

# 熱赤外線利用の地熱探査

～草津白根一万座地域を例として～

長谷 紘和・西村 嘉四郎

## はじめに

可視域をこえた中間～遠赤外波長領域の電磁波が地学の分野において 映像判読という形で利用できることをわれわれに最初に示唆したのは 米国地質調査所の W. A. FISCHER 博士で それは1961年のことである。

当時から10年余の年月が過ぎた今日 熱赤外線撮像技術はリモートセンシングの一分野として著しく進展し遅れぎみながらこれと雁行して利用分野も開けてきている。とくに水面の温度調査においてはすでに実用の段階に達した。たとえば工場排水による熱汚染の問題などに関して 熱赤外線映像が盛んに利用されるまでになった。熱赤外線映像の地学分野への利用については 他のリモートセンシング手段（従来の空中写真に加えて 今日わが国では 地球資源技術衛星からの多波長帯域非写真映像航空機からの多波長帯域写真などが利用可能となっている）と併用することによって 一段と利用効果が上がるものと考えられる。

地質調査所では 1965年から地学目的を主とする熱赤外線映像の利用に関する研究に着手し 当面火山・地熱地域を対象に研究を進めてきた。

熱赤外線映像による地熱異常のマッピングは ある意味ではまことに直接的な働きかけではあるが その反面これほど困難な対象はないといえる。火山・地熱地帯はわが国の場合その多くが急峻な山岳地帯にあり 撮像技術においても また得られた映像の解釈においても ともとも困難な諸要素が関連する。いいかえれば 火山・地熱地域の映像解釈には 熱赤外線映像解釈のすべての要素が盛り込まれているといっても言いすぎではないだろう。

われわれは 1970年以降わが国でも代表的な 火山・地熱地域の一つである 草津白根一万座地域を赤外線地質に関する研究地域に設定してテーマに取り組んできた。ここにこれまでの研究経過の一端と 今年8月におこなわれた現地調査の様子をご紹介したい。

本年度から全国的規模で開始された 地熱開発可能地域の基礎調査の計画の中で 空中熱赤外線映像による調査法は 地熱異常地の面的広がりをおさえる目的でとり上げられることになった。ここ数年間 熱赤外線映像の地

学分野への応用に関するテーマに取り組んできた筆者らにとって これまでの努力が研究の段階から実用段階で 実を結びつつあることは大変よろこばしい。

地質調査所では熱赤外線映像の高度の利用をはかるため今年度において 草津白根一万座地域の空中熱赤外線撮像を行なうとともに 地上における同時調査を計画した。本文はその結果についても記載する予定であったが 当初の計画（8月）が調査期間中における気象の悪条件のため撮像飛行が延期されるのやむなきにいたった。撮像飛行はその後9月に行なわれたが結果を紹介することは本誌の原稿締め切り期日からできない。本誌中の地上調査の様子は8月のときのものである。あらかじめおことわりしておきたい。

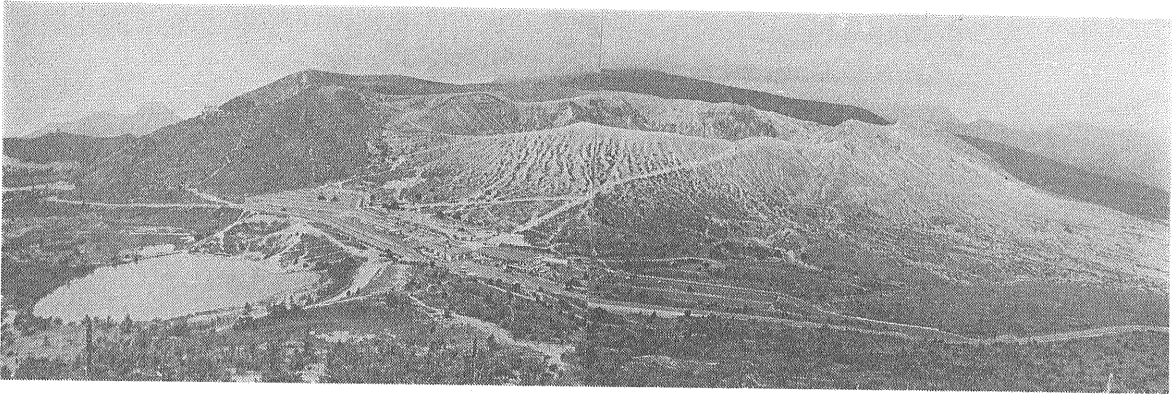
外国における熱赤外線映像利用の地熱調査例  
熱赤外波長領域をラジオメトリーあるいは映像として検知・表示する技術を 地熱探査の目的のために利用する場合には 次の三つが考えられる。

- 1) 未知の地熱異常地の探知
- 2) 熱異常分布のパターン解析
- 3) 定量的利用

未知の地熱異常地の探知という目的に対して空中赤外線撮像方式はもっとも直接的で有効な手段であるといえることができる。広域を短時間でカバーでき しかも二次元表示できる利点からいって 熱赤外線映像は地熱放出源の探査には最適の条件を備えている。実際 米国のイエローストン公園のように広大な面積を占める地熱異常地では 熱赤外線映像によって 新たに発見される地熱異常地が 多数にのぼることが報告されている。また開発の進んだ地熱地帯でもこれまでに知られていない地熱異常地が発見される場合がある。同じく米国のガイザー地熱地帯における報告がよい例である。

発展途上国における地熱開発計画では 地形測量のための空中写真撮影とともに 熱赤外線撮影がもっとも先行して行なわれるべき探査法の一つにあげられている。それらの例としては メキシコやエチオピアをあげることができよう。

現在火山・地熱地域を対象に熱赤外線撮像を行なっている国は上記の各国の他に ソ連 ニュージーランド イ



第1図 白根山頂の中央火口外観 左手に見える池は弓池である

タリア アイランド フィリピンなどである。だがエチオピアでの例をのぞいて 上記の各国での熱赤外撮像は 多分に実験的なものである。

ここで熱赤外線撮像技術および映像の解釈においても進んでいる米国の研究歴をたどってみよう。

第二次大戦後 米国における赤外線に関する研究はおもに軍事目的のために強力に推進されたが 全貌は厚い秘密のベールの中で進められてきた。1949年には 海軍研究局がスポンサーとなって IRIS (Infrared Information Symposia) という機関を設立し 限定された条件下ではあったが赤外線に関する資料が この機関を通じて公開され始めるようになった。このような状態は約10年間続き その間に得られた空中熱赤外映像上にあらわれた地質学的に興味のある地表面の温度差パターンは 背景雑信号としてかたづけられ かえりみられることはほとんどなかった。1960年代に入ると これらの「背景雑信号」の分野にたずさわる専門家の間にも熱赤外映像が目にとまるようになり データのもつ意味について深い興味と注目が集められるようになった。1962年には従来赤外線研究の一つの中心グループである ミシガン大学赤外線研究室が海軍研究局の援助で 地球科学・環境科学分野で応用できる リモートセンシング技術および利用技術研究を目的としたシンポジウム (Symposium on Remote Sensing of Environment) を開催した。このシンポジウムの資料を中心として 米国における熱赤外映像の利用分野の進展を追ってみると 1962—1964年の間におこなわれた撮像実験の最大の目的は映像を得ることにあつたと言ってもよいだろう。1965—1968年の間におこなわれた撮像実験は おもに米国航空宇宙局 (NASA) との研究契約に基づくもので 地質構造判読 鉱床探査 あるいは地熱探査における熱赤外映像利用の可能性を追求するということが主目的であつた。

1968年にはそれまで機密扱いとなっていた撮像装置技術が機密の枠を取り除かれるようになり それ以後今日まで 地学分野における熱赤外映像の利用研究は次第に活発となってきている。

ひるがえってわが国の実情をみると 地学への応用を目的とした研究は 1965年から実際に開始され 研究初期には撮像装置の開発と撮像が主目的であつた。撮像装置は日本電気株式会社によって開発され Infravision III型として 広く海外に紹介されたので注目されることとなり ミシガン大学からわざわざ見学者が訪ずれ 1968年の同大学でのシンポジウムでその見学感想手記が披露された。その後地質調査所においては熱赤外映像の解釈に関する研究に主眼を移し まえがきの部分でのべたように 草津白根一万座地域が選ばれたわけである。

#### 草津白根一万座地域の地質背景と火山活動

草津白根山は 同じ名を持つ日光白根山と区別するためにわざわざそう呼ばれている。群馬県の北部にあつて 長野県との県境を分ける山岳地域に発達する本山は本白根山 (南頂) とその側方火山的白根山 (北頂) の南北二頂を持つ複合火山である。ここは上信越高原国立公園の一部にあたり 高原状の火山地形の美しさで知られる (第1図)。シーズン中は 毎日多数の観光客で賑わうところであるが 最近のレジャーブームでさらに一層拍車がかかり 火口湖をみに山頂へ登る人の列は都会の繁華街とちつとも変わりが無い。

さて 草津一万座地域の火山・地熱活動を理解するために この地域の地質背景についてまずふれてみよう。

#### 地質概略

ごく巨視的に見ると 地域は東北日本列島弧と伊豆・マリアナ弧との接合部に位置し 第三紀中新世以降の島

弧変動が この地域の地質や地熱現象を規制していることは間違いないところであろう。 北部フォッサマグナのグリーンタフ地域では 本州中央部に楔が打ち込まれたように 中央構造線は北に押し込まれて方向をかえ また グリーンタフ火山活動の初期から第四紀に引続く火山活動の中心舞台となった中央隆起帯(飯島 1962)の形成は 北北東-南南西方向に長軸をもつ割れ目噴火帯に影響されている。 この地殻弱線は信州大学の飯島南海夫教授によって 諏訪-十日町構造線と名づけられたものである。 さらにグリーンタフ変動以前の地域の基盤構造は 諏訪-十日町構造線に直交する利根川構造線(山下 1954)によって規制を受けていると考えられる。 このように 草津白根-万座地域とその周辺地域には きわめて大規模な地殻弱線が発達するのが特徴である。

草津地域は早くから地質学的興味を引き もっとも古い記録では 19世紀の末に殺生河原の硫黄結晶について記載された文献がある(岩崎重三 1897)。 記録によると当時の殺生河原には 水をたたえた直径10mほどの池が存在したらしいが 今日その面影はない。 あるいは殺生河原の東南東約500mにある 武具脱<sup>のぬが</sup>の池がそれに相当するのかも知れないが 少々距離が離れすぎようだ。 この地域の一般地質と地質構造については 大橋良一先生によって1914年からはじめて総括され その後5万分の1地質図幅「草津」として地質調査所から出版された(太田 1957)。 最近群馬県企業局の依頼で再調査が行なわれ結果が公表されている(太田・松野 1970)。

草津白根火山は 歴史時代に入ってからもたびたび爆発活動をおこした活火山であるが 最近では 1937-39年の爆発を最後に顕著な活動はない。 爆発活動はいずれも水蒸気爆発に属するもので熔岩の噴出はなく 火山活動の終末期に近づいているものと考えられている。

草津白根火山の記録に残る火山活動は いずれも白根山頂付近でおこっており 山頂には多数の爆裂火口が地形的に保存され かつての活動のなごりを止めている。 このうち最大のもは湯釜で中にはオパール色をした水をたたえている。 水面の直径は約250mで 深さは今回の測深調査の結果深部で33mもあった(第2図 a b)。 湯釜をはさんで北東には水釜 南西にはから釜という名前で親しまれる火口湖が連なり 水釜には水深約1mのから釜には たかだか 30cm ほどの水をたたえている。

草津白根火山の活動記録は多くの人々によって記録されているが 昭和7年(1932年)の爆発までのもっとも詳しい記録は津屋弘達先生によって報告されている。 ここにその一部をご紹介させていただくことにする。

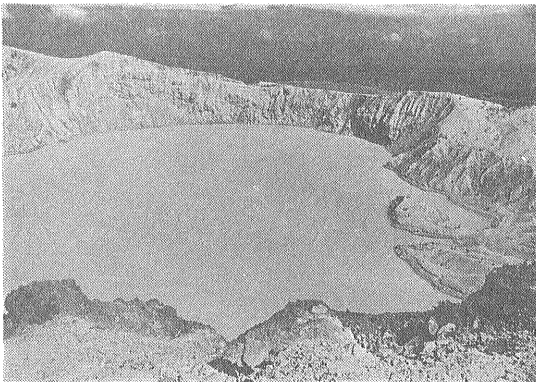
### 草津白根火山の活動記録

記録に残るもっとも古い爆発は明治15年(1882年)の夏に湯釜を中心にしておこった(第3図)。 その当時の湯釜には 中央部にわずかに水がたまっていただけで 火口底には樹木や草が生い繁っていたが 爆発の後にはすっかり枯れてしまった。 また火口底には無数の小爆裂火口ができて それらのうちでは湯釜北東部の火口壁のわきにできたものがもっとも大きく 直径150mに達し 爆発の後では水は新しくできた爆裂火口にたまるようになった。 この小さな火口湖は 当時大池と呼ばれていたものである。

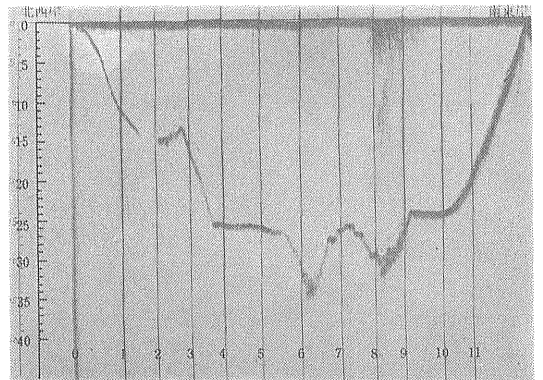
その後明治30年(1897年)と33年(1900年)にも爆発があつて爆発による負傷者も出た。

白根山々頂付近には他に大小さまざまな爆裂火口があるが その中で一番大きいのは から釜の南500mにある弓池(直径約150m)である(第1図参照)。

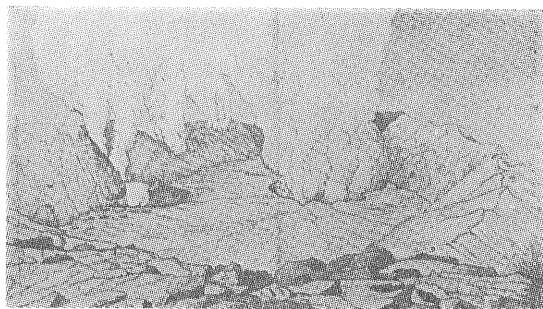
明治35年(1902年)の爆発は いままでの爆発とは異なってこの弓池の北岸でおこった。 爆発活動は約3ヶ月間続いてやんだが それまで魚もせい息していたこの



第2図 a 白根山頂中央火口湖 湯釜 湖面には小さな泡音をたてながら湖底湧泉の不気味な紋が広がる 写真左手に水釜右手にから釜が連なる



第2図 b 湯釜を横断(北西-南東方向)する測線に沿って得られた火口湖の断面図(上田ほかによる湖盆調査の一例)



第3図 明治15年(1882年)の爆発を示すスケッチ(TSUYA 1933に引用された JINGORO YANAZAWA 氏記録のもの) 図の正面で盛んに噴煙を上げているのが北東方向にあたる

池は 以後池の水が急に酸性を帯びて魚類はすめなくなつた。しかし弓池のまわりは殺伐な白根山頂付近とは異なり 緑にかこまれ風趣をそそるところで 爆発活動の後 観光用のボートが浮かべられていたということである。今日では池は水深約1.3mと浅くなり ボートなどの観光施設はない。池の周囲は湿原に変わりつつあって 高山性の水辺植物が繁茂する。今回の調査では水質は pH3.0 を示し かなり高酸性であった。

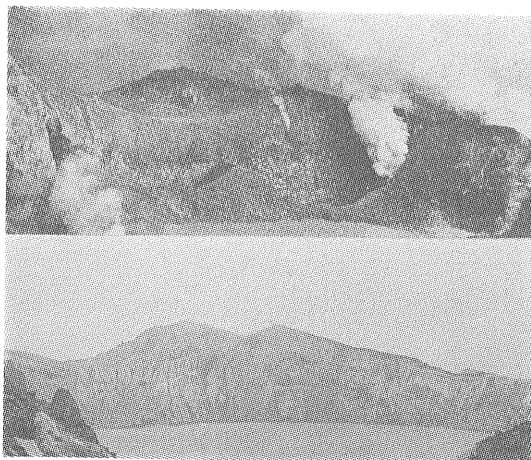
その後 白根山は明治38年(1905年) 大正14年(1925年) 昭和2年(1927年) と頻繁に爆発活動を繰返している。それらはいずれも湯釜を中心として活動したものであった。

昭和2年の大爆発の後白根山頂の活動は次第に不活発となって 湯釜湖岸では硫黄の採掘が盛んに行なわれるようになったが 新たな爆発活動はまさに晴天のへきれきのごとくに始まった。それは昭和7年(1932年)の10月1日午後2時5分のことである。津屋先生の報告にはその時の様子が見事な英文で実にいきいきと述べられている。何の予告もなしに始まったこの時の爆発活

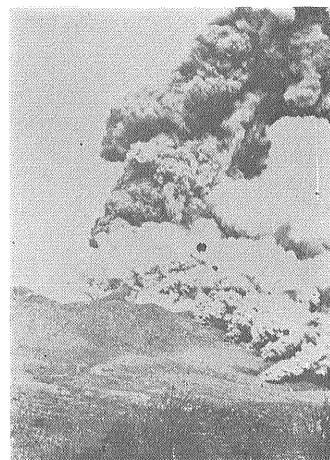
動では 晴天下で働らいていた硫黄採掘の鉱夫が2名即死し 7名が重傷を負うという大きな人的被害があった(第4図)。

この年の爆発活動で特筆すべきことは 従来弓池北岸でおこった爆発を除いてほとんどの活動が湯釜を中心とした火口壁内でおこっているのに較べて 火口壁の外側で爆発活動がおきたことである。すなわち湯釜の外側に北々東一南々西方向の割れ目帯ができ 割れ目に沿って烈しい爆発がおきた(第5図)。割れ目帯の長さはジグザクしながらも直線状に300m以上発達した。この時形成された割れ目帯は現在でも地形的特徴が残っている。第1図の写真で中央右手にみえる中央火口外側斜面の地形的切れこみがそうである。その他第1図からもわかるように 割れ目帯の南西方に爆裂火口の跡を示す小さな池があり 古い時代に爆発活動をおこした形跡をとどめている。余談になるがこの池には名前がついておらず 今回調査に同行した日大大学院生の上田君がみさこ池と命名した。

昭和7年の爆発活動があつて以後数年間は 白根山頂は静穏を保っていたが 昭和12年(1937年)の11月27日再び湯釜の周囲から爆発がおこった。ちょうどその頃草津白根火山の地球物理学的調査をしておられた水上武教授はいち早く現地へ駆けつけ 爆発の様子を記録された。爆発活動は間けつにつづき ようやく昭和14年(1939年)になって静穏になった。水上教授の記録によると 昭和12年の爆発でできた割れ目帯からはまだ活発な噴気活動がみられ かわえて水位が低下した湯釜を横切つて別の割れ目帯が北西一南東方向に発達し 噴気がそこから立ち昇っていたという。記録に残っている過去の爆発活動に伴うおもな地形変化を図に示す(第6



第4図 昭和7年の活動時における湯釜の様子(10月22日撮影 Photo TSUYA, TSUYA, 1933)と現在昭和48年8月20日との比較



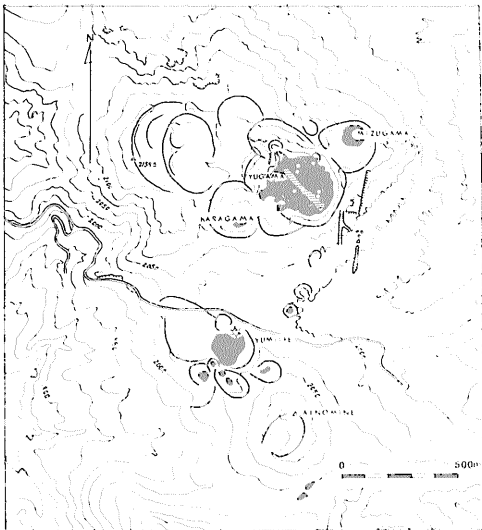
第5図 中央火口の外側にできた割れ目帯からの爆発の状況(昭和7年10月23日 Photo TSUYA, TSUYA, 1933より)

図).

今回の地上調査では前にもふれたように 魚群探知機を用いての測深と湖盆図作成が行なわれた(第2図b参照). 記録紙の上にあらわれた断面には 湖底に深い切れこみがみられ これは昭和12~14年の爆発の際にできた割れ目帯を示すものと思われるが 埋積作用は30年以上経った今日でも意外に進んでいないようである.

白根火山は昭和14年の爆発を最後に以後活発な活動を行っていない. 現在みられる山頂付近の地熱異常は湯釜の水温が高いこと 水釜のまわりの地熱異常 それに火口の外側の北側斜面に見られる噴気などである. 過去の爆発活動をもて記録に残る活動のもっとも長い静穏期間はたかだか20年で 30年以上も静穏を保っているのはむしろ異常現象ではないかと思われる. 昭和32年の爆発がそうであったように 次の爆発活動が一般人が全く気が付かないほどの予告で突然おきるようなことがあれば 黒山の人だかりで賑わうシーズン中など大変な人的被害が出ることが予想されよう.

われわれの現地調査と同時期に気象庁の火山観測班による白根山一帯の地震観測が行なわれた. 同じ宿泊所滞在了たので情報の交換もでき大変有意義であった. ただし このように各方面の調査が白根山周辺に集中したのは偶然であって 別に白根山の爆発が近々あることを予測してのことではないことを一言ふれておこう.



- 凡例
- 火口
  - 現在の湖水分布
  - 昭和2年当時の湖岸線
  - 昭和12年当時の湖水分布
  - 昭和7年当時の湖水分布
  - 湖底に存在する過去の湖底温泉の位置
  - 明治35年の爆発でできた噴石丘

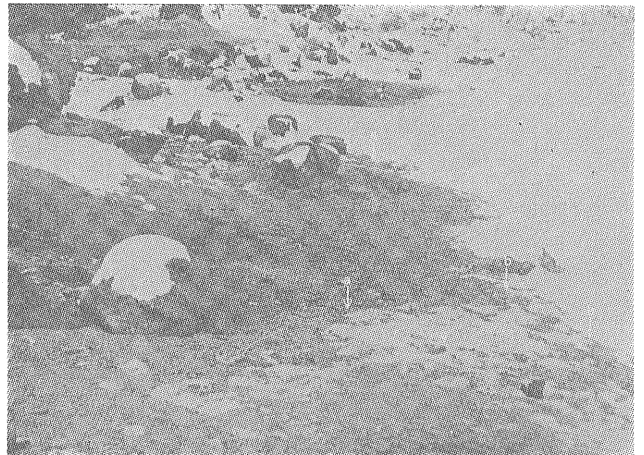
第6図 爆発活動によって生じた白根山頂付近のおもな地形的変化

### 自然現象を利用した地熱異常地のマッピングと放熱量

火山・地熱地域にはよく白色に変色した裸地が発達する. そこは変質帯と呼ばれ 現在噴気などの地熱活動がないところでも過去に地熱活動があったことを物語るところで 蒸気や熱水によって植物の成育に必要な土壌成分が溶脱し あるいは植物が育たないほど土質が化学的に変化した結果 地熱活動がやんだ後も植物が繁茂せずに地熱活動の証拠をとどめている. したがって 周囲の地表との色調の違いから 変質帯の存在は普通の白黒空中写真で濃度階調の差として容易にとらえられる場合が多い. しかしながら現在まだ地熱活動を続けているところを変質帯の中から識別することは困難で 噴気が実際にみられる地点を除いては写真やわれわれの目でそれを確かめることはできない. 熱赤外映像によって識別できる高地温異常地も 現在のところ植物のない裸地に限定される.

ところが降雪や植生という自然現象をたくみに利用して 地熱異常の広がりや放熱量をおさえることがこれまでに試みられている. 降雪の定量的利用をはじめて試みたのは米国地質調査所の WHITE 博士である. これは言われてみれば簡単なことで 地熱異常地に降り積った雪が異常の度合にしたがって融けることは多くの人々が経験的に知っているが それを実際の調査に適用したアイデアはコロンブスの卵である.

われわれは草津白根山の中腹に発達する殺生河原と万座温泉の湯畑東北部に発達する地熱異常地を対象にして 熱赤外映像の解釈のために 積雪利用の地熱異常マッピング調査を行なった(第7図). この調査は自然現象を利用するだけに なかなか好機をとらえることが困難で また放熱量が非常に大きいところでは雪が降り積



第7図 融雪を利用して地熱分布と放熱量が測定できる 雪線aa'の内側では雪が完全にとけた状態 abb'でかこまれる区域cは斑状に雪が残る 比較的地熱異常の小さいところ 草津殺生河原で

第1表 地表の状態と熱流量との関係 (Dawson, 1964による)

等級	地表条件	土壌温度(°C)と深度(cm)		熱流量(HFU*)
スーパー	裸地で蒸気が音をたてて放出する	97	0~1.5	3×10 <sup>5</sup>
A	裸地 蒸気の立ちのぼるの見える	97	1.5~3	1×10 <sup>5</sup>
B	裸地 熱変質で固まった粘土	97	3~7	50,000
C	枯死した樹木 苔 軟かい粘土	97	7~13	20,000
D	苔	97	13~24**	10,000
E	苔や地衣類	80~85	15**	6,000
F	育ちの悪い manuka (やぶをつくるかん木の種類)	60~80	15	3,000
G	manuka えにしだ など	40~60	15	1,000
H	幼松 manuka えにしだ など	25~40	15	100

注 \* 1HFU=1×10<sup>-6</sup>cal/cm<sup>2</sup> sec \*\* 24cmの深さで97°Cは15cmで85°Cに相当する

るといようなことがない などの制約があるし 測定値自体にかなりの誤差が推定されるが 上記の目的に対しては許容誤差範囲内におさまらざらうとの観点に立つておこなわれたものである。

草津白根一万座地域は 名だたる豪雪地域で 厳冬期には3mをこす積雪がある。 一晚のうちに数10cmの積雪を見ることは決して珍しいことではなく スキーヤーにとってはまことに恵まれた条件であるが 地熱異常のマッピングには都合が悪い。 この目的のためには10~20cmの積雪が24時間位のうちにあってくれなくては良い結果が出ないのである。 そのような条件を満す降雪は ここでは初冬のほんの一時期に限られる。

山麓の草津温泉付近や紅葉で名高い吾妻峡谷に沿って木枯らしが木の葉のしぐれを降らせるころ 殺生河原や万座温泉では初雪がやってくる。 それは多くは数cm以下の積雪でしかないが ときには最初から猛吹雪となってきっぱりと冬の到来を告げることもある。 昭和46年の冬の始まりはそうであった。 初冬の雪が降っては消え降っては消えの状態が 二三次続いたあとに好条件が訪ずれることが多く この機会をとらえるためにはかなりの忍耐が要求される。

こうして得られた放熱量図と、空中熱赤外映像に示された地熱異常分布とを比較すると 当然のことかも知れないがかなりよく一致する。 そこで熱赤外映像上に地熱異常として 周囲の温度差パターンから識別できる地熱異常の最小限界は放熱量(熱伝導と質量移送による地熱エネルギーの和)ではどの位の値になるかを経験的に求めることが可能となる。

地熱の有効利用が進んでいるニュージーランドの地熱地帯では 地熱異常地のまわりに成育する植物と地温異常 ひいては熱流量(熱伝導による地熱エネルギー)の間に特徴的な関係があることが確かめられた(Dawson, 1964)。

この植生の変化は空中写真上で容易におさえられるので 広い地域に点在する地熱異常地の熱量計算の概算に空中写真を利用して効果が上がったことが報告されている。

植物は一般に大型になるほど地下深く根をおろすので きょう木 かん木 草 苔類の順に地下の地熱異常の影響を受けやすい。 Wairakei での調査の結果 植物と熱流量との関係が9階級に分類された(第1表)。

米国のイエローストン公園でも White 博士は 同様の関係を指摘しておられた。 ここでは地熱地帯はロジポール松(*Pinus contorta*)の原生林の中に発達するが 地熱異常地の周辺では幼松は育つもの ある程度をこえて成長すると直根が地熱の影響を受け始め やがて枯死してしまう。 地熱異常地をかこむ幼松帯の内側は草地になり 中央の裸地に漸移する。 White博士によれば草地と裸地との境 (grass line) はほぼ 300μcal/cm<sup>2</sup>sec の熱流量に相当するとのことである。

わが国の万座地熱地帯では 万座川上流の地熱異常地(湯畑北東部地熱異常地)を対象に日大大学院生の芹川君が地表面付近の地熱異常の研究を進めている(第89図)。 ここでも地熱異常地の周辺に繁茂するかやの草地と熊笹原では 熱流量に違いが出るかも知れない(第10図)。

#### 草津白根一万座地域の熱赤外線映像 空中熱赤外映像

この地域内の地熱異常地を対象にして これまでに空中撮像飛行が二度 地上装置による撮像が一度行なわれた。 最初の空中熱赤外撮像は 昭和46年12月18日にアジア航測株式会社によってなされたもので 撮像対象地域は地域内の有力な地熱異常地の一つである殺生河原を中心とする区域である。 この時の飛行は予備飛行に相当するもので撮像時刻は日の出後の午前9時であった。 結果は残念ながら殺生河原をカバーする映像が得られな

かったが この付近に発達する殺生溶岩の表面状態が低高度の太陽光に照射された熱的強調パターンとして非常によくとらえられた。

次に撮像飛行が行なわれたのは翌年の8月19日のことである。この時期に万座温泉では写真測量学会主催によって「地熱を対象とした赤外線探査」というテーマでサマーコースが開催されようとしており(期間9月1～3日)地質調査所 中日本航空株式会社 富士通株式会社などが現地協力し 空中からの撮像は中日本航空株式会社が行なったものである。この時の撮像は 午前4時5分から同5時30分までの間になされ 草津白根一万座地域のおもな地熱異常地がカバーされた。

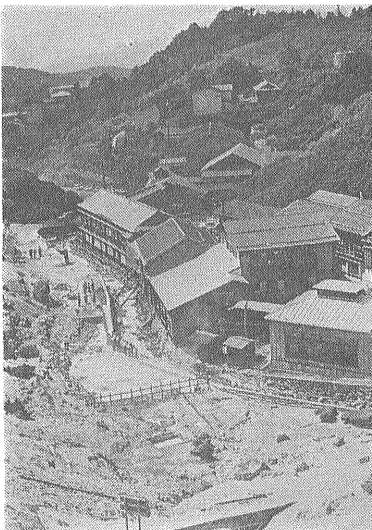
撮像の結果判明したもっとも注目すべき事実は 白根山頂中央火口群の外側にあたる北側斜面に見られる映像パターンである(表紙参照)。この地点には前にものべたようにいくつかの噴気地点が知られており とくに気温のさがる季節には噴気の状態がよく観察される。しかしながらそれらは点 または各噴気地点を結んだ直線状配列を示すものとして理解されていたわけであるが 撮像結果からみると半環状に配列することが一目瞭然である。この熱赤外映像と空中写真とを比較しながら熱異常地を追跡すると 水釜東側の火口壁縁に発達する地熱異常地に連続するのがわかる。

他方 昭和7年の爆発のさい形成された割れ目帯は熱パターン上からも識別されるが そこにはすでに映像上に表現されるような地熱異常はみられず むしろ地形的な凹地を形づくるために周囲より表面温度の低い部分となっている。しかしながらその北側の延長部分は

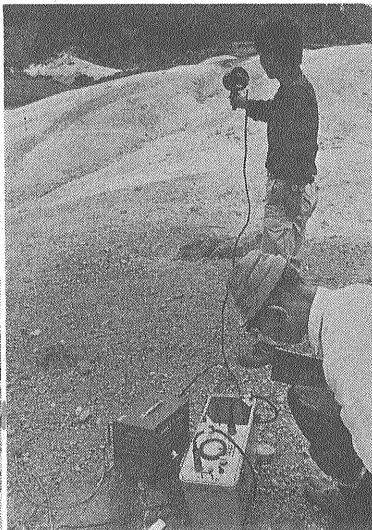
火口壁の外縁をとって 今日実際に地熱異常を示す地点にこれまた連続するのに見える。すなわち白根山頂の中央火口の外側には地熱異常を伴う環状～半環状の割れ目帯 (fissure zone) が発達し この割れ目に沿っては 過去にも爆発活動があったように 今後とも爆発活動がおきることが十分に予想されるのではなからうか。異常に長い年月の間静穏を保っているだけに何か不気味な感じすらするのである。

熱赤外映像にあらわれた温度分布には そのほかにも地熱異常地の分布を含めて興味深い点が数多くあるがここではそれらの一例を示すだけにとどめ説明は割愛させていただく(第11 12 13図)。

空中熱赤外映像を通して見える表面温度分布の一般的特徴としては 夜間～払曉にかけての温度パターン(ここでは吟味しないが実際には 表面物質毎の放射率  $\epsilon$  の差は みかけ温度分布にかなり大きく影響する)と植生の分布がかなり良く一致することがあげられる。例をあげると夜間の映像では草地や笹原の表面が相対的に低い温度にあらわれるのに反し 広葉かん木である山あじさいの群生表面は相対的高温部分に属し とくに後者では時として地熱異常と見間違ふことがある。アスファルト舗装の道路表面が 夜間には水面などと同様高温物体となることは 熱赤外映像を扱っている人にとってはよく知られた事実であるが 正直なもので舗装の切れたところから急に周囲のパターンから識別しにくくなる。変質帯や露岩などは空中写真では容易に識別できるので反して 熱赤外映像では日射量に大きな差があるとか地熱異常がそこになかぎりその識別は困難である。



第8図 万座川最上流にある万座温泉湯畑 写真を撮った位置に湯畑東北部地熱異常地が広がる



第9図 放射温度計PRT-4を使って地熱異常地表面の温度測定(万座・湯畑東北部地熱異常地)



第10図 湯畑東北部地熱異常地での浅地下熱流量測定

一・二の例にとどめたが 熱赤外映像には判読の面においても写真とは全く異なる特徴がある。

**地上熱赤外映像**

地上用熱赤外撮像装置を用いての現地撮像実験は 万座の通称からふき 地熱異常地を対象にして 昭和47年(1972年) 8月31日から9月2日にかけて行なわれた。撮像装置は同年富士通株式会社によって開発された インフラアイ 501 と呼ばれる装置である。この装置は撮像機と指示機から構成されるもので 全体重量が 25kg と軽量であることが特徴である。また常温付近の温度分布を対象にする地熱探査においては 8~14 $\mu$  の遠赤外波長領域を利用することがもっとも好ましく この点

上記装置の検知器がHgCdTe を用い 液体窒素温度の冷却で この波長領域をカバーすることができるのは大変理想的でありまた経済的である。

からふき の対岸には当時改築中のホテル(白根ホテル)があって その前庭の一隅に撮像装置を据え付けると からふき地熱異常地がちょうど撮像機に対して正対する位置にくるため格好の場所が求められた(第14 15図)。

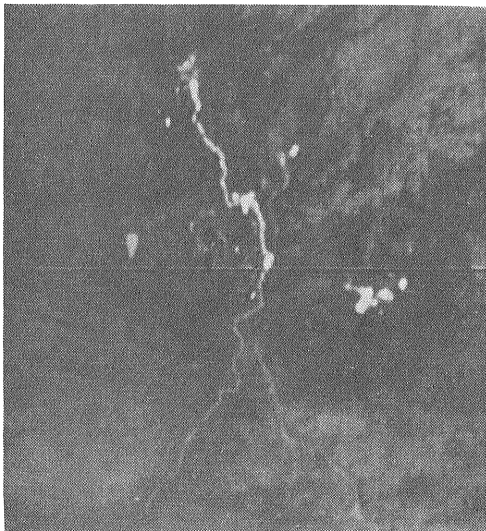
図に示す例はこうして得られた映像モザイクの一例である(第16図)。撮像機の画角は水平方向が15度 垂直方向が10度で この全視野を走査するのに要する時間は1秒である。モザイクは撮像装置を三脚上に据え 水平 垂直方向に首をふりながら得た映像から作成したものである。撮像は日中と夜間とに分けて行なわれ 良好な撮像結果がでたが さすがに夜霧が谷合いを流れるようになると映像の質は落ちる。

**映像の有効利用への試練と今後に向けて**

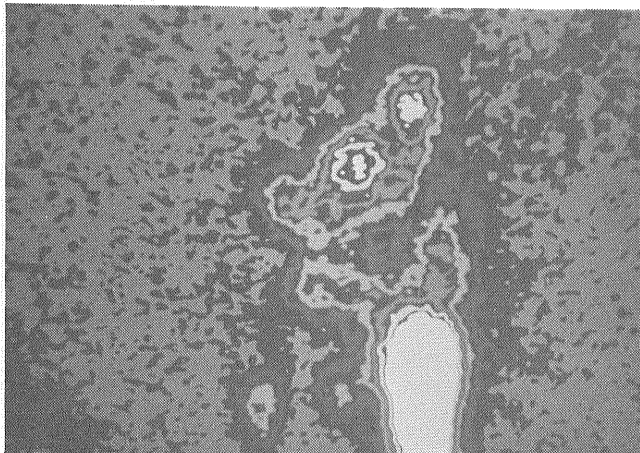
前節でのべた 草津白根一万座地域の熱赤外映像結果は 同地域内の地熱異常分布について 非常に貴重な資料を提供してくれたのであるが 熱赤外映像の判読要素が温度という時間変化するものであるだけに 映像に表現されたパターンを厳密に吟味するためには どうしても撮像と同時の地上調査を行なうことが不可欠となる。日中の地表面温度は太陽光の強い影響を受け それに伴って 風その他の微気象条件がめざましく変化するため 地表面温度は不安定で地熱異常など 地殻の内部熱の検知のためには不向きである。したがって撮像時間は夜間が選ばれ 映像評価のための地上調査も夜間作業ということになる。夜間の撮像飛行と同時の地上調査は実行するとなるとなかなか困難な問題がつきまとうもので



第11図 殺生河原付近の空中熱赤外映像(上)と画像解析された映像写真(下)(原画はカラー画像)

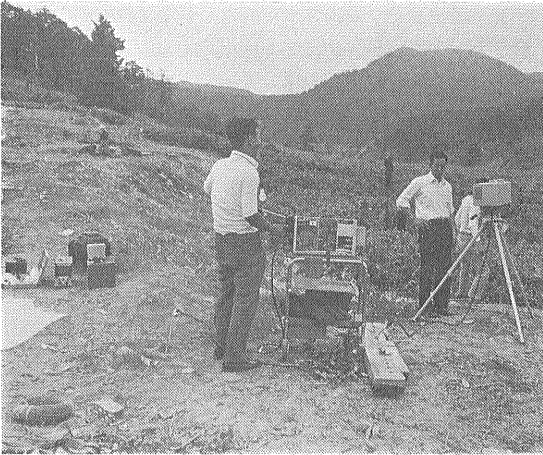


第12図 万座温泉付近の空中熱赤外映像 中央の白い線状部分は万座川に流入する温泉を示す 映像下部(下流)にいくほど温度は下る 最上部の地熱異常が湯畑東北部地熱異常地 中央右はからふき熱異常地である



第13図 画像解析された湯畑北東地熱異常地の映像写真の一例(原画はカラー画像 芹川 1972MSによる)

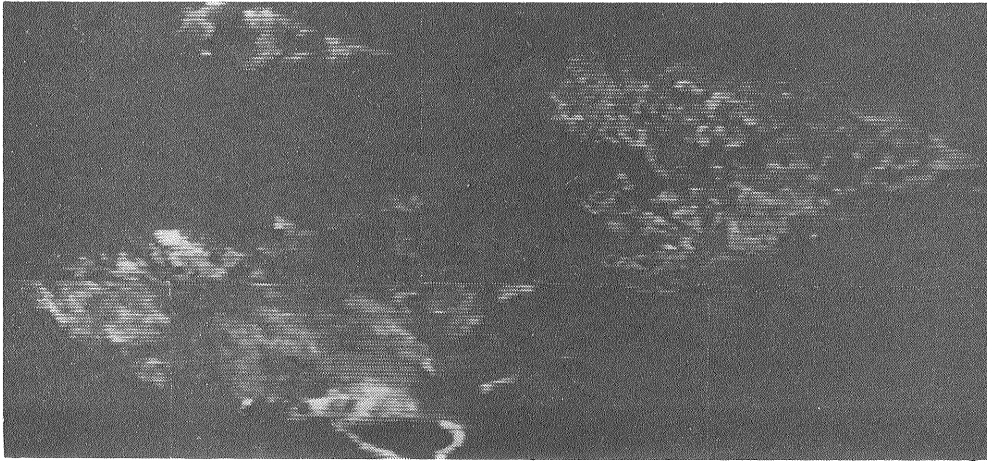




第14図 白根ホテルの前庭における撮像装置のすえつけ作業 右が撮像機 左が指示機



第15図 撮像地点より見た からふき地熱異常地 中央2カ所から蒸気が立ちのぼっているのみられる



第16図  
夜間のからふき地熱異常地の熱赤外モザイク(昭和47年8月31日 21h 31m-21h 34m 天気くもり 気温17.6~18.2°C)

ある(第17 18 19図)。

地質調査所では 昭和47年の空中撮像結果をもとに問題地点をいくつかにしぼり 昭和48年度において再び同地域の空中撮像実験を地上調査と同時にこなうことを計画した。

米国では 地質調査所(USGS)が米国航空宇宙局(NASA)との研究契約のもとに カリフォルニア州の Mono 湖周辺を対象にして 24時間以内に数回の撮像実験を行って熱赤外映像の地質学的判読に関する研究を行った例がある。 何ともうらやましい話ではあるがわれわれにはとてもこのような豪華な実験を行なうことが現状では困難である。 しかしながら同一対象に対して繰り返し季節をかえ 時間をかけて映像を得 時間とともに変化しつつある温度対象の特徴をつかむことは将来の熱赤外映像の有効利用のために是非とも必要であることは言うまでもあるまい。 以上のような観点から今年の計

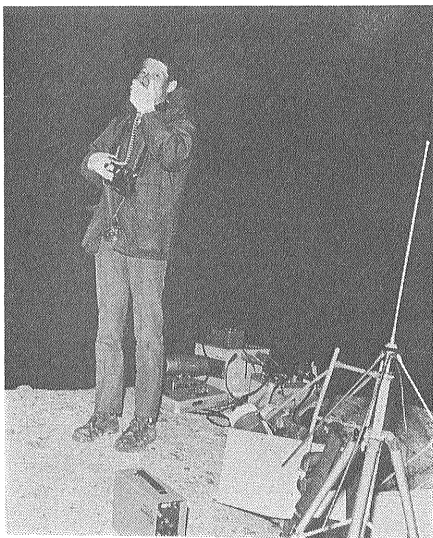
画を進めてきた訳である。

すなわち地上調査における重点は 次ののべる地表面温度決定要素の吟味から 地熱異常の地表面における影響を考察しようと試みた。

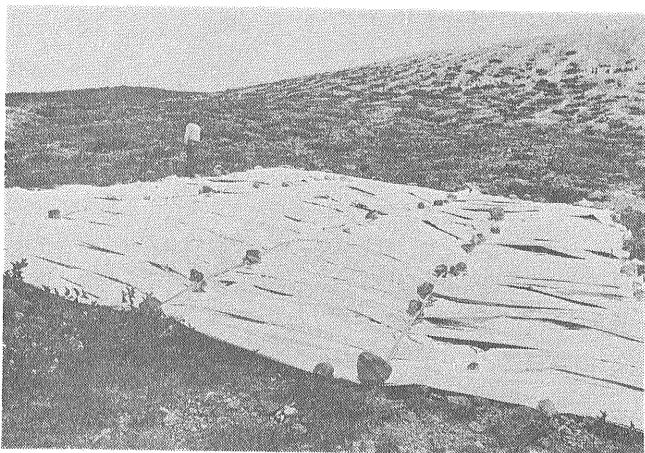
地熱異常の顕著でない地表面の温度は太陽放射によって基本的にきまる。 熱赤外映像から地熱エネルギーによる地表面温度異常を検知する場合には 太陽放射による影響は非常に大きな信号レベルをもった雑信号といえることができよう。 地表面温度を決定する諸要素を列記すると 風 雲 蒸発による熱交換 雲の天空カバーと放射交換の影響 結露 結水 温度の異なる雨・雪などがもたらす温度変化 大気の流れ 高度差の異なる対象地の場合に考えられる大気の逆転層が地表温度に与える影響など 気象学的要因 地表面物質の熱容量 熱伝導率 表面積体積比 空隙率 密度 比熱など物質の熱的物性特性による影響 同一温度に対してみかけの赤外放

射温度差を与える物質表面の放射率の差 植物の光合成などの化学的影響などが考えられ これらの諸要素が複雑に作用し合って地表面温度分布が決定される。

これらの諸要素を吟味するために 赤外放射温度計 日射計・雲量および 微地形解析用ホリズントスコープ (写真地質研究室考案) 気圧計 熱伝導率測定計 気圧計 風向・風力計 湿度計ほか各種の測温装置が現地に集結され 撮像と同時刻のこれらの諸記録が得られるよう作業が進められたのであるが 全く残念なことに飛行のための気象条件が整わず 当初計画期間中の撮像飛行は不可能となり 延期されるの止むなきに至ったのである (第20 21 22 23図)。



第17図 十数km離れた測定地点との深夜の連絡は無線機でしかし市民バンドでは無理 (トランシーブは 建設省品木ダム水質管理事務所の厚意により拝借した) 右手のアンテナは航空機からの連絡を受ける地上無線機のものである

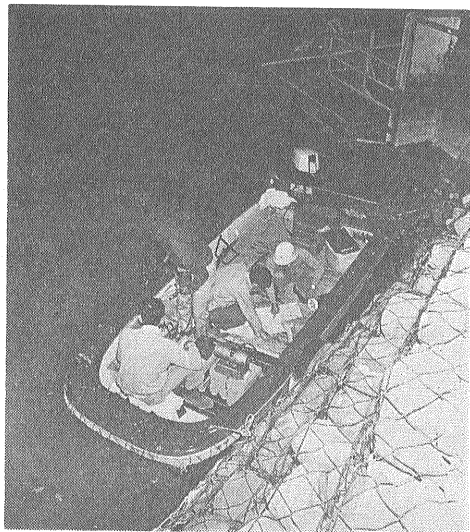


第18図 夜間映像における地上位置と映像のゆがみの状態を確かめるためにアルミ箱の様識が試みられた 放射率が低いので映像上のみかけ温度 (濃度) はずっと低くなる 飛行高度と瞬間視野を考慮して10m四方の広さをとった アルミ箱は裏に紙の補強のあるようかん包装用のもので数回以上の使用に耐えられそうである

本文は次の撮像計画への合間に書かれたものであり 時間の制約もあって意をつくせない部分も多い。気象条件というわれわれには全く如何ともなしがたい障害がとくにわが国のような湿潤気候のもとにおける空中熱赤外リモートセンシングにはつきまとうのである。熱赤外映像の地熱探査への有効利用は 顕著な地熱異常の分布を明確にする という直接的利用にとどまらず さらに微弱な地熱異常の検知 あるいは温度差として表現される地表物質の地学的意味づけへと発展させられなければならないものであろう。このような目的のために研究を続けてきたわれわれにとって 今回の調査計画の延期は今後への厳しい試練ともいえるであろう。

### 後 記

延期された調査計画は9月10日～16日の間に再度計画を練り直して実行する予定が立てられた。調査目的のためには日の出前の映像を得ることが必要で このため航空機が離陸するのはいきおい深夜となる。現在のところ飛行は目視飛行に頼っているので離陸地点 (この場合は小牧飛行場) から目的地までは月明りを頼りに地形を確認しつつ行なわれる。したがって当初の計画はもとより再計画の日取も 夜間飛行の可能な月令期間が基本的条件として考慮された。この再計画期間中も気象条件には決して恵まれなかった。とくに高山に局地的に発生する霧は撮像飛行にとって非常に危険であるばかりではなく撮像結果にも著しい悪影響を与える。霧の発生に悩まされ続けられながら計画を無事完遂したのは調査予定期間限界ぎりぎりの9月16日未明のことであった。その朝は珍しく透き通るような青空であった。



第19図 深夜の湖面放射温度調査へ出発 (建設省品木ダムで)

折しも米国航空宇宙局（NASA）のスカイラブ計画が進行中で 気象条件が良ければ本地域もスカイラブからの熱赤外映像でカバーされ表示されることであろう。

表紙に示す熱赤外映像は9月16日未明に撮像されたもので 本誌のしめ切り間際に漸く間に合ったものである。

本文中の調査実験を進めるに当っては きわめて多数の方々の御協力と御支援を受けた。 いちいち名は上げないがそれらの方達に対して深く感謝する次第である。特に群馬県企業局 建設省品木ダム水質管理事務所には

多大なる御協力を受けた。 松野久也応用地質部長は本研究を理解され 常に激励と御指導をいただいた。

本文中に引用された写真のほとんどは正井義郎技官の撮影によるものである。

（筆者らは 応用地質部）

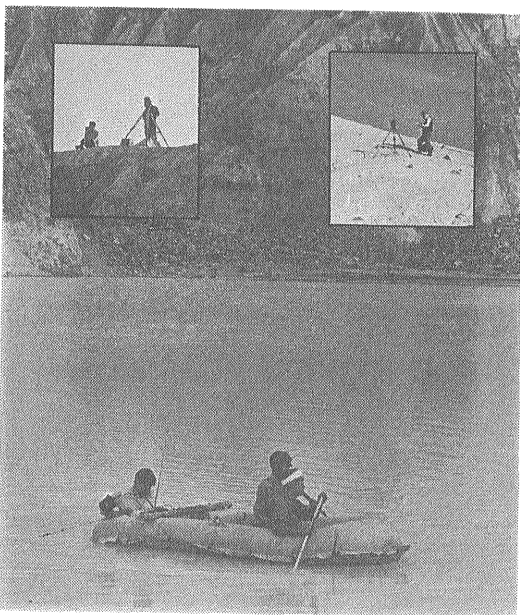
おもな引用文献

Dawson, G. B. (1964): The nature and assessment of heat-flow from hydrothermal areas. New Zealand Jour. Geol. Geophys., v. 7, p. 155—171.

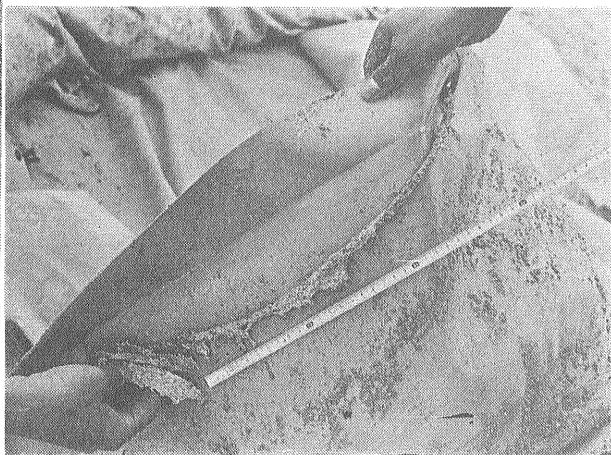
水上 武 (1938): 草津白根火山の活動 地震 v. 11 p. 13—34.

日本写真測量学会 (1972): 地熱を対象とした赤外線探査. サマーコーステキスト

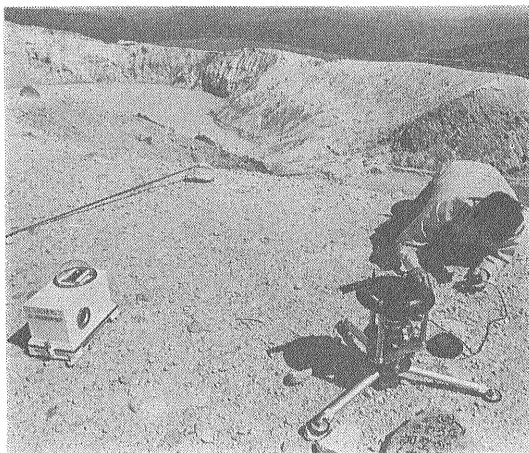
Tsuya, H., (1933): Explosive activity of Volcano Kusatsu-Sirane in Oct., 1932. Bull. Earthquake Res., Inst., Tokyo Imperial Univ., v. 11, no. 1, p. 82—112, 11pls.



第20図 湯釜の水溫調査 調査地点は火口縁に設置された2台のトランシットでおさえられる 同様にして水質・湖深・対流調査などがなされた



第21図 湯釜の湖底湧泉にともなって上ってくる浮遊硫黄 調査用ゴムボートのロープにべったりとゴム状に付着する



第22図 雲量 日射量の定時観測 左はロビッチ日射計 右はホルントスコープ（写真地質研究室考案）



第23図 前日からの測定および各測定地間の連絡もすべて順調 めとは航空機の飛来をまつばかりだが……（昭和48年8月22日未明）