第3回 原子力耐震安全研究委員会

東北地方太平洋沖地震・津波と それによる被害の概要

本資料は、表記に係る本年6月付政府報告書第Ⅲ章の抜粋である

平成23年7月29日

新潟工科大学 原子力耐震・構造研究センター



独立行政法人 原子力安全基盤機構

資料の構成

- 1. 地震・津波の概要
 - 地震、津波、余震
- 2. 主な被害状況

- (1) 一般の被害
- (2)沿岸原子力発電所の被害の概要
 - (福島第一、第二原子力発電所は東電資料による)
 - ·東通原子力発電所
 - ・女川 〃
 - ·東海第二 ″

1. 東北地方太平洋沖地震の概要

(1)地震

①発生部位

日本列島は、図1-1に示す北米、ユーラシア、太平洋、フィリピン海の4つのプレートからなる。 同列島は、太平洋プレート及びフィリピン海プレートの沈み込みにより2方向から強い圧縮力を受けている。



図1-1 日本列島周辺のプレート構造

東北地方太平洋沖地震(以下、今回の地震という。)は、2011年3月11日14時46分に、 図1-1中に示す日本海溝沿いの北米プレートと太平洋プレートとの境界部で発生した。





©引用文献: Miura et al.(2005; Tectonophysics, Vol.407)にJNESが一部加筆 図1-2 東北地方太平洋沖地震の震源域と破壊の連動

②地震諸元とメカニズム

気象庁は、地震の震源は三陸沖約130kmで、震源 深さは24km、地震規模はモーメントマグニチュード (Mw)9.0と推定している(気象庁第16報)。また、地震調 査研究推進本部(以下、「地震本部」という。)は、今回 の地震の震源域が岩手県沖から茨城県沖までに及び、 震源の長さは、図1-2のように約400km以上、幅約 200kmと推定している(地震本部地震調査委員会:東北 地方太平洋沖地震の評価(4月11日発表))。地震の発 生メカニズムは、西北西-東南東方向に圧力軸を持つ 逆断層型であった。

今回の地震の震源は、図1-2に示す宮城県沖領域内 にあり、地震本部の発表資料等によると、プレートの破 壊は宮城県沖領域の震源から開始され、北方の岩手 県沖、南方の福島県沖及び茨城県沖へと連動しなが ら伝播したと推定されている。震源となった宮城県沖領 域は、図1-2に示すようにA及びBの2つの震源領域か ら構成される。今回の震源は領域B内にあり、破壊は 領域Bで発生した後、西側の領域Aへ連動し、更に領 域Bの東側の領域まで拡大連動したと推定されている。

これらの震源域の破壊を断面で示すと、破壊は、図 1-2中のa-a'断面に示す領域B内(深さ24km付近)で始 まり、プレート境界深部の領域Aへ伝播するとともに、 領域Bの東側領域の浅部へと伝播したと推定されてい る。滑り量が大きい領域は、三陸沖南部海溝寄り及び 三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの一部であり、最大 すべり量は約20m以上と推定されている。

≽ JNES 🛛

③地殻変動と震源過程及び津波の波源過程の分析例

国土地理院は、図1-3に示すようにGPS観測に基づき解析した地殻変動の発生状況を公開している。 同図から、顕著な地殻変動は宮城県から福島県沿岸域で発生し、沈降量は0.5m~1.2m(平均沈降約0.8m) である。宮城県牡鹿観測点では、東南東方向の水平変位量が約5.3m、上下方向の変位量は約1.2mである。



本震(M9.0)に伴う地殻変動」にJNESが一部加筆 [Online]. http://www.gsi.go.jp/

図1-3東北地方太平洋沖地震による地殻の変動 (国土地理院3月11日速報値)



🔅 JNES

◎引用文献:気象庁気象研究所「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定--近地強震波形を用いた解析--」にJNESが一部加筆

図1-4 東北地方太平洋沖地震の震源断層の推定

④震源過程

気象庁は、防災科学技術研 究所のK-NETとKiK-netの観 測記録及び気象庁加速度計 の波形を用いて、今回の地 震の震源過程を分析し、 図1-4に示すようなすべり分 布を公開した。

気象庁は、解析条件として 断層の長さ約450km、幅約 150kmとしている。解析の結 果、モーメントマグニチュード (Mw)9.0、破壊の継続時間は 約170秒となっている。

また、プレートの滑り(破壊) は、破壊開始点(震源:北緯 38.10度、東経142.86度、深 さ23.7km)付近で徐々に拡大 した後(0~60秒)、南北方向 に分かれて進行している。

大きな滑り領域は、破壊開 始点の東から北東側(震源よ りも浅い部分)の領域で発生 し、最大滑り量は約30mであ る。大きな滑りが発生する領 域は国内外の研究機関の報 告結果でほぼ一致している。



例えば、藤井・佐竹(2011)は、気象庁や 他機関の津波観測記録を用いて、津波波 形インバージョン解析[1]を行い、津波波源 を分析した(図1-5参照)。これによっても、 大きな滑り領域は、破壊開始点から北東側 (図中の黒色の部分)に分布しており、上記 の気象庁の結果とほぼ一致している。

これらのすべり分布の状況と、藤井・佐竹 (2011)の津波解析結果から、破壊開始点 (震源)東側の浅いプレート境界における大 きな滑りが、大津波を引き起こした要因で ある。

[1] 津波波形インバージョン解析: 観測された津波の時系列データ等を 用い、震源過程を解析するプロセス。

◎引用文献:藤井・佐竹「津波波源モデル(Ver. 4.0)」にJNESが一部加筆 [Online].http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html

図1-5 東北地方太平洋沖地震の津波インバージョン解析結果

独立行政法人 原子力安全基盤機構

2011年1月11日現在



◎引用文献:地震調査研究推進本部・地震調査委員会「主な海溝型地震の評価結果」に JNESが一部加筆 [Online].http://www.jishin.go.jp/main/

図1-6 地震調査研究推進本部で想定していた地震と東北地方太平洋沖地震の比較

⑤地震本部における地震発生の長期評価 との関係

地震本部では、海溝型地震を対象に、図1-6に 示すような地震の規模や一定期間内に地震が発 生する確率を予測したものを公表し、今後10、30、 50年以内の地震発生確率を示している。その中 で、図1-6中に示すように宮城県沖地震の30年 以内の発生確率を99%、地震規模をマグニ チュード(M)7.5と評価し、注意を促していた。

今回の地震の破壊開始点(宮城県沖領域)、同 領域内の2つの震源領域A及びBの連動破壊の 想定、及び発生時期はほぼ地震本部の評価通り であった。しかしながら、震源域の範囲が、三陸 沖中部、宮城県沖、福島県沖、茨城県沖の広範 囲に連動したこと、及び地震規模がM9に達した ことは、想定外であったとしている(地震本部地震 調査委員会:東北地方太平洋沖地震の評価(3月 11日発表))。さらに、破壊が震源からプレート境 界の浅い部分に広がり、滑り量が20m以上で あったことについては、これまで、福島県沖及び 茨城県沖における日本海溝沿い浅部のプレート 境界が、ずるずると滑っている領域で、大きなひ ずみが蓄積されていないと推定されていた。

実際には、その領域が固着されていたようで、 その結果、長期間にわたりひずみが蓄積され、 宮城県沖領域での破壊が引き金となって今回の 地震が発生したとする専門家もいる。

(2) 津波の発生状況

🐎 JNES

独立行政法人港湾空港技術研究所による岩手県釜石市沖合におけるGPS波浪計の観測津波波形を図1-9に 示す。津波の観測最大水位は、地震発生14時46分の約26分後の第1波の6.7mであった。津波の襲来周期は、 第1~3波において不規則で明瞭でないが、第4~7波では約50分である。第1波の特徴は、6分後に2m、続く4 分後に6.7mへと2段階で上昇していることである。



図1-9 岩手県南部沖で観測された津波波形

東日本沿岸地域における気象庁による観測津波水位を図1-10に示す。観測津波水位は、宮古地点で8.5m 以上、石巻市鮎川地点7.6m以上、相馬地点9.3m以上等であった。津波はカナダ、米国、中南米等太平洋 沿岸でも観測され、チリでは最大2mであった。

> INES



http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/2011_Earthquake_Tsunami.pdf

図1-10 主な観測点の津波高さ(気象庁観測記録引用)

佐竹によると、津波水位は、貞観地震(869年)のようなやや深部での滑りによる長周期の波と、 明治三陸沖地震(1896年)のような浅部でのものによる短周期の高い津波が重畳したと推定し ている(図1-11参照)。そのため、短周期での高い津波が沿岸域に到達・遡上した後、長い周期 の津波が長時間にわたり繰り返し押し寄せ、遡上域を増大させたと推定されている。最大遡上 高さは、土木学会の調査によると、岩手県宮古市姉吉地区で38.9mである。三陸地方での遡上 高さは、明治三陸沖地震(1896年)及び昭和三陸沖地震(1933年)を上回った(図1-12参照)。

 \Rightarrow **JNES**



図1-11 東北地方太平洋沖地震で観測された津波波形の特徴

INES 🗞



図1-12 東北地方太平洋沖地震による津波と過去の地震の各地の遡上高さの比較

JNES _____

(3)余震及び誘発地震の発生状況

余震の積算回数は、5月6日現在、M5以上が約444回、M6以上76回、M7以上5回である。最大余震は、3月11日15時15分に発生し、 地震規模はM7.7であった。その他の主な余震として、同日15時25分の宮城県はるか沖の地震(深さ約34km、M7.5)、4月7日23時32 分に宮城県沖(深さ約40km、M7.1)の地震が発生した。4月7日の余震は、牡鹿半島の東約40kmで発生し、女川原子力発電所で大き な地震動が観測された。

誘発地震の発生状況を図1-13に示す。誘発地震は、長野県、秋田県、静岡県富士宮、福島県と全国各地で発生している[III1-5]。原子 力発電所周辺では、3月12日に柏崎原子力発電所から南東約50kmの長野県北部の十日町断層帯付近においてM6.7の地震が発生 した。また、福島第一原子力発電所から南西約50kmの井戸沢断層付近において、4月11日に地震(M7.1)が発生した。この地震は、プ レート内の浅い場所で発生した南西-東北東方向に張力軸を持つ正断層型であった。東北地方は逆断層の活断層が卓越し分布する 地域であり、正断層型の地震断層が確認されたのは初めてである。



図1-13 東北地方太平洋沖地震後に発生した主な誘発地震

2. 東北地方太平洋沖地震による主な被害状況 (1) 一般被害

①概況

津波による浸水面積は、国土地理院の調査によると、宮城県が最も大きく327km2で、次いで、福島県112km2、岩手県58km2等となっており、全浸水面積は561km2に及ぶ(国土地理院:津波による浸水範囲の面積(概略値)について(第5報))。家屋の被害は、全壊、半壊、一部破壊及び浸水を 合わせて約475,000棟である。公共建物や文教施設等の被害は約18,000件に上る。

ライフライン関係では、道路被害約4,000箇所、鉄道被害約7,280箇所(その内津波による被害約 1,680箇所)、ガスの停止約460,000戸、電気の停電約4,000,000戸、電話不通800,000回線等であ る(緊急災害対策本部発表:5月30日16時、JR東日本:4月17日現在、日本ガス協会公表:3月12日 現在、経済産業省発表:4月12日、緊急災害対策本部発表:3月12日12時等からピーク時被害状況 を集計)。

土砂崩れ、斜面崩壊、地盤変状等の土砂災害は、岩手県、宮城県、福島県、栃木県、茨城県の 広い地域で120箇所以上発生している(防災科学研究所5月19日現在)。福島県では、ダムが決壊し、 数名の行方不明者が出ている。千葉県では、浦安市や幕張市等湾岸地域や九十九里平野等で、 大規模な地盤の液状化が発生した(千葉県環境研究センター(第2報)、4月15日掲載)。

今回の地震による<u>全死亡者・行方不明者は、24,769名</u>となっている(緊急災害対策本部<u>5月30日</u> 17時現在)。 JNES -

②港湾施設周辺の防波堤及び防波堤等の被害

津波による一般港湾施設の防波堤及び防波堤や付帯設備の被害調査結果に基づき、津波による施設の洗掘*や波力の影響について示す。

*洗掘:津波により、海岸や海底の土砂が機械的に削り取られる現象のこと。今回の津波では、押し波と

引き波により、堤防の基礎周辺の地盤が洗い削られ、基礎が支持力を失って、堤防が倒壊した。

<u>防潮堤及び防波堤は、図1-15に示すように、基礎周辺地盤が津波の押し・引き波によって洗掘され、</u> 基礎が転倒しているものが多くみられた。また、防潮堤・防波堤のコンクリート覆工部分(防潮堤内部 の岩や地盤を覆うコンクリート部分)は基礎下端からえぐり取られ、覆工の役割を果たしていなかった。 これらの状況から、津波対策として、砂丘の堤防やコンクリート防波壁を設置する場合、津波が砂丘 をいったん超えると、押し波・引き波の洗掘によって砂丘が崩壊したり、防波壁も洗掘され倒壊する可 能性がある。そこで、各種の対策工に対し、技術指針が整備されるべきである。

防潮堤の付帯施設は、図1-15に示すように、津波の強い波圧によって薙ぎ倒されている。波圧の取り扱いについて、土木学会津波評価部会・津波評価技術(2002年)では、波圧算定式におけるソリトン分裂波の波圧分布特性等に関する高度化の必要性を指摘している。そこで、同部会の津波評価技術(2007年)の算定式は、水槽試験を実施し、得られたデータを用いて改良されている。同式を今回の 津波による被害に適用し検証すると共に、一層の評価技術の高度化が重要である。



JNES -

〔津波の洗掘による防潮堤の倒壊〕







〔押し波の波圧による施設の薙ぎ倒し〕



図1-15 津波による防潮堤及び施設の被害状況

岩手県宮古市田老地区の防潮堤は、地元では"万里の長城"と呼ばれ、<u>高さ10mの威容を誇っていたが、15m以上の津波により倒壊</u>し、図1-16(写真左)に示すように、防潮堤内で多大の被害が発生した(朝日新聞社、3月20日記事)。これに対し、岩手県普代村太田部地区では、古の教訓に基づく村長の強い意志によって、図1-16(写真右)中に示す<u>15.5mの防潮堤</u>が設置された。

この防潮堤は、今回の15mの津波を跳ね返し、防潮堤内の被害を阻止した(読売新聞社、4月3日 記事)。これらの地域は、リアス式海岸地域であり、明治三陸津波(1896年)や昭和三陸津波(1933年) 等15m級の津波によって古くから甚大な被害を被り、"15m程度の津波に備えよ"との教訓が伝聞さ れていた(読売新聞社、3月30日記事)。今回の津波では、<u>伝聞を守った太田部地区と田老地区とで</u> <u>明暗が分かれた。</u>

岩手県宮古市姉吉地区には、上記の両津波による遡上の教訓から、図1-17(写真左)に示すように、 <u>集落の入り口(標高60m)に「石碑:此処より下に家を建てるな」が設置されている</u>。この教訓を遵守し ていたために、津波は図中(写真右)に示すように集落近くまで遡上(遡上高さ38.9m)したものの、今 回の津波において一人の犠牲者も出なかった。

〔太田部地区の15.5m防潮堤の健全性〕

Miyako **Fuda** 図1-16 岩手県宮古市田老地区及び普代村太田部地区における 津波に対する防潮堤の堅牢の違いによる被害の明暗 **Fudai** 姉吉地区入り口の石碑(標高60m) 「姉吉集落近くまで到達した津波遡上」 Miyako (海岸から集落方向へ写す) (集落から海岸方向へ写す) Sendai 250km Miyako **Miyako**

〔田老地区の10m防潮堤の倒壊〕

JNES -

図1-17 岩手県宮古市姉吉地区の石碑と津波遡上の状況

(2)沿岸原子力発電所の被害の概況

■東北沿岸原子力発電所周辺の震度



◎引用文献:気象庁「『平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震』について(第1 報)」にJNESが一部加筆 [Online].http://www.jma.go.jp/jma/index.html

図1-8 東北地方太平洋沖地震による地震動の震度分布

- ●発生: 2011年3月11日14:46
- ●マグニチュード: 9.0
- ●震央: 三陸沖約 130km (北緯 38.10,東経 142.86 深さ 23.7km)

東日本の震度分布を図1-8に示す。宮城県 栗原市では最大震度7であった。震度5以上 の地域は、東北地方から関東地方までの広 い範囲に及んでいる。女川原子力発電所、 福島第一原子力発電所、福島第二原子力発 電所及び東海第二発電所の周辺地域の震 度は、5強~6強であった。

各発電所の運転または起動中の 号機はすべて地震動大信号により 自動停止

独立行政法人 原子力安全基盤機構





■各原子力発電所の地震動発生状況

女川原子力発電所、福島第一原子力発電所、福島第 二原子力発電所及び東海第二発電所の周辺地域で 観測された防災科学技術研究所のK-NETとKIK-net 観測点での加速度波形(水平2成分、上下成分)を図 1-7に示す。

震源に近い<u>女川原子力発電所</u>付近の観測点 (MYG011:震央距離127km)での加速度波形には、地 震発生から30秒と80秒付近に大きなピークが発生し ている。<u>福島第一原子力発電所</u>付近の観測点 (FKS011:震央距離176km)での加速度波形にも同様 のピークが見られるが、第2のピークは第1のピークよ りも大きい。これら2つのピークは、震源領域A及びB 付近の破壊によるものと考えられる。

一方、東海第二発電所付近の観測点(IBR007:震央 距離274km)での加速度波形には120秒後に1つの ピークだけが発生している。その理由として、<u>東海第</u> 二発電所付近では、上記宮城県沖領域内の震源領域 B及びAの破壊による地震動が減衰し、福島県沖から 茨城県沖の震源域の破壊による地震動の影響が大き くなったことによると考えられる。敷地の地震動に大き な影響を及ぼす要因は、広範な震源域の中で、敷地 近傍の震源域であり、そこでの破壊特性及び連動の 仕方等の可能性がある。

これに対し、<u>津波の水位に大きな影響を及ぼす要因としては、地震規模、震源域の広さ、すべり量、破壊の</u> 連動の仕方等の可能性がある。これらの要因の違い については、今後、国内外の研究機関での解明が期 待される。



■各発電所*の状況

発電所	地震及び津波後の状況
■ 東通原子力発電所 東北電力(株)	定期検査中 (1 つの号機) →地震により外部電源喪失。 →非常用ディーゼル発電機起動。
■ 女川原子力発電所 東北電力(株)	 地震により3つの号機が停止 →地震及び津波後も、一部の外部電源線及び海水ポンプの機能が維持される。 →3月12日1:17に冷温停止。
■ 東海第二発電所 日本原子力発電(株)	 地震により1つの号機が停止 →地震により外部電源喪失。 →津波後も非常用ディーゼル発電機の機能が維持される。 →3月15日0:40冷温停止。

* 福島第一、第二原子力発電所の状況は東電資料による

20

■女川原子力発電所



(0. P. は女川の基準面であり、東京湾平均海面より-0.74m)

※ 今回の地震発生後に公表された国土地理院による女川原子力発電所周辺の地殻変動(一約1m)を考慮した値。

設計津波水位と観測津波水位との関係

設計津波水位は、設置許可申請書では慶長三陸地震(M8.6、1611年)での9.1m、前述の土木学会の津波評価技術(2002年)に基づく評価では明治三陸地震(M8.3、1896年)での13.6mとなっている。 上記の設計津波水位は、上記観測津波水位より大きい。

海水系ポンプ及び非常用電源系

観測された津波水位は13mであり、地盤沈降があったものの津波による海水ポンプ室(沈降約1m を考慮した場合の敷地高さ13.8m)への直接の冠水はなかった。しかし、津波水位が上昇するにつれ、 図中に示す地下取水ピットの水位もサイホン現象によって上昇し、海水が水位計の開口部から海水 ポンプ室へ溢れでた。その後、海水は同ポンプ室から原子炉建屋地下階へトレンチを経由して伝わり、 地下2階の補機冷却系熱交換器室が浸水した。2号機の補機冷却系ポンプも浸水したことにより、非 常用ディーセル発電機の冷却機能が失われ、同発電機3台のうち2台が停止した。 >JNES

■東海第二原子力発電所



ポンフ

設計津波水位と観測津波水位との関係 設置許可申請書には設計津波水位は、記載 されていない。土木学会による津波評価技術 (2002年)に基づく評価では房総沖地震(M8.2、 1677年)でのH.P.+5.8m(標高+4.9m)が求めら れている。

海水系ポンプ及び非常用電源系

津波は、図に示す海水ポンプ室内の北側非 常用海水ポンプエリアに浸水した。そのため、 非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ3台のう ち1台が冠水し、非常用ディーゼル発電機3台 のうち1台が停止した。他の2台の非常用ディー ゼル発電機は稼動し、非常用電源を確保する ことができた。

北側非常用海水ポンプ室は、地震時に津波 対策として側壁の嵩上げ工事中であった (H.P.+5.8m、標高+4.9m)。この工事では、側 壁の外側にH.P.+7.0m(標高+6.1m)までの側 壁を新たに設置したが、壁の貫通部(電気ケー ブル等を通すための小さな穴)の封止(浸水を 防ぐ)工事は完了していなかったため、貫通部 からポンプ室に海水が浸水した。

津波による遡上高は、H.P.+6.3m(標高+5.4m) 程度であり、H.P.+7.0m(標高+6.1m)の側壁は 越えていない。