

ILC 北上候補サイト周辺の GNSS による地盤変動の把握について

RESEARCH ON GROUND DEFORMATION USING GNSS AROUND ILC KITAKAMI CANDIDATE SITE

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

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

^{A)} Toda Corporation

^{B)} Tohoku University

^{C)} Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract

The Japanese government (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) has declared its interest in the International Linear Collider (ILC) project to other governments and expressed a willingness to continue discussions. This is an important step toward receiving a green light. In order to achieve stable ILC operation, it is necessary to study the effects of ground deformation. We therefore examined data on ground deformation from electronic reference points located near the Kitakami granitic rock body, which is a candidate site for ILC. Data from these electronic reference points are released by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). The effects of earth tides and ground deformation were studied using these data. We considered the impact of ground deformation on ILC operation by comparing displacement of electronic reference points near the ILC candidate site with surrounding electronic reference points.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) は、政府の関心表明を受け日本への誘致が期待されている。ILC の安定的な運転を確実なものとするためには、地盤の変動が ILC に与える影響を把握する必要がある。

大型の衝突型加速器の性能 (ルミノシティ) は地盤変動の影響を受ける。例えば KEKB、スーパーKEKB や LHC (CERN) は地球潮汐の影響を補正しながら運転している。KEKB では周長 3 km に対して 20 ミクロン程度の補正量になるし、さらに気圧変動の影響も受けるので、それも補正している。リング型衝突加速器の場合、2つのビームは同じトンネル内を周回するので、影響は緩和されていると思われるが、ILC においては電子、陽電子リニアックは独立な加速器と考えるべきで、地盤変動の影響はリング型より大きいと推察される。また KEKB は浅深度地下、LHC は大深度地下で両者とも土被りは全周に亘り一様であり、かつ地質は堆積層である。それに対し ILC は均質な花崗岩体であり、かつ土被りが全線にわたって変化する。従って候補サイトにおける地盤変動について理解を深めることは極めて重要である。ILC が稼働し、地盤変動との相関の理解が進めば、地球科学的にも意味がある情報が得られる可能性もある。

地盤変動の影響の調査は、東北地方太平洋沖地震以前に土木学会のリニアコライダー土木技術研究小委員会で行われ[1]、長期的な地盤変動が ILC に与える影響は問題になるレベルではないことを示している。震災後の検討は横山らが 2015 年に実施し、ILC 施設が東北地方太平洋沖地震およびその年の余効変動を受けても、コヒーレントな動き (剛体運動) をするため、ILC 施設の基本的性能は維持されるとしている[2]。また、筆者らも高

感度地震観測網 Hi-net に併設された高感度加速度計 (傾斜計) のデータを調べ、地盤変動の影響が十分少ないことを示している[3]。

地盤は地球潮汐の影響で動いている。北上候補サイトの地盤は均質な硬岩 (花崗岩) であるため、その動きはコヒーレントであると推定されるが、実際にどうなのか調べる必要がある。そのため、ILC の建設候補地とされている北上花崗岩体近傍に位置する電子基準点のデータを調べた。その手法として地球潮汐の影響の有無を考慮できる PPP (Precise Point Positioning) 解析を採用して、地球潮汐の影響を把握した。さらに、サイト周辺の電子基準点の相対的な変位を算出する基線解析を行い、ILC に与える影響を考察した。なお、解析には国土地理院から発表されている GNSS (Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム) のデータ (GPS (米国)、みちびき (日本)、ガリレオ (欧州) の衛星データ) を使用した。

2. 地球潮汐の影響の有無を考慮した PPP 解析による地盤変動調査

2.1 PPP 解析

PPP 方式は、近接の基準局のデータを利用する RTK (Real Time Kinematic GPS, Fig. 1 参照) と異なり、近接

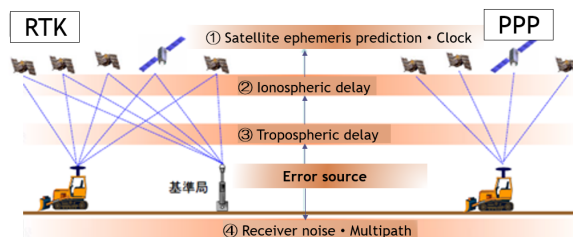


Figure 1: Conceptual diagram of PPP and RTK.

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

基準局無しで搬送波位相から数 cm の精度を達成する方式である。その PPP 方式自体の詳細は文献[4, 5, 6]を参照いただきたい。

Figure 1 に PPP 方式における各種誤差要因を示した。それに対する対応策を Table 1 にまとめた。各種誤差要因に対して対策することにより、cm レベルの精度を実現することができる。Table 2 に示すように PPP 方式では収束するのに時間を要するという課題があるが、近接基準点が必要なく、地球潮汐を含む絶対位置のデータが得られるという利点がある。

PPP 解析の調査対象とした電子基準点は、ILC の計画位置に至近の江刺、岩手大東、S 本吉の 3 点とした。それぞれの位置と ILC 計画位置の関係は Fig. 2 に示すとおりである。

Table 1: Error Source and Mitigation

Source	Potential error size	Error mitigation
Satellite clock model	2m (rms)	Centimeter level precise satellite clock
Satellite ephemeris prediction	2m (rms) along the LOS	Centimeter level precise satellite position
Ionospheric delay	2-10m (zenith) Obliquity factor 3 at 5°	Dual-frequency can mitigate it completely
Tropospheric delay	2.3-2.5m (zenith) Obliquity factor 10 at 5°	Precise model with centimeter level
Multipath (open sky)	Code: 0.5-1m Carrier: 0.5-1cm	Carrier-phase is used
Receiver Noise	Code: 0.25-0.5m Carrier: 1-2mm	Carrier-phase is used

Table 2: Comparison of RTK and PPP

	RTK	PPP
Need for closely situated reference points	Yes	No (requires tens of electronic reference points over a wide area spanning continents)
Reception of correction data	Yes	Yes (often via satellite)
Degree of precision	Normally within 1 cm	Several cm
Time required for convergence	Instantaneous	10-20 min (Depending on receiver)



Figure 2: Location of CORS (Continuously Operating Reference Station) for PPP analysis.

2.2 PPP 解析による地盤変動解析結果

Figure 3, 4 に、2019 年 1 月 1 日および 1 月 8 日の 24 時間における地球潮汐の影響を含んだ PPP 解析による地盤変動解析結果を経度方向 (E-W)、緯度方向 (N-S)、高度方向 (U-D) について示した。PPP 解析では最初の数時間は結果が収束しないため、考察の対象とはできないので図にハッチングを施した。Figure 3, 4 の結果を見ると地球潮汐の影響と考えられる変動が大きく、特に高度方向には 100 mm 以上の変動となっている。この特徴は江刺、岩手大東、S 本吉電子基準点とも同様となっており、このことから変動がコヒーレントな動きであることがわかる。

次に、Fig. 5, 6 に地球潮汐の影響を除いた場合の PPP 解析の結果を示した。この場合、収束後、各電子基準点の変動量は E-W および N-S 方向に 10 mm 以内、U-D 方向に 20 mm 以内となり、地盤は安定していることがわかる。

3. 基線解析による電子基準点の相対変位調査

3.1 基線解析による電子基準点の相対変位調査方法

基線解析とは、観測点間の幾何学的な位置関係を計算で求めるものである。観測点が 2 点の場合の基線解析であれば、それは 2 点間の相対地殻変動を求めることに対応する。

基線解析に用いた電子基準点は、Fig. 7 に示すように岩手大東を基準にし、その周辺の 6 か所とした。それぞれの電子基準点間の相対的な変動を求めた。ただし、岩手大東と S 本吉間は収束しなかったため、岩手川崎 A を介して相対地殻変動を求めることにした。解析したのは 2019 年 1 月 1 日から 1 週間ごとに 2 月 26 日までの約 2 か月間とした。RTK 計算には、測位衛星として GPS、みちびき、ガリレオを用い、信頼できる収束結果の 24 時間平均値をその日の結果とした。

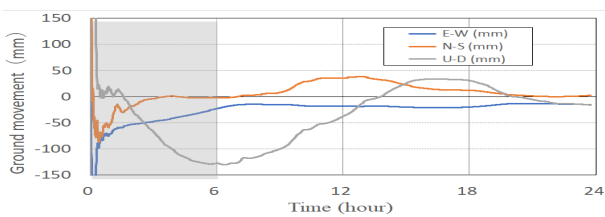
3.2 基線解析による電子基準点の相対変位調査結果

Figure 8 は岩手大東と江刺間の相対地殻変動を 2019 年 1 月 1 日を原点にして、E-W 方向、N-S 方向、U-D 方向について示している。また、Fig. 9 は同様に岩手大東と S 本吉の結果である。高度方向に振れが大きいのは、GNSS の特性として高度方向は誤差が大きくなることに起因していると思われる。

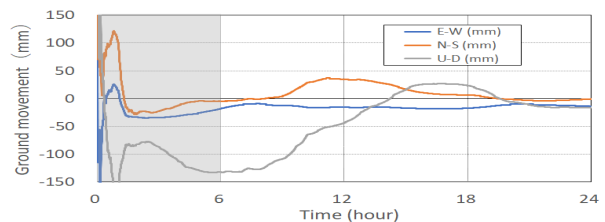
Table 3 に岩手大東と周辺各電子基準点の間の相対地殻変動解析結果を示した。経度・緯度方向には概ね 5 mm 以内、高度方向には概ね 20 mm の結果となった。この結果には GNSS の誤差を含んでおり、実際にはこれより小さな変動量となる。

以上の結果を検証するために、電子基準点のデータを国土地理院が解析し 2~3 週間後発表される「日々の座標値 (F3 解)」[7]と比較し、結果の妥当性を検証したところ、経度・緯度方向に概ね 5 mm 以内、高度方向に 20 mm 以内で一致し、妥当な結果であることが確かめられた。

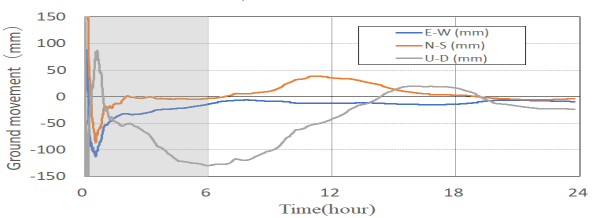
以上より、最近の ILC 北上候補サイトの周辺の電子基準点の動きは十分に小さい変動であることが分かった。



a) Esashi

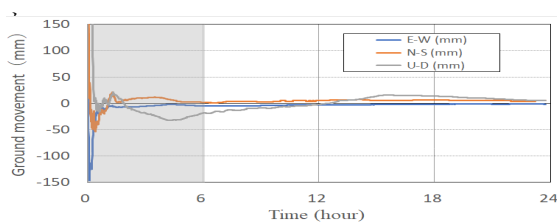


b) Iwate Daito

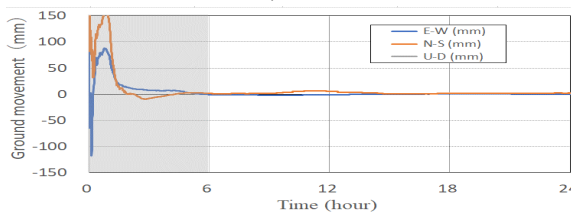


c) S Motoyoshi

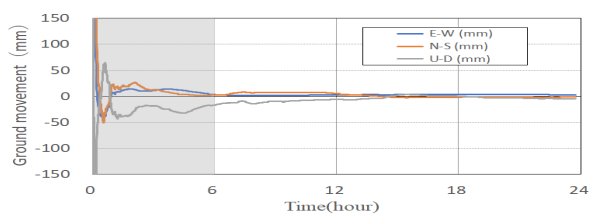
Figure 3: The results of PPP analysis including the influence of a tide on January 1, 2019.



a) Esashi

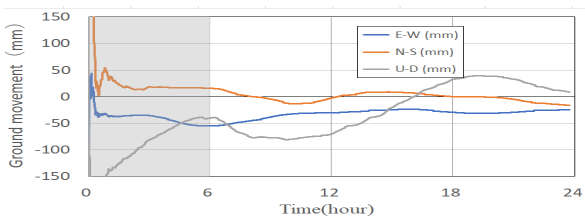


b) Iwate Daito

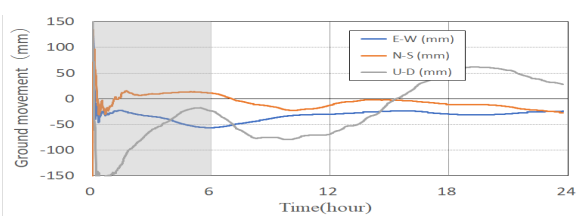


c) S Motoyoshi

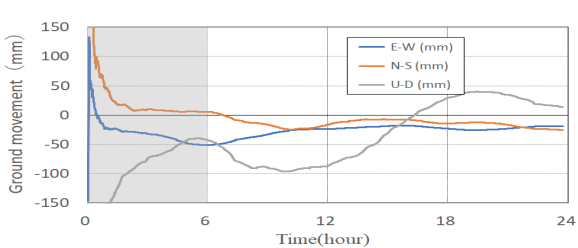
Figure 5: The results of PPP analysis without the influence of a tide on January 1, 2019.



a) Esashi

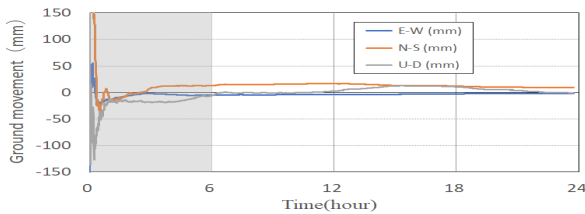


b) Iwate Daito

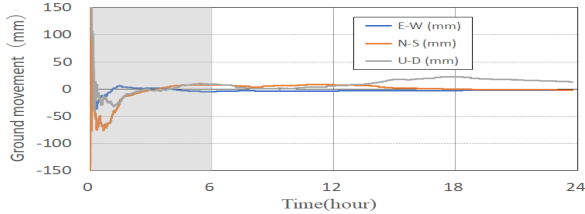


c) S Motoyoshi

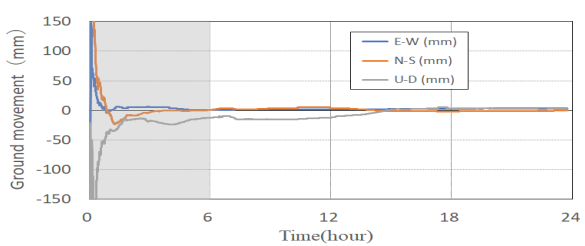
Figure 4: The results of PPP analysis including the influence of a tide on January 8, 2019.



a) Esashi



b) Iwate Daito



c) S Motoyoshi

Figure 6: The results of PPP analysis without the influence of a tide on January 8, 2019.

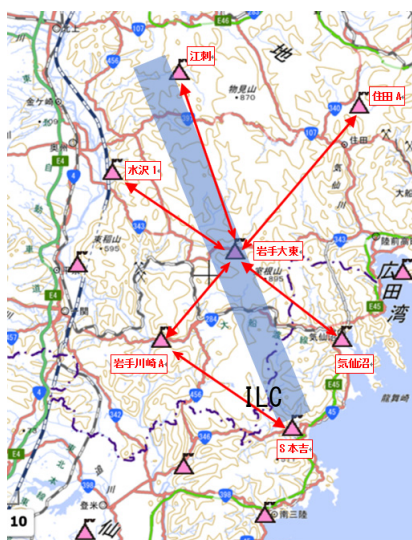


Figure 7: Location of CORS for baseline analysis.

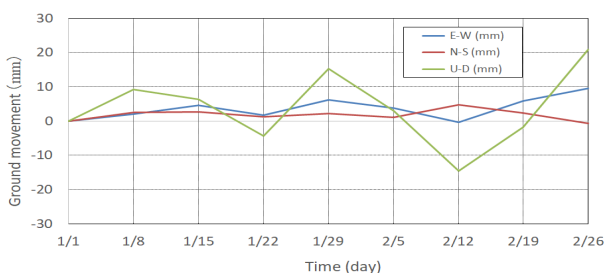


Figure 8: The relative position difference between Iwate daitou and Esashi by baseline analysis.

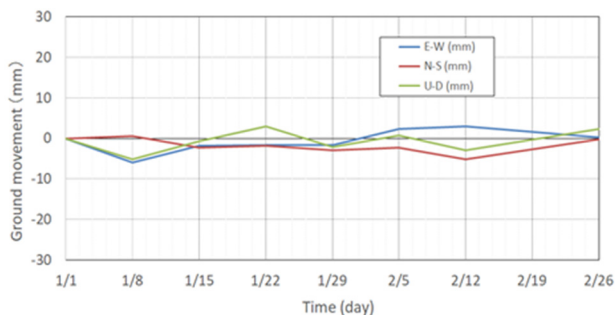


Figure 9: The relative position difference between Iwate daitou and S Motoyoshi by baseline analysis.

Table 3: The Maximum Deformation Between CORS by Baseline Analysis

(2019.1.1~2019.2.26)

CORS (Continuously Operating Reference Station)	E-W (mm)	N-S (mm)	U-D (mm)
Iwate daitou ⇔ Esashi	9.6	4.8	20.8
Iwate daitou ⇔ Sumita A	2.9	4.7	12.0
Iwate daitou ⇔ Mizusawa A	4.5	3.5	16.8
Iwate daitou ⇔ Kesenuma	2.9	3.5	19.3
Iwate daitou ⇔ Iwate Kawasaki A	2.4	3.1	6.5
Iwate daitou ⇔ S Motoyoshi	3.0	5.1	5.1

ILC ではゆっくりした変動に対してはフィードバックをかけてビーム軌道を補正する技術もあり、これは問題ないレベルの地盤変動であると言える。

4. まとめ

ILC 候補サイト周辺の電子基準点の最近の変動状況を調べた。地盤は地球潮汐によって変動しており、PPP解析により地球潮汐も含めた変動を求め、それがコヒーレントな変動であることを示した。

地球潮汐の影響を補正することにより、誤差を含めてもE-W,N-S方向に10mm以内、U-D方向に20mm以内の変動であり、地盤は安定的であることが明らかになった。

基線解析による相対変位の解析では、GNSSの誤差を含め、E-W,N-S方向に概ね5mm以内、U-D方向に20mm以内との結果が得られた。この結果は国土地理院の示す「日々の座標値(F3解)」と同等のオーダーであることを確認した。この地盤変動はゆっくりした動きであり、ILCではビーム軌道にフィードバックをかけることができるので、問題がないレベルの変動と言える。

今回の検討は、地表に設置された電子基準点で得られたデータから検討している。ILC施設の土被りは約20m~600mとされており、地下の岩盤の変動は地表とは異なることが考えられ、それは参考文献[3]で検討されているが、今後さらに詳細な検討を要する。

参考文献

- [1] 土木学会岩盤力学委員会・トンネル工学委員会リニアコライダー土木技術研究小委員会:加速器建設の土木技術に関する調査研究報告書、2008.
- [2] 横山幸也・小川浩司・船戸明雄・佐貫智行: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、2015.
- [3] 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.
- [4] 精密測位の理論及び解析手法;
<http://gpspp.sakura.ne.jp/theory.htm>
- [5] 宮川康平:GEONET-GNSS時代の幕開けー、国土地理院、2013;
<https://www.gsi.go.jp/common/000078222.pdf>
- [6] 久保信明:第5章GPSによる測定値と誤差要因、測位航法学会チュートリアルセッション、2010;
<http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/jp/assets/files/pdf/content/201004.pdf>
- [7] http://terras.gsi.go.jp/version_data.php