

東北地方太平洋沖地震に関する現地調査報告と地震動特性

中川 肇*

Site Research Report and Earthquake Ground Motion Property of the 2011 Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

The M9.0 severe earthquake of 24.4km in depth to assume Miyagi Prefecture offshore as an epicenter occurred in 11th of March 2011, the so-called 2011 Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake.

This paper presents three elements such as; 1) the site research reports of Ishinomaki, Natori, Kesenuma cities, Watari-cho in Miyagi Prefecture and Kamaishi city in Iwate Prefecture, 2) the estimation of the predominant period, maximum acceleration response of these earthquakes based on the earthquake observation records with K-NET and 3) the estimation of non-stationary random input parameters (σ_f, ω_g, h_g) based on the ocean and the long period types observation records in the Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake.

The damage conditions of the steel structure and the wooden frame house were grasped in the site research of Miyagi Prefecture. The ocean type random input parameters are calculated for earthquake observation records in Ichinomaki, Sendai and the long period type random parameters are calculated for Osaka.

KEY WORDS: Tohoku-pacific ocean earthquake, Tsunami, Site research report, Earthquake observation system K-NET, Earthquake excitation property

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日 (金)、午後 2 時 46 分 18 秒、三陸沖を震源とする津波地震が発生した。震源は宮城県牡鹿半島の東南東 (北緯 38 度 6 分, 東経 142 度 52 分) 約 130km、深さ 24.4km である。北海道から九州にかけての広い範囲で震度 7~震度 1 の揺れと巨大津波に見舞われ、死者は東北地方を中心に 15,815 人、行方不明者は 3,966 人以上 (平成 23 年 9 月 30 日午後 6 時現在、警察庁¹⁾の纏め) である。地震の規模を示すマグニチュード (M) は 9.0 で、平成 7 年の兵庫県南部地震のマグニチュードが M7.3 で、この未曾有の大震災より約 355 倍規模の地震である。

東北地方太平洋沖地震は、震源域が幅 200km、長さ 500km の帯状をしており、プレート間での低角逆断層型でずれ、かつ海溝型の地震が連動し大津波が発生したと思われる。その後、海上保安庁の調査に

よれば、震源の真上にあたる宮城県沖の海底が約 3m 隆起し、南東南に約 24m 移動したと報告されている。

本論では、平成 23 年 5 月に実施した宮城県における被災地の現地調査及び地震観測システム K-NET²⁾を用いた前震一本震一余震における岩手・宮城県の地震動特性を把握することが目的である。この結果を踏まえて、今後発生することが懸念されている南海、東南海、東海地震に関する防災対策に役立てたいと思う。

2. 東北地方太平洋沖地震

2-1 概要

3 月 11 日の本震における各地の震度は以下の通りである。震度 7 が宮城県栗原市築館、震度 6 強が宮城県仙台市宮城野区、同県登米市を含め 25 箇所、震度 6 弱が同県仙台市青葉区、気仙沼市を含め 26 箇所であった。本震発生後、国内太平洋沿岸地域に大津波警報、津波警報、津波注意報が発令され、岩

*建築学科

手県から茨城県にかけて津波が観測されている。

青森県八戸市 (8.4m)、久慈市 (9.8m)、岩手県宮古市田老町 (遡上高さ 38.9m)、大槌町 (12.6m)、釜石市 (9m)、大船渡市 (9.5m) 陸前高田市 (15m)、宮城県南三陸町 (15.4m)、女川町 (17.6m)、石巻市雄勝町 (16.7m)、東松島市 (10.4m)、仙台新港 (14.4m)、福島県相馬市 (7.3m 以上)、福島第一原子力発電所 (14m)、茨城県大洗市 (4.8m) を観測している³⁾。ここで、参考までに津波高さについて説明する。津波高さとは、平均海水面と検潮所との高さを意味し、津波発生後、建築物及び土木構造物が浸水している高さを浸水高さ、遡上高さとは津波が高台等を駆け上がった高さを言う。

東北地方太平洋沖地震と類似する過去の歴史的な津波地震としては、寛平 8 年(896)年 7 月の貞観地震、明治 29(1896)年 6 月の明治三陸地震が挙げられる。明治三陸地震は M8.5、死者が 21,959 名で最大津波高さは 38.2m、流失や全半壊による被害家屋は 1 万棟以上と示されている⁴⁾。

2・2 人的被害と建物被害

表 1 に、平成 23 年 9 月 30 日現在の死者、行方不明者、全壊建物数を示している。震災発生後 100 日が経過している段階で行方不明者が 7,676 名と多く、津波の引き波や東京電力、福島第一原子力発電所事故の影響により半径 20km 圏内の搜索活動が難航したためと考えられる。これは、平成 7 年の兵庫県南部地震とは異なる傾向である。

表 1 死者・行方不明者数、全壊建物数(単位:人, 戸)¹⁾

	死者	行方不明者	全壊建物数
北海道	1		
青森県	3	1	307
岩手県	4,664	1,632	20,209
宮城県	9,481	2,092	76,065
山形県	1		37
福島県	1,604	238	17,871
茨城県	24	1	2,799
栃木県	4		263
群馬県	1		
千葉県	20	2	798
東京都	7		
神奈川県	4		
合計	15,815	3,966	118,349

図 1 には、本震発生 3 日目から 50 日目までの岩手県、宮城県、福島県の死者、行方不明者数の推移を示している。

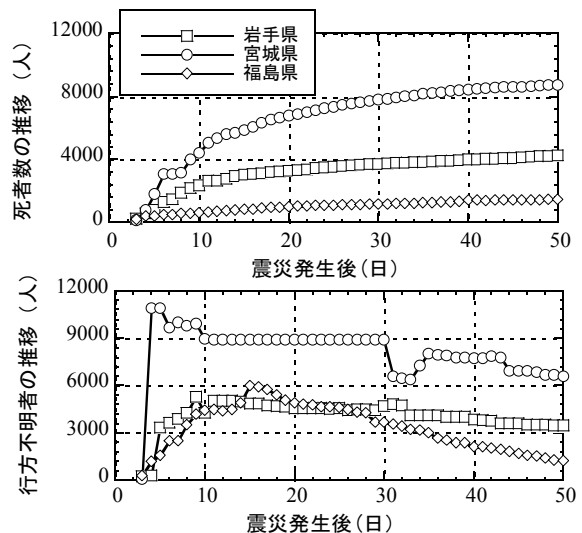


図 1 東北 3 県の死者、行方不明者の推移

図 2 には、岩手、宮城、福島県における死者の男女比率と年齢別の死者数とその比率を示している。3 県の年齢別の死者数、性別のデータは、各県警で検視が終了し、身元が判明したもので各県警より入手したデータである。これは、9 月 30 日現在の死者数で、警察庁が発表している全死者数の 84.3% の値で分析している。図 2 より、3 県合計での男女の比率は、男性が 42.2%、女性が 57.8% である。一方、年齢別の割合で見ると、7~20 歳までは登校しており、地震発生時刻に下校した小学校の低学年以外は生存していることが判る。また、18 歳以下の幼児、児童、生徒が全体の 5.9% で下校中或いは校舎の 3 階以上まで津波が浸水した可能性がある。60 歳以上の方が全体の 63.3% で地震による大津波で高台或いは鉄筋コンクリート造 3 階以上に避難することができなかったか或いは、過去の津波地震の経験を過信し亡くなったのではないかと推察している。60 歳以上の方の割合は、兵庫県南部地震の数値とほぼ同じである。

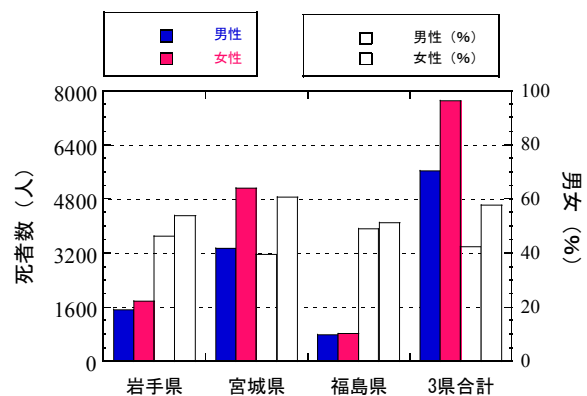


図 2 東北 3 県における死者の分析結果

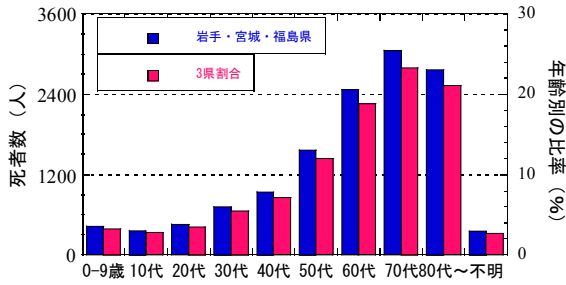


図2 東北3県における死者の分析結果(Continued)

2・3 本震と余震

本節では、余震活動及び本震直後の2つの内陸地震について述べる。図3に3月11日の本震と余震の状況を示す。

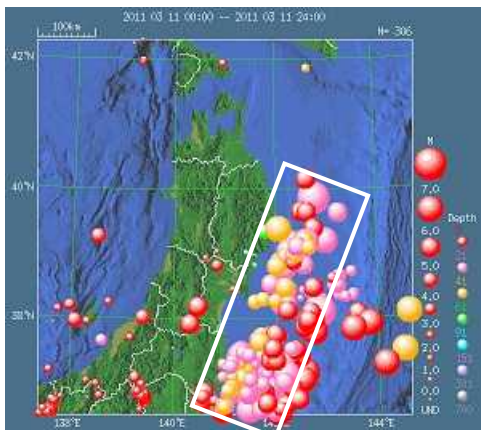


図3 本震と余震状況⁴⁾

図3より、幅200km、長さ500kmの震源域の内側を中心にM5以上の余震が約150回以上発生し、9月30日現在で、M7以上が7回、M6~6.9が96回、M5~5.9が563回である。また、本震の特徴として、三陸沖中部、宮城沖、三陸沖南部、福島県沖及び茨城県沖の地震発生域が連動し破壊した地震である。これは、兵庫県南部地震より地震規模、余震の回数が非常に多いように見え、余震活動が終焉するには、半年以上はかかると推察している。

本震直後に2つの誘発地震が発生しており、3月12日、午前3時59分に長野県北部を震源とする地震が発生し、長野県栄村で震度6強の揺れを観測した。マグニチュードは6.7で震源の深さは約10kmである。また、3月15日、午後10時31分、静岡県東部を震源とする地震が発生し、静岡県富士宮市で震度6強を観測した。マグニチュードは6.4で震源の深さは14kmである。2つの地震とも木造家屋等に被害を及ぼしている。

3. 被災地の現地調査

本震発生後、報道、新聞等を通じて情報収集にあたり、平成23年5月3日、4日の2日間、宮城県仙台市青葉区、石巻市、名取市西部、亶理郡亶理町の現地調査を、9月5日から8日の4日間、宮城県名取市閑上地区、同県気仙沼市、岩手県釜石市の現地調査を実施した。石巻市はJR仙台線が津波の影響で不通となっていたが、JR仙台駅から代替バスが運行しており、また名取市と亶理町はJR常磐線が仙台駅と亶理駅での折り返し運転をしており、調査場所を選定した。現地調査内容は日本建築学会災害調査ガイドラインに準拠している。

図4に石巻市、名取市西部、亶理町及び名取市沿岸部、気仙沼市、釜石市の調査区域を示している。石巻市は、図4に示すようにJR石巻駅から国道398号沿いを通って、石巻漁港まで約5kmの区間を、名取市はJR名取駅から仙台高専までの約2kmの区間を、亶理町はJR亶理駅から荒浜地区(沿岸部)まで約5kmの区間を2日間で調査した。また、名取市沿岸部はJR名取駅から国道129号を通り閑上地区(名取川河口部)までの約7kmの区間を、気仙沼市はJR気仙沼駅から気仙沼漁港周辺までの約5kmの区間を、釜石市はJR釜石駅から釜石港の一周の約4kmの区間を4日間で調査した。



図4 調査区域(石巻市, 名取市西部)



図 4 調査区域
(亶理町, 名取市沿岸部, 気仙沼市, 釜石市)

写真 1～3 に石巻市、名取市、亶理町で甚大な被害を受けた建物を示している。写真 1 より、石巻市は旧北上川を遡上し沿岸部から約 5km の JR 石巻駅周辺まで津波が到達したものと推察される。①の石ノ森萬画館や西内海橋の手すりの状況から判断すると津波が旧北上川を遡上したものと考えられる。②の写真より津波の影響で木造家屋が跡形もなく流失しており、コンクリート基礎と柱土台を固定しているアンカーボルトのみが残っている。⑤と⑥は、石巻漁港周辺の S 造の石巻加工と 1 階がピロティの

RC 造の石巻市水産物地方卸売市場の建屋である。⑤の写真から、古い鉄骨造の柱材は圧縮座屈ではなく、津波の抗力による横座屈が生じているように思える。また、紙面の関係で省略したが、漁港周辺には水産加工場が多く存在し、建設年度が比較的新しい S 造の躯体への被害は殆どなく、津波の影響で天井材、ALC パネルなどの外壁材、2 次部材の損傷が多いことを確認している。

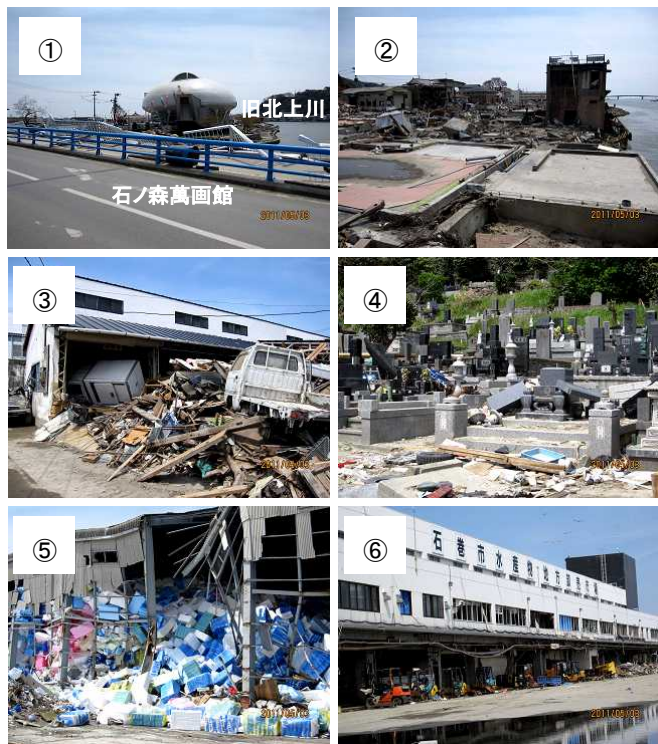


写真 1 石巻市



写真 2 名取市

名取市東部の関上地区は平地に関わらず、津波の浸水により甚大な被害を受けている。写真 2 より、名取市西部は、津波による浸水を受けておらず被害の程度は軽微である。しかし、⑦の大手町 6 丁目付近の比較的新しい RC 造 8 階建ての分譲マンションにおいて、桁行方向の雑壁のせん断破壊が 2～5 階で多く見られ、1 階のエントランス廻りの外壁タイルの剥落を確認している。このマンション周辺に同様なマンションが存在するが全く損傷を受けてお

らず、適切に設計・施工がなされているか確認が必要である。



写真3 亙理町

図4より、亙理町の津波被害は、常磐自動車道を境に発生していることを現地調査で確認している。

写真3より、荒浜漁港に到達した津波が農地で分散し、荒浜地区で築30年以上の土壁による在来木造住宅が流失せず、かなりの損傷を受けているが、現存していることが判る。しかし、3月27日に応急危険度判定が実施されており、全壊住宅として判定されている。また、⑫の木造住宅のように基礎の高さが一般より高く、津波による浸水を受けなかったため、軽微な被害に留まっている。

写真4～6に名取市沿岸部、気仙沼市、釜石市で甚大な被害を受けた建物を示している。名取市沿岸部では木造家屋、S造の大型の店舗ビル、個人商店、児童公民館等のRC造の公共施設が存在している。気仙沼市や釜石市では木造家屋、商店街、S造の店舗、個人医院、RC造の中層マンション、漁業関係ビル、市役所が存在している。

写真4より、名取市閉上地区では、沿岸部から約6kmの範囲にあり、津波が浸水しており、建物に甚大な被害を及ぼしている。⑬のS造のCMビルは食料品を販売する大型の店舗ビルであり、津波の影響で外壁材が脱落し、骨組みが剥き出しになっていることが判る。また、⑭の曹洞宗T寺は本堂、屋根部分(中央と右側)が大きく損傷していることが判る。

気仙沼市は津波地震発生後、火災が発生し木造家屋、RC造の集合住宅などに被害を齎している。写真5より、S造3階建ての住宅では、2階或いは3階まで浸水しており、外壁材のALCパネルや2次部材が損傷していることが判る。

釜石市は釜石湾からJR釜石駅周辺まで津波が浸水し、駅前の商店街などの被害が大きい。しかし、駅前の新日本製鉄所釜石工場や、やや高台に位置している釜石市役所は津波被害を受けていない。

写真6より、釜石湾に最も近い⑰の市営Kビル(RC造8階建て)は津波避難ビルに指定されており、本震時、2階まで浸水したが、津波避難ビルの役割は十分に果たしたと思う。



写真4 名取市閉上地区



写真5 気仙沼市



写真6 釜石市

4. 東北地方太平洋沖地震の地震動特性

4.1 本震

2.3節で上述したように、本震における震源域は広範囲にわたるために、ここでは、まず岩手県から千葉県に亘る地震動波形の特徴について説明する。次いで、本震時に観測され、現地調査を実施した岩手県、宮城県における地震動特性について述べる。

図5には、代表的な岩手県、宮城県、福島県、茨城県、千葉県の地震動波形を示す。岩手県岩泉(IWT019)、川井(IWT016)、大東(IWT009)、宮城県歌津(MYG002)、角田(MYG017)、福島県飯館(FSK004)、茨城県大子(IBR001)、千葉県浦安(CHB008)の8つの地震波である。

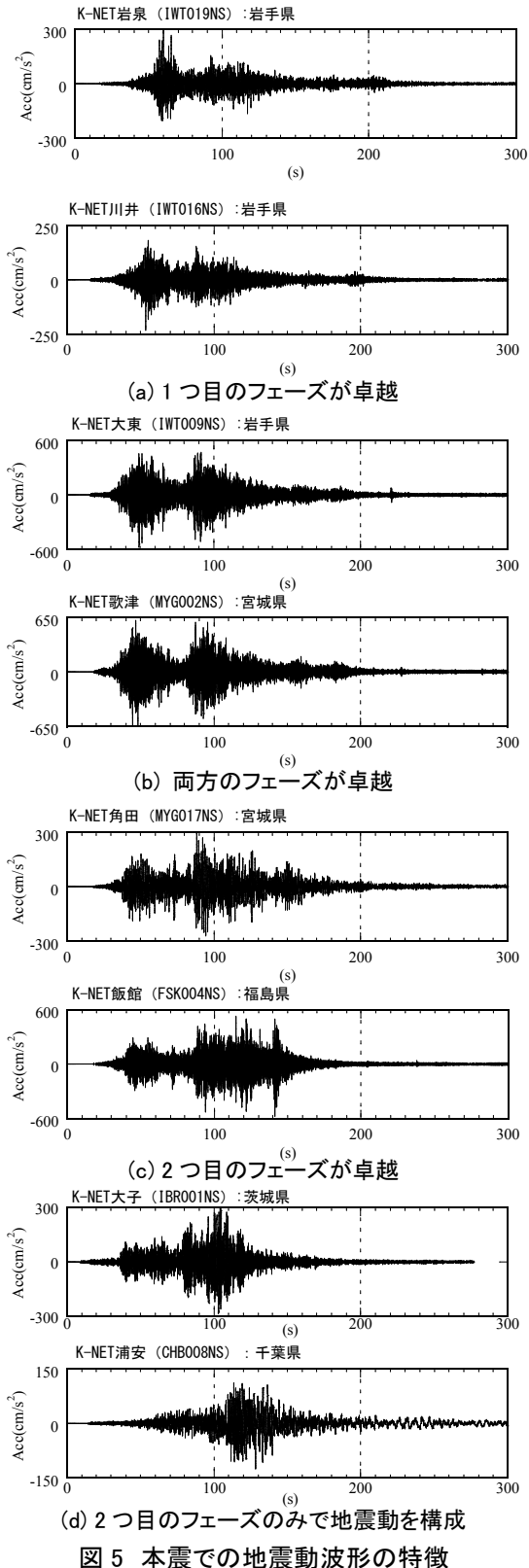
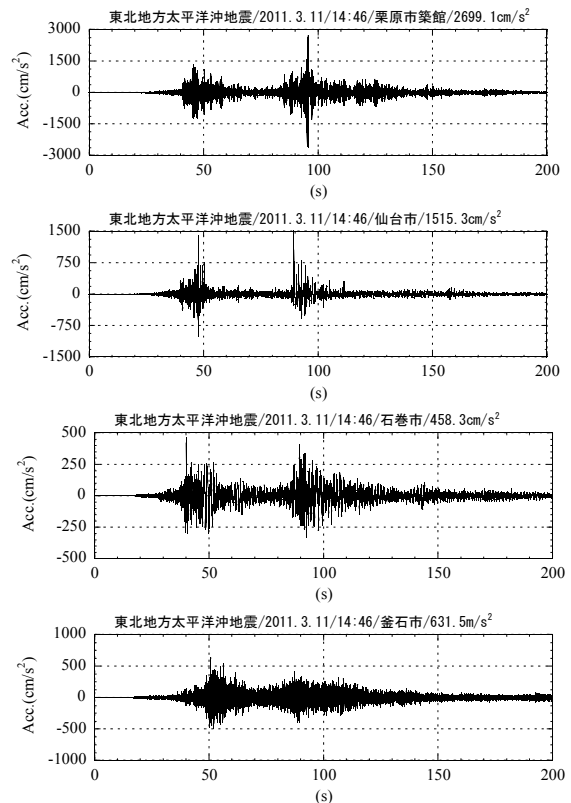


図5(a)より、岩手県北部から中部にかけて1つ目の地震動のフェーズが卓越し、(b)図より岩手県南部から宮城県北部にかけて両方のフェーズが顕著に卓越している。(c)図より宮城県南部から福島県北部

にかけて2つ目のフェーズが卓越し、(d)図より茨城県北部から千葉県にかけて1つ目のフェーズが殆ど見られず2つ目のフェーズで地震動が構成されていることが判る。これは岩手県から千葉県(北から南)に位置する断層面のすべり量が異なっているためと考えている。

次に、3章で述べた被災地の現地調査に関連し、震度7を観測し宮城県栗原市築館(MYG004)、現地調査を実施した仙台市(MYG013)、石巻市(MYG010)及び岩手県釜石市(IWT007)の4箇所の地震動波形(NS成分)と速度応答スペクトルを夫々図6、7に示し、夫々の地震動特性について述べる。なお、東北地方3県(岩手、宮城、福島県)で本震時に観測された地震計は70箇所であった。

図6より、地震発生後25~30秒付近からP波、その後70秒付近までS波が到達している。しかし、その後、2度目のP波とS波が到達しているように見える。本震の震源域が幅200km、長さ500kmと広範囲で、プレート境界の浅い2箇所ですり破壊が生じたためと考えられる。また、この地震は短周期の成分が卓越した地震動で継続時間が非常に長いことが特徴である。地震動の特徴として、築館、仙台市、石巻市は図5(b)と同様に、両方のフェーズが卓越した地震動であり、一方、釜石市は図5(a)と同様に1つ目のフェーズが卓越する地震動である。



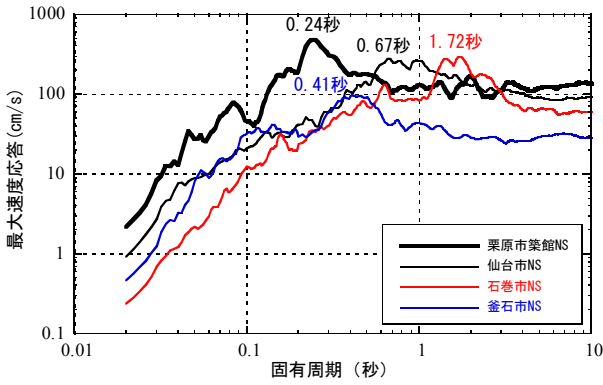


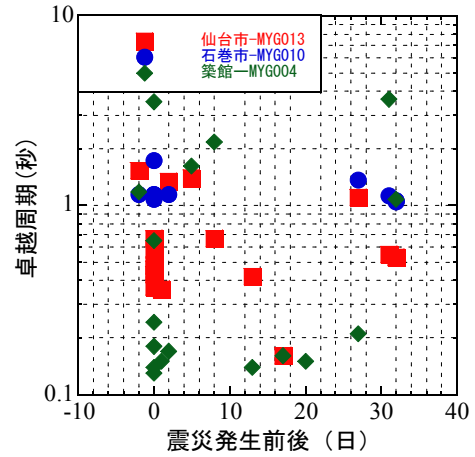
図 7 速度応答スペクトル

図 7 より、石巻市の結果を除き、栗原市築館、仙台市、釜石市の地震動の卓越周期が夫々0.24, 0.67, 0.41 秒の短周期地震動であることが判る。一方、石巻市の卓越周期は他の 3 箇所 비해、やや長く、1.72 秒であることが判る。このことは次節で少し説明したいと思う。本地震では、地震動の卓越周期が 0.8 ~ 2.0 秒付近があまり卓越せず、木造や RC 造の構造物への被害が少なかったと思われる。しかし、東北地方の内陸部では、RC 造では柱のせん断破壊が多く発生していることが報告されている⁶⁾。

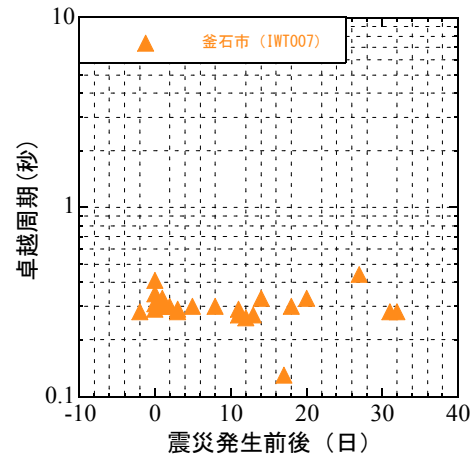
4.2 前震一本震一余震

本震直前の 3 月 9 日午前 11 時 45 分には、ほぼ同緯度でありながら海溝軸よりの三陸沖南部 (北緯 38 度 19 分、東経 143 度 17 分) において M7.2 の三陸沖地震が発生している。この地震を本論では、前震と呼ぶ。前震を含む本地震以後、M6 以上の余震を解析対象の地震動としてサンプリングし、4.1 節の宮城県栗原市築館、仙台市、石巻市、岩手県釜石市における前震、本震、余震の卓越周期を計算した。

図 8 にこれらの結果を示す。図 8(a)より、K-NET 築館では、0.6 秒以下の短周期が卓越する場合と 2.0 秒以上のやや長周期が卓越する場合に区分される。K-NET 築館の地震計設置付近の地盤が内陸であるにもかかわらず液状化現象を発生しており、この影響も十分考慮することが必要である。K-NET 仙台では 0.4~1.5 秒付近が卓越していることが判る。また、K-NET 石巻では 1.0~2.0 秒付近が卓越しており、本震発生後、32 日間はあまり卓越周期の推移が見られない。また、図 8(b)より、K-NET 釜石は本震の震源から約 170km の位置であるが、卓越周期は 0.3~0.4 秒付近を推移し変動していないことが判る。



(a) 宮城県仙台市、石巻市、栗原市築館



(b) 岩手県釜石市

図 8 前震・本震・余震における卓越周期の推移

次に、図 9 には、3 月 9 日から 4 月 12 日までの前震、本震、余震における K-NET 仙台、石巻、築館、釜石までの震央距離に対する地震動の卓越周期が描かれている。図 9 より、K-NET 石巻、釜石、仙台とも震央距離に関係なく、夫々 1.1 秒、0.3 秒、0.5 ~ 1.5 秒付近を推移していることが判る。一方、K-NET 築館では、震央距離が 180km 以内の場合、卓越周期は 0.1~0.2 秒付近を推移し、震央距離が 200km 以上離れた遠地震では、卓越周期が 1.1~3.5 秒の中周期からやや長周期となっていることが判る。これは、K-NET 石巻における土質柱状図を見ると、地表面から深さ 20m まで N 値が 5~20 付近の値を示しており、強震動下では、表層地盤の特性により比較的長い卓越周期になったためと考えている。一方、K-NET 築館では、図 8 の考察で述べたように、地震計の設置付近が液状化を起こしており、そのため、短周期とやや長周期の卓越周期が得られたと推察している。

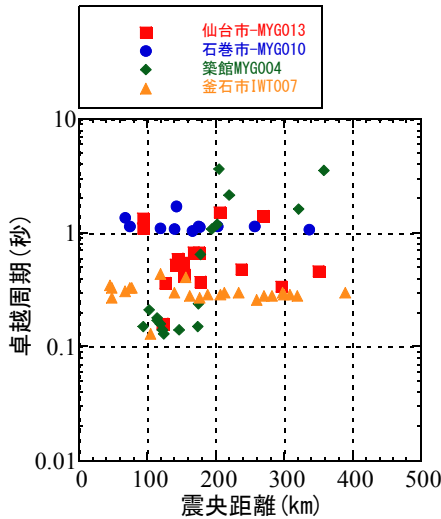


図9 震央距離に対する卓越周期の推移

5. 東北地方太平洋沖地震における非定常ランダム入力モデルの構築

4章で説明したように、本震において、岩手、宮城、福島県で観測された地震動は、震源の深さが比較的浅い海洋型地震である。しかし、震源から500~700km離れた東京、名古屋、大阪ではやや長周期の揺れを観測しており、3都市に存在する超高層ビルが最大13分揺れ続けたことが報道されている⁷⁾。

本章では、本震時、海洋型でかつ中短周期地震動を観測した K-NET 石巻、仙台及びやや長周期地震動を観測した K-NET 大阪の地震動波形を基に、非定常ランダム入力モデルを作成する。これらの入力モデルを作成する手法は、文献 8) に紹介しているので参照されたい。

図 10 には、図 6 で示した K-NET 石巻、仙台、大阪での観測記録に基づく非定常ランダム入力パラメータ (σ_f, ω_g, h_g) が描かれている。ここで、図 10 の左図の縦軸、横軸は夫々、各時刻での振幅包絡線関数 σ_f をその最大値で除した値、時刻 t を表 2 に示す継続時間で除した無次元時間 τ としている。

図 10 より、海洋型 (石巻、仙台) とも振幅包絡線関数 σ_f は、観測記録と同様に 2 つのピークを示す双峰型の形状となっている。地震動の卓越振動数 ω_g は 16~18rad/s 付近を無次元時間 τ に関係なく推移していることが判る。また、スペクトルの形状係数 h_g は概ね 0.47~0.56 付近を推移しているように思える。

一方、やや長周期型 (大阪) の場合、従来の振幅包絡線関数 σ_f と同様に、単峰型を描いており、地震動の卓越振動数 ω_g は長周期特有の時間軸に対し反比例的に変化しており、またスペクトルの形状

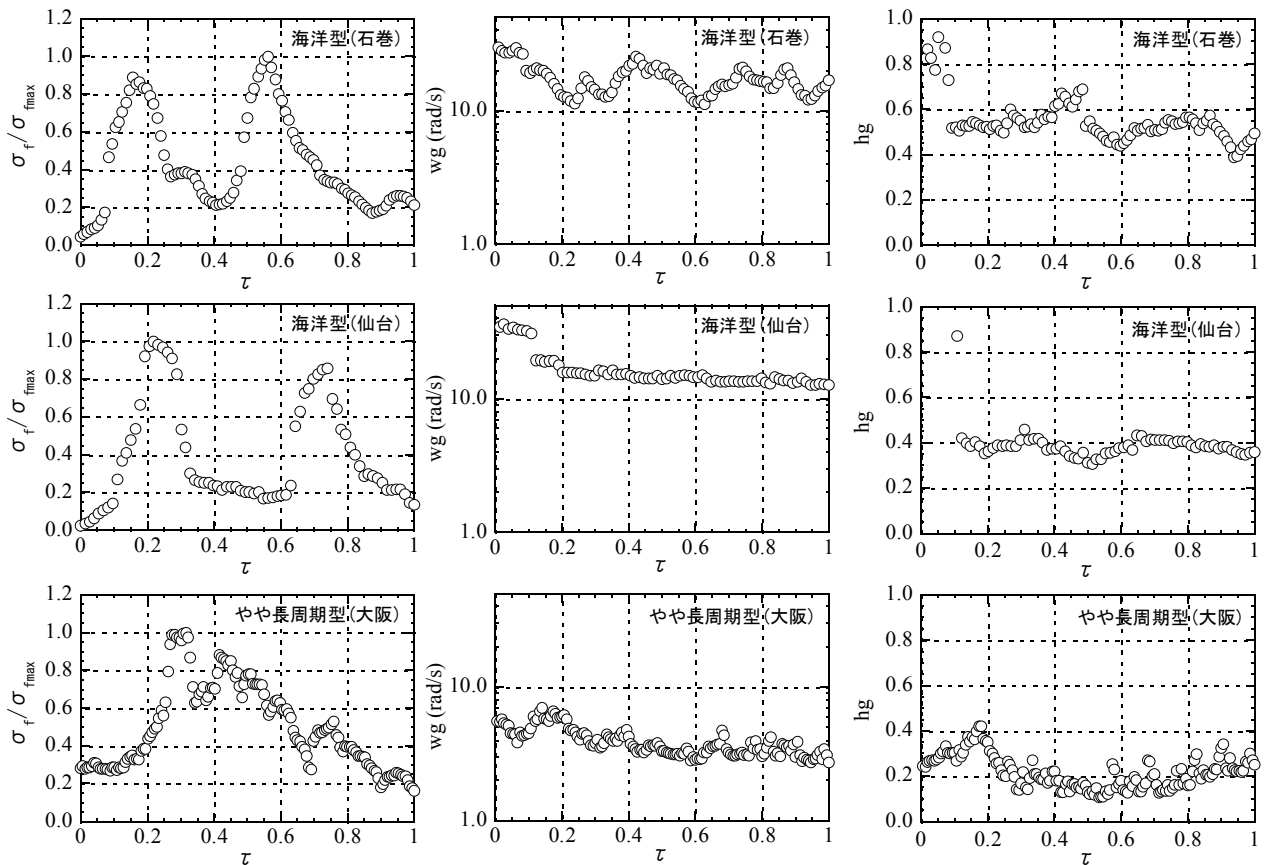


図 10 非定常ランダム地震入力モデル(海洋型, 長周期型)

係数 h_g は 0.16~0.34 付近を推移していることが判る。

図 10 で得られた非定常ランダム入力パラメータの平均値を表 2 に示す。なお、 σ_f は最大速度 100cm/s に規準化している。継続時間 t_d は地震の入力エネルギーが全入力エネルギーの 5~95%になるように計算している。

表 2 非定常ランダム入力モデルの平均値

地震動名	σ_f (cm/s ²)	ω_g (rad/s)	h_g	t_d (s)
海洋型(石巻)	853.6/3	17.52	0.558	90.7
海洋型(仙台)	1658.4/3	16.81	0.476	84.3
長周期型(大阪)	111.9/3	3.93	0.219	104.1

6. まとめ

本論では、平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震の概要、5 月、9 月に実施した宮城県、岩手県における被災地の現地調査及び前震、本震、余震における地震動特性の把握を行った。また、K-NET 石巻、仙台、大阪で観測された本震での地震動波形を用いた非定常ランダム入力モデルの構築を行った。本論から得られた工学的知見は以下の通りである。

- 1) 本地震での岩手県、宮城県、福島県の死者の合計は、15,749 名で全体の 99.6%である。その内、約 92.5%が津波による溺死(うっ血死)である。年齢別の死者数では、60 歳以上が全体の 63.2%であり、兵庫県南部地震の場合と同等である。
- 2) 宮城県、岩手県の現地調査において、石巻市、亶理郡亶理町における津波が浸水した箇所では、津波の波高が 2~5m 以上で木造家屋が流失するなど壊滅的な被害となっている。石巻漁港周辺にある鉄骨造の水産加工工場では主要構造部の被害は見られないが、2 次部材の損傷や ALC パネル、天井材の脱落が多く見られた。また、名取市閑上地区、気仙沼市、釜石市では、鉄骨構造は 1 階の外壁及び 2 次部材がかなりの損傷を受け、骨組みが剥き出しになっている箇所が多い。

- 3) 本地震での震源域が三陸沖中部から茨城県沖までの幅 200km、長さ 500km と広範囲であり、2 つの波形が複合した地震動波形となっており、岩手県北部、中部では第 1 フェーズが、岩手県南部から宮城県北部では第 1、2 フェーズが、宮城県南部と福島県では第 2 フェーズが、茨城県、千葉県では第 1 フェーズが殆ど見られず、第 2 フェーズのみが卓越している。
- 4) K-NET 石巻、仙台、大阪で得られた地震動波形を基に、非定常ランダム入力モデルを作成した結果、海洋型の石巻、仙台では、地震動の振幅包絡線関数 σ_f は双峰型を、やや長周期型では単峰型を示している。地震動の卓越振動数 ω_g において、海洋型では概ね 16.8~17.5rad/s を、やや長周期型では 1.9~7.0rad/s 付近を変動している。なお、本論で得られた非定常ランダム入力モデルは、津波地震に対する人工地盤上の中間層免震構造物群や複合免・制震構造の地震動として採用したいと考えており、研究結果については稿を改めて論じたいと思う。

参考文献

- 1) 警察庁ホームページ、
<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm>
- 2) (独) 防災科学研究所：地震観測システム K-NET
- 3) 消防庁ホームページ、
<http://www.fdma.go.jp/bn/2011/>
- 4) 岡田義光：最新日本の地震地図、東京書籍、pp.57~58、(2006)
- 5) 気象庁ホームページ、
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/daily_map/sendai/index.html
- 6) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、丸善出版、2011.7
- 7) 朝日新聞朝刊、平成 23 年 4 月 19 日
- 8) 中川肇：K-NET を用いた地震観測記録に基づく非定常ランダム入力モデルの構築、明石高専研究紀要、第 51 号、pp.39~44、(2008)