

# ILC建設地点としての北上サイトの地殻応力状態と岩盤の安定性

横山幸也<sup>1\*</sup>・小川浩司<sup>1</sup>・船戸明雄<sup>2</sup>・佐貫智行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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）

<sup>2</sup>公益財団法人深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12）

<sup>3</sup>東北大学大学院理学研究科物理学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3）

\*E-mail: yokoyama-tatsuya@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が主な地下構造物で、特に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。既往調査結果によると、ILC ルートのほぼ全区間には堅硬な花崗岩が分布し、その周辺に活断層は認められないことから、北上サイトはILC 施設の適地であると判断された。一方、この施設の成立性は長期的な岩盤の安定性にも左右されるため、3.11 地震での地殻変動の影響についても検討した。その結果、岩盤応力や地殻ひずみおよびGPS データの解析により、北上サイトは全体的に地殻ひずみが小さく岩盤応力の安定した地域であることが分かった。

**Key Words :** ILC, rock stress, hydraulic fracturing, high stiffness,

## 1. はじめに

ILCは、International Linear Collider の略称で、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ある。図-1 に示すように、ILC 施設はメインライナックトンネル (MLT) とダンピングリングおよび中央部に位置する衝突実験ホールなどの地下空洞施設と研究棟などの地上施設とで構成される。特に地下施設においては多くの精密な実験機材が設置され、これらの設備が安定的かつ正確に稼働するためには以下のような地形・地質条件が必要とされる。

- ・全長50km の直線トンネルが標高110m 程度の位置に掘削可能であること。
- ・全区間には健全な岩盤が分布し、特に中央部の大

空洞は堅硬な岩盤に包まれること。

- ・ ILC ルートに近接あるいは交差する活断層が存在しないこと。
- ・ ILC ルート周辺の岩盤応力や広域的な地殻応力が長期的に安定であること。

これらの要求事項に基づき、想定されたILC ルート周辺における地形解析や地質調査が行われてきた。現在のILC ルートはこれらの条件をほぼ満足しているが、ILC 施設の特徴である直線トンネルと大空洞の建設においては、上記四つ目の項の確認が特に重要である。本稿ではこの課題に重点を置き、広域的な地殻ひずみ分布の確認と実際に岩盤応力の測定を行ったのでこれらの結果について詳しく述べる<sup>1)</sup>。

一方、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、3.11 地震）での地殻変動を目の当たりにし、地震直後に

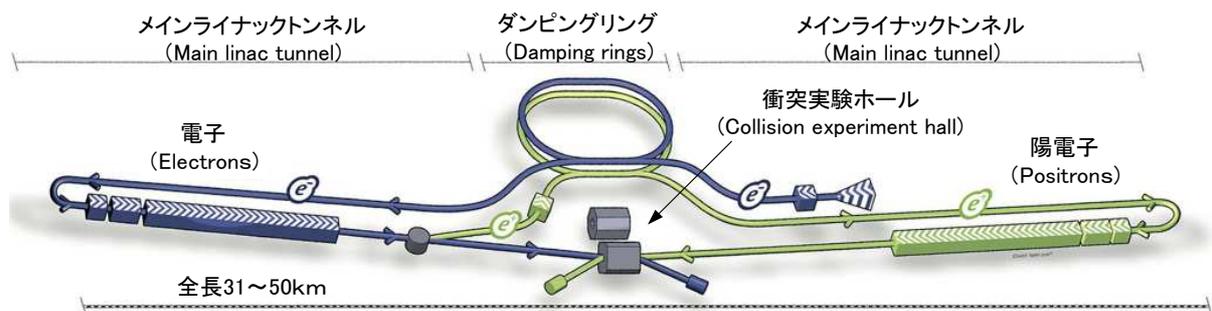


図-1 ILC の地下施設概念図 (<http://www.linearcollider.org/images/2>)に加筆)

生じた短時間での地殻ひずみやその後の地盤変位が ILC ルート周辺の岩盤に与えた影響についても検討しておく必要が生じた。この課題に関しては、ILC ルート付近に位置する国立天文台の江刺地球潮汐観測施設での観測データが参考になった。また、3.11 地震後の GPS による地殻変動が公表されており、この観測データについても解析を行った。ここでは、これらのデータに基づいて明らかにした3.11地震後の北上サイトの地殻変動および ILC 施設の長期安定性についても述べる。

## 2. 北上サイトの地質岩盤状況

### (1) 地形・地質概況

北上山地は南北250km、東西80km におよぶ非火山性の山地で、尾根に定高性があり起伏が小さくならぬ高原状の地形は隆起準平原の一例とされている。図-2 に示すように、ILC ルートは北上山地の南部に北北西-南南東方向で配置され、標高400m 以下の里山のような地域にあり、河川も幅広くゆるやかである。しかし、ルート为数km 東西に離れると地形は急峻となり、標高は500m ~ 900m を越える。

ILC ルートは北から人首、千厩、折壁と呼ばれる白亜紀前期の花崗岩体を貫通し、ルートの南端約3km は中生界の稲井層群が分布する。図-3 には ILC ルート沿いの地質断面図を示す。直線トンネル (MLT) は標高110m 前後で計画されている。人首花崗岩体は北北西-南南東に伸びた岩体で、大部分が花崗閃緑岩からなる。千厩花崗岩体はしづく状の形状をなしており、石英閃緑岩が主体である。折壁複合岩体は石英モンゾ閃緑岩、花崗閃緑岩、アダメロ岩などからなる複合岩体である。これらの花崗岩体が貫入したときの時のホルンフェルス化により、周囲の堆積岩類は極めて硬質であるのに対し、花崗岩類は浸食に弱くその分布域は盆地状の地形をなしている。南端に分布する稲井層群もホルンフェルス化した砂岩と泥岩である。

ILC の長期的な安定稼働を考慮すると、ILC ルートに活断層が交差しないことがこのプロジェクトの成立に欠かせない要件となる。ILC ルートから東西におよそ15km の範囲で抽出されたリニアメントは15条あり、このうち ILC ルートに交差あるいは近接するリニアメント9条については、その生成要因に関して現地踏査で直接確認された。その結果、判読されたリニアメントは地層境界、定向性のある節理

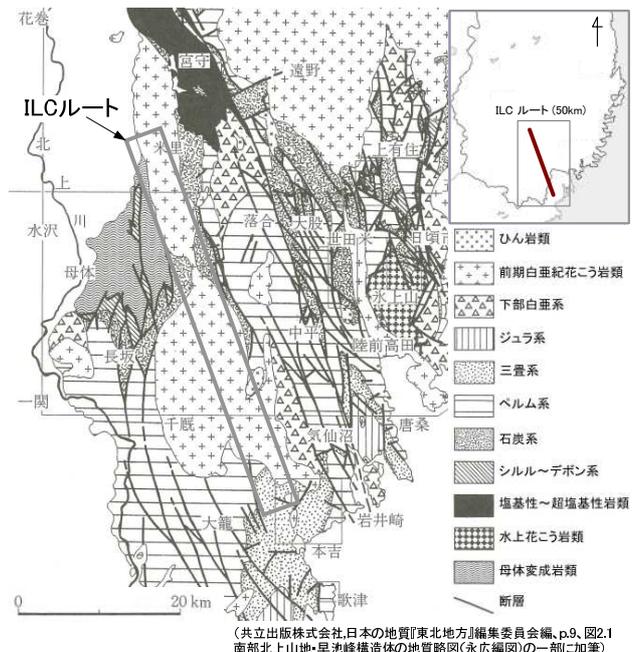


図-2 北上サイト周辺の地質図<sup>3)</sup>と ILC ルート

群が主たるその成因であり、活断層や活褶曲等の活構造と認められるリニアメントは存在しないことが分かった。

### (2) 岩盤特性

ILC ルート沿いの岩盤特性を把握するため数か所において弾性波探査、電気/電磁探査、ボーリング調査・検層、岩石試験等が実施された。MLT の施工基面にあたる標高110m 付近での岩盤状況については、P 波速度で4km/s 以上、比抵抗値で1,000 Ωm 以上、一軸圧縮強度は150MPa 以上の健全な岩盤が分布することが明らかとなった。図-4 には、ILC ルート中央部での弾性波探査結果を示す。ここには ILC 施設の中でも最も重要な施設の一つである高さ40m、幅30m、長さ140m の衝突実験ホールが掘削される。この中央部の地質と岩盤状況を把握するため深さ300m のボーリング調査を行い、速度検層、電気検層、水圧破碎試験、孔内載荷試験、透水試験等が実施された。地質は、表土を除けば全て千厩花崗岩で構成されており、地表から深度約32m までは風化の進んだマサ状から軟質岩盤、32m ~ 72m 間は割れ目間隔10cm 程度の硬質な岩盤、72m 以深は割れ目間隔が1m 前後の新鮮堅硬な岩盤で、一部に割れ目間隔が2m ~ 3m の岩盤が認められる。全深度に顕著な断層はなく、脆弱部としては深度270m 付近に幅約20cm 程度の熱水変質帯がみられるのみである。

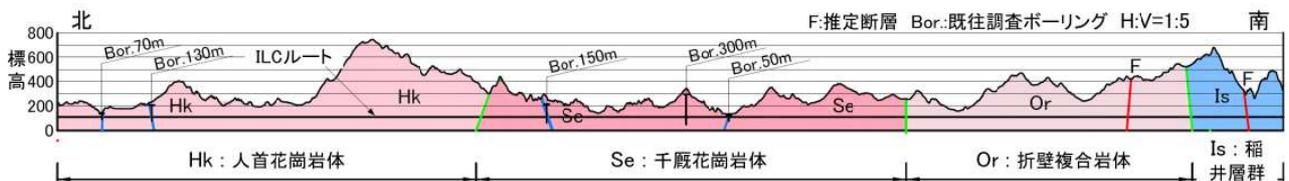


図-3 ILC ルート沿いの推定地質断面図 (全長 50km, 縮尺 H:V=1:5)

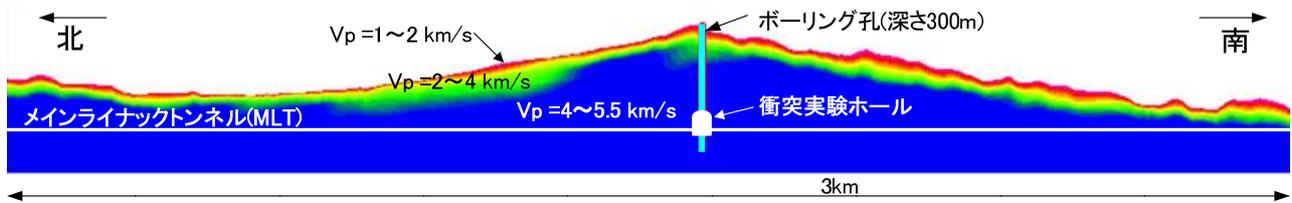


図-4 ILCルート中央部での弾性波探査結果（全長 3km，縮尺 H:V=1:1）

### 3. 地殻応力と岩盤の安定性

#### (1) 岩盤応力測定

衝突実験ホールのような大空洞を掘削するためには、計画地点周辺における岩盤応力の状態を把握しておく必要がある。この空洞掘削箇所は標高約350mの小高い丘の地下にあたり、空洞直上の被りは約200mである。岩盤応力の測定に用いた方法は、最近我々が開発した高剛性水圧破碎試験法で、地表から地下深くに向けて岩盤の応力を直接測定できる唯一の方法である。図-5に深度200m～300m間で測定した岩盤の応力状態を示す。

この結果によると、最小主応力は5.1MPa～6.2MPaで、岩盤の密度を2.7g/cm<sup>3</sup>と仮定したときの被り圧と同等あるいはそれ以下の値となる。最大主応力は9.5MPa～10.8MPaであり、最大主応力(σHmax)と被り圧(σz)の比で示される側圧比(σHmax/σz)は1.33～1.77となった。また、最大主応力の方位は、平均的にはNW-SE系である。

#### (2) 地殻ひずみ

ILC 施設は総延長が最大50kmに及ぶため、その全区間において岩盤応力の状態を確認することは現

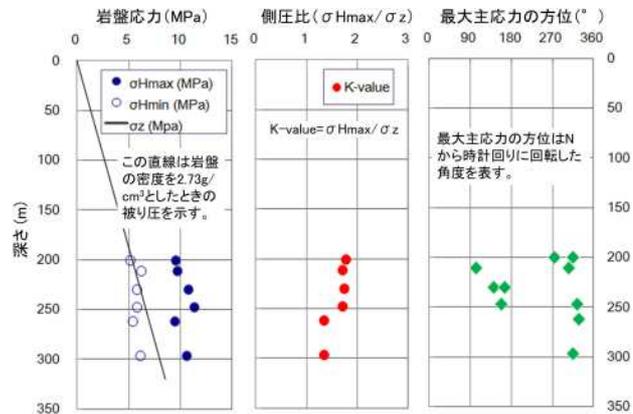


図-5 高剛性水圧破碎法による岩盤応力測定の結果

実的に難しい。このため、ILC ルート周辺における岩盤応力状態は、北上地方の地殻ひずみ分布から推察することにした。

図-6の左図(a)は、1883年から1994年の過去約100年間における地表の三角点の測量結果から計算された地殻ひずみの主ひずみ方向とその相対的な大きさを表す。同図において、太い線が圧縮ひずみ、細い線が引張りひずみを示す。東北地方の中でも岩手県の南東に位置する北上山地周辺は、全体的に地殻ひ

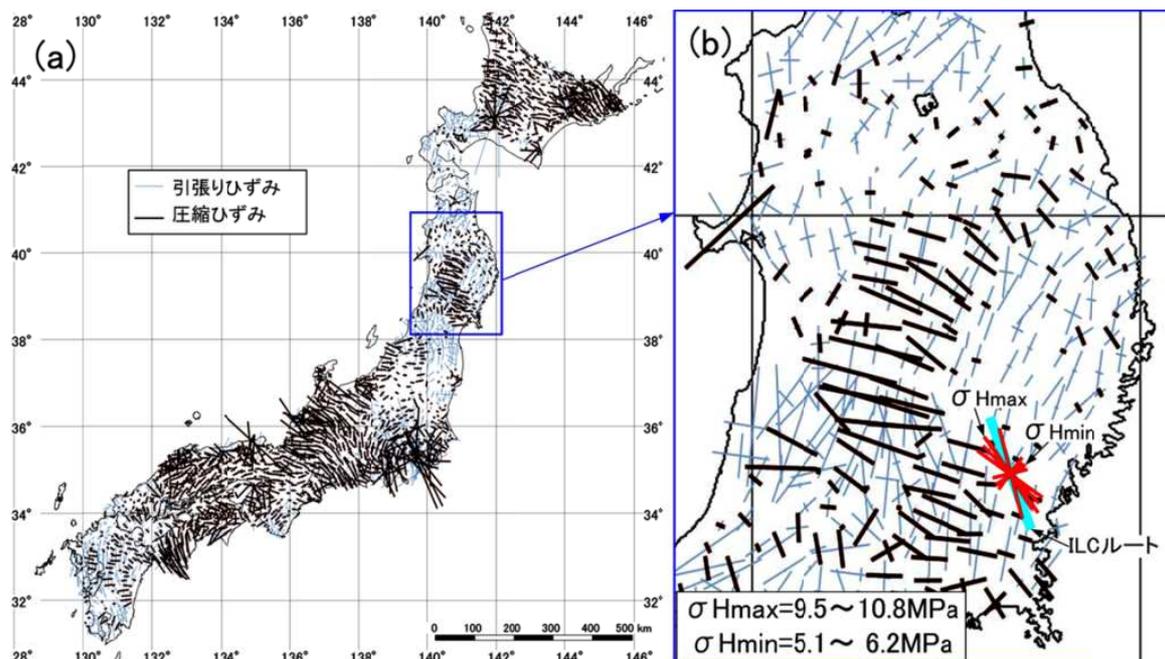


図-6 日本列島の三角点測量による過去約100年間（1883～1994）の地殻ひずみ分布図(a)と岩盤応力の測定結果を重ねてプロットした図(b)

ずみが小さく引張り側の傾向にある。この地殻ひずみの分布状況からは、ILC ルート周辺における岩盤応力は北上山地を取り巻く西側の領域に比べて小さな応力状態にあることが推察される。

図-6の右図(b)は、拡大した東北地方の地殻ひずみの分布図に、図-5の直接測定された岩盤応力の主応力の方位と大きさを重ねてプロットしたものである。測定された岩盤応力の主応力の方位は、地殻ひずみの方向性と調和的でNW-SE系となっていることから、ILC ルート周辺における応力状態も地殻ひずみの分布傾向に近いものと推定される。

### (3) 3.11地震による地盤変位

ILC ルートの北側に位置する国立天文台江刺地球潮汐観測施設（以下、観測施設）では、延長 250m の花崗岩の坑道内に設けられた長さ約 30m の石英管ひずみ計で岩盤のひずみが常時計測されている。このひずみ計は、岩盤の伸び縮みを 10m につき  $0.01 \mu\text{m}$  ( $10^{-9}$  ひずみ) の分解能で計測可能であり、3.11 地震で生じた岩盤のひずみを正確にとらえていた。図-7 に 3.11 地震発生前後の約 3 年間での観測施設で得られたひずみの経時変化を示す。

3.11 地震発生時には、瞬間的に E-W 方向、N-S 方向ともに大きな引張りひずみが生じている。この地震後にも余効変動（大規模地震後のゆっくりと動く地殻変動）が継続しており、E-W 方向では引張りひずみが、N-S 方向では逆の圧縮ひずみが生じている。3.11 地震発生時のひずみ変化は、E-W 方向で約  $6.5 \times 10^{-6}$  の伸び、N-S 方向で約  $4.5 \times 10^{-6}$  の伸びが観測されている。これらのひずみ量に ILC ルートの延長 50km の長さを掛け合わせて変位に置き換えると、E-W 方向で約 32.5cm、N-S 方向で 22.5cm の伸びの変位となり、ILC ルートの延長方向 ( $N20^\circ W$ ) の伸びは約 24cm となる。ただし、観測されたひずみは割れ目の少ない岩盤であり、実際の ILC ルート全体に分布する岩盤に生じた変位は上記で算定される変位量の数倍程度大きいものと推察される。

一方、3.11 地震による北上地方の地盤の水平変位は、「国土地理院・電子基準点 (GPS)」の観測結

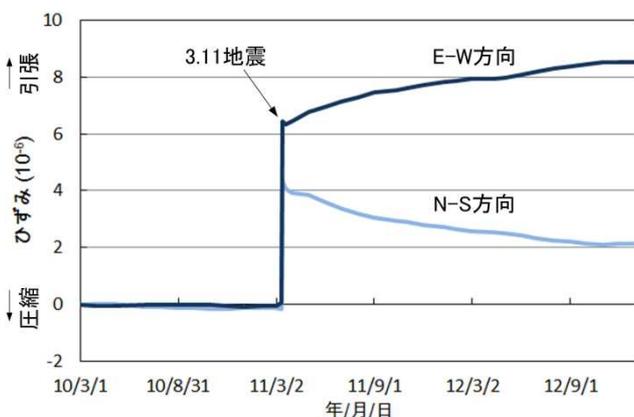


図-7 江刺地球潮汐観測施設の石英管ひずみ計がとらえた 3.11 地震時の岩盤のひずみ

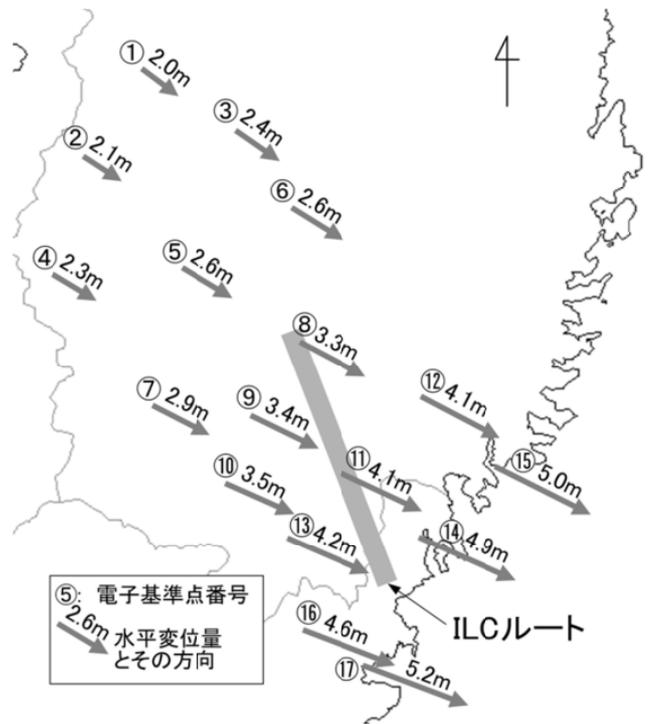


図-8 電子基準点 (GPS) の 2011 年 1 月 1 日～12 月 31 日まで 1 年間での地盤の水平変位 (電子基準点番号は任意の通し番号)

果から確認できる。図-8 は 3.11 地震の発生日を含む 2011 年 1 月 1 日から同年 12 月 31 日まで 1 年間での地盤の水平変位を示す。図に示した水平変位は ILC ルートを囲む全 17 の電子基準点の観測結果であるが、この地域では全体に NW から SE 方向に移動している。変位量は西から東の海側に行くほど大きくなり、ILC ルートの北端と南端との相対的な伸びは 1m 程度である。この電子基準点の相対変位量は、図-7 でのひずみ変化から計算される値の数倍程度であり、計測方法の違いによる観測量の差異に整合性が認められる。

## 4. 考察

構造物としての ILC 施設は、その重要な機器の殆ど全ては地下のトンネルと空洞に納められるため、トンネルや空洞の力学的な安定性が求められる。一般に、トンネルや空洞の力学的安定性は、主要な支保材としての岩盤の強度とその岩盤に作用する地圧（初期地圧、岩盤応力、地殻応力等と呼ばれている）との関係で決まる。岩盤の強度については、部分的には試錐調査で確認でき、トンネルルート沿いの面的広がりについては弾性波探査で得られる P 波速度値から推定できる。岩盤強度のような物性値は、その岩盤を構成する地質の種類と風化変質の程度がわかれば、ある範囲での値を推定することができる。しかし、初期地圧は岩盤固有の物性値とは異なり、岩盤が外部から受ける力により生じる応力であり場

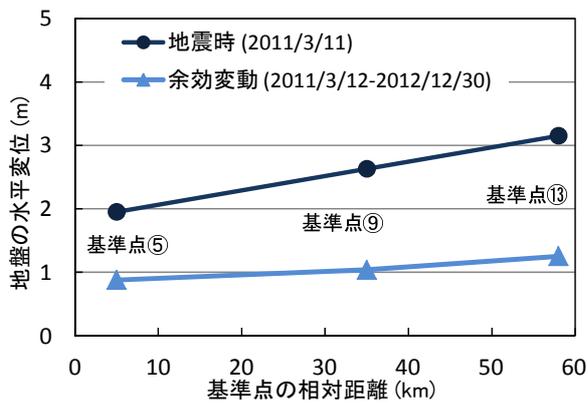


図-9 3.11地震時と余効変動期間での ILC ルート沿い西側の地盤の水平変位量

所により様々な状態であるため、実際にその場所で測定する以外に確かめる方法はない。

今回、国土院で観測されている過去 100 年間に於ける北上地方の地殻ひずみの分布状態から、この地域では比較的小さな岩盤応力状態にあることが推察される。実際に、ILC ルート中央付近で測定された岩盤応力の大きさや側圧比は安定的な応力状態を示し、主応力の方向性も北上地方の平均的な地殻ひずみと整合的である。このような岩盤応力状態から推定される空洞周辺の応力値が確認された岩盤の強度より十分小さいことから、空洞の力学的安定性は確保される。

一方、3.11 地震と同等規模の地震が再来したときの MLT 内の観測設備に与える影響についても検討した。地震により ILC 施設の受ける致命的損傷としては、MLT を横切る新たな断層が生じることや、直線トンネルを大きく曲げるような地盤変動が考えられる。図-9 は、図-8 で示した 3.11 地震に伴う電子基準点の水平変位を地震発生時と余効変動に分けて示したものである。選定した基準点は ILC ルートにほぼ平行した位置にあり、それぞれの変位量の絶対値は異なるがこれら 3 点はいわゆるコヒーレントな動き（剛体運動）をしているため、仮に将来 3.11 地震と同規模のプレート型地震が生じても直線構造物としての ILC 施設の基本的機能は維持されるものと思われる。

## 5. まとめ

北上サイトの ILC ルート周辺における地質調査の結果、以下のような地質・岩盤条件と岩盤応力状態が明らかとなった。

- ・ ILC ルートほぼ全区間に堅硬で割れ目の少ない花崗岩が分布し、南端の 3km 区間のみ堆積岩であるが硬質な古生層泥岩が分布している。
- ・ 北上山地には明瞭な活断層が認められないこと、少なくとも ILC ルートを交差する活断層は存在していないことが明らかになった。

- ・ トンネルの施工に妨げとなる古い断層についても、大規模な破碎帯を有する断層は認められていない。
- ・ 弾性波探査結果、ILC 中央部付近のメインライナックトンネルや衝突実験ホールの掘削位置は弾性波速度( $V_p$ )が 4km/s~5.5km/s の岩盤に計画されている。
- ・ 岩手県の南東に位置する北上山地周辺は全体的に地殻ひずみの大きさが小さく引張り側の傾向にあり、この地域における地下の水平方向のひずみは小さな応力状態にあることが推察される。
- ・ 今回測定された初期地圧の最大値と側圧比とともに、過去国内で計測された値と同等であり特異な応力状態ではないことが確認された。

## 6. おわりに

昨年、わが国の高エネルギー物理学研究者会議と ILC 戦略会議は、ILC の候補地を北上サイトに絞り、政府に対し日本誘致の要望書を提出した。2012 年のヒッグス粒子発見から ILC の計画がにわかに現実味を帯びてきたが、ILC 施設の建設には着工から完成まで約 10 年の工期と多額の費用を要するわが国で未経験の国際プロジェクトであるため、日本誘致の決定までにはまだ解決すべき課題が多く残されているが、是非この ILC プロジェクトの完成を願いながら今後の動向を見守りたい。

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、植野歩末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) Yokoyama, T., Ogawa, K., Hirayama, N., Funato, A., Sanuki, T., Yamamoto, H., Kyoya, T., Kazama, M., and Kawai, T., Rock Stresses Measurement with High Stiffness Hydraulic Fracturing System in ILC Kitakami Site, the 8th Asian Rock Mechanics Symposium "ARMS8", 2014. (in preparation)
- 2) Linear Collider Collaboration, <http://www.linearcollider.org/images/>, (2014/4/21 アクセス).
- 3) 日本の地質『東北地方』編集委員会編：日本の地質 2 東北地方, 共立出版, p.9, 1989.

# ROCK STRESS STATES AND STABILITIES OF KITAKAMI MOUNTAINS AS A CANDIDATE-SITE OF THE ILC PROJECT

Tatsuya YOKOYAMA, Koji OGAWA, Akio FUNATO and Tomoyuki SANUKI

The International Linear Collider (ILC) is an underground structure that has a 31-50km long straight tunnel and a collision experiment hall at the central area. The required conditions of geology and rock physics for constructing ILC facilities will be that the hard and sound rock bodies is located around the candidate-site. On the other hand, the establishment possibility of this facility is dependent on the long-term stability of the in-situ stress states, we have also examined the effects of crustal deformation in the 3.11 earthquake. As a result, it has been understood that the crustal strains and the magnitude of rock stress are smaller than other sites in Japan from the results of stress measurement and GPS analysis.