# ILC 北上サイトの地殻応力状態と地震時の岩盤安定性

# 横山幸也

# 深田地質研究所

# Crustal stress states and rock stability in earthquake at the ILC Kitakami site

# YOKOYAMA Tatsuya

#### Fukada Geological Institute

要旨:国際リニアコライダー(以下,ILC)は、全長 20km 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、ILC ルートの山岳部で岩 盤応力の測定が行われ、さらに 2011 年東北地方太平洋沖地震での地殻変動の影響についても検 討された.その結果、現在の岩盤応力や地殻ひずみの状態、および GPS データの分析に基づく 地震時や地震後の地殻の動きが明らかになり、北上サイトは全体に地殻ひずみが小さく安定的な 地殻応力状態であることが分かった.

キーワード: 国際リニアコライダー (ILC), 岩盤応力, 地殻ひずみ, 2011 年東北地方太平洋沖 地震, 地殻変動

Abstract: The International Linear Collider (ILC) is an underground structure consisting mainly of a 20-kmlong linear tunnel and a collision experiment hall at the central area, and requires long-term stable rock for accurate operation of the experimental facilities. According to the results of previous investigations, the Kitakami site was evaluated as a suitable route for the ILC facility, because hard granite rocks are distributed along almost the entire ILC route and no active fault is found in its vicinity. On the other hand, because the viability of this facility depends on the long-term stability of the rock mass, rock stresses were measured in the mountains of the ILC route. In addition, the effects of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on crustal movements were also discussed. The results reveal the current states of rock stress and crustal strains, as well as the crustal movements during and after the earthquake based on GPS data analysis. It was found that the Kitakami site has a stable crustal stress state with a small crustal strain magnitude.

Keywords: International Linear Collider (ILC), rock stress, crustal strain, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, crustal movement

### 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 施設はメインリニアックトンネ ル(以下,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

#### 横山幸也



図1 ILC の地下施設概念図 (ILC GDE, 2013 に加筆).

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 20 km の直線トンネルが標高 110 m 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(平松ほか,2015).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(Yokoyama et al., 2014)につい て詳しく述べる.

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(横山ほか、2015).ここでは、 これらのデータに基づいて明らかにした 2011 年 東北地方太平洋沖地震(以下、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. 北上サイトの地質と岩盤

### 2.1 地形·地質

北上山地は南北 250 km, 東西 80 km 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 さくなだらかな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 400 m 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, ルートを数 km 東西に離れると地形は急峻となり, 標高は 500 m~900 m 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が分布する(日本の地



図 2 北上サイト周辺の地質図と ILC ルートの延長範囲 (横山ほか, 2015).

『東北地方』編集委員会編, 1989). 図3にはILC ルート沿いの地質断面図を示す. MLT は標高 110 m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. 千厩花崗岩体はしずく状の形状をな 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.

# 2.2 活断層

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 15 km 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. 図 4 には ILC ルート周辺の地質と抽出されたリ ニアメントの分布を示す. 同図に示されたリニア メントは、土木学会(1985)が作成した判読基準 により分類された La~LEの5 段階基準の内,活 断層や変動地形の可能性が低い Lc, Lp, LE に ランクされている. 判読されたリニアメントは地 層境界,定向性のある節理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ものとの結論が得られて いる (平松ほか.2015).

#### 2.3 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(坂下 ほか,2015). MLT の施工基面にあたる標高 110 m 付近での岩盤状況については,P 波速度で4 km/s 以上,比抵抗値で 1,000 Ωm 以上,一軸圧 縮強度は 150 MPa 以上の健全な岩盤が分布する ことが明らかとなった.図5には,ILC ルート全 ルートをカバーする弾性波速度断面図を示す.



図3 ILC ルート沿いの推定地質断面図, 全長 50 km, 縮尺 H: V=1:5, (横山ほか, 2015).



※1)変位地形である可能性が低い、※2)変位地形である可能性が非常に低い、 ※3)変位地形以外の要因に起因する(土木学会,リニアメント判読基準,1985)

図 4 北上サイト周辺の地質図とリニアメント分布 (平松 ほか, 2015).

この区間での地質と岩盤状況を把握するため 深さ 300 m のボーリング調査を行い,速度検層, 電気検層,水圧破砕試験,孔内載荷試験,透水試 験,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 32 m までは風化の進んだマサ状から軟質岩盤, 32 m~72 m 間は割れ目間隔 10 cm 程度の硬質な岩盤, 72 m以深は割れ目間隔が 1 m 前後の新鮮堅 硬な岩盤で,一部に割れ目間隔が 2 m~3 m の国 内ではまれに見る A 級岩盤が認められる. 全深 度にわたり断層と認められる破砕帯はなく, 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.水圧破砕試験に よる岩盤応力測定については後述する.

## 3. 地殻応力と岩盤の安定性

#### 3.1 岩盤応力測定

ILC は、長大トンネルと大空洞を基本構造と する地下施設である.特に衝突実験ホールのよう な大空洞を安全に掘削しかつ空洞の安定性を確保 するためには、地下の岩盤応力の状態を把握して おく必要がある.岩盤応力の測定に用いた方法は、 新たに開発された高剛性水圧破砕試験法で、地表 から地下深くに向けて岩盤の応力を直接測定でき る方法である.ここでは、図6に示す ILC 計画 ルートの中間部に位置する標高約350 m の早麻 山の山頂から長さ300 m のボーリングを行い、 地下施設の深度に近い深度200 m~300 m 間で岩 燃応力の測定を行った.



図 5 ILC ルート沿いの弾性波速度断面図, 全長約 30 km, 縮尺 H: V=1:5, (H22 (東丑石):弾性波探査の実施時期と地 名を示す), (土木学会岩盤力学委員会, 2020, 図 2.2 から一部抜粋).



図6 岩盤応力測定を行ったボーリング位置とその周辺の弾性波速度,全長3km,縮尺H:V=1:1,(横山ほか,2015を 一部修正).

図7に深度200 m~300 m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 ( $\sigma$ Hmin)は5.1 MPa~6.2 MPaで,岩盤の密度 を2.7 g/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( $\sigma$ Hmax)は9.5 MPa~10.8 MPaであり,最大主応 力と被り圧( $\sigma$ z)の比で示される側圧比( $\sigma$ Hmax/ $\sigma$ z)は1.33~1.77 となった.また,最大 主応力の方位は,平均的に NW-SE 系である.

# 3.2 地殻ひずみ

ILC 施設は総延長が最大 20 km 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実的に難しい.このため、ILC ルート周辺における平均的な岩盤応力状態は、北上地方の地殻ひずみ分布から推察する.

図 8 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



図7 岩盤応力測定で得られた岩盤応力,側圧比,最大主応力の方位の各深度分布,(横山ほか,2015).

#### 横山幸也



図8 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),(横山ほか,2015).

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 側の領域に比べで小さな応力状態にあることが推 察される.図8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7の実際に測定され た岩盤応力の主応力の方位と相対的な大きさを重 ねてプロットしたものである.測定された岩盤応 力の最大主応力の方位は,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 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,江刺観測施設)では,延 長 250 m の花崗岩の坑道内に設けられた石英管 ひずみ計で, N-S 方向(長さ 35.77 m), E-W(長 さ 35.69 m)方向,および NE-SW(長さ 50.69 m)方向の 3 成分のひずみが常時観測されている. このひずみ計は,岩盤の伸び縮みを 10 m につき 0.01  $\mu$ m(10<sup>9</sup> ひずみ)の分解能で計測すること が可能である. 3.11 地震時には,地盤の大きな揺 れに伴い石英管ひずみ計の変位計がスケールアウ トしていたが,2011 年 4 月 1 日に復旧されて以 降は正常な計測データが得られている.

図 9 に 3.11 地震発生後の約 400 日間における 石英管ひずみ計ひずみの経時変化を示す. 変位計 のスケールアウトにより 3.11 地震に伴うひずみ の絶対値は不明であるが、復旧後においても N-S, E-W,および NE-SW の 3 方向ともに大きなひず み変化が継続している.この地震後約 400 日での 余効変動(大規模地震後のゆっくりと動く地殻変 動)に伴うひずみは、N-S 方向で約 1,600×10<sup>9</sup>



図 9 江刺観測施設で計測された 3.11 地震後の余効変動 に伴う岩盤のひずみ変化。(田村ほか、2013).



図 10 GPS 電子基準点の 2011 年 1 月 1 日~12 月 31 日の 1 年間での地盤の水平変位(横山ほか, 2015 を一部修 正)

の縮み, E-W 方向で約 2,000×10<sup>9</sup>の伸び, NE-SW 方向で約 500×10<sup>9</sup>の伸びが観測されている. 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 結果から確認できる. 図 10 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. 同図に示した 水平変位は ILC ルートを囲む全 17 の電子基準点 の GPS 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 ルート延 長上 50 km の北端と南端との相対的な伸びは 1 m 程度である.

# 4. 考察

ILC 施設の重要な実験機器の殆ど全ては地下の トンネルと衝突実験ホールに納められるため,同 施設の健全な運営にはトンネルや空洞の長期的な 力学的安定性が求められる.これまでに行われて きた地表地質調査やボーリング調査,あるいはボ ーリング孔を利用した各種検層と ILC ルート沿 いの弾性波探査などの成果からは,ILC ルート全 域において良好で硬質な花崗岩が分布し,活断層 などの活構造は認められず,岩盤の健全さの指標 となる弾性波速度の値も大きいとの結論が得られ ている.

一般に、トンネルや空洞の力学的安定性は、 地下空洞を構成する岩盤力学的特性としての岩盤 の硬さや強度のみならず、その岩盤に作用する岩 盤応力の大きさに大きく左右される。岩盤応力は 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.この ため、水圧破砕法により現在の岩盤応力状態が計 測され、ここでは特に大きな応力値の存在は確認 されなかった.

今回,国土地理院で観測されている過去 100 年間にお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 ることが想定される.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からは, 当地域が安定的な応力状態であることが明らかと なり,最大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とがわかった.この ような岩盤応力状態を基に,今後,ILC 施設の地 下空洞周辺の岩盤応力状態が詳細に解析されれば, 地下施設の岩盤安定性は十分確保されていること が確認されるものと推察される.

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 11 は,図 10 で示した 3.11 地震に伴う GPS 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



図 11 3.11 地震時と余効変動期間での ILC ルート沿いの 地盤の水平変位量(横山ほか, 2015)

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点は並進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十分 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、この周辺を硬質な古生層泥岩 が取り囲む構造をなしている.
- ・北上山地には明瞭な活断層は認められなく、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.
- ・トンネル掘削に妨げとなる古い断層についても、 大規模な破砕帯を有する断層は認められない.
- ・弾性波探査結果,ILC ルート全域において弾性 波速度(Vp)が4 km/s~5.5 km/sの岩盤が分布 していることが確認された.
- ・岩手県の南東に位置する北上山地周辺は全体的 に地殻ひずみが小さいため、この地域における 地下岩盤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も に、特異な応力状態ではないことが確認された.

# 6. おわりに

地下岩盤を対象にした大規模な掘削工事を伴 う ILC 計画では,建設地点における固有の地形 地質条件や岩盤の安定性に係わる地殻応力状態や 震時の安定性を考慮することが不可欠である.ま た,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,ILC 誘致の最終決 定までにはまだ解決すべき課題が残されているが, 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.今回の成果は、東北大 学理学部の山本均教授、佐貫智行准教授のご指導 のもと、岩手県政策地域部(現,ILC 推進局)の 方々に多大なるご配慮をいただきながら実施した 現地調査の結果をまとめたものである.また、地 震後の余効変動に伴う岩盤のひずみ変化について は、国立天文台江刺地球潮汐観測施設の田村良明 博士に多くのご助言をいただいた.ここに記して 深く感謝するものである.

なお,ここで述べた調査や試験では,応用地 質株式会社の平松晋一顧問,松下典史上級専門職, 坂下晋上級専門職,江波戸昌徳部長ら,および筆 者が共に現地作業を行い,今回それらの成果をと りまとめたものである. 理探査による岩盤特性,第43回岩盤力学に関 するシンポジウム講演集,272-277.

- 田村良明,三浦哲,太田雄策,出町知嗣,河野俊 夫,佐藤忠弘,坪川恒也 (2013):江刺地球潮 汐観測施設で観測された東北地方太平洋沖地 震前後でのひずみ速度変化,日本測地学会第 120回講演会,東京,国立極地研究所.
- 土木学会岩盤力学委員会 (2020): 東北 ILC 施設 計画, 9.
- 日本の地質『東北地方』編集委員会編 (1989): 日本の地質2東北地方,共立出版,9.
- 平松晋一,松下典史,横山幸也,佐貫智 (2015): 北上山地における直線長大トンネル立地に向 けた地質学的検討,第43回岩盤力学に関する シンポジウム講演集,266-271.
- 横山幸也,小川浩司,船戸明雄,佐貫智行 (2015): 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,第43回岩盤力学に関す るシンポジウム講演集,248-253.
- Yokoyama, T., Ogawa, K., Hirayama, N., Funato, A., Sanuki, T., Yamamoto, H., Kyoya, T., Kazama, M., and Kawai, T. (2014) : Rock Stresses Measurement with High Stiffness Hydraulic Fracturing System in ILC Kitakami Site, 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), GD-1.

# 文献

- ILC GDE, ILC conceptual diagram (2013): http://ww2.linearcollider.org/images/pid/1000890/g allery/12\_ILC\_schematic\_image%28J%29.jpg, (2020 年 8 月 26 日参照).
- 坂下晋, 横山幸也, 松下典史, 平松晋一, 佐貫智行 (2015): ILC 建設地点としての北上サイトの物