

ILC建設地点としての北上サイトの 物理探査による岩盤特性

坂下 晋^{1*}・横山 幸也¹・松下 典史¹・平松 晋一¹・佐貫 智行²

¹応用地質株式会社（〒336-0015：埼玉県さいたま市南区太田窪2-2-19）

²東北大学大学院理学研究科物理学専攻（〒980-8578：宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6番3号）

*E-mail: sakashita-susumu@oyonet.oyo.co.jp

国際リニアコライダー（以下、ILC）は、全長31km～50kmの直線トンネルと中央部の衝突実験ホールから成る地下構造物である。実験設備が精度良く稼働するためには堅硬で長期的に安定した岩盤が必要とされる。ILC想定ルートにおける土木技術的な要検討箇所のうち、土被りの小さい河川横断部と花崗岩体接触部付近における岩盤性状を対象に、複数の物理探査手法を組み合わせた調査を行った。河川横断部では熱水変質による岩盤の脆弱部が確認され、花崗岩体接触部付近では施工基面以下の少なくとも約200m-400mまでは、堅硬な岩盤の分布が推定された。

Key Words : ILC, seismic method, resistivity method, electromagnetic method, gravity method, tunnel

1. はじめに

ILC(International Linear Collider)は、高エネルギー電子と陽電子をほぼ光の速度で加速・衝突させる大規模研究施設で、宇宙と素粒子の謎を解き明かすための世界的な研究拠点を作ろうとする国際的に合意された計画である。ILCの主要装置は、粒子加速器と観測装置から成る。これらは標高110m程度、全長31km～50kmのトンネルと衝突点となる中央部の大空洞(幅30m×高さ40m×長さ140m)という地下構造物内に配置される。

土木学会 国際リニアコライダー施設の土木工事に関する指針策定委員会(2011)：

<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00019/2011/PD01.pdf> では、ILCに関わる土木施設の建設に当たり、以下のような調査が重要であるとしている。

- 1) ILC実験施設の運転には安定な地盤および自然振動・人口振動が少ないことが必要であることを考慮した地震・断層に関する調査。
- 2) 長大トンネルの掘削、長期にわたる維持管理の面から、地下水・水質環境に関する調査。
- 3) 衝突点となる中央部の大空洞において、設備設置箇所の変位が十分に小さいことを考慮した、地殻変動に伴う変位や岩盤のクリープ変形の有無に関する調査。
- 4) ILC実験施設は、延長が30kmにおよぶ直線状のトンネルおよび地下発電所に匹敵する大空洞からなる大規模な

岩盤内構造物であることを考慮した、効率的な調査。

ILC施設の建設候補地の一つである北上サイトでは、上記に関わるような各種調査を実施している。本報告では、それらのうち物理探査を利用して岩盤特性を評価した例を中心に紹介する。まず、北上サイトの地形・地質状況から考えられる土木技術的な課題を示す。次いで、これらの課題に対して、反射法地震探査、電気・電磁法探査、重力探査、物理検層という複数の物理探査手法を効果的に組み合わせて調査した結果を報告する。

2. 地形・地質概要及び土木技術的課題

ILCの想定ルート周辺の地質図を図-1に、想定ルートの地質断面を図-2に示す。想定ルートが位置する北上山地は、南北250km、東西80kmにおよぶ非火山性山地である。尾根に定高性があり、起伏が小さいなだらかな高原状地形を示し、隆起準平原の一例とされている。北上山地は、主に古・中生代の堆積岩類とそれに貫入する白亜紀の花崗岩類からなる。ILCの想定ルートには、前期白亜紀の2つの花崗岩体(人首花崗岩体および千厩花崗岩体)と閃緑岩とアダムロ岩などの複合岩体(折壁複合岩体)が分布する。花崗岩体の周辺にはホルンフェルス化したきわめて硬質な堆積岩類が分布する。ルート南端の稲井層群もホルンフェルス化した砂岩と泥岩から成る。千厩

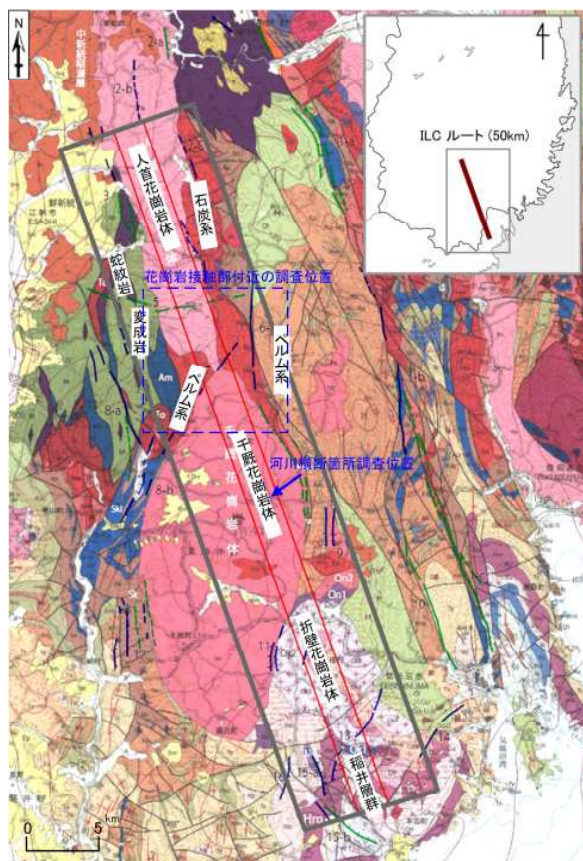


図-1 ILCルート周辺の地質図(竹内ほか, 2005¹⁾より作成)

花崗岩体はしずく状の形状をしており、ルート北方の人首花崗岩体との境界部では、花崗岩の分布幅が地表で1km以下と狭くなる。

ILC施設を建設する場合の土木技術的な重要箇所として、以下の点が考えられる。

- 1) 千厩花崗岩体と人首花崗岩体との境界部
- 2) 地形断面に認められる土被りが小さい(20m程度)箇所
- 3) 衝突点となる大規模空洞(H40m×W30m×L140m)の設置箇所
- 4) 千厩花崗岩体と折壁花崗岩体または折壁花崗岩体と稲井層群との境界部

本報告では、上記の1)と2)に関する調査結果を示す。

3. 土被りが小さい河川横断部の調査

調査地点は図-1、図-2および図-3に示すように標高が低い河川横断部である。トンネル天端までの土被りが小さいうえ、河床幅が広いことから、現在の河川とは別の位置に旧河道が存在している可能性がある。旧河道部では周辺と比較して未固結層や脆弱な岩盤が深部まで分布している可能性があることから、岩盤の出現深度と健全性を確認することが必要である。表層の堆積物、旧河道部、基盤の風化部と堅硬な岩盤との間には明瞭な弾性波

速度および密度のコントラストが期待できる。そこで、堅硬な岩盤の形状を精度よく把握するために反射法地震探査を実施した。また、本調査地では反射法地震探査と同じ測線で電気探査も実施した。電気探査により得られる比抵抗値は、含有鉱物や含水比など応答する要素が多く、解析結果の解釈が難しい。ただし、今回のように地下水位が高い花崗岩地域では堅硬部と風化部が高比抵抗と低比抵抗で区分されることが知られている²⁾。反射法地震探査および電気探査の測線は同一とし、図-3上段に示すように想定ルートと同じ方向で河床部を横切るように設定した。

反射法地震探査および電気探査結果を図-3中段および下段に示す。反射法地震探査結果からは、地形面の下位に連続性の良い反射面が認められる。この反射面の凹凸は岩盤の風化状況を反映していると考えられる。電気探査結果からは、比抵抗値が数百から数 $k \cdot \Omega m$ まで変化に富み、浅部の $1k \Omega \cdot m$ 以下の比抵抗が深部まで分布する箇所と、 $2 \sim 3k \Omega \cdot m$ 以上の比抵抗が深部に分布する箇所と明瞭な違いが認められる。

両手法の結果より現河川の南方（距離程260m付近）では、反射面および低比抵抗領域が深く分布する特徴が確認できる。一方現河川付近およびその北方では、反射面が浅く、高比抵抗領域が深く分布している。施工基面までの正確な岩盤状況を把握するため、上記の物理探査による特徴が異なる2箇所でボーリングを実施し、掘削した孔を利用して速度検層および電気検層を実施した。

図-4に2本のボーリングによる簡易柱状図、岩盤等級、速度および比抵抗分布を合わせて示す。

ボーリングNo.1は、反射面が浅く、高比抵抗が分布する河川脇において実施した。河床堆積物の厚さは3.7m、花崗岩の風化も厚さ3m程度であり、新鮮な花崗岩が深度7m付近で出現した。速度検層によるP波速度 (V_p) は、全体に4km/s以上を示し、電気検層による比抵抗値は、 $1k \Omega \cdot m$ 以上を示した。

ボーリングNo.2は、低比抵抗領域で反射面が深く分布する位置に近い場所で実施した。河床堆積物の厚さはNo.1とほぼ同じ3m弱であったものの、その下部に風化変質の進行が認められる花崗岩が分布していた。風化変質部は、粘土化（一部固結化含む）してD~CL級岩盤を呈していた。深度約18mまでは強く風化変質が進み、深度18~32mまでの花崗岩には弱い変質が認められた。速度検層では深度約22m以深で $V_p 3.8km/s$ (CM級岩盤)であった。電気検層では全体に $1k \Omega \cdot m$ 以下であった。ただし、これらの変質は、地質観察の結果から断層に伴う劣化ではなく熱水変質によるものと推定した。

以上のことから、トンネル施工基面付近では一部で花崗岩の変質部を通る可能性があり、施工時には留意が必要であることが明らかになった。

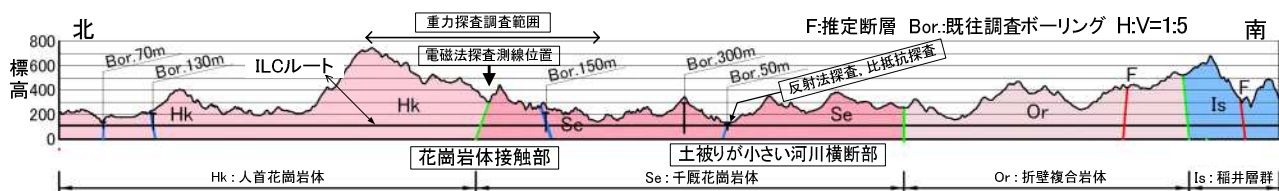


図-2 ILCルート沿いの概略地質断面図

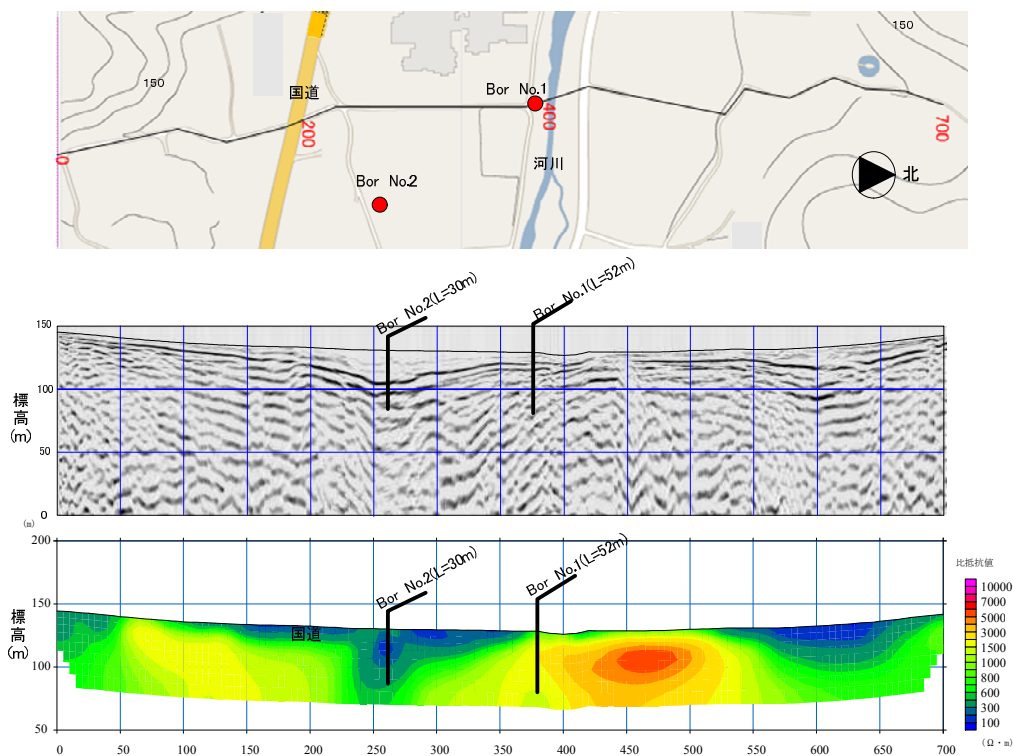


図-3 河川横断箇所の調査結果(反射法地震調査および電気調査)

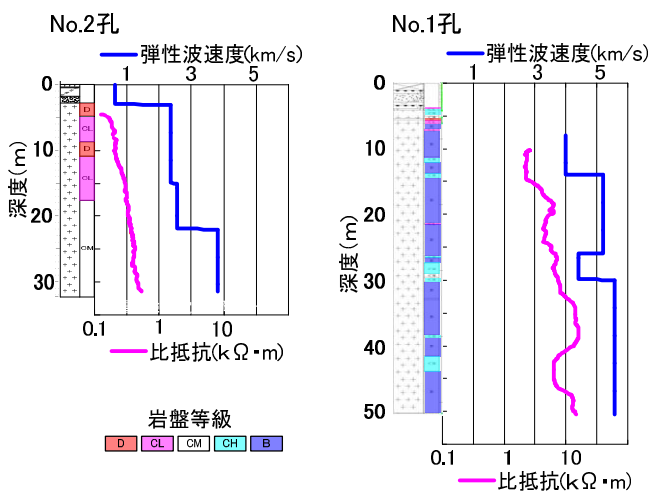


図-4 河川横断箇所の調査結果(ボーリング簡易柱状図)

4. 千厩花崗岩体、人首花崗岩体接触部付近の調査

ILCの想定ルートは、図-1に示すように千厩花崗岩体と人首花崗岩体の両岩体を貫いて計画される。しかし、両岩体の接合部は地表ではくびれた形状となり、花崗岩

分布域が狭いことが懸念される。花崗岩が地下で消滅している場合は、ILC想定ルートのトンネル部が花崗岩を取巻く周囲のホルンフェルス化した堆積岩類に侵入することになり、大きな不連続面を通過することになる。このため、当該地点を広域かつ深部まで把握できる調査として電磁法調査（CSAMT法）と重力調査を適用した。

(1) 重力調査結果

調査地に分布する地質は、花崗岩類が主体であるが、「くびれ」位置の西部には変成岩類や石炭紀の堆積岩類、東部には石炭紀の堆積岩類が分布する。これらの岩石を地表でサンプリングし密度を測定した結果、石炭紀の堆積岩類および変成岩類では、 $2.86\sim 2.88\text{g/cm}^3$ 程度、花崗岩では 2.69g/cm^3 程度を示し、花崗岩類の方が周辺の堆積岩類よりも相対的に低密度であった。

重力調査は図-1および図-2に示すように「くびれ」位置を中心として $10\text{km}\times 10\text{km}$ の範囲で実施した。測定は96点で、解析は既往重力点の10点と合わせて合計106点のデータを用いた(図-5上段)。

図-5上段に示す重力異常図は、測定データからフィルター処理を行い、仮定した密度(2.69g/cm^3)から算出され

る重力値との差を示したものである。測定範囲の地下の密度構造を反映して、高密度が分布する箇所では高重力異常を、低密度が分布する箇所では低重力異常を示す。重力探査における探査深度は一般的には測定範囲（10k m）の1/5程度であることから、今回の結果は、地表から深度1～2km程度の平均的な密度分布を反映した結果を示す。図-5上段の重力異常分布図と中段の地質図と重力異常図のコンターを重ねた図とを対比すると、花崗岩の分布域と低重力異常の分布域が整合している。

重力異常分布から地下の密度構造を推定するためモデル計算を行った。計算は図-5中段図に示すように「くびれ」を横断する位置で実施した。図-5下段図に決定した2次元密度分布モデルと計算結果を示す。計算した重力値と観測値とは、ほぼ一致している。この結果よりくびれ部分の深部には、花崗岩相当の周辺より低密度の物質が、地下深部まで分布していると考えられる。

(2) 電磁法探査結果

図-6に電磁法探査（CSAMT法）の測線配置および解析結果を示す。測線は「くびれ」部分を横断するように配置したEW測線（図-5に示した重力モデル計算を実施した位置と同一）と、それに直交するようにILC想定ルートに沿う方向のNS測線を設定した。測定は、主に道路沿いに200m～500mピッチで、EW測線では25点の測点を、NS測線では29点の測点を設けた。

EW測線の比抵抗断面より以下の特徴が認められる。

- ①解析された比抵抗値は、数百～10万 $\Omega \cdot m$ 以上を示す。
- ②距離程0～1200mかつ深度0～800mの範囲、距離程3000m付近の上部および測線全体に渡る極浅部には、数百～1k $\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗領域が分布する。
- ③距離程3200m～4200mで地表部～深度1000m以上には、10k $\Omega \cdot m$ 以上の高比抵抗領域が分布する。

NS測線の比抵抗断面よりトンネル計画施工基面付近において、以下の特徴が認められる。

- ①計画施工基面付近では概ね3k $\Omega \cdot m$ を越える比抵抗が広く分布する。
- ②特に、距離程1400～1900mおよび4200～4700mでは7k $\Omega \cdot m$ を越える高比抵抗領域が分布する。
- ③一方、距離程100～1300m、2100～2700mおよび5300m付近では3k $\Omega \cdot m$ を下回る領域が見られる。
- ④さらに、終点側の距離程7000m付近には、1k～1.5k $\Omega \cdot m$ のやや低比抵抗領域が認められる。

上記の比抵抗分布域と地質・岩盤状況との関係を以下にまとめる。

1) 低比抵抗領域（1k $\Omega \cdot m$ 以下）

浅部の低比抵抗領域は、風化により岩盤が土砂化して地下水や地表水で高含水状態となっていると推定される。

2) 高比抵抗領域（3～10k $\Omega \cdot m$ ）

10k $\Omega \cdot m$ を超える比抵抗は一般的には火成岩である場合が多く、当該地の地質状況から判断すると未風化の花崗岩によるものと推定される。

3) 中比抵抗領域（1～3k $\Omega \cdot m$ ）

上記1) および2) の要因が混在した状況と推定される。すなわち地質が同様であった場合には亀裂などの岩盤状況の違いが考えられる。

以上、重力探査と電磁法探査結果より、くびれ部分では未風化の花崗岩が、計画施工基面より少なくとも200-400m程度深部まで分布しているものと判断される。さらに、想定ルート沿いの施工基面付近の花崗岩は、概ね未風化で、一部施工時に留意が必要な箇所を特定することができた。

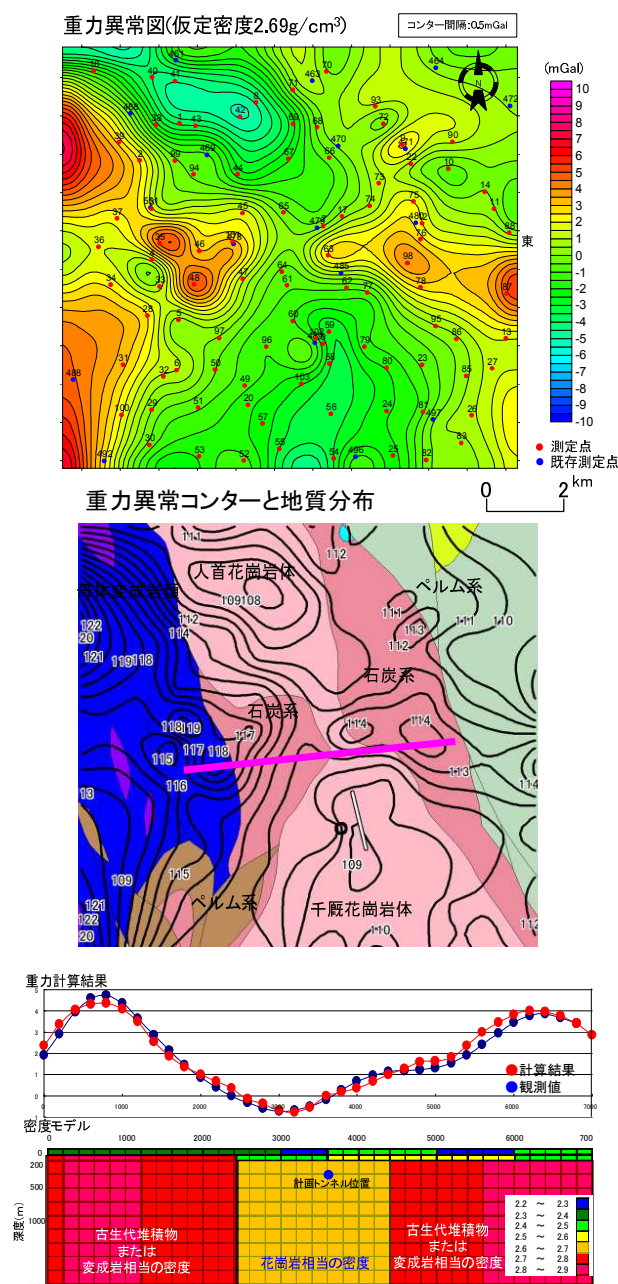
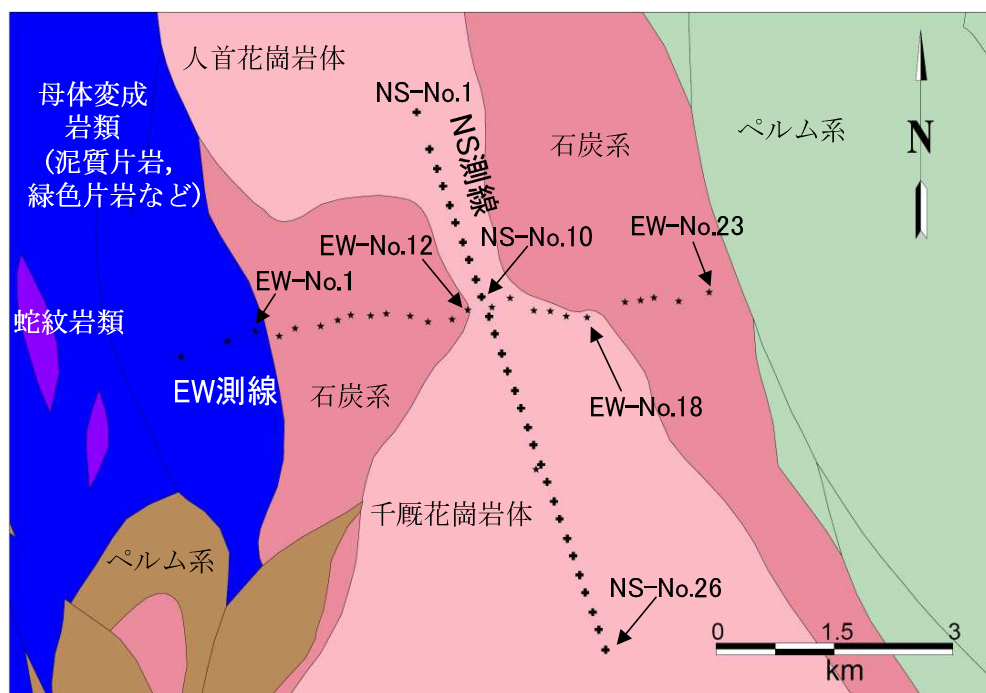
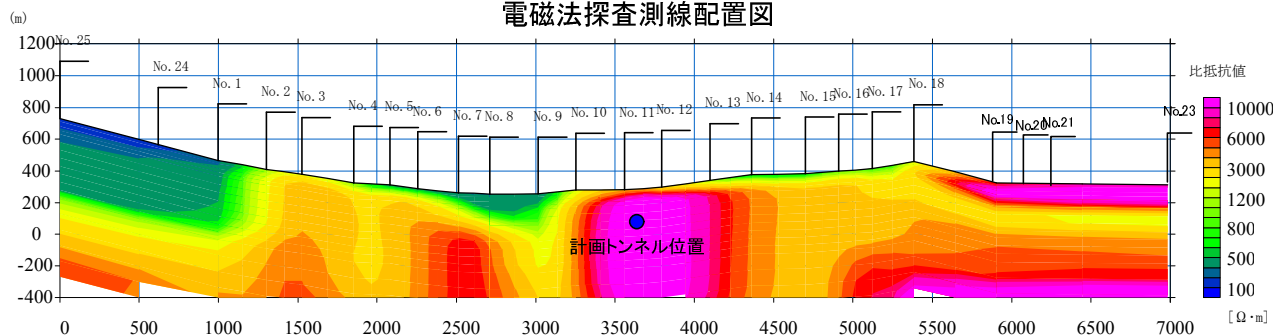


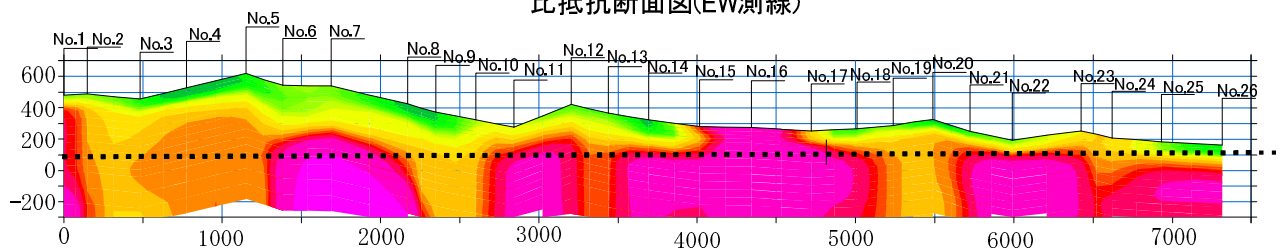
図-5 重力探査結果



電磁法探査測線配置図



比抵抗断面図(EW測線)



比抵抗断面図(NS測線)

図-6 電磁法探査測線配置図(背景の地質平面図は産業技術総合研究所, 2009³⁾より作成)及び比抵抗断面図

5. おわりに

ILC想定ルート周辺の土木技術的に検討を要する箇所のうち、土被りの小さい河川横断面と花崗岩体接触部付近において、複数の物理探査を組み合わせた調査を実施した。

河川横断面では反射法地震探査と電気探査を適用した。探査結果より堅硬な岩盤の出現深度が異なる地点を抽出し、各々の箇所ではボーリングを掘削し、速度、電気検層

を実施した。これらの結果より、岩盤が変質している範囲を把握するとともに、その性状は熱水変質を受けてはいるものの、強い破碎を被ったものではないことが示された。

花崗岩体接触部付近では、重力探査とCSAMT法探査を適用した。その結果、地表地質踏査で花崗岩体がくびれたように分布している箇所において、花崗岩体を示唆する低密度・高比抵抗の物性が、幅約1km、施工基面以下の少なくとも約200-400mまで分布していることが確認

できた。これより、堅硬な岩盤が地下深部まで幅広く分布していることが示された。

謝辞：ILCプロジェクトに関する一連の調査・解析は、2010年に東北大学・岩手県の「北上山地花崗岩体の形態・構造と岩盤安定性の評価に関する共同研究」として開始された。このときは、東北大学理学部・山本均教授、今泉俊文教授、吉田武義教授のご指導のもと、岩手県政策地域部・大平尚首席ILC推進監、植野歩未主任主査のご協力をいただきながら現地調査に赴いた。その後、東北大学工学部・京谷孝史教授、風間基樹教授、河井正准教授にご指導いただき、岩手県政策地域部に赴任された

細越健志特命課長、大久保義人主任主査にもひとかたならぬご協力をいただきながら進めてきた。ここに記して深く感謝するものである。

参考文献

- 1) 竹内 誠，鹿野和彦，御子柴(氏家)真澄，中川 充，駒澤正夫：20 万分の 1 地質図幅一関，2005.
- 2) 松井 保：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用，物理探査，Vol.48，No.6，pp.530-538，1995.
- 3) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編：20 万分の 1 日本シームレス地質図 DVD 版,2009.

INVESTIGATIONS FOR ROCK PROPERTIES OF KITAKAMI MOUNTAINS BY GEOPHYSICAL METHODS AS A CANDIDATE-SITE OF THE ILC PROJECT

Susumu SAKASHITA, Tatsuya YOKOYAMA, Norifumi MATSUSHITA Shinichi
HIRAMATSU and Tomoyuki SANUKI

The International Linear Collider (ILC) is an underground structure that has a 31-50km long straight tunnel. The required geology and rock properties for constructing ILC facilities will be that the hard and stable rock bodies is located around the candidate site. We conducted the investigations combined several geophysical methods to understand the rock condition of the following two areas. One area is the part of the tunnel passing below a river at the small overburden. Another area is the part of different granite bodies contacting together. It is obtained that a hydrothermal alteration vein is existed in the former part and hard rock bodies are distributed at least 200-400m deep below the tunnel formation in the latter part.