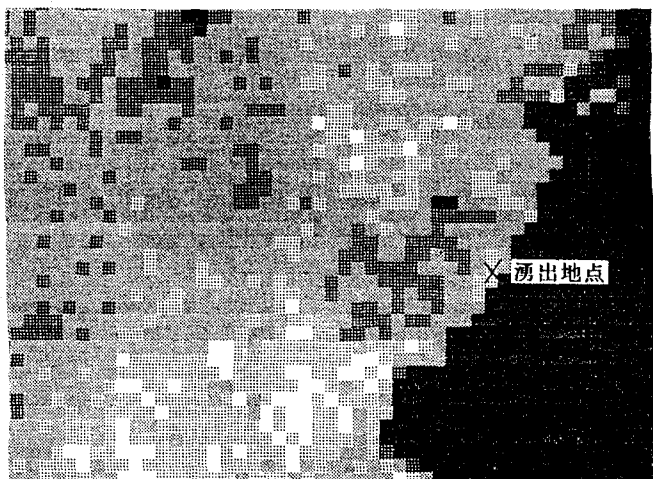
バンド	ランドサットデータ観測日		
	1985年8月29日	1987年9月4日	1987年10月6日
1	やや高い	×	やや高い
2	やや高い	×	やや高い
3	やや高い	×	やや高い
4	高い	やや高い	高い
5	高い	高い	高い
6	低い	低い	低い
7	高い	×	やや高い



(a) バンド3（可視域）



(b) バンド4（近赤外域）



(c) バンド7（中間赤外域）

図-8 1985年8月29日観測データのバンド6以外の解析結果

6. 島原半島全域における 探査

6.1 方針

これまでの千々石海岸の湧水地点の解析を行うことによって、以下のことが判明した。

- (1) バンド6が湧水地点において最も顕著なCCTの特徴を示している。
- (2) バンド1～3の可視域のバンドでは、3シーンの内、2シーンにCCT値の高い地点が認められただけである。このバンドでは、沿岸水と淡水の違いが読み取れるはずなので、解析には有用なバンドだと思われる。
- (3) バンド4, 5の近赤外域のバンドにおいて、湧水地点は周囲の海域よりも高いCCT値を示している。

これらのことを考慮に入れて、島原半島全域における解析を行っていく。

6.2 解析方法

はじめにバンド6により、周囲の海域よりも低い温度を示している地点を捜す。次に、その低水温域において、バンド6以外のバンドにおいても、先に得られた湧水地点における解析結果と比較する。

6.3 解析結果

図-9に示すように、島原半島全域（国東半島沖、千々石海岸、島原市沖等）において、低水温域が確認された。これらの地域は、海岸付近に自噴井戸が在る⁷⁾ように地下水の豊富な場所であり、またこれらの地点には河川がない等のことから、低水温の海水域は海底からの地下水湧出によると考えられる。

例として、国東半島沖の低水温域とその周囲の海域のCCT値を比較した結果を、表-4に示す。これを湧水地点で得られたデータ、表-3と比較すると、全体的に見て、県が確認した湧水地点と同様なCCT値の分布状況を示していると言えよう。



図-9 島原半島の全域の低水温域

表-4 国東半島の各バンドのCCT値の特徴

バンド	ランドサットデータ観測日		
	1985年8月29日	1987年9月4日	1987年10月6日
1	×	やや高い	×
2	やや高い	×	やや高い
3	×	×	×
4	高い	高い	やや高い
5	やや高い	やや高い	×
6	低い	低い	低い
7	やや高い	×	×

7. あとがき

本研究の解析結果より、長崎県が潜水調査により確認した海岸湧水の湧出地点を、ランドサットTMセンサーが探査していたことが実証された。また、県が調査した地点以外にも、上記の湧出地点と同様の分光反射特性を示す、湧水の発生していると考えられる地点が、島原半島内に多数存在することが判明した。

この人工衛星を利用した地下水の探査は、従来の方法よりも費用、時間とも極めて少なく済む。また、今後海岸の湧出地下水を調査するに当たっても、人工衛星データの解析を併用することで、調査地域の限定を行え、湧水地点の選定の確立も高くなるものと思われる。

最後に、本研究は島原半島に限らず、将来においても水不足に悩まされる地域の新たな水資源の開発に、大きく貢献できるものと確信する。

1) 後藤恵之輔ほか：ランドサットTMデータを用いた海岸湧出地下水の遠隔探査，海洋開発論文集，Vol.4, pp.249～254, 1988.

2) 農業用地下水研究グループ：日本の地下水，地球社，pp.824～828, 1986.

3) 古川博恭：九州・沖縄の地下水，九州大学出版会，pp.186～194, 1981.

4) 日本写真測量学会編：熱赤外線リモートセンシングの技術と実際，鹿島出版会，pp.118～120, 1987.

5) 長崎県水産試験場島原分場：第47回西海区ブロック漁海況連絡会議浅海分科会資料，1987.9.

6) 宇宙開発事業団：地球観測ハンドブックーランドサット編・改定版ー，1986.10.

7) 九州農政局：地下水利用実態調査農業用地下水取水施設位置図，1976.6.

参考文献