

## 埋立地盤における地震動増幅特性とその経時変化

京都大学 正会員 岡二三生

岐阜大学 正会員 杉戸真太 八嶋 厚 古本吉倫

福井県警 齊藤真也 神戸市港湾整備局 山田耕一郎

- はじめに:**兵庫県南部地震において液状化の激しかった神戸市ポートアイランド(PI)では、この地震以前より、鉛直アレー観測システムにより観測が行われており、前震、余震を含む多くの記録が得られている。また、六甲アイランド(RI)においては、本震記録は得られなかったものの、前後の約2年間で多くの記録が得られている。ここでは、これらの記録をもとに、本震前後の地震動増幅特性と本震による液状化発生以降の地震増幅特性の経時変化を考察した。
- 鉛直アレー観測点の概要:** 両人工島(図1)では、地表と地中に観測計が設置されている(図2)。PI観測点では、地下15~33mの部分に沖積層が存在し、そのうち15~23mの上部沖積層がやや軟弱になっている。それより上部は埋立て層である。RI観測点では、23.7~33.8mに沖積層があり、その部分のせん断波速度は115m/secでPI観測点に比べてさらに軟弱となっている。埋立て終了時期が、PI観測点では1969年頃、RI観測点では1979年頃であり、沖積層の圧密期間の違いがせん断波速度の相違の要因の一つとも考えられる。表1に示す39の地震の記録を解析対象としたが、地震計測システムの不備により記録が得られていない期間もある。尚、PI観測点について、GL-83mの強震計の観測方位が水平面で時計回りに22°ずれていることが指摘されており<sup>1)</sup>、当該記録について補正を施した。
- 地震動増幅特性の比較:** まず、最大地動の増幅特性を検討する(図3~図6)。図3に、表1の本震以前に区分される記録(NS,EW,UD成分)の最大加速度を、最深部の最大加速度により正規化した増幅分布を示す。PI地点で水平成分がGL-16mより浅い部分で大きく増幅しているのに対して、RI地点では、地表への増幅率が相対的に小さいことを示している。上下動成分については、両地点とも同様に地表付近で大きく増幅している。図6は表1の本震以後2に属する地震について、同様に最大加速度の増幅特性を比較したものである。RI地点では図3とやや傾向の異なる記録も得られるが、概ね図3と同様である。すなわち、PI地点では地表近くで水平成分の増幅が大きく、RI地点では小さいことが示されている。一方、図4,図5はそれぞれPI地点における本震および、本震直後の増幅特性を示したものであるが、これらの特性は前述のPI地点における本震前後の特性(図3(a),図6(a))とは異なり、水平成分において地表での増幅率は相対的に小さい。図7は地表面の加速度応答スペクトル(減衰5%)を、最深部のスペクトルで正規化して増幅率を算出したものである。PI地点においては本震直後において大きくスペクトル特性が変化し、その後もとの特性に回復していく様子が観察できる。
- 数値計算による増幅率の検討:** 入力レベルの違いによる地震動増幅特性の変化に地盤の材料的非線形性がどのように影響するかを調べる必要がある。ここでは、等価ひずみに周波数特性を与える手法<sup>2)</sup>を導入した等価線形化法を用いて、3つの入力地震動レベルによる両観測点での増幅特性を求めた。図8は、本震におけるPI観測点GL-83mでの方向補正記録NS成分を、1.0、0.2、0.05倍に振幅調整した波形をGL-83m(PI地点)、GL-155m(RI地点)に入力した場合の最大加速度の分布を示したものである。入力地震動の最大加速度が26cm/sec<sup>2</sup>の場合には、PI観測点で地表で増幅し、RI観測点では増幅しておらず、図3、図6の結果と対応している。一方、入力地震動レベルが大きくなると(526cm/sec<sup>2</sup>)、地盤の非線形性の影響が現れ、地表付近で最大加速度の増幅率が低くなる。これはPI地点における図4、図5の結果と対応しているが、地表では依然として増幅しており、等価線形化法の有効範囲を超えていると思われる。RI地点では、観測記録が得られていないが、計算では特に軟弱な沖積層の部分で大きく減衰している。よって同地点では、強震時には埋立て層への入力強度が押さえられることが考えられ、兵庫県南部地震における両人工島での液状化の程度の違いに影響した可能性もあると考えられる。
- 増幅率の経時変化:** 表1に示す地震における加速度記録の水平成分について、最下層から地表への最大加速度の増幅率が時間の経過と共にどのように変化するかを考察した(図9)。PI地点において、最大加速度の増幅率は、本震

直後急激に低下し、その後約1週間経過すると本震前の平均値に収束している。次にスペクトル増幅率についても(図10左)、特に高振動数域において、最大加速度の増幅率と同様に、本震直後急激に低下し、その後約1週間経過すると本震前の平均値に収束している。中振動数域についてもやや同様の傾向がみられる。これは時間の経過と共に徐々に過剰間隙水圧が消散していく状況を示している。RIでは本震直後の記録がないが、スペクトル増幅率には本震前後でPIのような際立った変化はみられず、本震後の最大加速度の増幅率とスペクトルの増幅率は、PI同様、本震前の平均値に収束しているように見える。

6. まとめ: 両人工島におけるアレー観測記録に基づく、地震動増幅特性に関する基礎的検討について述べた。観測記録と震動解析結果の両面から両人工島における液状化層下部への入力地震動レベルが異なっていた可能性について指摘した。さらに、最大加速度の増幅特性とスペクトル増幅特性の経時変化が見出された。今後、埋立て層下の沖積層の動的物性値の違いが両人工島での液状化の程度にどのように影響したかについてさらに詳細に検討していく。なお、本報は、神戸市からの委託研究として行っている検討事項の一部について報告したものである。

参考文献

- 1) M.Sugito, K.Sekiguchi, A.Yashima, F.Oka, Y.Taguchi, Y.Kato: Correction of Orientation Error of Borehole Strong Motion Array Records obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan.17, 1995, 土木学会論文集, No.531/I-34, pp51~pp63, 1996.
- 2) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/II-27, pp.49-58, 1994.

表1 PIおよびRI地点で観測された兵庫県南部地震を含む前後の地震 ('94 6/28~'95 10/24)

地震区分	地震No.	発震日時	M	深さ(km)	震源地	緯度	経度	data No.	備考
A (本震以前)	01	94.06.28 13:09	4.6	13	京都府中部	35.08.	135.39.	46281309	
	02	94.07.28 10:02	4.1	9	大阪府南部	34.19.	135.19.	47281002	
	03	94.10.24 11:51	4.3	15	京都府中部	35.00.	135.31.	4a241151	
	04	94.11.09 20:27	4	14	兵庫県東部	34.55.	135.23.	4b092027	
	05	94.11.10 00:38	3.9	14	兵庫県東部	34.55.	135.23.	4b100038	
本震	06*	95.01.17 05:46	7.2	13	淡路島	34.64.1	135.17.9	51170546	注1
B (本震直後1)	07*	95.01.17 05:53	4.9	8	兵庫県南東部	34.40.7	135.08.9	51170553	注1
	08*	95.01.17 08:58	4.7	19	淡路島	34.35.2	135.00.4	51170858	注1
	09*	95.01.18 05:25	4.5	15	兵庫県南東部	34.41.8	135.10.9	51180525	注1
	10*	95.01.18 13:34	4	15	兵庫県南東部	34.41.3	135.10.5	51181334	注1
C (本震直後2)	11*	95.01.19 01:00	4	14	兵庫県南東部	34.47.8	135.19.7	51190100	注1
	12*	95.01.19 01:52	3.3	10	大阪湾	34.38.7	135.07.5	51190152	注1
	13*	95.01.19 02:23	3.4	14	兵庫県南東部	34.41.7	135.02.1	51190223	注1
	14*	95.01.19 05:10	3.2	18	兵庫県南東部	34.39.8	135.09.6	51190510	注1
D (本震以後1)	15*	95.01.20 15:38	3.7	14	兵庫県南東部	34.41.9	135.12.3	51201538	注2
	16*	95.01.23 21:44	4.3	16	兵庫県南東部	34.37.6	135.19.1	51232144	注2
	17*	95.01.25 23:16	4.7	17	兵庫県南東部	34.47.4	135.18.8	51252316	注2
E (本震以後2)	18	95.01.26 01:01	3.5	13	兵庫県南東部	34.46.0	135.16.0	51260101	
	19	95.01.26 23:08	3.5	15	兵庫県南東部	34.47.4	135.18.6	51262308	
	20*	95.01.28 08:06	3	5	兵庫県南東部	34.41.0	135.10.7	51280806	注1
	21	95.01.29 09:41	3.3	14	兵庫県南東部	34.39.4	135.08.6	51290941	
	22	95.01.29 16:02	3.6	13	兵庫県南東部	34.41.1	135.10.8	51291602	
	23	95.02.02 16:19	4.2	18	兵庫県東部沿岸	34.41.7	135.09.0	52021619	
	24	95.02.03 04:36	3.7	15	兵庫県東部沿岸	34.41.8	135.11.2	52030436	
	25	95.02.03 20:37	3.4	12	兵庫県東部沿岸	34.43.8	135.16.0	52032037	
	26	95.02.06 13:00	3.5	12	兵庫県東部	34.47.6	135.19.5	52061300	
	27	95.02.18 21:37	4.9	13	淡路島	34.26.7	134.48.4	52182137	
28	95.02.24 08:03	3.3	15	兵庫県東部沿岸	34.42.9	135.12.5	52240803		
F (本震以後3)	29	95.03.05 10:04	3.2	15	兵庫県東部沿岸	34.43.7	135.14.8	53051004	
	30	95.04.06 10:50	4	12	兵庫県南東部	34.47.4	135.19.2	54061050	
	31	95.05.04 05:53	3.6	15	兵庫県南東部	34.41.7	135.11.1	55040553	
	32	95.05.04 17:42	4.1	18	大阪湾	34.32.2	134.54.3	55041742	
	33	95.05.08 02:36	3.3	14	兵庫県南東部	34.42.6	135.12.8	55080236	
	34	95.05.15 07:33	3.4	13	大阪湾	34.38.8	135.07.9	55150733	
	35	95.05.19 20:35	4.4	19	大阪湾	34.36.4	135.02.1	55192035	
	36*	95.05.28 10:34	4	14	兵庫県南東部	34.40.4	135.10.1	55281034	注1
	37*	95.06.19 08:38	3.4	13	兵庫県南東部	34.45.8	135.16.2	56190838	注1
	38	95.09.12 06:30	3.6	16	兵庫県南東部	34.41.5	135.11.8	59120630	
	39	95.10.14 02:04	4.8	17	大阪湾	34.37.0	135.06.4	5a140204	

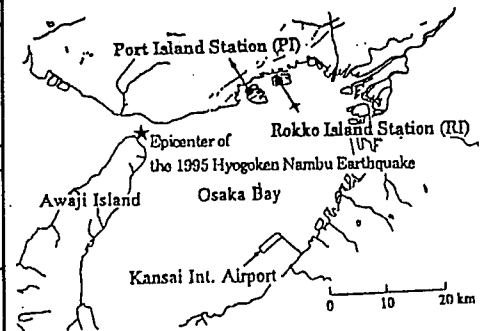


図1 観測地点位置と震源地

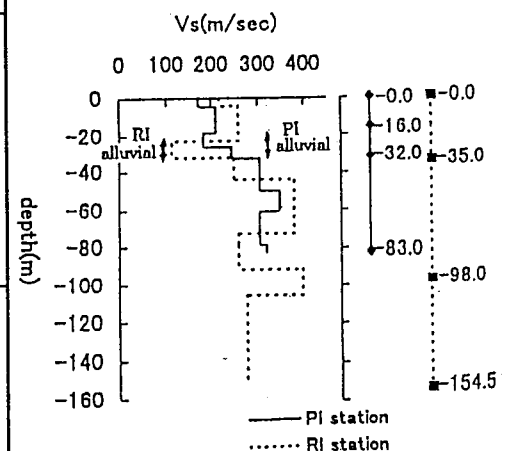


図2 速度構造と地震計設置状況

注1) 六甲アイランドにおいて記録が得られていない。注2) ポートアイランドにおいて記録が得られていない。

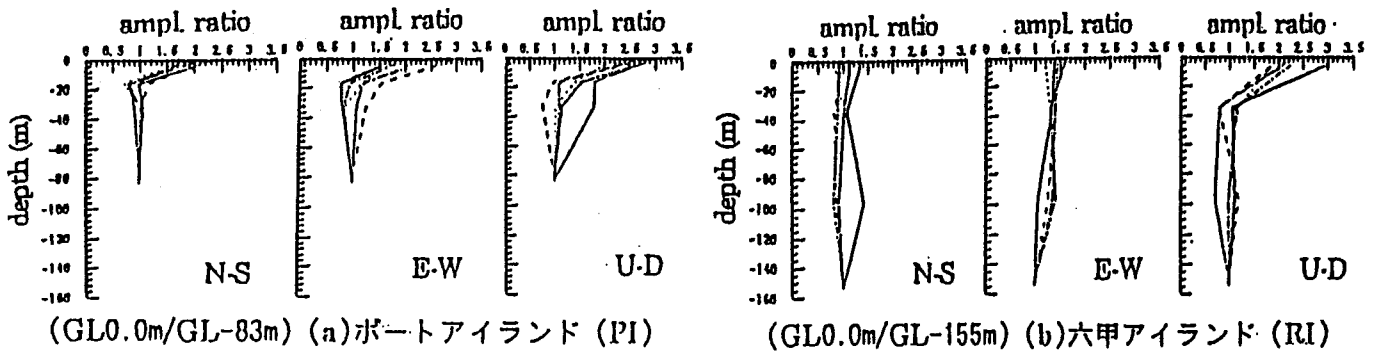


図3 最大加速度の増幅特性 (表1における本震以前)

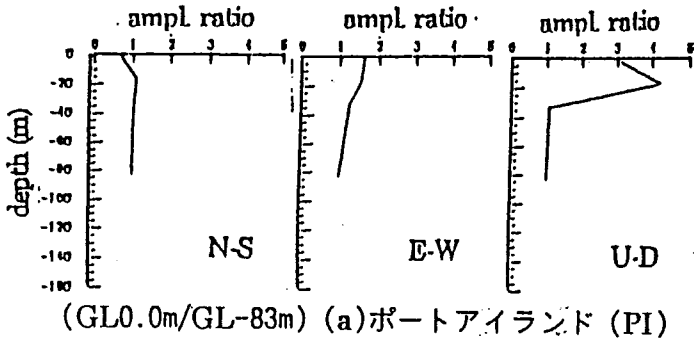


図4 最大加速度の増幅特性 (本震)

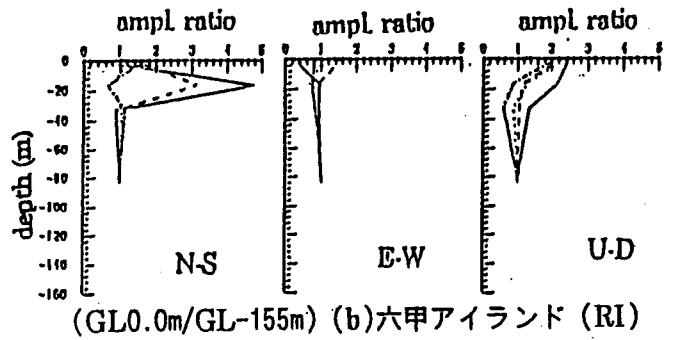


図5 最大加速度の増幅特性 (表1における本震直後1)

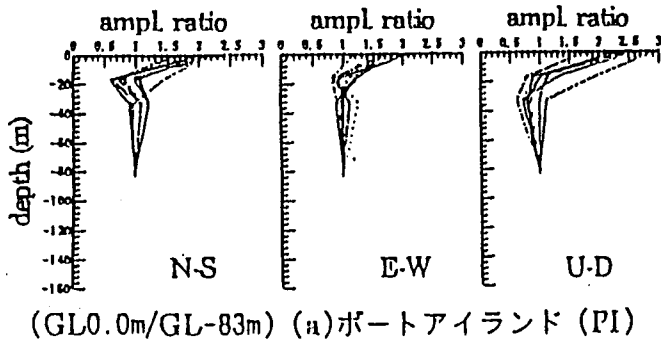


図6 最大加速度の増幅特性 (表1における本震以後2)

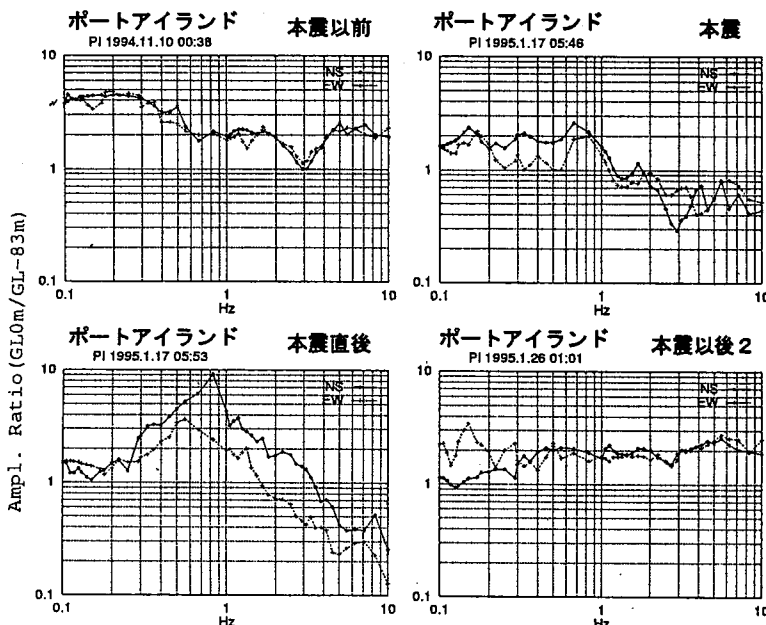
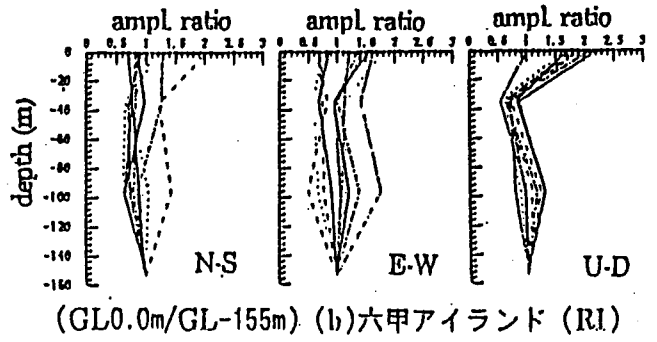


図7 (a) ポートアイランドにおける加速度応答スペクトルの増幅特性

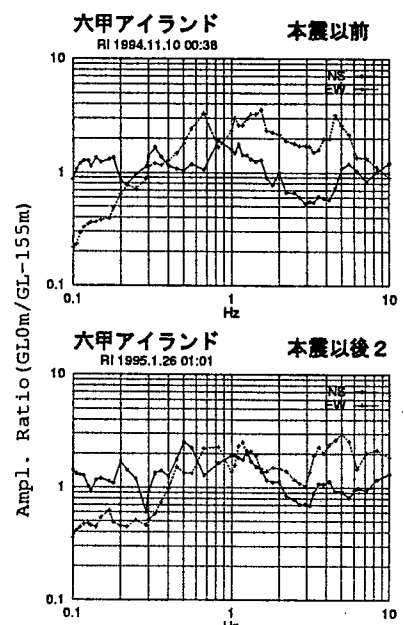


図7 (b) 六甲アイランドにおける加速度応答スペクトルの増幅特性

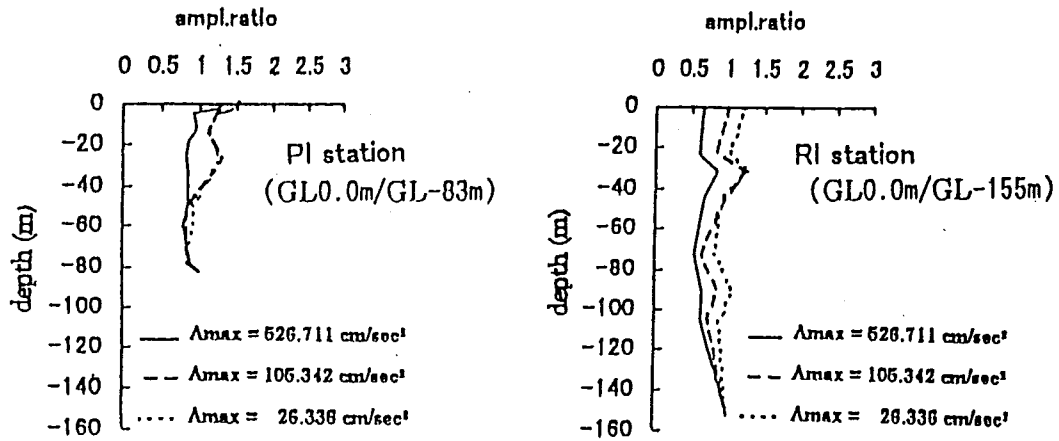


図8 地盤応答解析による最大加速度の増幅特性

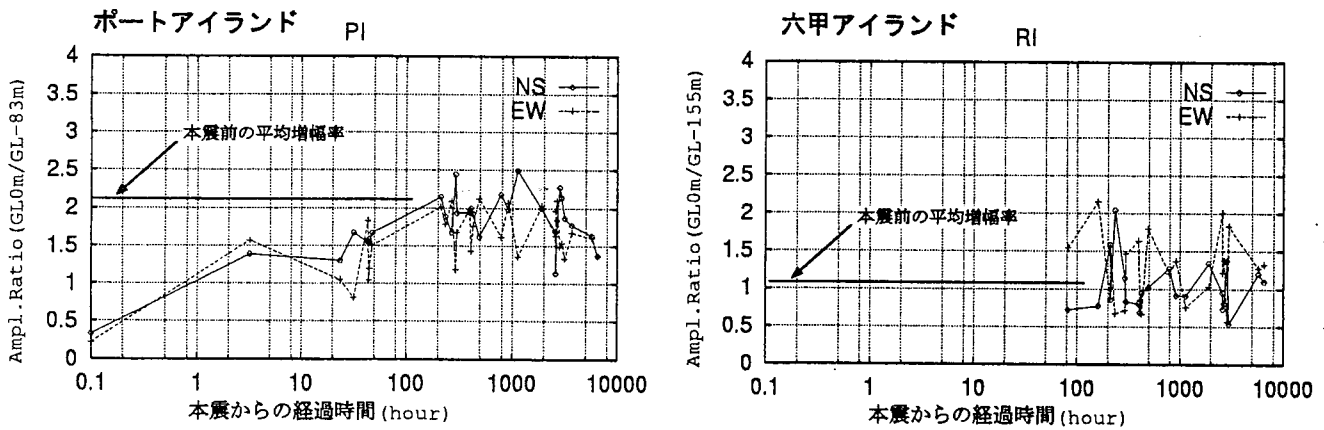


図9 最大加速度の増幅率の経時変化

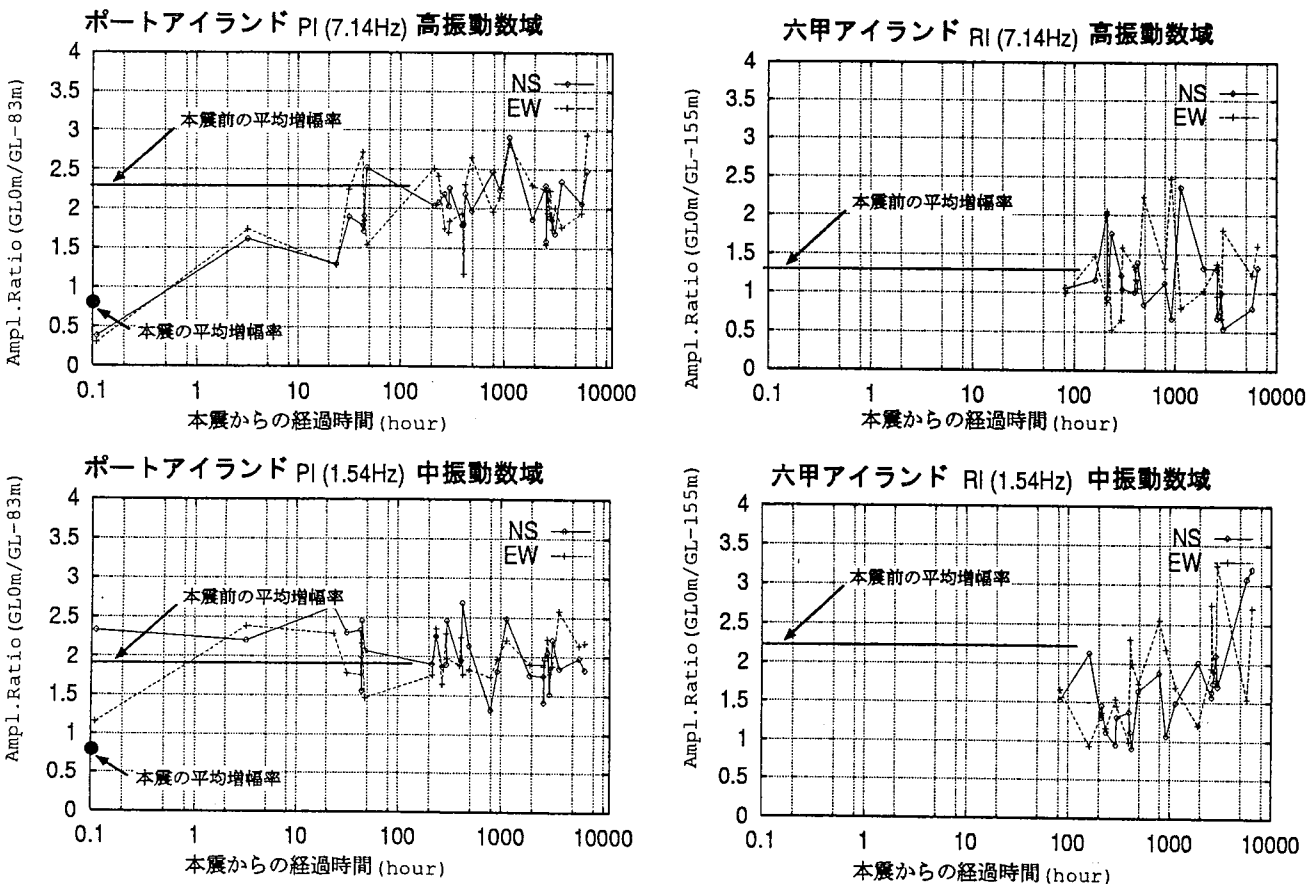


図10 加速度応答スペクトルの増幅率の経時変化