

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, 若竹亮  
Ichiro Sekine, Ryo Wakatake  
(Toda Corporation)

吉岡正和, 佐貫智行  
Tomoyuki Sanuki, Masakazu Yoshioka  
(Tohoku University)

## 【研究の目的】

- ・環太平洋造山帯に位置する日本で計画するILCに対する地震の影響検討は重要
- ・北上山地南部は、東日本太平洋沖地震震源方向に1年間で約6cm移動している。
- ・一様に移動していれば全く問題ないが、完全には一様ではなく、ひずみがあるはず
- ・地殻変動による加速器施設への影響を検討する。



図-1 GNSSによる地殻変動観測結果 (2020.2 ~ 2021.2の1年間、国土地理院)

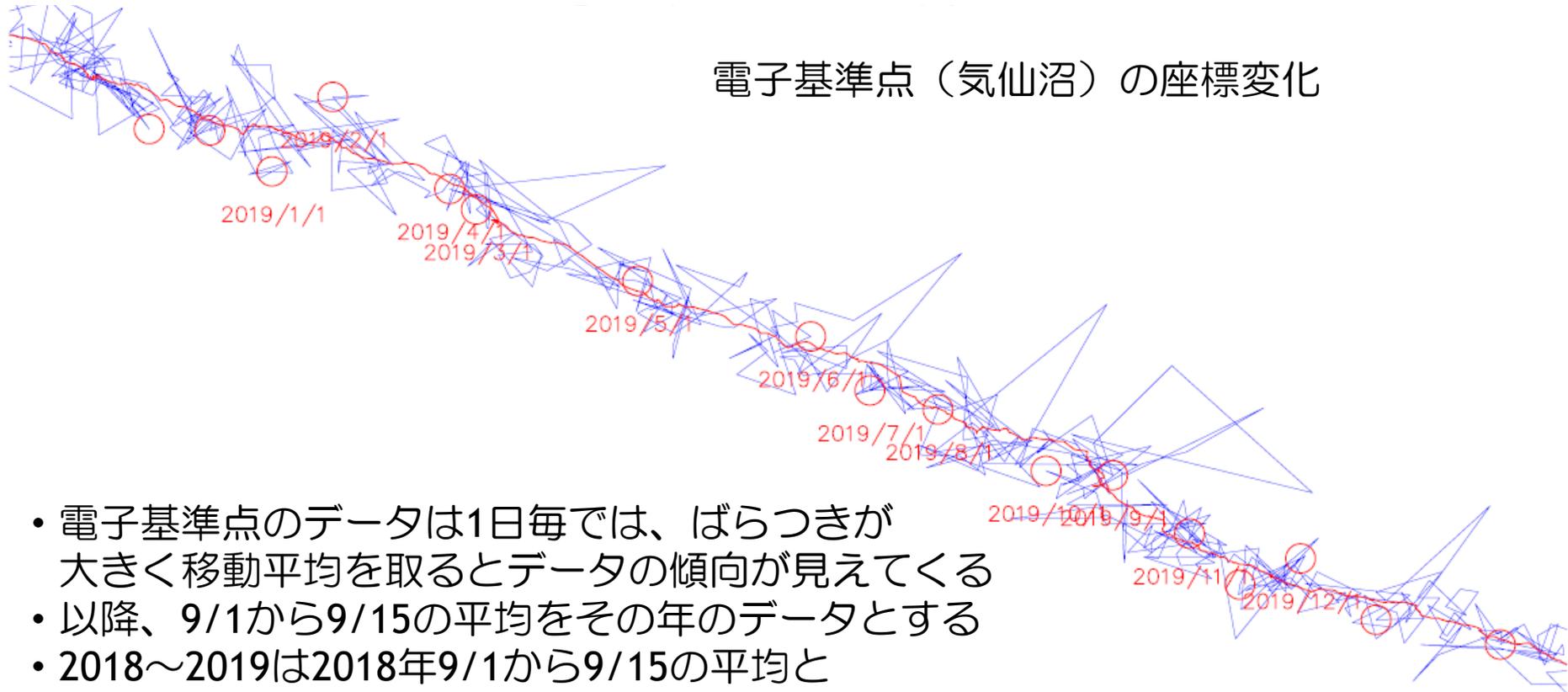
## ・ILC候補地周辺の国土地理院GNSS電子基準点



- ・ILC候補地周辺には多数の国土地理院のGNSS電子基準点がある。
- ・周辺13観測点のデータを使って東北地方太平洋沖地震後の地殻変動がILC施設に与える影響を把握する。

# ・GNSS電子基準点(国土地理院)のデータとは・・・

電子基準点(気仙沼)の座標変化



- 電子基準点のデータは1日毎では、ばらつきが大きく移動平均を取るとデータの傾向が見えてくる
- 以降、9/1から9/15の平均をその年のデータとする
- 2018～2019は2018年9/1から9/15の平均と2019年9/1から9/15の平均の差を表す



10 mm

電子基準点の座標の軌跡(1点/日)

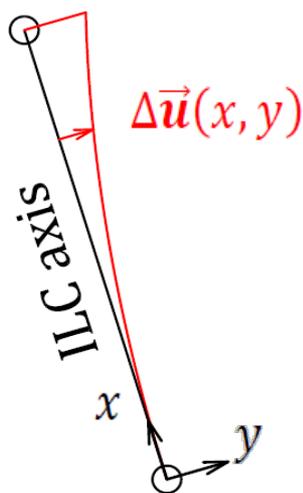
上記の30日移動平均

## 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軸はそれぞれ下図のようにILC施設の軸方向と軸直交方向とする。



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。

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

ただし、 $C_{x1} \sim C_{x6}$ 、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

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

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

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  $\Delta u_x$  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  $\Delta u_y$  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  $\Delta \bar{u}$  は以下のようなになる。

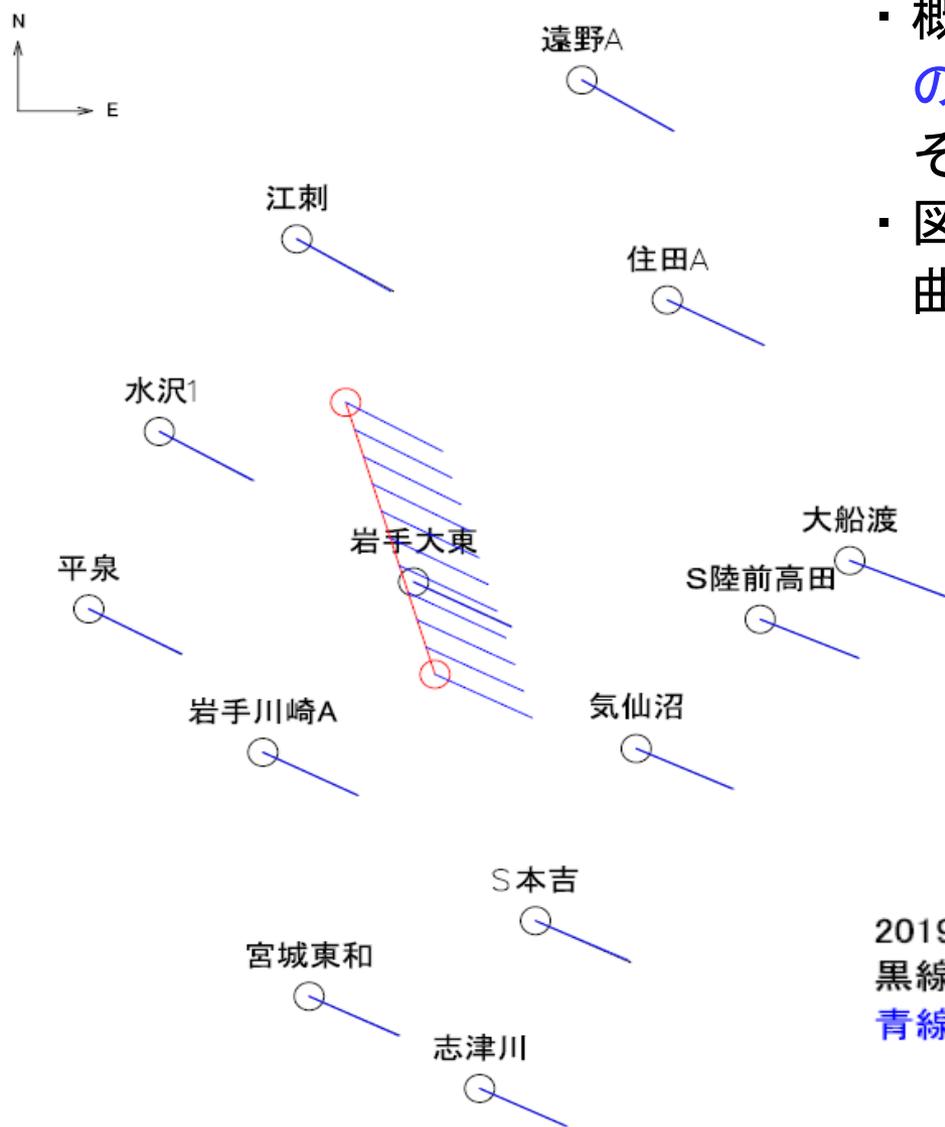
$$\Delta \bar{u}(x, 0) = \begin{bmatrix} C_{x2} & C_{x4} \\ 0 & C_{y4} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

すなわち軸方向の伸縮、及び軸線の曲がり は以下のようなになる。

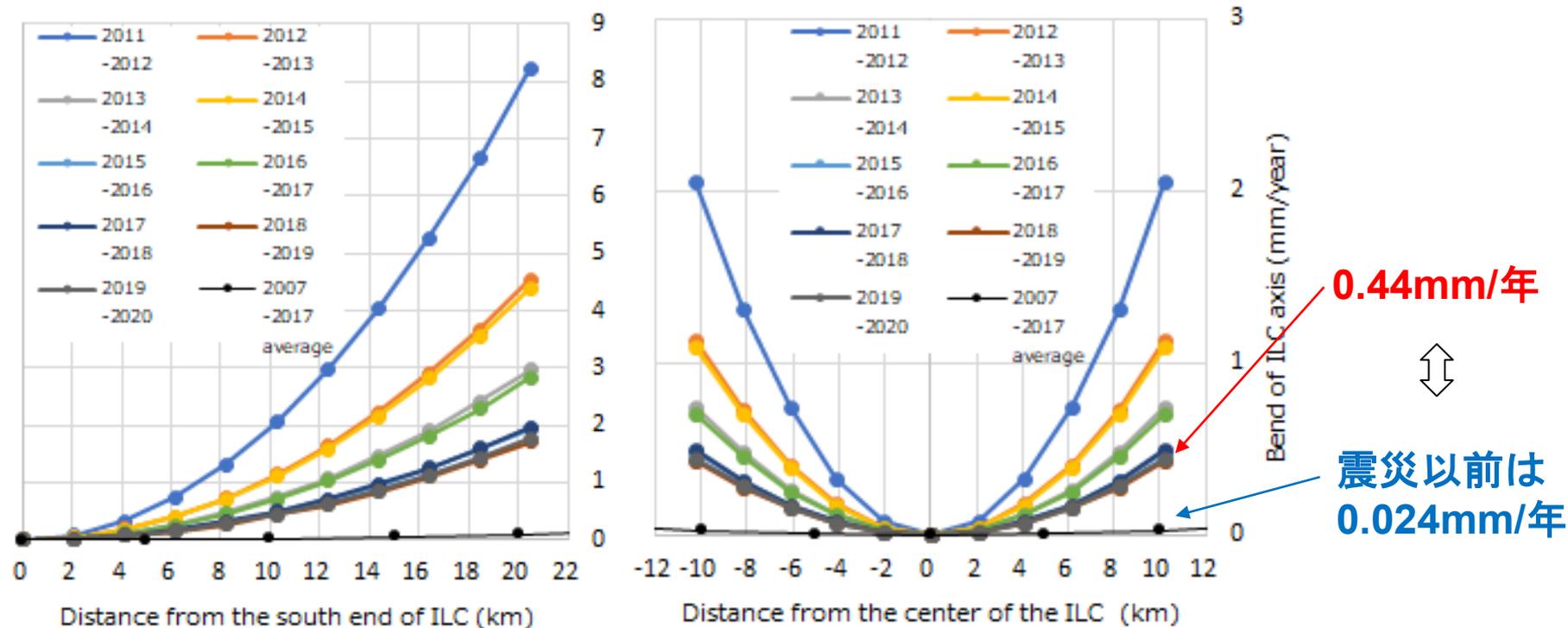
$$\Delta u_x(x, 0) = C_{x2}x + C_{x4}x^2 \quad (5)$$

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

## 2.3 地盤変動の計算結果



- ・ ILC候補地周辺は約6cm/年移動
- ・ 概ね一体となった動きだがILC軸線の曲がり、軸線のひずみがありそれを計算で検出
- ・ 図では読み取れないが、わずかな曲がり、ひずみがある



0.44mm/年

⇕

震災以前は  
0.024mm/年

a) ILCの南端を原点として表示      b) ILCの中間点を原点として表示

・この結果は、東日本太平洋沖地震以前(土木学会小委員会)に比べると、約18倍と大きい。

## ■ 加速器施設への影響は？

- ・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 $\mu$ 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。Fig. 6の結果からずれは10 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\mu$ 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小さいと考えられる。

## 2.4 軸方向のひずみの検討

軸方向のひずみ $\varepsilon(x, 0)$ は以下のように示すことができる。

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

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 $\varepsilon(0, 0)$ 、及び北端部の軸方向ひずみ $\varepsilon(L, 0)$ は以下のようなになる。

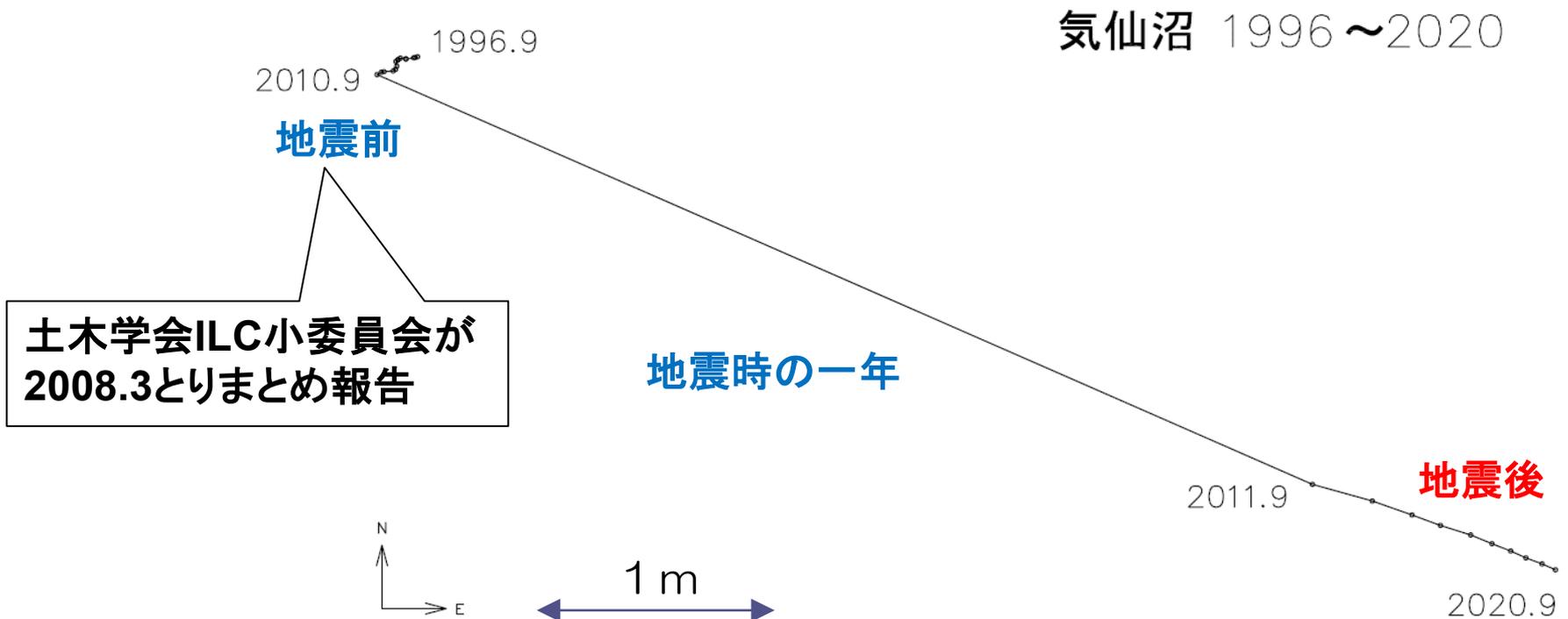
$$\varepsilon(0, 0) = -1.77\text{E-}07 \quad (8)$$

$$\varepsilon(L, 0) = -1.66\text{E-}07 \quad (9)$$

- ・南端部で**圧縮ひずみが最大値1.77E-07**
- ・**変形量としてILC南北端間で圧縮に3.5mm**
- ・**加速器側の調整でカバーできる範囲**

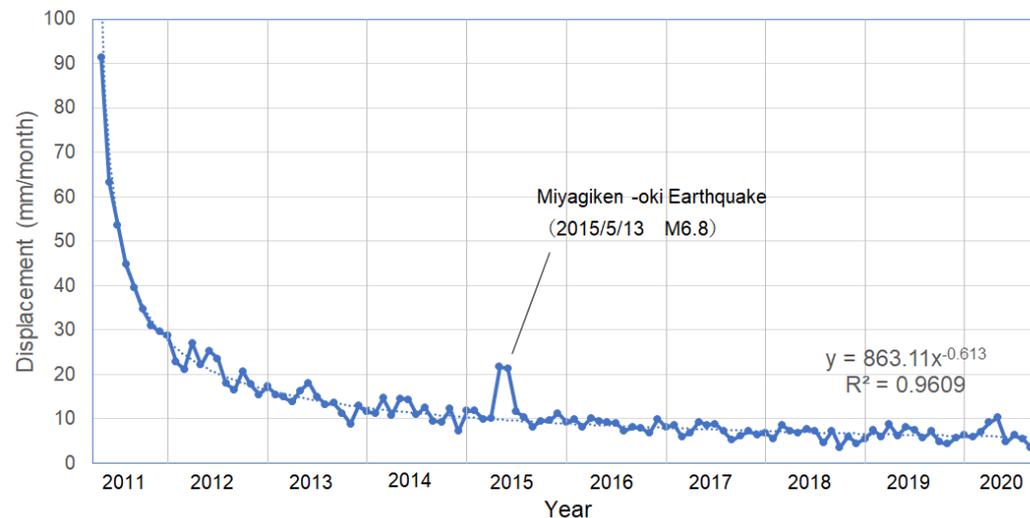
### 3. 変位量の推移と予測

- 東北地方太平洋沖地震前の変位に比較して地震後の変位は大きい。

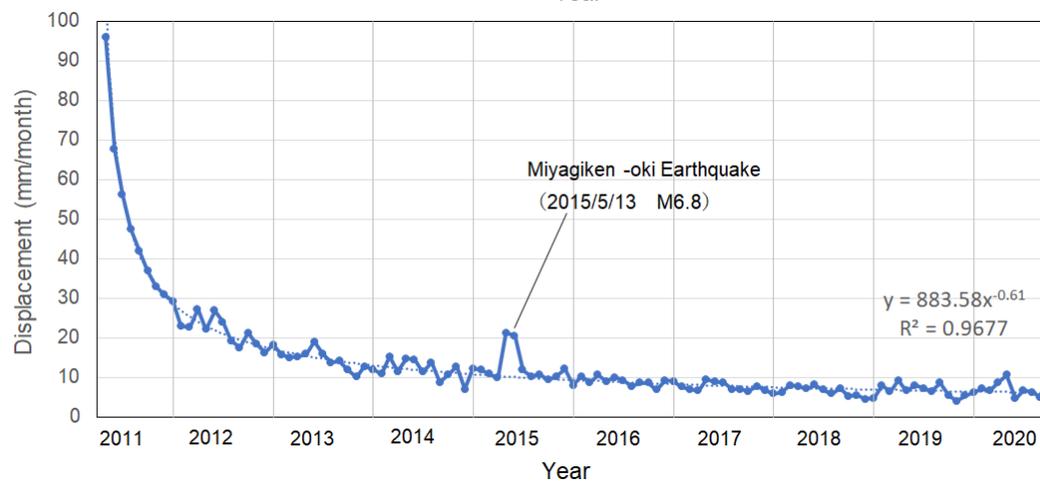


気仙沼電子基準点の長期変動

# 月間変位量



気仙沼



岩手大東

- ・ 累乗近似によって良く再現可能
- ・ この傾向が今後も続くと仮定すると、変位量は2020年9月時点に対して10年で概ね5%程度減少、20年後の2040年で10%の減少

## 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。

① ILC計画線上での軸線の曲がり、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 $300\mu\text{m}$ 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 $10\mu\text{m}/\text{年}$ 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。

② ILC施設予定地の軸方向のひずみは圧縮で $1.77\text{E}-07$ 、南端と北端の間の軸方向の変位量は $3.5\text{mm}/\text{年}$ 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年後でも現在の變位量が約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。

ご清聴ありがとうございました