

1. 地震・震災の概要

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分に三陸沖の深さ約 25km でマグニチュード（モーメントマグニチュード*）9.0 の平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震は、その発生機構が西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震である。地震の震源域は、岩手県沖から茨城県沖までに及んでおり、その長さは約 400km 以上、幅は約 200km で、最大の滑り量は 20m 以上であったと推定されている。

今回の本震の規模はこれまでに日本国内で観測された最大の地震であり、この地震により宮城県栗原市で最大震度 7 が観測された。また、高い津波が北海道地方、東北地方、関東地方の太平洋沿岸で観測された。具体的には、宮古では 8.5m 以上、大船渡で 8.0m 以上、石巻市鮎川で 7.6m 以上、相馬で 7.7m 以上といったものである。このほか、岩手県宮古市小堀内漁港では 30m 以上の遡上なども確認されている。

6 月 10 日現在、最大の余震は 3 月 11 日 15 時 15 分に発生した M7.7 の地震で、M6.0 以上の余震が 80 回以上発生している。また、4 月 7 日には、M7.1 の地震が発生し、宮城県で震度 6 強が観測された。余震域は南北約 500km にわたっている。

本震の発生に伴って東北地方から関東地方の広い範囲で地殻変動が観測されており、宮城県牡鹿では東南東方向に約 5.3m の水平移動、約 1.2m の沈降が観測されている。また、地震発生後には、地震後に観測される地殻変動である余効変動と考えられる東向き地殻変動が観測されており、5 月上旬の時点で岩手県山田で水平方向約 40cm、上下方向 8cm（沈降）などの地殻変動が観測されている。

平成 23 年 6 月 10 日時点で判明している東北地方太平洋沖地震の状況は、以下のとおりまとめられる。

・ 本震

発生日：平成 23 年 3 月 11 日

発生時刻：14 時 46 分 18.1 秒

震央：三陸沖（北緯 38 度 6 分 12 秒・東経 142 度 51 分 36 秒）

震源の深さ：24km

規模：9.0（モーメントマグニチュード(M_w))

最大震度：震度 7（宮城県栗原市）

地震の種類：海溝型地震・逆断層型

・ 余震

回数：震度 4 以上 170 回、M5 以上 502 回（うち M6 以上 82 回）

最大余震：平成 23 年 3 月 11 日 15 時 15 分 34.4 秒 M7.7

* 地震の規模を表す指標であるマグニチュードには、国際的に統一されたものはないが、最も標準的なものと考えられているのはモーメントマグニチュードである。これは、断層の面積と断層滑り量の積に比例する量であり、物理的な意味が明確であるという点で他のマグニチュードにはない利点があるものの、地震波全体を使った複雑な計算が必要になる。わが国では、気象庁マグニチュードが標準的なマグニチュードとして利用されている。これは、比較的大きな地震では地面の動き（変位）の最大値を用いた変位マグニチュード式、小規模の地震では地面が動く速度（速度）を用いた速度マグニチュード式で計算されていたものであるが、平成 15 年からは、変位マグニチュードと整合性があり、なおかつ深い地震に対しても適用可能な速度マグニチュード式で計算されるマグニチュードが採用されている。

- 被害

(日本国内) 死者 15,405 人, 行方不明者 8,095 人, 負傷者 5,365 人

(日本国外) 死者 2 人, 行方不明者 5 人

(余震・被害は 6 月 10 日時点)

(出典)

- 第 27 回原子力安全委員会資料第 1 号 :

<http://www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2011/genan027/siryo1.pdf>

- Wikipedia:

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9D%B1%E5%8C%97%E5%9C%B0%E6%96%B9%E5%A4%AA%E5%B9%B3%E6%B4%8B%E6%B2%96%E5%9C%B0%E9%9C%87>

2. 東北地方太平洋沖地震

(1) 地震の規模

平成 23 年 3 月 13 日、気象庁は、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震について、詳細に解析した結果として、地震の規模（モーメントマグニチュード）を 9.0 とすると発表した。これは、外国の地震観測データを用いて本震による震源域の破壊の進行の様子（破壊過程）を調べた結果、通常より複雑なかたちで 3 つの巨大な破壊が連続して発生していることがわかったからである。今回のような複雑なかたちで破壊した地震は極めてまれで、1 つめの巨大な破壊に相当する波形とは異なる通常見られない特殊な地震波形が認められ、再調査したところ、これが 2 つめ、3 つめの巨大な破壊に相当することが判明したとしている。

3 月 11 日の本震後も非常に多くの余震が生じており、上記のように、6 月 10 日現在、M5 以上の余震が 502 回発生している。図- 1 は、3 月 11 日 12 時 00 分～6 月 8 日 08 時 00 分間に深さ 90km 以浅で発生した、震度 4 以上の 1 日当たりの余震の回数の推移を示している。

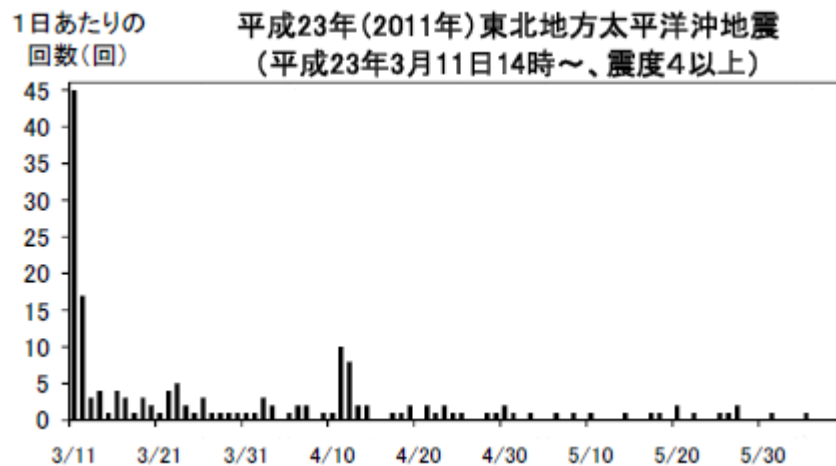


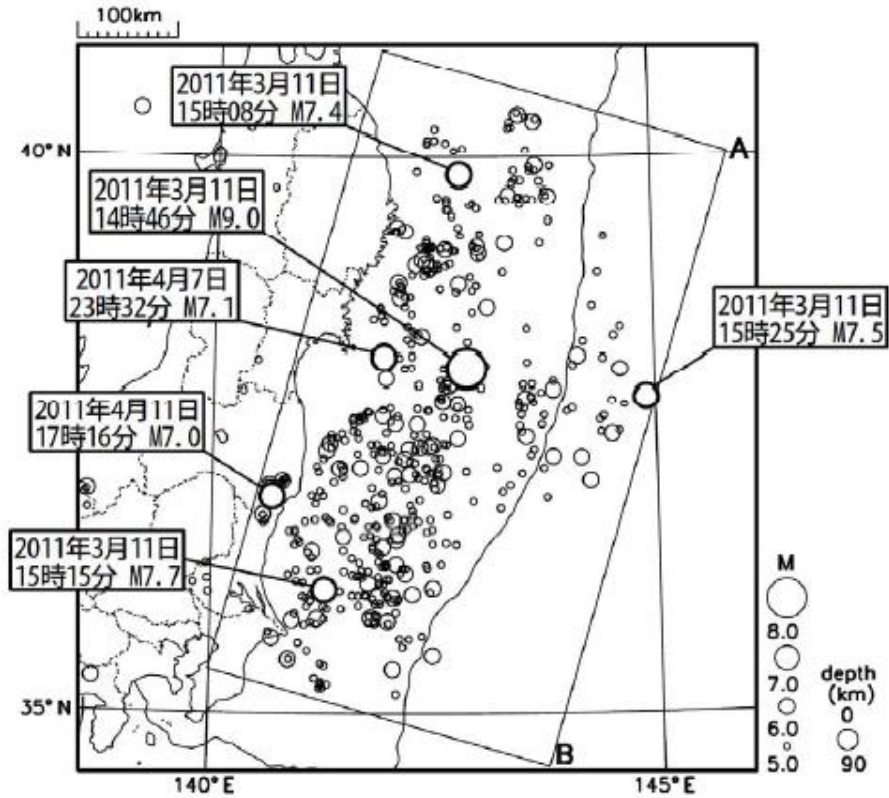
図 1 東北地方太平洋沖地震の余震回数の推移

(出典)

気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/press/1106/08b/kaisetsu201106081030.pdf>

(2) 震央分布

図- 2 には、余震も含め、東北地方太平洋沖地震の震央分布を示している（3 月 11 日 12 時 00 分～6 月 8 日 08 時 00 分間に深さ 90km 以浅で発生した、マグニチュード 5.0 以上の地震）。



丸の大きさはマグニチュードの大きさを表す。
M7.0以上の地震に吹き出しをつけている。

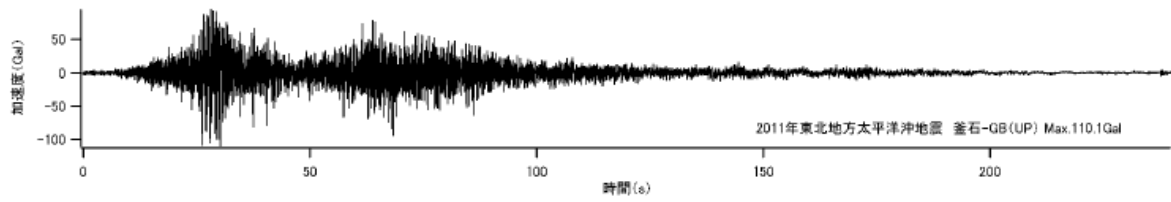
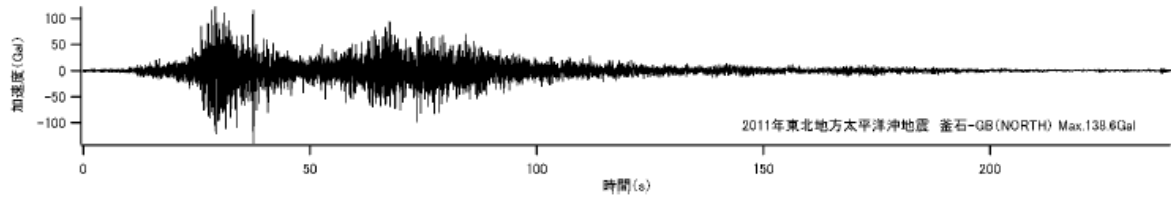
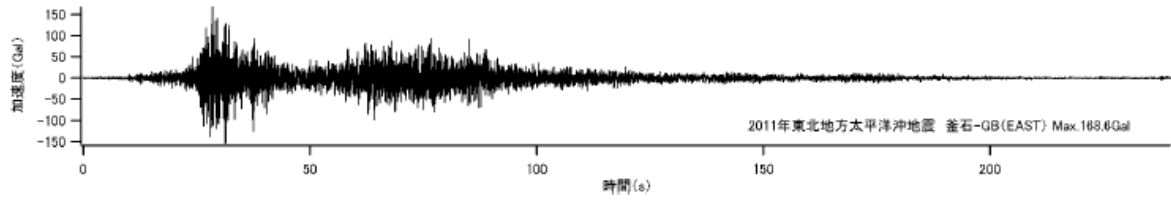
図 2 東北地方太平洋沖地震の震央分布

(出典)

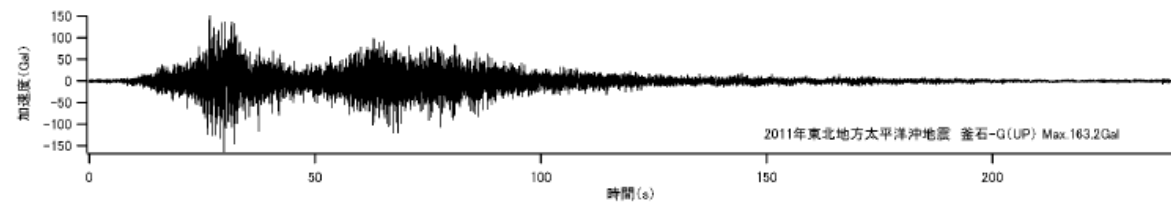
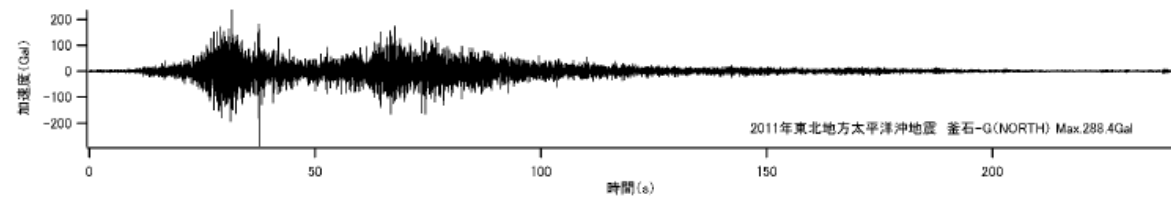
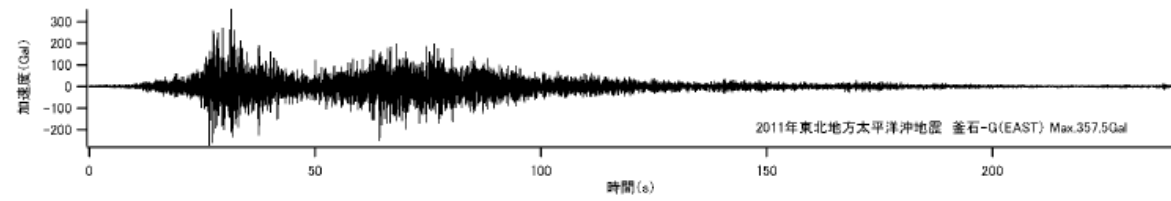
気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/press/1106/08b/kaisetsu201106081030.pdf>

(3) 港湾において観測された地震波形

東北地方太平洋沖地震では、港湾地域強震観測網により全国 30 の港湾で 70 の強震記録が得られている。いずれも、継続時間が非常に長いこと、釜石港から仙台塩釜港では波形が二山からなり、途中で一旦揺れが停止しているようにみえることが特徴である。二山については、震源より陸側の断層の破壊による地震波が到来したのち、少し間をおいて沖側の大きな滑りによる地震波が到来したものと推定されている。得られた強震記録のうち、岩手県釜石港と福島県小名浜港におけるものを図-3、図-4 に示す。

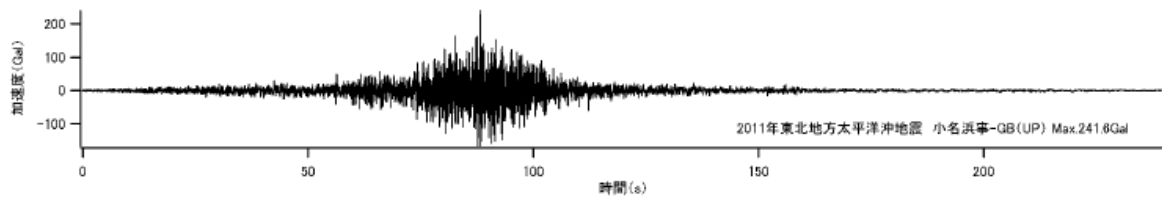
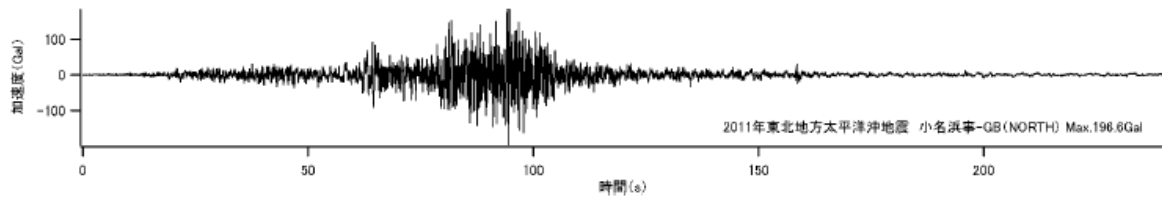
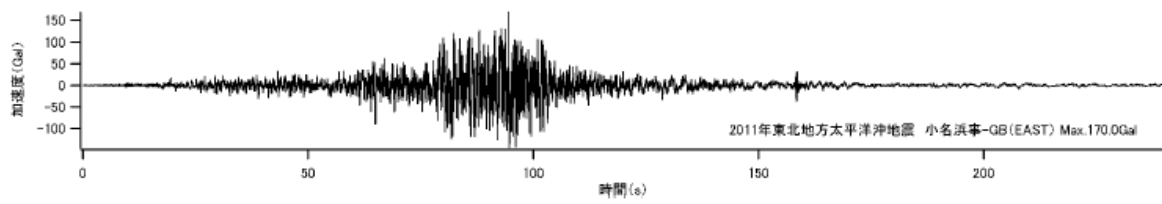


a) 地中

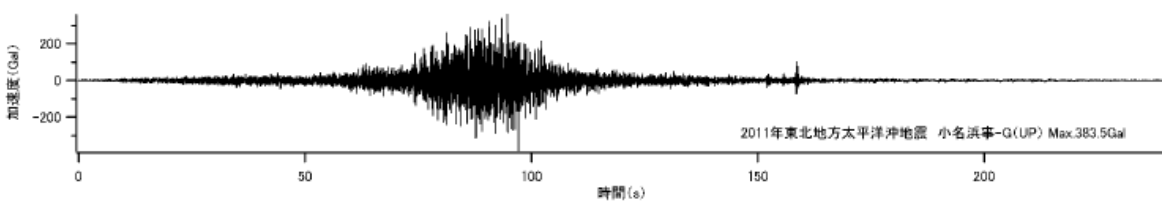
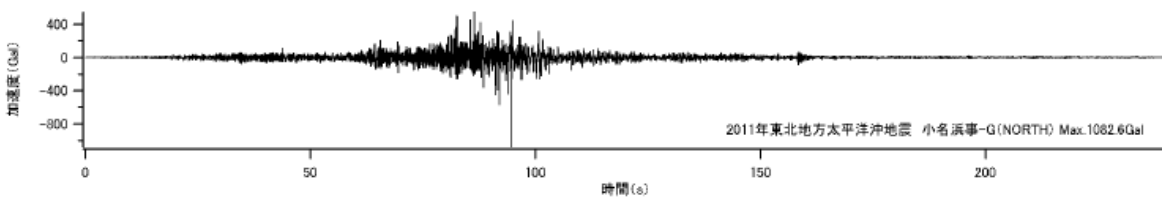
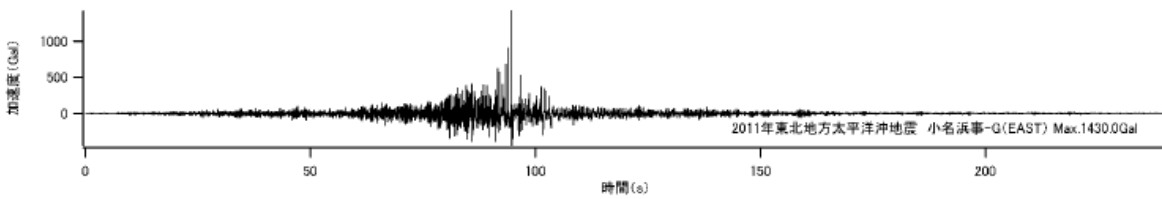


b) 地表

図 3 釜石港で観測された加速度波形



a) 地中



b) 地表

図 4 小名浜港で観測された加速度波形

(出典)

港湾空港技術研究所： <http://www.pari.go.jp/files/3642/1049951767.pdf>

¥Scopentsv01¥e¥SCOPE 共通¥【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】 ¥2304 港空研資料 1231
 「2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」 ¥「2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」 ①.pdf

(4) 震度分布

東北地方太平洋沖地震の震度分布は図- 5 のとおりである。最大震度は、上記のように、宮城県栗原市で観測された震度7である。

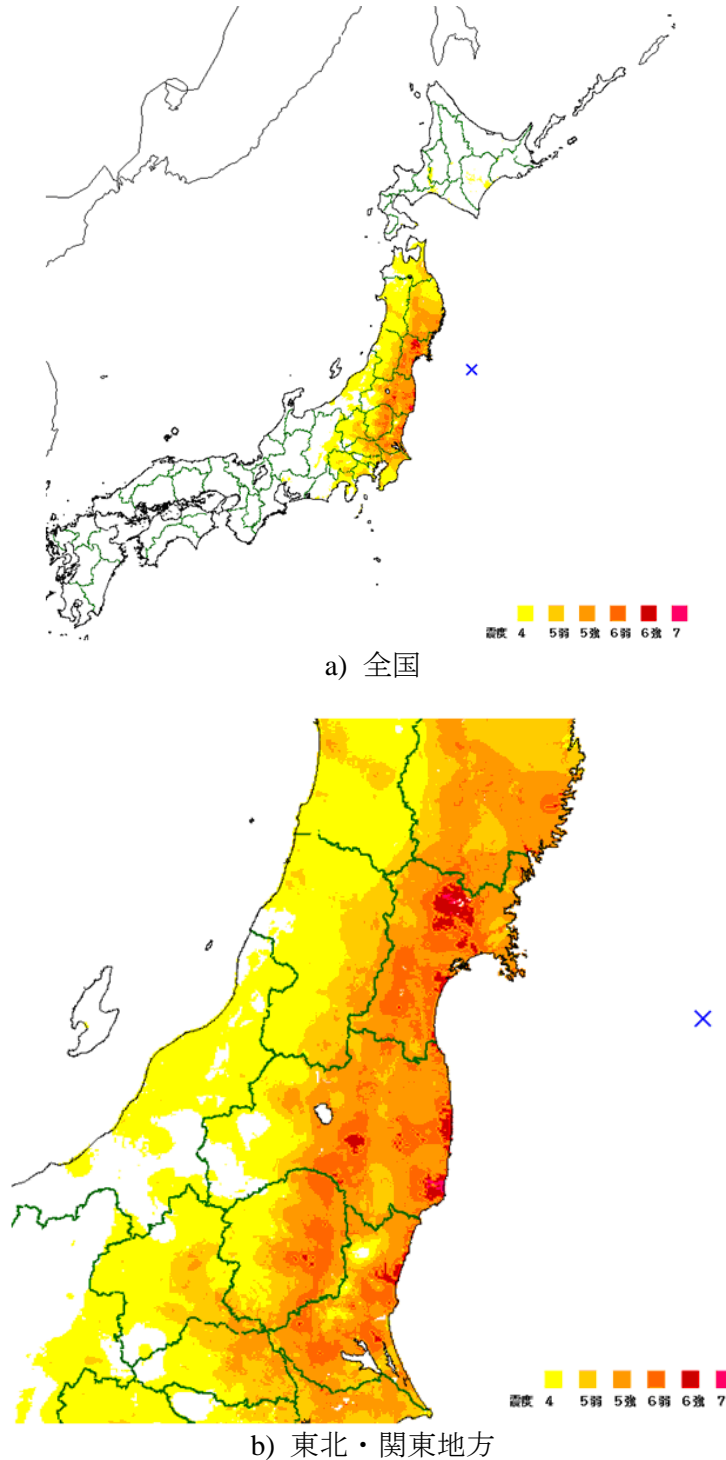


図 5 東北地方太平洋沖地震の震度分布

(出典)

気象庁：http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/suikai/201103111446_288/201103111446_288_1.html

(5) 揺れの状況

東北地方太平洋沖地震の規模はマグニチュード 9.0 と非常に大きく、巨大な断層がずれ動く時間も長かったと考えられ、各地で地震の揺れは長く続いた。本震発生時の震度計の観測データから震度 5 強以上を観測した気象庁の観測点のうち、以下の地点での本震の揺れの時間は表-1 のとおりである。

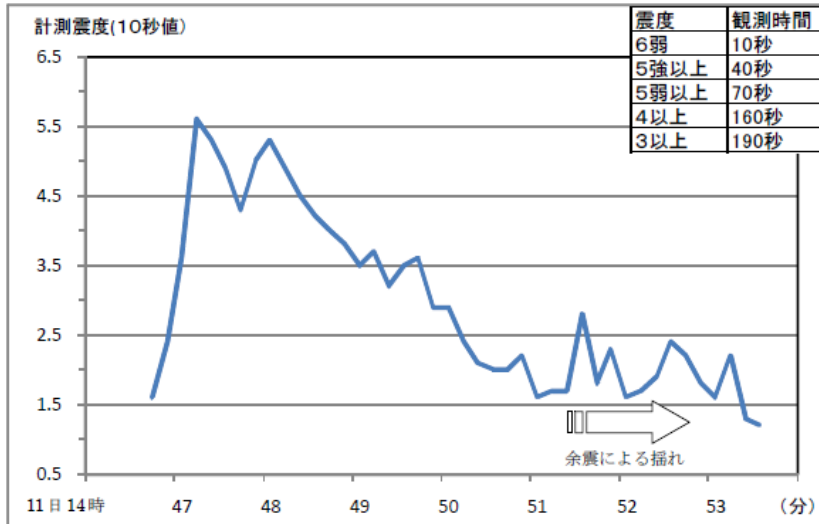
表 1 本震の揺れの時間

調査した地点	震度	震度 4 以上を観測した時間
五戸町古館	5 強	約 180 秒
盛岡市山王町(盛岡地方気象台)	5 強	約 160 秒
大船渡市大船渡町(大船渡特別地域気象観測所)	6 弱	約 160 秒
石巻市泉町(石巻特別地域気象観測所)	6 弱	約 160 秒
仙台宮城野区五輪(仙台管区気象台)	6 弱	約 170 秒
福島市松木町(福島地方気象台)	5 強	約 150 秒
白河市郭内(白河特別地域気象観測所)	5 強	約 140 秒
いわき市小名浜(小名浜特別地域気象観測所)	6 弱	約 190 秒
水戸市金町(水戸地方気象台)	6 弱	約 130 秒
宇都宮市明保野町(宇都宮地方気象台)	5 強	約 120 秒
久喜市下早見	5 強	約 120 秒
千葉市中央区中央港(千葉特別地域気象観測所)	5 強	約 130 秒
東京千代田区大手町(気象庁)	5 強	約 130 秒
横浜中区山手町(横浜地方気象台)	5 強	約 130 秒

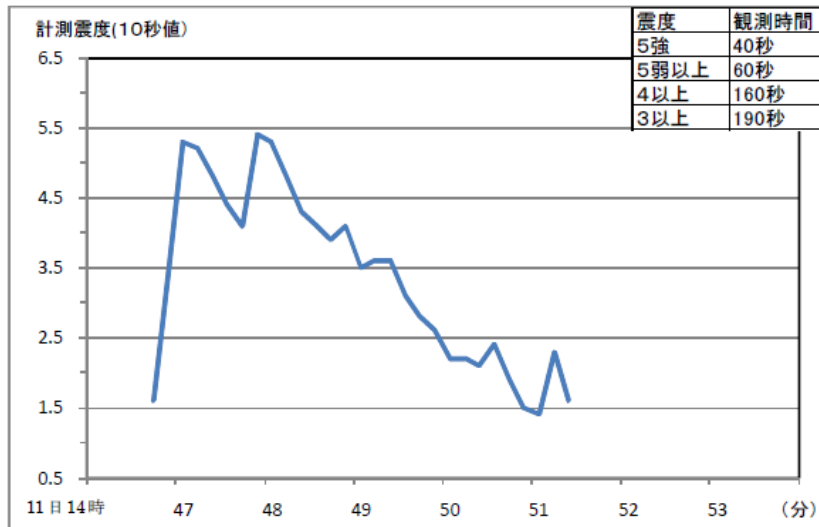
具体的な揺れの状況については、図-6 に示す。

(出典)

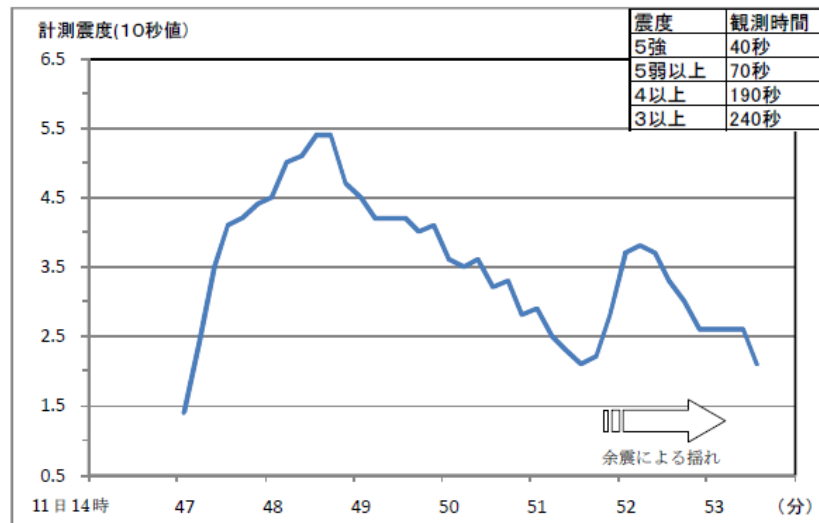
気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/25a/kaisetsu201103251030.pdf>



a) 大船渡市大船渡町 (大船渡特別地域気象観測所)



b) 石巻市泉町 (石巻特別地域気象観測所)

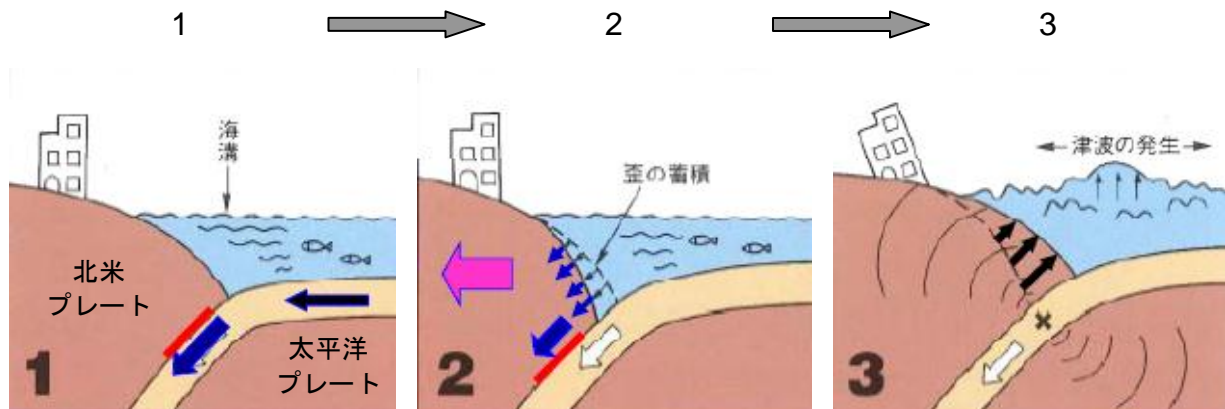


c) いわき市小名浜 (小名浜特別地域気象観測所)

図 6 東北地方太平洋沖地震の揺れの状況

(6) 地震のメカニズム

今回の地震は、日本海溝から沈み込む太平洋プレートと東北地方が乗っている北米プレートとの間で起きたプレート境界型（海溝型）であり、日本海溝寄りのプレート境界で大きな滑りが生じ、沿岸寄りの領域も連動して破壊した巨大地震である。海溝型地震発生メカニズムは図-7に示すとおりである。



太平洋プレートが東から東北地方の乗る北米プレートの下に沈み込んでいる

北米プレートが西向きに引きずり込まれ東北地方は西向きに押される

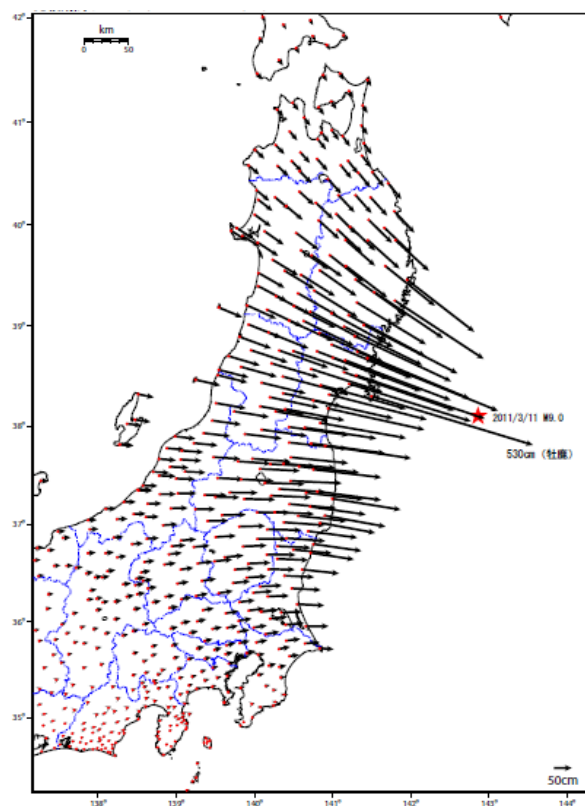
固着していたプレート境界面がはがれて北米プレートが東にのし上がる

図 7 海溝型地震発生メカニズム

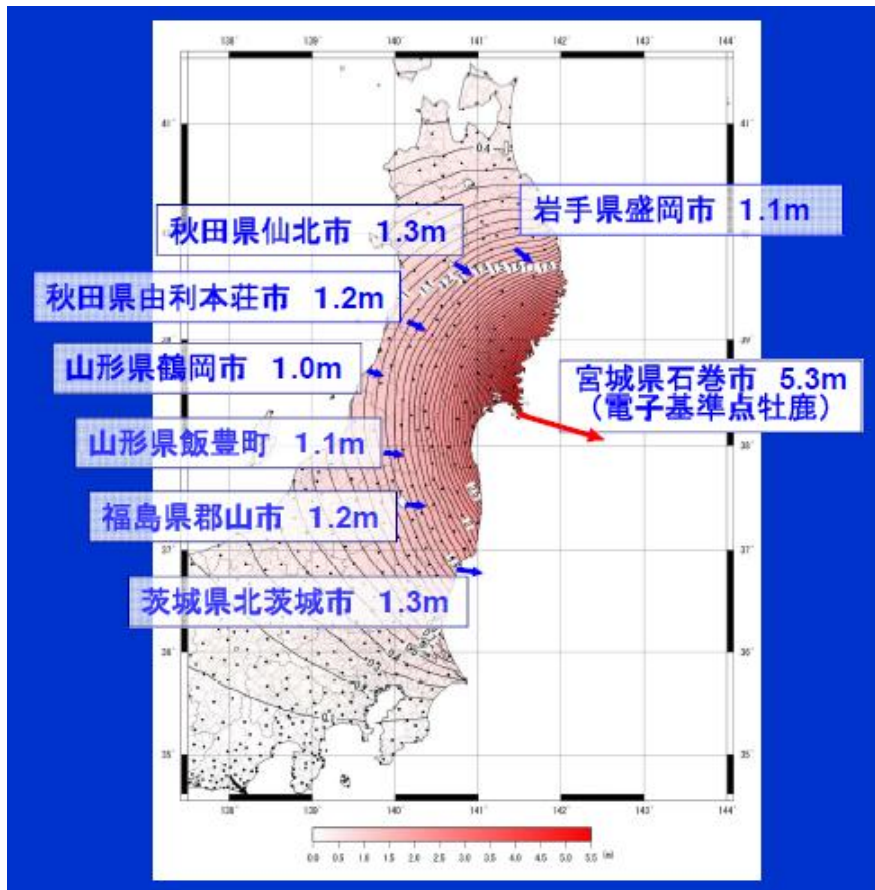
3. 地震による地殻変動の状況

(1) 本震

国土地理院では、GPS の連続観測を行う電子基準点を全国 1,240 箇所に約 20km の間隔で設置して測量の基準点として活用するとともに、全国の地殻変動を監視している。これによれば、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、最大で水平方向に約 5.3m、上下方向に約 1.2m という極めて大きな地殻変動が北海道から近畿地方にかけて広い範囲で観測された。最大変位は、電子基準点「牡鹿」(宮城県石巻市)で観測され、東南東方向へ約 5.3m 動き、約 1.2m 沈下した。図- 8、図- 9 は、それぞれ水平方向ならびに上下方向の地殻変動の状況を示したものである。これは、島根県にある電子基準点「三隅」が地震前後で動いていないと仮定して計算されたものである。

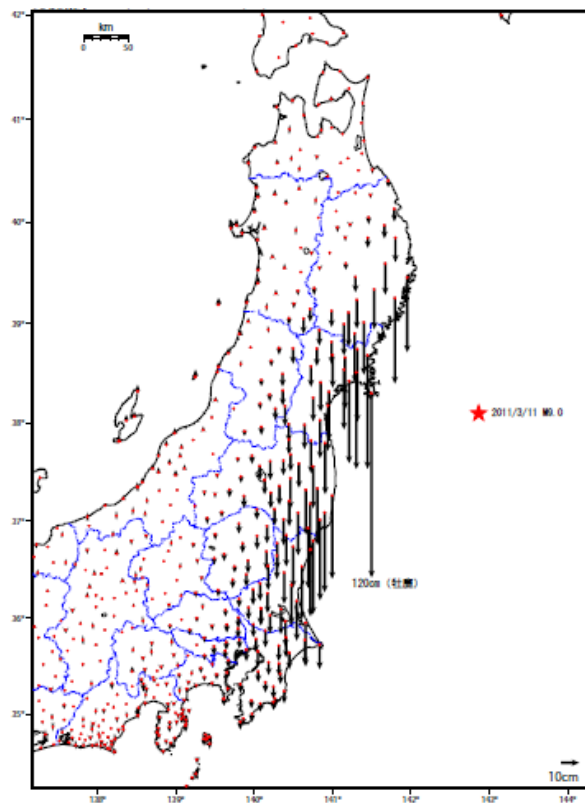


a) ベクトル図

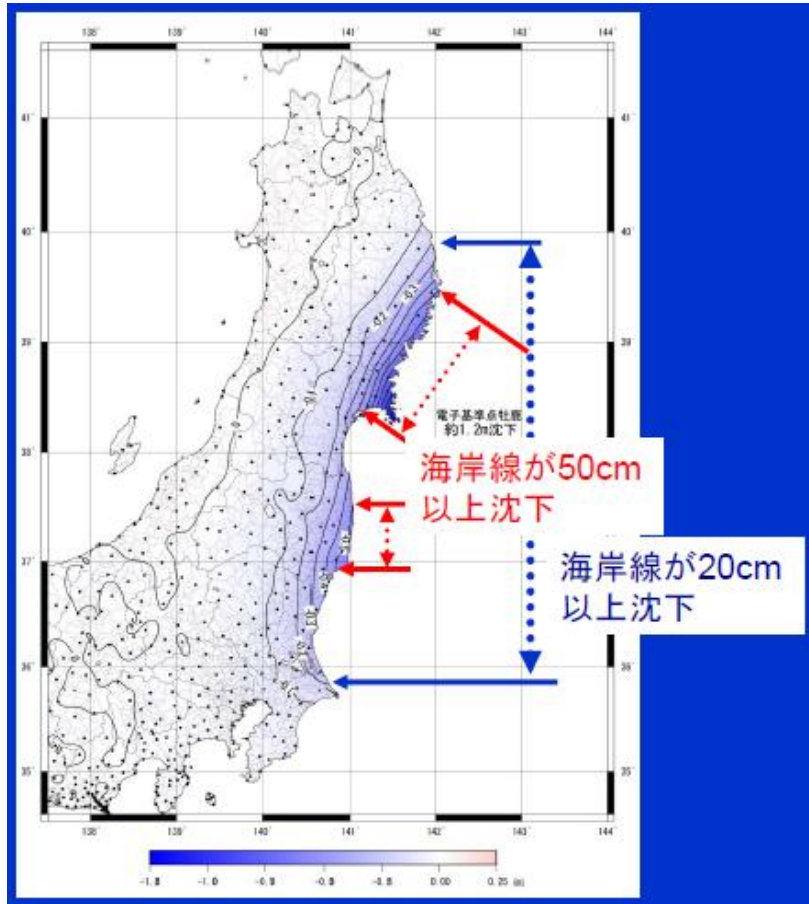


b) コンタ図

図 8 地震による地殻変動（水平方向）



a) ベクトル図



b) コンタ図

図 9 地震による地殻変動（上下方向）

（出典）

国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>

国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/common/000061101.pdf>

【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】 ¥230603 国土地理院報告会
 ー東日本大震災と地理空間情報ー ¥地震による地殻変動.pdf

(2) 本震後

3月11日の本震後も、本震時の変動に比べるとわずかではあるが、緩やかな地殻変動が続いている。これは、本震の断層周辺でゆっくりとした断層すべりが継続しているためである。このような地震後に地殻変動が継続する現象は、大規模な地震の後によく見られ、余震に伴う変動に加え、地震の震源域あるいはその周辺で発生する断層面の滑り（余効滑り）が原因の一つとして考えられている。

本震発生後2ヶ月間での水平方向における余効変動の状況を図-10に示す。本震と同様に、東北・関東周辺の広い範囲で南東～東南東～東方向の変動がみられ、沿岸の広い範囲で30cm～40cmの大きさとなっている。また、福島・茨城県境で平成23年4月11日に発生した地震に伴う地殻変動も見られる。

同様に、上下方向の予効変動状況を図-11に示す。岩手県沿岸では沈降がみられ、宮城県

沿岸山田で- 8cm となっている。宮城県沿岸では隆起がみられ、牡鹿半島周辺の矢本で+5cm, M 牡鹿で+7cm となっている。このほか、福島・茨城県境付近での地震の影響により、銚子周辺は隆起がみられる。

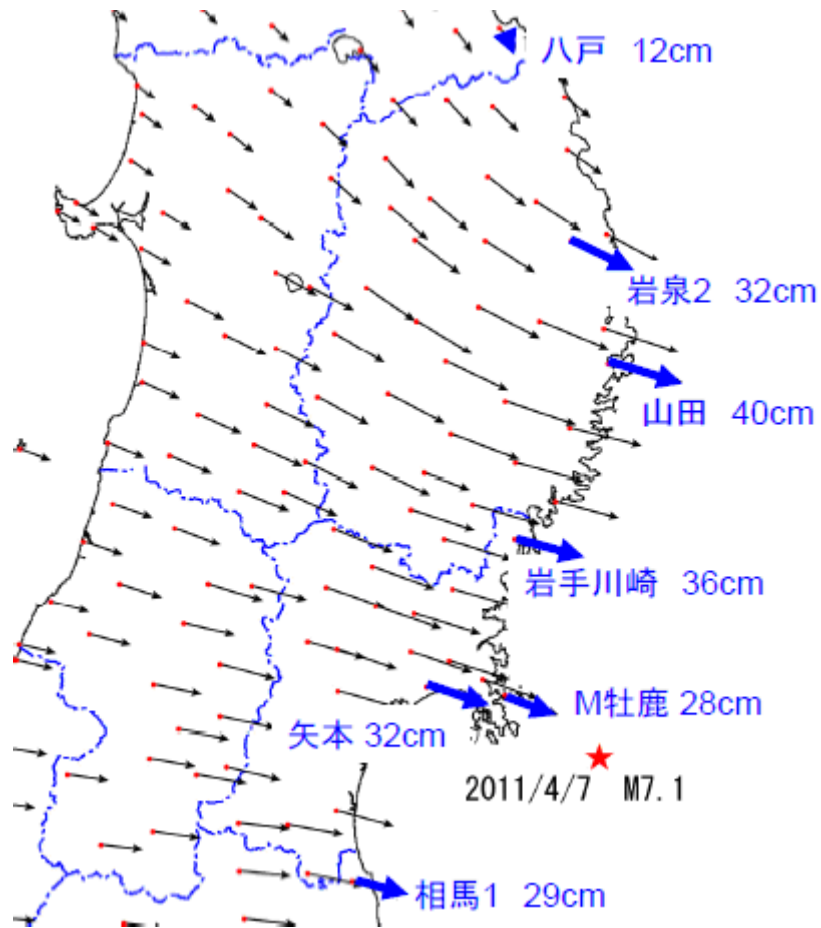


図 10 余効変動 (5月 6-7 日まで・水平方向)

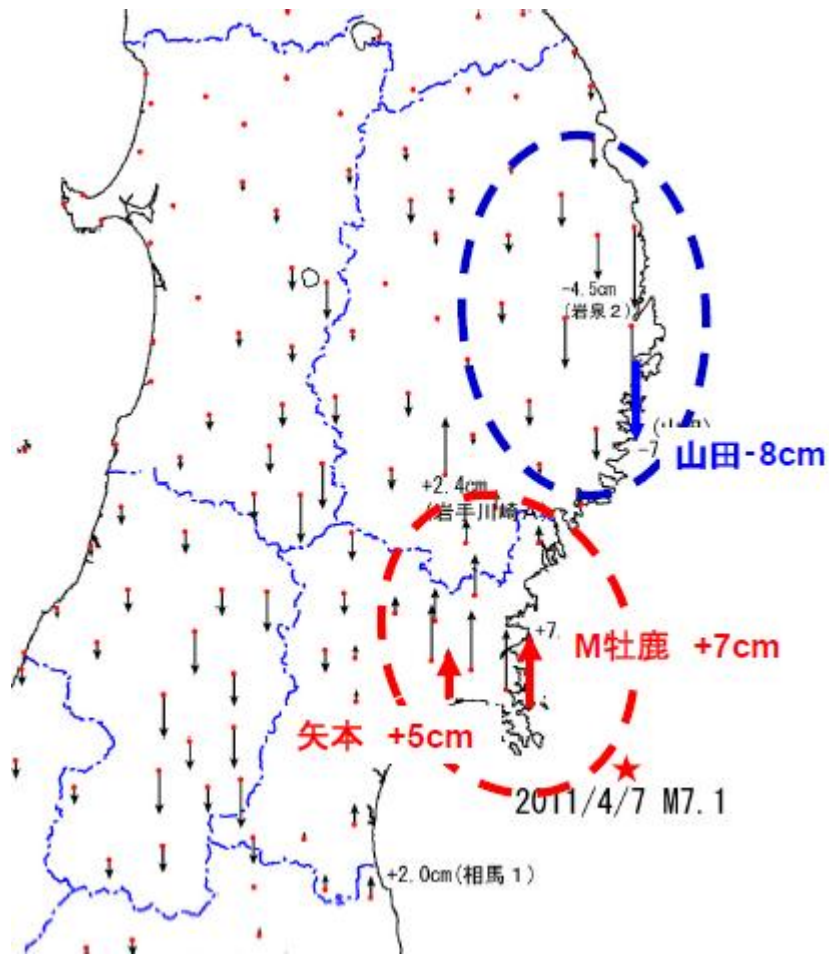


図 11 余効変動 (5月6-7日まで・上下方向)

(出典)

国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/common/000061101.pdf>

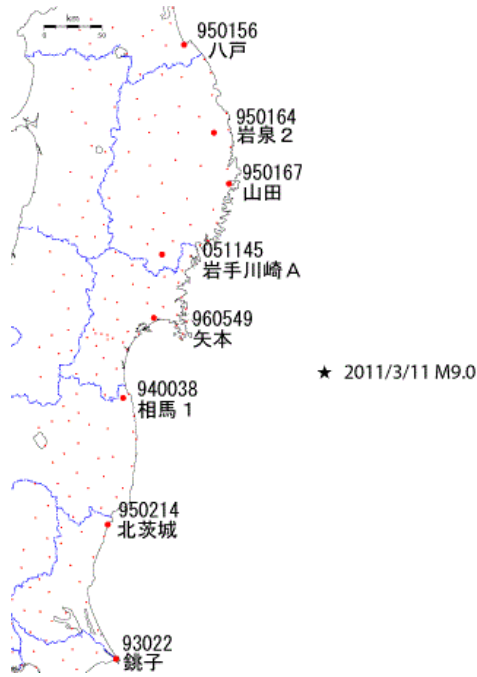
Scopentsv01eSCOPE 共通【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】¥230603 国土地理院報告会
 ー東日本大震災と地理空間情報ー地震による地殻変動.pdf

(3) 地殻変動の時間的变化

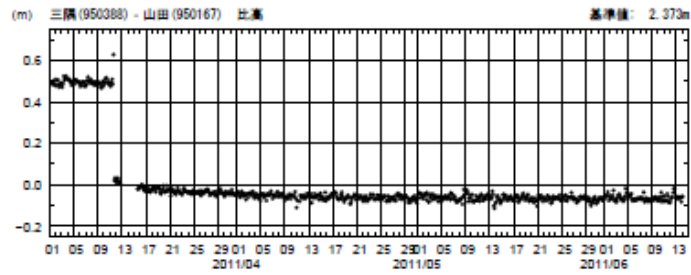
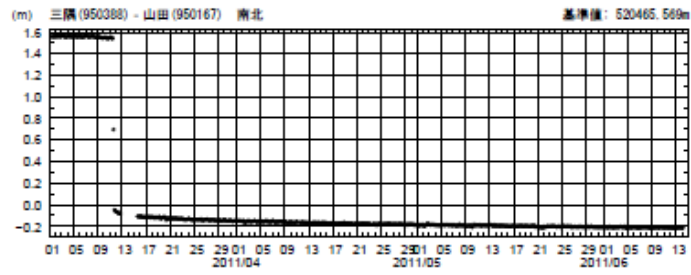
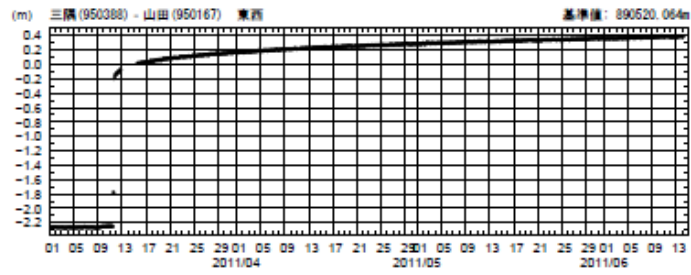
東北地方太平洋沖地震の本震により生じた地殻変動とその余効変動，すなわち地殻変動の時間的な変化状況について図-12に示す。

(出典)

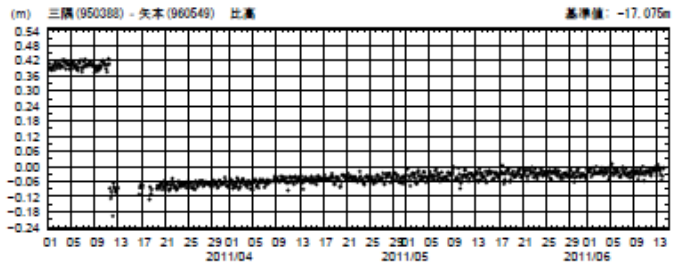
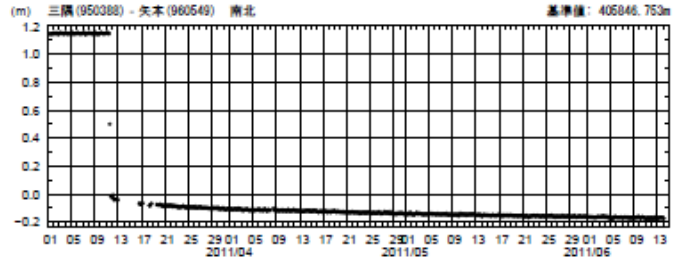
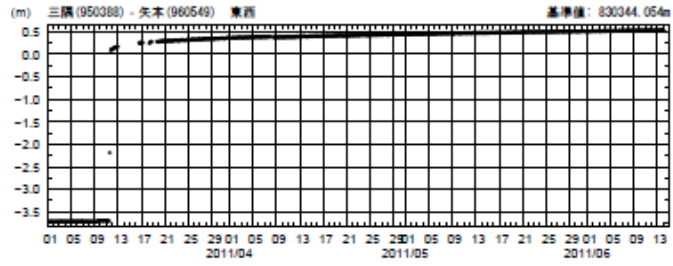
国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>



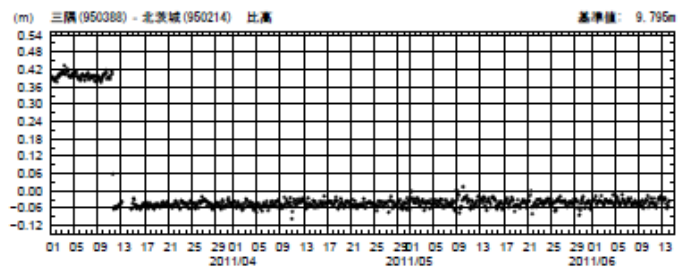
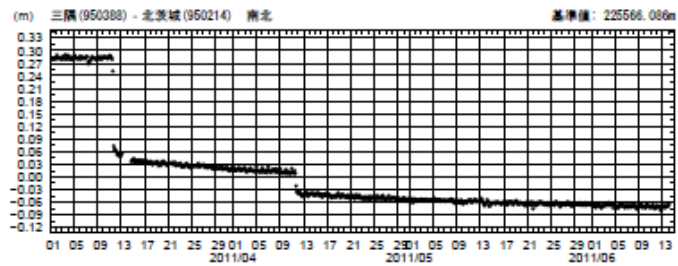
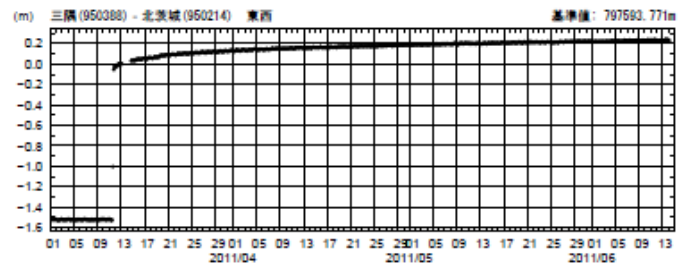
a) 観測地点



b) 山田



c) 矢本

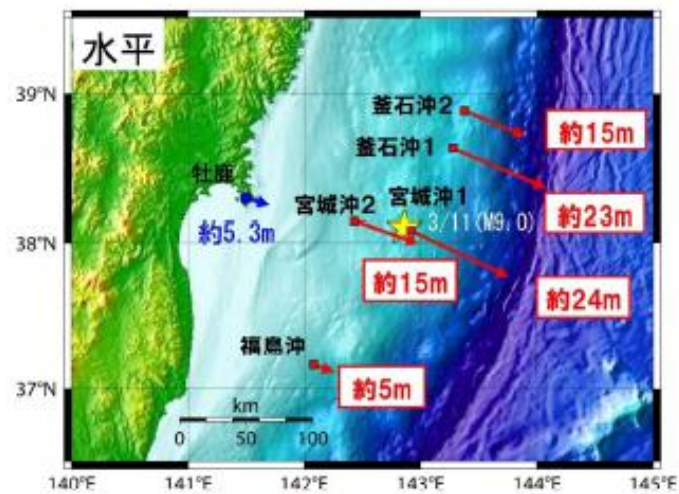


d) 北茨城

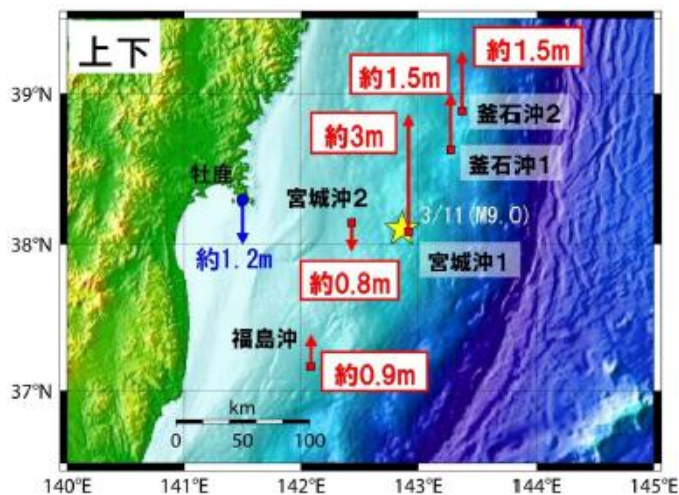
図 12 地殻変動の時間的な変化

(4) 東北地方太平洋沖地震に伴う海底の動き

海上保安庁では、3月28、29日に測量船「明洋」により海底基準局の被害調査を実施し、観測可能であった海底基準局から得られたデータを解析した。その結果として、3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、震源のほぼ真上に位置する宮城県沖の海底基準点が地震前と比べて東南東に約24m移動、約3m隆起したことが、また、震源の約40km陸側に位置する基準点では東南東に約15m、福島県沖の基準点では東南東に約5m移動していることがわかったとしている。その状況を図-13に示す。



a) 水平方向



b) 上下方向

図 13 東北地方太平洋沖地震に伴う海底の動き

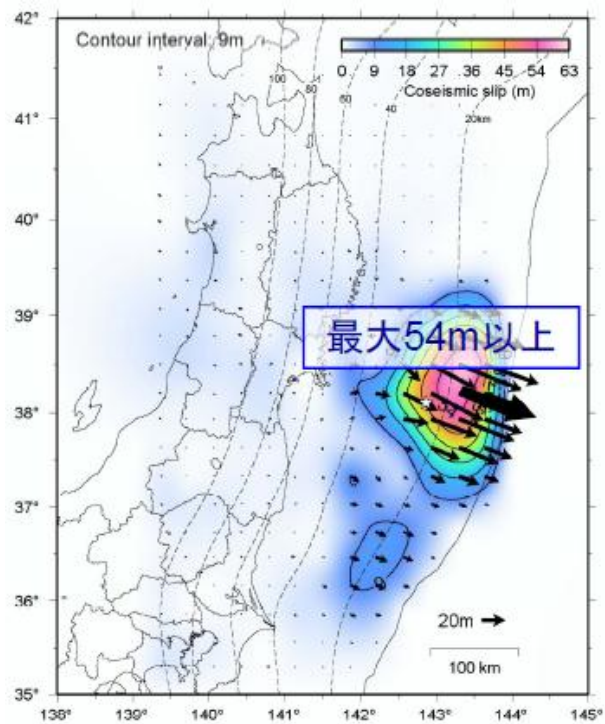
(出典)

海上保安庁：<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h23/k20110406/k110406-2.pdf>

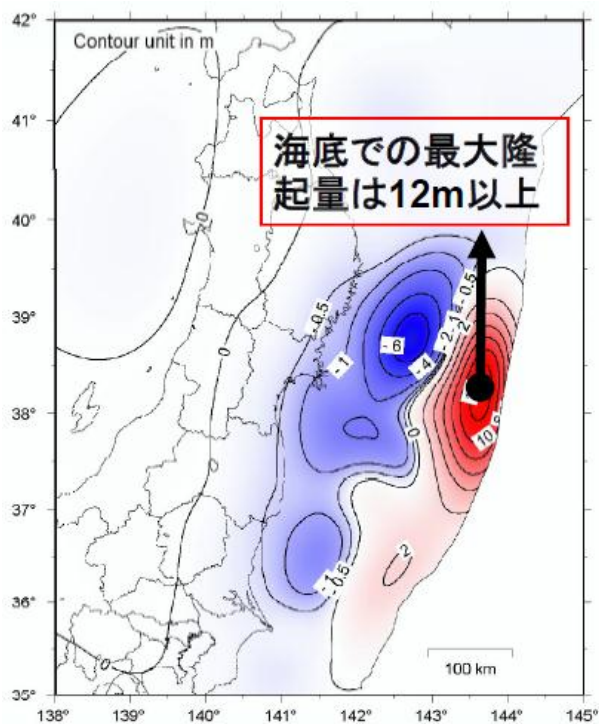
国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/common/000061101.pdf>

¥¥Scopentsv01¥e¥SCOPE 共通¥【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】¥230603 国土地理院報告会
 ー東日本大震災と地理空間情報ー¥地震による地殻変動.pdf

国土地理院では、陸上部のデータに海底地殻変動のデータを加えることで、滑りの中心がより海溝側にあること、最大滑り量が 54m とより大きくなること、また、海底面の隆起量については 12m 以上であることが推定されると報告している。(図-14)



a) 最大滑り量 (水平方向)



b) 海底面の最大隆起量

図 14 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動

(出典)

国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/common/000061101.pdf>

Scopentsv01SCOPE 共通【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】230603 国土地理院報告会
—東日本大震災と地理空間情報—地震による地殻変動.pdf

4. 地震による津波の状況

(1) GPS 波浪計による津波の観測値

GPS 波浪計は、図- 15 に示すとおり、現時点で 12 基が配備されている。これは、ブイの上部に搭載された GPS により 1 秒ごとに高度を計測するもので、条件がよければ、鉛直方向の測位誤差の標準偏差は離岸距離が 20km でも数 cm と小さく、ブイの上下動を除くことにより潮位成分が得られるようになっている。



図 15 GPS 波浪計の配置

図- 16 は、東北～四国地方沿岸の 9 基の GPS 波浪計で観測した東北地方太平洋沖地震津波の波形である。陸上局からのデータが使用可能な東北地方沿岸の 4 地点（岩手北部沖，岩手中部沖，岩手南部沖，福島県沖）では、14 時 50 分過ぎから第一波が到達し、15 時 12～19 分頃に高さ 2.6～6.7m の最大波が押し寄せた。これら 4 地点では、図中に↓で示した小さな峰があり、これは北へ行くほど小さくなっている。

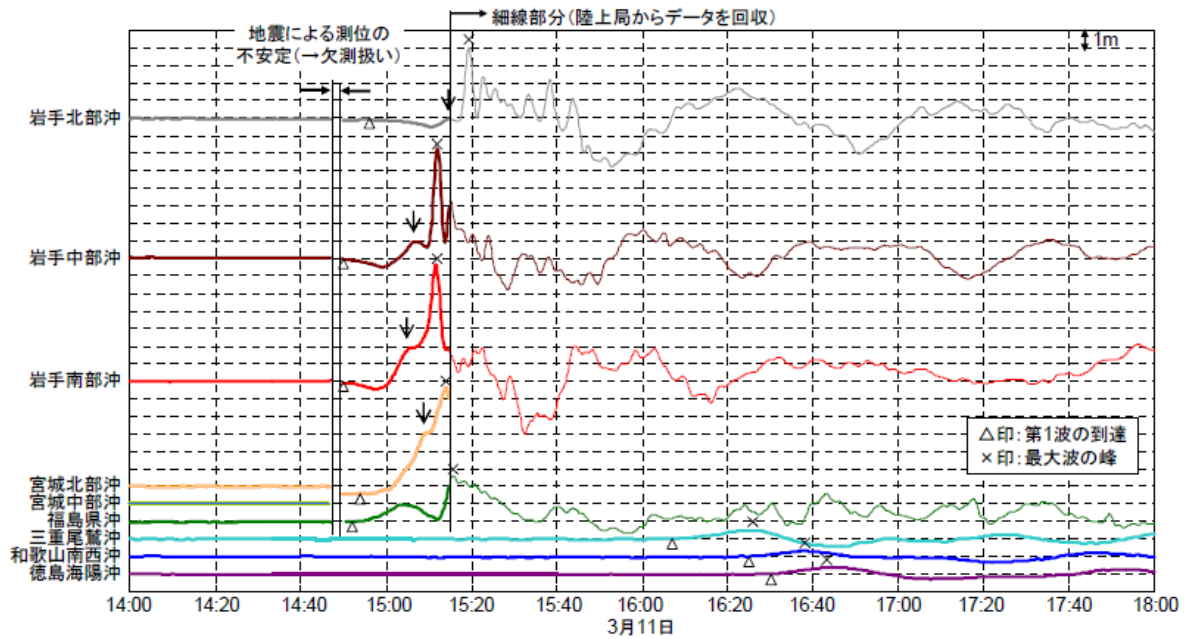
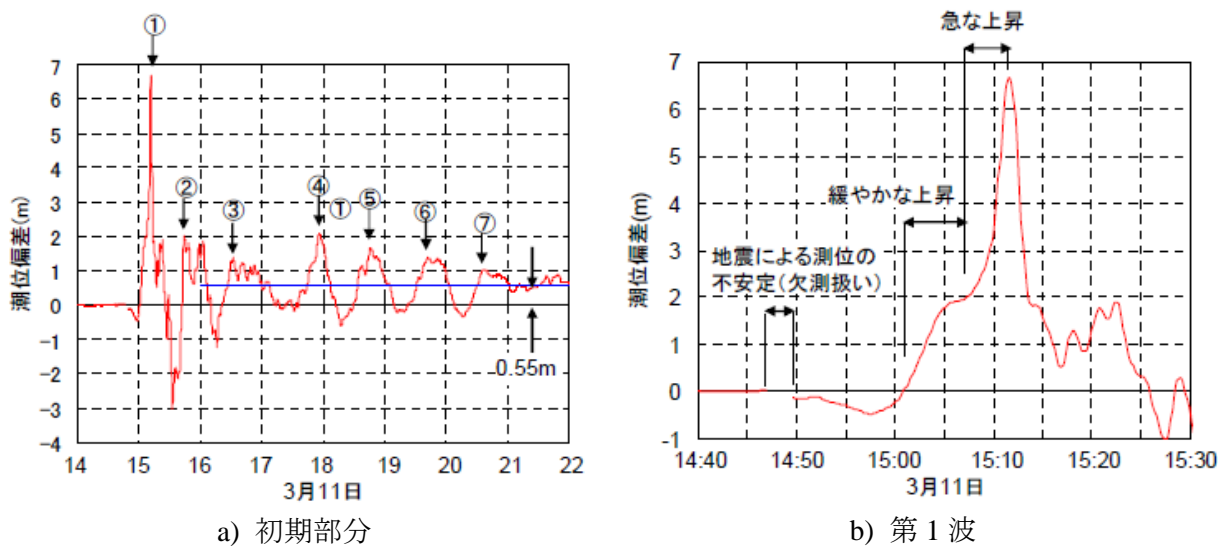


図 16 東北～四国地方沿岸の津波波形の初期部分

図- 17a) は、岩手南部沖における津波波形の初期部分である。津波の峰の高さは、第 1 波が突出して高く、第 2～7 波において徐々に小さくなっている。同図 b) は、第 1 波を拡大したものである。その峰は地震発生から 15 分後からの約 6 分間で 2m 程度上昇した後に、続く約 4 分間でさらに 4m 以上も急激に上昇した。なお、このような状況は、岩手中部沖その他でも観測されている。



a) 初期部分

b) 第 1 波

図 17 岩手南部沖における津波波形

(出典)

港湾空港技術研究所： <http://www.pari.go.jp/files/3642/1049951767.pdf>

¥¥Scopentsv01¥¥SCOPE 共通¥【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】¥2304 港空研資料 1231

「2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」 ¥ 「2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」 ①.pdf

(2) 津波高さ

図- 18 は、沿岸で観測された津波の高さである（高さ 250cm 以上の場合に観測点名を表記）。この観測値は気象庁による読取り値であり、内閣府，国土交通省港湾局，海上保安庁，国土地理院，愛知県，四日市港管理組合，兵庫県，宮崎県，日本コークス工業（株）の検潮所のものを含んでいる。

（出典）

<http://www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2011/genan027/siryu1.pdf>

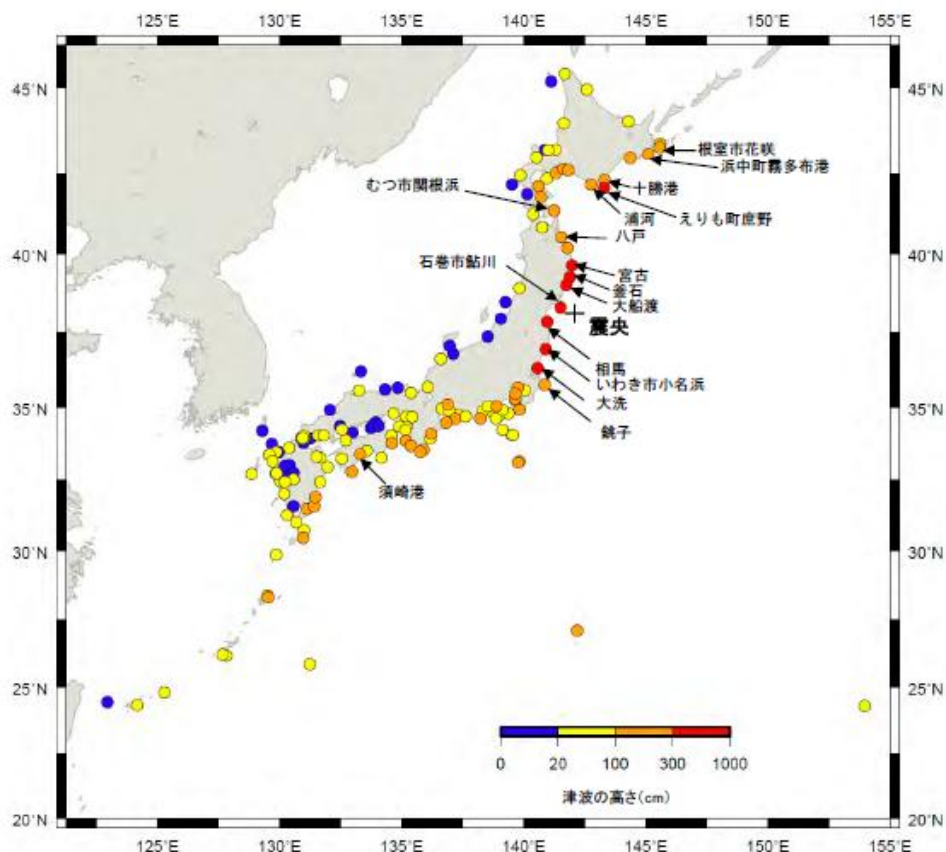


図 18 沿岸で観測された津波の高さ

港湾で観測された津波の高さについては、図- 19 にまとめた（図中の I, R については図- 20 で説明している）。

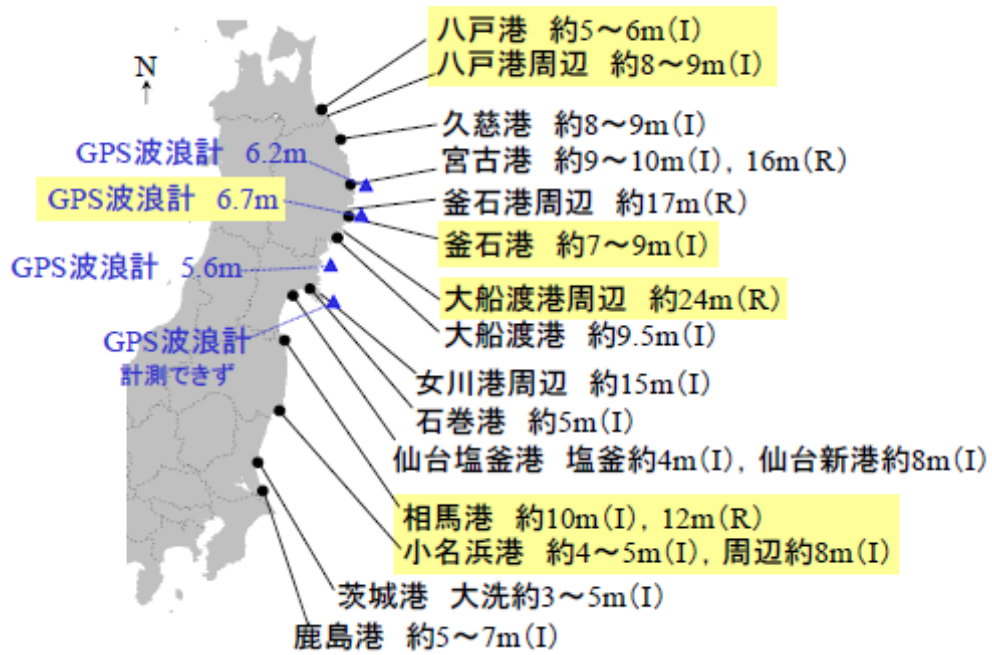


図 19 津波の痕跡高さ

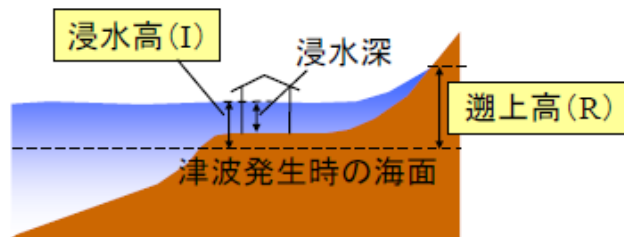


図 20 津波の痕跡高さの定義 (I と R)

(出典)「東日本大震災」調査報告会
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku/happyou/2-2.pdf>
 ¥Scopentsv01¥e¥SCOPE 共通¥【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】¥230426「東日本大震災調査報告会」資料(国総研、土研、建研)¥観測された津波の特性について.pdf

5. 港湾施設の被害の状況

東北地方太平洋沖地震により港湾が被害を受けた状況には地域差が認められている。被害の原因は、北部では津波、南部では地震動が主たるものである。すなわち、北部では、津波による防波堤の被害が顕著で、防波堤ケーソンの滑動・傾斜・埋没、津波波力と流れによるケーソンと基礎の被害がみられ、津波高さの高い港湾ほど被害が大きい傾向にあった。これに対して、南部では地震動による岸壁などの被害が顕著であった（図-21）。

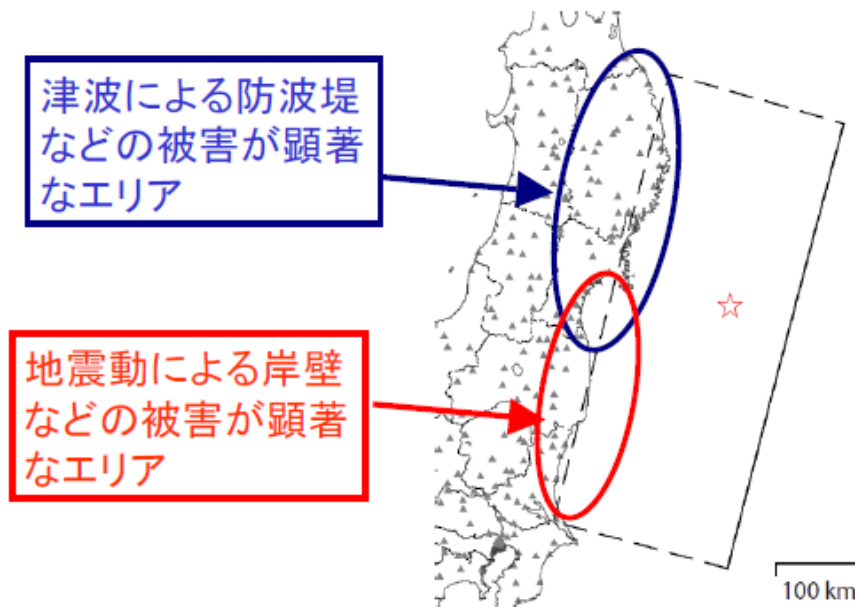


図 21 港湾施設の被害の原因

一般的に、港湾における地震動は、堆積層が厚いため、内陸部と比較して低周波数成分が増幅されやすいことから、地震動による被害が生じやすい。ただし、東北太平洋側の北部の港湾は比較的堆積層が薄い場合が多いことから、地震動による被害は南部におけるものほどではなかったものと考えられる。

（出典）「東日本大震災」調査報告会
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku/happyou/2-3.pdf>
¥¥Scopentsv01¥e¥SCOPE 共通¥【東北地方太平洋沖地震関連資料フォルダ】¥230426「東日本大震災調査報告会」資料（国総研、土研、建研）¥港湾における地震・津波による被害状況と復旧支援について.pdf