

25. アラスカ不連続永久凍土地帯の凍土と植生

RELATIONSHIP BETWEEN DISCONTINUOUS PERMAFROST AND VEGETATION IN ALASKA

河内邦夫*・矢部和夫**・浦野慎一***・石川信敬****

Kunio KAWAUCHI*, Kazuo YABE**, Shin-ichi URANO***, Nobuyoshi ISHIKAWA****

ABSTRACT ; The purpose of this paper is to detect discontinuous permafrost in the subarctic taiga of Interior Alaska by using geophysical prospecting. Alaskan taiga is characterised by permafrost overlaid with an active layer. For shallow discontinuous permafrost mapping, we carried out electrical resistivity sounding. The following results were obtained: beneath north-facing slopes, there is a continuous high electrical resistivity zone, the upper boundary of which is almost flat through summer, and the thickness of which is between 10 and 20m. It follows from this that the high resistivity zone is almost equivalent to permafrost zone. Beneath south-facing slopes, two high resistivity zones are near surface and underground cavities at the depth of about 15m. It follows from these that the high resistivity zones are not equivalent to permafrost zones, these phenomena of near surface appear to depend on being dried through summer and on cavities of scree. And the permafrost and whose active layer influence the biology of the taiga. The second goal of this study was to describe the temporal variation of vegetation. The north-facing slopes have Black spruce-mosses woodland. The south-facing slopes have Aspen-birch forest, whose foot have *Sphagnum* mosses mire. The watershed have Dwarf shrubs.

KEYWORDS ; permafrost, electrical resistivity sounding, Alaska, subarctic taiga, vegetation

1 はじめに

高緯度地方の水や熱環境は低緯度地方とは異なる様相を呈している。これは夏期と冬期の極端な日射環境の違いや長期間にわたる凍結土壌（永久凍土）の存在が地表面と大気間の熱交換や水循環、さらには降水や融雪水の地中浸透や河川流失プロセスに影響を与えているからである。また、凍結土壌の存在はその上の植生状態を決定する重要な要因である。近年の地球規模の温暖化現象やアラスカ・シベリアでの森林火災は、この永久凍土を減少させメタンや二酸化炭素を増加させ、結果として地球温暖化を促進させている要因になっている。筆者らは、アラスカ内陸部の不連続凍土地帯に実験流域を設けて、1997年～2001年の主に夏期に電気探査による凍土分布調査と踏査による詳細な植生調査を行い、当該地域のモデル地区を設定して

*室蘭工業大学 環境科学・防災研究センター Muroran Institute of Technology, **札幌市立高等専門学校インダストリアルデザイン学科 Sapporo School of Arts, ***北海道大学大学院農学研究科 Hokkaido University, ****北海道大学大学院地球環境科学研究科 Hokkaido University

凍土と植生の関係を明らかにした。一方、この流域は、既往の研究¹⁾ から以前は氾濫源には永久凍土が分布していた。しかし、今回の調査では、以前存在が示唆されたモデル地区の氾濫源下の凍土は、夏期には凍結土壌が消える季節凍土であることが電気探査の結果から示唆され、氾濫源下の永久凍土の消滅したことから地球温暖化の影響が懸念される。さらに今回設定したモデル地区は、北向き斜面、氾濫源、南向き斜面の植生が明瞭に区別できるので、北向き斜面下の永久凍土の分布状態、特にその厚さの情報は、今後予想される地球温暖化の気候等への影響をモニターするセンサーとなると考えられる。また、この実験流域内では、1999 年夏には、アラスカ森林局による厳格な規定に従った人工燃焼（人工森林火災：2600 エーカー）実験が実施され、2004 年夏には、大規模森林火災が実験地東端に迫り、森林火災の生態系への影響についての研究にも役立つモデル地区になると考えられる。今回の発表は、アラスカ内陸部に広がる不連続永久凍土地帯での 20 世紀末の永久凍土分布状態と植生を詳細に調べ、今後の地球温暖化や森林火災の影響を研究するための基準となる実験サイトを CPRW 実験流域内に設定したので、その性状を述べたい。

2 調査地の概要

調査地は、フェアバンクスから北約 50km 離れた Caribou Poker Creek Research Watershed (CPCRW) 【北緯 65° 19′ 西経 147° 50′】と呼ばれる流域面積約 11km² の実験地内である。（図 1 参照）

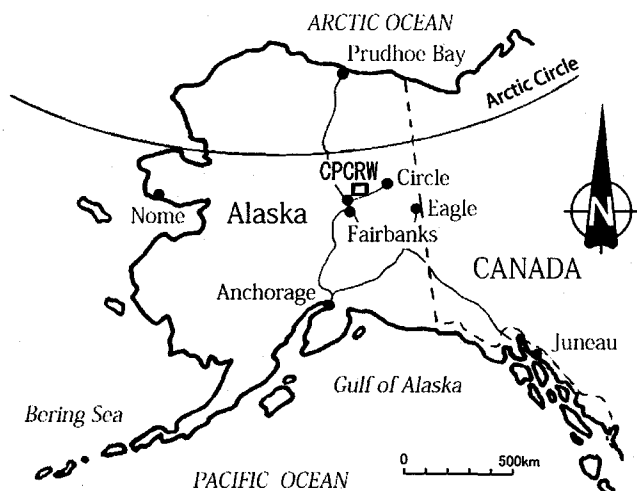


図 1 調査地案内図

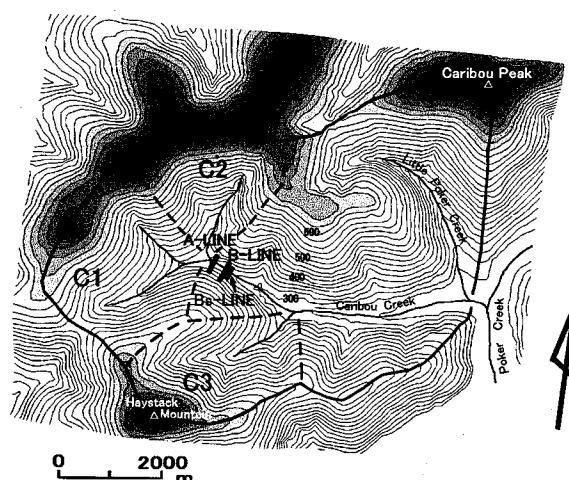


図 2 CPCRW 調査地の概要と調査測線
(C1、C2、C3 は図 4 に対応する)

3 調査・解析の概要

調査では、森林火災の影響が近年はなく、植生タイプが典型的な北向き斜面から南向き斜面にかけての連続した 3 測線 A-LINE、B-LINE、Bs-LINE を設け、高密度 2 次元電気探査を実施した。（図 2 参照） 測線全長を、それぞれ 400m、460m、312m とした。それぞれの調査測線は、最も西に位置す

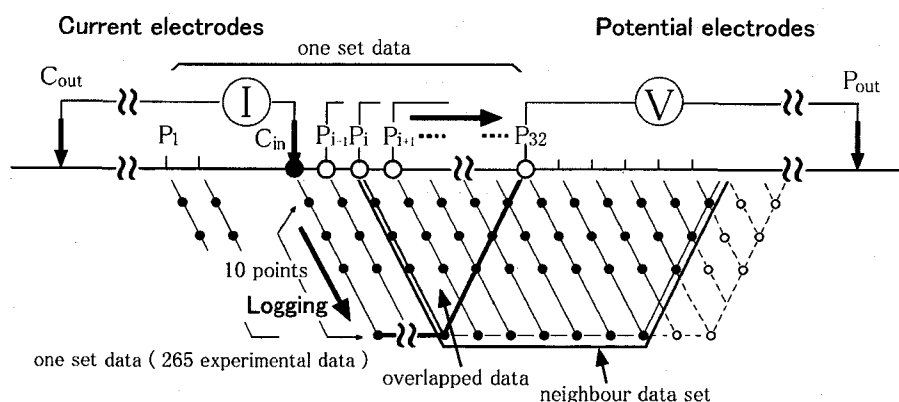


図 3 2 極法高密度電気探査測定の様子

る A-LINE から下流約 500m に B-LINE、その約 50m 下流に Bs-LINE とした。調査では、電極間隔に、A-LINE、B-LINE が 5m、Bs-LINE が 6m を用いたが、詳細探査では 1m、2m も使用した。一回のデータ収集では、32 チャンネル (図 3 ; $P_1 \sim P_{32}$) ケーブルを使用し深度方向は 10 点 (図 3 ; 10 points) 1 組 265 点の見掛け比抵抗値を計測した。測線上での計測では、この 1 組の測定を次の測定では一部重複させながら (図 3 ; ▽の陰影部分) 移動させて行った。電気探査に用いた機器は McOHM-21 (応用地質(株)製)で、使用した比抵抗トモグラフィ用ソフトは ElecPROF (応用地質(株)開発, GIS ジーアイエス(株)販売)で、動作環境は EWS 上である。

4 調査地の凍土分布と土壌の比抵抗

既往の研究論文によると、この実験地では、過去に植生分布から求めた凍土分布図(図 4 参照)が公表されている¹⁾。この図から調査地では、約 30 年前には氾濫源から北向き斜面にかけて永久凍土が分布していたと推察される。岩石や土が凍ると比抵抗は大きくなる。文献²⁾に載っているアラスカ・フェアバンクス近郊の凍土・未凍土の比抵抗値を図 5 に示す。有機物含有フェアバンクスシルトは、 -2°C 以下を凍土であるとすると $2500\Omega \cdot \text{m}$ 以上の比抵抗値を示している。実験地の土壌は、この有機質含有シルトと考えられる。

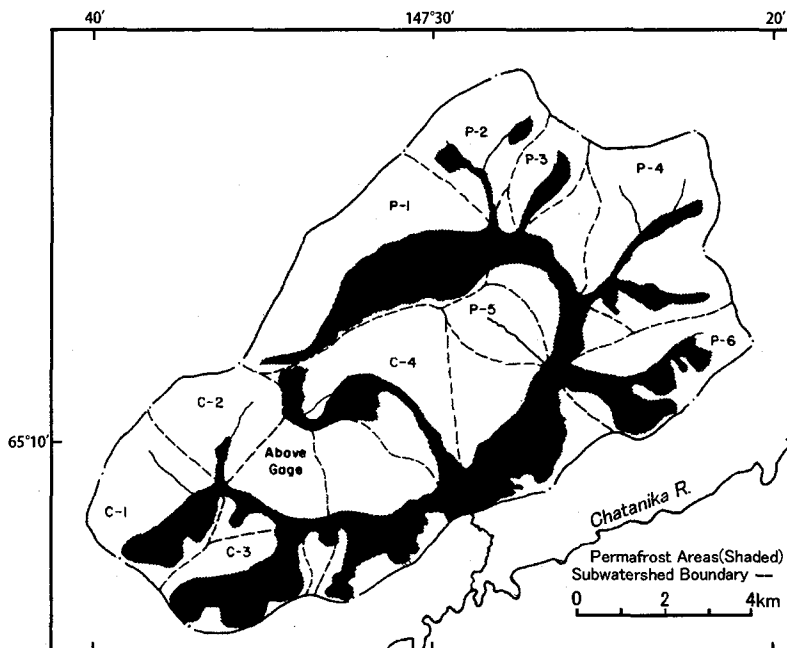


図 4 CPCRW の永久凍土分布¹⁾

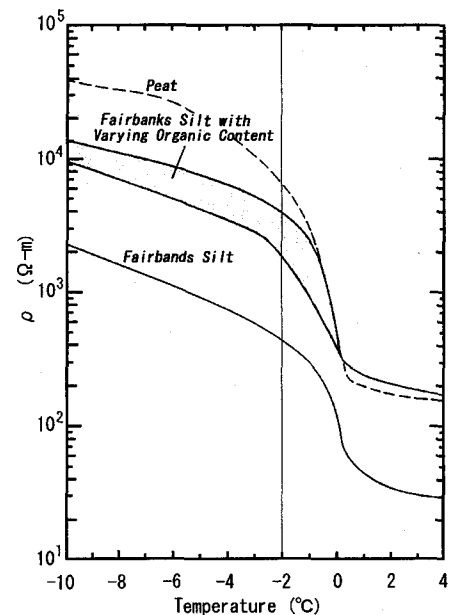


図 5 フェアバンクス近郊のシルトの凍土・未凍土の温度・比抵抗の関係²⁾

5 結果および考察

調査の解析結果を図 6 に示す。図中には 3 つの比抵抗構造を示したが、上から 1998 年調査の A-LINE、1999 年調査の B-LINE、Bs-LINE で下流から見た比抵抗横断面と測線上の植生分布を示す。斜面の向きは左から北向き、氾濫原、南向きである。ただし A-LINE は、1998 年調査と 1999 年調査を重ね合わせて解析をした比抵抗断面図である。図中の || の範囲 (overlapped zone) がその重複範囲を示す。

A-LINE、B-LINE、Bs-LINE とともに北向きと南向き斜面下の比抵抗構造は、はっきり異なっているが、各ラインは互いに同じ向き斜面下の比抵抗構造の傾向はよく似ている。各斜面の比抵抗構造を比較すると地表面から深さ 10~15m 程度までは、ほぼ $10000\Omega \cdot \text{m}$ 以上の高比抵抗帯が斜面の裾から上部に連続するのは北向き斜面である。南向き斜面では、深さ 15~20m に中心部が $5000 \sim 20000\Omega \cdot \text{m}$ の斜面に沿った楕円状の高比抵抗帯が見られ、地上付近には地表面に沿って厚さ 1~2m のシート状の高比抵抗

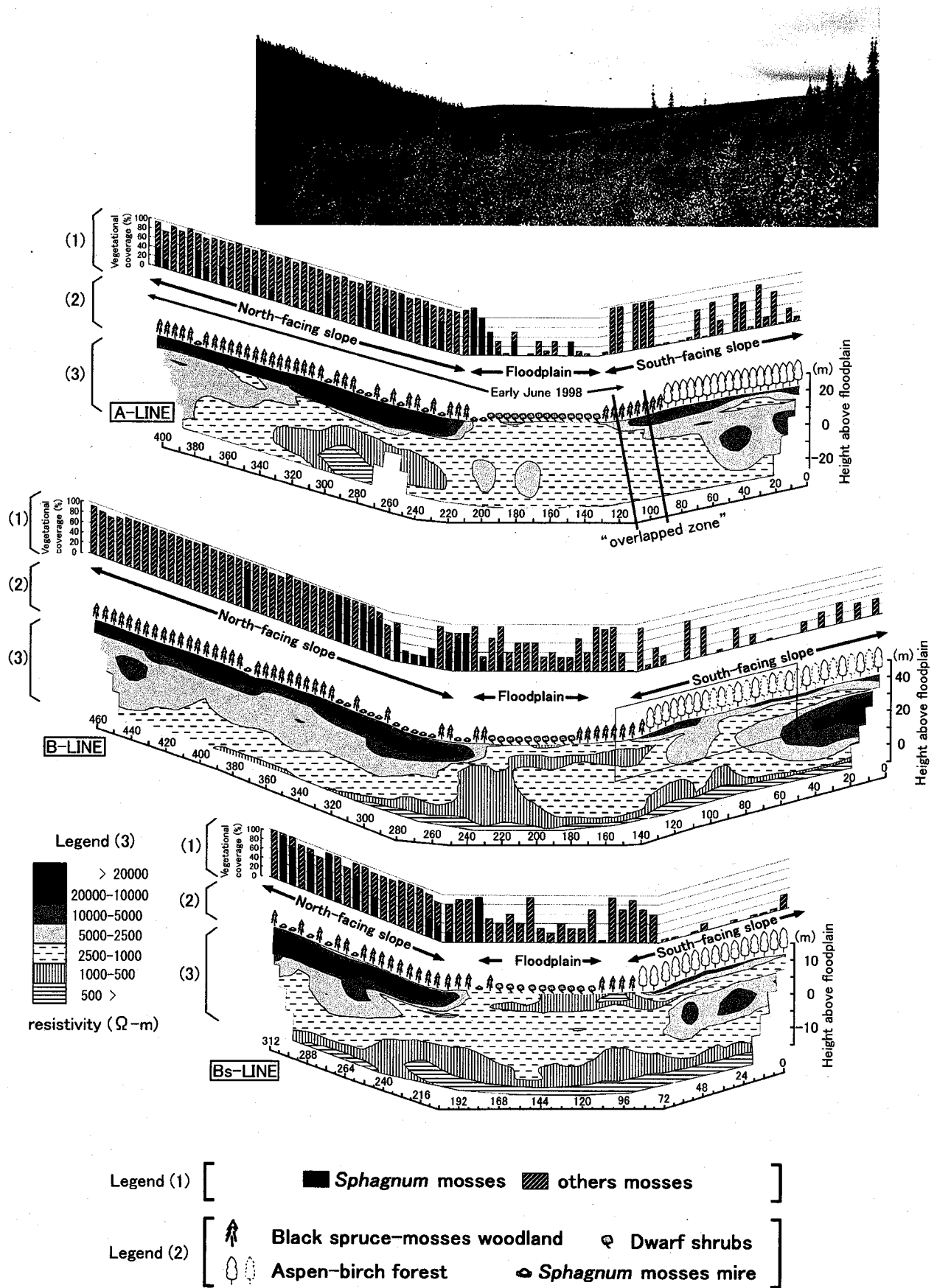


図6 モデル地区の比抵抗構造と測線上の植生分布【□内；詳細調査を実施】

帯が存在する。そこで、当該地区の基盤や斜面を主に構成する雲母片岩³⁾の温度と比抵抗値の関係を、A-LINE 測線付近の地表で採取した岩塊を使って実験室の恒温冷凍機内で温度を替えて測定した。その結果の一部(−10℃~10℃)を図7に示した。図中には、図5の有機物含有フェアバンクスシルトの値も加えて示した。雲母片岩の比抵抗値は、−2℃前後では約10000Ω・mを示す。北向きの地表面踏査からその地表面は、雲母片岩の岩片、それを覆うコケ類、付近に広がる泥炭やシルトで構成されていた。その泥炭やシルトの比抵抗は、図5のハッチ部(Fairbanks Silt with Varying Organic Content)にあたると考えられ、−2℃前後でその凍土の比抵抗値は2000~4000Ω・mを示す。さらに、ピートの含有量(その多くは水分)が多くなれば同じ温度でも7000Ω・m程度まで比抵抗値は高くなることが判る。従って、前述の北向き斜面の高比抵抗帯は、ほとんど全て凍土であると推察される。凍土層と思われる帯状の高比抵抗層の下部が平坦であることも、大気と地温との間の熱伝達方向は地表面に対して垂直であるので、その境界面は地表面に対して平行になると考えられ、地表下の帯状の高比抵抗層が凍土層であるとする判断を支持する。しかし、B-LINE、Bs-LINEの北向き斜面下に見られる高比抵抗帯の上下面が、A-LINEのそれよりもともに凹凸な形状を示している。これは、A-LINEの測定時期が早春(1998年6月上旬)で、1)活動層の形成が始まったばかり、2)凍土層内の温度が夏より低温、であったと考えれば、上下の境界面がそのままはっきり凍土・未凍土の境界として明瞭な比抵抗コントラストになって現れたと推察される。一方、B-LINE、Bs-LINEの測定時期は、晩夏~初秋(1999年7月下旬~8月上旬)だったので、1)活動層がかなり形成され、2)凍土層内の温度が春より+0℃に近く、部分的にはプラスになっている、ので上下面とも温度の不均質により±0℃付近の比抵抗値の急激な変化が境界面付近の凹凸になって現れていると推察される。

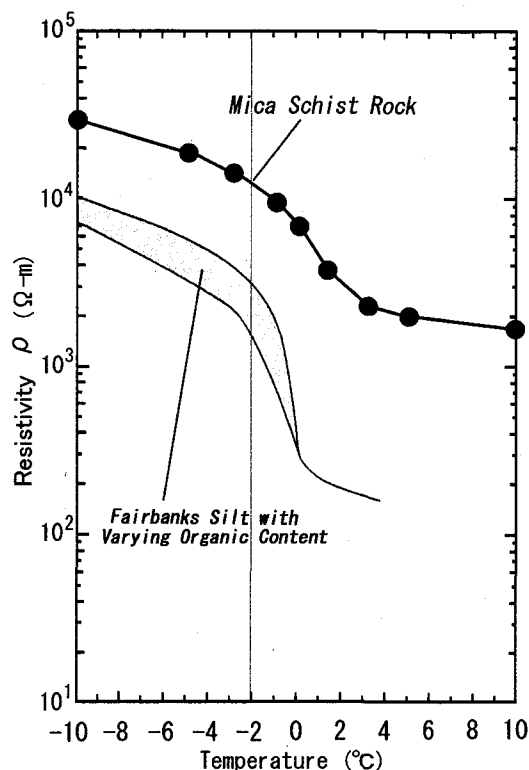


図7 CPCRW 実験地で採取した雲母片岩(Mica Schist Rock)の比抵抗と温度の関係

一方、南向き斜面は各ラインとも表面付近の数mより浅いところに5000Ω・m程度の連続する高比抵抗の帯が見られる。地表踏査から地表面には北向き斜面の地表面同様、当該地域に広く分布している雲母片岩³⁾の扁平な岩塊が折り重なり、ところどころ苔がなく(図6の凡例(1)参照)空隙が地中に伸びていた。中には、風欠のように冷たい空気が吹き出る空隙も多数あったが凍結した土壌の中に詰まっている様子は観察されなかった。さらに、折り重なった岩塊のまわりの土壌は北向き斜面のように凍土ではなく比較的乾燥していた。以上の踏査結果が

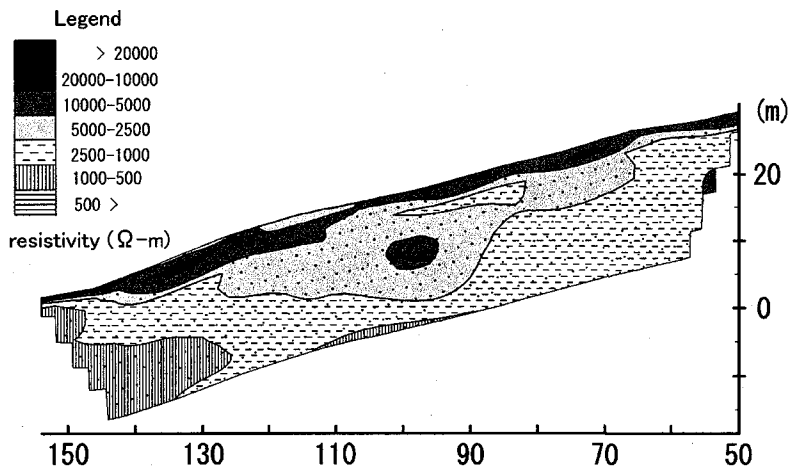


図8 B-LINEでの高密度電気探査による詳細比抵抗構造

ら判断して地表付近の高比抵抗帯は、夏季の乾燥と岩片の折り重なりによって生じる空隙によると考えられる。次に、深度 15m 前後に見られる $10000 \sim 20000 \Omega \cdot m$ の丸～楕円状の高比抵抗帯は、岩片が折り重なってできた地表面に見られる様な空洞が内部にも形成され、周りの空隙の断熱効果により閉じ込められた氷塊や凍土、低温の空洞などが孤立して存在していることが考えられる。

この高比抵抗帯の性状を明らかにするために 2000 年と 2001 年に実施した B-LINE を横切る縦断面探査の結果からも、上述の推察を否定する結果は得られなかった。図 8 に 2000 年に実施した電極間隔 2m の詳細調査結果の一例を示す。ただし、この図中の・は、測定点を表している。この比抵抗構造から深度 10m 付近に中心がある丸～楕円状の高比抵抗帯と地表付近の扁平な空隙の形状がはっきり捉えられている。特に、B-LINE の 140～150 付近の南向き斜面裾に、崖錐堆積物による高比抵抗が明瞭に判る。この結果は、上述の推察を支持している。

さらに氾濫原から南向き斜面で縦断面探査による詳細な凍土調査を行った結果（紙面の都合で省略）からも、北向き斜面の下以外には永久凍土の存在を示す比抵抗構造は見られなかったことを付け加えておきたい。

6 まとめ

CPCRW 実験地内のカリブー・クリーク上流に調査地を設定し、北向き斜面から南向き斜面にかけての詳細な永久凍土調査と植生調査を実施した。その結果から判ったことを以下にまとめると、

- 1) 当該地区の永久凍土は、北向き斜面下のみに存在し、地表面に平行で帯状に発達していると考えられる。
- 2) 北向き斜面の地表面は一面コケ類に覆われ、特に裾部はミズゴケ類が繁茂していた。
- 3) 南向き斜面下の表面付近の数mより浅いところには、雲母片岩の重なり合いによる空洞が多数みられ、コケ類に覆われない乾燥した層を形成していた。
- 4) 南向き斜面下 15m 付近にみられる扁平な楕円状の $5000 \Omega \cdot m$ 前後の高比抵抗部は、地質構造に大きく依存していると考えるのが妥当であるが、詳細な横断・縦断方向の高密度比抵抗調査結果などにより中心部が周りより高く円形に近い形状を示すことが確認され、凍土塊・氷塊あるいは空洞の存在が強く示唆された。
- 5) 既往の論文では、氾濫原には約 30 年前永久凍土が存在したが、20 世紀末には季節凍土になっていた。

謝 辞

本調査に参加した北大大学院学生諸氏、アラスカ州立大の Larry D. Hinzman 教授とスタッフの方々、院生諸氏、また支援を頂いた(株)ブコーシャ総合科学研究所の星山賢一所長（当時）と本調査に直接参加協力された山田課長（当時）、高橋宣之氏、藤崎浩孝氏には、この場を借りて感謝したい。

参 考 文 献

- 1) Hoekstra, P., Sellmann, P.V. and Delaney, A. (1975): Geophysics, vol. 40, no.4
- 2) Haugen, R.K., Slaughter, C.W., Howe, K.E and Dingman, S.L.: Hydrology and climatology of the Caribou-Poker Creeks Research Watershed, Alaska, CRREL Report 82-26, 4
- 3) Rieger, S., Furbush, C.E., Schoephorster, D.B., Summerfield and Geiger, L.C. (1972): Soils of the Caribou-Poker Creeks Research Watershed, Alaska, CRREL technical Report 236 AD 744451