

耐震構造健全性評価試験  
— 直管要素の動的加振試験 —

(試験報告書)



2000年9月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2000

2000年9月

耐震構造健全性評価試験  
— 直管要素の動的加振試験 —  
(試験報告書)

奥田 幸彦<sup>\*1</sup>, 篠原 義和<sup>\*2</sup>, 堀切 守人<sup>\*3</sup>

要 旨

高速炉実機配管の直径／肉厚比を考慮した薄肉の直管要素試験体に対して、振動特性、弾塑性挙動、破損モード等を把握するための動的加振試験を実施した。試験結果を分析・評価することにより以下の事項を確認した。

- (1) 入力加速度が大きくなり試験体の塑性変形が進行するにつれて、固有振動数は低下し、減衰比は増大することを確認した。これは試験体の塑性エネルギー吸収による応答低減効果であるものと考えられる。
- (2) 加振の繰返しによって、静的座屈試験と同様に固定端部付近に徐々に外側に膨らむ進行性変形（バルジ変形）が生じたが、試験体の荷重変位特性に急激な載荷能力の低下などは見られなかった。
- (3) 応答加速度から算出した動的限界強度は、最大荷重発生前に著しい動的負荷履歴を受けていたにもかかわらず、静的座屈荷重を下回ることはなかった。
- (4) 最終的に、配管内面より発生したき裂が発生又は貫通して破損に至った。破面のSEM観察の結果、断定できないがストライエーション状の模様が観察されたことから、破損は繰返し負荷に伴う疲労き裂の発生及び進展・貫通によるものと考えることができる。
- (5) 破損部付近のひずみ履歴より疲労損傷を評価した結果、進行性変形（ラチエット）に伴う累積非弾性ひずみによる延性消耗との相互作用として試験結果を整理できる可能性があることがわかった。

---

<sup>\*1</sup>核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 要素技術開発部 機器・構造安全工学グループ

<sup>\*2</sup>元 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器・構造安全工学グループ（現在 三菱重工業（株））

<sup>\*3</sup>核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 要素技術開発部 機器・構造安全工学グループ

September 2000

**Dynamic Failure Tests on Piping**  
— Dynamic Tests on Straight Pipe Components —  
(Test Report)

Yukihiko Okuda\*<sup>1</sup>, Yoshikazu Shinohara\*<sup>2</sup>, Morito Horikiri\*<sup>3</sup>

**ABSTRACT**

Dynamic failure tests of thin-walled straight pipe components with the diameter/thickness ratio of the piping for Fast Breeder Reactor were conducted due to evaluate vibration characteristics, elastic-plastic behavior, failure mode and ultimate strength under dynamic load. The following items were confirmed by analyzing and investigating test data:

- (1) In accordance with input acceleration increasing, natural frequency is increased and damping rate is decreased. These are considered the effect of response reduction.
- (2) Although progressive deformation was observed near the fixed end of the specimens, the load-displacement behavior of the specimen was stable and fast collapse did not occur.
- (3) Although the specimens received much damage under dynamic load, dynamic ultimate load calculated from response acceleration is larger than static buckling load.
- (4) Finally, the specimens failed because cracks penetrated. As a result of SEM, the pattern like striation was observed on fracture surface, so failure mode is considered due to fatigue crack initiated inside of the wall growing and penetrating under cyclic load.
- (5) As a result of damage evaluation near the crack location, test data can be evaluated as the effects of fatigue and ductility consumption caused cumulative inelastic strain with progressive deformation.

---

\*<sup>1</sup> Structure Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

\*<sup>2</sup> Former Structure Safety Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, JNC (Presently Mitsubishi Heavy Industries ltd.)

\*<sup>3</sup> Structure Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

## 目 次

要旨	I
目次	III
表リスト	V
図リスト	VI
写真リスト	XI
付録表リスト	XII
付録図リスト	XII
 1. 緒言	1
 2. 試験方法	3
2.1. 試験装置	3
2.2. 供試体	3
2.2.1. 試験体	3
2.2.2. 材料	4
2.2.3. 試験治具	5
2.3. 計測方法	6
2.3.1. 加速度	6
2.3.2. 変位	6
2.3.3. ひずみ	7
2.3.4. 温度	7
2.3.5. 形状計測及び板厚計測	8
2.4. 加振方法	9
2.4.1. 定常ランダム波漸増加振試験	9
2.4.2. 地震波漸増加振試験	10
2.4.3. 地震波限界加振試験	11
 3. 定常ランダム波漸増加振試験結果	44
3.1. 加速度	44
3.2. 相対変位	44
3.3. ひずみ	45
3.4. 温度	45
3.5. 形状計測	46
3.6. 破面観察	46

4. 地震波漸増加振試験結果 .....	81
4.1. 加速度 .....	81
4.2. 相対変位 .....	81
4.3. ひずみ .....	82
4.4. 温度 .....	82
4.5. 形状計測 .....	83
4.6. 破面観察 .....	83
5. 地震波限界加振試験結果 .....	127
5.1. 加速度 .....	127
5.2. 相対変位 .....	127
5.3. ひずみ .....	128
5.4. 温度 .....	128
5.5. 形状計測 .....	129
5.6. き裂外観の観察 .....	129
6. 試験結果の評価 .....	153
6.1. 振動特性 .....	153
6.2. 荷重一変位関係 .....	154
6.3. 変位一ひずみ関係 .....	154
6.4. 疲労評価 .....	155
6.5. 評価の妥当性 .....	157
7. まとめ .....	204
参考文献 .....	205
付録 .....	206

## 表リスト

表 2.2.2.1	直管素材のミルシート	.....	12
表 2.2.2.2	引張試験結果	.....	13
表 2.2.2.3	疲労試験結果	.....	13
表 2.2.3.1	錘支持装置のタッピング試験結果	.....	14
表 2.3.1	計測装置の一覧表（定常ランダム波漸増加振試験、1/2）	..	15
表 2.3.2	計測装置の一覧表（定常ランダム波漸増加振試験、2/2）	..	16
表 2.3.3	計測装置の一覧表（地震波漸増加振試験及び 地震波限界加振試験、1/2）	.....	17
表 2.3.4	計測装置の一覧表（地震波漸増加振試験及び 地震波限界加振試験、2/2）	.....	18
表 2.3.1.1	加速度計の型式一覧	.....	6
表 2.3.2.1	変位計の型式一覧	.....	6
表 2.4.1.1	定常ランダム波漸増加振試験の試験条件	.....	9
表 2.4.2.1	地震波漸増加振試験の試験条件	.....	10
表 2.4.3.1	地震波限界加振試験の試験条件	.....	11
表 6.1	試験結果のまとめ	.....	158
表 6.1.1	各加振試験における固有振動数及び減衰比の算出結果	.....	159
表 6.4.1	疲労損傷評価表（CASE1）	.....	160
表 6.4.2	疲労損傷評価表（CASE2）	.....	161
表 6.4.3	累積ひずみの算出結果	.....	161

## 図リスト

図 2.1.1	加振機の形状及び概略仕様	19
図 2.1.2	加振機の性能特性	20
図 2.2.1.1	試験体の寸法	21
図 2.2.1.2	試験体の初期形状計測結果	22
図 2.2.1.3	試験体の初期板厚計測結果	23
図 2.2.2.1	SUS304 の単調応力ひずみ関係	24
図 2.2.2.2	SUS304 の疲労曲線	24
図 2.2.2.3	SUS304 の繰返し応力ひずみ関係	25
図 2.2.2.4	直管要素の静的座屈試験概要	26
図 2.2.2.5	静的座屈試験における荷重－変位関係	26
図 2.2.3.1	試験体配置図	27
図 2.2.3.2	多段積層ゴムの概要	28
図 2.3.1.1	加速度計の計測点位置	29
図 2.3.2.1	変位計の計測点位置	30
図 2.3.3.1	定常ランダム波漸増加振試験におけるひずみゲージ 計測点位置	31
図 2.3.3.2	地震波漸増加振試験及び地震波限界加振試験における ひずみゲージの計測点位置	32
図 2.3.3.3	ひずみ計測用格子の概要	33
図 2.3.3.4	定常ランダム波漸増加振試験及び地震波漸増加振試験 におけるひずみ計測用格子位置	34
図 2.3.3.5	地震波限界加振試験におけるひずみ計測用格子位置	35
図 2.3.4.1	熱電対の計測点位置	36
図 2.3.5.1	配管形状計測装置の概要	37
図 2.3.5.2	超音波板厚計の概要	38
図 2.4.1.1	基準ランダム波の特性	39
図 2.4.2.1	参考地震波の特性	40
図 2.4.2.2	加振試験に用いた地震波の特性	41
図 3.1.1	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M1)	47
図 3.1.2	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M2)	48
図 3.1.3	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M3)	49
図 3.1.4	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M4)	50
図 3.1.5	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M5)	51
図 3.1.6	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M6)	52

図 3.1.7	定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M7) .....	53
図 3.1.8	入力加速度に対する応答加速度の推移 .....	54
図 3.1.9	加振試験における周波数特性 (M1) .....	55
図 3.1.10	加振試験における周波数特性 (M2) .....	56
図 3.1.11	加振試験における周波数特性 (M3) .....	57
図 3.1.12	加振試験における周波数特性 (M4) .....	58
図 3.1.13	加振試験における周波数特性 (M5) .....	59
図 3.1.14	加振試験における周波数特性 (M6) .....	60
図 3.1.15	加振試験における周波数特性 (M7) .....	61
図 3.1.16	入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移 .....	62
図 3.2.1	入力加速に対する相対変位の推移 .....	63
図 3.3.1	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M1) ..	64
図 3.3.2	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M2) ..	65
図 3.3.3	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M3) ..	66
図 3.3.4	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M4) ..	67
図 3.3.5	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M5) ..	68
図 3.3.6	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M6) ..	69
図 3.3.7	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (M7) ..	70
図 3.3.8	入力加速に対するひずみ (53ch) の推移 .....	71
図 3.4.1	温度の時刻歴 (定常ランダム波漸増加振試験) .....	72
図 3.4.2	表面温度の変化に対するひずみ計測値の変化 .....	72
図 3.5.1	各加振レベルにおける試験体の形状計測結果 .....	73
図 3.5.2	試験前後の試験体形状計測結果の比較 .....	74
図 3.6.1	破面観察位置 .....	75
図 4.1.1	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P1) .....	84
図 4.1.2	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P2) .....	85
図 4.1.3	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P3) .....	86
図 4.1.4	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P4) .....	87
図 4.1.5	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P5) .....	88
図 4.1.6	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P6) .....	89
図 4.1.7	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P7) .....	90
図 4.1.8	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P8) .....	91
図 4.1.9	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P9) .....	92
図 4.1.10	地震波漸増加振試験の時刻歴 (P10) .....	93
図 4.1.11	入力加速度に対する応答加速度の推移 .....	94
図 4.1.12	加振試験における周波数特性 (P1) .....	95

図 4.1.13	加振試験における周波数特性 (P2)	.....	96
図 4.1.14	加振試験における周波数特性 (P3)	.....	97
図 4.1.15	加振試験における周波数特性 (P4)	.....	98
図 4.1.16	加振試験における周波数特性 (P5)	.....	99
図 4.1.17	加振試験における周波数特性 (P6)	.....	100
図 4.1.18	加振試験における周波数特性 (P7)	.....	101
図 4.1.19	加振試験における周波数特性 (P8)	.....	102
図 4.1.20	加振試験における周波数特性 (P9)	.....	103
図 4.1.21	加振試験における周波数特性 (P10)	.....	104
図 4.1.22	入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移	.....	105
図 4.2.1	入力加速に対する相対変位の推移	.....	106
図 4.3.1	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P1)	...	107
図 4.3.2	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P2)	...	108
図 4.3.3	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P3)	...	109
図 4.3.4	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P4)	...	110
図 4.3.5	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P5)	...	111
図 4.3.6	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P6)	...	112
図 4.3.7	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P7)	...	113
図 4.3.8	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P8)	...	114
図 4.3.9	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P9)	...	115
図 4.3.10	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (P10)	..	116
図 4.3.11	入力加速に対するひずみ (43ch) の推移	.....	117
図 4.4.1	温度の時刻歴 (地震波漸増加振試験)	.....	118
図 4.5.1	各加振レベルにおける試験体の形状計測結果	.....	119
図 4.5.2	試験前後の試験体形状計測結果の比較	.....	120
図 4.6.1	破面観察位置	.....	121
図 5.1.1	地震波限界加振試験の時刻歴 (Q1)	.....	130
図 5.1.2	地震波限界加振試験の時刻歴 (Q2)	.....	131
図 5.1.3	地震波限界加振試験の時刻歴 (Q3)	.....	132
図 5.1.4	地震波限界加振試験の時刻歴 (Q4)	.....	133
図 5.1.5	地震波限界加振試験の時刻歴 (Q5)	.....	134
図 5.1.6	入力加速度に対する応答加速度の推移	.....	135
図 5.1.7	加振試験における周波数特性 (Q1)	.....	136
図 5.1.8	加振試験における周波数特性 (Q2)	.....	137
図 5.1.9	加振試験における周波数特性 (Q3)	.....	138
図 5.1.10	加振試験における周波数特性 (Q4)	.....	139

図 5.1.11	加振試験における周波数特性 (Q5) .....	140
図 5.1.12	入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移 .....	141
図 5.2.1	入力加速に対する相対変位の推移 .....	142
図 5.3.1	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (Q1) ..	143
図 5.3.2	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (Q2) ..	144
図 5.3.3	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (Q3) ..	145
図 5.3.4	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (Q4) ..	146
図 5.3.5	ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (Q5) ..	147
図 5.3.6	入力加速に対するひずみ (43ch) の推移 .....	148
図 5.4.1	温度の時刻歴 (地震波限界加振試験) .....	149
図 5.5.1	各加振レベルにおける試験体の形状計測結果 .....	150
図 5.5.2	試験前後の試験体形状計測結果の比較 .....	151
図 6.1.1	固有振動数と減衰比の推定 (M1) .....	162
図 6.1.2	固有振動数と減衰比の推定 (M2) .....	163
図 6.1.3	固有振動数と減衰比の推定 (M3) .....	164
図 6.1.4	固有振動数と減衰比の推定 (M4) .....	165
図 6.1.5	固有振動数と減衰比の推定 (M5) .....	166
図 6.1.6	固有振動数と減衰比の推定 (M6) .....	167
図 6.1.7	固有振動数と減衰比の推定 (M7) .....	168
図 6.1.8	固有振動数と減衰比の推定 (P1) .....	169
図 6.1.9	固有振動数と減衰比の推定 (P2) .....	170
図 6.1.10	固有振動数と減衰比の推定 (P3) .....	171
図 6.1.11	固有振動数と減衰比の推定 (P4) .....	172
図 6.1.12	固有振動数と減衰比の推定 (P5) .....	173
図 6.1.13	固有振動数と減衰比の推定 (P6) .....	174
図 6.1.14	固有振動数と減衰比の推定 (P7) .....	175
図 6.1.15	固有振動数と減衰比の推定 (P8) .....	176
図 6.1.16	固有振動数と減衰比の推定 (P9) .....	177
図 6.1.17	固有振動数と減衰比の推定 (P10) .....	178
図 6.1.18	固有振動数と減衰比の推定 (Q1) .....	179
図 6.1.19	固有振動数と減衰比の推定 (Q2) .....	180
図 6.1.20	固有振動数と減衰比の推定 (Q3) .....	181
図 6.1.21	固有振動数と減衰比の推定 (Q4) .....	182
図 6.1.22	固有振動数と減衰比の推定 (Q5) .....	183
図 6.1.23	入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移 (定常ランダム波漸增加振試験) .....	184

図 6.1.24	入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移 (地震波漸増加振試験) .....	185
図 6.1.25	入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移 (地震波限界加振試験) .....	186
図 6.1.26	応答低減の様子 (定常ランダム波漸増加振試験) .....	187
図 6.2.1	荷重-変位関係 (定常ランダム波漸増加振試験、1/2) .....	188
図 6.2.2	荷重-変位関係 (定常ランダム波漸増加振試験、2/2) .....	189
図 6.2.3	荷重-変位関係 (地震波漸増加振試験、1/3) .....	190
図 6.2.4	荷重-変位関係 (地震波漸増加振試験、2/3) .....	191
図 6.2.5	荷重-変位関係 (地震波漸増加振試験、3/3) .....	192
図 6.2.6	荷重-変位関係 (地震波限界加振試験、1/2) .....	193
図 6.2.7	荷重-変位関係 (地震波限界加振試験、2/2) .....	194
図 6.2.8	各試験における荷重-変位線図 .....	195
図 6.3.1	変位-ひずみ関係 (定常ランダム波漸増加振試験) .....	196
図 6.3.2	変位-ひずみ関係 (地震波漸増加振試験) .....	196
図 6.3.3	変位-ひずみ関係 (地震波限界加振試験) .....	197
図 6.3.4	CASE1 によるひずみ推定値の時刻歴 (定常ランダム波漸増加振試験) .....	198
図 6.3.5	CASE1 によるひずみ推定値の時刻歴 (地震波漸増加振試験) .....	199
図 6.3.6	CASE1 によるひずみ推定値の時刻歴 (地震波限界加振試験) .....	200
図 6.3.7	変位範囲-ひずみ範囲関係 (定常ランダム波漸増加振試験) .....	201
図 6.3.8	変位範囲-ひずみ範囲関係 (地震波漸増加振試験) .....	201
図 6.3.9	変位範囲-ひずみ範囲関係 (地震波限界加振試験) .....	202
図 6.4.1	CASE1 の疲労損傷評価結果 .....	203
図 6.4.2	CASE2 の疲労損傷評価結果 .....	203

### 写真リスト

写真 2.1.1	構造物耐震強度試験装置の全景	42
写真 2.2.3.1	試験体据え付け時の状態	43
写真 3.6.1	き裂発生部付近の様子（定常ランダム波漸増加振試験）	76
写真 3.6.2	き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面内側）	77
写真 3.6.3	き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面外側）	78
写真 3.6.4	破面のSEM観察結果（1/2）	79
写真 3.6.5	破面のSEM観察結果（2/2）	80
写真 4.6.1	き裂発生部付近の様子（地震波漸増加振試験）	122
写真 4.6.2	き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面内側）	123
写真 4.6.3	き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面外側）	124
写真 4.6.4	破面のSEM観察結果（1/2）	125
写真 4.6.5	破面のSEM観察結果（2/2）	126
写真 5.6.1	き裂発生部付近の様子（地震波限界加振試験）	152

### 付録表リスト

付録表 1.1	各ケースにおける固有値解析結果	207
付録表 2.1	加速度計の型式・仕様	208
付録表 2.2.1	レーザー変位計の型式・仕様 (1/3)	209
付録表 2.2.2	レーザー変位計の型式・仕様 (2/3)	210
付録表 2.2.3	レーザー変位計の型式・仕様 (3/3)	211
付録表 2.3.1	ひずみゲージの型式・仕様 (1/3)	212
付録表 2.3.2	ひずみゲージの型式・仕様 (2/3)	213
付録表 2.3.3	ひずみゲージの型式・仕様 (3/3)	214
付録表 2.4	配管形状計測装置の型式・仕様	215
付録表 2.5	超音波板厚計の型式・仕様	216

### 付録図リスト

付録図 1.1	固有値解析の解析モデル	217
付録図 1.2	各ケースにおける固有ベクトル	218

## 1. 緒 言

現行の原子力プラント配管系における耐震設計の考え方は、系の剛性を高めることで地震力に対抗するものである。耐震性を確保するため配管系自体に十分な剛性を持たせようすると、配管の肉厚は必要以上に厚くなり、熱応力を顕在化させる可能性がある。このため、配管支持装置を用いて配管系を支持する方法が採用されてきた。しかし、これらは建設プラントにおけるコスト増加の一因となっており、配管系の耐震設計法の合理化が望まれている。

一方、現行の耐震設計基準の材料特性は弾完全塑性を仮定し、基本的には塑性変形を許さないものである。しかしながら、一般の材料は降伏点を超えて急速に破損する危険性は少ないとから、配管としての機能を損失しない程度の塑性変形を許容すれば、合理的な設計手法を開発することが可能である。

近年、軽水炉では、動的試験を基に新しい耐震設計法、すなわち配管としての機能を損失しない程度の塑性変形を許容する耐震設計法を定める動きにある。これは現行の耐震設計基準が過度に保守的であるという認識の基に、アメリカ（N R C、E P R I、G E等）が中心となり動的強度実証試験を実施し、許容応力値を 3 Sm から 4.5 Sm に引き上げる改定を行った。これによると、軽水炉配管は口径／肉厚比が比較的小さい厚肉構造となっており、さらに、内圧に対抗するフープの応力が作用しているため、破損モードは従来考えられていた座屈・崩壊よりはむしろラチエット疲労であり、ラチエット疲労を防止するという考え方の基に実現したものである。日本でもこのような試みが行われており、原子力発電技術機構（N U P E C）が中心となり配管系終局強度実証試験を行っている。しかしながら、これらは厚肉の軽水炉配管を想定したものであり、薄肉の高速炉配管では適応範囲外となっている。

薄肉の高速炉配管では、フランスのC E A等が耐震試験及び解析を実施している。これによると、薄肉の直管要素の一端を、剛配管を介して加振機に据え付け、他端に錘を配置して加振試験を実施した。直管要素に初期クラックありとなしの場合で加振試験を実施し、初期クラックなしのケースでは、試験結果と解析結果がよく一致することが確認された。その際、疲労による最終破損前に、座屈・崩壊で生じるバルジ変形が確認されている。つまり、薄肉の高速炉配管では、厚肉配管に見られたラチエット疲労だけでなく、座屈・崩壊も重要な破損モードとなり得ることを示している。

このような背景から、本試験では、高速炉配管の口径／肉厚比を考慮した薄肉配管系に対して、破損に至るような大きな模擬地震波による動的負荷を与えた場合について、破損メカニズムや限界強度の解明、並びに安全裕度の確認及び耐震設計法合理化に向けた実験的検討を行うことを目的とする。

地震時の配管系全体の健全性を評価するためには、配管系が直管、エルボ等の要素の組合せで構成されることに着目して、まず、要素単体の挙動を把握し、次に、単純に要素を組合せた配管系について、これら要素間の相互作用による全体挙動を把握することが必要となる。

本試験報告書は、高速炉配管系を構成する主要な要素のひとつである直管について動的加振試験を行い、試験データを取得するとともに、試験データの分析・評価を行い、直管要素の振動特性、弾塑性挙動、限界強度に着目して、試験データの実験的検討を実施したものである。

## 2. 試験方法

### 2.1. 試験装置

試験装置には、核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター メカトロニクス応用研究棟の構造物耐震強度試験装置を用いた。構造物耐震強度試験装置の全景を写真 2.1.1 に示す。本加振装置は、3 台の独立した油圧加振機から構成され、設置エリア  $12m \times 12m$  内で自由に配置でき、加振機で地震波等を発生させて配管系等の試験体に対し加振試験を実施することが可能である。なお、加振時の大きな振動を絶縁するため、基礎に空気ばねを用いた浮き基礎方式を採用している。

図 2.1.1 に加振機の形状及び概略仕様を、図 2.1.2 に性能特性を示す。加振機は、3ton 積載時で最大加速度  $10 G$ 、最大速度  $2m/s$  (ランダム波)、加振周波数  $0.1\sim50Hz$  という性能を有する高応答・高加速度型であり、試験体に錘等の慣性質量を取り付けた状態で、模擬地震波等を加振することにより、慣性質量に発生する慣性力を試験体に負荷し、試験体を破損させることを目的として設計したものである。本試験では、この内の油圧加振機 1 台を用いて、慣性力で試験体を最終的に破損に至らせた。

### 2.2. 供試体

#### 2.2.1. 試験体

試験体の基本形状は、高速炉実機配管の  $D/t$  (直径／板厚比) を参考に、 $D/t = 60$  を条件として選定した。 $D/t$  を実機と等しくすることにより、相似側に基づき、応力が実機と等しい応力等価モデルとなる。さらに、口径は加振機の性能を勘案して 6B とし、6B/Sch5 ( $\phi 165.2mm \times 2.8mm$ ,  $D/t = 59$ ) の直管素材を使用した。図 2.2.1.1 に試験体の寸法を示す。試験体は、直管部の両端にフランジを取り付けた構造となっており、直管部の長さは、転倒モーメントの影響が無視できる 5D 程度を目安として  $818mm$  とした。

試験体の製作には、加振試験時の変形過程を的確に捉えるため、高応力が発生する固定端側については疲労破損を避けるように配慮した。素材より未加工の直管部に、フランジ部より削りだした管台を電子ビーム溶接 (EBW) により接合し、さらに手作業での研削により余盛を取り除いた。自由端側のフランジ接合部は差し込み TIG 溶接を採用し、構造不連続部の応力集中を避けるため機械加工により滑らかに仕上げた。本試験では、以上の様にして製作された試験体を 3 体使用した。これらの試験体について、試験体の強度、

寸法精度、溶接部欠陥の有無を確認するため、外観検査、寸法検査、溶接部検査を実施し、問題ないことを確認した。

各種の計測に用いる直管部の基準位置は、図 2.2.1.1 の固定端側 R 止端部（フランジ端より 4mm）に設定し、試験体の初期形状及び初期板厚を計測した。後述の配管形状計測装置を用いて、試験体 3 体（S5、S6、S8）の初期形状を計測した結果を図 2.2.1.2 に示す。形状計測は軸方向 1mm ピッチの断面において周方向 5° ピッチで計測を行い、図中には代表として軸方向 10~60 mm において 10mm ピッチで示した。この結果、設計寸法となる基準円（φ 165.2 mm）からの形状誤差は±1mm 以内であることを確認した。

また、後述の超音波板厚計を用いて、試験体の初期板厚分布を計測した結果を図 2.2.1.3 に示す。板厚計測は軸方向 5 mm ピッチの断面において周方向 5° ピッチで計測を行い、図中には代表として軸方向 25~50 mm において 5° ピッチで示した。設計寸法となる板厚 2.8 mm に対して、板厚誤差は±0.2mm 以内であることを確認した。

## 2.2.2. 材料

試験体の材料には、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いた。直管素材のミルシートを表 2.2.2.1 に示す。試験材料が JIS 規格を満足することを確認するとともに、評価用の基礎データを取得することを目的として、室温における材料試験を実施した。試験項目は引張試験及び疲労試験であり、試験体は配管素材から採取したミニチュア試験片（φ 2mm）を用いた。

引張試験は JIS Z2241（金属材料引張試験方法）に準拠して行った。SUS304 の室温における引張試験結果を表 2.2.2.2、単調応力ひずみ関係を図 2.2.2.1 に示す。全ての JIS 規格値を満足していることがわかる。

また、SUS304 の室温における疲労試験結果を表 2.2.2.3、疲労曲線を図 2.2.2.2、繰返し応力ひずみ関係を図 2.2.2.3 に示す。SUS304 は室温で顕著な繰り返し硬化特性を示す。図 2.2.2.2 の疲労試験結果の回帰によって得られた SUS304 の低サイクル疲労特性は以下の式となる。

$$\Delta\varepsilon_t = 12.22 \cdot N_f^{-0.371} + 1.511 \cdot N_f^{-0.233} \quad (2-1)$$

さらに、動的試験条件の参考として、本試験と同様の直管要素試験体を用いて静的座屈試験を実施した。試験の概要を図 2.2.2.4 に示す。試験体を垂直に固定し、容量 30ton の疲労試験機を用いて試験体頂部に治具及びアーム（負荷棒）を介して水平に繰り返し強制変位を与えた。また、アームには容量 5ton のロードセルを配置し、荷重を測定した。

試験結果として、負荷点における荷重一変位関係を図 2.2.2.5 に示す。この図から読み取れる座屈荷重は 19.9kN、座屈変位は 70.7mm であった。

### 2.2.3. 試験治具

試験体は水平に配置された片持ちの状態とした。図2.2.3.1に示すように、試験体の一端は十分に剛な治具（重量 2ton）を介して加振台に取り付けられた固定端とし、他端には錘を配置して自由端を実現した。写真 2.2.3.1 に試験体据え付け時の状態を示す。

錘支持装置は、自由端に十分な慣性力を発生させるための錘と、これを支持する多段積層ゴムから構成されている。錘の自重による鉛直面内曲げ応力を抑えるとともに、錘に発生する水平方向の慣性力を試験体に伝達できるよう、多段積層ゴムを用いて錘を支持する方法を採用した。図 2.2.3.2 に多段積層ゴムの概要を示す。水平方向に柔らかく、鉛直方向に剛性の高いばねを使用しており、加振方向に対してはゴムの剛性を除けば完全に自由となっている。

試験体に作用する慣性力は応答加速度×慣性質量で表されるため、錘の質量は試験体の振動特性に大きな影響を与える。錘の質量を変えた場合の加振機の制御特性を事前に調査し、加振機の最大加速度性能（10G）で試験体を破損させることができることが可能であり、かつ、試験体の固有振動数が低くなりすぎて加振機の制御特性が悪化しないように、錘の重量を 468kg（固有振動数は約 9Hz）に設定した。

さらに、多段積層ゴムが加振方向に影響を与えないことを確認するため、錘支持装置の振動特性試験を実施した。多段積層ゴムに重量 126kg の加振試験用錘を据え付けた状態でタッピング試験を行い、表 2.2.3.1 のような錘支持装置タッピング試験結果が得られた。これによると、多段積層ゴムの1次固有振動数は 126kg 積載時で約 1.7Hz であり、500kg 積載時には 1.0Hz 以下に低下する。これは、試験体の固有振動数（約 9Hz）に対して十分低く、また、実際には積層ゴムの復元力より配管の復元力の方が支配的となるので、試験体の振動特性に対し影響は少ないものと考えられる。

## 2.3. 計測方法

加振試験では、振動特性、弾塑性挙動、破損モード等を把握するため、試験体の加速度、変位、ひずみ、温度の4つの力学的データを計測し、加振毎にデータ整理を行った。表2.3.1～2.3.4に試験に使用した計測装置の一覧表を示す。さらに、各加振後に試験体の形状計測を実施した。これらの計測方法を以下に示す。

### 2.3.1. 加速度：加速度計

加速度計により試験体、錘及び変位計取付治具の加速度を計測した。加速度計の計測点位置を図2.3.1.1に示す。加速度計には共和電業（株）製の以下の2種類を使用し、計測範囲によって適当なものに使い分けた。なお、加振機の加速度は加振機に取り付けた加速度計を用いて計測した。

表2.3.1.1 加速度計の型式一覧

加速度計	計測範囲 (G)	応答周波数範囲 (Hz)
AS-10B	±10	0～300
AS-20B	±20	0～650

### 2.3.2. 変位：レーザー変位計

レーザー変位計を用いて試験体の変位を計測した。図2.3.2.1に変位計の計測点位置を示す。レーザー変位計には（株）キーエンス製の以下のようない3種類のセンサーへッド及びアンプユニットを使用した。レーザー変位計は取付治具を介して浮き基礎に固定した状態で使用し、変位計取付治具の加速度を計測することにより加振装置と絶縁されていることを確認した。

錘と加振台の相対変位は、錘の浮き基礎からの試験体変位と加振台の変位の差により算出した。なお、加振台の変位は加振装置制御系内のストローク変位を用いている。

表2.3.2.1 変位計の型式一覧

センサーへッド	アンプユニット	計測範囲 (mm)
LK-080	LK-2100	±15
LB-300	LB-1200	±100
LK-500	LK-2500	±250

### 2.3.3. ひずみ：ひずみゲージ、ひずみ計測用格子

加振中に発生するひずみはひずみゲージにより計測した。図 2.3.3.1 に定常ランダム波漸増加振試験時のひずみゲージの計測点位置を、図 2.3.3.2 に地震波漸増加振試験及び地震波限界加振試験時のひずみゲージの計測点位置を示す。これは定常ランダム波漸増加振試験時のひずみ発生分布を考慮して、ひずみゲージの計測点位置を見直したためである。ひずみゲージには東京測器研究所（株）製の YFLA、共和電業（株）製の KFEL、KFG の 3 種類の汎用箔ひずみゲージを使用した。

さらに、ひずみゲージでは計測範囲外となる大ひずみが発生した場合にひずみゲージを補完する目的で、ひずみ計測用格子を用いて残留ひずみを計測した。なお、地震波限界加振試験時には、ひずみ計測用格子の代用として 1 mm 間隔で罫書き線を入れて同様の計測を行った。これは試験体の表面に格子状の罫書きを施し、光学的にひずみを算定するものである。図 2.3.3.3 に計測用格子の概要を示す。格子のパターンは、0.5 mm 角の正方形格子を 1 mm × 5 mm の長方形領域に罫書きしたものである。まず、CCD カメラ（(株) ハイロックス製、ハイトロン、KH-2200）を用いて、250 倍の格子画像（640 × 480 ピクセル）を撮影・記録する。この画像からビデオメジャリングゲージ（FOR-A CO LTD 製、IV-560）を用い、ピクセル単位で格子間隔の目盛りを読み取り、同様に画像上で読み取ったスケール（1 mm）の目盛りとの比により格子間寸法を算出する。次に、この格子間寸法に対し、試験体の変形形状による補正を行った後、図中の式により試験体の残留ひずみを算出した。なお、1 ピクセルの読み取り誤差が生じた場合、格子間寸法は 2.5  $\mu m$  程度の誤差となることから、本計測によるひずみ計測値には ±1.0% 程度の誤差が含まれると考えられる。

図 2.3.3.4 に定常ランダム波漸増加振試験及び地震波漸増加振試験におけるひずみ計測用格子位置を、図 2.3.3.5 に地震波限界加振試験におけるひずみ計測用格子位置を示す。

### 2.3.4. 温度：熱電対

本試験では、試験体は破損に至るまでの間大きな動的負荷を受けるため、高応力部では非常に大きな塑性ひずみが発生し、局部的に温度が上昇する。このとき、温度がひずみゲージの計測値に対して影響を及ぼす恐れがあるため、熱電対を用いて加振時の試験体温度を計測した。図 2.3.4.1 に熱電対の計測点位置を示す。

### 2.3.5. 形状計測及び板厚計測

試験体が塑性変形したと思われる高加速度レベルの加振では、試験体の変形挙動を捉えるために、加振後に形状計測を実施した。さらに、試験終了後には試験体の全体形状計測を実施した。

形状計測に使用した配管形状計測装置の概要を図 2.3.5.1 に示す。配管形状計測装置は、レーザー変位計を試験体の円周方向に平行な円環状の治具に据え付け、さらに、この治具をリニアスライドベースに沿って軸方向に移動可能にしたものであり、これにより試験体周方向及び軸方向の外表面に沿った形状計測が可能である。

加振後には、試験体に取り付けた各計測装置を避けるために、周方向  $80^\circ$  及び  $260^\circ$  の 2 直線上を、軸方向に  $0\sim250mm$  の範囲について  $1mm$  ピッチで形状計測を行った。また、試験終了後には、計測装置を全て取り外した後、周方向に  $5^\circ$  ピッチ、軸方向に  $0\sim250mm$  の範囲について  $1mm$  ピッチで試験体全体の形状計測を行った。

ここで、2章の初期板厚計測に使用した超音波板厚計の概要を図 2.3.5.2 に示す。超音波板厚計をレーザー変位計と同様の円環状治具に据え付け、周方向に  $5^\circ$  ピッチ、軸方向に  $20\sim100mm$  の範囲を  $5mm$  ピッチで初期板厚計測を行った。

## 2.4. 加振方法

室温で、試験体3体(S-5, S-6, S-8)に対し、定常ランダム波及び地震波を用いて、3種類の加振試験(定常ランダム波漸増加振試験、地震波漸増加振試験、地震波限界加振試験)を実施した。これらの加振試験の条件を以下に示す。

### 2.4.1. 定常ランダム波漸増加振試験

S-6試験体に対して定常ランダム波を用いて加振試験を行った。定常ランダム波は計算機で作成した波形であり、任意の長さの時間を取りた場合、その波形のRMS値や周波数分析などの統計的特性及び振動特性が大きく変わらないという特徴を有する。

本試験で基準とした定常ランダム波の特性として、図2.4.1.1(a)に加速度時刻歴を、図2.4.1.1(b)にパワースペクトルを示す。基準ランダム波は、加振装置の制御用計算機(VAX STATION 3000)を用いて、周波数範囲:4~14Hz、RMS値:0.05G、継続時間:30secの条件で作成したものである。なお、周波数範囲は、試験体の固有振動数が変化してもある程度の応答が得られるように、試験体の弾性域における固有振動数(約9Hz)を基準に±5Hz、すなわち4~14Hzに設定した。

本試験は、加振レベルを段階的に上げていく漸増加振試験とし、試験体が弾性域から最終的に破損に至るまでの間、挙動データをほぼ等間隔で取得できるように加振レベルを調整した。これにより各加振時の加速度時刻歴は、上記の基準ランダム波に対する加振レベルの倍率により表2.4.1.1のように設定した。

表2.4.1.1 定常ランダム波漸増加振試験の試験条件

加振	加振レベル (倍率)
M1	× 1
M2	× 2
M3	× 8
M4	× 14
M5	× 22
M6	× 30
M7	× 40

#### 2.4.2. 地震波漸增加振試験

S-5 試験体に対して地震波を用いて加振試験を行った。加振試験用の地震波を作成するにあたり、過去の設計研究<sup>1) 2)</sup>において機器設計の耐震条件設定を目的として作成された地震波を参考とした。参考とした地震波は、岩盤中に深く埋め込まれた原子炉建物の地盤－建物相互作用解析によって得られた原子炉容器据付レベルでの加速度時刻歴と対応する加速度応答スペクトルである。地盤条件としては、硬質岩盤を想定し、せん断波速度  $V_s=2000m/s$  が用いられた。参考地震波の特性として、図 2.4.2.1 の(a)に加速度時刻歴を、(b)に床応答スペクトルを示す。床応答スペクトルから読み取れる卓越振動数はおよそ 6Hz の辺りにある。

本試験では、試験体の固有振動数及び加振装置の性能を考慮して、スペクトルの卓越振動数が約 8Hz、継続時間が 30sec、RMS 値 : 0.05G 程度となるように調整したものを入力用地震波として設定した。加振試験に用いた地震波の特性を図 2.4.2.2 の(a)及び(b)に示す。

本試験は、加振レベルを段階的に上げていく漸增加振試験とし、加振時の加速度時刻歴は上記の入力用地震波に対する加振レベルの倍率により表 2.4.2.1 のように設定した。なお、22 倍の地震波による加振試験を実施した後には、試験体の固有振動数の変化を調べるために弾性域となる 1 倍の地震波による加振試験を行った。

表 2.4.2.1 地震波漸增加振試験の試験条件

加振	加振レベル (倍率)
P1	× 1
P2	× 1
P3	× 2
P4	× 10
P5	× 18
P6	× 22
P7	× 1
P8	× 22
P9	× 1
P10	× 22

### 2.4.3. 地震波限界加振試験

S-8 試験体に対して再び地震波を用いて加振試験を実施した。本試験では、上記の地震波漸増加振試験の結果を参考に、1回の加振試験で試験体が限界強度付近まで到達するような高加振レベルの加振試験を目標とした。したがって、地震波漸増加振試験における 22 倍の地震波を用いて、試験体が破損に至るまで繰り返した。加振後に試験体の固有振動数の変化を調べるために弾性域となる 1 倍の地震波による加振試験を行い、各加振時の加速度時刻歴は加振レベルの倍率により表 2.4.3.1 のように設定した。

表 2.4.3.1 地震波限界加振試験の試験条件

加振	加振レベル (倍率)
Q1	× 1
Q2	× 1
Q3	× 22
Q4	× 1
Q5	× 22

表 2.2.2.1 直管素材のミルシート

Order No. 94-2442  
 客様名 NAKII STAINLESS CO., LTD.  
 製品名 JTIS G 3459-98 SUS304TP-S-C  
 規格名



STAINLESS KUZE CO., LTD.  
 HAKUI WORKS.

## INSPECTION CERTIFICATE

年月日 1994. 9. 30  
 注文番号 TP94-377  
 (Order No.)  
 P.O. No. 61 Shimbō-chō, Hakui-shi,  
 Ishikawa-ken, 925/Japan

(2) 鋼番 (Heat No.)	寸法 (Size) mm, in, ft	数量 (Quantity) pc, m, ft	質量 (Mass) kg	引張試験 (Tension Test)			硬度 HRB	水圧試験 Hydrostatic Test MPa kgf/cm <sup>2</sup>	化成分 (Chemical Composition) %								
				引張力 N/mm <sup>2</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	伸び (E.L.) %			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr		
E38385	Work No. 94F112-1 165.2 × 2.8 × L	57.3		226	596	63	-	1.5	4	44	109	25	5	838	1829		
	Work No. x x																
E37604	Work No. 94F112-2 165.2 × 2.8 × L	35.1		256	602	59	-	1.5	2	45	109	28	5	824	1830		
	Work No. x x																
	Work No. x x		Total 1045.0														
			Spec.	Min 205	Min 520	Min 28											
寸法・表面 (Dimensions & Surface)	水圧試験 (Hydrostatic Test)	ヘン平試験 (Flattening Test)	押抜試験 (Flaring Test)	導波探傷試験 (Eddy Current Test)	Remarks Heat treatment : min 1040°C Rapid Cooling												
GOOD	GOOD	GOOD	-	-													
Surveyor To																	

We herewith certify the material herein has been manufactured and examined in accordance with the requirements specified in this order and the results are acceptable.

The material is in the solution heat-treated condition.

NOTE (1)-F=Full Section, S=Strip Section

NOTE (2), (3)-Heat Number and Chemical Composition are posted from Mill Maker's Certificate.

Manager of QA Section

表 2.2.2.2 引張試験結果

試験片 No	温度		0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び $\delta$ (%)	絞り $\phi$ (%)	ヤング率 E (N/mm <sup>2</sup> )	破断位置
		JIS 規格値	206 以上	520 以上	30 以上	—	—	
SS-1	RT		248	646	82.0	88.3	199000	A
SS-2			257	646	86.0	90.2	201000	A

表 2.2.2.3 疲労試験結果

試験片 No	温度	ひずみ速度 (%/sec)	ひずみ範囲 (%)			応力 (N/mm <sup>2</sup> )			破損繰返数 Nf (Cycles)	破断位置
			$\Delta \epsilon_t$	$\Delta \epsilon_{in}$	$\Delta \epsilon_e$	$\Delta \sigma$	$\Sigma_{max}$	$\sigma_{min}$		
S4P-1			1.998	1.574	0.424	894	454	-440	275	A
S4P-2			1.500	1.158	0.342	829	422	-407	555	A
S4P-3			0.994	0.744	0.250	675	342	-332	1590	C
S4P-4			0.794	0.566	0.228	621	309	-311	4050	BC
S4P-5			0.598	0.418	0.180	541	278	-264	9450	A

表 2.2.3.1 錘支持装置のタッピング試験結果

打撃点	打撃方向 (手加振方向)	最大振幅 (mm)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	振動モード
手で加振後 自由振動	水平方向	23	1.7	2.8	水平
辺の中央	水平方向	0.6	1.7	1.3	水平
手でねじり 自由振動	水平面内 回転	片側 29	2.0	2.8	ねじり
		片側 24	2.0	2.8	ねじり
辺の端	水平面内 回転	片側 2.6	2.1	2.7	ねじり
		片側 1.4	2.1	2.5	ねじり
上面中央	鉛直方向	0.07	32.0	2.0	鉛直

表2.3.1 計測装置の一覧表(定常ランダム波漸増加振試験、1/2)

Ch	計測器名	No.	型式	方向	位 置		
					周方向(°)	軸方向(mm)	内・外
1	ひずみゲージ	1A	KFEL-2-120-C1	軸	0	5	外面
2	ひずみゲージ	2A	KFEL-2-120-C1	軸	0	55	外面
3	ひずみゲージ	3A	KFEL-2-120-C1	周	0	55	外面
4	ひずみゲージ	4A	KFEL-2-120-C1	軸	45	5	外面
5	ひずみゲージ	5A	KFEL-2-120-C1	軸	45	55	外面
6	ひずみゲージ	6A	KFEL-2-120-C1	周	45	55	外面
7	ひずみゲージ	7A	KFEL-2-120-C1	軸	90	5	外面
8	ひずみゲージ	8A	KFEL-2-120-C1	軸	90	15	外面
9	ひずみゲージ	9A	KFEL-2-120-C1	軸	90	25	外面
10	ひずみゲージ	10A	KFEL-2-120-C1	軸	90	35	外面
11	ひずみゲージ	11A	KFEL-2-120-C1	軸	90	45	外面
12	ひずみゲージ	12A	KFEL-2-120-C1	軸	90	55	外面
13	ひずみゲージ	13A	KFEL-2-120-C1	軸	90	65	外面
14	ひずみゲージ	14A	KFEL-2-120-C1	軸	90	75	外面
15	ひずみゲージ	15A	KFEL-2-120-C1	軸	90	105	外面
16	ひずみゲージ	16A	KFEL-2-120-C1	周	90	15	外面
17	ひずみゲージ	17A	KFEL-2-120-C1	周	90	25	外面
18	ひずみゲージ	18A	KFEL-2-120-C1	周	90	35	外面
19	ひずみゲージ	19A	KFEL-2-120-C1	周	90	45	外面
20	ひずみゲージ	20A	KFEL-2-120-C1	周	90	55	外面
21	ひずみゲージ	21A	KFEL-2-120-C1	周	90	65	外面
22	ひずみゲージ	22A	KFEL-2-120-C1	周	90	75	外面
23	ひずみゲージ	23A	KFEL-2-120-C1	周	90	105	外面
24	ひずみゲージ	24A	KFEL-2-120-C1	軸	135	5	外面
25	ひずみゲージ	25A	KFEL-2-120-C1	軸	135	55	外面
26	ひずみゲージ	26A	KFEL-2-120-C1	周	135	55	外面
27	ひずみゲージ	27B	YFLA-2	軸	180	5	外面
28	ひずみゲージ	28B	YFLA-2	軸	180	55	外面
29	ひずみゲージ	29B	YFLA-2	周	180	55	外面
30	ひずみゲージ	30B	YFLA-2	軸	225	5	外面
31	ひずみゲージ	31B	YFLA-2	軸	225	55	外面
32	ひずみゲージ	32B	YFLA-2	周	225	55	外面
33	ひずみゲージ	33B	YFLA-2	軸	270	5	外面
34	ひずみゲージ	34B	YFLA-2	軸	270	15	外面
35	ひずみゲージ	35B	YFLA-2	軸	270	25	外面
36	ひずみゲージ	36B	YFLA-2	軸	270	35	外面
37	ひずみゲージ	37B	YFLA-2	軸	270	45	外面
38	ひずみゲージ	38B	YFLA-2	軸	270	55	外面
39	ひずみゲージ	39B	YFLA-2	軸	270	65	外面
40	ひずみゲージ	40B	YFLA-2	軸	270	75	外面
41	ひずみゲージ	41B	YFLA-2	軸	270	105	外面
42	ひずみゲージ	42B	YFLA-2	周	270	15	外面
43	ひずみゲージ	43B	YFLA-2	周	270	25	外面
44	ひずみゲージ	44B	YFLA-2	周	270	35	外面
45	ひずみゲージ	45B	YFLA-2	周	270	45	外面
46	ひずみゲージ	46B	YFLA-2	周	270	55	外面
47	ひずみゲージ	47B	YFLA-2	周	270	65	外面
48	ひずみゲージ	48B	YFLA-2	周	270	75	外面
49	ひずみゲージ	49B	YFLA-2	周	270	105	外面
50	ひずみゲージ	50B	YFLA-2	軸	315	5	外面
51	ひずみゲージ	51B	YFLA-2	軸	315	55	外面
52	ひずみゲージ	52B	YFLA-2	周	315	55	外面
53	ひずみゲージ	53A	KFEL-2-120-C1	軸	90	35	内面
54	ひずみゲージ	54A	KFEL-2-120-C1	軸	90	55	内面
55	ひずみゲージ	55B	YFLA-2	軸	270	35	内面
56	ひずみゲージ	56B	YFLA-2	軸	270	55	内面
57	加速度計	57xA	AS-10B	x	加振台上面		
58	加速度計	58xA	AS-10B	x	試験体フランジ部(加振機側)		
59	加速度計	59xA	AS-10B	z	試験体フランジ部(加振機側)		
60	加速度計	60xA	AS-10B	x	試験体側面(加振機側フランジ端から246mm)		
61	加速度計	61xA	AS-10B	z	試験体側面(加振機側フランジ端から246mm)		
62	加速度計	62xA	AS-10B	x	試験体側面(加振機側フランジ端から446mm)		
63	加速度計	63xA	AS-10B	z	試験体側面(加振機側フランジ端から446mm)		
64	加速度計	64xA	AS-10B	x	試験体側面(加振機側フランジ端から846mm)		
65	加速度計	65xA	AS-10B	z	試験体側面(加振機側フランジ端から846mm)		
66	加速度計	66xA	AS-10B	x	試験体フランジ部(錐側)		
67	加速度計	67xA	AS-10B	z	試験体フランジ部(錐側)		
68	加速度計	68xA	AS-10B	z	錐側面の角(-X-Y側)		
69	加速度計	69yA	AS-10B	y	錐側面中心(-X側)		
70	加速度計	70zA	AS-10B	z	錐側面の角(-X+Y側)		
71	加速度計	71xB	AS-20HB	x	錐側面中心(+Y側)		

表2.3.2 計測装置の一覧表(定常ランダム波漸増加振試験、2/2)

Ch	計測器名	No.	型式	方向	位 置		
					周方向(°)	軸方向(mm)	内・外
76	加速度計	76xA	AS-10B	x	レーザー変位計83xB取付治具		
77	加速度計	77xA	AS-10B	x	レーザー変位計84xD取付治具		
78	加速度計	78xA	AS-10B	x	レーザー変位計85xC取付部		
79	加速度計	79yA	AS-10B	y	レーザー変位計86yD取付治具		
80	予備						
81	テーブル加速度計	81xC	2262A-25	x	加振機用		
82	テーブル変位計	82xA	LVDT	x	加振機用		
83	レーザー変位計	83xB	センサー・ヘッド LB-300	x	試験体側面(加振機側フランジ端から310mm)		
84	レーザー変位計	84xB	センサー・ヘッド LB-300	x	試験体側面(加振機側フランジ端から560mm)		
85	レーザー変位計	85xC	センサー・ヘッド LK-500	x	縦側面中心(-X側より)		
86	レーザー変位計	86yD	センサー・ヘッド LK-080	y	縦側面中心(-Y側より)		
87	予備						
88	予備						
89	予備						
90	予備						
91	予備						
92	予備						
93	熱電対	93			90	30	外面
94	熱電対	94			90	50	外面
95	熱電対	95			270	30	外面
96	熱電対	96			270	50	外面

表2.3.3 計測装置の一覧表(地震波漸増加振試験及び地震波限界加振試験、1/2)

Ch	計測器名	No.	型式	方向	位置		
					周方向(°)	軸方向(mm)	内・外
1	ひずみゲージ	1A	YFLA-2	軸	0	30	外面
2	ひずみゲージ	2A	YFLA-2	周	0	30	外面
3	ひずみゲージ	3A	YFLA-2	軸	45	30	外面
4	ひずみゲージ	4A	YFLA-2	周	45	30	外面
5	ひずみゲージ	5B	KFG-1N-120-C1-16L5M3R	軸	90	1	外面
6	ひずみゲージ	6A	YFLA-2	軸	90	5	外面
7	ひずみゲージ	7A	YFLA-2	軸	90	10	外面
8	ひずみゲージ	8A	YFLA-2	軸	90	20	外面
9	ひずみゲージ	9A	YFLA-2	軸	90	30	外面
10	ひずみゲージ	10A	YFLA-2	軸	90	40	外面
11	ひずみゲージ	11A	YFLA-2	軸	90	50	外面
12	ひずみゲージ	12A	YFLA-2	軸	90	60	外面
13	ひずみゲージ	13A	YFLA-2	周	90	10	外面
14	ひずみゲージ	14A	YFLA-2	周	90	20	外面
15	ひずみゲージ	15A	YFLA-2	周	90	30	外面
16	ひずみゲージ	16A	YFLA-2	周	90	40	外面
17	ひずみゲージ	17A	YFLA-2	周	90	50	外面
18	ひずみゲージ	18A	YFLA-2	軸	135	30	外面
19	ひずみゲージ	19A	YFLA-2	周	135	30	外面
20	ひずみゲージ	20A	YFLA-2	軸	180	30	外面
21	ひずみゲージ	21A	YFLA-2	周	180	30	外面
22	ひずみゲージ	22A	YFLA-2	軸	225	30	外面
23	ひずみゲージ	23A	YFLA-2	周	225	30	外面
24	ひずみゲージ	24B	KFG-1N-120-C1-16L5M3R	軸	270	1	外面
25	ひずみゲージ	25A	YFLA-2	軸	270	5	外面
26	ひずみゲージ	26A	YFLA-2	軸	270	10	外面
27	ひずみゲージ	27A	YFLA-2	軸	270	20	外面
28	ひずみゲージ	28A	YFLA-2	軸	270	30	外面
29	ひずみゲージ	29A	YFLA-2	軸	270	40	外面
30	ひずみゲージ	30A	YFLA-2	軸	270	50	外面
31	ひずみゲージ	31A	YFLA-2	軸	270	60	外面
32	ひずみゲージ	32A	YFLA-2	周	270	10	外面
33	ひずみゲージ	33A	YFLA-2	周	270	20	外面
34	ひずみゲージ	34A	YFLA-2	周	270	30	外面
35	ひずみゲージ	35A	YFLA-2	周	270	40	外面
36	ひずみゲージ	36A	YFLA-2	周	270	50	外面
37	ひずみゲージ	37A	YFLA-2	軸	315	30	外面
38	ひずみゲージ	38A	YFLA-2	周	315	30	外面
39	ひずみゲージ	39A	YFLA-2	周	45	30	内面
40	ひずみゲージ	40A	YFLA-2	軸	90	5	内面
41	ひずみゲージ	41A	YFLA-2	軸	90	10	内面
42	ひずみゲージ	42A	YFLA-2	軸	90	20	内面
43	ひずみゲージ	43A	YFLA-2	軸	90	30	内面
44	ひずみゲージ	44A	YFLA-2	軸	90	40	内面
45	ひずみゲージ	45A	YFLA-2	軸	90	50	内面
46	ひずみゲージ	46A	YFLA-2	周	90	30	内面
47	ひずみゲージ	47A	YFLA-2	周	135	30	内面
48	ひずみゲージ	48A	YFLA-2	周	225	30	内面
49	ひずみゲージ	49A	YFLA-2	軸	270	5	内面
50	ひずみゲージ	50A	YFLA-2	軸	270	10	内面
51	ひずみゲージ	51A	YFLA-2	軸	270	20	内面
52	ひずみゲージ	52A	YFLA-2	軸	270	30	内面
53	ひずみゲージ	53A	YFLA-2	軸	270	40	内面
54	ひずみゲージ	54A	YFLA-2	軸	270	50	内面
55	ひずみゲージ	55A	YFLA-2	周	270	30	内面
56	ひずみゲージ	56A	YFLA-2	周	315	30	内面
57	加速度計	57xA	AS-10B	x	加振台上部		
58	加速度計	58xA	AS-10B	x	試験体フランジ部(加振機側)		
59	加速度計	59xA	AS-10B	z	試験体フランジ部(加振機側)		
60	加速度計	60xA	AS-10B	x	試験体側面(加振機側フランジ端から246mm)		
61	加速度計	61xA	AS-10B	z	試験体側面(加振機側フランジ端から246mm)		
62	加速度計	62xA	AS-10B	x	試験体側面(加振機側フランジ端から446mm)		
63	加速度計	63xA	AS-10B	z	試験体側面(加振機側フランジ端から446mm)		
64	加速度計	64xA	AS-10B	x	試験体側面(加振機側フランジ端から646mm)		
65	加速度計	65xA	AS-10B	z	試験体側面(加振機側フランジ端から646mm)		
66	加速度計	66xA	AS-10B	x	試験体フランジ部(錐側)		
67	加速度計	67xA	AS-10B	z	試験体フランジ部(錐側)		
68	加速度計	68xA	AS-10B	z	錐側面の角(-X-Y側)		
69	加速度計	69yA	AS-10B	y	錐側面中心(-X側)		
70	加速度計	70zA	AS-10B	z	錐側面の角(-X+Y側)		
71	加速度計	71xB	AS-20HB	x	錐側面中心(+Y側)		

表2.3.4 計測装置の一覧表(地震波漸増加振試験及び地震波限界加振試験、2/2)

Ch	計測器名	No.	型式	方向	位 置		
					周方向(°)	軸方向(mm)	内・外
76	加速度計	76xA	AS-10B	x	レーザー変位計83xB取付治具		
77	加速度計	77xA	AS-10B	x	レーザー変位計84xB取付治具		
78	加速度計	78xA	AS-10B	x	レーザー変位計85xC取付部		
79	加速度計	79yA	AS-10B	y	レーザー変位計85yD取付治具		
80	予備						
81	テーブル加速度計	81xC	2262A-25	x	加振機用		
82	テーブル変位計	82xA	LVDT	x	加振機用		
83	レーザー変位計	83xB	センサー・ヘッド LB-300	x	試験体側面(加振機側フランジ部から310mm)		
84	レーザー変位計	84xB	センサー・ヘッド LB-300	x	試験体側面(加振機側フランジ部から560mm)		
85	レーザー変位計	85xC	センサー・ヘッド LK-500	x	鏡側面中心(-X側より)		
86	レーザー変位計	86yD	センサー・ヘッド LK-080	y	鏡側面中心(-Y側より)		
87	予備						
88	予備						
89	予備						
90	予備						
91	予備						
92	予備						
93	熱電対	93			90	30	外面
94	熱電対	94			90	50	外面
95	熱電対	95			270	30	外面
96	熱電対	96			270	50	外面

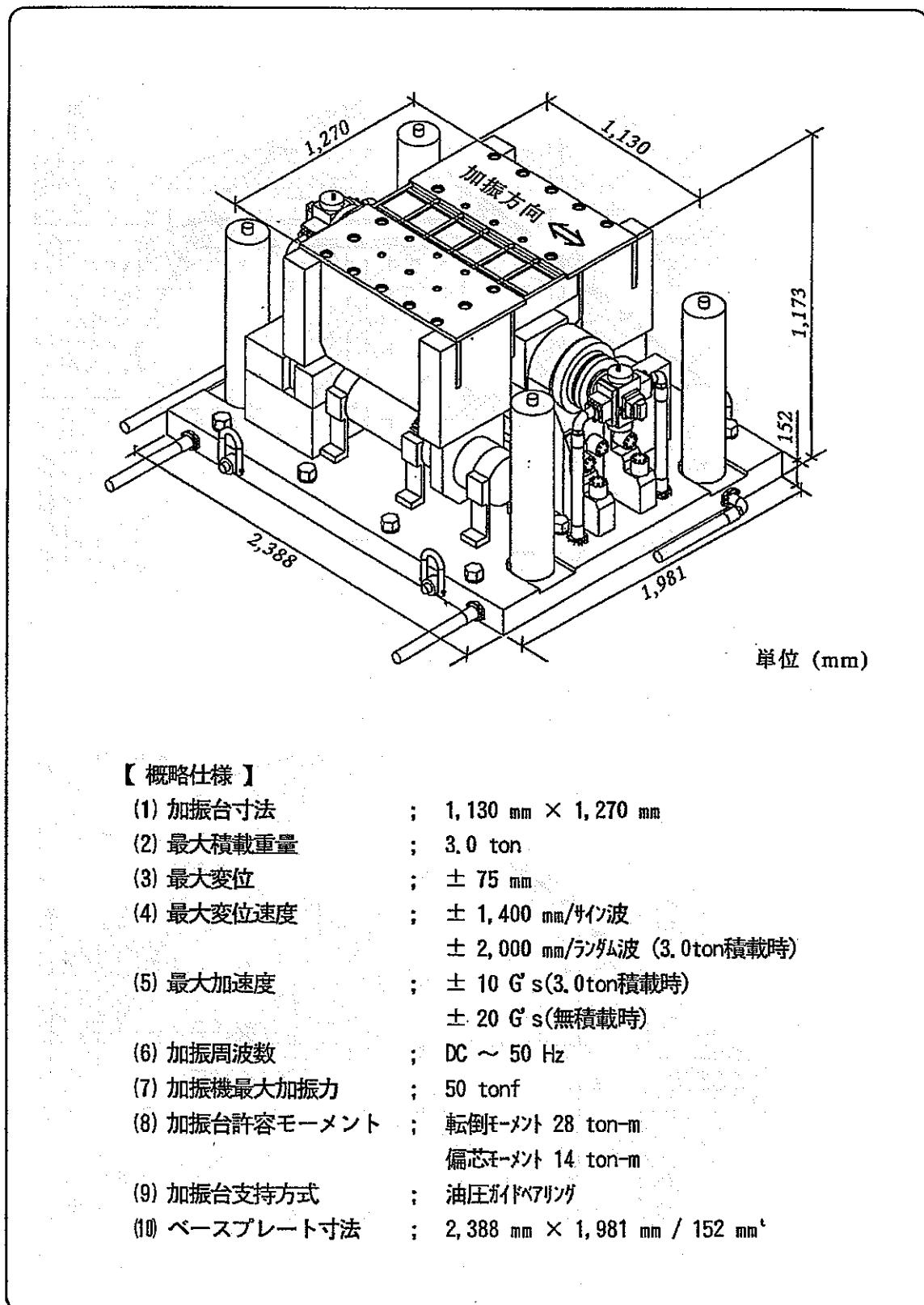


図 2.1.1 加振機の形状及び概略仕様

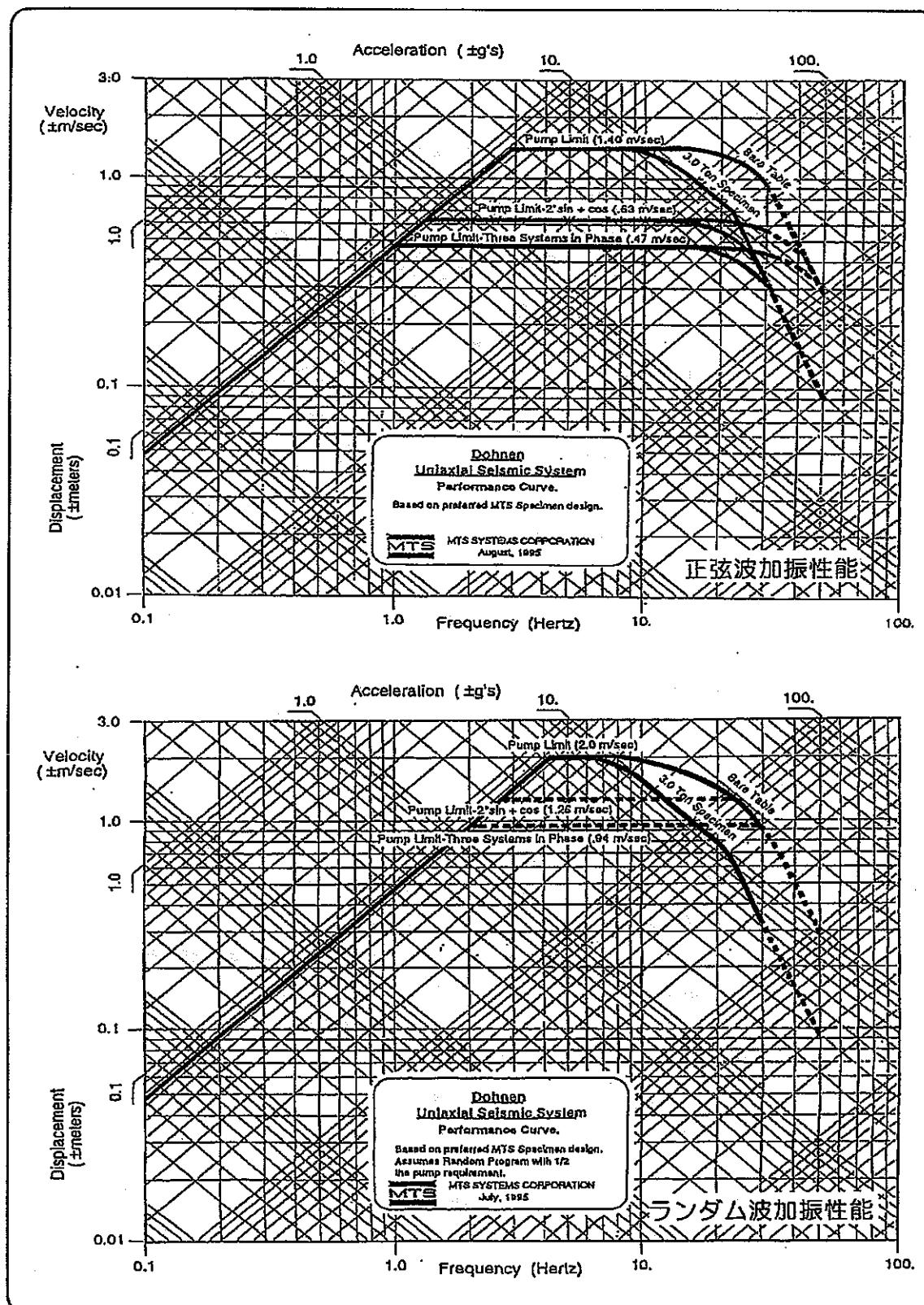


図 2.1.2 加振機の性能特性

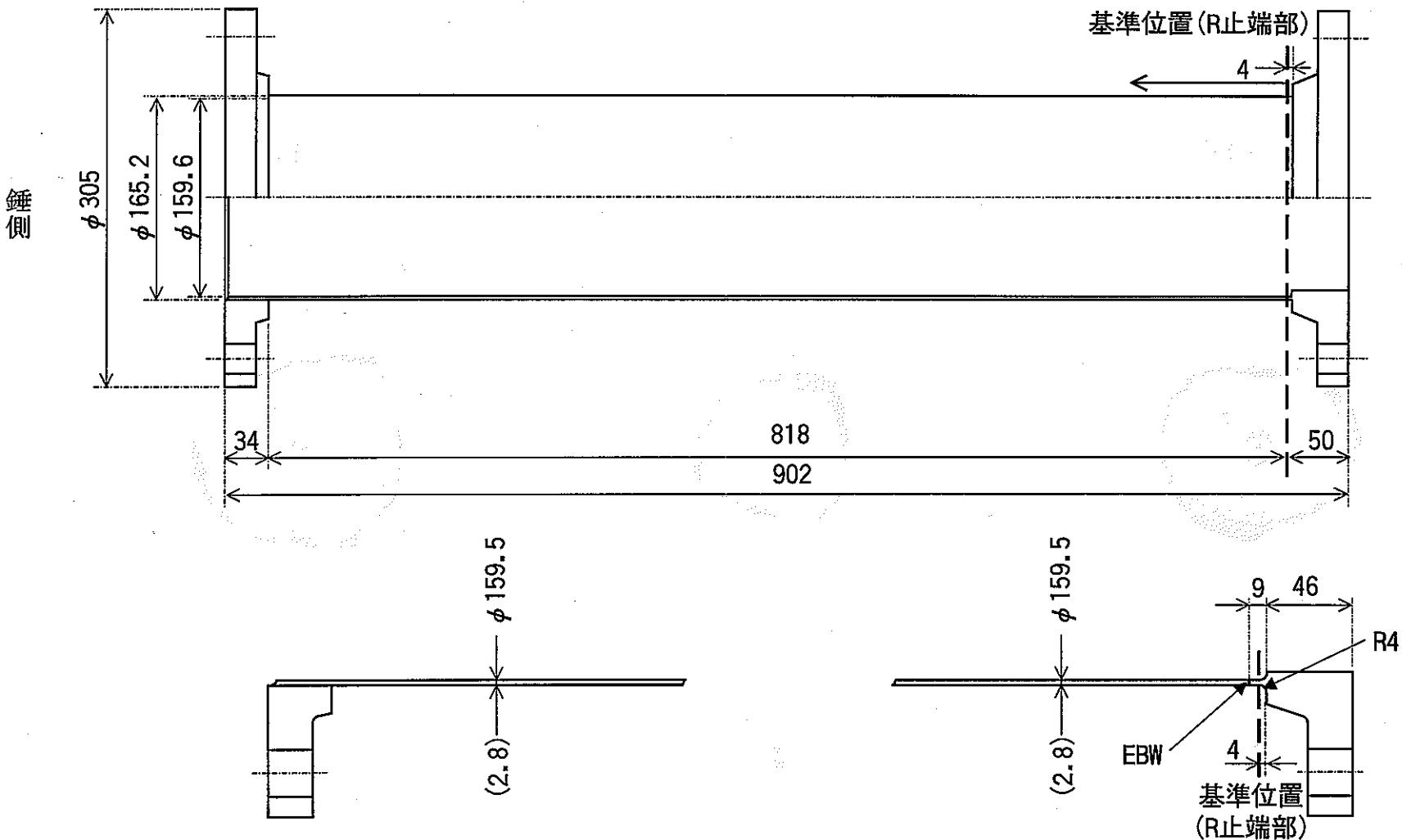


図 2.2.1.1 試験体の寸法

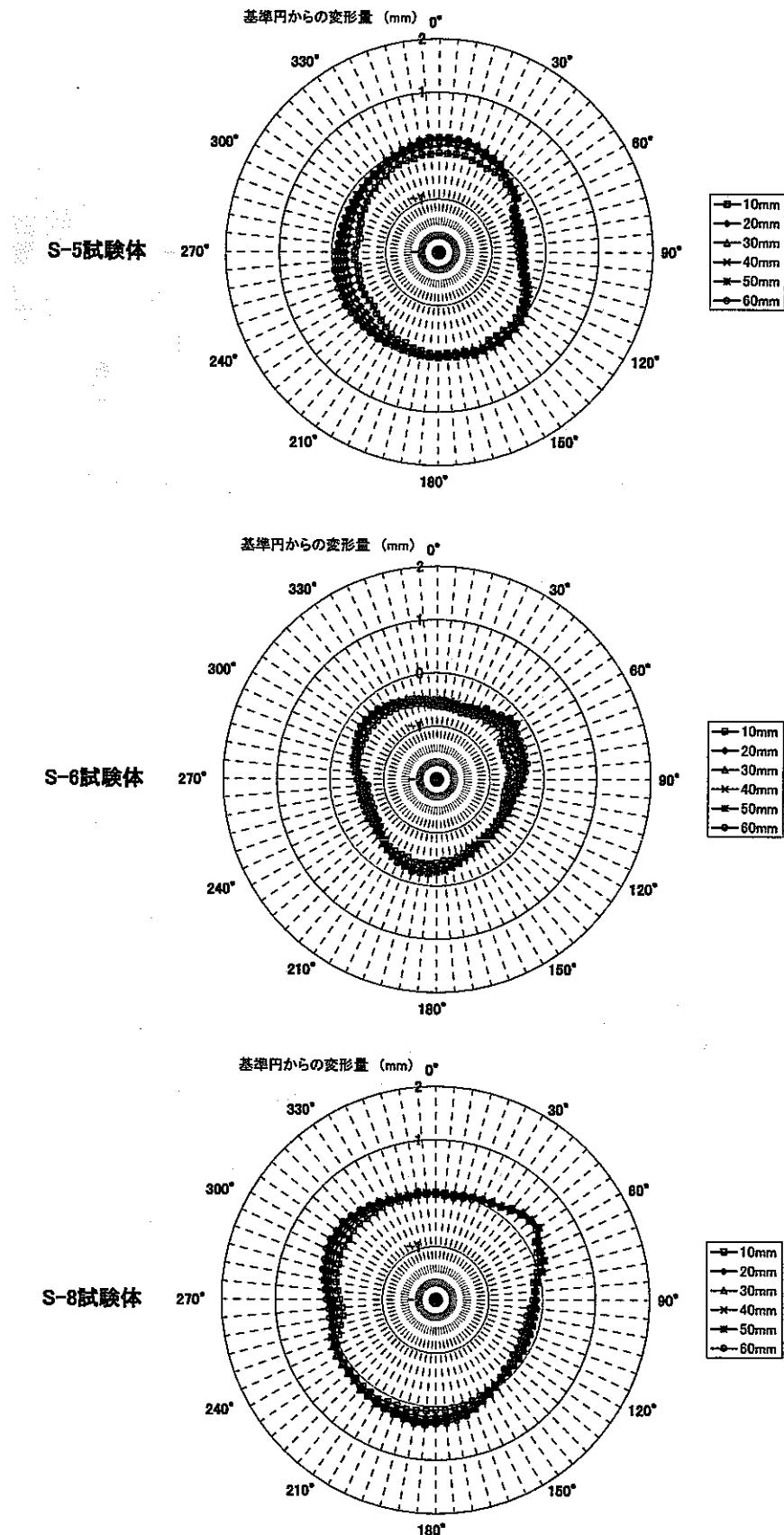


図 2.2.1.2 試験体の初期形状計測結果

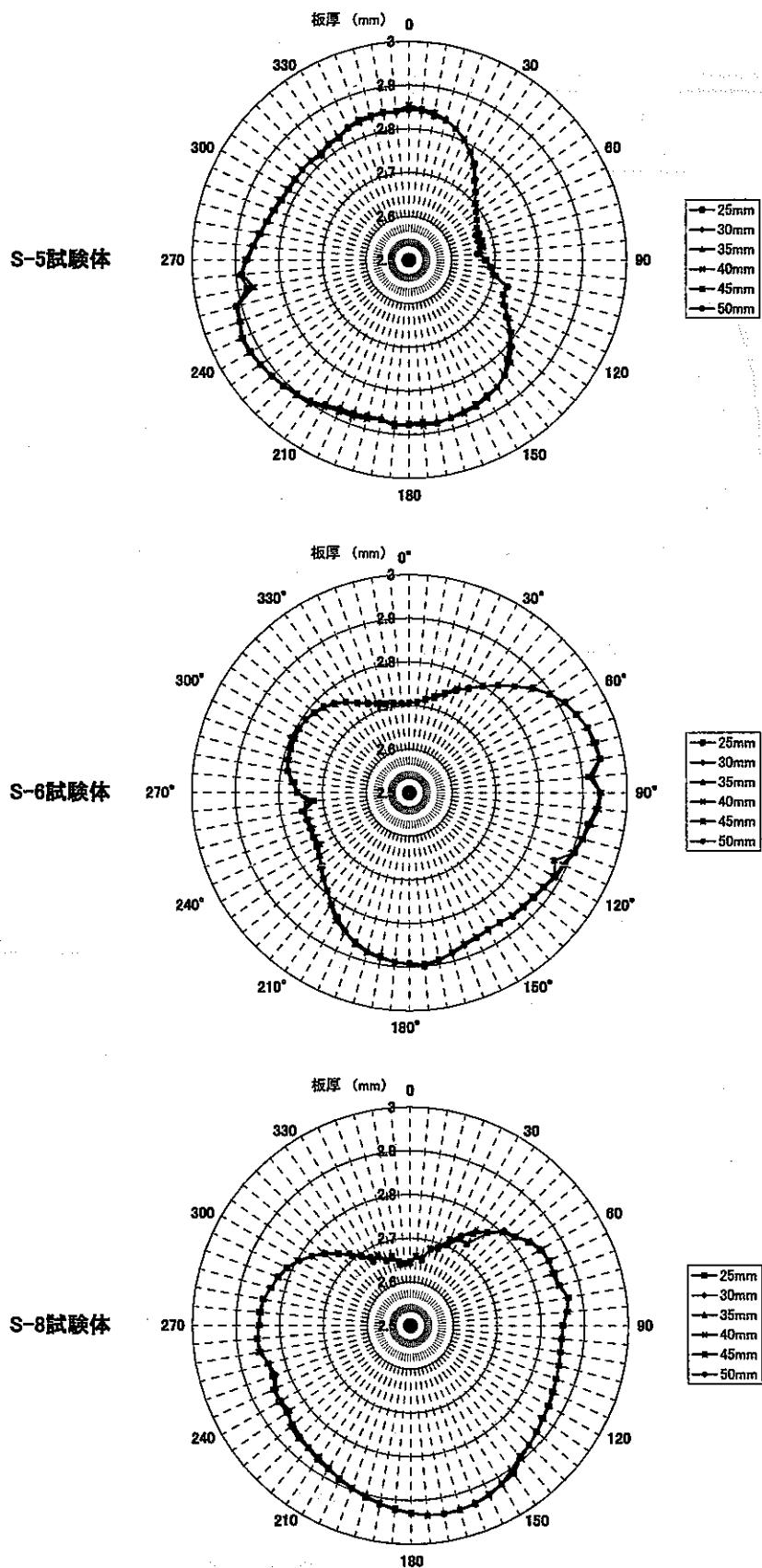


図 2.2.1.3 試験体の初期板厚計測結果

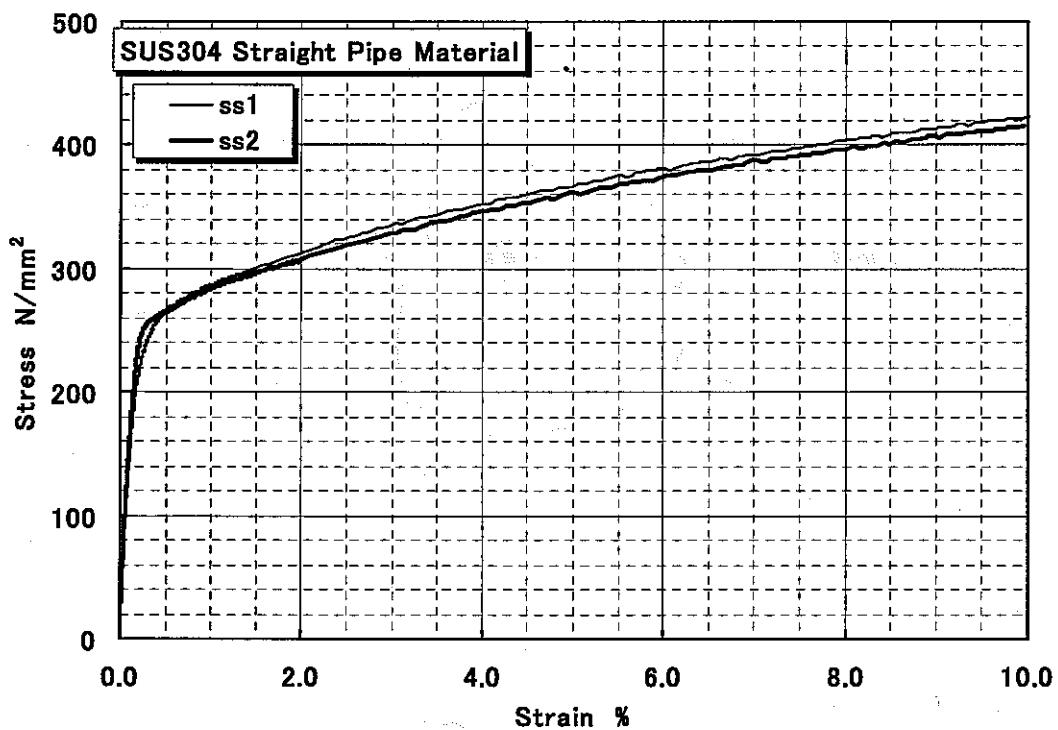


図 2.2.2.1 SUS304 の単調応力ひずみ関係

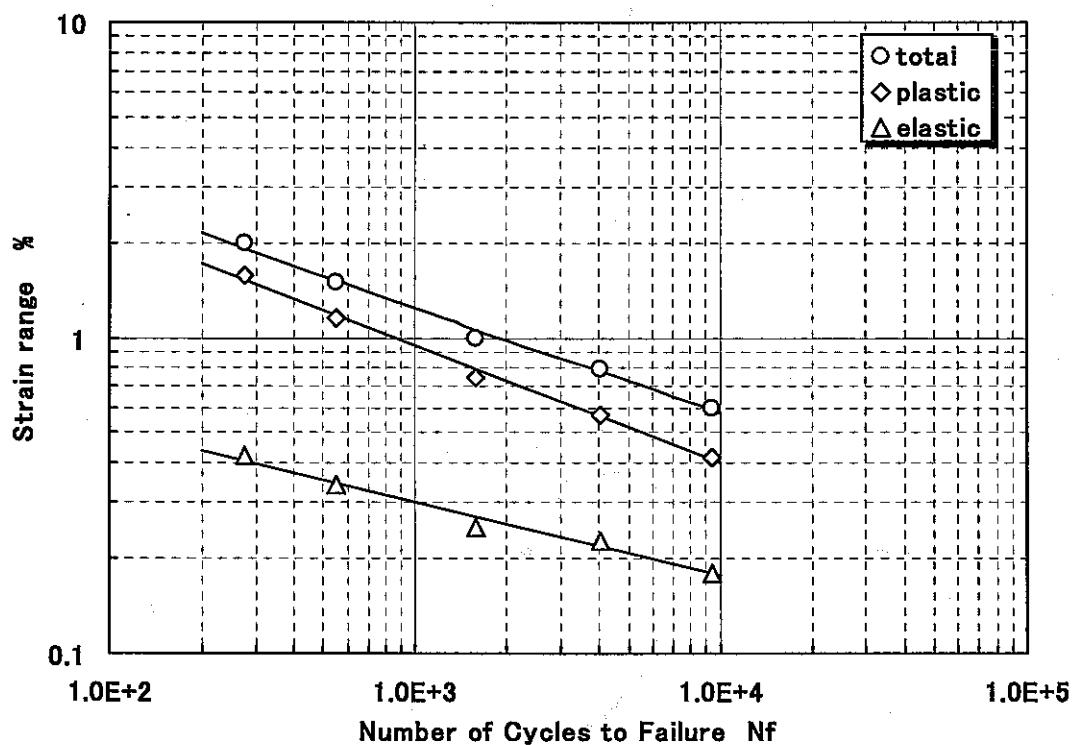


図 2.2.2.2 SUS304 の疲労曲線

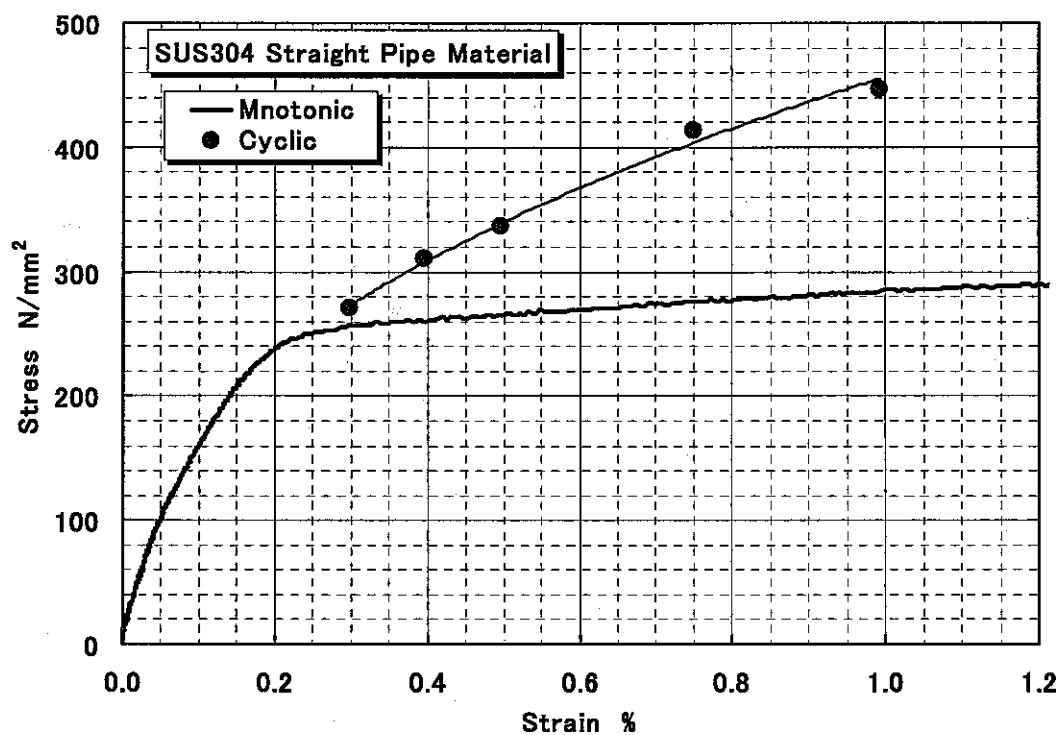
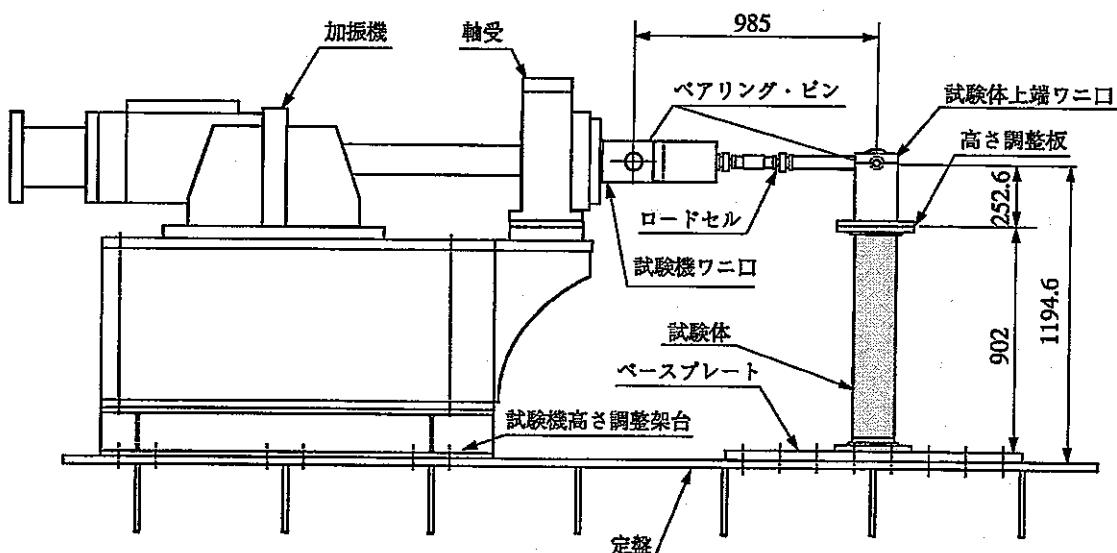


図 2.2.2.3 SUS304 の繰返し応力ひずみ関係



SCALE 1/20

図 2.2.2.4 直管要素の静的座屈試験概要

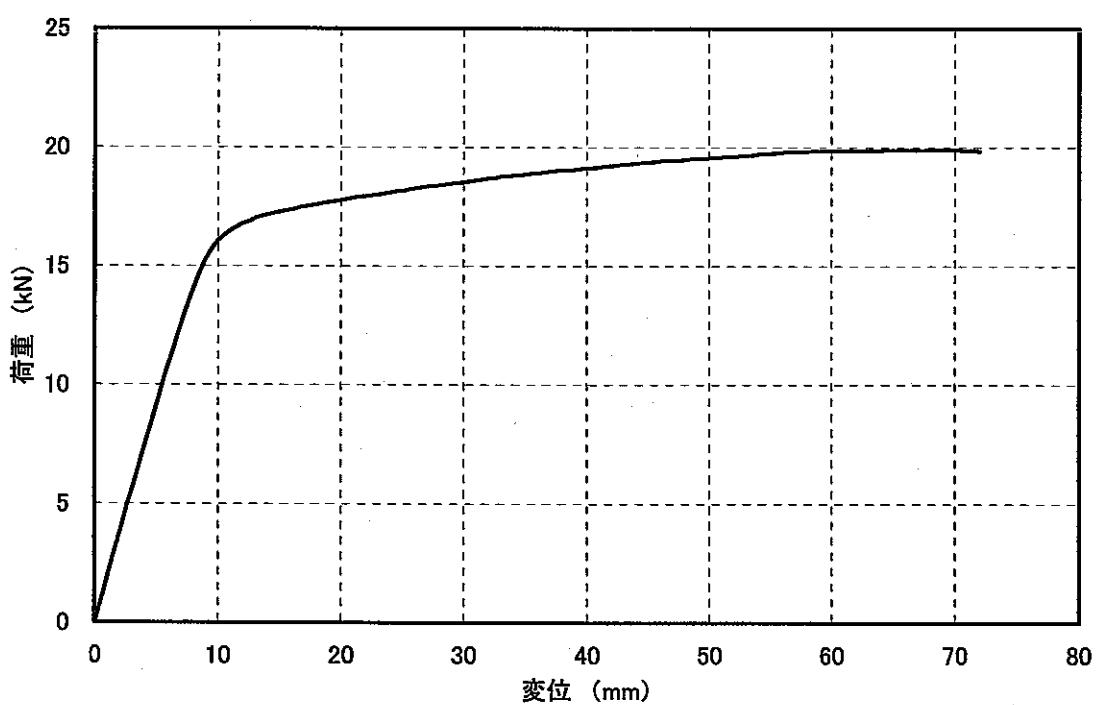


図 2.2.2.5 静的座屈試験における荷重-変位関係

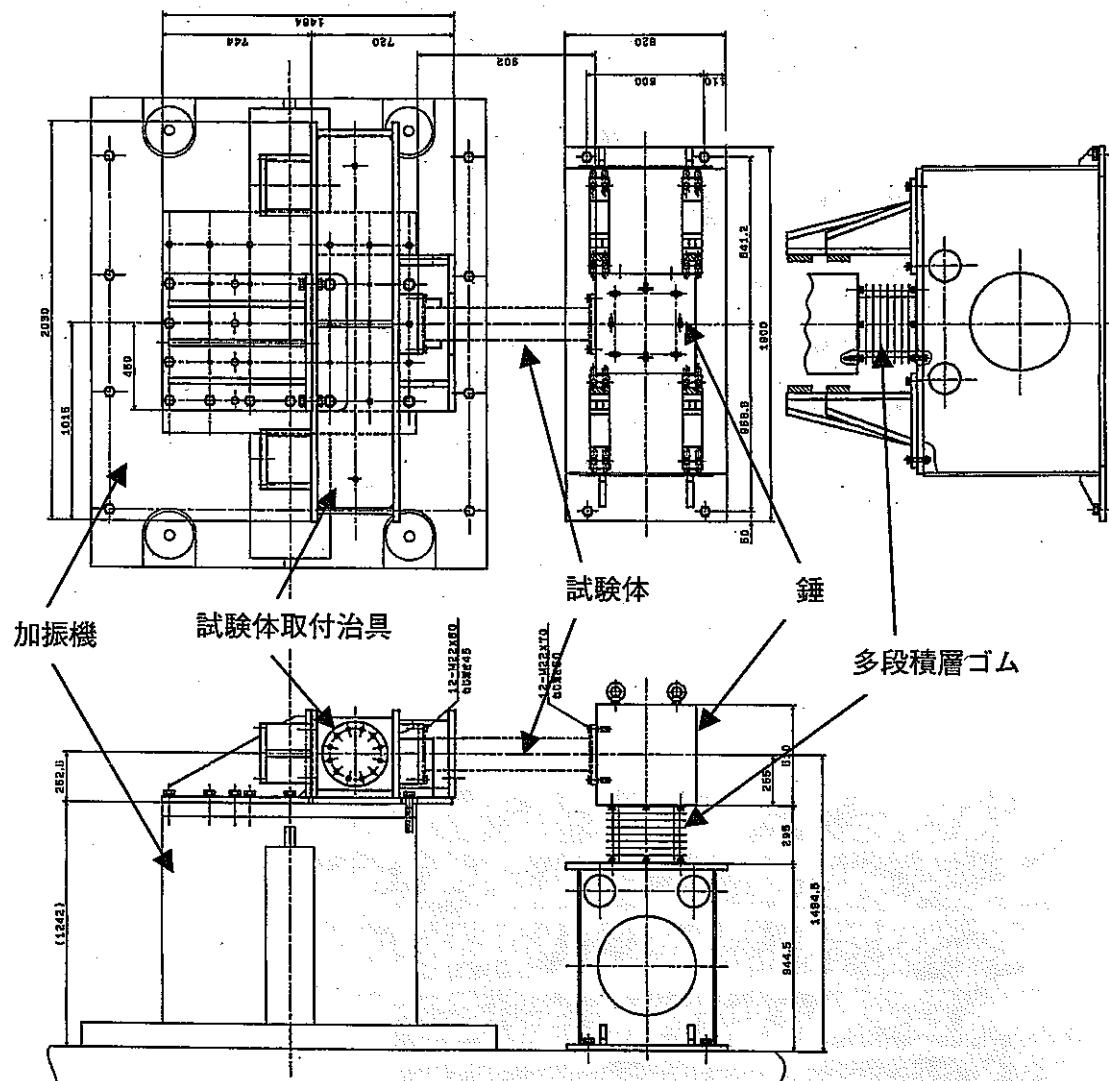


図 2.2.3.1 試験体配置図

免震・除震用多段積層ゴム  
“マルチステージラバーベアリング”  
形 式 ; MS0108U20N  
推 燐 荷 重 ; 9,800 N  
水平ばね定数 ; 12.7 N/mm  
鉛直ばね定数 ; 11,300 N/mm  
水平許容変位 ; ±16.5 mm ( /個 )  
〔(株)ブリヂストン製〕

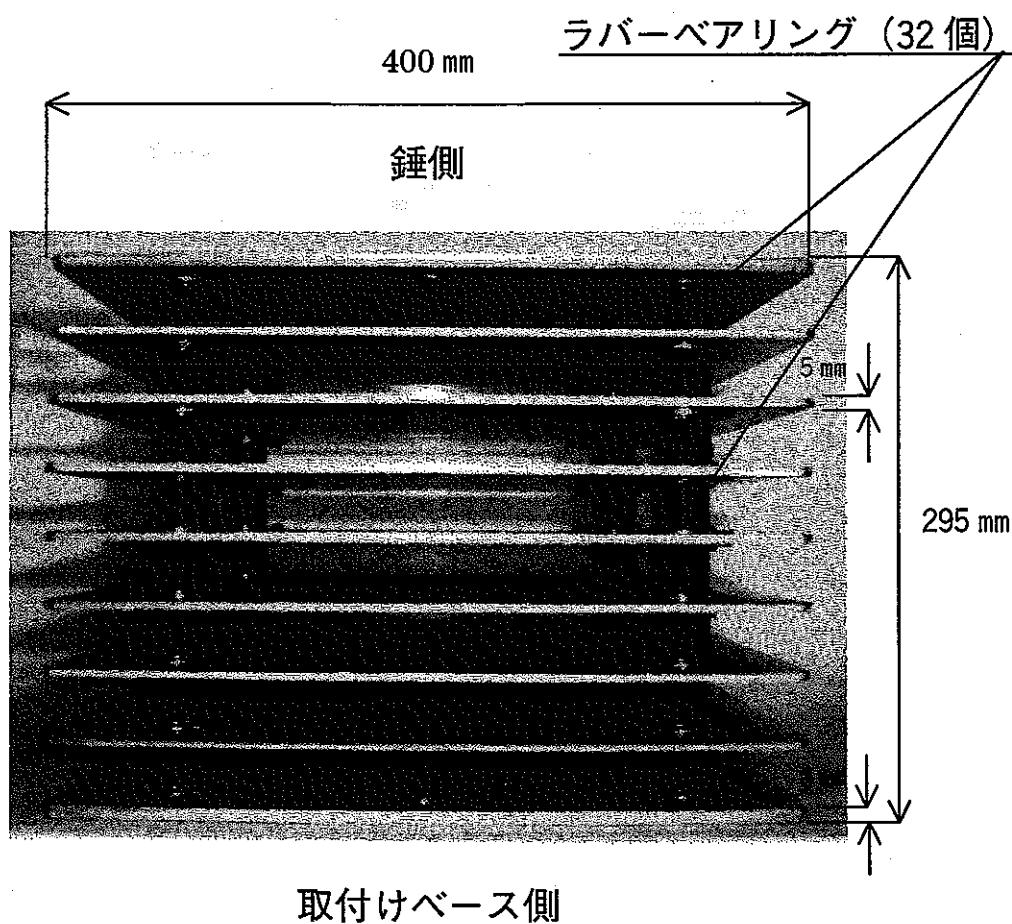
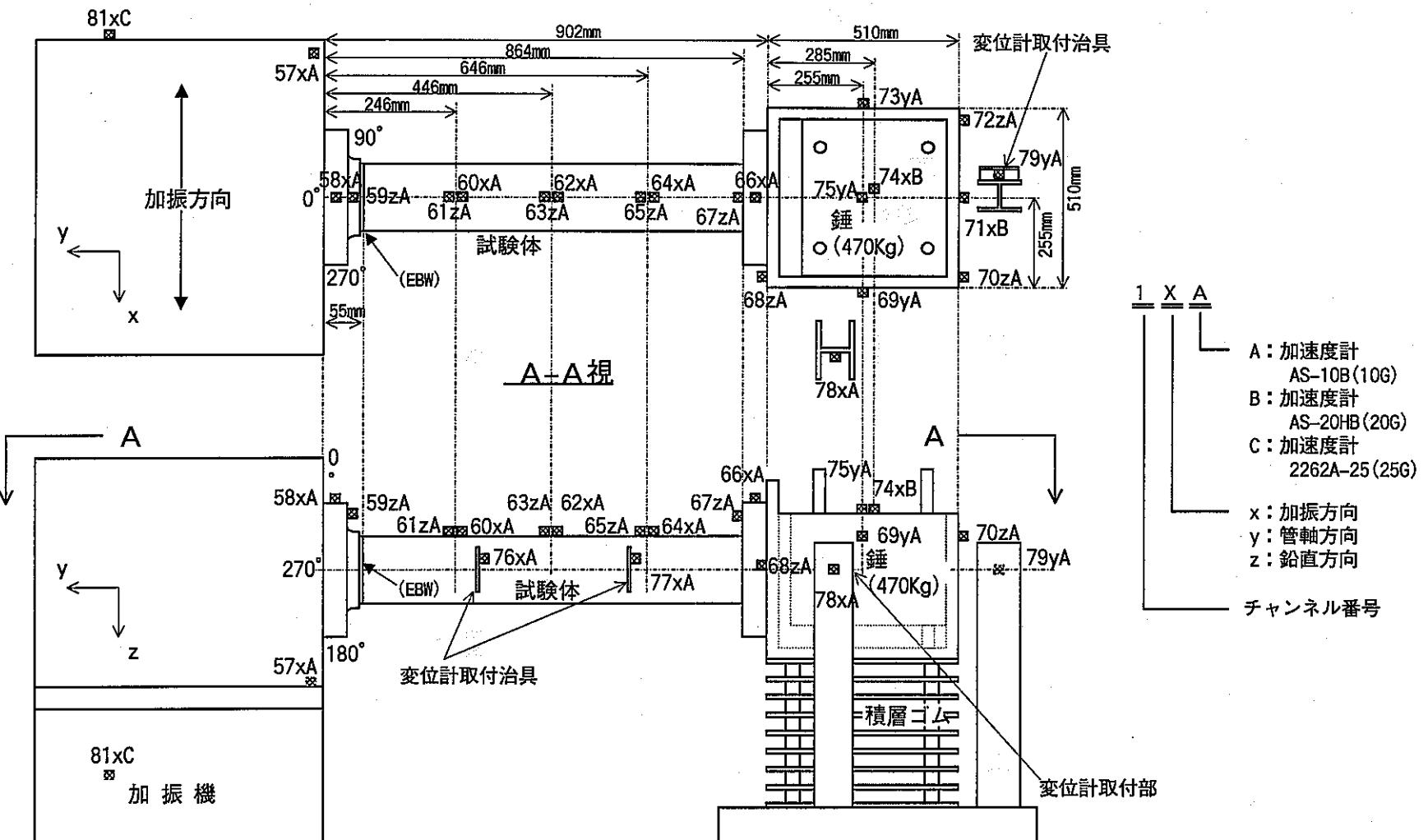


図 2.2.3.2 多段積層ゴムの概要



#### 図2.3.1.1 加速度計の計測点位置

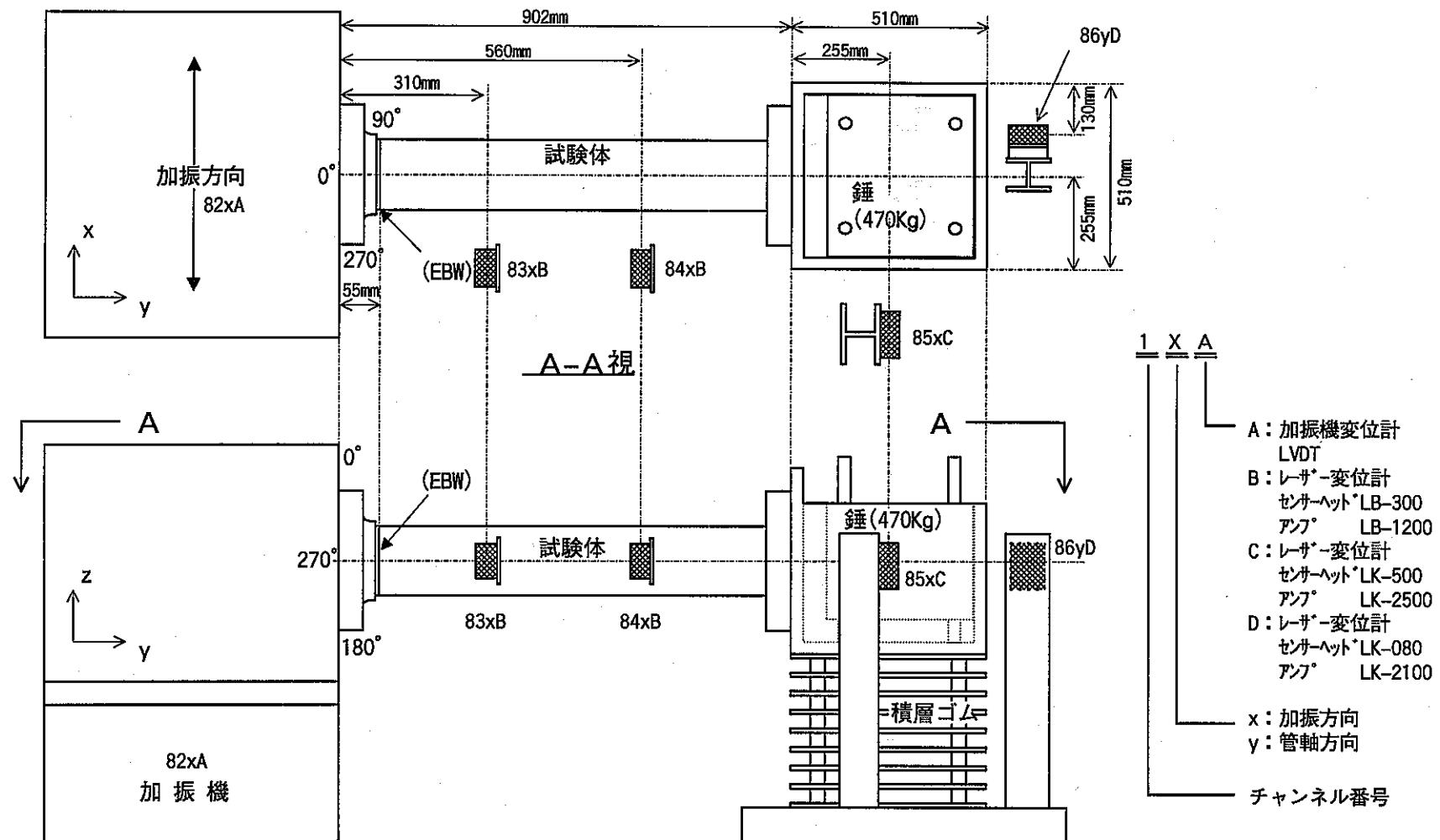
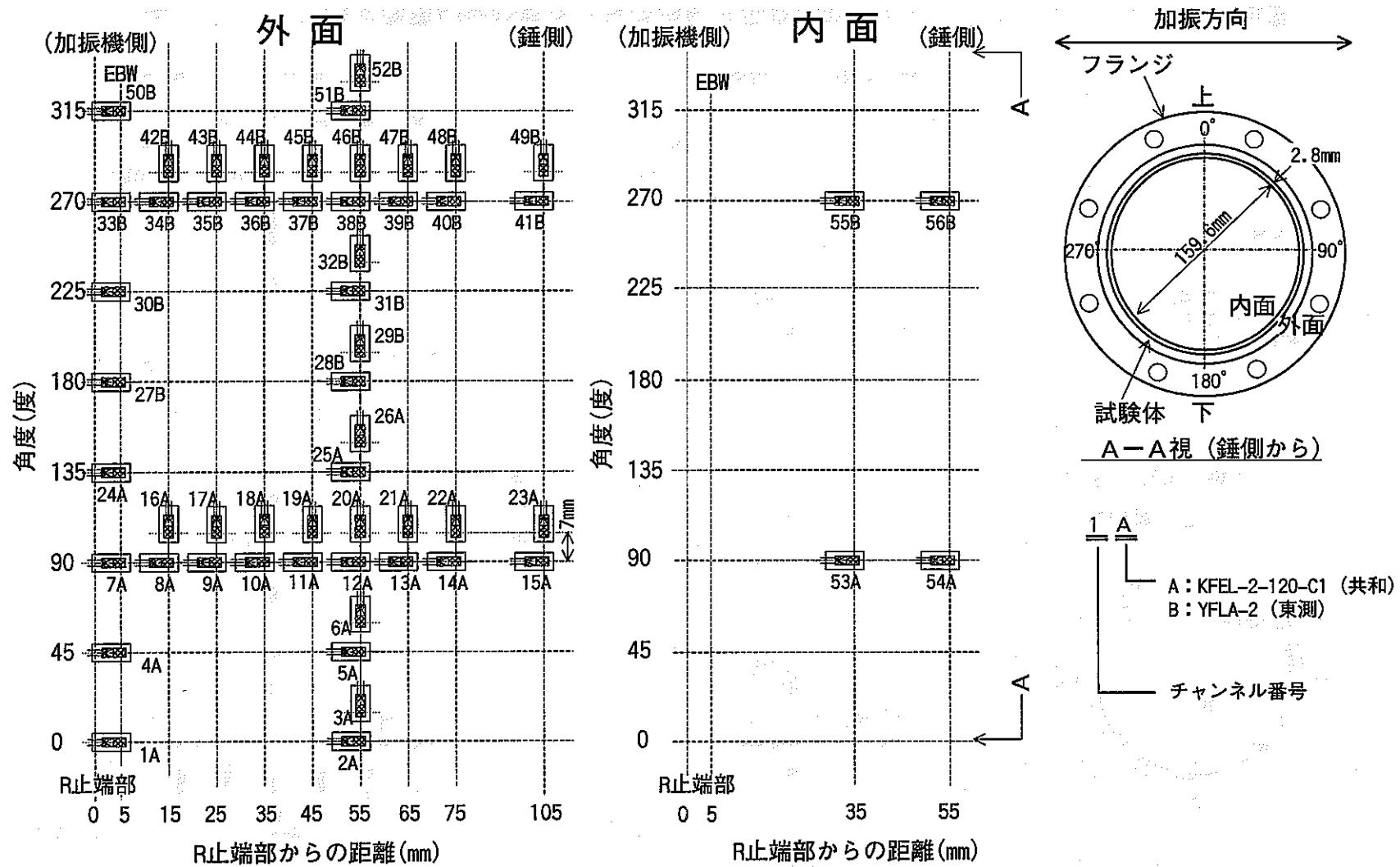


図2.3.2.1 変位計の計測点位置



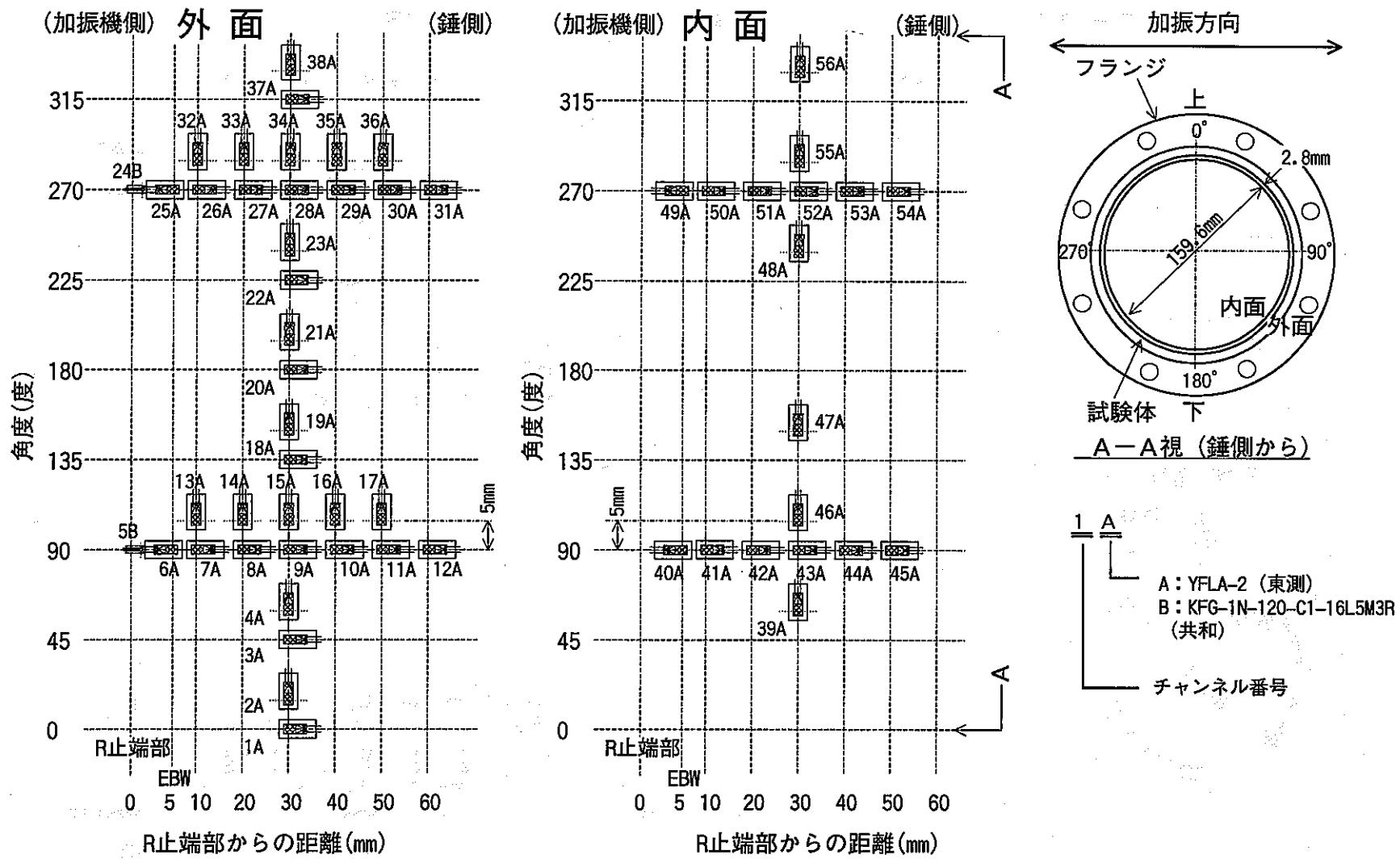


図2.3.3.2 地震波漸增加振試験及び地震波限界加振試験におけるひずみゲージの計測点位置

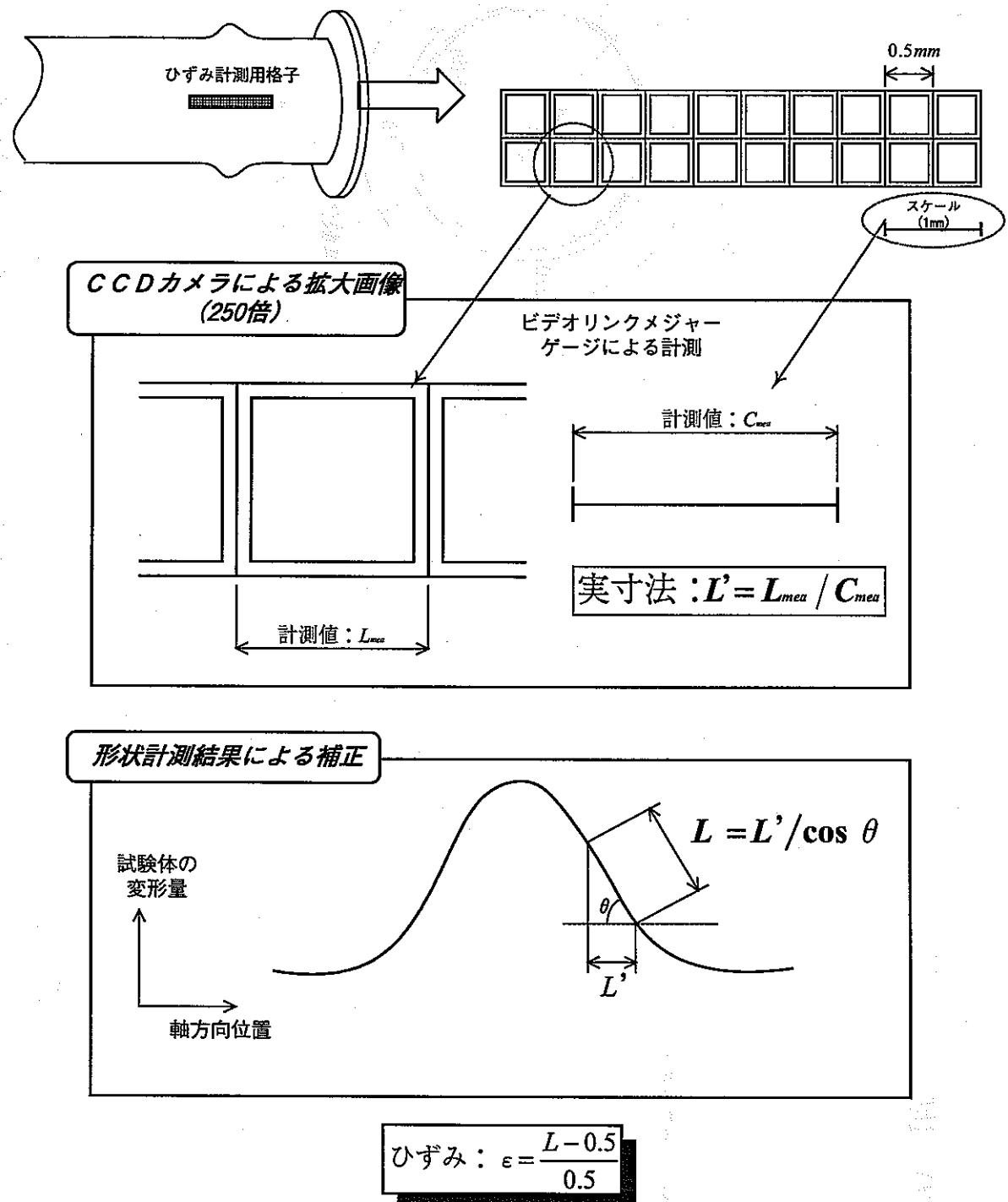
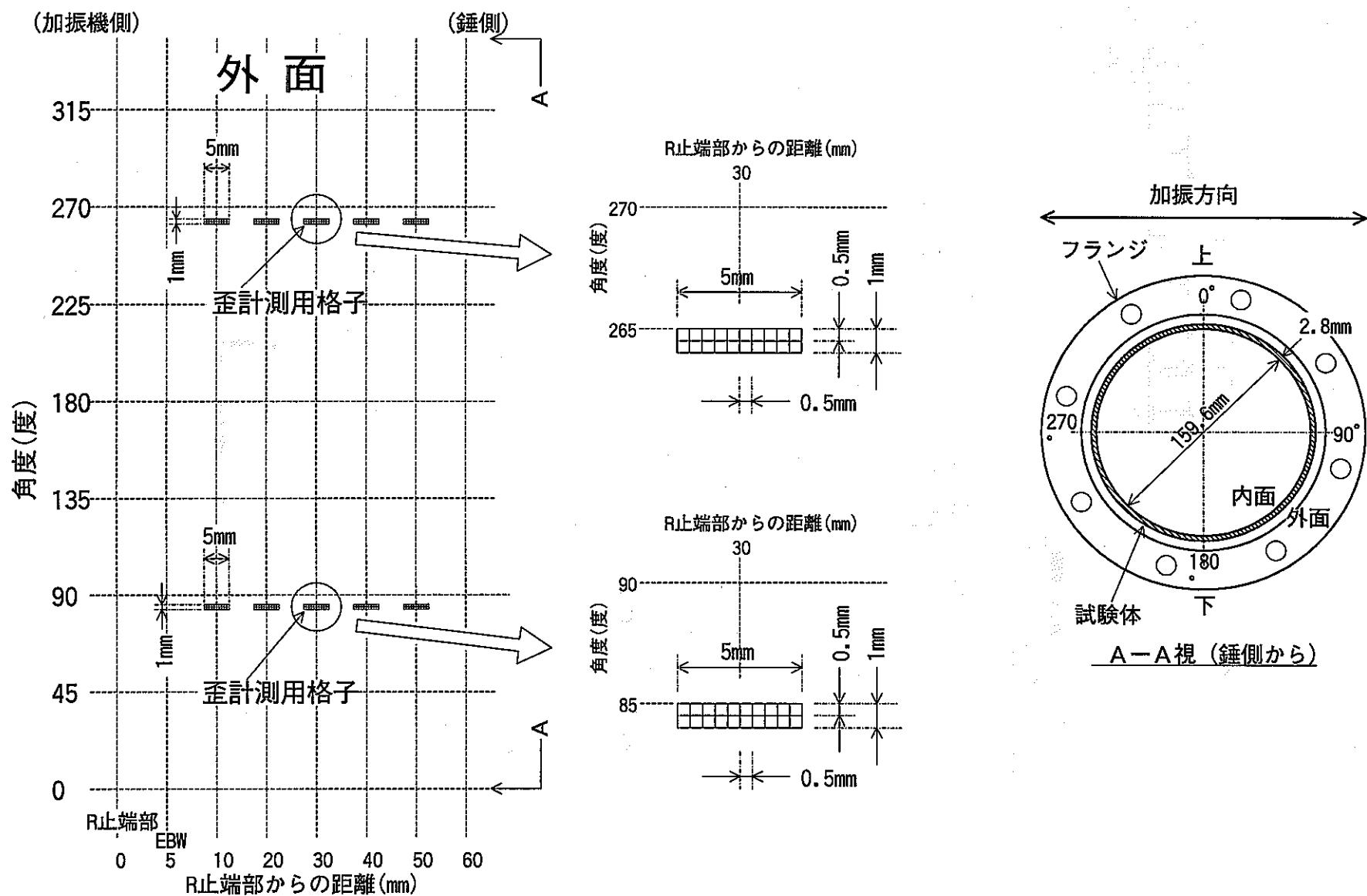


図 2.3.3.3 ひずみ計測用格子の概要



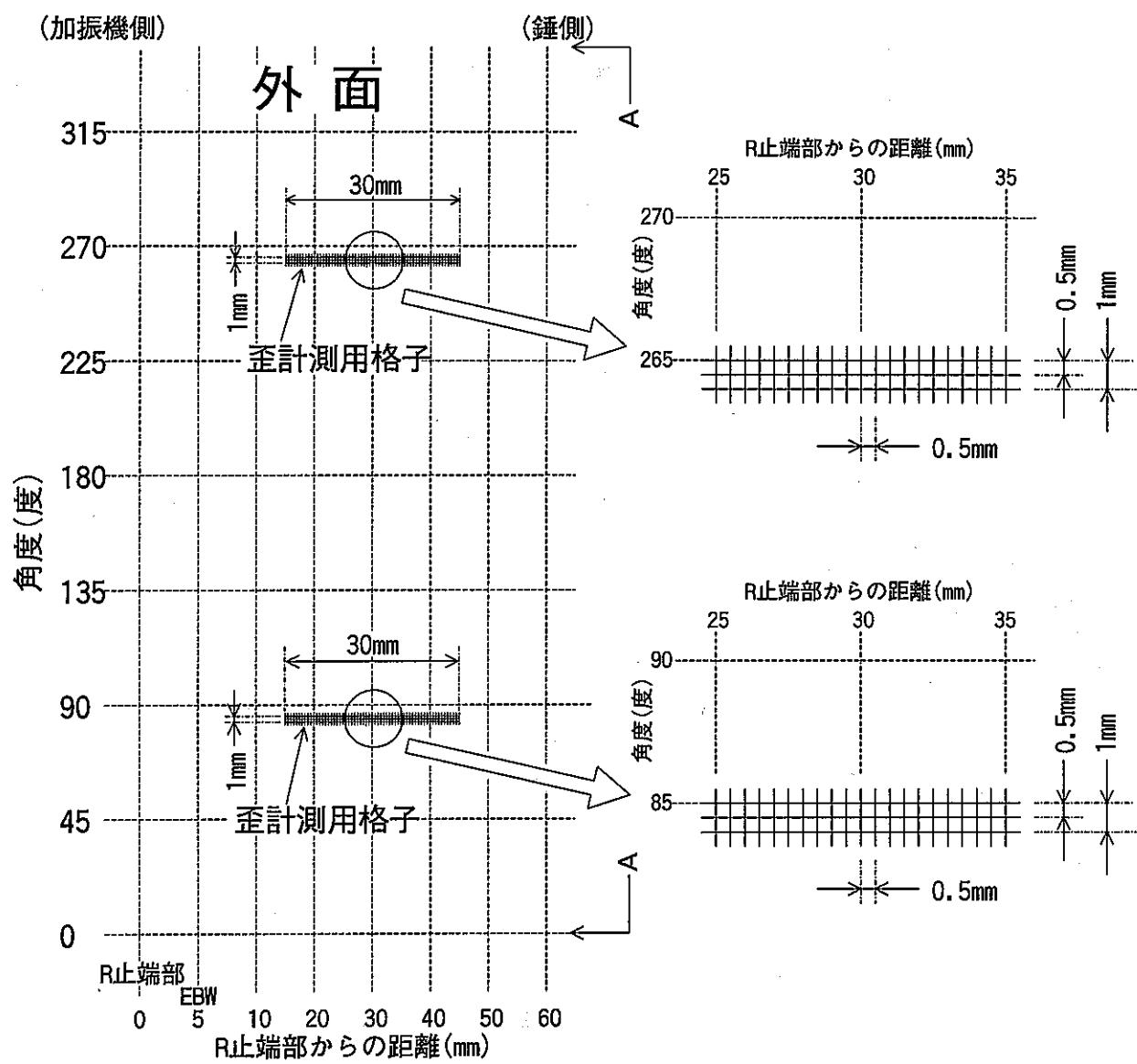


図2.3.3.5 地震波限界加振試験におけるひずみ計測用格子位置

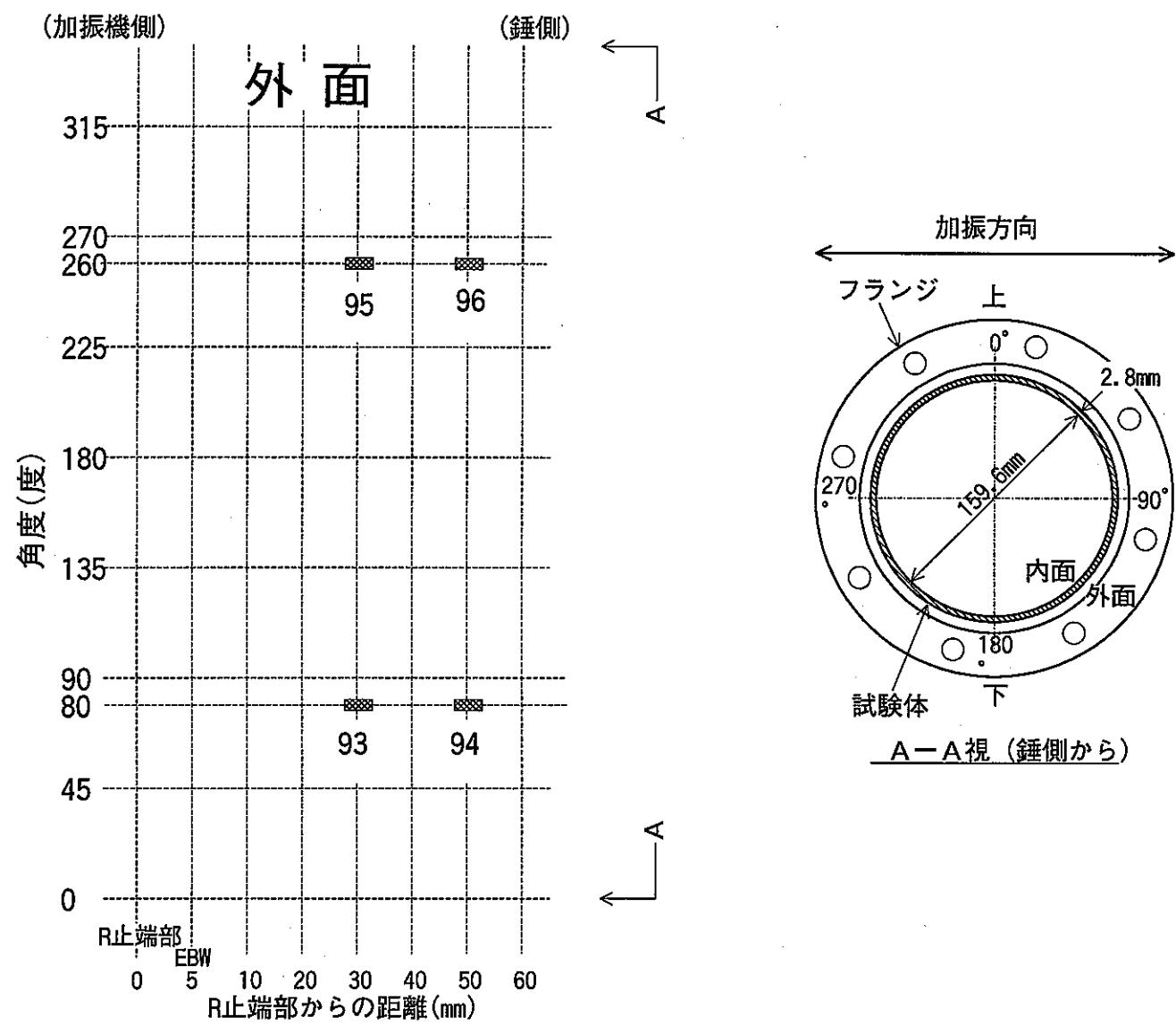


図2.3.4.1 热電対の計測点位置

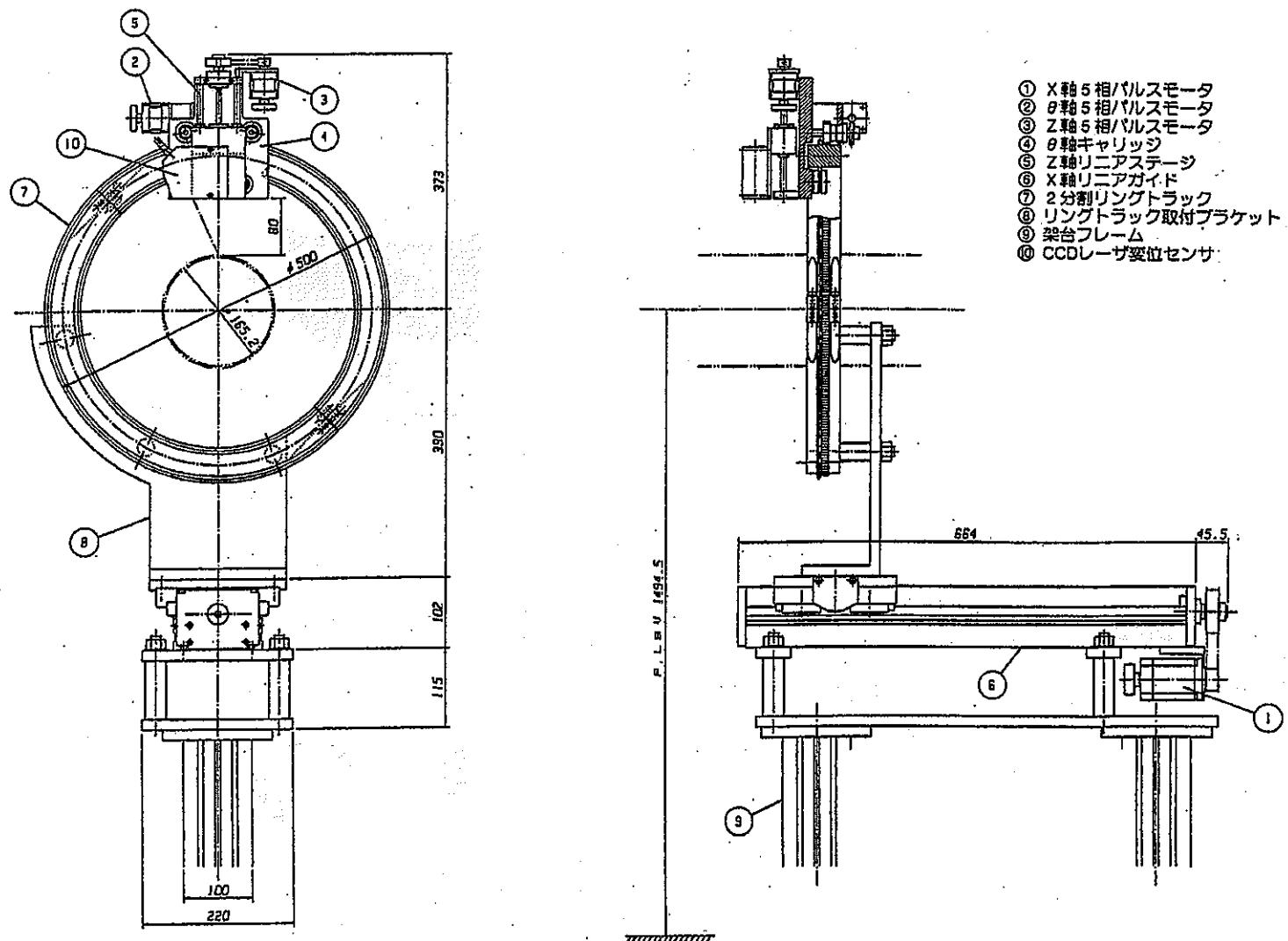
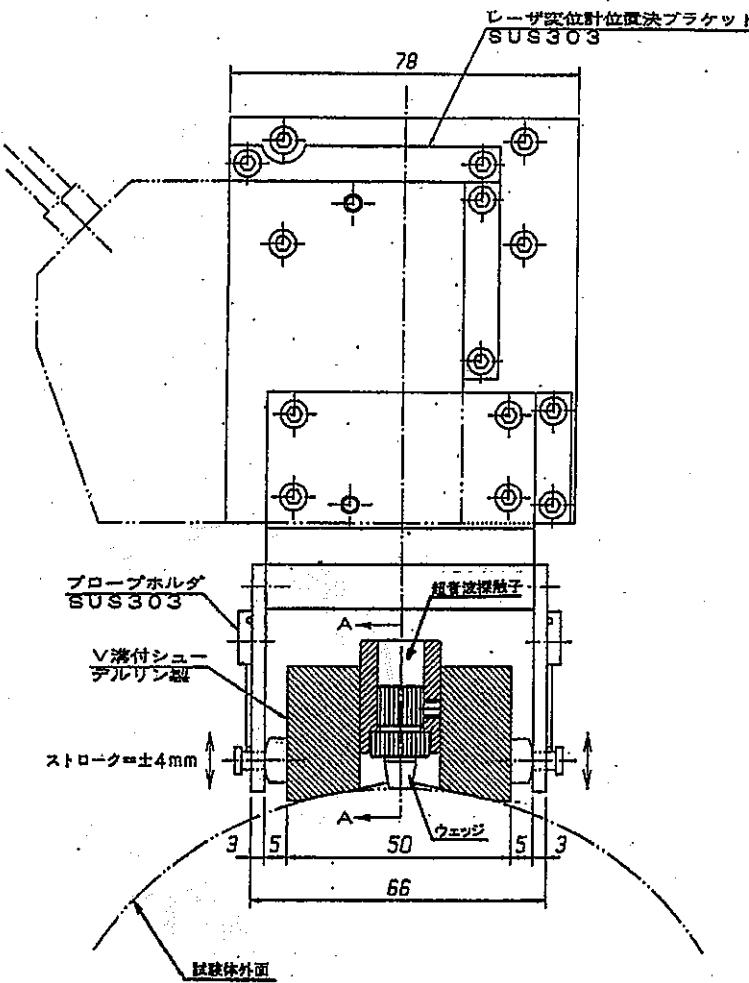


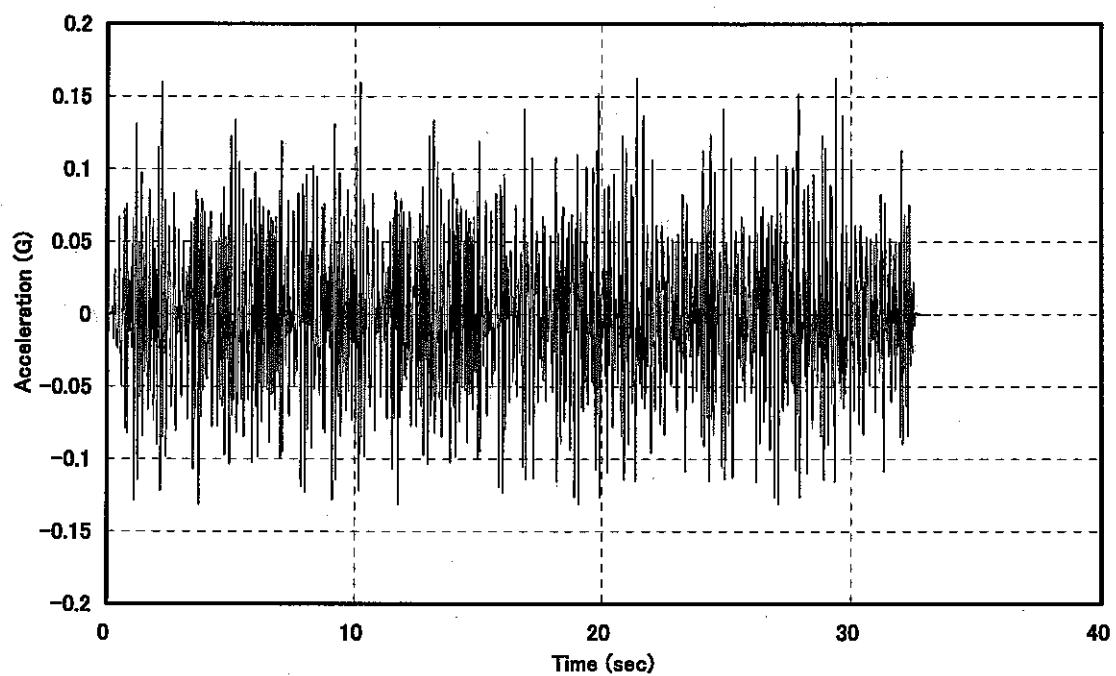
図 2.3.5.1 配管形状計測装置の概要



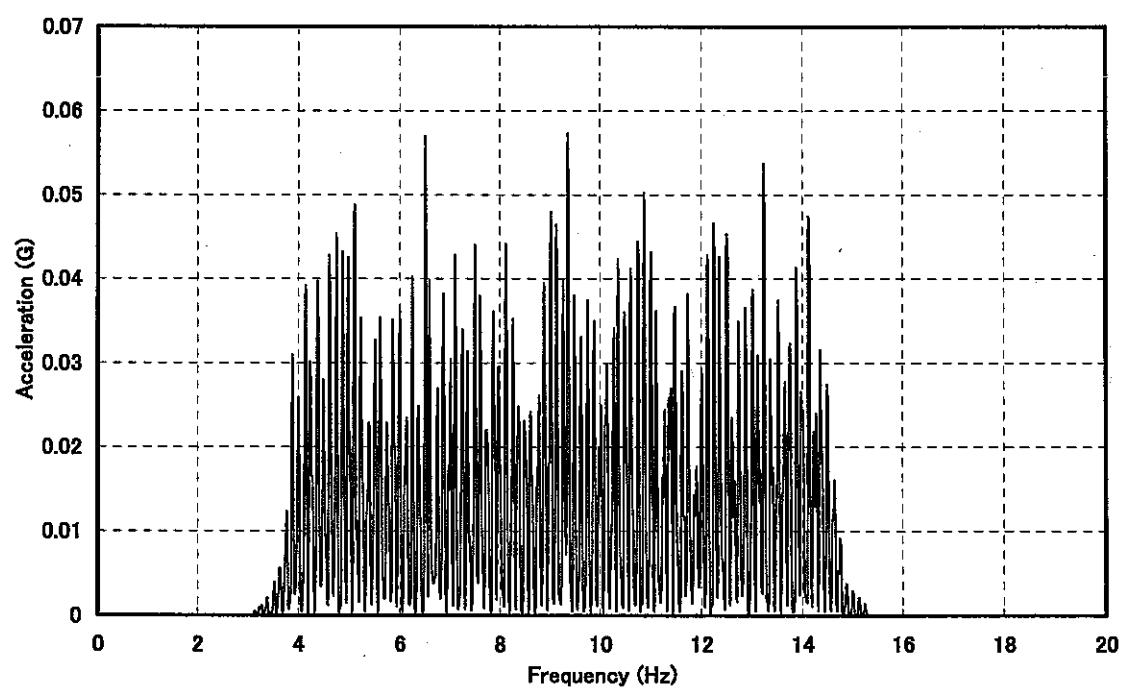
計測センサー（超音波探触子）GP-1504 (HARISONIC製)

周 波 数 15MHz  
 探 触 子 径  $\phi$  6.4mm  
 帯 域 幅 広帯域(高分解能)  
 ケーブル長さ 2.5m (GR-1504用)  
 探触子用ウェッジ 特殊ウェッジ(栄進化学製)  
 接 触 媒 質 ソニコート BS-18

図 2.3.5.2 超音波板厚計の概要

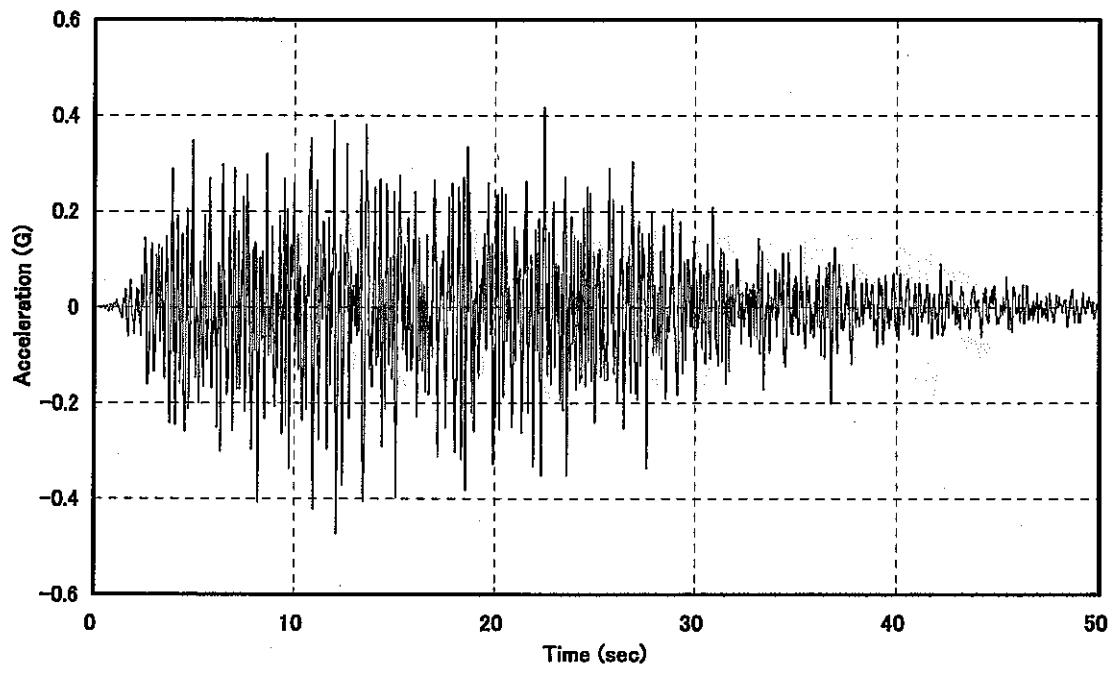


(a) 加速度時刻歴

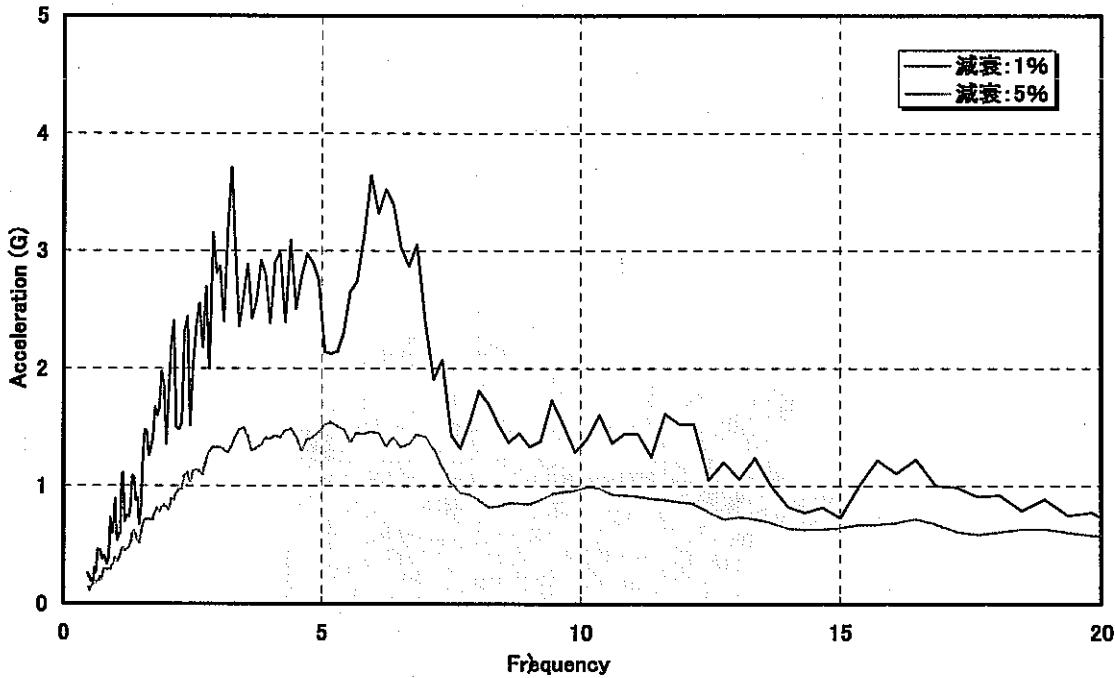


(b) パワースペクトル

図 2.4.1.1 基準ランダム波の特性



(a) 加速度時刻歴



(b) 床応答スペクトル

図 2.4.2.1 参考地震波の特性

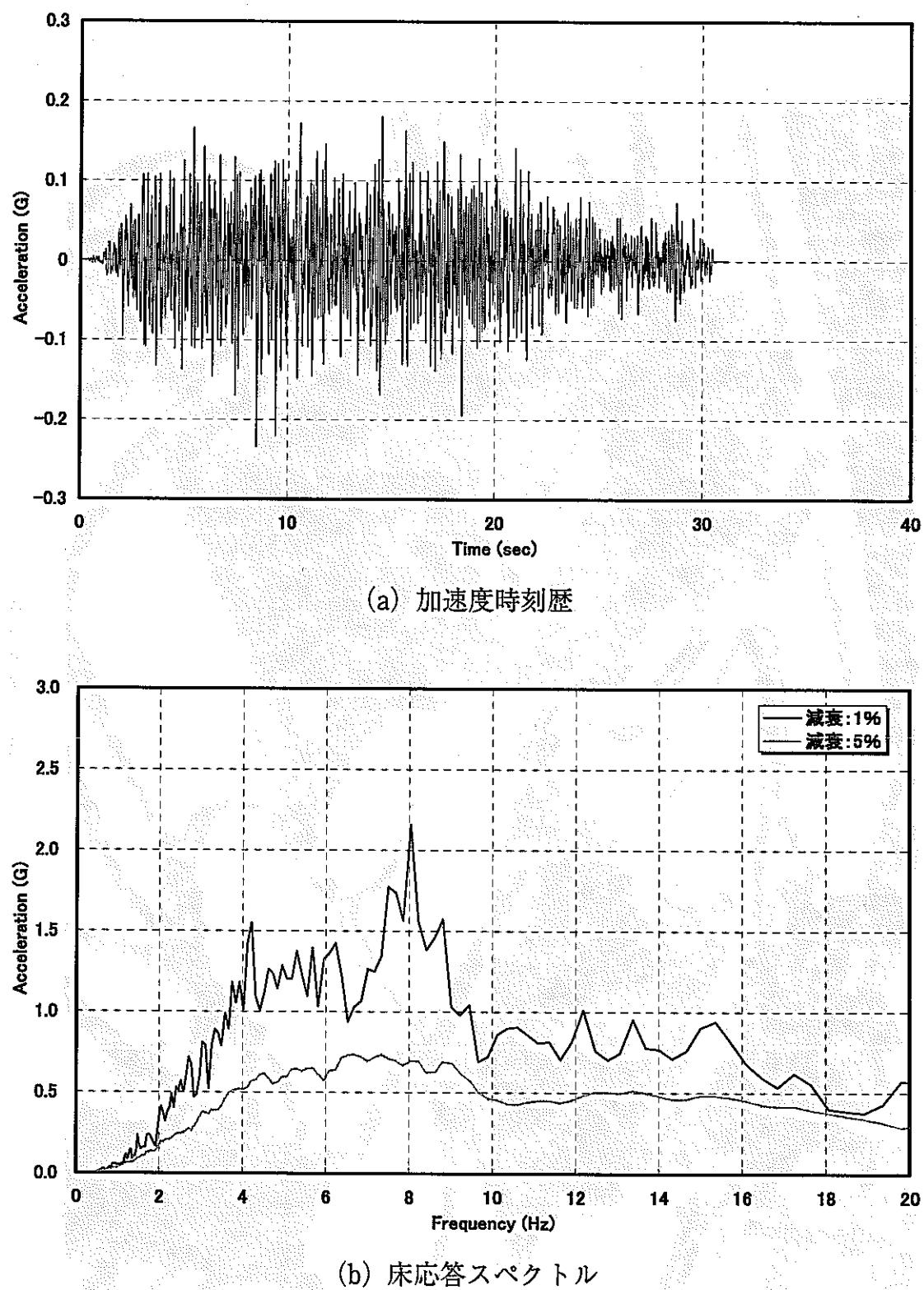


図 2.4.2.2 加振試験に用いた地震波の特性

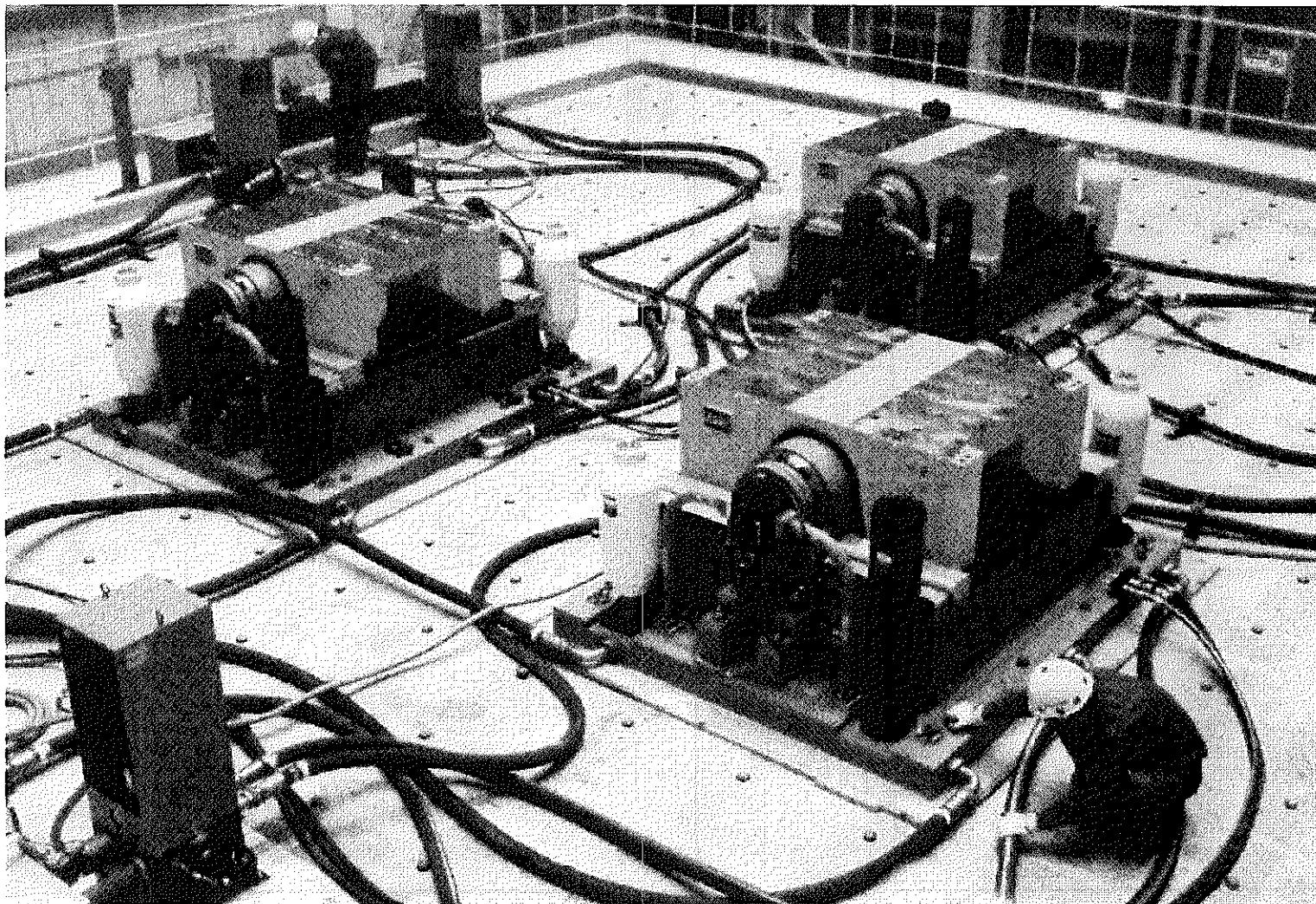


写真 2.1.1 構造物耐震強度試験装置の全景

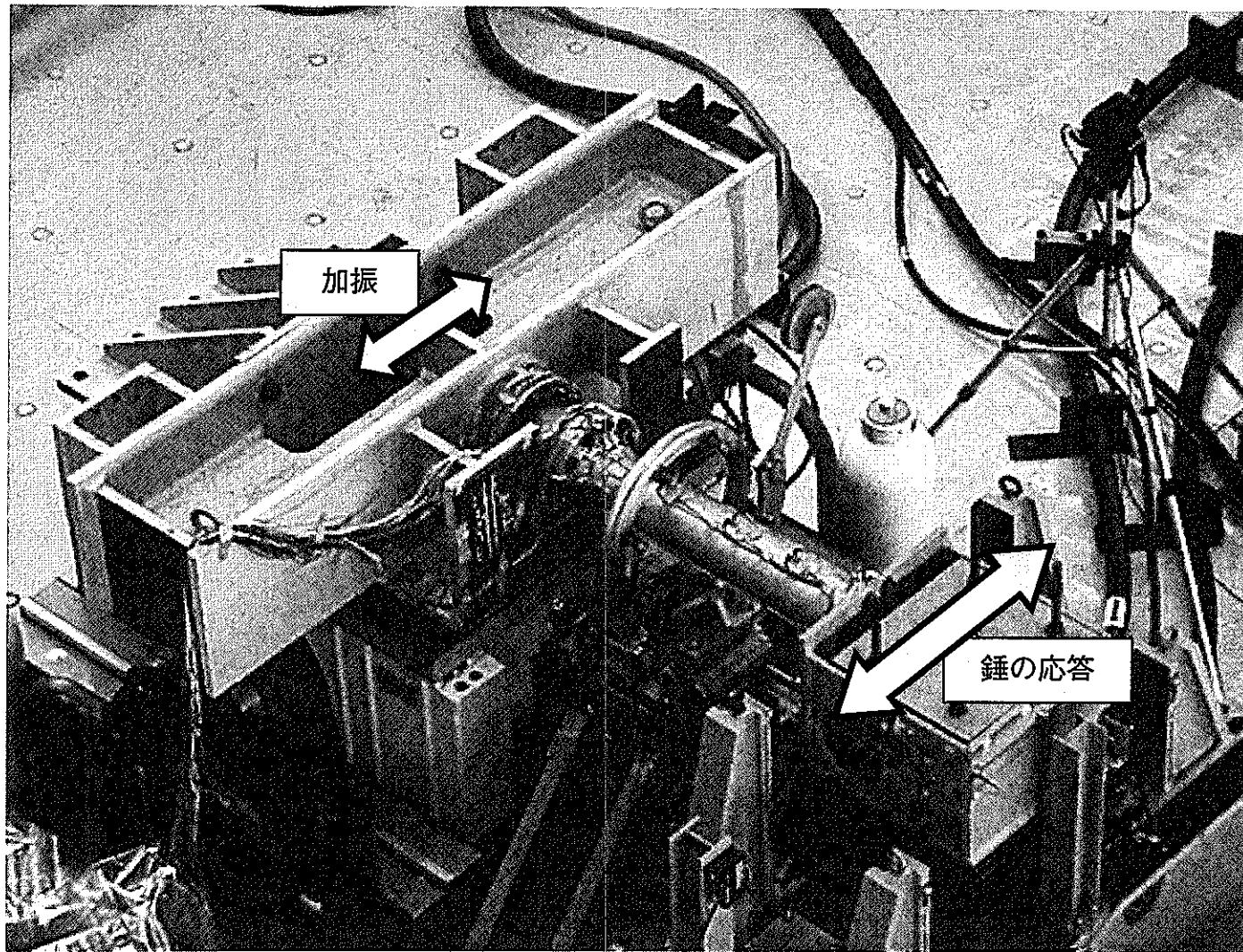


写真 2.2.3.1 試験体据え付け時の状態

### 3. 定常ランダム波漸増加振試験結果

S-6 試験体を用いて定常ランダム波漸増加振試験を実施した。M6 加振後に、軸方向 30mm の周方向 90 及び 270° 付近で外側に膨らむ変形が認められた。この変形部付近を観察し、き裂が発生していないことを確認したため試験を継続した。M7 加振を実施し、加振後に変形部付近を観察したところ、変形部の両側（90 及び 270° 方向）より貫通き裂が発生していたため、定常ランダム波漸増加振試験を終了した。

本章では、定常ランダム波漸増加振試験において、加速度、変位、ひずみ、温度を計測し、さらに試験終了後に試験体の形状計測、破面観察を行った結果をまとめて示す。

#### 3.1. 加速度

各加振レベルにおいて、加振台で計測した入力加速度（57ch）の時刻歴を図 3.1.1(a)～3.1.7(a)に、錐で計測した応答加速度（74ch）の時刻歴を図 3.1.1(b)～3.1.7(b)に示す。これらの結果を基に、入力加速度に対する応答加速度の推移をまとめて図 3.1.8 に示す。

図 3.1.9(a)～3.1.15(a)に、入力加速度に対する応答加速度の伝達関数を示す。伝達関数は、40 秒間の時刻歴データを時間軸方向に 8 秒間で区分したものを作成し、前後の区間を 4 秒間オーバーラップさせることにより 9 区間に分割し、区間毎に算出した。さらに、区間毎の伝達関数を平均化処理することにより全区間の伝達関数とし、この伝達関数のピーク周波数を各加振レベルにおける固有振動数として決定した。

図 3.1.9(b)～3.1.15(b)に、線形応答解析により算出した応答スペクトルの減衰比による変化を示す。入力加速度の最大値と上記の固有振動数より得られる実測値について、最も近い応答スペクトルの減衰比を各加振試験における減衰比として決定した。

図 3.1.16 に入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移を示す。

#### 3.2. 相対変位

各加振レベルにおいて、試験体に作用した相対変位の時刻歴を図 3.1.1(c)～3.1.7(c)に示す。試験体に作用した相対変位とは、錐で計測した変位（85ch）と加振台で計測した変位（82ch）の差により算出し、加振試験後に生じる残留変形（永久変形）を含めた絶対量で示した。なお、相対変位の rms 値につ

いては、試験体の永久変形に伴いドリフトすることから、時刻歴の平均値より差し引いた相対変位量より rms 値を算出している。

図 3.2.1 に入力加速度に対する相対変位の推移を示す。

### 3.3. ひずみ

M5 加振以降では軸方向 30mm 付近で外側に膨らむ変形が生じたため、変形部付近のひずみゲージが剥れ、ひずみが計測不能となるものがあった。これらは接着材の性能を超える大ひずみが発生して剥れたものであり、そのような計測点の値は試験結果より除外した。また、計測可能であったひずみゲージについても、計測限界を超えるひずみ値を示したゲージも見られることから、ここでは定性的な試験結果のまとめのみを行うこととする。

局部的なひずみは変形部付近で大きな値を示した。変形様式を考慮した試験体外面の軸方向ひずみに着目し、図 3.3.1～3.3.7 に各加振レベルにおける最大値及び最小値の軸方向分布及び周方向分布を示す。なお、ひずみゲージの計測値は累積ひずみも含めて示している。また、ひずみ最大値及び最小値は各ひずみゲージ計測点での時刻歴より最大値及び最小値を算出したものであり、この図中の最大値及び最小値の発生時刻が等しいとは限らない。入力加速度に対するひずみ (53ch) の推移をまとめて図 3.3.8 に示す。

さらに、大加振レベルの加振 (M5～M7) ではひずみゲージの計測限界を超える大ひずみが発生したことから、ひずみ格子を用いて試験終了後の残留ひずみを計測した結果、試験体外面の軸方向 30mm 付近（き裂発生部付近）では  $16.3 \pm 1\%$  となった。

### 3.4. 温度

試験体表面の局部的な温度については、軸方向 30mm 付近、周方向  $90^\circ$  において計測した温度 (93ch) が最も高い値を示した。図 3.4.1 に、各加振レベルにおける温度の時刻歴を示す。また、試験体の表面温度上昇によるひずみゲージ計測値の影響を調べるために、温度の変化に対するひずみ計測値の変化の関係を計測した結果を図 3.4.2 に示す。

試験体の表面温度は最大で  $137^\circ\text{C}$  (M7) まで上昇するが、ひずみゲージ計測値の温度による影響は高々  $350 \mu\varepsilon$  であり、表面温度はひずみゲージの計測値に大きな影響を与えないと判断される。

### 3.5. 形状計測

各加振後に試験体の形状計測を行った。各加振後の周方向  $80^\circ$  及び  $260^\circ$  における形状計測結果を図 3.5.1 に示す。M5 加振後に試験体の軸方向  $30\text{mm}$  付近に残留変形が発生し、加振レベルが大きくなるとともに残留変形が増大していく様子がわかる。これは試験体の固定端部がフランジにより拘束されるため、軸方向  $30\text{mm}$  付近に変形が生じたものと考えることができる。周方向  $80^\circ$  では配管外面方向に  $6.1\text{mm}$ 、周方向  $260^\circ$  では配管外面方向に  $9.6\text{mm}$  の残留変形が生じている。

さらに、試験終了後に試験体の全体形状計測を行った。軸方向  $30\text{mm}$  付近では、全周に渡り  $3\sim9\text{mm}$  程度外側に膨らむ残留変形を生じていることがわかる。

### 3.6. 破面観察

試験体を観察した結果、軸方向  $30\text{mm}$  付近の周方向  $90^\circ$  及び  $270^\circ$  で貫通き裂が発生していた。写真 3.6.1 に試験体き裂発生部付近の様子を示す。

試験体の破損メカニズムを検討するため、き裂縦断面の光学顕微鏡観察及び破面の SEM 観察を実施した。破面観察を行った位置を図 3.6.1 に示す。

まず、写真 3.6.2 及び 3.6.3 に試験体のき裂縦断面の光学顕微鏡観察結果を示す。この結果として、き裂付近を目視及び光学顕微鏡により観察したところ、配管内面側には多数の微小なき裂が認められたが、配管外面側には認められなかった。したがって、き裂は配管内面から発生したものと考えられる。

次に、写真 3.6.4 及び 3.6.5 に破面の SEM 観察結果を示す。これより以下の事項が明らかとなった。

- 破面には、ストライエーションと思われる模様（写真 3.6.5(f)、(h)、(i)）が認められるが、明確ではなく、潰されたようになっている。これは圧縮負荷時のき裂閉口が原因と思われ、ストライエーションによるき裂進展があったものと考えられる。
- 最終破断位置と見られる延性破面（写真 3.6.4(d)）はディンプル状であり、軸方向に引張負荷により引きちぎられたことを示している。
- ストライエーション状の模様は、最終破断位置を挟み配管外側（写真 3.6.4(c)）にも見られたことから、破断直前には配管外面からもき裂が発生・進展したものと考えられる。

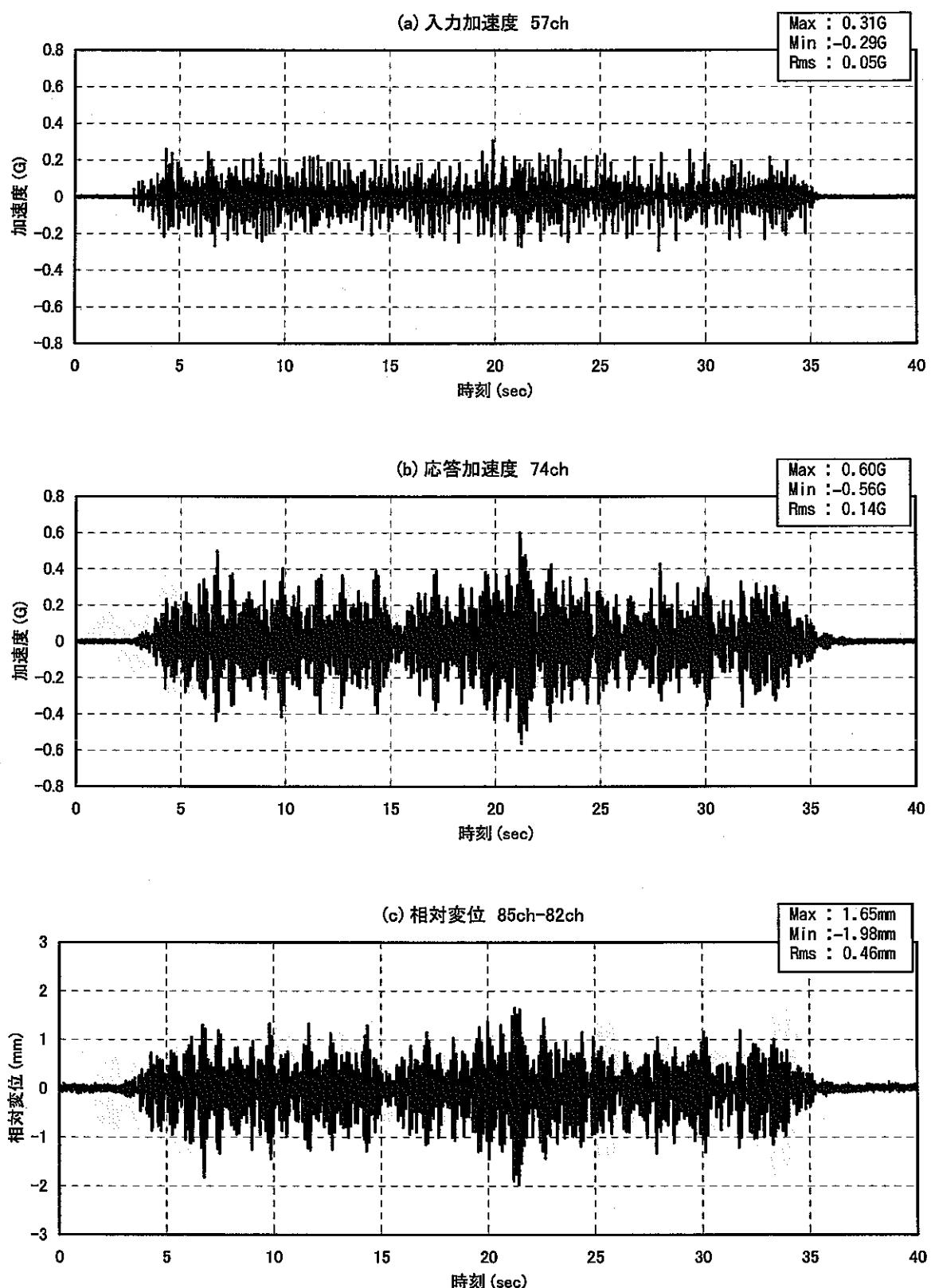


図3.1.1 定常ランダム波漸增加振試験の時刻歴 (M1)

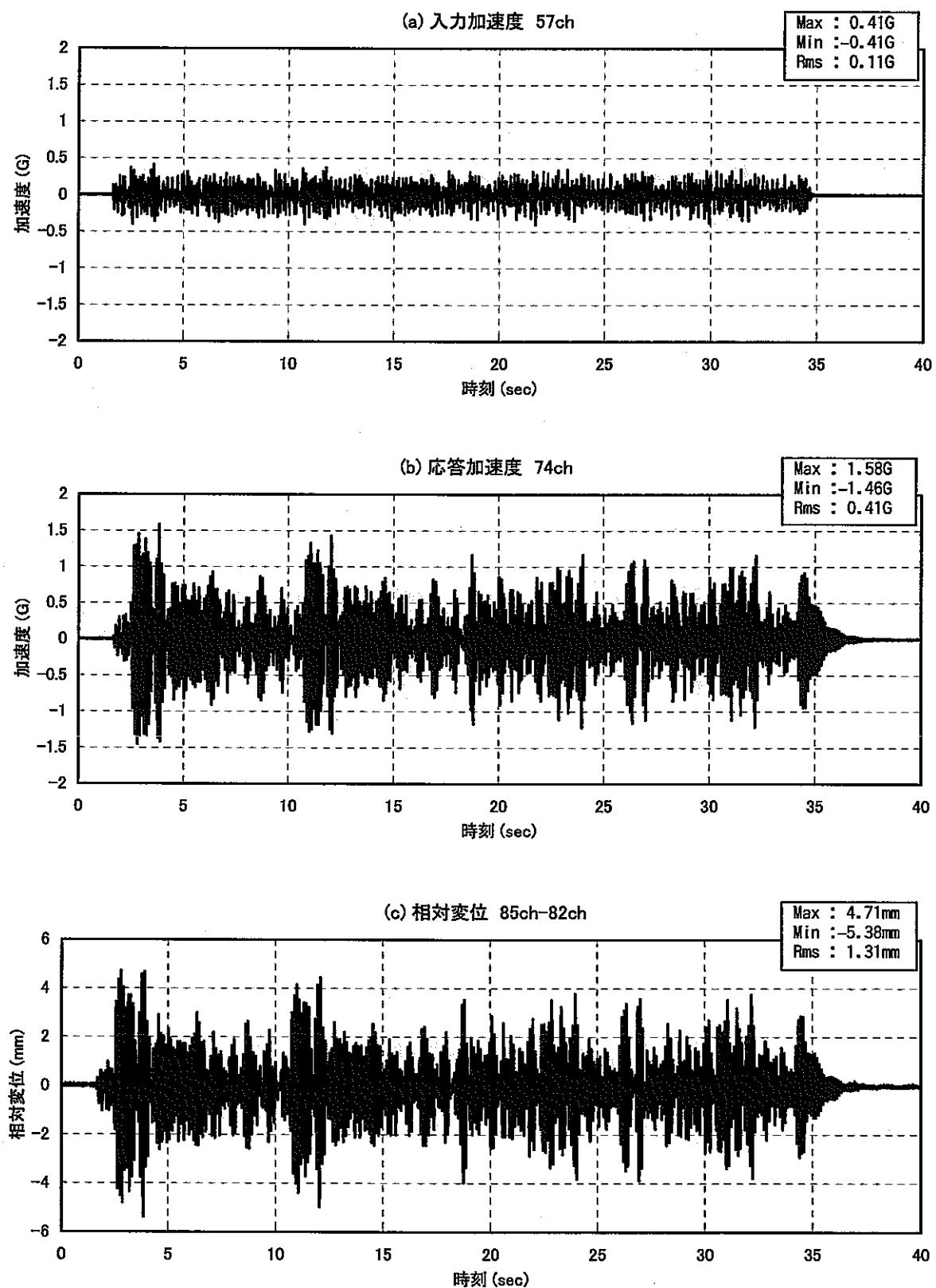


図3.1.2 定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M2)

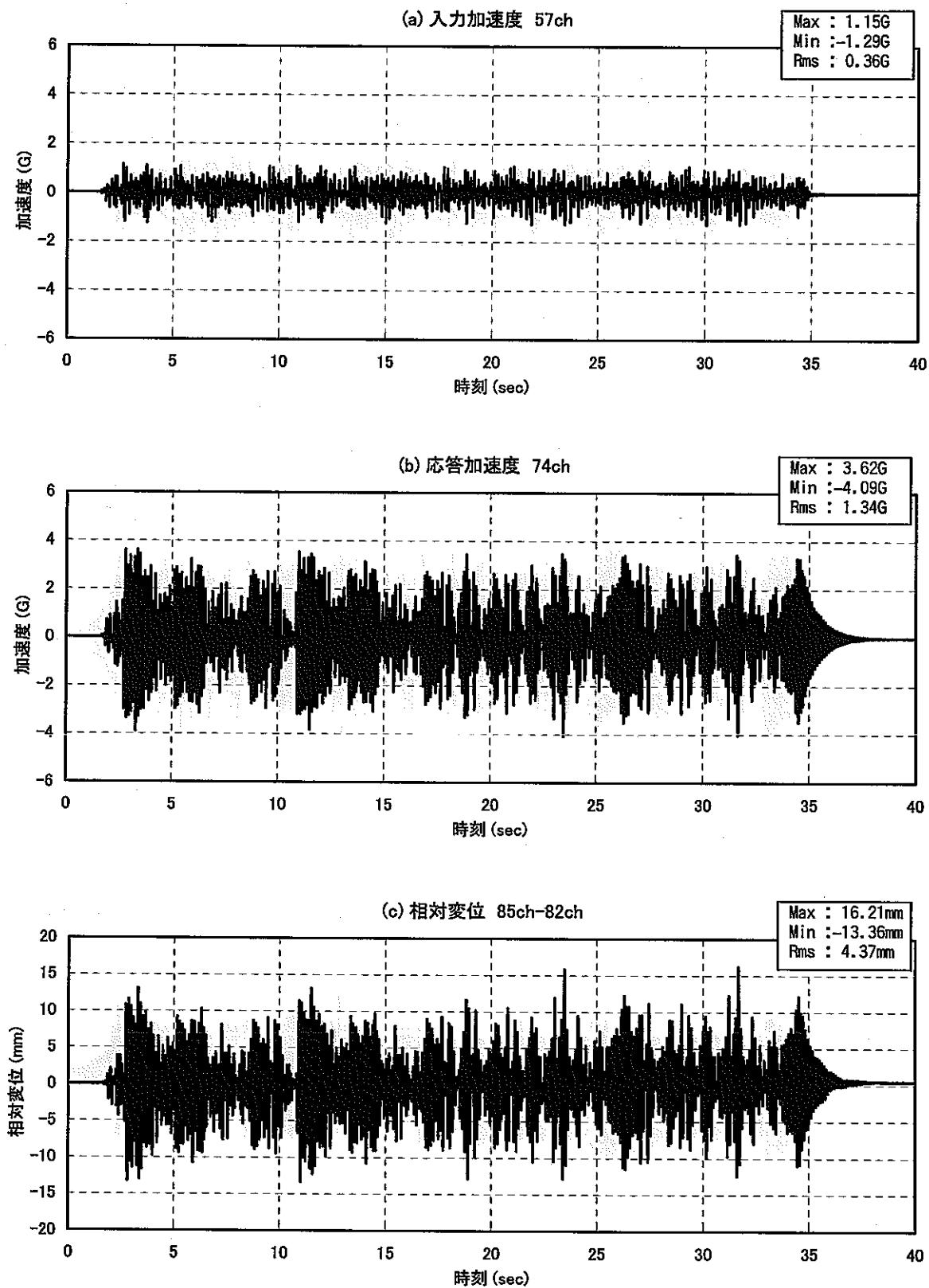


図3.1.3 定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M3)

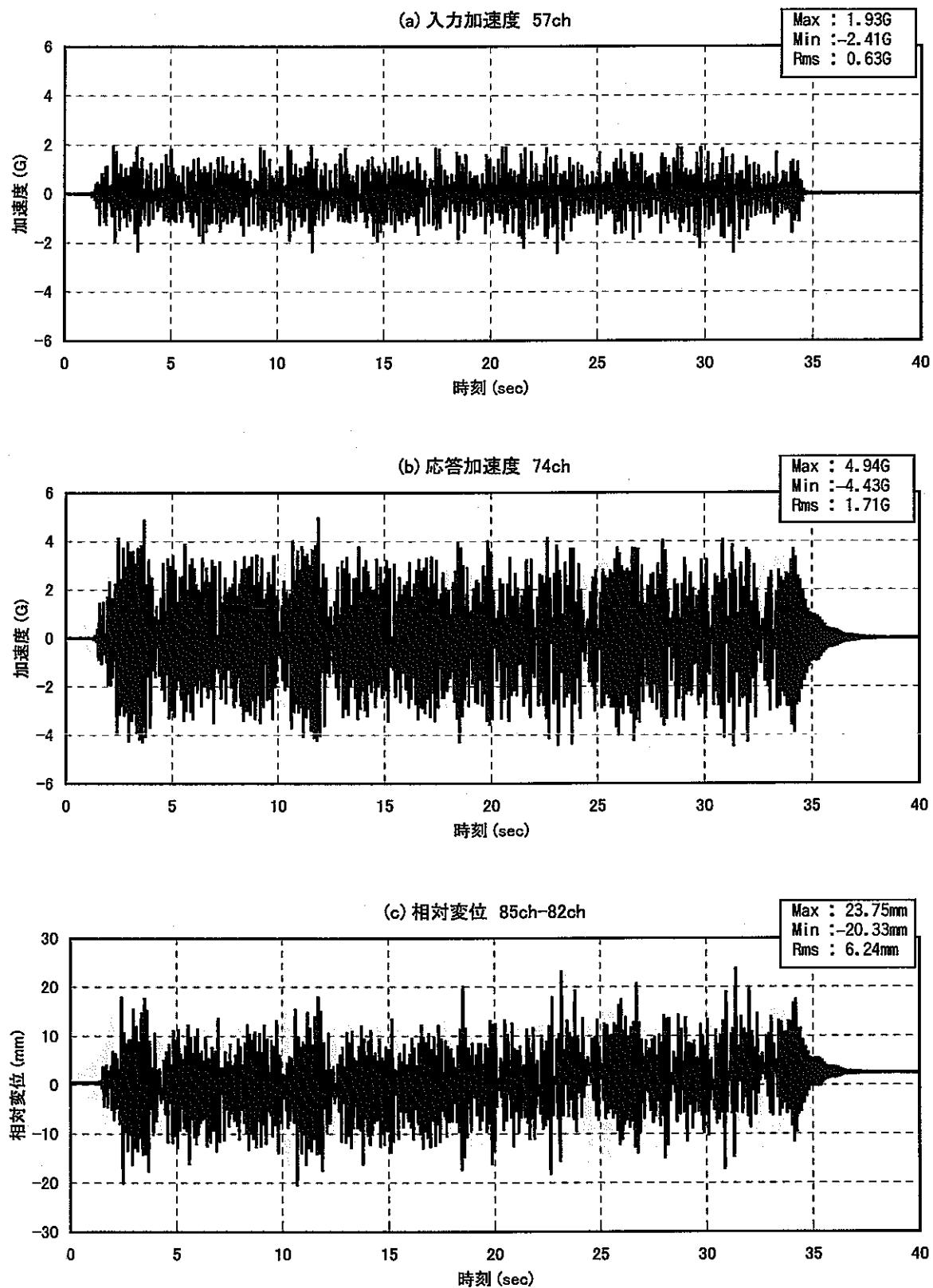


図3.1.4 定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M4)

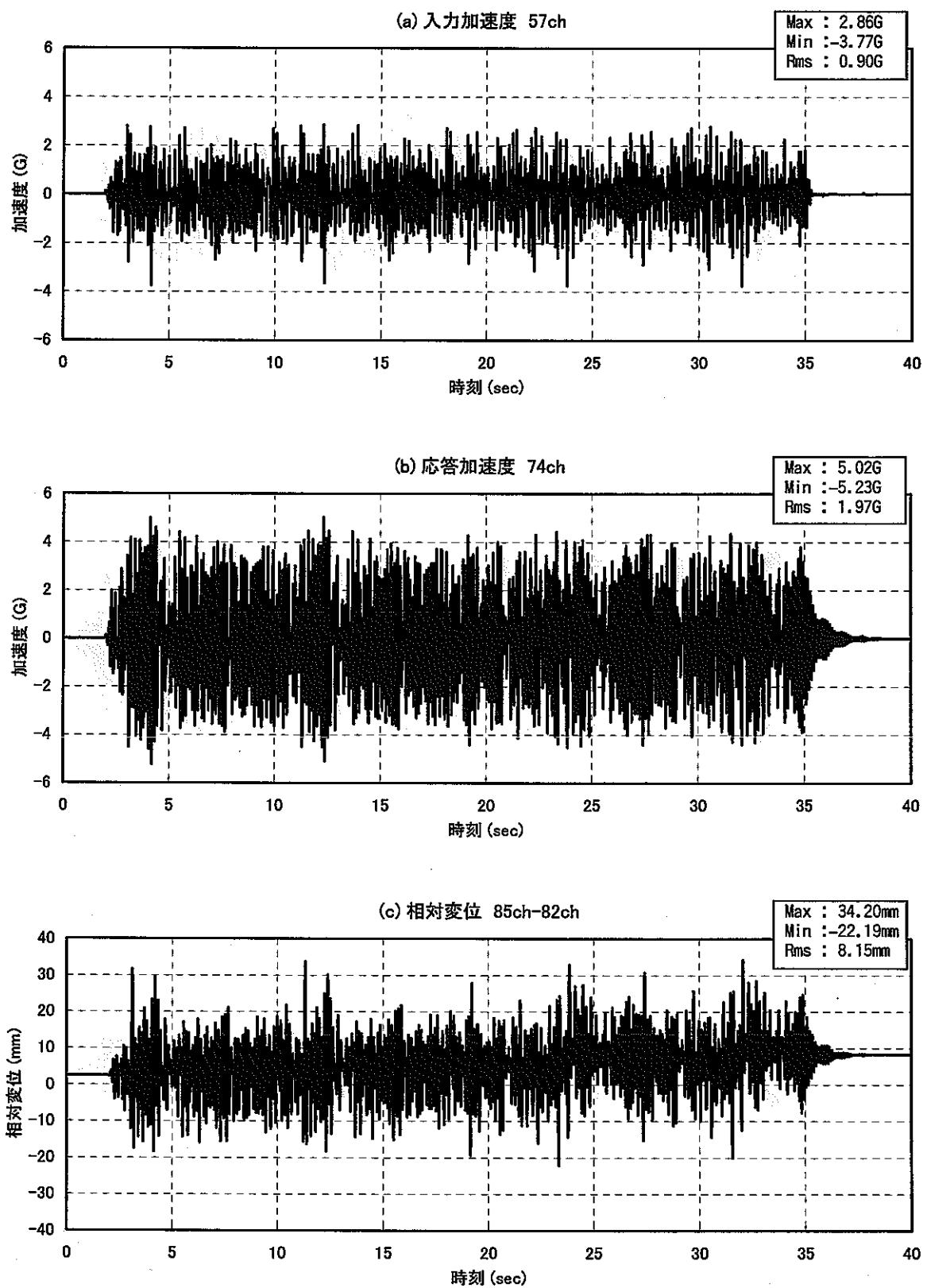


図3.1.5 定常ランダム波漸增加振試験の時刻歴 (M5)

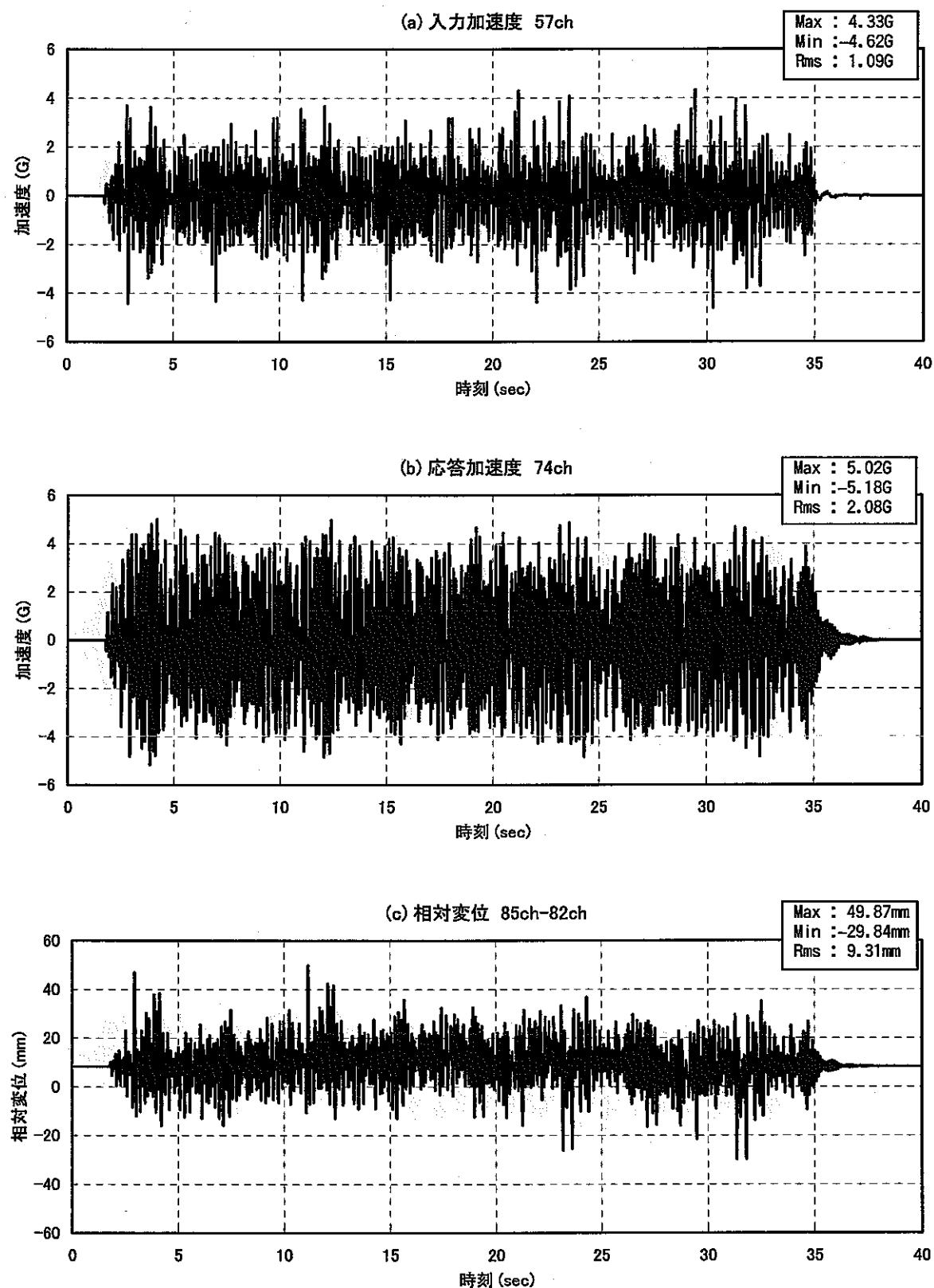


図3.1.6 定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M6)

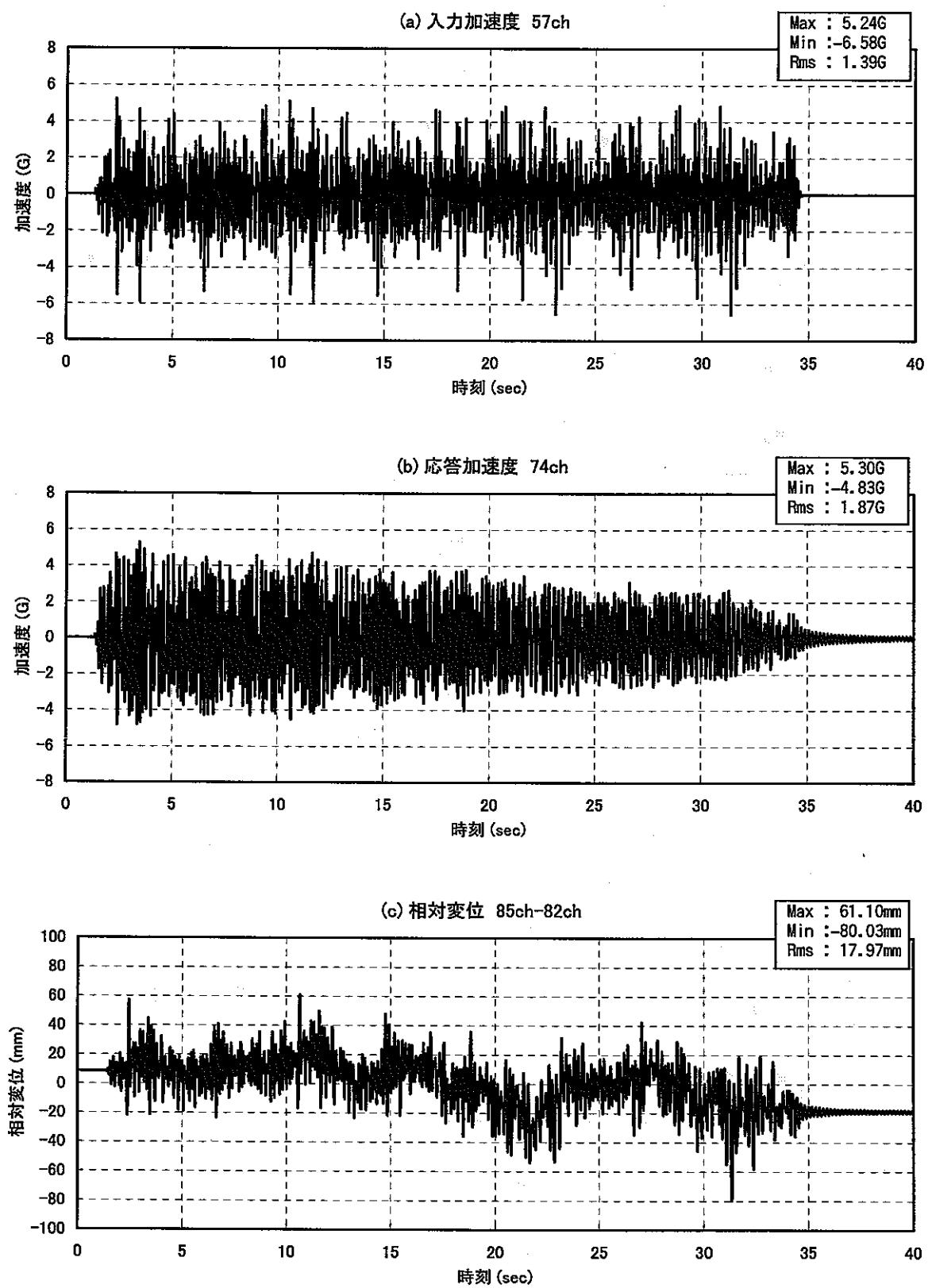


図3.1.7 定常ランダム波漸増加振試験の時刻歴 (M7)

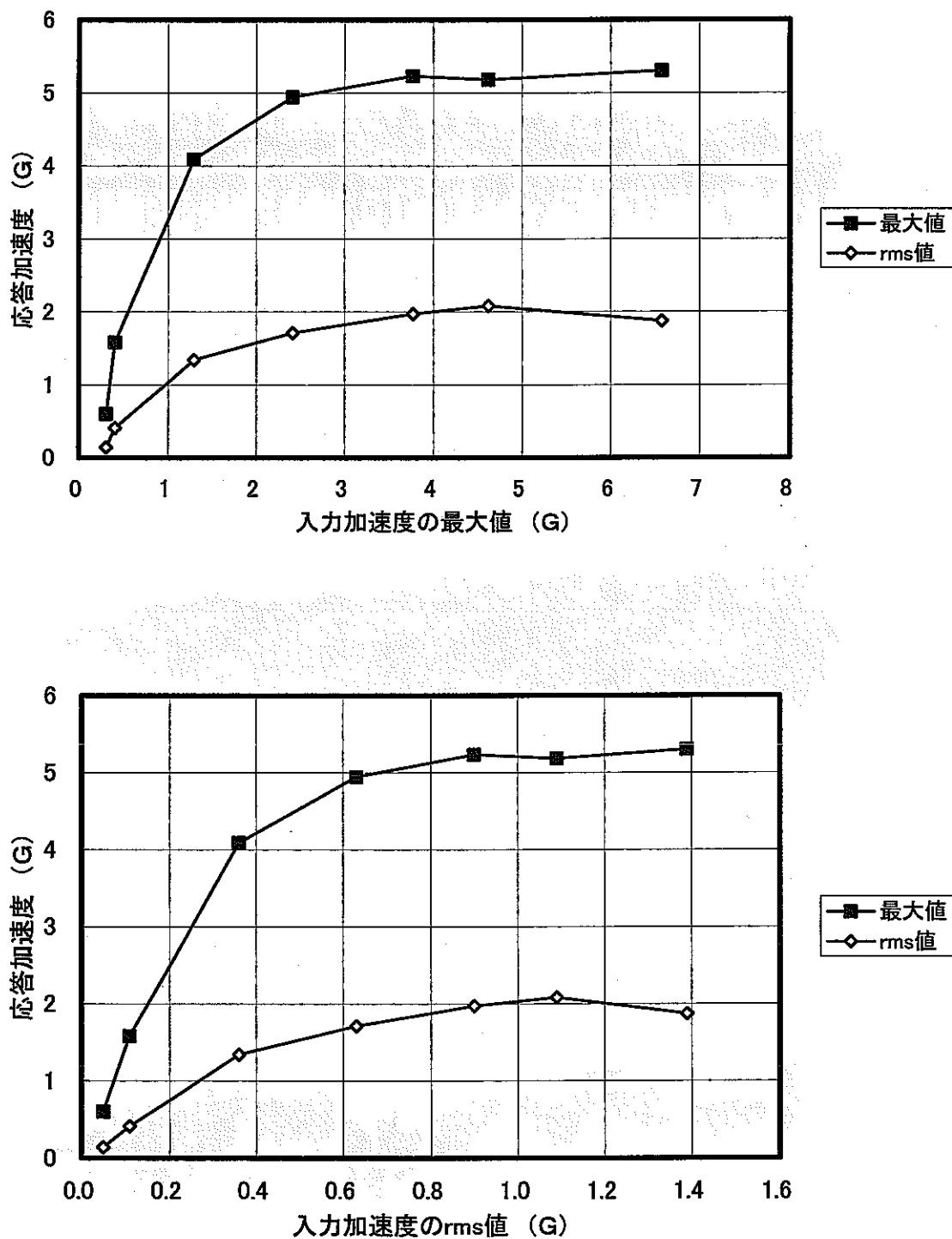
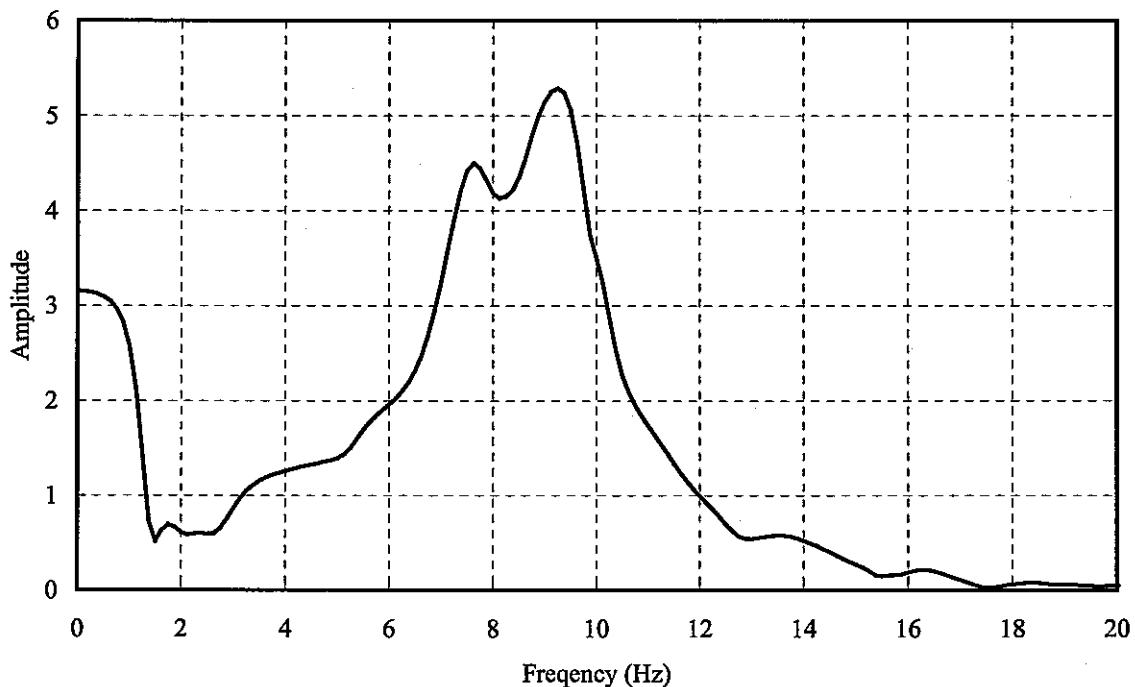
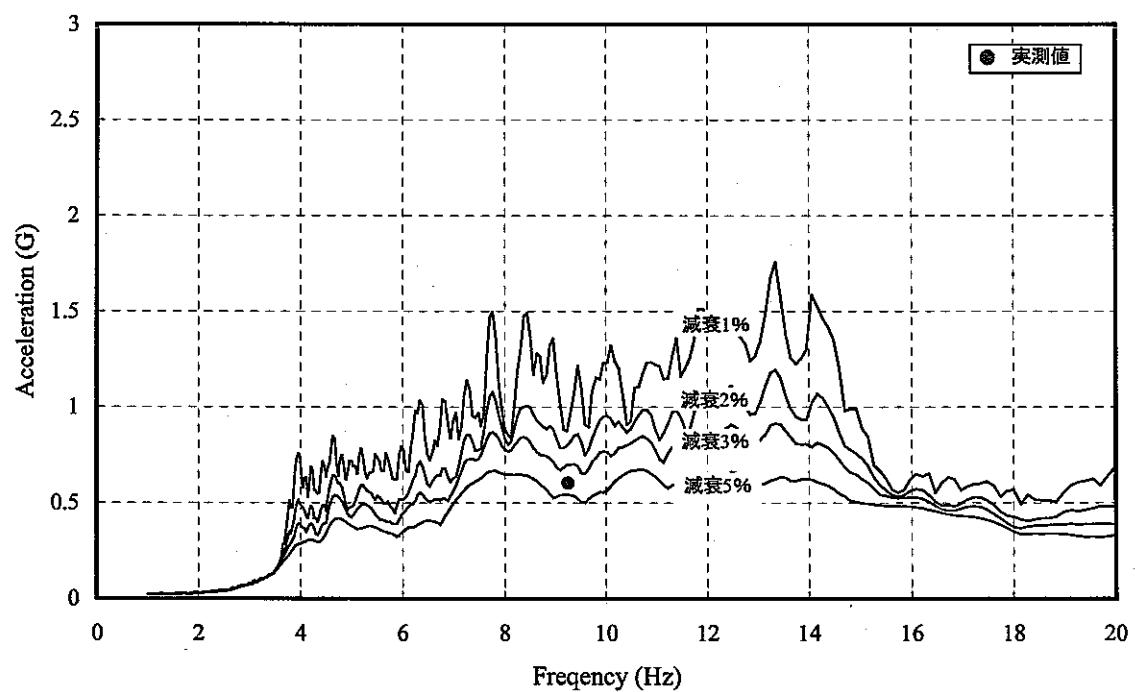


図3.1.8 入力加速度に対する応答加速度の推移

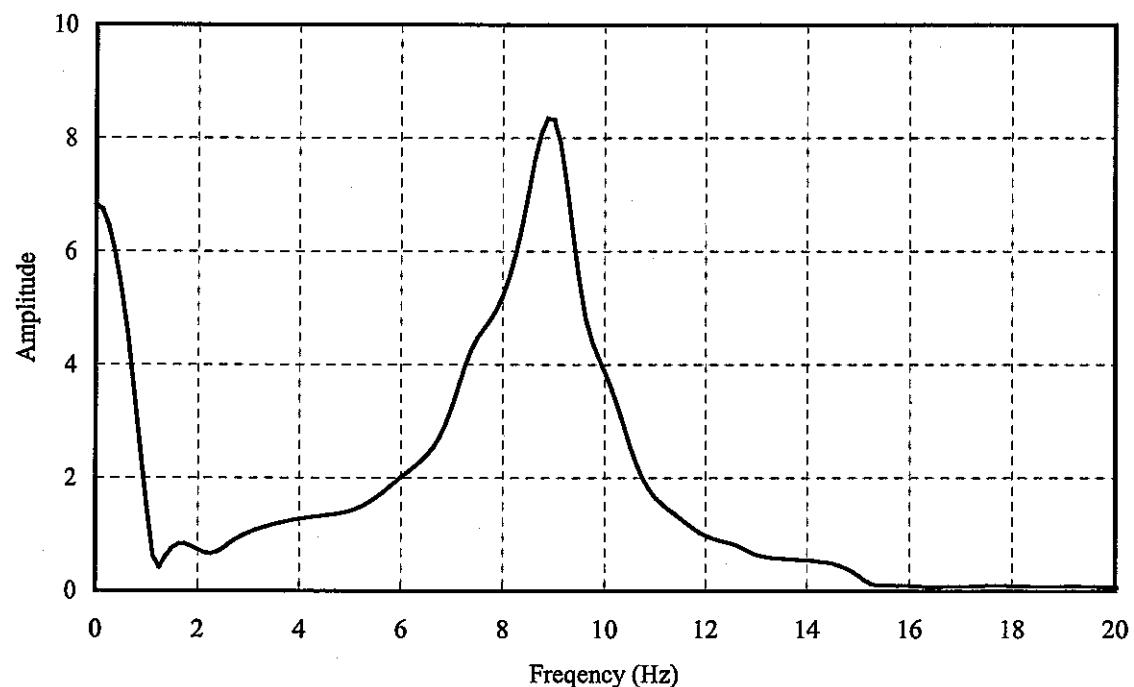


(a) 伝達関数

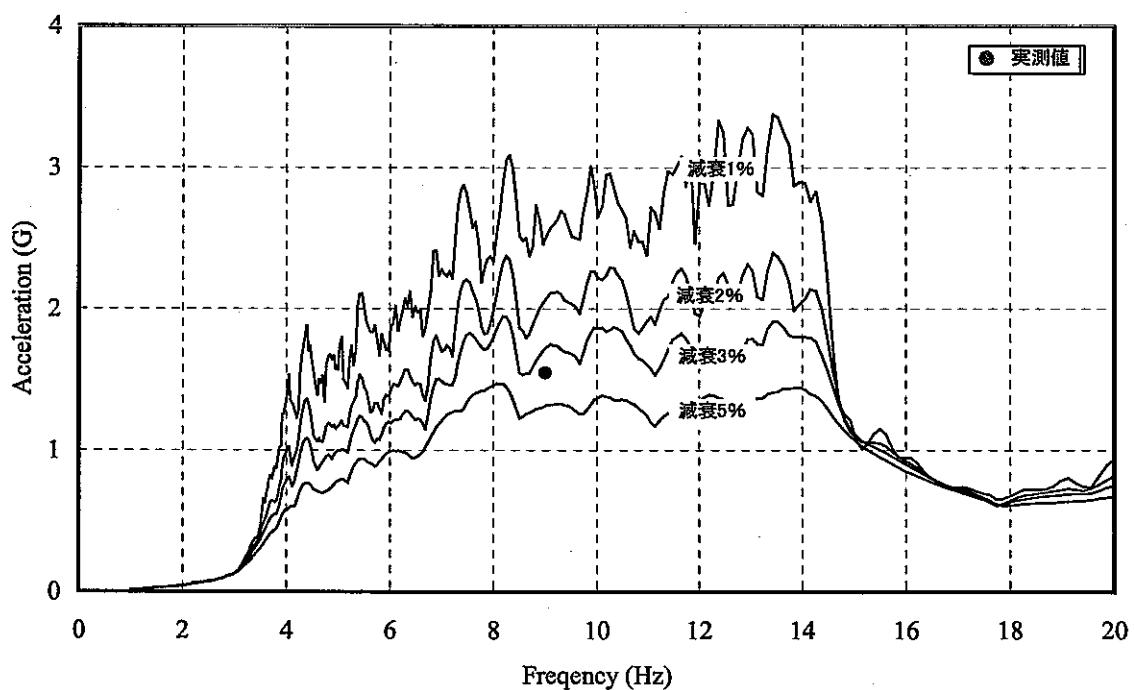


(b) 応答スペクトル

図 3.1.9 加振試験における周波数特性 (M1)

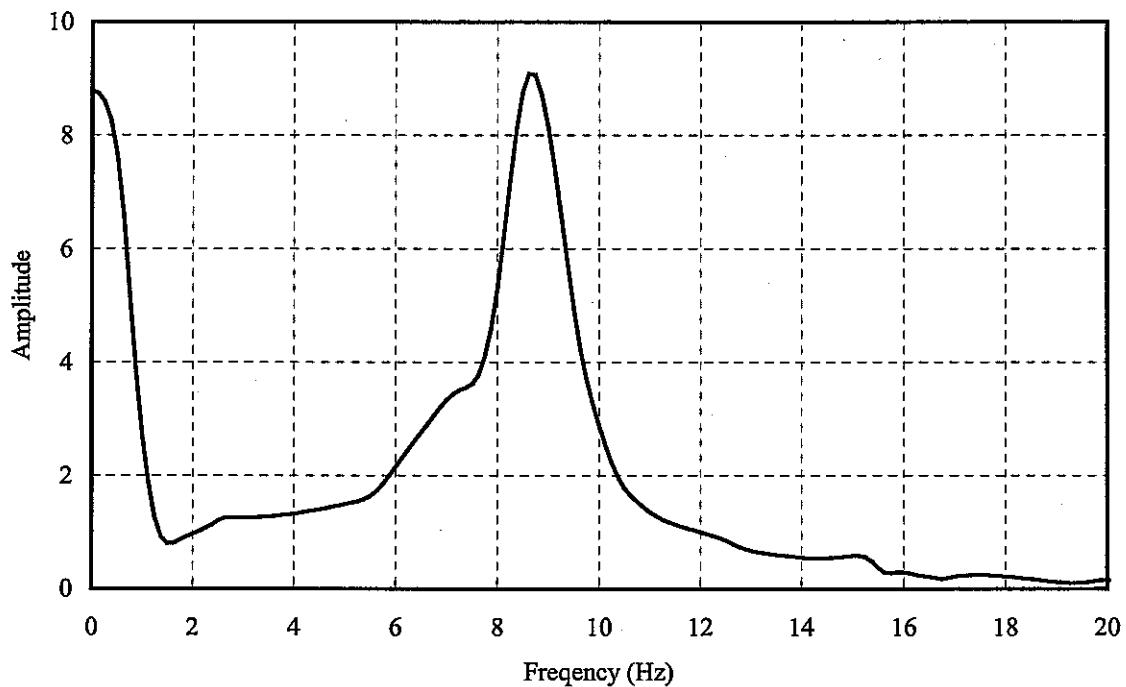


(a) 伝達関数

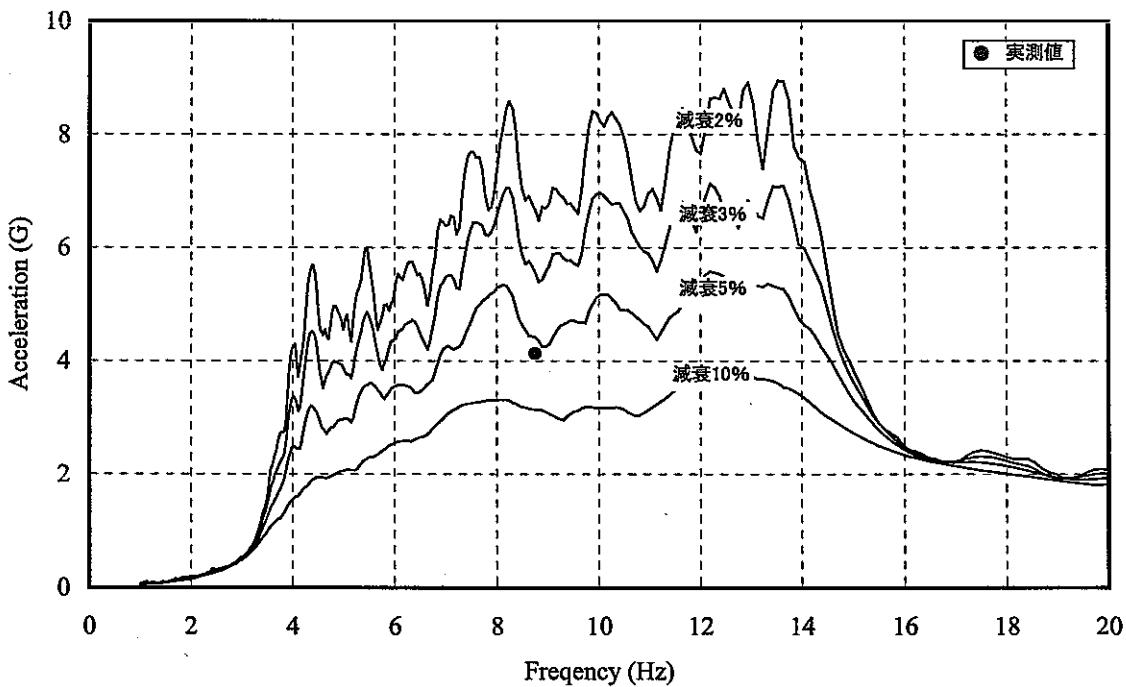


(b) 応答スペクトル

図 3.1.10 加振試験における周波数特性 (M2)

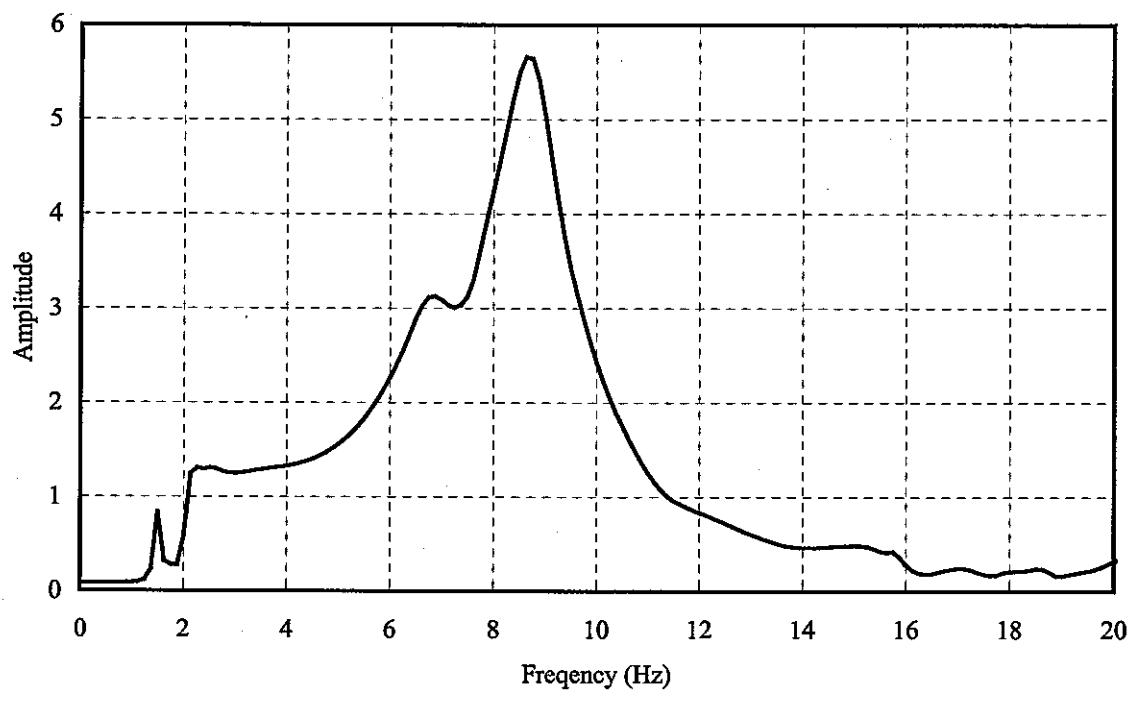


(a) 伝達関数

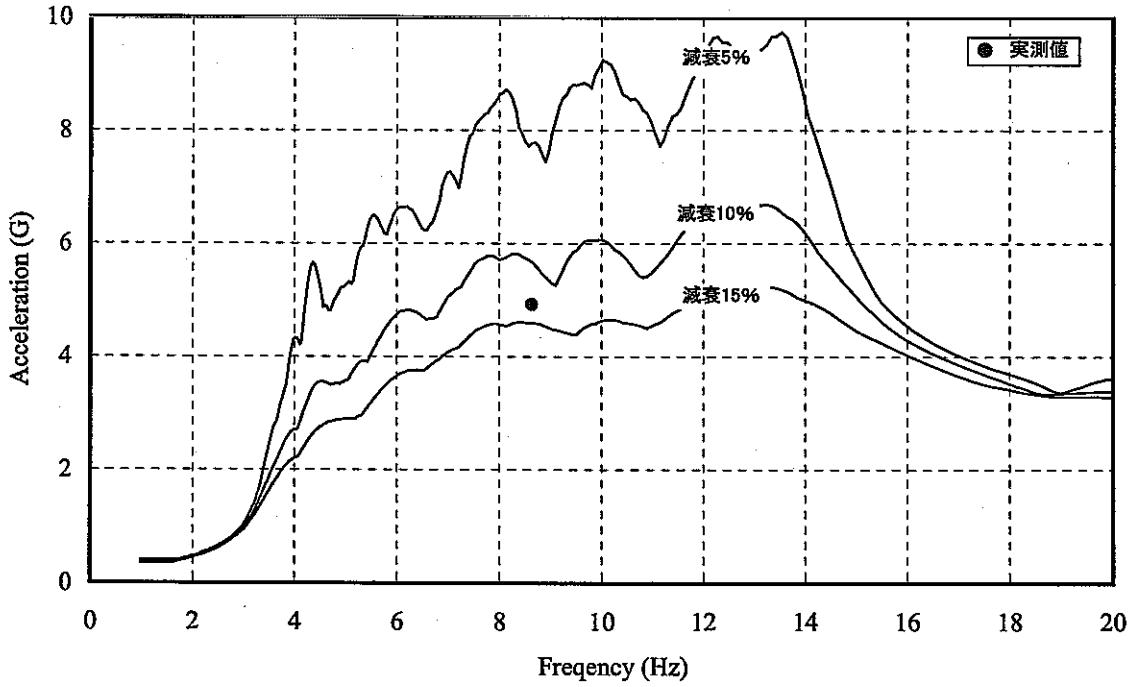


(b) 応答スペクトル

図 3.1.11 加振試験における周波数特性 (M3)

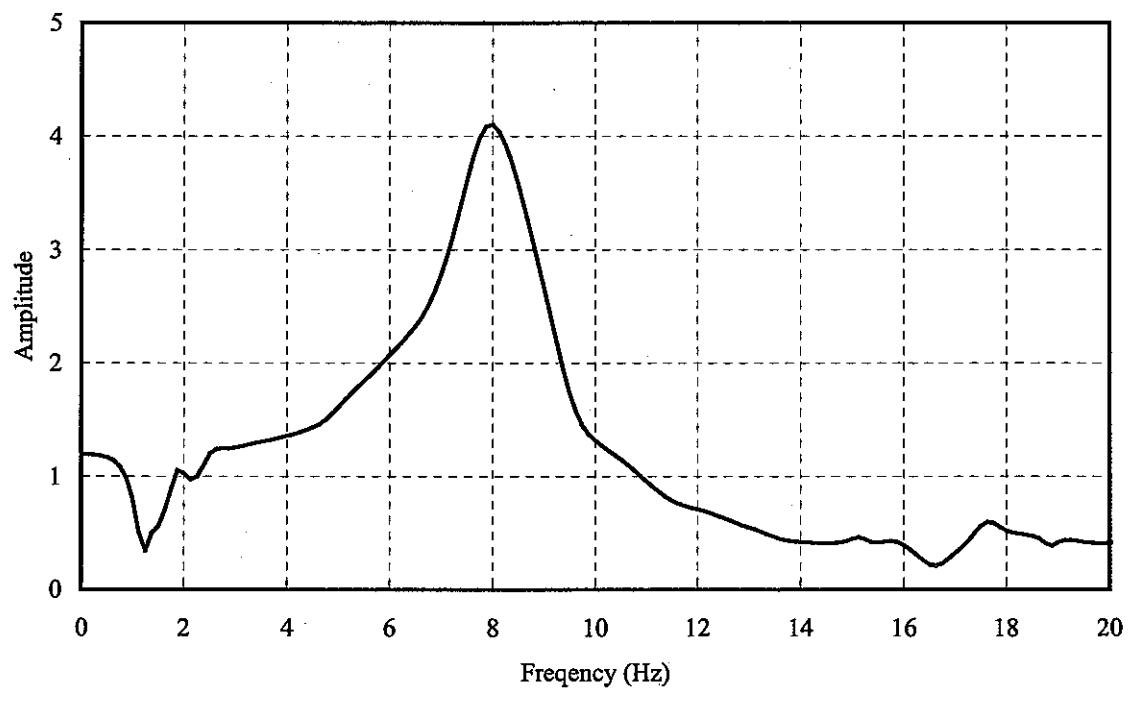


(a) 伝達関数

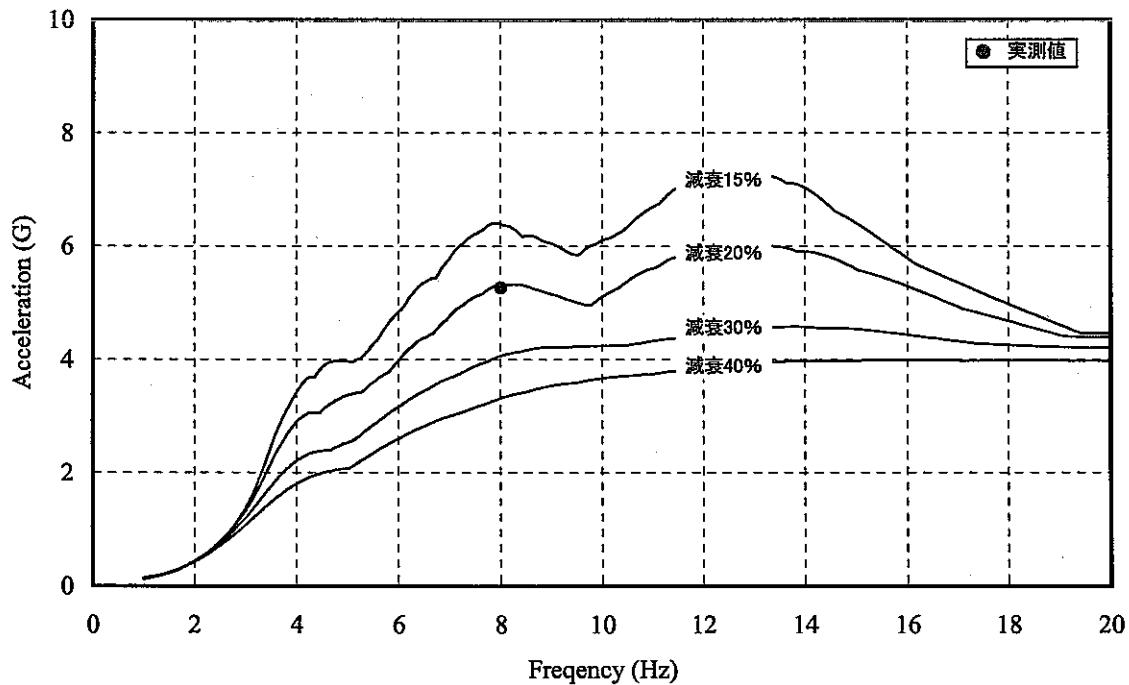


(b) 応答スペクトル

図 3.1.12 加振試験における周波数特性 (M4)

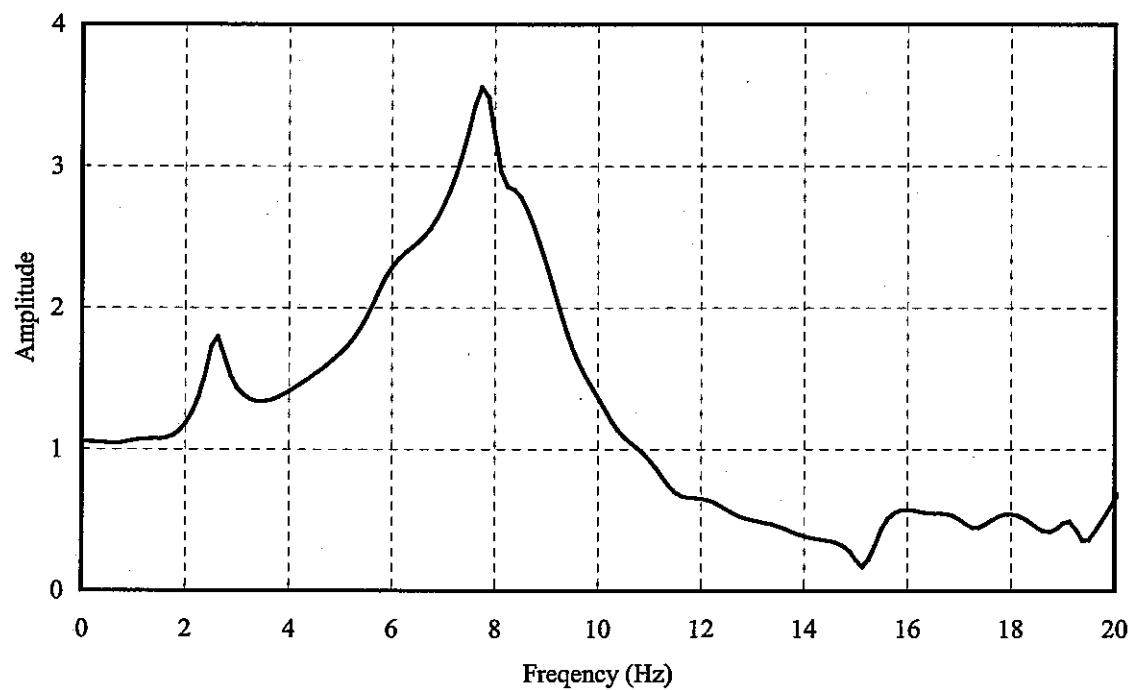


(a) 伝達関数

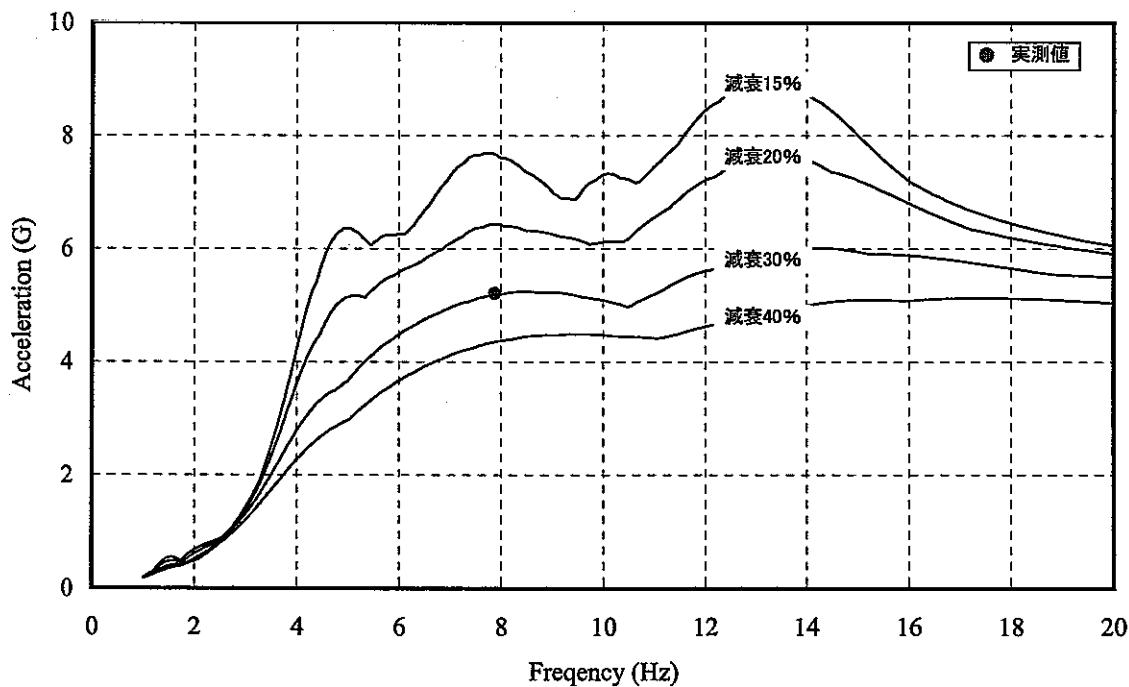


(b) 応答スペクトル

図 3.1.13 加振試験における周波数特性 (M5)

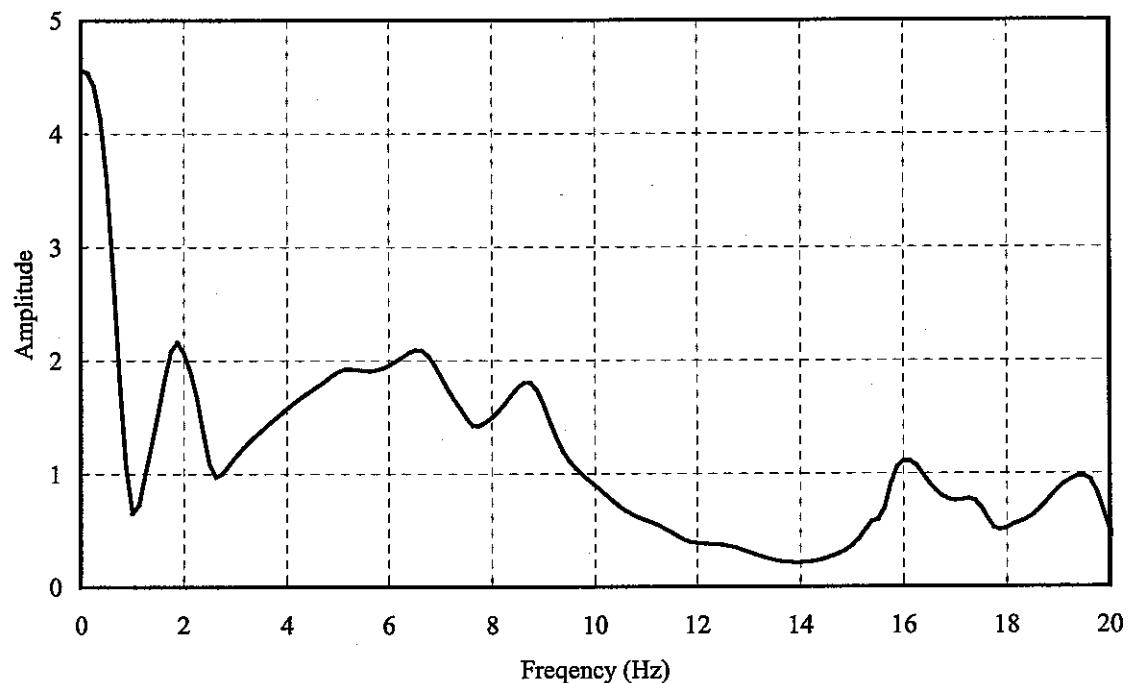


(a) 伝達関数

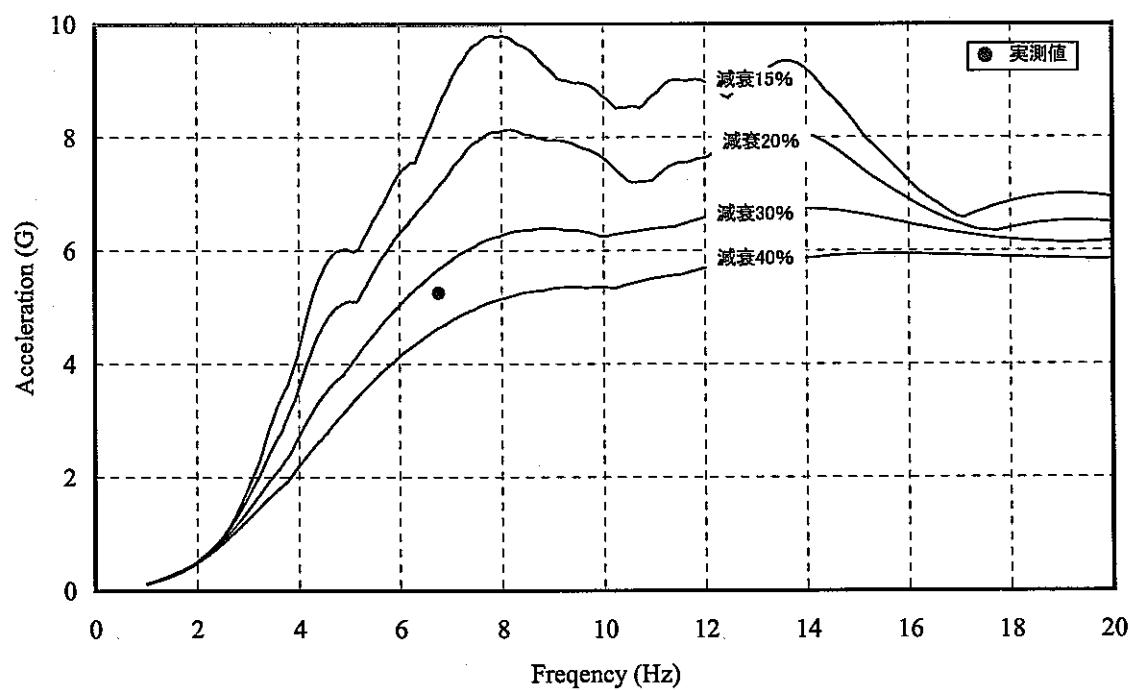


(b) 応答スペクトル

図 3.1.14 加振試験における周波数特性 (M6)



(a) 伝達関数



(b) 応答スペクトル

図 3.1.15 加振試験における周波数特性 (M7)

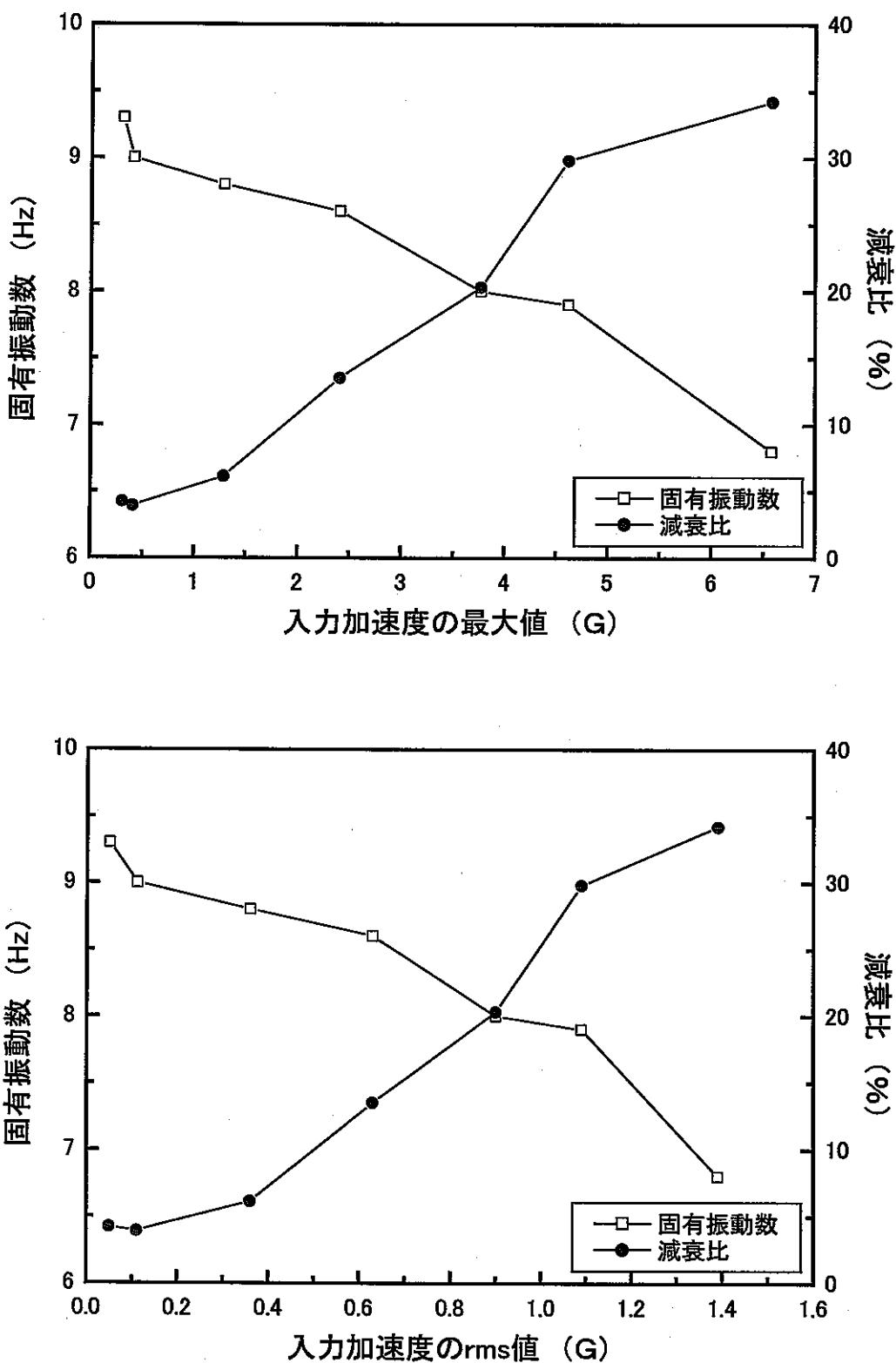


図 3.1.16 入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移

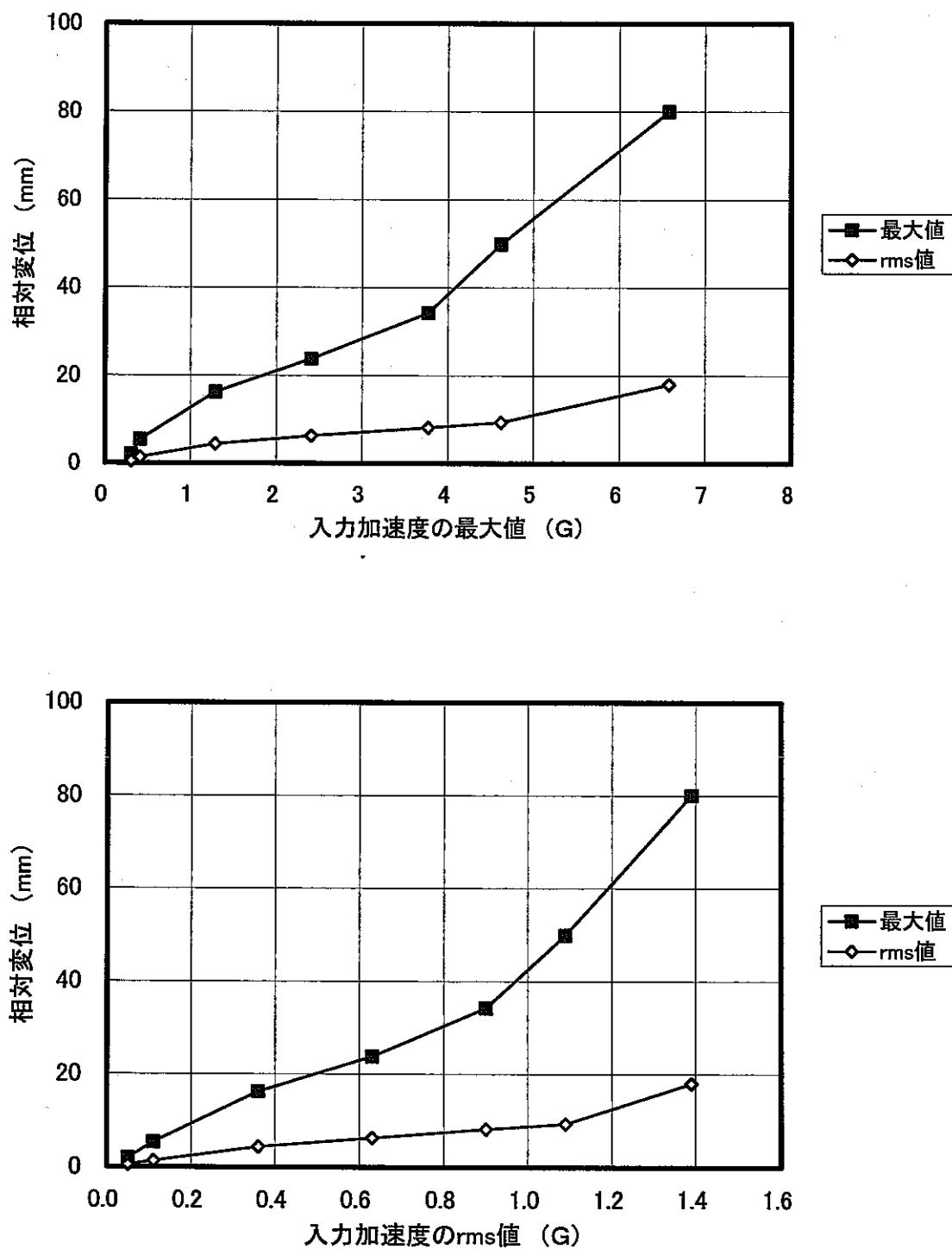


図3.2.1 入力加速度に対する相対変位の推移

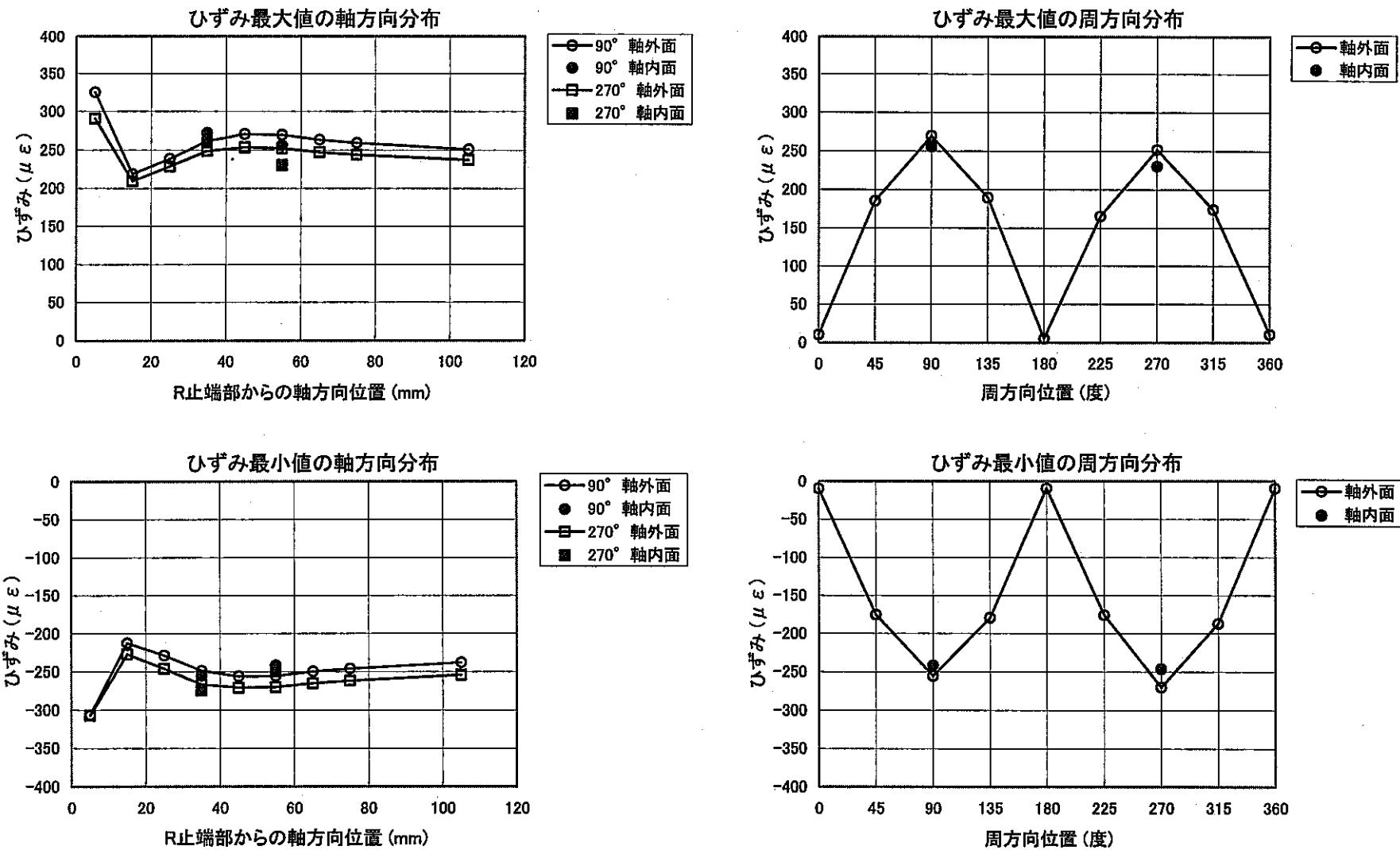


図 3.3.1 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M1)

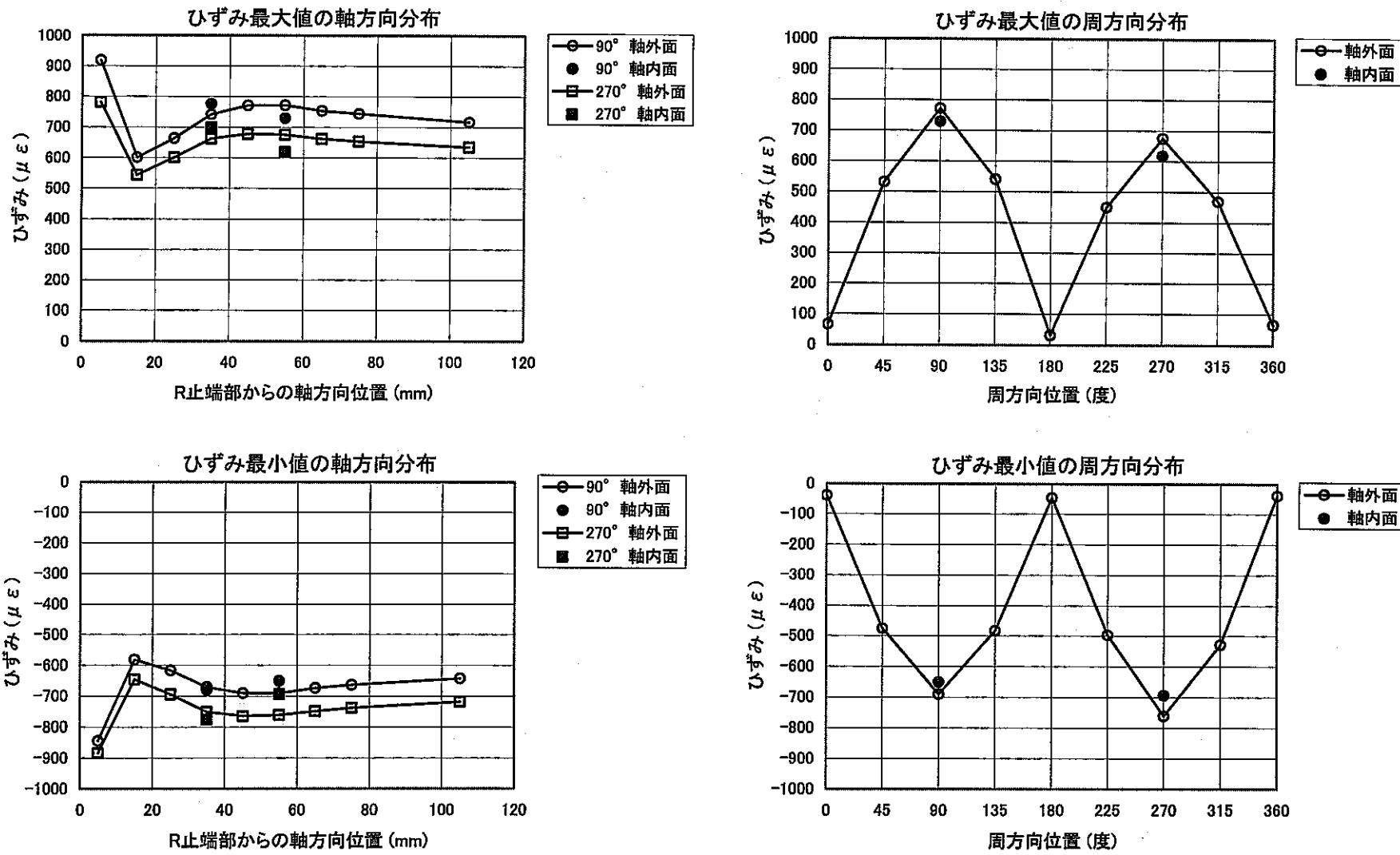


図 3.3.2 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M2)

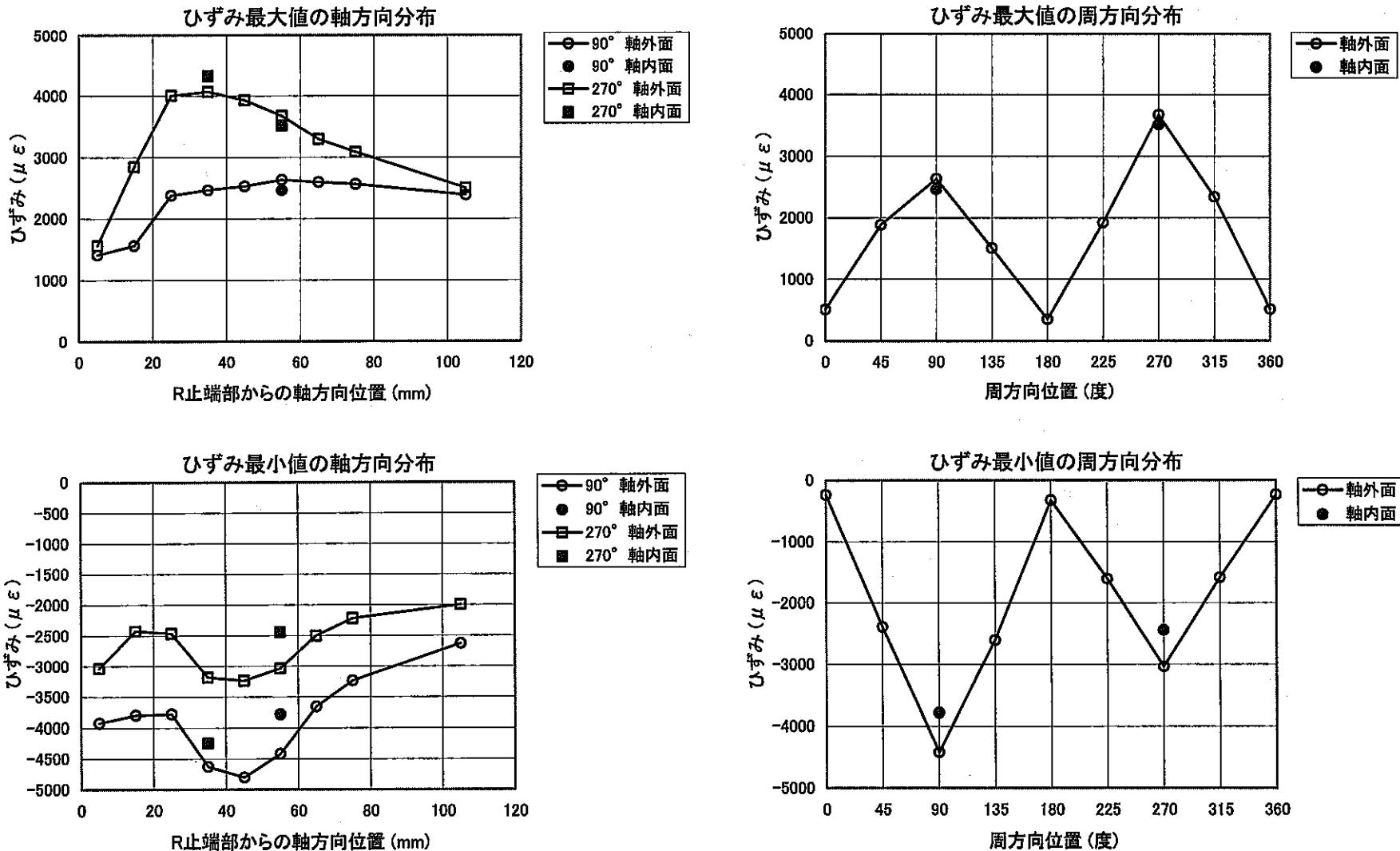


図 3.3.3 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M3)

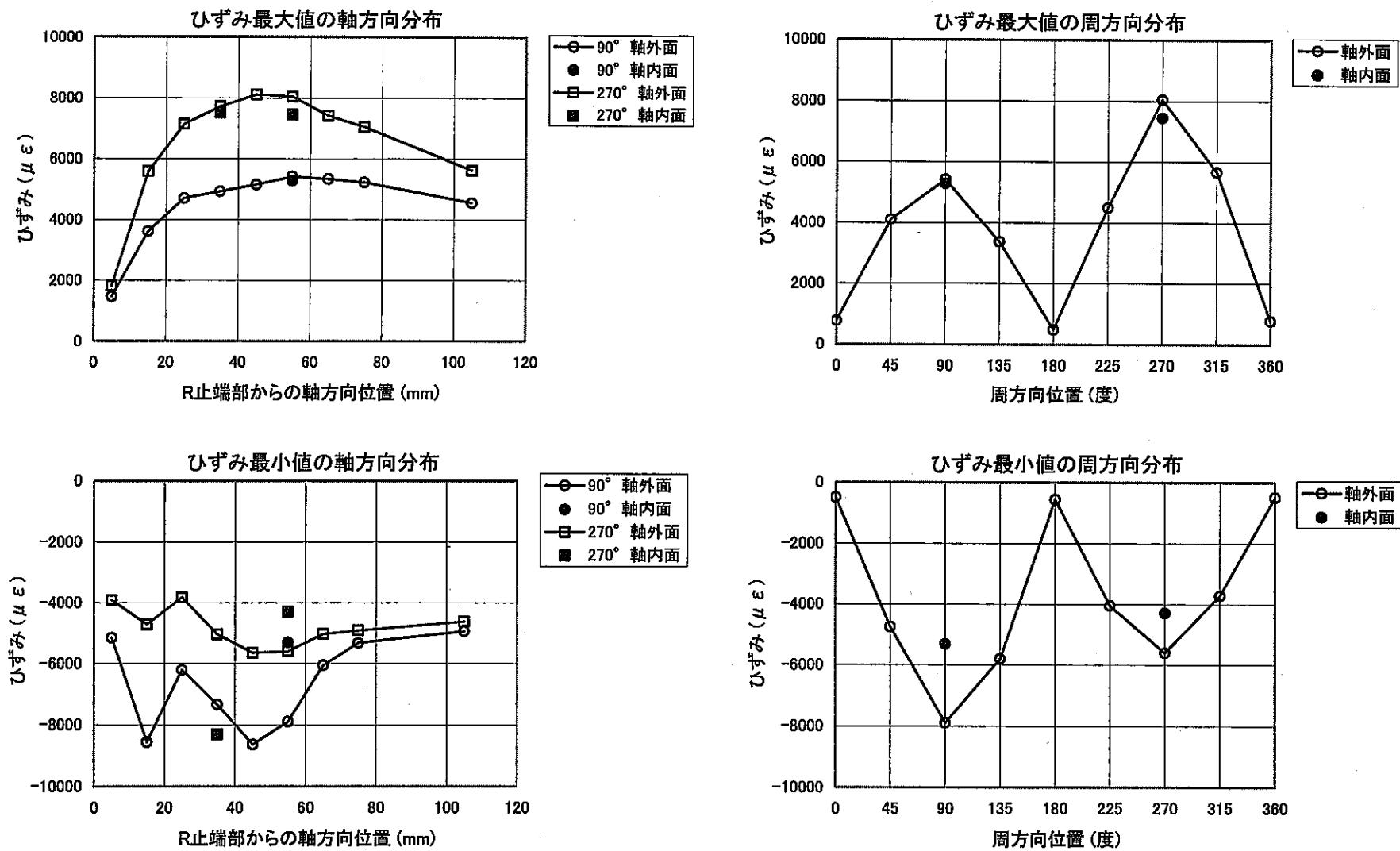


図 3.3.4 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M4)

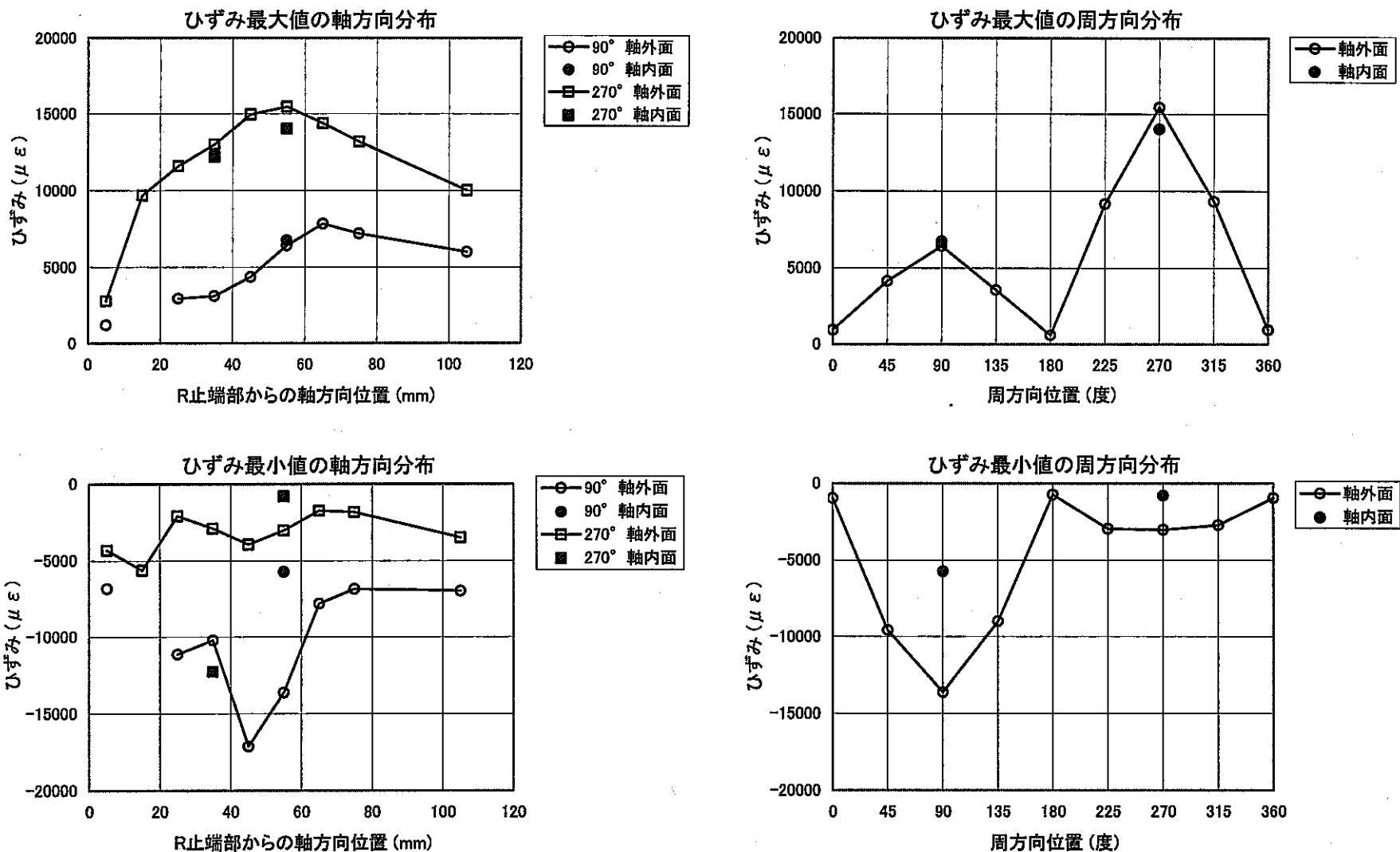


図 3.3.5 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M5)

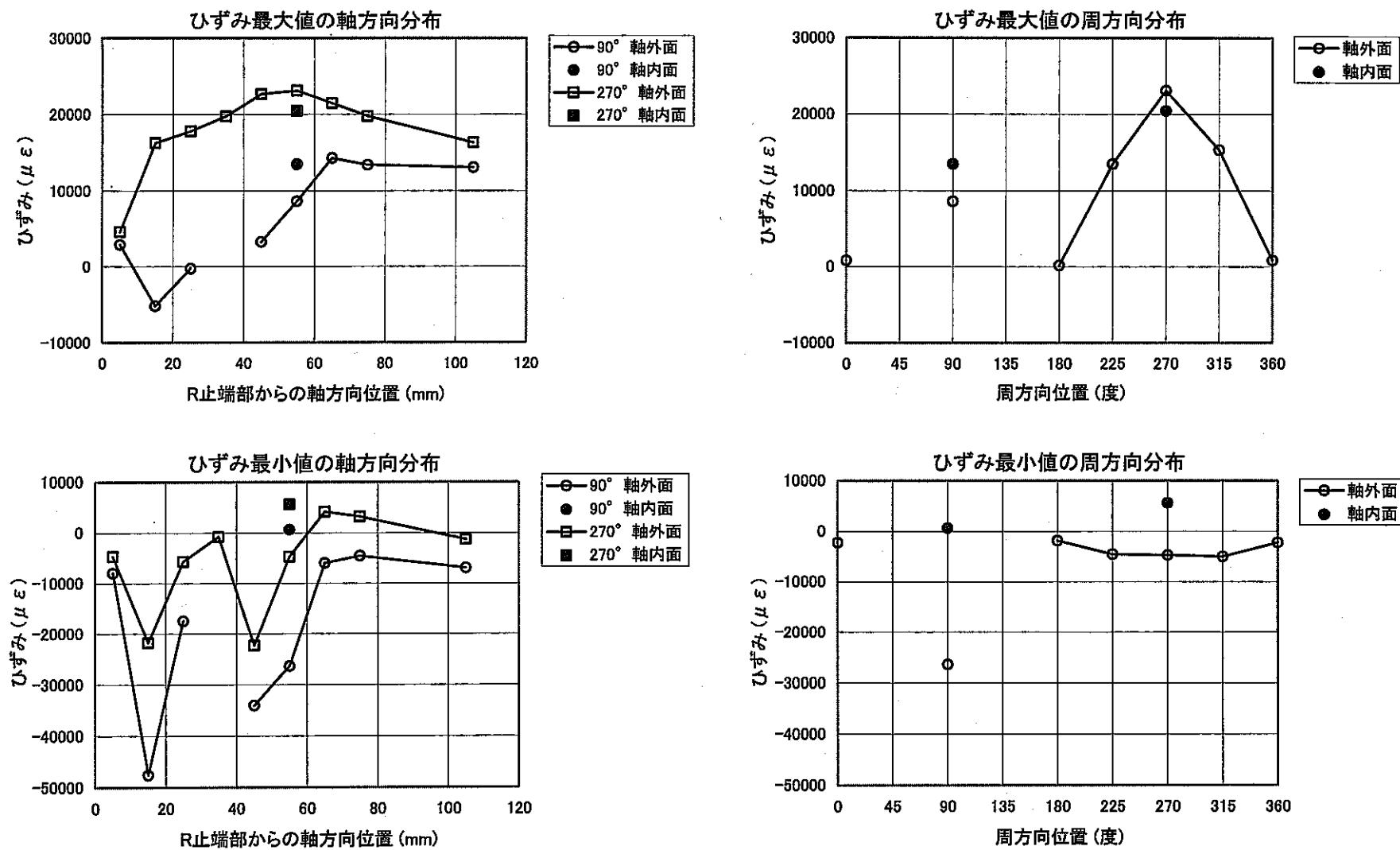


図 3.3.6 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M6)

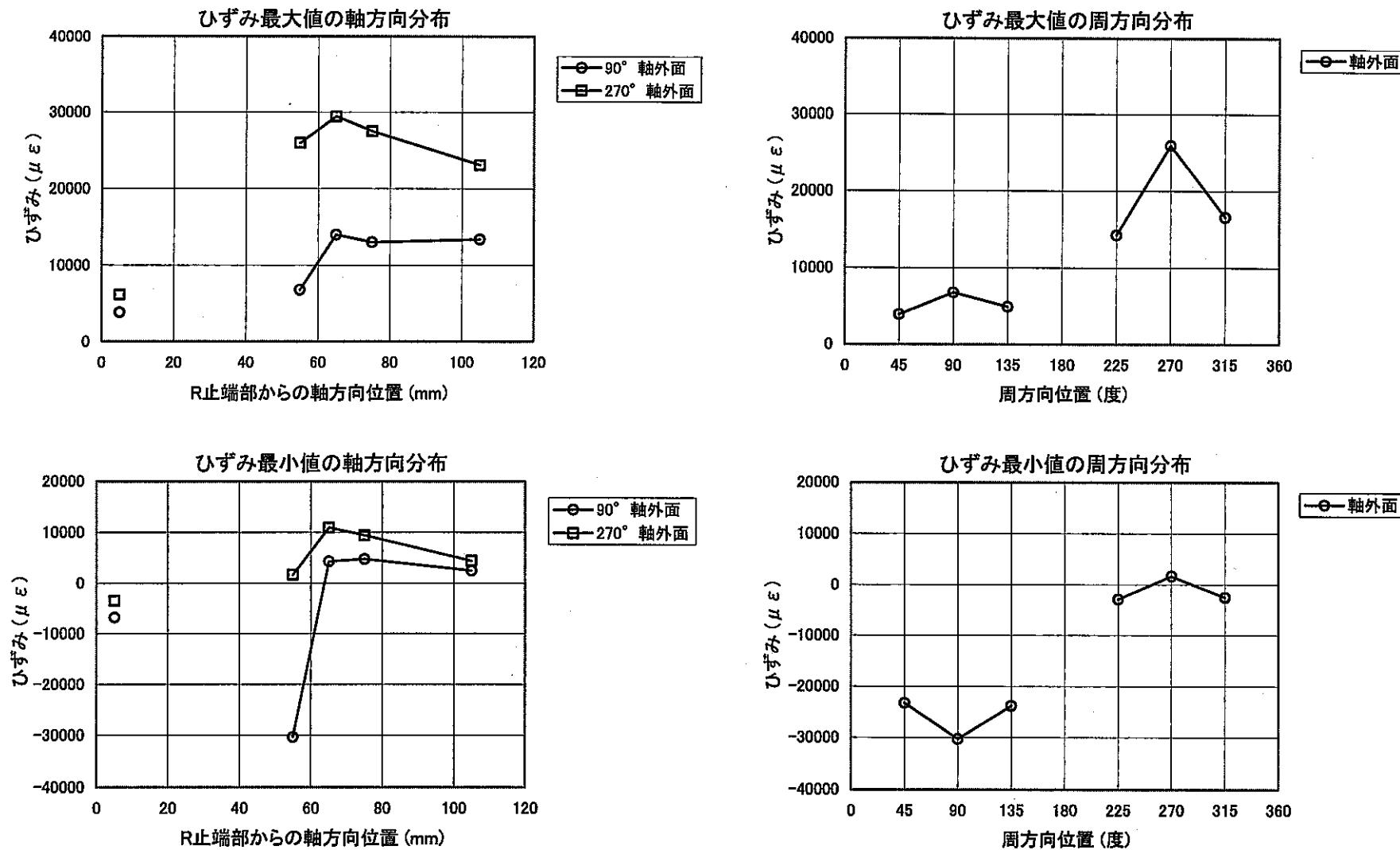


図 3.3.7 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(M7)

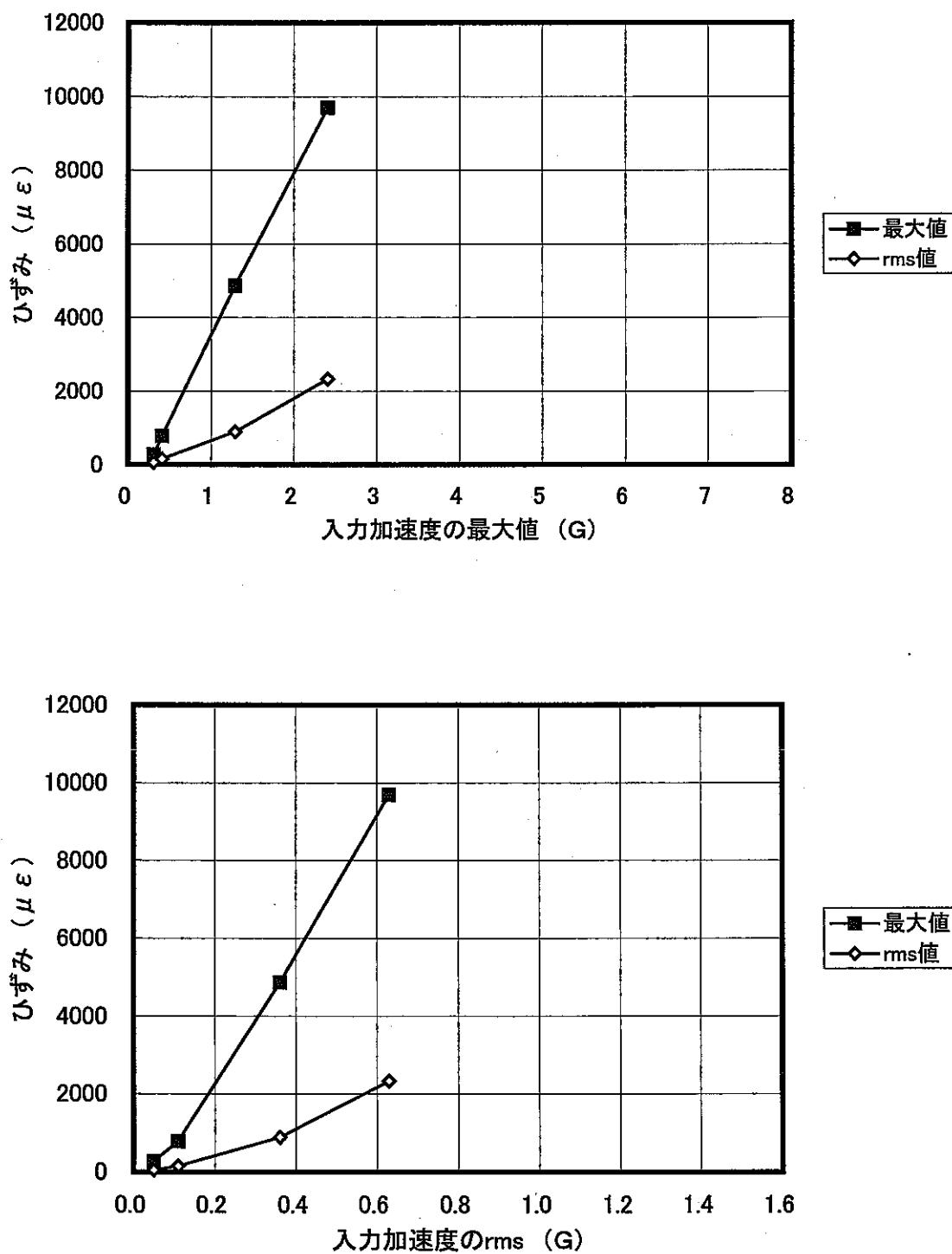


図3.3.8 入力加速度に対するひずみ(53ch)の推移

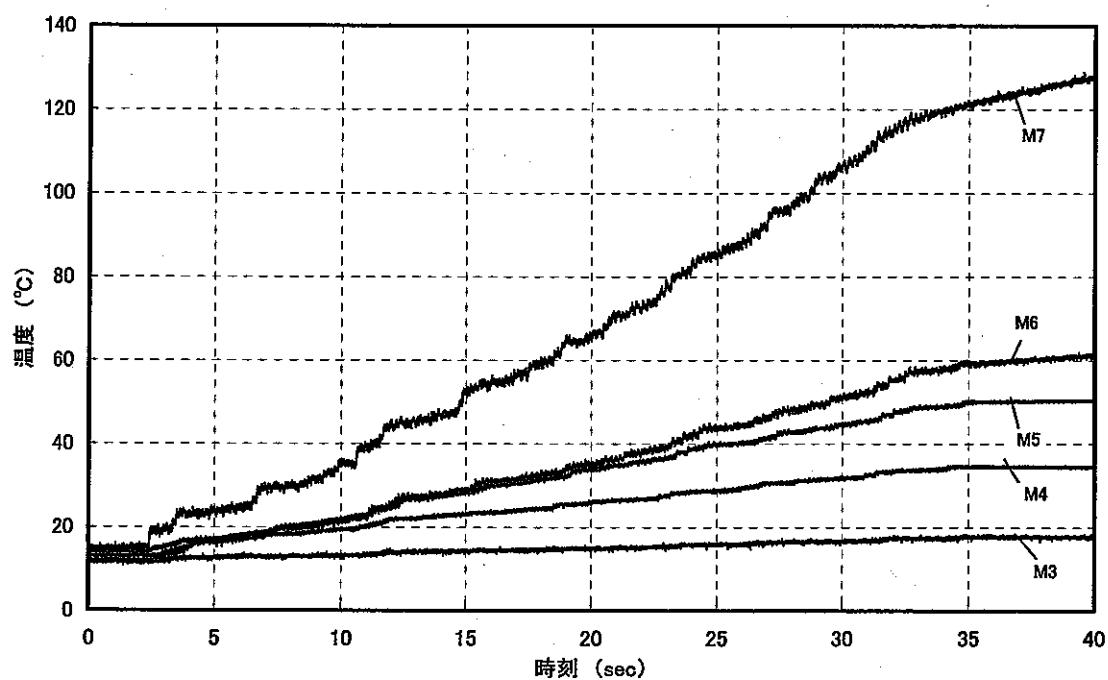


図 3.4.1 温度の時刻歴（定常ランダム波漸増加振試験）

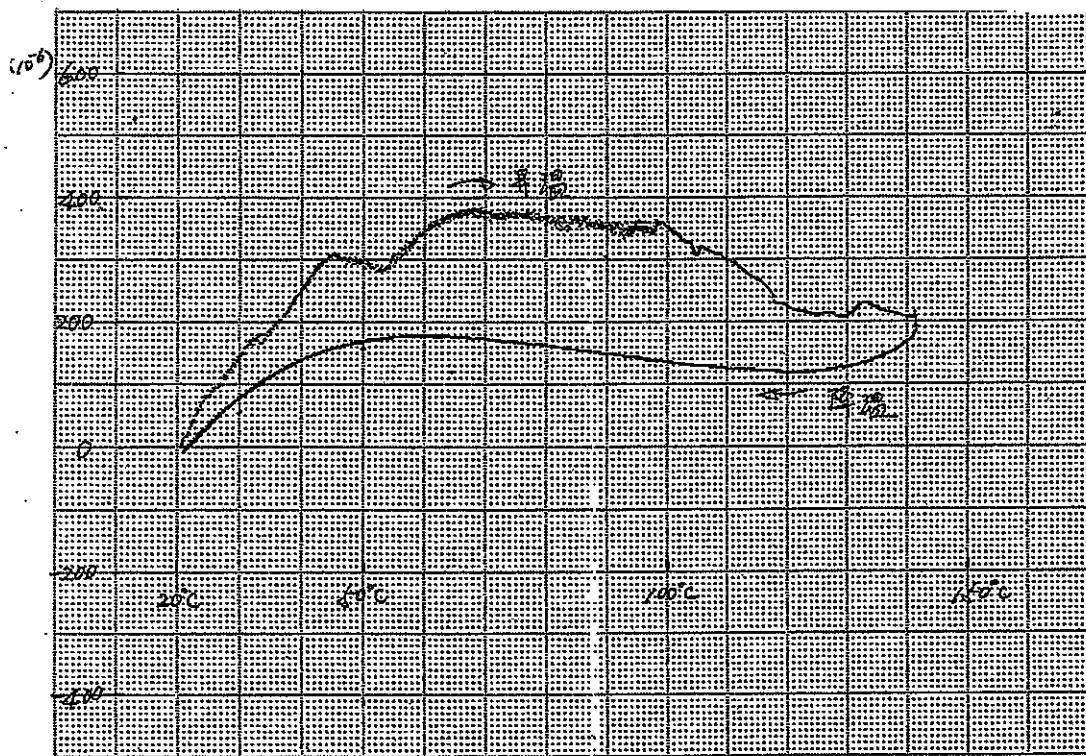


図 3.4.2 表面温度の変化に対するひずみ計測値の変化

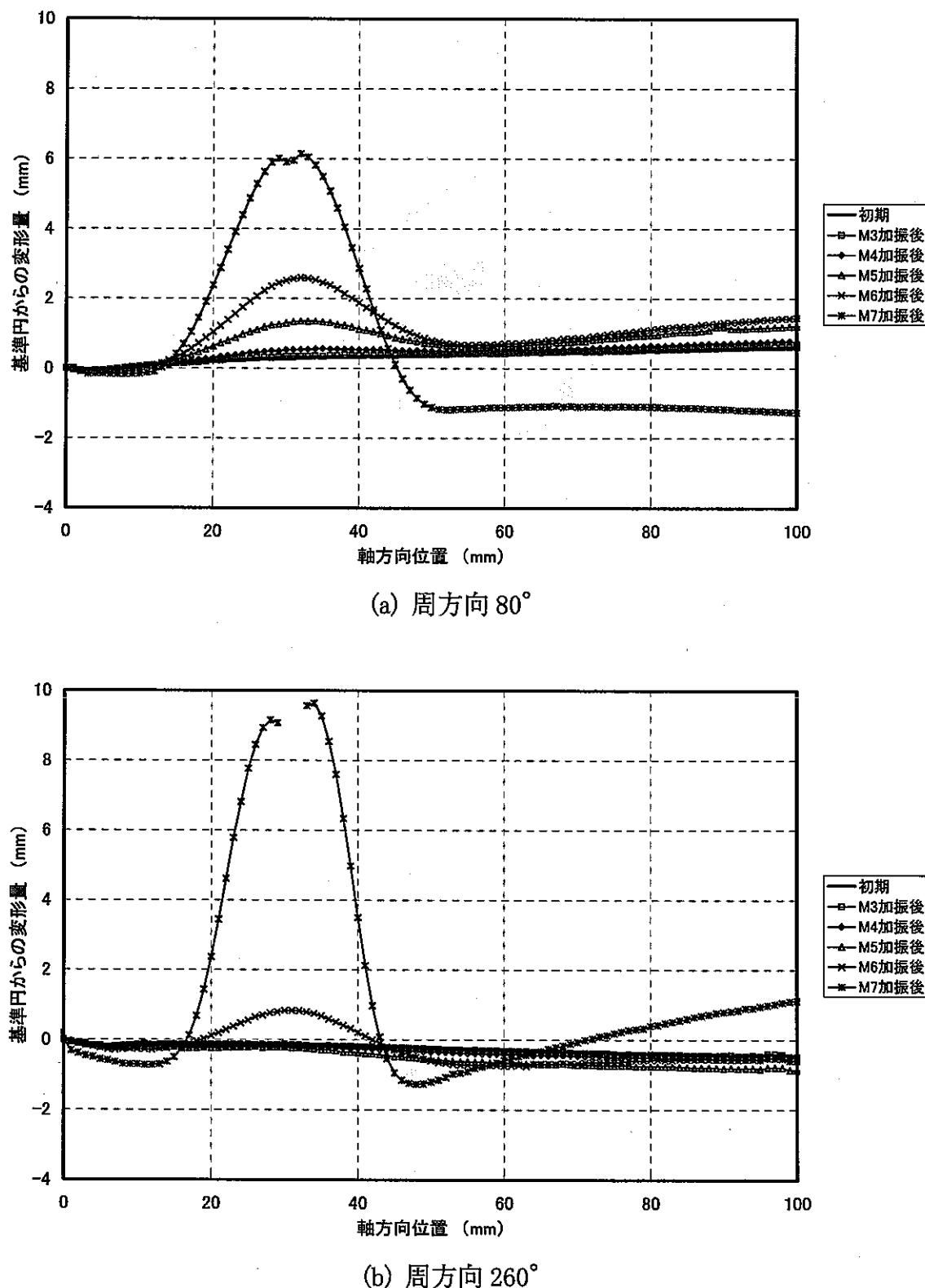


図 3.5.1 各加振レベルにおける試験体の形状計測結果

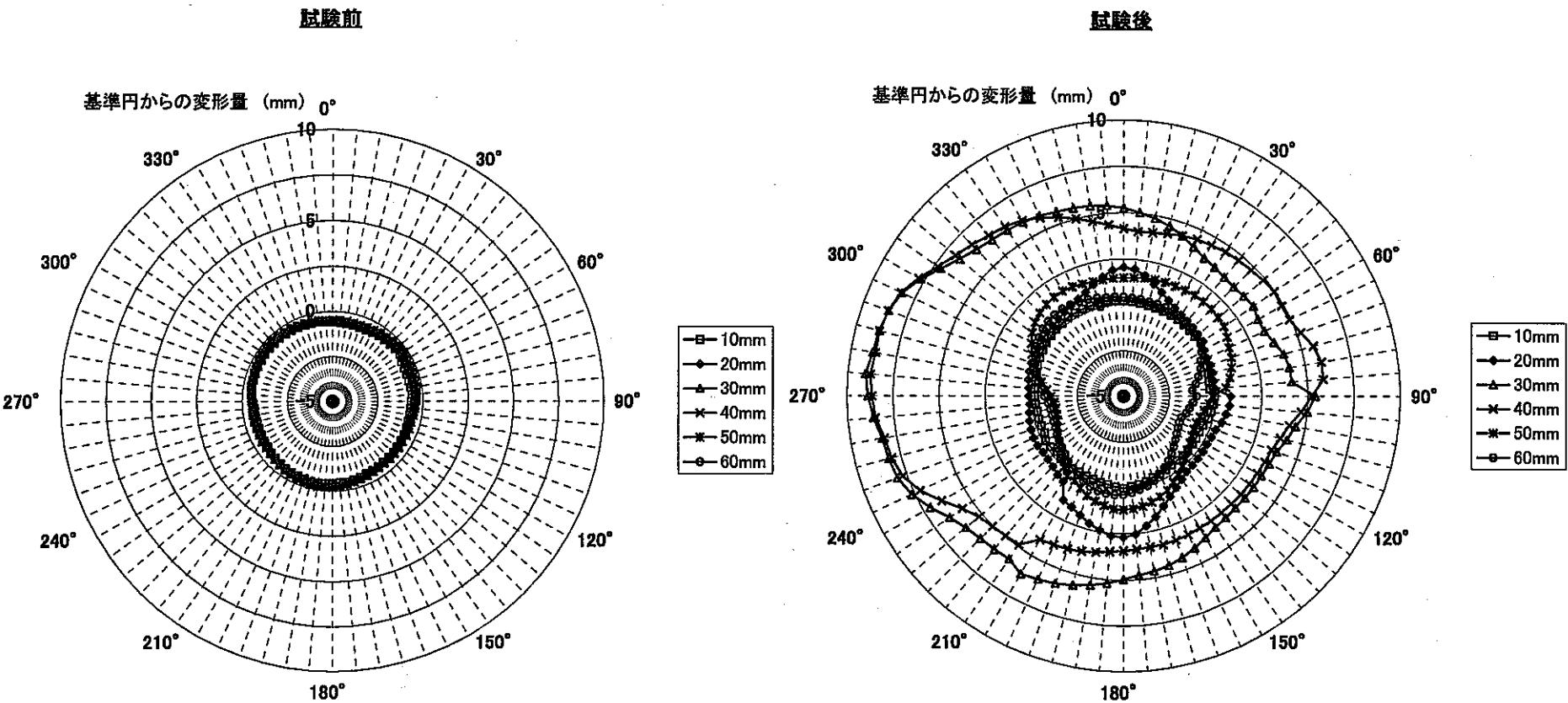


図 3.5.2 試験前後の試験体形状計測結果の比較

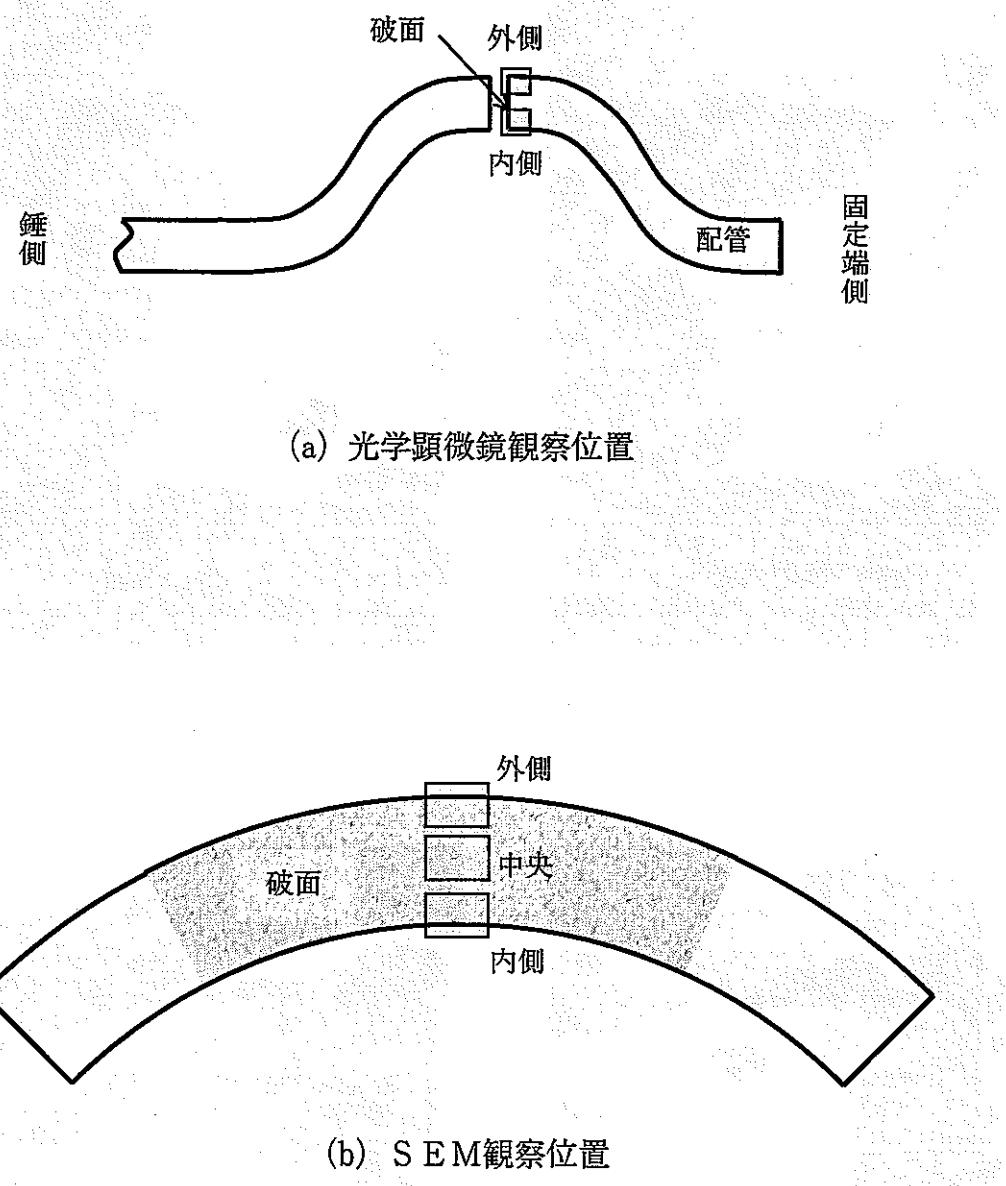
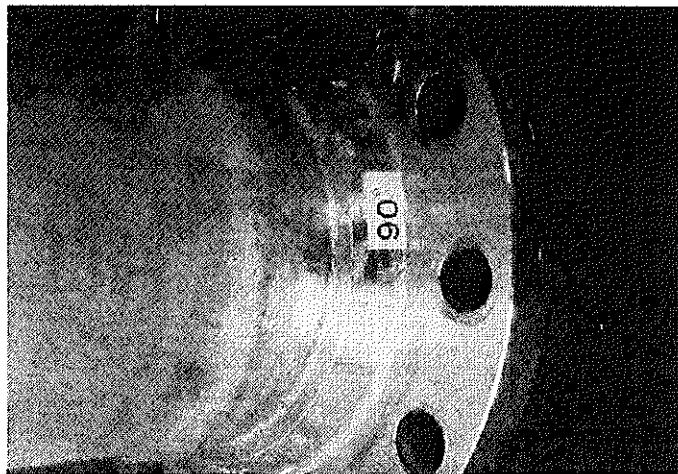
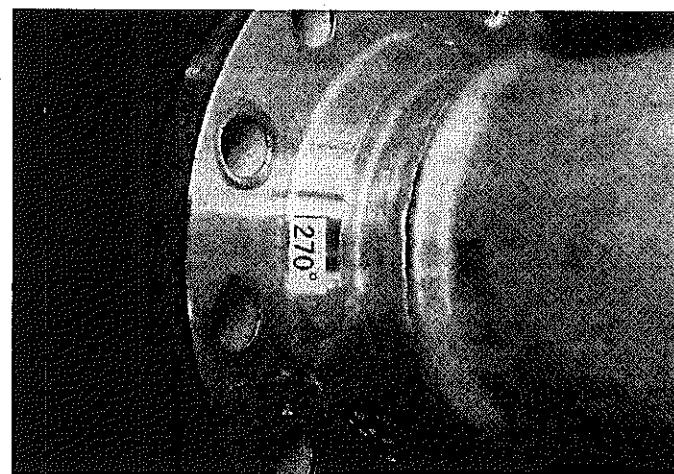


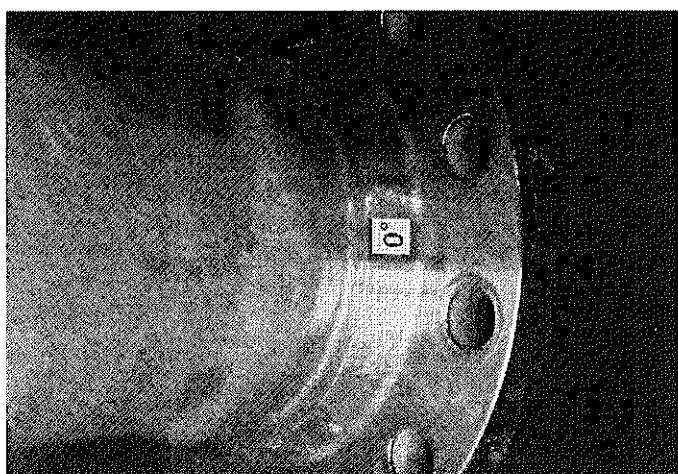
図 3.6.1 破面観察位置



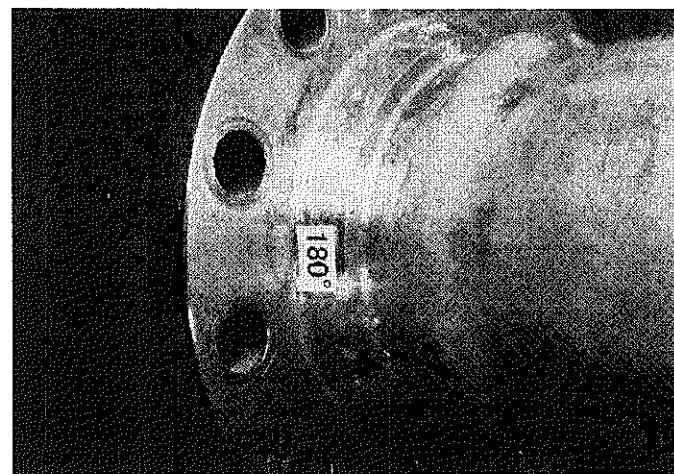
90°



270°



0°



180°

写真 3.6.1 き裂発生部付近の様子（定常ランダム波漸増加振試験）

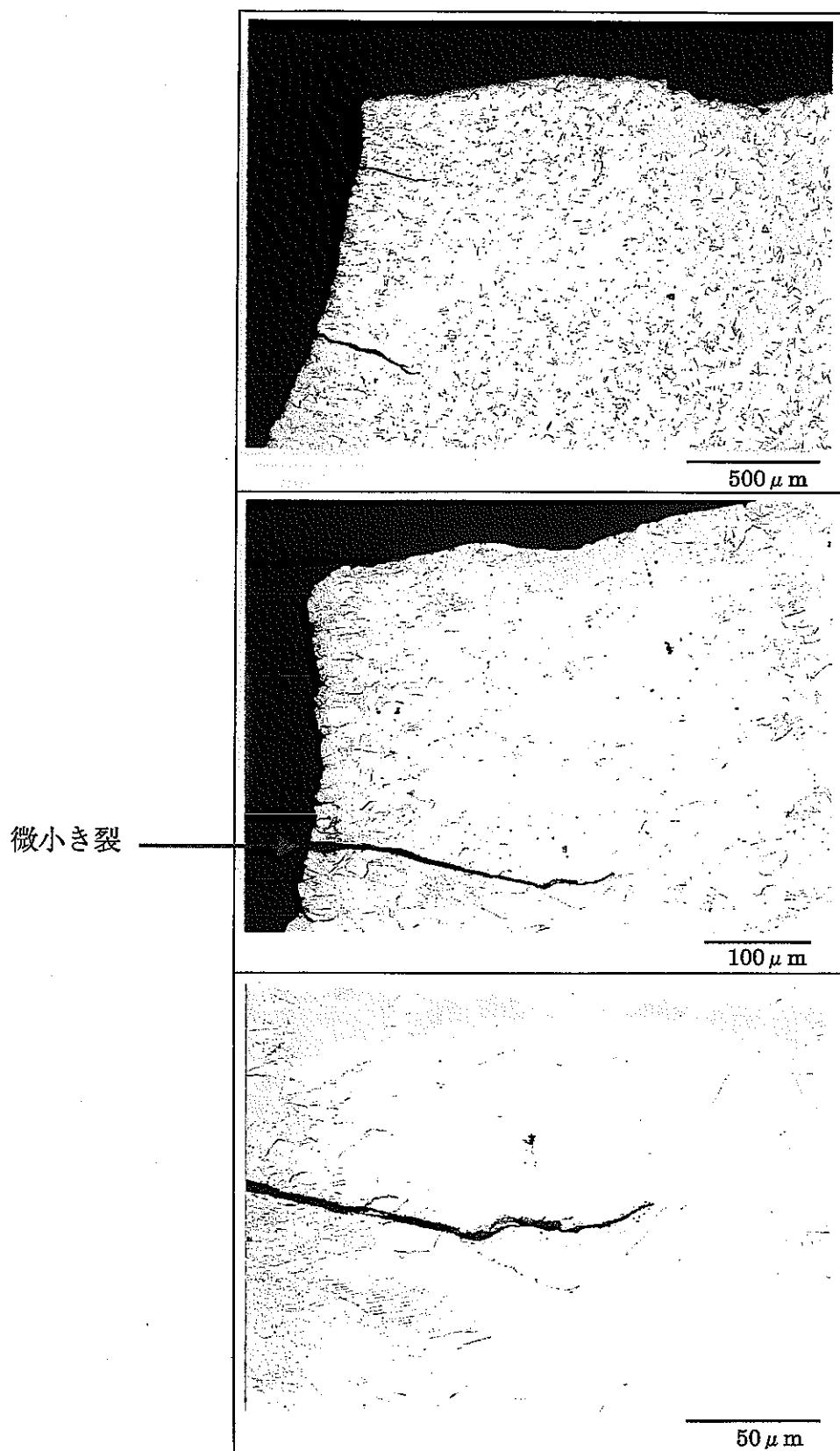


写真 3.6.2 き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面内側）

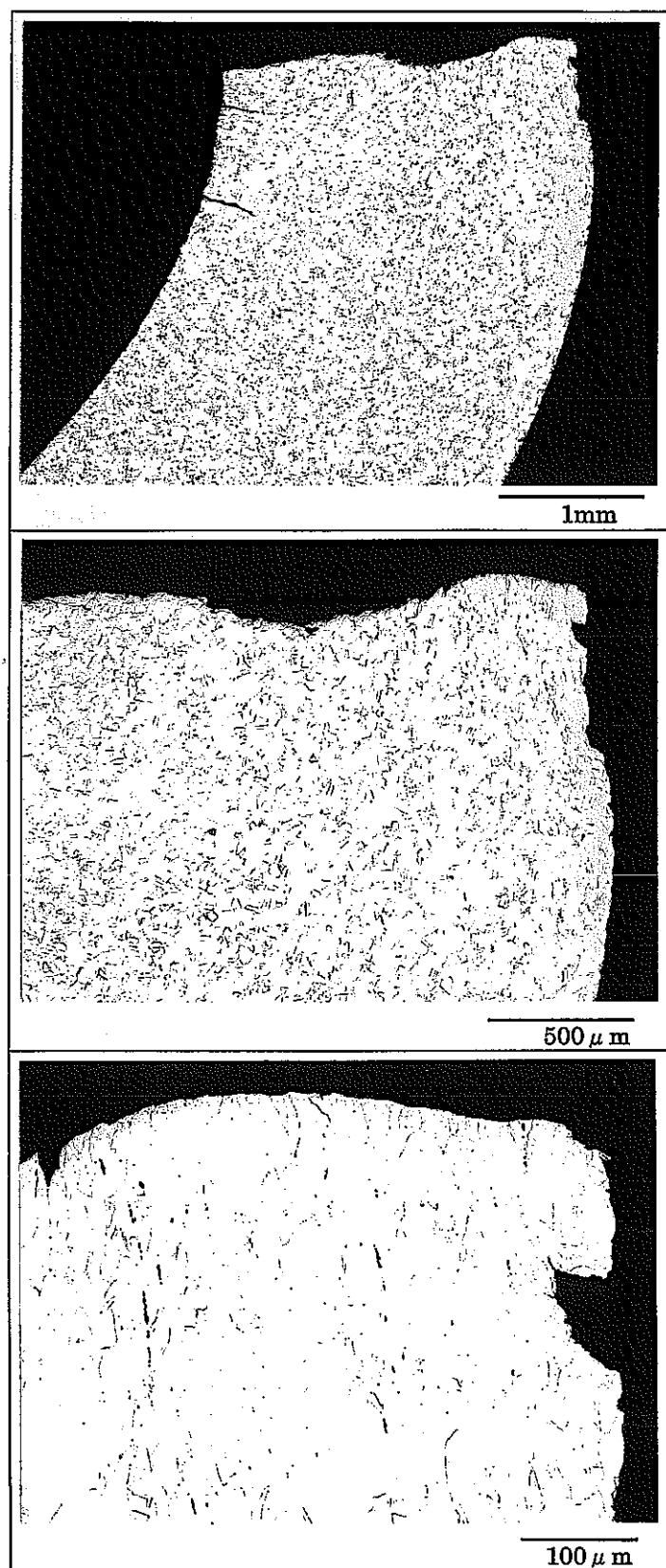


写真 3.6.3 き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面外側）

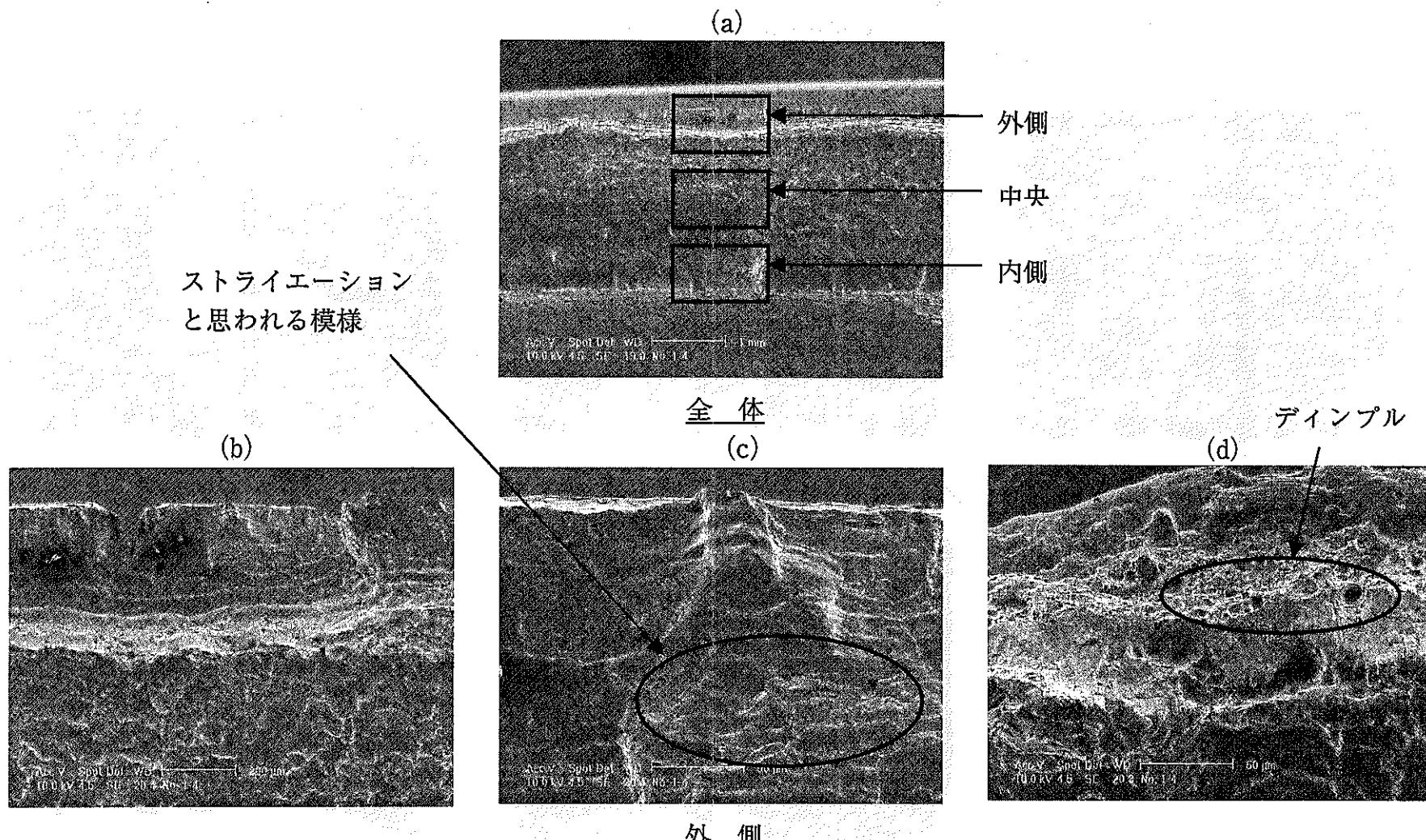


写真 3.6.4 破面の SEM 観察結果 (1/2)

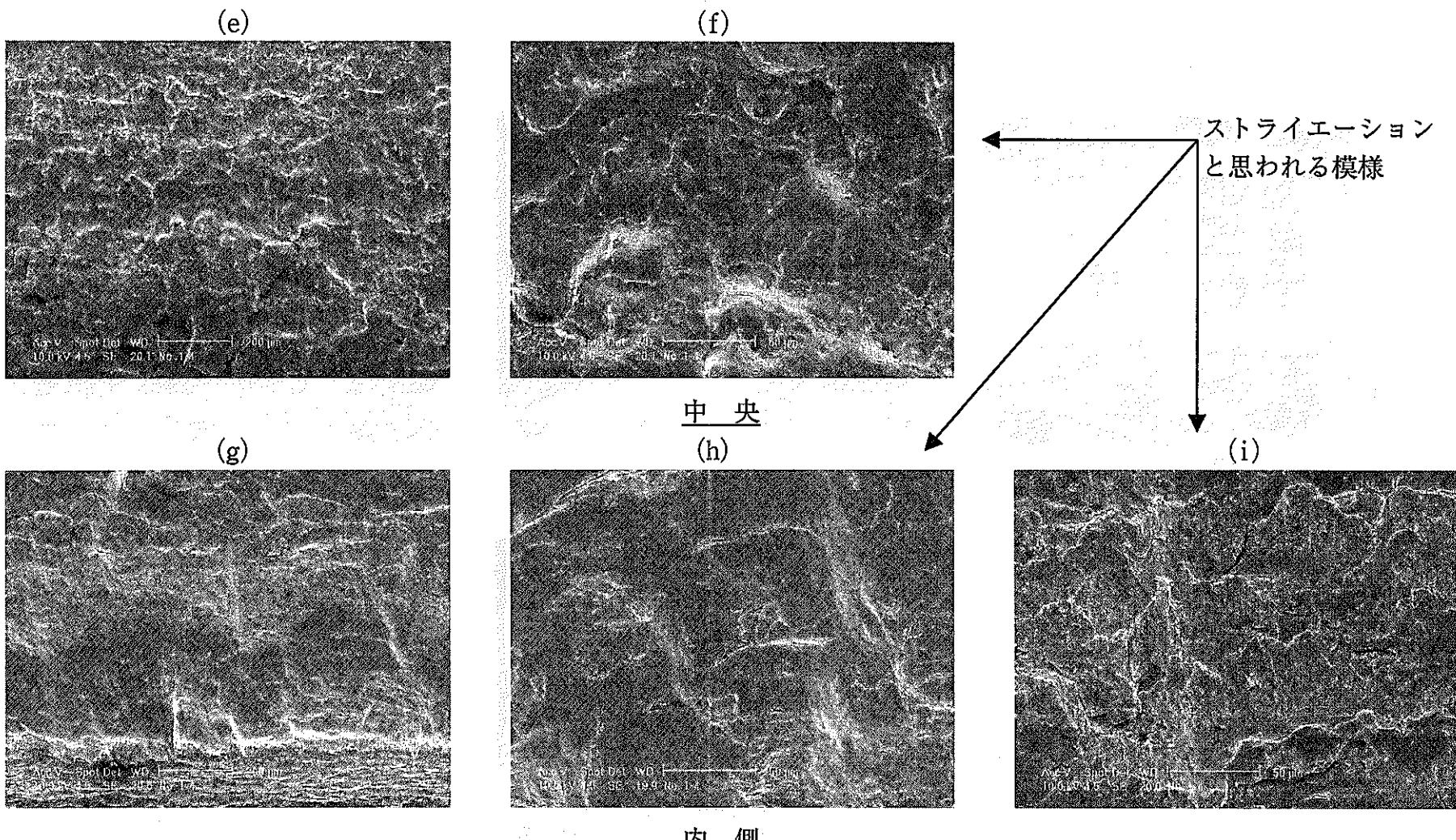


写真 3.6.5 破面の SEM 観察結果 (2/2)

## 4. 地震波漸增加振試験結果

S-5 試験体を用いて地震波漸增加振試験を実施した。P6 加振後に、軸方向 30mm 付近の周方向 90° で外側に膨らむ変形が認められた。この変形部付近を観察し、き裂が発生していないことを確認したため試験を継続した。P10 加振を開始して約 10 秒後に試験体外表面よりき裂が発生し、約 18 秒後に試験体の剛性が急激に低下したため加振を中断した。加振後に変形部付近を観察したところ、変形部（軸方向 30mm 付近の周方向 90°）より貫通き裂が発生していたため、地震波漸增加振試験を終了した。

本章では、地震波漸增加振試験において、加速度、変位、ひずみ、温度を計測し、さらに試験終了後に試験体の形状計測、破面観察を行った結果をまとめて示す。

### 4.1. 加速度

各加振レベルにおいて、加振台で計測した入力加速度（57ch）の時刻歴を図 4.1.1(a)～4.1.10(a)に、錐で計測した応答加速度(74ch)の時刻歴を図 4.1.1(b)～4.1.10(b)に示す。これらの結果を基に、入力加速度に対する応答加速度の推移をまとめて図 4.1.11 に示す。

図 4.1.12(a)～4.1.21(a)に、入力加速度に対する応答加速度の伝達関数を示す。伝達関数は、40 秒間の時刻歴データを時間軸方向に 8 秒間で区分したものを作成し、前後の区間を 4 秒間オーバーラップすることにより 9 区間に分割し、区間毎に算出した。さらに、区間毎の伝達関数を平均化処理することにより全区間の伝達関数とし、この伝達関数のピーク周波数を各加振レベルにおける固有振動数として決定した。

図 4.1.12(b)～4.1.21(b)に、線形応答解析により算出した応答スペクトルの減衰比による変化を示す。入力加速度の最大値と上記の固有振動数より得られる実測値について、最も近い応答スペクトルの減衰比を各加振試験における減衰比として決定した。

図 4.1.22 に入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移を示す。

### 4.2. 相対変位

各加振レベルにおいて、試験体に作用した相対変位の時刻歴を図 4.1.1(c)～4.1.10(c)に示す。試験体に作用した相対変位とは、錐で計測した変位(85ch)と加振台で計測した変位(82ch)の差により算出し、加振試験後に生じる残

留変形（永久変形）を含めた絶対量で示した。なお、相対変位の rms 値については、試験体の永久変形に伴いドリフトすることから、時刻歴の平均値より差し引いた相対変位量より rms 値を算出している。

図 4.2.1 に入力加速度に対する相対変位の最大値の推移を示す。

#### 4.3. ひずみ

P6 加振以降では軸方向 30mm 付近で外側に膨らむ変形が生じたため、変形部付近のひずみゲージが剥れ、ひずみが計測不能となるものがあった。これらは接着材の性能を超える大ひずみが発生して剥れたものであり、そのような計測点の値は試験結果より除外した。また、計測可能であったひずみゲージについても、計測限界を超えるひずみ値を示したゲージも見られることから、ここでは定性的な試験結果のまとめのみを行うこととする。

局部的なひずみは変形部付近で大きな値を示した。変形様式を考慮した試験体外面の軸方向ひずみに着目し、図 4.3.1～4.3.10 に各加振レベルにおける最大値及び最小値の軸方向分布及び周方向分布を示す。なお、ひずみゲージの計測値は累積ひずみも含めて示している。また、ひずみ最大値及び最小値は各ひずみゲージ計測点での時刻歴より最大値及び最小値を算出したものであり、この図中の最大値及び最小値の発生時刻が等しいとは限らない。入力加速度に対するひずみ (43ch) の推移をまとめて図 4.3.11 に示す。

さらに、大加振レベルの加振 (P6, P8, P10) ではひずみゲージの計測限界を超える大ひずみが発生したことから、ひずみ格子を用いて試験終了後の残留ひずみを計測した結果、試験体外面の軸方向 30mm 付近（き裂発生部附近）では  $16.1 \pm 1\%$  となった。

#### 4.4. 溫度

試験体表面の局部的な温度については、軸方向 30mm 付近、周方向  $90^\circ$  において計測した温度 (93ch) が最も高い値を示した。図 4.4.1 に、各加振レベルにおける温度の時刻歴を示す。

試験体の局部的な表面温度は、P8 及び P10 では約  $180^\circ\text{C}$  及び  $200^\circ\text{C}$  まで上昇する。しかし、表面温度が  $140^\circ\text{C}$  以上となると接着剤の接着性能限界を超えるため、ひずみゲージが剥れて計測不能となり、ひずみゲージに与える影響は考慮しなくてもよい。また、P6 では約  $100^\circ\text{C}$  まで上昇するが、図 3.4.2 よりひずみゲージ計測値の温度による影響は高々  $350 \mu\epsilon$  であり、表面温度はひずみゲージの計測値に大きな影響を与えないと判断される。

#### 4.5. 形状計測

各加振後に試験体の形状計測を行った。各加振レベルにおける周方向 80° 及び 260° での形状計測結果を図 4.5.1 に示す。P6において試験体の軸方向 30mm 付近の周方向 80° に残留変形が発生し、加振レベルが大きくなるとともに、残留変形が増大していく様子がわかる。周方向 80° において配管外面方向に 8.5mm 残留変形が生じている。

さらに、試験終了後に試験体の全体形状計測を行った。試験前後の試験体形状計測結果を比較して図 4.5.2 に示す。軸方向 30mm 付近では、90° 方向で 7mm 程度外側に膨らむ残留変形を生じているのに対して、270° 方向では残留変形がほとんど見られない。

#### 4.6. 破面観察

試験体を観察した結果、軸方向 30mm 付近の周方向 90° で貫通き裂が発生していた。写真 4.6.1 に試験体き裂発生部付近の様子を示す。

試験体の破損メカニズムを検討するため、き裂縦断面の光学顕微鏡観察及び破面の SEM 観察を実施した。破面観察を行った位置を図 4.6.1 に示す。

まず、写真 4.6.2 及び 4.6.3 に試験体のき裂縦断面の光学顕微鏡観察結果を示す。この結果として、き裂付近を目視及び光学顕微鏡により観察したところ、配管内面側には多数の微小なき裂が認められたが、配管外面側には認められなかった。したがって、き裂は配管内面から発生したと考えられる。

次に、写真 4.6.4 及び 4.6.5 に破面中央部付近の SEM 観察結果を示す。これより以下の事項が明らかとなった。

- ストライエーション状の模様は、破面の配管内側に多く見られる（写真 4.6.5(e)、(g)、(h)）が、中央及び外側は破面が潰されているため判然としない。
- 配管外側に最終破断位置と見られるディンプル状の延性破面（写真 4.6.4(d)）が見られることから、配管内面に発生したき裂が進展し、最終破断直前に軸方向に引きちぎられたことを示している。
- 地震波を用いたランダムな繰り返し負荷の影響により、ストライエーション状の模様の間隔は不規則となり、き裂進展速度を求めるることは不可能である。

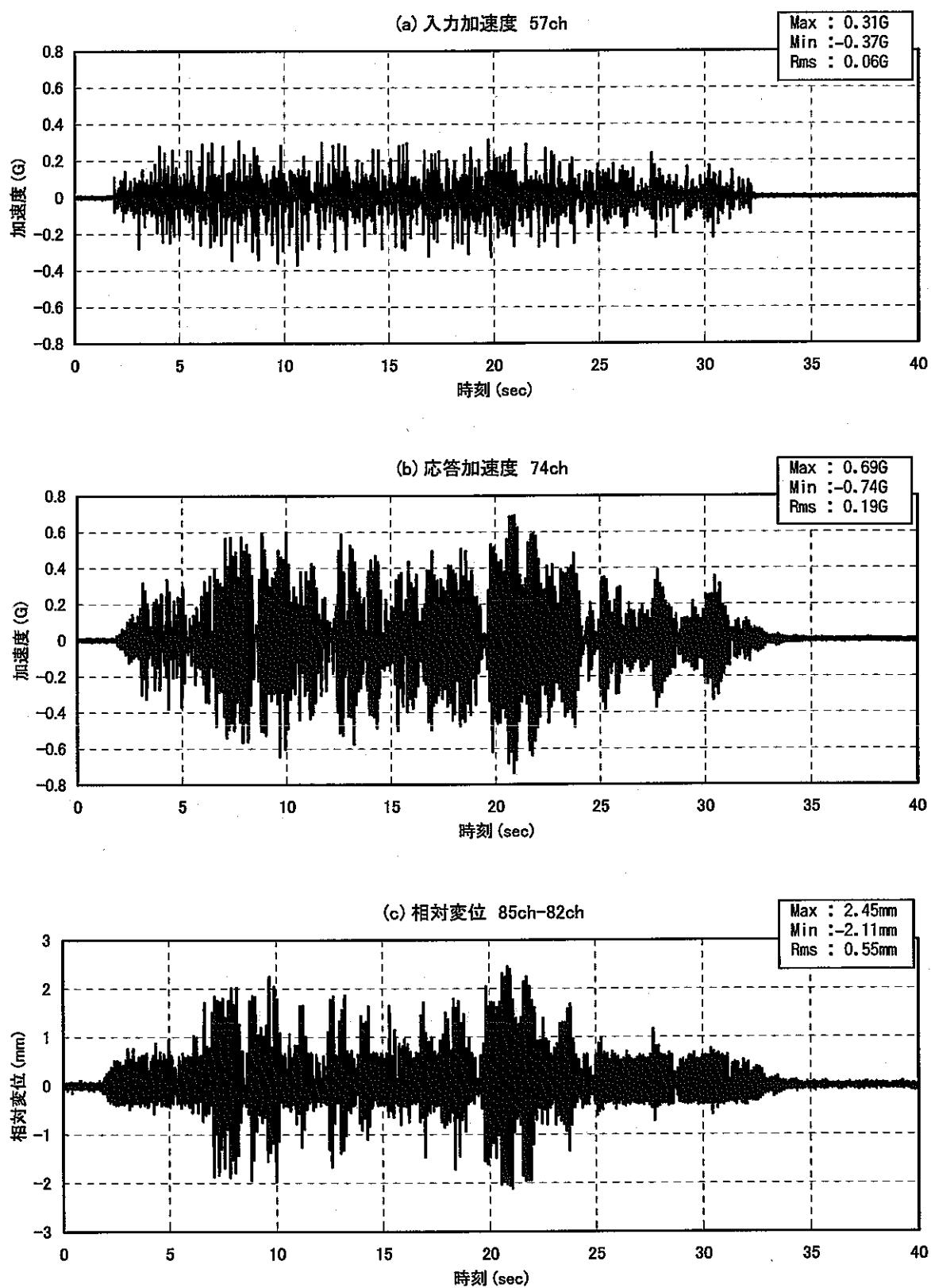


図4.1.1 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P1)

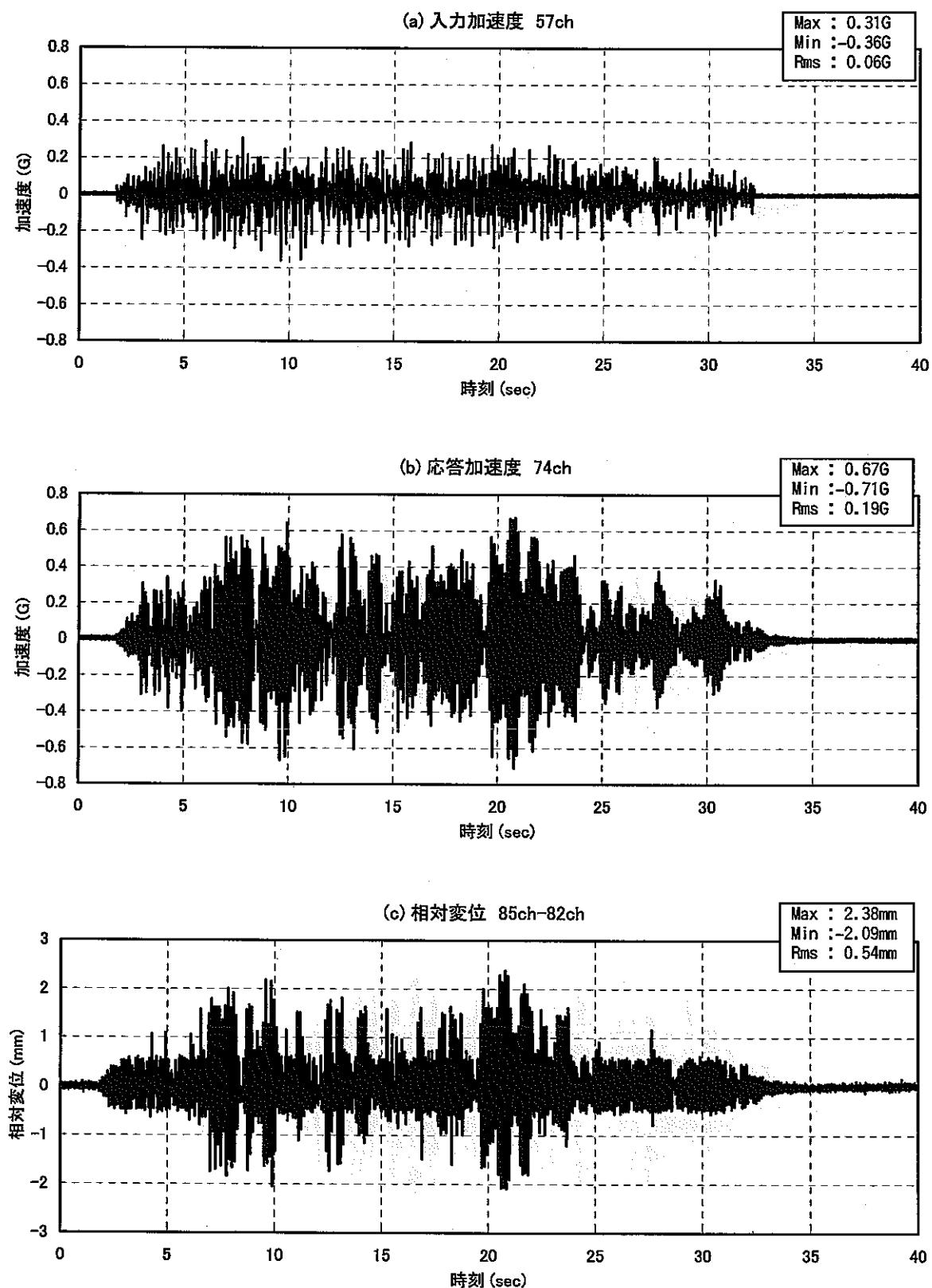


図 4.1.2 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P2)

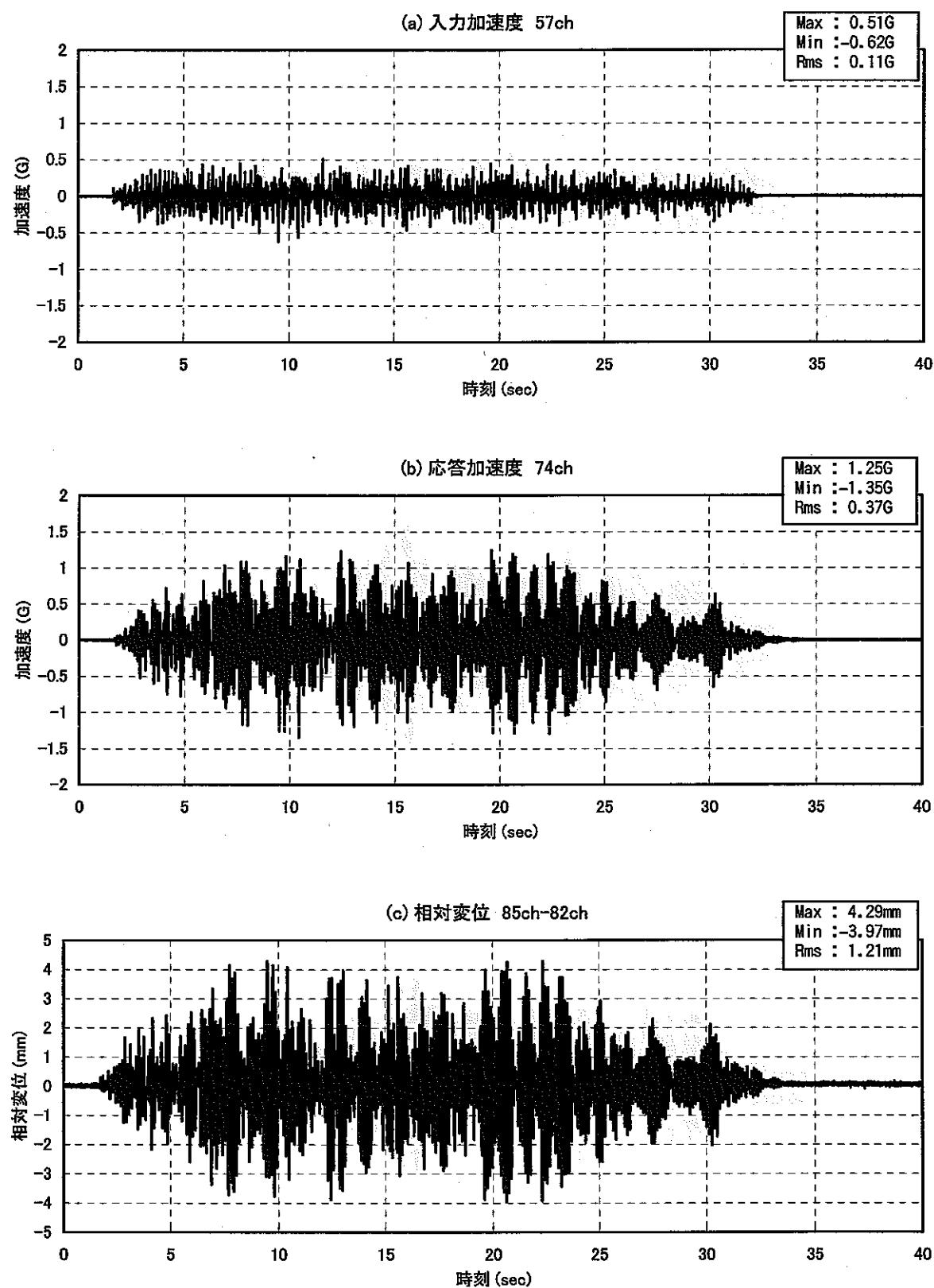


図4.1.3 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P3)

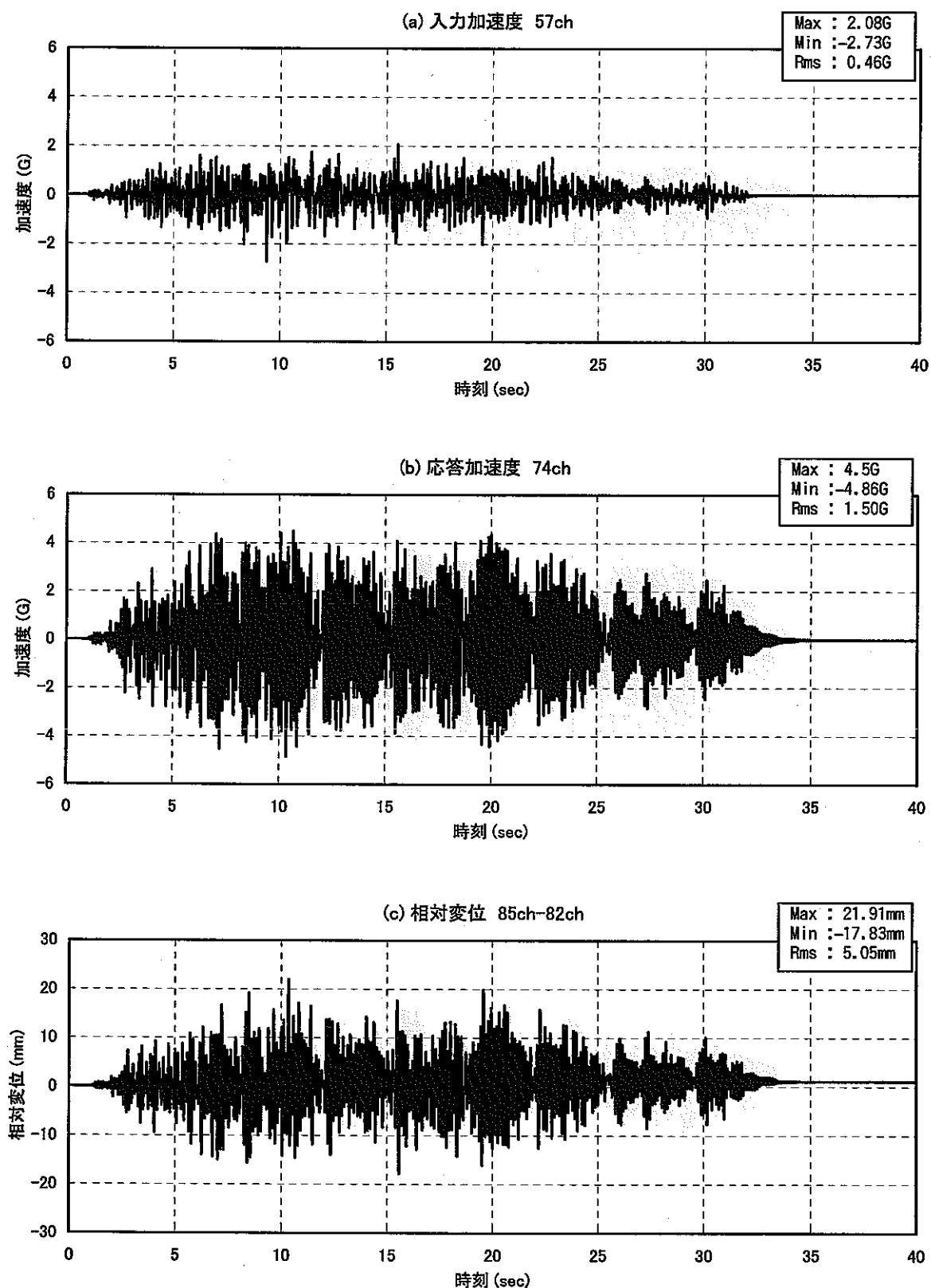


図4.1.4 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P4)

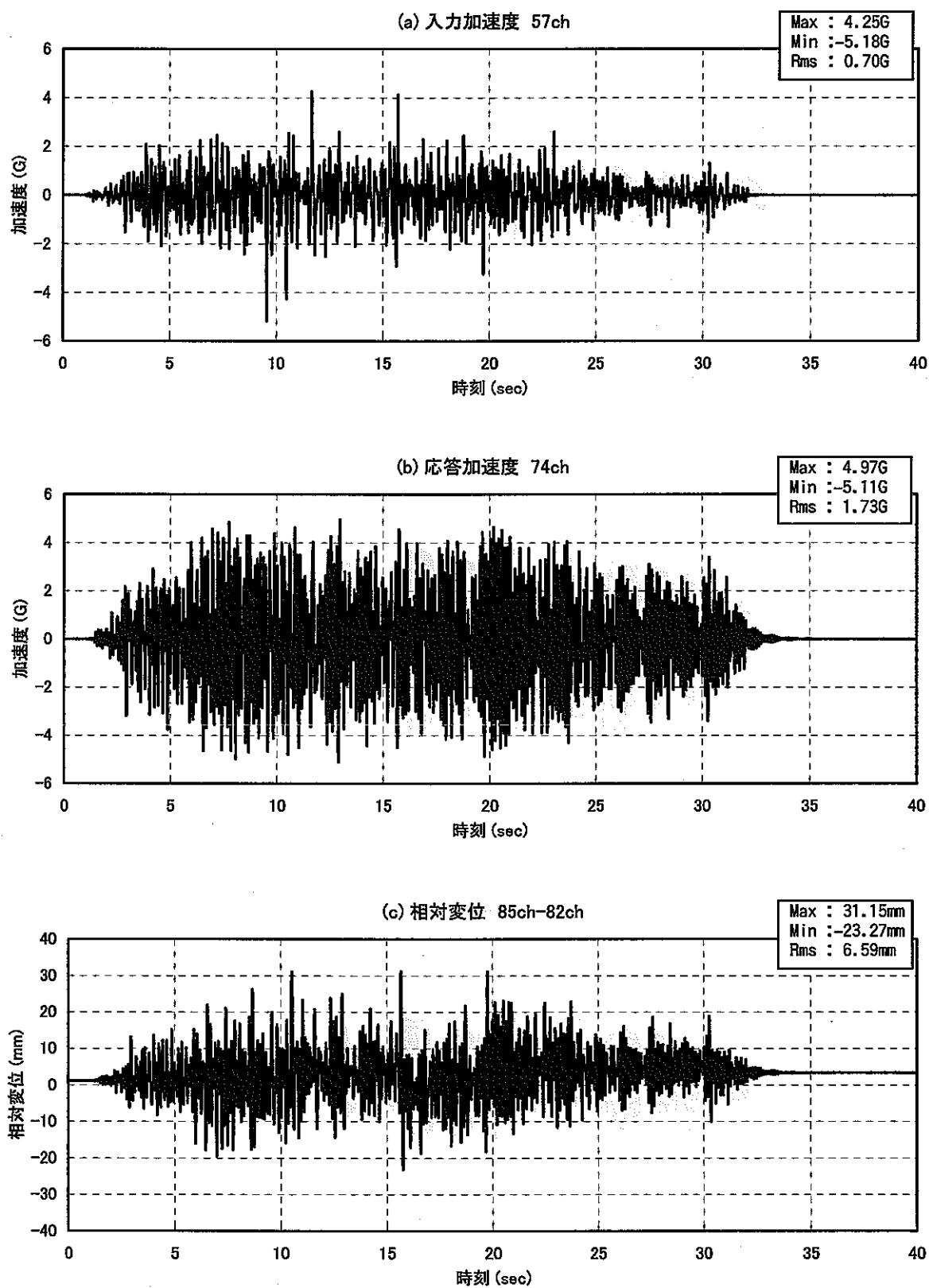


図4.1.5 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P5)

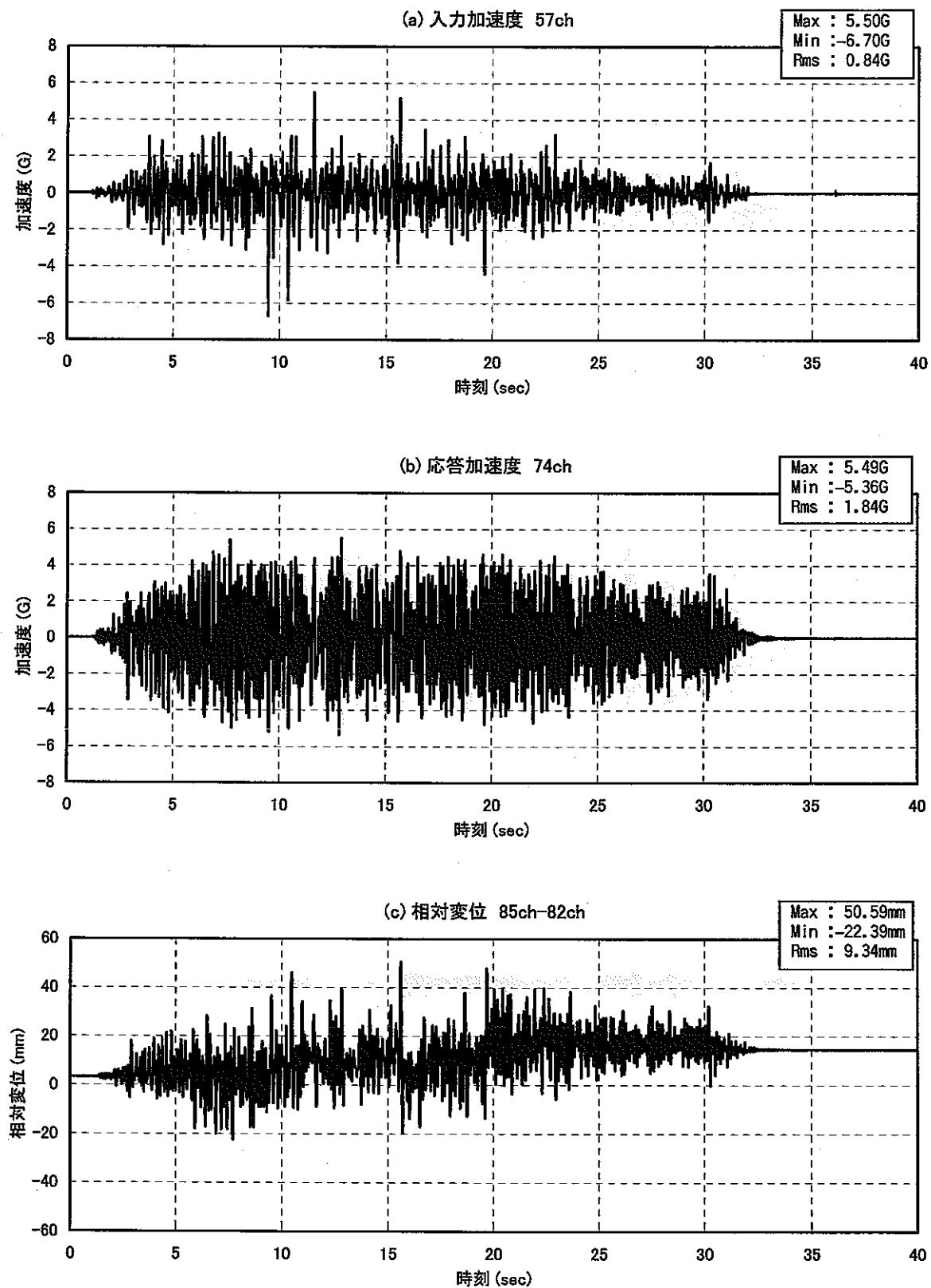


図4.1.6 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P6)

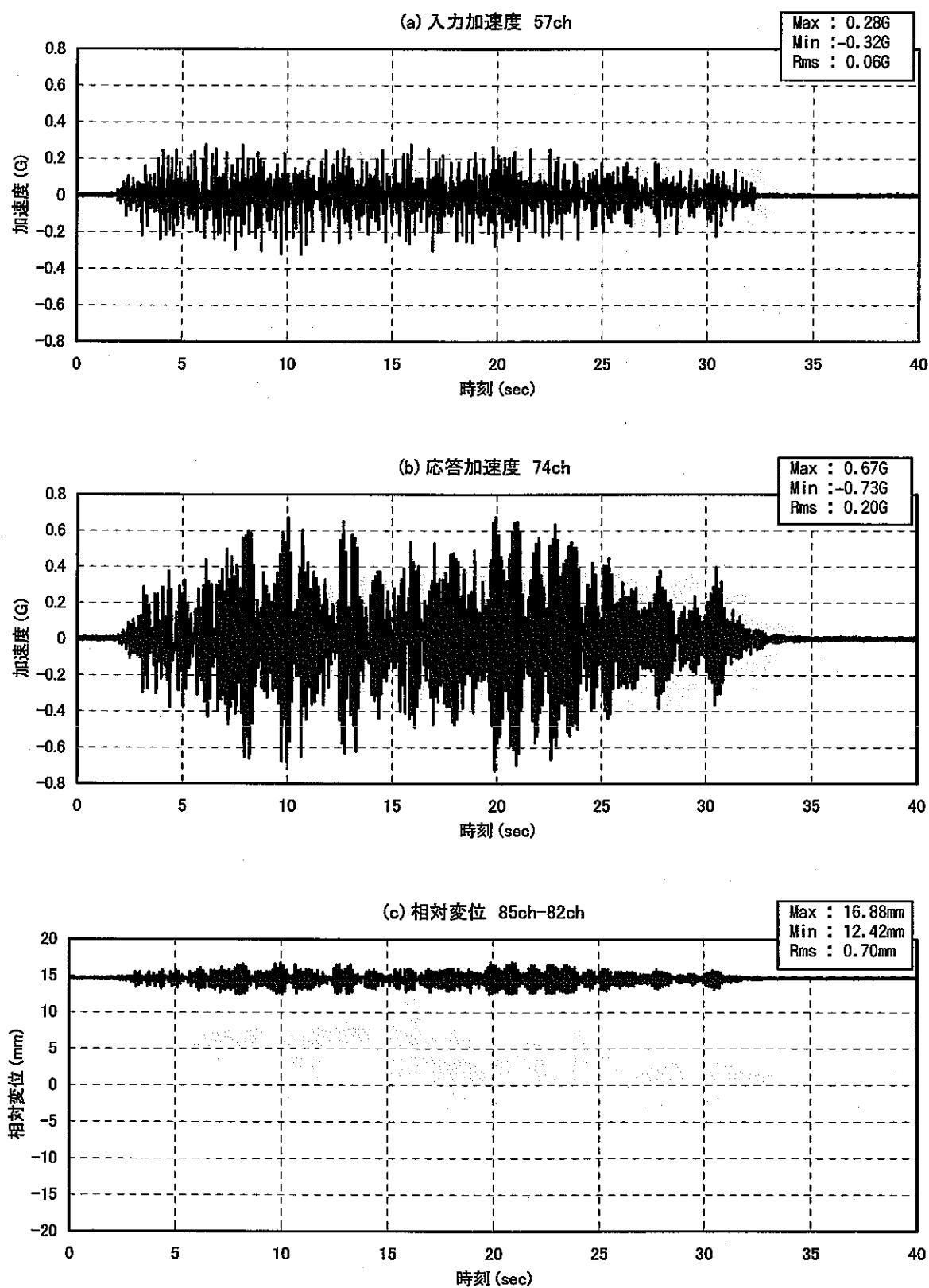


図4.1.7 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P7)

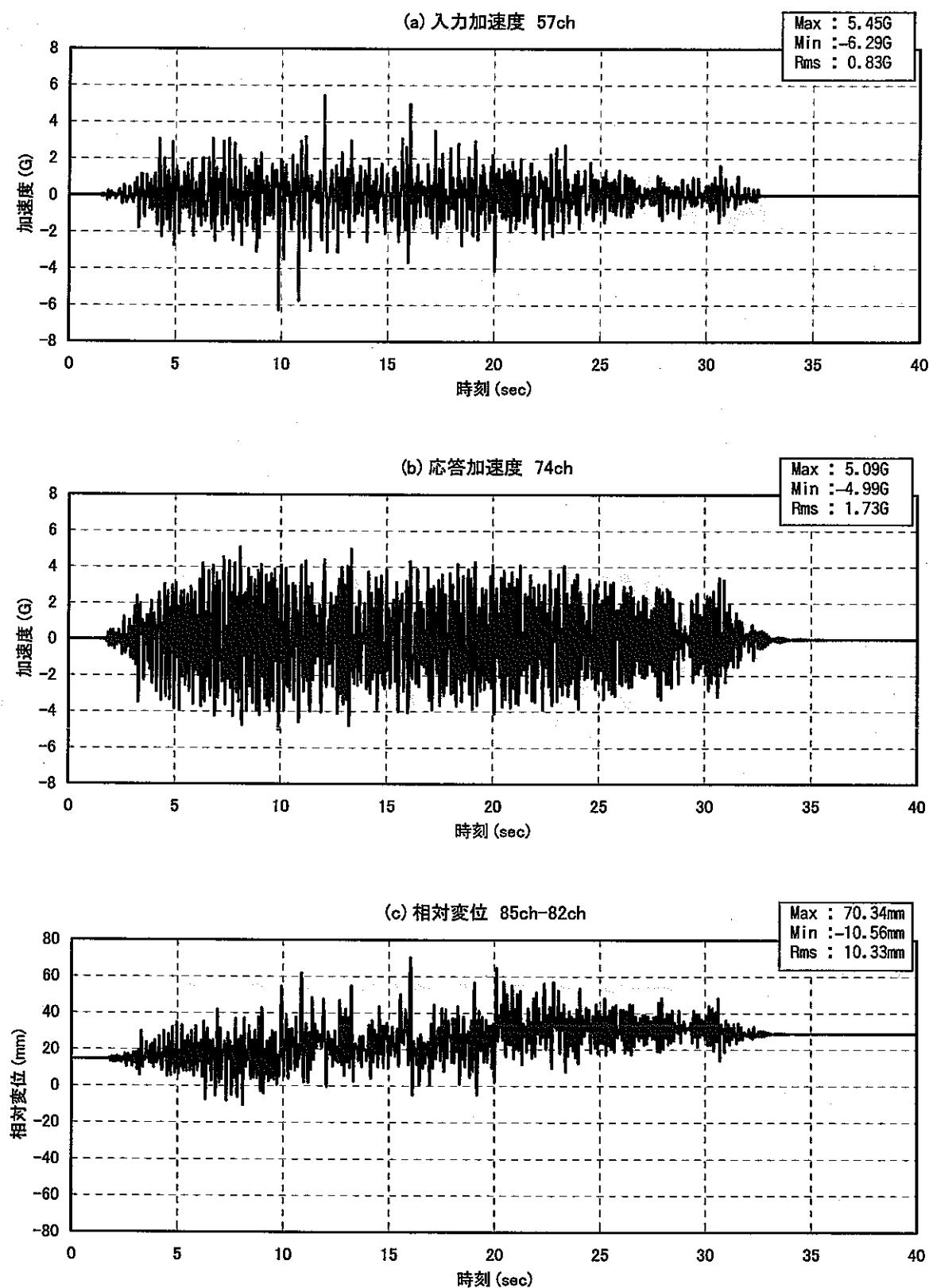


図4.1.8 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P8)

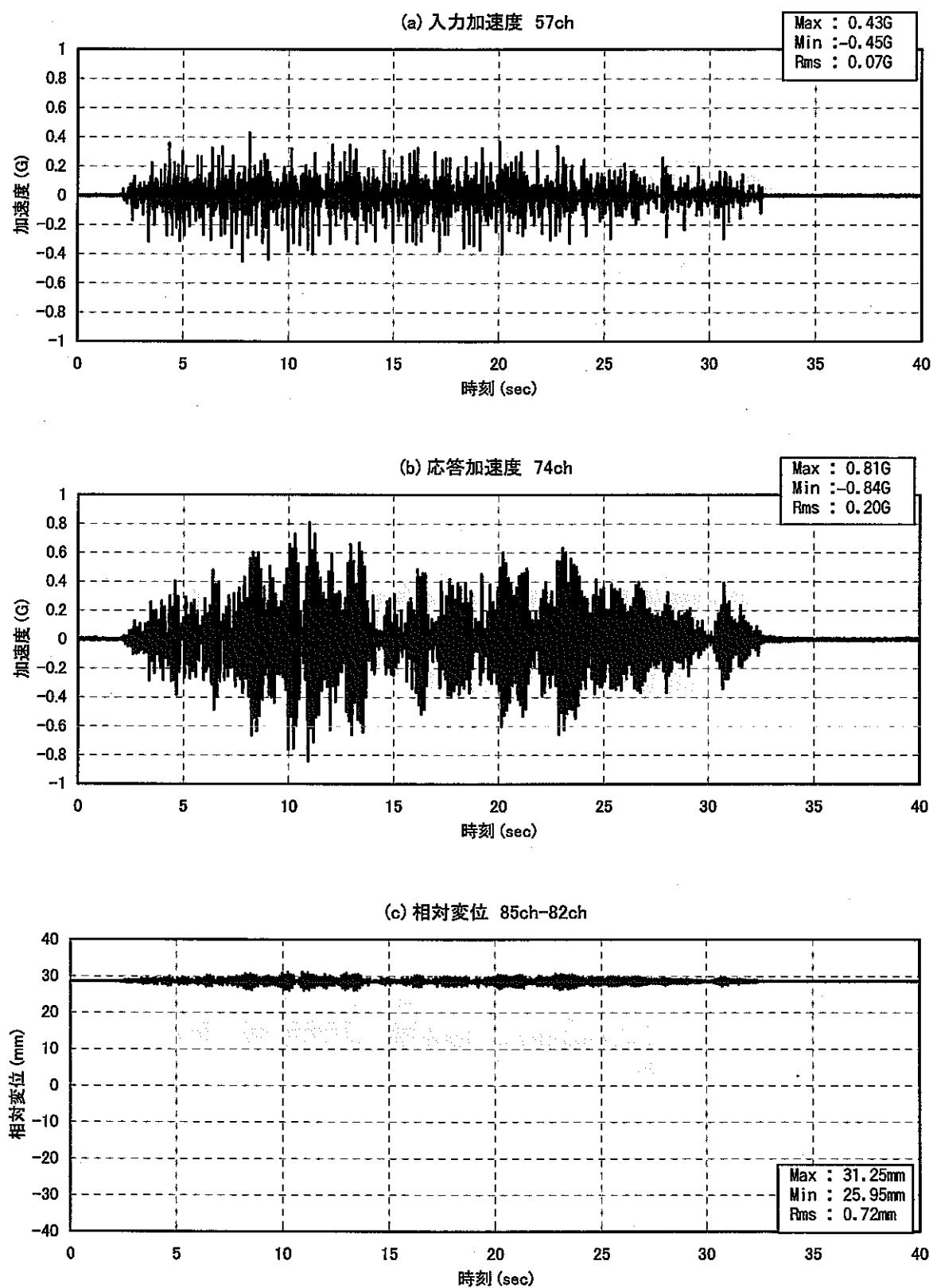


図4.1.9 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P9)

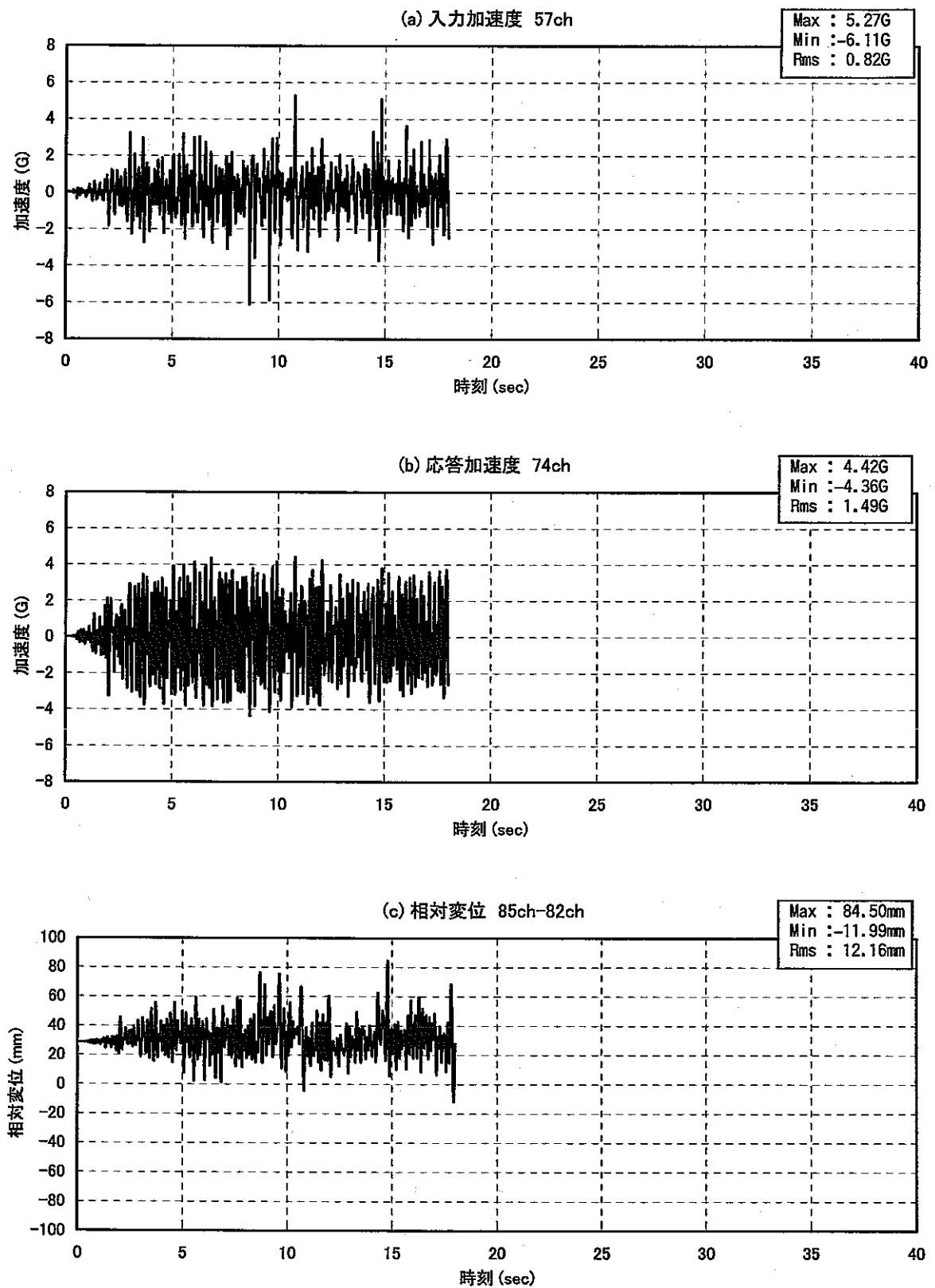


図4.1.10 地震波漸增加振試験の時刻歴 (P10)

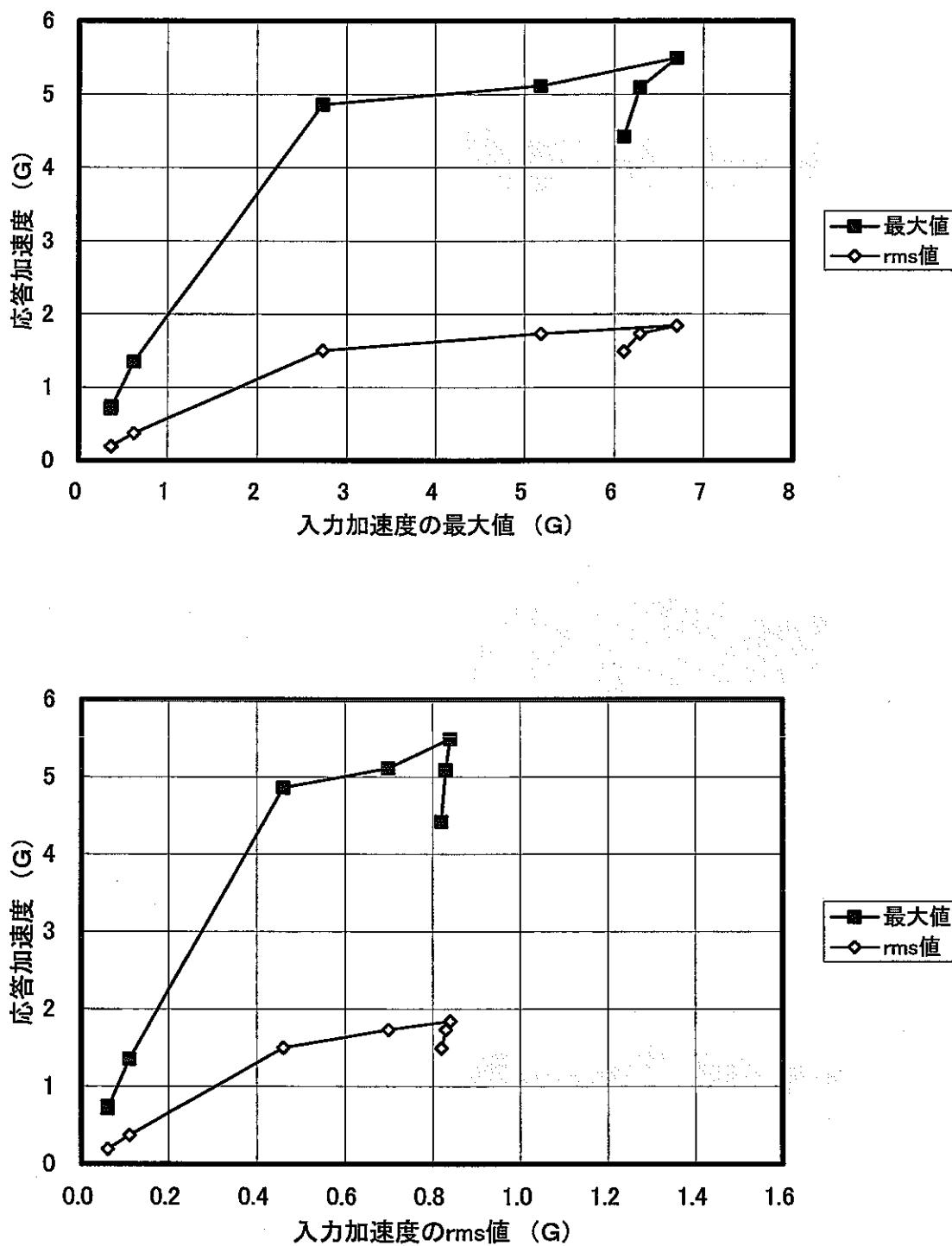
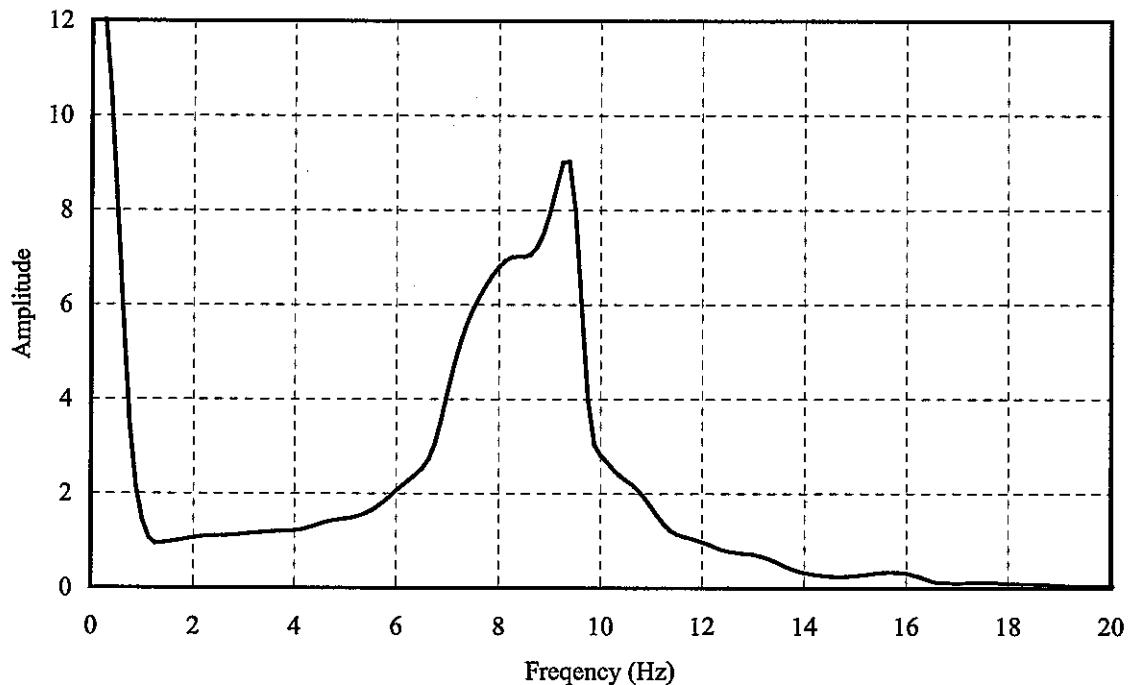
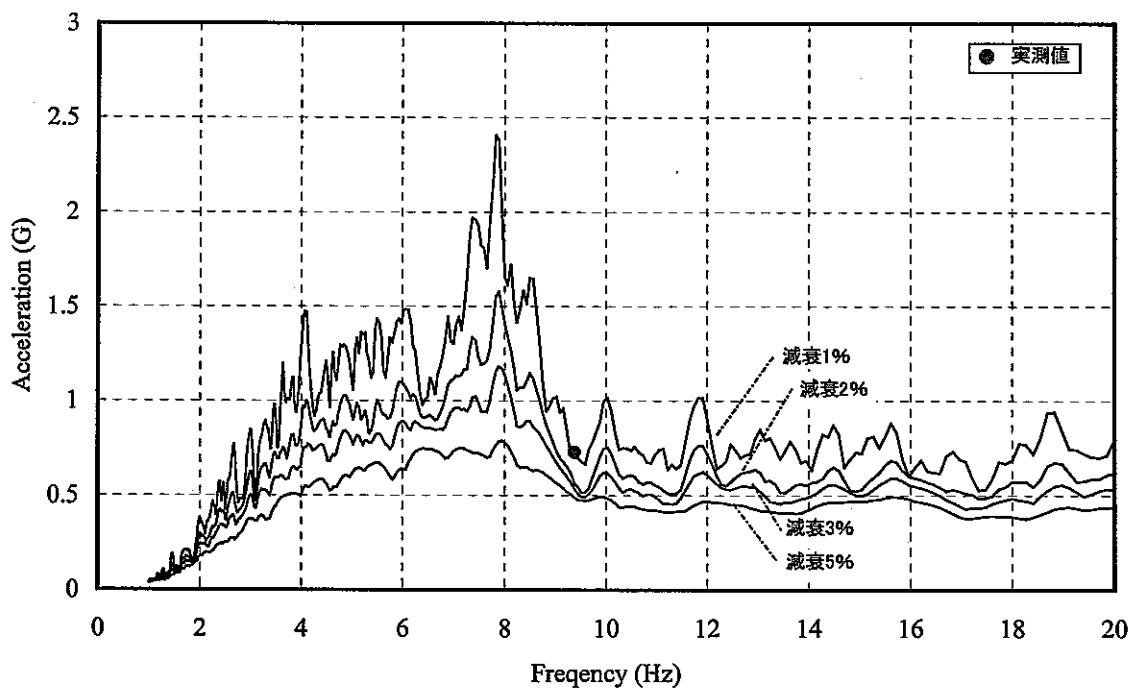


図4.1.11 入力加速度に対する応答加速度の推移

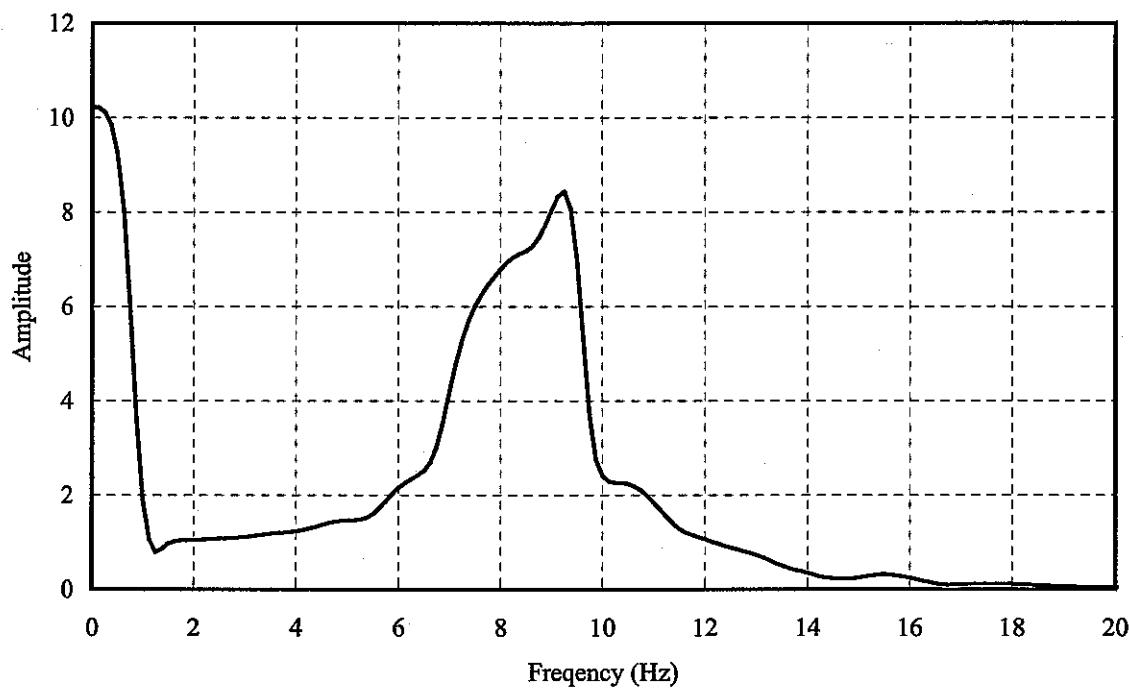


(a) 伝達関数

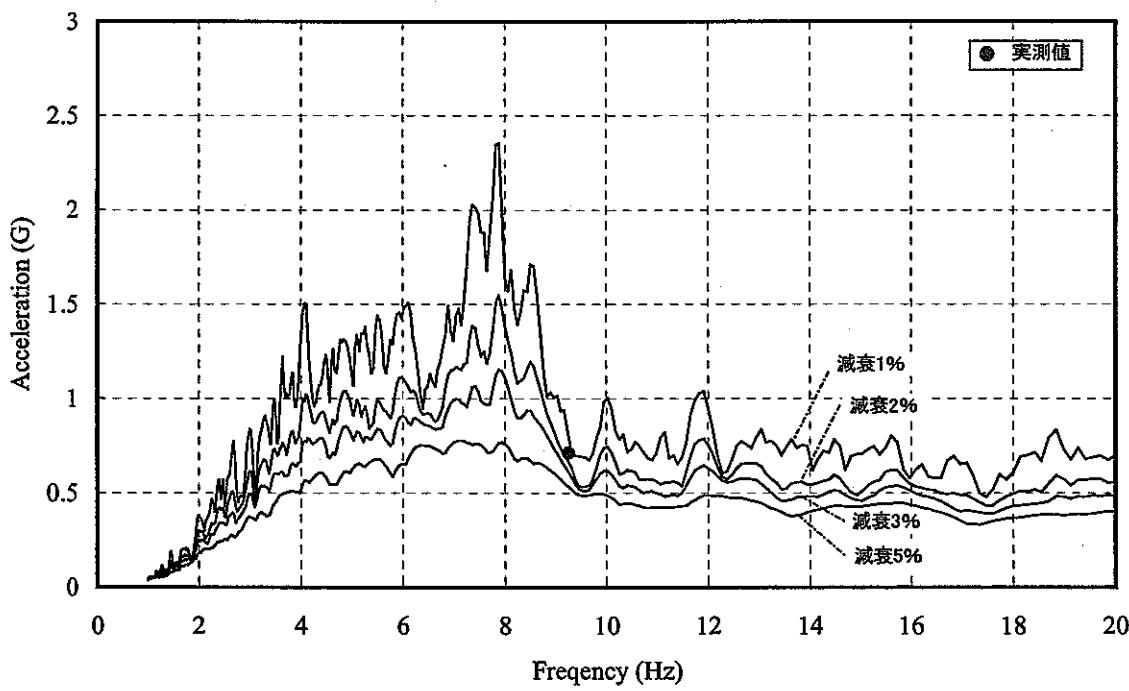


(b) 応答スペクトル

図 4.1.12 加振試験における周波数特性 (P1)

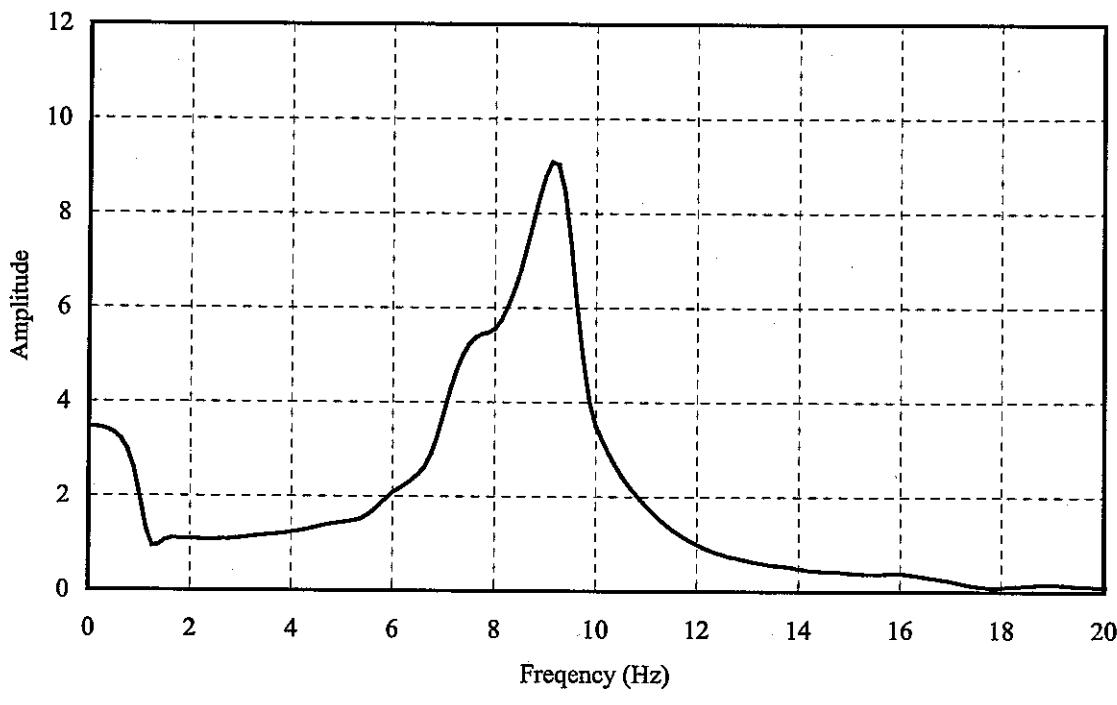


(a) 伝達関数

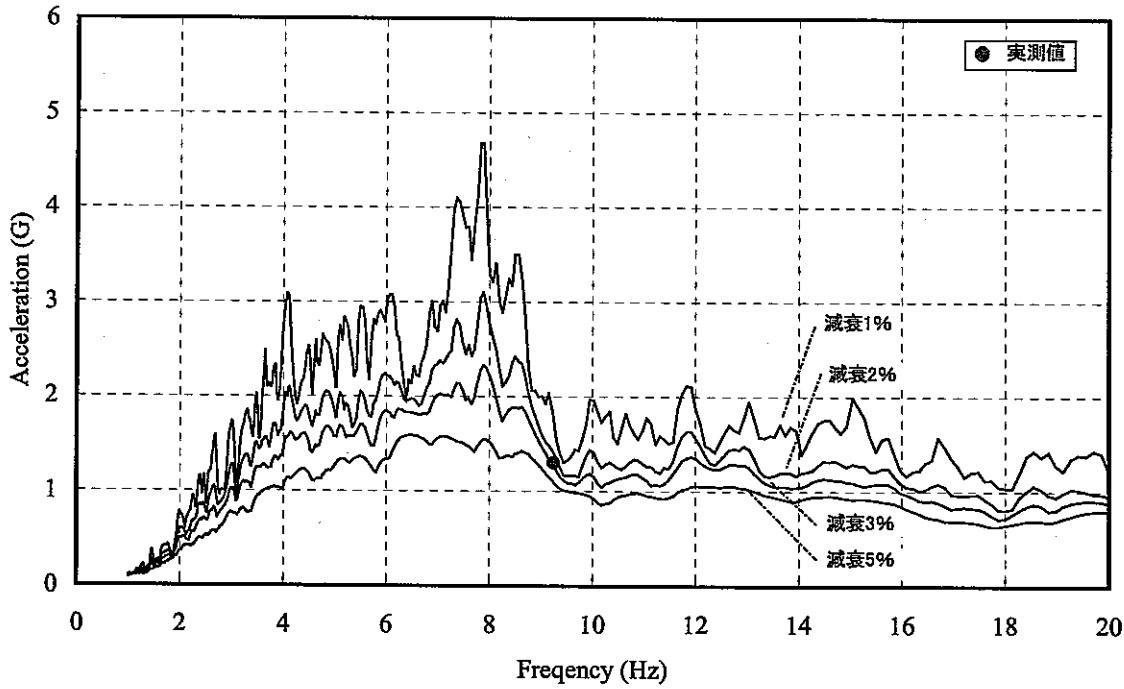


(b) 応答スペクトル

図 4.1.13 加振試験における周波数特性 (P2)

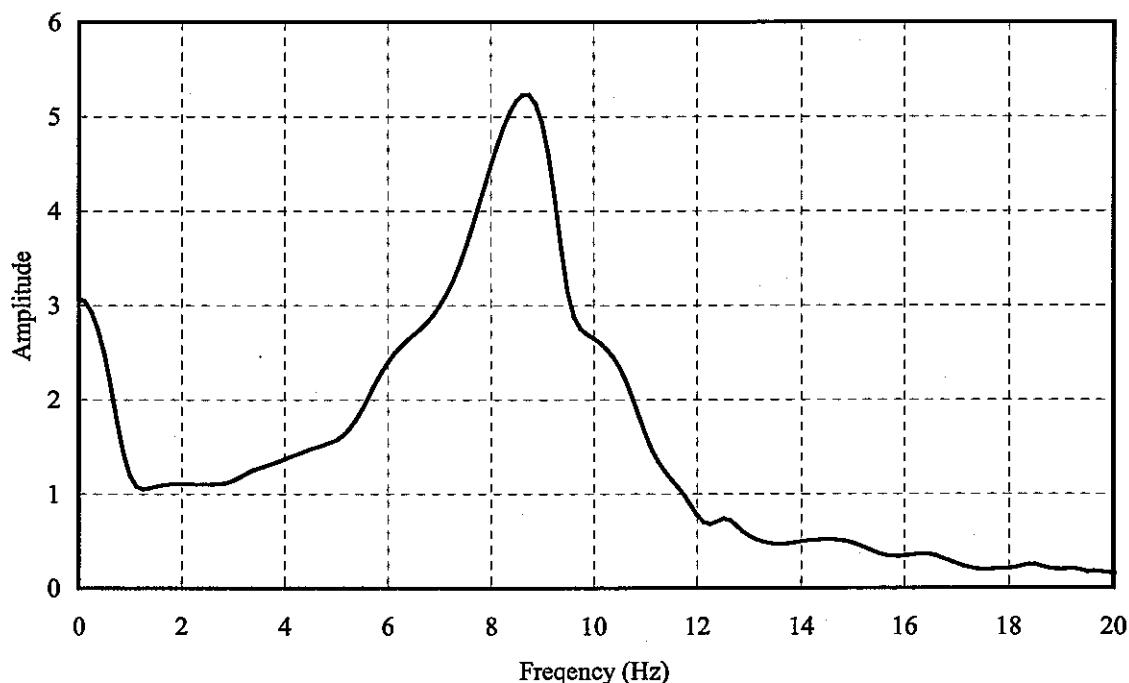


(a) 伝達関数

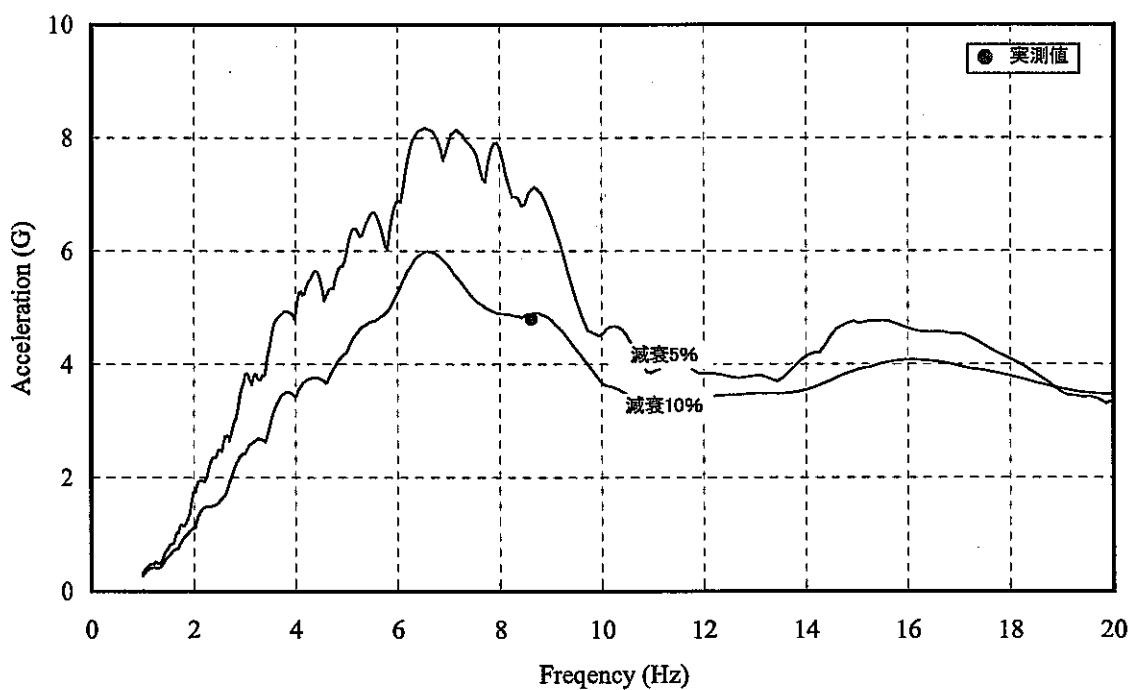


(b) 応答スペクトル

図 4.1.14 加振試験における周波数特性 (P3)

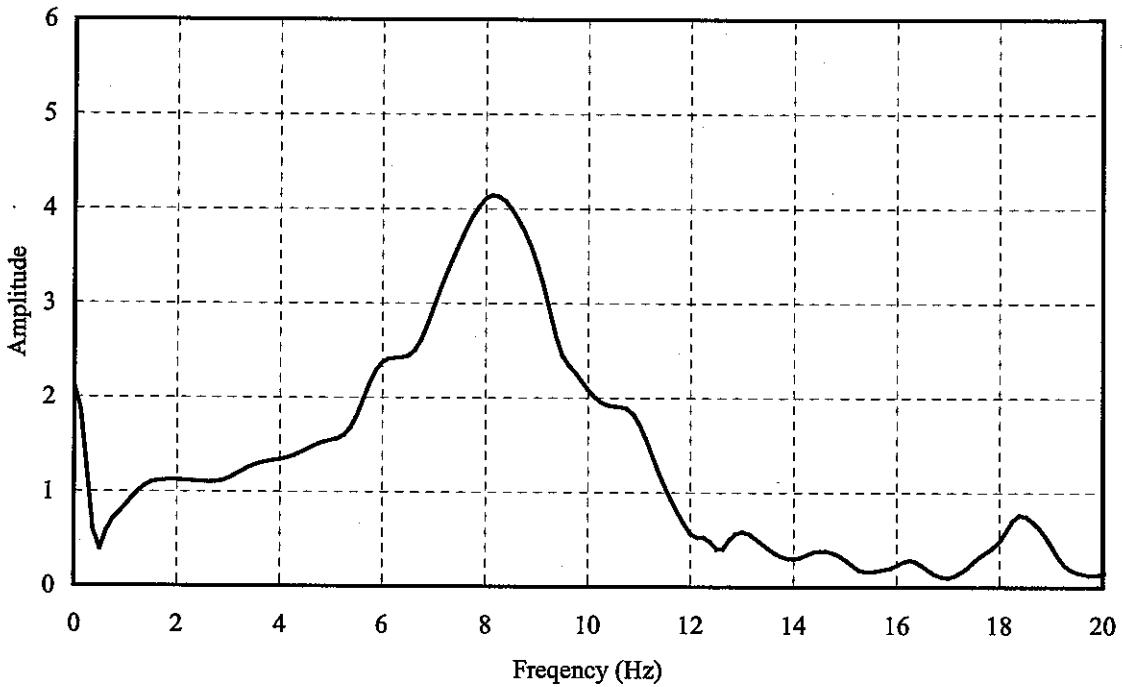


(a) 伝達関数

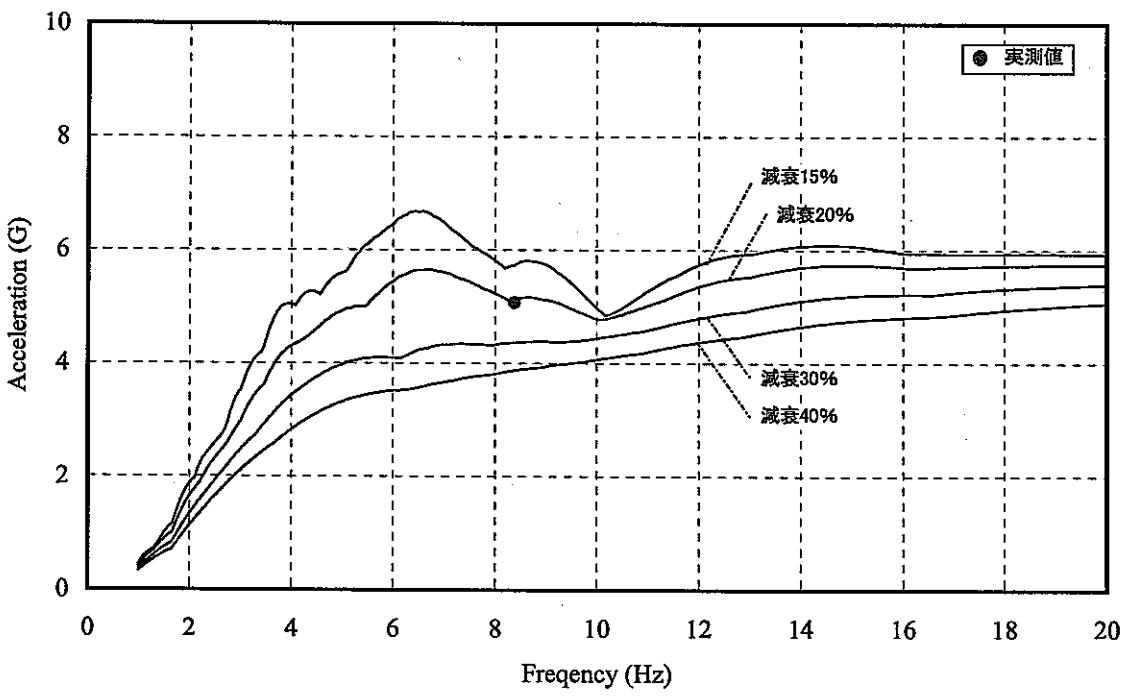


(b) 応答スペクトル

図 4.1.15 加振試験における周波数特性 (P4)

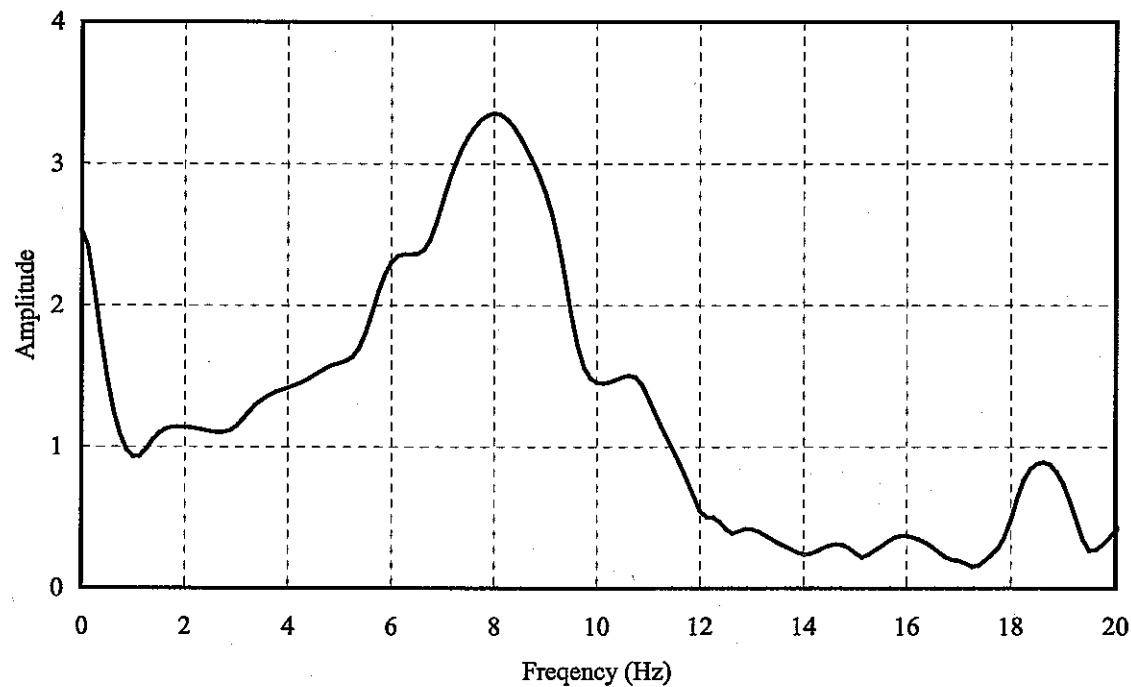


(a) 伝達関数

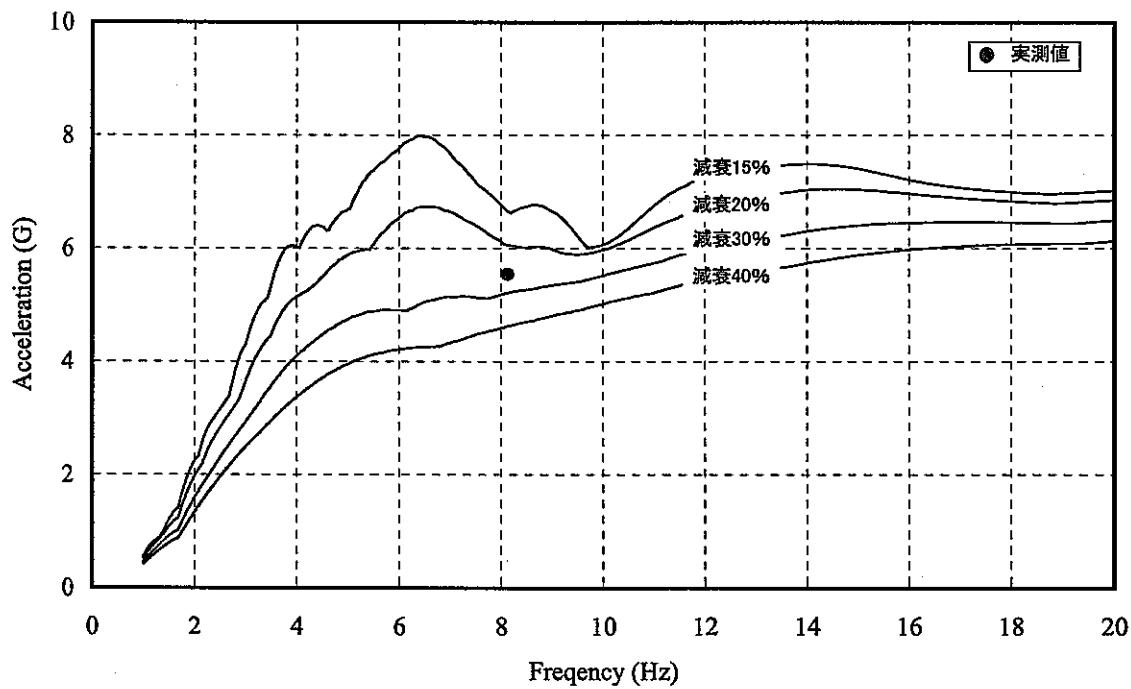


(b) 応答スペクトル

図 4.1.16 加振試験における周波数特性 (P5)

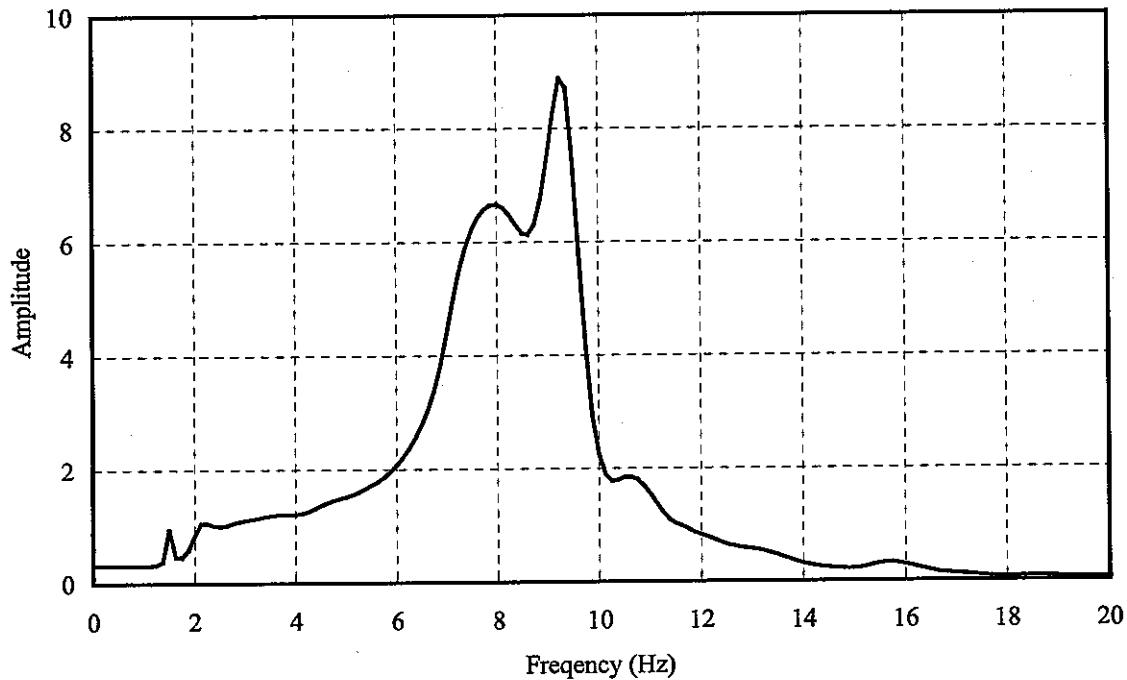


(a) 伝達関数

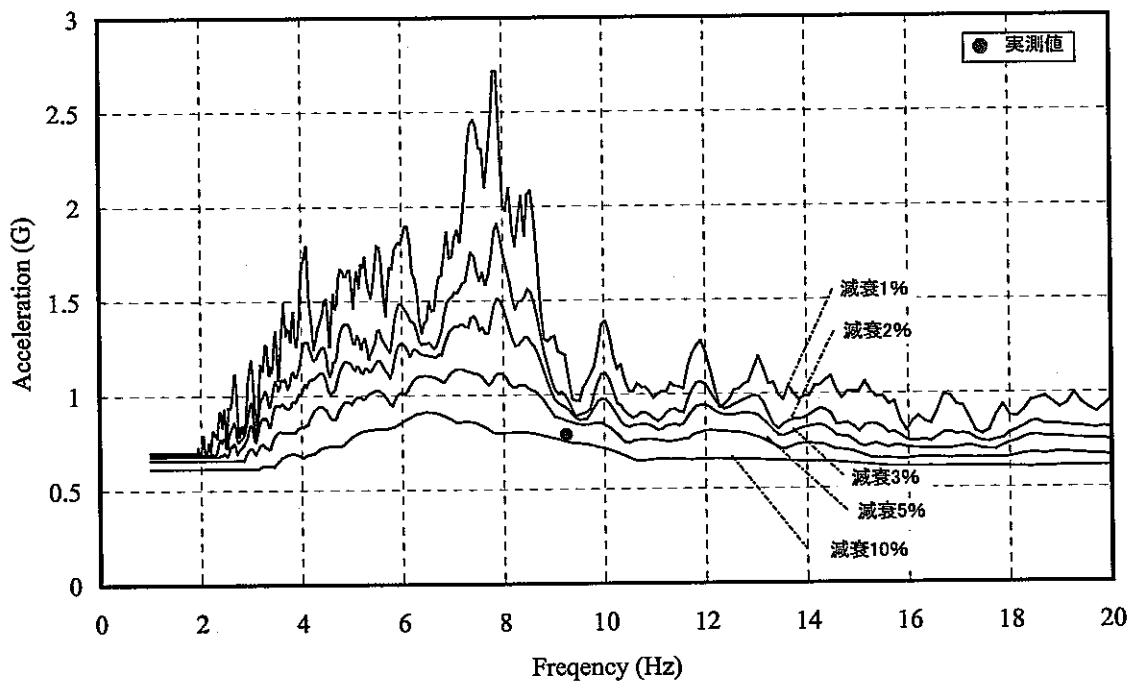


(b) 応答スペクトル

図 4.1.17 加振試験における周波数特性 (P6)

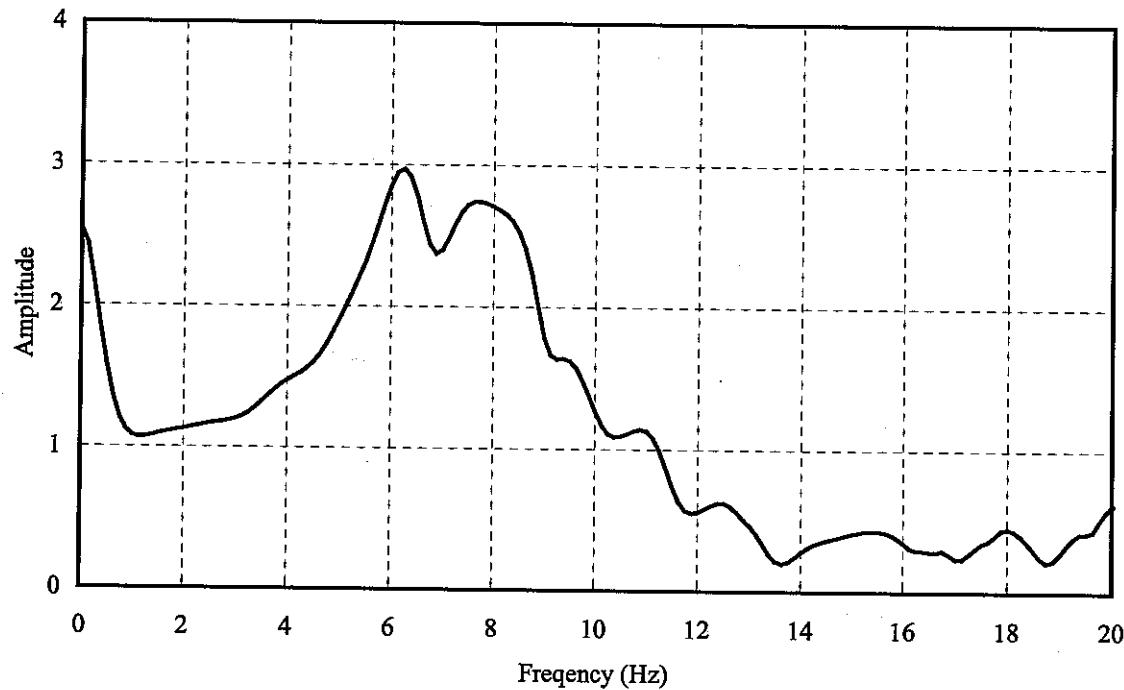


(a) 伝達関数

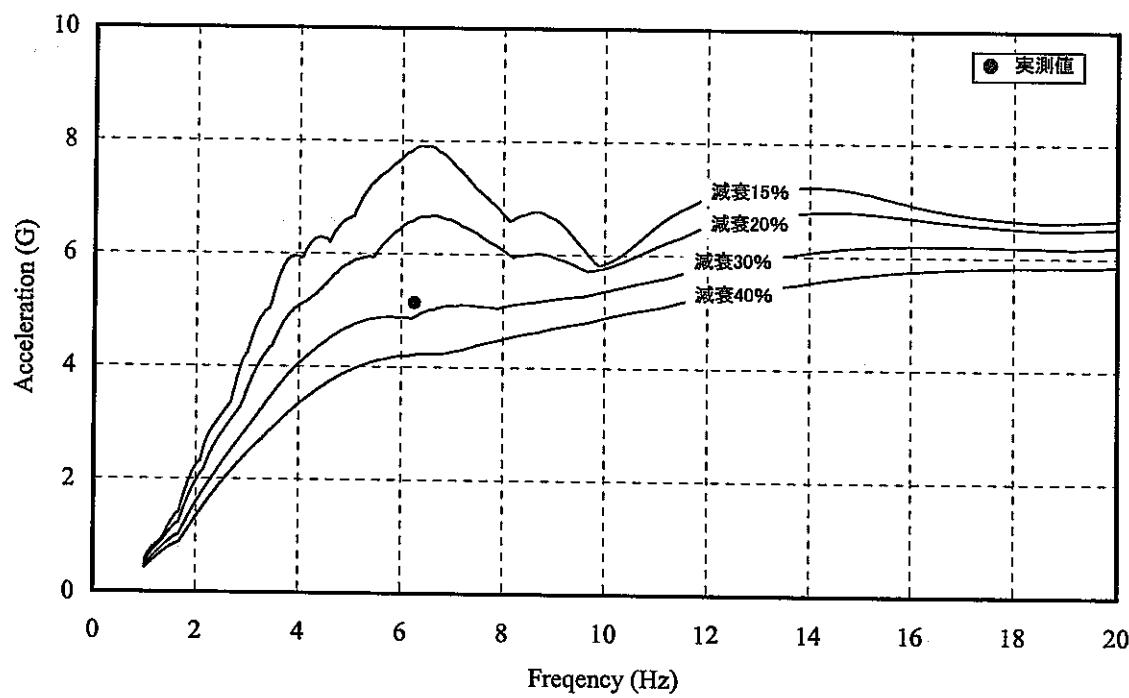


(b) 応答スペクトル

図 4.1.18 加振試験における周波数特性 (P7)

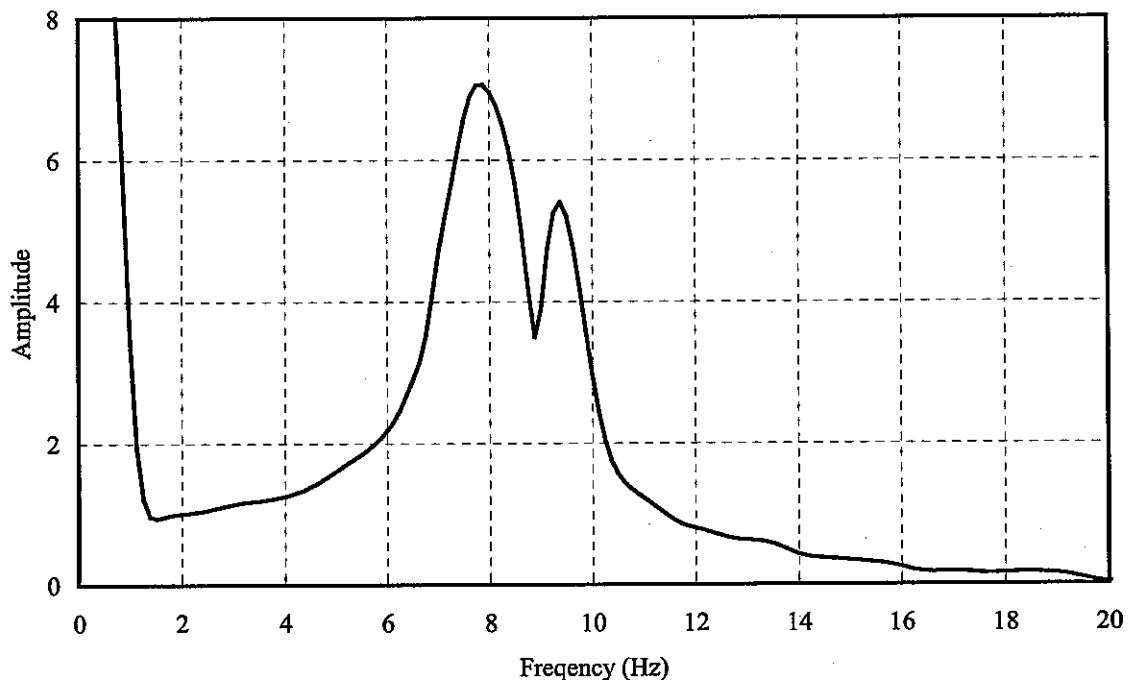


(a) 伝達関数

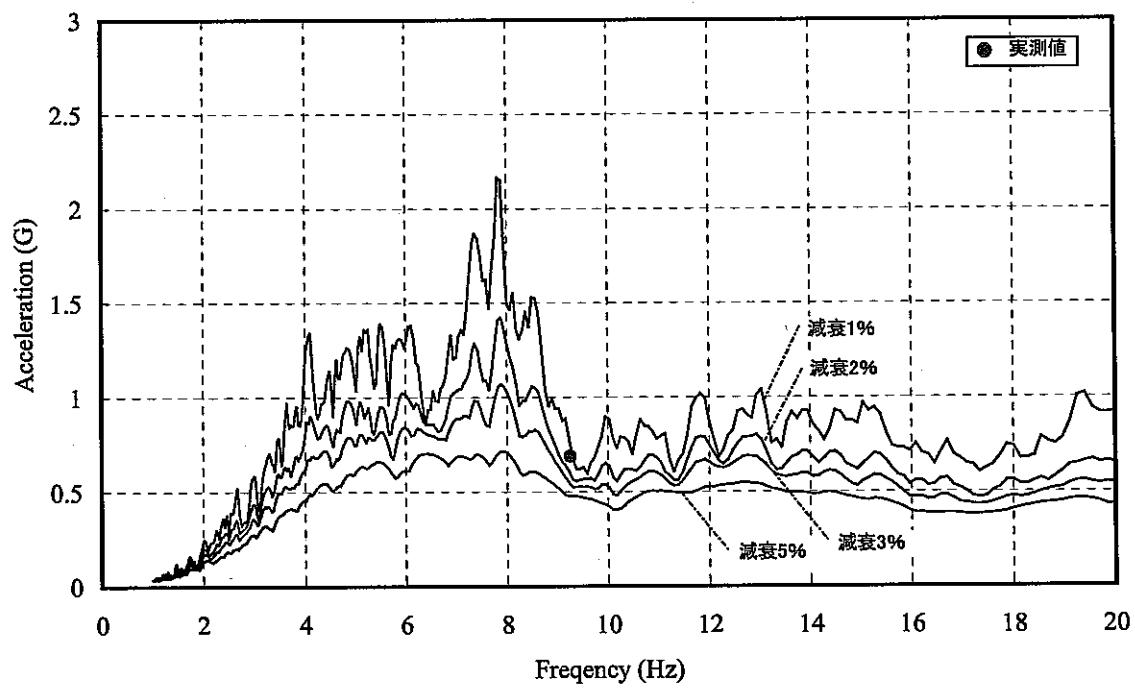


(b) 応答スペクトル

図 4.1.19 加振試験における周波数特性 (P8)

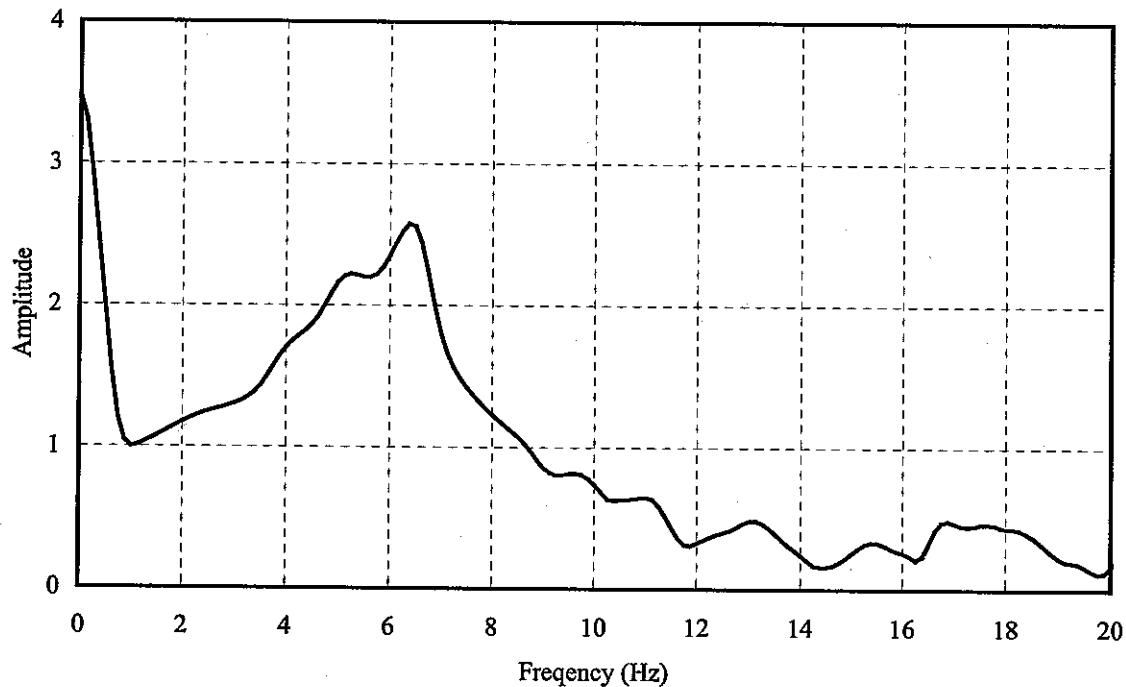


(a) 伝達関数

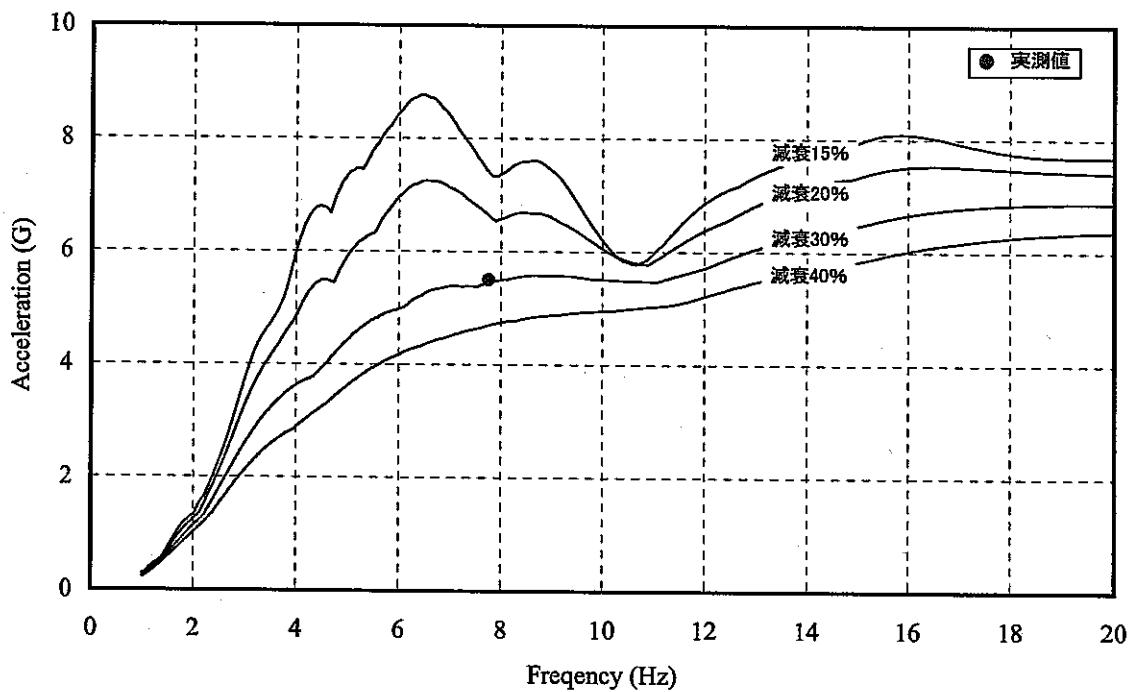


(b) 応答スペクトル

図 4.1.20 加振試験における周波数特性 (P9)



(a) 伝達関数



(b) 応答スペクトル

図 4.1.21 加振試験における周波数特性 (P10)

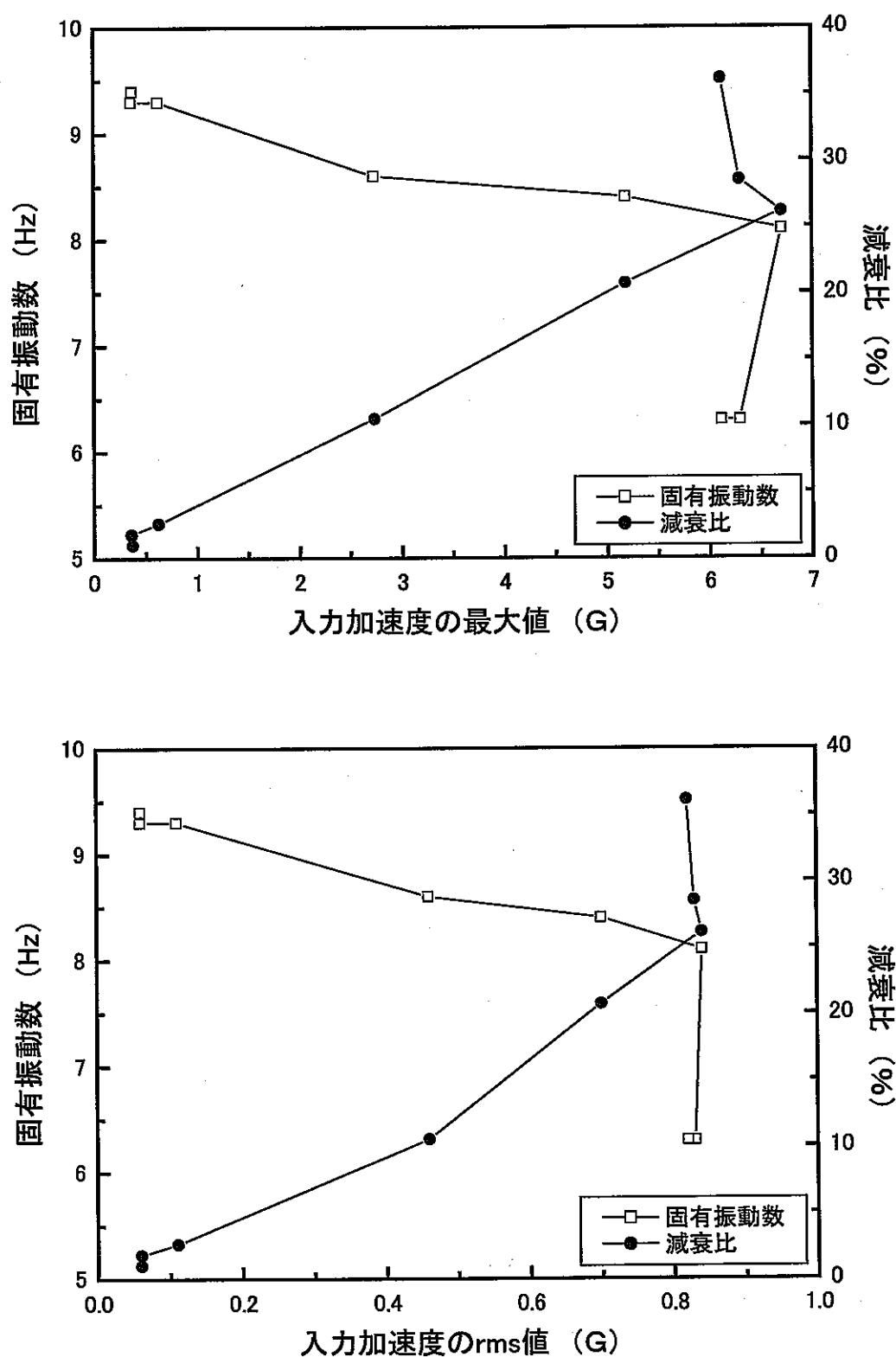


図 4.1.22 入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移

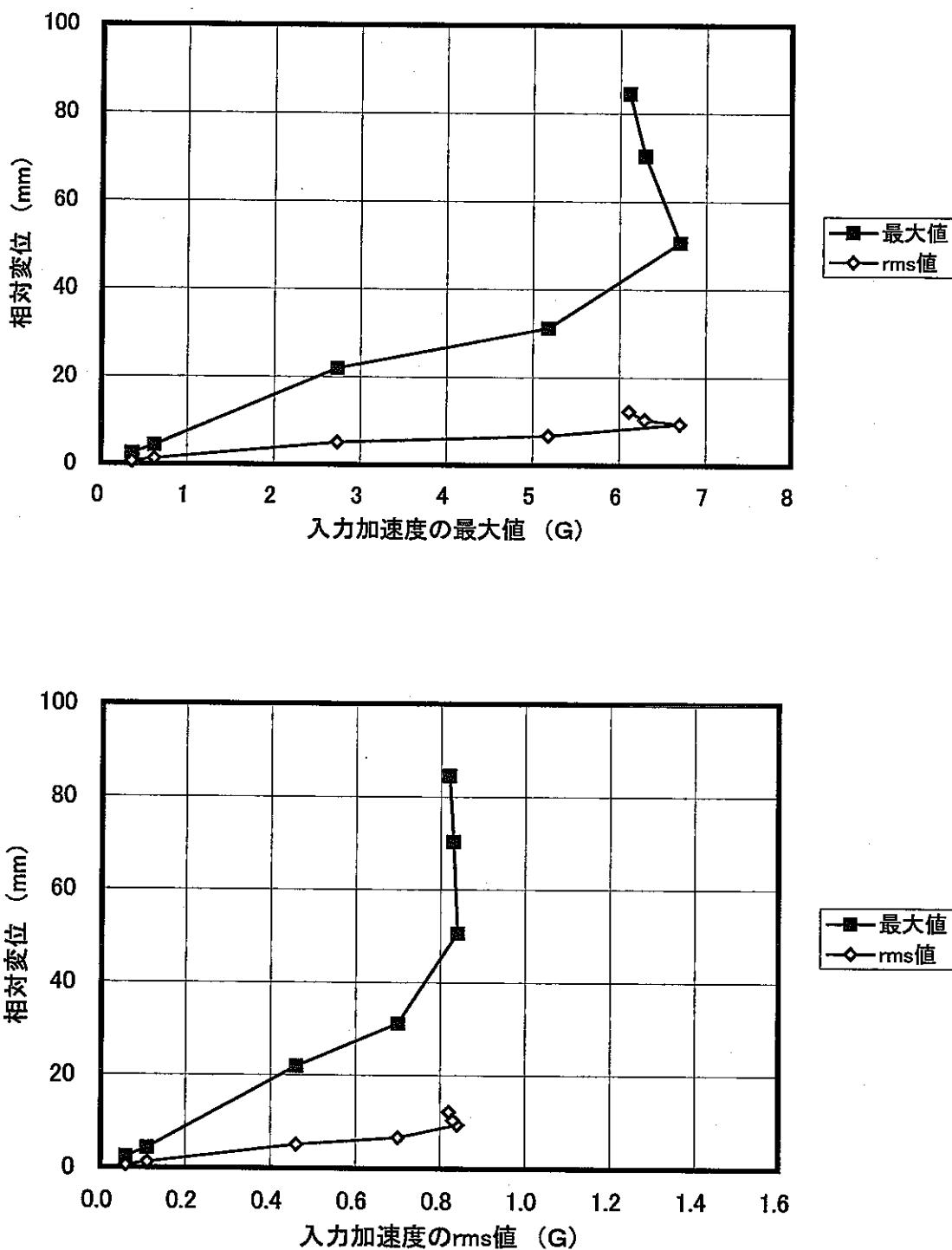


図4.2.1 入力加速度に対する相対変位の推移

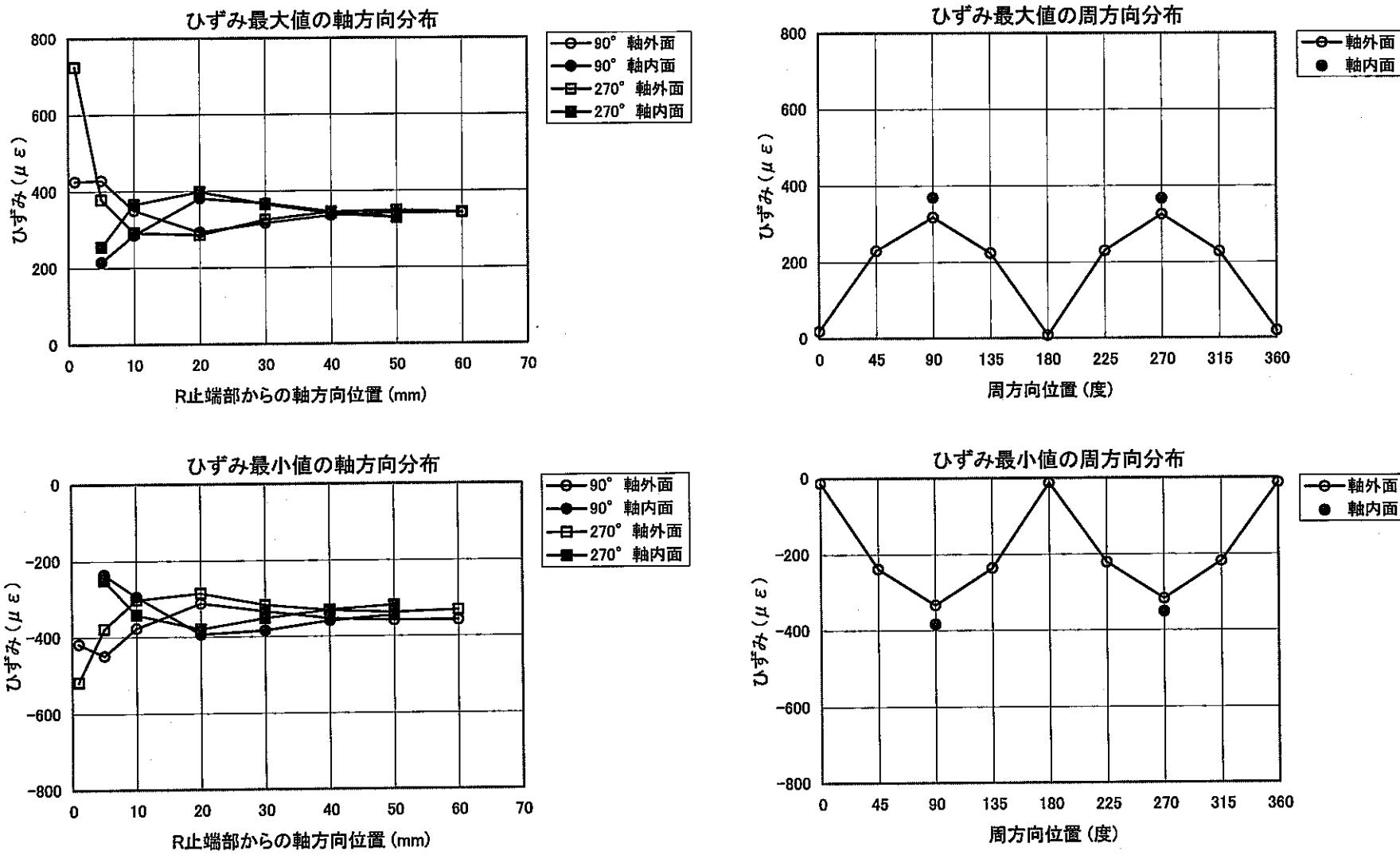


図 4.3.1 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P1)

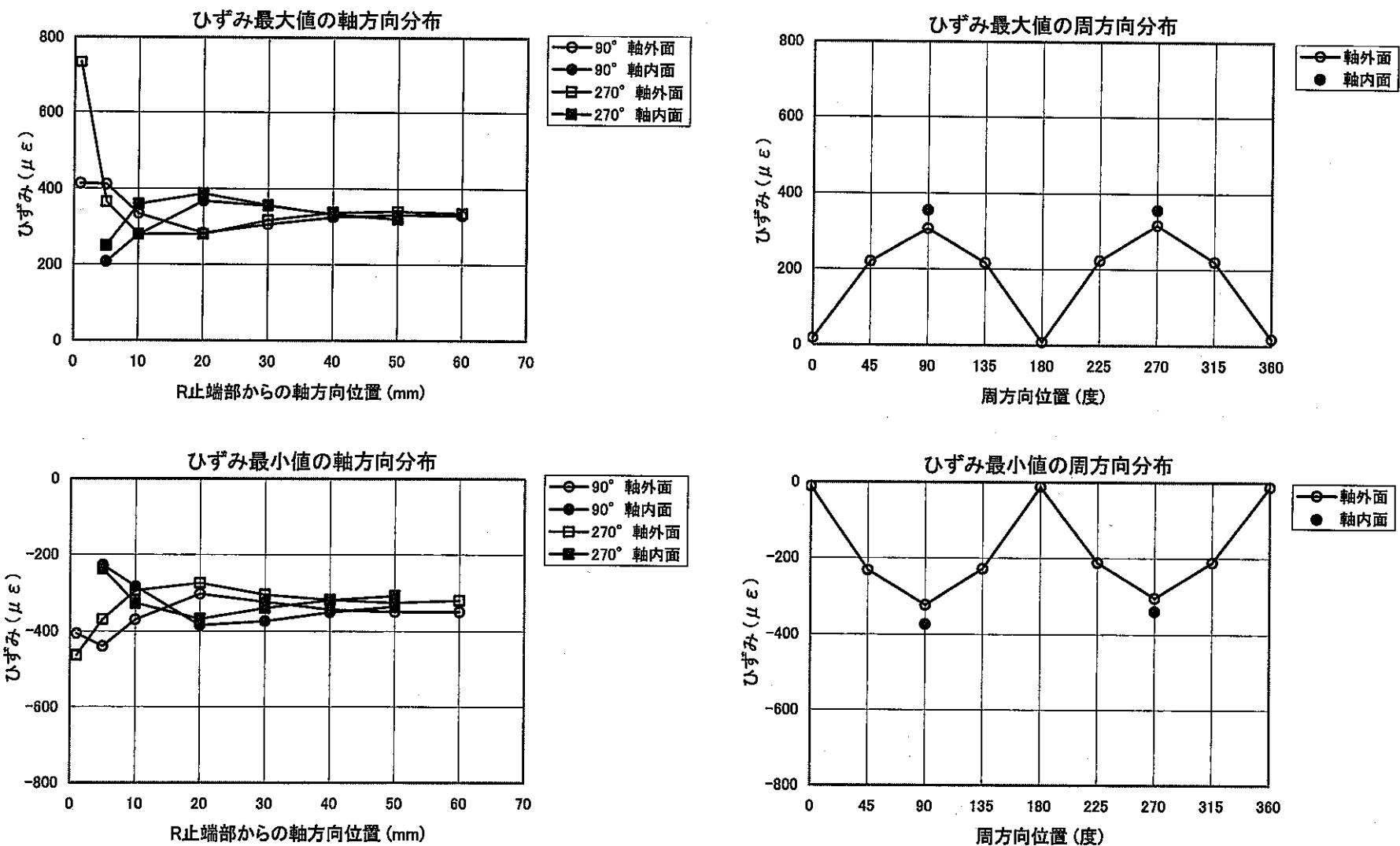


図 4.3.2 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P2)

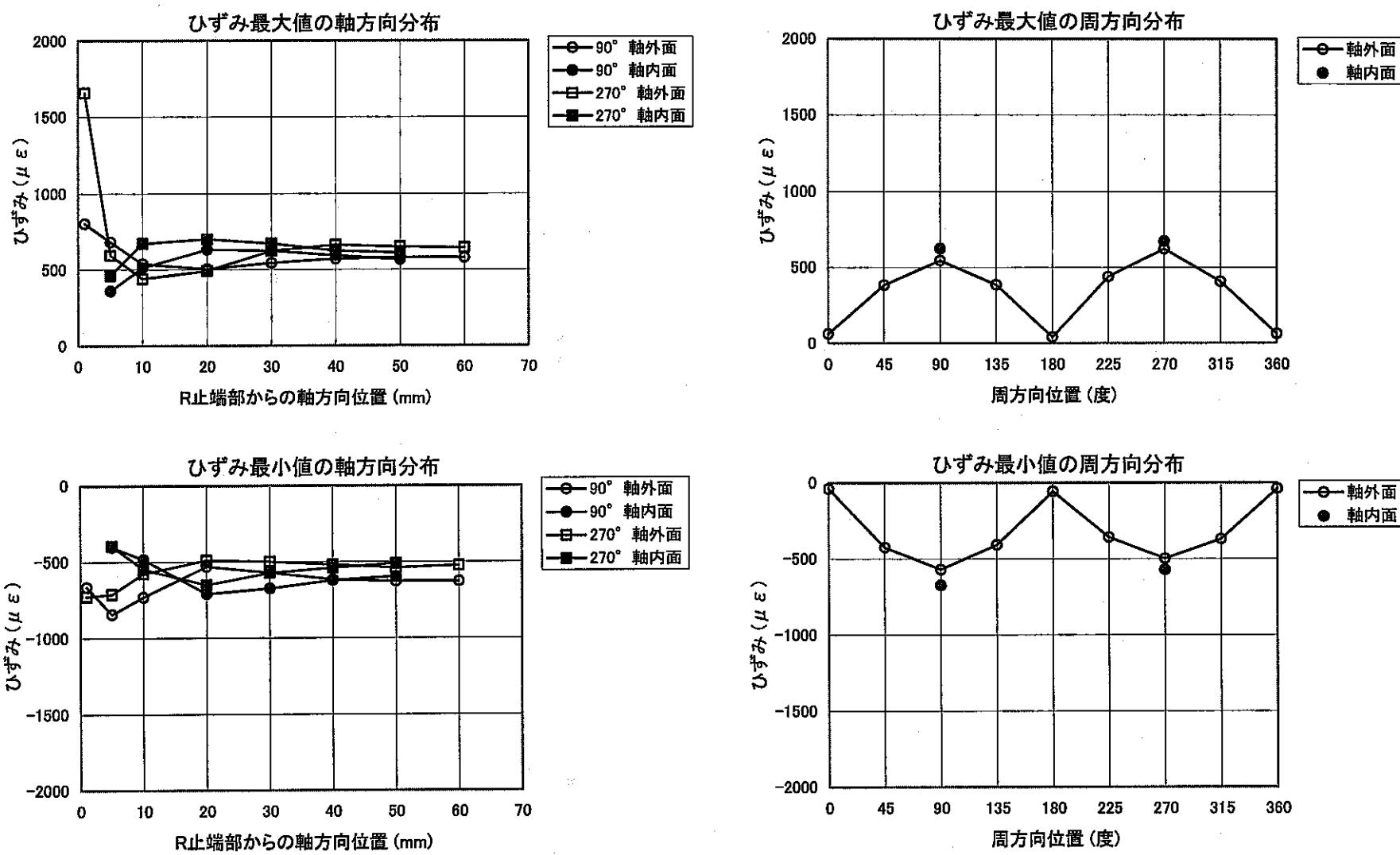


図 4.3.3 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P3)

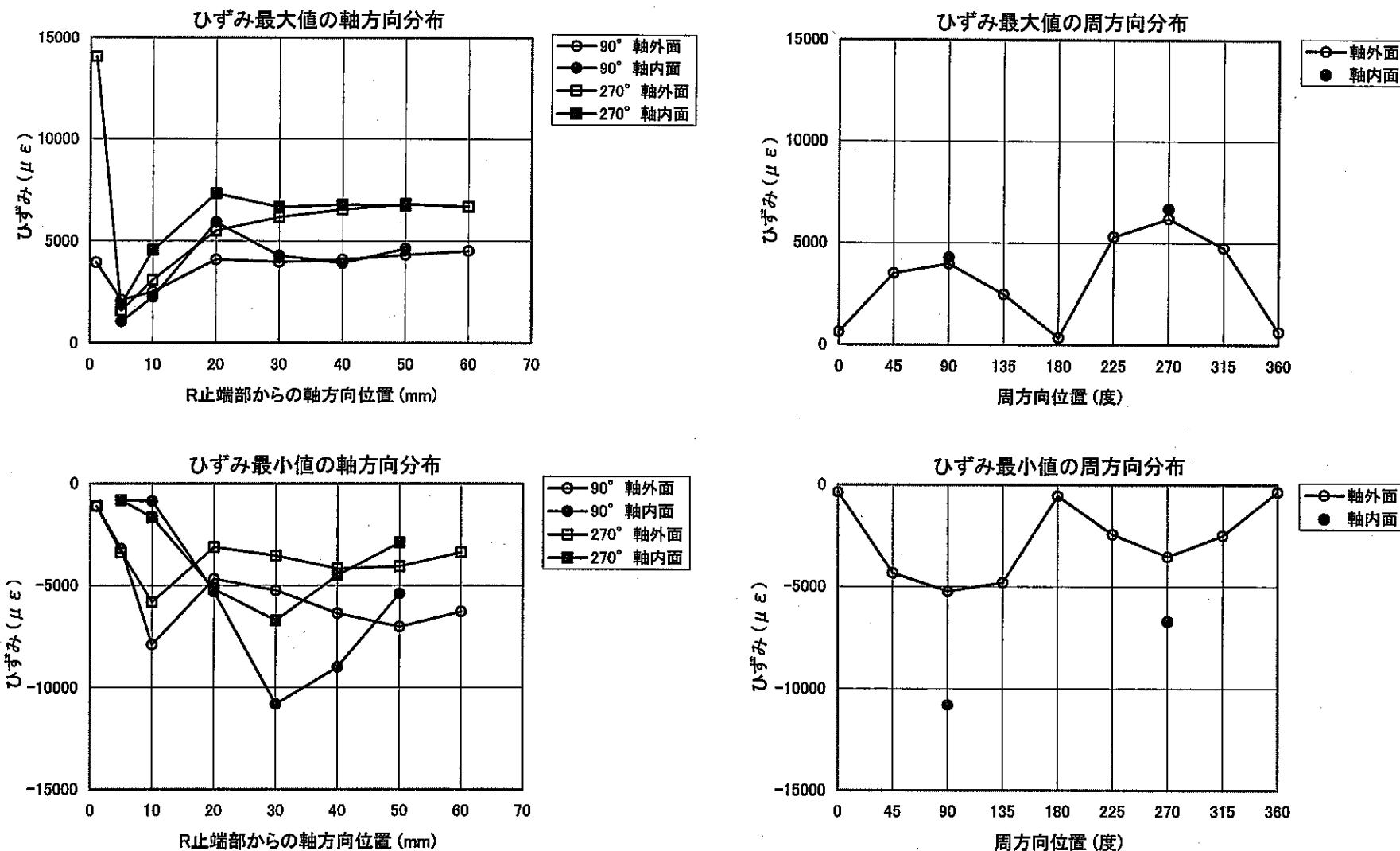


図 4.3.4 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P4)

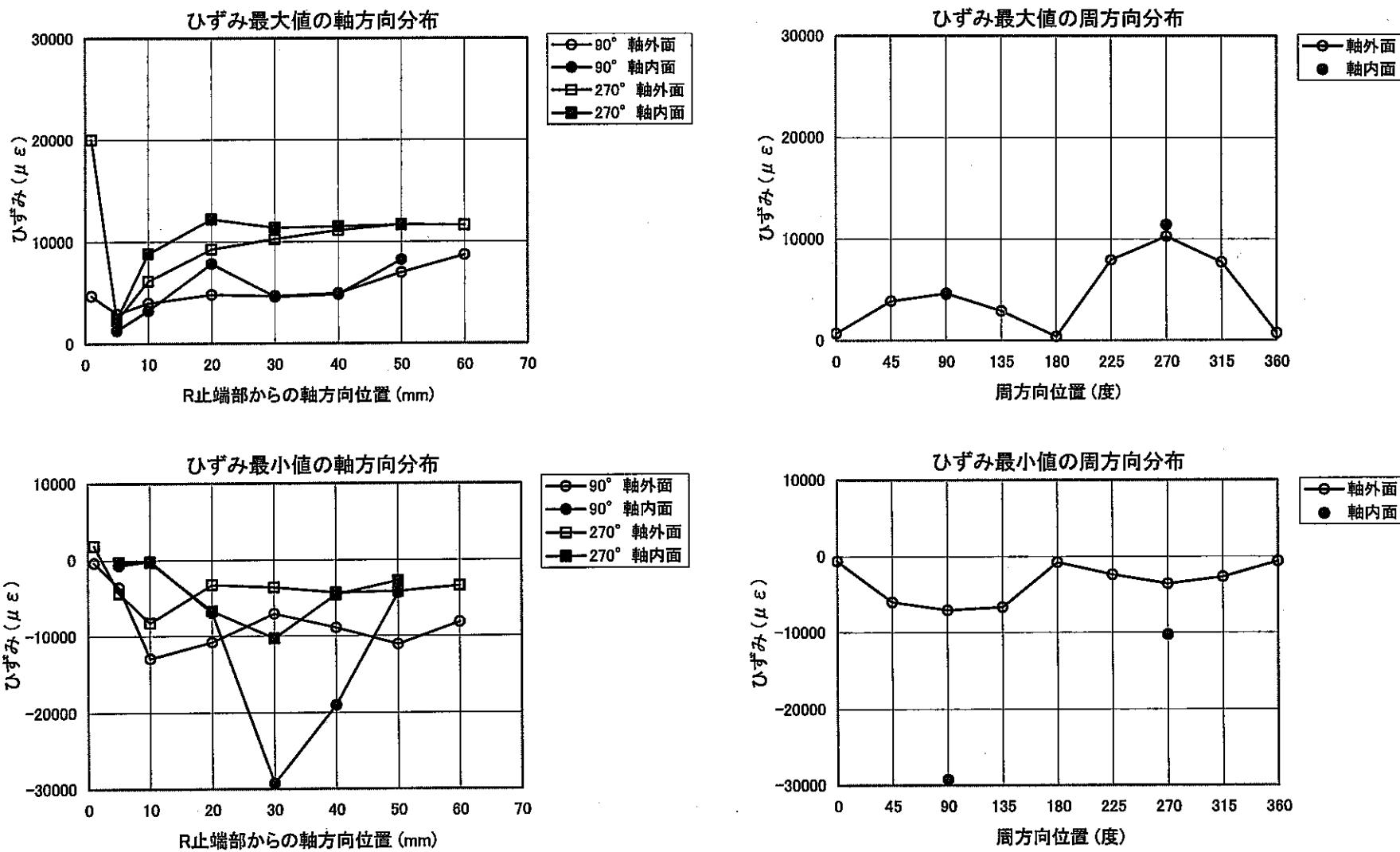


図 4.3.5 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P5)

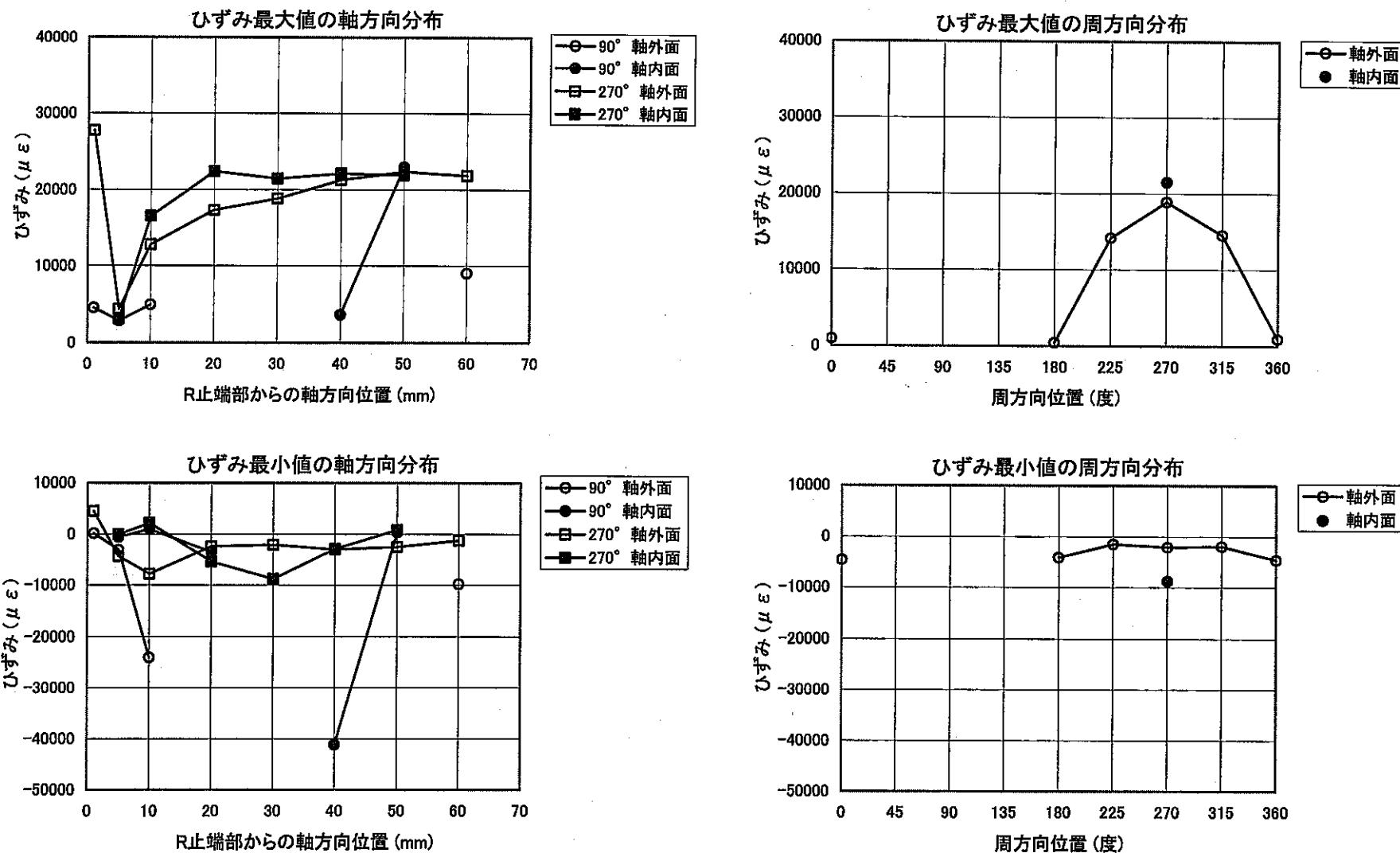


図 4.3.6 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P6)

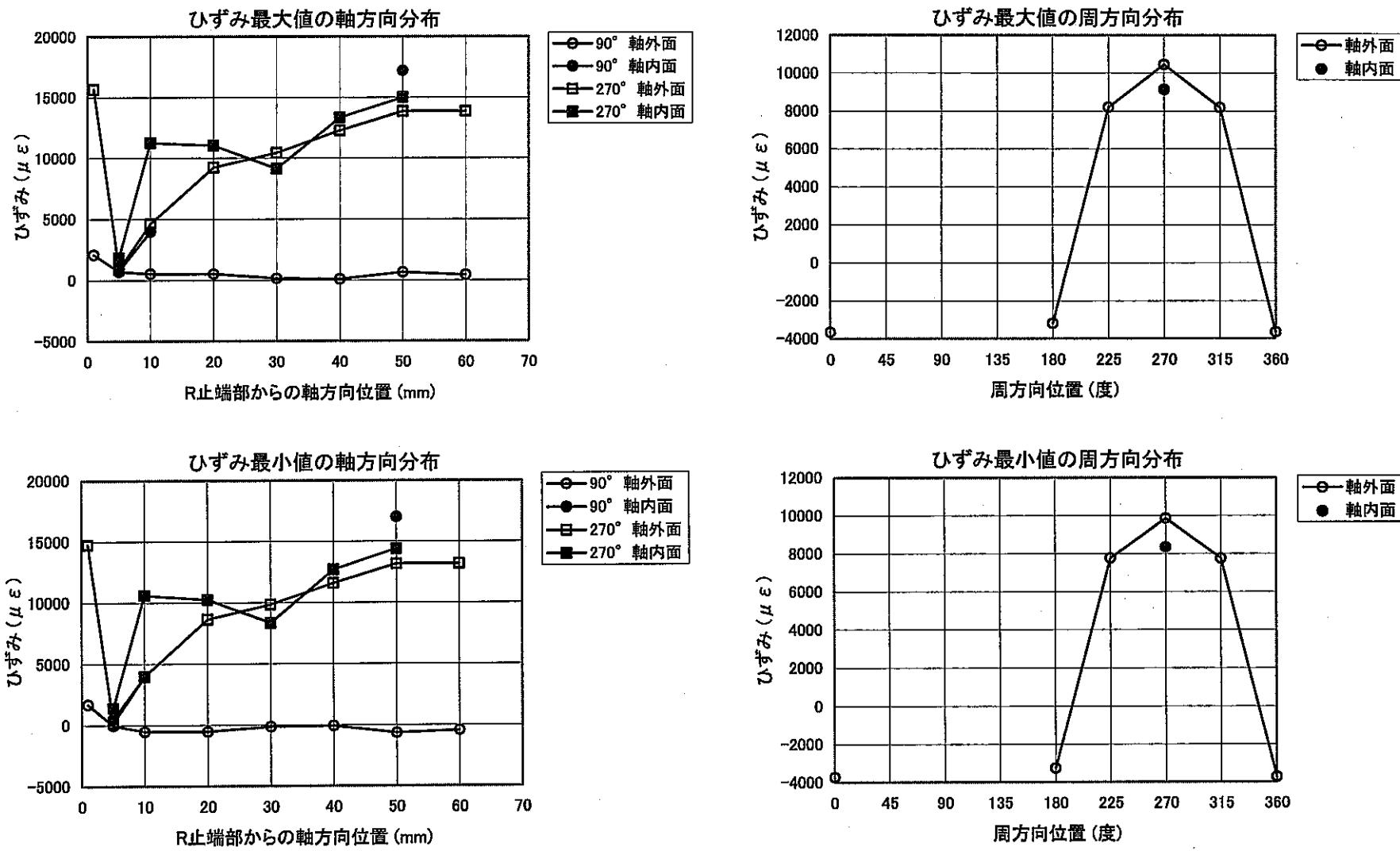


図 4.3.7 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P7)

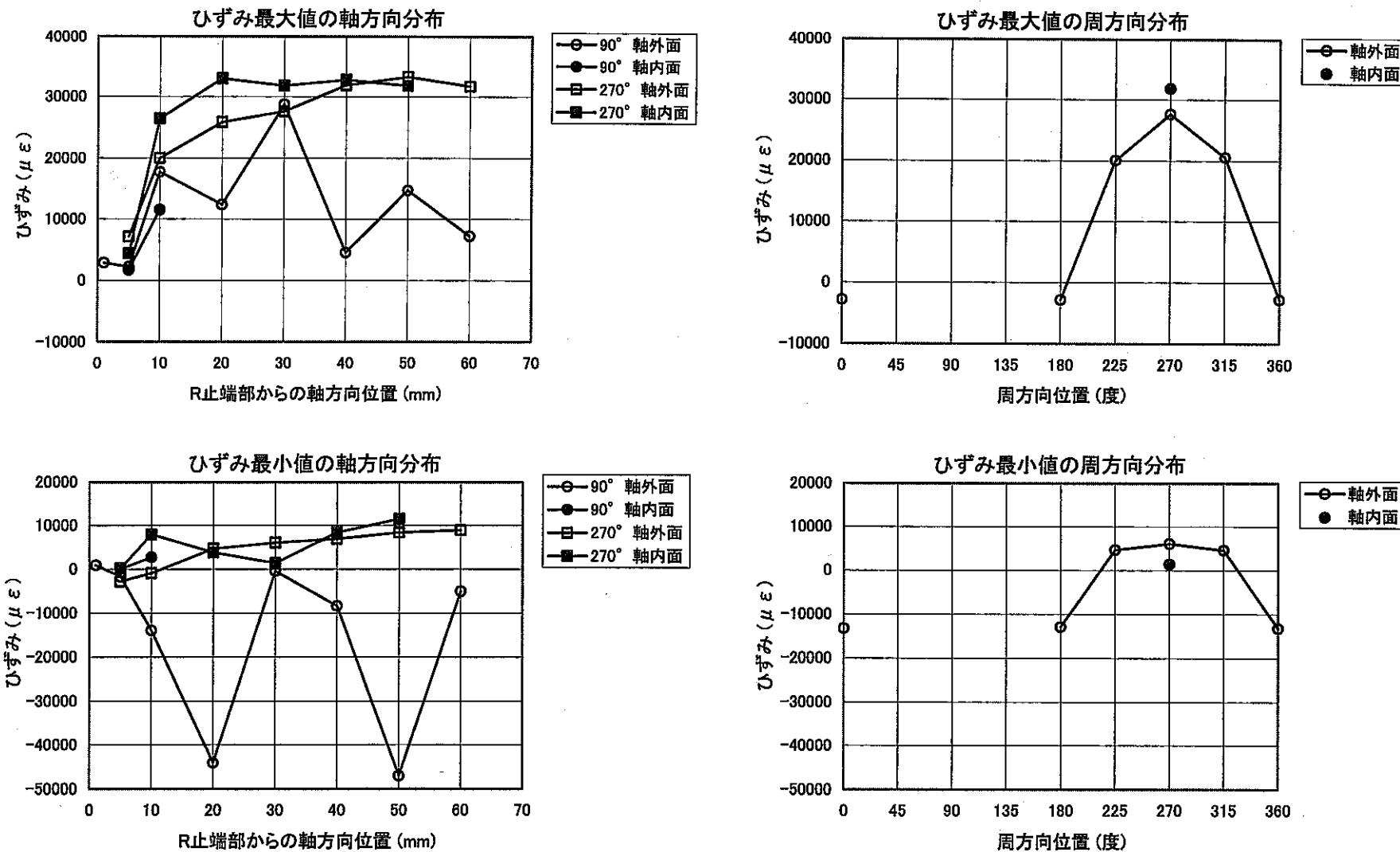


図 4.3.8 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P8)

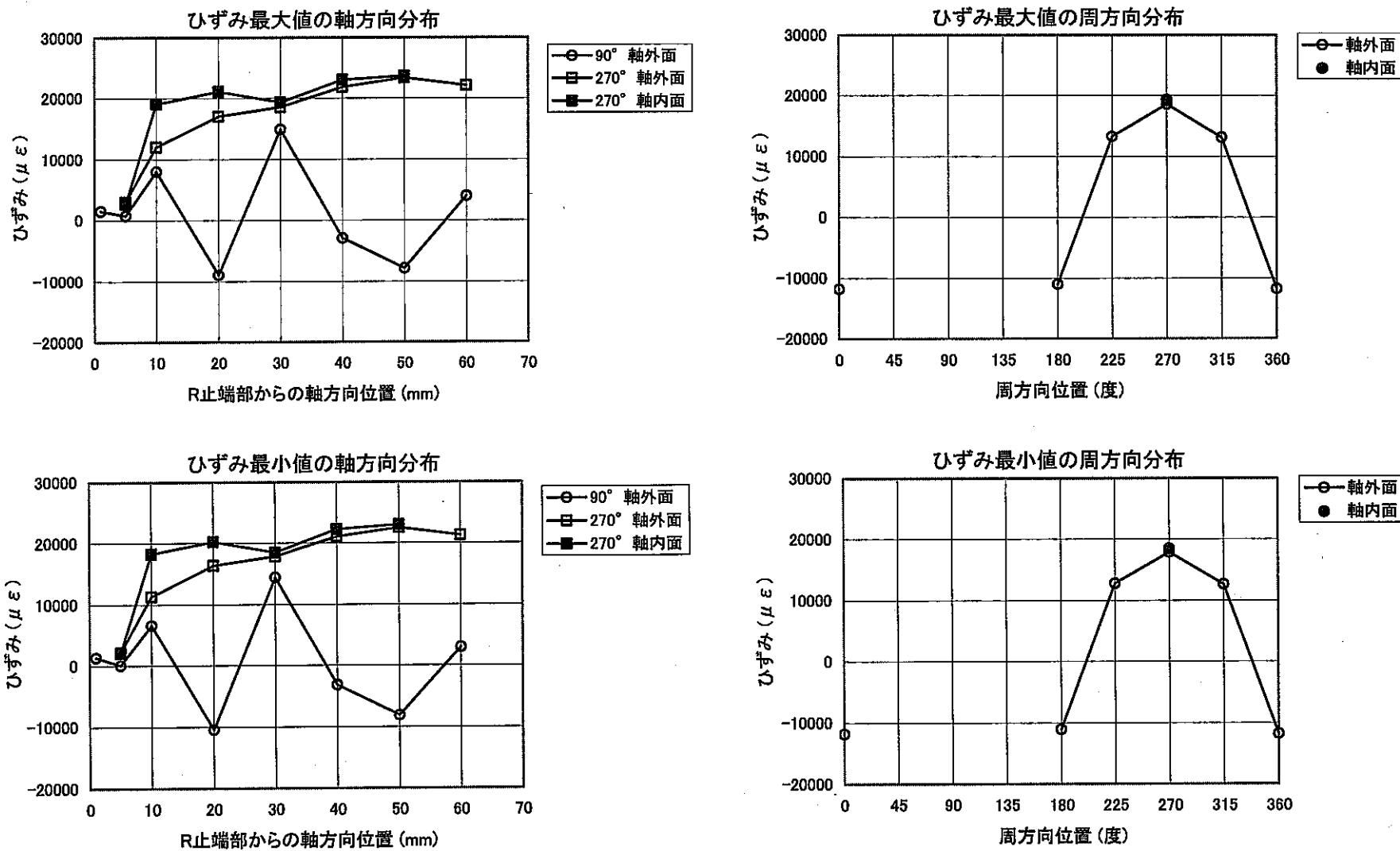


図 4.3.9 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P9)

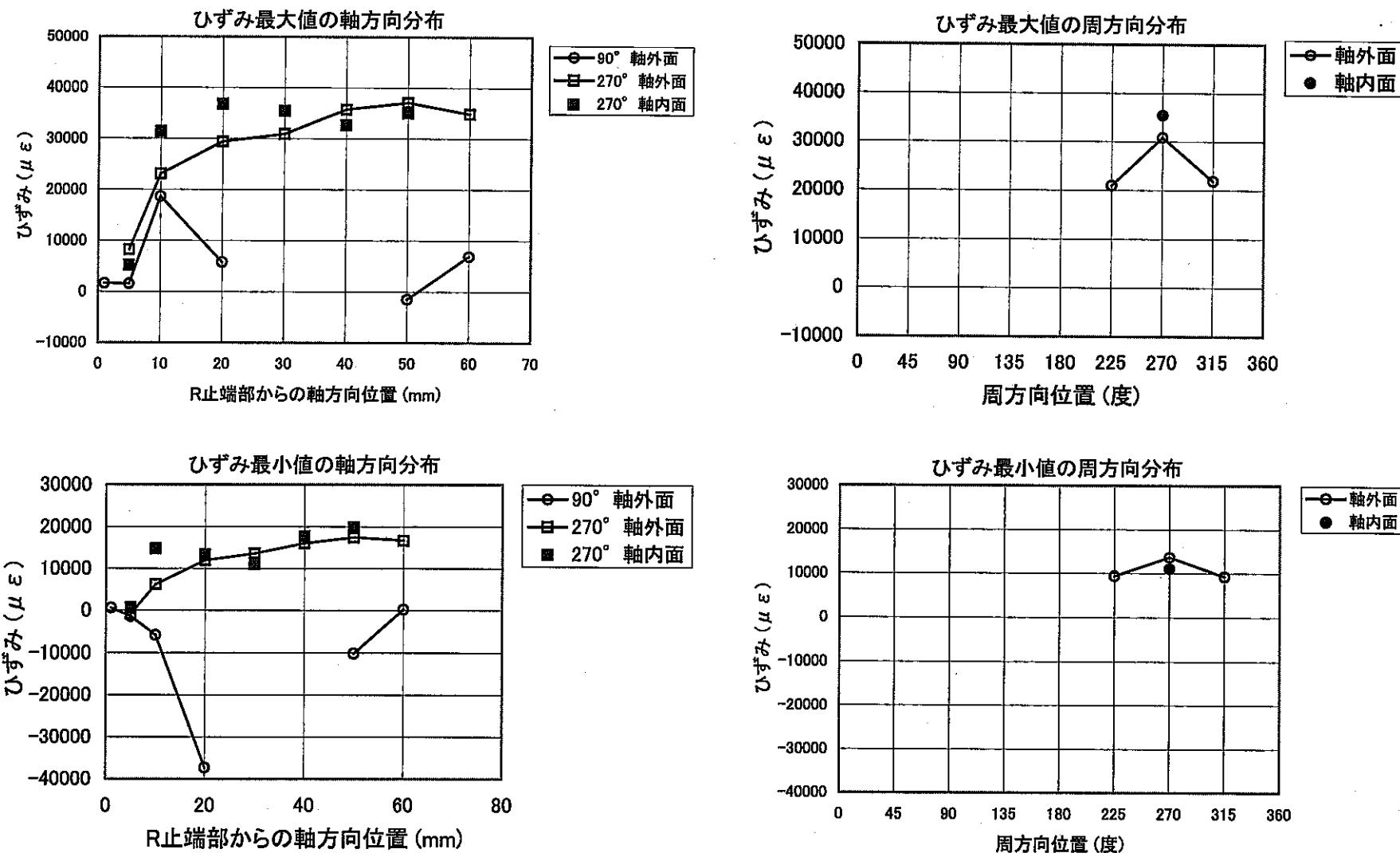


図 4.3.10 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(P10)

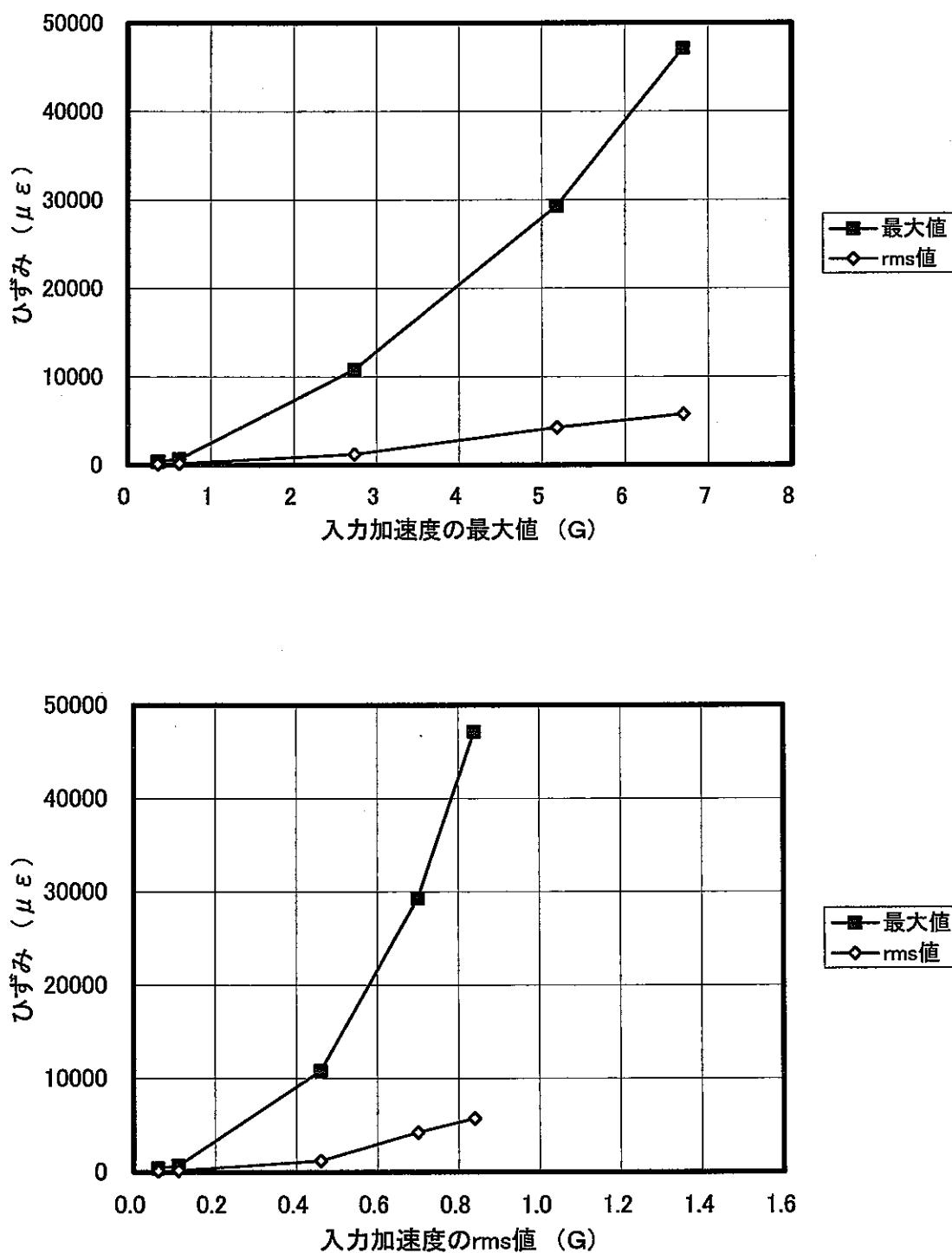


図4.3.11 入力加速度に対するひずみ(43ch)の推移

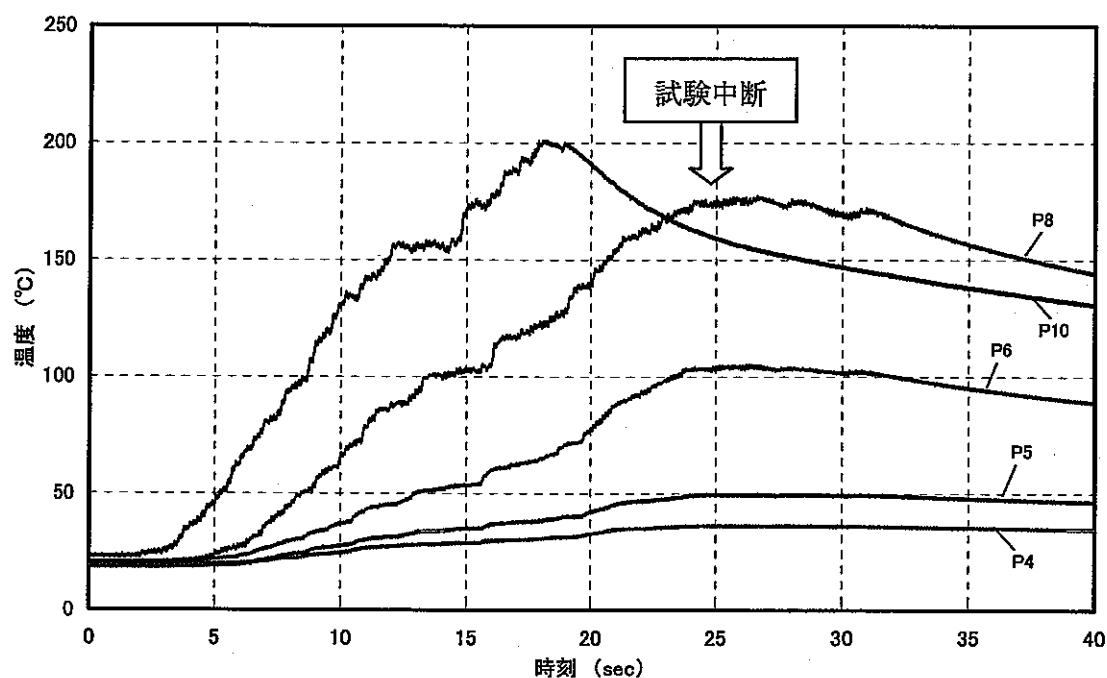


図 4.4.1 温度の時刻歴（地震波漸増加振試験）

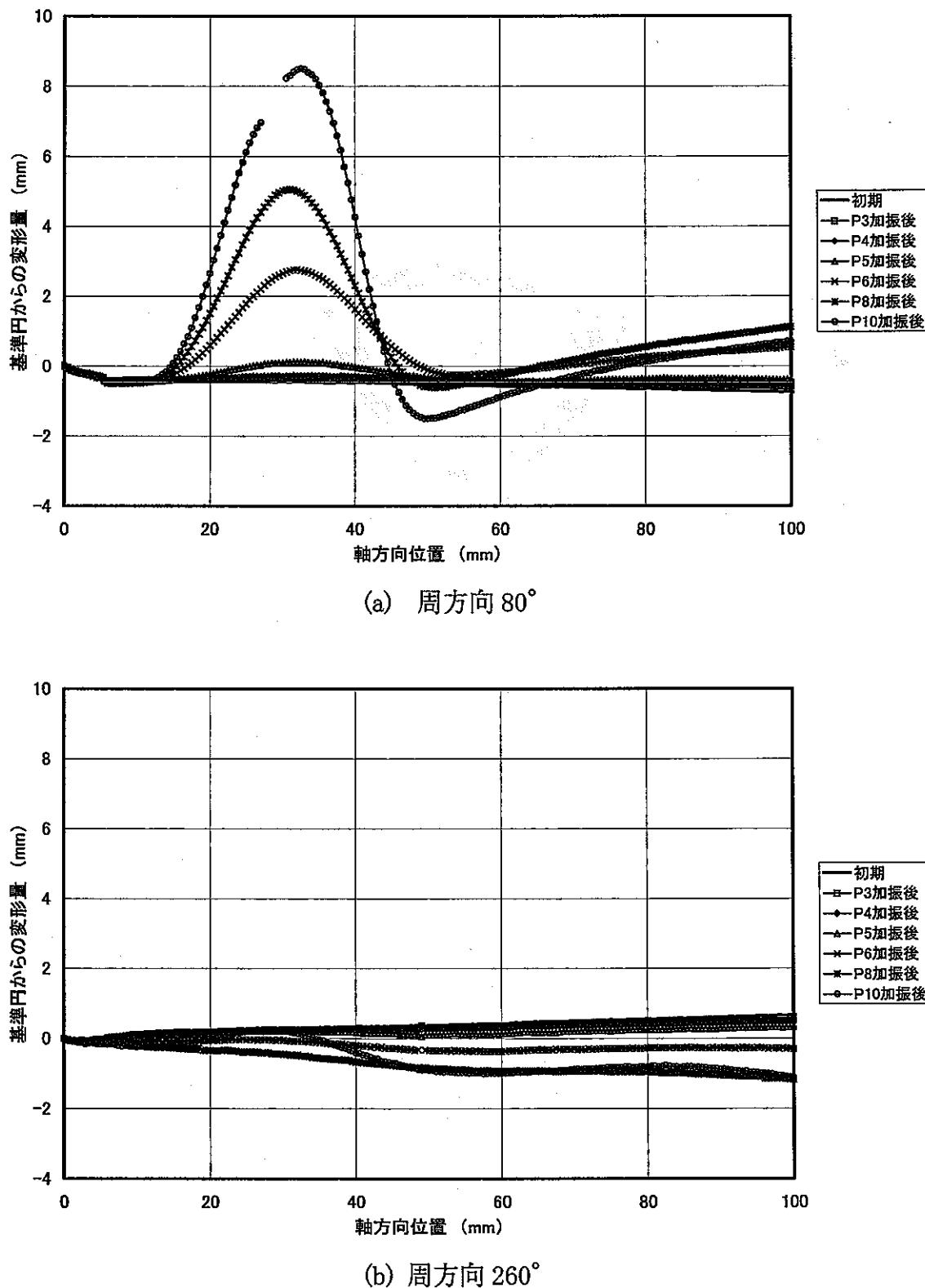


図 4.5.1 各加振レベルにおける試験体の形状計測結果

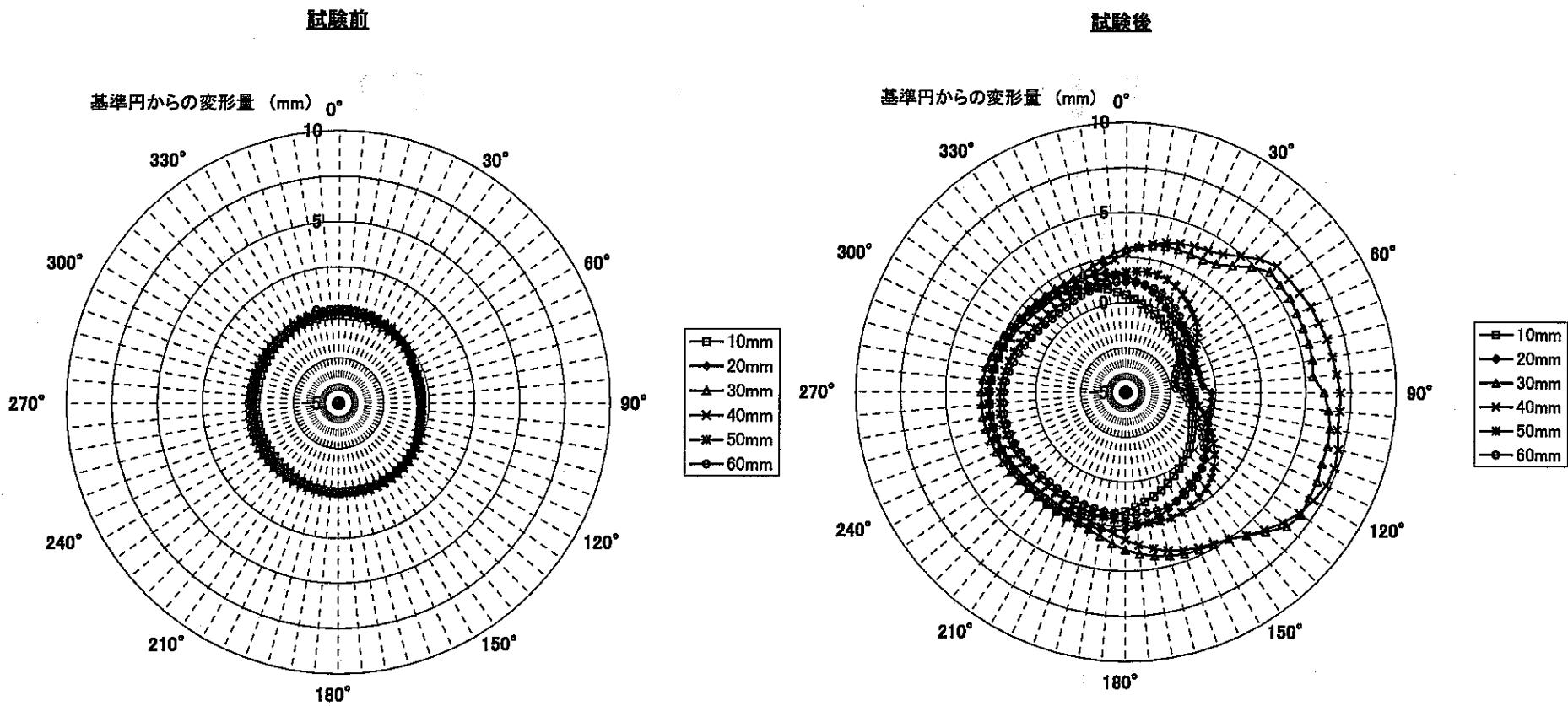


図 4.5.2 試験前後の試験体形状計測結果の比較

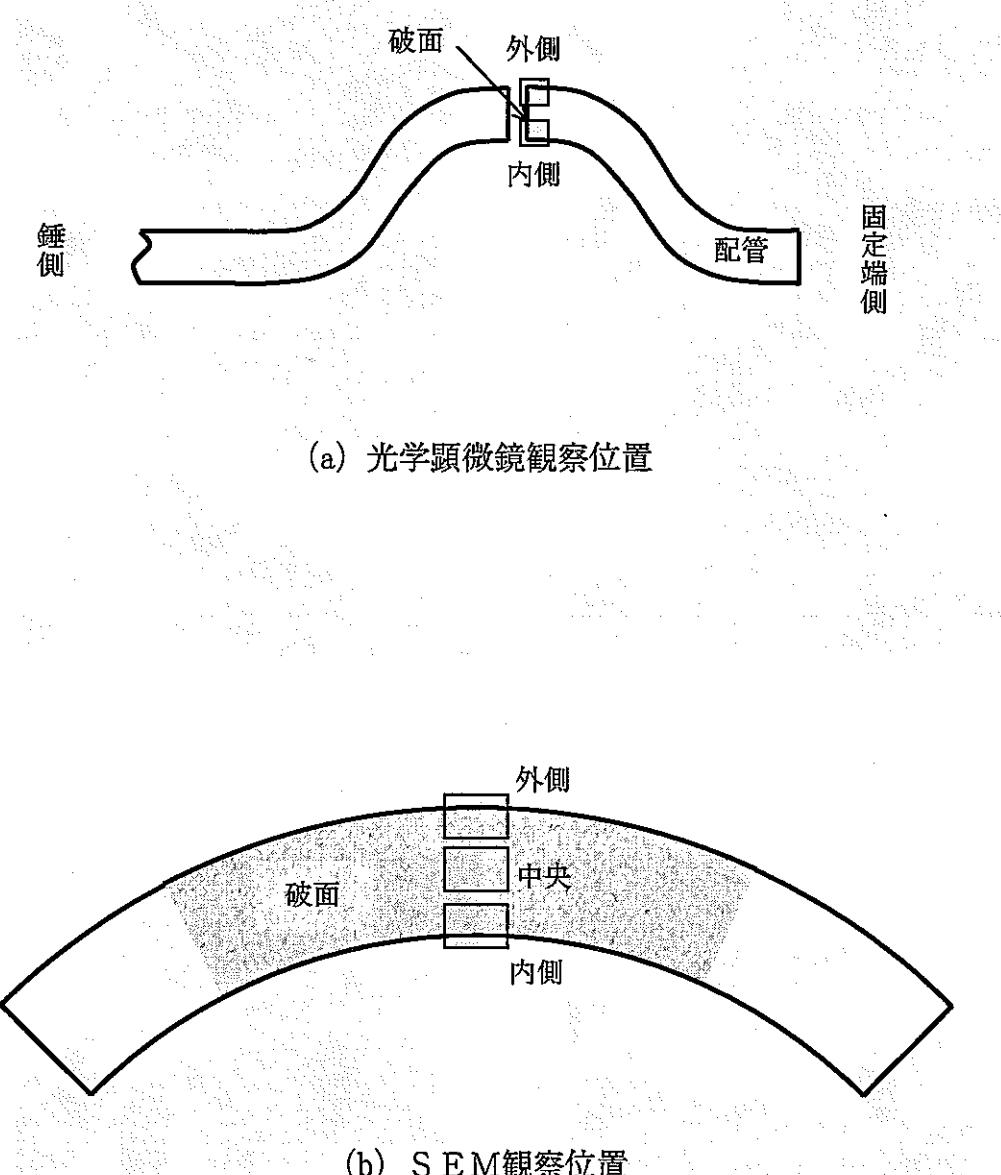
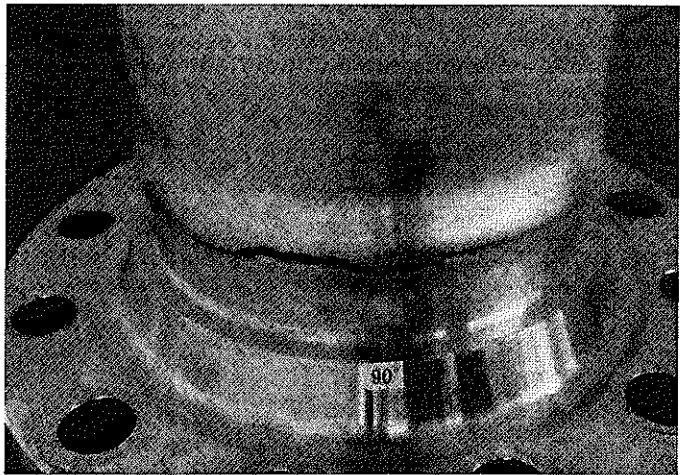
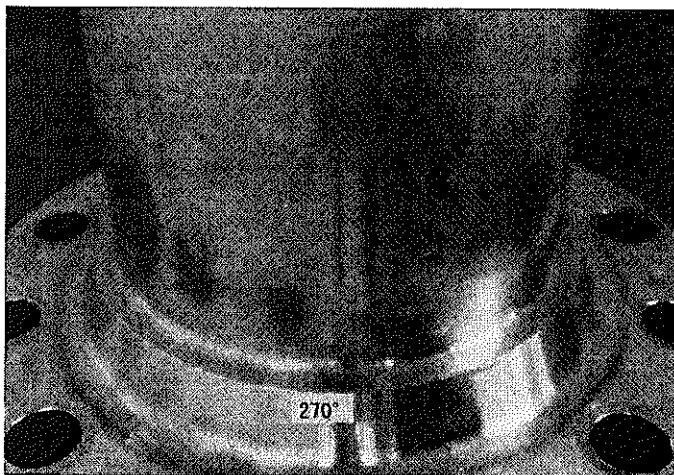


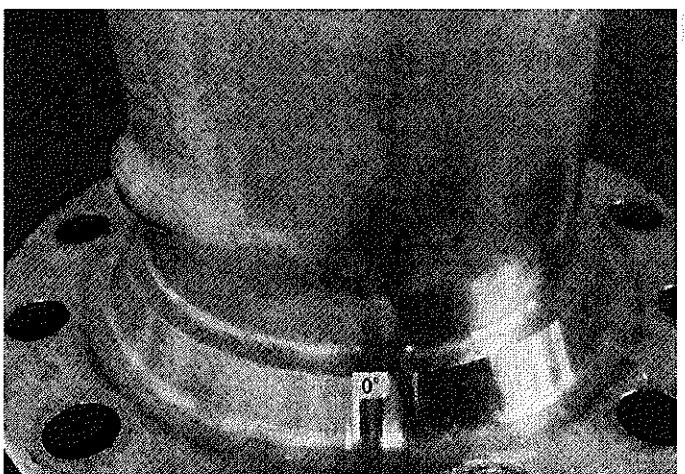
図 4.6.1 破面観察位置



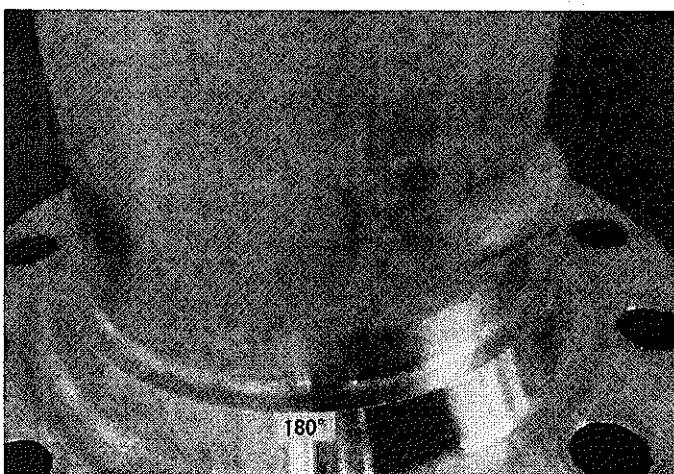
90°



270°



0°



180°

写真 4.6.1 き裂発生部付近の様子（地震波漸増加振試験）

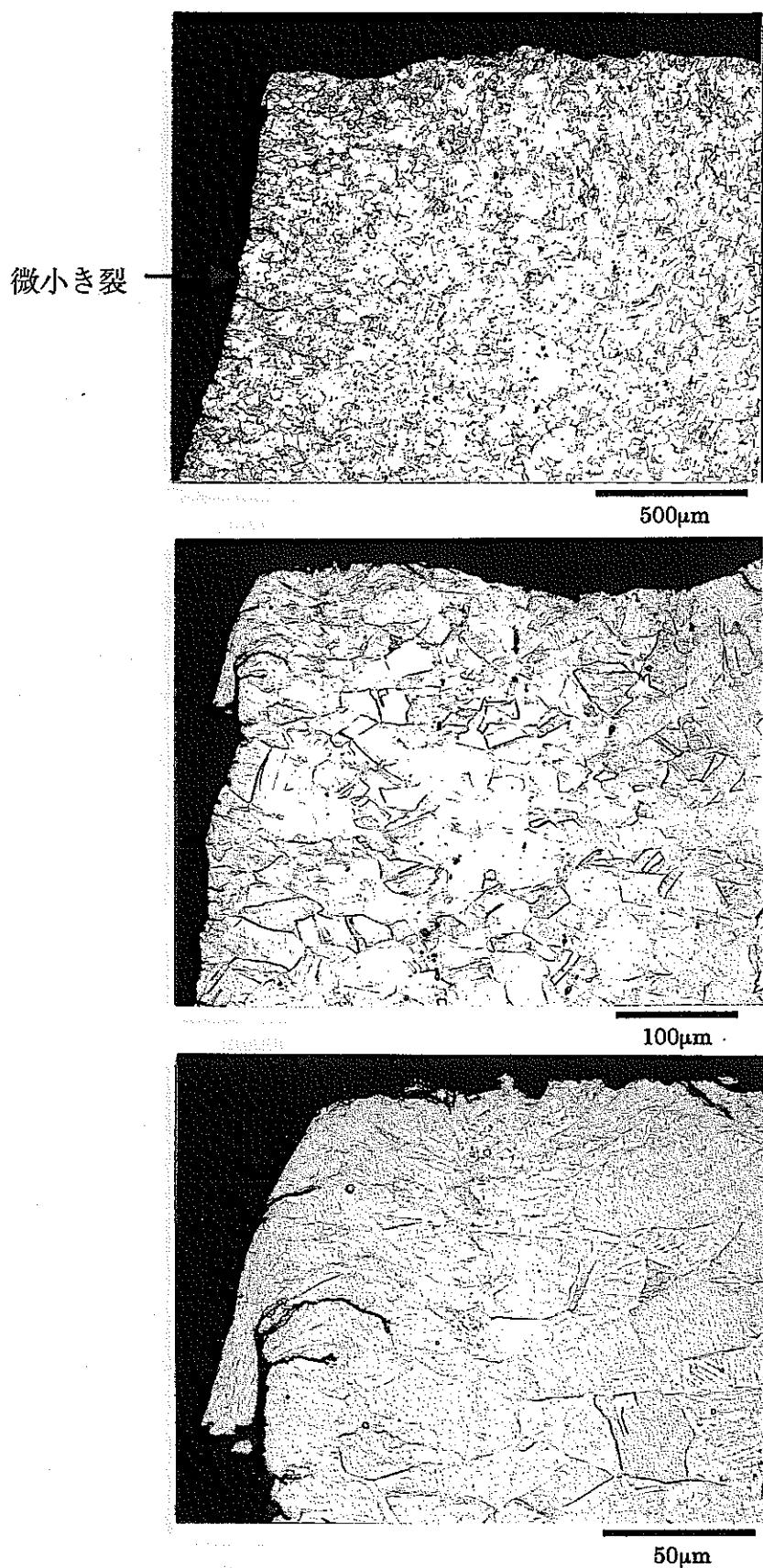


写真 4.6.2 き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面内側）

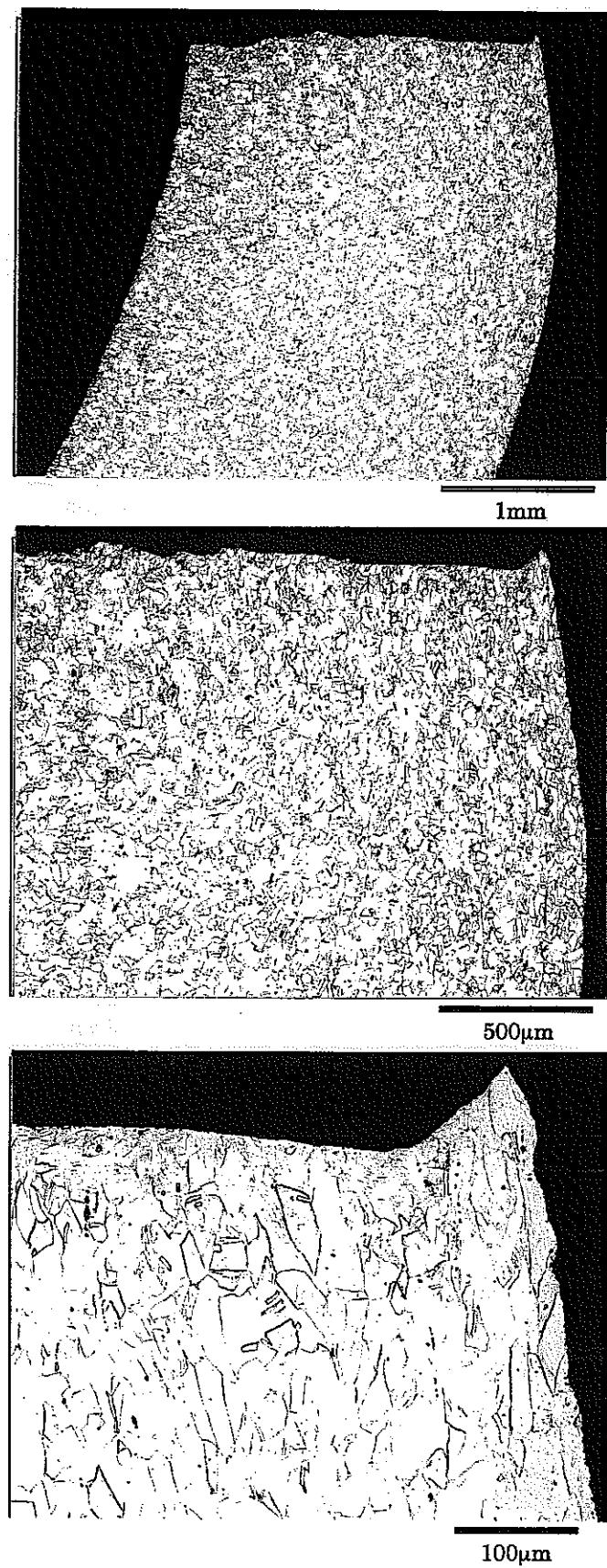
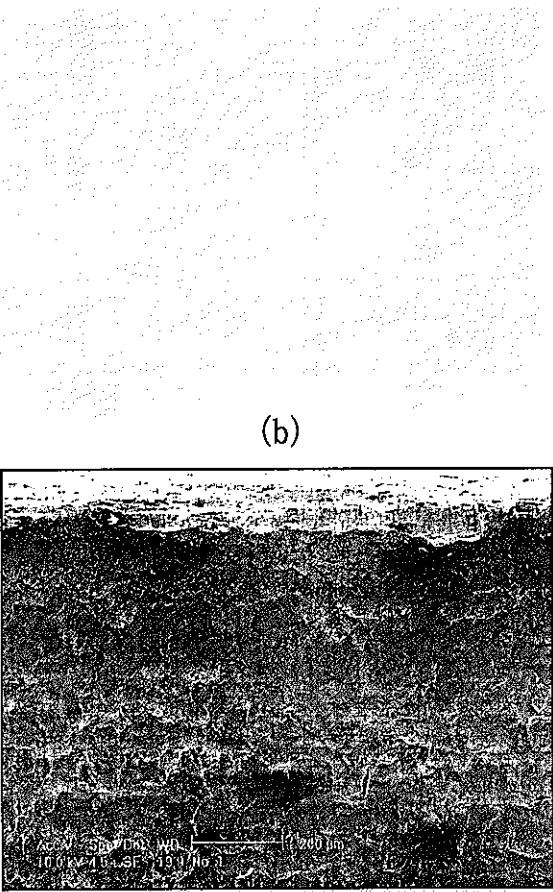


写真 4.6.3 き裂縦断面の光学顕微鏡観察結果（破面外側）



(b)

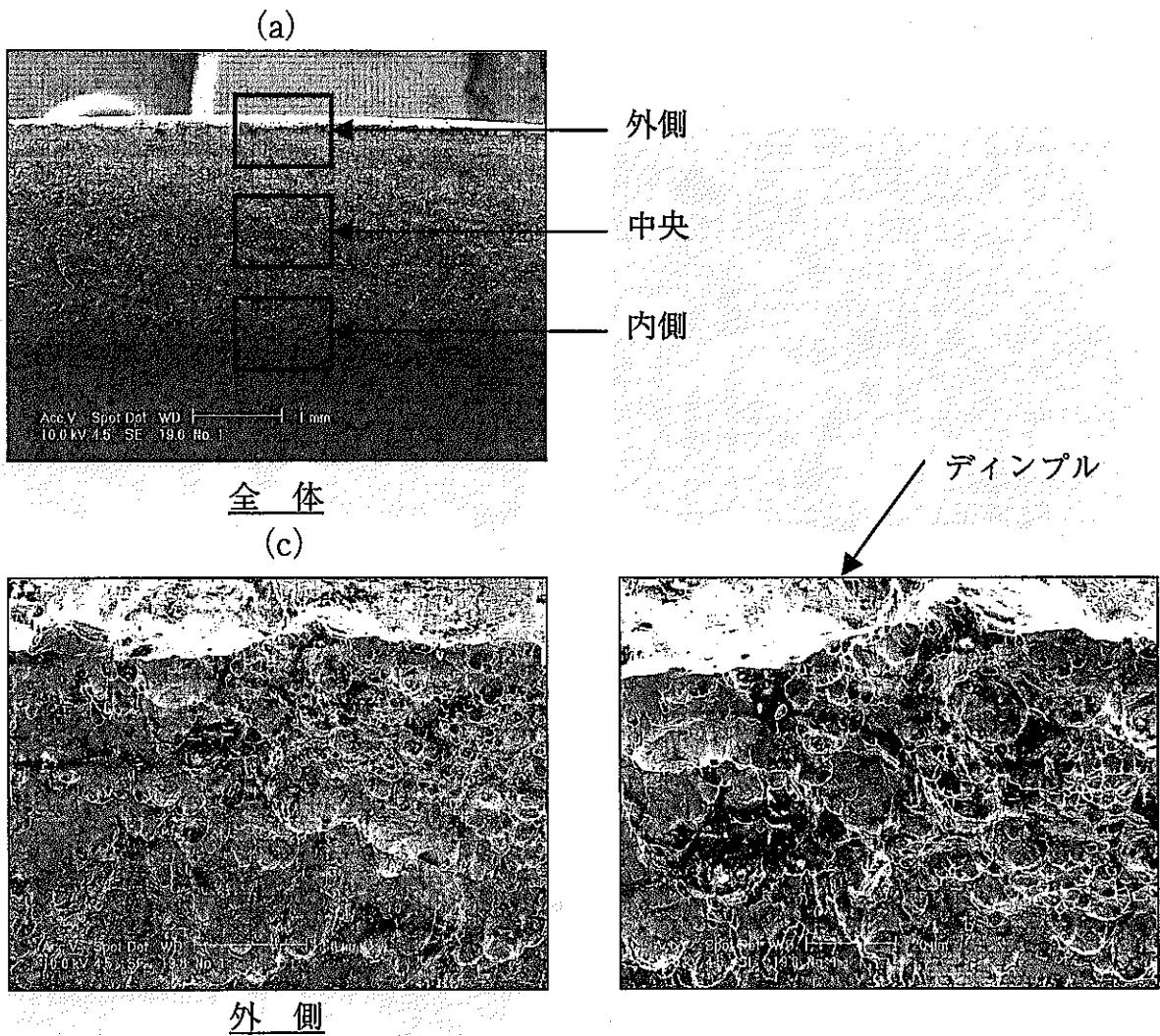


写真 4.6.4 破面の SEM 観察結果 (1/2)

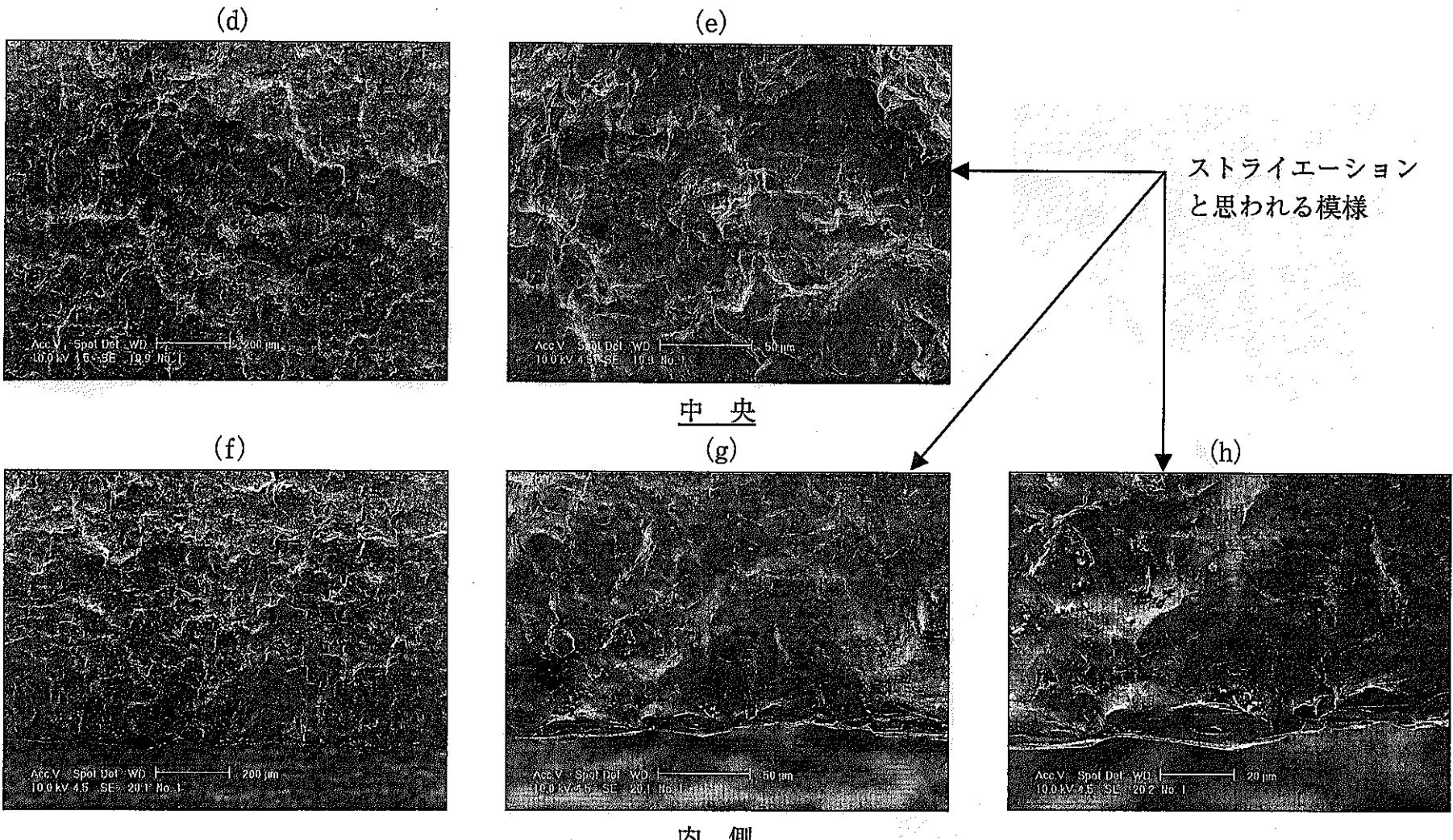


写真 4.6.5 破面の SEM 観察結果 (2/2)

## 5. 地震波限界加振試験結果

S-8 試験体を用いて地震波限界加振試験を実施した。Q3 加振後に、軸方向 30mm 付近の周方向 90° より外側に膨らむ変形が認められた。この変形部付近を観察し、き裂が発生していないことを確認したため試験を継続した。Q5 加振を開始し、約 10 秒後に試験を中断して変形部付近を観察したところ、変形部（軸方向 30mm 付近の周方向 90°）の内表面より表面き裂が発生していたため、地震波限界加振試験を終了した。

本章では、地震波限界加振試験において、加速度、変位、ひずみ、温度を計測し、さらに試験終了後に試験体の形状計測を行った結果をまとめて示す。

### 5.1. 加速度

各加振レベルにおいて、加振台で計測した入力加速度（57ch）の時刻歴を図 5.1.1(a)～5.1.5(a)に、錐で計測した応答加速度（74ch）の時刻歴を図 5.1.1(b)～5.1.5(b)に示す。これらの結果を基に、入力加速度に対する応答加速度の推移をまとめて図 5.1.6 に示す。

図 5.1.7(a)～5.1.11(a)に、入力加速度に対する応答加速度の伝達関数を示す。伝達関数は、40 秒間の時刻歴データを時間軸方向に 8 秒間で区分したものを作成し、前後の区間を 4 秒間オーバーラップすることにより 9 区間に分割し、区間毎に算出した。さらに、区間毎の伝達関数を平均化処理することにより全区間の伝達関数とし、この伝達関数のピーク周波数を各加振レベルにおける固有振動数として決定した。

図 5.1.7(b)～5.1.11(b)に、線形応答解析により算出した応答スペクトルの減衰比による変化を示す。入力加速度の最大値と上記の固有振動数より得られる実測値について、最も近い応答スペクトルの減衰比を各加振試験における減衰比として決定した。

図 5.1.12 に入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移を示す。

### 5.2. 相対変位

各加振レベルにおいて、試験体に作用した相対変位の時刻歴を図 5.1.1(c)～5.1.5(c)に示す。試験体に作用した相対変位とは、錐で計測した変位（85ch）と加振台で計測した変位（82ch）の差により算出し、加振試験後に生じる残留変形（永久変形）を含めた絶対量で示した。なお、相対変位の rms 値については、試験体の永久変形に伴いドリフトすることから、時刻歴の平均値よ

り差し引いた相対変位量より rms 値を算出している。

図 5.2.1 に入力加速度に対する相対変位の推移を示す。

### 5.3. ひずみ

Q3 加振以降では軸方向 30mm 付近で外側に膨らむ変形が生じたため、変形部付近のひずみゲージが剥れ、ひずみが計測不能となるものがあった。これらは接着材の性能を超える大ひずみが発生して剥れたものであり、そのような計測点の値は試験結果より除外した。また、計測可能であったひずみゲージについても、計測限界を超えるひずみ値を示したゲージも見られることから、ここでは定性的な試験結果のまとめのみを行うこととする。

局部的なひずみは変形部付近で大きな値を示した。変形様式を考慮した試験体外面の軸方向ひずみに着目し、図 5.3.1～5.3.5 に各加振レベルにおける最大値及び最小値の軸方向分布及び周方向分布を示す。なお、ひずみゲージの計測値は累積ひずみも含めて示している。また、ひずみ最大値及び最小値は各ひずみゲージ計測点での時刻歴より最大値及び最小値を算出したものであり、この図中の最大値及び最小値の発生時刻が等しいとは限らない。入力加速度に対するひずみ (43ch) の推移をまとめて図 5.3.6 に示す。

さらに、大加振レベルの加振 (Q3, Q5) ではひずみゲージの計測限界を超える大ひずみが発生したことから、ひずみ格子を用いて試験終了後の残留ひずみを計測した結果、試験体外面の軸方向 30mm 付近（き裂発生部付近）では  $12.5 \pm 1\%$  となった。

### 5.4. 温度

試験体表面の局部的な温度については、軸方向 30mm 付近、周方向  $90^\circ$  において計測した温度 (93ch) が最も高い値を示した。図 5.4.1 に、各加振レベルにおける温度の時刻歴を示す。

試験体の局部的な表面温度は、Q3 及び Q5 では約  $180^\circ\text{C}$  及び  $200^\circ\text{C}$  まで上昇する。しかし、表面温度が  $140^\circ\text{C}$  以上となると接着剤の接着性能限界を超えるため、ひずみゲージが剥れて計測不能となり、ひずみゲージに与える影響は考慮しなくてもよい。また、Q1, Q2, Q4 では表面温度はほぼ室温であることから、表面温度はひずみゲージの計測値に大きな影響を与えないと判断される。

## 5.5. 形状計測

各加振後に試験体の形状計測を行った。各加振レベルにおける周方向  $80^\circ$  及び  $260^\circ$  での形状計測結果を図 5.5.1 に示す。Q3において試験体の軸方向  $30mm$  付近の周方向  $80^\circ$  に残留変形が発生し、加振レベルが大きくなるとともに、残留変形が増大していく様子がわかる。

さらに、試験終了後に試験体の全体形状計測を行った。試験前後の試験体形状計測結果を比較して図 5.5.2 に示す。軸方向  $30mm$  付近では、 $90^\circ$  方向で  $7mm$  程度外側に膨らむ残留変形を生じているのに対して、 $270^\circ$  方向では残留変形がほとんど見られない。

## 5.6. き裂外観の観察

試験体を観察した結果、軸方向  $30mm$  付近の周方向  $90^\circ$  で配管内面に表面き裂が発生していた。写真 5.6.1 に試験体き裂発生部付近の様子を示す。き裂は試験体内面の変形部（軸方向  $30mm$  付近の周方向  $90^\circ$ ）に発生しており、試験体外面には認められなかった。

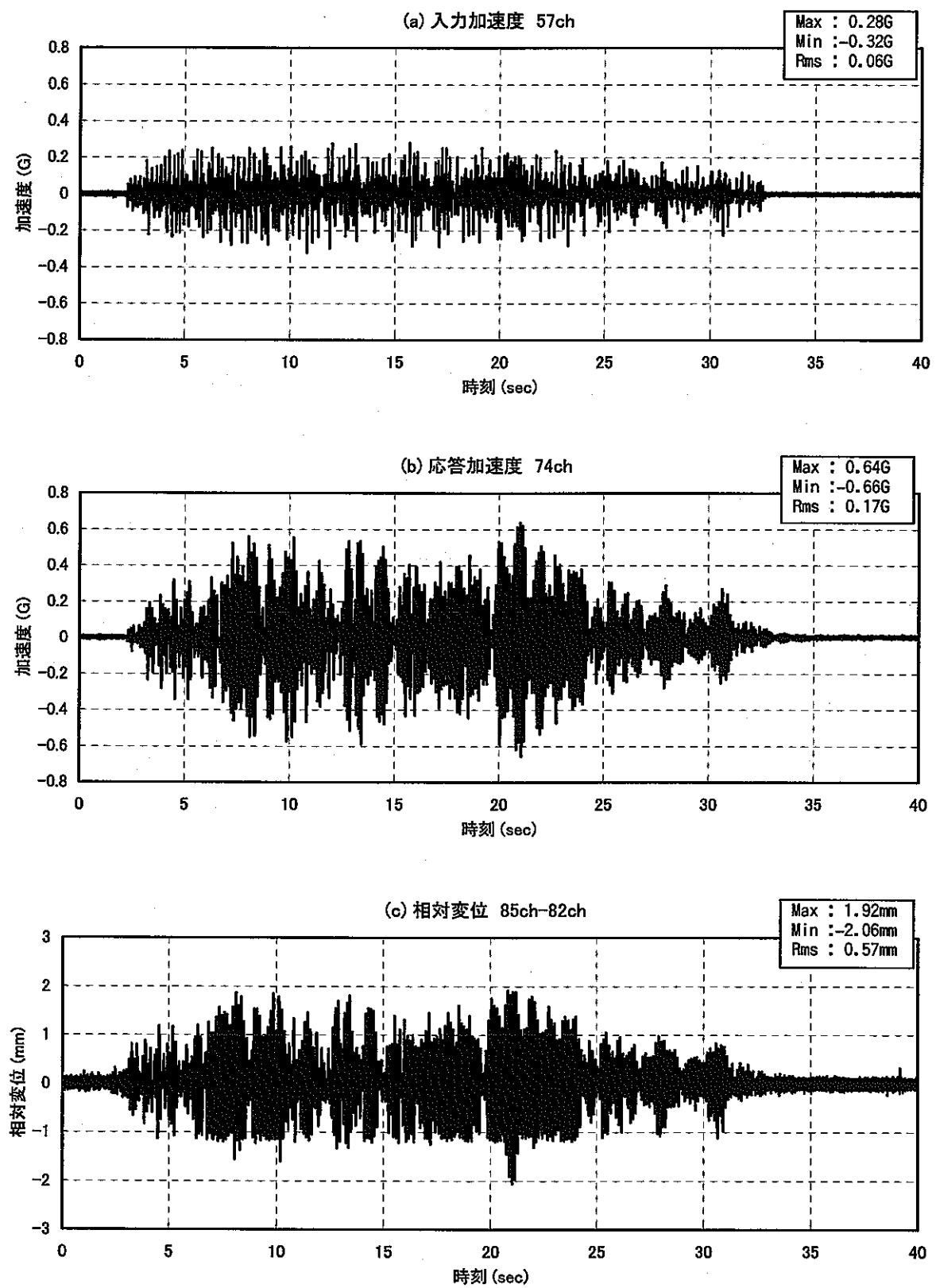


図5.1.1 地震波限界加振試験の時刻歴 (Q1)

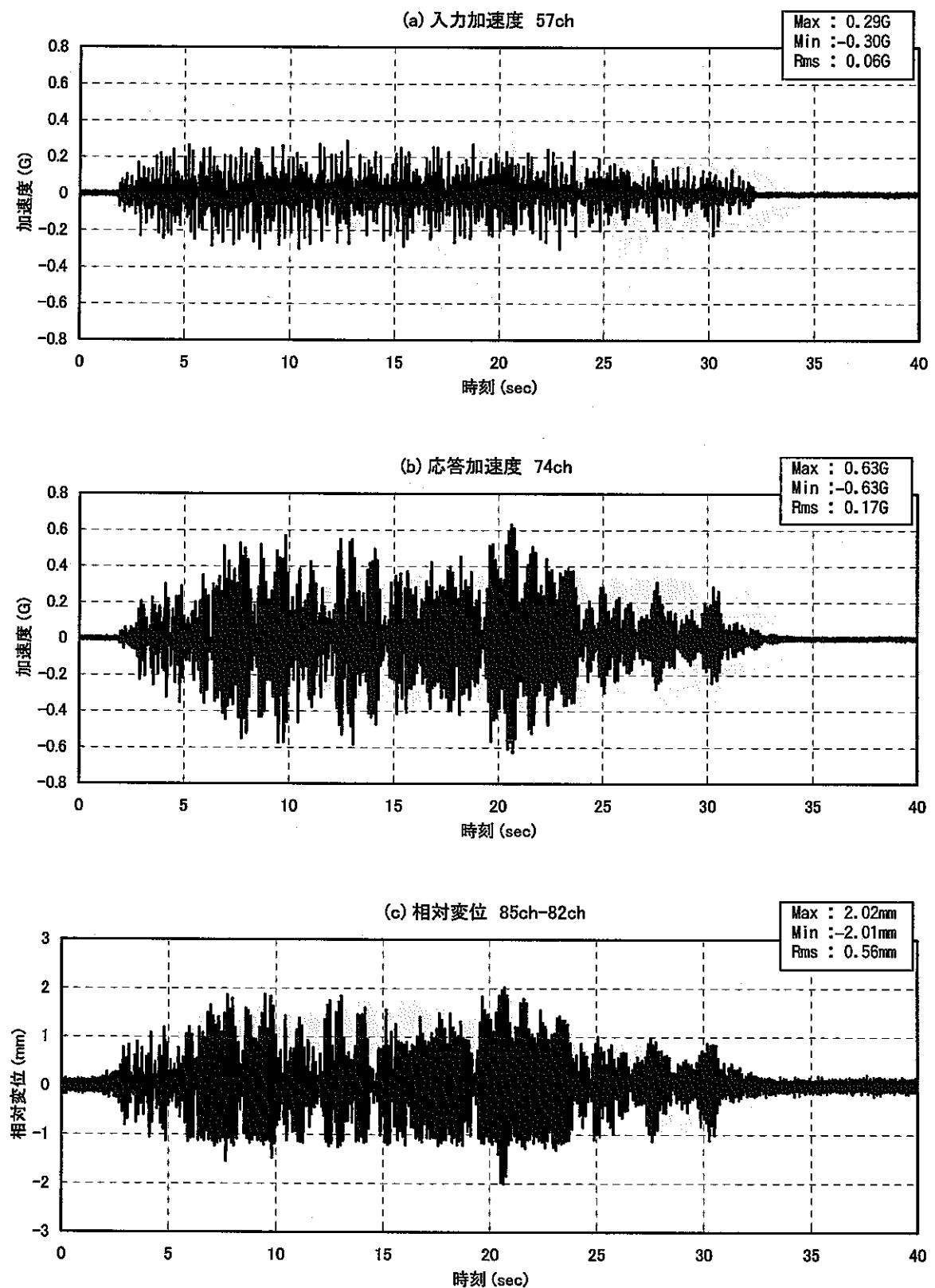


図5.1.2 地震波限界加振試験の時刻歴 (Q2)

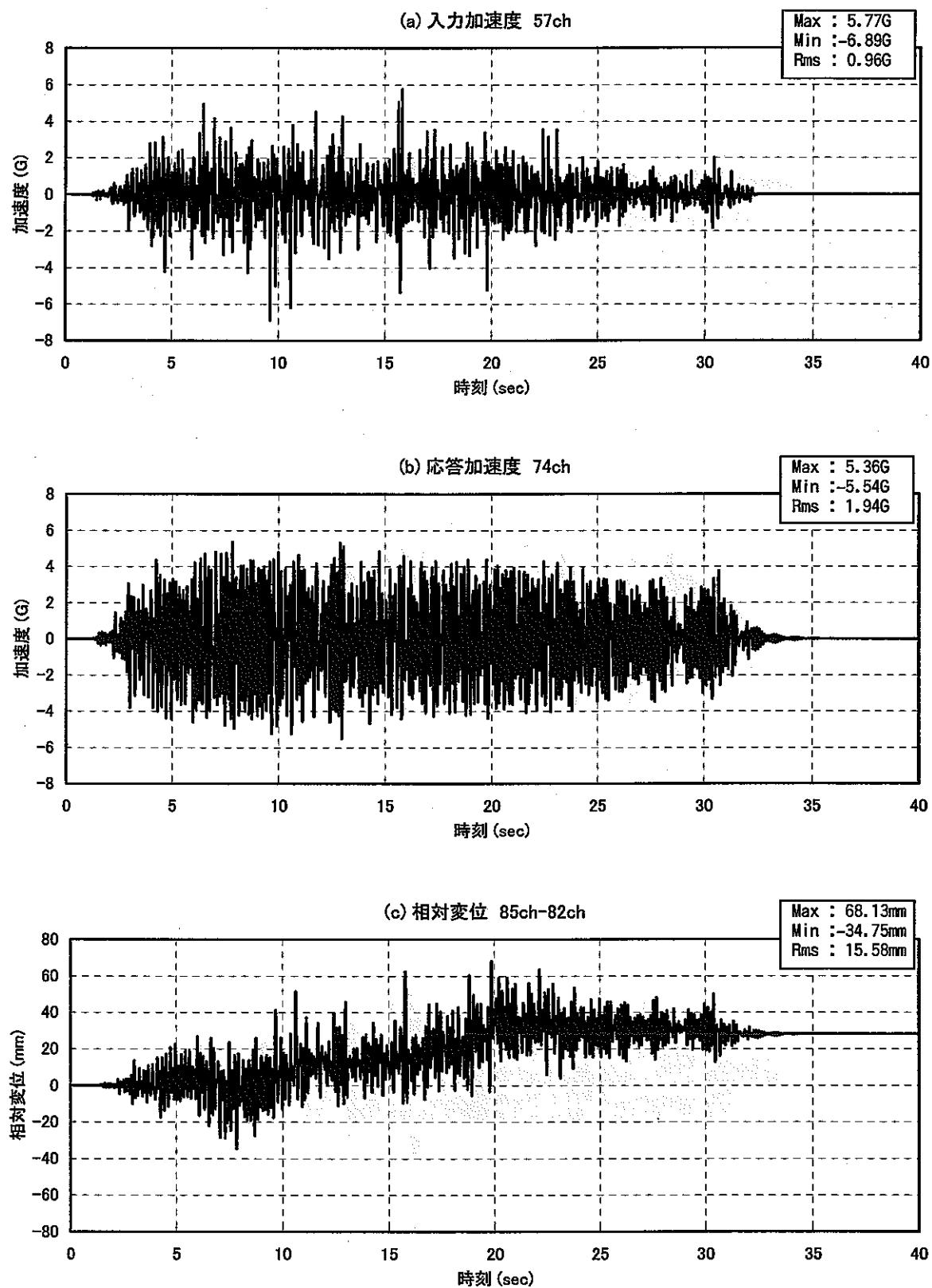


図5.1.3 地震波限界加振試験の時刻歴 (Q3)

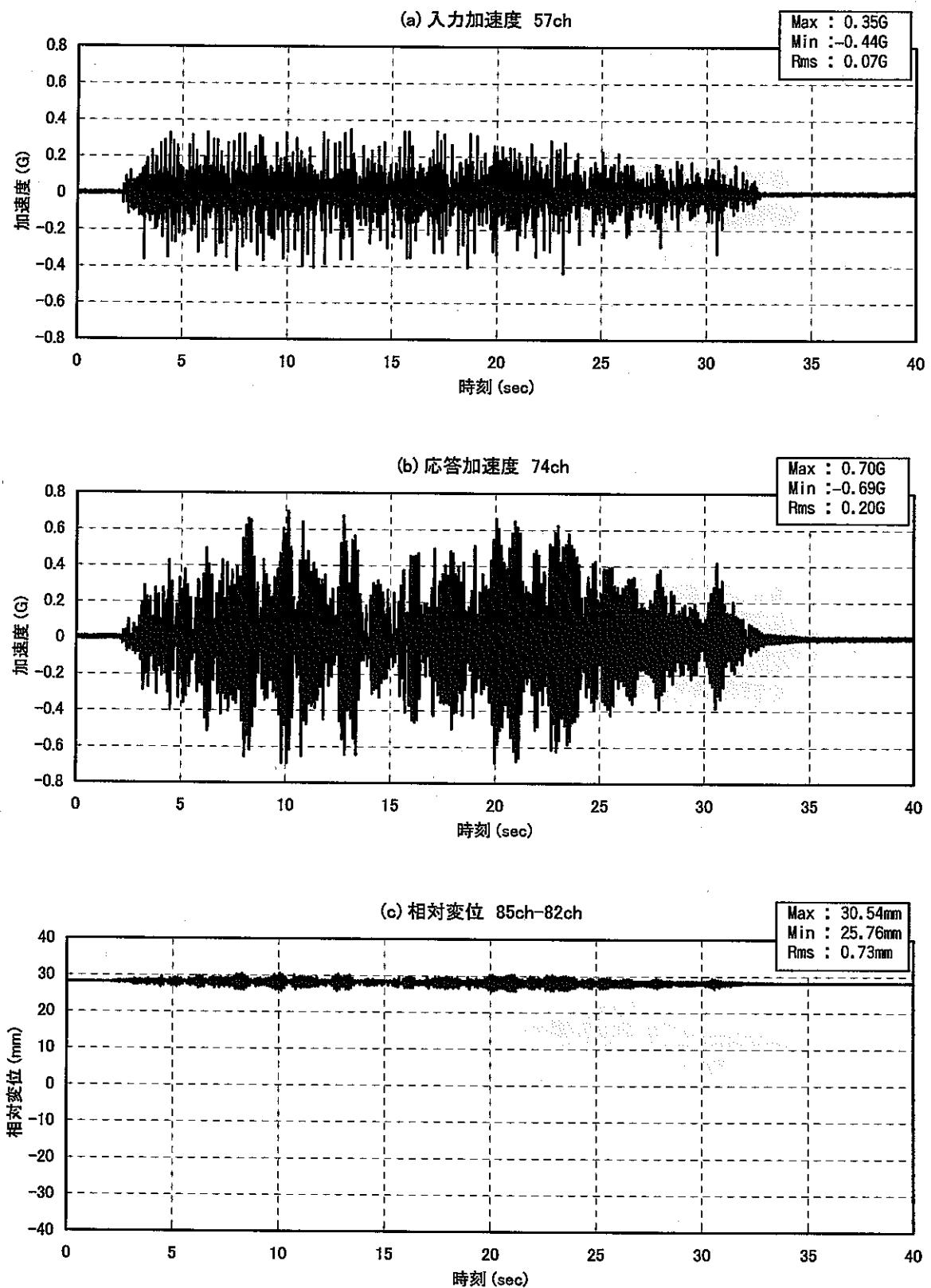


図5.1.4 地震波限界加振試験の時刻歴 (Q4)

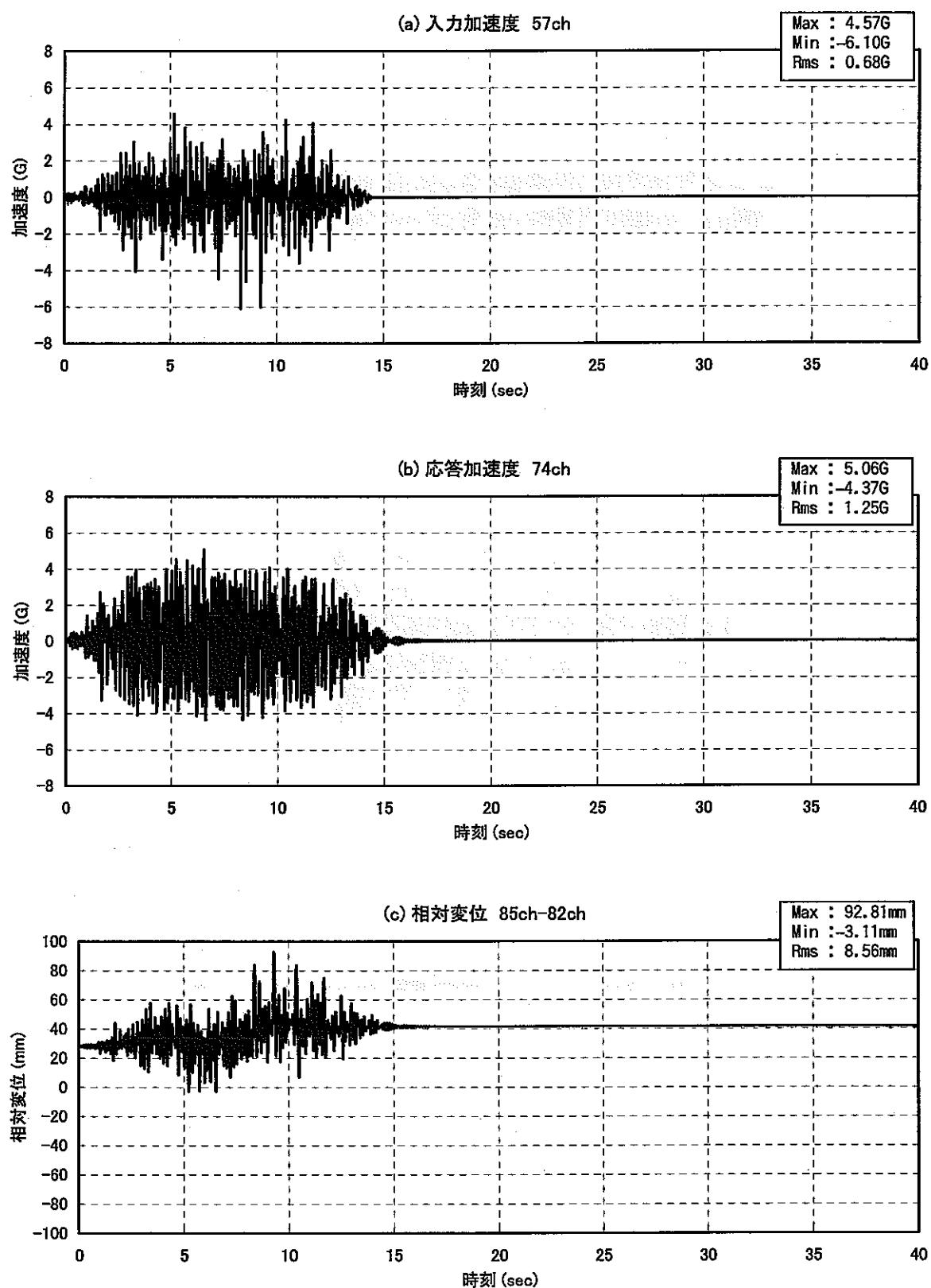


図5.1.5 地震波限界加振試験の時刻歴 (Q5)

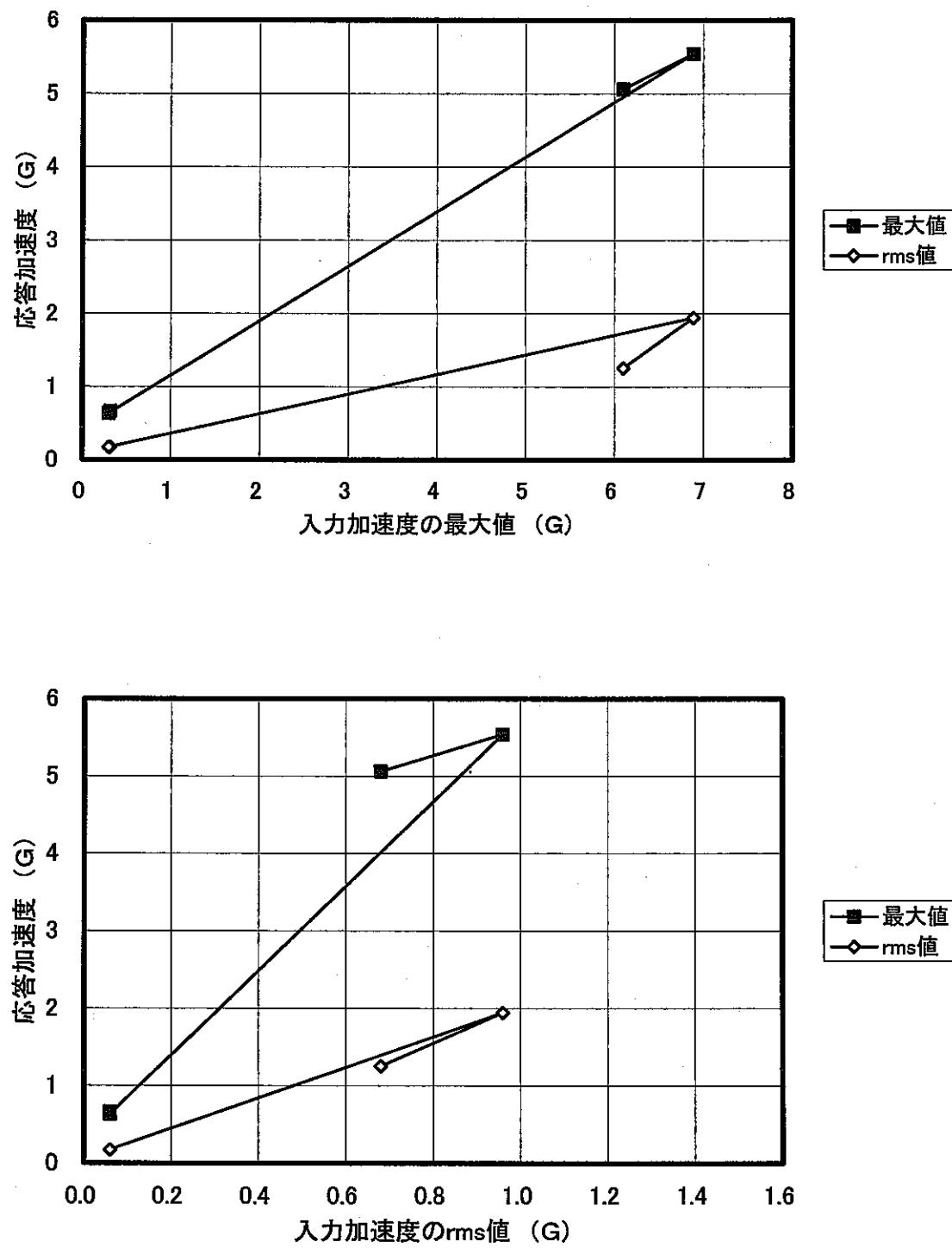
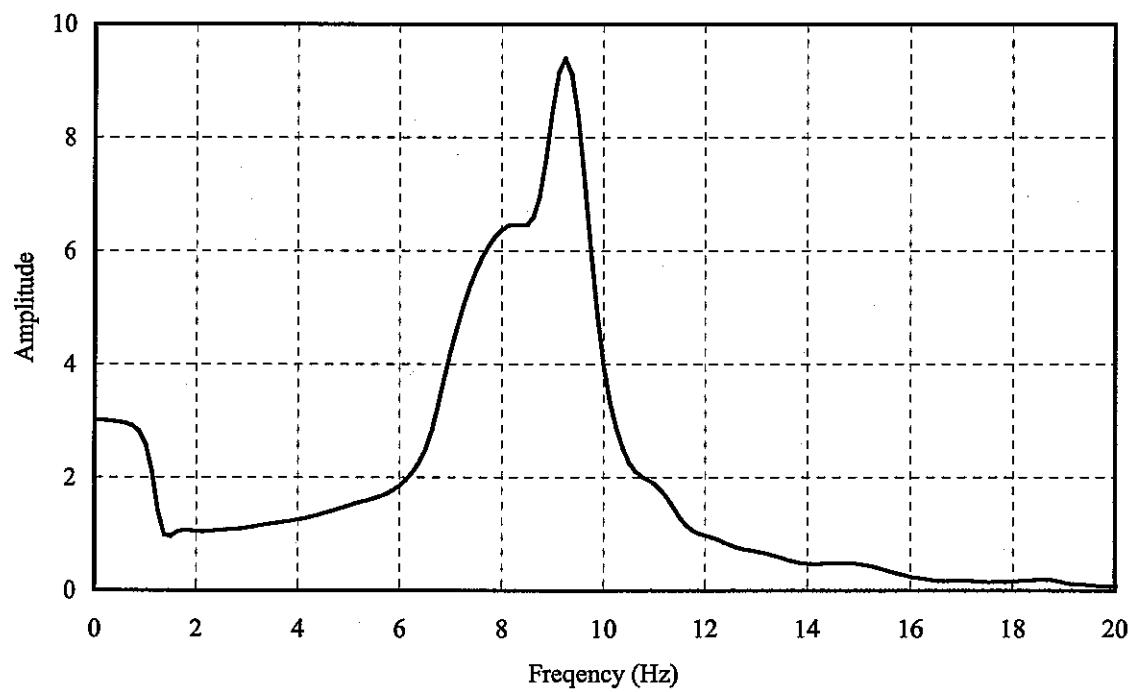
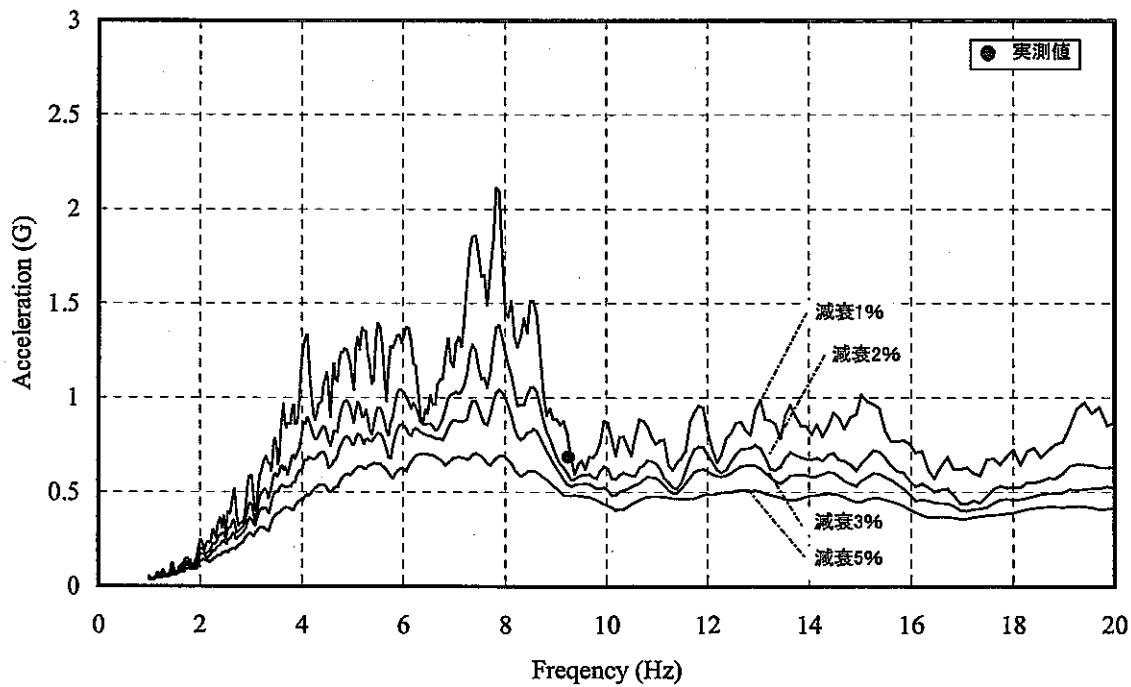


図5.1.6 入力加速度に対する応答加速度の推移



(a) 伝達関数



(b) 応答スペクトル

図 5.1.7 加振試験における周波数特性 (Q1)

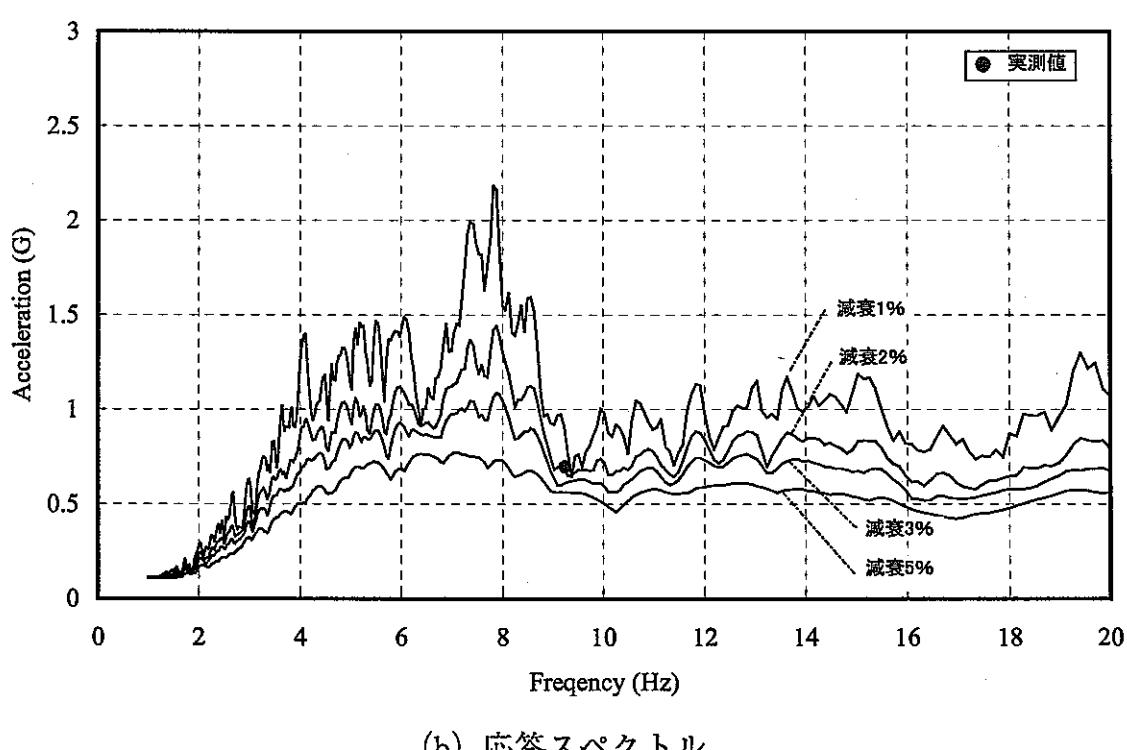
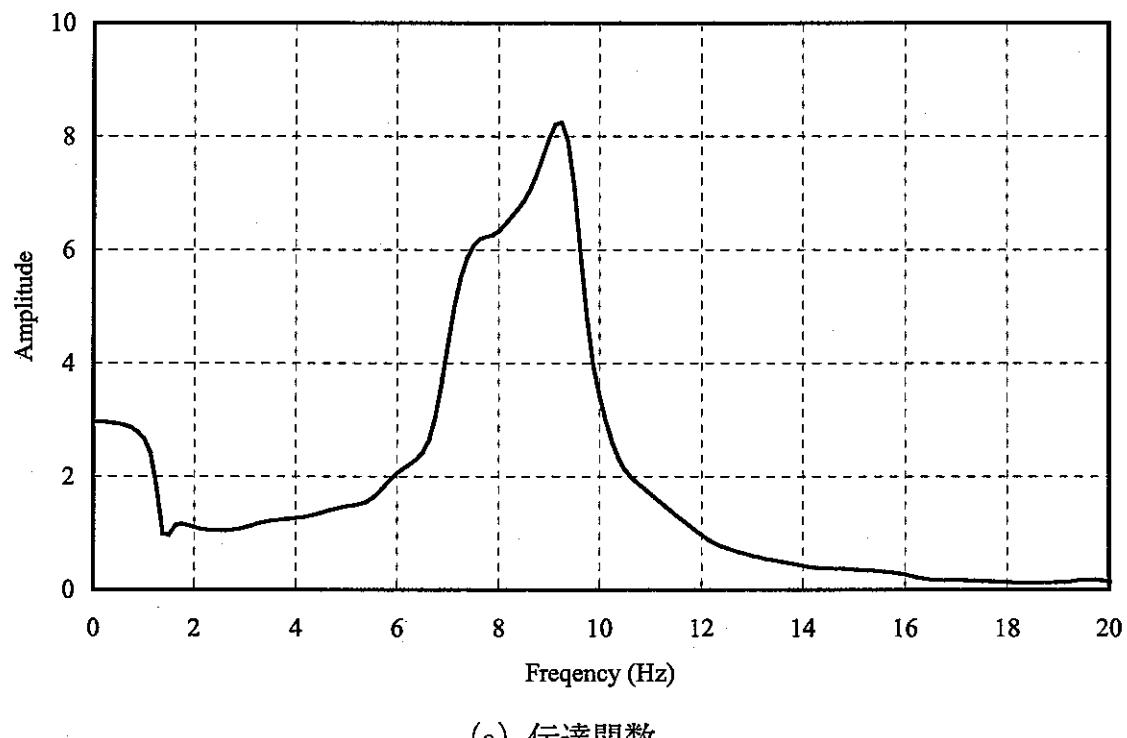
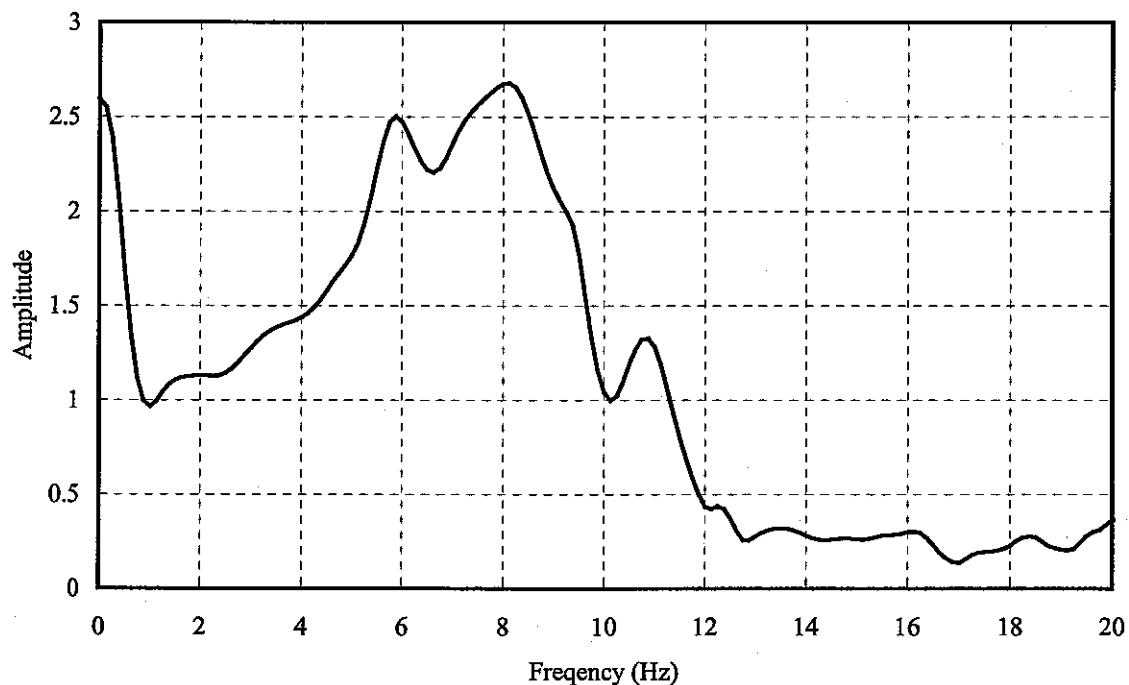
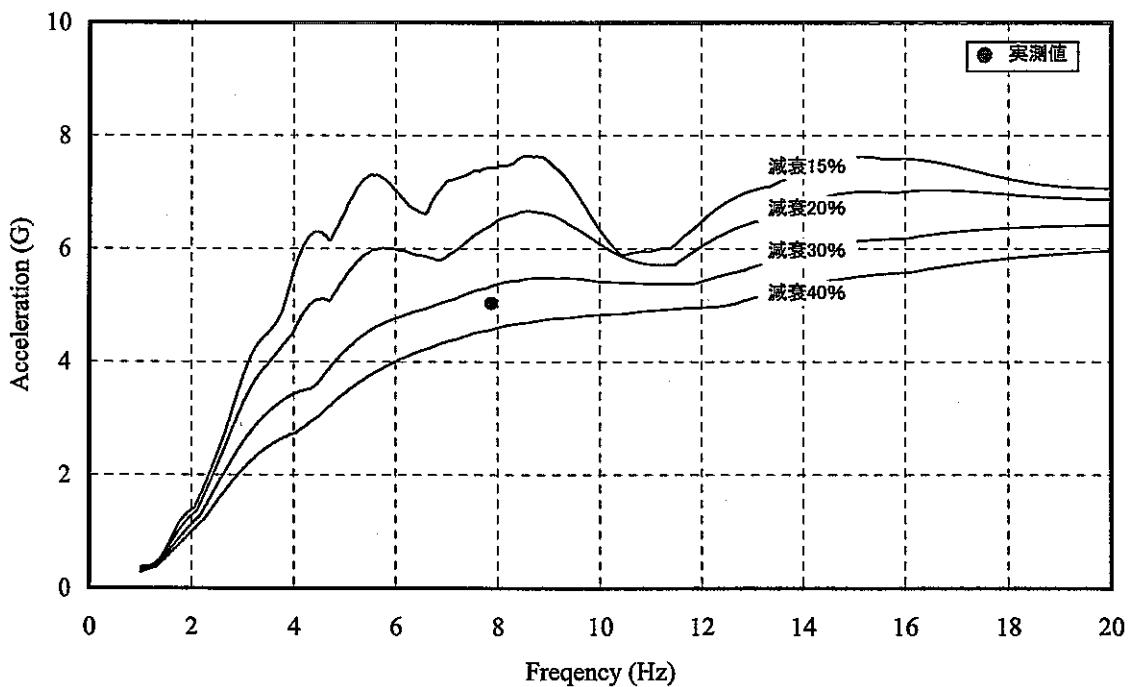


図 5.1.8 加振試験における周波数特性 (Q2)

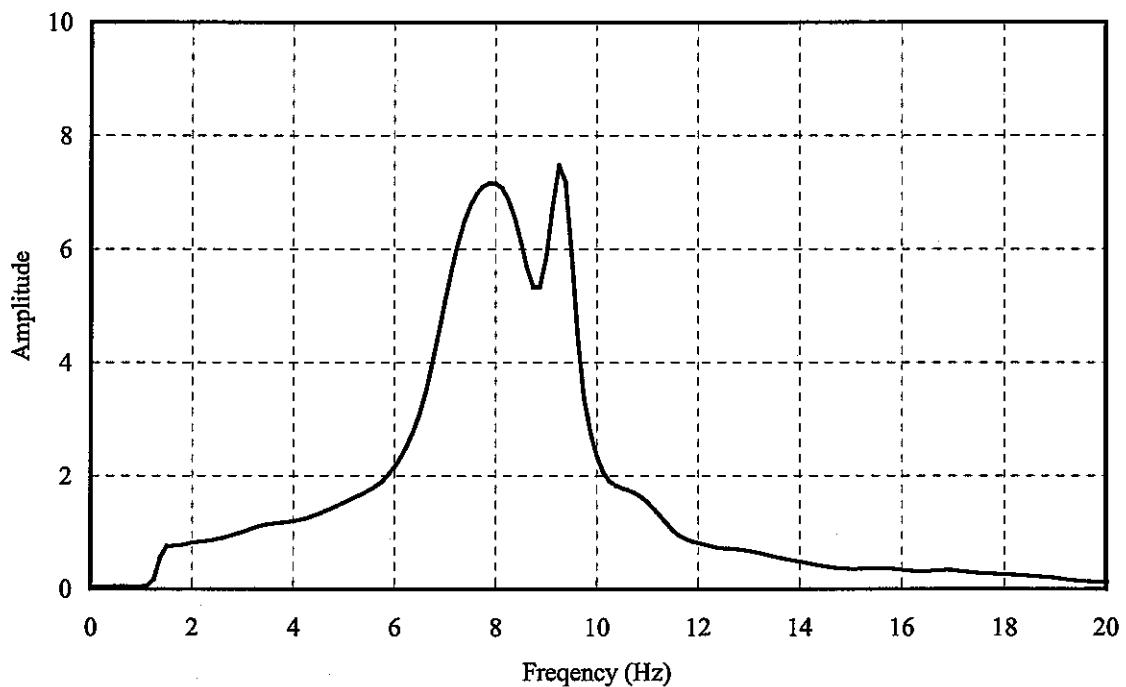


(a) 伝達関数

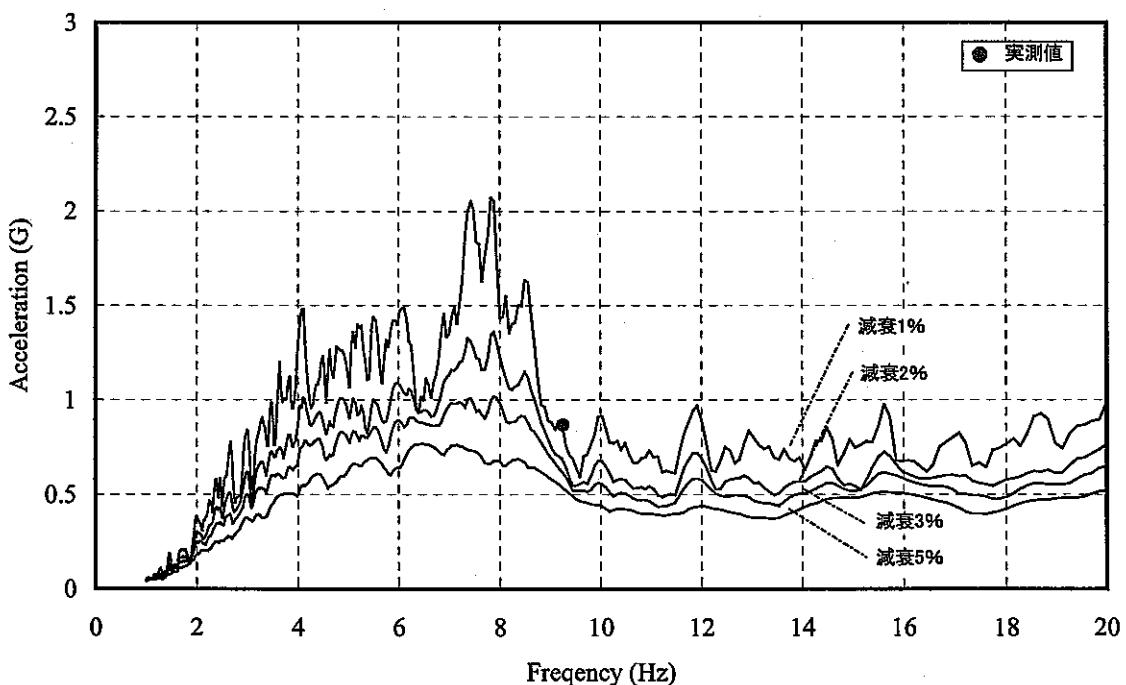


(b) 応答スペクトル

図 5.1.9 加振試験における周波数特性 (Q3)

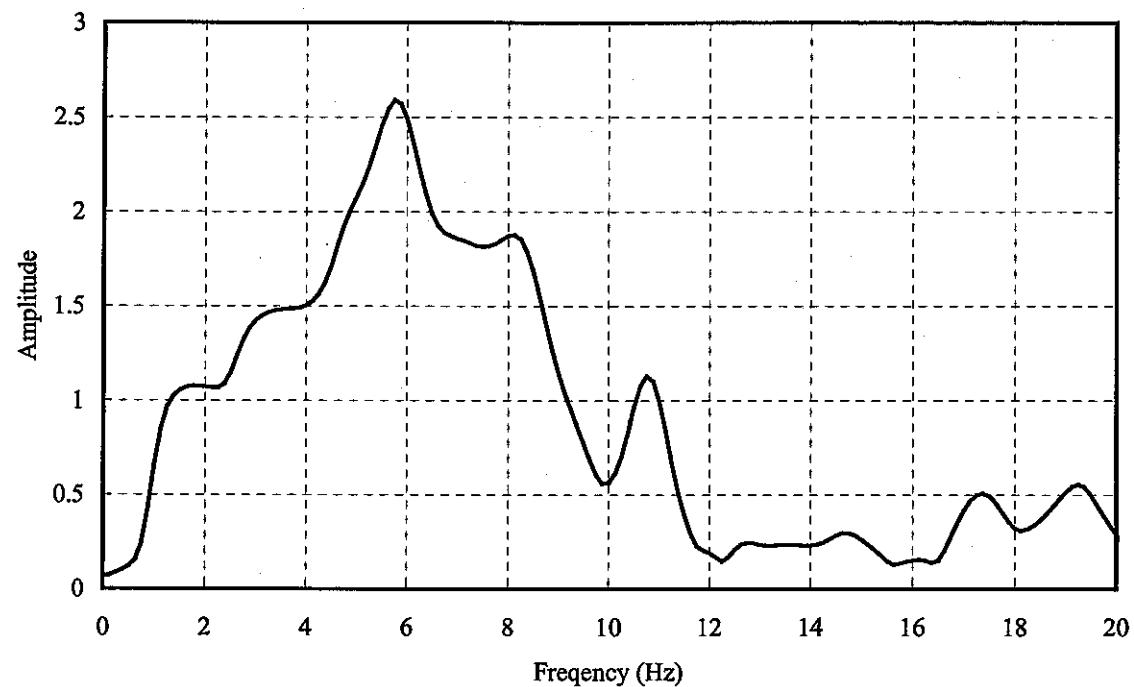


(a) 伝達関数

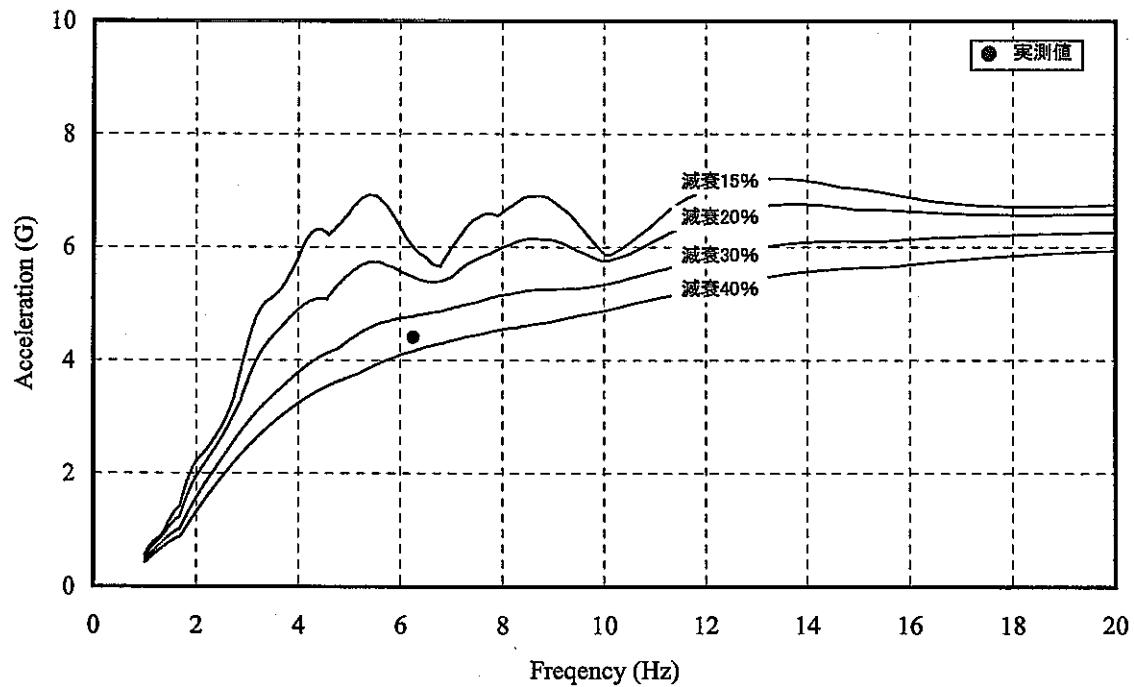


(b) 応答スペクトル

図 5.1.10 加振試験における周波数特性 (Q4)



(a) 伝達関数



(b) 応答スペクトル

図 5.1.11 加振試験における周波数特性 (Q5)

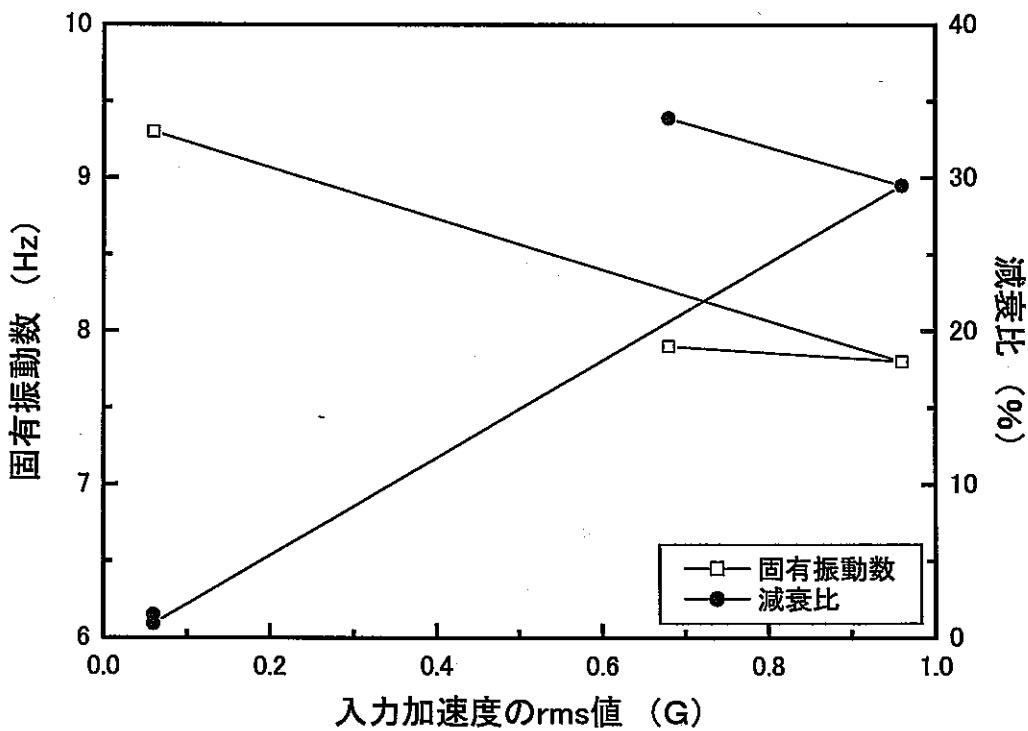
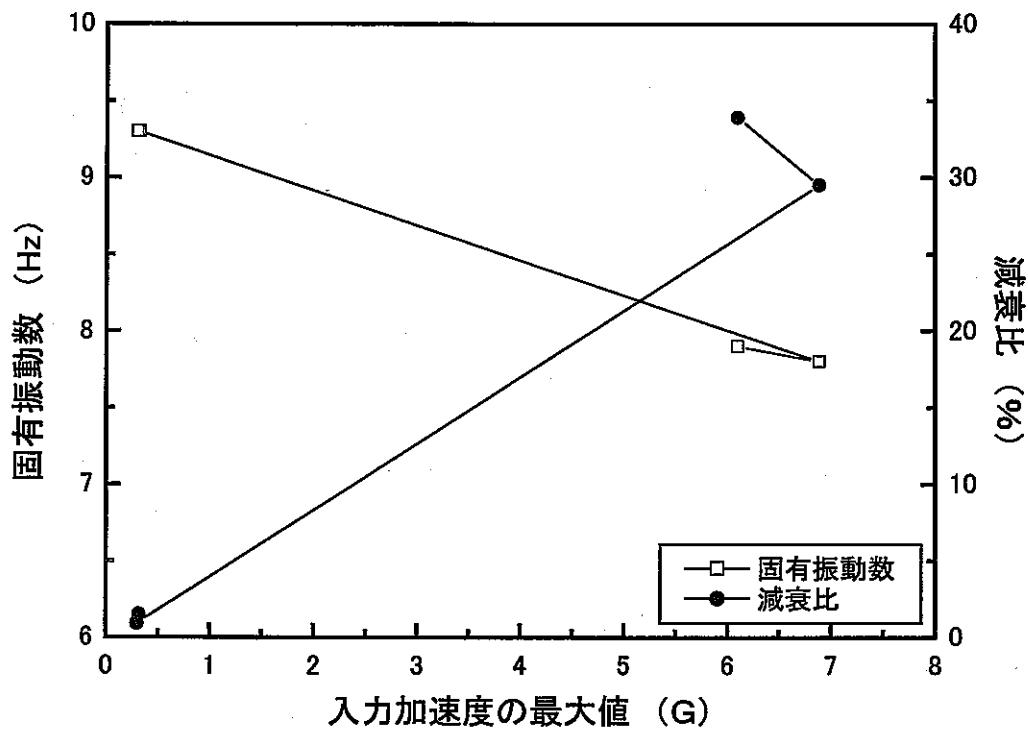


図 5.1.12 入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移

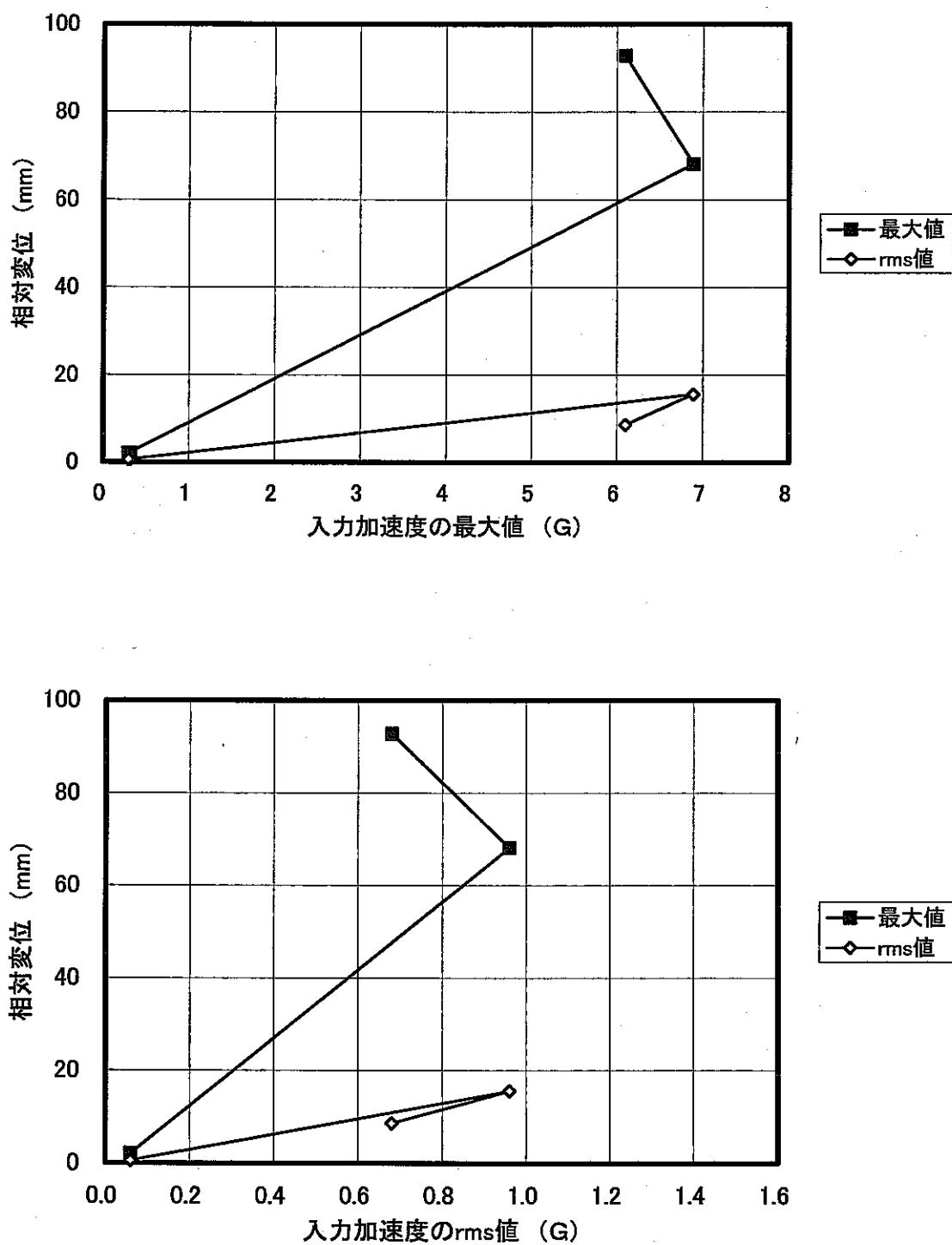


図5.2の 入力加速度に対する相対変位の推移

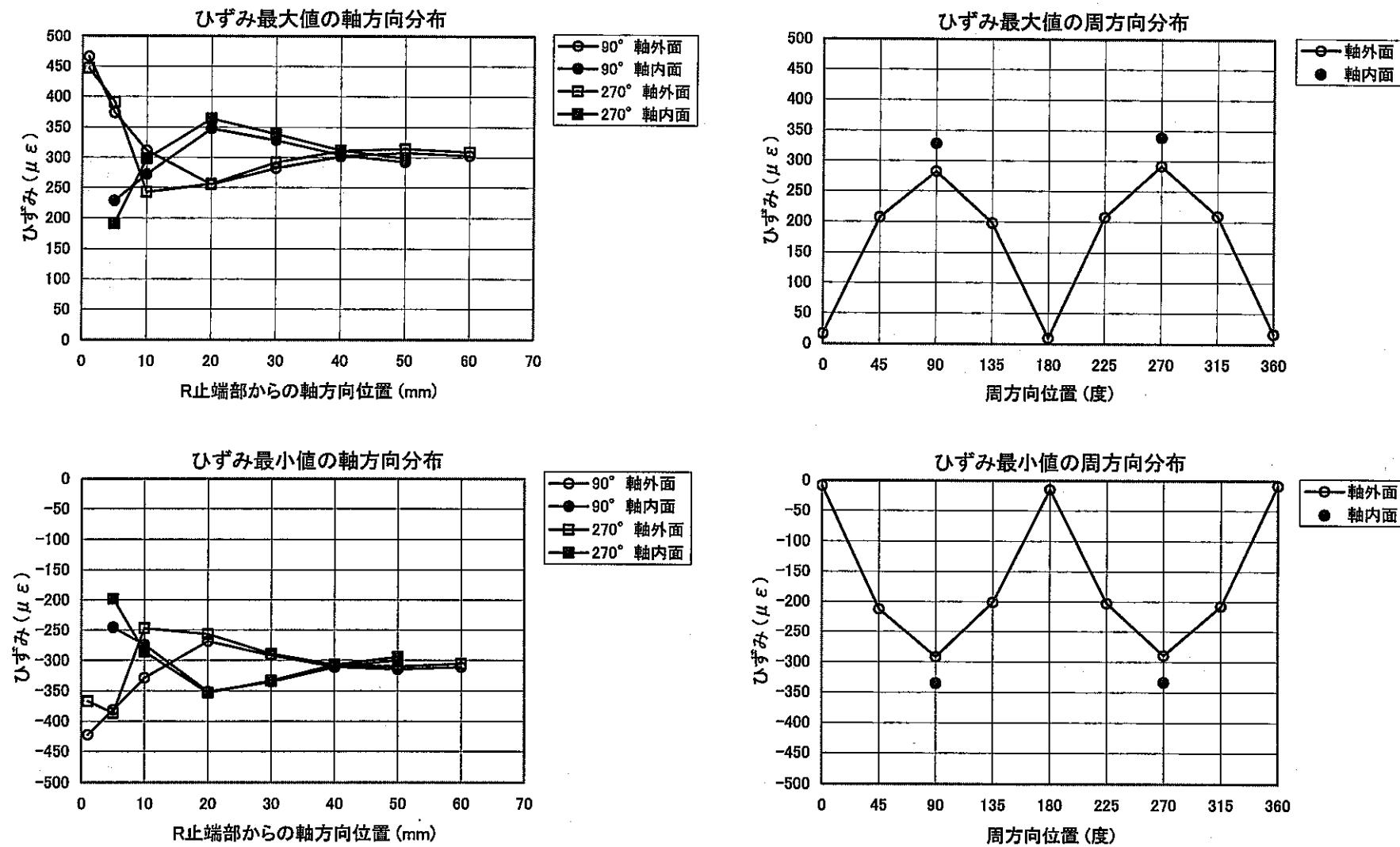


図 5.3.1 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(Q1)

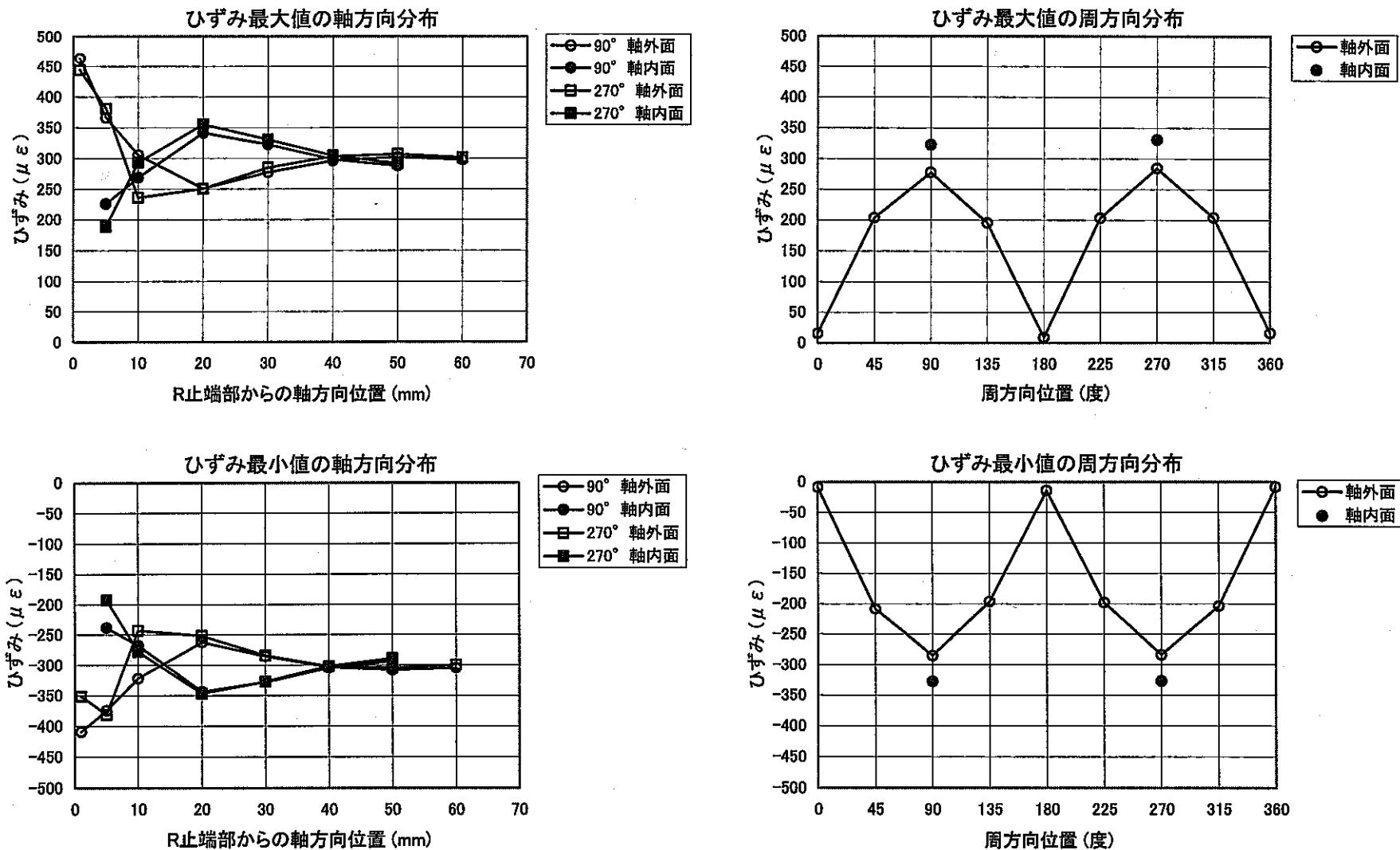


図 5.3.2 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(Q2)

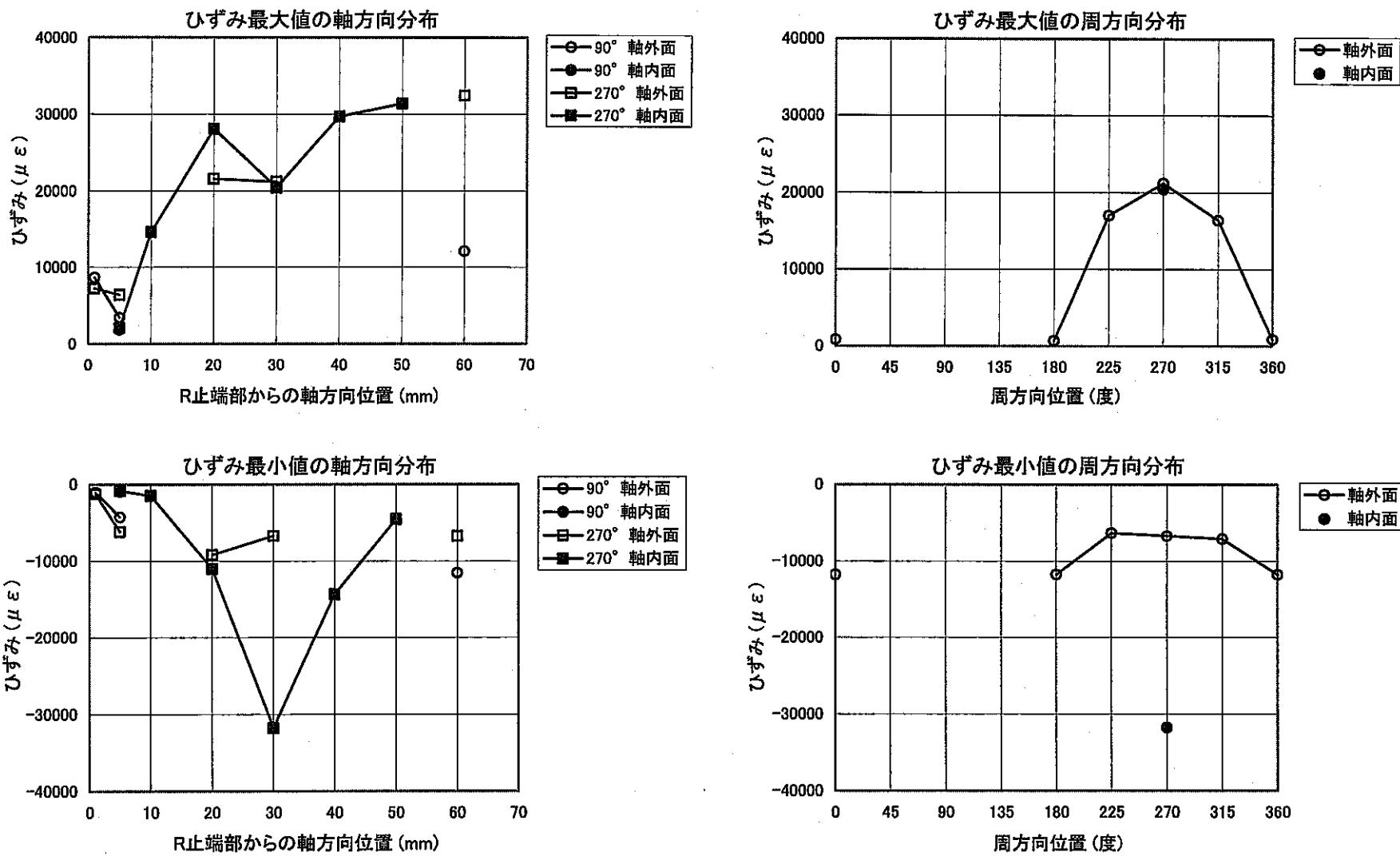


図 5.3.3 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布 (Q3)

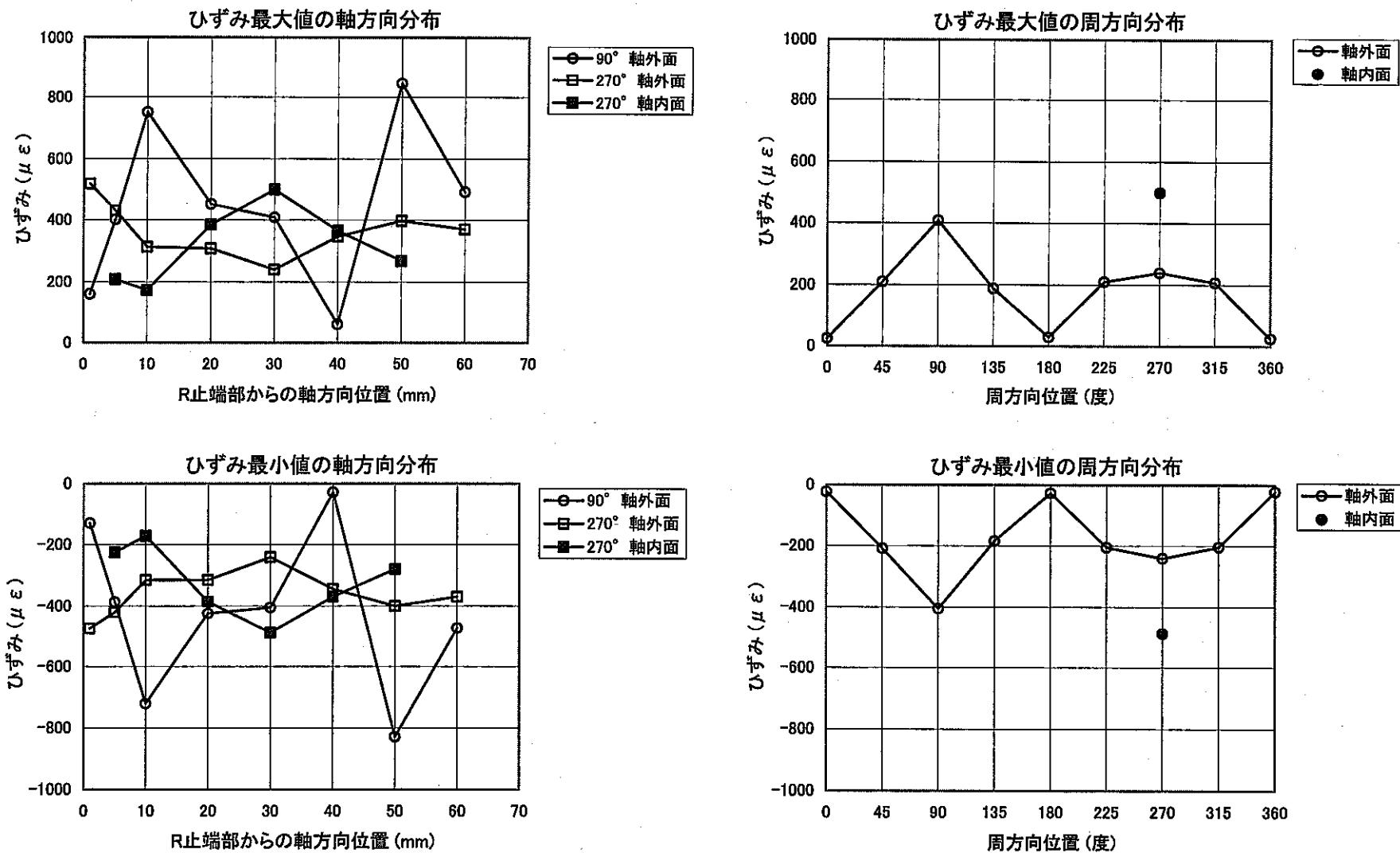


図 5.3.4 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(Q4)  
(累積ひずみを含まない)

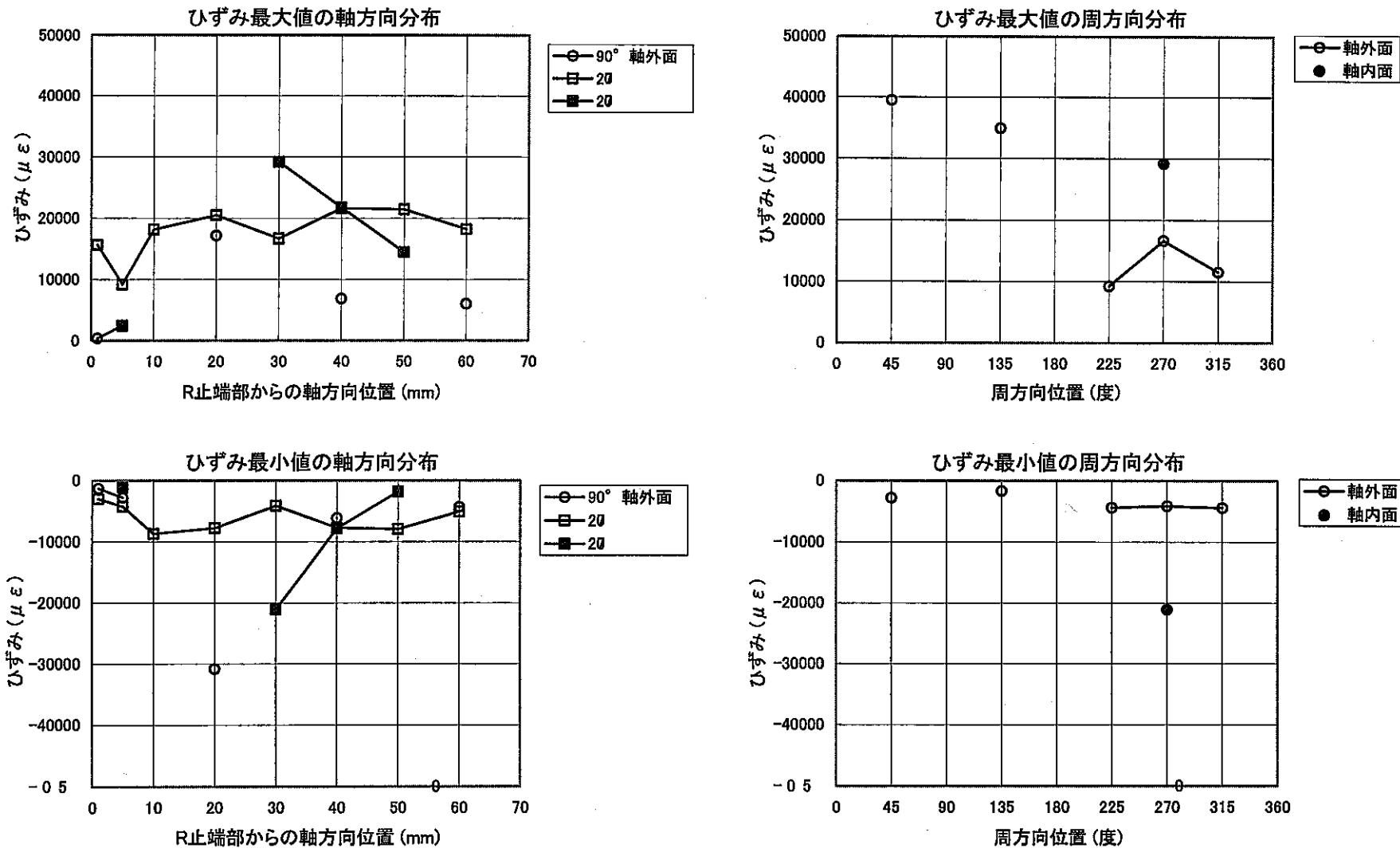


図 5.3.5 ひずみ最大値及び最小値の軸方向及び周方向分布(Q5)

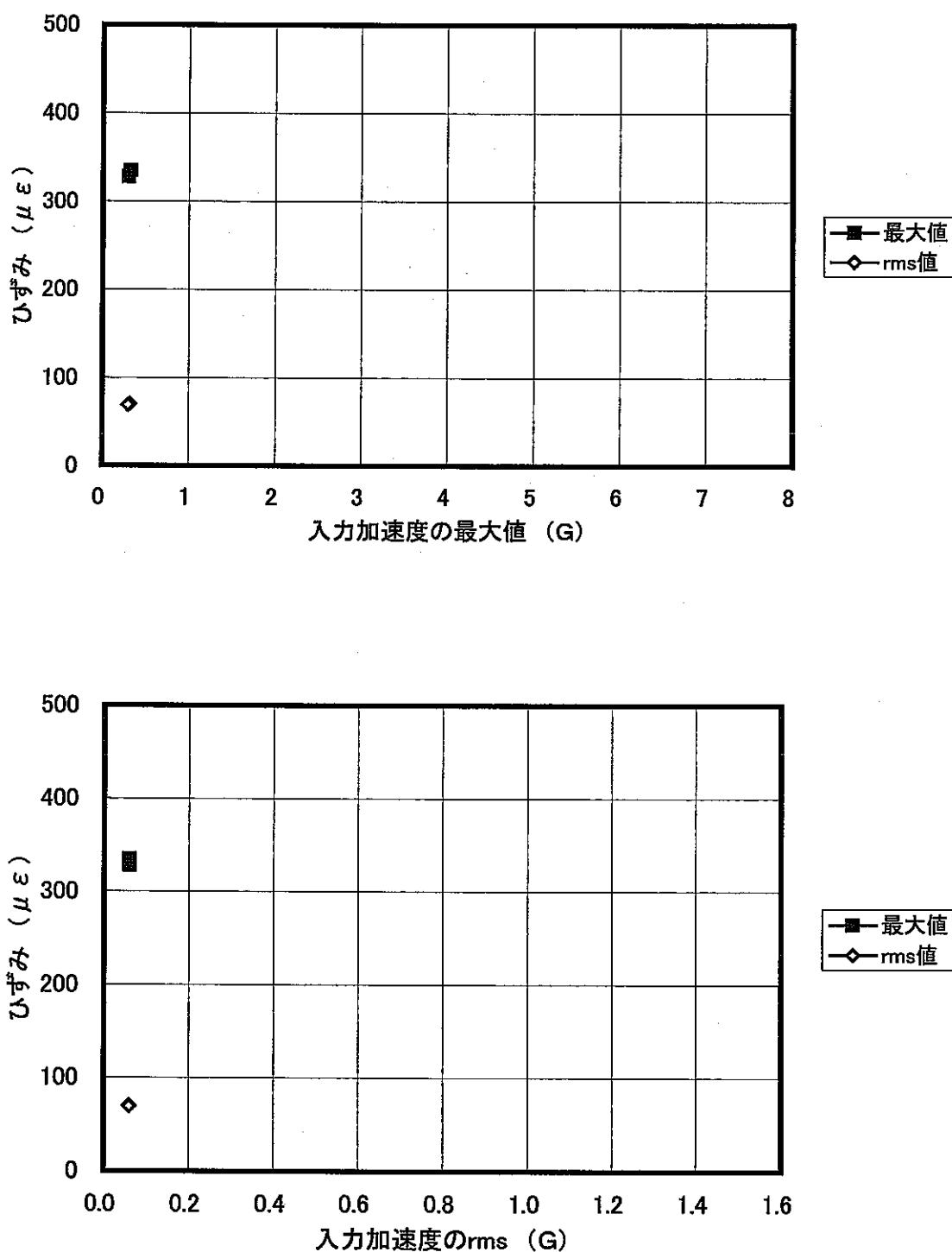


図5.3.6 入力加速度に対するひずみ(43ch)の推移

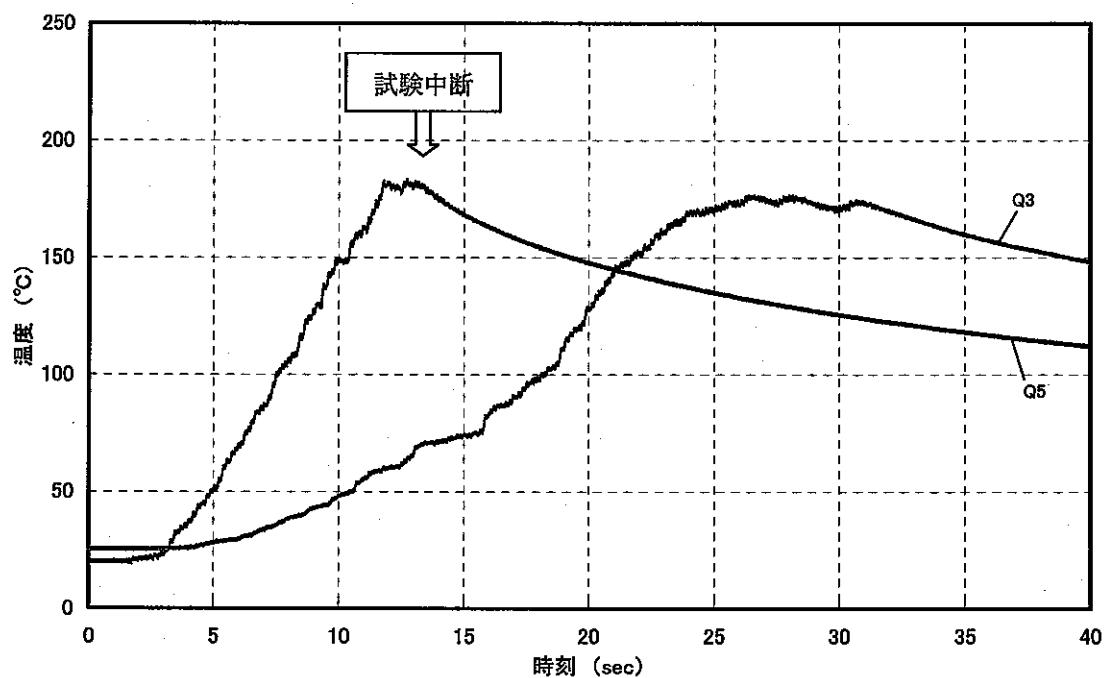


図 5.4.1 温度の時刻歴（地震波限界加振試験）

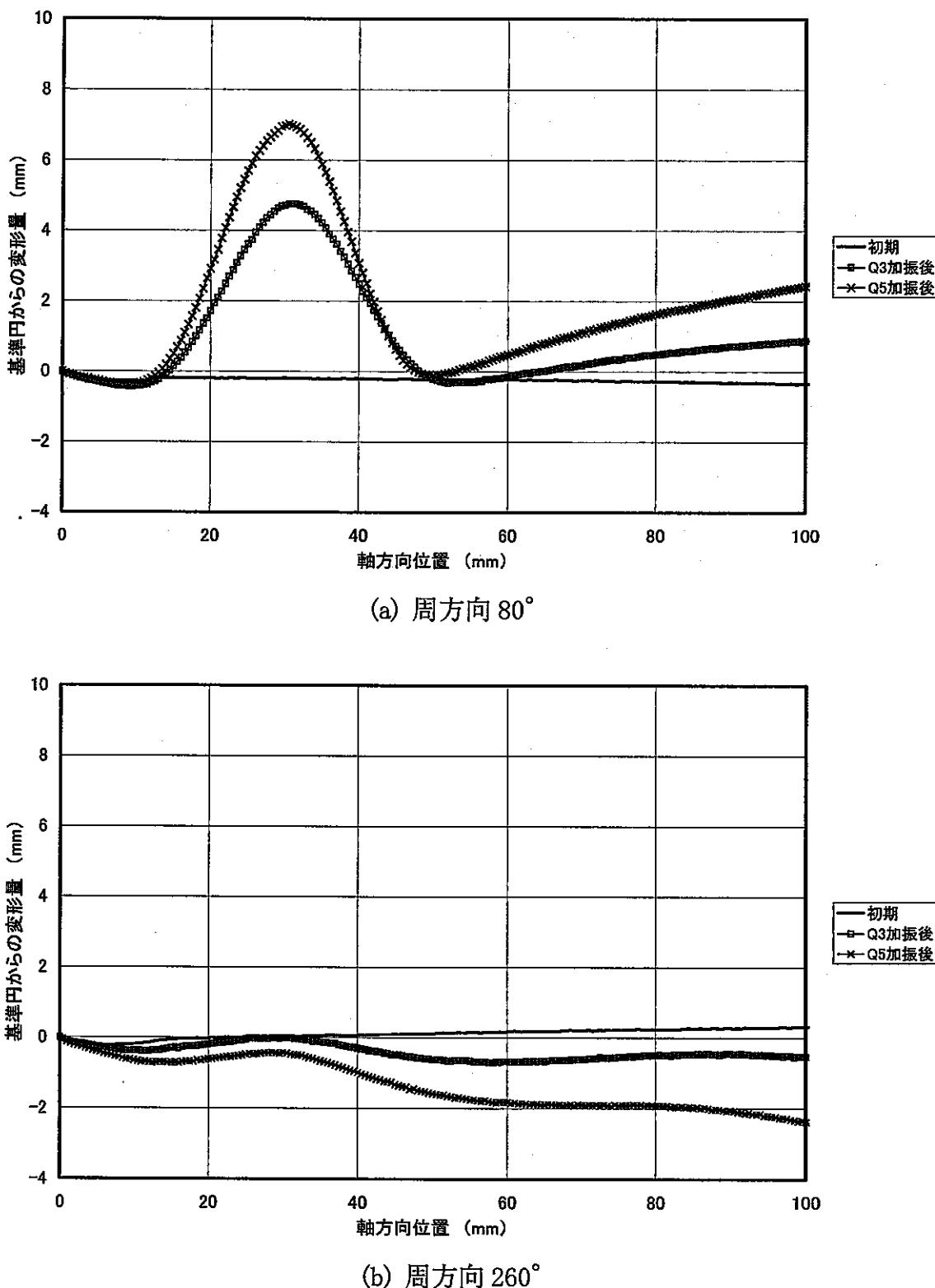


図 5.5.1 各加振レベルにおける試験体の形状計測結果

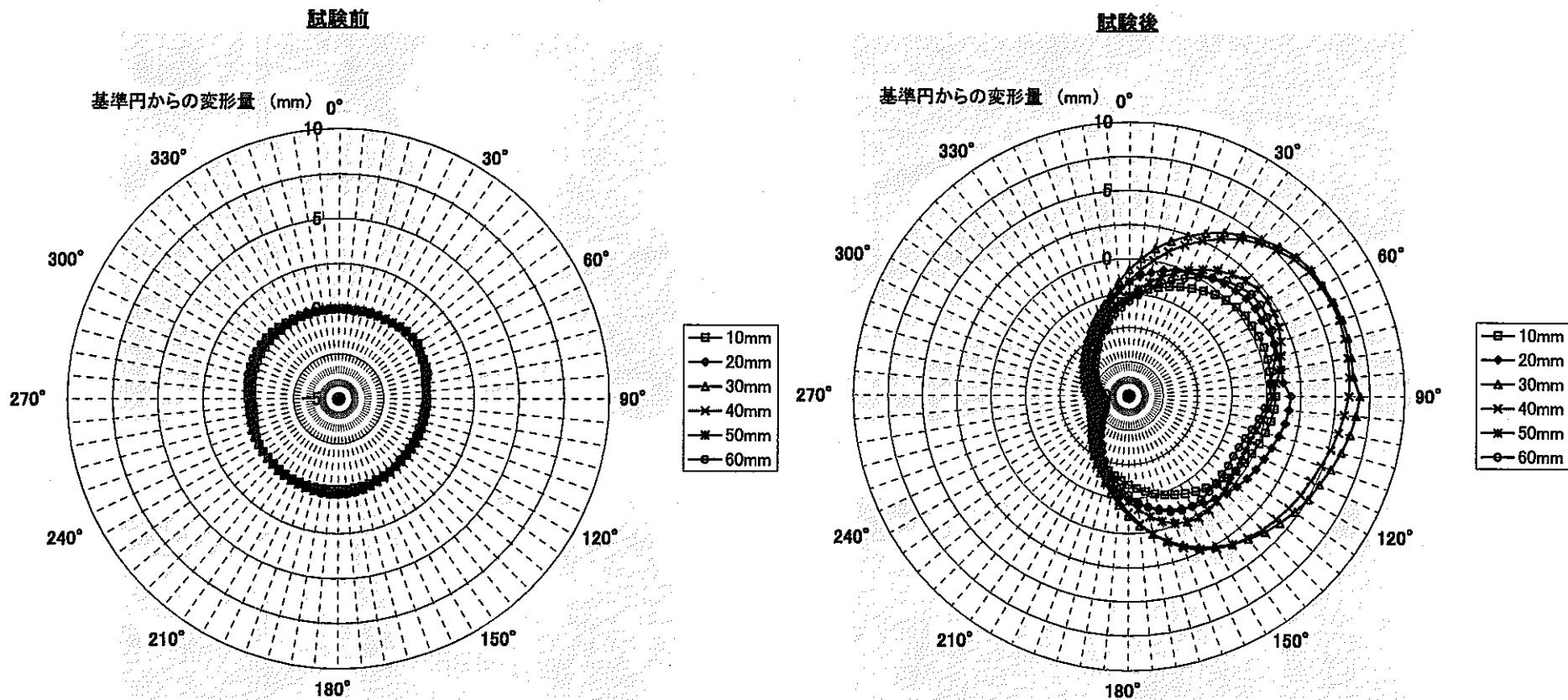


図 5.5.2 試験前後の試験体形状計測結果の比較

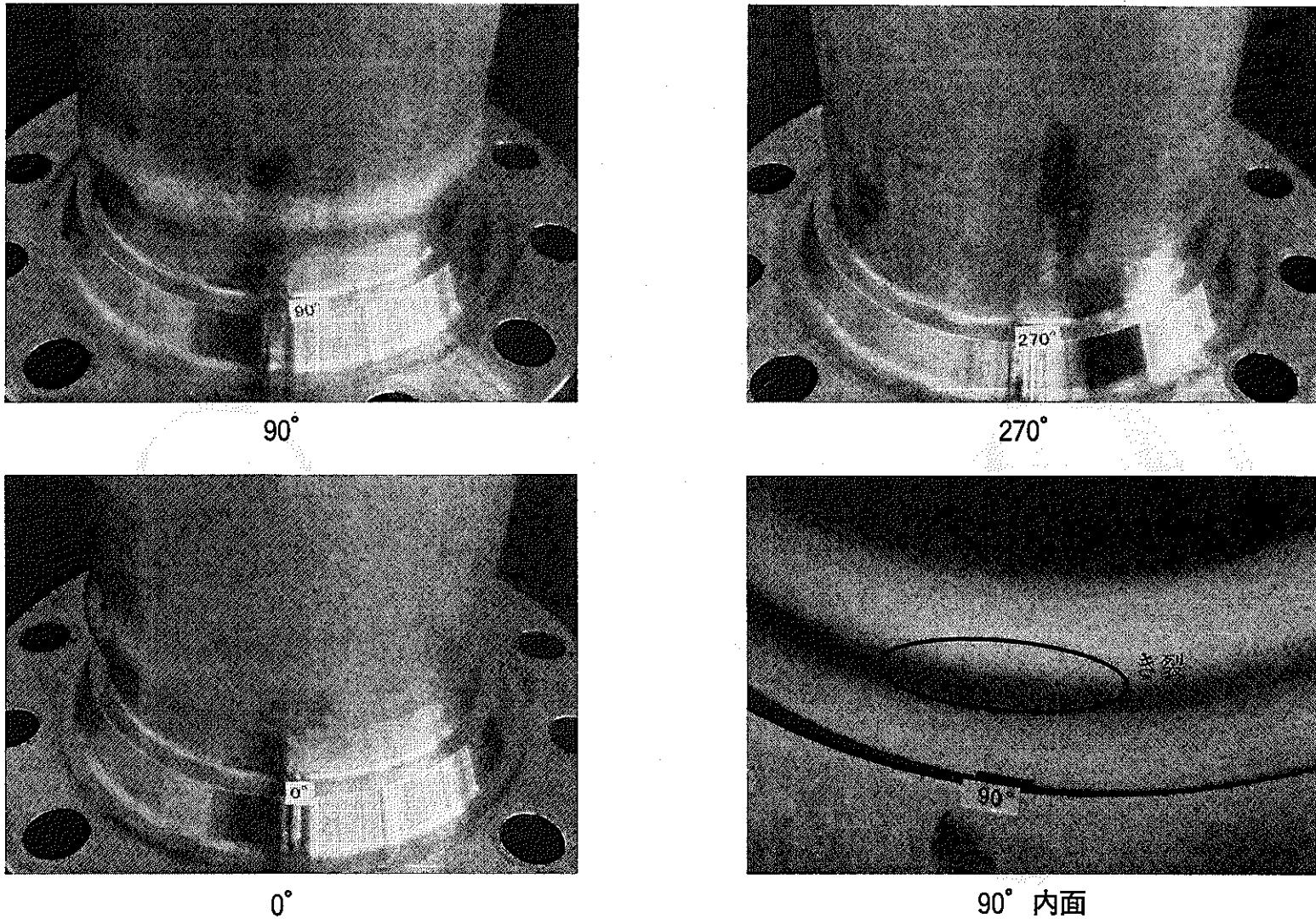


写真 5.6.1 き裂発生部付近の様子（地震波限界加振試験）

## 6. 試験結果の評価

3～5章の試験結果をまとめて表6.1に示す。さらに、これらの試験結果を基に、動的負荷による直管要素の振動特性、弾塑性挙動、限界強度を把握するため、以下のような試験結果の評価を行った。ただし、ひずみ挙動については、加振中にひずみゲージが剥がれて計測不能となるものや、計測限界を超える値を示すものも見られたことから、ひずみの検討は今後の課題とし、ここでは定性的な評価のみを行うこととする。

### 6.1. 振動特性

3.1、4.1、5.1項で算出した平均化処理した伝達関数を用いて、異なる手法を用いて固有振動数及び減衰比を推定した。図6.1.1～6.1.22に示すように、1自由度系の強制振動により得られる強制項の位相について、固有振動数及び減衰比をパラメータとし、試験結果の位相の傾きにフィッティング<sup>3)</sup>させることにより推定した。

各加振試験における固有振動数及び減衰比の算出結果をまとめて表6.1.1に示す。さらに、図6.1.23～6.1.25に、各加振試験における入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移を示す。

固有振動数は、加速度レベルが大きくなり試験体の塑性変形が顕著になるにしたがって減少しており、弾性域では約9Hzであったのに対し、大加振時には約7Hzまで減少していることがわかる。これは、試験体が塑性変形するに伴い荷重－変位関係の傾きが緩やかになり、見かけ上の剛性が低下したためと考えられる。

減衰比は、加振レベルが大きくなり試験体の塑性変形が顕著になるにしたがって増大しており、弾性域では約2%であるのに対し、大加振時には30%近くまで増大していることがわかる。これは、加振時の振動エネルギーが試験体の塑性変形に伴うエネルギーとして吸収される応答低減効果があったためと考えることができる。一例として、定常ランダム波漸増加振試験における応答低減の様子を図6.1.26に示す。加振レベルが大きくなるにつれて、応答が低下していることがわかる。

なお、今回求めた減衰比には、試験体の塑性エネルギー吸収による減衰の他に、多段積層ゴムによる減衰も含まれている。しかし、多段積層ゴムの剛性は12.7N/mmであり、試験体と多段積層ゴムの剛性（荷重－変位関係の傾き）146.4N/mmに比べて十分小さいため、多段積層ゴムの影響は無視できる程度に小さいものと考えられる。

## 6.2. 荷重－変位関係

荷重－変位関係として、錘の応答加速度から算出した荷重と相対変位の関係を図 6.2.1～6.2.7 に示す。入力加速度が大きくなるにつれて、ヒステリシス特性が顕著になることがわかる。

さらに、各加振試験に対して、図 6.2.1～6.2.7 の荷重－変位関係より最外周に位置するプロット点を抜き出し、荷重－変位線図を作成した。比較のために静的座屈試験の荷重－変位線図を併記したものを図 6.2.8 に示す。この図によると、全ての加振試験結果において、降伏後に荷重はわずかに増加しながら最大荷重点に至り、最大荷重点を超えた後もわずかに減少するものの試験体の荷重変位特性は安定に推移し、急激な載荷能力の低下等は見られなかった。また、今回の動的加振試験で得られた最大荷重はおよそ  $23\text{ kN}$  であり、静的座屈試験における座屈荷重の  $20\text{ kN}$  を上回る結果となった。したがって、本試験では、最大荷重発生前に著しい動的負荷履歴を受けているにもかかわらず、限界強度については静的座屈荷重と比較して同等以上であり、動的効果による限界強度の減少は認められなかった。

参考として、図 6.2.8 の図中に示すように、限界荷重を ASME の  $2\tan\theta$  法を用いて評価を行った。荷重－変位線図の最大荷重点が明確ではないものの、 $2\tan\theta$  法による最大荷重点の推定値と荷重－変位線図の最大荷重点が近い値となるものと推定できる。

## 6.3. 変位－ひずみ関係

試験体に進行性変形が発生する大入力レベルの加振では、試験体にひずみゲージの計測範囲を超える大ひずみが発生するため、ひずみの計測が不可能となった。このような大ひずみ領域では、ひずみを試験体の相対変位と関連させて推定する必要があるので、本試験では変位とひずみの関係に着目して 2 種類の推定法を検討した。なお、ここで使用するひずみとは、き裂発生部と考えられる直管内面の軸方向  $30\text{mm}$ 、周方向  $90^\circ$  付近（定常ランダム波漸増加振試験では 53ch、地震波漸増加振試験及び地震波限界加振試験では 43ch）のひずみゲージの値であり、試験体の変形及び破損様式を考慮して軸方向ひずみを用いている。

CASE1 として、まず、ひずみ計測が可能な領域における変位－ひずみ関係式を求め、計測した変位よりひずみを推定することとした。図 6.3.1～6.3.3 に各加振試験における変位－ひずみ関係を示す。なお、ひずみの時刻歴波形とは、ある大ひずみに対して極大値を探る直前の時刻歴波形を示したものである。この時刻歴波形に対して、変位とひずみの相関をよく表現できる関数

として、図中に示す3次式により近似した。この近似式を用いて、各加振における変位を用いてひずみを推定し、さらに、ひずみ時刻歴と合うようにフィッティングさせた。図6.3.4～6.3.6にひずみを推定した結果を示す。

CASE2として、まず、ひずみの計測可能領域における変位範囲とひずみ範囲の関係を求め、ひずみの計測範囲外の領域では個々のヒステリシスループから求められる変位範囲よりひずみ範囲を推定することとした。図6.3.7～6.3.9に変位範囲－ひずみ範囲関係を示す。変位範囲とひずみ範囲の相関をよく表現できる関数として、図中に示す2次式により近似した。CASE2では6.4項に示すように推定したひずみ範囲より疲労損傷係数を算出することとした。

#### 6.4. 疲労評価

6.3項より、ひずみゲージ計測範囲外の大なひずみは、CASE1及びCASE2の2通り方法を用いて推定した。ここでは計測及び推定したひずみに対し疲労寿命の推定を行った。疲労寿命推定法については種々の方法が提案されているが、本報告ではランダム波形に対しても線形累積損傷則が成り立つものとして疲労寿命推定を行った。ひずみ頻度読み取り法については、CASE1では変位とひずみの相関関係を求めひずみ時刻歴を推定していることからピーク法<sup>4)</sup>を用い、CASE2では個々のヒステリシスループの最小値と最大値の間の変位範囲をとひずみ範囲の関係を外挿し、ひずみ範囲より疲労寿命を算出する方法を用いている。なお、両手法において疲労寿命を算出するために2-1式を用いている。

表6.4.1及び6.4.2に、それぞれCASE1及びCASE2を用いた場合の累積疲労損傷評価結果を示す。き裂発生部近傍の累積疲労損傷係数はCASE1及びCASE2の全ての加振試験で制限値1以下であった。

本試験では、ひずみゲージ計測範囲外の大ひずみ領域まで試験体に慣性力が負荷されたことにより、非弾性ひずみの発生が確認されていることから、従来の疲労損傷評価法では試験体破損の説明が困難である。

Coffin、朝田らの研究によれば、進行性変形が発生する場合、ラチェットひずみによる延性消耗が原因となって疲労寿命は低下する。Coffinは疲労寿命の低下に対し、延性消耗の影響を考慮した次式を提案している<sup>5)</sup>。

$$(n_f / N_f)^{0.6} + \sum \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} = 1 \quad (6-1)$$

$n_f$ はラチェット発生下での破損繰返し数、 $N_f$ は繰返しひずみ振幅による破損繰返し数、 $\Sigma\varepsilon$ は累積ひずみ、 $\varepsilon_f$ は破断延性であり引張試験片の初期横断面積を $A_0$ 、引張試験後のそれを $A_f$ としたとき $\varepsilon_f = \ln(A_0 / A_f)$ で与えられる。

一方、朝田は内圧を受ける配管のラチェット疲労試験結果から、累積ひずみに対する延性消耗の影響を考慮した以下の2式を提案している<sup>6)</sup>。

### 実験式1

$$\begin{aligned} 3D_f + D_d &= 1 & (D_f \leq 0.25) \\ D_f + 3D_d &= 1 & (D_f > 0.25) \end{aligned} \quad (6-2)$$

### 実験式2

$$D_f + 2(D_f \cdot D_d)^{0.5} + D_d = 1 \quad (6-3)$$

ここで、 $D_f = (n_f / N_f)^{0.6}$ 、 $D_d = \Sigma \varepsilon / \varepsilon_f$ である。

以上のラチェット疲労損傷評価法に基づき、破損部付近のひずみ履歴に対して疲労損傷評価を試みた。なお、累積ひずみ $\Sigma \varepsilon$ は、表6.4.3に示すように試験終了後にひずみ格子を用いて計測した値を用いた。

図6.4.1及び6.4.2にそれぞれCASE1及びCASE2に対するラチェット疲労損傷評価結果を示す。これらの図によると、評価結果は(6-3)式とよく一致しており、ラチェット疲労による相互作用則により本試験結果が整理できる可能性があることがわかった。

最後に、現段階では客観的な根拠に乏しいが、本加振試験で得られた断片的な結果を基に、試験体のき裂発生までのメカニズムについて考える。

片持ちはりで高応力部となる固定端部付近では、動的負荷下でも薄肉円筒の静的圧縮座屈と類似のメカニズムにより座屈変形が発生するものと考えると都合がよい。この変形が、定常ランダム波では90°及び270°方向に発生したのに対して、地震波では90°方向のみに発生したという違いについては、負の方向により大きな加速度を持つ地震波の偏りの影響により、90°方向により大きな圧縮応力が発生したためと説明できる。

さらに、本試験で見られたような進行性変形(バルジ変形)の発生に伴い、変形部付近では、外面には引張応力が発生し加振時の圧縮応力を打ち消す方向に作用するのに対し、内面には圧縮応力が発生し加振時の圧縮応力と重ね合わせられて、圧縮応力を増大させると考えることができる。これより、90°方向の試験体内面が最も高応力部となり、最終的にはラチェット疲労によるき裂が発生したものと推察することができる。

## 6.5. 評価の妥当性

一般に、繰返し負荷を受ける試験体の大ひずみ（10%程度）を計測することは、現在の計測技術を持ってしても困難である。したがって、ひずみ挙動の評価を行う場合は、推定に負うところが大きく、先にも述べたようにひずみの定量的な評価は今後の課題としている。

次に、疲労損傷評価についても、大ひずみ領域における疲労寿命については、データが少ないため推定に頼らざるをえない。例えば、評価に使用した疲労寿命評価式(2-1)式は、全ひずみ範囲が約2%までの疲労試験結果の回帰により得られたものであり、10%程度の全ひずみ範囲に対する疲労寿命を外挿して推定することに議論の余地がある。

また、本試験で用いたひずみ格子については、確立された計測方法ではなく、計測精度の点から問題が残る。その上、ひずみ格子を用いた累積ひずみの計測は試験体外面で行われたものであり、破損部と考えられる試験体内面の累積ひずみに比べて小さく見積もられている可能性がある。したがって、試験体内面の累積ひずみはさらに大きな値となることが予想される。

これらの問題点を実験的に解決することは困難であることから、今後、薄肉直管要素の解析的検討を行い、その結果を含めて定量的評価を実施することとした。

表 6.1 試験結果のまとめ

加振試験		入力加速度			応答加速度			相対変位			振動特性	
		最大値 (G)	最小値 (G)	rms 値 (G)	最大値 (G)	最小値 (G)	rms 値 (G)	最大値 (mm)	最小値 (mm)	rms 値 (mm)	固有振 動数 (Hz)	減衰比 (%)
定常ラン ダム波 漸増加振 試験	M1	0.31	-0.29	0.05	0.60	-0.56	0.14	1.65	-1.98	0.46	9.3	4.2
	M2	0.41	-0.41	0.11	1.58	-1.46	0.41	4.69	-5.40	1.31	9.0	3.9
	M3	1.15	-1.29	0.36	3.62	-4.09	1.34	16.18	-13.39	4.37	8.8	6.1
	M4	1.93	-2.41	0.63	4.94	-4.43	1.71	23.74	-20.34	6.24	8.6	13.5
	M5	2.86	-3.77	0.90	5.02	-5.23	1.97	34.18	-22.20	8.15	8.0	20.3
	M6	4.33	-4.62	1.09	5.02	-5.18	2.08	49.84	-29.87	9.31	7.9	29.8
	M7	5.24	-6.58	1.39	5.30	-4.83	1.87	61.07	-80.06	17.97	6.8	34.2
地震波 漸増加振 試験	P1	0.31	-0.37	0.06	0.69	-0.74	0.19	2.45	-2.11	0.55	9.4	1.0
	P2	0.31	-0.36	0.06	0.67	-0.71	0.19	2.39	-2.09	0.54	9.3	1.8
	P3	0.51	-0.62	0.11	1.25	-1.35	0.37	4.43	-3.83	1.21	9.3	2.6
	P4	2.08	-2.73	0.46	4.50	-4.86	1.50	21.90	-17.84	5.05	8.6	10.5
	P5	4.25	-5.18	0.70	4.97	-5.11	1.73	31.13	-23.29	6.59	8.4	20.7
	P6	5.50	-6.70	0.84	5.49	-5.36	1.84	50.59	-22.39	9.34	8.1	26.1
	P7	0.28	-0.32	0.06	0.67	-0.73	0.20	16.90	-12.43	0.70	9.3	8.2
	P8	5.45	-6.29	0.83	5.09	-4.99	1.73	70.34	-10.56	10.33	6.3	28.5
	P9	0.43	-0.45	0.07	0.81	-0.84	0.20	31.26	-25.96	0.72	9.3	0.8
	P10	5.27	-6.11	0.82	4.42	-4.36	1.49	84.51	-11.97	12.16	6.3	36.1
地震波 最強加振 試験	Q1	0.28	-0.32	0.06	0.64	-0.66	0.17	1.92	-2.06	0.57	9.3	1.5
	Q2	0.29	-0.30	0.06	0.63	-0.63	0.17	2.31	-1.73	0.56	9.3	0.9
	Q3	5.77	-6.89	0.96	5.36	-5.54	1.94	68.47	-34.40	15.58	7.8	29.5
	Q4	0.35	-0.44	0.07	0.70	-0.69	0.20	18.63	13.85	0.73	9.3	1.6
	Q5	4.57	-6.10	0.68	5.06	-4.37	1.25	80.96	-14.96	8.56	7.9	33.9

表6.1.1 各加振試験における固有振動数及び減衰比の算出結果

## 定常ランダム波漸増加振試験

<i>Test #</i>	<i>Max Acceleration, G</i>	<i>RMS Acceleration, G</i>	<i>Frequency Hz</i>	<i>Damping %</i>
<i>M1</i>	0.31	0.05	9.2	2.0
<i>M2</i>	0.41	0.11	9.1	2.0
<i>M3</i>	1.29	0.36	8.9	2.0
<i>M4</i>	2.41	0.63	8.5	8.0
<i>M5</i>	3.77	0.90	8.3	14.0
<i>M6</i>	4.62	1.09	8.0	20.0
<i>M7</i>	6.58	1.39	7.0	28.0

## 地震波漸増加振試験

<i>Test #</i>	<i>Max Acceleration, G</i>	<i>RMS Acceleration, G</i>	<i>Frequency Hz</i>	<i>Damping %</i>
<i>P1</i>	0.37	0.06	9.1	3.0
<i>P2</i>	0.36	0.06	9.1	2.5
<i>P3</i>	0.62	0.11	9.0	2.5
<i>P4</i>	2.73	0.46	8.6	7.0
<i>P5</i>	5.18	0.70	8.4	9.0
<i>P6</i>	6.70	0.84	8.1	10.0
<i>P7</i>	0.32	0.06	8.9	2.7
<i>P8</i>	6.29	0.83	7.8	16.0
<i>P9</i>	0.45	0.07	8.7	2.0
<i>P10</i>	6.11	0.82	7.3	22.0

## 地震波限界加振試験

<i>Test #</i>	<i>Max Acceleration, G</i>	<i>RMS Acceleration, G</i>	<i>Frequency Hz</i>	<i>Damping %</i>
<i>Q1</i>	0.32	0.06	9.1	2.0
<i>Q2</i>	0.30	0.06	9.1	2.0
<i>Q3</i>	6.89	0.96	7.8	19.0
<i>Q4</i>	0.44	0.07	8.8	2.2
<i>Q5</i>	6.10	0.68	7.3	20.0

表 6.4.1 疲労損傷評価表 (CASE1)

定常ランダム波 漸增加振試験		地震波漸增加振試験		地震波限界加振試験	
加振試験	疲労損傷 係数	加振試験	疲労損傷 係数	加振試験	疲労損傷 係数
M1	0.000	P1	0.000	Q1	0.000
M2	0.000	P2	0.000	Q2	0.000
M3	0.000	P3	0.000	Q3	0.530
M4	0.006	P4	0.002	Q4	0.000
M5	0.012	P5	0.004	Q5	0.237
M6	0.042	P6	0.059		
M7	0.109	P7	0.000		
		P8	0.133		
		P9	0.000		
		P10	0.108		
累積疲労損傷係数					
0.169		0.306		0.766	

表 6.4.2 疲労損傷評価表 (CASE2)

定常ランダム波漸増加振試験		地震波漸增加振試験		地震波限界加振試験	
加振試験	疲労損傷係数	加振試験	疲労損傷係数	加振試験	疲労損傷係数
M1	0.000	P1	0.000	Q1	0.000
M2	0.000	P2	0.000	Q2	0.000
M3	0.002	P3	0.000	Q3	0.162
M4	0.013	P4	0.008	Q4	0.000
M5	0.032	P5	0.057	Q5	0.151
M6	0.078	P6	0.106		
M7	0.071	P7	0.000		
		P8	0.122		
		P9	0.000		
		P10	0.108		
累積疲労損傷係数					
0.195		0.401		0.313	

表 6.4.3 累積ひずみの算出結果

	累積ひずみ*, $\Sigma \varepsilon$ (%)	破断延性, $\varepsilon_f$	$\sum \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}$
定常ランダム波漸増加振試験	16.3		0.073
地震波漸增加振試験	16.1	2.23	0.072
地震波限界加振試験	12.5		0.056

\* ひずみ格子により計測した、試験終了後の累積ひずみの値

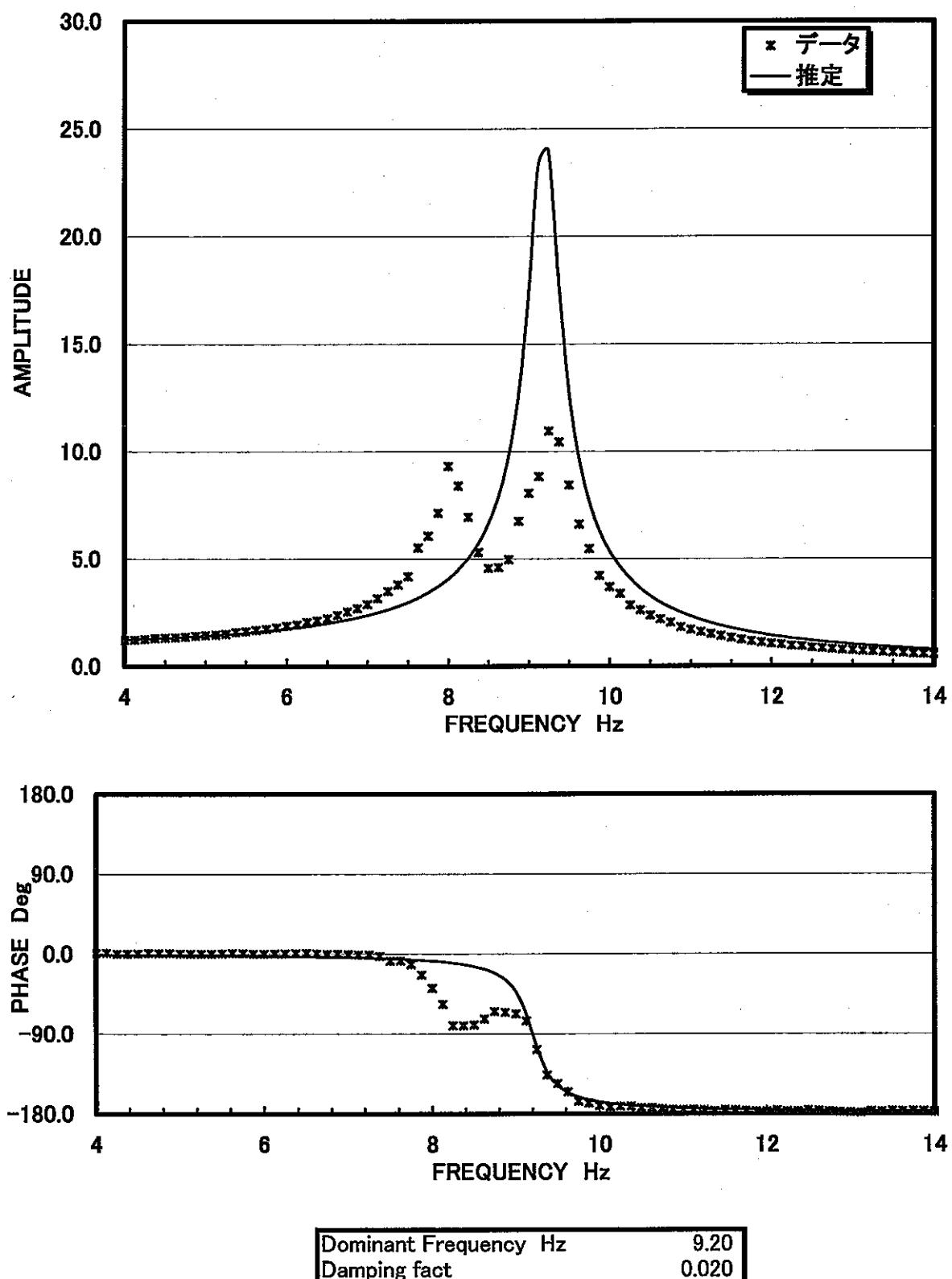
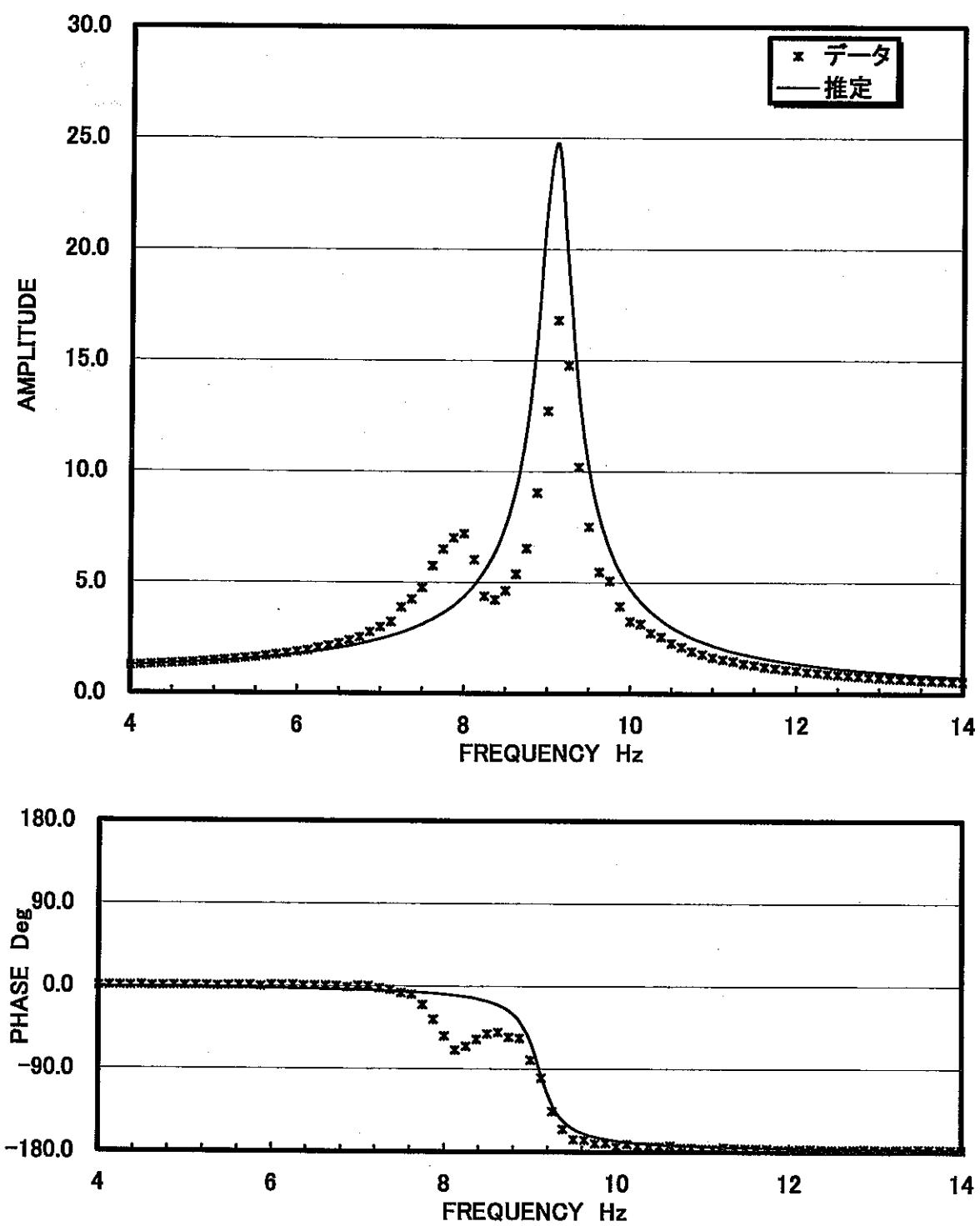


図6.1.1 固有振動数と減衰比の推定(M1)



Dominant Frequency Hz	9.10
Damping fact	0.020

図6.1.2 固有振動数と減衰比の推定(M2)

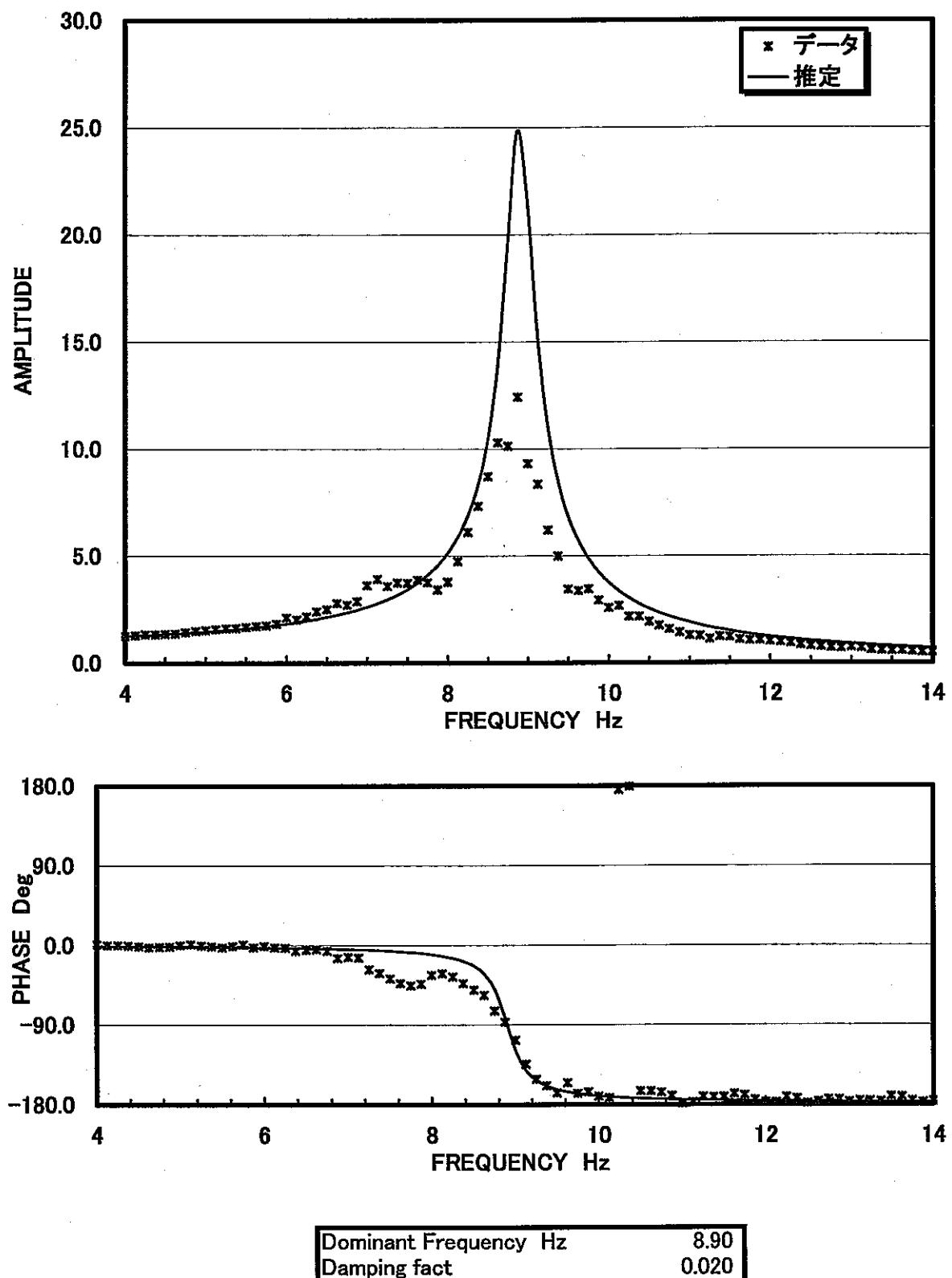


図6.1.3 固有振動数と減衰比の推定(M3)

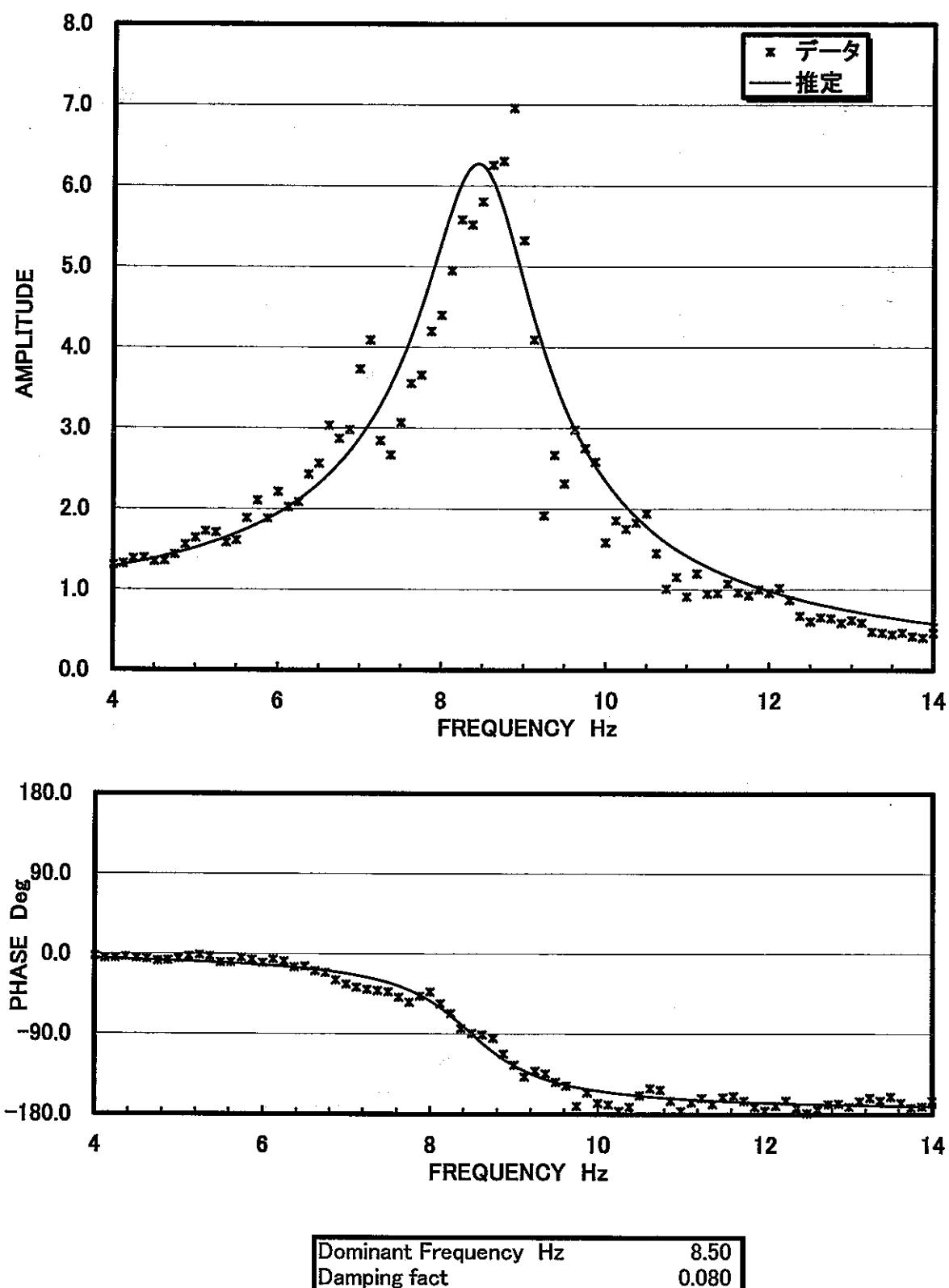


図6.1.4 固有振動数と減衰比の推定(M4)

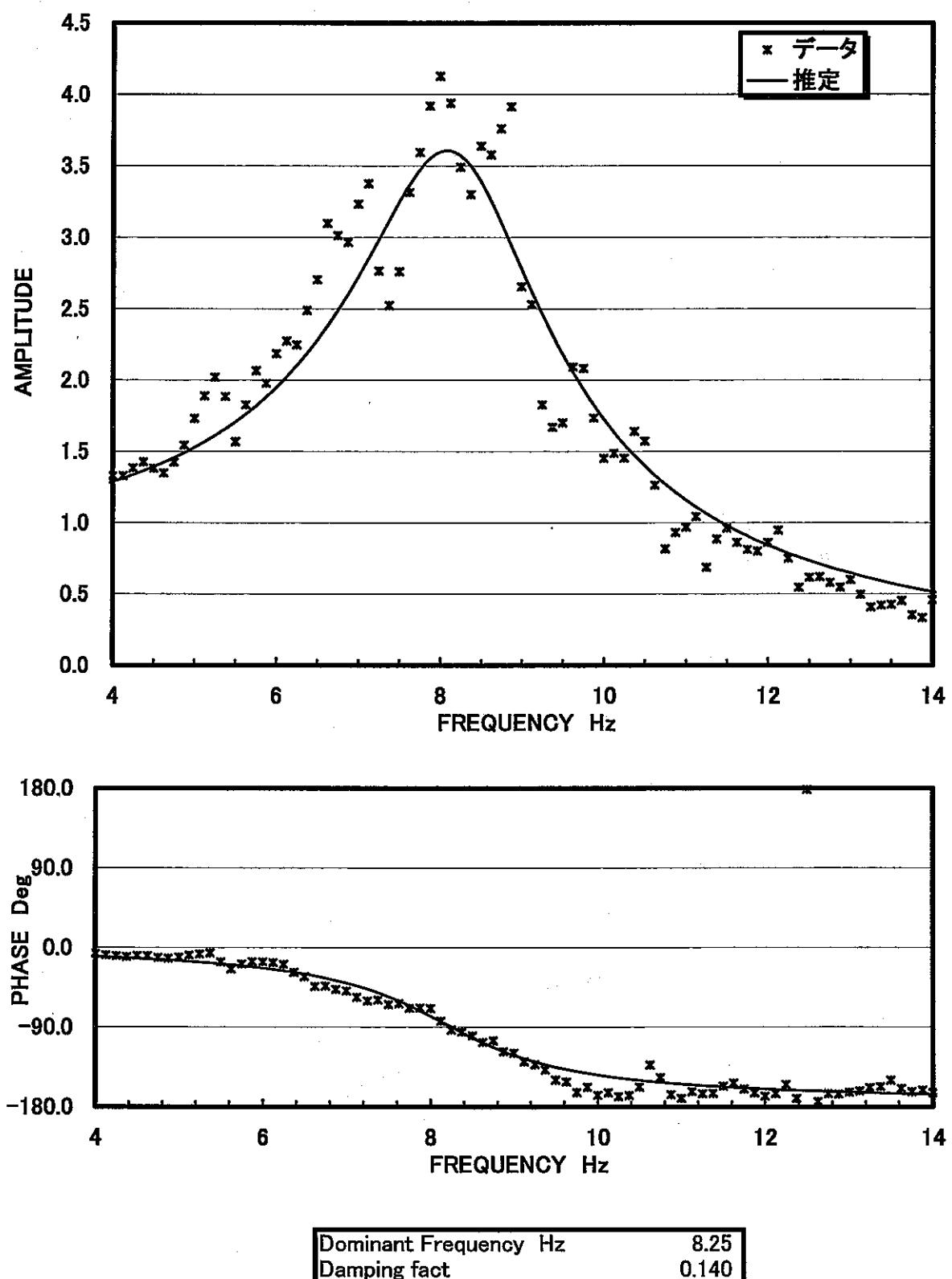
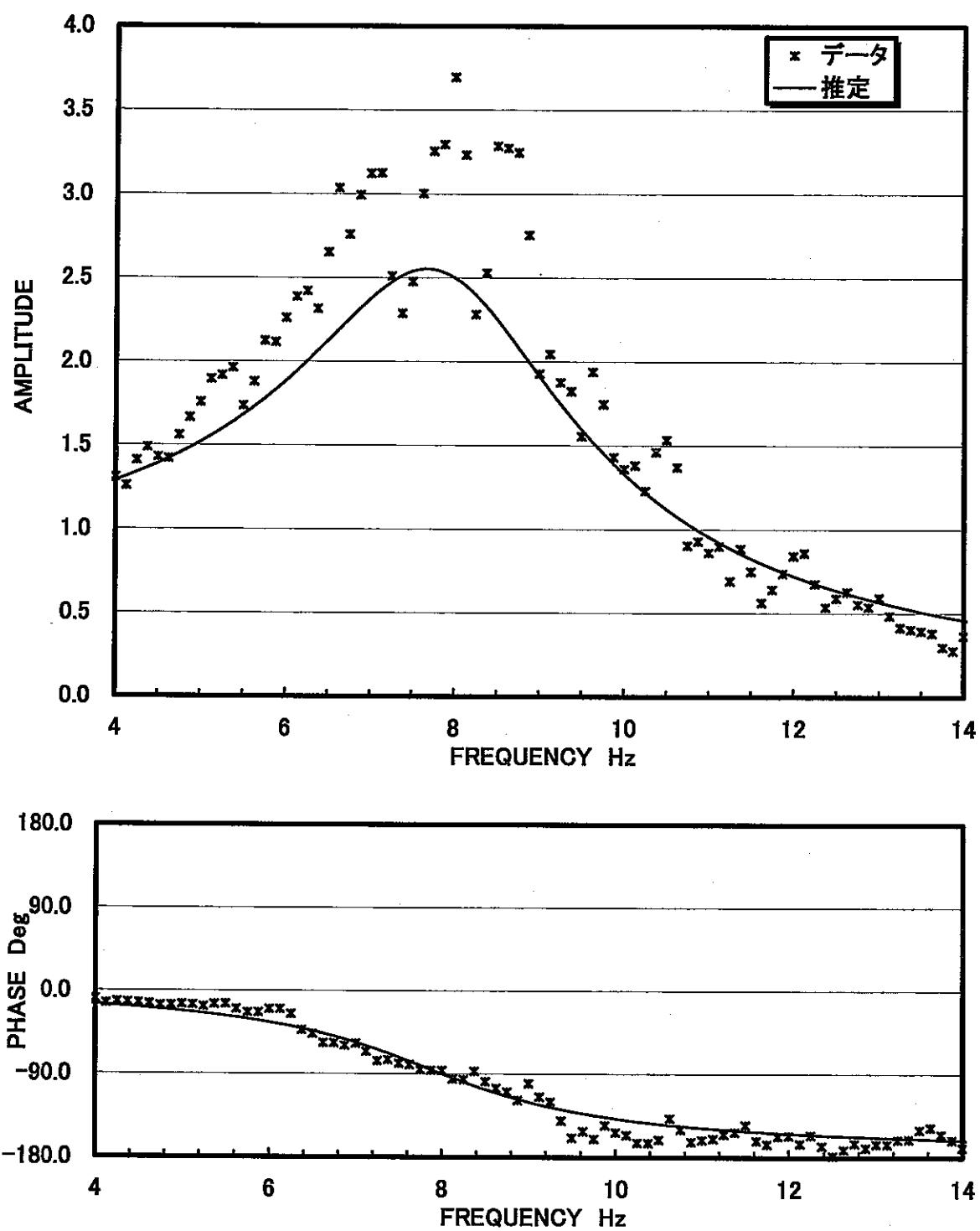
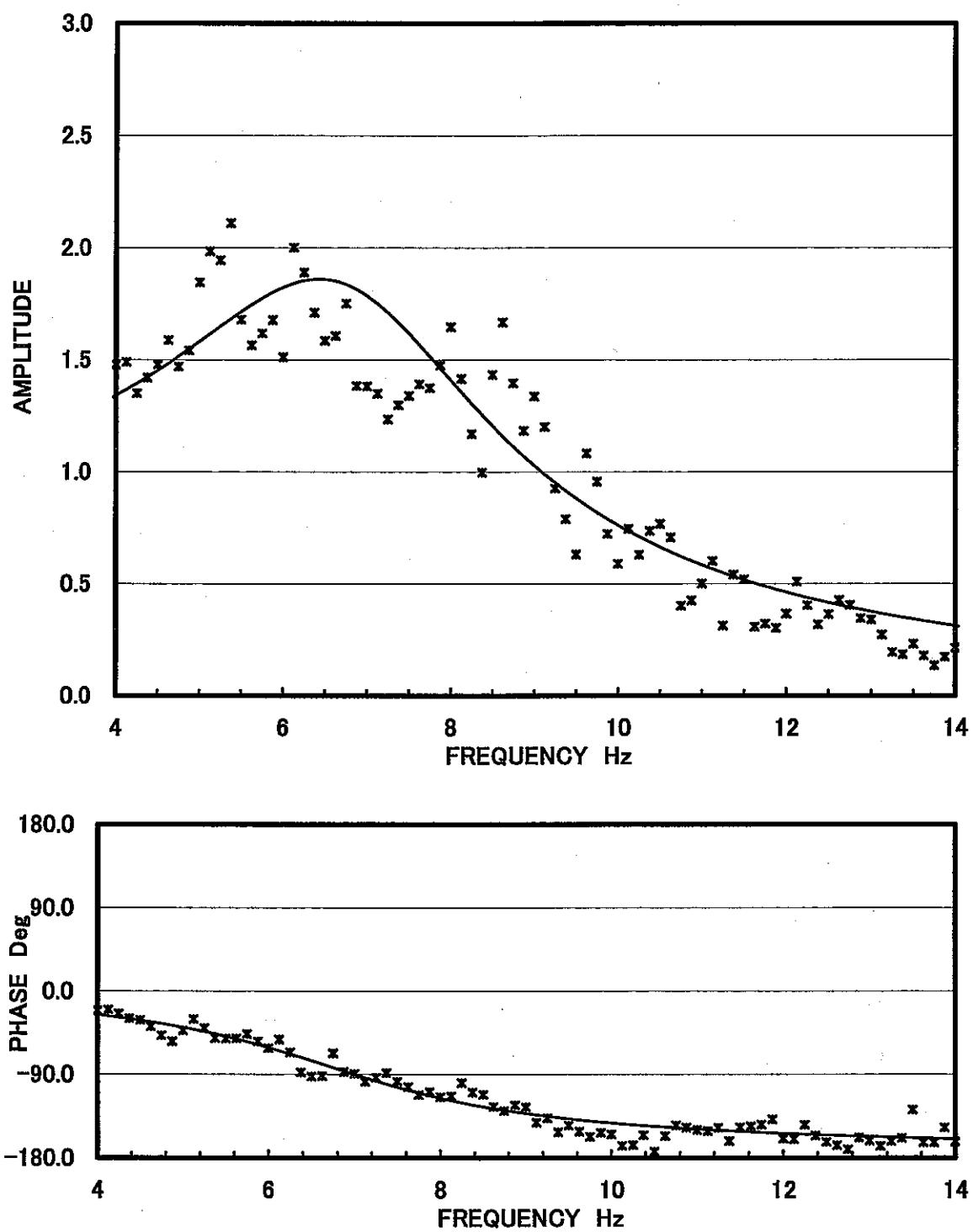


図6.1.5 固有振動数と減衰比の推定(M5)



Dominant Frequency Hz	8.00
Damping fact	0.200

図6.1.6 固有振動数と減衰比の推定(M6)



Dominant Frequency Hz	7.00
Damping fact	0.280

図6.1.7 固有振動数と減衰比の推定(M7)

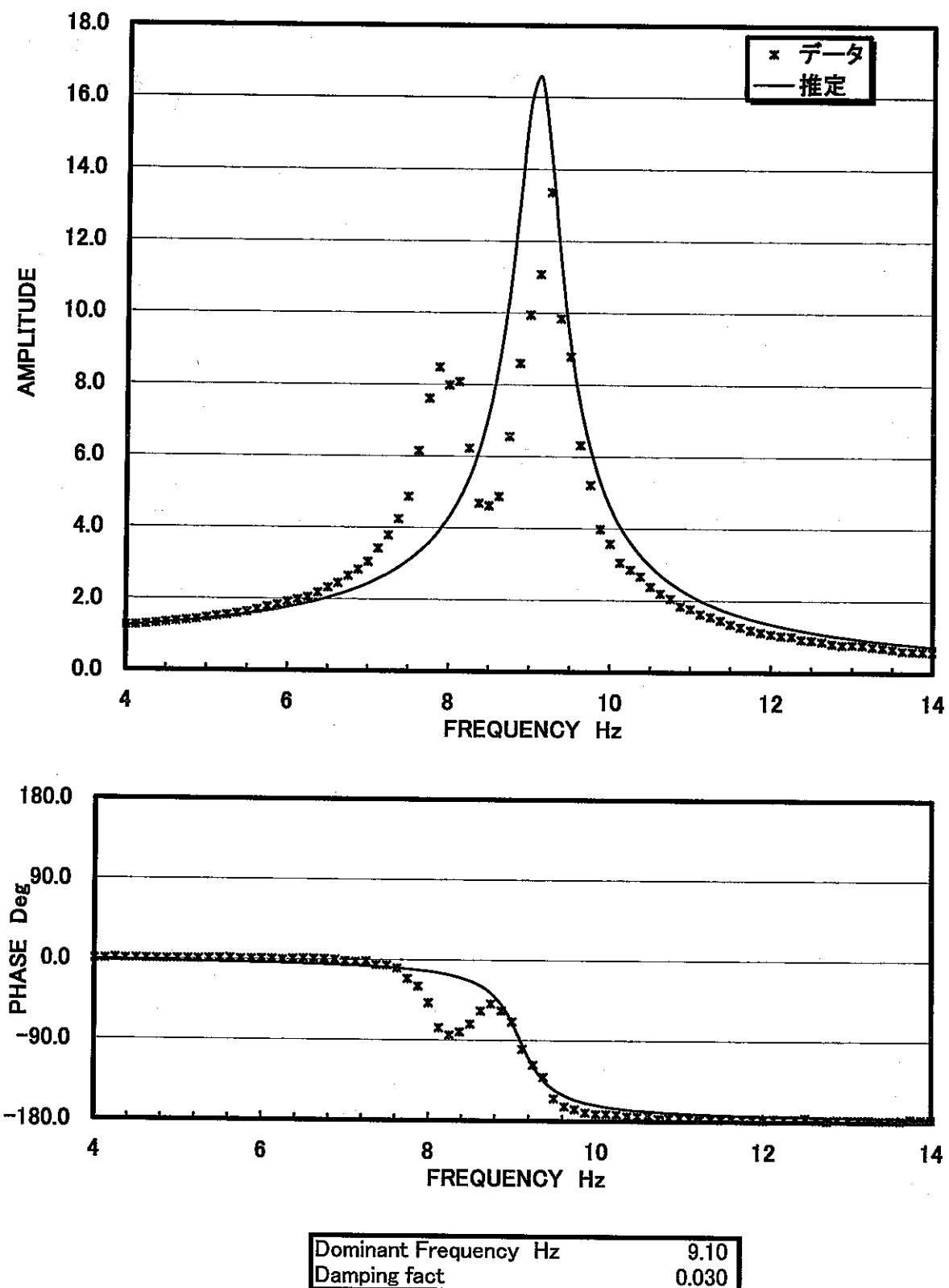


図6.1.8 固有振動数と減衰比の推定(P1)

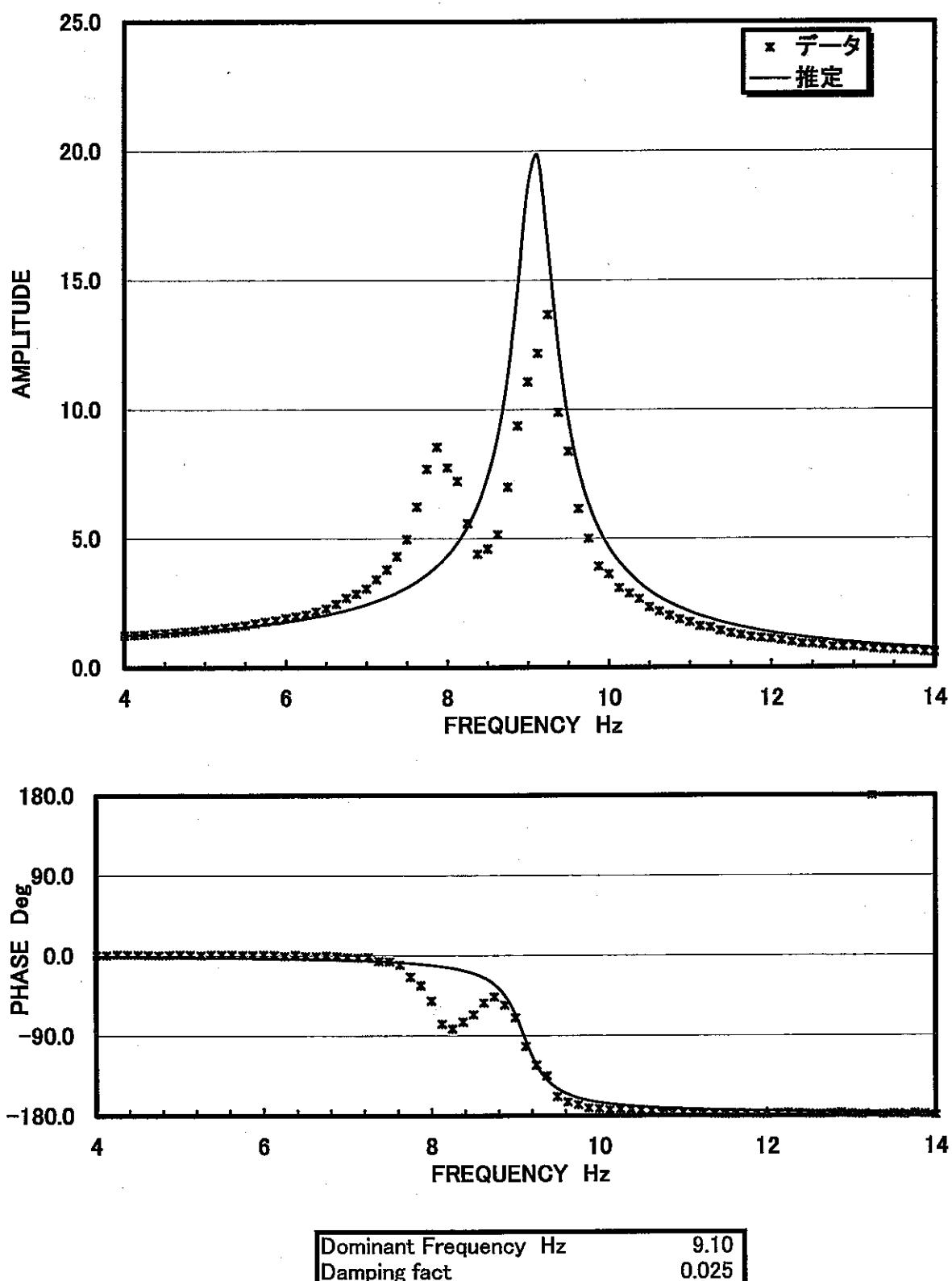


図6.1.9 固有振動数と減衰比の推定(P2)

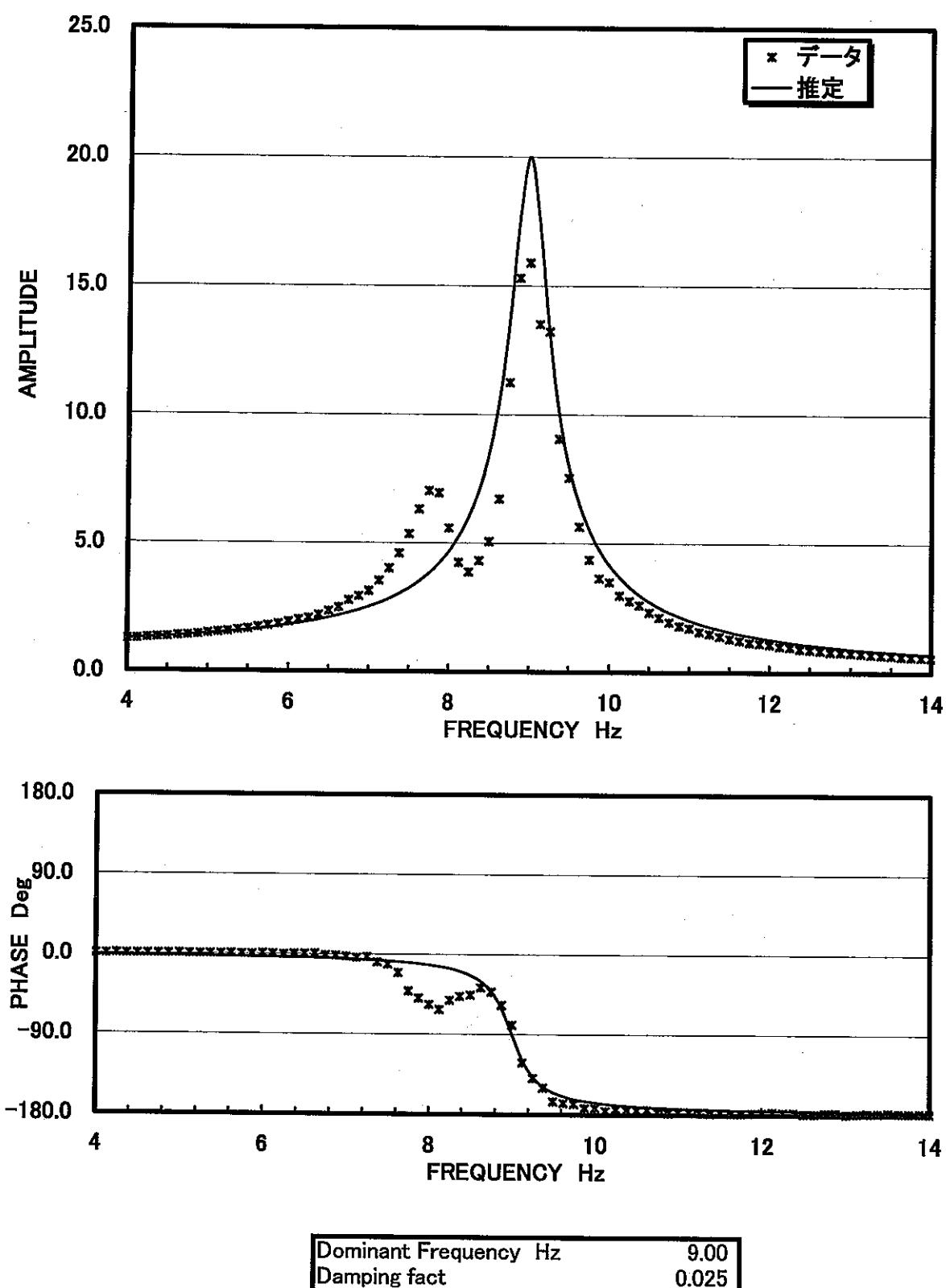


図6.1.10 固有振動数と減衰比の推定(P3)

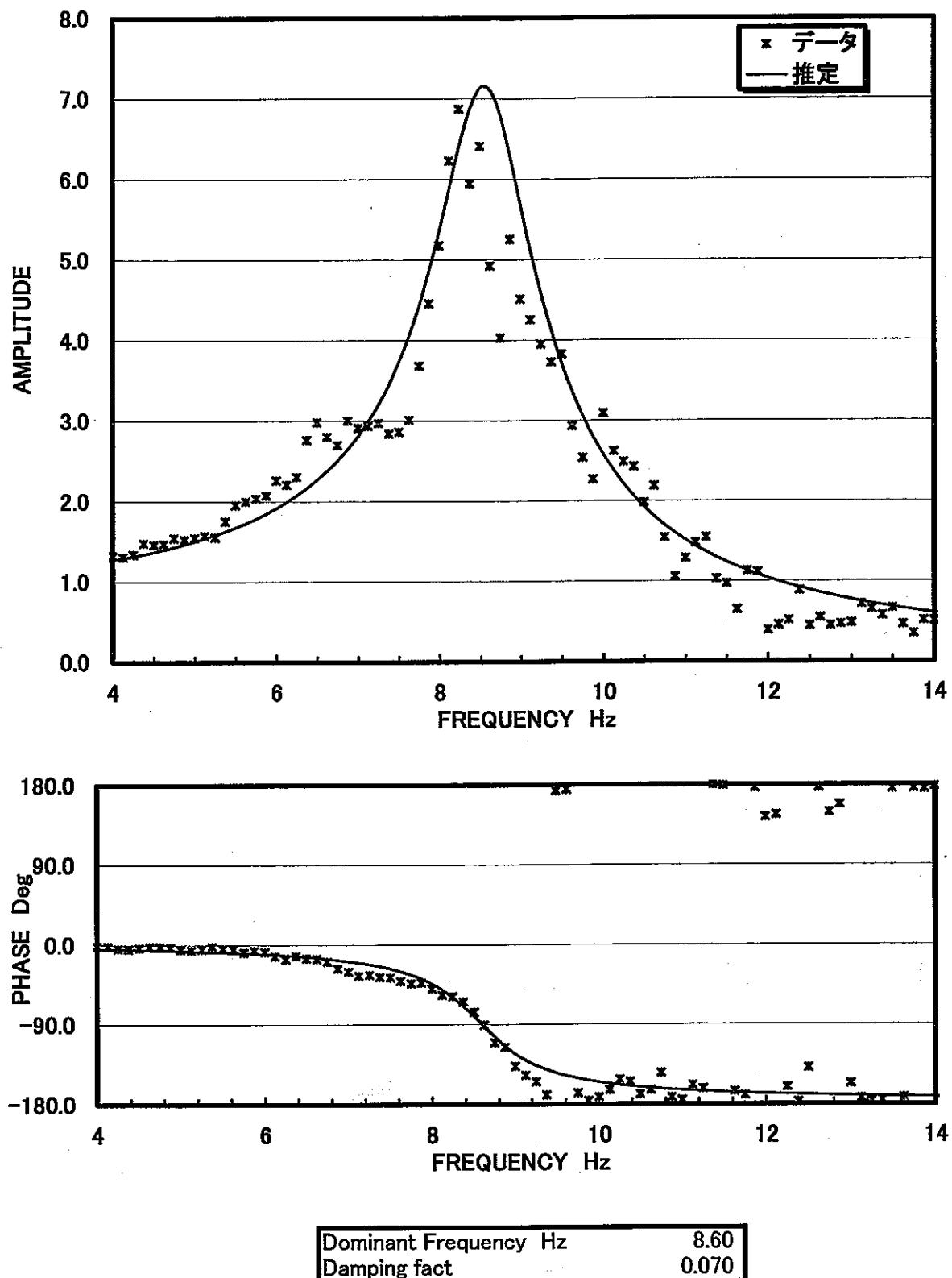


図6.1.11 固有振動数と減衰比の推定(P4)

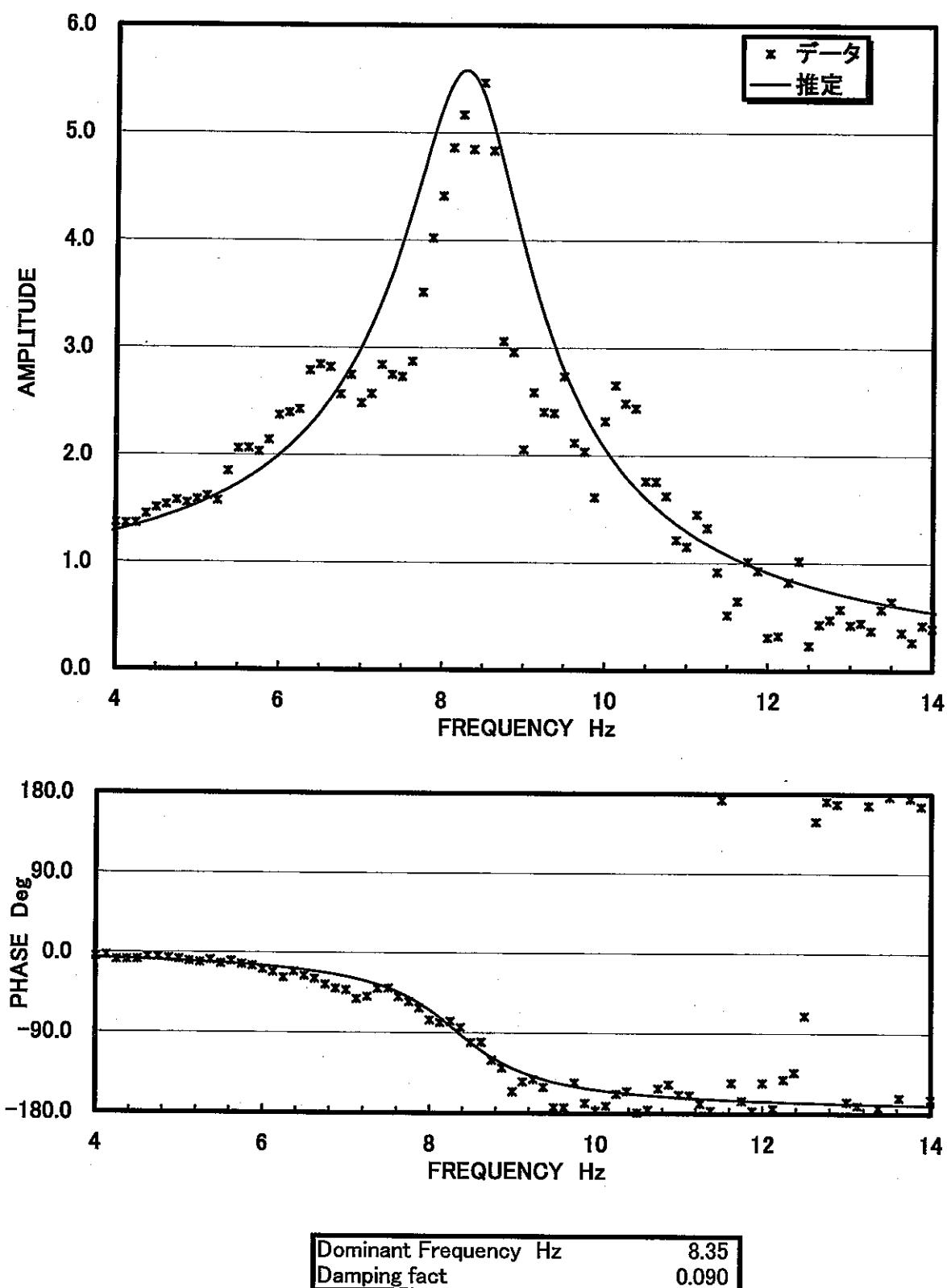


図6.1.12 固有振動数と減衰比の推定(P5)

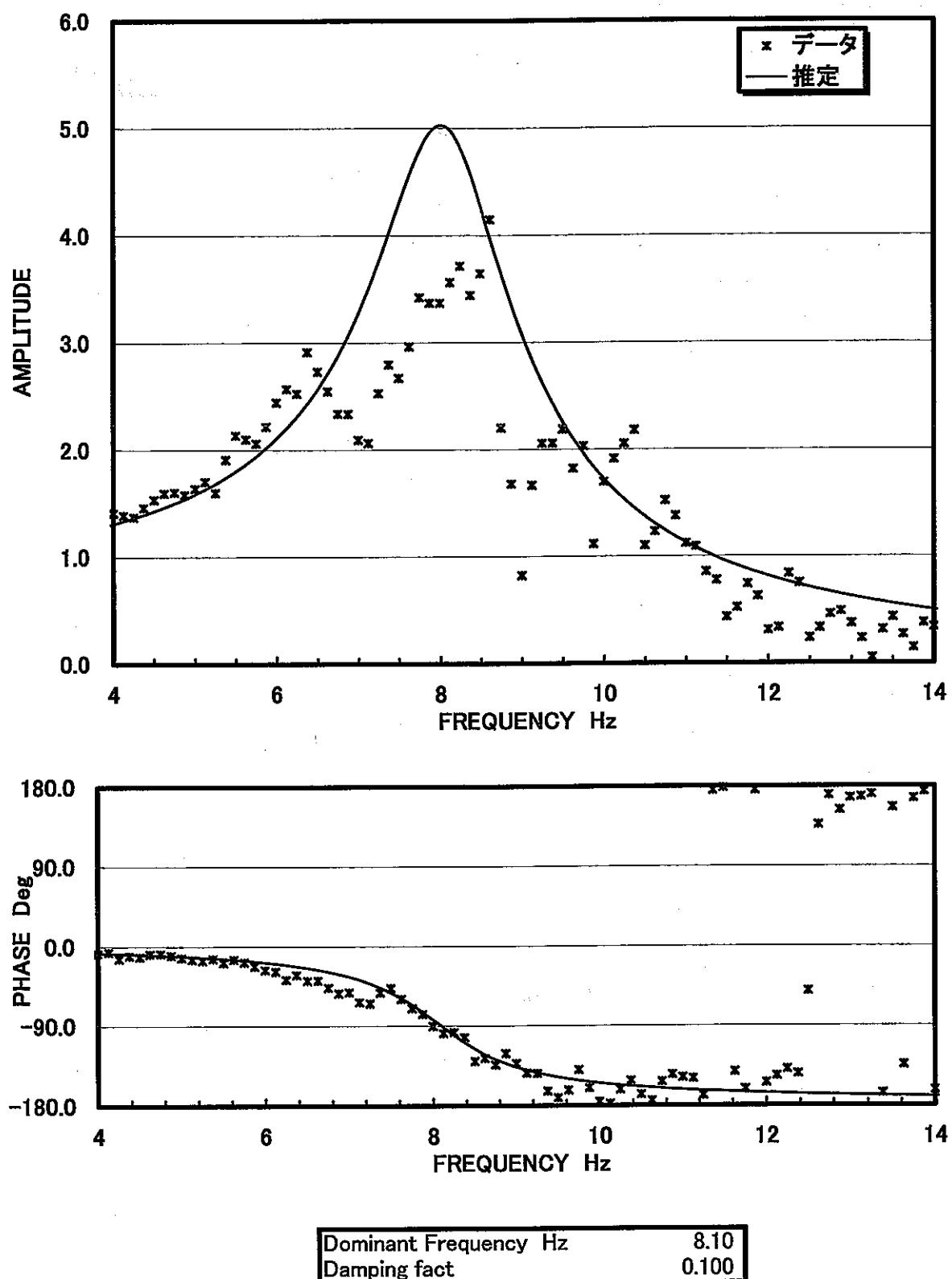


図6.1.13 固有振動数と減衰比の推定(P6)

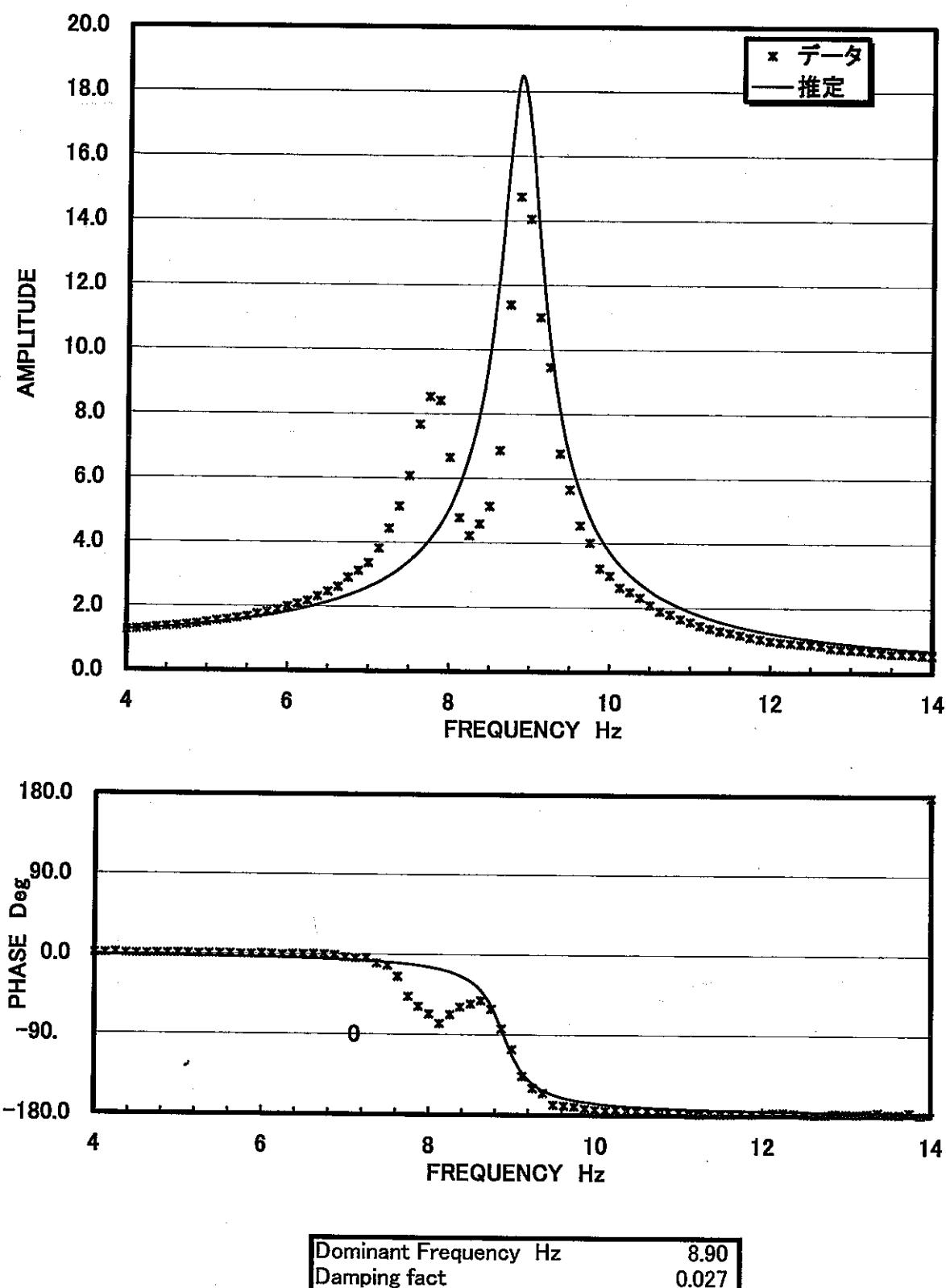


図6.1.14 固有振動数と減衰比の推定(P7)

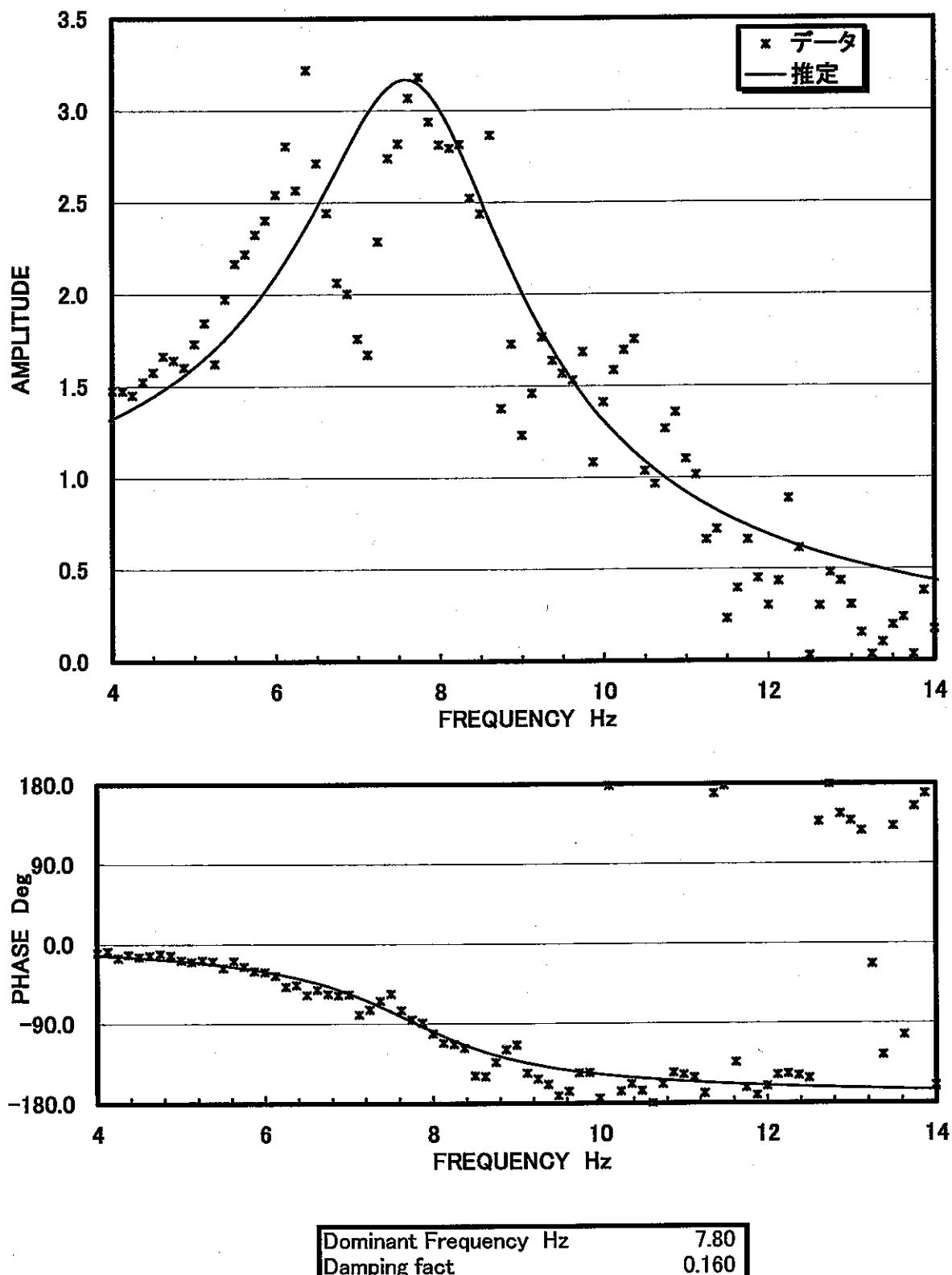
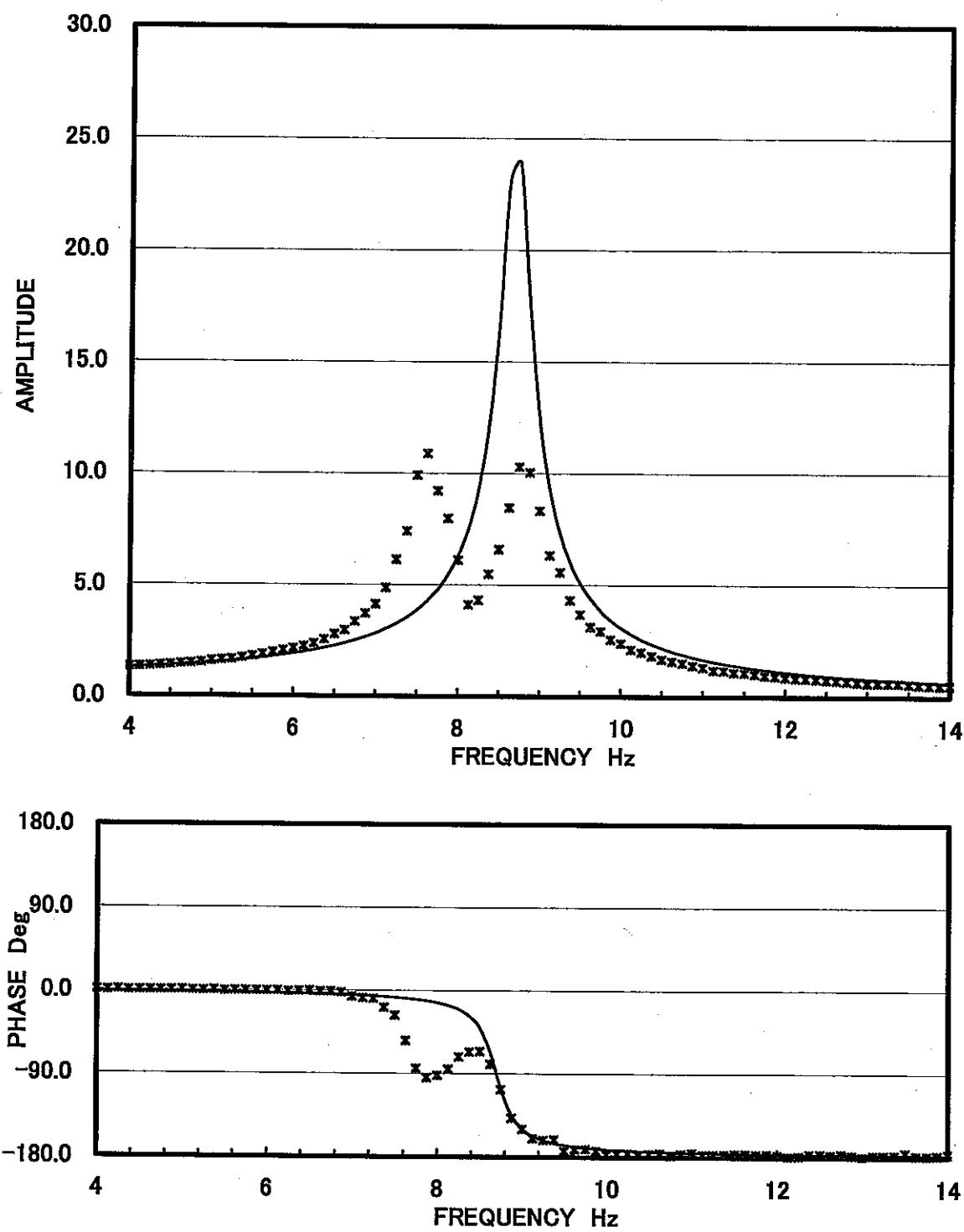


図6.1.15 固有振動数と減衰比の推定(P8)



Dominant Frequency Hz	8.70
Damping fact	0.020

図6.1.16 固有振動数と減衰比の推定(P9)

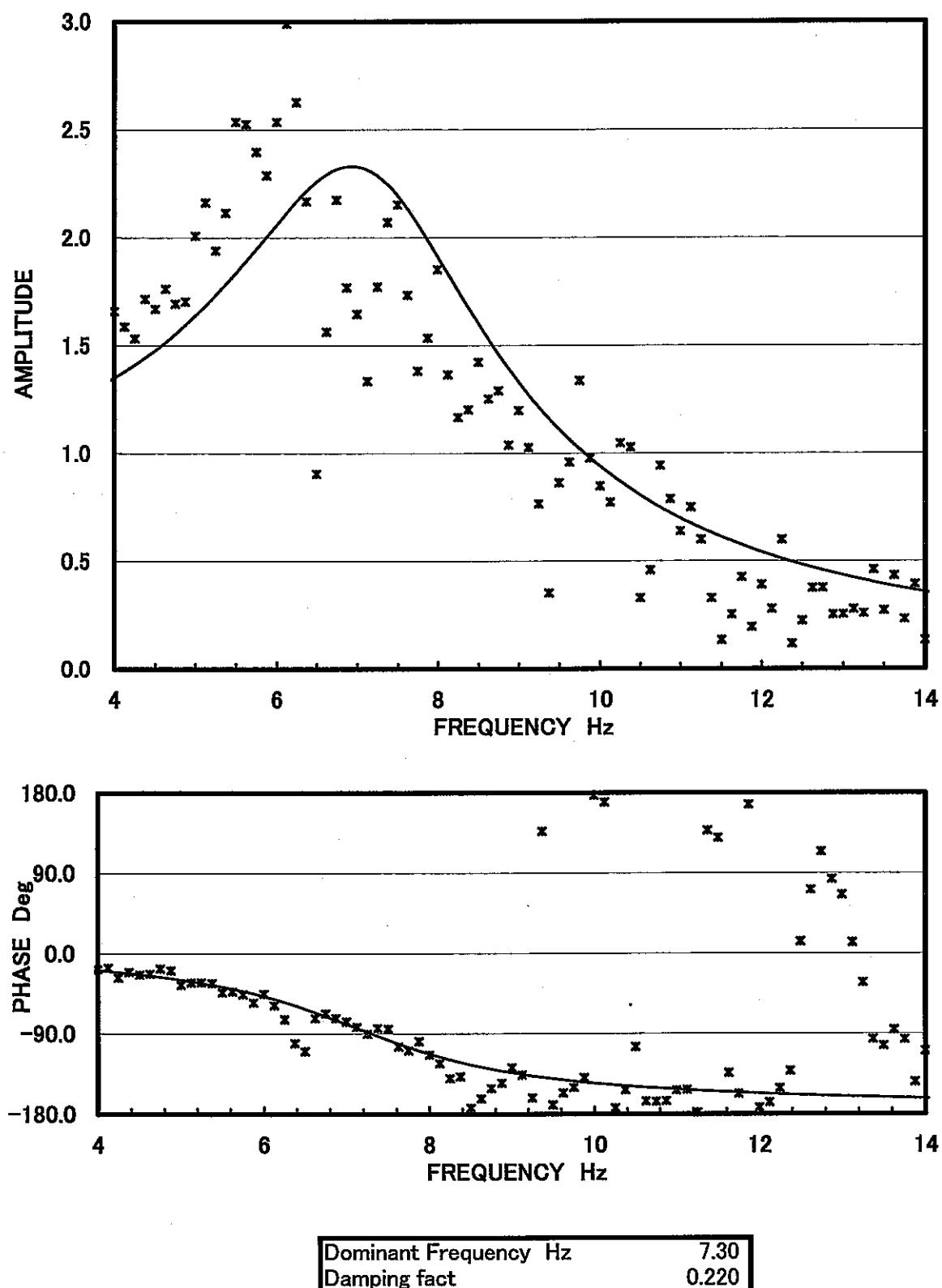
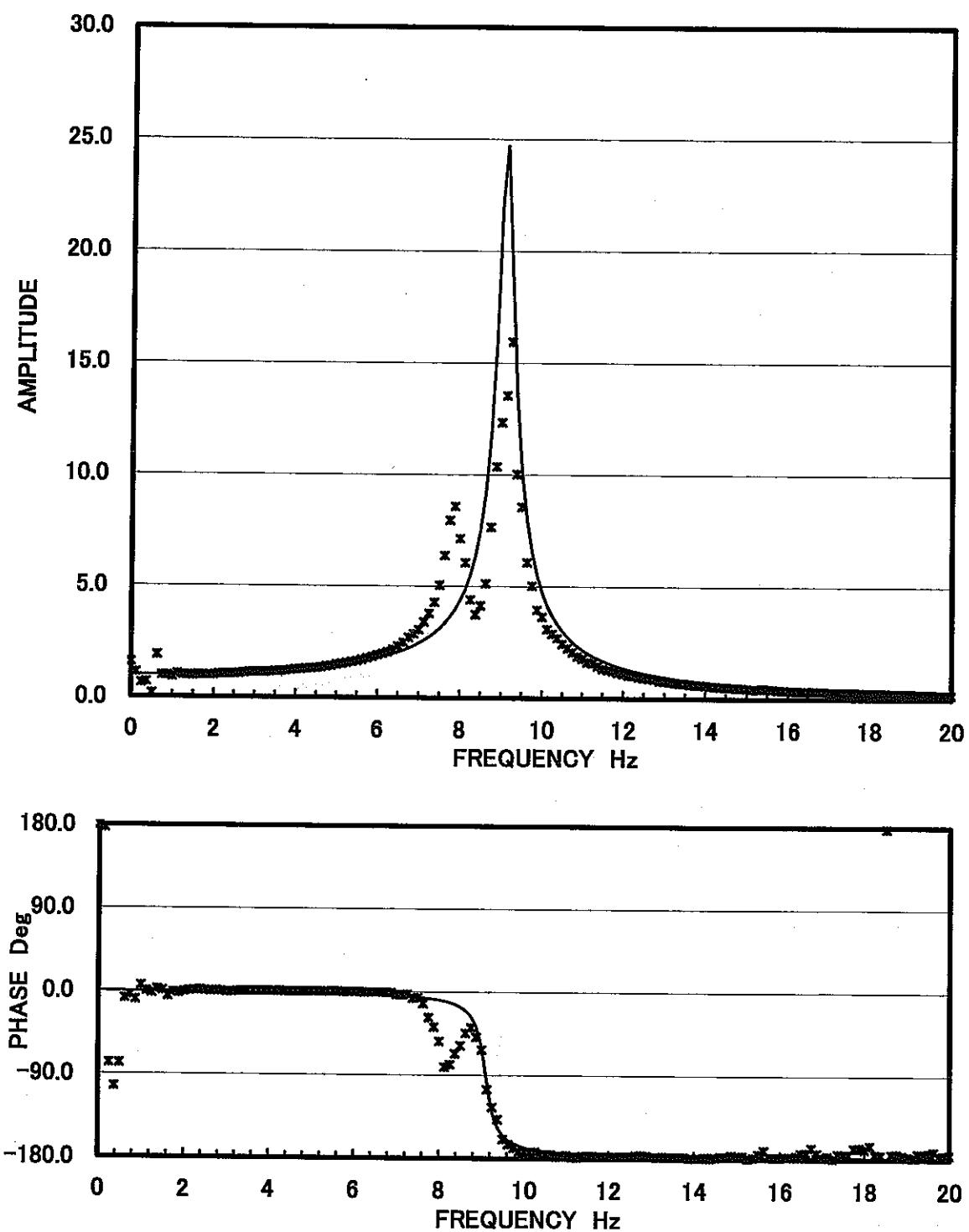


図6.1.17 固有振動数と減衰比の推定(P10)



Dominant Frequency Hz	9.10
Damping fact	0.020

図6.1.18 固有振動数と減衰比の推定(Q1)

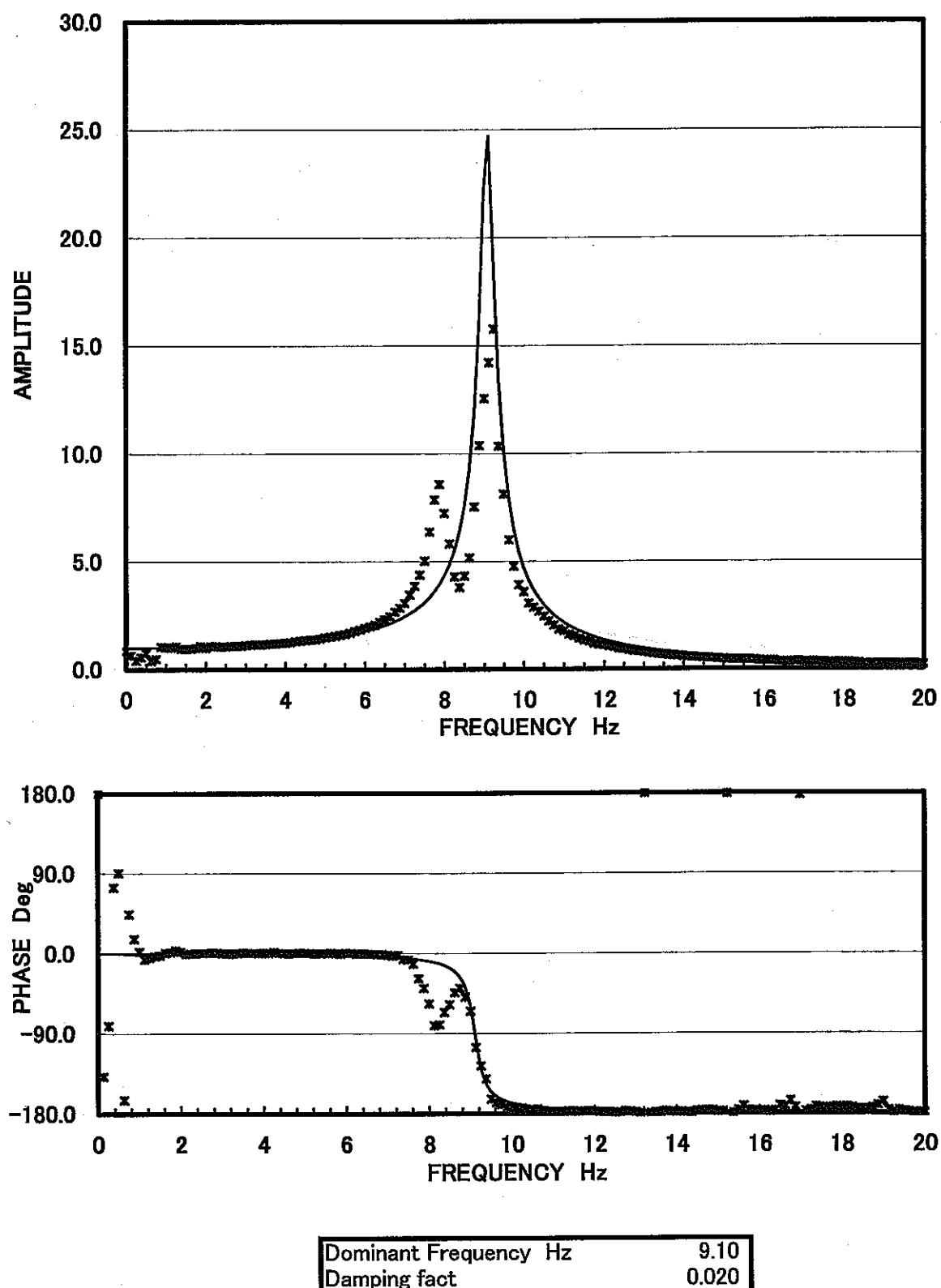
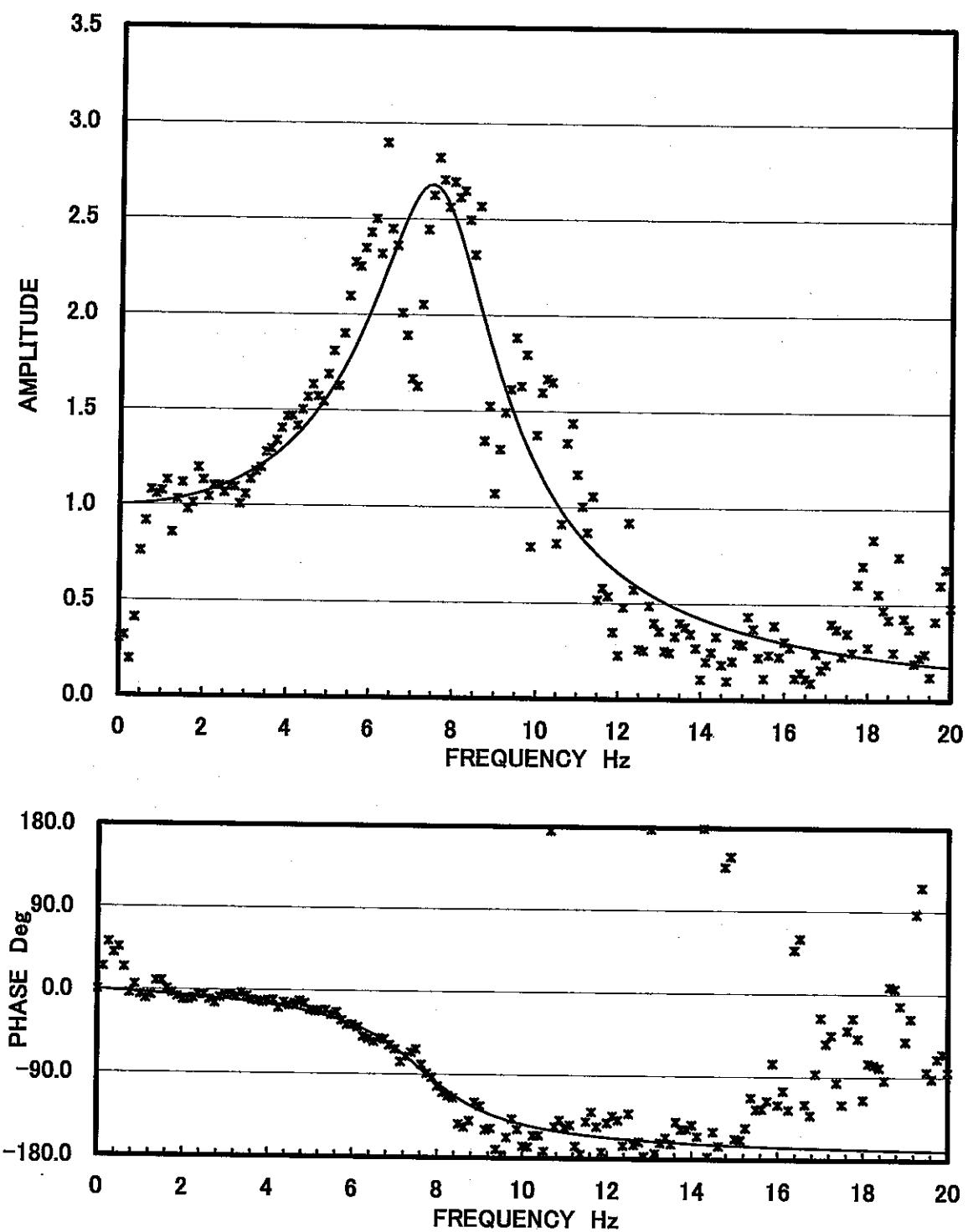


図6.1.19 固有振動数と減衰比の推定(Q2)



Dominant Frequency Hz	7.75
Damping fact	0.190

図6.1.20 固有振動数と減衰比の推定(Q3)

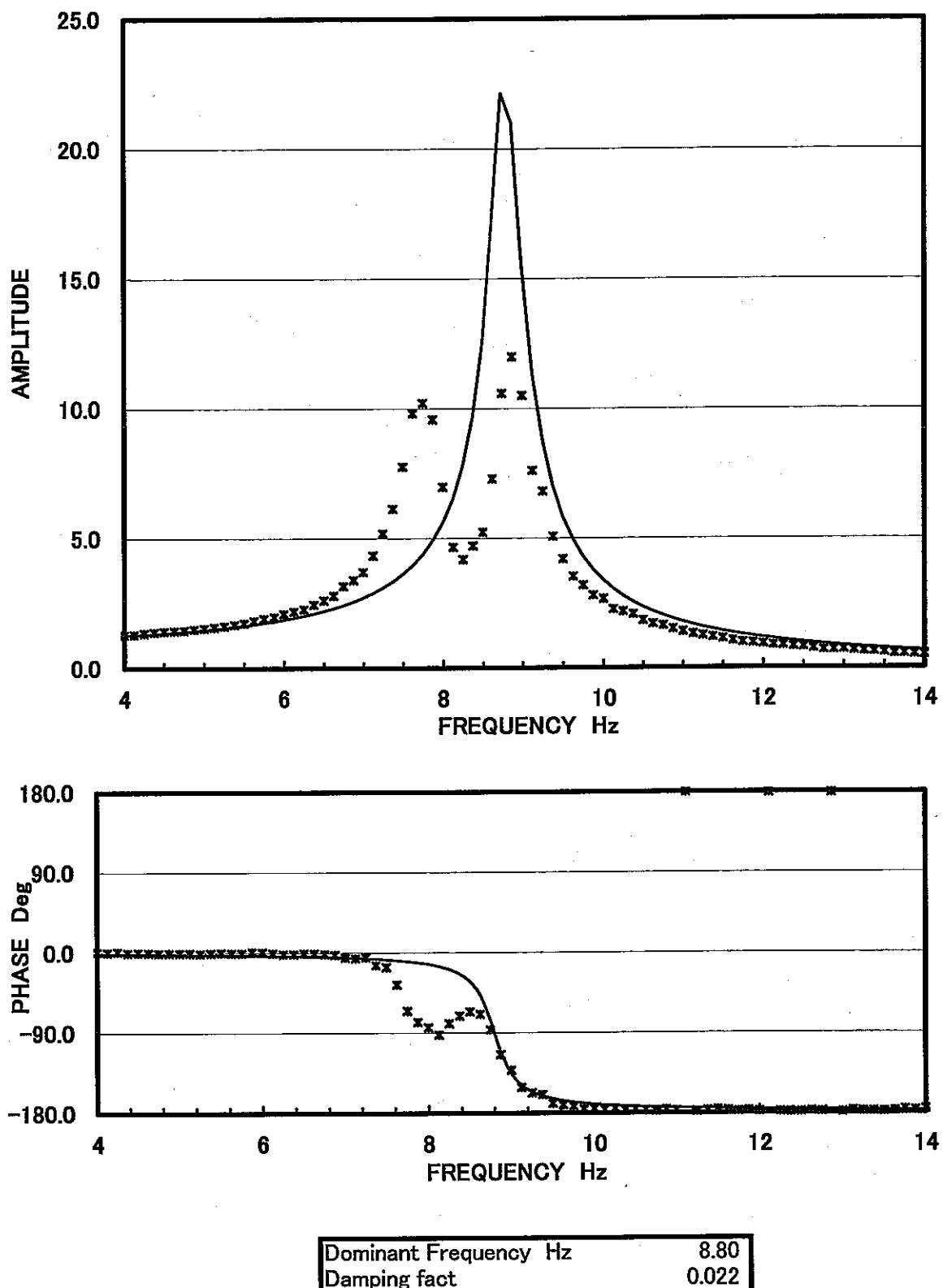
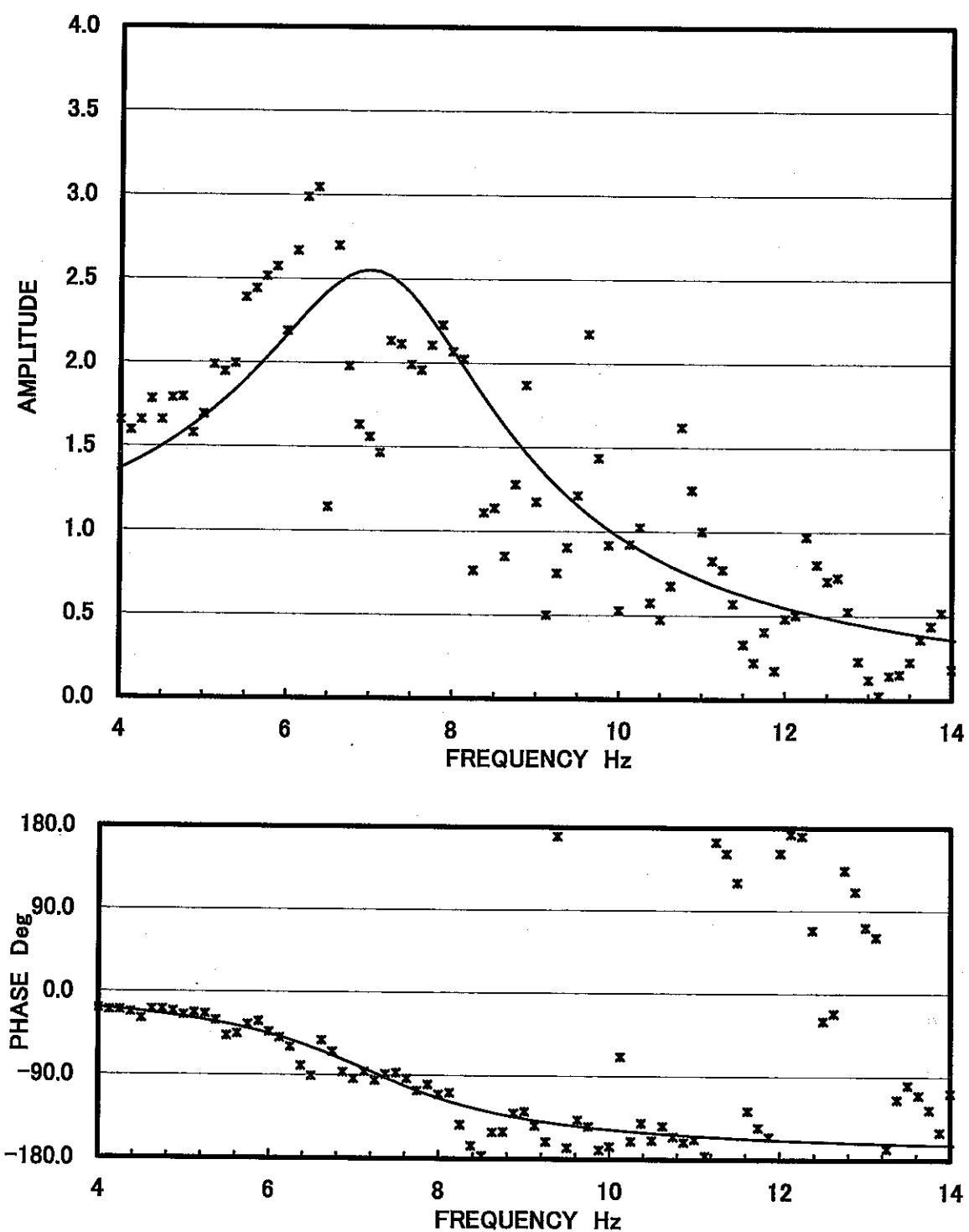


図6.1.21 固有振動数と減衰比の推定(Q4)



Dominant Frequency Hz	7.30
Damping fact	0.200

図6.1.22 固有振動数と減衰比の推定(Q5)

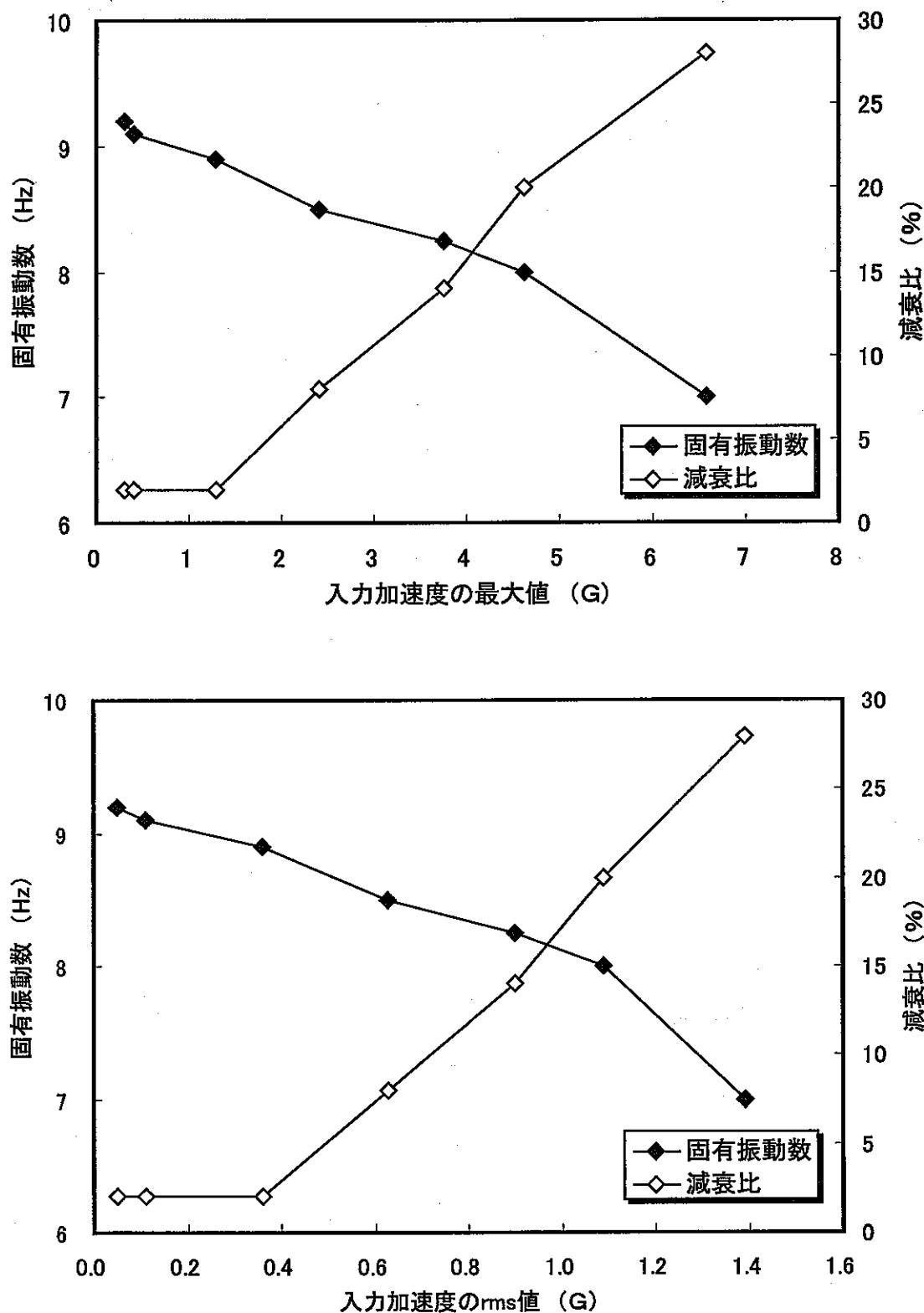


図 6.1.23 入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移  
(定常ランダム波漸増加振試験)

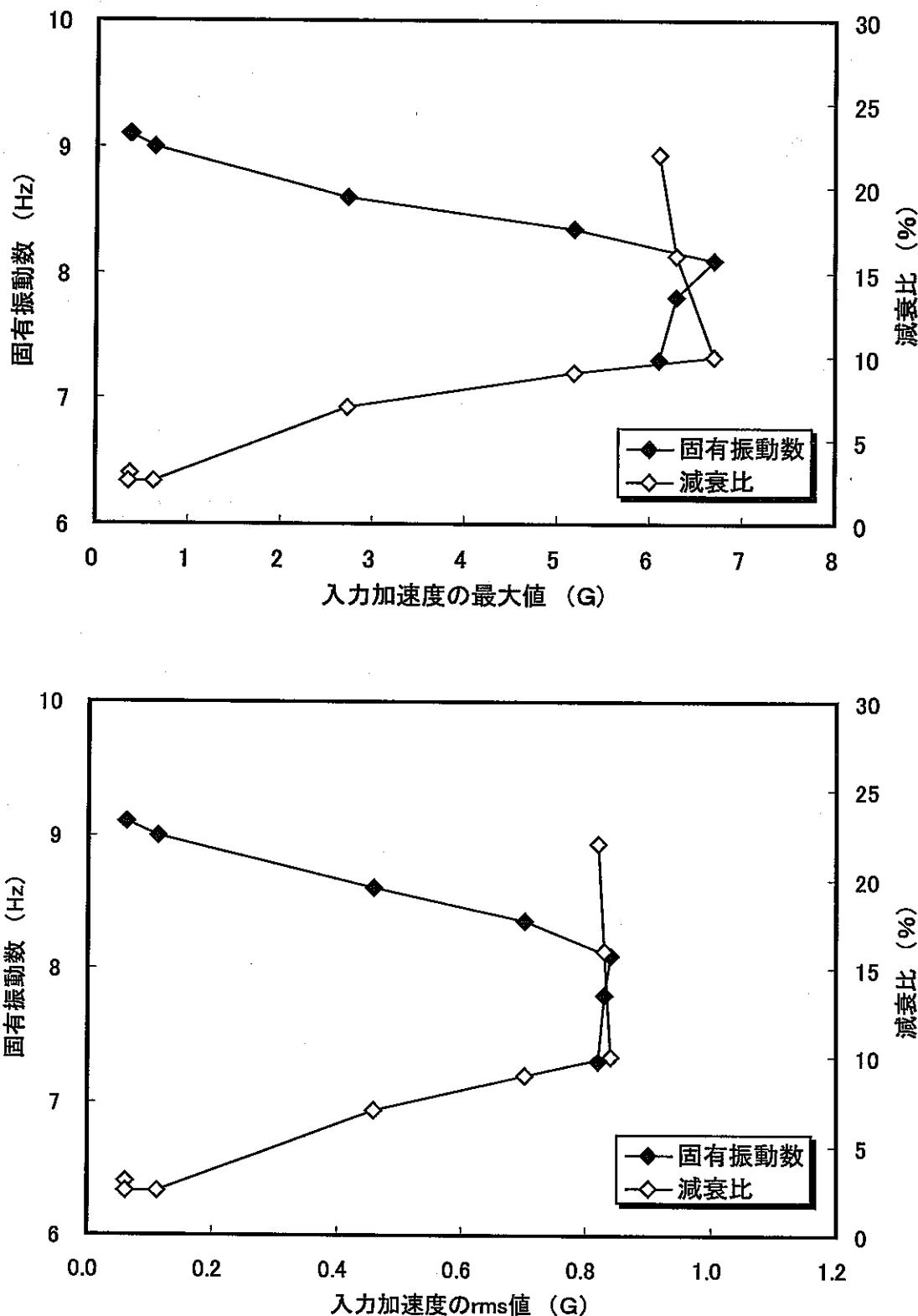


図 6.1.24 入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移  
(地震波漸増加振試験)

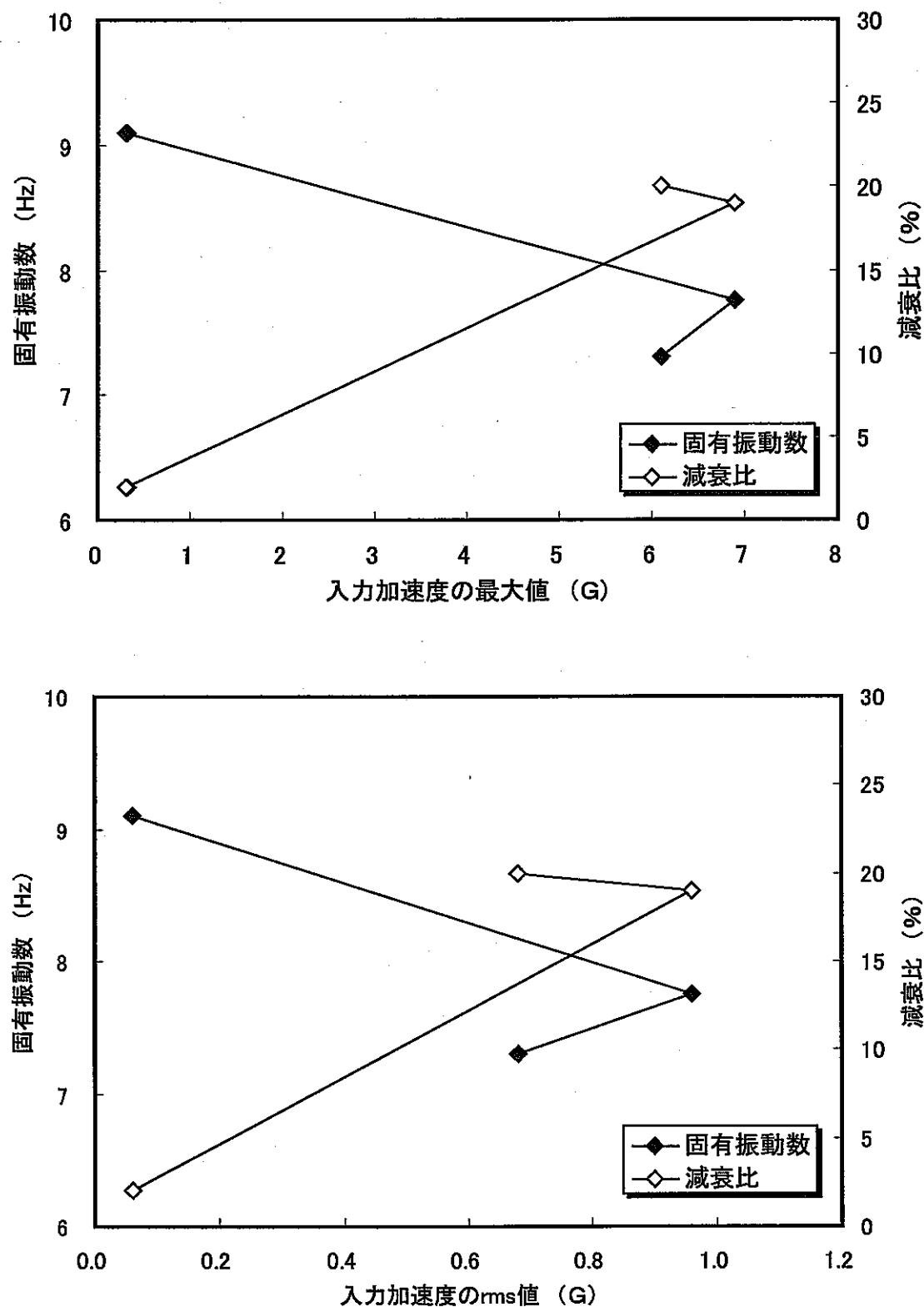


図 6.1.25 入力加速度に対する固有振動数及び減衰比の推移  
(地震波限界加振試験)

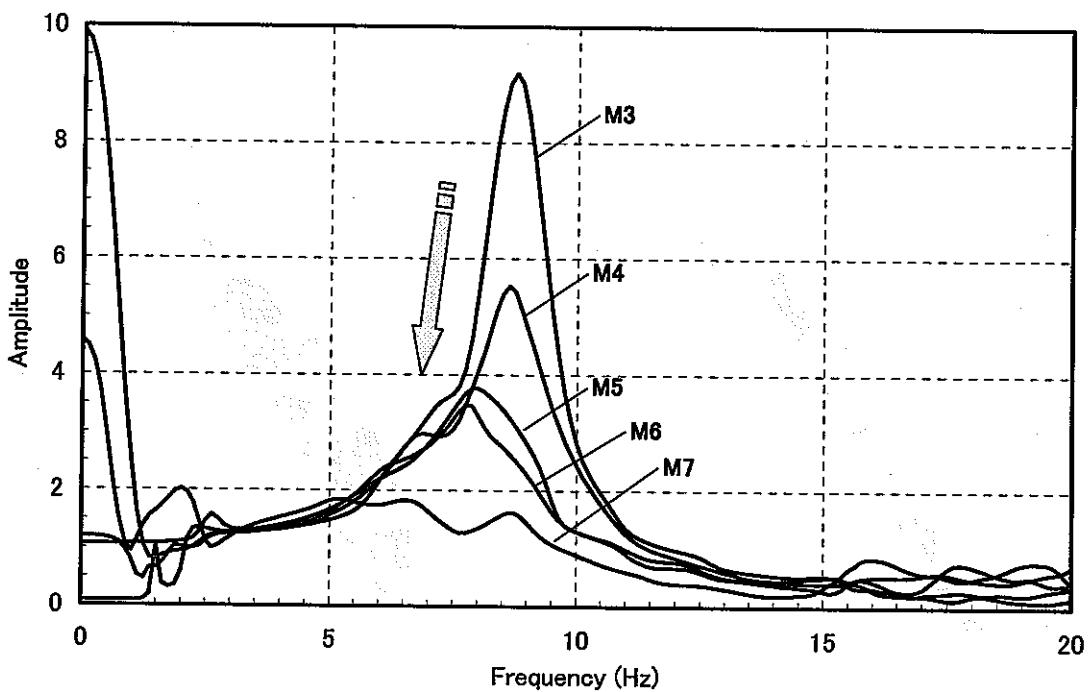


図 6.1.26 応答低減の様子（定常ランダム波漸増加振試験）

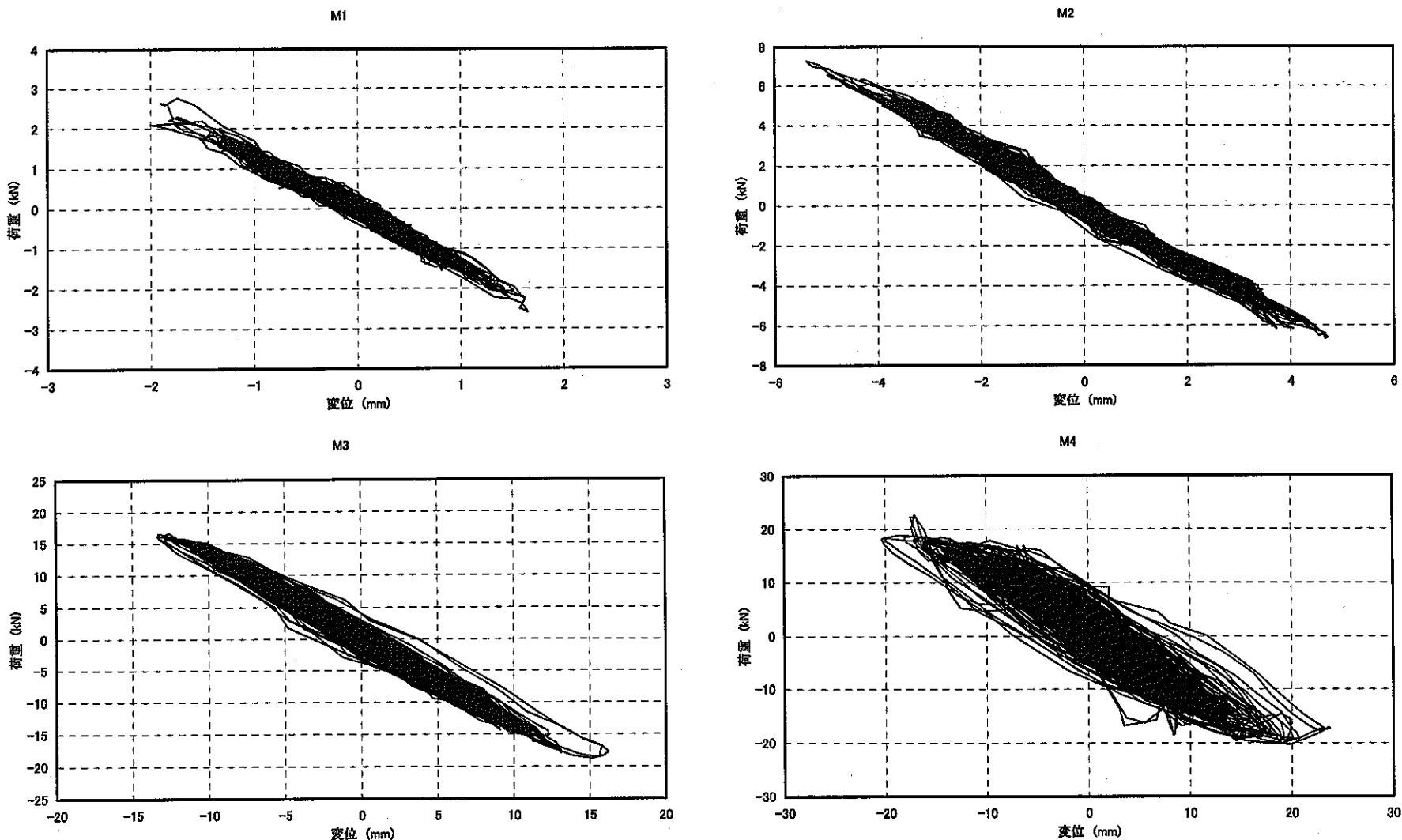


図 6.2.1 荷重一変位関係（定常ランダム波漸増加振試験、1/2）

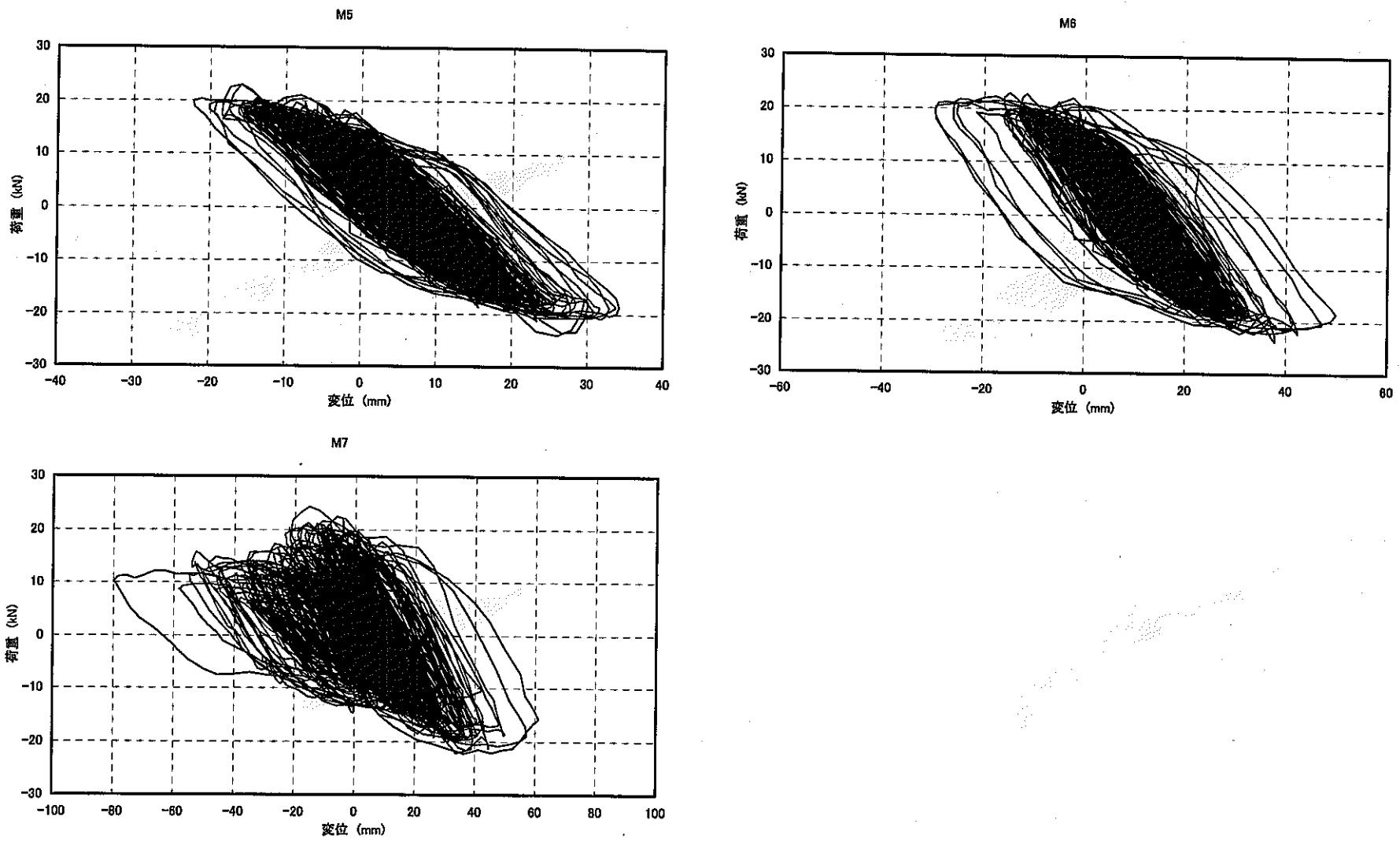


図 6.2.2 荷重-変位関係（定常ランダム波漸増加振試験、2/2）

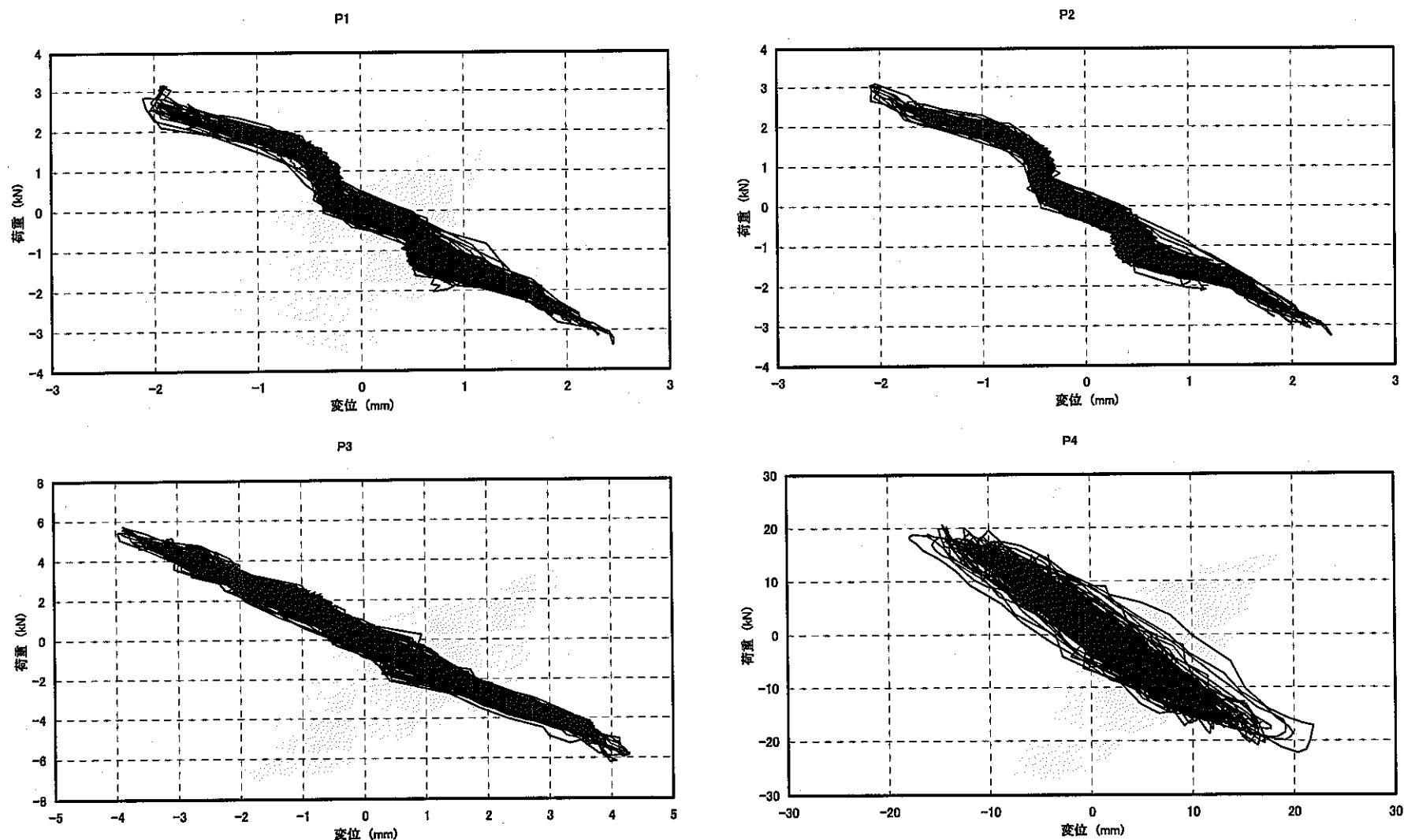


図 6.2.3 荷重一変位関係（地震波漸增加振試験、1/3）

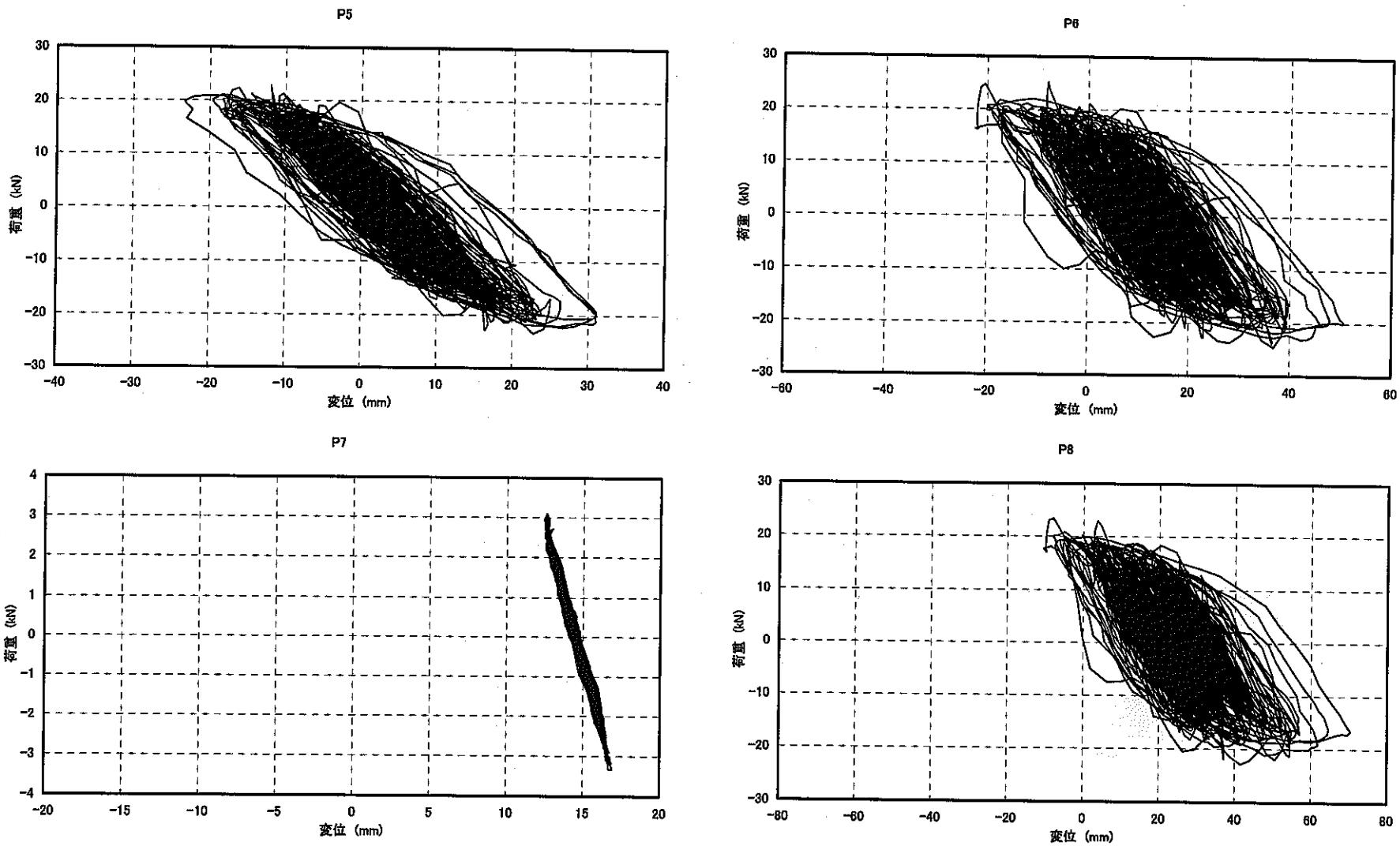


図 6.2.4 荷重-変位関係（地震波漸增加振試験、2/3）

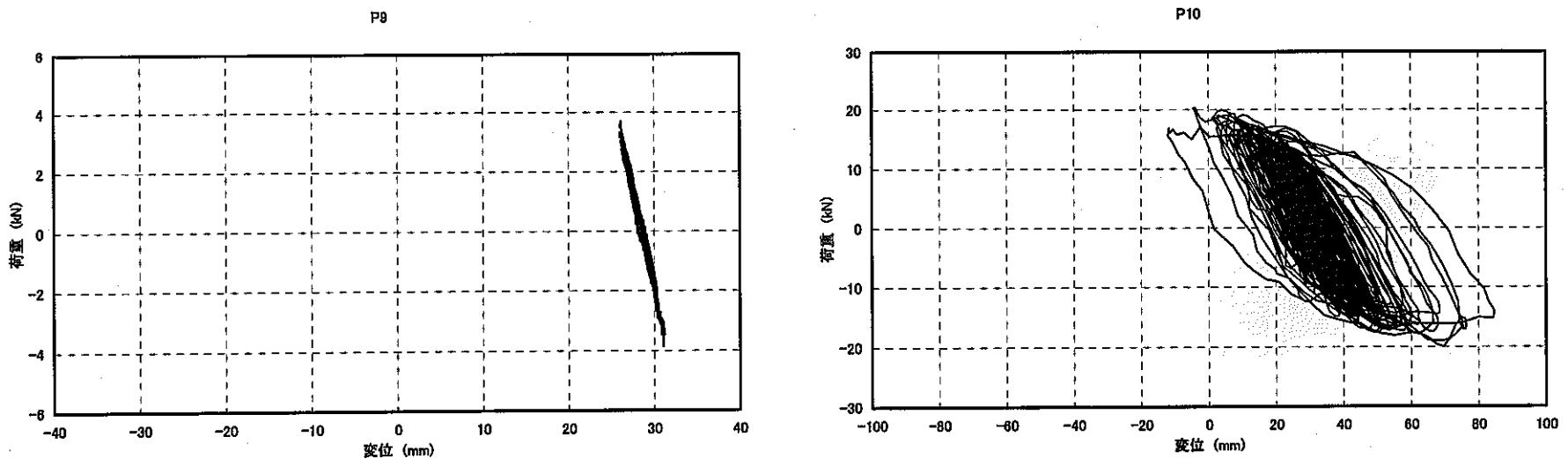


図 6.2.5 荷重-変位関係（地震波漸增加振試験、3/3）

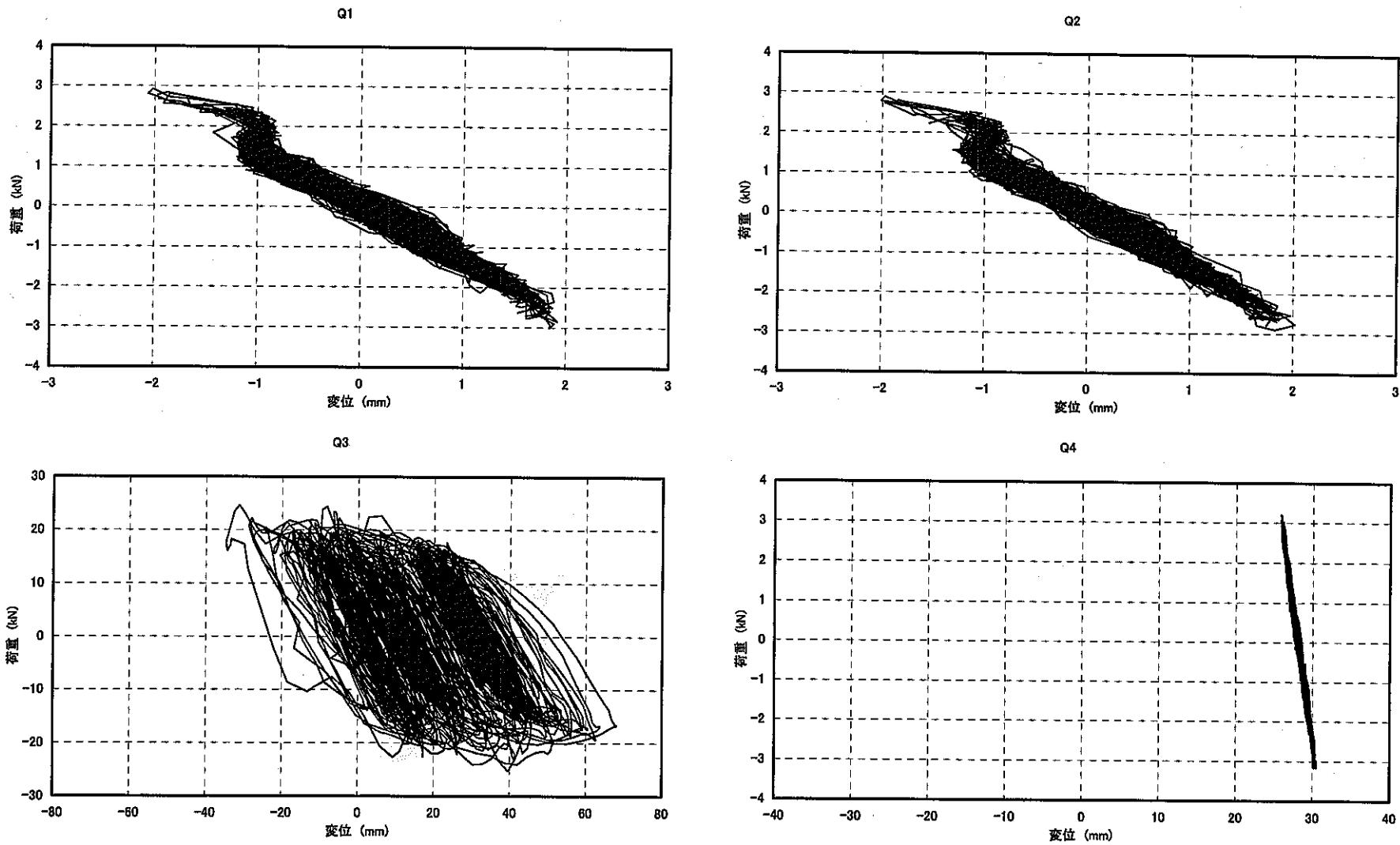


図 6.2.6 荷重一変位関係（地震波限界加振試験、1/2）

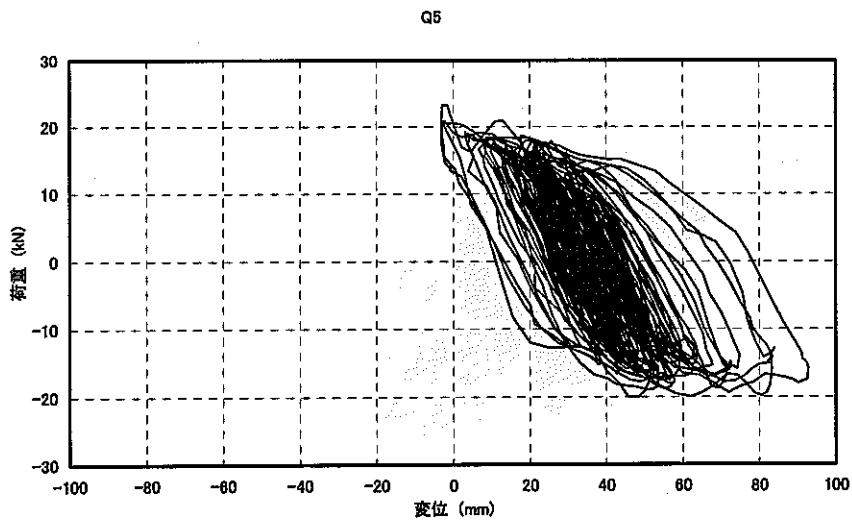


図 6.2.7 荷重一変位関係（地震波限界加振試験、2/2）

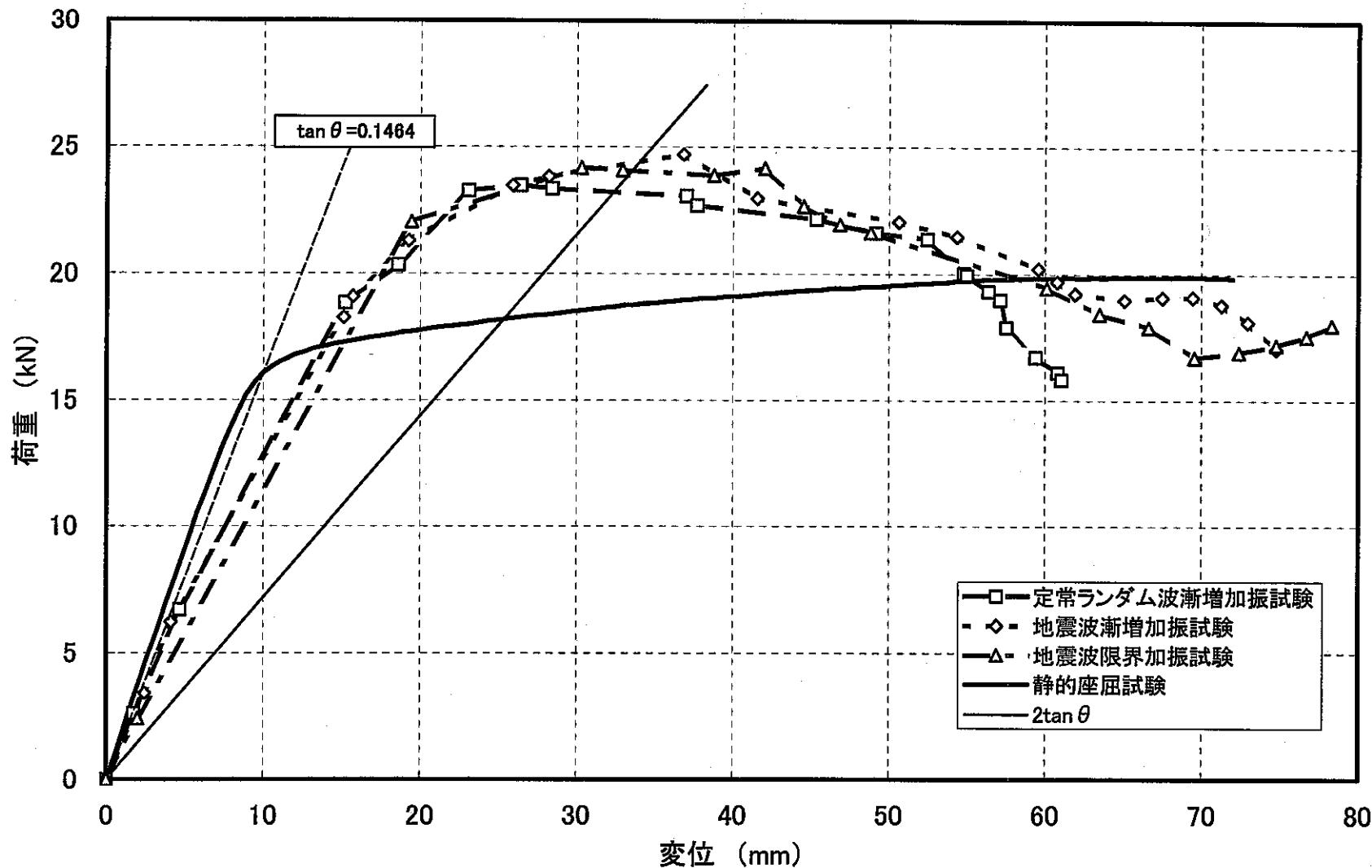


図 6.2.8 各試験における荷重一変位線図

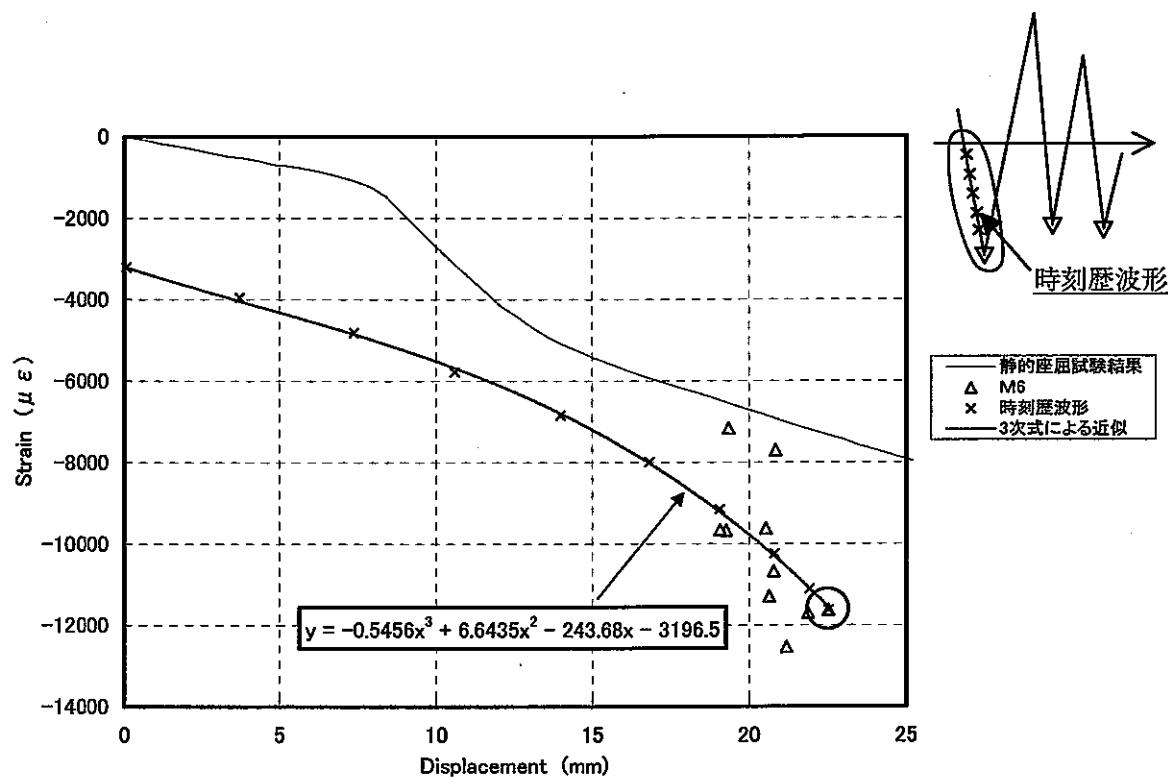


図 6.3.1 変位ーひずみ関係（定常ランダム波漸増加振試験）

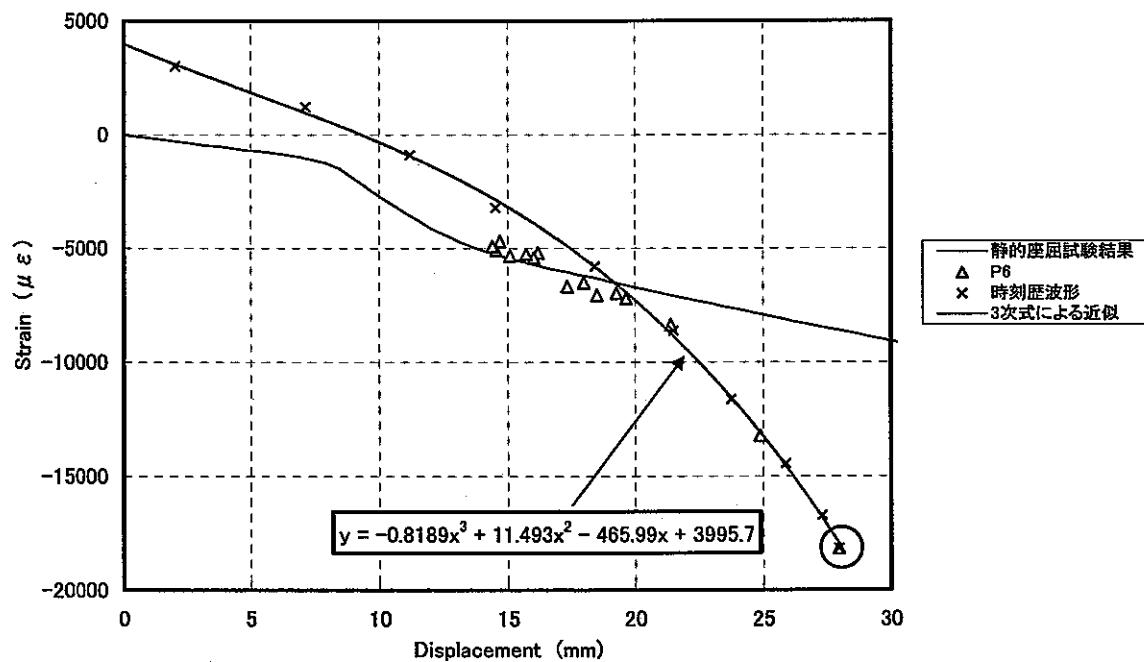


図 6.3.2 変位ーひずみ関係（地震波漸増加振試験）

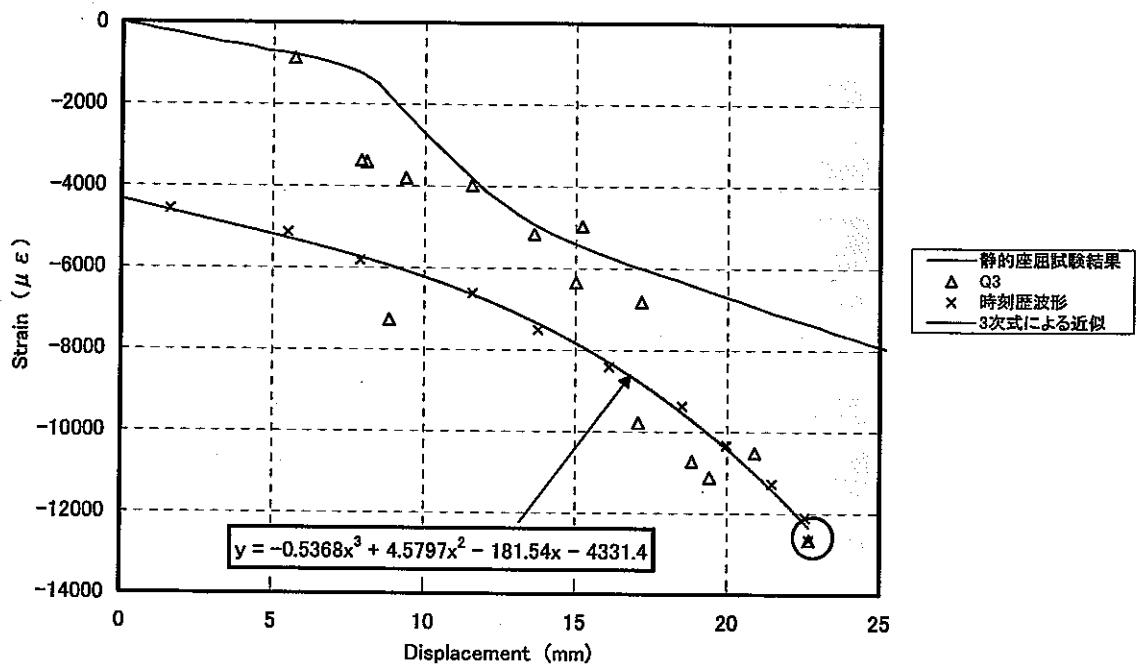


図 6.3.3 変位－ひずみ関係（地震波限界加振試験）

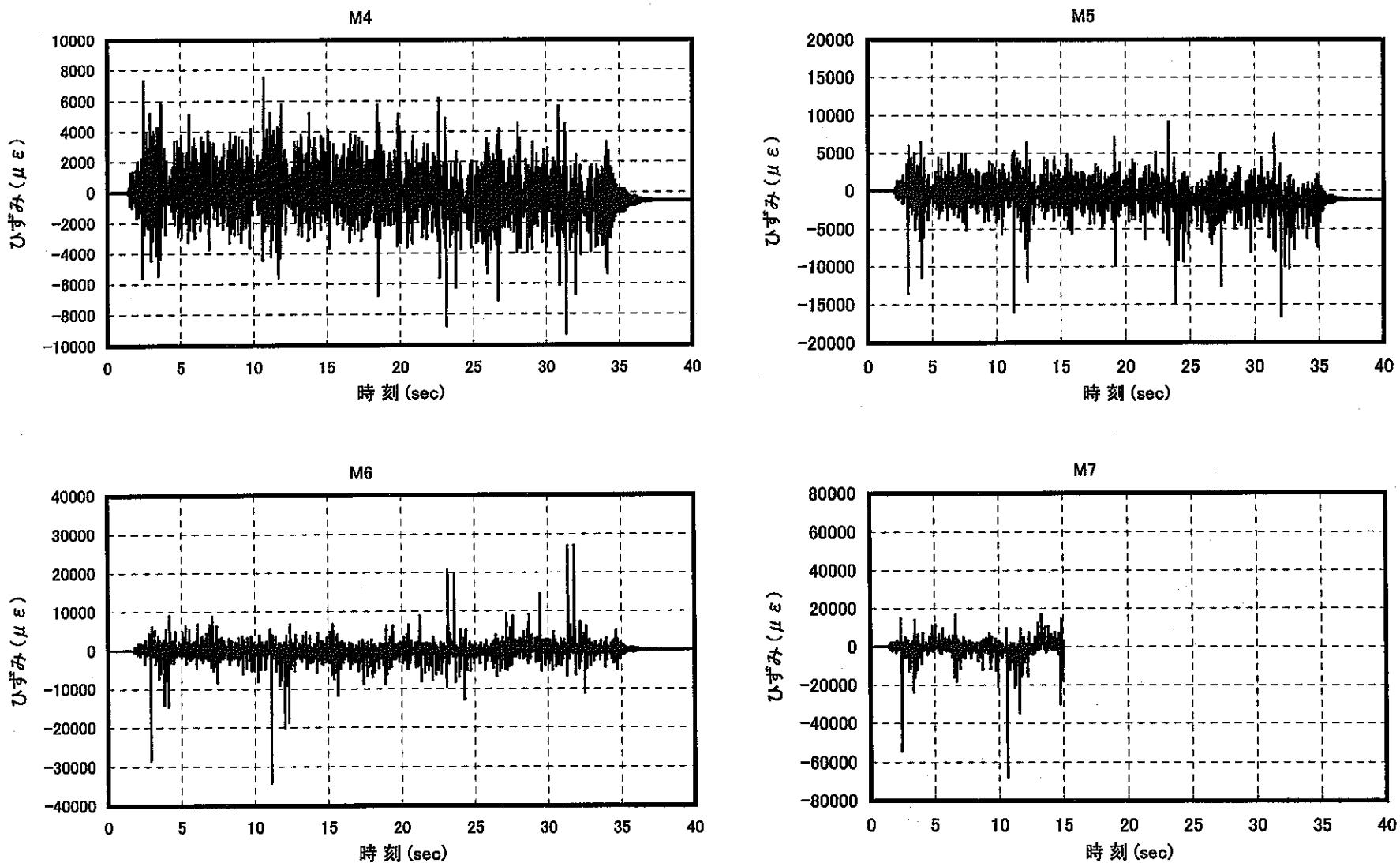


図 6.3.4 CASE1によるひずみ推定値の時刻歴（定常ランダム波漸増加振試験）

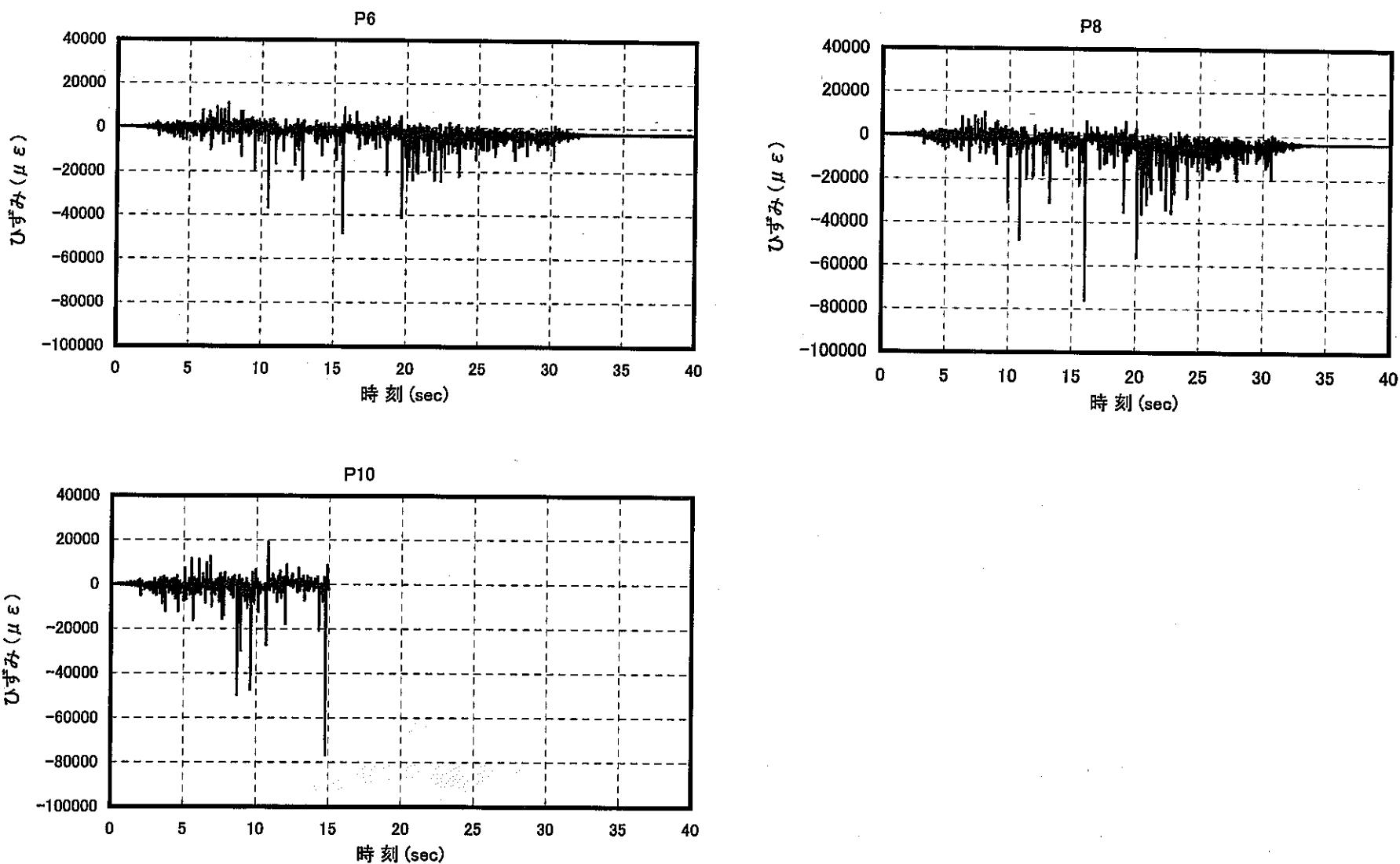


図 6.3.5 CASE1によるひずみ推定値の時刻歴（地震波漸増加振試験）

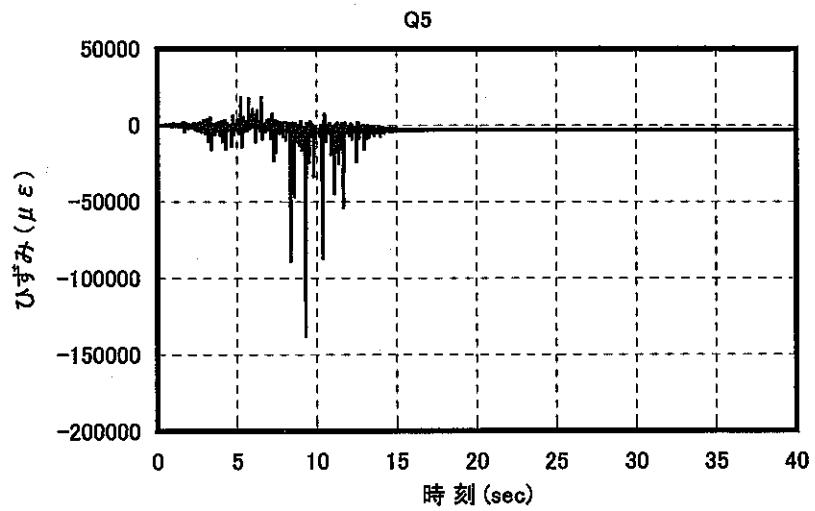
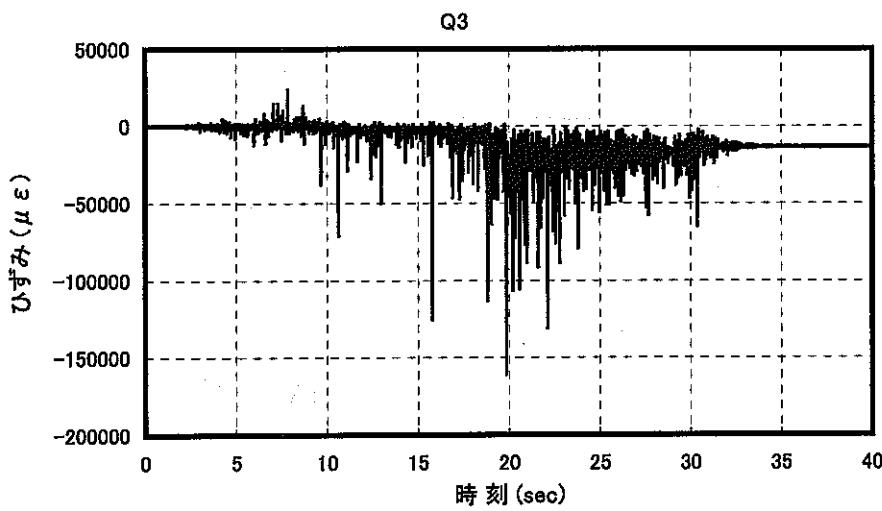


図 6.3.6 CASE1によるひずみ推定値の時刻歴（地震波限界加振試験）

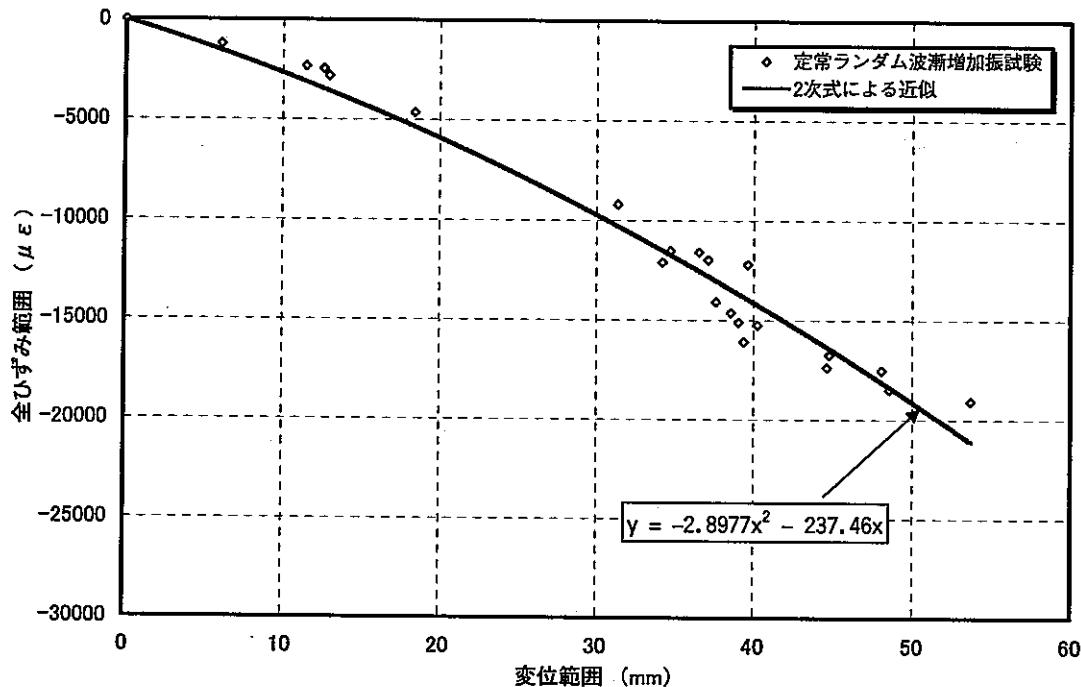


図 6.3.7 変位範囲ーひずみ範囲関係（定常ランダム波漸増加振試験）

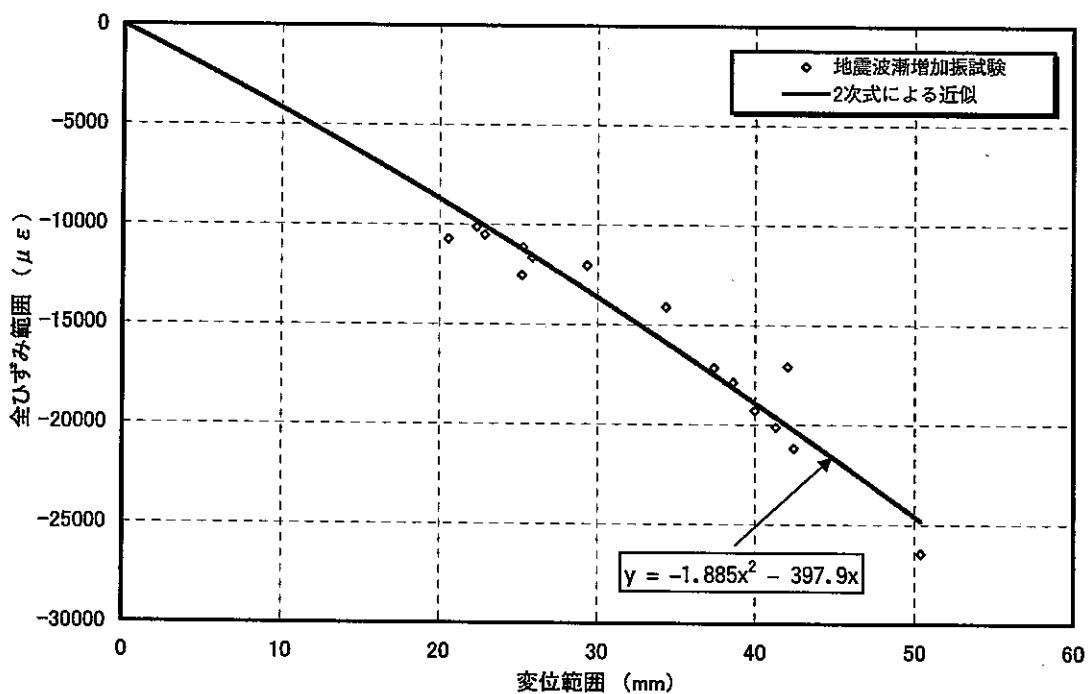


図 6.3.8 変位範囲ーひずみ範囲関係（地震波漸増加振試験）

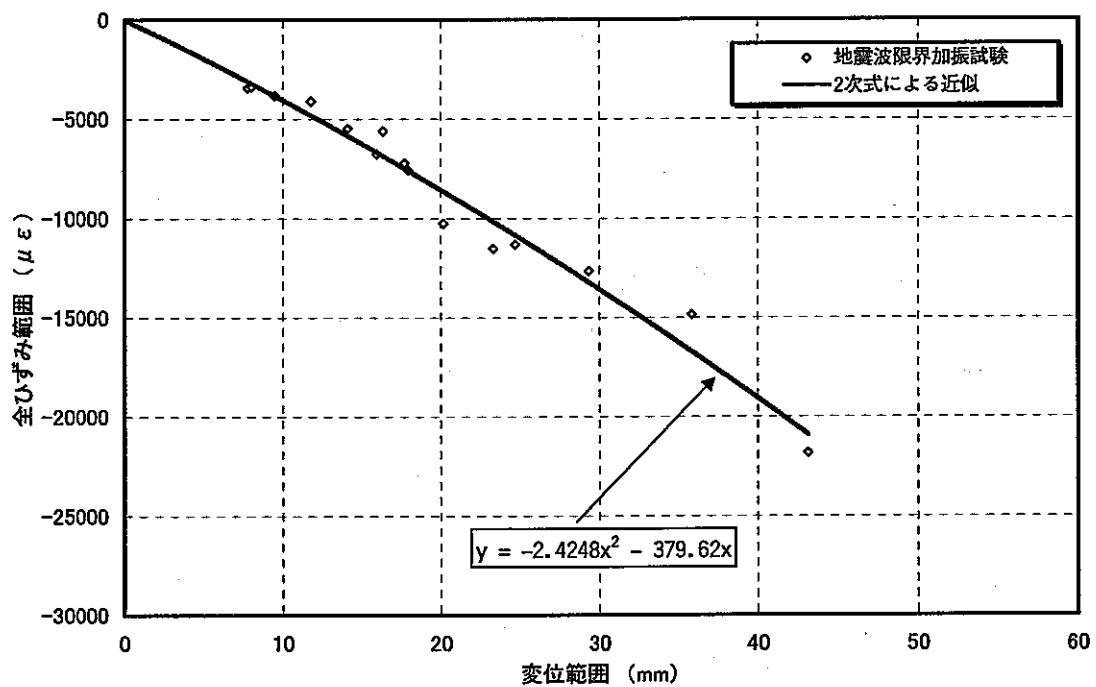


図 6.3.9 変位範囲－ひずみ範囲関係（地震波限界加振試験）

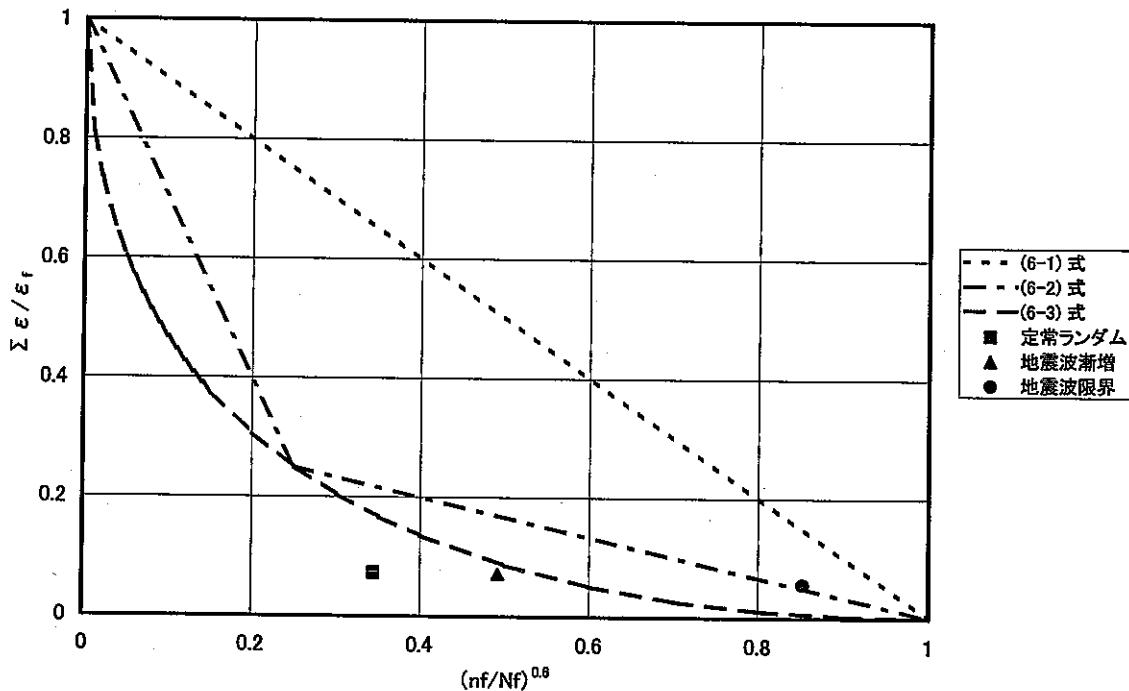


図 6.4.1 CASE1 の疲労損傷評価結果

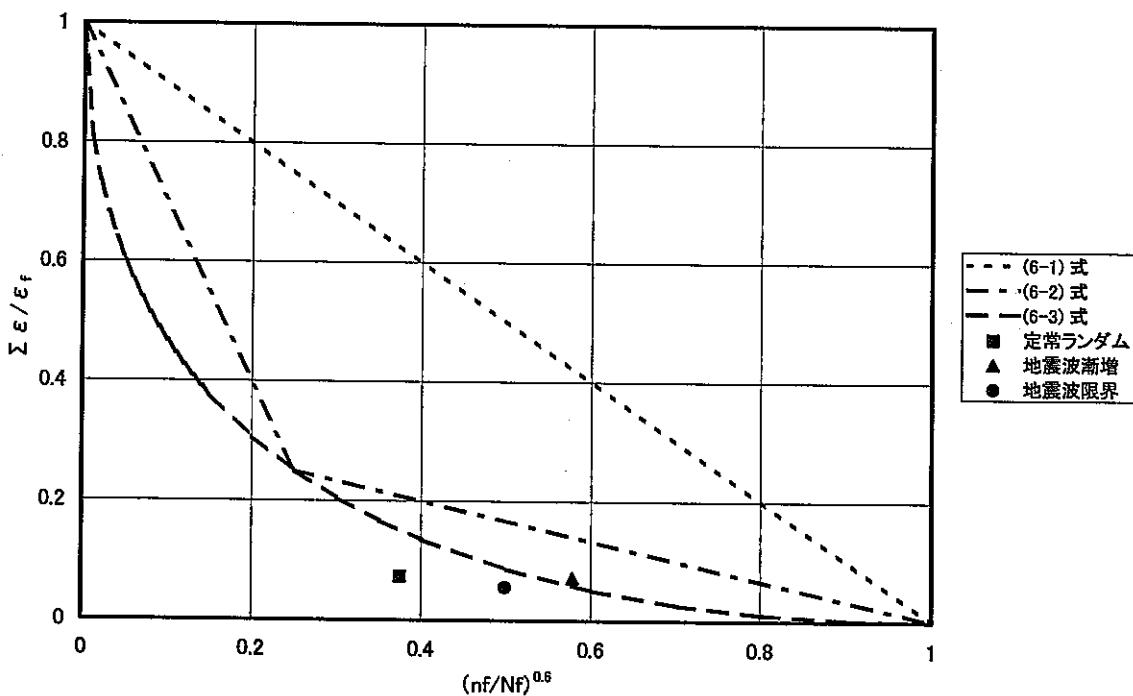


図 6.4.2 CASE2 の疲労損傷評価結果

## 7. まとめ

室温で、構造物耐震強度試験装置を用いて直管要素の試験体3体に対し、3種類の加振方法（定常ランダム波漸増加振、地震波漸増加振、地震波限界加振）による動的加振試験を実施した。試験結果を分析・評価することにより以下の事項を明らかにした。

- (1) 試験体の固有振動数は、弾性域では約9Hzであったのに対し、塑性変形が進行するにつれて低下し、破損時には約7Hzであった。減衰比は弾性域では約2%であったのに対し、塑性変形が進行するにつれて増大し、破損時には約30%であった。これは試験体の塑性エネルギー吸収による応答低減効果であるものと考えられる。
- (2) 加振の繰返しによって、試験体の固定端付近で徐々に外側に膨らむ進行性変形（バルジ変形）が見られた。最大荷重発生後もこの変形は進行したが、試験体の荷重変位特性に急激な載荷能力の低下等は見られなかつた。
- (3) 応答加速度から算出した動的限界強度は静的座屈荷重を下回ることはなかった。つまり、最大荷重発生前に著しい動的負荷履歴を受けていたにもかかわらず、動的限界荷重は静的座屈荷重と同等以上であり、動的負荷による限界強度の減少等の影響は認められなかつた。
- (4) 最終的に、進行性変形部でき裂が貫通して破損に至った。試験終了後に破損部の光学顕微鏡観察を行った結果、微小き裂が配管内面にのみ観察されたため、き裂は配管内面より発生・進展して貫通に至ったものと考えることができる。
- (5) 破面のSEM観察の結果、断定できないがストラエーション状の模様が観察されたことから、破損は繰返し負荷に伴う疲労き裂の発生及び進展・貫通によるものと考えることができる。
- (6) 破損部付近のひずみ履歴より低サイクル疲労損傷を評価した結果、繰返し負荷による疲労損傷と、進行性変形（ラチェット）に伴う累積非弾性ひずみによる延性消耗との相互作用として試験結果を整理できる可能性があることがわかつた。

薄肉の直管要素に対してはラチェット疲労が主要な破損モードであり、進行性変形に伴う延性消耗の影響が寄与しているものと考えられる。今後、直管要素の解析的検討を行い、振動特性、弾塑性挙動、破損モード、動的終局強度等を解明していく予定である。

## 参考文献

- 1) 森下正樹他, 大型炉設計研究成果報告書 -60万KWe級プラントの設計研究-, PNC TN9410 92-137, (1992).
- 2) 森下正樹他, 埋込みを考慮した60万KWe級大型炉の床応答評価, PNC TN9410 95-021, (1995).
- 3) 川村壮一著, 新しい耐震設計講座 耐震設計の基礎, オーム社, (1984).
- 4) 谷口修編, 振動工学ハンドブック, 養賢堂, (1985).
- 5) Coffin, L. F., "The Deformation and Fracture of Ductile Metals under Superposed Cycle and Monotonic Strain", ASTM STPG467, pp.53-76, (1970).
- 6) Asada, Y., "Fatigue Criterion on Low-Cycle Fatigue with Excessive Progressive Deformation", Proceeding of 3<sup>rd</sup> German-Japanese Joint Seminar, II 2.2, pp3-11, (1985).

## 付録

本試験報告書は、配管系を構成する基本要素のひとつである直管要素について加振試験を行い、試験データを分析・評価したものである。本試験に参考となる固有値解析結果及び計測装置の仕様を付録として以下に示す。

### ○ 試験体の固有値解析

多段積層ゴムが試験体の振動特性に及ぼす影響を調べるために、(a) 多段積層ゴム+錘、(b) 多段積層ゴム+錘+試験体の 2 ケースについて固有値解析を実施した。解析コードには FINAS.ver13 を使用し、各要素をばね一質点系でモデル化している。固有値解析の解析モデルを付録図 1.1 に示す。

付録表 1.1 に各ケースにおける固有値解析結果を示す。ケース (a) における 1 次モードの固有振動数は約 0.8Hz であり、試験体の固有振動数（約 9Hz）とは十分離れているのに対して、2 次モードは約 8.2Hz と比較的近い値となっている。ケース (b) における 1 次及び 2 次モードの固有振動数がそれぞれ約 7.8Hz 及び約 9.0Hz であることから、試験体は多段積層ゴム+錘の 2 次モードに近い振動挙動を示すことがわかる。付録図 1.2 にケース (a) 及び (b) の固有ベクトルを示す。ケース (b) の 1 次及び 2 次モードは、ケース (a) の 2 次モード、すなわち多段積層ゴム中央部付近が振動する挙動を示している。

この解析結果を試験結果と比較すると、M1 加振等の弾性範囲における加振試験で見られたような伝達関数に 2 山のピークを持つ周波数分布と、付録図 1.2 のようなケース (b) の 1 次及び 2 次モードがよく一致していることがわかる。また、1 次と 2 次モードの刺激係数もほぼ等しいことから、加振試験で見られた振動挙動がこの結果より説明することができる。

### ○ 計測装置の仕様

本試験に用いた計測装置の型式・仕様を以下の通り示す。

加速度計の型式・仕様	;	付録表 2.1
レーザー変位計の型式・仕様	;	付録表 2.2.1～2.2.3
ひずみゲージの型式・仕様	;	付録表 2.3.1～2.3.3
配管形状計測装置の型式・仕様	;	付録表 2.4
超音波板厚計の型式・仕様	;	付録表 2.5

付録表 1.1 各ケースにおける固有値解析結果

(a) 多段積層ゴム+錘

MODE	FREQUENCY	刺激係数
1	7.98E-01	2.31E-01
2	8.17E+00	-3.06E-02
3	1.59E+01	1.49E-02

(b) 多段積層ゴム+錘+試験体

MODE	FREQUENCY	刺激係数
1	7.75E+00	1.69E-01
2	8.97E+00	-1.60E-01
3	1.59E+01	2.10E-02

付録表 2.1 加速度計の型式・仕様

型 式	AS-10B
測定範囲	±10 G
定格出力	0.5 mV/V ±25 %
非直線性	±1 % RO
ヒステリシス	±1 % RO
入出力抵抗	120 Ω ±5 %
推奨印加電圧	3 V
許容印加電圧	6 V
応答周波数範囲	0 ~ 300 Hz (感度偏差±5 %)
固有振動数	約 490 Hz
横感度	±2 %
許容温度範囲	-10 ~ +60 °C
ダンピング比	約 0.64 (23 °C)
許容過負荷	300 %
重量	約 13 g

型 式	AS-20HB
測定範囲	±20 G
定格出力	0.5 mV/V ±20 %
非直線性	±1 % RO
ヒステリシス	±1 % RO
入力抵抗	120 Ω ±8.3 %
出力抵抗	140 Ω ±7.1 %
推奨印加電圧	3 V
許容印加電圧	6 V
応答周波数範囲	0 ~ 650 Hz (感度偏差±5 %)
固有振動数	約 1.3 KHz
横感度	±2 %
許容温度範囲	-15 ~ +65 °C
ダンピング比	約 0.64 (23 °C)
許容過負荷	300 %
重量	約 13 g

付録表 2.2.1 レーザー変位計の型式・仕様 (1/3)

型 式		センサーへッド LK-080 アンプユニット LK-2100
基 準 距 離		80 mm
測 定 範 囲		±15 mm
光 源		赤外半導体レーザ
波 長		670 nm (可視光) クラス2
出 力		最大0.95 mW
ス ポ ッ ツ 径		約Φ70 μm(基準距離にて)
直 線 性		±0.1 % of F.S.
分 解 能		3 μm
ア ナ ロ グ 出 力 電 壓 出 力		±5 V (3 μm/mV)
出 力 イン ピ ー ダ ン ス		100 Ω
電 流 出 力		4 ~ 20 mA (MAX350 Ω)
ア ラ ー ム 出 力		NPNオープンコレクタ(N.C.) 最大100 mA(40 V以下) 残留電圧1V以下
サンプリング周期		1024 μS
副 機 能		オートゼロ／アラーム時アナログ出力ホールド機能 ゲイン切換機能／レスポンス切換機能 スパン・シフト調整機能
定 格	電 源 電 壓	DC24 V±10 % リップル10 % (P-P)以下
	消 費 電 力	400 mA以下
温 度 ド リ フ ツ	センサーへッド	0.01 % of F.S. / °C
	アンプユニット	0.01 % of F.S. / °C
耐 環 境 性	保 護 構 造	IP-67
	使 用 周 围 照 度	白熱ランプ・蛍光灯 10000 lx以下
	使 用 周 围 温 度	センサーへッド 0 ~ 50 °C アンプユニット 0 ~ 50 °C
	使 用 周 围 湿 度	35 ~ 85 %RH (結露なきこと)
	耐 振 動	10 ~ 55 Hz 複振動 1.5 mm XYZ各方向 2時間
材 質	センサーへッド	アルミダイカスト
	アンプユニット	ポリカーボネイト
重 量	センサーへッド	約260 g
	アンプユニット	約515 g

付録表 2.2.2 レーザー変位計の型式・仕様 (2/3)

型 式		センサーへッド LB-300 アンプユニット LB-1200
基 準 距 離		300 mm
測 定 範 囲		±100 mm
光 源		赤外半導体レーザ
波 長		780 nm (不可視) クラス3B
出 力		最大20 mW (平均10 mW)
ス ポ ッ ツ 径		1.2 × 2.5 mm (基準距離にて)
直 線 性		0.4 % of F.S.
分 解 能		50 μm (LO時)
ア ナ ロ グ 出 力	電 壓 出 力	±5 V (20 mm/V)
	出 力 イン ピ ーダ ン ス	100 Ω
	電 流 出 力	4 ~ 20 mA (MAX350 Ω)
ア ラ ー ム 出 力		NPNオープンコレクタ 最大100 mA(40 V以下) N.C. 残留電圧1V以下
応 答 性		915Hz(HIGH時) / 36Hz(MID時) / 9Hz(LO時) 各-3 dBにて
定 格	電 源 電 壓	AC100 ~ 240 V±10 % 50/60 Hz
	消 費 電 力	約15 VA
温 度 ド リ フ ツ	センサーへッド	0.02 % of F.S. / °C
	アンプユニット	0.02 % of F.S. / °C
耐 環 境 性	使 用 周 围 照 度	白熱ランプ・蛍光灯 4000 lx以下
	使 用 周 围 温 度	センサーへッド 0 ~ 50 °C アンプユニット 0 ~ 45 °C
	使 用 周 围 湿 度	35 ~ 85 %RH (結露なきこと)
	耐 振 動	10 ~ 55 Hz 複振動 1.5 mm XYZ各方向 2時間
材 質	センサーへッド	アルミダイカスト
	アンプユニット	ポリカーボネイト
重 量	センサーへッド	約250 g
	アンプユニット	約530 g

付録表 2.2.3 レーザー変位計の型式・仕様 (3/3)

型 式		センサーへッド LK-500 アンプユニット LK-2500
測定モード		ロングモード
基 準 距 離		500 mm
測 定 範 囲		±250 mm
光 源		赤外半導体レーザ
波 長		690 nm (可視光) クラス3B
出 力		最大15 mW
ス ポ ッ ツ 径		約Φ0.3 mm(基準距離にて)
直 線 性		±0.1 % of F.S.
分 解 能		50 $\mu$ m
アナログ出力	電圧出力	±5 V (50 $\mu$ m/mV)
	出力インピーダンス	100 $\Omega$
	電流出力	4 ~ 20 mA (MAX350 $\Omega$ )
ア ラ ー ム 出 力		NPNオープンコレクタ(N.C.) 最大100 mA(40 V以下) 残留電圧1V以下
サンプリング周期		1024 $\mu$ S
副 機 能		オートゼロ／アラーム時アナログ出力ホールド機能 ゲイン切換機能／レスポンス切換機能 スパン・シフト調整機能
定 格	電源電圧	DC24 V±10 % リップル10 % (P-P)以下
	消費電力	400 mA以下
温度ドリフト	センサーへッド	0.02 % of F.S. /°C
	アンプユニット	0.01 % of F.S. /°C
耐環境性	保護構造	IP-67
	使用周囲照度	白熱ランプ・蛍光灯 10000 lx以下
	使用周囲温度	センサーへッド 0 ~ 50 °C アンプユニット 0 ~ 50 °C
	使用周囲湿度	35 ~ 85 %RH (結露なきこと)
	耐振動	10 ~ 55 Hz 複振動 1.5 mm XYZ各方向 2時間
材 質	センサーへッド	アルミダイカスト
	アンプユニット	ポリカーボネイト
重 量	センサーへッド	約700 g
	アンプユニット	約515 g

付録表 2.3.1 ひずみゲージの型式・仕様 (1/3)

型 式		YFLA-2-4F-05LT
ベース	材料	特殊プラスチック
	抵抗素子	Cu-Ni箔
	長さ	7.5mm
	幅	4mm
ゲージ	長さ	2mm
	幅	1.8mm
	リード線	素線直径0.2mm 素線数1本 テフロン被覆線3線0.5m付
ゲージ抵抗値		120Ω
ゲージ率		約2.1
測定範囲		約±10～±15 % (約±100000～約±150000 × 10 <sup>6</sup> )
使用温度範囲		-20～+70°C
横感度係数		0.6%
接着剤		シアノアクリレート接着剤(M)
リード線		素線直径0.12mm 素線数10本 ビニール被覆線3線5m
ひずみゲージ端子		T-P6

型 式		YFLA-2-5LT
ベース	材料	特殊プラスチック
	抵抗素子	Cu-Ni箔
	長さ	7.5mm
	幅	4mm
ゲージ	長さ	2mm
	幅	1.8mm
	リード線	素線直径0.12mm 素線数10本 ビニール被覆線3線5m付
ゲージ抵抗値		120Ω
ゲージ率		約2.1
測定範囲		約±10～±15 % (約±100000～約±150000 × 10 <sup>6</sup> )
使用温度範囲		-20～+70°C
横感度係数		0.6%
接着剤		シアノアクリレート接着剤(M)

付録表 2.3.2 ひずみゲージの型式・仕様 (2/3)

型 式		KFEL-2-120-C1
ベース	材料	ポリイミド
	抵抗素子	Cu-Ni系合金箔
	長さ	8mm
	幅	4mm
ゲージ	長さ	2mm
	幅	2.1mm
	リード線	テフロン被覆線3線0.5m付
ゲージ抵抗値		120Ω
ゲージ率		約2.1
測定範囲		約±10～±15 % (約±100000～約±150000 × 10 <sup>6</sup> )
使用温度範囲		-10～+80°C
横感度係数		—
接着剤		CC-33A(使用温度範囲-10～+80°C)
リード線		ビニール被覆線3線5m
ひずみゲージ端子		T-P6

型 式		KFEL-2-120-C1L10M3R
ベース	材料	ポリイミド
	抵抗素子	Cu-Ni系合金箔
	長さ	8mm
	幅	4mm
ゲージ	長さ	2mm
	幅	2.1mm
	リード線	ビニール被覆線3線10m付
ゲージ抵抗値		120Ω
ゲージ率		約2.1
測定範囲		約±10～±15 % (約±100000～約±150000 × 10 <sup>6</sup> )
使用温度範囲		-10～+80°C
横感度係数		—
接着剤		CC-33A(使用温度範囲-10～+80°C)

付録表 2.3.3 ひずみゲージの型式・仕様 (3/3)

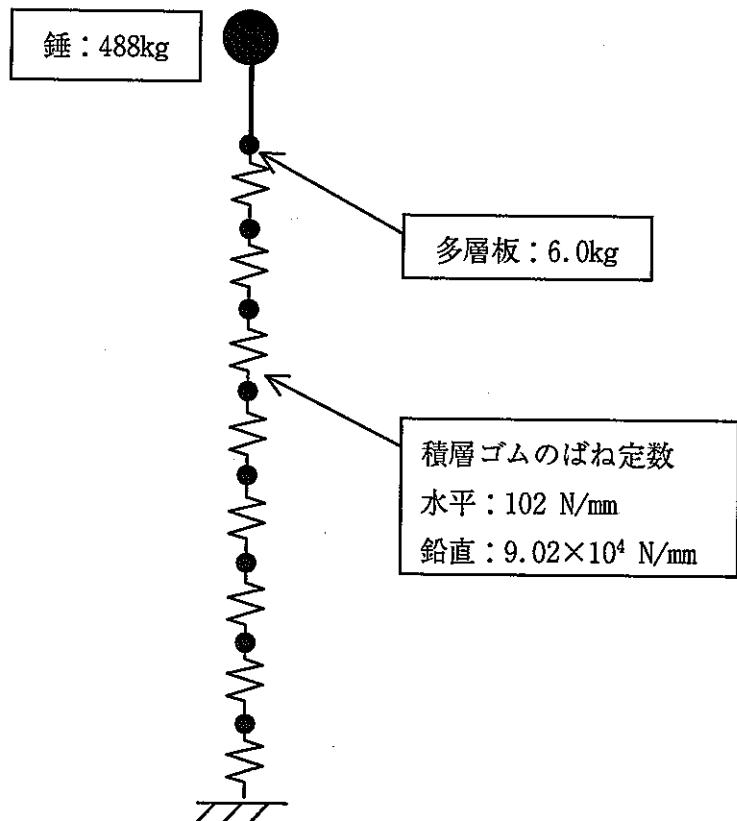
型 式		KFG-1N-120-C1-16L5M3R
ベース	材料	ポリイミド
	抵抗素子	Cu-Ni系合金箔
長さ		4.2mm
幅		1.5mm
ゲージ	長さ	1mm
	幅	0.65mm
	リード線	ビニール被覆線3線5m付
ゲージ抵抗値		120Ω
ゲージ率		約2.1
測定範囲		約±5 % (約±50000 × 10 <sup>6</sup> )
使用温度範囲		-196～+150°C
横感度係数		2.3%
接着剤		CC-33A(使用温度範囲-196～+120°C)

付録表 2.4 配管形状計測装置の型式・仕様

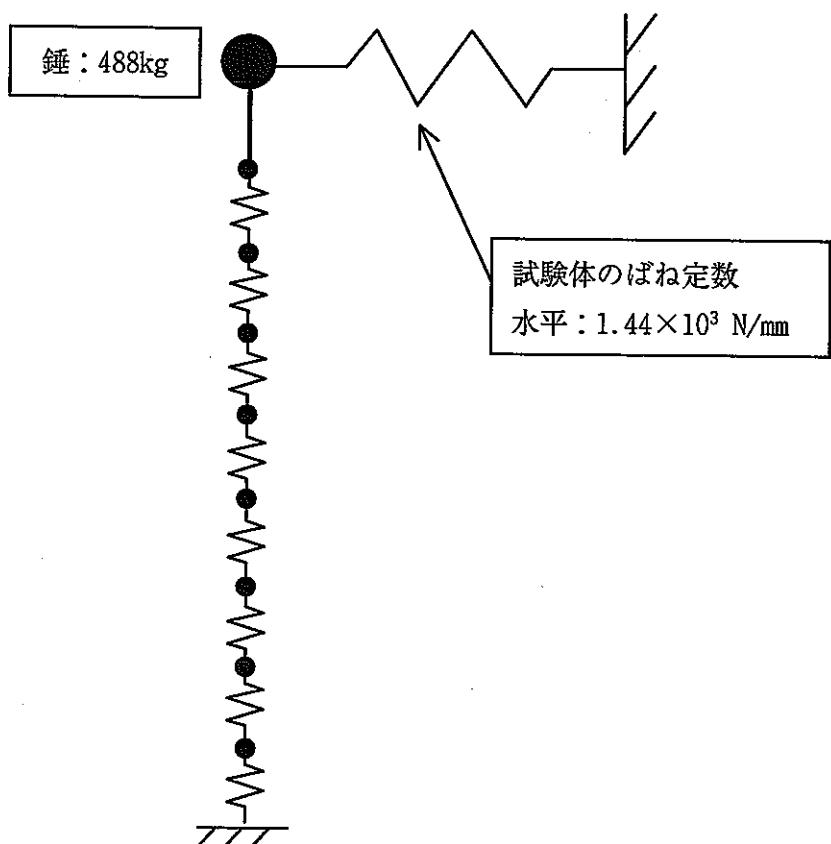
品名	型式・仕様
2分割リングトラック治具 [取付けブラケット含む]	
外径	Φ 500 mm
内径	Φ 450 mm
試験体間距離	80 mm (計測センサー測定基準距離)
X軸リニアガイド治具 [パルスモータ含む]	
全長	700 mm
有効ストローク	350 mm
テーブル寸法	180 mm × 200 mm
Z軸リニアステージ治具 [パルスモータ含む]	
全長	200 mm
有効ストローク	100 mm
計測基準距離	80 mm ± 15 mm (計測センサー仕様)
θ 軸キャリッジ治具 [パルスモータ含む]	
駆動方式	ウォーム・ピニオンギア方式
トレース方式	ジャーナルアセンブリー方式(対リングトラック)
回転角度	360° (リングトラック全周)
架台フレーム	L 700 × W 600 × H 853 (mm)
パルスモータ制御装置	
X軸移動量	5 mm / 500パルス
Z軸移動量	1 mm / 500パルス
θ 軸移動量	2.5 mm / 500パルス
スキャン速度(mm/sec)	10, 20, 50, 75.08, 100, 154.32, 200 (7種類)
計測センサー(レーザ変位計)	
センサーヘッド	LK-080 (キーエンス製)
アンプユニット	LK-2100 (キーエンス製)
基準距離	80 mm
測定範囲	± 15 mm
光源	赤外半導体レーザ (670 nm / 可視光 / レベル2)
スポット径	約Φ70 μm (基準距離にて)
分解能	3 μm
サンプリング周期	1024 μS
スキャン速度(mm/sec)	10, 20, 50, 75.08, 100, 154.32, 200 (7種類)
モータドライバ	M850D
モータコントローラ	M850C
パソコン用コンピュータ	PC-LPV466D2 (DEC製)

付録表 2.5 超音波板厚計の型式・仕様

品名	型式・仕様
2分割リングトラック治具 [取付けブラケット含む]	
外径	φ 500 mm
内径	φ 450 mm
試験体間距離	80 mm (計測センサー測定基準距離)
X軸リニアガイド治具 [パルスモータ含む]	
全長	700 mm
有効ストローク	350 mm
テーブル寸法	180 mm × 200 mm
Z軸リニアステージ治具 [パルスモータ含む]	
全長	200 mm
有効ストローク	100 mm
θ軸キャリッジ治具 [パルスモータ含む]	
駆動方式	ウォーム・ピニオンギア方式
トレース方式	ジャーナルアセンブリ方式(対リングトラック)
回転角度	360° (リングトラック全周)
架台フレーム	L 700 × W 600 × H 853 (mm)
パルスモータ制御装置	
X軸移動量	5 mm / 500パルス
Z軸移動量	1 mm / 500パルス
θ軸移動量	2.5 mm / 500パルス
スキャン速度(mm/sec)	10, 20, 50, 75.08, 100, 154.32, 200 (7種類)
計測センサー (超音波探触子)	GP-1504 (HARISONIC製)
周波数	15MHz
探触子径	φ 6.4mm
帯域幅	広帯域(高分解能)
ケーブル長さ	2.5m (GR-1504用)
探触子用ウェッジ	特殊ウェッジ(栄進化学製)
接触媒質	ソニコート BS-18
探触子保持治具	超音波探触子ホルダー(栄進化学製)
計測器 (超音波板厚計)	SONIC-434 (HARISONIC製)
モータドライバ	M850D
モータコントローラ	M850C
パソコンコンピュータ	PC-LPV466D2 (DEC製)

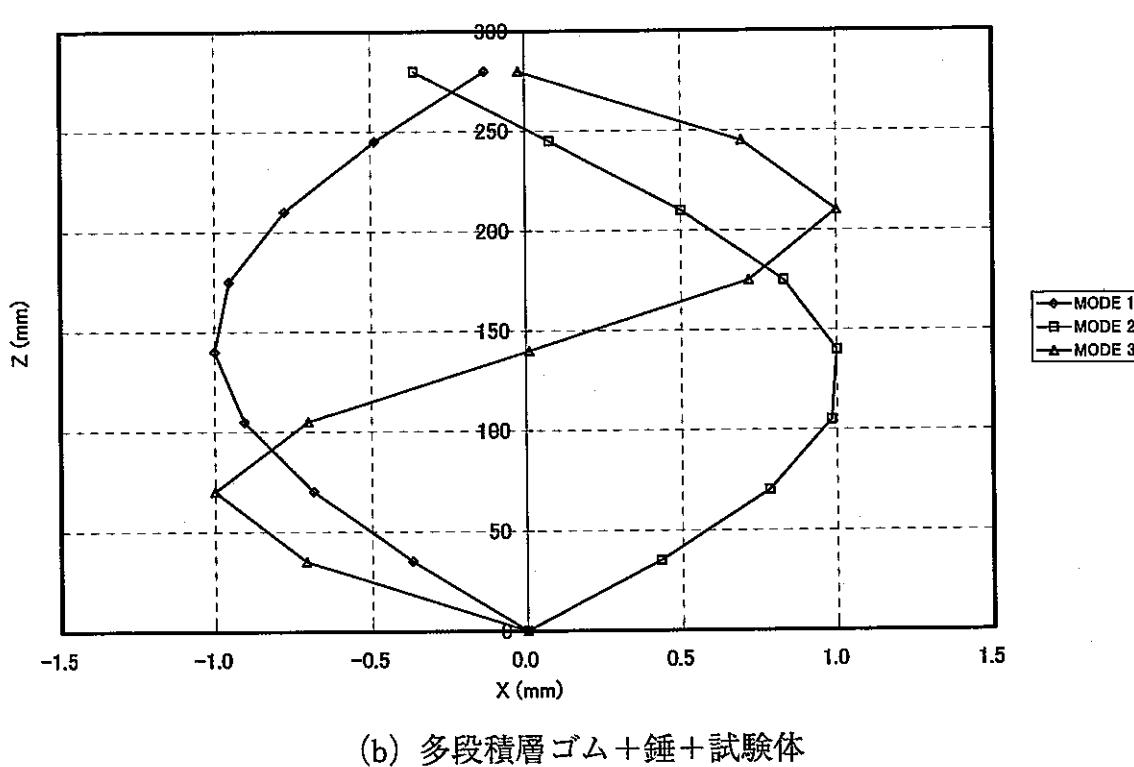
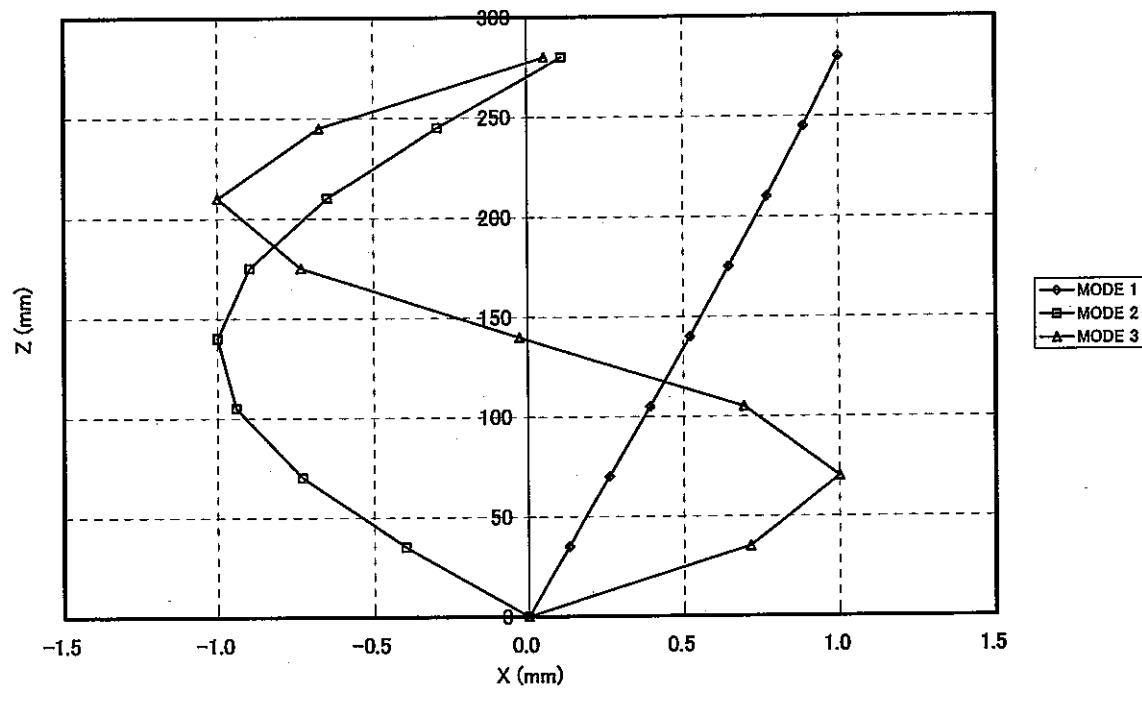


(a) 多段積層ゴム+錘



(b) 多段積層ゴム+錘+試験体

付録図 1.1 固有値解析の解析モデル



付録図 1.2 各ケースにおける固有ベクトル