

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動による ILC 実験施設への影響検討 INVESTIGATION OF THE EFFECT TO ILC EXPERIMENT FACILITIES BY TECTONIC DEFORMATION AFTER THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

関根一郎^{#,A)}, 若竹亮^{A)}, 吉岡正和^{B)}, 佐貫智行^{B)}

Ichiro Sekine^{#,A)}, Ryo Wakatake^{A)}, Masakazu Yoshioka^{B)}, Tomoyuki Sanuki^{B)}

^{A)} Toda Corporation

^{B)} Tohoku University

Abstract

The Japanese islands lie in the mountain-forming zone by the name of the circum-pan-Pacific orogenic belt. Therefore, we have to consider the degree of the influence of earthquakes regarding the yet-to-be construction of the international linear collider (ILC). It is already considered that the influence in the underground facility by an earthquake is small. A crustal movement is considered as one of the influences by an earthquake. The crust of Kitakami mountains has been transformed due to the movement of the Pacific plates before the Tohoku Earthquake off the Pacific coast in 2011. After 2011, the crust has been continuously moving due to the post-seismic movement. In the planning of the accelerator facility, it is important to clearly grasp the degree of the crustal movements and its long-term trend in order to consider how much influence the ILC experimental facilities will face in that regard. In this paper, based on the GNSS data of crustal movements published by Geospatial Information Authority of Japan, we calculated amounts of crustal movements around ILC Kitakami candidate site after the Tohoku earthquake off the Pacific coast in 2011. After that, we studied the degree of their influence to the ILC experimental facilities. As a result, it became clear that, although the crustal movements continuously occur, their influence is small by doing the realignment and course correction of collision experiments.

1. はじめに

北上山地は地質的に安定した地域に位置するが、日本列島は環太平洋造山帯に位置するので、東北地方は太平洋プレートの移動の影響を常に受けている。東北地方太平洋沖地震後も Fig. 1 のように、地殻変動により 2019.2~2020.2 の 1 年で約 6 cm、東南東に移動している。この地殻の動き(余効運動)は広域の地殻が概ね一体となった動きであるが、測定箇所により、わずかに差がある。20.5 km と長い ILC 施設への影響は問題ないのか最新のデータで検討した。検討方針は下記の通りである。

ILC 施設は延長 20.5 km、土被りは平均 100 m 程度なので、ILC が建設されるレベルにおける広域の変位は地表において十分推定が可能である[1]。ここでは、地質変化等に起因する局所的な変形は除外し、国土地理院の公開する GNSS のデータを用いて広域変形について検討した。

地殻は一体となって移動しているので、GNSS 測点間の動きはわずかであるが違いがある。そのデータをもとに、ILC の 20.5 km 区間における地殻の動き、すなわち軸線の曲がり、軸線のひずみ(伸び、縮)を算出し、再アライメントの観点と衝突実験への影響の観点から、許容可能か検討した。

2. 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

2.1 ILC 候補サイト周辺の GNSS 観測点

北上山地南部近傍の GNSS 観測点分布を Fig. 2 に示す。本検討では図中赤で示した ILC 施設計画位置周辺

[#] ichiro.sekine@toda.co.jp

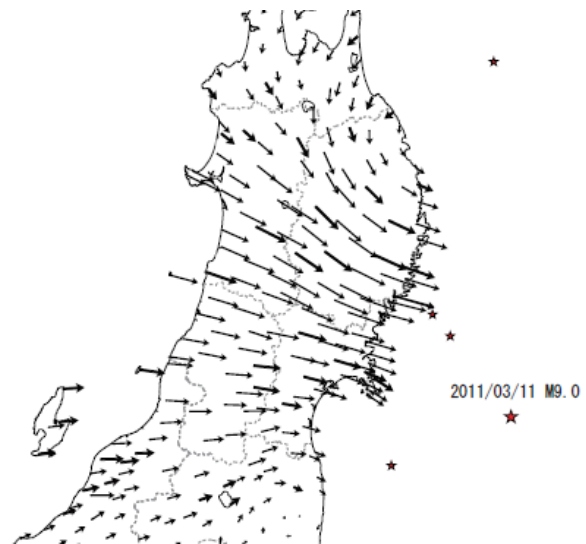


Figure 1: Crustal movement measured by GNSS after the Tohoku Earthquake off the Pacific coast in 2011 (2020.2 ~ 2021.2, It was presented by GSI).

の 13 観測点を対象にして、ILC 候補サイト周辺の地盤変位の近似計算分析を行った。



Figure 2: The GNSS stations around the ILC candidate site.

2.2 ILC 候補サイト周辺の地盤変位の近似計算方法について

GNSS 観測点のデータから ILC 候補サイト周辺の地盤変位を近似計算する方法は、東北地方太平洋沖地震前について、土木学会リニアコライダー土木技術研究小委員会で同様な検討をした手法[2]を踏襲した。

1) 2 次関数へ近似

ILC 施設の地盤変位を算出するために、周辺地域の地盤変位の近似式を求める。その際、 x 軸、 y 軸はそれぞれ Fig. 3 のように ILC 施設の軸方向と軸直交方向とする。

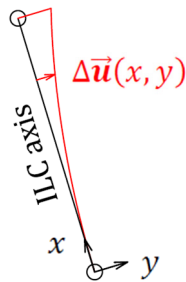


Figure 3: Local coordinate along the ILC axis.

地盤変位の近似値を $\Delta\vec{u}(x, y)$ とすると以下のように書ける。

$$\Delta\vec{u}(x, y) = \begin{pmatrix} \Delta u_x(x, y) \\ \Delta u_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (1)$$

また、ILC 施設への影響を検討するため、剛体変位だけでなく変形変位まで考慮する必要がある。すなわち伸縮や曲がりを考慮し、 x 、 y に対して 2 次の近似とする。

$$\Delta\vec{u}(x, y) = \begin{bmatrix} C_{x1} & C_{x2} & C_{x3} & C_{x4} & C_{x5} & C_{x6} \\ C_{y1} & C_{y2} & C_{y3} & C_{y4} & C_{y5} & C_{y6} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \\ x^2 \\ y^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $C \sim C_{x6}$ 、及び $C_{y1} \sim C_{y6}$ は定数である。

13 地点の GNSS の変位データを用いて最小二乗近似を行い、定数を算出する。

2) 軸直交方向の曲げ変形

ILC 施設は断面寸法に対して軸方向長さが極めて長いので、線構造 ($y = 0$) とみなすことができる。そのため変位 $\Delta\vec{u}$ は以下のように書くことができる。

$$\Delta\vec{u}(x, y) = \Delta\vec{u}(x, 0) = \begin{bmatrix} C_{x1} & C_{x2} & C_{x4} \\ C_{y1} & C_{y2} & C_{y4} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで変位全体から剛体変位を差し引いて、変形変位のみを考える。軸方向変位 Δu_x は、 C_{x1} の項が平行移動、 $C_{x2}x$ 、 $C_{x4}x^2$ の項が軸方向の伸縮に対応している。また、軸直交方向変位 Δu_y は、 C_{y1} の項が平行移動、 $C_{y2}x$ の項が回転、 $C_{y4}x^2$ の項が軸線の曲がりに対応する。

変形変位のみを考えると変位 $\Delta\vec{u}$ は以下ようになる。

$$\Delta\vec{u}(x, 0) = \begin{bmatrix} C_{x2} & C_{x4} \\ 0 & C_{y4} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

すなわち軸方向の伸縮、及び軸線の曲がりは以下のようになる。

$$\Delta u_x(x, 0) = C_{x2}x + C_{x4}x^2 \quad (5)$$

$$\Delta u_y(x, 0) = C_{y4}x^2 \quad (6)$$

2.3 地盤変動の計算結果

2019 年 9 月から 2020 年 9 月までの 1 年間について、国土地理院の GNSS 電子基準点の内、ILC 施設候補地周辺 (13 点) の変位実測値と計算によって求められた近似値を Fig. 4 に示した。また、ILC 候補サイトの軸線に沿った近似値を示した。なお、国土地理院によって求められている電子基準点の変位は、日毎のデータでは最大 10mm 程度のばらつきがあるので、2019 年、2020 年ともに、9 月 1 日から 15 日の間の平均値で扱った。

Figure 4 から ILC 周辺が全体に移動しており、図からは読み取れないが ILC 計画線でわずかな曲がりがある。Figure 5 に 2011 年から 2020 年までの 1 年毎について ILC 計画線上での曲がりを、中間点を原点とした場合、端部を原点とした場合について示した。Figure 5 は Fig. 4 と同様に 9 月 1 日から 15 日までの平均値と翌年の 9 月

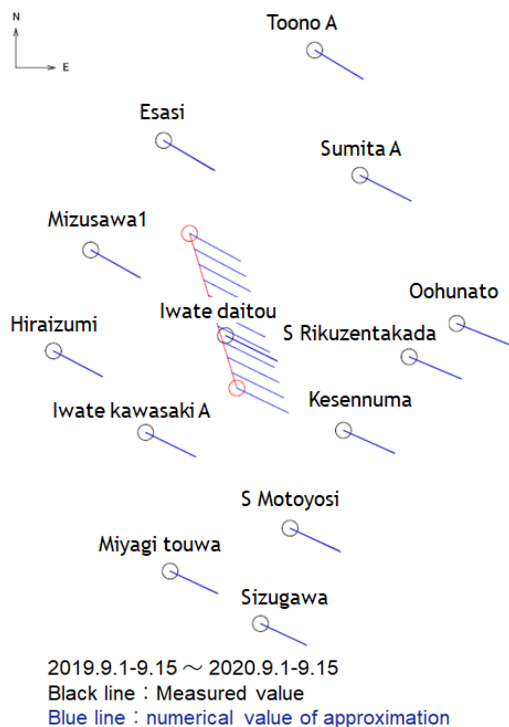


Figure 4: The numerical value of an approximation at GNSS station and displacement at the ILC candidate site.

1日から15日までの平均値の1年間の差を示している。なお、東北地方太平洋沖地震前について、土木学会リニアコライダー土木技術研究小委員会で実施した結果[2]を併記した。東日本太平洋沖地震以前[2]に比べると、2章で求めた2019年から2020年のILC計画線上での軸線の曲がりりは、約18倍大きい結果であった。

TDR[3]によるとアライメントから見た許容値は300mの範囲で300 μ mを超えるようなずれが発生した場合にはアライメントの再調整が必要になるとされている。Figure 6の結果からずれは10 μ m程度であり、十分に小さいと言える。

Q-magnet(四重極磁石)やBPM(ビーム位置モニター)の位置が10~20 μ mずれると約1%程度エミッタンスが増大すると計算されている。このずれが大きくなった場合、電磁石の微調整によりビーム軌道を補正することで対応する。これに要する時間は数分と想定されている[4]。従って、10~20 μ m程度変化するのに1日程度以上かかるならば、1日1回15分要しても約1%のロスなので、ルミノシティロスは十分に小さいと考えられる。

2.4 軸方向のひずみの検討

次に軸方向のひずみを計算する。軸方向のひずみ $\epsilon(x, 0)$ は以下のように示すことができる。

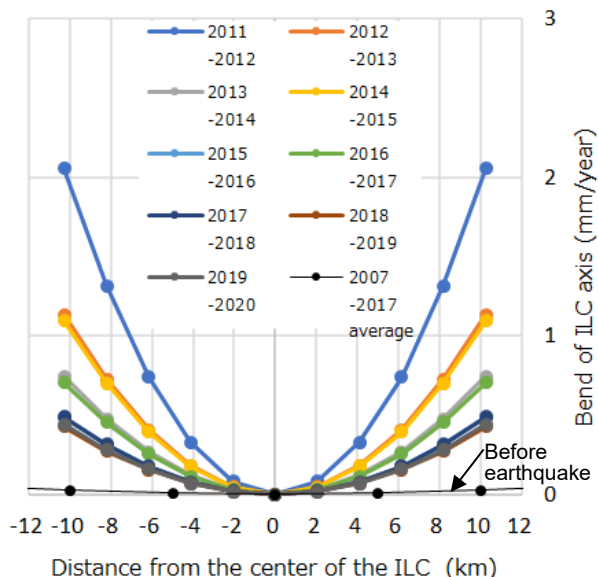
$$\epsilon(x, 0) = \frac{\partial \Delta u_x(x, 0)}{\partial x} = C_{x2} + 2C_{x4}x \quad (7)$$

ここで2019年9月から2020年9月までの間の軸方向ひずみについて考える。南端部を原点としたとき、南端部の軸方向ひずみ $\epsilon(0, 0)$ 、及び北端部の軸方向ひずみ $\epsilon(L, 0)$ は以下のようになる。

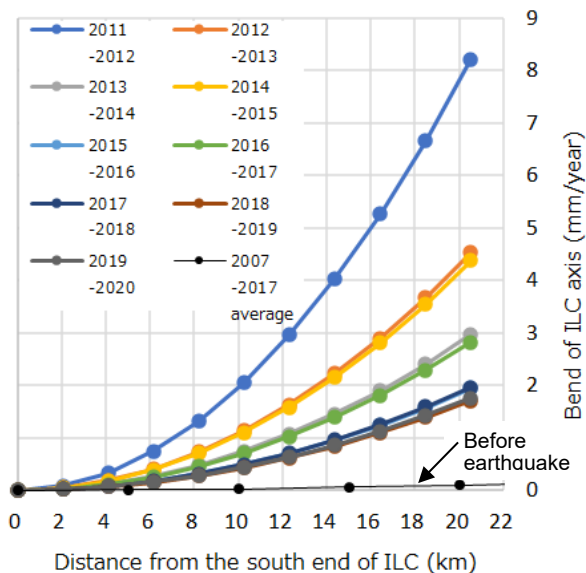
$$\epsilon(0, 0) = -1.77E-07 \quad (8)$$

$$\epsilon(L, 0) = -1.66E-07 \quad (9)$$

軸方向ひずみは x に対して1次式であるため、南端部で圧縮ひずみが最大値1.77E-07をとる。このひずみは、加速器側で調整してカバーできる程度の値である。また、このひずみ量からILC施設予定地の南端と北端の間の軸方向の変位量は3.51mm/年の圧縮との計算結果が得られた。



a) The figure which made the halfway point the starting point.



b) The figure which made the edge the starting point.

Figure 5: Curve in ILC facilities after the Tohoku earthquake off the Pacific coast in 2011.

3. 変位量の推移と予測

東北地方太平洋沖地震前後の観測点の動きを把握するため、気仙沼観測点の動きを調べた(Fig. 6)。なお、最も近い観測点は岩手大東であるが、東北地方太平洋沖地震後に新設された観測点のため、地震前のデータがないので対象としなかった。

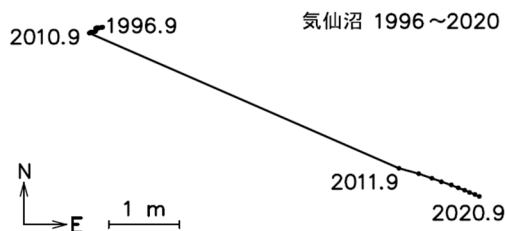


Figure 6: Coordinate change of Kesenuma GNSS station before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

この結果から、東北地方太平洋沖地震時に大きく変動した後、地震後変動量は漸減していることがわかる。ただし、地震前の動きに対し、地震後の余効運動は大きく、2章の検討結果と整合的である。

次にこの運動の変化の傾向を調べた。Figure 7に気仙沼、Fig. 8に岩手大東の月間変位量の推移を示す。変化量の推移は、累乗近似によってよく再現することができた。この傾向が今後も続くことと仮定すると、変位量は2020年9月時点に対して10年で概ね5%程度減少し、20年後の2040年で10%の減少になると予想された。

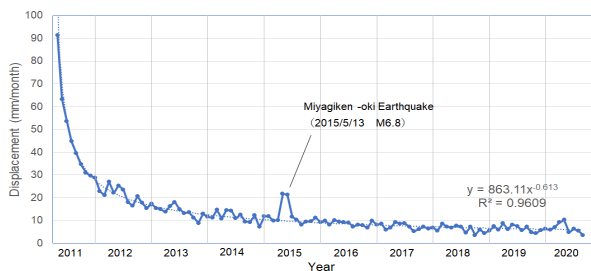


Figure 7: Long-term trend of displacement at Kesenuma GNSS station.

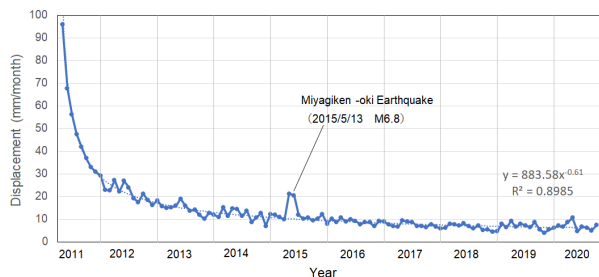


Figure 8: Long-term trend of displacement at Iwate Daitou GNSS station.

4. まとめ

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動による加速器施設への影響について、国土地理院のGNSS電子基準点のデータを用いて検討した。その結果、下記が明らかになった。

①ILC計画線上での軸線の曲がりは、東北地方太平洋沖地震前に比較して、約18倍と大きくなっている。300m程度の範囲で300μmを超えるズレが発生した場合、アライメントの再調整が必要になるが、計算では10μm/年程度との結果が得られており、十分に小さいと言える。また、衝突実験の軌道補正の観点からも影響は小さいことは明らかである。

②ILC施設予定地の軸方向のひずみは圧縮で1.71E-07、南端と北端の間の軸方向の変位量は3.51mm/年の圧縮との計算結果が得られた。このひずみは加速器側で調整してカバーできる。

③東北地方太平洋沖地震前に比較して、地震後の余効運動は現在のところ大きい、次第に落ち着いていく傾向にある。その傾向を調べるために、気仙沼、岩手大東の2電子基準点について、地震後の傾向を調べた。現在、変化の速度は低下しており、20年後でも現在の変位量が約10%減になる程度と現在のデータからは予想される。

謝辞

本報告は、先端加速器科学技術推進協議会のプロジェクト推進部会、安全・防災WG地震SWGの成果に、分析を追加し、加筆したものであり、SWGメンバーに感謝いたします。また、KEKの照沼信浩教授には、加速器施設の面から詳細なご指導をいただきましたこと、深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 吉岡正和・山下了・佐貫智行・汐見勝彦・関根一郎: ILC北上候補サイト周辺の高感度地震観測網Hi-netに併設された高感度加速度計による地盤変動の把握について、第12回日本加速器学会年会、2015。
- [2] リニアコライダー土木技術研究小委員会報告書、公益社団法人土木学会、2008.3。
- [3] ILC技術設計書(TDR)、2013。
- [4] ILC ML & SCRF Baseline Technical Review (ML & SCRF BTR) (2012), "Beam Dynamics" Report; <https://agenda.linearcollider.org/event/5444/sessions/2833/#20120119>