

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1244 December 2011

東日本大震災で被災した港湾における地震動特性

野津 厚
若井 淳

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 本研究における微動H/Vスペクトルの利用方法	4
3. 微動観測と余震観測	6
3.1 久慈港	6
3.2 宮古港	11
3.3 釜石港	17
3.4 大船渡港	23
3.5 石巻港	28
3.6 仙台塩釜港（塩釜港区）	33
3.7 仙台塩釜港（仙台港区）	36
3.8 相馬港	39
3.9 小名浜港	41
4. 地震動の事後推定	48
4.1 相馬港	48
4.2 石巻港	52
4.3 仙台塩釜港（仙台港区）	58
4.4 小名浜港	63
5. 考察	69
5.1 微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との関係	69
5.2 サイト増幅特性と被害との関係	69
6. まとめ	74
謝辞	75
参考文献	75

Characteristics of Ground Motions at Damaged Ports during the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster

Atsushi NOZU*

Atsushi WAKAI**

Synopsis

After a large earthquake, it is quite important to estimate strong ground motions at the site of damaged port structures to analyze damage mechanism and to determine restoration policy. Although several strong motion records were successfully obtained at damaged ports during the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster (Takahashi *et al.*, 2011), the records do not necessarily represent strong ground motions at the site of structural damage, because, according to recent knowledge, site effects can vary significantly within a relatively small area, even within a port. Thus, in this study, microtremor measurements and aftershock observations were conducted at damaged ports and strong ground motions were estimated based on the observation results. First, microtremor observations were conducted densely within the ports to reveal the gross distribution of the site effects. In particular, microtremor characteristics at the strong motion stations and at the sites of structures were compared to know whether the strong motion records represent the strong ground motions at the sites of structures. Then, if the strong motion records do not represent the strong ground motions at the sites of structures, aftershock observations were carried out to reveal the site effects at the sites of structures. Furthermore, strong ground motions at the sites of structural damage were estimated based on the site effect replacement method. The results of the study can be summarized as follows:

- 1) Gross distribution of the site effects within the ports were revealed at 8 ports where microtremor observations were conducted.
- 2) At 7 ports (9 points), detailed site effects were revealed based on aftershock observations.
- 3) Strong ground motions during the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster were estimated at 4 ports (6 points) based on the site effect replacement method.

Key Words: The 2011 Great East Japan Earthquake Disaster, ground motion, site effect, aftershock observation, microtremor measurement, site effect replacement method

* Head of Engineering Seismology Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Postdoctoral Fellow, Engineering Seismology Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

東日本大震災で被災した港湾における地震動特性

野津 厚*・若井 淳**

要 旨

大地震の発生により港湾施設が被害を受けた場合、被害原因の究明、復旧方針の策定を行う上で、港湾施設に作用した地震動を把握することは極めて重要である。東日本大震災で被災した港湾の中には、強震記録が得られている港湾も少なくないが、最近の知見によると、地震動はサイト特性の影響で狭い範囲でも大きく変化することがあるため、強震記録が必ずしも施設に作用した揺れを表しているとは限らない。そこで、本研究では被災した港湾において微動観測および余震観測を行うことによりサイト特性の把握を行い、さらに必要に応じて地震動の事後推定を行った。具体的には、まず、港湾内で微動観測を面的に実施することにより、港湾全体のサイト特性の概要を把握した。特に、施設背後と強震観測地点における微動特性を比較することにより、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表しているかどうかの判断を行った。また、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表していないと判断される場合には、施設の背後において余震観測を行い、当該地点における詳細なサイト特性を明らかにした。地震動の事後推定はサイト特性置換手法を用いて実施した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。まず、常時微動観測を実施した 8 つの港湾において港湾全体のサイト特性の概要を把握することができた。一例として大船渡港では、湾口防波堤基部に設置された強震観測地点（大船渡防地-G）と係留施設の背後では微動特性が大きく異なっていることがわかった。従って大船渡防地-G で得られた記録は湾口防波堤に作用した地震動として扱うことはできるが、係留施設に作用した地震動としては扱うことができないと考えられる。余震観測を実施した 7 港湾（9 地点）では詳細なサイト特性を把握することができた。さらに、これらに基づき、被害を受けた施設等における地震動の推定を 4 港湾（6 地点）において実施した。

キーワード：東日本大震災、地震動、サイト特性、余震観測、微動観測、サイト特性置換手法

* 地盤・構造部 地震防災研究領域 地震動研究チームリーダー

** 地盤・構造部 地震防災研究領域 地震動研究チーム 特別研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

1. はじめに

大地震の発生により港湾施設が被害を受けた場合、被害原因の究明、復旧方針の策定を行う上で、港湾施設に作用した地震動を把握することは極めて重要である。東日本大震災で被災した港湾の中には、強震記録が得られている港湾も少なくないが(高橋他, 2011)、最近の見によくと、地震動はサイト特性の影響で狭い範囲でも大きく変化することがあるため(例えば野津・長尾, 2005)、強震記録が必ずしも施設に作用した揺れを表しているとは限らない。ここに、サイト特性とは、地震基盤上に存在する堆積層が地震動に及ぼす影響のことであり(日本港湾協会, 2007)、工学的基盤面より上方に存在する表層地盤と、それより下方に存在する深部地盤の双方の影響を含む。なお、本研究では、既往の研究(野津・長尾, 2005)と同様、堆積層が地震動に及ぼす影響全般を指す用語として「サイト特性」を、堆積層による(地震基盤から地表までの)地震動フーリエスペクトルの増幅率を指す用語として「サイト増幅特性」を、それぞれ用いる。

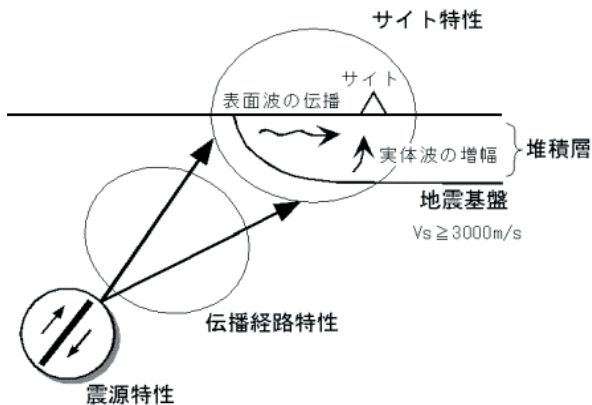


図-1.1 サイト特性の位置づけ

サイト特性を解明する上では、中小地震観測および微動観測が有用である。東日本大震災で被災した港湾においても、地震以前の段階で、これらを活用することにより部分的にはサイト特性の解明が図られてきている。仙台塩釜港(仙台港区)高松埠頭, 同雷神埠頭, 小名浜港3号埠頭において東北地方整備局により中小地震観測が実施されサイト特性の解明が図られたのはその例である(これらについては後述する)。しかしながら、これらの港湾において、今後被害の分析を行っていく上で十分なほど、サイト特性の解明が包括的になされているとは言えない状況である。

そこで、本研究では被災した港湾において微動観測および余震観測を行うことによりサイト特性の把握を行う

とともに、必要に応じて地震動の事後推定を実施する。具体的には、まず、港湾内で微動観測を面的に実施することにより、港湾全体のサイト特性の概要を把握する。特に、施設背後と強震観測地点における微動特性を比較することにより、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表しているかどうかの判断を行う。また、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表していないと判断される場合には、施設の背後において余震観測を行い、当該地点における詳細なサイト特性を明らかにする。今回のような大地震の後には多数の余震が発生するので、通常の時期に中小地震観測を実施するよりも、短い期間に効率的に記録を取得することができる。さらに、これらの結果に基づき、サイト特性置換手法(Hata *et al.*, 2011)を用いて地震動の事後推定を行う。

2. 本研究における微動 H/V スペクトルの利用方法

対象地点におけるサイト特性を評価する上で最も信頼性の高い方法は中小地震観測を行う方法であるが、港湾内のあらゆる地点において中小地震観測を実施することはかなり困難である。そこで、本研究では港湾全体のサイト特性の概要を把握する目的で微動観測を活用する。

微動観測の結果得られる微動 H/V スペクトル(上下動に対する水平動のフーリエスペクトル比)(中村, 1988)は、地震観測から得られるサイト増幅特性とよく対応することが知られている。例えば図-2.1 は高知港とその周辺の強震観測地点において微動観測を実施し、その結果得られた微動 H/V スペクトルを、強震観測記録から評価されたサイト増幅特性(野津・長尾, 2005)と比較したものである。ここで微動 H/V スペクトルは長尾他(2010)の方法で算定を行っている(本稿に示す以下のすべての微動 H/V スペクトルも同様)。この方法では3区間のデータから微動 H/V スペクトルが算定されるが、図-2.1 ではそれらの平均を示している。高知-G では微動 H/V スペクトルが 1.3Hz 付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET 高知では微動 H/V スペクトルが 1.6Hz 付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET 土佐山田では、微動 H/V スペクトルが明瞭なピークを有していないが、サイト増幅特性も同様に明瞭なピークを有していない。このように微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間には良好な対応関係が認められる。図-2.2 は和歌山港とその周辺の強震観測地点を対象に同様の検討を実施したものである。ここでもやはり微動 H/V スペクトルとサイト増

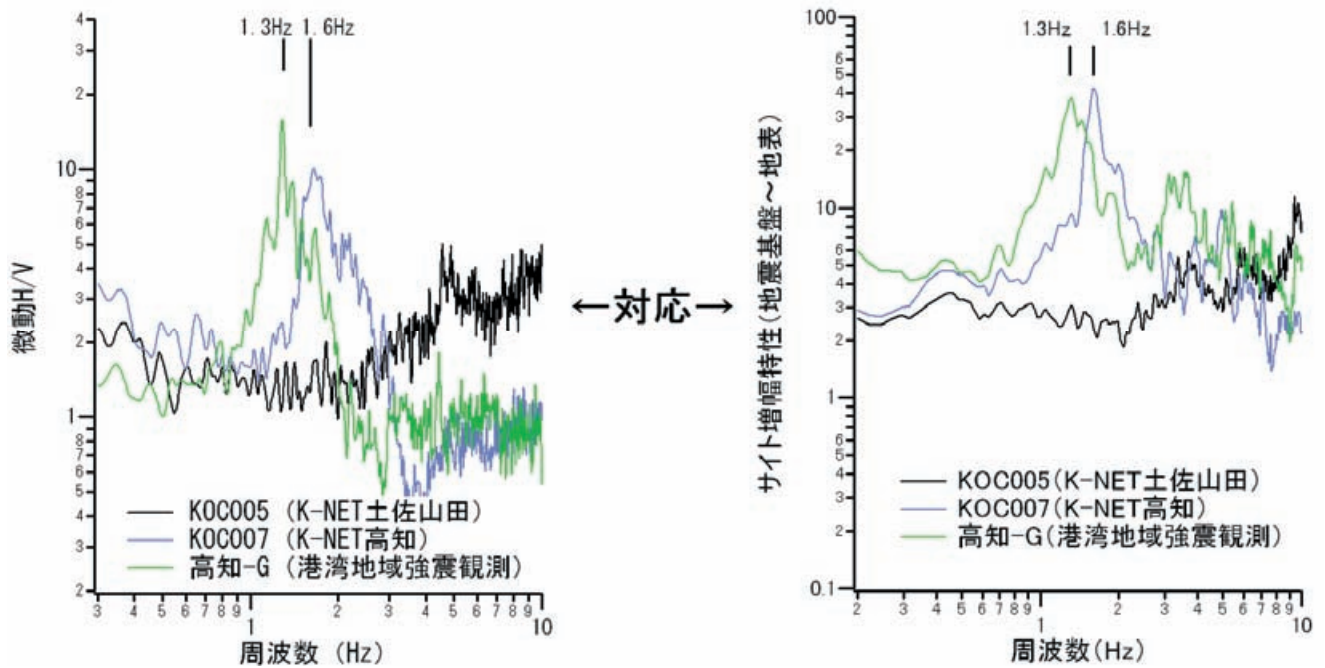


図-2.1 高知港とその周辺の強震観測地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性（野津・長尾，2005）の関係（ここに示す微動 H/V は 3 区間の平均値）

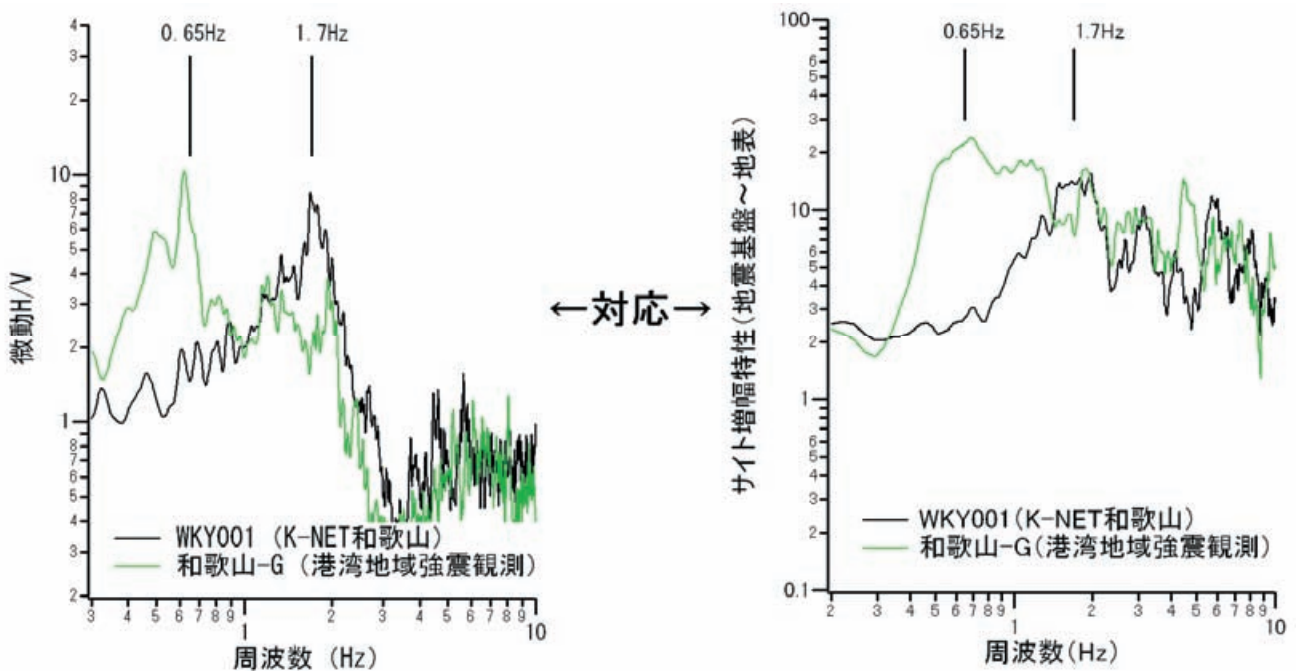


図-2.2 和歌山港とその周辺の強震観測地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性（野津・長尾，2005）の関係（ここに示す微動 H/V は 3 区間の平均値）

幅特性との間には一定の対応関係が認められる。これらのことから、東日本大震災で被災した港湾においても、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間には一定の対応関係が期待できると考え、港湾全体のサイト特性の概要の把握は微動観測に基づいて行うこととした。ただし、対象地

域において微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間に実際に対応関係が認められるかどうかについては、本研究で得られたデータに基づいて検証を行う。

なお、微動 H/V スペクトルからサイト増幅特性を推定することについては、以下に述べるように、いくつかの問題

が存在することも事実である。

第一に、ピークの高さの問題がある。図-2.1、図-2.2に示すように、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数には良好な対応関係が認められる。このことは、他の地点を対象とした既往の研究でも言及されている（長尾他，2010）。しかしながら、ピーク高さの相関性については様々な議論がある。地域を限定すれば微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク高さに相関性があるとする研究（長尾他，2010）があるものの、図-2.1に示す高知-GとK-NET高知のようにピーク高さの大小関係が逆転している例も実際に存在する。また、微動 H/V スペクトルがレイリー波の粒子軌跡を示すという現在の標準的な解釈（時松・宮寺，1992）に従う限り、上記のような相関性を理論的には説明できないという問題点も存在する。言い換えれば、もしピーク高さに相関性が存在することが事実なら、それに見合うように、微動 H/V の波動論上の解釈に修正を加えなければならない。

第二に、サイト増幅特性に見られる2次以上の（つまり低周波側から数えて二つ目以上の）ピークが微動 H/V に見られないことが多いという問題がある。上記の例でも、高知-Gのサイト増幅特性に見られる3.3Hz付近のピークと和歌山-Gのサイト増幅特性に見られる1.2Hz付近のピークは微動 H/V には明確には表れていない。

これらの問題が存在することから、本研究では微動 H/V を港湾全体のサイト特性の概略的把握という目的に限定して用いることとし、サイト特性の詳細な把握は余震観測に基づいて行うこととした。余震観測では、記録の精度の観点から、M4程度以上の記録を取得することを念頭においた。なお、上で述べたような事情で、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク高さの相関性の有無を地域毎に調べることはたいへん重要である。そこで、本研究の最後ではこの点についての検討も実施する。

3. 微動観測と余震観測

3.1 久慈港

3.1.1 微動観測

久慈港では、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、主要な係留施設と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。久慈港では港湾独自の強震観測は行われていないため、最寄りの他機関の観測地点であるK-NET久慈を微動観測対象に含めた。久慈港での微動観測結果の一部は前報（高橋他，2011）でも紹介したが、その後、観測点数が増えている。観測を実施した場所を図-3.1および表-3.1に示す。このうちNo.2は本研究において余震観測

表-3.1 久慈港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	K-NET久慈（K-NETの強震観測地点）
No.2	久慈港出張所（余震観測地点）
No.3	諏訪下地区岸壁（-10m）背後
No.4	諏訪下地区岸壁（-5.5m）背後
No.5	諏訪下地区栈橋（-7.5m）背後
No.6	諏訪下地区栈橋（-6.0m）背後
No.7	半崎地区岸壁（-5.0m）背後



写真-3.1 K-NET久慈における微動観測状況



写真-3.2 諏訪下地区栈橋（-6.0m）における微動観測状況

を実施した地点である。写真-3.1および写真-3.2に微動観測の状況を示す。

まず、K-NET久慈において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性（野津・長尾，2005）と微動 H/V スペクトルとの比較を行った。結果を図-3.2に示す。K-NET久慈の微動 H/V スペクトルには目立ったピークが無く、強いて言えば0.5Hz付近と3Hz付近に緩やかなピークがあることが特徴であるが、このような特徴はサイト増幅特性も共有してい

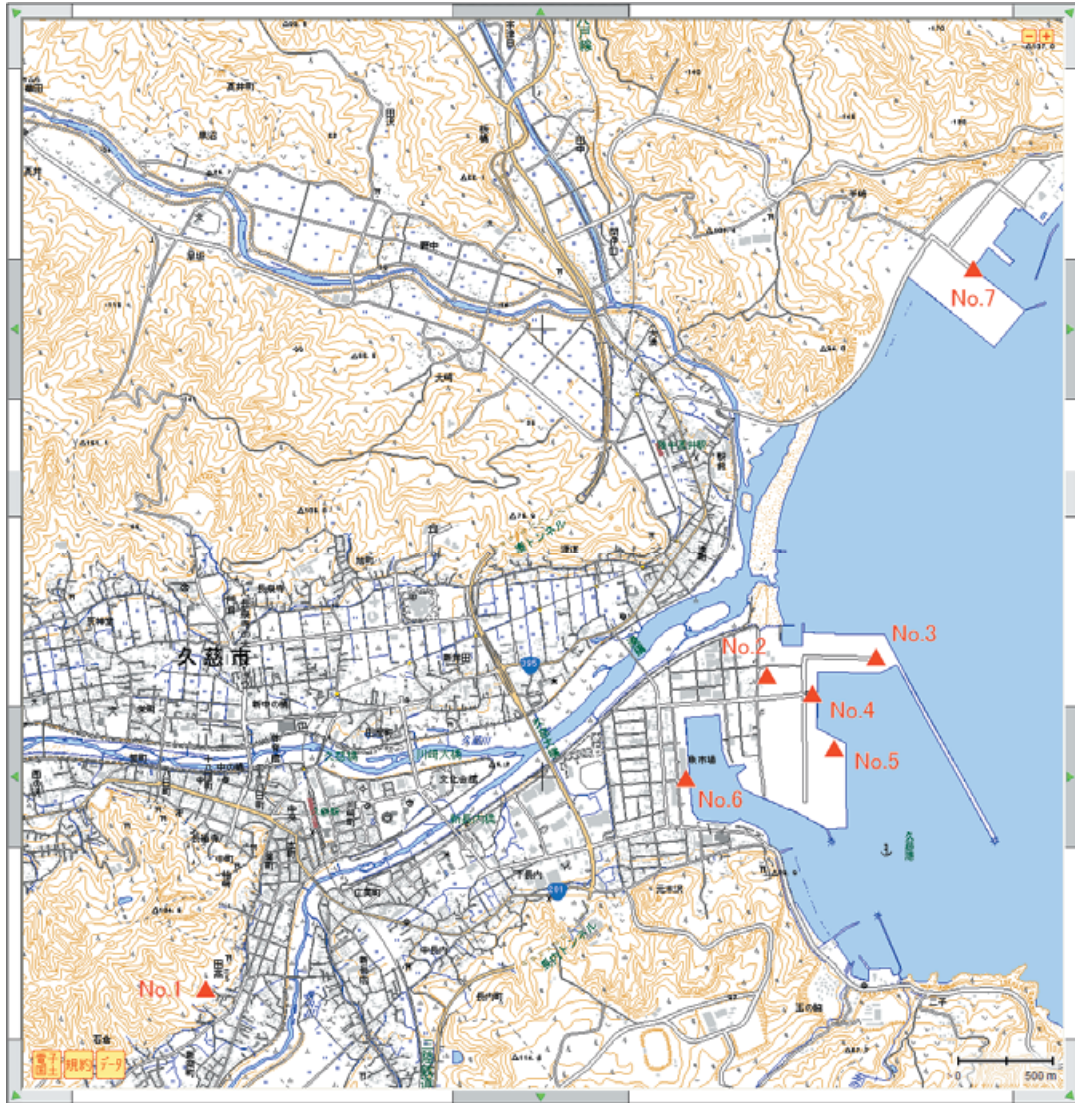


図-3.1 久慈港における微動観測地点

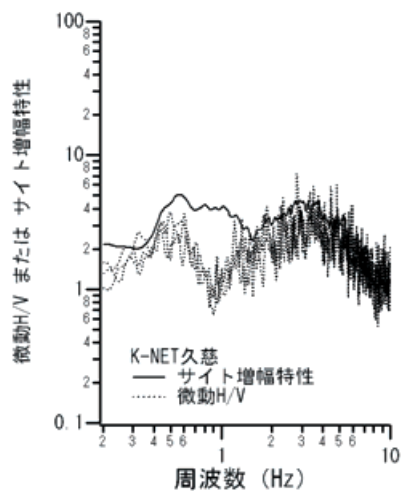


図-3.2 K-NET 久慈における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

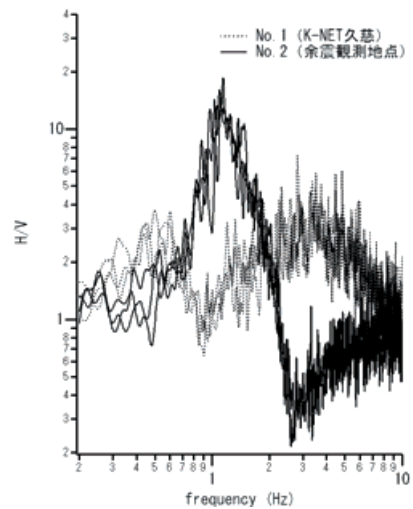


図-3.3 K-NET 久慈と余震観測地点の微動 H/V の比較

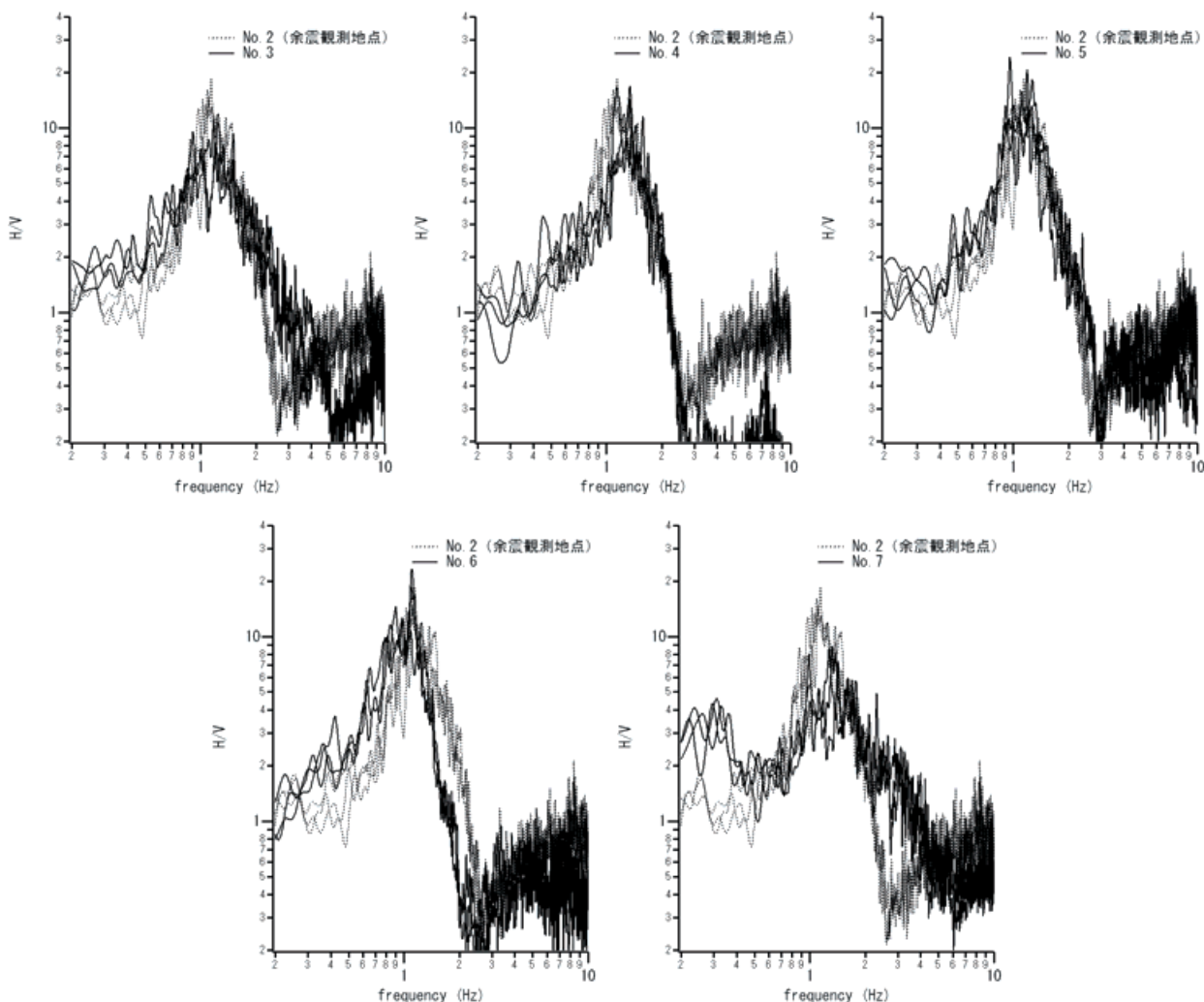


図-3.4 久慈港の係留施設の背後で得られた微動 H/V (余震観測地点の微動 H/V との比較)

る。従って、K-NET 久慈では、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間に一定の対応関係があると言える。このことは、2. で述べた他の地域における結果とも整合している。このような対応関係があることを念頭に、他の地点における微動観測結果を見ていく。

図-3.3 は既存の強震観測地点である K-NET 久慈 (No.1) と今回の余震観測地点 (No.2) での微動 H/V を比較したものである。この図から、余震観測地点における微動 H/V は 1Hz 付近に明瞭なピークを有しており、K-NET 久慈の微動 H/V とは全く異なる特性となっていることがわかる。従って、少なくとも余震観測を行った No.2 地点の地震動特性は K-NET 久慈とは相当異なるものであると推察される。

そこで、余震観測地点 (No.2) での微動 H/V をリファレンスとして、係留施設の背後における微動 H/V を図-3.4 に示す。これらの図から、諏訪下地区に位置する No.3~No.6 地点については、いずれも微動 H/V スペクトルは 1Hz 付近にピークを有しており、余震観測地点と類似した特性

となっていることがわかる。また、半崎地区に位置する No.7 地点についても、ピークの高さは異なるが、ピーク周波数については余震観測地点と類似している。従って、余震観測記録に基づいてサイト増幅特性の評価を行えば、その結果はこれらの係留施設に対しても適用できると考えられる。

3.1.2 余震観測

久慈港における余震観測は久慈港出張所の車庫 (図-3.1 の No.2 地点) で実施した。幸い 100V 電源を利用することができたため、3.2 以下に述べる他の港湾と異なり、約 1 ヶ月にわたり観測を行うことができた。観測は 7 月 11 日午後から 8 月 11 日午前にかけて実施した。この間、K-NET 久慈 (図-3.1 の No.1 地点) でも観測が行われており、そこでの余震観測記録は防災科学技術研究所のホームページから公開されている。そこで、以下においては久慈港出張所における余震観測記録と K-NET 久慈での記録を比較す

表-3.2 久慈港における余震観測で観測された地震 (K-NET 久慈でデータが公開されている地震のみ示す)

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ1	7/12 18:00	宮城県沖	約 60km	4.9	
EQ2	7/13 0:37	宮城県沖	約 50km	5.1	
EQ3	7/14 10:35	宮城県沖	約 60km	4.8	
EQ4	7/23 13:34	宮城県沖	約 40km	6.5	
EQ5	7/25 0:07	宮城県沖	約 50km	5.2	
EQ6	7/25 3:51	福島県沖	約 40km	6.2	
EQ7	7/25 20:04	宮城県沖	約 40km	5.1	
EQ8	7/26 7:58	浦河沖	約 60km	4.8	
EQ9	7/31 3:54	福島県沖	約 40km	6.4	
EQ10	7/31 14:20	青森県東方沖	約 60km	4.2	
EQ11	8/1 2:36	浦河沖	約 40km	5.4	
EQ12	8/1 22:44	岩手県沖	約 50km	5.7	
EQ13	8/5 19:53	岩手県沖	約 30km	4.9	

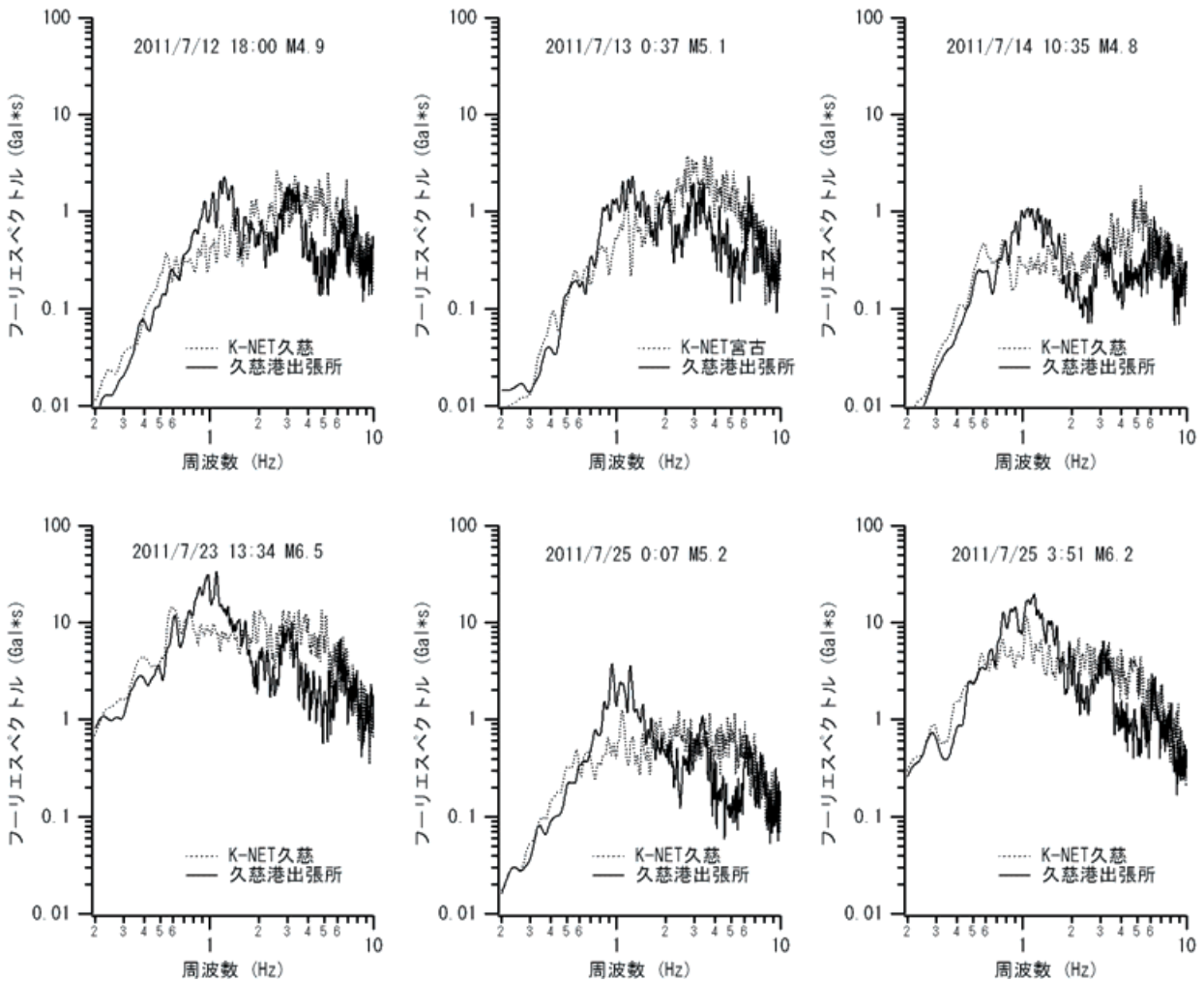


図-3.5 各地震による K-NET 久慈と久慈港出張所のフーリエスペクトル

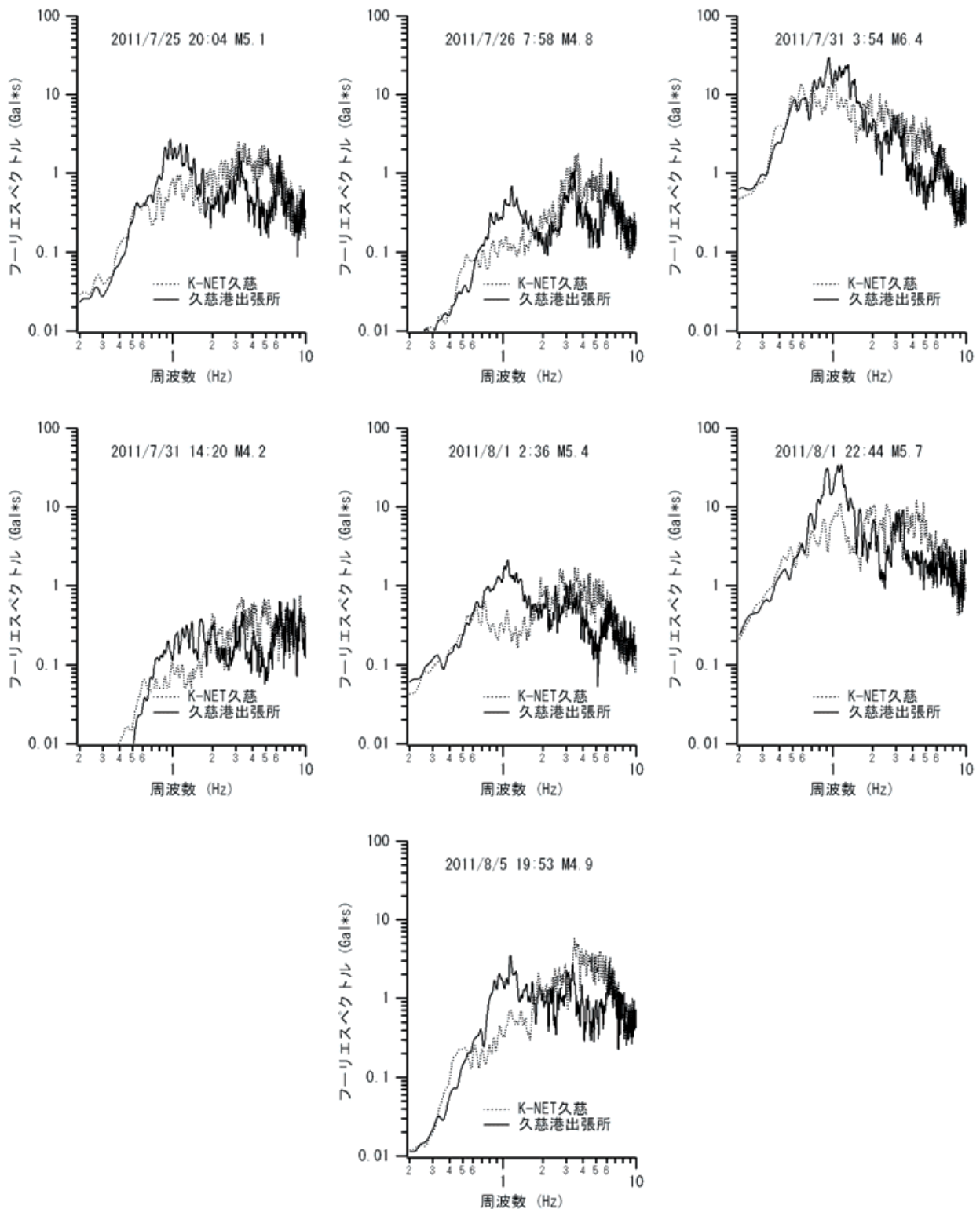


図-3.5 (つづき)

る。なお、写真-3.3に余震観測の状況を示す。

余震観測の結果、K-NET久慈と久慈港出張所における同時観測記録（K-NET久慈でデータが公開されているもの）として、表-3.2に示す13地震の記録が得られた。各地震

による各地点のフーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの）を図-3.5に示す。地震によらず久慈港出張所の記録は1Hz付近でK-NET久慈よりも大きく、地震動特性が



写真-3.3 久慈港における地震計の設置状況

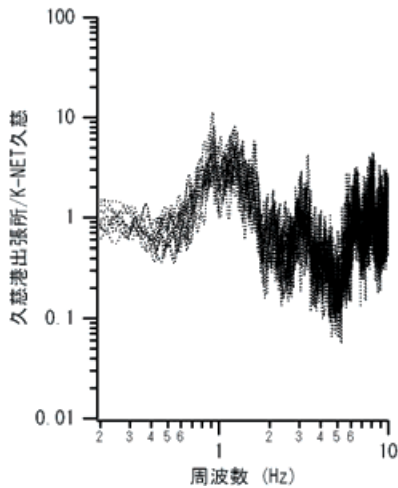


図-3.6 K-NET久慈に対する久慈港出張所のフーリエスペクトル比

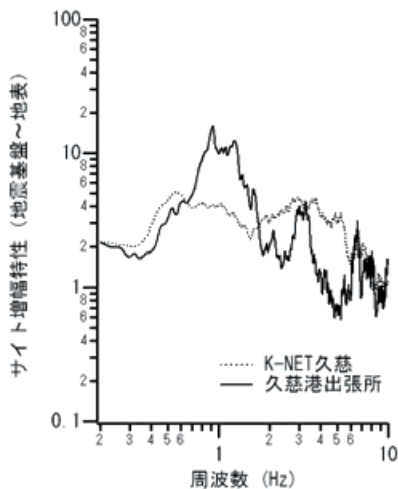


図-3.7 久慈港出張所におけるサイト増幅特性

異なっていることが伺える。K-NETに対する久慈港出張所のスペクトル比を図-3.6に示す。このスペクトル比の対数平均をK-NET久慈のサイト増幅特性(図-3.2)に乗じることにより得られた久慈港出張所のサイト増幅特性を図-3.7に示す。久慈港出張所におけるサイト増幅特性は、K-NET久慈におけるサイト増幅特性と大幅に異なり、1Hz付近にピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性と同じ地点の微動H/Vスペクトル(図-3.3)との間には良好な対応関係が認められる。

3.1.3 久慈港における観測結果のまとめ

久慈港における観測結果は次の通りまとめることができる。

- ①久慈港の主な係留施設の背後で得られた微動H/Vスペクトルは余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大きくは異ならない。主な係留施設における地震動特性は比較的一様であると考えられる。
- ②久慈港出張所において余震観測を行いサイト増幅特性の評価を行った。その結果、1Hz付近にピークを有するサイト増幅特性が得られた。

3.2 宮古港

3.2.1 微動観測

宮古港ではこれまで微動観測データの蓄積が無いので、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、主要な係留施設と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。宮古港には港湾地域強震観測の観測点(宮古-G)が存在している。津波により流失したため本震の記録は得られていないが(高橋他, 2011), それ以前の地震による記録は蓄積されている。一方、内陸よりのK-NET宮古では本震の記録も得られている。いずれの強震観測地点も微動観測の対象とした。観測を実施した場所を図-3.8および表-3.3に示す。このうちNo.6は本研究において余震観測を実施した地点である。写真-3.4および写真-3.5微動観測の状況を示す。

表-3.3 宮古港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	宮古-G (港湾の強震観測地点)
No.2	鍬ヶ崎地区岸壁 (-5m)
No.3	出先地区岸壁 (-9m)
No.4	藤原地区岸壁 (-12m)
No.5	藤原地区岸壁 (-7.5m)
No.6	藤原地区岸壁 (-10m) (170m 区間)
No.7	藤原地区岸壁 (-10m) (550m 区間)
No.8	K-NET 宮古 (K-NET の強震観測地点)

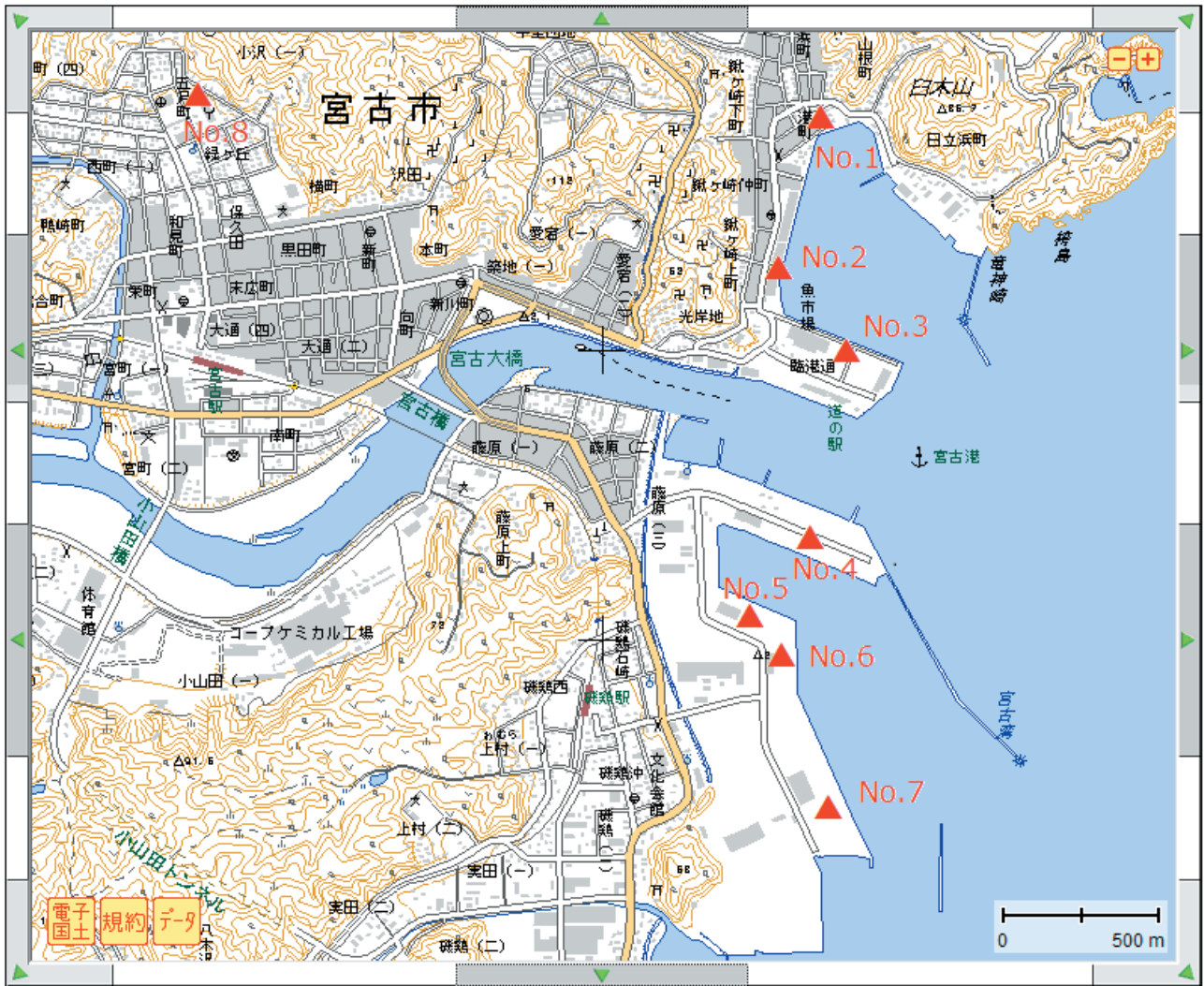


図-3.8 宮古港における微動観測地点



写真-3.4 K-NET 宮古における微動観測状況



写真-3.5 藤原地区岸壁 (-12m) における微動観測状況

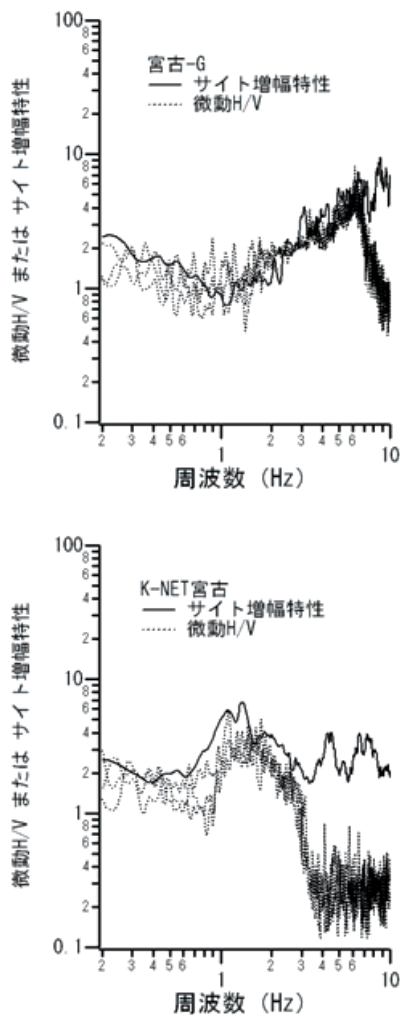


図-3.9 宮古-GおよびK-NET 宮古における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

まず、宮古-G および K-NET 宮古において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性(野津・長尾, 2005)と微動 H/V スペクトルとの比較を行った。結果を図-3.9 に示す。この図から、微動 H/V スペクトルがピークとなっている周波数(宮古-G では 6Hz 付近、K-NET 宮古では 1.1Hz 付近)では、サイト増幅特性もピークとなっていることがわかる。従って、宮古港周辺の強震観測地点では、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間に一定の対応関係があると言える。このことは、2. で述べた他の地域における結果とも整合している(なお、サイト増幅特性の 2 次以上のピークは必ずしも微動 H/V スペクトルと対応しないが、このことも他の地域での結果と整合的である)。このような対応関係があることを念頭に、他の地点における微動観測結果を見ていく。

図-3.10 に係留施設の背後で得られた微動 H/V を強震観測地点における微動 H/V と比較して示す。No.1 地点(宮古

-G) から No.2 地点まで南下すると、ピーク周波数は 6Hz 前後から 2.8Hz 前後まで低下する。これは、その分だけ堆積層が厚くなってきていることを示す。No.3 地点では、ピーク周波数は 1.4Hz 前後まで低下し、K-NET におけるピーク周波数に近づく。閉伊川を越えて No.4 地点まで南下すると、ピーク周波数はさらに低下し 0.95Hz 付近となる。この値は No.5 地点および No.6 地点においても概ね維持される。しかし、No.7 地点まで進むと、ピーク周波数は逆に高周波側に移動し 1.4Hz 前後となる。

この結果から、港湾構造物にとって厳しい地震動が最も生じやすいゾーンを宮古港の中で挙げるとすれば、No.4~No.6 にかけてのゾーンであると言える。また、このゾーンにおける微動 H/V スペクトルは宮古-G と K-NET 宮古とも類似していないために、これまで宮古-G や K-NET 宮古で蓄積されている強震観測記録は、上記のゾーンにおけるサイト特性を評価する上では有用でないと言える。そこで、今回、このゾーンに属する No.6 地点において余震観測を行い、サイト特性の評価を行うこととした。

3.2.2 余震観測

宮古港における余震観測は藤原地区のテント下(図-3.8 の No.6 地点)で実施した。観測は 5 月 27 日夕方から 5 月 30 日朝にかけて実施した。この間、K-NET 宮古(図-3.8 の No.8 地点)でも観測が行われており、そこでの余震観測記録は防災科学技術研究所のホームページから公開されている。そこで、以下においては藤原地区 No.6 地点における余震観測記録と K-NET 宮古での記録を比較する。なお、写真-3.6 に余震観測の状況を示す。

余震観測の結果、K-NET 宮古と藤原地区 No.6 地点における同時観測記録として、表-3.4 に示す 4 地震の記録が得られた。各地震による各地点のフーリエスペクトル(水平 2 成分のベクトル和をとりバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用したもの)を図-3.11 に示す。地震によらず K-NET 宮古よりも藤原地区 No.6 地点の方がピークが低周波側となっており、地震動特性が異なっていることが伺える。K-NET に対する藤原地区 No.6 地点のスペクトル比を図-3.12 に示す。このスペクトル比の対数平均を K-NET 宮古のサイト増幅特性(図-3.9)に乗じることにより得られた藤原地区 No.6 地点のサイト増幅特性を図-3.13 に示す。K-NET 宮古では 1.1Hz にサイト増幅特性のピークがあるのに対し、藤原地区 No.6 地点では 0.95Hz にピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性と同じ地点の微動 H/V スペクトル(図-3.10)の間には良好な対応関係が認められる。なお藤原地区 No.6 地点の方が K-NET よりもピーク周波数が低周波側となっているのは、K-NET より

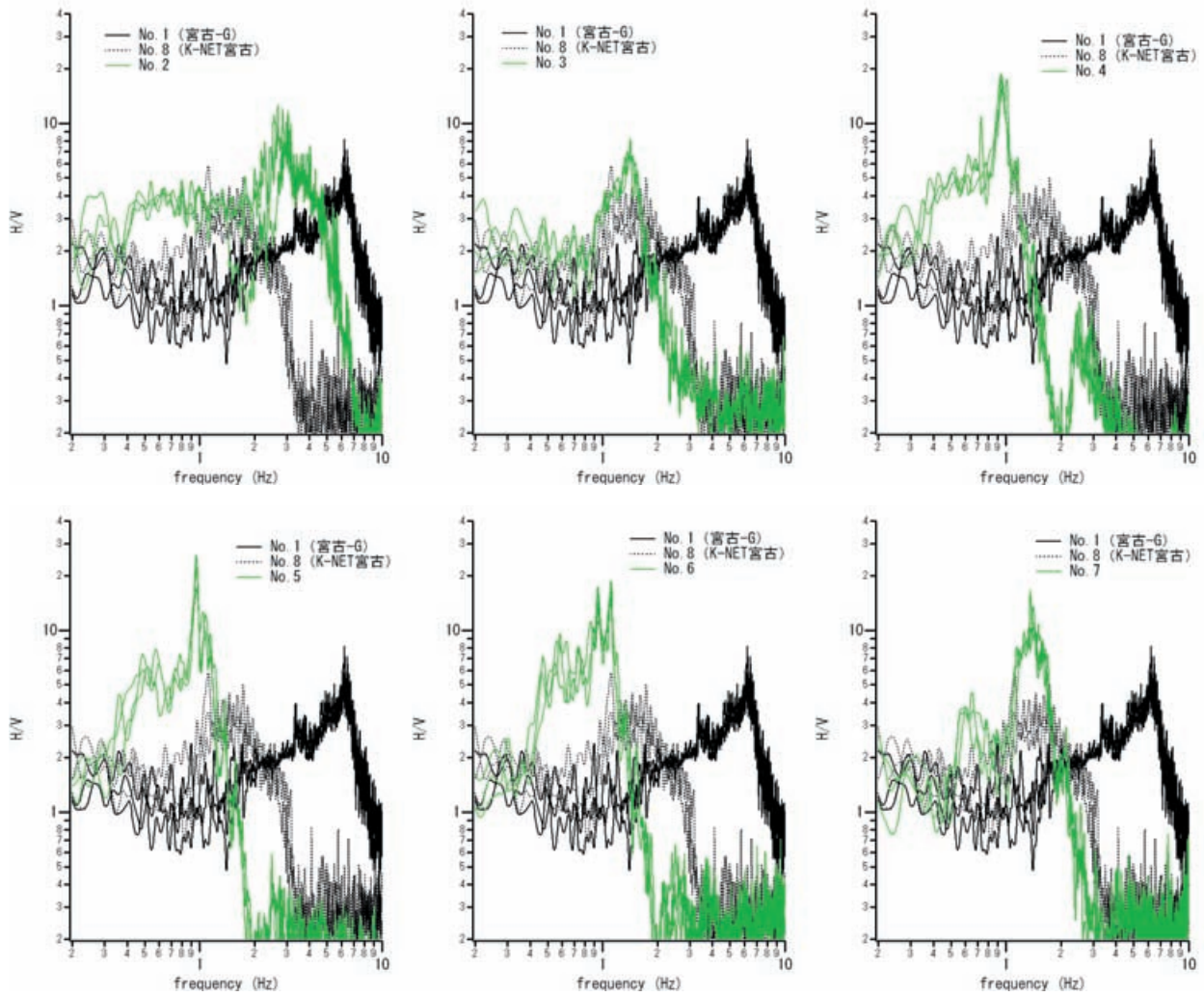


図-3.10 宮古港の係留施設の背後で得られた微動 H/V (強震観測地点の微動 H/V との比較)



写真-3.6 宮古港で余震観測を実施した場所 (中央のテント) と地震計の設置状況

表-3.4 宮古港における余震観測で観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ1	5/28 8:02	岩手県沖	約 50km	4.5	
EQ2	5/29 3:53	宮城県沖	約 40km	4.3	
EQ3	5/29 9:03	岩手県沖	約 40km	4.1	
EQ4	5/29 12:58	岩手県沖	約 50km	3.8	

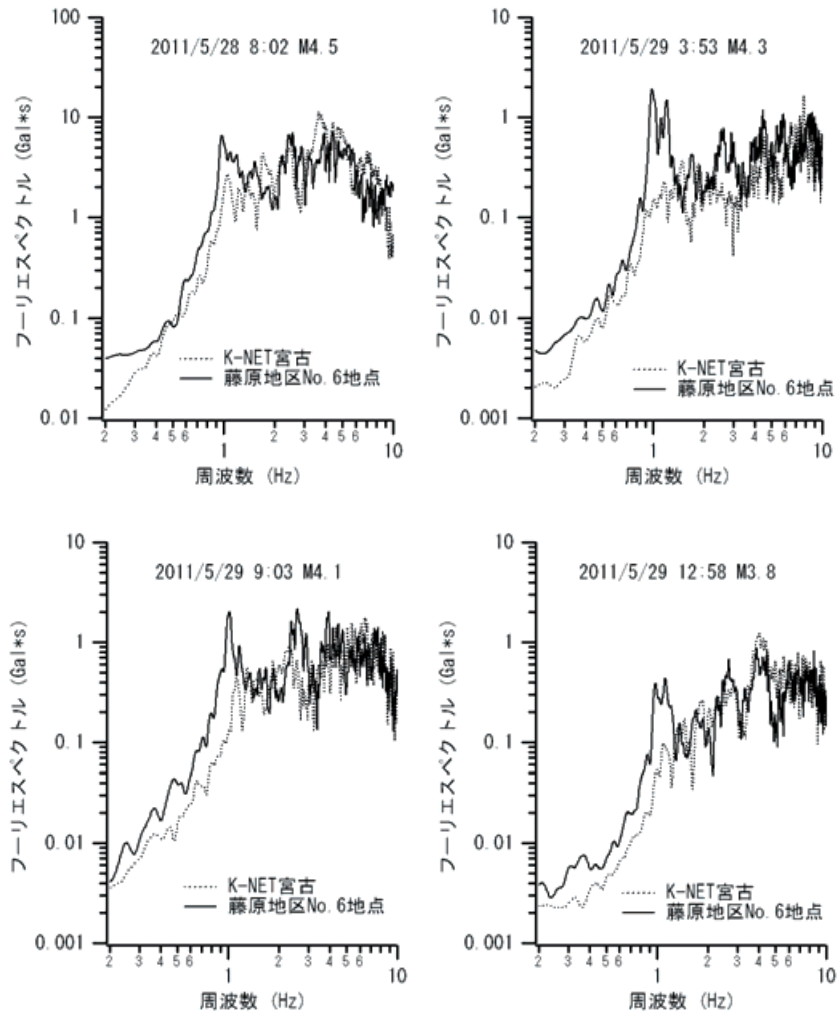


図-3.11 各地震による K-NET 宮古と藤原地区 No.6 地点のフーリエスペクトル

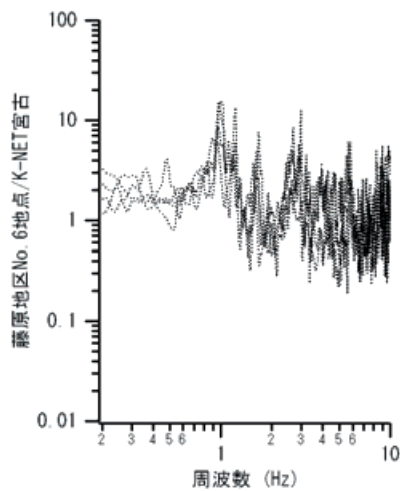


図-3.12 K-NET 宮古に対する藤原地区 No.6 地点のフーリエスペクトル比

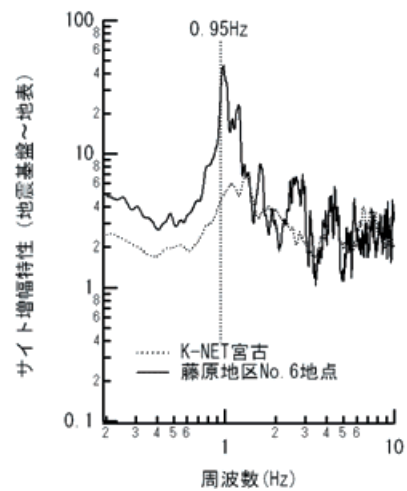


図-3.13 藤原地区 No.6 地点におけるサイト増幅特性

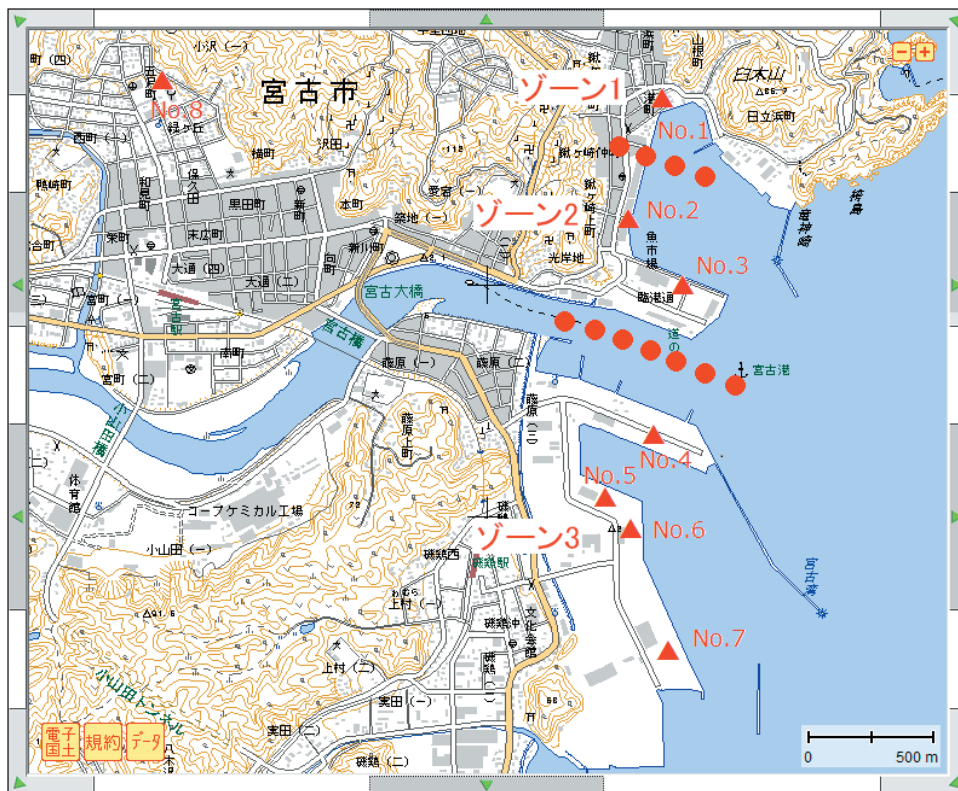


図-3.14 地震動の観点からの宮古港におけるゾーニング

りも藤原地区 No.6 地点の方が地震基盤上に存在する堆積層が厚いためであると考えられる。

3.2.3 宮古港における観測結果のまとめ

宮古港における観測結果は次の通りまとめることができる。

①宮古港周辺の既存の強震観測点である宮古-G と K-NET

宮古のいずれにおいても、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の対応関係は良好である。

②宮古港における微動観測結果によると、宮古-G から No.4 地点まではピーク周波数は次第に低下する。No.4 地点から No.6 地点までの範囲では、ピーク周波数は概ね 0.95Hz であり、この範囲が宮古港の中では港湾構造物にとって最も厳しい地震動が発生しやすい範囲であると考えら

れる。No.7 地点まで進むと、ピーク周波数は逆に高周波側に移動する。

③No.6 地点において余震観測を行いサイト増幅特性の評価を行った。その結果、0.95Hz 付近にピークを有するサイト増幅特性が得られた。

また、以上の結果を踏まえ、宮古港では、地震動の観点からは図-3.14 のようなゾーニングが可能であると考えられる。ここに、

ゾーン1：宮古-G のサイト増幅特性が利用可能なゾーン
 ゾーン2：K-NET 宮古のサイト増幅特性が利用可能なゾーン

ゾーン3：今回得られた藤原地区 No.6 地点のサイト増幅特性が利用可能なゾーン

ゾーン1 とゾーン2 の境界は現時点では明確でないため、

図-3.14 では●●●で示している。

3.3 釜石港

3.3.1 微動観測

釜石港ではこれまで微動観測データの蓄積が無いので、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、主要な係留施設と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。観測を実施した場所を図-3.15 および表-3.5 に示す。このうち No.3 は余震観測を実施した地点である。写真-3.7 および写真-3.8 に微動観測の状況を示す。

表-3.5 釜石港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	K-NET 釜石 (K-NET の強震観測地点)
No.2	釜石-G (港湾の強震観測地点)
No.3	須賀地区 (余震観測地点)
No.4	須賀地区棧橋 (-7.5m) 背後
No.5	須賀地区岸壁 (-11m) 背後



写真-3.7 K-NET 釜石における微動観測状況



写真-3.8 須賀地区棧橋 (-7.5m) における微動観測状況

微動観測地点のうちの二か所が強震観測地点であるので、それらの地点において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルとの比較を行った。結果を図-3.16 に示す。なお、ここで示した K-NET 釜石のサイト増幅特性は野津・長尾 (2005) のものであるが、釜石-G については、野津・長尾 (2005) の解析で用いられた記録の数が1個と少なく、そこで評価されているサイト増幅特性は信頼性に乏しいので、国土技術政策総合研究所において中小地震記録に基づいて再評価されたサイト増幅特性 (www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html) を用いた。K-NET 釜石では微動 H/V スペクトルが 3.6Hz 付近にピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。釜石-G では微動 H/V スペクトルが明瞭なピークを有していないが、サイト増幅特性にも同様の特徴がある。従って、釜石港周辺の強震観測地点では、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間に一定の対応関係があると言える。このことは、2. で述べた他の地域における結果とも整合している。このような対応関係があることを念頭に、他の地点における微動観測結果を見ていく。

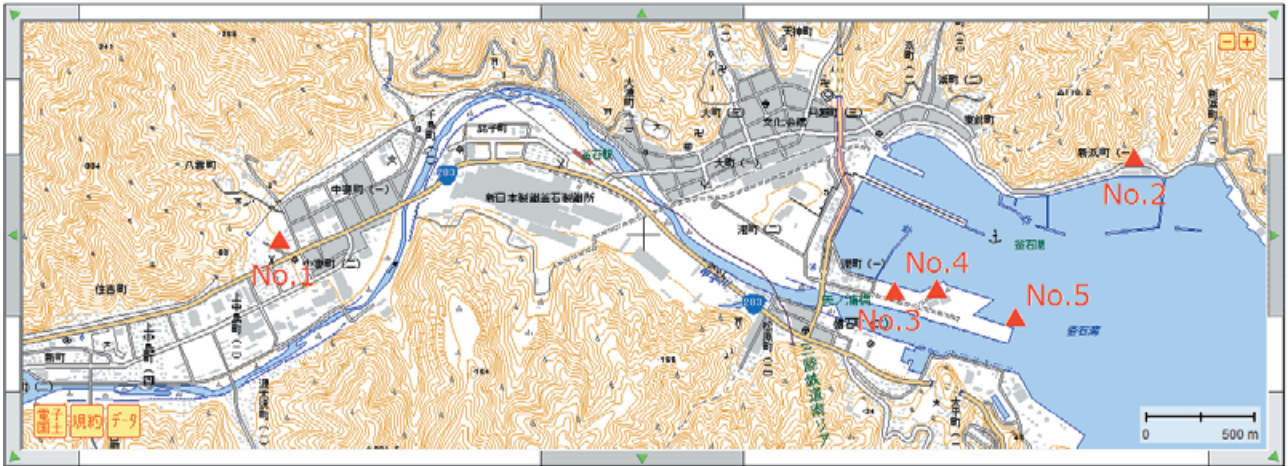


図-3.15 釜石港における微動観測地点

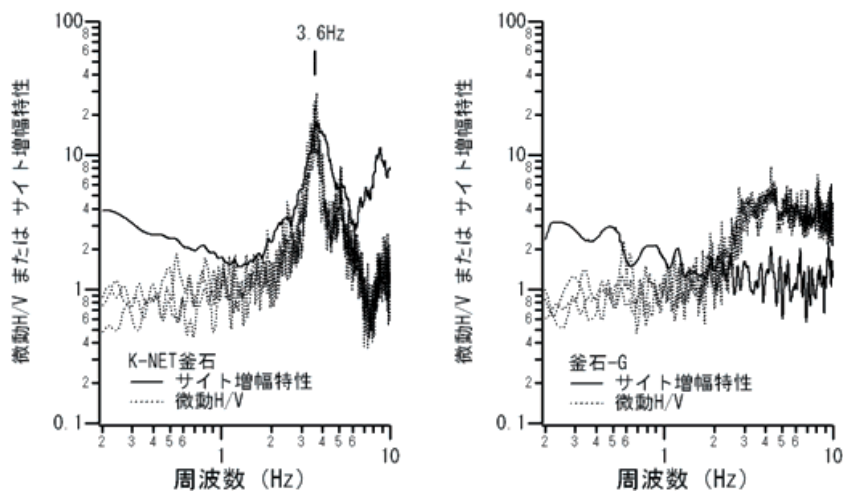


図-3.16 釜石港周辺の強震観測地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

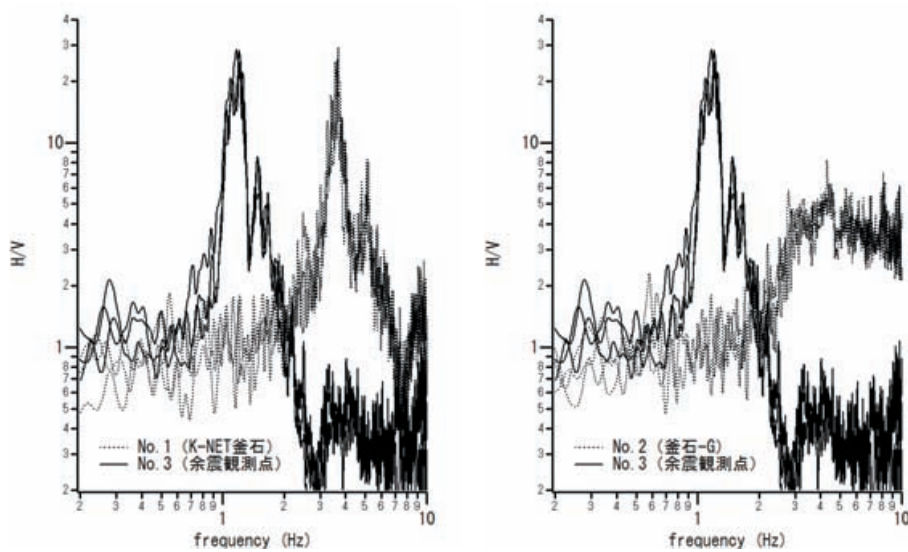


図-3.17 K-NET 釜石 (左) および釜石-G (右) と余震観測地点 (No.3) の微動 H/V の比較

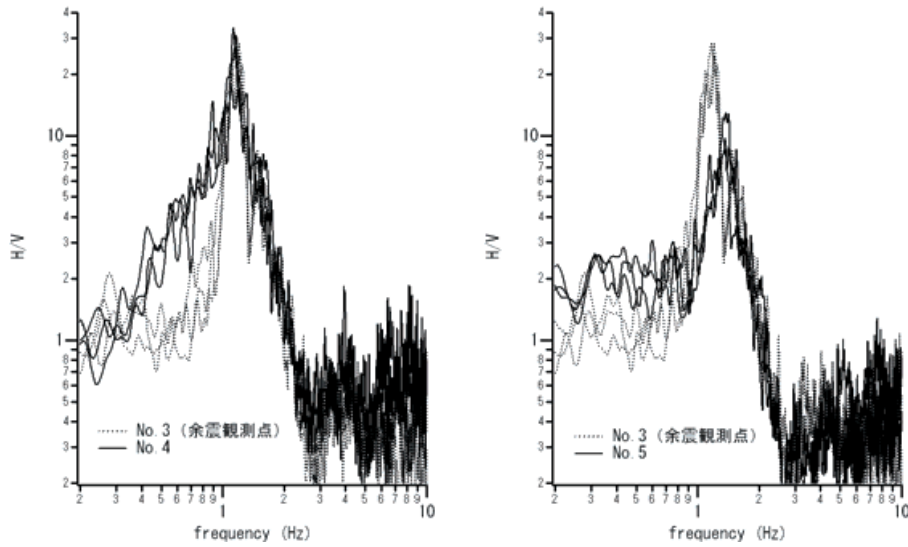


図-3.18 釜石港の係留施設の背後で得られた微動 H/V (余震観測地点の微動 H/V との比較)

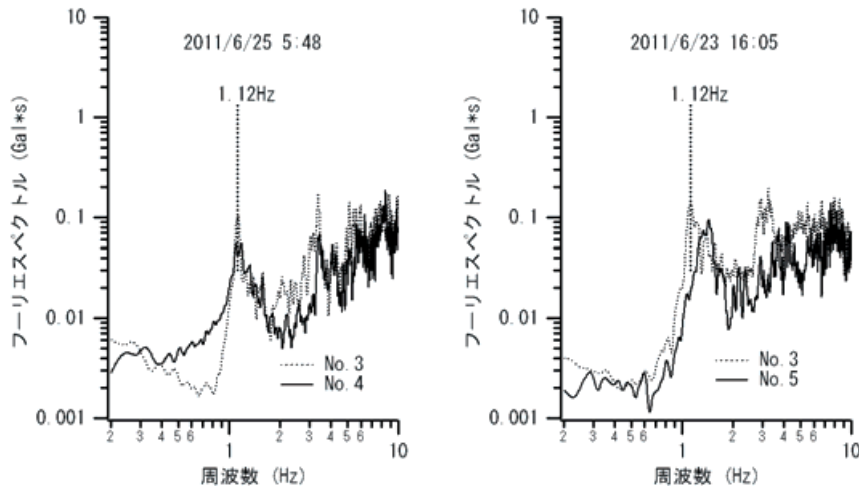


図-3.19 釜石港の係留施設の背後で得られた微小地震のフーリエスペクトル (余震観測地点との比較)

図-3.17は既存の強震観測地点であるK-NET釜石(No.1)および釜石-G(No.2)と今回の余震観測地点(No.3)での微動H/Vを比較したものである。この図から、余震観測地点における微動H/Vは1.2Hz付近に明瞭なピークを有しており、K-NET釜石や釜石-Gの微動H/Vとは全く異なる特性となっていることがわかる。従って、少なくとも余震観測を行ったNo.3地点の地震動特性はK-NET釜石とも釜石-Gとも相当異なるものであると推察される。

そこで、余震観測地点(No.3)での微動H/Vをリファレンスとして、係留施設の背後における微動H/Vを図-3.18に示す。まずNo.4地点の微動H/Vについては、ピーク周波数、ピーク高さともNo.3地点と良く一致しており、低周波側での傾きが緩やかであるものの、No.4地点の地震動特性はNo.3地点と類似しているものと考えられる。No.5地

点については、ピーク周波数がNo.3地点よりもやや高周波側であり、ピーク高さがやや低いという特徴を有しているものの、全体としてはNo.3地点と類似した特性となっている。

さらに、No.4地点での微動観測中には2011/6/25 5:48頃発生した小規模な地震が、No.5地点での微動観測中には2011/6/23 16:05頃発生した小規模な地震が観測されており、これらはNo.3地点でも観測されている。そこで、それらのフーリエスペクトル(水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの)について比較を行った結果が図-3.19である。これを見ると、No.4地点ではピーク周波数がNo.3地点と類似しており低周波側での傾きがやや緩やかであること、No.5地点ではピーク周波数がNo.3地点よりもやや高周波側であることなど、微

表-3.6 釜石港における余震観測で観測された地震 (M4.0 以上のみ表示)

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ2	6/23 19:16	岩手県沖	約 40km	4.1	
EQ3	6/23 19:35	宮城県沖	約 60km	5.3	
EQ4	6/23 20:14	岩手県沖	約 30km	4.0	
EQ5	6/24 6:05	宮城県沖	約 30km	4.0	
EQ10	6/25 2:39	浦河沖	約 50km	5.3	
EQ14	6/25 9:44	岩手県沖	約 50km	4.3	
EQ16	6/25 22:35	岩手県沖	約 40km	4.4	
EQ21	6/27 5:10	岩手県沖	約 30km	4.1	

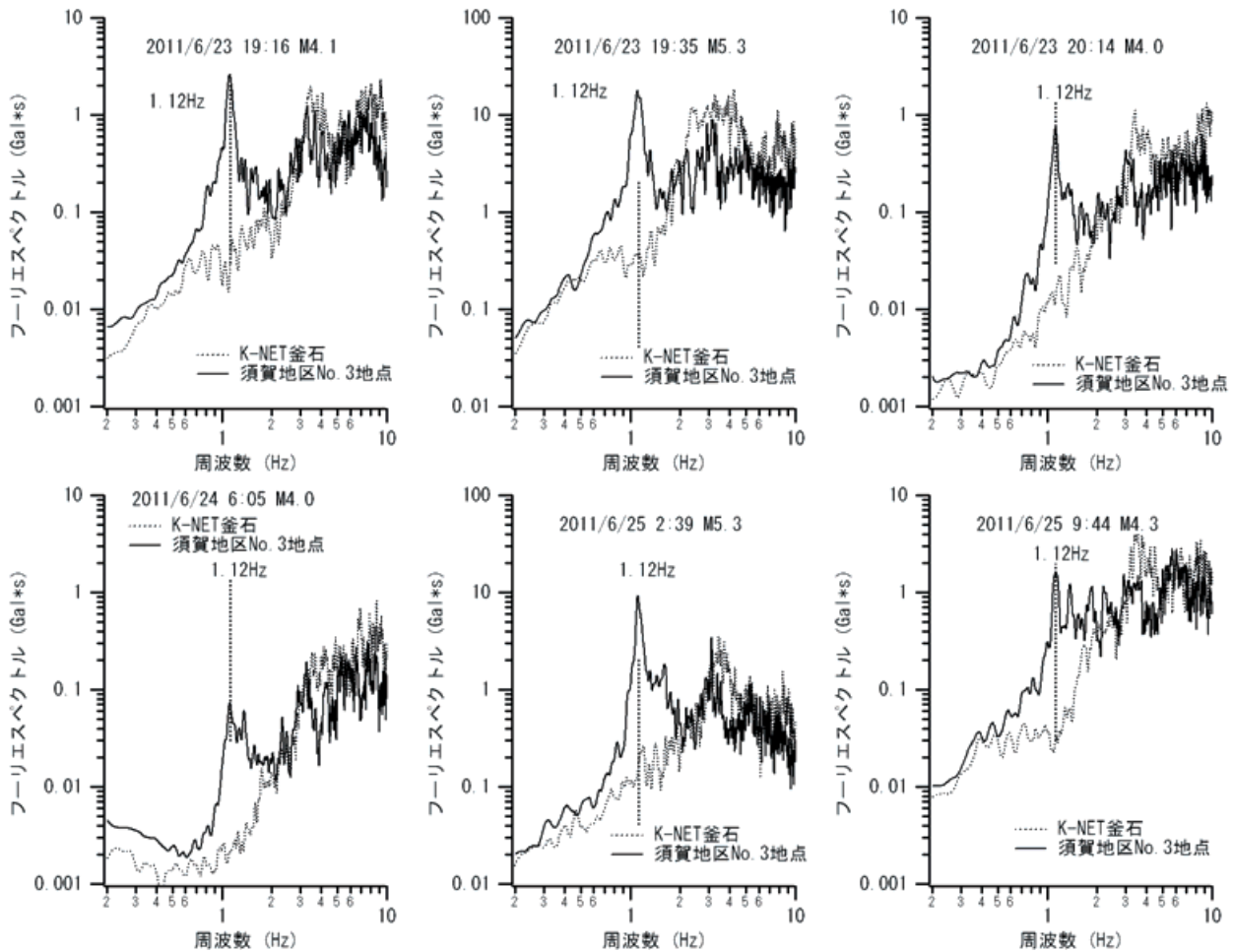


図-3.20 各地震による K-NET 釜石と須賀地区 No.3 地点のフーリエスペクトル

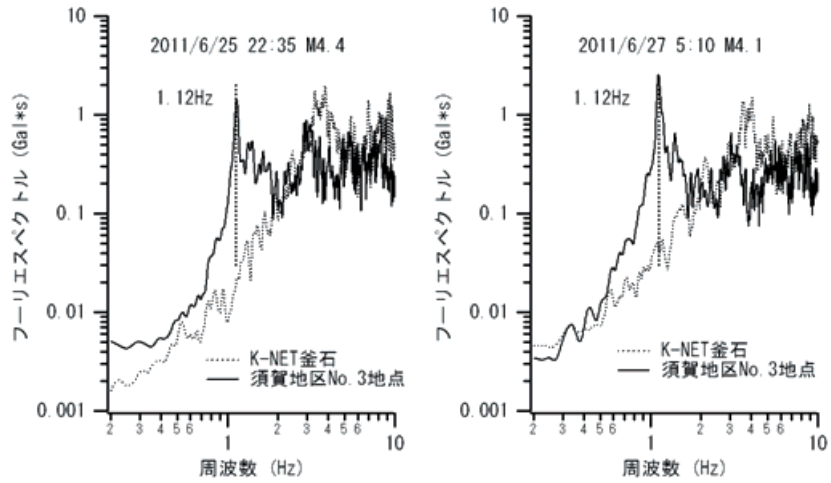


図-3.20 (つづき)

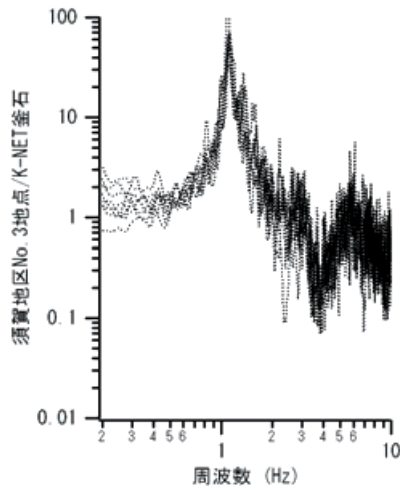


図-3.21 K-NET 釜石に対する須賀地区 No.3 地点のフーリエスペクトル比

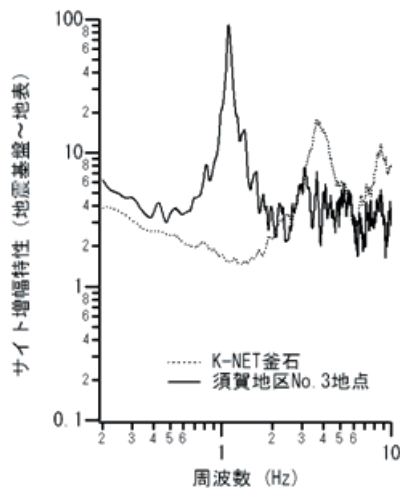


図-3.22 須賀地区 No.3 地点におけるサイト増幅特性

動 H/V と良く対応した特性が得られている。なお、地震動フーリエスペクトル、微動 H/V スペクトルとも No.4 地点の方が No.3 地点よりも低周波数側での傾きが緩やかである理由についてははっきりしないが、No.3 地点および No.4 地点のそれぞれから南を望んだ状況(写真-3.9 および写真-3.10)を比較するとわかるように、No.4 地点は谷筋の延長上に位置しており、基盤がやや深い可能性がある。ただし、そうしたことがあったとしても、そのことが No.3 地点と No.4 地点の地震動特性に大きな違いを与える結果とはなっていない(図-3.18 および図-3.19)。全体的には No.4 地点、No.5 地点とも地震動特性は No.3 地点と類似しており、No.3 地点(余震観測地点)の地震動特性が釜石港の係留施設の地震動特性を代表していると考えて良さそうである。



写真-3.9 No.3 地点から南を望む



写真-3.10 No.4 地点から南を望む

3.3.2 余震観測

釜石港における余震観測は須賀地区のテント下(図-3.15の No.3 地点)で実施した。観測は6月23日午後から6月

27日朝にかけて実施した。この間、K-NET 釜石(図-3.15の No.1 地点)でも観測が行われており、そこでの余震観測記録は防災科学技術研究所のホームページから公開されている。そこで、以下においては須賀地区 No.3 地点における余震観測記録と K-NET 釜石での記録を比較する。なお、写真-3.11 に余震観測の状況を示す。



写真-3.11 釜石港で余震観測を実施した場所(右のテント)と地震計の設置状況

余震観測の結果、K-NET と須賀地区 No.3 地点における同時観測記録(S/N 比の良好な M4.0 以上の記録)として、表-3.6 に示す 8 地震の記録が得られた。各地震による各地点のフーリエスペクトル(水平 2 成分のベクトル和をとりバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用したもの)を図-3.20 に示す。地震によらず須賀地区 No.3 地点の記録には 1.1Hz 付近にピークがあり、地震動特性が異なっていることが伺える。K-NET に対する須賀地区 No.3 地点のスペ

クトル比を図-3.21 に示す。地震毎のばらつきは非常に小さいことがわかる。このスペクトル比の対数平均を K-NET 釜石のサイト増幅特性(図-3.16)に乗じることにより得られた須賀地区 No.3 地点のサイト増幅特性を図-3.22 に示す。須賀地区 No.3 地点におけるサイト増幅特性は、K-NET 釜石におけるサイト増幅特性と大幅に異なり、1.1Hz 付近にピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性と同じ地点の微動 H/V スペクトル(図-3.17)との間には良好な対応関係が認められる。

3.3.3 釜石港における観測結果のまとめ

釜石港における観測結果は次の通りまとめることができる。

- ①釜石港の主な係留施設の背後で得られた微動 H/V スペクトルは余震観測地点における微動 H/V スペクトルと大きくは異ならない。主な係留施設における地震動特性は比較的一様であると考えられる。
- ②須賀地区において余震観測を行いサイト増幅特性の評価を行った。その結果、1.1Hz 付近にピークを有するサイト増幅特性が得られた。
- ③釜石-G で得られた東北地方太平洋沖地震の記録は、湾口防波堤に作用した地震動として扱うことはできるが、係留施設に作用した地震動としては扱うことはできないと考えられる。

3.4 大船渡港

3.4.1 微動観測

大船渡港ではこれまで微動観測データの蓄積が無いので、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、主要な係留施設と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。観測を実施した場所を図-3.23 および表-3.7 に示す。このうち No.6 は余震観測を実施した地点である。写真-3.12 および写真-3.13 に微動観測の状況を示す。

表-3.7 大船渡港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	K-NET 大船渡 (K-NET の強震観測地点)
No.2	大船渡防地-G (港湾の強震観測地点)
No.3	茶屋前地区背後
No.4	茶屋前地区岸壁 (-9m) 背後
No.5	茶屋前地区栈橋 (-6m) 背後
No.6	野々田地区栈橋 (-7.5m) 背後 (今回の余震観測地点)
No.7	野々田地区栈橋 (-13m) 背後
No.8	永浜・山口地区栈橋 (-13m) 背後



写真-3.12 K-NET 大船渡における微動観測状況



写真-3.13 野々田地区 No.6 地点における微動観測状況

微動観測地点のうちの二か所が強震観測地点であるので、それらの地点において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルとの比較を行った。結果を図-3.24 に示す。なお、ここで示した強震観測地点のサイト増幅特性のうち、K-NET 大船渡のものは野津・長尾(2005)、大船渡防地-Gのものは野津・菅野(2008)によるものである。この図からわかるように、K-NET 大船渡、大船渡防地-Gとも、微動 H/V スペクトルは明瞭なピークを有していないが、サイト増幅特性にも同様の特徴がある。従って、大船渡港周辺の強震観測地点では、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間に一定の対応関係があると言える。このことは、2.で述べた他の地域における結果とも整合している。このような対応関係があることを念頭に、他の地点における微動観測結果を見ていく。

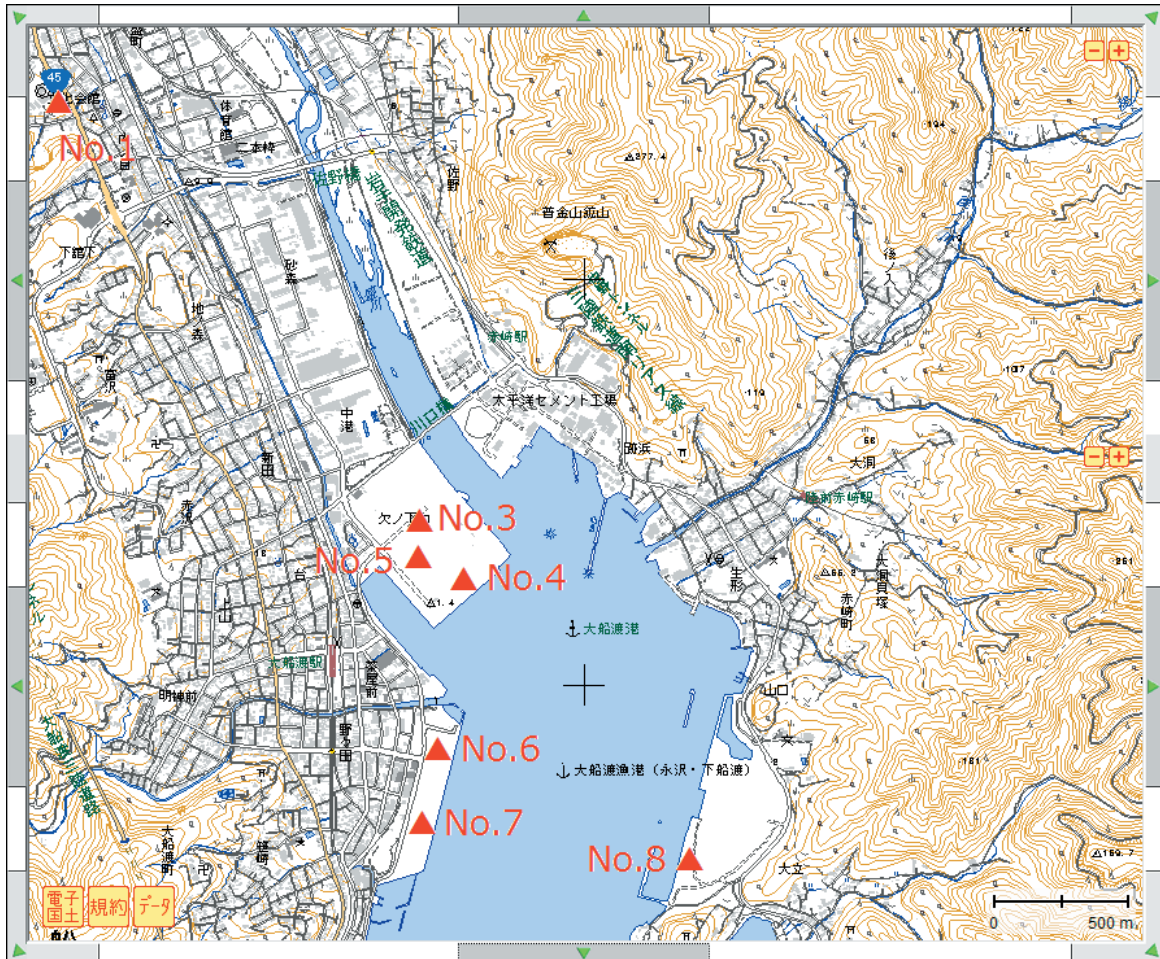


図-3.23 大船渡港における微動観測地点

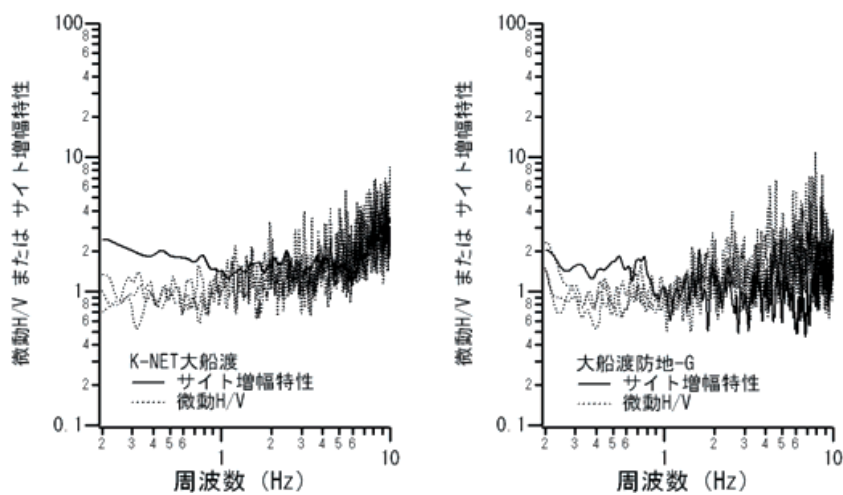


図-3.24 大船渡港周辺の強震観測地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

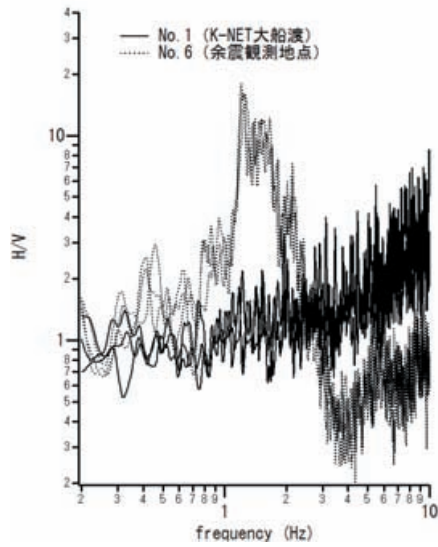


図-3.25 K-NET 大船渡 (No.1) と余震観測地点 (No.6) の微動 H/V の比較

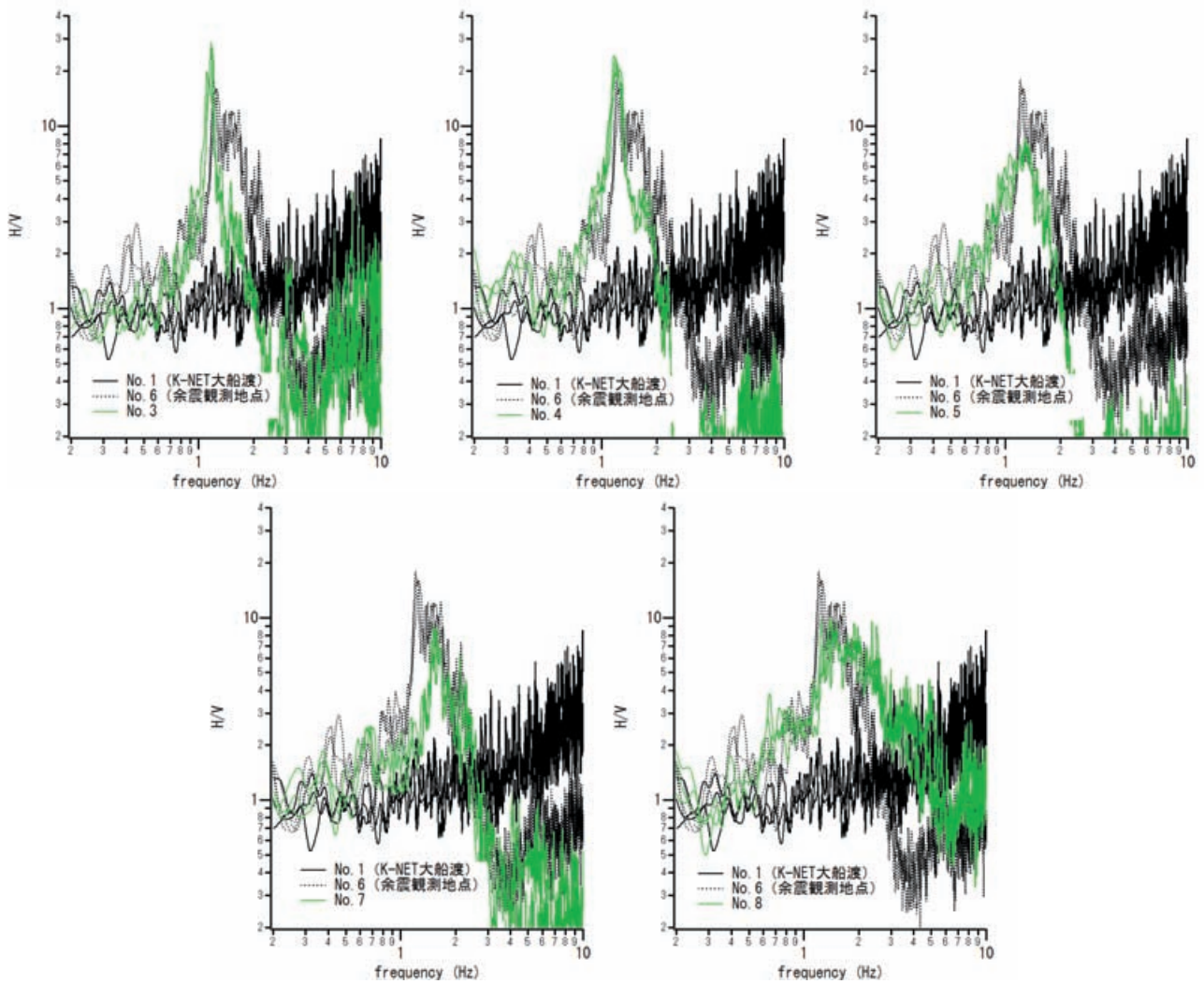


図-3.26 大船渡港の係留施設の背後で得られた微動 H/V (余震観測地点の微動 H/V との比較)

表-3.8 大船渡港の余震観測において観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ1	6/18 10:40	宮城県沖	約 50km	4.0	
EQ2	6/18 20:31	福島県沖	約 30km	5.9	
EQ3	6/20 0:49	宮城県沖	約 40km	4.3	

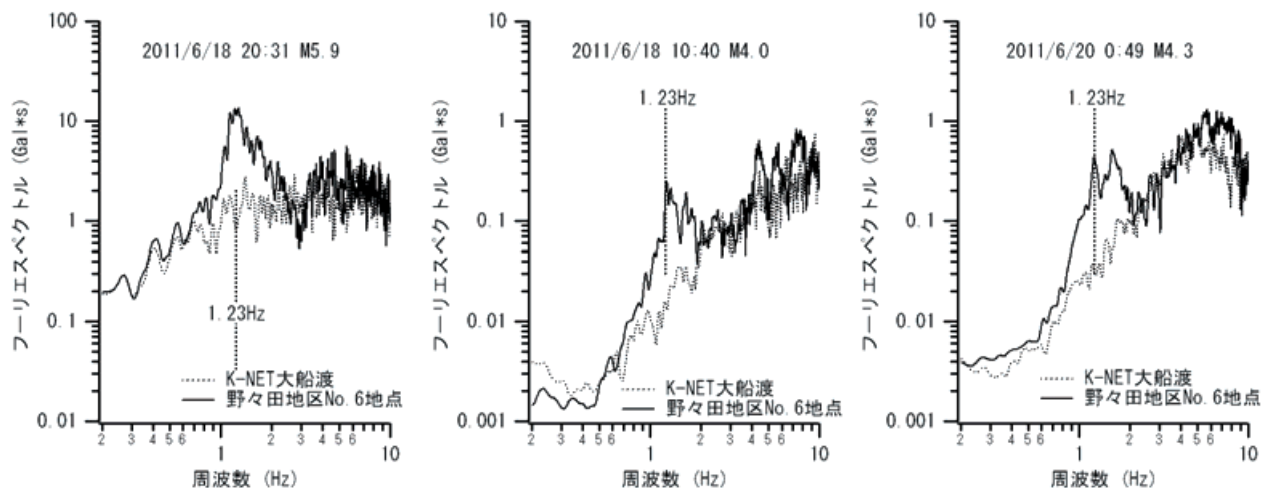


図-3.27 各地震による K-NET 大船渡と野々田地区 No.6 地点のフーリエスペクトル

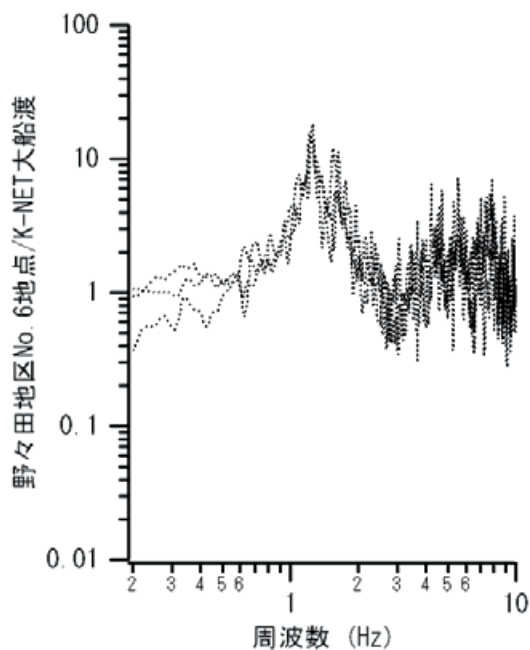


図-3.28 K-NET 大船渡に対する野々田地区 No.6 地点のフーリエスペクトル比

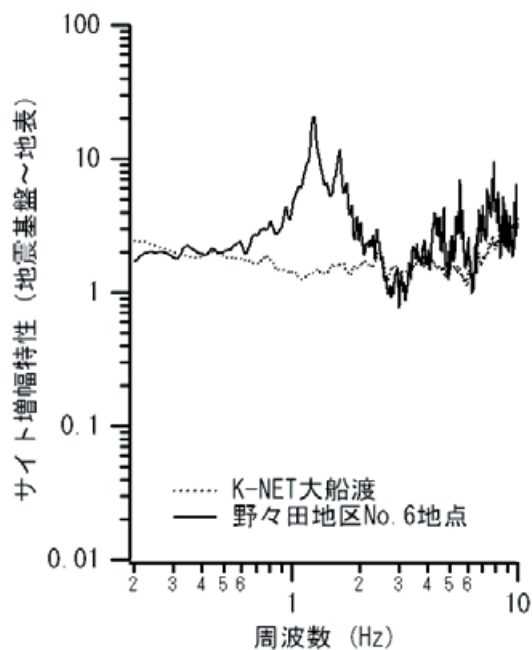


図-3.29 野々田地区 No.6 地点におけるサイト増幅特性

図-3.25は既存の強震観測点であるK-NET大船渡(No.1)と今回の余震観測地点(No.6)での微動H/Vを比較したものである。この図から、余震観測地点における微動H/Vは1.2Hz付近に明瞭なピークを有しており、K-NET大船渡の微動H/Vとは全く異なる形状となっていることがわかる。従って、少なくとも余震観測を行った野々田地区棧橋(-7.5m)背後(No.6)の地震動特性はK-NET大船渡とは相当異なるものであると推察される。

そこで、K-NET大船渡と余震観測地点での微動H/Vをリファレンスとして、他の地点における微動H/Vを図-3.26に示す。茶屋町地区背後(No.3~No.5)の微動H/Vは余震観測地点とかなり類似した特性を示す。野々田地区棧橋(-13m)背後(No.7)における微動H/Vは余震観測点と比較してやや短周期側にピークがあるものの大きさは異ならない。永浜・山口地区棧橋(-13m)背後(No.8)における微動H/Vは余震観測点とかなり類似した特性を示す。以上のことから、大船渡港の主な係留施設における地震動特性は比較的一様であり、余震観測点における地震動特性でカバーできると考えられる。

また、係留施設の背後における微動H/Vスペクトルはいずれも大船渡防地-Gにおける微動H/Vスペクトルと大きく異なっているので、大船渡防地-Gで得られた東北地方太平洋沖地震の記録(高橋他, 2011)は、湾口防波堤に作用した地震動として扱うことはできるが、係留施設に作用した地震動としては扱うことはできないと考えられる。

3.4.2 余震観測

大船渡港における余震観測は野々田地区棧橋(-7.5m)背後のテント下(図-3.23のNo.6地点)で実施した。観測は6月16日夕方から6月20日朝にかけて実施した。この間、K-NET大船渡(図-3.23のNo.1地点)でも観測が行われており、そこでの余震観測記録は防災科学技術研究所のホームページから公開されている。そこで、以下においては野々田地区No.6地点における余震観測記録とK-NET大船渡での記録を比較する。なお、写真-3.14に余震観測の状況を示す。

余震観測の結果、K-NETと野々田地区No.6地点における同時観測記録として、表-3.8に示す3地震の記録が得られた。各地震による各地点のフーリエスペクトル(水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの)を図-3.27に示す。地震によらず野々田地区No.6地点の記録には1.2Hz付近にピークがあり、地震動特性が異なっていることが伺える。K-NETに対する野々田地区No.6地点のスペクトル比を図-3.28に示す。地震毎のばらつきは小さいことがわかる。このスペクトル比



写真-3.14 大船渡港で余震観測を実施した場所(左のテント)と地震計の設置状況

の対数平均をK-NET大船渡のサイト増幅特性(図-3.24)に乗じることにより得られた野々田地区No.6地点のサイト増幅特性を図-3.29に示す。野々田地区No.6地点におけるサイト増幅特性は、K-NET大船渡におけるサイト増幅特性と大幅に異なり、1.2Hz付近にピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性と同じ地点の微動H/Vスペクトル(図-3.25)との間には良好な対応関係が認められる。

3.4.3 大船渡港における観測結果のまとめ

大船渡港における観測結果は次の通りまとめることができる。

- ①大船渡港の主な係留施設の背後で得られた微動H/Vスペクトルは余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大きくは異ならない。主な係留施設における地震動特性は比較的一様であると考えられる。
- ②野々田地区棧橋(-7.5m)背後において余震観測を行いサイト増幅特性の評価を行った。その結果、1.2Hz付近にピークを有するサイト増幅特性が得られた。
- ③大船渡防地-Gで得られた東北地方太平洋沖地震の記録

は、湾口防波堤に作用した地震動として扱うことはできるが、係留施設に作用した地震動としては扱うことはできないと考えられる。

3.5 石巻港

3.5.1 微動観測

石巻港ではこれまで微動観測データの蓄積が無いので、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、公共埠頭と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。観測を実施した場所を図-3.30 および表-3.9 に示す。このうち No.9 は余震観測を実施した地点である。

表-3.9 石巻港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	K-NET 石巻 (K-NET の強震観測地点)
No.2	中島埠頭
No.3	大手埠頭
No.4	日和埠頭
No.5	潮見埠頭
No.6	南浜埠頭
No.7	雲雀野埠頭岸壁 (-10m)
No.8	雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後 (北)
No.9	雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後 (中央) (今回の余震観測地点)
No.10	雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後 (南)

まず、K-NET 石巻において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性 (野津・長尾, 2005) と微動 H/V スペクトルとの比較を行った。結果を図-3.31 に示す。この図からわかるように、K-NET 石巻では微動 H/V スペクトルが 0.95Hz 付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数に明瞭なピークを有しており、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との対応関係は非常に良好である。微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との間のこのような対応関係を念頭に、他の地点における微動観測結果を見ていく。

図-3.32 は、K-NET 石巻における微動 H/V スペクトルをリファレンスとして、他の地点における微動 H/V スペクトルを示したものである。これらの図において、縦の破線は、余震観測点と K-NET での微動 H/V スペクトルのピークである 0.7Hz と 0.95Hz を示したものである。これらの図から、まず、中島埠頭、大手埠頭、日和埠頭の微動特性は K-NET の特性に近いことがわかる。潮見埠頭と南浜埠頭の微動特性についても、やはり K-NET に近い。ただし、詳細に見ると潮見埠頭については K-NET よりもピーク周波数がやや高周波側となっている。これは潮見埠頭が日和山 (図-3.30) にやや近い位置にあり、堆積層がやや薄いためである可能

性がある。雲雀野埠頭岸壁 (-10m) は、位置的には K-NET よりも余震観測点に近いが、その微動 H/V スペクトルは K-NET に近い。さらに、雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後の 3 箇所 (北, 中央, 南) における微動 H/V スペクトルを見ると、南側の特性は中央 (=余震観測点) の特性に近いが、北側の特性は中央 (=余震観測点) と K-NET の中間的な特性となっていることがわかる。このことは、雲雀野埠頭岸壁 (-13m) の北側から中央部にかけて堆積層が厚くなっていることを示唆するものと考えられる。

3.5.2 余震観測

石巻港における余震観測地点としては、K-NET と特性が異なっており、かつ、国による復旧事業が予定されている雲雀野埠頭岸壁 (-13m) を選定した。観測は 5 月 13 日夕方から 5 月 16 日朝にかけて実施した。観測地点は図-3.30 の No.9 地点 (▲で示す) である。また K-NET 石巻 (図-3.30 の No.1 地点) では余震観測期間中も観測が継続されており、その記録は防災科学技術研究所のホームページから公開されている。そこで以下においては雲雀野埠頭 No.9 地点における余震観測記録と K-NET 石巻での記録を比較する。なお、写真-3.15 に余震観測の状況を示す。



写真-3.15 余震観測を実施した場所と地震計の設置状況



図-3.30 石巻港における余震観測地点 (▲) と微動観測地点 (△)

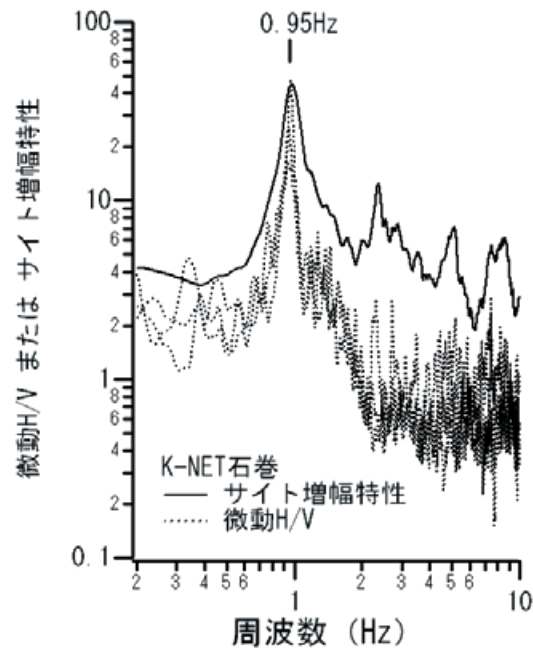


図-3.31 K-NET 石巻における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

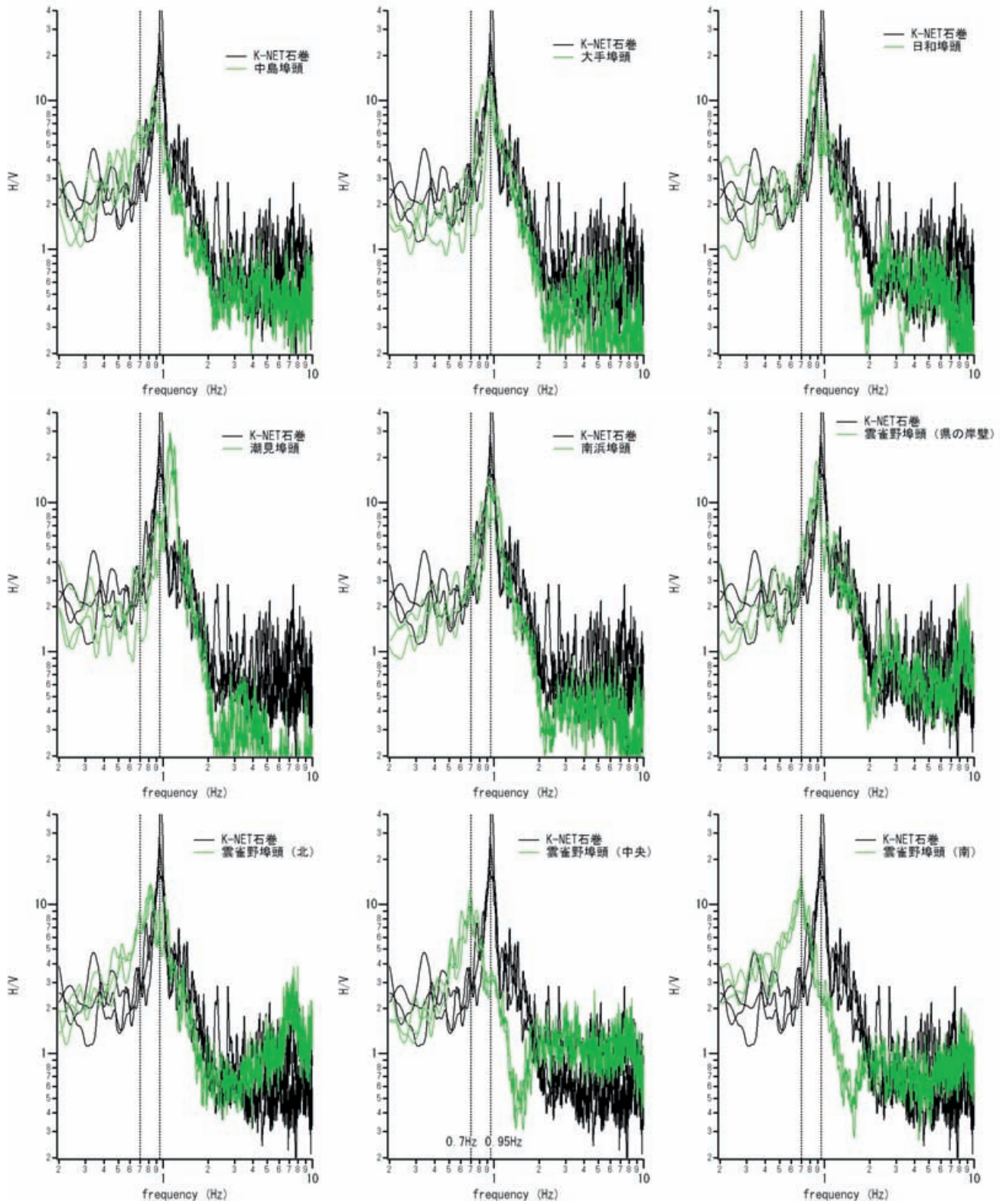


図-3.32 係留施設の背後で得られた微動 H/V (K-NET 石巻の微動 H/V との比較)

表-3.10 石巻港の余震観測において観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ1	5/14 5:17	福島県沖	約 40km	4.4	
EQ2	5/14 8:36	福島県沖	約 30km	5.7	
EQ3	5/15 1:45	宮城県沖	約 40km	4.0	
EQ4	5/15 8:51	福島県沖	約 50km	5.0	
EQ5	5/15 18:56	宮城県沖	約 50km	4.1	
EQ6	5/15 21:14	福島県沖	約 10km	5.4	
EQ7	5/16 4:07	宮城県沖	約 50km	4.6	

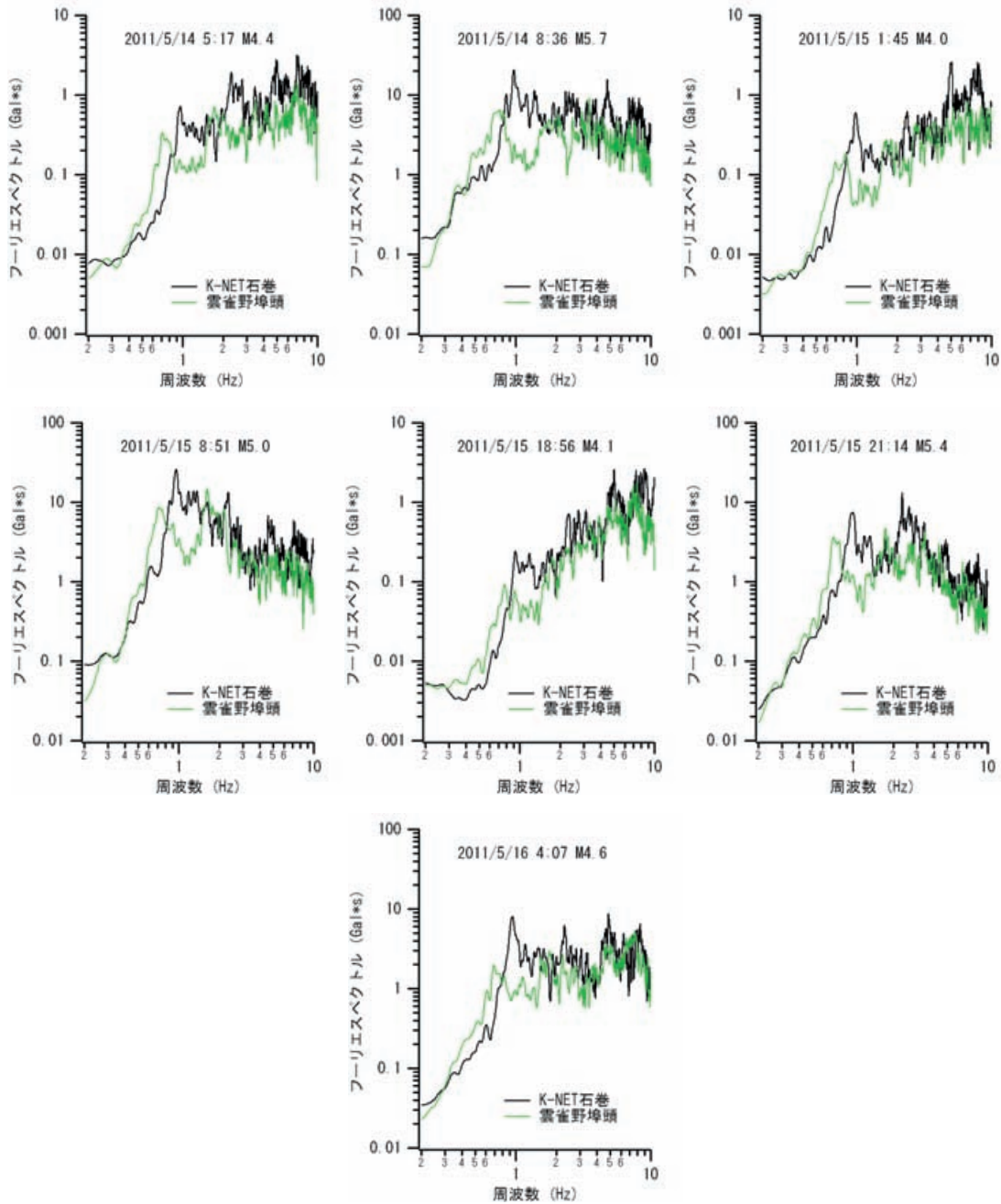


図-3.33 各地震による K-NET 石巻と雲雀野埠頭 No.9 地点のフーリエスペクトル

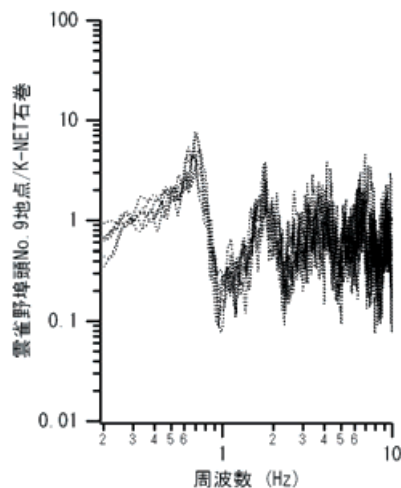


図-3.34 K-NET 石巻に対する雲雀野埠頭 No.9 地点のフーリエスペクトル比

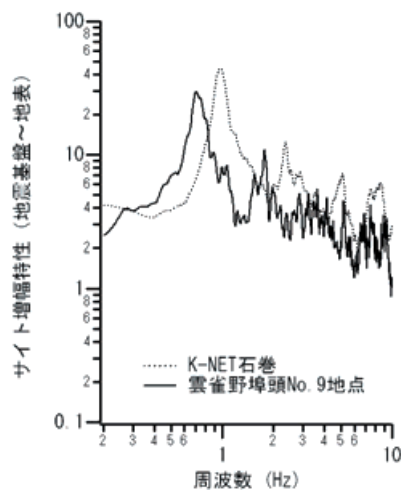


図-3.35 雲雀野埠頭 No.9 地点におけるサイト増幅特性

余震観測の結果、K-NET と雲雀野埠頭における同時観測記録として、表-3.10 に示す 7 地震の記録が得られた。各地震による各地点のフーリエスペクトル（水平 2 成分のベクトル和をとりバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用したもの）を図-3.33 に示す。K-NET 石巻では常に 0.95Hz 付近にピークがあるのに対し、雲雀野埠頭 No.9 地点では常に 0.7Hz のところにピークがあり、地震動特性が異なっていることが示唆される。K-NET 石巻に対する雲雀野埠頭 No.9 地点のスペクトル比を図-3.34 に示す。先に示したフーリエスペクトルの特性を反映して、スペクトル比においては、0.7Hz 付近に山が、0.95Hz 付近に谷が現れており、地震毎のばらつきは非常に少ない。このスペクトル比の対数平均を K-NET 石巻のサイト増幅特性（野津・長尾, 2005）に乗じることにより得られた雲雀野埠頭 No.9 地点におけるサイト増幅特性を図-3.35 に示す。この結果から、K-NET

石巻では 0.95Hz にサイト増幅特性のピークがあるのに対し、雲雀野埠頭 No.9 地点では 0.7Hz にピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性は同じ地点における微動 H/V スペクトルと調和的である。なお雲雀野埠頭 No.9 地点の方がピーク周波数が低周波側となっているのは、K-NET よりも雲雀野埠頭 No.9 地点の方が地震基盤上に存在する堆積層が厚いためであると考えられる。

3.5.3 石巻港における観測結果のまとめ

石巻港における観測結果は次の通りまとめることができる。

- ① K-NET 石巻ではサイト増幅特性および微動 H/V のピークがともに 0.95Hz であるのに対し、雲雀野埠頭岸壁 (-13m) ではサイト増幅特性および微動 H/V のピークがともに 0.7Hz であり、両者の地震動特性は異なる。



図-3.36 地震動の観点からの石巻港におけるゾーニング

②各埠頭での微動観測結果によれば、雲雀野埠頭岸壁(-13m)を除く各埠頭の微動 H/V スペクトルは、雲雀野埠頭岸壁(-13m)よりも K-NET 石巻に近い。

また、これらの結果を踏まえると、石巻港では地震動の観点からは図-3.36 のようなゾーニングが可能であると考えられる。ここに、

ゾーン1: 微動 H/V スペクトルが K-NET 石巻と類似しているゾーン

ゾーン2: 微動 H/V スペクトルのピーク周波数が K-NET 石巻よりも低周波側に存在し、今回得られた雲雀野埠頭 No.9 地点のサイト増幅特性が利用可能なゾーン

3.6 仙台塩釜港 (塩釜港区)

仙台塩釜港 (塩釜港区) については、現在、2004 年 1 月に移設される前の K-NET 塩釜のサイト増幅特性(図-3.37)に基づいてレベル1地震動が設定されている。しかし、このことの妥当性を担保するための微動観測等はこれまでのところ行われていない。そこで、今回、主な係留施設の背後と強震観測点において微動観測を行い、上記の妥当性について検討を行った。

観測を行った場所は図-3.38 および表-3.11 に示す通りである。ただし、この中で No.1 (移設前の K-NET 塩釜)については、交通量の多さ等のため、有効なデータを得る

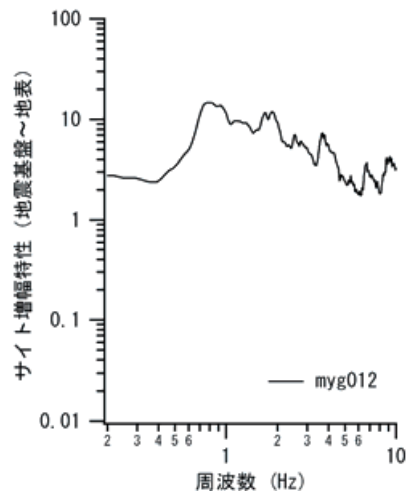


図-3.37 移設前の K-NET 塩釜のサイト増幅特性 (野津・長尾, 2005)

ことができなかった。そこで、それ以外の地点における観測結果に基づいて議論を行う。No.2 地点および No.4 地点における微動観測状況を写真-3.16～写真-3.17 に示す。

図-3.39 に各地点で得られた微動 H/V スペクトルを示す。これを見ると、微動 H/V スペクトルに顕著なピークが表れているのは No.5, No.6, No.7, No.8 の 4 地点である。これらの地点では 1Hz 前後にピークが表れており、それより高

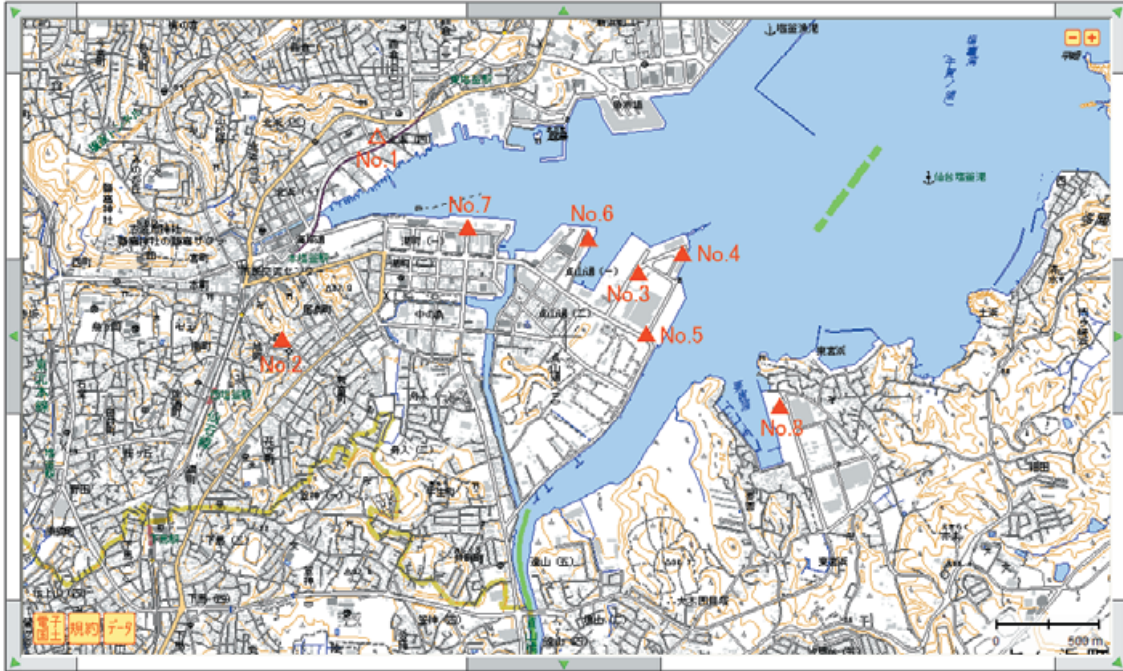


図-3.38 仙台塩釜港（塩釜港区）における微動観測地点（△では有効なデータが得られなかった）

表-3.11 仙台塩釜港（塩釜港区）における微動観測地点一覧

観測点番号	観測地点
(No.1)	K-NET 塩釜（移設前）（観測期間：1996/6～2004/1）
No.2	K-NET 塩釜（移設後）（観測期間：2004/1～）
No.3	港湾地域強震観測の観測点「塩釜工場-S」（観測期間：1968/6～1996/3）
No.4	貞山二号埠頭，岸壁（-9m）中央部の背後
No.5	港湾地域強震観測の観測点「塩釜-S」（観測期間：1964/12～1968/6）
No.6	中埠頭，栈橋（-7.5m）中央部の背後
No.7	西埠頭，栈橋（-5.5m）西端部の背後
No.8	東宮地区，栈橋（-5.5m）中央部の背後



写真-3.16 No.2 地点（K-NET 塩釜）における微動観測状況



写真-3.17 No.4 地点における微動観測状況

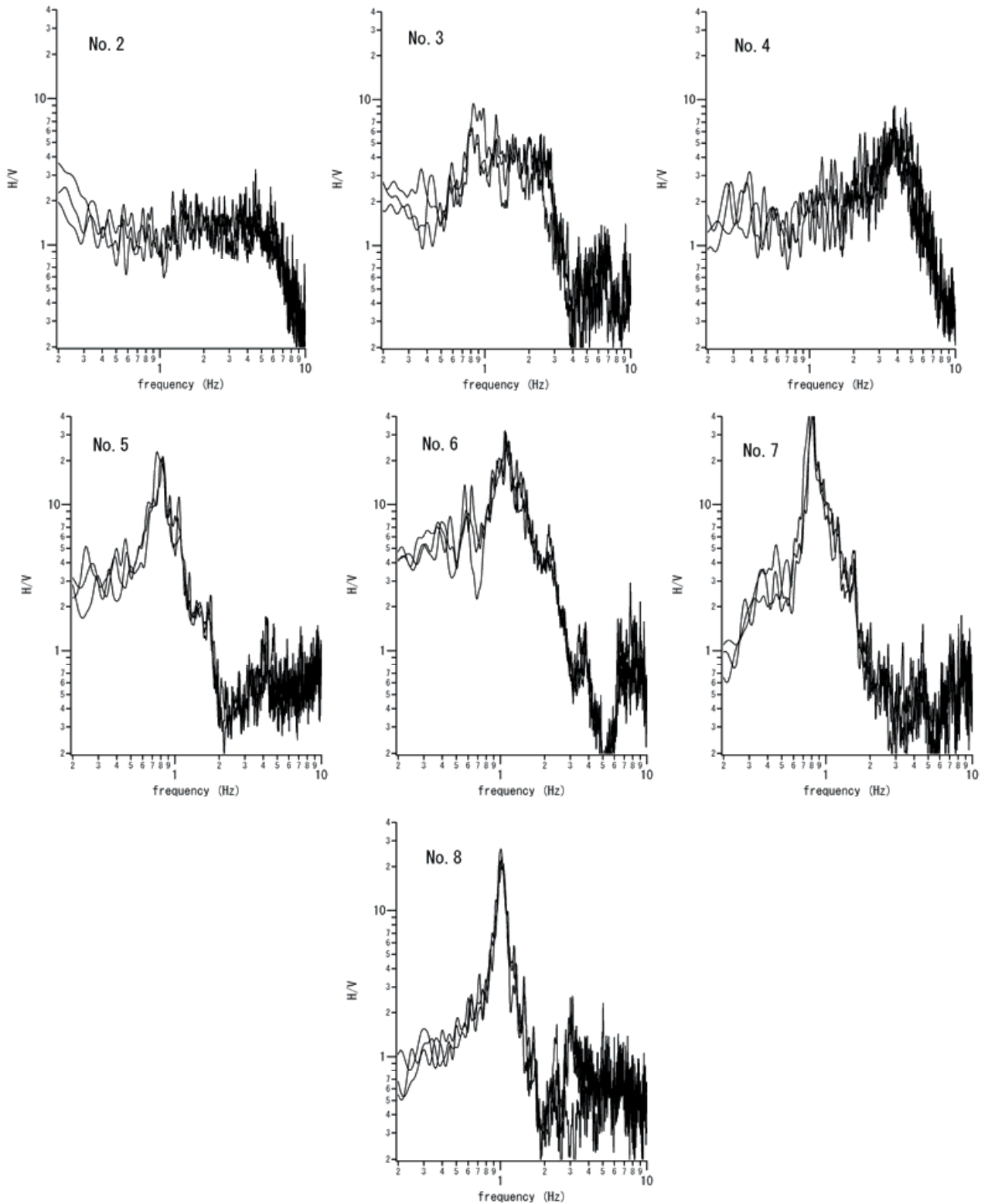


図-3.39 仙台塩釜港（塩釜港区）の各地点で得られた微動 H/V スペクトル

周波側ではスペクトル比が急激に低下するという特徴を有する。No.3 地点は、1Hz 弱に存在するピークの高さが No.5 ~No.8 地点よりも低い反面、高周波側は 3Hz 付近までスペクトル比の値が大きいという特徴を有する。ピークの表れ

ている位置は移設前の K-NET 塩釜におけるサイト増幅特性（図-3.37）と類似している。No.4 地点はピークが高周波側（4Hz 付近）にあり、基盤が浅いものと推察される。No.2 地点（移設後の K-NET 塩釜）は 0.2-10Hz の範囲に明

瞭なピークが無く非常に基盤が浅い地点であると推察される。

これらの結果から、塩釜港区の主な係留施設においては、No.4 地点を除けば、微動 H/V スペクトルが 1Hz 弱あるいは 1Hz 付近にピークを有するケースが多い。従って地震動もこれらの周波数帯域で増幅される傾向があるものと推察される。一方で、現状のレベル 1 地震動の算定に用いられている移設前の K-NET 塩釜におけるサイト増幅特性は、1Hz 弱あるいは 1Hz 付近において 10 倍以上の高い値を示していることから、現状のサイト増幅特性を塩釜地区の主な係留施設に適用することは適切である可能性が高い。

ただし、微動 H/V スペクトルの中にはピークの高さが非常に高いものも存在しているので、これらの地点において真のサイト増幅特性が移設前の K-NET 塩釜より大きい可能性も残されるため、今後、重要性の高い事業が塩釜港区において実施される場合には、事前に短期間の地震観測を行い、サイト増幅特性を評価することが望ましいと考えられる。

3.7 仙台塩釜港（仙台港区）

東北地方太平洋沖地震の際、仙台塩釜港（仙台港区）では、強震観測地点である仙台-G（図-3.40）において強震記録が得られている（高橋他，2011）。しかし、H.19 年度～H.20 年度にかけて仙台塩釜港（仙台港区）高松埠頭（図-3.40）において東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所により実施された臨時的な地震観測の結果から、仙台-G と高松埠頭ではサイト増幅特性が大幅に異なっていることがわかっている（高橋他，2011）。このことから、高松埠頭からその対岸に位置する高砂埠頭（図-3.40）にかけても、地下構造および地震動特性がさらに変化している可能性が否定できない。そこで、本研究では、過去に一度も地震観測の実施されたことのない高砂埠頭において余震観測を実施し、その結果に基づき、高砂埠頭におけるサイト増幅特性の評価を実施した。

余震観測は 5 月 2 日夕方から 5 月 5 日未明にかけて実施した。観測地点は図-3.40 に▲で示す仙台-G（塩釜港湾・空港整備事務所）と高砂埠頭である。なお、図-3.40 の▲は過去に臨時的な地震観測が実施されたことのある場所である。

観測の結果、十分に SN 比の良い記録として、表-3.12 に示す 3 つの地震の記録が得られた。観測された地震は、海溝付近の地震が 2 つ、内陸地殻内地震が 1 つである。各地震による両地点のフーリエスペクトル（水平 2 成分のベクトル和をとりバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用したもの）を図-3.41 に示す。高砂埠頭-仙台-G 間のス

ペクトル比を図-3.42 に示す。この結果から、高砂埠頭-仙台-G 間のスペクトル比は、地震によらず 1Hz 前後で 10 倍程度の値を示すことがわかった。また、海溝付近の地震（EQ1 と EQ3）と内陸地殻内地震（EQ2）とでスペクトル比にあまり違いは見られないことがわかった。図-3.42 よりスペクトル比の対数平均を求め、それを仙台-G のサイト増幅特性（野津・長尾，2005）に乗じることにより、高砂埠頭でのサイト増幅特性を推定した。結果を図-3.43 に赤で示す。高砂埠頭のサイト増幅特性は 1Hz を中心とする帯域で仙台-G よりもはるかに大きいことがわかる。すなわち、東北地方太平洋沖地震において高砂埠頭に作用した地震動は、仙台-G で観測された地震動と比較して、1Hz を中心とする帯域ではるかに大きかったと考えられる。

この結果を過去に仙台塩釜港（仙台港区）の他の場所で行われた地震観測結果と比較してみる。まず高松埠頭（図-3.40）においては H.19 年度～H.20 年度にかけて仙台港湾空港技術調査事務所により地震観測が実施され、その結果に基づいて当所でサイト増幅特性の評価を行っている。その結果を図-3.43 に緑の線で示している（国総研 HP の L1 地震動はこのサイト増幅特性に基づいて算定されている）。この結果から、高松埠頭におけるサイト増幅特性と高砂埠頭におけるサイト増幅特性はかなり類似していることがわかる。従って東北地方太平洋沖地震において高松埠頭に作用した地震動と高砂埠頭に作用した地震動は同程度であったと考えられる。

さらに、H.20 年度には雷神埠頭（図-3.40）の背後において、塩釜港湾・空港整備事務所により地震観測とサイト増幅特性の評価が行われている。その結果得られた雷神埠頭におけるサイト増幅特性を図-3.44 に示す。雷神埠頭におけるサイト増幅特性も大局的には高松埠頭や高砂埠頭でのサイト増幅特性と大きくは異ならないと言える。ただし 0.4Hz～0.8Hz では雷神埠頭のサイト増幅特性は高松埠頭や高砂埠頭に比べ小さい。0.4Hz～0.8Hz は岸壁に対して比較的影響を及ぼしやすい周波数成分である。従って、東北地方太平洋沖地震の際、雷神埠頭に作用した地震動は、高松埠頭や高砂埠頭に作用した地震動に比べ、岸壁に対してやや影響を及ぼしにくい地震動であった可能性がある。

以上をまとめると次のように整理できる。

- 東北地方太平洋沖地震の際、高松埠頭と高砂埠頭に作用した地震動は同程度であったと考えられる。
- 雷神埠頭に作用した地震動は、高松埠頭や高砂埠頭に作用した地震動に比べ、岸壁に対して影響を及ぼしやすい成分がやや少なかった可能性がある。
- 以前から指摘されているように仙台-G と各埠頭の間では地震動特性が大幅に異なる。



図-3.40 今回の余震観測地点 (▲) と過去に臨時の地震観測が実施されたことのある場所 (▲)

表-3.12 仙台塩釜港（仙台港区）の余震観測で観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ1	5/3 22:36	宮城県沖	約 40km	4.7	
EQ2	5/3 22:57	福島県浜通り	約 20km	4.5	
EQ3	5/5 2:36	宮城県沖	約 40km	4.1	

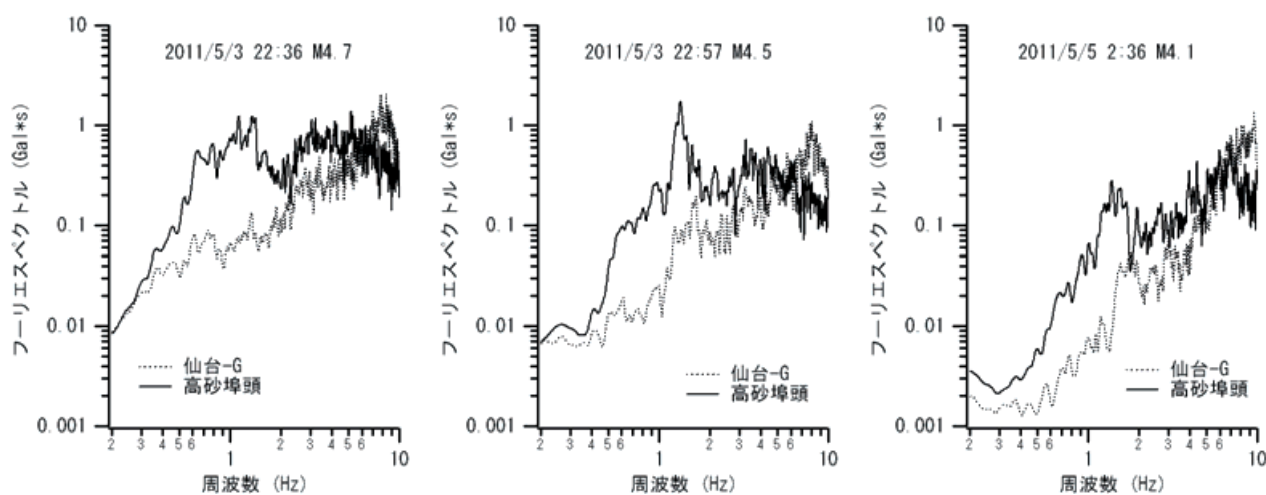


図-3.41 各地震による仙台-Gと高砂埠頭のフーリエスペクトル

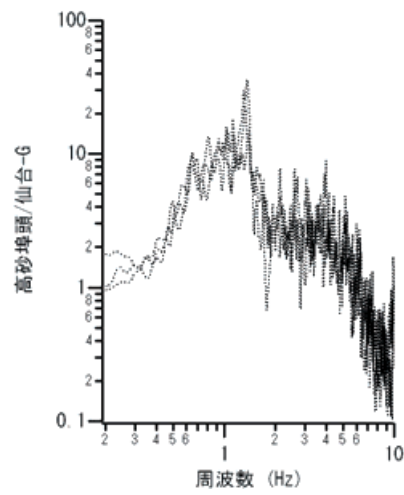


図-3.42 仙台-G に対する高砂埠頭のフーリエスペクトル比

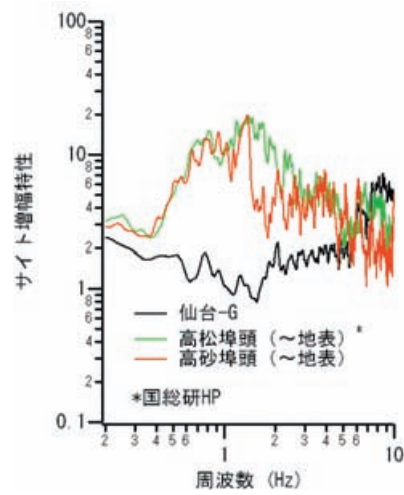


図-3.43 本研究で得られた高砂埠頭におけるサイト増幅特性

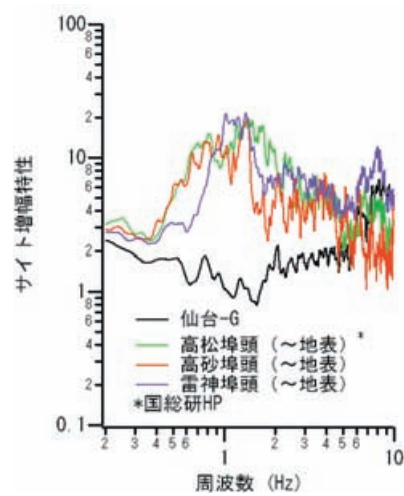


図-3.44 図-3.43 に雷神埠頭におけるサイト増幅特性（塩釜港湾・空港整備事務所による）を追加したもの

3.8 相馬港

相馬港では、港湾地域強震観測の観測点「相馬-G」が津波で流失したため東北地方太平洋沖地震の記録は得られていない。しかしながら、それ以前に発生した地震の記録は蓄積されているため、4. で述べるように、サイト特性置換手法を用いて、東北地方太平洋沖地震による相馬-Gでの地震動を事後推定することは可能である。ただし、相馬-Gにおける推定地震動を相馬港の係留施設に作用した地震動として扱うことができるかについては、微動観測に基づいて確認を行う必要がある。そこで、**図-3.45** および**表-3.13**に示すように相馬港の係留施設および相馬-G において微動観測を実施した。

写真-3.18 に 1 号埠頭における微動観測状況を示す。1 号埠頭では高橋他（2011）の**図-6.4.1.3**に示す矢板式岸壁の開口部の背後付近で観測を実施した。**写真-3.19** に 2 号埠頭における微動観測状況を示す。2 号埠頭ではタイヤマウント式クレーンの転倒箇所（高橋他，2011）の背後付近で観測を実施した。**写真-3.20** に 3 号埠頭における微動観測状況を示す。3 号埠頭では整備中の耐震強化岸壁中央部の背後付近で観測を実施した。**写真-3.21** は相馬-G における微動観測状況である。

表-3.13 相馬港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	1 号埠頭
No.2	2 号埠頭
No.3	3 号埠頭
No.4	相馬-G（港湾の強震観測地点）



写真-3.18 1 号埠頭における微動観測状況



写真-3.19 2 号埠頭における微動観測状況



写真-3.20 3 号埠頭における微動観測状況



写真-3.21 相馬-G における微動観測状況

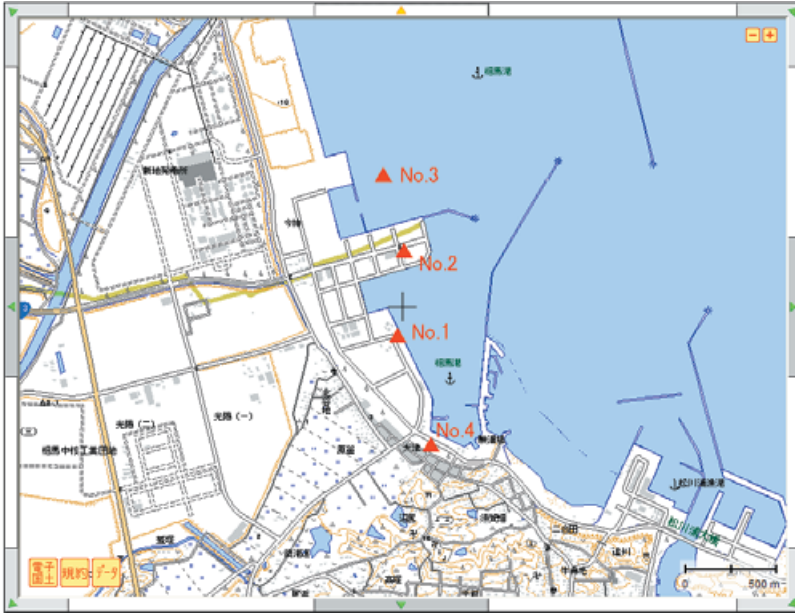


図-3.45 相馬港における微動観測地点

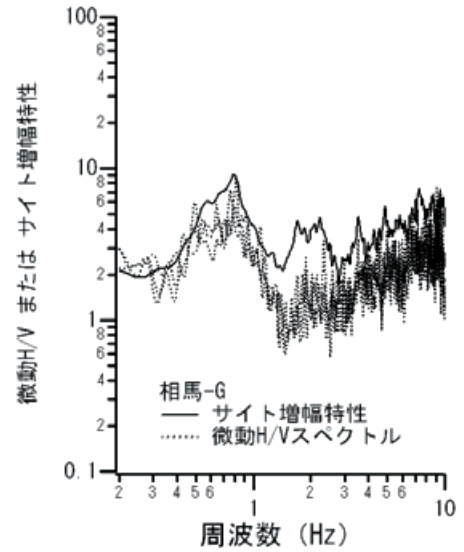


図-3.46 相馬-Gにおける微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

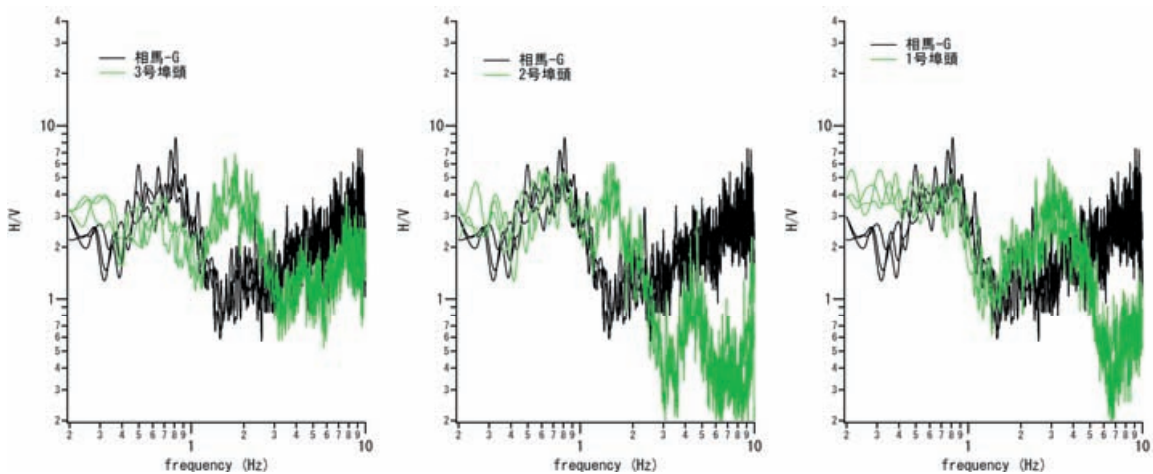


図-3.47 各埠頭と相馬-Gにおける微動 H/V スペクトルの比較

図-3.46 は相馬-G におけるサイト増幅特性(野津・長尾, 2005) と微動 H/V スペクトルを比較したものである。この図から、0.8Hz 付近に 1 つ目のピークがあること、2Hz 付近に 2 つ目のピークがあることなど、両者の特徴は非常に良く一致している。このように、相馬港周辺でもサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルとの間には一定の対応関係があることが期待できる。

図-3.47 は各埠頭における微動 H/V スペクトルを相馬-G と比較したものである。1 号埠頭については、微動 H/V スペクトルの特徴は全体に相馬-G と良く一致している。2 号埠頭についても、約 1Hz 以下においては微動 H/V スペクトルの特徴は相馬-G と良く一致しているが、1.5Hz 付近にピ

ークがあるという点が異なっている。ただし、この高周波側の相違については、表層地盤の相違によると考えられ、工学的基盤で深の性質は相馬-G に近いものと考えられる。3 号埠頭における微動 H/V スペクトルは 1 号埠頭や 2 号埠頭と比較すれば相馬-G との差が大きい。しかし、低周波側で 0.4-1Hz の範囲で上に凸となっている特徴は相馬-G と共通である。また、0.8Hz 付近と 2Hz 付近にピークがあるという点では相馬-G におけるサイト増幅特性(図-3.46) と共通の特徴を有している。

以上のことから、相馬-G における推定波を 1 号埠頭～3 号埠頭の係留施設に作用した地震動と見なしても大きな不都合は無いものと考えられる。

3.9 小名浜港

3.9.1 微動観測

小名浜港においては、港湾地域強震観測の観測点「小名浜事-G」が小名浜港湾事務所（図-3.48）敷地内に存在しており、ここで東北地方太平洋沖地震の記録が得られている（高橋他，2011）。また、H.20 年度には小名浜港湾事務所により3号埠頭において臨時の地震観測が実施され、サイト特性が明らかにされている（これについては後述する）。さらに、これに先立ち、港湾全体をある程度面的にカバーするような微動観測も当所により実施されている。しかしながら、小名浜港は規模の大きい港湾であり、かつ、港湾内におけるサイト特性が変化に富んでいるので、上記の観測だけで港湾全体のサイト特性の概要が把握できたとは言えない状況であった。

そこで、本研究では新たに港湾内の12箇所での微動観測を実施した（位置を図-3.48に示す）。その結果について、H.20年度に実施した微動観測（同じく位置を図-3.48に示す）の結果と併せて以下に示す。

まず、図-3.49は小名浜事-Gにおけるサイト増幅特性（野津・長尾，2005）と微動H/Vスペクトルを比較したものである。小名浜事-Gにおける微動H/Vスペクトルは5Hz付近に顕著なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数に顕著なピークを有しており、両者は良く対応している。このように、小名浜港周辺でもサイト増幅特性と微動H/Vスペクトルとの間には一定の対応関係があることが期待できる。

次に、各埠頭における微動H/Vスペクトルの特徴を西から東の順に見ていく。なお、以下においては、藤原埠頭の余震観測地点（H.23-3）における微動H/Vスペクトルをリファレンスとして用いている（余震観測については後述する）。

まず、大剣埠頭における微動H/Vスペクトルは藤原埠頭の余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大差ないと言える（図-3.50）。藤原埠頭における微動H/Vスペクトルは、先端部（H.20-11）を除き、藤原埠頭の余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大差ないと言える（図-3.51）。先端部（H.20-11）は明瞭なピークが無く岩盤が浅いものと推察される。7号埠頭における微動H/Vスペクトルは、基部（H.23-12）を除き、藤原埠頭の余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大差ないと言える（図-3.52）。基部（H.23-12）はピークが高周波側となっている。5-6号埠頭における微動H/Vスペクトルは、先端部（H.23-8）を除き、藤原埠頭の余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大差ないと言える（図-3.53）。しかし先端部（H.23-8）においてはピークが低周波側となっておりピーク高さも高くな

っている。このことは、5-6号埠頭先端部では、これまで述べてきた小名浜港の他の地点と比較して、港湾構造物にとってより厳しい地震動が作用しやすいことを意味すると考えられる。実際、5-6号埠頭先端部護岸は小名浜港で最も大きな被害を受けた施設の一つとなっている（後述）。被害程度と微動H/Vスペクトルとの関係を示唆する興味深い事例であると考えられる。

4号埠頭における微動H/Vスペクトルは、藤原埠頭の余震観測地点における微動H/Vスペクトルと比較して、先端部（H.20-8）ではピークが高周波側、中間部（H.23-10）ではピークが同等、基部（H.23-9）ではピークが低周波側となっている（図-3.54）。このことは、先端部から基部に向かって岩盤が深くなっていることを示唆するとともに、基部においてより厳しい地震動が作用しやすいことを意味すると考えられる。この傾向は5-6号埠頭とは逆であり、小名浜港における地下構造およびサイト特性の複雑さを示す例である。

3号埠頭における微動H/Vスペクトルは全体に藤原埠頭の余震観測地点における微動H/Vスペクトルと比較してピークが低周波側にある（図-3.55）。このことは、3号埠頭は全体として、厳しい地震動が作用しやすいことを意味する。実際、3号埠頭で生じた被害は、今回の地震において小名浜港で生じた被害の中でも最も著しいものであった。このことも、被害程度と微動H/Vスペクトルとの関係を示唆する興味深い事例となっている。なお、ピーク周波数は先端部（H.20-7）が1.7Hz程度である以外は概ね1Hz程度である。このことは、4号埠頭と同様、3号埠頭でも、先端部から基部に向かって岩盤が深くなっていることを示唆する。また、ここでは述べないが1号埠頭と2号埠頭のピーク周波数も1Hz程度である。

3.9.2 余震観測

小名浜港における余震観測は5月2日夕方から5月5日未明にかけて実施した。観測地点は図-3.56に示す4地点（事務所、5号埠頭、藤原埠頭、大剣埠頭）である。なお、これらの観測点配置は、小名浜港の西半分まで過去に地震観測が実施されていないことを考慮して定めたものである。

観測の結果、表-3.14に示す5つの地震の記録が得られた。これ以外にも気象庁が震源情報を公表していない小さい地震の記録が多数得られているがここでは詳しく述べない。各地震による各地点のフーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウインドウを適用したものを図-3.57に示す。埠頭-事務所間のスペクトル比を図-3.58に示す。この対数平均を小名浜事-Gにおけるサイト増幅特性（図-3.49）に乗じることによ



図-3.48 小名浜港における地震観測地点と微動観測地点
 ▲▲：それぞれ H.20 年度と H.23 年度における地震観測地点
 △△：それぞれ H.20 年度と H.23 年度における微動観測地点

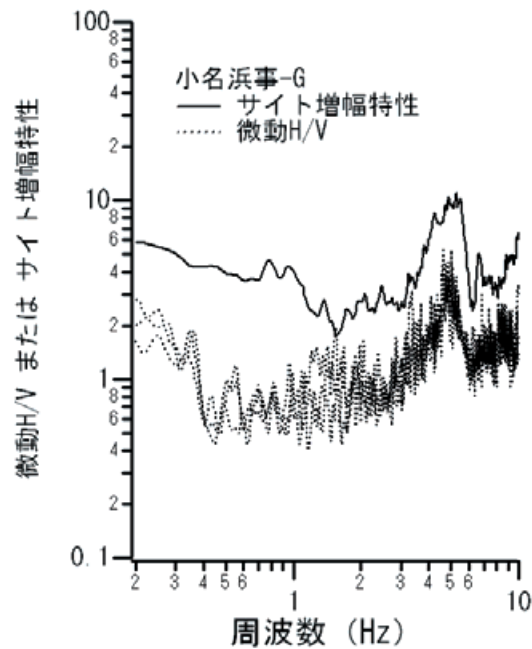


図-3.49 小名浜事-G における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

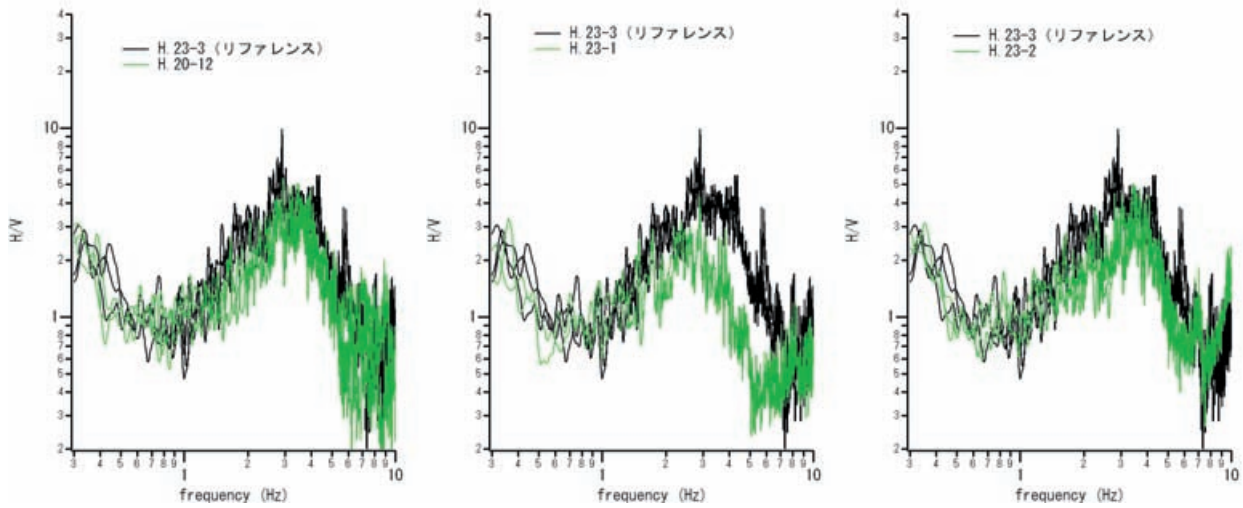


図-3.50 大剣埠頭における微動 H/V スペクトル (藤原埠頭における余震観測地点との比較)

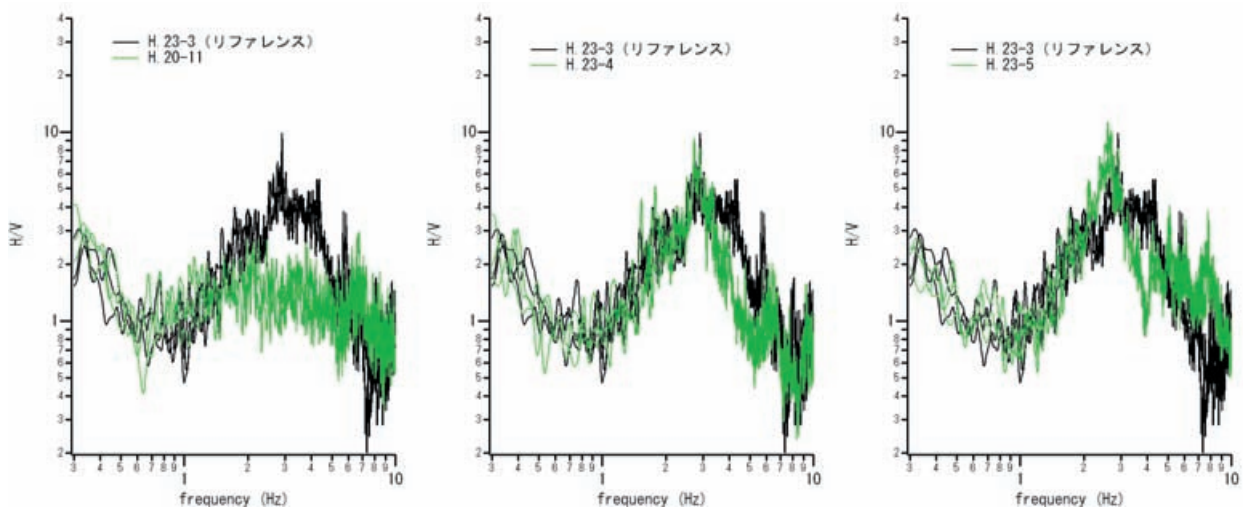


図-3.51 藤原埠頭における微動 H/V スペクトル (藤原埠頭における余震観測地点との比較)

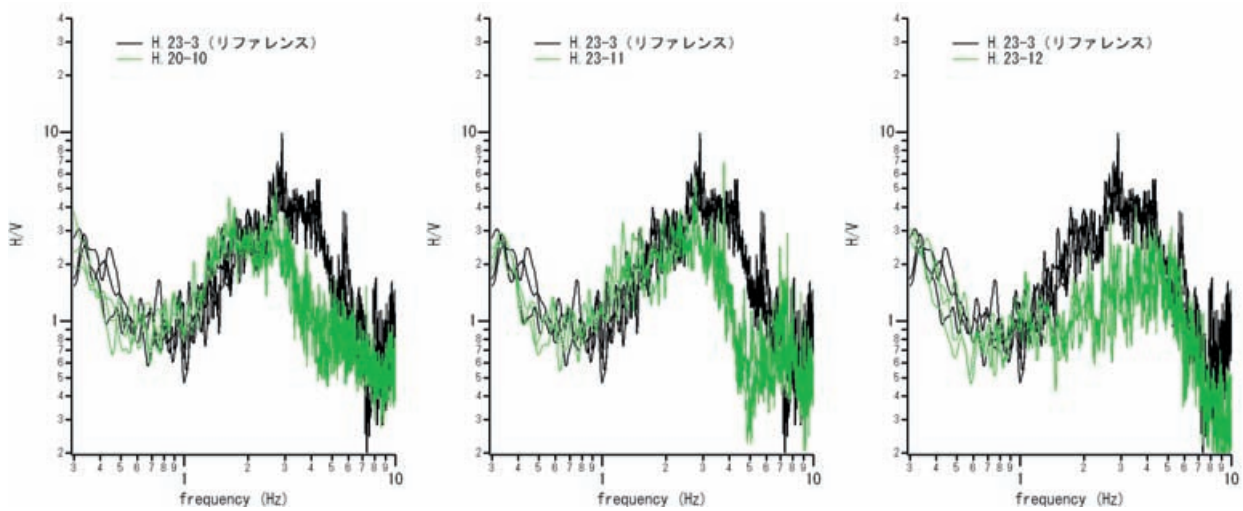


図-3.52 7号埠頭における微動 H/V スペクトル (藤原埠頭における余震観測地点との比較)

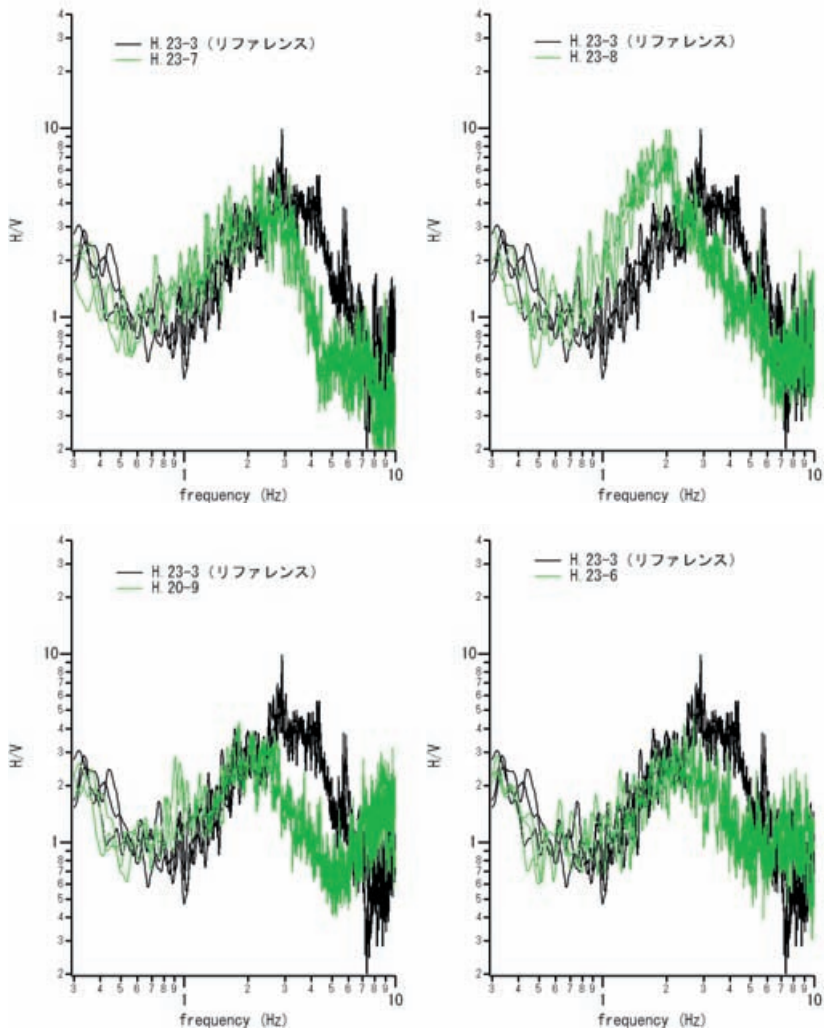


図-3.53 5-6号埠頭における微動 H/V スペクトル（藤原埠頭における余震観測地点との比較）

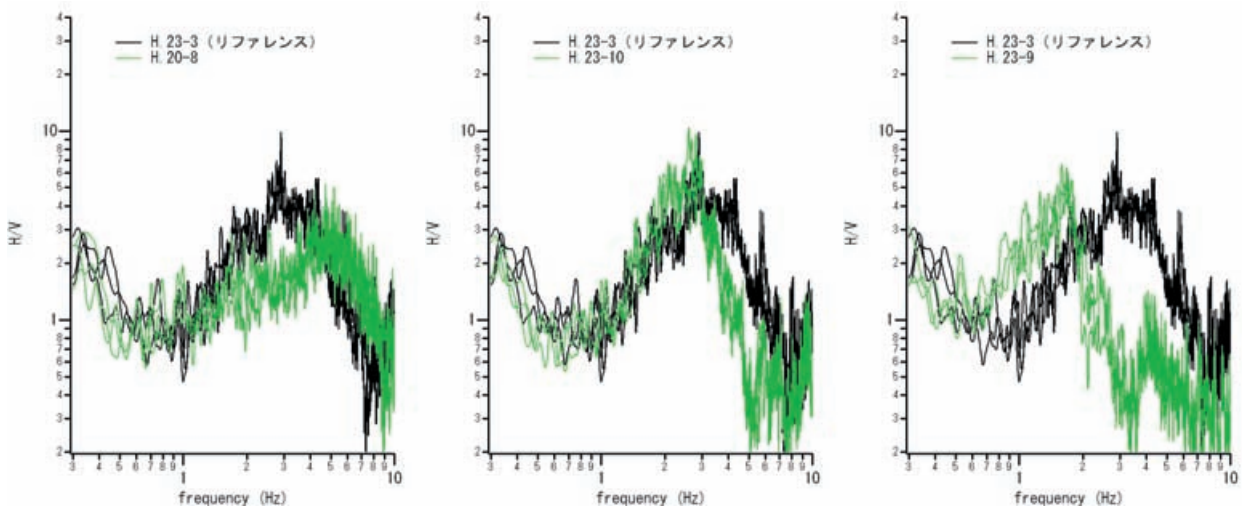


図-3.54 4号埠頭における微動 H/V スペクトル（藤原埠頭における余震観測地点との比較）

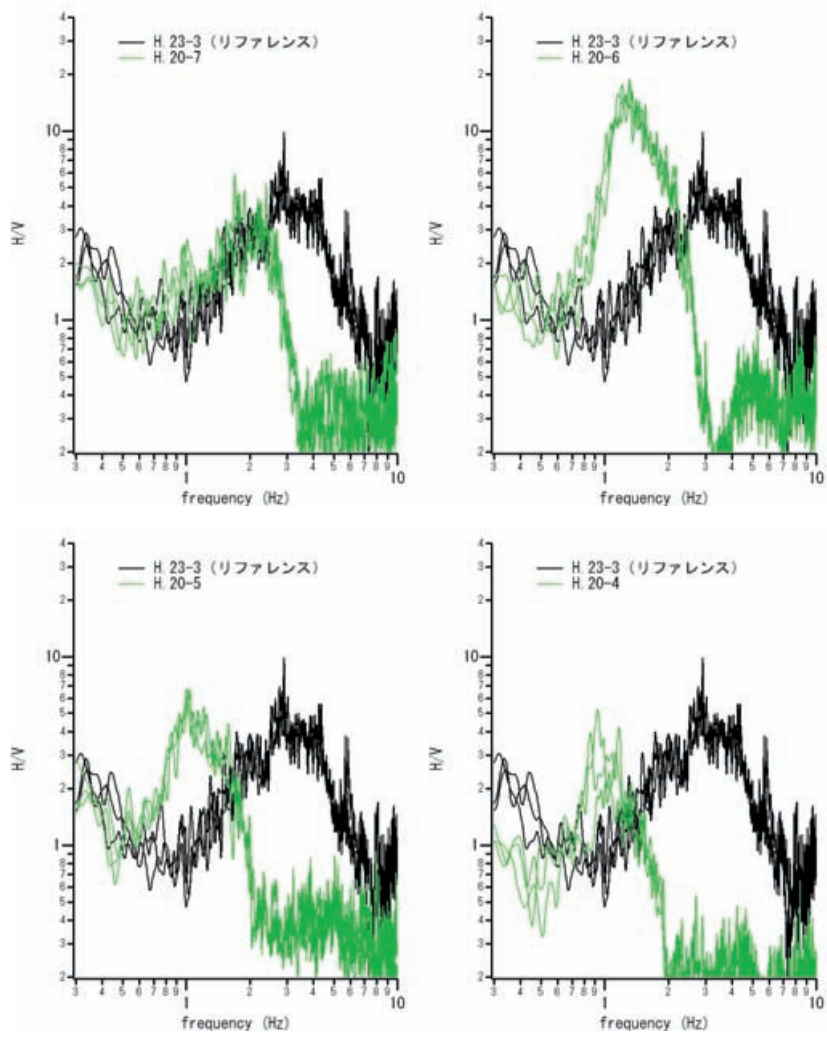


図-3.55 3号埠頭における微動 H/V スペクトル（藤原埠頭における余震観測地点との比較）



図-3.56 小名浜港における余震観測地点（▲）

表-3.14 小名浜港の余震観測で観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード	備考
EQ1	5/2 16:58	茨城県沖	約 30km	4.0	5号埠頭は記録なし
EQ2	5/3 22:36	宮城県沖	約 40km	4.7	
EQ3	5/3 22:57	福島県浜通り	約 20km	4.5	藤原埠頭は記録なし
EQ4	5/4 17:47	茨城県北部	約 20km	3.9	
EQ5	5/5 0:09	茨城県北部	約 20km	4.2	藤原埠頭は記録なし

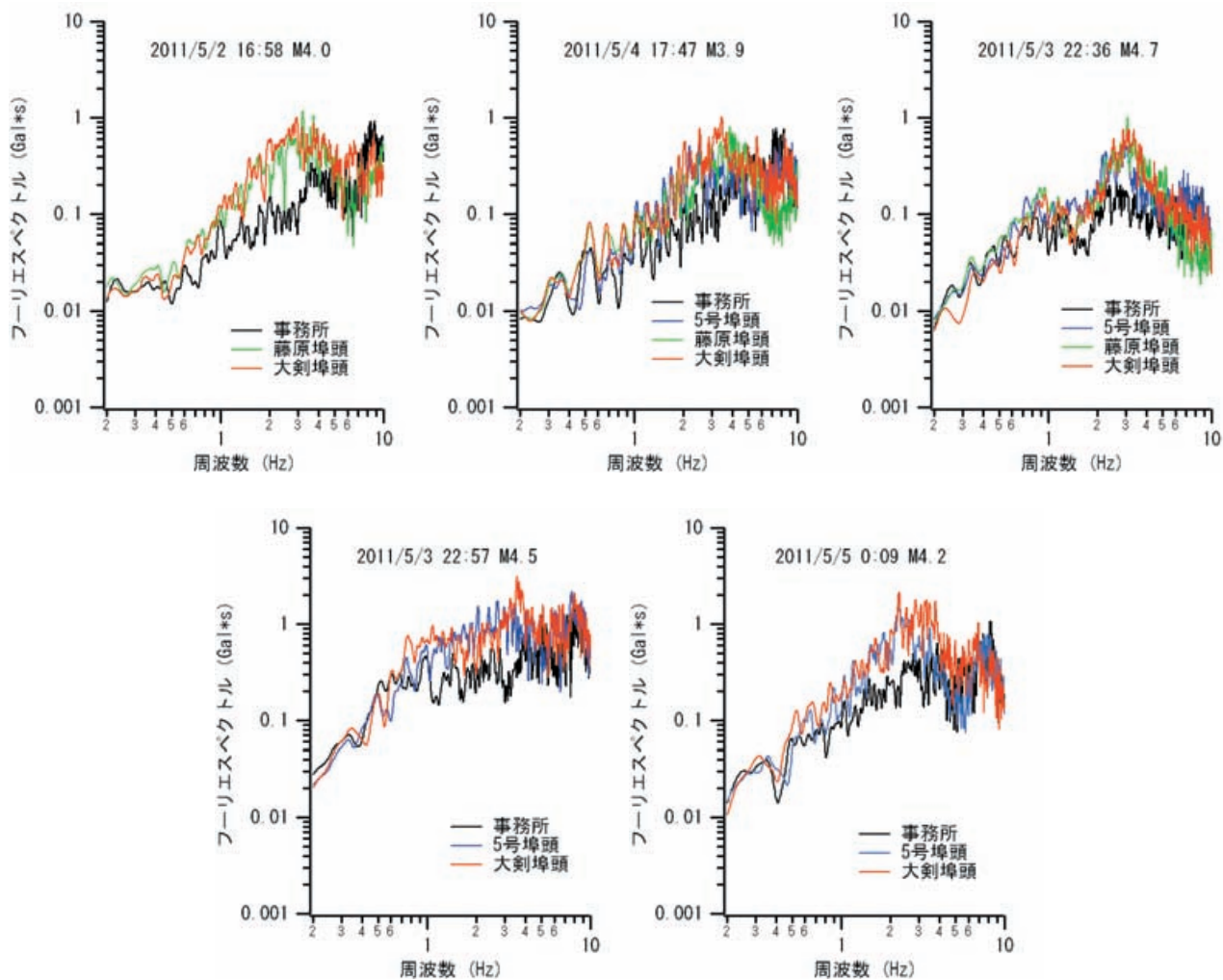


図-3.57 各地震による各地点のフーリエスペクトル

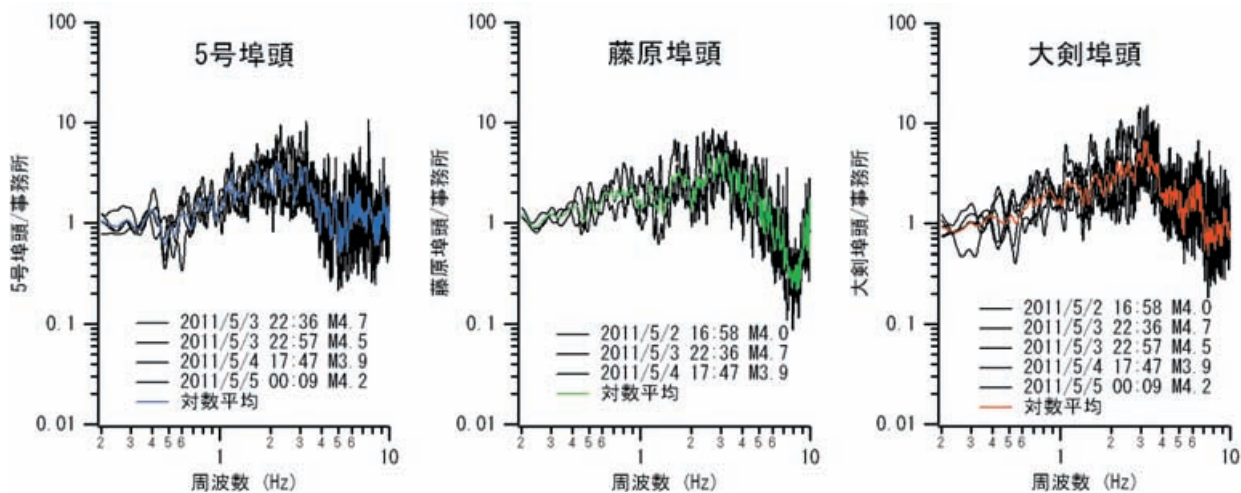


図-3.58 埠頭—事務所間のスペクトル比とその対数平均

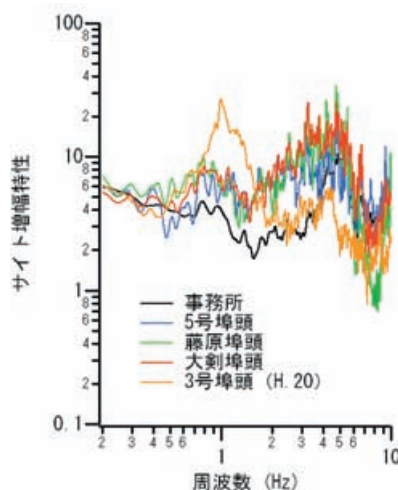


図-3.59 本研究で得られた5号埠頭，藤原埠頭，大剣埠頭におけるサイト増幅特性と事務所（小名浜事-G）のサイト増幅特性（野津・長尾，2005），および3号埠頭でのサイト増幅特性（H.20年度小名浜港湾事務所調査）の比較

り算定された各埠頭におけるサイト増幅特性を図-3.59に示す。この結果から、①事務所よりも地震観測を行った各埠頭の方がサイト増幅特性が大きいこと、②地震観測を行った埠頭間でサイト増幅特性の差は大きくはないこと、がわかる。ただし、これらの埠頭におけるサイト増幅特性は、H.20年度に小名浜港湾事務所による地震観測で明らかにされた3号埠頭（図-3.48のH.20-5地点）におけるサイト増幅特性とは大幅に異なる（後者の方がはるかに厳しい）点に注意が必要である（図-3.59）。

3.9.3 小名浜港における観測結果のまとめ

小名浜港における観測結果は次の通りまとめることができる。

①大剣埠頭から5号埠頭までは一部例外を除いて微動特性

に大きな変化はない。また、この範囲の三箇所でも余震観測を実施したが、地震動の特性に著しい相違は見られなかった。よって、この領域は地震動の観点から一つのゾーンとすることができると考えられる。一部例外とは、藤原埠頭の先端部でピークが見られないこと、7号埠頭の基部でピークが多少高周波よりであること、5-6号埠頭の先端部でピークが低周波よりであることである。

②3号埠頭（先端部以外）では、微動H/Vのピークが1Hz程度と、大剣埠頭から5号埠頭までのゾーンに比べて明らかに低周波側にあり、また、H.20年度に小名浜港湾事務所による地震観測で明らかにされた3号埠頭におけるサイト増幅特性も、ピークが1Hz付近にあり、大剣埠頭から5号埠頭までのものとは異なっている。また実際に深刻な被害が3号埠頭で発生している。従って3号埠頭

については大剣埠頭から5号埠頭までとは別ゾーンと考えることが必要である。

③3号埠頭の中でも先端部だけは微動 H/V のピークが1.7Hz程度とやや高く、3号埠頭(先端部以外)とは別扱いとすることが望ましいと考えられる。4号埠頭については、基部は3号埠頭先端部に近い特性であり、4号埠頭全体を3号埠頭先端部と同一ゾーンとして扱うことも考えられる。

以上により、地震動の観点からは、小名浜港では以下のようなゾーニングが可能であると考えられる。

ゾーン1:3号埠頭一般部(1号埠頭と2号埠頭も必要であればここに含める)

ゾーン2:3号埠頭先端部(4号埠頭もここに含める)

ゾーン3:5号埠頭～大剣埠頭

4. 地震動の事後推定

ここまでで得られたデータなどをもとに、サイト特性置換手法(Hata *et al.*, 2011)を用い、被災した港湾における地震動の事後推定を行っている。その点について報告する。対象港湾は石巻港、仙台塩釜港(仙台港区)、相馬港、小名浜港である。なお、同手法を各港湾に適用するにあたり、表層地盤の非線形性の取り扱いについて個別に工夫を行っているが、相馬港から説明を開始するのが最も理解しやすいと考えられるので、地理的な順序とは異なるが、最初に相馬港について説明する。

4.1 相馬港

東北地方太平洋沖地震の際、相馬-Gの強震計は流し失強震記録が得られていない(高橋他, 2011)。そこで、ここではサイト特性置換手法により相馬-Gにおける地震動の事後推定を行う。この方法は、対象地点周辺における強震観測点(基準観測点と呼ぶ)で得られた本震記録に対し、サイト増幅特性の補正を行うことにより対象地点における本震の地震動のフーリエ振幅を推定し、一方、対象地点における本震の地震動のフーリエ位相は、対象地点で得られている余震など他の地震のフーリエ位相で近似することにより、対象地点における本震の地震動を推定するものである。

4.1.1 基準観測点の選定

サイト特性置換手法で用いるサイト増幅特性は、通常は中小地震記録に基づいて算定されているため、地盤の線形時の増幅特性を反映している。従って、基準観測点における本震記録が非線形性の影響を大きく受けていることは好ましくない。

相馬港の周辺には、K-NETのFKS001、KiK-netのMYGH10などの強震観測点があり、本震の地震動が観測されている。図-4.1はそれらのフーリエスペクトル(水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの)と、それらの観測点におけるサイト増幅特性(野津・長尾, 2005)との比較を行ったものである。これを見ると、FKS001ではサイト増幅特性よりも本震のフーリエスペクトルの方がピーク周波数が(特に1~3Hz付近において)低周波側となっており、本震時に地盤が非線形挙動を示していたことを示唆している。一方MYGH10では少なくともそのような傾向は顕著ではない。加えて、MYGH10における地表/地中のスペクトル比は、本震の二日前に発生したM7.3の地震と本震とであまり変化がなく(図-4.2)、このことから、MYGH10における地盤の非線形挙動が顕著でなかったことが伺える。そこで、ここでは基準観測点としてMYGH10を選定した。

4.1.2 拡張型サイト特性置換手法の適用

既存のサイト特性置換手法は、対象地点における本震の地震動のフーリエ位相を、対象地点で得られている余震など他の地震のフーリエ位相で近似するものであるが、東北地方太平洋沖地震の際、MYGH10および周辺の観測点で観測された地震動は大きく二つの山からなり(図-4.3)、それぞれ別のサブイベントに起因することは明らかである。この場合、本震のフーリエ位相が1個の余震のフーリエ位相で近似できないことは明らかである。そこで、このような波形に対応するために、既存のサイト特性置換手法の拡張を行った。すなわち、基準観測点における地震動から波形の前半部分と後半部分を切り出し、各々に対して既存のサイト特性置換手法を適用して対象地点における地震動に変換し、最後にそれらを重ね合わせるという方法である。

まず、図-4.3に示す地震動に対して、65秒~85秒の範囲でテーパーをかけることにより、前半部分と後半部分の切り出しを行った。切り出された前半部分を図-4.4に、後半部分を図-4.5に示す。

次に、切り出された前半部分のフーリエスペクトルを計算し、MYGH10と相馬-Gのサイト増幅特性(図-4.6)の比を乗じることにより、相馬-Gの地表におけるフーリエスペクトルを推定した。その際、

(相馬-GにおけるEW成分) = (MYGH10におけるEW成分) × (サイト増幅特性の比)

(相馬-GにおけるNS成分) = (MYGH10におけるNS成分) × (サイト増幅特性の比)

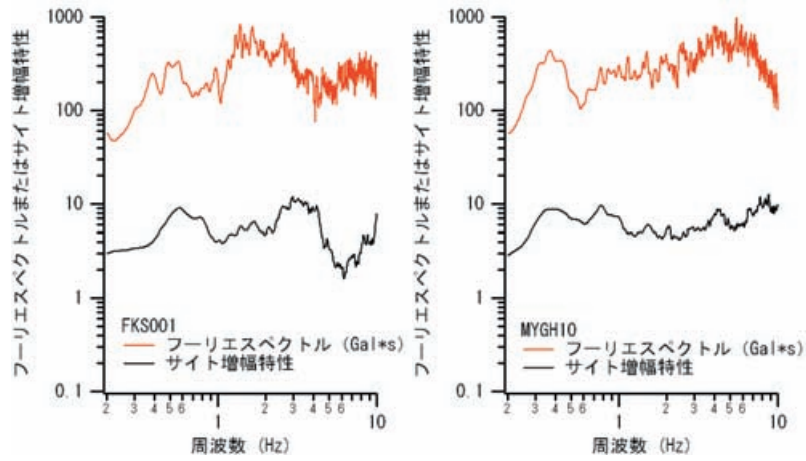


図-4.1 FKS001 と MYGH10 における本震のフーリエスペクトルとサイト増幅特性³⁾

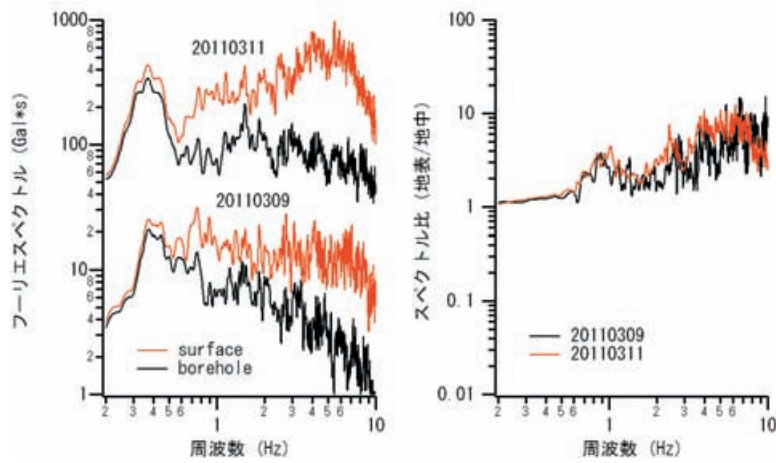


図-4.2 2011年3月9日三陸沖の地震 (M7.3) と東北地方太平洋沖地震 (M9.0) による MYGH10 における地表と地中のフーリエスペクトル (左) と、地表/地中のスペクトル比 (右)

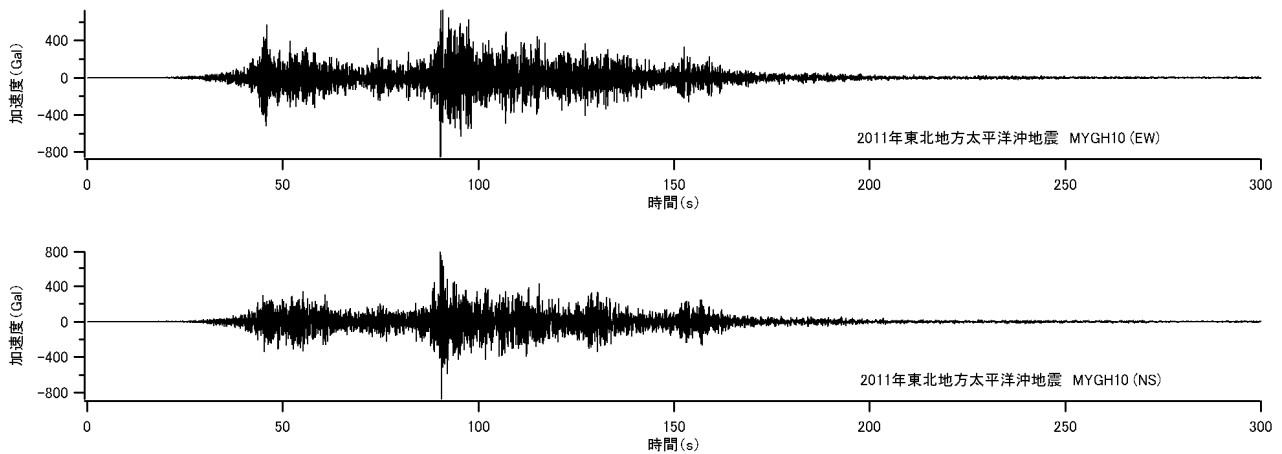


図-4.3 2011年東北地方太平洋沖地震の際 MYGH10 の地表で観測された地震動

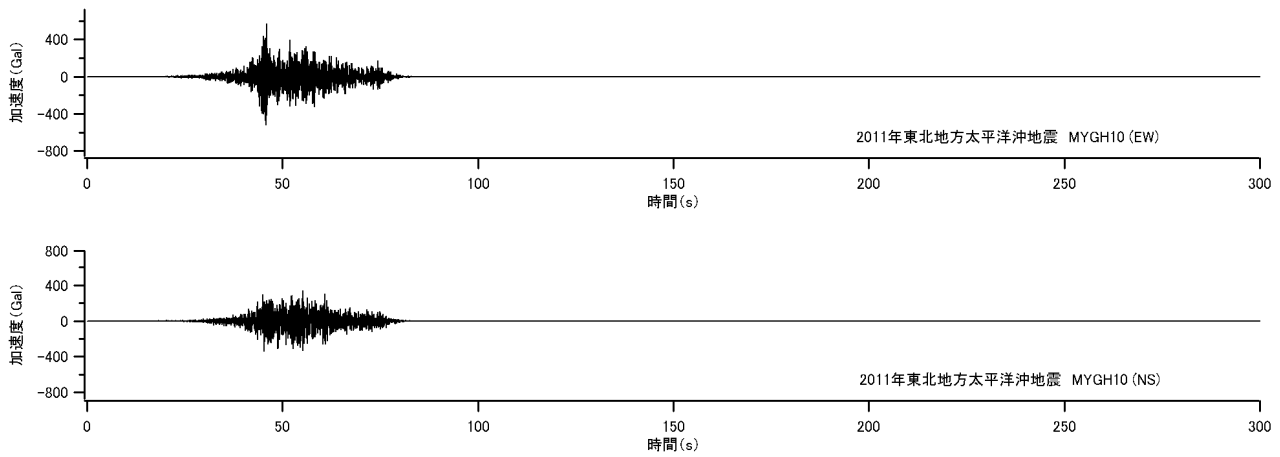


図-4.4 MYGH10 の地表で観測された地震動の前半部分

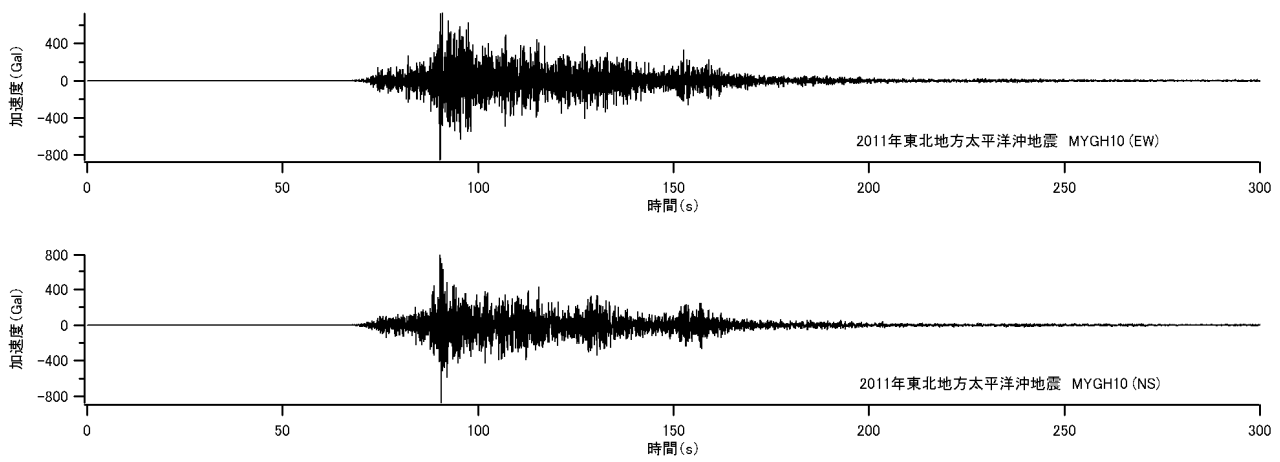


図-4.5 MYGH10 の地表で観測された地震動の後半部分

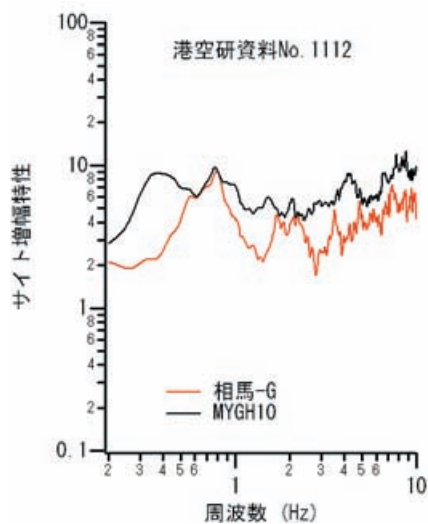


図-4.6 MYGH10 および相馬-G におけるサイト増幅特性³⁾

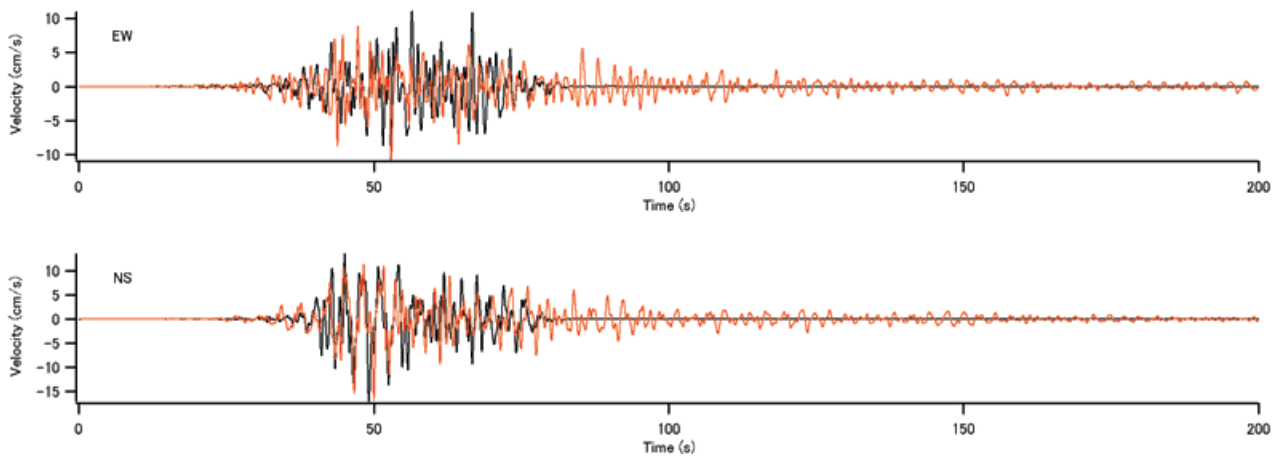


図-4.7 2011年東北地方太平洋沖地震によるMYGH10の地表での速度波形(0.2-2Hz)の前半部分のフーリエ位相を2005年8月16日宮城県沖の地震(M7.2)のフーリエ位相に置き換えた波形(灰)と元の前半部分(黒)との比較

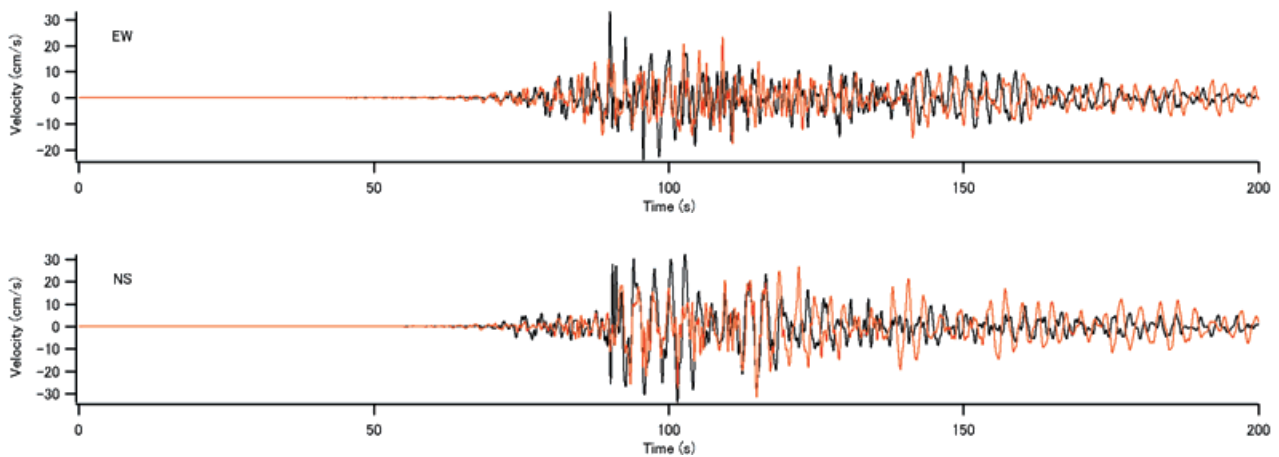


図-4.8 2011年東北地方太平洋沖地震によるMYGH10の地表での速度波形(0.2-2Hz)の後半部分のフーリエ位相を2011年3月9日三陸沖の地震(M7.3)のフーリエ位相に置き換えた波形(灰)と元の後半部分(黒)との比較

表-4.1 相馬-Gにおける表層地盤モデル(野津・若井, 2010)

層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
2.00	150.0	1.94
3.00	250.0	1.94
—	550.0	1.73

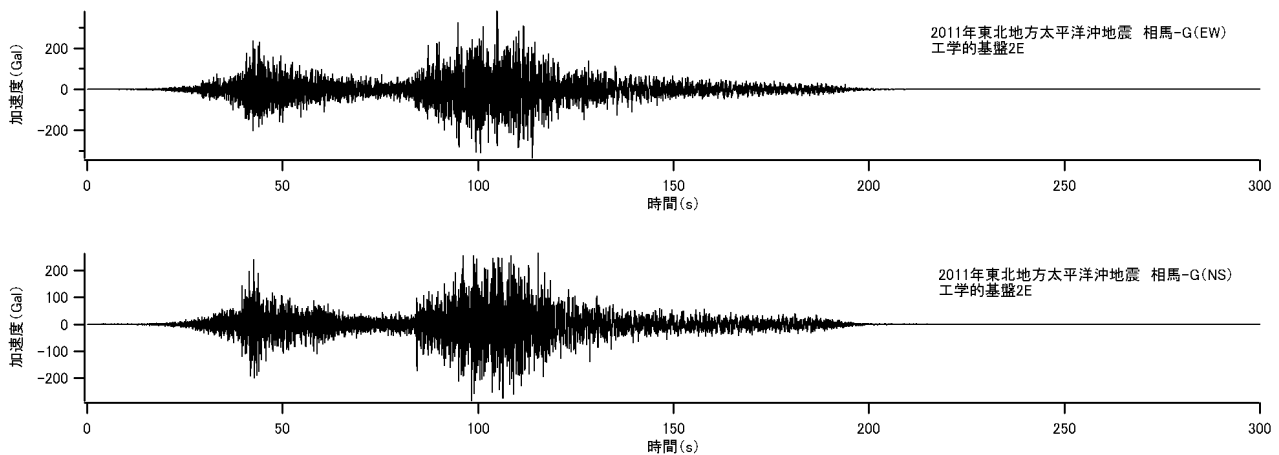


図-4.9 推定された相馬-Gの工学的基盤における2E波

のように推定を行った。さらに、得られたフーリエスペクトルと本震以前の地震による相馬-Gでの記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、相馬-Gにおける本震時の地震動の前半部分を推定した。このとき用いる本震以前の記録としては、2005年8月16日宮城県沖の地震(M7.2)による相馬-Gでの記録を採用した。なお、MYGH10においては、本震波形の前半部分のフーリエ位相を2005年8月16日宮城県沖の地震(M7.2)のフーリエ位相に置き換えることにより、本震波形の前半部分が良好に再現されることを確認している(図-4.7)。

また、これと同様の作業を波形の後半部分に対しても行い、相馬-Gにおける本震時の地震動の後半部分を推定した。このとき用いる本震以前の記録としては、2011年3月9日三陸沖の地震(M7.3)による相馬-Gでの記録を採用した。なお、MYGH10においては、本震波形の後半部分のフーリエ位相を2011年3月9日三陸沖の地震(M7.3)のフーリエ位相に置き換えることにより、本震波形の後半部分が良好に再現されることを確認している(図-4.8)。

さらに、前半部分と後半部分を足し合わせることで、相馬-Gにおける本震時の地震動(ただし地盤が線形の場合の地震動)を推定した。このとき、前半部分と後半部分の足し合わせは、前半部分と後半部分の各々に対応するS波初動の間隔がMYGH10と同様となるように足し合わせを行った。

最後に、相馬-Gにおける表層地盤モデル(表-4.1)に基づいて、線形の重複反射理論により、工学的基盤(表-4.1)におけるS波速度550m/sの地層)での2Eを求めた。結果を図-4.9に示す。ここでの推定地震動の対象周波数は0.2Hz以上である。

推定波の利用上の注意点としては、ここで得られた地震動はS波速度が550m/s程度の地層における2E波であるた

め、解析に用いる場合、S波速度がこれと大きく異ならない地層における2E波として用いる必要がある。

4.2 石巻港

3.で調べたように、石巻港雲雀野埠頭No.9地点における東北地方太平洋沖地震の際の地震動は、K-NET石巻で観測された地震動とはかなり異なっていた可能性が高い。そこで、ここでは雲雀野埠頭No.9地点(図-3.36)における余震観測結果(3.)に基づき、東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定を実施した。

なお、石巻港の最寄りの強震観測地点であるK-NET石巻で本震時に観測された地震動(図-4.10)はピーク周波数が0.69Hzとなっており、線形時のサイト増幅特性(野津・長尾, 2005)と比較するとピーク周波数が低周波側に移動しているため、地盤の非線形挙動の影響を受けていることは明らかである(図-4.11)。このような場合、K-NET石巻における工学的基盤～地表の地盤モデルを作成し、等価線形解析等により地震動を工学的基盤まで引き戻すだけでは、ピーク周波数は大きく変化せず、表層地盤の非線形挙動の影響を除去することはできない。

そこで、新しい試みとして、非線形時に対応した地震基盤～地表のサイト増幅特性をK-NET石巻と雲雀野埠頭に対して概略的に求め、これを利用してサイト特性置換手法により雲雀野埠頭における地震動の推定を行った。

4.2.1 非線形時のサイト増幅特性の推定

非線形時のサイト増幅特性の推定にあたり、リファレンスとして、地盤の非線形挙動の影響を受けていない観測点を必要とする。ここでは、石巻市周辺でその条件を満たす可能性の高い観測点としてK-NET牡鹿を選択した。K-NET牡鹿は土質区分上は地表まで岩盤となっており、GL-2m以

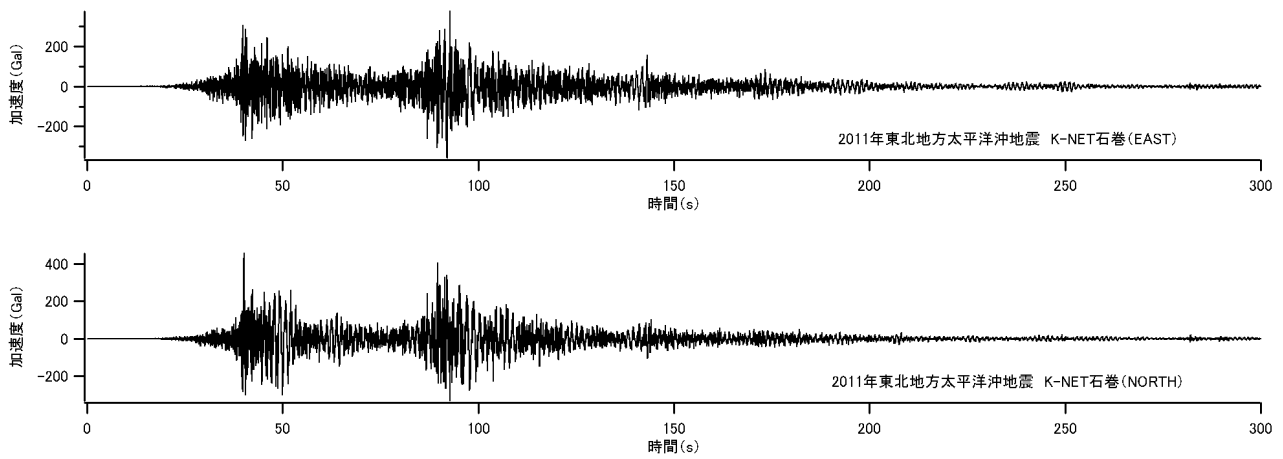


図-4.10 2011年東北地方太平洋沖地震の際、K-NET石巻で観測された地震動

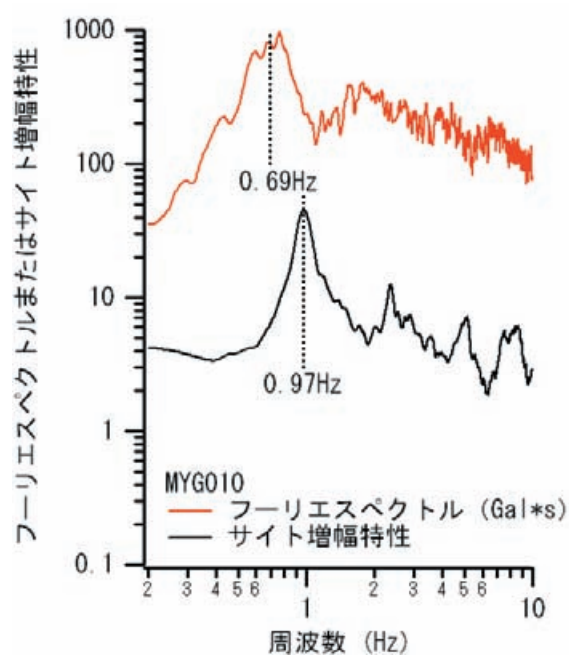


図-4.11 K-NET石巻における本震のフーリエスペクトルとサイト増幅特性(野津・長尾, 2005)の関係

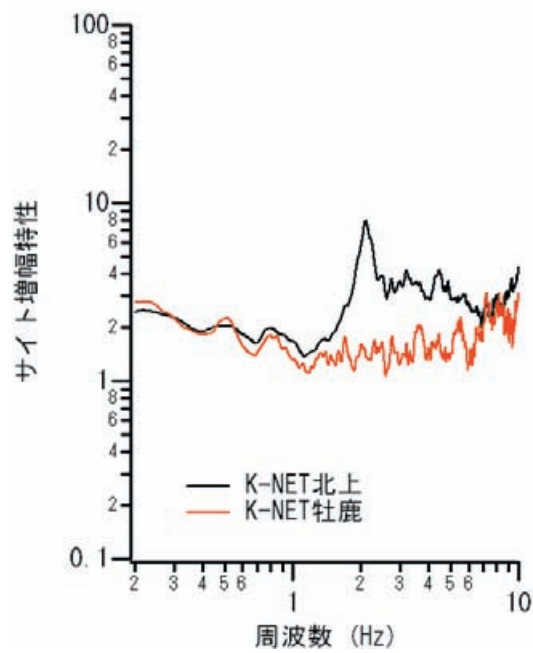


図-4.12 移設後の K-NET 牡鹿におけるサイト増幅特性の評価結果

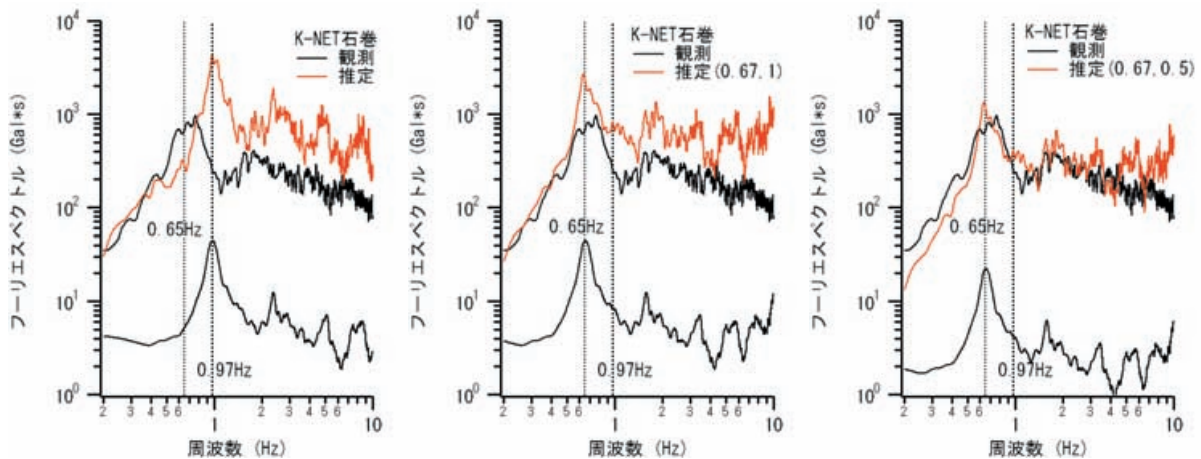


図-4.13 K-NET 牡鹿での本震観測スペクトルをもとにした K-NET 石巻での本震スペクトルの推定結果

(左) K-NET 石巻における線形時のサイト増幅特性（野津・長尾，2005）を使用。

(中) 上記のサイト増幅特性をピーク周波数が 0.65Hz となるように対数軸上で平行移動して使用。

(右) 上記のサイト増幅特性を 1/2 倍して使用。

各々の図で下方に示すものは各々のケースにおいて使用した K-NET 石巻のサイト増幅特性。

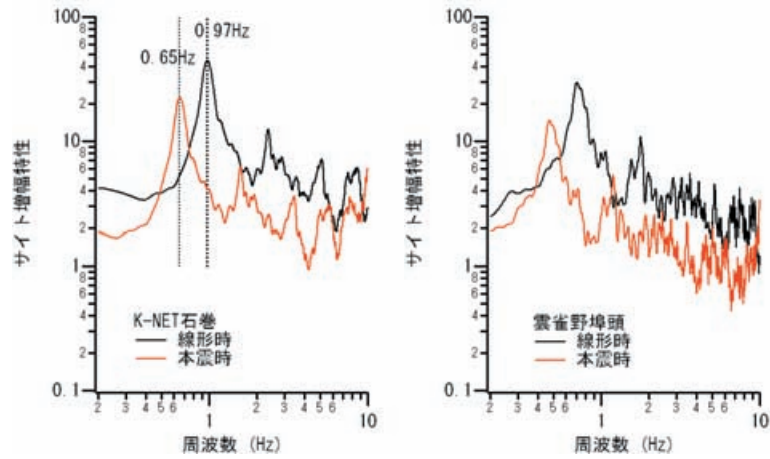


図-4.14 K-NET 石巻と雲雀野埠頭 No.9 地点における線形時と本震時のサイト増幅特性の推定結果

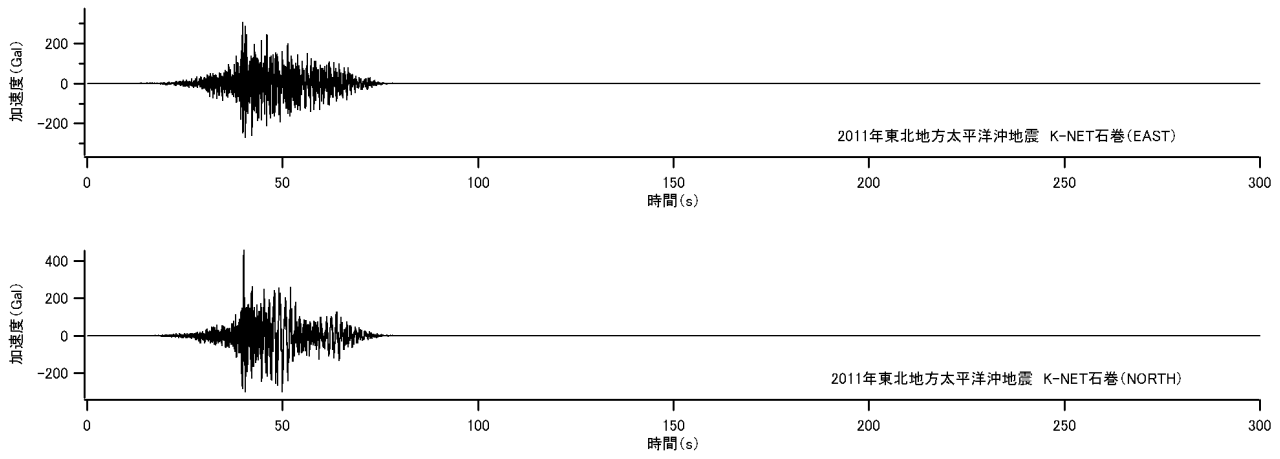


図-4.15 K-NET 石巻の地表における地震動（前半部分）

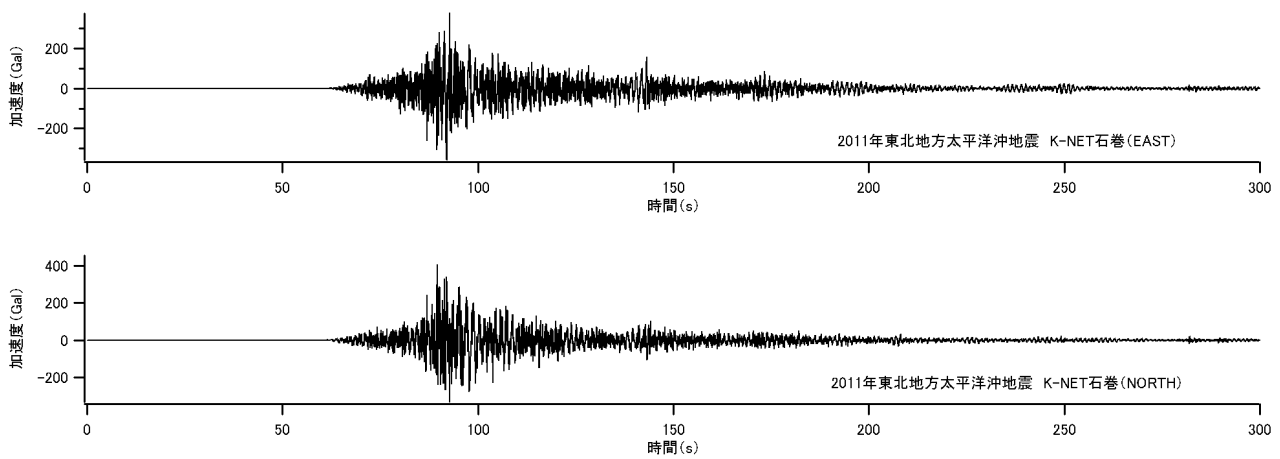


図-4.16 K-NET 石巻の地表における地震動（後半部分）

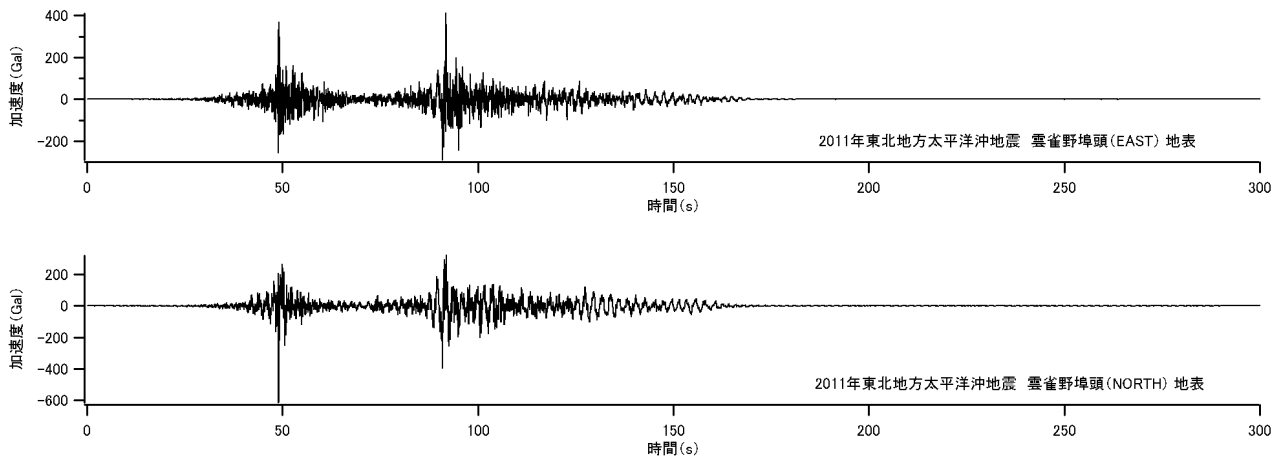


図-4.17 雲雀野埠頭 No.9 地点の地表における地震動の推定結果

表-4.2 雲雀野埠頭 No.9 地点付近の地盤モデル

層厚 (m)	S 波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
16.10	207.0	2.000
3.25	174.0	2.000
15.25	158.0	1.597
1.65	198.0	2.000
2.75	155.0	1.762
1.00	145.0	2.000
3.70	175.0	1.733
1.90	187.0	2.000
3.65	205.0	1.742
1.75	195.0	2.000
1.00	226.0	1.500
4.95	275.0	2.000
1.00	249.0	1.500
1.55	222.0	2.000
0.95	219.0	1.500
1.30	259.0	1.500
2.10	220.0	2.000
1.80	297.0	1.500
0.80	318.0	2.000
6.35	285.0	2.000
—	318.0	2.000

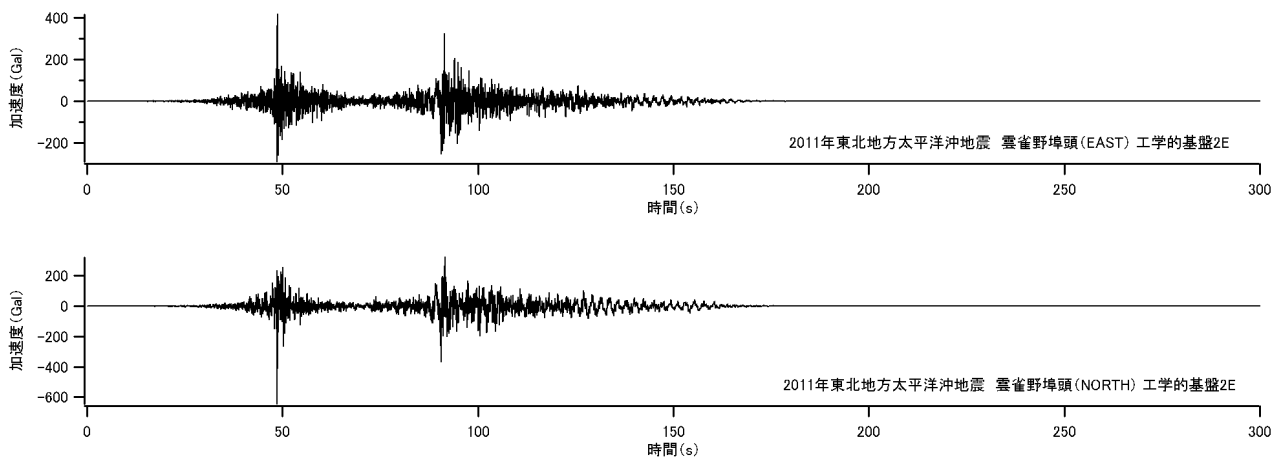


図-4.18 推定された雲雀野埠頭 No.9 地点の工学的基盤における 2E 波

下では S 波速度が 1100m/s 以上となっているため、本震時の地震動が（ごく高周波数成分を除けば）地盤の非線形挙動の影響を受けていた可能性は小さいと考えられる。

K-NET 牡鹿は 2004 年 1 月 30 日に移設されており、移設後の K-NET 牡鹿のサイト増幅特性は既往の研究（野津・長尾，2005）では算定されていない。そこで、ここでは、まず、K-NET 牡鹿と最寄りの K-NET 観測点である K-NET 北上における中小地震観測記録のフーリエスペクトル比に基づいて、移設後の K-NET 牡鹿におけるサイト増幅特性の評価を行った。具体的には

- ①2004 年 1 月 30 日から 2011 年 3 月 10 日までの間に発生
 - ②M5.0 以上 M7.0 未満
 - ③深さ 60km 以下
 - ④K-NET 牡鹿と K-NET 北上の両方で記録が得られている
- 以上の 4 条件を満足する 31 の地震に対し、K-NET 牡鹿と K-NET 北上におけるフーリエスペクトルの比を計算し、これに K-NET 北上における既往のサイト増幅特性（野津・長尾，2005）を乗じることにより、移設後の K-NET 牡鹿におけるサイト増幅特性の評価を行った。結果を図-4.12 に示す。得られたサイト増幅特性は表層地盤による増幅の影響の小さいものとなっている。このことから、移設後の K-NET 牡鹿における本震時の地震動が表層地盤の非線形挙動の影響を受けていた可能性は小さいことが再確認できる。

次に、K-NET 牡鹿で観測された本震時のフーリエスペクトルに対し、K-NET 牡鹿と K-NET 石巻のサイト増幅特性の比を乗じることにより、K-NET 石巻における本震時のフーリエスペクトルを推定し、実際に観測されたフーリエスペクトルとの比較を行った。その結果、図-4.13（左）に示すように、K-NET 石巻における線形時のサイト増幅特性（野津・長尾，2005）を使用すると、ピーク周波数が実際に観測されたものとずれ、同時に振幅が過大評価となる。そこで、まず、非線形時における地盤の S 波速度の低下に対応した補正として、サイト増幅特性をピーク周波数が 0.65Hz となるように対数軸上で平行移動すると、推定結果と観測結果のピーク周波数は概ね一致するようになる（図-4.13 中）。このことは、K-NET 石巻周辺の地盤における本震時の S 波速度が平均的には線形時の 2/3 程度まで低下していたことを意味する。次に、非線形時における地盤の減衰定数の増加に対応した補正として、平行移動後のサイト増幅特性を全周波数にわたり 1/2 倍とした。補正後のサイト増幅特性を用いると、K-NET 石巻における観測スペクトルが概ね説明できるようになる（図-4.13 右）。なお図-4.13（左）（中）（右）にはそれぞれ使用したサイト増幅特性を図の下方に記入している。以上で K-NET 石巻における本震

時のサイト増幅特性が求まったので、これと全く同様の補正を雲雀野埠頭 No.9 におけるサイト増幅特性にも適用し（ピーク周波数が 2/3 倍となるよう対数軸上で平行移動させることと振幅を 1/2 倍とすること）、雲雀野埠頭 No.9 地点における本震時のサイト増幅特性の評価を行った。結果を図-4.14 に示す。以下、これを利用して、雲雀野埠頭 No.9 地点における本震時の地震動を推定する。

4.2.2 サイト特性置換手法の適用

相馬港と同様、拡張型のサイト特性置換手法を適用し、雲雀野埠頭 No.9 地点の地表における地震動を推定する。図-4.10 に示す K-NET 石巻における地震動に対して、60 秒～80 秒の範囲でテーパーをかけることにより、前半部分と後半部分の切り出しを行った。切り出された前半部分を図-4.15 に、後半部分を図-4.16 に示す。

次に、切り出された前半部分のフーリエスペクトルを計算し、K-NET 石巻と雲雀野埠頭の本震時のサイト増幅特性（図-4.14）の比を乗じることにより、雲雀野埠頭 No.9 地点の地表におけるフーリエスペクトルを推定した。その際、

（雲雀野埠頭における EW 成分） = （K-NET 石巻における EW 成分） × （サイト増幅特性の比）

（雲雀野埠頭における NS 成分） = （K-NET 石巻における NS 成分） × （サイト増幅特性の比）

のように推定を行った。さらに、得られたフーリエスペクトルと余震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、雲雀野埠頭 No.9 地点における本震時の地震動の前半部分を推定した。なお、このとき用いる余震記録としては、K-NET 石巻における本震観測記録の前半部分のフーリエ位相と余震観測記録のフーリエ位相の類似性を検討した上で、2011 年 5 月 16 日 4 時 7 分宮城県沖の地震（M4.6）による雲雀野埠頭 No.9 地点での記録を採用した。

また、これと同様の作業を波形の後半部分に対しても行うことにより、雲雀野埠頭 No.9 地点における本震時の地震動の後半部分を推定した。このとき用いる余震記録としては、K-NET 石巻における本震観測記録の後半部分のフーリエ位相と余震観測記録のフーリエ位相の類似性を検討した上で、2011 年 5 月 15 日 21 時 14 分福島県沖の地震（M5.4）による雲雀野埠頭 No.9 地点での記録を採用した。

さらに、前半部分と後半部分を足し合わせることで、雲雀野埠頭 No.9 地点における本震時の地震動を推定した。このとき、前半部分と後半部分の足し合わせは、前半部分と後半部分の各々に対応する S 波初動の間隔が K-NET 石巻

と同様となるように足し合わせを行った。結果を図-4.17に示す。

最後に、表-4.2に示す地盤モデルに基づいて、線形の重複反射理論により、工学的基盤（表-4.2におけるS波速度318m/sの地層）での2Eを求めた。結果を図-4.18に示す。

ここでの推定地震動の対象周波数は0.2Hz以上である。

推定波の利用上の注意点としては、ここに推定された地震動は石巻港のゾーン2（図-3.36）が適用対象である。また、ここで得られた地震動はS波速度が318m/s程度の地層における2E波であるため、解析に用いる場合、S波速度がこれと大きく異なる地層における2E波として用いる必要がある。

4.3 仙台塩釜港（仙台港区）

3.で調べたように、仙台塩釜港（仙台港区）高砂埠頭における東北地方太平洋沖地震の際の地震動は、仙台-Gで観測された地震動とはかなり異なっていた可能性が高い。そこで、ここでは高砂埠頭における余震観測結果（3.）に基づき、サイト特性置換手法により、東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定を実施した。

サイト特性置換手法において必要となる基準観測点としては仙台-Gを選定した。ただし仙台-Gにおける鉛直アレー観測記録の解析結果によると、仙台-Gの地盤は本震時にわずかではあるが非線形挙動を示していたと考えられる（高橋他，2011）。そこで、仙台-Gでの本震観測記録（図-4.19）から表層地盤の非線形挙動の影響を取り除くための処理を最初に行った。このことを含め、地震動推定の一連の手順を示したものが図-4.20である。以下、この手順に沿って説明する。

4.3.1 仙台-Gの本震観測記録の取り扱い

仙台-Gの本震観測記録について、地表と地中のフーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの）の比を求め、図-4.21に示した。この図では比較のため、地盤が線形の範囲で挙動していると考えられる過去の地震によるスペクトル比を破線で併記している。この図から、仙台-Gでは、スペクトル比のピークが線形時よりも若干低周波側に移動しており、若干の非線形挙動が生じていることがわかる。そこで、仙台-Gの記録に対して非線形／線形の重複反射理論を適用し、非線形挙動の影響を除去することを試みた。そのため、まず、非線形時（本震時）と線形時の各々に対応する地盤モデルを作成した。地盤モデルは、PS検層結果による地盤モデル（野津・若井，2010）をもとに、S波速度と減衰定数のチューニングを行うことにより、図4.21

のスペクトル比を満足するような地盤モデルを求めた。結果を表-4.3と表-4.4に示す。これらの地盤モデルを用いれば、図-4.22に示すように、本震時および線形時の地表／地中のスペクトル比はほぼ再現される。そこで、まず表-4.3の地盤モデルを用いて重複反射理論により仙台-Gの地表の観測記録を工学的基盤の地震動に変換し、次に表-4.4の地盤モデルを用いて重複反射理論によりこれを仙台-Gの地表における線形時の地震動に変換した。結果を図-4.23に示すが、結果的には非線形挙動の影響を除去する前の地震動（図-4.19）と比較して大きな変化はない。

4.3.2 サイト特性置換手法の適用

まず、図-4.23に示す地震動に対して、45秒～65秒の範囲でテーパーをかけることにより、前半部分と後半部分の切り出しを行った。切り出された前半部分を図-4.24に、後半部分を図-4.25に示す。

次に、切り出された前半部分のフーリエスペクトルを計算し、仙台-Gと高砂埠頭のサイト増幅特性（図-3.43）の比を乗じることにより、高砂埠頭の地表におけるフーリエスペクトルを推定した。その際、

（高砂埠頭におけるEW成分）＝（仙台-GにおけるEW成分）×（サイト増幅特性の比）

（高砂埠頭におけるNS成分）＝（仙台-GにおけるNS成分）×（サイト増幅特性の比）

のように推定を行った。さらに、得られたフーリエスペクトルと余震記録のフーリエ位相を組み合わせて、フーリエ逆変換することにより、高砂埠頭における本震時の地震動の前半部分を推定した。なお、このとき用いる余震記録としては、仙台-Gにおける本震観測記録のフーリエ位相と余震観測記録のフーリエ位相の類似性を検討した上で、2011年5月3日22時36分宮城県沖の地震（M4.7）による高砂埠頭での記録を採用した。

また、これと同様の作業を波形の後半部分に対しても行い、高砂埠頭における本震時の地震動の後半部分を推定し、さらに、前半部分と後半部分を足し合わせることで、高砂埠頭における本震時の地震動（ただし地盤が線形の場合の地震動）を推定した。このとき、前半部分と後半部分の足し合わせは、前半部分と後半部分の各々に対応するS波初動の間隔が仙台-Gと同様となるように足し合わせを行った。結果を図-4.26に示す。

最後に、表-4.5に示す地盤モデルに基づいて、線形の重複反射理論により、工学的基盤（表-4.5におけるS波速度520m/sの地層）での2Eを求めた。結果を図-4.27に示す。

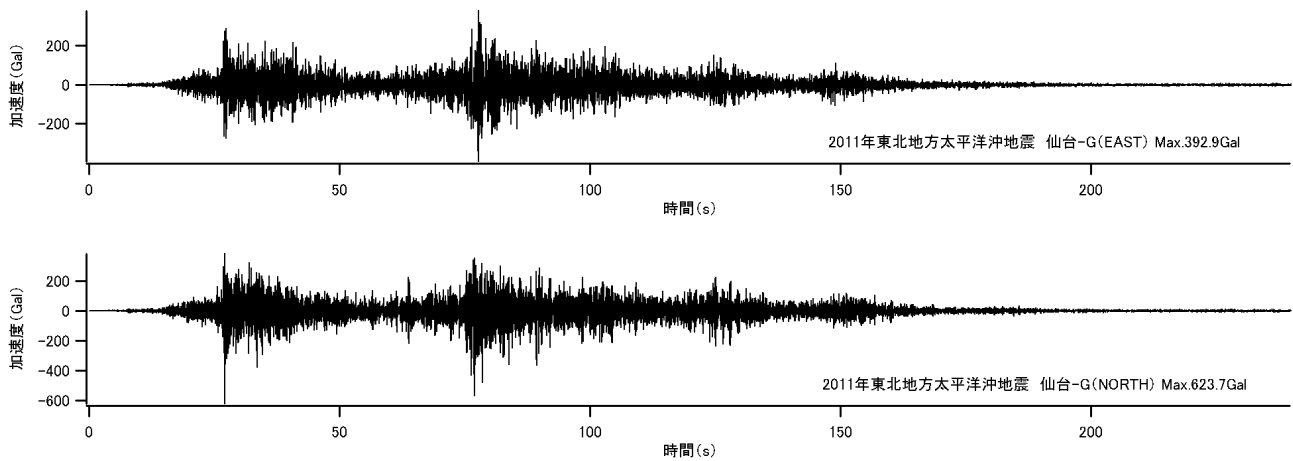


図-4.19 2011年東北地方太平洋沖地震の際、仙台-Gで観測された地震動

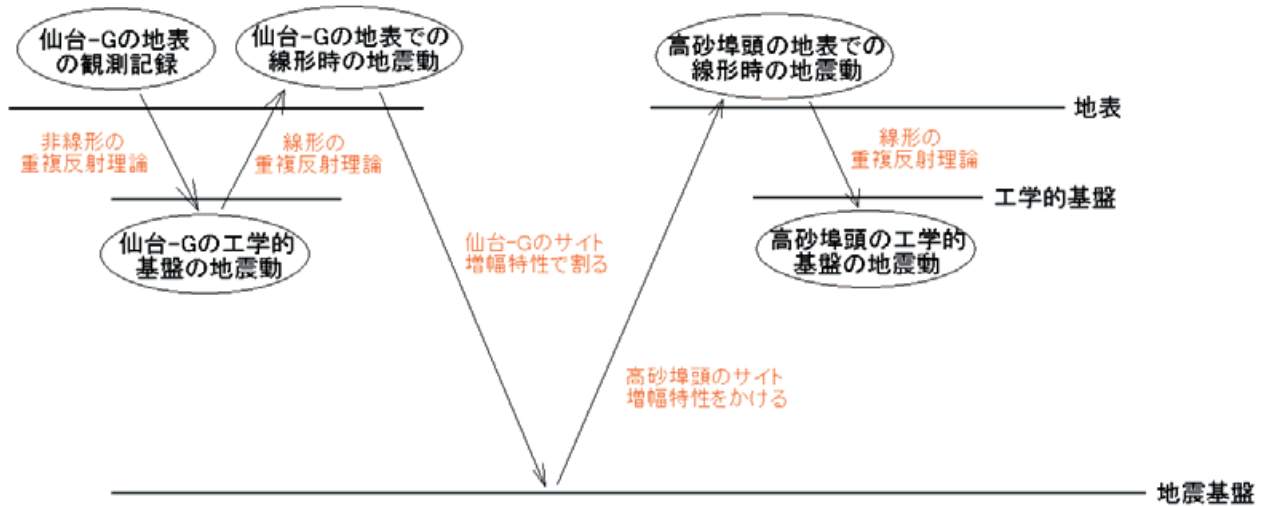


図-4.20 高砂埠頭における地震動推定の一連の手順

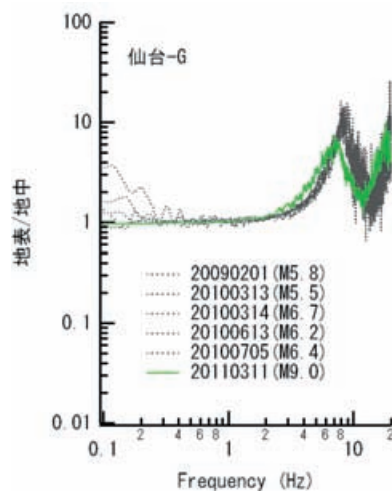


図-4.21 地表/地中のスペクトル比 (仙台-G/仙台-GB)

表-4.3 仙台-Gにおける非線形時（本震時）の地盤モデル

層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰定数
3.0	149.5	1.75	0.09
4.0	207.0	1.85	0.09
3.4	820.0	2.40	0.09
—	820.0	2.40	—

表-4.4 仙台-Gにおける線形時の地盤モデル

層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰定数
3.0	182.0	1.75	0.05
4.0	252.0	1.85	0.05
3.4	820.0	2.40	0.05
—	820.0	2.40	—

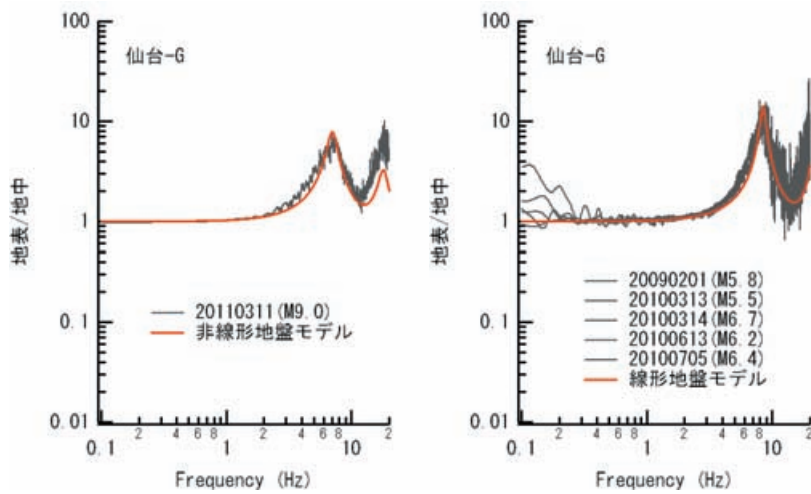


図-4.22 表-4.3および表-4.4の地盤モデルによる仙台-G/仙台-GBのスペクトル比の再現

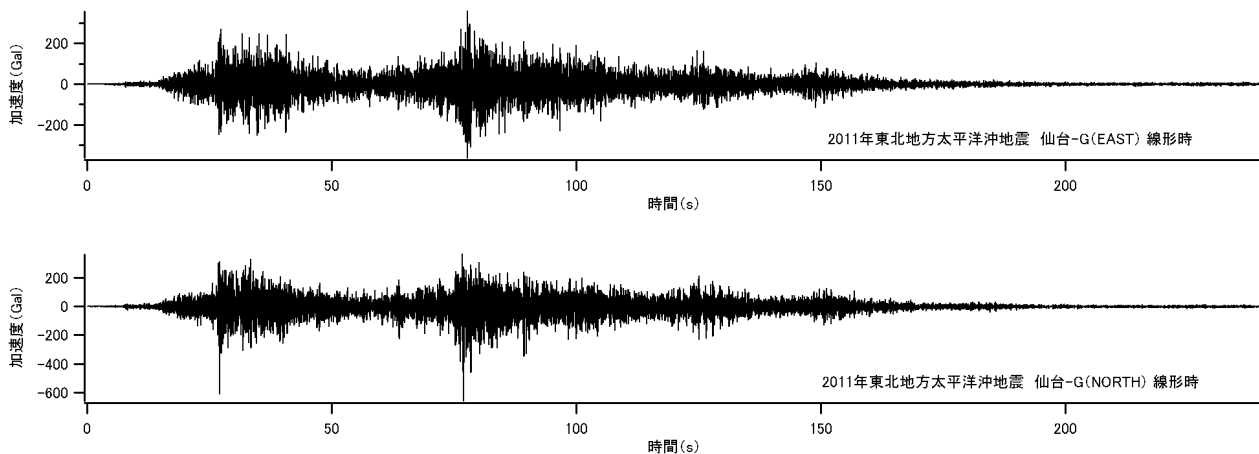


図-4.23 仙台-Gの地表における線形時の地震動

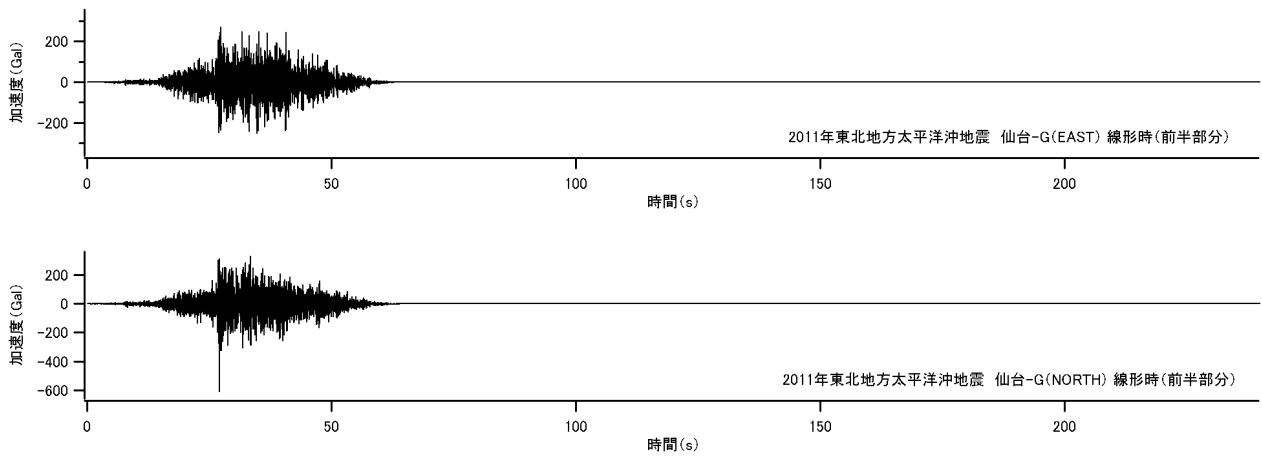


図-4.24 仙台-Gの地表における線形時の地震動（前半部分）

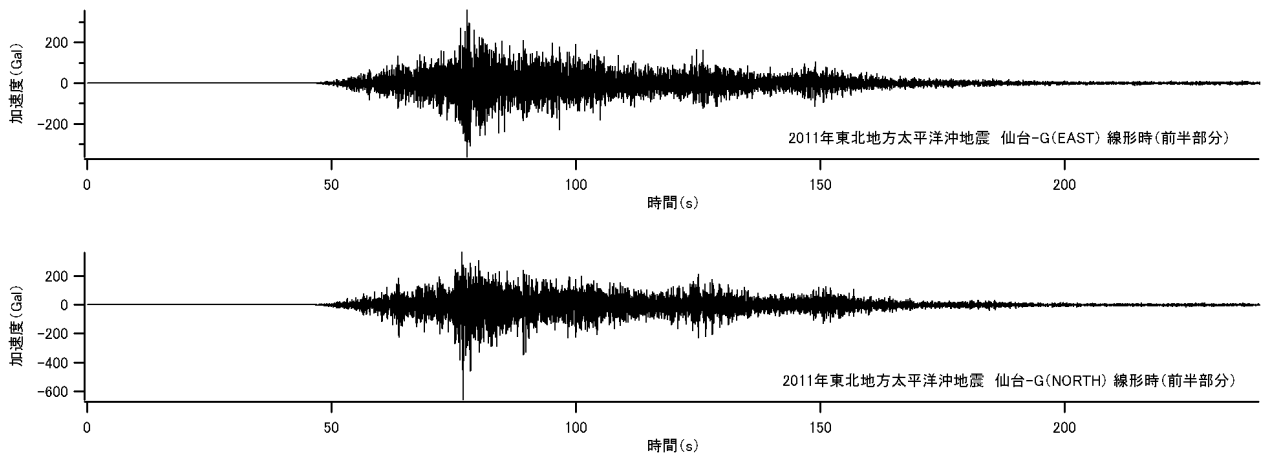


図-4.25 仙台-Gの地表における線形時の地震動（後半部分）

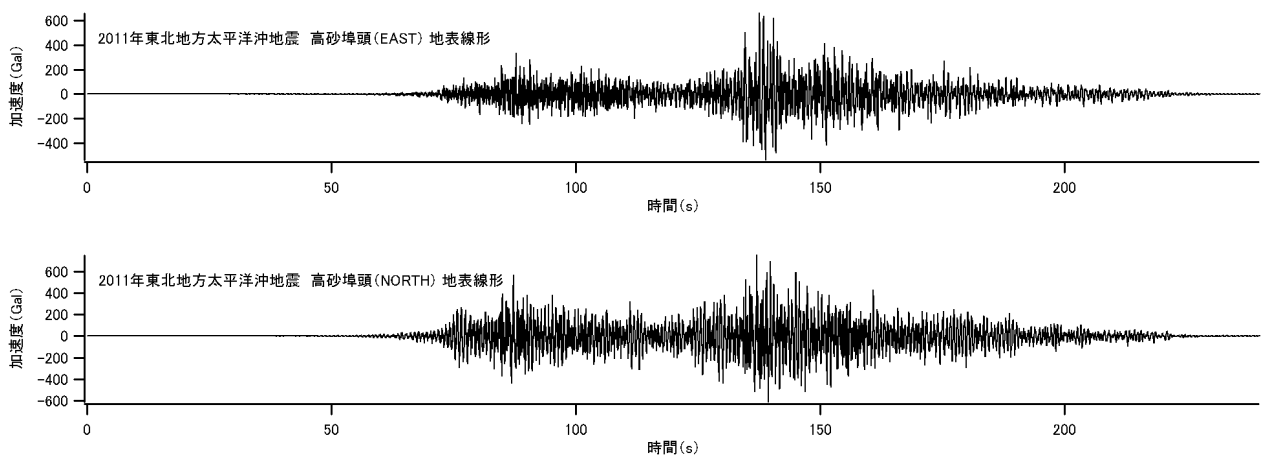


図-4.26 高砂埠頭の地表における地震動の推定結果（ただし地盤線形時）

表-4.5 高砂埠頭の地盤モデル

層厚 (m)	S 波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰定数
3.00	160.0	2.000	0.03
4.00	110.0	2.000	0.03
4.00	190.0	2.000	0.03
4.00	180.0	1.568	0.03
4.00	220.0	1.642	0.03
6.00	160.0	1.495	0.03
10.00	290.0	1.715	0.03
—	520.0	2.100	—

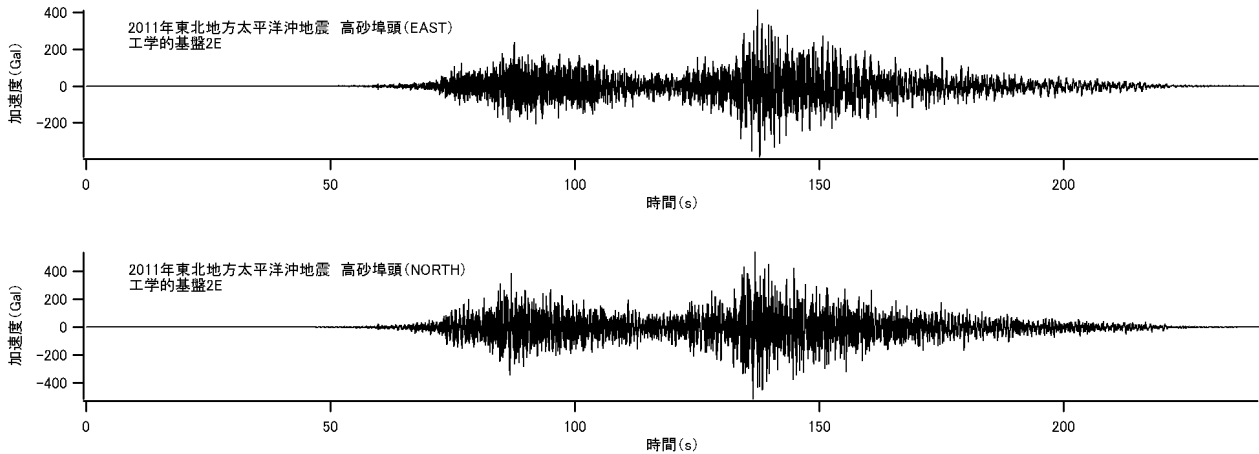


図-4.27 推定された高砂埠頭の工学的基盤における 2E 波

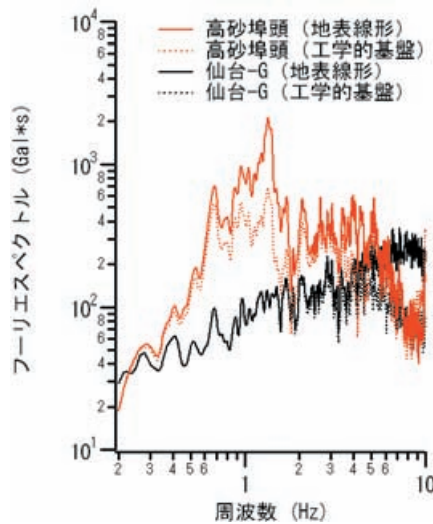


図-4.28 各種の地震動のフーリエスペクトルの比較

ここでの推定地震動の対象周波数は 0.2Hz 以上である。

ここまでの過程で登場した種々の地震動のフーリエスペクトルの比較を行った結果が図-4.28 である。仙台-Gでの地震動と高砂埠頭での地震動には大きな違いがあり、地震基盤～工学的基盤の増幅特性の場所による違いが大きいことがわかる。

推定波の利用上の注意点としては、ここに推定された地

震動はあくまでも高砂埠頭でのものであるが、図-3.43 に示すように高砂埠頭と高松埠頭ではサイト増幅特性は大きくは異ならないと考えられるため、高松埠頭に対しても適用可能であると考えられる。また、雷神埠頭での地震動は、高砂埠頭や高松埠頭に比べ、岸壁に対して影響を及ぼしやすい成分がやや少なかった可能性があるが(3.)、安全側の解析を目的とする場合には、ここで得られた地震動が適用

可能である。ただし、ここで得られた地震動は S 波速度が 520m/s 程度の地層における 2E 波であるため、解析に用いる場合、S 波速度がこれと大きく異なる地層における 2E 波として用いる必要がある。

4.4 小名浜港

東北地方太平洋沖地震の際、小名浜港では、強震観測点である小名浜事-G において強震記録が得られている（高橋他，2011）。しかし、3. で述べたように港湾内におけるサイト特性は多様であり、小名浜事-G における強震記録が適用できる施設はむしろ少ないと考えられる。そこで、新たに得られたデータ等に基づき、サイト特性置換手法により、3. で述べた各ゾーンにおける地震動の事後推定を実施した。

4.4.1 基準観測点の選定

サイト特性置換手法では、対象地点周辺における本震記録の中で、表層地盤の非線形挙動の影響を著しく受けていない記録を用いるか、または、対象地点周辺における本震記録から表層地盤の非線形挙動の影響を取り除いて用いる必要がある。しかしながら、小名浜事-G（事務所の地表）における強震記録は表層地盤の非常に強い非線形挙動の影響を受けていることが確実である（高橋他，2011）。

図-4.29 は小名浜港強震観測地点の地表（小名浜事-G）と地中（小名浜事-GB）のフーリエスペクトル比を示したものである。本震に先立ついくつかの地震に対するスペクトル比（破線）と比較して、本震時のスペクトル比はピークが低周波側に移動するとともに倍率が小さくなっており、本震時の表層地盤の強い非線形挙動が示唆される。また、本震時のスペクトル比がかなり低周波側（0.7Hz 付近）から 1 を上回っているが、このような特徴は等価線形解析では再現することが出来ない。すなわち、等価線形解析で対象とすることができないような強い非線形挙動が生じていると言える。一般に地表で観測された強震記録から表層地盤の非線形挙動の影響を取り除くために等価線形解析が用いられることが多いが（4.3 における高砂埠頭の例参照）、ここでは強震観測地点の地表で観測された地震動から等価線形解析により非線形挙動の影響を取り除くことは困難であると考えられる。

一方、小名浜港の周辺には、K-NET の FKS012、KiK-net の FKSH14（地表）などの強震観測点があり、本震の地震動が観測されている。図-4.30 はそれらのフーリエスペクトル（水平 2 成分のベクトル和をとりバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用したもの）と、それらの観測点におけるサイト増幅特性（野津・長尾，2005）との比較を行ったものである。これを見ると、FKS012 においては 1-2Hz

の範囲でサイト増幅特性は増加傾向にあるのに対し本震時のフーリエスペクトルは減少傾向にあり、表層地盤の非線形挙動の影響が懸念される。また、FKSH14（地表）においても、サイト増幅特性のピークは 1Hz より高周波側にあるのに対し、本震時のフーリエスペクトルのピークは 1Hz より低周波側であり、やはり表層地盤の非線形挙動の影響が懸念される。従ってこれらの記録を非線形性の影響が無いものとして扱うことは困難である。

また、KiK-net の FKSH14 では地中での観測も行われている。地中観測点は S 波速度 1210m/s の砂岩の中に存在しているので、ここでの本震記録は地盤の非線形性の影響を受けていないと考えることは、一見妥当であるように思える。しかし、以下に述べるように、実際にはそのように仮定することは適切でない。良く知られているように、地中における観測記録は、上昇波と下降波の干渉により、特定の周波数（地中の観測点より上方に存在する地盤の固有周波数）においてフーリエスペクトルに谷間が生じる。そこで実際に本震前の地震と本震に対し、FKSH14 の地中観測記録のフーリエスペクトルを計算してみると、図-4.31 に示すように、本震前の地震に対しては 1.1Hz 付近に谷間が生じるのに対し、本震に対しては 0.72Hz 付近に谷間が生じていることがわかる。すなわち、本震時の表層付近の地盤の剛性低下が地中の観測記録にも影響を及ぼしていることがわかる。このとき、非線形挙動の影響が、港湾施設への影響が特に大きいと考えられる 0.3-1Hz の周波数帯域に表れていることは重要である。上記の周波数帯域は地震動の事後推定において最も精度を確保したい周波数帯域である。このことから、FKSH14 の地中観測記録が地盤の非線形挙動の影響を受けていないと仮定して解析を進めることは今の場合適切でない。

一方、小名浜港湾強震観測地点の地中（小名浜事-GB）における観測記録は、4.4.5 に述べる理由により、（港湾施設への影響が特に大きい周波数帯域では）地盤の非線形挙動の影響を大きくは受けていないと考えられる。そこで、この記録をもとに小名浜港の各ゾーン（3.）における地震動の推定を実施することとした。

4.4.2 ゾーン 1 における地震動の推定

まず、図-4.32 左に示すように、小名浜港強震観測地点の地中（小名浜事-GB）に対する地表（小名浜事-G）のスペクトル比（線形時のもの）の平均を求め、小名浜事-G に対応するサイト増幅特性（野津・長尾，2005）を除することにより、小名浜事-GB に対応するサイト増幅特性を求めた（図-4.32 右）。

次に、小名浜事-GB におけるサイト増幅特性とゾーン 1

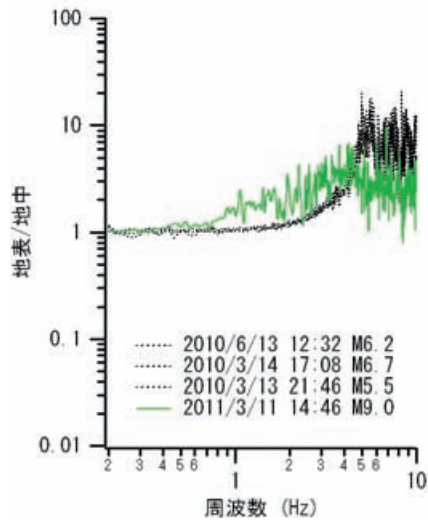


図-4.29 小名浜港強震観測地点の地表（小名浜事-G）と地中（小名浜事-GB）のスペクトル比（今回の地震およびそれに先立ついくつかの地震に対して）

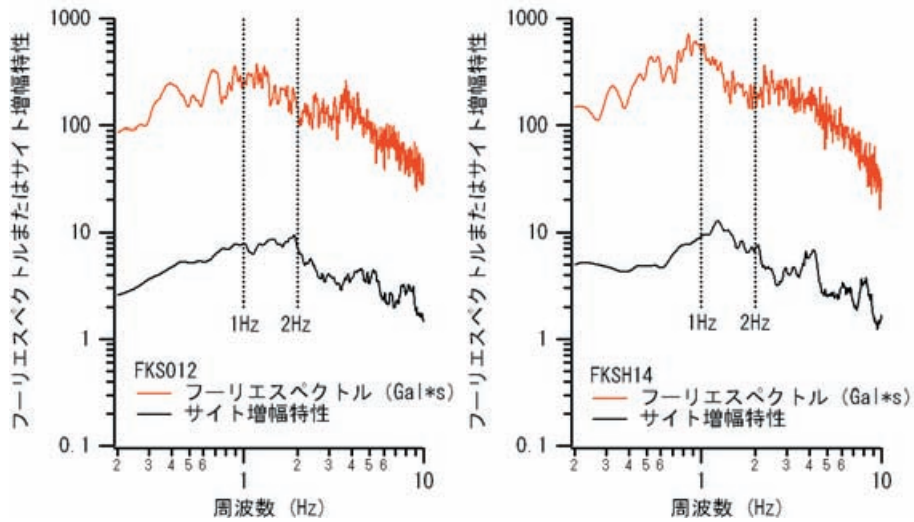


図-4.30 FKS012 と FKSH14 における本震のフーリエスペクトルとサイト増幅特性（野津・長尾，2005）

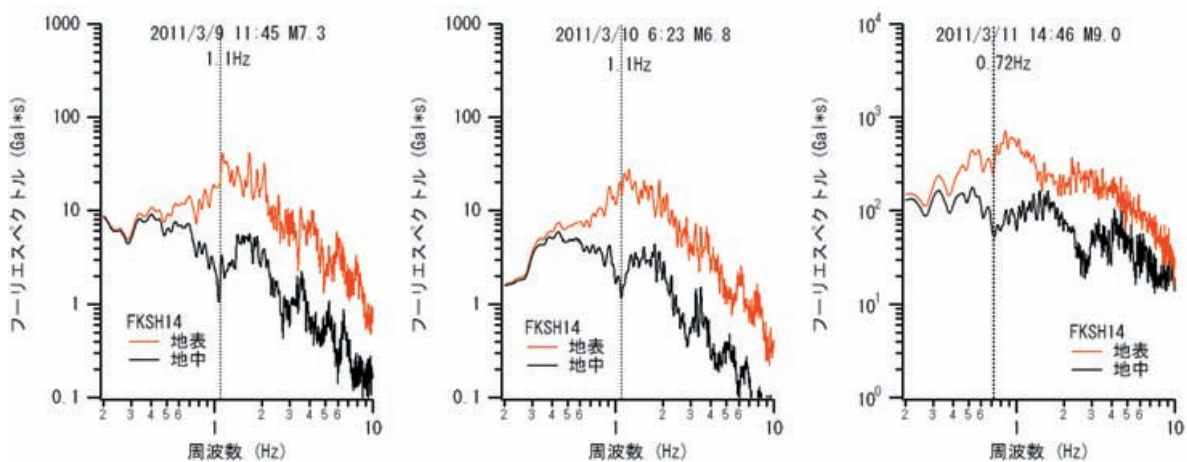


図-4.31 本震前の地震と本震に対する FKSH14 における地表と地中のフーリエスペクトル

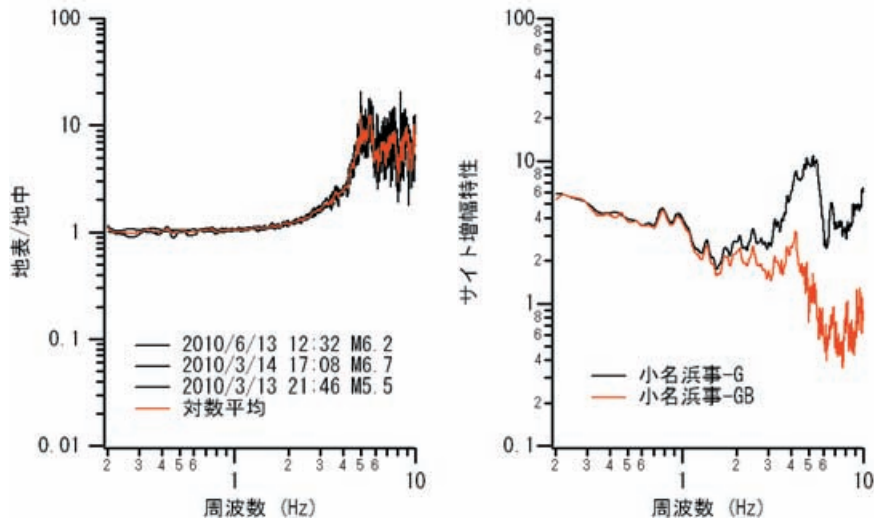


図-4.32 小名浜港強震観測地点の地中に対する地表のスペクトル比(左)とこれに基づいて求めた地中のサイト増幅特性

表-4.6 小名浜港ゾーン1における地盤モデル

地層	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
Bs	8.80	214.0	2.02
As1	10.70	298.0	2.04
As2	1.30	193.0	2.04
As3	9.70	172.0	2.04
Ac2	10.10	119.0	1.56
As4	1.00	234.0	2.04
Ac2	2.90	119.0	1.56
As4	1.80	270.0	2.04
Md	10.55	194.0	2.04
Md	—	314.0	2.04

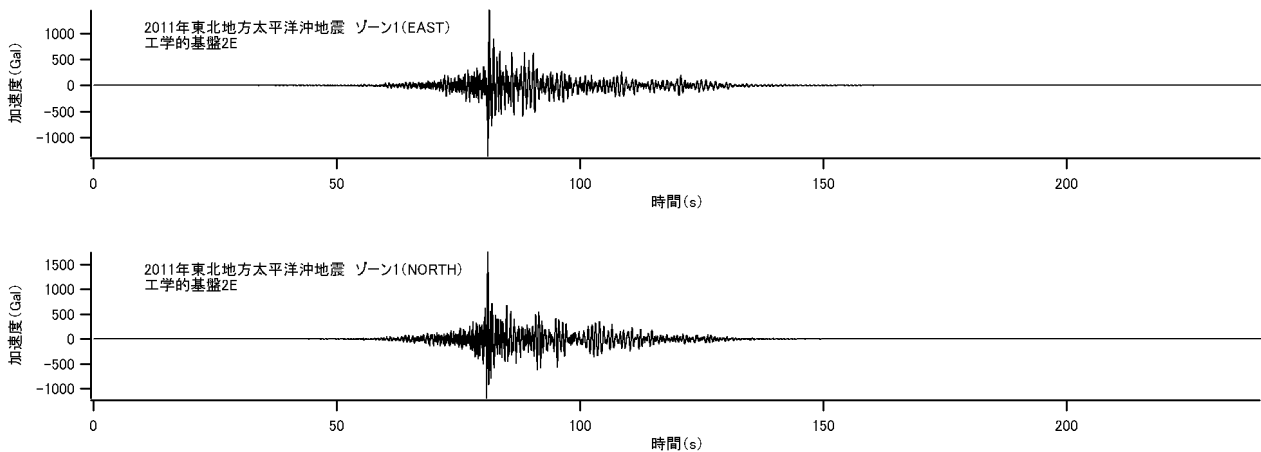


図-4.33 推定されたゾーン1の工学的基盤における2E波

表-4.7 小名浜港ゾーン2における地盤モデル

地層	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
Bs	9.30	213.0	2.00
As1	8.30	315.0	2.04
As2	5.00	176.0	2.04
Md	—	314.0	2.04

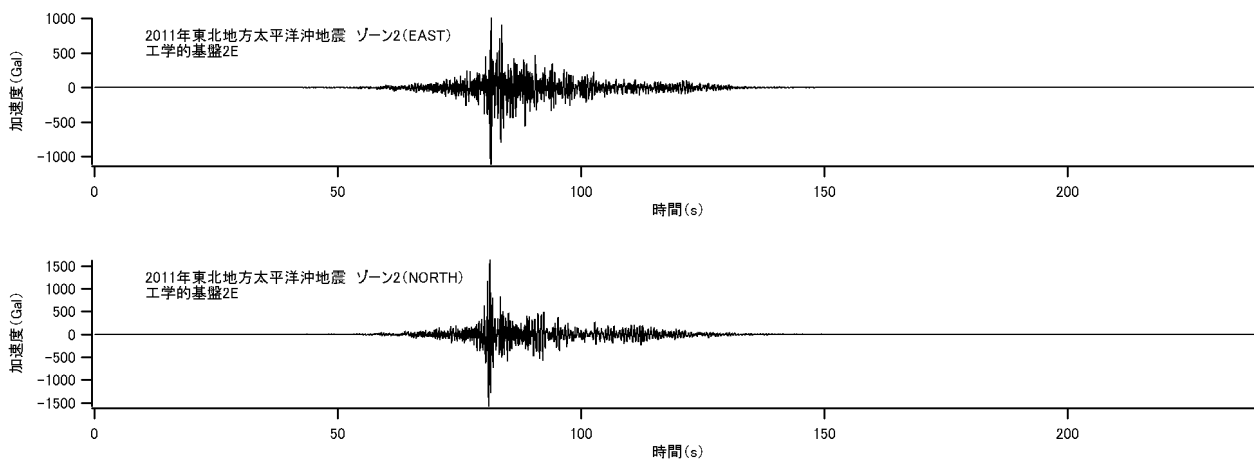


図-4.34 推定されたゾーン2の工学的基盤における2E波

表-4.8 小名浜港5号埠頭における地盤モデル

地層	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
シルト質粗砂	1.55	90.0	1.77
粗砂	5.65	220.0	1.79
固結シルト	5.30	260.0	1.75
固結シルト	—	480.0	1.80

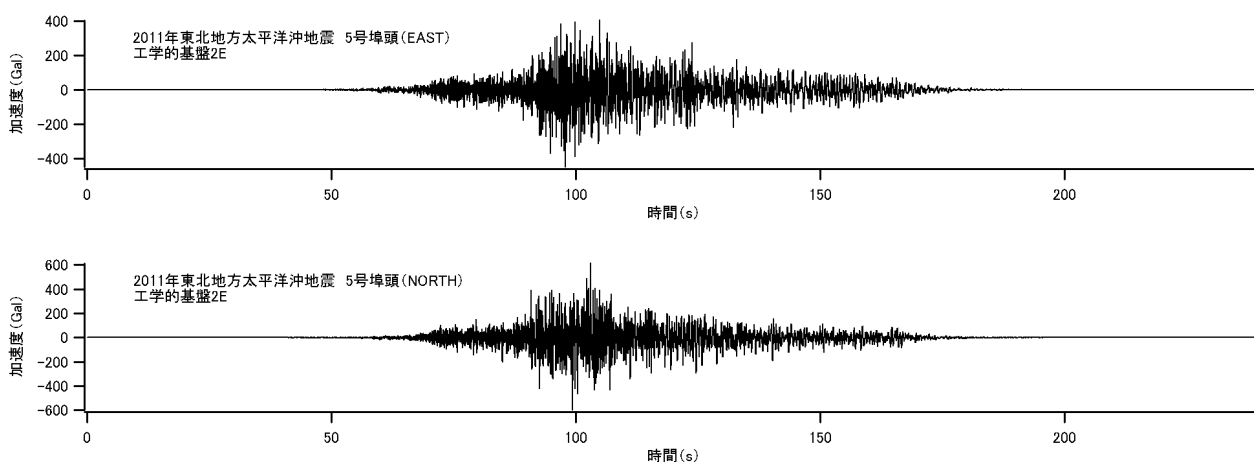


図-4.35 推定された5号埠頭の工学的基盤における2E波

表-4.9 小名浜港港湾強震観測点におけるFLIP解析用地盤モデル(暫定)

	H	β	ρ	ρ'	ν	G	K	$\sigma v'$	$\sigma m'$
	m	m/s	ton/m ³	ton/m ³		kPa	kPa	kPa	kPa
埋土	1.3	30	1.8	1.8	0.33	1620	4225	11.5	8.6
砂質土	0.7	200	2.0	1.0	0.33	80000	208627	26.4	19.8
砂質土	1.0	200	2.0	1.0	0.33	80000	208627	34.7	26.0
砂質土	1.0	200	2.0	1.0	0.33	80000	208627	44.5	33.4
砂質土	1.0	200	2.0	1.0	0.33	80000	208627	54.3	40.7
砂質土	1.0	200	2.0	1.0	0.33	80000	208627	64.1	48.1
砂質土	1.0	200	2.0	1.0	0.33	80000	208627	73.9	55.4

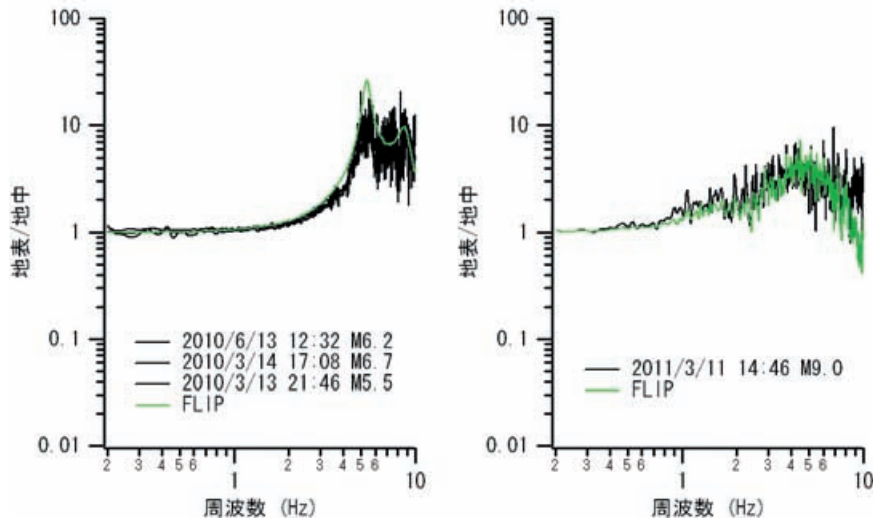


図-4.36 表-4.9 に示した地盤モデルを用い FLIP で計算される地表/地中のスペクトル比と観測スペクトル比との比較

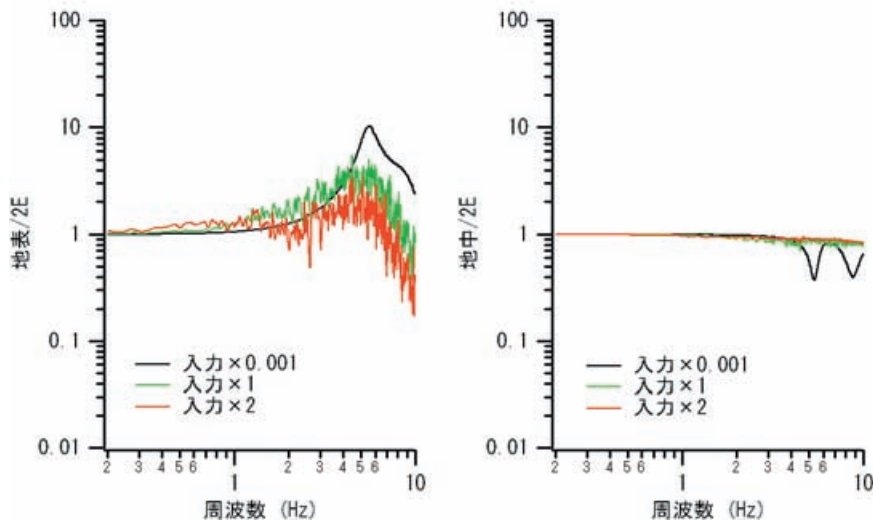


図-4.37 表-4.9 に示した地盤モデルに下方粘性境界を加えたモデルを用い FLIP で計算される地表と地中の応答波形の入射波形に対するスペクトル比

におけるサイト増幅特性 (図-3.59 に示す 3 号埠頭のサイト増幅特性) の比を小名浜事-GB における本震記録のフーリエスペクトルに乗じることにより、ゾーン 1 におけるフーリエスペクトルを推定した。その際、

(ゾーン 1 における EW 成分) = (小名浜事-GB における EW 成分) × (サイト増幅特性の比)

(ゾーン 1 における NS 成分) = (小名浜事-GB における NS 成分) × (サイト増幅特性の比)

のように推定を行った。フーリエ位相については、3 号埠頭では 2008 年 8 月から 2009 年 3 月にかけて 19 個の地震が観測されている。このうち、FKS012 において本震のフー

リエ位相を最も良く再現する地震として 2009 年 2 月 11 日福島県沖の地震 (M4.1) を選択し、この地震による 3 号埠頭での記録のフーリエ位相を用いた。

推定されたフーリエ振幅とフーリエ位相を用い、ゾーン 1 での本震の地震動の推定を行い、さらに、表-4.6 に示すゾーン 1 での地盤モデルを用い、線形の重複反射理論により、工学的基盤 (表-4.6 における S 波速度 314m/s の Md 層) での 2E を求めた。結果を図-4.33 に示す。ここでの推定地震動の対象周波数は 0.2Hz 以上である。

4.4.3 ゾーン 2 における地震動の推定

小名浜事-GB におけるサイト増幅特性とゾーン 2 におけるサイト増幅特性の比を小名浜事-GB における本震記録の

フーリエスペクトルに乗じることにより、ゾーン2におけるフーリエスペクトルを推定した。その際、ゾーン2におけるサイト増幅特性は、ゾーン1におけるサイト増幅特性をもとに、長尾他(2006)の方法で推定した。また、

(ゾーン2におけるEW成分) = (小名浜事-GBにおけるEW成分) × (サイト増幅特性の比)

(ゾーン2におけるNS成分) = (小名浜事-GBにおけるNS成分) × (サイト増幅特性の比)

のように推定を行った。フーリエ位相については、ゾーン1と同様、2009年2月11日福島県沖の地震(M4.1)による3号埠頭での記録のフーリエ位相を用いた。

推定されたフーリエ振幅とフーリエ位相を用い、ゾーン2での本震の地震動の推定を行い、さらに、表-4.7に示すゾーン2での地盤モデルを用い、線形の重複反射理論により、工学的基盤(表-4.7におけるS波速度314m/sのMd層)での2Eを求めた。結果を図-4.34に示す。ここでの推定地震動の対象周波数は0.2Hz以上である。

4.4.4 ゾーン3における地震動の推定

ゾーン3を代表してここでは5号埠頭における地震動の推定を行った。

小名浜事-GBにおけるサイト増幅特性と5号埠頭におけるサイト増幅特性(図-3.59)の比を小名浜事-GBにおける本震記録のフーリエスペクトルに乗じることにより、5号埠頭におけるフーリエスペクトルを推定した。その際、

(5号埠頭におけるEW成分) = (小名浜事-GBにおけるEW成分) × (サイト増幅特性の比)

(5号埠頭におけるNS成分) = (小名浜事-GBにおけるNS成分) × (サイト増幅特性の比)

のように推定を行った。フーリエ位相については、5号埠頭で観測されている地震(表-3.14)の中で、発生位置の観点から最も適切と考えられるEQ2の記録のフーリエ位相を用いた。

推定されたフーリエ振幅とフーリエ位相を用い、5号埠頭での本震の地震動の推定を行い、さらに、表-4.8に示す5号埠頭での地盤モデルを用い、線形の重複反射理論により、工学的基盤(表-4.8におけるS波速度480m/sの固結シルト層)での2Eを求めた。結果を図-4.35に示す。ここでの推定地震動の対象周波数は0.2Hz以上である。

4.4.5 小名浜事-GBにおける観測記録への表層地盤の非線形挙動の影響について

最後に、強震観測地点の地中(小名浜事-GB)における観測記録が(港湾施設への影響が特に大きい周波数帯域では)地盤の非線形挙動の影響を大きくは受けていないと仮定したことの妥当性について考察する。

強震観測地点の地盤は本震時に強い非線形挙動を示しており、等価線形解析では追跡できないことがすでに分かっている。そこで、有効応力解析プログラムFLIP(Iai et al., 1990)を用い、強震観測地点の地盤の地震時の挙動を出来るだけ再現できるような地盤モデルを作成した。表-4.9に作成した地盤モデルを示す。なお表-4.9の地盤モデルの下にはP波速度1825m/s、S波速度784m/s、密度2.0g/cm³の線形平面要素が4m続いている。また表-4.9の砂質土に対しては変相角28°および液状化パラメータS₁=0.005、W₁=30.0、P₁=0.5、P₂=0.7、C₁=1.0を設定した。この地盤モデルにより、線形時の地中に対する地表のスペクトル比は概ね再現される(図-4.36左)。また、本震時の地中の波形を入力した場合に計算される地表/地中のスペクトル比は、図-4.36右に示すようにピークの低下を示すとともに、スペクトル比が低周波側(0.7Hz付近)から1を上回るという先に述べた観測スペクトル比の特徴もある程度再現している。そこで、この地盤モデルは概ね強震観測地点の地盤の挙動を再現するモデルであると考え、これを使用して以下の解析を行う。なお、この地盤モデルは暫定的なものであり、今後の研究により改訂される可能性がある。

上で作成した地盤モデルに下方粘性境界(P波速度1825m/s、S波速度784m/s、密度2.0g/cm³)を追加し、振幅の大きな地震波を2E波として入力する解析を実施し、地表および地中の観測波に対して地盤の非線形挙動の影響がどの程度及ぶのかについての検討を行った。ここで入力する地震波は、解析の性質上、特段の制約はないが、ここでは小名浜事-GBにおける観測波そのものを入力した。解析はEW成分を入力した解析とNS成分を入力した解析を実施し、計算結果の加速度波形から、これまでと同様の手順で、フーリエスペクトルの算定を行った。最初に比較のため入力波の振幅を0.001倍とした解析を実施し(このとき地盤は線形の応答を示す)、次に1倍、2倍とした解析を行った。

図-4.37に計算結果のスペクトルの入力波に対する比を示す。地盤の応答が線形であればこれらの比は入力波の振幅に依存しないはずであるが、地盤の応答が非線形であるため、入力波の振幅に応じて比の値が変化している。特に図-4.37左に示す地表での地震動に対しては非線形性の影響が大きく、線形の場合よりも非線形の場合の方が応答が大きくなる傾向がかなり低周波側から認められる。しかし、図-4.37右に示す地中での地震動に対しては、少なくとも

3Hzより低周波側に着目する限り、非線形性の影響はほとんど表れていない。地震動の事後推定において最も精度を確保したいのは港湾施設への影響が特に大きい周波数帯域（0.3-1Hz）であるという点を考慮すると、強震観測地点の地中（小名浜事-GB）における観測記録が地盤の非線形挙動の影響を大きくは受けていないと仮定したことは妥当であると考えられる。

5. 考察

本研究で新たに得られたデータをもとに、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との関係、および、サイト増幅特性と被害との関係について考察を行う。

5.1 微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性との関係

本研究では新たに7つの港湾（9地点）において余震観測に基づきサイト増幅特性の評価を実施した。この結果、これらの港湾周辺において地震観測記録に基づくサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルの双方が得られている地点は表-5.1に示すとおり合計23地点となった。そこで、これらのデータに基づいて改めて微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係について考察する。

各地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性を比較したものが図-5.1である。この図から、微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の間には良好な対応関係があることがわかる。微動 H/V スペクトルにピークがある場合には、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有すること、微動 H/V スペクトルに明瞭なピークがない場合には、サイト増幅特性にも明瞭なピークの無い傾向があること（大船渡防地-G、K-NET 大船渡など）などがわかる。

図-5.1から微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数およびピーク高さを読みとると表-5.1のようになる。ここで微動 H/V スペクトルおよびサイト増幅特性が明瞭なピークを示さない地点については読みとりを行っていない。この表をもとにピーク周波数およびピーク高さの対応関係をプロットすると図-5.2に示すとおりとなる。まず図-5.2左に示すピーク周波数については、両者の対応関係は非常に良好である。微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数が良好な対応関係を示すことはすでに既往の研究でも指摘されているが（例えば長尾他, 2010）、本研究でこのことが改めて検証されたと言える。一方、図-5.2右に示すピーク高さについても、ピーク周波数と比較してばらつきは大きいものの、両者は明らかに相関性を有している。2.で述べたように、長尾他（2010）は、ある程度地域を限定した場合、微動 H/V スペクトルとサイト増幅

特性のピーク高さは相関性を示すと述べている。ピーク高さの相関性については現在様々な議論があるが、少なくとも東北の港湾を対象とした本研究の結果は、長尾他（2010）の見解を支持するものである。ピーク高さの相関性に関しては、微動 H/V スペクトルがレイリー波の粒子軌跡を示すという現在の標準的な解釈（時松・宮寺, 1992）に従う限り、相関性を波動論的に説明することができないという問題点が残されている。波動論の立場から両者の相関性を否定する見解が出されることもあるが、観測事実を軽視すべきではなく、むしろ、相関性があることを前提として、それに見合うように、微動 H/V の波動論上の解釈に修正を加えていく必要があるように思われる。

なお、設計実務上は、微動 H/V スペクトルからサイト増幅特性を推定できるかどうかが重要である。図-5.2を見る限り、両者のピーク高さは相関性を有するとは言えかなりのばらつきを伴っている。また、このことに加え、仙台塩釜港（仙台港区）高松埠頭の例に見られるように、サイト増幅特性が二つのピークを有するにも関わらず（0.8Hz 付近および 1.4Hz 付近）、微動 H/V スペクトルには低周波側のピークが表れていないケースも存在する。このようなことから、微動 H/V スペクトルからのサイト増幅特性の推定にはかなりの不確実性が伴うのが現状である。従って、重要構造物の設計のために照査用地震動を設定する場合等には、現地での地震観測に基づいてサイト増幅特性を評価することが望ましい。

5.2 サイト増幅特性と被害との関係

本研究で対象とした港湾の中には、係留施設の背後におけるサイト増幅特性の変化が大きい港湾も存在している。そこで、ここでは主にそれらの港湾を対象に、サイト増幅特性と被害との関係について考察を行う。係留施設の背後においてサイト増幅特性の変化が大きい港湾として具体的には宮古港、石巻港、小名浜港が存在する。このうち宮古港では地震動による被害は軽微であるため、以下においては主に石巻港と小名浜港を対象に考察を行う。

石巻港は、地震動の観点から、微動 H/V スペクトルが 0.95Hz あるいはそれより若干高周波側にピークを有するゾーン1と、微動 H/V スペクトルが 0.7Hz 付近にピークを有するゾーン2に区分できることは3.で述べた通りである。それに対して、東北地方太平洋沖地震による被害状況を見ると、図-5.3に示すように、ゾーン2に属する雲雀野埠頭岸壁（-13m）では被害が大きいのに対し、ゾーン1に属する各埠頭では、日和埠頭と南浜埠頭で岸壁背後に若干の段差が生じているものの、全体として軽微な被害にとどまっている。サイト増幅特性と被害との間に対応関係が認めら

表-5.1 サイト増幅特性と微動 H/V スペクトルの双方が得られている地点の一覧

対象地域	地震観測地点	微動H/Vスペクトル		サイト増幅特性	
		ピーク周波数 (Hz)	ピーク高さ	ピーク周波数 (Hz)	ピーク高さ
久慈港周辺	K-NET久慈	0.44	3.01	0.56	5.11
	久慈港出張所	1.15	13.95	0.92	15.95
宮古港周辺	宮古-G	6.12	5.80	6.49	7.42
	K-NET宮古	1.11	3.88	1.32	6.73
	藤原地区No.6地点	1.11	16.75	0.98	45.90
釜石港周辺	釜石-G	-	-	-	-
	K-NET釜石	3.64	20.28	3.66	18.00
	須賀地区No.3地点	1.21	24.67	1.11	91.49
大船渡港周辺	大船渡防地-G	-	-	-	-
	K-NET大船渡	-	-	-	-
	野々田地区No.6地点	1.25	15.33	1.26	20.79
石巻港周辺	K-NET石巻	0.96	27.94	0.97	44.80
	雲雀野埠頭No.9地点	0.69	10.38	0.70	29.71
仙台塩釜港周辺	仙台-G	8.87	12.92	8.62	7.22
	高松埠頭	1.63	10.84	1.39	19.52
	雷神埠頭	1.19	16.33	1.34	21.74
	高砂埠頭	0.68	6.37	1.37	19.69
相馬港周辺	相馬-G	0.81	5.86	0.78	9.11
小名浜港周辺	小名浜事-G	5.05	4.60	5.27	11.00
	3号埠頭	1.02	5.99	1.00	27.18
	5号埠頭	2.70	3.19	4.86	21.55
	藤原埠頭	2.91	6.27	4.76	34.05
	大剣埠頭	3.51	4.15	4.75	25.65

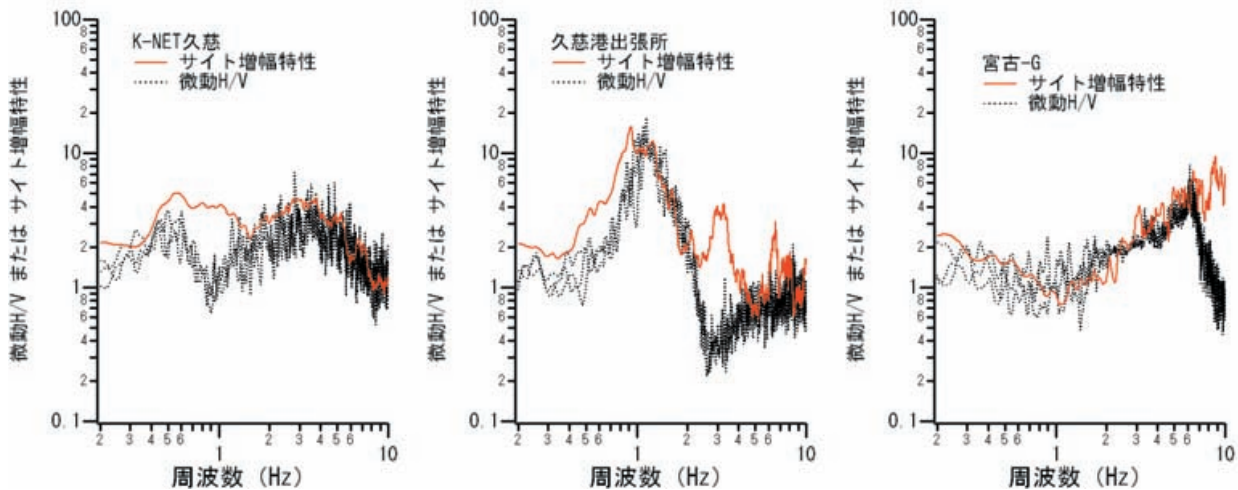


図-5.1 各地点におけるサイト増幅特性と微動 H/V スペクトルの比較

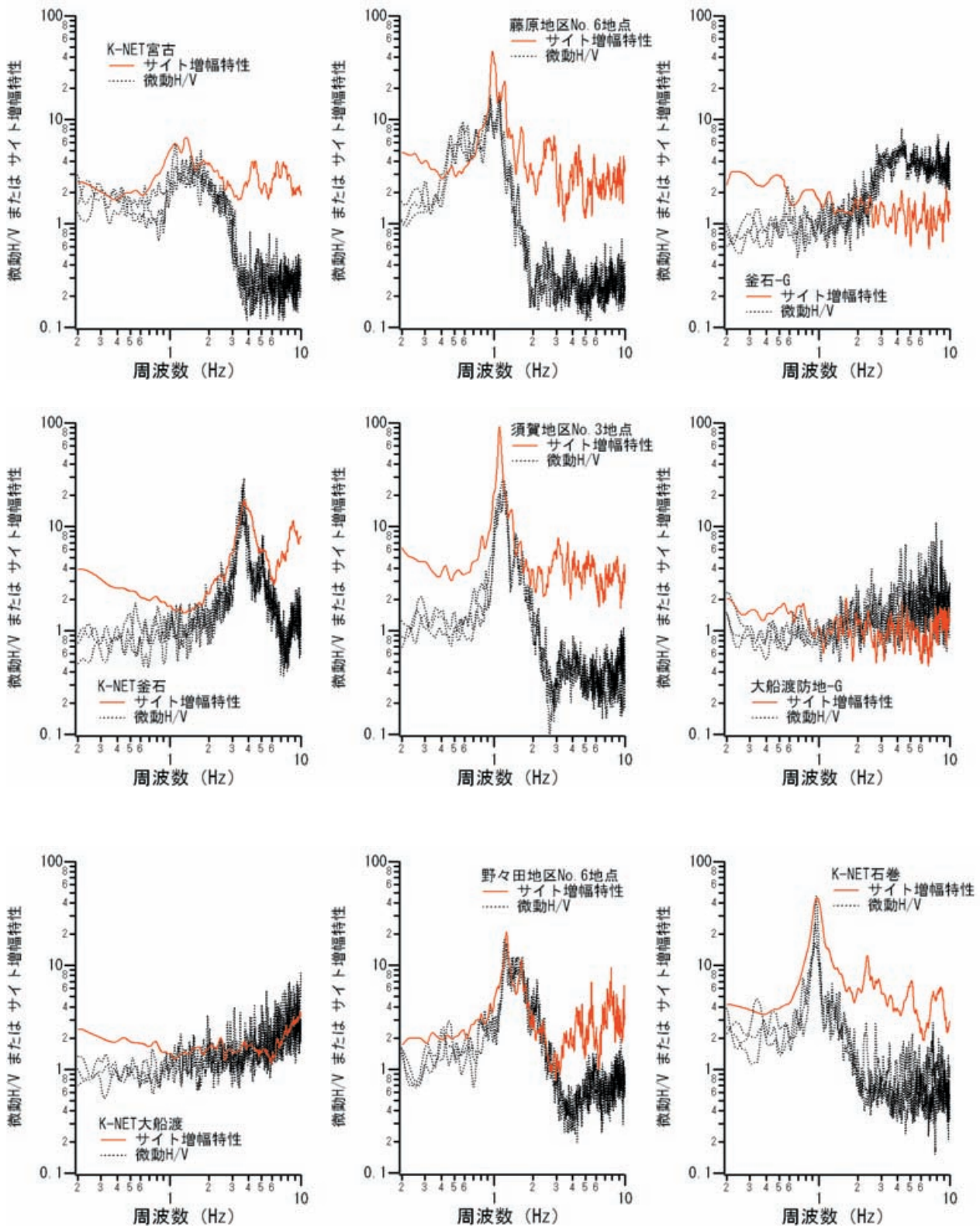


図-5.1 (つづき)

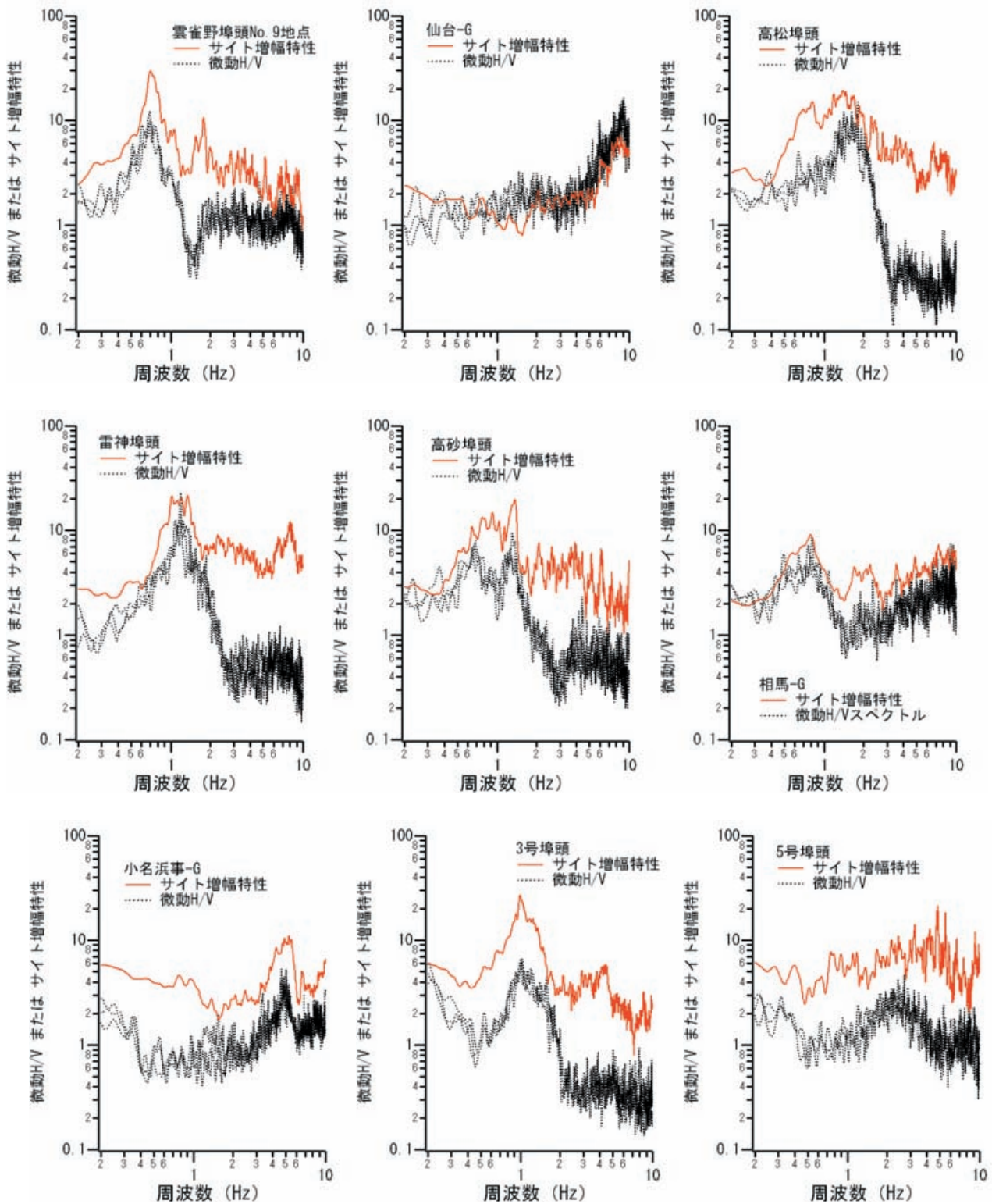


図-5.1 (つづき)

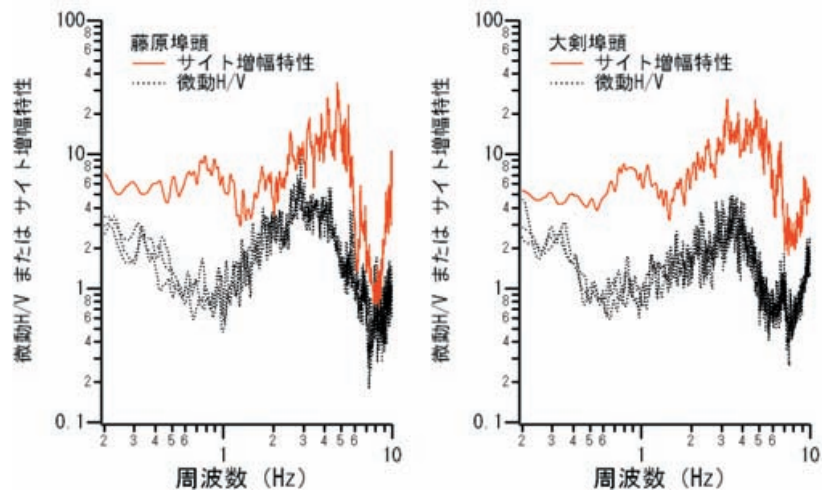


図-5.1 (つづき)

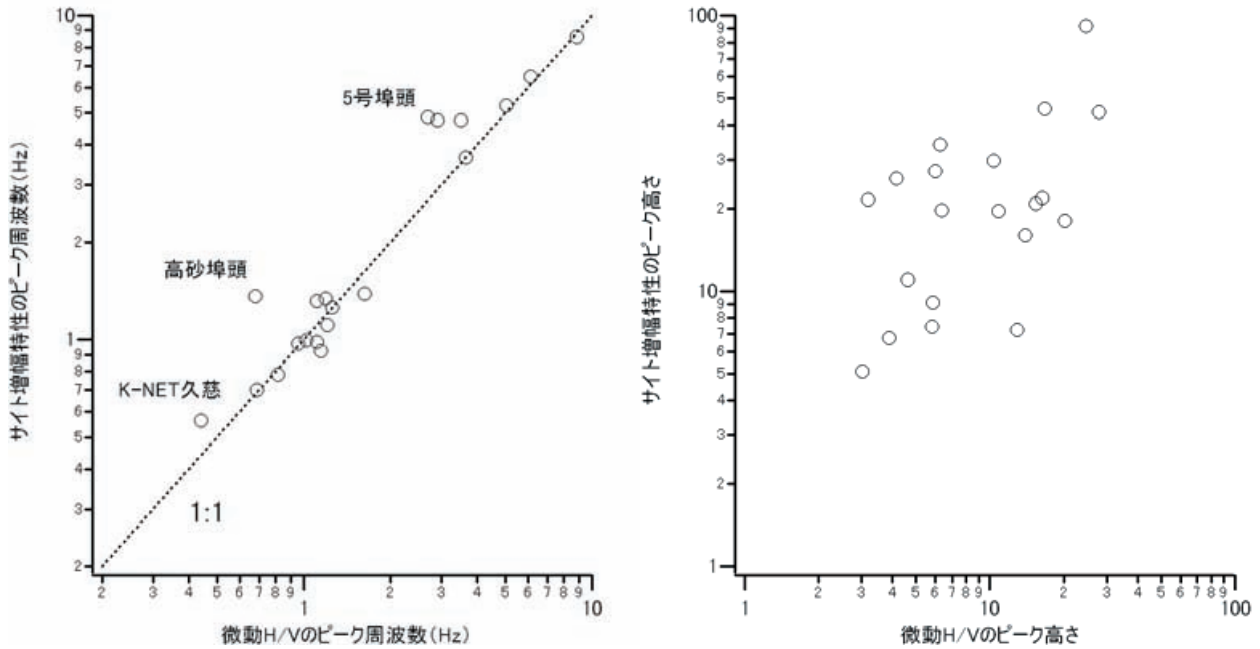


図-5.2 微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数およびピーク高さの対応関係
(左) ピーク周波数. (右) ピーク高さ.



図-5.3 石巻港の各埠頭における被害状況

れる例であると考えられる。

小名浜港では、3. で述べたように、3 号埠頭におけるサイト増幅特性が 1Hz を中心に他の埠頭と比較してかなり大きい（図-3.59）、実際、3 号埠頭で生じた被害は、今回の地震において小名浜港で生じた被害の中でも最も著しいものであった。また、5 号埠頭より西側のゾーン 3 では全般にサイト増幅特性は小さ目であると考えられるが（図-3.59）、その中で例外的に 5-6 号埠頭先端部（図-3.48 の H.23-8）では微動 H/V スペクトルのピークが比較的 low 周波側に存在しており（図-3.53）、余震観測は行われていないものの、ゾーン 3 の中では例外的に地震動の low 周波成分が増幅されやすい場所である可能性がある。実際、5-6 号埠頭先端部護岸は小名浜港で最も大きな被害を受けた施設の一つとなっている。被害程度と微動 H/V スペクトルとの関係を示唆する興味深い事例であると考えられる。

以上のように、サイト増幅特性と被害との間には一定の対応関係があると考えられる。今後、これらについて、数値解析を含むより詳細な検討が行われることが望ましい。

6. まとめ

本研究は東日本大震災で被災した港湾において微動観測および余震観測を行うことによりサイト特性の把握を行い、さらに必要に応じて地震動の事後推定を行ったものである。具体的には、まず、港湾内で微動観測を面的に実施することにより、港湾全体のサイト特性の概要を把握した。特に、施設背後と強震観測地点における微動特性を比較することにより、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表しているかどうかの判断を行った。また、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表していないと判断される場合には、施設の背後において余震観測を行い、当該地点における詳細なサイト特性を明らかにした。地震動の事後推定はサイト特性置換手法を用いて実施した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- ① 常時微動観測を実施した 8 つの港湾において港湾全体のサイト特性の概要を把握することができた。
- ② 余震観測を実施した 7 港湾（9 地点）では詳細なサイト特性を把握することができた。
- ③ 被害を受けた施設等における地震動の推定を 4 港湾（6

地点)において実施した。

これらに加えて、本研究で新たに得られたデータに基づいて微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の関係について検討したところ、ピーク周波数のみならず、ピーク高さについても、一定の相関が認められた。微動H/Vスペクトルに関する今後の研究の方向性を決める上で重要な結果であると考えられる。また、係留施設の背後におけるサイト増幅特性の変化が大きい港湾を対象として、サイト増幅特性と被害との対応について検討したところ、両者の間には一定の対応関係があることが示唆された。

(2011年8月15日受付)

謝辞

本研究では東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所、釜石港湾事務所、同久慈港出張所、同宮古港出張所、塩釜港湾・空港整備事務所、同石巻港出張所、小名浜港湾事務所、同相馬港出張所の皆様にたいへん御世話になりました。本研究を進めるにあたり、塩釜港湾・空港整備事務所より雷神埠頭における中小地震観測記録とサイト増幅特性を、小名浜港湾事務所より3号埠頭における中小地震観測記録とサイト増幅特性を、それぞれ御提供いただきました。また、本研究では防災科学技術研究所の強震記録、気象庁の震源データを使用しています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野 甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津厚・岡本修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷲崎誠・泉山拓也・関克己・廉慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二(2011):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, 港湾空港技術研究所資料 No.1231.

時松孝次・宮寺泰生(1992):短周期微動に含まれるレイリ一波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, No.439, pp.81-87.

長尾毅・平松和也・平井俊之・野津厚(2006):高松港における被害地震の震度再現に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.22, pp.505-510.

長尾毅・山田雅行・野津厚(2010):常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する

研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.324-333.

中村豊(1988):常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, No.4, pp.18-27.

日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.

野津厚・菅野高弘(2008):経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良, 港湾空港技術研究所資料 No.1173.

野津厚・長尾毅(2005):スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112.

野津厚・若井淳(2010):港湾地域強震観測年報(2009), 港湾空港技術研究所資料, No.1223.

Hata, Y., A. Nozu and K. Ichii (2011): A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake, based on site specific amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp.688-700.

Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990): Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15.

港湾空港技術研究所資料 No.1244

2011.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています