

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1214      June 2010

スペクトルインバージョンに基づく  
道北の強震観測地点におけるサイト増幅特性

野津 厚  
菅野 高弘

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. 道北における既往のサイト増幅特性評価の問題点 .....	4
3. 解析に用いたデータと解析手法 .....	6
4. 結果と考察 .....	9
5. まとめ .....	17
謝辞 .....	18
参考文献 .....	18

# Site Amplification Factor for Strong-Motion Sites in Northern Hokkaido, Japan, Based on Spectral Inversion Technique

Atsushi NOZU\*

Takahiro SUGANO\*\*

## Synopsis

In areas with low seismic activity, such as Northern Hokkaido, Japan, site amplification factors are evaluated based on limited number of seismograms. In this case, the evaluated site amplification factors are quite dependent on the characteristics of individual records. Although site amplification factors at 260 strong-motion sites in Hokkaido were evaluated by Nozu and Nagao (2005), it was found afterward that the site amplification factors at several sites, most of which are located in Northern Hokkaido, are overestimated at around 0.2 Hz due to inadequate characteristics of the records. Therefore, in this study, site amplification factors for strong-motion sites in Northern Hokkaido were re-evaluated based on currently available strong motion data using spectral inversion technique. In the analysis, records from four earthquakes at 118 sites were used. To avoid the trade-off between the source characteristics and the site amplification factor, the site amplification factors at three sites were constrained using the results of Nozu and Nagao (2005). As a result of the analysis, the site amplification factors at 115 sites were newly obtained. It can be recognized that the new results are free from the overestimation around 0.2 Hz which was found in the results of the conventional analysis (Nozu and Nagao, 2005). For the majority of sites and frequencies, the newly obtained site amplification factors are in agreement with the results of Nozu and Nagao (2005). In the west of Northern Hokkaido, where thick sediments are located, the evaluated site amplification factors are large in the low frequency range (0.2 - 1 Hz). The source characteristics estimated in the analysis are in good agreement in the low frequency range with the F-net CMT solutions, indicating the adequacy of the constraint used for the inversion.

**Key Words:** Strong ground motion, site amplification factor, spectral inversion, Northern Hokkaido

---

\* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Director, Earthquake Disaster Prevention Engineering 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

# スペクトルインバージョンに基づく 道北の強震観測地点におけるサイト増幅特性

野津 厚\*・菅野 高弘\*\*

## 要 旨

道北のように地震の発生が比較的少ない地域では、限られたデータに基づいてサイト増幅特性が評価されている。その場合、用いられた記録の特性により、サイト増幅特性が大きく影響を受ける場合がある。既往の研究（野津・長尾，2005）では全国の強震観測地点を対象にサイト増幅特性の評価を行っており、北海道では 260 の地点が対象となっているが、このうち道北を中心とするいくつかの地点では、用いられた記録の特性により、低周波側（0.2Hz 付近）においてサイト増幅特性が過大評価となっていることがわかった。そこで、本研究では道北地方などを対象として、現時点で利用可能なデータに基づき、スペクトルインバージョンによりサイト増幅特性の再評価を行った。解析では 2004 年 12 月から 2005 年 3 月にかけて対象地域に強震記録をもたらした 4 つの地震を対象とし、それらの地震に対して震央距離 150km 以内にある 118 の地点を対象とした。また、既往の研究結果との連続性を保つ観点から、既往の研究において問題なくサイト増幅特性が評価されている 3 地点におけるサイト増幅特性を拘束条件として与えた。解析の結果、115 の地点においてサイト増幅特性が新たに評価された。本研究で得られたサイト増幅特性を既往の研究のものと比較すると、既往の研究では複数の地点で見られた低周波側（0.2Hz 付近）でのサイト増幅特性の過大評価が、本研究では解消されていることが確認された。それ以外の観測点や周波数帯域に着目すると、本研究で得られたサイト増幅特性は概ね既往の研究におけるサイト増幅特性と調和的である場合が多い。新たに得られたサイト増幅特性と地下構造との対応関係に着目すると、北海道の中でも特に厚い堆積層の分布する地域として知られている道北の西側（サロベツ原野周辺）では低周波側で非常に大きなサイト増幅特性を示す地点が多いことがわかる。また、後志支庁の赤井川カルデラや網走支庁の山間部にも低周波側で非常に大きなサイト増幅特性を示す地点が分布している。一方、雄冬岬の近くに位置する HKD023 では 0.2-2Hz の範囲でサイト増幅特性は 1~2 の範囲に収まっている。サイト増幅特性と同時に得られた 4 つの地震の震源特性と F-net による CMT 解の地震モーメントとの比較を行ったところ互いに調和的であることがわかった。

キーワード：地震動，サイト増幅特性，スペクトルインバージョン，道北

---

\* 地盤・構造部主任研究官

\*\* 地盤・構造部地震防災研究領域長

〒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

一般に、地震による地盤の揺れ（地震動）は震源断層の破壊過程の影響（震源特性）と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、それに地震基盤から地表に至る堆積層の影響（サイト特性）の三者によって決まると考えられている（図-1.1）。ここに地震基盤とは一般に花崗岩でS波速度が3km/s以上の地層を言う。堆積層が地震動に及ぼす影響は非常に大きい（例えば野津・長尾, 2005）、将来の地震による揺れの推定を行う場合、堆積層の影響すなわちサイト特性を適切に考慮することが重要である。なお、ここで言うサイト特性とは、工学的基盤面より上方の表層地盤と、工学的基盤面より下方の深層地盤の双方の影響を含むものである。

地震動のフーリエ振幅スペクトル $O(f)$ は、式(1.1)に示すように、震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積で表される。

$$O(f) = S(f)P(f)G(f) \quad (1.1)$$

ここに、 $S(f)$ は震源特性、 $P(f)$ は伝播経路特性、 $G(f)$ はサイト特性である。以下においては、前報（野津・長尾, 2005）と同様、堆積層が地震動のフーリエ振幅スペクトルに及ぼす影響（すなわち $G(f)$ ）を指す用語として「サイト増幅特性」を、堆積層が地震動に及ぼす影響を一般的に指す用語として「サイト特性」をそれぞれ用いることとする。

強震記録の得られている地点でのサイト増幅特性を評価するための手法の一つとしてスペクトルインバージョン（岩田・入倉, 1986）がある。この方法は、複数の地点で得られた強震記録のフーリエ振幅スペクトルに対して一種の回帰分析を適用する方法である。この方法によれば、地下構造の情報が十分でない地域においても、深層地盤の影響を含む形でサイト増幅特性を評価することができる。野津・長尾（2005）は北海道から九州にかけての強震記録に対してスペクトルインバージョンを適用し、強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価を行った。野津・菅野（2007）は類似の手法を沖縄・奄美地域の強震記録に適用し、強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価を行っている。

しかしながら、野津・長尾（2005）の研究では、道北のように地震の発生が少ない地域においては、極めて限られたデータに基づいてサイト増幅特性が評価されており、その場合の評価結果は用いられたデータの性質に大きく影響を受けることになる。後に2.で述べるように、野津・長尾（2005）の解析に用いられた道北地方のデータの中には、この種の解析に用いるのに適さないデータが存在していたことがわかっている。従って、道北地方ではサイト増幅特性の再評価が必要であると考えられる。

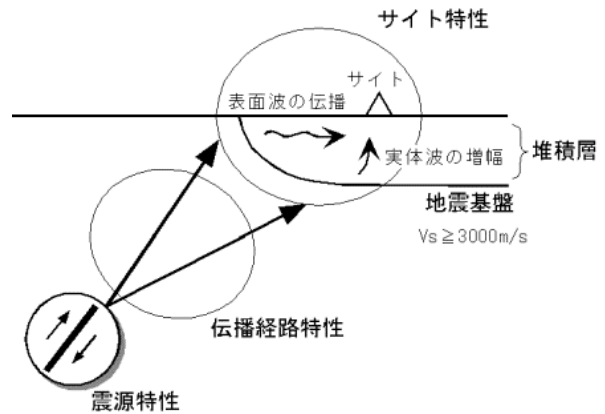


図-1.1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

そこで、本研究では現時点で利用可能な道北地方の強震観測記録について整理を行い、利用可能なデータに対してスペクトルインバージョン手法を適用することにより、道北地方の強震観測点におけるサイト増幅特性の再評価を行った。よって本研究は野津・長尾（2005）の補遺として位置づけられるべきものである。以下、2.においては、道北地方のサイト増幅特性の既往の研究における評価の問題点について述べる。3.では今回新たに実施した解析において対象としたデータと解析手法について述べる。4.では解析結果について述べる。5.では全体のまとめを行う。

## 2. 道北における既往のサイト増幅特性評価の問題点

道北のように地震の発生が比較的少ない地域においては、極めて限られたデータに基づいてサイト増幅特性が評価されている場合がある。このような場合、用いられている記録の特性によっては、サイト増幅特性の信頼性が十分でない可能性がある。野津・長尾（2005）によってサイト増幅特性の評価されている北海道の強震観測地点は全部で260地点であるが、これらの観測点を解析に用いられた記録の数によって分類しプロットすると図-2.1のようになる。10個以上のデータに基づいてサイト増幅特性が評価されている地点は主に地震活動の活発な太平洋岸に分布している。一方、3個未満のデータに基づいてサイト増幅特性が評価されている地点も存在しており、主に道北に分布している。これは、道北地方が比較的地震の発生が少ない地域であり、解析条件を満足する記録の数が少ないためである。

また、北海道の260地点のうち、図-2.2に示す56の地点では、2004年12月14日15:01に留萌支庁南部で発生した地震(M4.7)の記録が解析に用いられている。ところが、この地震の記録は、以下に述べるような理由で、サイト増

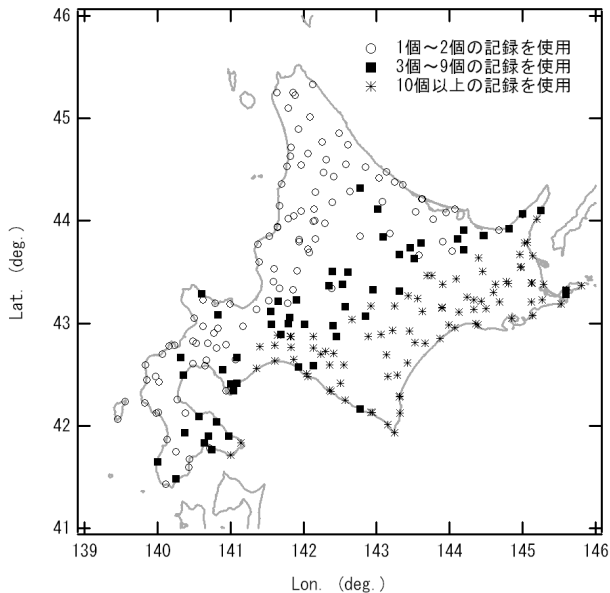


図-2.1 既往の研究（野津・長尾，2005）で用いられた記録の数

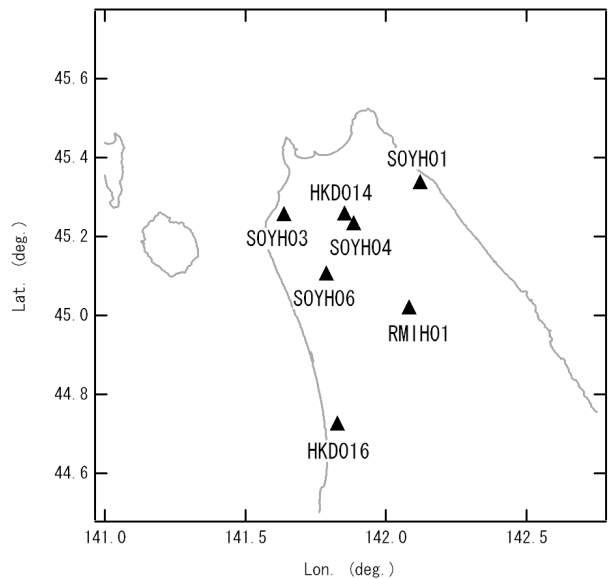


図-2.3 SOYH06等の位置

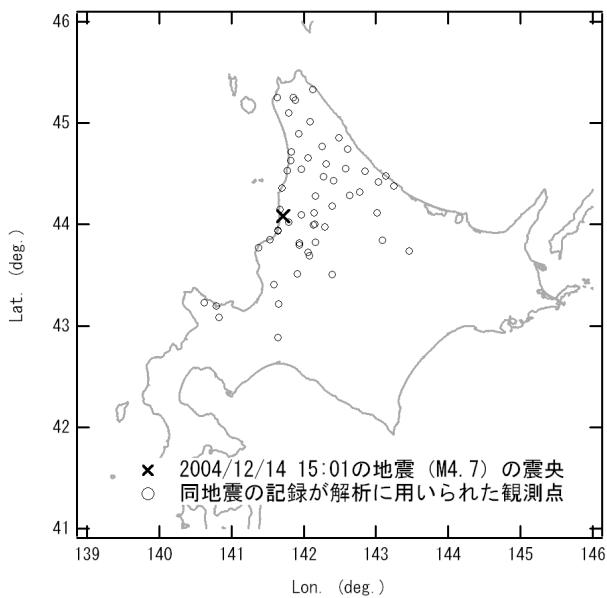


図-2.2 2004年12月14日15:01留萌支庁南部の地震(M4.7)の震央と、既往の研究（野津・長尾，2005）で同地震の記録が用いられた地点。

幅特性の評価には適さない記録であることがわかった。

この地震は、2004年12月14日14:56に留萌支庁南部で発生したM6.1の地震の余震であり、本震のわずか5分後に発生している。防災科学技術研究所の強震観測網KiK-net (Aoi *et al.*, 2000) の観測点SOYH06（場所は図-2.3参照）の地表における加速度波形を図-2.4に示すが、120秒間の記録全体にわたり、周期5秒程度のたいへん顕著な波が観測されていることがわかる。この波はS波到達時刻（グラ

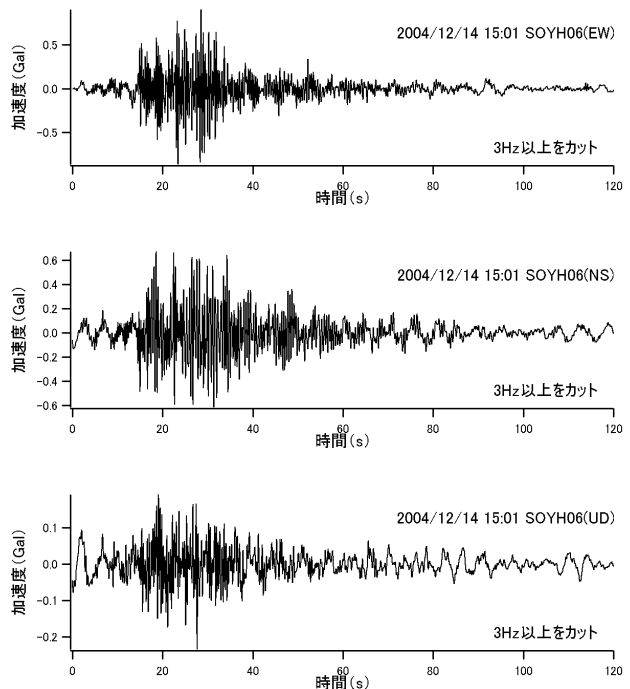


図-2.4 2004年12月14日15:01留萌支庁南部の地震(M4.7)によるSOYH06の地表における3成分の加速度波形（上から順に東西，南北，上下成分）。

フでは15秒付近）よりも前から観測されていることから、15:01の余震によって励起されたと考えることは不合理である。したがって、これは5分前の本震によって励起された波が観測されたものと考えられる。同じように、本震によって励起されたと考えられる顕著な波は、K-NET (Kinoshita, 1998) の観測点であるHKD014, HKD016や

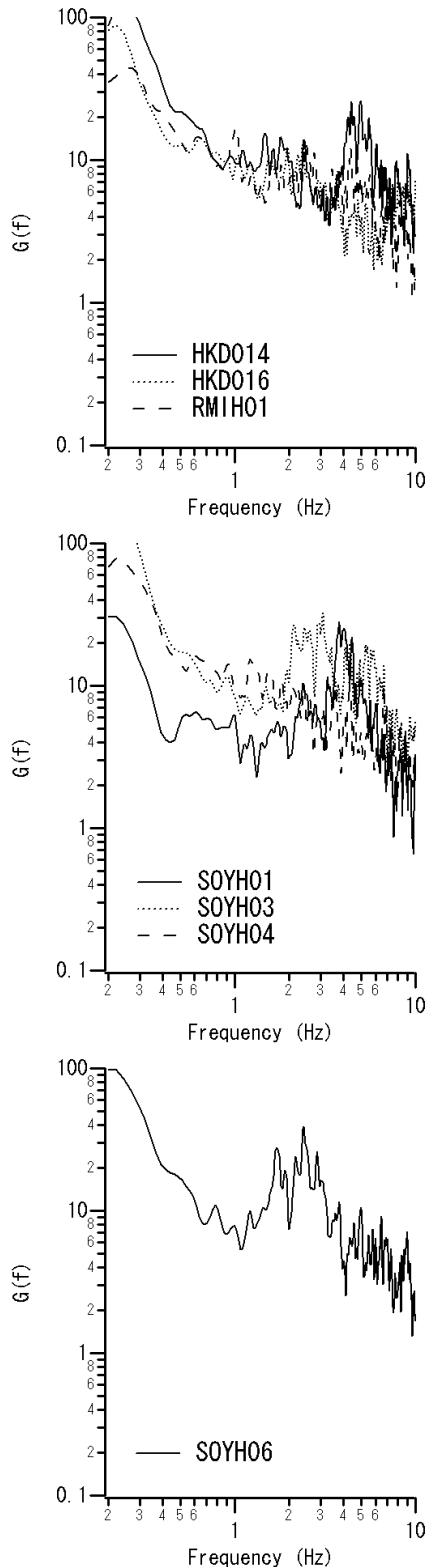


図-2.5 既往の研究(野津・長尾, 2005)で評価されているHKD014, HKD016, RMIH01, SOYH01, SOYH03, SOYH04, SOYH06におけるサイト増幅特性。

KiK-netの観測点であるRMIH01, SOYH01, SOYH03, SOYH04, SOYH06等の余震記録の中にも認められる(こ

れらの観測点の位置については図-2.3を参照されたい)。既往の研究(野津・長尾, 2005)ではこれらの地震波を15:01の余震に励起されたものとみなしてサイト増幅特性を求めているので、特に周期5秒付近(周波数0.2Hz付近)ではサイト増幅特性が過大評価されている可能性がある。実際、これらの地点に対して既往の研究で求められているサイト増幅特性は図-2.5に見られるように周波数0.2Hz付近において著しく大きな値を示しており、過大評価が生じていると考えられる。15:01の余震の記録を用いている他の地点においても、評価されたサイト増幅特性には誤差が含まれている可能性がある。

そこで、本研究では、主に15:01の余震の記録を用いてサイト増幅特性が評価された強震観測地点を対象とし、これに、既往の研究でサイト増幅特性の評価されていない観測地点を加え、現時点で利用可能なデータをもとにサイト増幅特性の再評価を行うこととした。

### 3. 解析に用いたデータと解析手法

まず、解析対象地震の選定の考え方について述べる。一般にスペクトルインバージョンでは対象とする地震の規模に対して制約を設けることが多い。例えば野津・長尾(2005)の研究では解析にM4.5以上M6.0未満の記録を用いている。ここで、M4.5未満の記録を除外したのは、規模の小さい地震の記録は低周波側での精度が十分でないことが多いためである。また、M6.0以上の記録を除外したのは、スペクトルインバージョンでは震源から各方面に放射される地震波のスペクトルが等しいと仮定することが多く、規模の大きい地震ほどこの仮定が満たされにくくなるためである。しかしながら、本研究で対象とする道北地方は地震活動度の低い地域であるため既存の地震観測記録が少なく、上記の条件をそのまま適用した場合には、解析が困難である。こうした中で、2004年12月14日14:56に留萌支庁南部で発生したM6.1の地震は、道北地方の広い範囲で観測されており、貴重なデータを提供している。そこで、本研究では、既往の研究の条件からはわずかに外れるものの、この地震を解析対象地震の一つとした。この地震を地震1とする。

その他の解析対象地震としては、道北地方で強震記録の得られている地震として、2004年12月14日17:54北海道西方沖の地震(M4.8)、2004年12月15日2:29北海道西方沖の地震(M4.6)、および2005年3月18日9:38北海道西方沖の地震(M5.0)を選定した。これらを地震2～地震4とする。地震1～地震4の震央を図-3.1に示す。

次に、解析対象地点の選定の考え方について述べる。既往の研究では、震央距離が150kmを越える記録を解析から

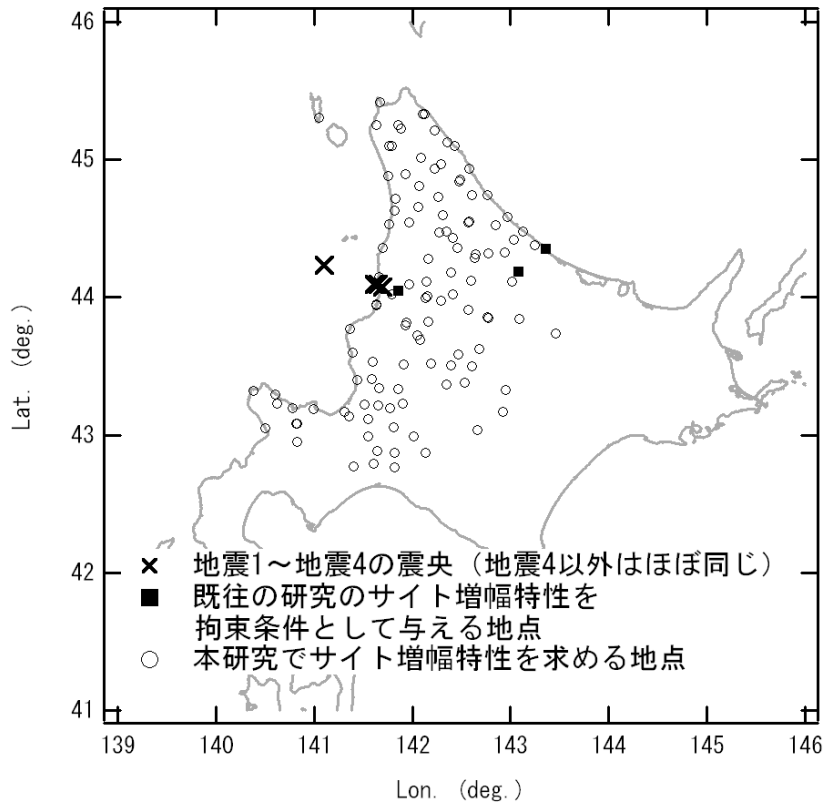


図-3.1 解析対象とする118地点. このうち3地点(■)では既往の研究(野津・長尾, 2005)のサイト増幅特性を拘束条件として与え, 残りの115地点でサイト増幅特性を評価する(○).

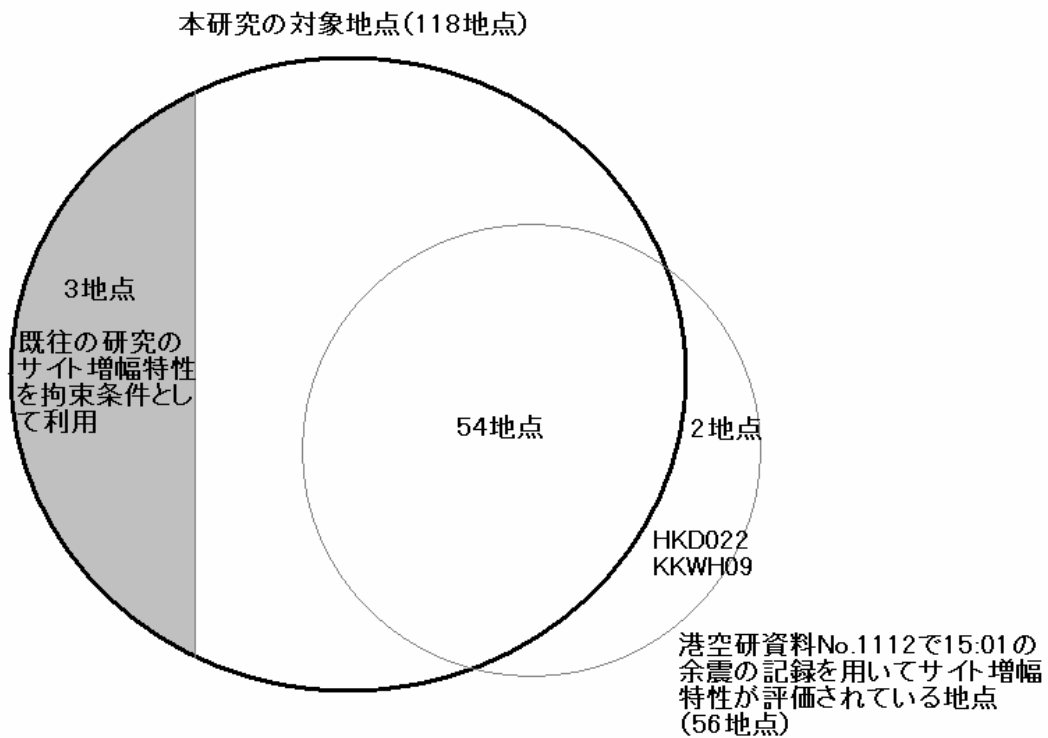


図-3.2 対象地点の分類



表-3.1 対象地点一覧。条件欄で■となっているのは既往の研究（野津・長尾，2005）のサイト増幅特性を拘束条件として与える地点，条件欄で※となっているのは既往の研究（野津・長尾，2005）で15:01の余震の記録を用いてサイト増幅特性が評価されている地点。

番号	観測点名	観測網	東経	北緯	条件	記録数
1	HKD001	K-NET	141.6720	45.4163		1
2	HKD003	K-NET	141.7667	45.1030		1
3	HKD004	K-NET	142.2255	45.2141		1
4	HKD005	K-NET	142.1077	45.3299		1
5	HKD006	K-NET	142.3519	45.1266		1
6	HKD007	K-NET	142.2908	44.9698		1
7	HKD008	K-NET	142.5744	44.9375		1
8	HKD009	K-NET	142.4811	44.8417		1
9	HKD010	K-NET	142.7633	44.7406		1
10	HKD013	K-NET	141.0475	45.3049		1
11	HKD014	K-NET	141.8541	45.2519	※	1
12	HKD015	K-NET	141.7500	44.8845		3
13	HKD016	K-NET	141.8284	44.7195	※	3
14	HKD017	K-NET	141.7664	44.5323	※	2
15	HKD018	K-NET	141.9653	44.5453	※	2
16	HKD019	K-NET	141.6978	44.3611	※	4
17	HKD020	K-NET	141.6642	44.1486	※	2
18	HKD021	K-NET	141.6370	43.9407	※	4
19	HKD023	K-NET	141.3685	43.7735	※	2
20	HKD024	K-NET	141.8573	44.0489	■	3
21	HKD025	K-NET	142.0717	44.8116		1
22	HKD026	K-NET	142.2636	44.7284		1
23	HKD027	K-NET	142.3427	44.4806		1
24	HKD028	K-NET	142.4547	44.3598		1
25	HKD029	K-NET	142.6419	44.3111		1
26	HKD030	K-NET	142.3942	44.1821	※	1
27	HKD031	K-NET	142.5952	44.1185		1
28	HKD032	K-NET	142.4123	44.0235		1
29	HKD033	K-NET	142.5695	43.9090		1
30	HKD034	K-NET	142.7686	43.8543		1
31	HKD037	K-NET	142.4675	43.5885		1
32	HKD041	K-NET	142.6837	43.6249		1
33	HKD042	K-NET	142.5691	44.5450		1
34	HKD043	K-NET	142.9644	44.5820		1
35	HKD044	K-NET	143.1277	44.4796	※	1
36	HKD045	K-NET	142.9447	44.3287		1
37	HKD047	K-NET	143.3538	44.3557	■	1
38	HKD115	K-NET	142.1484	44.0071	※	2
39	HKD116	K-NET	141.9342	43.8007	※	3
40	HKD117	K-NET	142.0525	43.7243	※	1
41	HKD119	K-NET	142.1914	43.5199		1
42	HKD120	K-NET	141.6635	43.3443		2
43	HKD121	K-NET	141.8553	43.3332		1
44	HKD122	K-NET	141.7754	43.1968		1
45	HKD127	K-NET	141.8204	42.8741		1
46	HKD128	K-NET	141.8221	42.7655		1
47	HKD137	K-NET	140.3791	43.3235		1
48	HKD138	K-NET	140.6014	43.2921		1
49	HKD139	K-NET	140.7818	43.1974	※	3
50	HKD140	K-NET	140.9935	43.1907		1
51	HKD142	K-NET	140.8200	43.0846	※	1
52	HKD175	K-NET	141.3882	43.6015		2
53	HKD176	K-NET	141.5924	43.5324		2
54	HKD177	K-NET	141.4346	43.4001		1
55	HKD178	K-NET	141.3046	43.1721		1
56	HKD179	K-NET	141.5171	43.2237		1
57	HKD180	K-NET	141.3513	43.1390		1
58	HKD181	K-NET	141.5462	43.1161		2
59	HKD182	K-NET	141.5524	42.9925		1

番号	観測点名	観測網	東経	北緯	条件	記録数
60	HKD184	K-NET	141.6010	42.7900		2
61	HKD185	K-NET	141.4021	42.7755		1
62	ABSH01	KiK-net	142.8483	44.5253	※	2
63	ABSH02	KiK-net	143.0304	44.4210	※	1
64	ABSH03	KiK-net	143.2446	44.3819	※	1
65	ABSH04	KiK-net	143.0806	44.1896	■	1
66	ABSH05	KiK-net	143.0149	44.1123	※	2
67	ABSH07	KiK-net	143.0900	43.8469	※	2
68	ABSH13	KiK-net	143.4553	43.7394	※	1
69	IBUH01	KiK-net	141.8228	42.8714		1
70	IBUH02	KiK-net	142.1322	42.8689		1
71	IKRH01	KiK-net	141.5873	43.4063	※	3
72	IKRH02	KiK-net	141.6561	43.2179	※	3
73	IKRH03	KiK-net	141.6436	42.8856	※	2
74	KKWH01	KiK-net	142.3075	44.5950	※	4
75	KKWH02	KiK-net	142.5775	44.5486	※	4
76	KKWH03	KiK-net	142.2764	44.4708	※	4
77	KKWH04	KiK-net	142.4094	44.4353	※	4
78	KKWH05	KiK-net	142.6342	44.2897	※	3
79	KKWH06	KiK-net	142.7694	44.3183	※	3
80	KKWH07	KiK-net	142.3447	43.3672		2
81	KKWH08	KiK-net	142.6600	43.0381		1
82	KKWH10	KiK-net	142.0567	44.6594	※	4
83	KKWH11	KiK-net	142.2872	43.9731	※	4
84	KKWH12	KiK-net	142.6044	43.5014		1
85	KKWH13	KiK-net	142.3944	43.5089	※	2
86	KKWH14	KiK-net	142.5283	43.3817		1
87	KKWH15	KiK-net	142.7694	43.8522		1
88	RMIH01	KiK-net	142.0833	45.0144	※	3
89	RMIH02	KiK-net	141.9289	44.8925	※	4
90	RMIH03	KiK-net	141.8225	44.6336	※	4
91	RMIH04	KiK-net	141.9658	44.0953	※	4
92	RMIH05	KiK-net	141.7914	44.0231	※	3
93	SBSH01	KiK-net	140.6264	43.2317	※	1
94	SBSH02	KiK-net	140.5053	43.0503		1
95	SBSH03	KiK-net	140.8235	43.0818	※	1
96	SBSH05	KiK-net	140.8261	42.9478		1
97	SOYH01	KiK-net	142.1224	45.3324	※	2
98	SOYH02	KiK-net	142.2293	45.2141		2
99	SOYH03	KiK-net	141.6372	45.2508	※	3
100	SOYH04	KiK-net	141.8844	45.2281	※	2
101	SOYH06	KiK-net	141.7872	45.0997	※	2
102	SOYH07	KiK-net	142.4346	45.0978		1
103	SOYH08	KiK-net	142.2286	44.9364		2
104	SOYH09	KiK-net	142.4907	44.8547	※	1
105	SOYH10	KiK-net	142.6078	44.7410	※	2
106	SRCH01	KiK-net	142.1633	44.2780	※	3
107	SRCH02	KiK-net	142.1452	44.1136	※	3
108	SRCH03	KiK-net	142.1296	43.9970	※	3
109	SRCH04	KiK-net	141.9435	43.8179	※	4
110	SRCH05	KiK-net	142.1632	43.8219	※	3
111	SRCH06	KiK-net	142.0814	43.6924	※	3
112	SRCH07	KiK-net	141.9016	43.2276		2
113	SRCH08	KiK-net	141.9128	43.5114	※	3
114	SRCH09	KiK-net	141.8100	43.0563		3
115	SRCH10	KiK-net	142.0123	42.9905		1
116	TKCH04	KiK-net	142.9214	43.1714		1
117	TKCH10	KiK-net	142.9486	43.3313		1
118	留萌-G	港湾	141.6340	43.9500	※	1

除外している。これは、震央距離が大きい記録の場合、 $L_g$ 波（例えば Street *et al.*, 1975）など、震源に由来する表面波が多く含まれる場合があり、それが卓越した記録は解析に

適さないためである。この条件は本研究でも踏襲することとした。そこで、本研究では、地震1～地震4のいずれかが観測されており、かつ震央距離が150km未満であるよう

な観測点を選定し、それらを解析の対象とした。選定された観測点は全部で 118 地点であった。それらの観測点を図-3.1 および表-3.1 に示す。

さて、全 118 地点の中には、既往の研究（野津・長尾，2005）においてサイト増幅特性が評価されている地点も存在する。既往の研究で述べられているように、スペクトルインバージョンでは、解析結果である震源特性とサイト増幅特性との間にはトレードオフの関係があり、これを回避するためには、一つ以上の地震の震源特性に対して拘束を与えるか、または、一つ以上の地点のサイト増幅特性に対して拘束を与える必要がある。本研究では、既往の研究結果との連続性を保つ観点から、既往の研究においてサイト増幅特性が評価されている地点におけるサイト増幅特性を拘束条件として与えた。ただし、既往の研究でサイト増幅特性が評価されている地点であっても、15:01 の余震の記録が用いられている地点では、サイト増幅特性の信頼性が十分でない可能性がある。そこで、本研究では、既往の研究で 15:01 の余震の記録を用いずにサイト増幅特性が評価されている地点のうち、対象地域の中心部に位置する HKD024, HKD047, および ABSH04 の 3 地点におけるサイト増幅特性を拘束した。それらの地点を図-3.1 に示す。

対象地点には、既往の研究でサイト増幅特性の評価に 15:01 の余震の記録が用いられた 56 地点のうち 54 地点が含まれている（図-3.2）。従って、本解析によりほとんどの地点においてサイト増幅特性の再評価が可能であると考えられる。なお、既往の研究で 15:01 の余震の記録が用いられた地点のうち、今回の解析の対象とすることができなかった地点は HKD022 と KKWH09 である。

対象地震による対象地点での観測記録を収集したところ全部で 220 の記録（440 の水平成分）が存在した（KiK-net は地表の記録を用いる）。ただし、このうち 5 つは 200Gal を越える記録であり、表層地盤の非線形挙動の影響が考えられたので除外した。その結果、解析対象記録数は 215 となった（430 の水平成分）。なお、既往の研究（野津・長尾，2005）では 100Gal を超える記録を解析対象から除外している。本研究では、道北地方において解析対象記録が少ないことを考慮し、除外する記録の条件を変更した。なお、100Gal を越える記録のうち KiK-net の記録については、地中に対する地表のスペクトル比をとることにより、著しい非線形挙動は生じていないことを確認した。従って、100Gal を超える記録を用いたことが解析結果に及ぼす影響は大きくないと考えられるが、この点については、記録の蓄積を待ってさらに検証を行うことが望ましい。

上記の記録に対して、水平 2 成分のフーリエスペクトルを計算し、バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用し、

水平 2 成分のベクトル和をとったものを解析対象データとした。

一般に  $M$  個の地震 ( $i=1,2,\dots,M$ ) の記録が  $N$  個の観測点 ( $i=1,2,\dots,N$ ) で得られているとき、観測記録のフーリエ振幅スペクトルは震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の積として式 (3.1) で表すことができる（例えば岩田・入倉，1986）。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) P_{ij}(f) G_j(f) \quad (3.1)$$

ここに  $S_i(f)$  は第  $i$  地震の震源特性（震源スペクトル）、 $P_{ij}(f)$  は第  $i$  地震の震源から第  $j$  地点の地震基盤までの伝播経路特性、 $G_j(f)$  は第  $j$  地点のサイト増幅特性である。伝播経路特性  $P_{ij}(f)$  は、震源から球面状に広がる実体波の幾何減衰 ( $1/r$ ) と非弾性減衰を考慮すると、次式で表すことができる。

$$P_{ij}(f) = \frac{1}{r_{ij}} \exp\left(-\pi f r_{ij} / QV_s\right) \quad (3.2)$$

式 (3.2) の  $r_{ij}$  は震源距離、 $V_s$  は伝播経路における平均的な S 波速度である。また、式 (3.2) の  $Q$  は  $Q$  値と呼ばれるもので、この値が小さいほど伝播経路での非弾性減衰が大きいことを意味する。ここで  $Q$  値としては、既往の研究（野津・長尾，2005）との連続性を考慮し、佐藤・巽（2002）が東日本の海溝型地震に対して求めている値 ( $Q=114f^{0.92}$ ) を与えた。

式 (3.1) の両辺の常用対数をとると次式を得る。

$$\log O_{ij} = \log S_i + \log P_{ij} + \log G_j \quad (3.3)$$

ここでは表現を簡単にするため、周波数への依存を示す  $f$  を省略した。式 (3.3) には震源特性  $S_i$  とサイト増幅特性  $G_j$  の併せて  $M+N$  個の未知数が含まれていることになる ( $Q$  値を既知とする場合)。一方、式の本数は使用可能な記録の数に等しい。そこで、使用可能な記録の数が  $M+N$  よりも多ければ、最小自乗法により式 (3.3) の残差を最小とするような未知数を周波数毎に求めることができる。以上がスペクトルインバージョンの基本的考え方である。ただし、ここでは既知のサイト増幅特性を拘束条件として与えている。これを式で書くと次のようになる。

$$\log G_j = \log \bar{G}_j \quad (3.4)$$

ここで  $\bar{G}_j$  は既知のサイト増幅特性を表す。ここでは式 (3.3) と (3.4) の残差の合計が最小となるような未知数を周波数毎に求めた。解析対象周波数は、既往の研究と同様、0.2-10Hz とした。

#### 4. 結果と考察

今回サイト増幅特性を評価した地点のうち、既往の研究（野津・長尾，2005）で 15:01 の余震の記録を用いてサイ

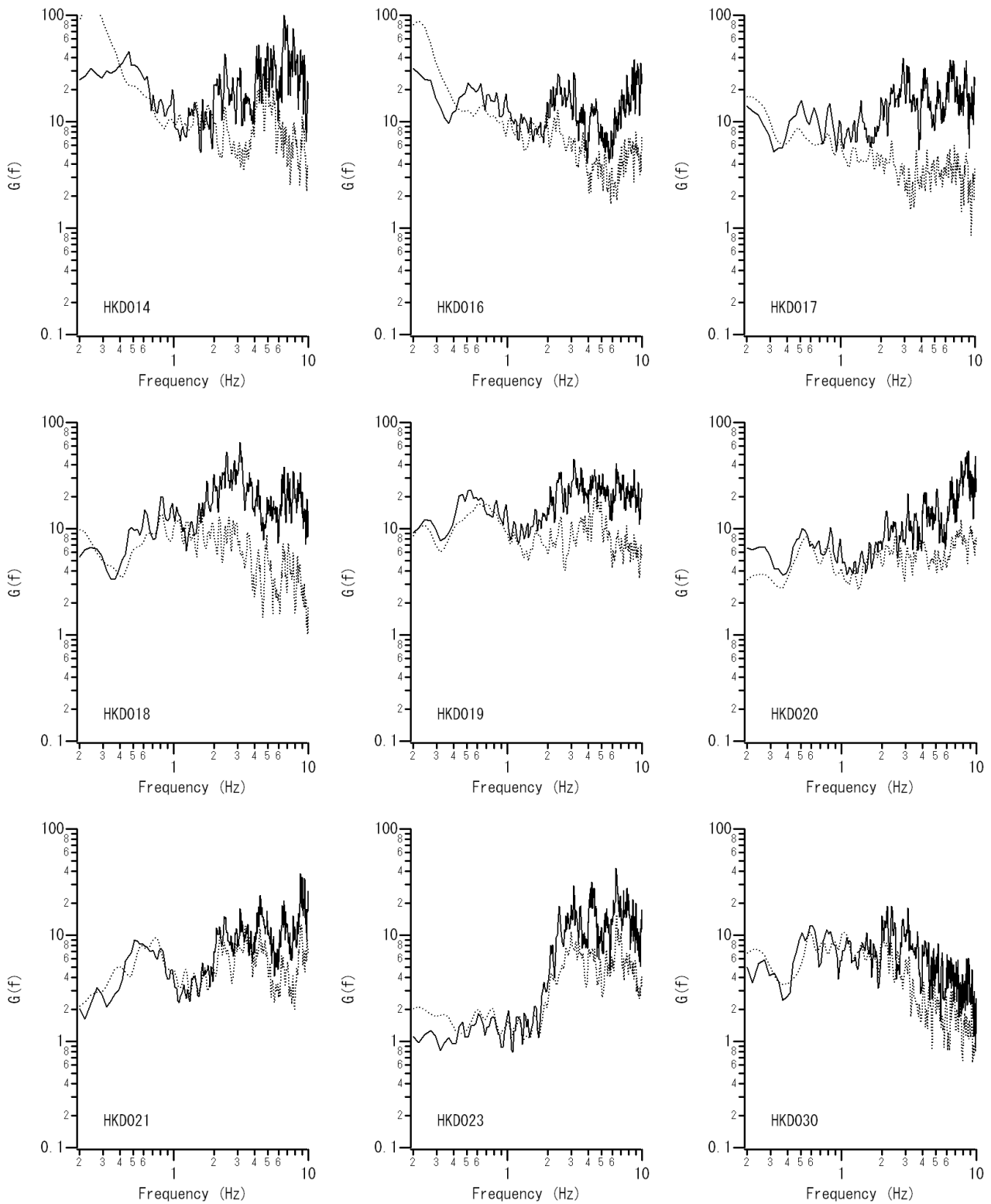


図-4.1 新旧のサイト増幅特性の比較 (その1) 破線が既往の研究 (野津・長尾, 2005). 実線が今回.

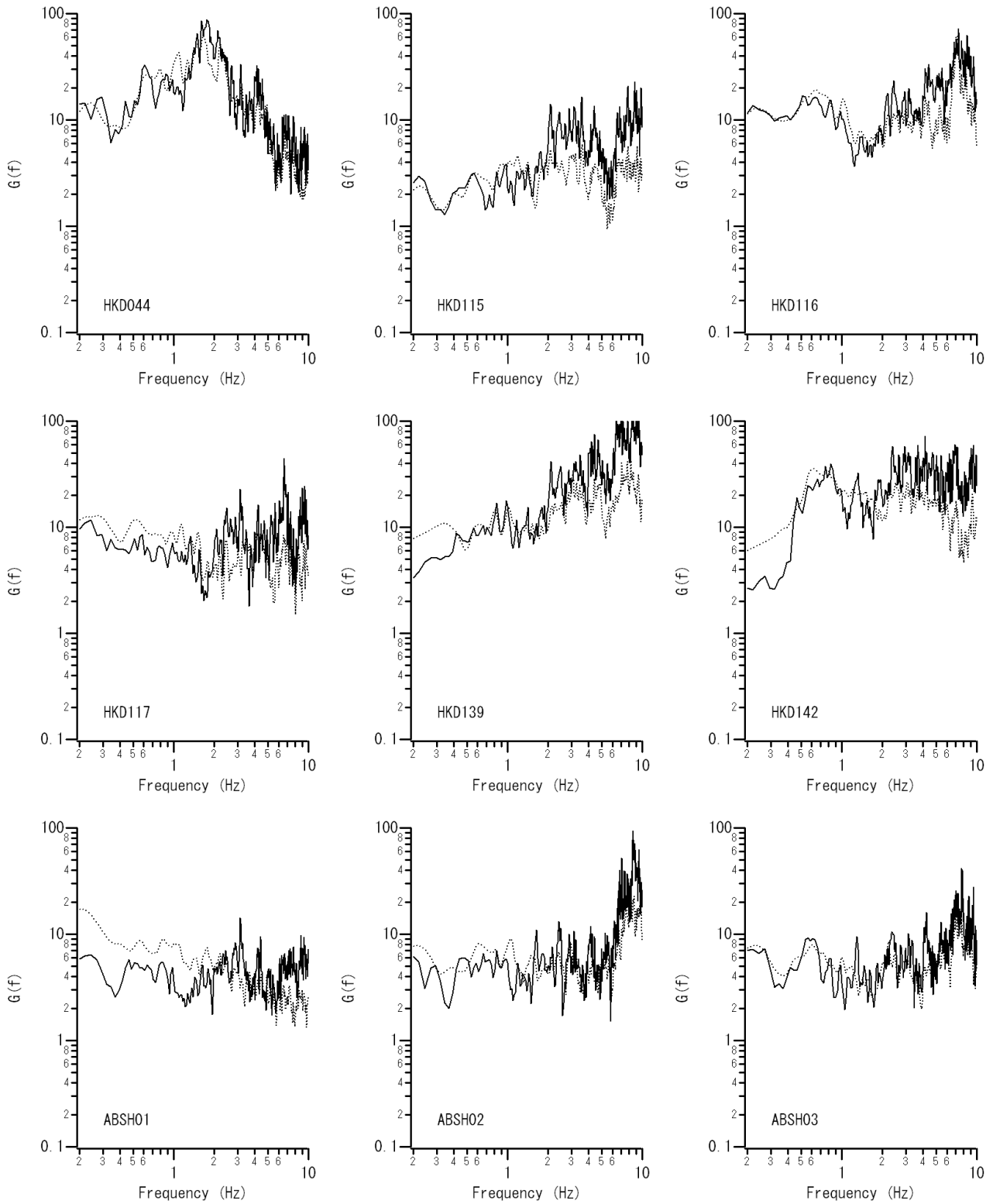


図-4.2 新旧のサイト増幅特性の比較 (その2) 破線が既往の研究 (野津・長尾, 2005). 実線が今回.

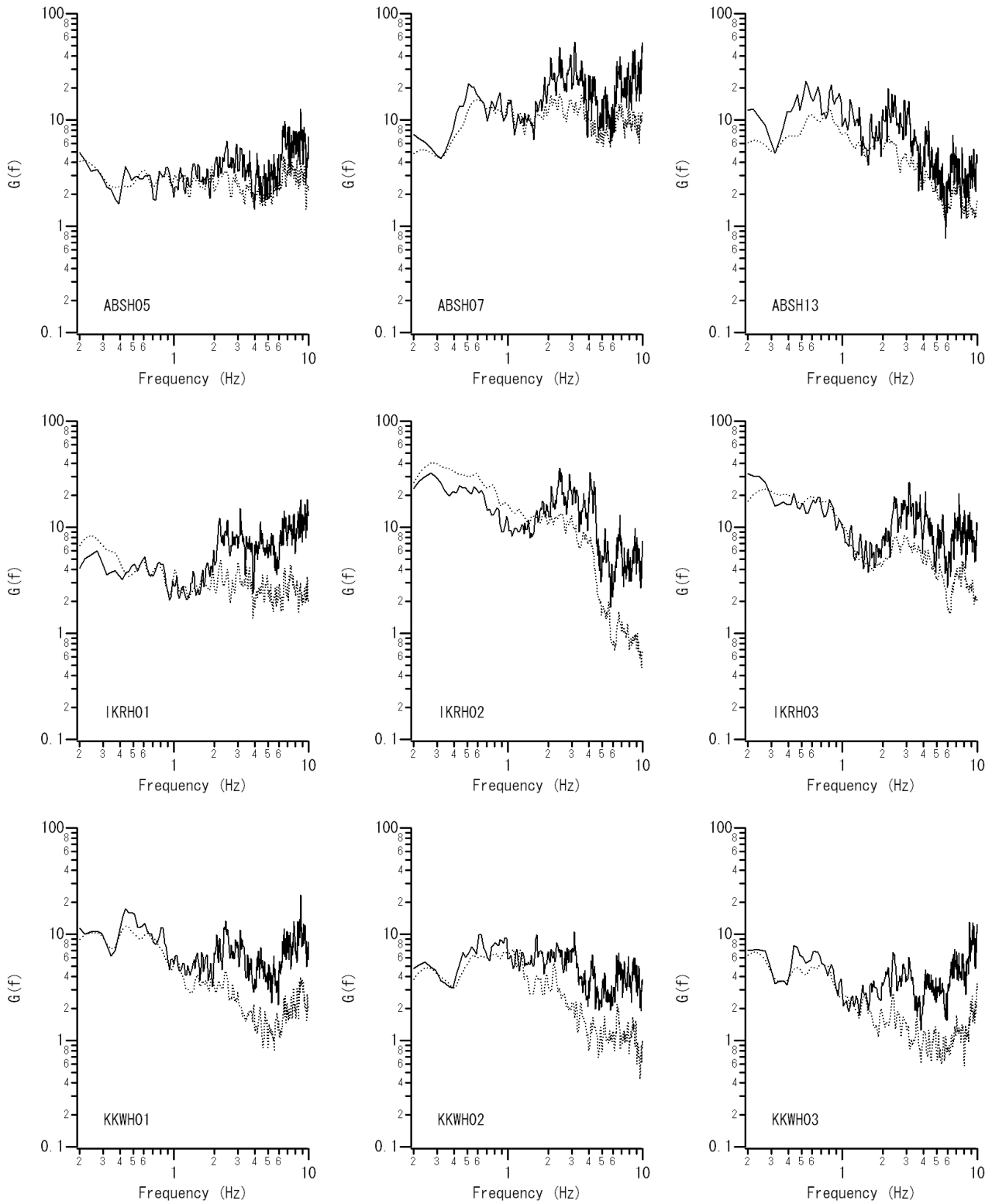


図-4.3 新旧のサイト増幅特性の比較 (その3) 破線が既往の研究 (野津・長尾, 2005). 実線が今回.

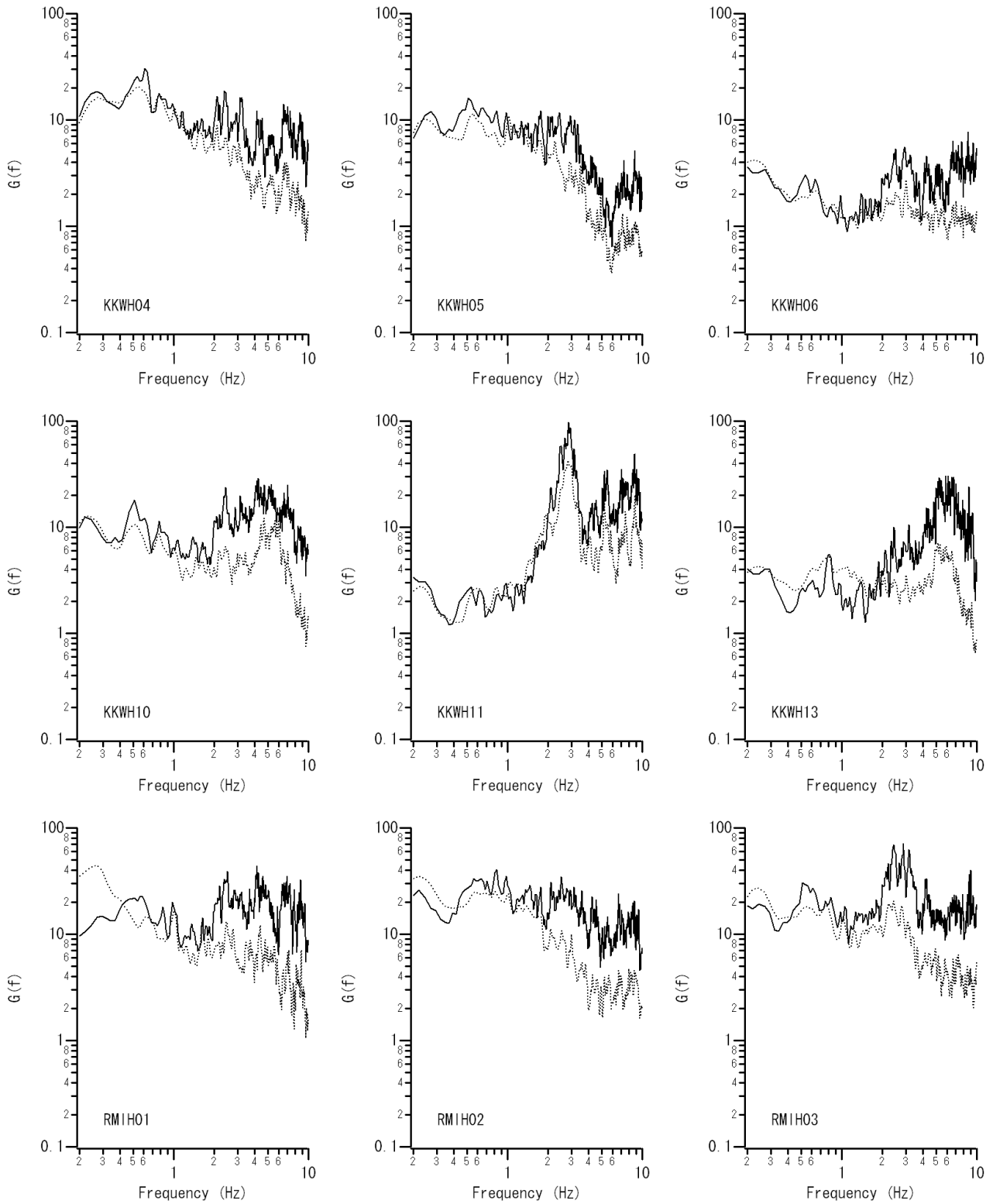


図-4.4 新旧のサイト増幅特性の比較 (その4) 破線が既往の研究 (野津・長尾, 2005). 実線が今回.

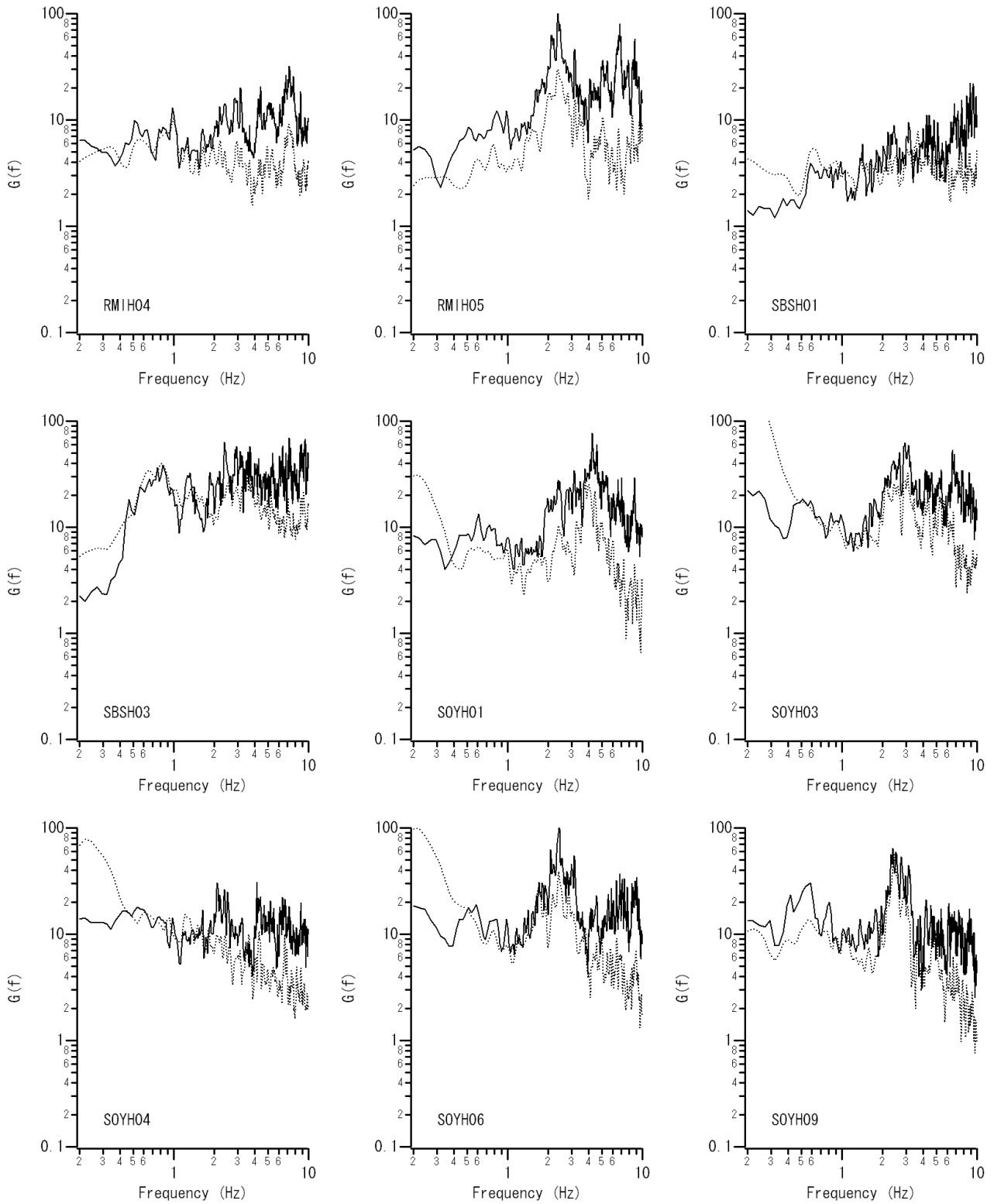


図-4.5 新旧のサイト増幅特性の比較 (その5) 破線が既往の研究 (野津・長尾, 2005). 実線が今回.

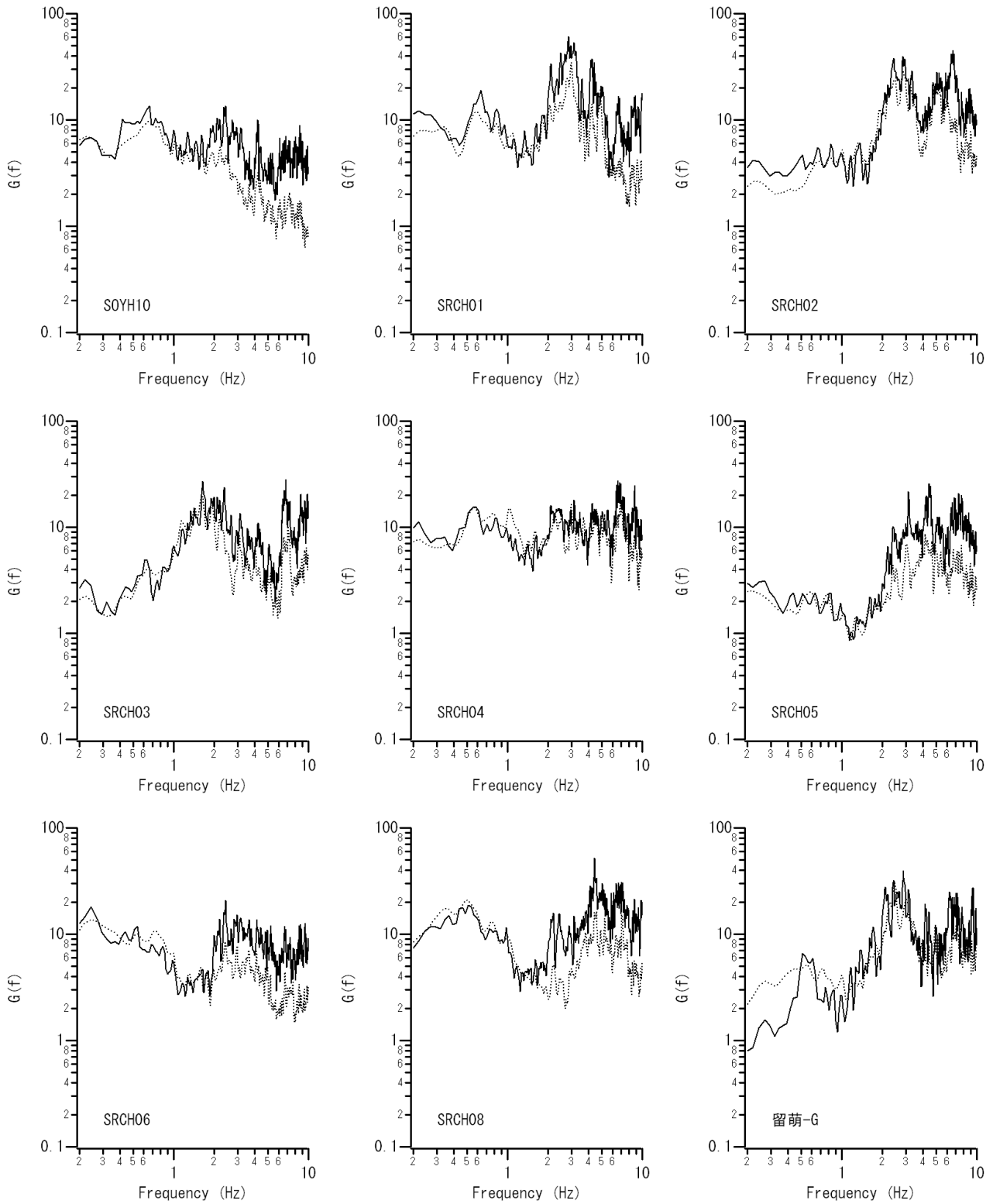


図-4.6 新旧のサイト増幅特性の比較 (その6) 破線が既往の研究 (野津・長尾, 2005). 実線が今回.



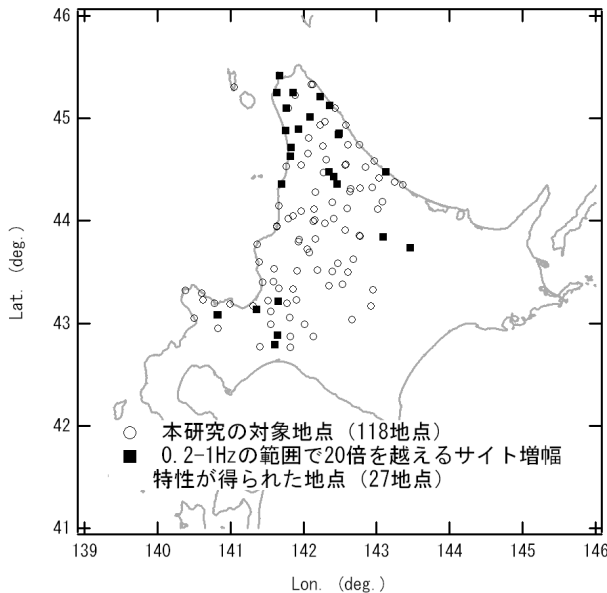


図-4.7 本研究で対象とした地点 (○) のうち、0.2-1Hz の範囲で 20 倍を越えるサイト増幅特性が得られた地点 (■)。

ト増幅特性が評価されていた 54 地点について、新旧のサイト増幅特性を比較したものが図-4.1～図-4.6 である。2. で述べたように、道北の HKD014, HKD016, RMIH01, SOYH01, SOYH03, SOYH04, SOYH06 等の地点では、既往の研究では 15:01 の余震観測記録の影響で 0.2Hz 付近のサイト増幅特性が過大評価されていたが、今回の解析結果では過大評価が解消されていることが図-4.1～図-4.6 からわかる。それ以外の観測点や周波数帯域に着目すると、本研究で得られたサイト増幅特性は概ね既往の研究におけるサイト増幅特性と調和的である場合が多い。なお、高周波側で新旧のサイト増幅特性に違いのある観測点もあるが、これは主に解析に用いられた個々の記録の特性によると考えられる。サイト増幅特性は複数の記録に対する平均値として定義されるので、解析に利用できる記録の数が少ない間は、個々の記録の特性が反映されやすい。今後、道北地域において解析に利用できる記録の数が増えるにしたがい、より安定した解析結果が得られるものと期待される。

ここで、低周波側 (0.2-1Hz の範囲) で 20 倍を越えるような非常に大きなサイト増幅特性が得られている地点に着目すると、全部で 27 地点存在する。それらを地図上にプロットすると図-4.7 のようになる。この図からわかるように、低周波側で非常に大きなサイト増幅特性を示す地点は道北の西側 (サロベツ原野周辺) に多く分布している。サロベツ原野とその周辺は北海道の中でも特に厚い堆積層の分布する地域として知られており (例えば中央防災会議, 2008), 上記の結果はこうした地下構造と関係があるものと考えら

れる。ただし、低周波側でサイト増幅特性の非常に大きい地点は道北の東側にも分布している。この他、低周波側でサイト増幅特性の非常に大きい地点は名寄盆地, 石狩平野, 後志支庁の赤井川カルデラ, 網走支庁の山間部などにも分布している。

一方、サイト増幅特性の非常に小さい地点に目を向けてみると、雄冬岬の近くに位置する HKD023 では、0.2-2Hz の範囲でサイト増幅特性は 1～2 の範囲に収まっており、地震基盤に近い特性を示している (図-4.1)。

本解析では、サイト増幅特性と同時に、4 つの地震の震源特性が得られている。3. で述べたように、スペクトルインバージョンでは震源特性とサイト増幅特性の間にトレードオフの関係がある。このことを回避するため、スペクトルインバージョンでは拘束条件を与えるが (本研究では HKD024, HKD047, および ABSH04 のサイト増幅特性)、与えた拘束条件が不適切である場合には、震源特性、サイト増幅特性とも不適切なものが求まる恐れがある。そこで、本研究で得られている震源特性が妥当なものであるかを確認するため、防災科学技術研究所の F-net による CMT 解 (福山他, 1998) による地震モーメント (例えば日本港湾協会, 2007) との比較を行った。

本研究で得られた震源特性を図-4.8 に細実線で示す。震源特性  $S(f)$  はしばしば  $\omega$  スクエアモデル (Aki, 1967) を用いて式 (4.1) のようにモデル化される (例えば Boore, 1983; 日本港湾協会, 2007)。

$$S(f) = R_{\theta\phi} \times FS \times PRITIN \times \frac{M_0}{4\pi\rho V_s^3} \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (4.1)$$

ここに  $M_0$  は地震モーメント,  $f_c$  はコーナー周波数 (例えば日本港湾協会, 2007),  $\rho$  は震源付近の密度,  $V_s$  は震源付近の S 波速度,  $R_{\theta\phi}$  はラディエーション係数 (例えば日本港湾協会, 2007),  $FS$  は自由地表面による増幅の効果を表す係数 (=2),  $PRITIN$  は地震波のエネルギーの水平 2 成分への分配を表す係数である。ただし本研究では解析の対象としてフーリエスペクトルの水平 2 成分のベクトル和を対象としているので  $PRITIN=1$  である。また、図-4.8 に震源特性をプロットする際には  $FS=2$  で除して示している。従って、図-4.8 に示された震源特性は式で表現すれば

$$S(f) = R_{\theta\phi} \times \frac{M_0}{4\pi\rho V_s^3} \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (4.2)$$

となる。従って  $\omega$  スクエアモデルではコーナー周波数よりも低周波側では震源特性は周波数の自乗に比例し、両対数軸上では傾き 2 の直線となる。またコーナー周波数は規模の大きい地震ほど低周波側にあると考えられている。

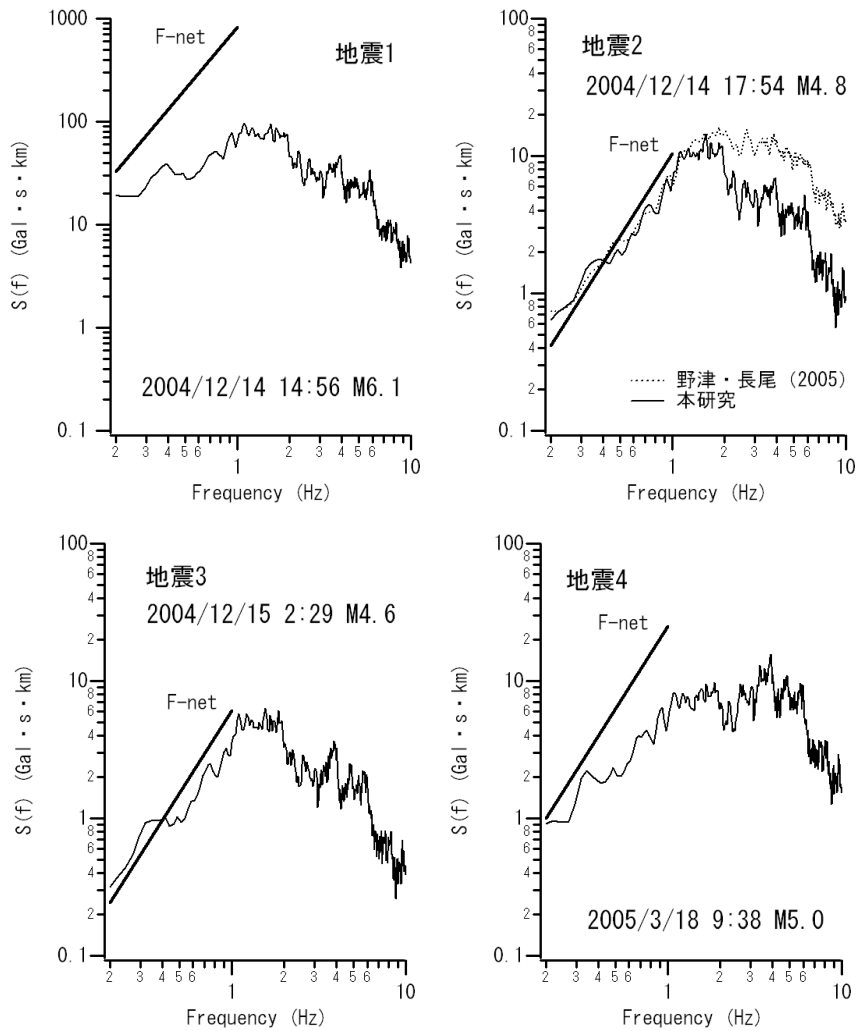


図-4.8 本研究で推定された震源特性（細実線）. 太実線はF-netのCMT解（福山他，1998）から推定される震源特性の低周波側のフラットレベル. 破線は既往の研究（野津・長尾，2005）の震源特性.

ここでは防災科学技術研究所のF-netによるCMT解（福山他，1998）の地震モーメントを式(4.2)に代入し震源スペクトルの低周波側の直線部分を求めた. その際，震源深さを考慮し，いずれの地震に対しても  $\rho = 2.4 \text{ ton/m}^3$ ， $V_S = 3.55 \text{ km/s}$  を用いた（福山他，1998）. またラディエーション係数としては全方位への平均値 0.63 を用いた. こうして求めた低周波側の直線部分を図-4.8 に太実線で示している.

本研究で得られた震源特性の低周波部分は，地震規模が大きくコーナー周波数の低い地震 1（M6.1）に対してはあまりはっきりしないものの，それ以外の地震に対しては，F-net の CMT 解から求めた低周波側の直線部分と良く整合している. 従って，本研究で与えた拘束条件（HKD024，HKD047，ABSH04 におけるサイト増幅特性）は適切なも

のであったと考えられる. なお，既往の研究（野津・長尾，2005）でも地震 2 は解析に用いられており震源特性が評価されているので参考のため図-4.8 に示した.

## 5. まとめ

本研究では，既往の研究（野津・長尾，2005）においてサイト増幅特性が評価されている北海道の 260 地点のうち，道北を中心とするいくつかの地点において，用いられた記録の特性により低周波側（0.2Hz 付近）においてサイト増幅特性が過大評価となっていることに着目し，現時点で利用可能なデータに基づいてスペクトルインバージョンによりサイト増幅特性の再評価を行った.

解析では 2004 年 12 月から 2005 年 3 月にかけて対象地

域に強震記録をもたらした4つの地震を対象とし、それらの地震に対して震央距離150km以内にある118の地点を対象とした。また、既往の研究結果との連続性を保つ観点から、既往の研究においてサイト増幅特性が問題なく評価されている3地点におけるサイト増幅特性を拘束条件として与えた。解析の結果、115の地点においてサイト増幅特性が新たに評価された。本研究で得られたサイト増幅特性を既往の研究のものと比較すると、既往の研究では複数の地点で見られた低周波側(0.2Hz付近)でのサイト増幅特性の過大評価が、本研究では解消されていることが確認された。それ以外の観測点や周波数帯域に着目すると、本研究で得られたサイト増幅特性は概ね既往の研究におけるサイト増幅特性と調和的である場合が多い。新たに得られたサイト増幅特性と地下構造との対応関係に着目すると、北海道の中でも特に厚い堆積層の分布する地域として知られている道北の西側(サロベツ原野周辺)では低周波側で非常に大きなサイト増幅特性を示す地点が多いことがわかる。また、後志支庁の赤井川カルデラや網走支庁の山間部にも低周波側で非常に大きなサイト増幅特性を示す地点が分布している。一方、雄冬岬の近くに位置するHKD023では0.2-2Hzの範囲でサイト増幅特性は1~2の範囲に収まっている。サイト増幅特性と同時に得られた4つの地震の震源特性とF-netによるCMT解の地震モーメントとの比較を行ったところ互いに調和的であることがわかった。

本研究により得られたサイト増幅特性は一定の信頼性を有すると考えられるが、対象地域は地震の少ない地域であるため、今回の解析に用いることのできた記録の数も必ずしも多いとは言えない(表-3.1)。従って、当該地域において今後新たに地震観測記録が得られた場合には、それらに基づいてサイト増幅特性の再評価を行い、サイト増幅特性評価の、ひいては耐震設計の一層の信頼性向上を図っていくことが重要である。本研究で得られたサイト増幅特性と震源特性の数値データを参考のため付録CDに示す。

(2010年1月27日受付)

## 謝辞

本研究をすすめるにあたり、国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室の長尾毅室長および(株)ニュージェックの山田雅行氏から御意見をいただきました。(独)防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの強震記録, F-netのCMT解を利用しました。記して謝意を表します。

## 参考文献

岩田知孝・入倉孝次郎(1986): 観測された地震波から震源

特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, 第39巻, pp.579-593.

佐藤智美・巽誉樹(2002): 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号, pp.15-24.

中央防災会議(2008): 長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周期, 東南海、南海地震等に関する専門調査会平成20年12月5日記者発表資料, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/36/shiryou/shiryou4.pdf>.

日本港湾協会(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説。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・菅野高弘(2007): スペクトルインバージョンに基づく南西諸島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.1149.

福山英一・石田瑞穂・Douglas S. Dreger・川井啓廉(1998): オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震2, 第51巻, pp.149-156.

Aki, K. (1967): Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol.72, pp.1217-1231.

Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara, and Y. Okada (2000): New strong-motion observation network: KiK-net, *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, 81, 329.

Boore, D.M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894.

Kinoshita, S. (1998): Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332.

Street, R., R. Herrmann and O. Nuttli (1975), Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol.41, pp.51-63.

港湾空港技術研究所資料 No. 1214

2010.6

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 大 應

Copyright © (2010) 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。