

2. 石油コンビナート地域等で観測された地震動の特徴

2.1 消防研究センターによる石油コンビナート地域等における強震観測

平成 23 年（2011 年）3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震が発生した際、消防研究センターでは石油コンビナート地域等 25 箇所で広帯域速度型強震計による強震観測を行っていた（表 2.1.1 及び図 2.1.1）。これら 25 の観測点のうち、23 地点は石油コンビナート等特別防災区域（特防区域）内にあり、残りの 2 地点は、平成 18 年まで特防区域に指定されていた旧尼崎特防区域内と東京都調布市内の消防研究センターにある。

東北地方太平洋沖地震の本震記録は、25 の観測点うち **FRISEN**（仙台）観測点を除く 24 地点で得られた。消防研究センターが設置している観測装置では、ほとんどの観測点において、地震記録が取得された後、公衆電話回線、インターネット回線を経由して地震記録が電子メールに添付される形で送信されてくる仕組みになっているが、**FRISEN** からは地震記録が送信されてこなかった。また、**FRISEN** の記録装置は、地震に伴う津波により押し流されてしまい、4 月 12 日に現地に向いた際にも記録装置を発見することができず、結局、**FRISEN** の記録は回収することができなかった。

ここでは、東京湾岸及び新潟地域以北の消防研究センター観測点で記録された東北地方太平洋沖地震の本震等の地震動の特徴を述べるとともに、関東東北地方太平洋岸の特防区域周辺のお他機関強震観測点で記録された地震動の特徴にもふれることとする。

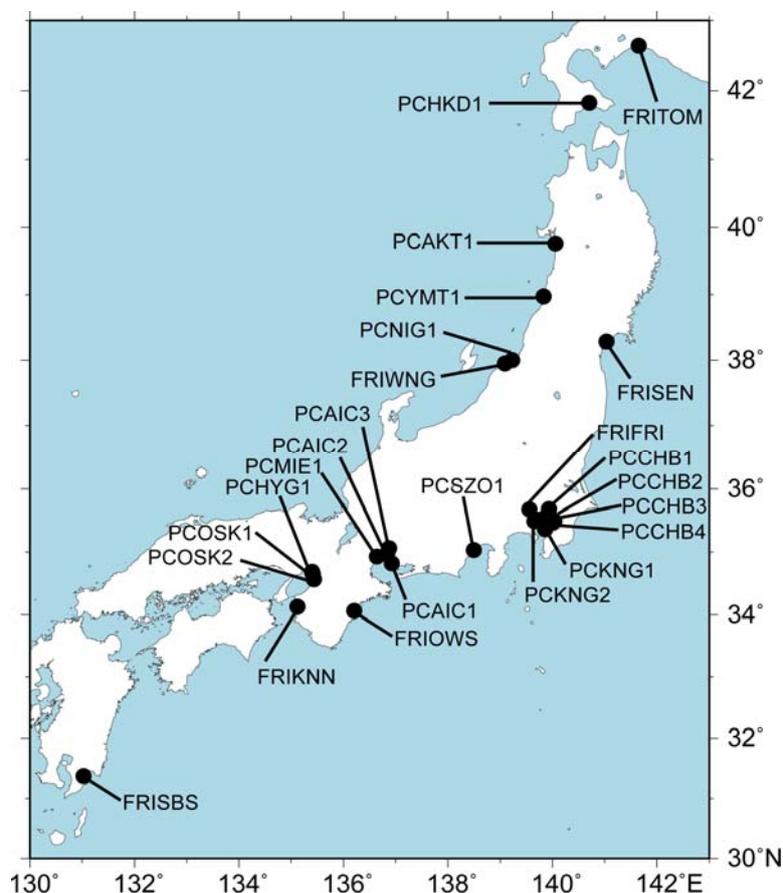


図 2.1.1 石油コンビナート地域等における消防研究センターの強震観測点。

表 2.1.1 石油コンビナート地域等における消防研究センターの強震観測点

設置地点名	観測点 コード	特防区域	地域区分※
苫小牧西港	FRITOM	苫小牧	イ
上磯	PCHKD1	北斗	ハ
秋田	PCAKT1	秋田	ハ
酒田	PCYMT1	酒田	イ
市川	PCCHB1	京葉臨海北部	ロ
市原	PCCHB2	京葉臨海中部	ロ
袖ヶ浦	PCCHB3	京葉臨海中部	ロ
君津	PCCHB4	京葉臨海南部	ロ
川崎水江	PCKNG1	京浜臨海	ロ
横浜	PCKNG2	京浜臨海	ロ
新潟東港	PCNIG1	新潟東港	イ
新潟西港	FRIWNG	新潟西港	イ
清水	PCSZO1	清水	ハ
武豊	PCAIC1	衣浦	ハ
知多	PCAIC2	名古屋臨海	ハ
名古屋	PCAIC3	名古屋臨海	ハ
四日市	PCMIE1	四日市臨海	ハ
大阪櫻島	PCOSK1	大阪北港	ハ
堺	PCOSK2	堺泉北臨海	ハ
仙台	FRISEN	仙台	その他
尾鷲	FRIOWS	尾鷲	その他
海南	FRIKNN	和歌山北部臨海中部	その他
志布志	FRISBS	志布志	その他
尼崎	PCHYG1		その他
調布消研	FRIFRI		その他

※危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示第4条の20第2項第3号において定められている液面揺動の水平設計震度の地域区分。

2.2 東京湾岸の特防区域の地震動の特徴

2.2.1 地動速度波形

図 2.2.1～図 2.2.3 に、PCCHB2（市原）、PCKNG1（川崎水江）、PCCHB1（市川）の3観測点における14時44分から1時間分の地動速度波形をそれぞれ示す。記録先頭約200秒後から始まる揺れは、14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震の本震（Mw9.0）のものである。PCCHB2とPCKNG1では大きな揺れは300秒程度にわたって継続している。PCCHB1での大きな揺れの継

続時間はより長い。最大振幅は、PCCHB2、PCKNG1、PCCHB1 でそれぞれ 25cm/s、36cm/s、30cm/s である。

記録先頭約 1950 秒後から始まる揺れは、15 時 15 分頃に茨城県沖で発生したこれまでのところの最大余震 (M7.7) のものである。最大余震時の最大振幅は、本震のそれに比べておおむね半分程度である。

PCCHB1 の波形の水平動成分には、他の 2 観測点に見られないような長周期の成分のっており、いびつな波形になっている。6 月 21 日に現地に赴いたところ、強震計が設置されている建屋周辺に憤砂の痕跡が見られた。このことなどから、このいびつな波形は地盤の液状化の影響によるものと考えられる。PCCHB1 の記録が、最大余震の途中から途切れているのは停電のためである。

2.2.2 長周期の地震動

まず、東北地方太平洋沖地震の本震時の東京湾岸の特防区域における長周期の揺れの程度と、平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震の際に、浮き屋根式石油タンクに火災、浮き屋根沈没の等の甚大な液面揺動被害が発生した北海道苫小牧市内の製油所内における長周期の揺れの程度を比べる。図 2.2.4 と図 2.2.5 に、東京湾岸千葉県側及び神奈川県側の特防区域における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトル (減衰 0.5%) をそれぞれ示す。描かれている疑似速度応答値は、水平動 2 成分の幾何平均である。前述のとおり PCCHB1 (市川) の地震記録は、地盤の液状化の影響を受けているため、参考記録として扱うべきと考え、スペクトルは点線で示している。これらの図中「2003 Refinery」が、十勝沖地震の際に、苫小牧市内の製油所内で記録された揺れの疑似速度応答スペクトルである。また、消防法令で定められている長周期地震動の大きさとの比較のため、これらの図には、危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示 (昭和 49 年自治省告示第 99 号、告示) 第 4 条の 20 第 2 項第 3 号において東京湾岸の特防区域に対して定められている液面揺動の水平設計震度に相当する疑似速度応答 (「Kh2 for Tokyo Bay」、速度応答告示スペクトル) も示した。PCCHB1 (市川) を除く千葉県側の観測点及び神奈川県側の観測点における周期 3~10 秒程度の長周期帯域の速度応答値はともに、十勝沖地震の際の苫小牧市内の製油所内における速度応答値を超えていない。また、告示スペクトルが定められている周期 3~15 秒の全帯域にわたって、本震時の速度応答値は告示スペクトルを超えていない。

次に、東北地方太平洋沖地震の本震時と最大余震時の長周期の揺れの程度を比べる。最大余震の震央は、本震の震央よりも東京湾岸からの距離が近いこと、両者のスペクトルのレベルを見比べておくことは意味があると思われる。図 2.2.6 に、PCCHB2 (市原)、PCCHB4 (君津)、PCKNG1 (川崎水江)、PCKNG2 (横浜) の 4 観測点での本震時と最大余震時の揺れの疑似速度応答スペクトルを示す。図 2.2.4 からわかるように、PCCHB2 (市原) と PCCHB3 (袖ヶ浦) の長周期の揺れの程度はおおむね同様であるので、PCCHB3 (袖ヶ浦) のスペクトルは描かなかった。また、地盤の液状化の影響を受けている PCCHB1 (市川) のスペクトルも割愛した。周期 3~15 秒の長周期帯域で、最大余震時の速度応答値は本震時よりも小さい。詳しく見ると、千葉県側の PCCHB2 (市原) と PCCHB4 (君津) では、周期 4 秒付近と周期 6~8 秒の帯域で、本震と最大余震で同程度の速度応答値となっている。また、神奈川県側の PCKNG1 (川崎水江)、PCKNG2 (横浜) では、周期 6 秒弱において本震と最大余震の速度応答値が同程度となっている。

2.2.2 短周期の地震動

図 2.2.7 に、本震時に東京湾岸の観測点で記録された揺れの加速度応答スペクトル(減衰 10%)を示す。地盤の液状化の影響を受けている PCCHB1 (市川) のスペクトルは点線で描いている。消防法令で定められている短周期地震動の大きさとの比較のため、この図には、石油タンクの側板に発生する応力等の照査に用いるものとして、告示第 4 条の 20 第 2 項第 1 号において、地域別補正係数 1.0 と四種地盤に対して定められている水平設計震度に相当する加速度応答(「Kh1」、側板発生応力等に係る加速度応答告示スペクトル)と必要保有水平耐力の計算に用いるものとして、告示第 79 条第 2 号において定められている塑性設計係数 $v_p=1.5$ を乗じた後の水平設計震度に相当する加速度応答(「Kh1 $\times v_p$ 」、必要保有水平耐力に係る加速度応答告示スペクトル)も示した。PCCHB1 (市川) も含め、本震時の揺れの加速度応答値は、側板発生応力等に係る加速度応答告示スペクトルよりも小さい。

次に、東北地方太平洋沖地震の本震時と最大余震時の短周期の揺れの程度を比べる。図 2.2.8 に、図 2.2.6 と同じく 4 観測点での本震時と最大余震時の揺れの加速度応答スペクトルを示す。最大余震時の加速度応答値は本震時よりも基本的に小さい。しかし、PCCHB2 (市原) では、周波数 2Hz 程度より低い周波数では、両者の大きさは同程度であり、周波数によっては最大余震のほうが大きいところもある。

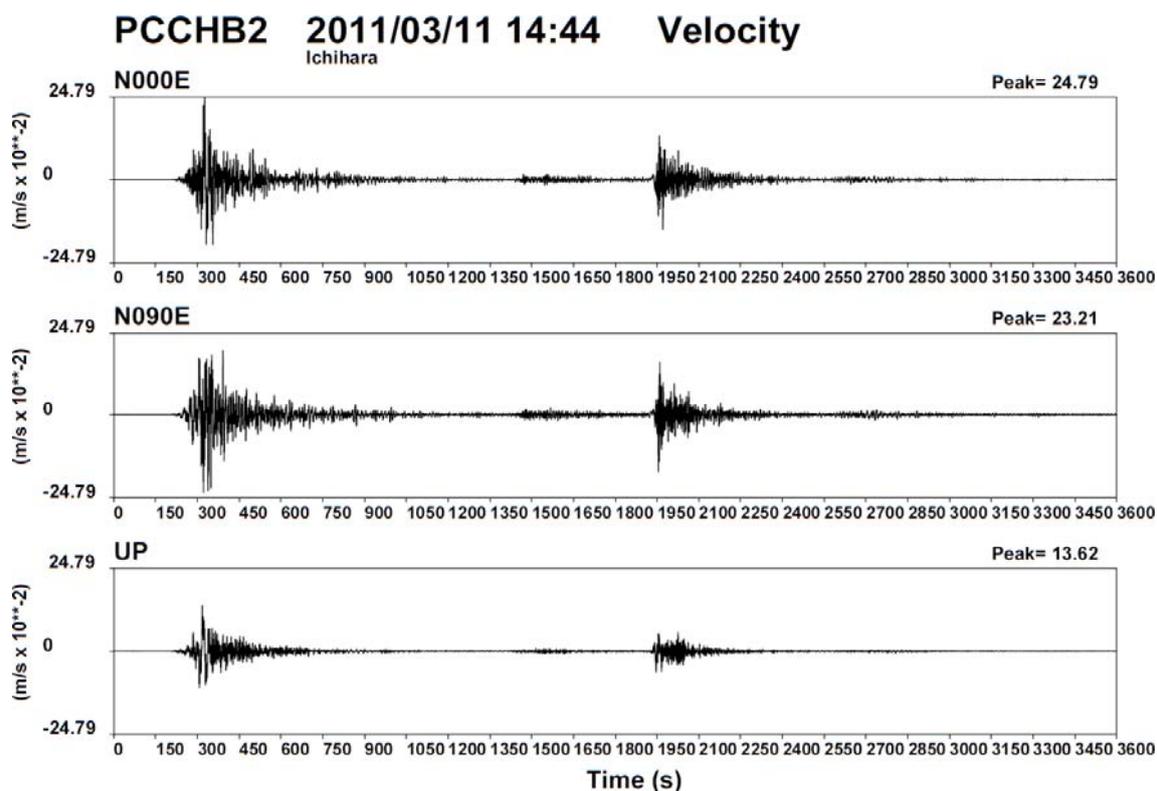


図 2.2.1 PCCHB2 (市原) 観測点で記録された地動速度波形。

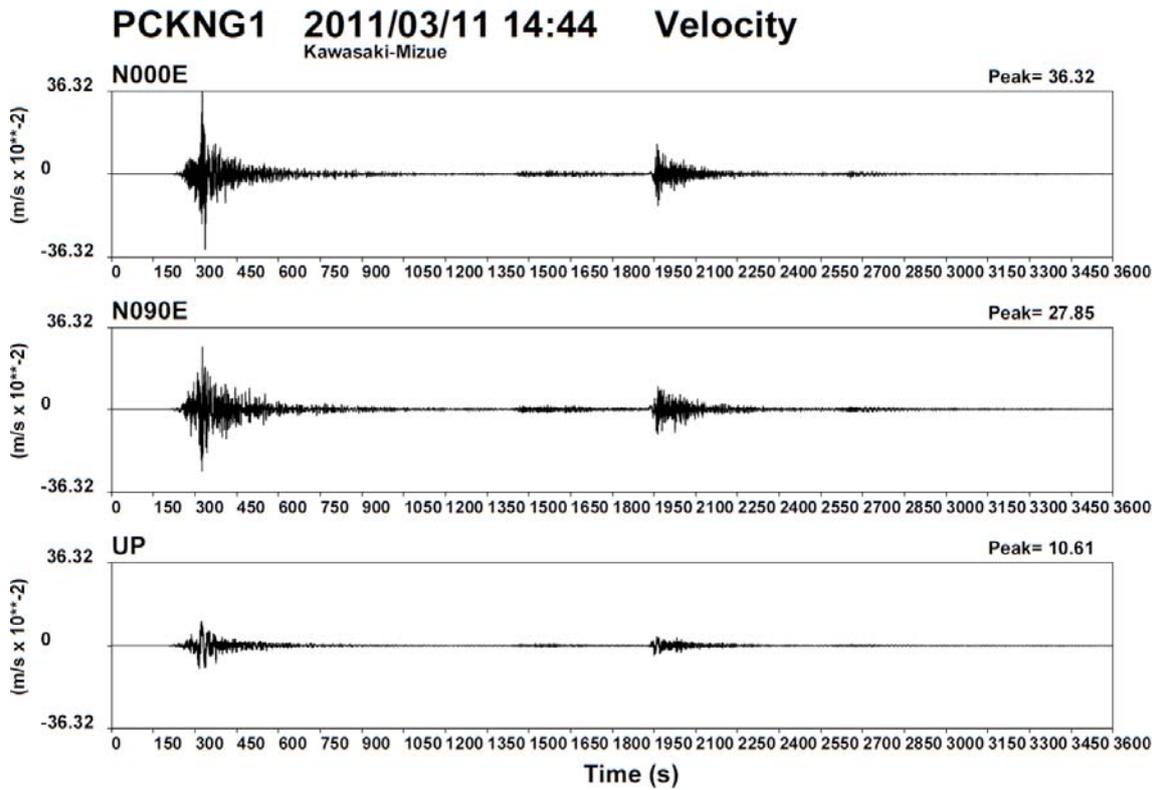


図 2.2.2 PCKNG1 (川崎水江) 観測点で記録された地動速度波形。

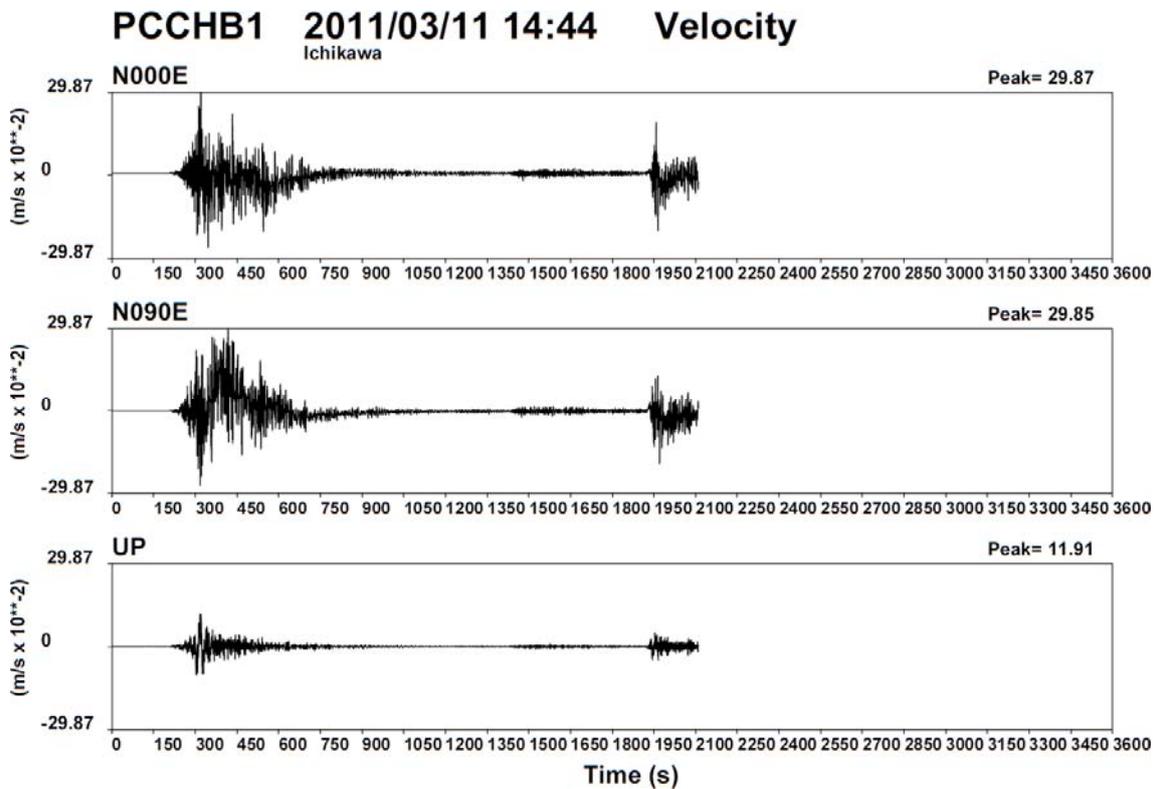


図 2.2.3 PCCHB1 (市川) 観測点で記録された地動速度波形。

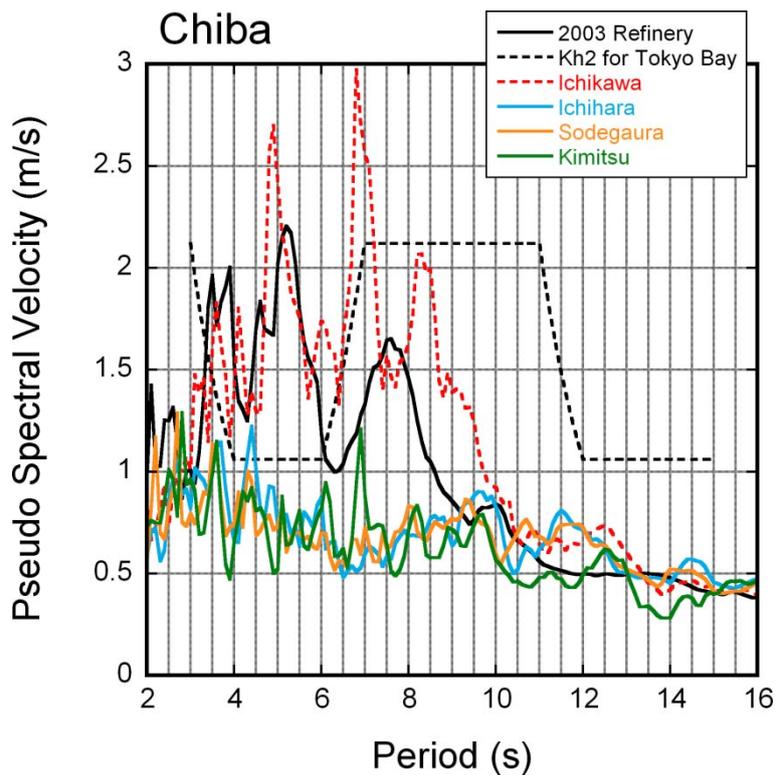


図 2.2.4 東京湾岸千葉県側の特防区域における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

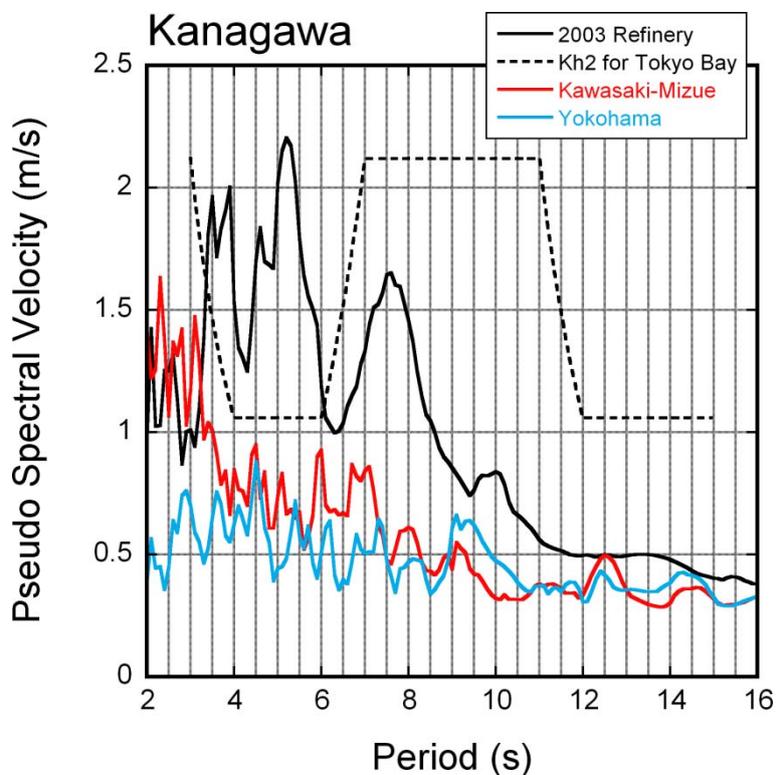


図 2.2.5 東京湾岸神奈川県側の特防区域における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

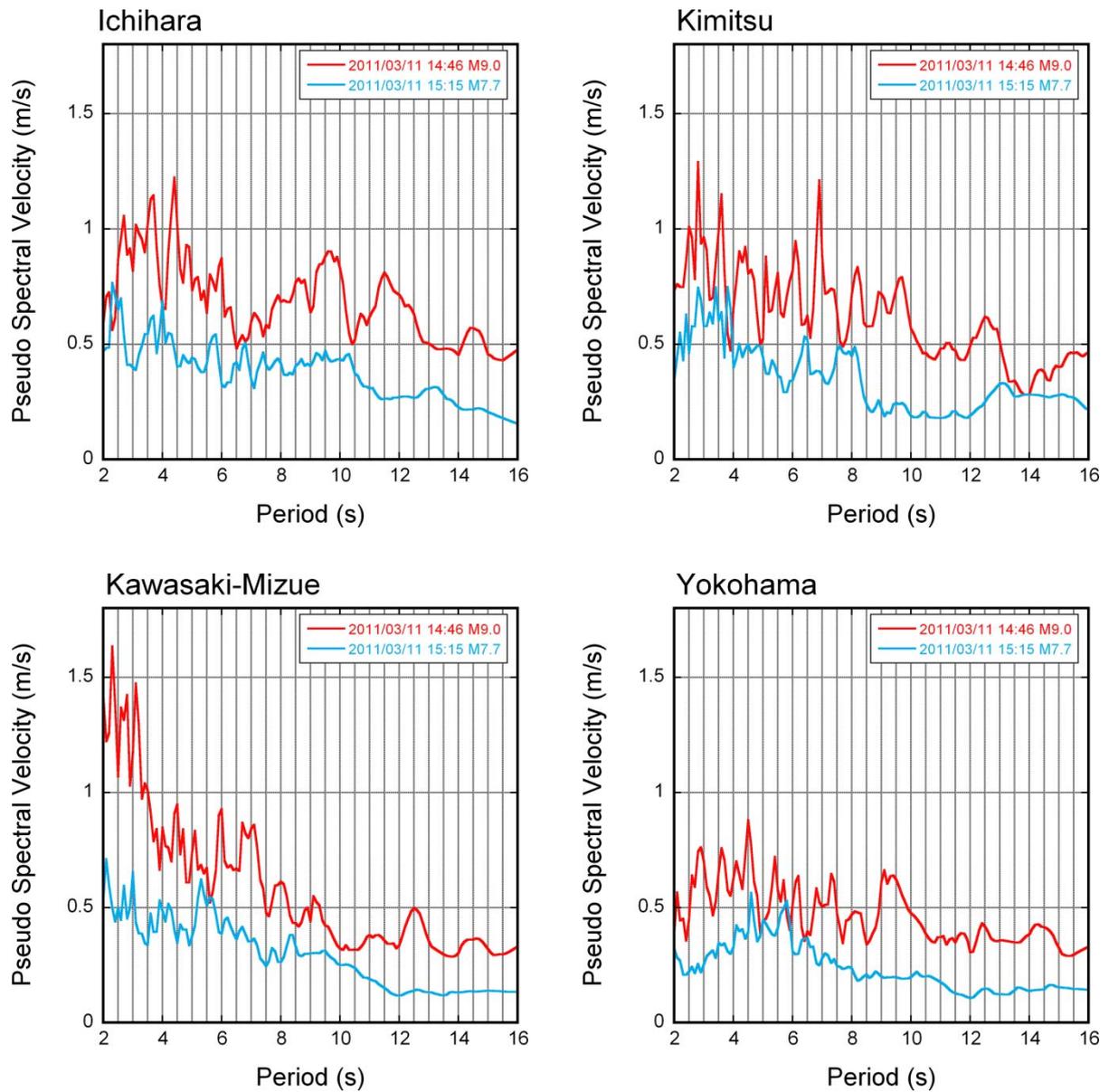


図 2.2.6 東京湾岸の観測点における本震時と最大余震時の揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

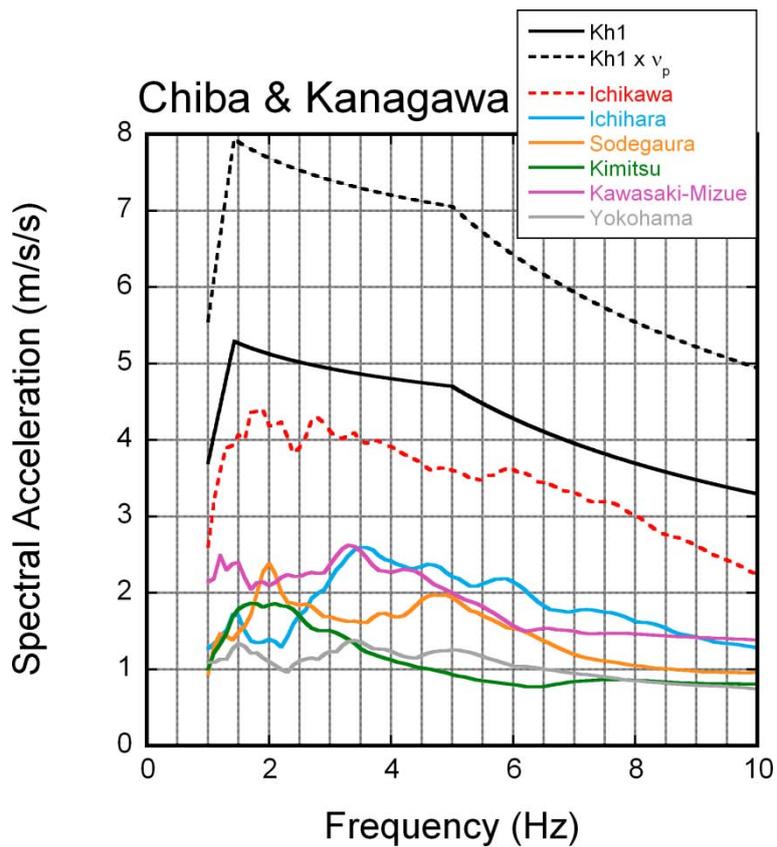
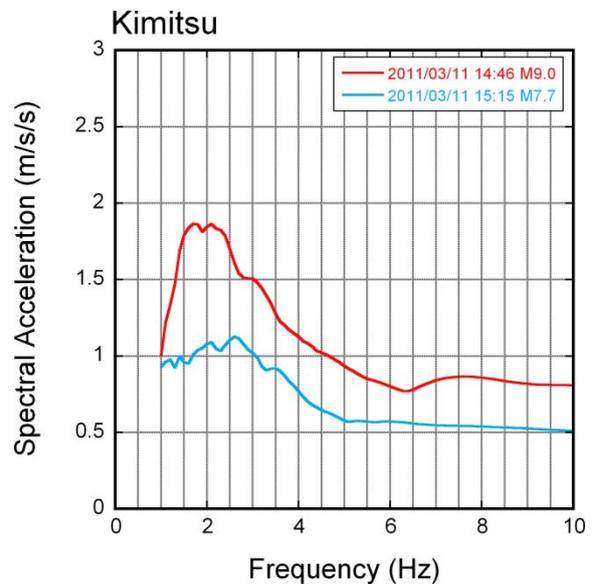
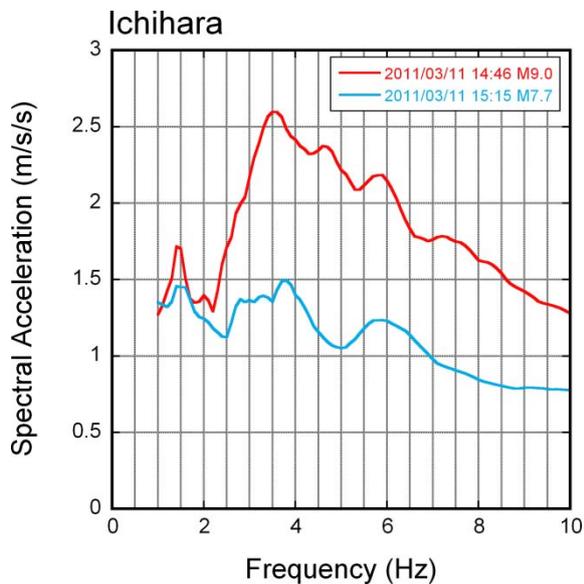


図 2.2.7 東京湾岸の特防区域における本震時の揺れの加速度応答スペクトル（減衰 10%）。加速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。



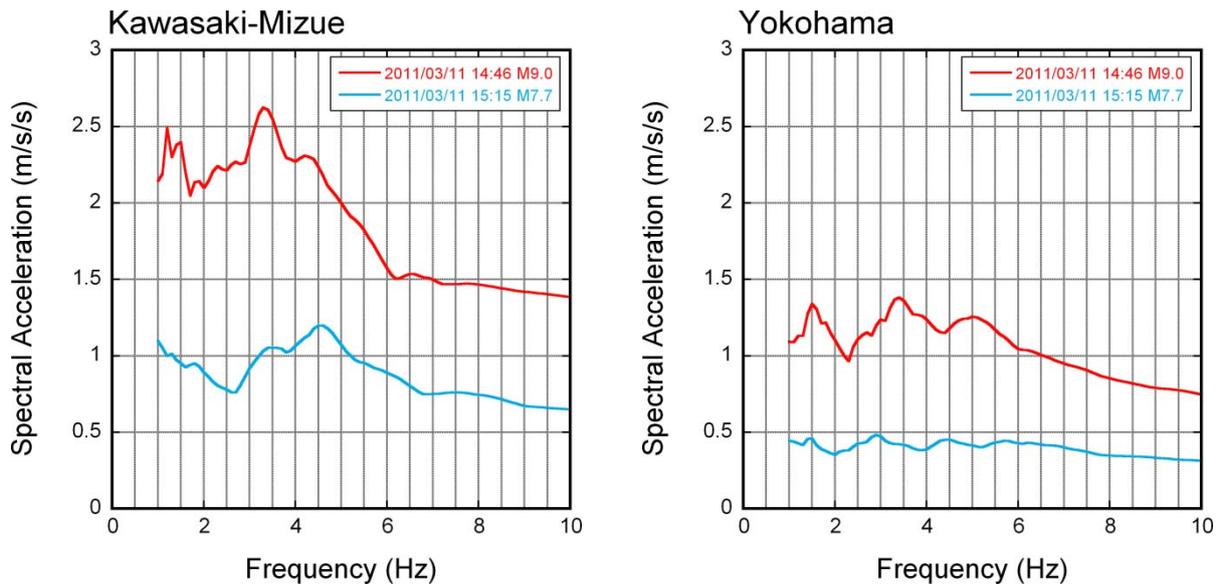


図 2.2.8 東京湾岸の観測点における本震時と最大余震時の揺れの加速度応答スペクトル（減衰 10%）。加速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

2.3 東北地方日本海沿岸地域、新潟地域、北海道の特防区域の長周期地震動の特徴

東北地方日本海沿岸地域及び新潟地域は、震源から比較的遠いため、ここでは長周期地震動の特徴のみ述べることにする。

図 2.3.1 に、秋田特防区域（PCAKT1）と酒田特防区域（PCYMT1）内の消防研究センター観測点で東北地方太平洋沖地震の本震時に記録された揺れの疑似速度応答スペクトルを示す。「Kh2 for Sakata」と「Kh2 for Akita」はそれぞれ、酒田特防区域と秋田特防区域に対する速度応答告示スペクトルである。酒田特防区域における長周期の揺れの大きさは、周期 5 秒強及び周期 8 秒弱の一部の周期を除いて、平成 15 年（2003 年）十勝沖地震の際に苫小牧市内の製油所内で観測されたもの（「2003 Refinery」）に匹敵している。酒田特防区域におけるこの長周期の揺れは、東北地方太平洋沖地震の本震時に消防研究センター観測点で観測されたものの中では最大である。酒田特防区域に対する速度応答告示スペクトルとの比較では、ごく一部の周期を除き、観測された揺れは告示スペクトルを下回っている。秋田特防区域における長周期の揺れは、酒田特防区域に比べると大きくない。

図 2.3.2 は、新潟東港特防区域（PCNIG1）と新潟西港特防区域（FRIWNG）内の消防研究センター観測点における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトルである。「Kh2 for Niigata」はこれらの特防区域に対する速度応答告示スペクトルである。周期 10 秒よりも短い周期では、本震時の揺れは、十勝沖地震の際に苫小牧市内の製油所内で観測されたもの（「2003 Refinery」）よりも小さいが、周期 10 秒よりも長い周期では、「2003 Refinery」を上回っている。十勝沖地震の規模は Mw8.0、東北地方太平洋沖地震の本震は Mw9.0 であり、この規模に違いによる震源からの長周期成分の放射に関する周期特性の違いが現れたものと考えられる。新潟東港と新潟西港の比較では、新潟東港よりも新潟西港のほうでより大きな長周期の揺れが観測されたことがわかる。

図 2.3.3 は、苫小牧特防区域（FRITOM、苫小牧西港）と上磯特防区域（PCHKD1）内の消防研究センター観測点における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトルである。FRITOM（苫小牧西港）は、「2003 Refinery」の記録が得られたのと同じ製油所内に設置されている。「Kh2 for Tomakomai」

と「Kh2 for Sakata」はそれぞれ、苫小牧特防区域と上磯特防区域に対する速度応答告示スペクトルである。苫小牧西港における東北地方太平洋沖地震本震時の長周期の揺れは、このグラフに示されている周期範囲では十勝沖地震時よりも小さい。なお、より長い周期を見ると、東北地方太平洋沖地震本震時のほうが大きい。上磯特防区域における揺れは、周期4秒よりも短い周期では苫小牧特防区域よりも大きい、周期4秒よりも長い周期では苫小牧特防区域に及ばない。

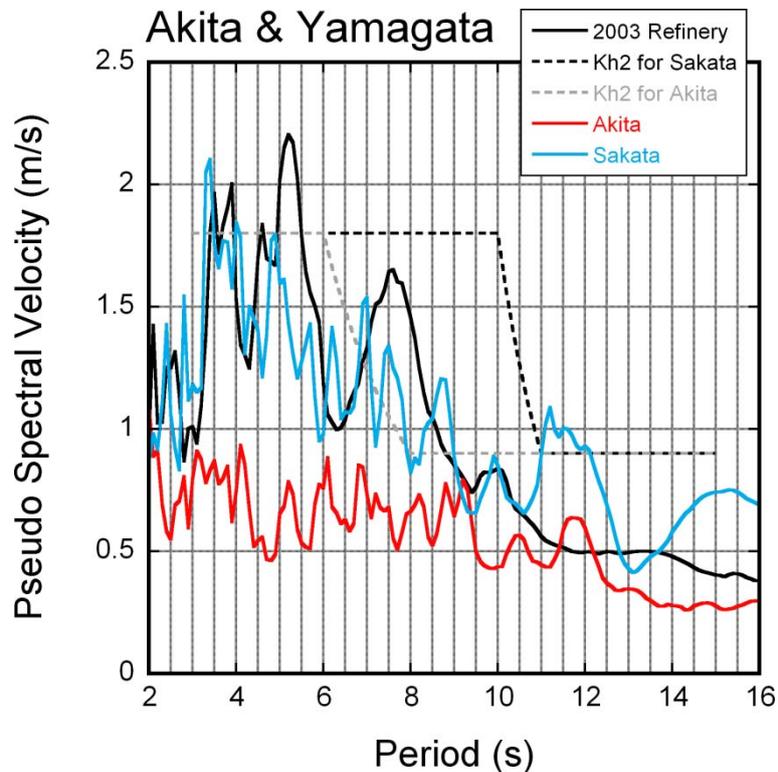


図 2.3.1 秋田特防区域と酒田特防区域における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

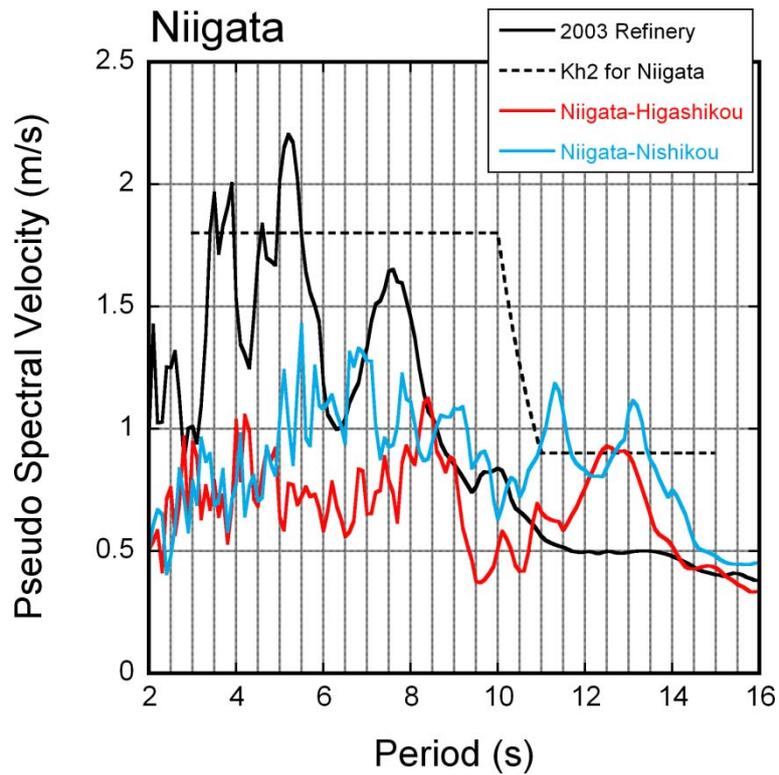


図 2.3.2 新潟東港特防区域と新潟西港特防区域における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

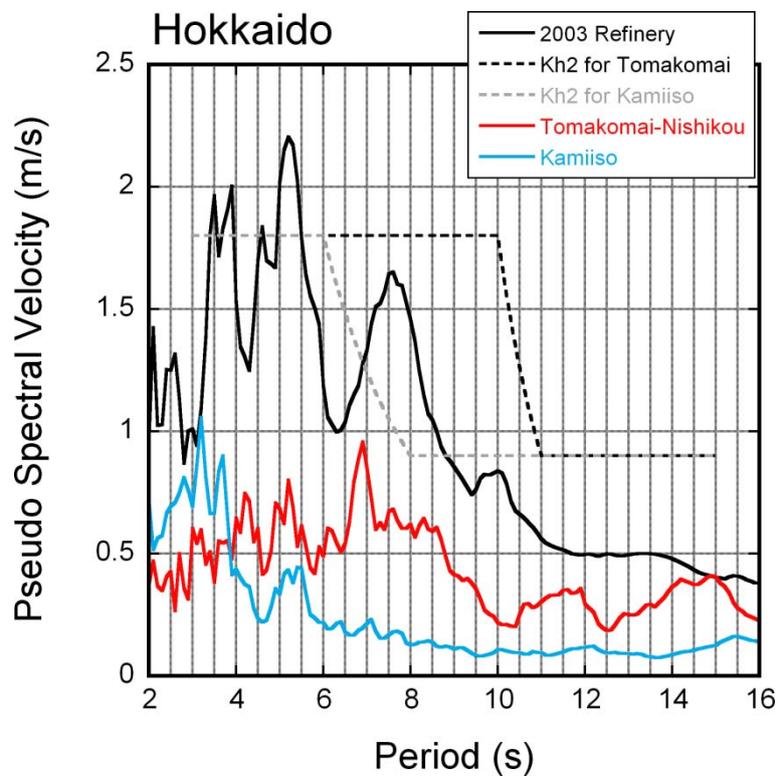


図 2.3.3 苫小牧特防区域と上磯特防区域における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

2.4 東北地方太平洋沿岸地域の特防区域周辺の地震動の特徴

2.4.1 地動加速度波形

東北地方太平洋沿岸地域の特防区域では唯一の消防研究センター観測点であった FRISEN（仙台）は 2.1 で述べたように津波で押し流れたしまったことなどから、地震記録が回収できなかった。そこで、ここでは東北地方太平洋沿岸地域の特防区域の周辺に位置する他機関の強震観測点で東北地方太平洋沖地震の本震時に得られた強震記録を用いて、特防区域周辺の揺れについて述べることにする。ここで用いる強震記録は、独立行政法人防災科学技術研究所の K-NET 及び KiK-net 並びに国土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所の港湾地域強震観測によるものである。

図 2.4.1 に用いた強震記録の地動加速度波形を示す。これらの観測点と特防区域の位置関係は、図 2.4.2 及び図 2.4.3 に示されている。Kamaishi-G（港湾地域強震観測釜石港）を境にそれよりも北にある観測点（Kamaishi-G よりも上側の波形）に比べて、南にある観測点（Kamaishi-G よりも下側の波形）のほうで、より大きな地動加速度が記録されたことがわかる。

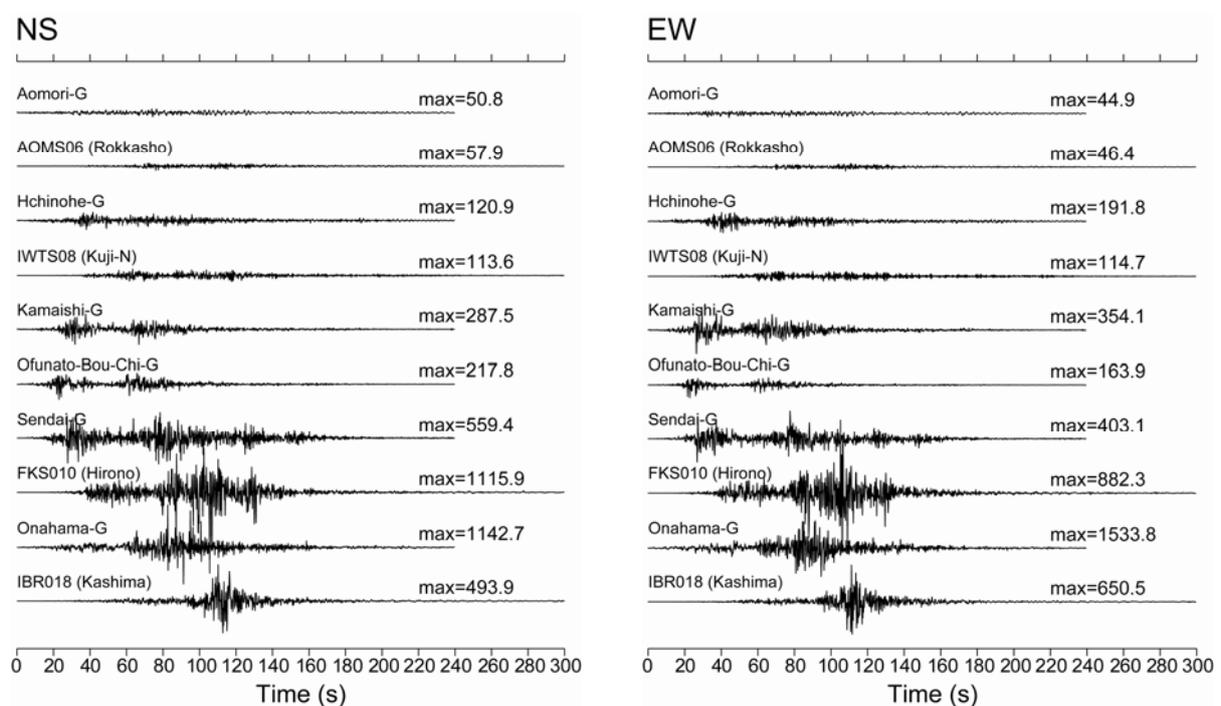


図 2.4.1 東北地方太平洋沿岸地域の特防区域周辺の強震観測点で記録された東北地方太平洋沖地震の本震時の地動加速度波形。（左）南北成分。（右）東西成分。

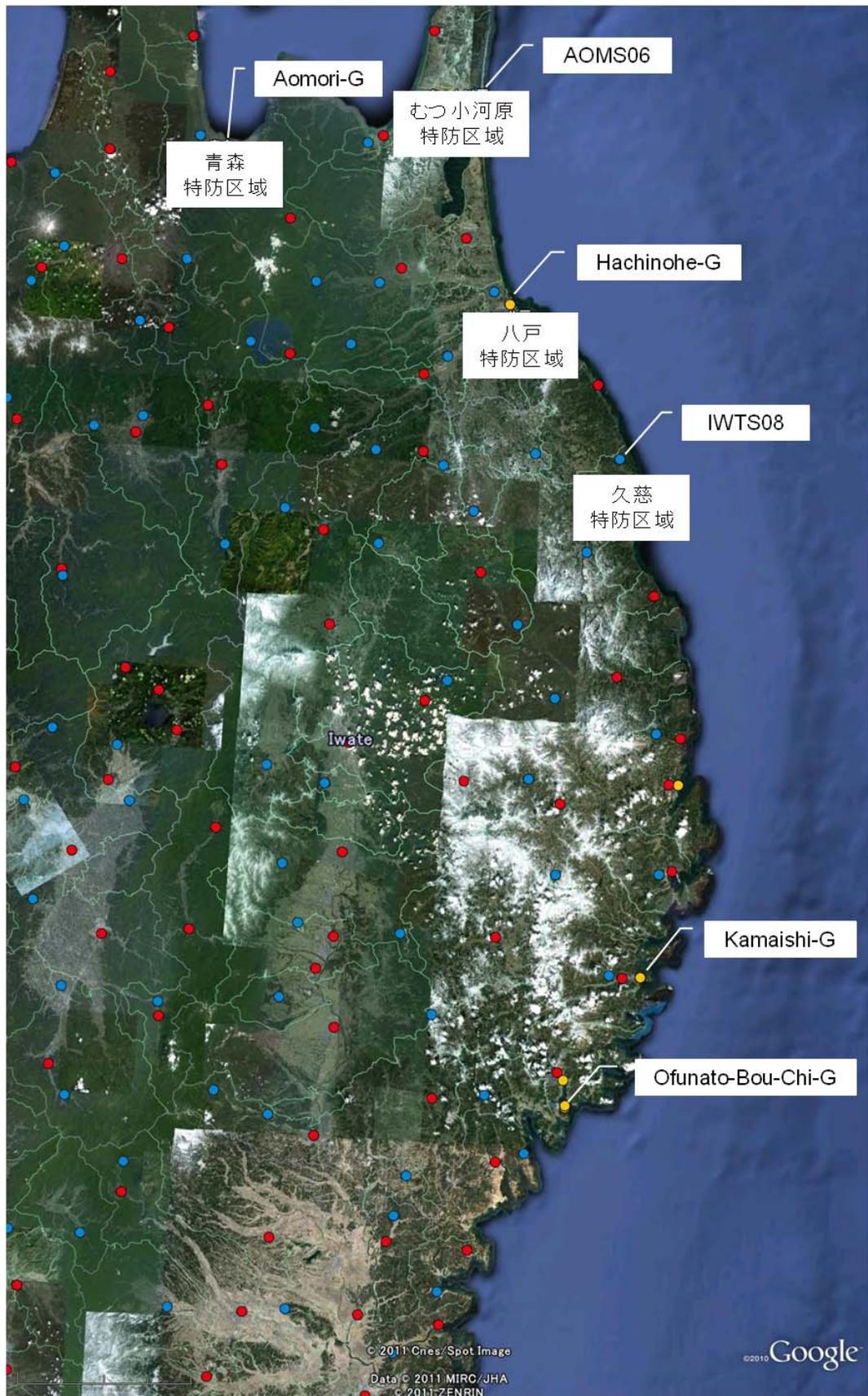


図 2.4.2 東北地方太平洋沿岸北部の特防区域と周辺の強震観測点。



図 2.4.3 東北地方太平洋沿岸南部及び茨城県沿岸の特防区域と周辺の強震観測点。

2.4.2 長周期の地震動

図 2.4.4 に、青森 (Aomori-G)、むつ小川原 (AOMS06)、八戸 (Hachinohe-G)、久慈 (IWTS08) の各特防区域周辺の強震観測点における本震時の揺れの疑似速度応答スペクトルを示す。Aomori-G では、周期 4 秒以下の帯域に速度応答値 1m/s を超える成分がある。Hachinohe-G の周期 4 秒以下の速度応答値も Aomori-G ほどではないがやや大きい。AOMS06 と IWTS08 における長周期の揺れは、これら 4 つの観測点の中では小さい。これら 4 つの観測点の速度応答値は、「2003 Refinery」に及ばない。

図 2.4.5 は、仙台 (Sendai-G)、広野 (FKS010)、いわき (Onahama-Ji-G)、鹿島臨海 (IBR018) の各特防区域周辺の強震観測点における疑似速度応答スペクトルである。Sendai-G を除く 3 つの観測点では、周期 7 秒以下の帯域に速度応答値 1m/s を超える成分があり、それらの中には「2003 Refinery」に迫る大きさのものがある。Sendai-G における長周期の揺れは、これら 4 つの観測点の中では小さい。

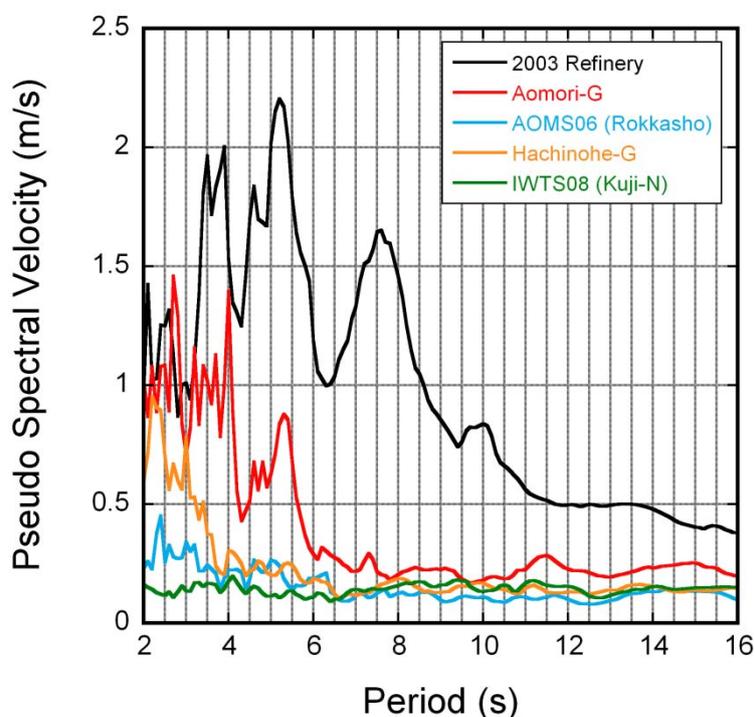


図 2.4.4 東北地方太平洋沿岸北部の特防区域周辺の強震観測点における揺れの疑似速度応答スペクトル (減衰 0.5%)。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

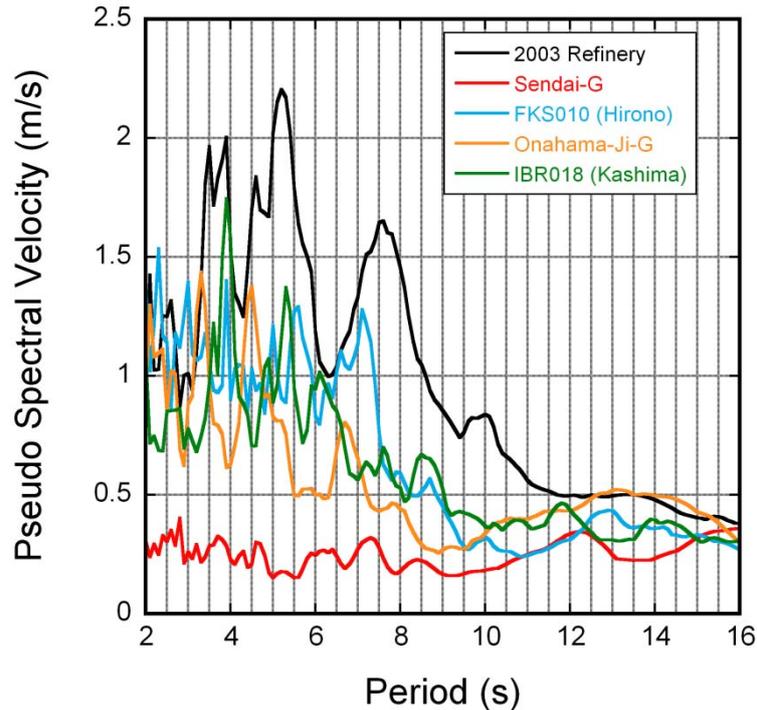


図 2.4.5 東北地方太平洋沿岸南部及び茨城県沿岸の特防区域周辺の強震観測点における揺れの疑似速度応答スペクトル（減衰 0.5%）。疑似速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

2.4.3 短周期の地震動

図 2.4.6 に、図 2.4.4 と同じく青森（Aomori-G）、むつ小川原（AOMS06）、八戸（Hachinohe-G）、久慈（IWTS08）の各特防区域周辺の強震観測点における本震時の揺れの加速度応答スペクトルを示す。これらの 4 つの観測点における加速度応答値は、側板発生応力等に係る加速度応答告示スペクトルを下回っている。

図 2.4.7 は、仙台（Sendai-G）、広野（FKS010）、いわき（Onahama-Ji-G）、鹿島臨海（IBR018）の各特防区域周辺の強震観測点における加速度応答スペクトルである。これらの観測点での加速度応答値は、周波数 3Hz 程度より高い周波数帯域において、必要保有水平耐力に係る加速度応答告示スペクトルをも上回っている。とくに FKS010 の加速度応答値の大きさが目立つ。図 2.2.7 で見たように、観測点周辺の地盤で液状化が発生した PCCHB1 における加速度応答値が、他の観測点に比べて際だって大きいこと、Onahama-Ji-G で記録された本震時の地動加速度波形にはサイクリックモビリティの特徴が指摘されていること（本報告書 3.8.1 参照）から、これら 4 つの観測点での大きな加速度応答値を解釈する際は、観測点周辺の地盤の非線形挙動や変状などの影響も考慮する必要があるのかもしれない。

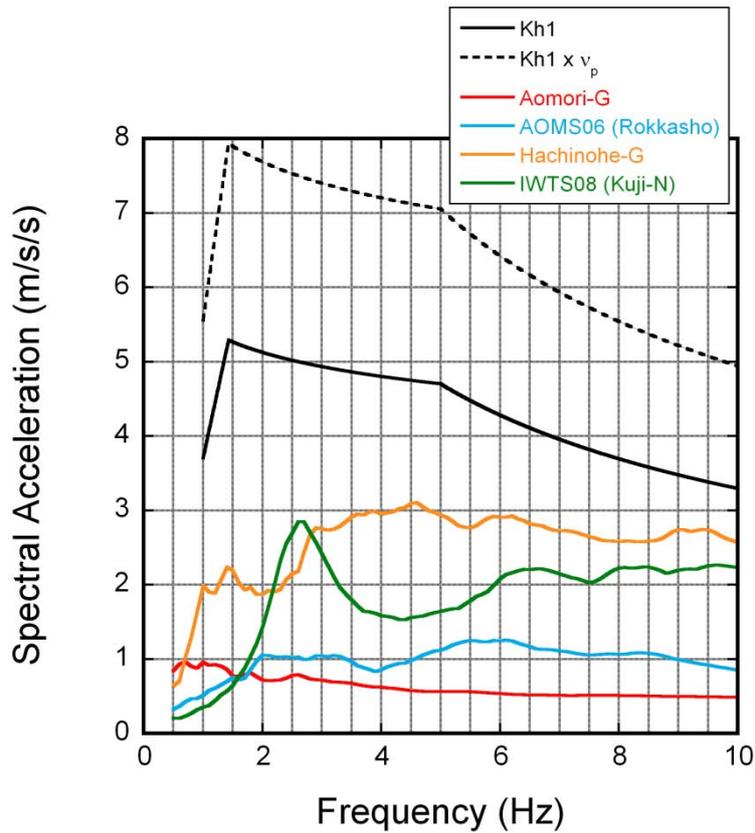


図 2.4.6 東北地方太平洋沿岸北部の特防区域周辺の強震観測点における揺れの加速度応答スペクトル（減衰 10%）。加速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

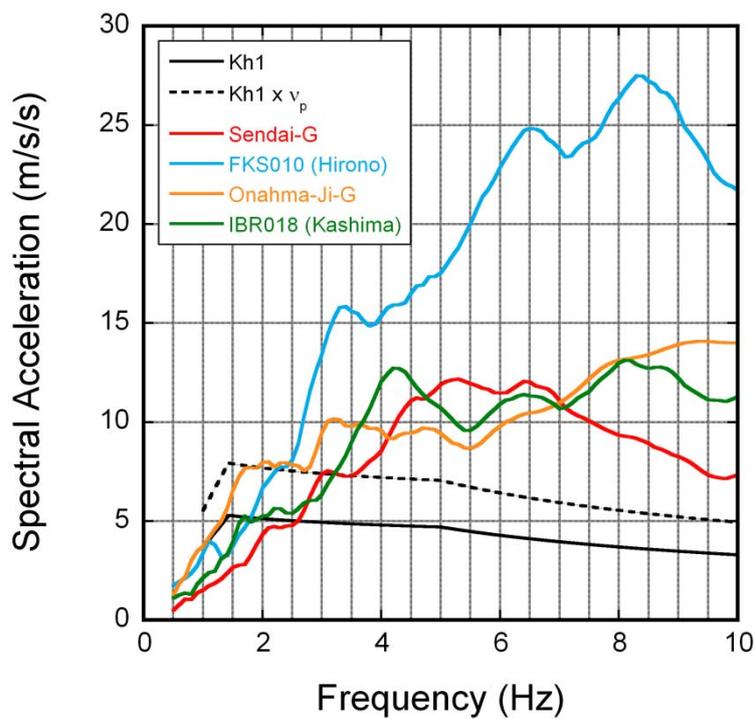


図 2.4.7 東北地方太平洋沿岸南部及び茨城県沿岸の特防区域周辺の強震観測点における揺れの

加速度応答スペクトル（減衰 10%）。加速度応答値は水平動 2 成分の幾何平均。

謝辞

本稿では、独立行政法人防災科学技術研究所の K-NET 及び KiK-net 並びに国土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所の港湾地域強震観測による強震記録を使わせていただいた。記して感謝の意を表します。