

片持ちはりの衝突振動に関する基礎的検討  
(研究報告書)

1999年5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。

〒319-1194 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-ken, 319-1194,

Japan

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

1999

## 片持ちはりの衝突振動に関する基礎的検討 (研究報告書)

大岡 誠\*, 堀切 守人\*\*, 森下 正樹\*\*\*

### 要 旨

はり状の構造物が振動する際に、何らかの理由によって他の構造物と衝突する場合を考え、振動による破損防止の観点から、はりの振動特性が衝突によってどのような影響を受けるかについて実験及び解析によって検討した。

一連の振動試験の結果、以下が明らかになった。

- 1) 衝突により、はりの振動特性は卓越振動数の加振レベル依存性や跳躍現象などの典型的な非線型挙動を示す。
- 2) 共振応答(卓越振動数による定常加振に対する応答)は単純な片持ちはりの場合や衝突部をピン支持条件とした場合が大きく、衝突によって応答は低下する。
- 3) 衝突によって振動モードが変化するので、軸方向のひずみ分布も変る。ただし、衝突によって応答が低下するので、同一入力に対する発生ひずみは片持ちはりで衝突のない場合が最大になる。

はり要素とギャップ要素を用いた非線型応答解析によって、振動試験結果を精度よく再現することが可能である。

---

\* 大洗工学センター 管理部 地域交流課

\*\* 大洗工学センター ナトリウム安全工学部 機器構造安全工学Gr

\*\*\* 大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発Gr

## A STUDY ON COLLISION VIBRATION CHARACTERISTICS OF A CANTILEVER BEAM

Makoto OOkA\*, Morito HORIKIRI\*\*, Masaki MORISHITA\*

### *Abstract*

When a vibrating cantilever beam collides with another structure, its dynamic characteristics may be affected and changed by the collision. In order to study the effect of collision on the vibration of the beam, mainly from a view point of failure prevention, vibration experiments and dynamic analyses were made.

From the vibration experiment, it was found that;

- 1) Due to the collision, the vibration characteristics show typical non-linear behavior such as excitation level dependency and jump phenomena..
- 2) Larger resonant response were seen with a simple cantilever beam without collision and pinned supported beam than with the cases with collision.
- 3) Vibration mode is affected by the collision and hence the axial distribution of bending strain is also affected. However, the maximum strain along the beam axis of the simple cantilever case is larger than other cases.

Non-linear dynamic response analysis with beam and gap elements is capable of reproducing the experiment results with sufficient accuracy.

---

\* Community Relations Section, O-arai Engineering Center

\*\* Structure and Material Research Group, O-arai Engineering Center

\*\*\* Structure Safety Engineering Group, O-arai Engineering Center



## 目 次

要 旨

表リスト

図リスト

1.	はじめに .....	1-1
2.	試験方法 .....	2-1
2.1	試験体 .....	2-1
2.2	試験方法 .....	2-2
3.	予備試験結果 .....	3-1
3.1	打振試験 .....	3-1
3.2	正弦波掃引試験 .....	3-2
4.	本試験結果 .....	4-1
4.1	正弦波掃引試験 .....	4-1
4.2	定常正弦波加振試験 .....	4-5
4.3	正弦波加振加速度掃引試験 .....	4-8
5.	解析 .....	5-1
5.1	解析方法 .....	5-1
5.2	固有値解析 .....	5-1
5.3	応答解析 .....	5-2
6.	考 察 .....	6-1
7.	結 論 .....	7-1
8.	謝 辞 .....	8-1
APPENDIX-A 試験実施状況		
APPENDIX-B 試験体形状の検討		
APPENDIX-C 反発係数の測定		
APPENDIX-D 圧電式加速度計によって計測した加速度波形の位相ずれ		
APPENDIX-E 試験結果 掃引加振時刻歴波形		
APPENDIX-F 試験結果 周波数応答関数		
APPENDIX-G 試験結果 減衰比算出結果		
APPENDIX-H 応答倍率から計算される減衰比について		
APPENDIX-I 試験結果 定常加振時刻歴波形 (LPF 30Hz)		

## 表リスト

- 表 2.2-1 打振試験使用計測機器
- 表 2.2-2 反発係数計測試験使用計測機器
- 表 2.2-3 試験マトリクス(正弦波掃引試験、定常正弦波加振試験)
- 表 2.2-4 はり状構造物衝突振動試験ケース
- 表 2.2-5 計測テーブル(GP以外の場合)
- 表 2.2-6 計測テーブル(GPの場合)
  
- 表 3.1-1 固有振動数、減衰比測定結果
- 表 3.3-1 反発係数計測結果
  
- 表 4.1-1 ギャップ量及び加振レベルと卓越振動数の関係
- 表 4.3-1 加振加速度掃引試験結果と推定値の比較
  
- 表 5.1-1 はりの諸元と解析モデル物性値
- 表 5.2-1 固有値解析ケース一覧
- 表 5.2-2 固有値解析結果一覧
- 表 5.3-1 応答解析ケース一覧
- 表 5.3-2 応答解析結果一覧

## 図リスト

- 図 2.1-1 試験装置全体概要(その1)
- 図 2.1-2 試験装置全体概要(その2)
- 図 2.1-3 試験体固定部詳細図
- 図 2.1-4 本試験用試験体
- 図 2.1-5 衝突部アタッチメント形状
- 図 2.1-6 衝突部変位拘束金具
- 図 2.1-7 (欠番)
- 図 2.2-1 打振試験計測位置
- 図 2.2-2 (欠番)
- 図 2.2-3 加速度、反力計測位置
- 図 2.2-4 ひずみゲージ貼付位置
- 図 2.2-5 変位計測位置
- 図 2.2-6 計測ブロックチャート
- 図 3.1-1 固有振動数及び減衰比計測結果(1/5)
- 図 3.1-2 固有振動数及び減衰比計測結果(2/5)
- 図 3.1-3 固有振動数及び減衰比計測結果(3/5)
- 図 3.1-4 固有振動数及び減衰比計測結果(4/5)
- 図 3.1-5 固有振動数及び減衰比計測結果(5/5)
- 図 4.1-1(1/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ $\infty$ 、先端変位)
- 図 4.1-1(2/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ $\infty$ 、先端加速度)
- 図 4.1-1(3/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ピン支持、先端変位)
- 図 4.1-1(4/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ピン支持、先端加速度)
- 図 4.1-1(5/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 0、先端変位)
- 図 4.1-1(6/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 0、先端加速度)
- 図 4.1-1(7/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 0.4mm、先端変位)
- 図 4.1-1(8/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 0.4mm、先端加速度)
- 図 4.1-1(9/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 0.8mm、先端変位)
- 図 4.1-1(10/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 0.8mm、先端加速度)
- 図 4.1-1(11/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 1.2mm、先端変位)
- 図 4.1-1(12/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ギャップ 1.2mm、先端加速度)
- 図 4.1-2(1/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ 0mm、120gal、先端変位)
- 図 4.1-2(2/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ 0mm、120gal、先端加速度)
- 図 4.1-2(3/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ 0mm、240gal、先端変位)

- 図 4.1-2(4/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ° 0mm、240gal、先端加速度)
- 図 4.1-2(5/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ° 0.4mm、240gal、先端変位)
- 図 4.1-2(6/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ° 0.4mm、240gal、先端加速度)
- 図 4.1-2(7/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ° 0.8mm、240gal、先端変位)
- 図 4.1-2(8/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ° 0.8mm、240gal、先端加速度)
- 図 4.1-3 ギャップ量と卓越振動数の関係
- 図 4.1-4(1/2) ギャップ量と先端変位応答倍率の関係
- 図 4.1-4(2/2) ギャップ量と先端加速度応答倍率の関係
- 図 4.1-5(2/1) 先端変位応答倍率と減衰比の関係
- 図 4.1-5(2/2) 先端加速度応答倍率と減衰比の関係
- 図 4.1-6 ギャップ量と等価減衰比の関係(先端加速度応答倍率より換算)
- 図 4.1-7(1/10) 先端変位時刻歴波形の比較(加振レベル 60gal)
- 図 4.1-7(2/10) 先端加速度時刻歴波形の比較(加振レベル 60gal)
- 図 4.1-7(3/10) 先端変位時刻歴波形の比較(加振レベル 120gal)
- 図 4.1-7(4/10) 先端加速度時刻歴波形の比較(加振レベル 120gal)
- 図 4.1-7(5/10) 先端変位時刻歴波形の比較(加振レベル 180gal)
- 図 4.1-7(6/10) 先端加速度時刻歴波形の比較(加振レベル 180gal)
- 図 4.1-7(7/10) 先端変位時刻歴波形の比較(加振レベル 240gal、掃引方向 UP)
- 図 4.1-7(8/10) 先端加速度時刻歴波形の比較(加振レベル 240gal 掃引方向 UP)
- 図 4.1-7(9/10) 先端変位時刻歴波形の比較(加振レベル 240gal、掃引方向 DOWN)
- 図 4.1-7(10/10) 先端加速度時刻歴波形の比較(加振レベル 240gal、掃引方向 DOWN)
- 図 4.1-8(1/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ 0.4mm、240gal、掃引 UP)
- 図 4.1-8(2/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ 0.4mm、240gal、掃引 UP)
- 図 4.1-8(3/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ 0mm、240gal、掃引 UP)
- 図 4.1-8(4/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ 0mm、240gal、掃引 UP)
- 図 4.1-8(5/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ 0mm、120gal、掃引 DOWN)
- 図 4.1-8(6/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ 0mm、120gal、掃引 DOWN)
- 図 4.2-1(1/6) 定常加振時刻歴波形(ギャップ $\infty$ 、240gal、16.5Hz)
- 図 4.2-1(2/6) 定常加振時刻歴波形(ピン支持、240gal、26.5Hz)
- 図 4.2-1(3/6) 定常加振時刻歴波形(ギャップ 0mm、240gal、20.4Hz)
- 図 4.2-1(4/6) 定常加振時刻歴波形(ギャップ 0.4mm、240gal、17Hz)
- 図 4.2-1(5/6) 定常加振時刻歴波形(ギャップ 0.8mm、240gal、16.5Hz)
- 図 4.2-1(6/6) 定常加振時刻歴波形(ギャップ 1.2mm、240gal、16.5Hz)
- 図 4.2-2(1/5) ひずみ、加速度、変位の高さ方向分布(LPF100Hz、定常加振、240gal)
- 図 4.2-2(2/5) ひずみ、加速度、変位の高さ方向分布(LPF30Hz、定常加振、240gal)
- 図 4.2-2(3/5) 実験と解析の加速度モードの比較(ギャップ $\infty$ 、ピン支持)
- 図 4.2-2(4/5) 実験と解析のひずみモードの比較(ギャップ $\infty$ 、ピン支持)

- 図 4.2-2(5/5) 定常加振と掃引加振とのモード比較(ピン支持)
- 図 4.2-3 反力と衝突部変位のヒステリシス(定常加振、240gal)
- 図 4.2-4(1/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル(ギャップ 0mm)
- 図 4.2-4(2/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル(ギャップ 0.4mm)
- 図 4.2-4(3/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル(ギャップ 0.8mm)
- 図 4.2-4(4/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル(ギャップ 1.2mm)
- 図 4.3-1 加振加速度掃引試験結果
- 図 4.3-2 加振加速度掃引試験結果概念図
- 図 4.3-3 加振加速度掃引試験 代表ケースの時刻歴波形
- 図 5.1-1 解析モデル
- 図 5.1-2 接触部のモデル化
- 図 5.2-1 先端質量と拘束板を考慮したモード(1/2)
- 図 5.2-2 先端質量と拘束板を考慮したモード(2/2)
- 図 5.3-1 周波数応答関数図(1/2)
- 図 5.3-2 周波数応答関数図(2/2)
- 図 5.3-3 ギャップ量による卓越振動数の傾向
- 図 5.4-1 スイープ順逆での周波数応答関数図:G0 (1/2)
- 図 5.4-2 スイープ順逆での周波数応答関数図:G1 (2/2)
- 図 5.3-6 ひずみモード分布
- 図 5.3-7 入力レベルによるひずみ分布:ギャップ=1.2mm

## 1. はじめに

振動するはり状構造物がその一部で剛体(はりの剛性に比べ十分に剛性が高い)に衝突する場合に、その振動挙動が衝突部の条件(ギャップの有無, ギャップの大きさ), 加振レベルの大きさによってどのような影響を受けるかについて実験的に明らかにするとともに、その機構を解明するために必要な基礎データ及びシミュレーションに必要な基礎データを取得することを目的として、振動台による振動試験を実施した。本書はその結果をまとめたものである。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験体

#### (1) 試験装置の概要

試験体及び試験装置を図 2.1-1～図 2.1-3 に示す。図 2.1-1 に示すとおり、試験装置は試験体、衝突力をロードセルにより計測する架台、試験体の変位を計測するための変位計固定架台及びそれらを固定し振動台上に固定するベースプレートから構成される。試験体の固定方法はねじ止めとした(図 2.1-3)。試験体設置状況の写真を APPENDIX A に示す。

#### (2) 試験体

試験体の詳細形状を図 2.1-4～図 2.1-6 に示す。試験体は、直径 14mm、長さ 700mm の中実円柱の片持ちはりを基本とし、衝突部は固定端から全長の 1/3 の位置とした。振動時の振れまわりを避けるため、試験体の断面は側面を削り、加振方向と加振直角方向の剛性に異方性を持たせることで固有振動数に差をつけた。また、衝突振動時には非線形挙動による分数波等の発生の可能性があるため、加振方向と加振直角方向の固有振動数は整数倍にならないよう配慮した。試験体形状の設計検討の詳細については APPENDIX B を参照のこと。

事前解析による試験体の固有振動数は以下のとおりである（後述の粘弾性体、拘束板及び変位計測のための変位計ターゲットは考慮していない）。

衝突が無い場合                   : 21Hz

衝突部でピン支持する場合       : 38Hz

S/N 比が良く精度の高い振動計測を行うこと及びギャップ量の調整を精度良く行うことを考慮すると、試験体の振動応答は大きい方が良いが、振動応答が大きい場合、試験体付根部の疲労強度が問題となる。このため、炭素鋼と比較して疲労強度が高いクロムモリ

ブデン鋼(SCM435 JIS-G-4105)を用いた。

また、鋼の片持ちはりの場合、減衰比が非常に小さいため低加振力でも大きな応答となる。共振時の過大な応答を抑制し、且つ振動台の制御性が良い範囲で試験を行うため、図 2.1-4 に示すように粘弾性体(幅 10mm, 長さ 240mm, 厚さ 1mm, 住友3M製)を試験体側面の両面に貼付けることによって、減衰比を大きくした。粘弾性体はせん断変形によってエネルギーを吸収することから、減衰効果を高めるために粘弾性体の試験体側と反対の面に拘束板を接着した。粘弾性体と試験体及び拘束板の接着は粘弾性体上の接着剤で、拘束板と追加拘束板の接着には両面テープを用いた。

### (3) 衝突部架台

はりの衝突を受ける衝突力計測架台は、ギャップサイズを変更できるようベースプレートにボルトで固定した。ギャップサイズは、すきまゲージを挿入して調節し、変位計によって確認した。ギャップ 0mm の試験ケースの場合は、反力の出力が 0.5kg 程度となる位置とした。

## 2.2 試験方法

### 2.2.1 予備試験

#### (1) 打振試験

試験条件を検討するために必要な固有振動数及び減衰比を計測するため、打振試験を行った。試験条件を以下に示す。

- ・試験体: 本試験用試験体(図 2.1-4 参照)
- ・衝突部のギャップ:  $\infty$
- ・加振方法: 先端変位計ターゲットの取付位置の下(先端から約 100mm)をプラスチックハンマーで打撃
- ・計器及び計測位置: 使用計測器を表 2.2-1 に、計測位置を図 2.2-1 に示す。
- ・サンプリング周波数: 1kHz



## (2) 正弦波掃引試験

本試験での加振レベル及び掃引試験での掃引速度を特定するため、正弦波掃引試験を行った。試験条件を以下に示す。

- ・試験体: 本試験用試験体(図 2.1-4 参照)
- ・衝突部のギャップ:  $\infty$
- ・加振方法: 正弦波掃引(加振レベル 100gal)
- ・掃引速度: 0.04Hz/sec, 0.02Hz/sec
- ・計器及び計測位置: 本試験と同条件(後項 2.2.3 本試験計測項目 参照)
- ・サンプリング周波数: 1kHz

### 2.2.2 本試験

試験マトリクスを表 2.2-3 に、各試験ケースの詳細条件を表 2.2-4 に示す。

#### (1) 正弦波掃引試験

周波数応答関数を得るために、試験体と衝突部のギャップ(以下、ギャップ)の大きさ及び、加振レベルをパラメータとした正弦波掃引試験を行った。試験条件を以下に示す。

- ・掃引速度: 0.04Hz/sec
- ・掃引範囲
  - ギャップ $\infty$  : 15~19Hz(共振振動数 $\pm$ 2Hz, 掃引時間 100sec)
  - ピン支持 : 25~29Hz(共振振動数 $\pm$ 2Hz, 掃引時間 100sec)
  - その他のケース: 15~29Hz(掃引時間 350sec)
- ・掃引方向: UP のみ
  - 但し, G0(ギャップ 0mm)の加振レベル 2(120gal), 加振レベル 4(240gal), G1(ギャップ 0.4mm)及び G2(ギャップ 0.8mm)の加振レベル 4(240gal)の計4ケースでは DOWN も行い, UP/DOWN の周波数応答関数を比較した。
- ・サンプリング周波数: 200Hz(アンチエイリアシングフィルタ 100Hz)

#### (2) 定常正弦波加振試験

振動モード形状を調査するため、掃引試験より応答の最大値を精度良く求めることの

できる定常正弦波加振試験を代表ケース(表 2.2-3 参照)に対して実施した。この時、サンプリング周波数も掃引試験より細かい 1kHz とした。試験条件を以下に示す。

- ・加振振動数: 正弦波掃引試験結果の変位応答が最大となる振動数
- ・加振時間: 10sec
- ・サンプリング周波数: 1kHz(アンチエイリアシングフィルタ 100Hz)

### (3) 正弦波加振加速度掃引試験

加振振動数を一定として加振レベルを徐々に変化させる、正弦波加振加速度掃引試験を実施した。試験条件を以下に示す。

- ・衝突部のギャップ: 0.4mm
- ・加振レベル: 0~400~0gal
- ・加振振動数: 15, 16, 17, 17.5, 18, 18.5Hz
- ・加振方法: 加振レベルを手動で制御
- ・加振時間: 100sec
- ・サンプリング周波数: 200Hz(アンチエイリアシングフィルタ 100Hz)

### 2.2.3 本試験計測項目

本試験計測項目を以下に示す。

- ・加速度
- ・ひずみ
- ・変位
- ・衝突反力

計測テーブルを表 2.2-5, 2.2-6 に、計測位置を図 2.2-3~2.2-5, 計測ブロックチャートを図 2.2-6 に示す。

表2.2-1 打振試験使用計測機器

機器名	型式	メーカー	計測周波数レンジ	備考
変位計	NPB-250	エミック	DC~20kHz	渦電流式
データレコーダ	PC216AX	ソニーマグネ スケール	DC~20kHz	

表2.2-3 試験マトリクス（正弦波掃引試験、定常正弦波加振試験）

ケース	加振レベル		レベル1 (60gal)	レベル2 (120gal)	レベル3 (180gal)	レベル4 (240gal)	掃引範囲 Hz
	ギャップ mm.						
GP	ピン支持		◎	◎	◎	◎	25~29
G0	0(片側FREE)		○	○*	○	○*	15~29
G1	G <sub>1</sub> (0.4mm)		◎	○	○	○*	15~29
G2	G <sub>2</sub> (0.8mm)		-	◎	○	○*	15~29
G3	G <sub>3</sub> (1.2mm)		-	-	◎	○	15~29
G1	∞		◎	◎	◎	◎	15~19

○：衝突の発生するケース、◎：衝突の発生しないケース

\*：掃引方向をUP/DOWNともに実施、他はUPのみ実施

■：定常正弦波加振試験も実施

表2.2-4 はり状構造物衝突振動試験ケース

試験目的	試験ケース名	試験日	衝突部境界条件 (ギヤップ量)	加振レベル gal	掃引速度 Hz/sec	掃引範囲 Hz	掃引方向	タップリング 周波数 Hz	計測テーブル	計測ch 合計数	備考		
固有値、減衰比計測(予備)	FR1~5	2/16	ギヤップ <sup>∞</sup>	-	-	-	-	1k	表2.2-5	2ch	先端打振、目標先端変位8mm 変位(D1、D2)のみ収録		
正弦波掃引試験(予備)	PRE01	2/17	ギヤップ <sup>∞</sup>	100	0.04	14~19	up	200	表2.2-5	2ch	変位(D1、D2)のみ収録		
	PRE02											0.02	
正弦波掃引試験	G1-1U2	2/17	ギヤップ <sup>∞</sup>	100	0.04	15~19	up	200	表2.2-5	18ch			
	G1-2											100	
	G1-3											100	
	G1-4U2											100	
	GP-1	2/17	ピン支持	100	0.04	25~29	up	200	表2.2-6	16ch	R1、D1データ収録無し		
	GP-2											100	
	GP-3											100	
	GP-4											100	
	G0-1	2/17	ギヤップ <sup>0</sup> (片側)	100	0.04	25~29	up	200	表2.2-5	18ch			
	G0-2											100	
	G0-2D											100	
	G0-3											100	
	G0-4	2/17	ギヤップ <sup>0</sup> (片側)	100	0.04	25~29	down	200	表2.2-5	18ch			
	G0-4D3											100	
	G1-1											100	
	G1-2											100	
	G1-3	2/18	ギヤップ <sup>G1</sup>	100	0.04	15~29	up	200	表2.2-5	18ch			
	G1-4U2											100	
	G1-4D3											100	
	G2-2											100	
G2-3	2/18	ギヤップ <sup>G2</sup>	100	0.04	15~29	up	200	表2.2-5	18ch				
G2-4											100		
G2-4D2											100		
G3-3											100		
G3-4	2/18	ギヤップ <sup>G3</sup>	100	0.04	15~29	up	200	表2.2-5	18ch				
定常正弦波加振試験	G1-4S	2/17	ギヤップ <sup>∞</sup>	100	-	16.5	-	1k	表2.2-5	18ch			
	GP-4S	2/17	ピン支持	100	-	26.5	-	1k	表2.2-6	16ch	R1、D1データ収録無し		
	G0-1US	2/18	ギヤップ <sup>0</sup> (片側)	100	-	24.2	-	1k	計測時間 10sec	表2.2-5	18ch	G0-1の卓越振動数 G0-2の卓越振動数 G0-2Dの卓越振動数 G0-3の卓越振動数 G0-4の卓越振動数 G0-4D3の卓越振動数	
	G0-2US												100
	G0-2DS												100
	G0-3US												100
	G0-4US	2/18	ギヤップ <sup>G1</sup>	100	-	16.5	-	1k	計測時間 10sec	表2.2-5	18ch	衝突無し	
	G0-4DS												100
	G1-S1												100
	G1-S2												100
	G1-S3	2/18	ギヤップ <sup>G2</sup>	100	-	17.0	-	1k	計測時間 10sec	表2.2-5	18ch	衝突無し	
	G2-4S1												100
G2-4S2	100												
G3-4S1	2/18	ギヤップ <sup>G3</sup>	100	-	16.5	-	1k	計測時間 10sec	表2.2-5	18ch			
加振加速度掃引試験	G1UD150	2/19	ギヤップ <sup>G1</sup>	0~400 ~0 gal スィーブ	-	15.0	-	200	計測時間 100sec	表2.2-5	18ch		
	G1UD160												100
	G1UD165												100
	G1UD170												100
	G1UD175												100
	G1UD180												100
	G1UD185												100

表2.2-5 計測テーブル（GP以外の場合）  
正弦波掃引試験、定常正弦波加振試験

行番	CH番号	計測項目	CH名	計測位置	センサ
1	1	加速度	AX1	図2.2-3	圧電式加速度 ピックアップ インデブコ2222C相当
2	2		AZ1		
3	3		AX2		
4	4		AX3		
5	5		AX4		
6	6		AX5		
7	7		AX6		
8	8		AZ6		
9	9		AY1		
10	10		AY2		歪みゲージ式加速度計 共和電業 AS-2GB
11	11	ひずみ	S1	図2.2-4	共和電業 単軸、2線式 KFG2120C111L3M2R
12	12		S2		
13	13		S3		
14	14		S4		
15	15		S5		
16	16	反力	R1	図2.2-3	NEC三栄 9E01L33-50K
17	17	衝突部変位	D1	図2.2-5	キ-エンス AS-440-05 0~5mm
18	18	先端変位	D2	図2.2-5	EMIC NPB-250 0~25mm

データサンプリング周波数

- ・ 正弦波掃引加振試験：200Hz
- ・ 定常正弦波加振試験：1kHz

表2.2-6 計測テーブル (GPの場合)  
 正弦波掃引試験、定常正弦波加振試験

行番	CH番号	計測項目	CH名	計測位置	センサ	備考
1	1	加速度	AX1	図2.2-3	圧電式加速度 ピックアップ インデブコ2222C相当	変位拘束金具上
2	2		AZ1			
3	3		AX2			
4	4		AX3			
5	5		AX4			
6	6		AX5			
7	7		AX6			
8	8		AZ6			
9	9		AY1			
10	10		AY2			
11	11	ひずみ	S1	図2.2-4	共和電業 単軸、2線式 KFG2120C111L3M2R	
12	12		S2			
13	13		S3			
14	14		S4			
15	15		S5			
-	16	反力	R1	図2.2-3	NEC三栄 9E01L33-50K	非接続
-	17	衝突部変位	D1	図2.2-5	キ-エンス AS-440-05 0~5mm	非接続
16	18	先端変位	D2	図2.2-5	EMIC NPB-250 0~25mm	

データサンプリング周波数

- ・ 正弦波掃引加振試験：200Hz
- ・ 定常正弦波加振試験：1kHz

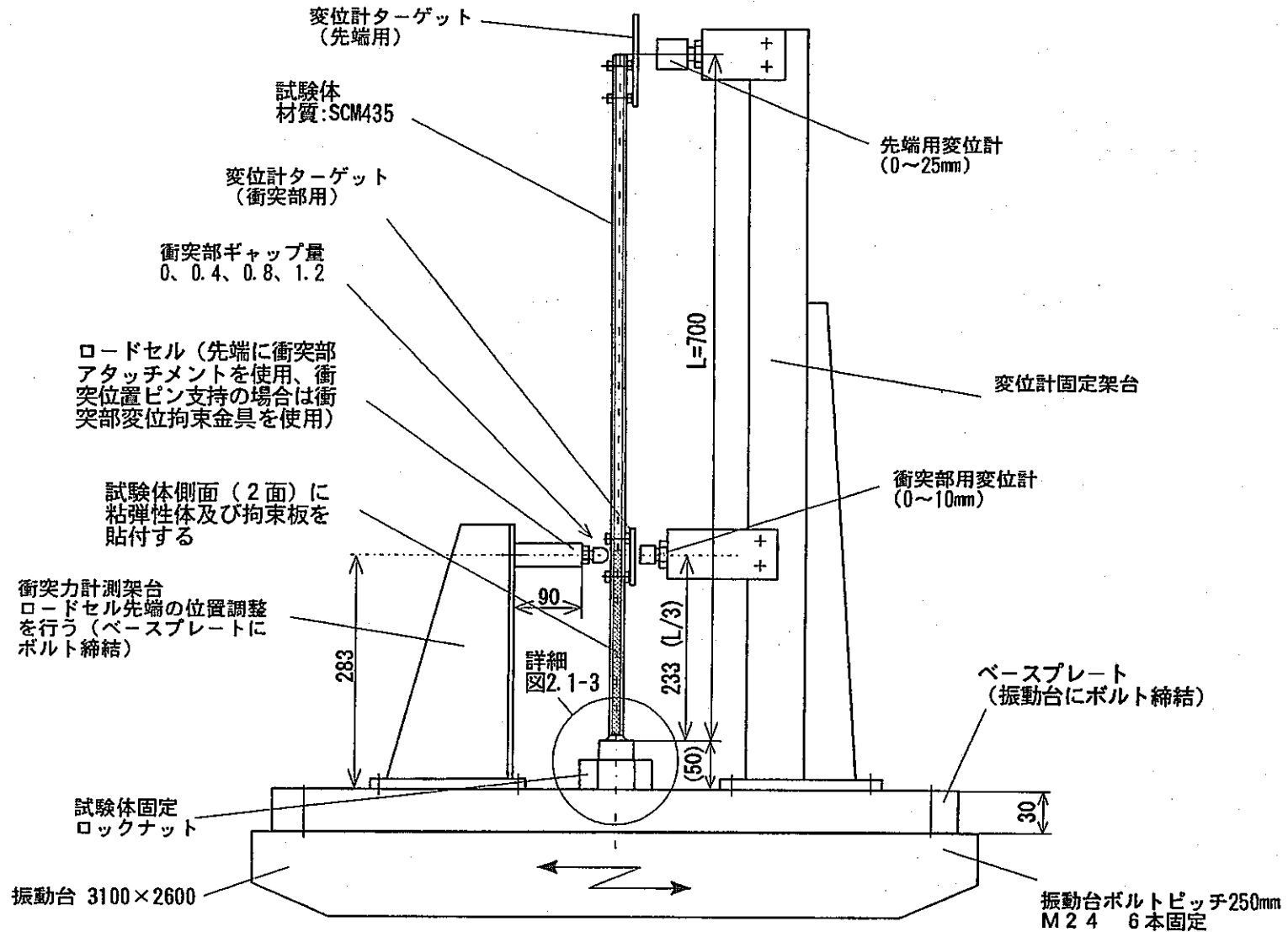


図2.1-1 試験装置全体概要 (その1)



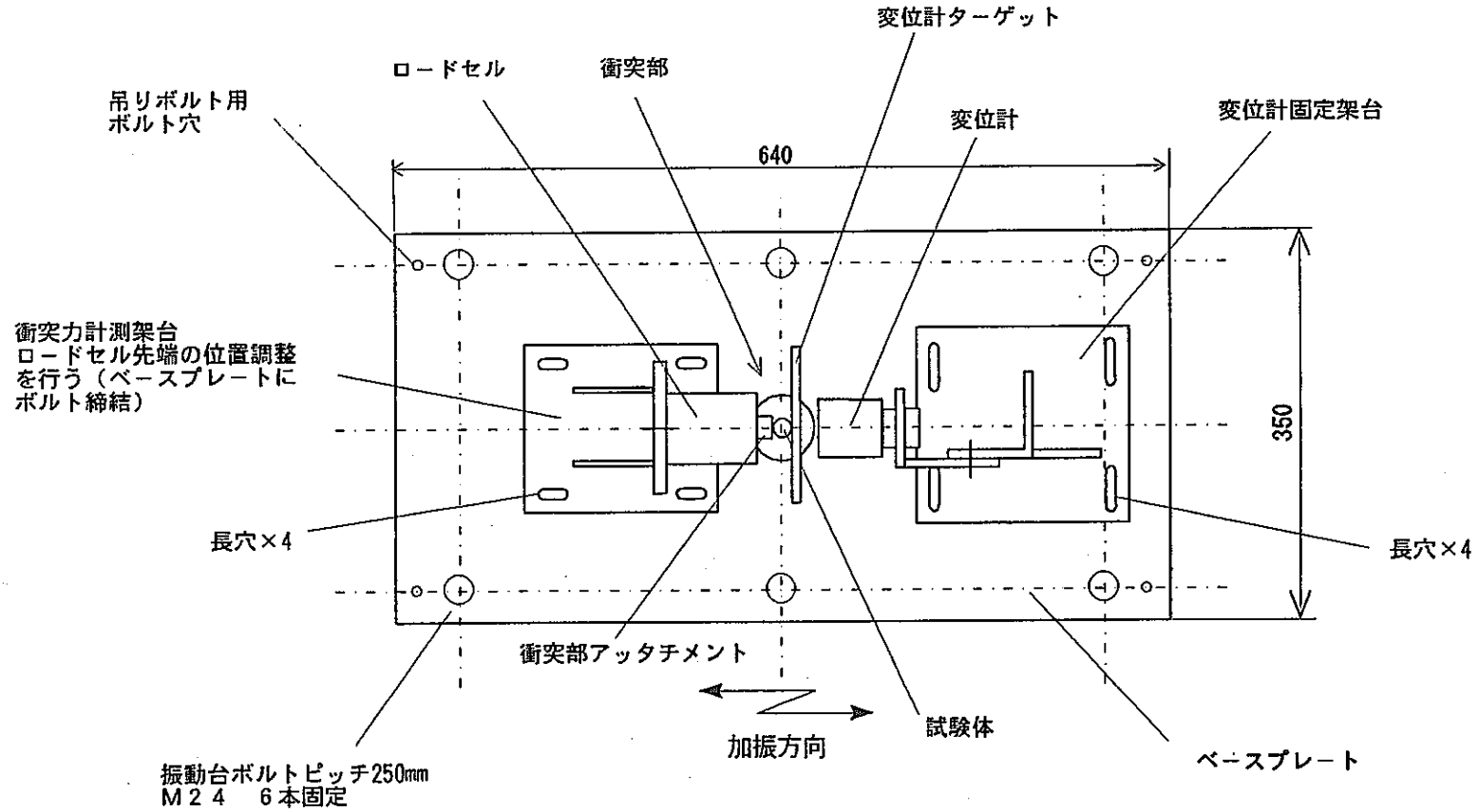


図2.1-2 試験装置全体概要 (その2)

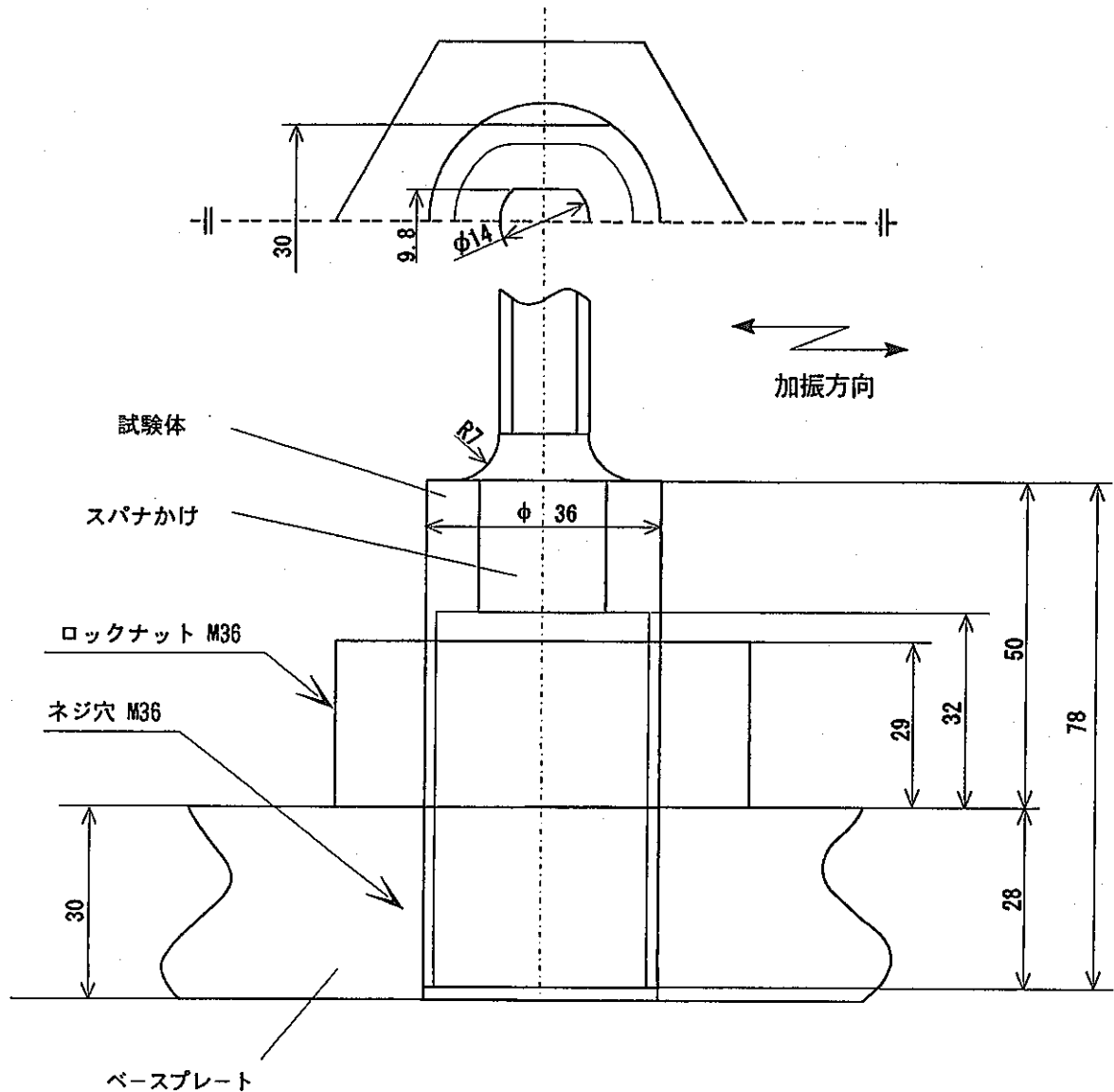


図2.1-3 試験体固定部詳細図

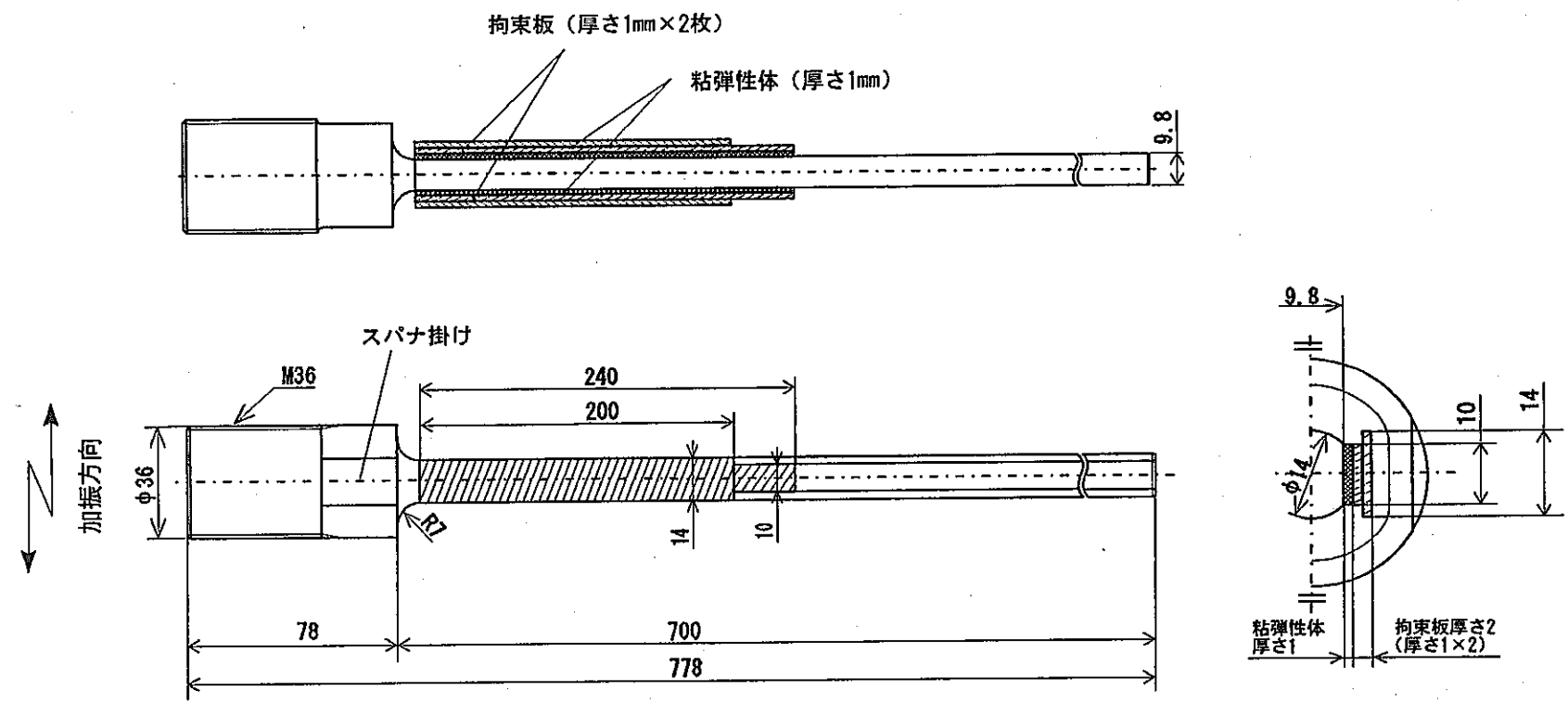


図2.1-4 本試験用試験体

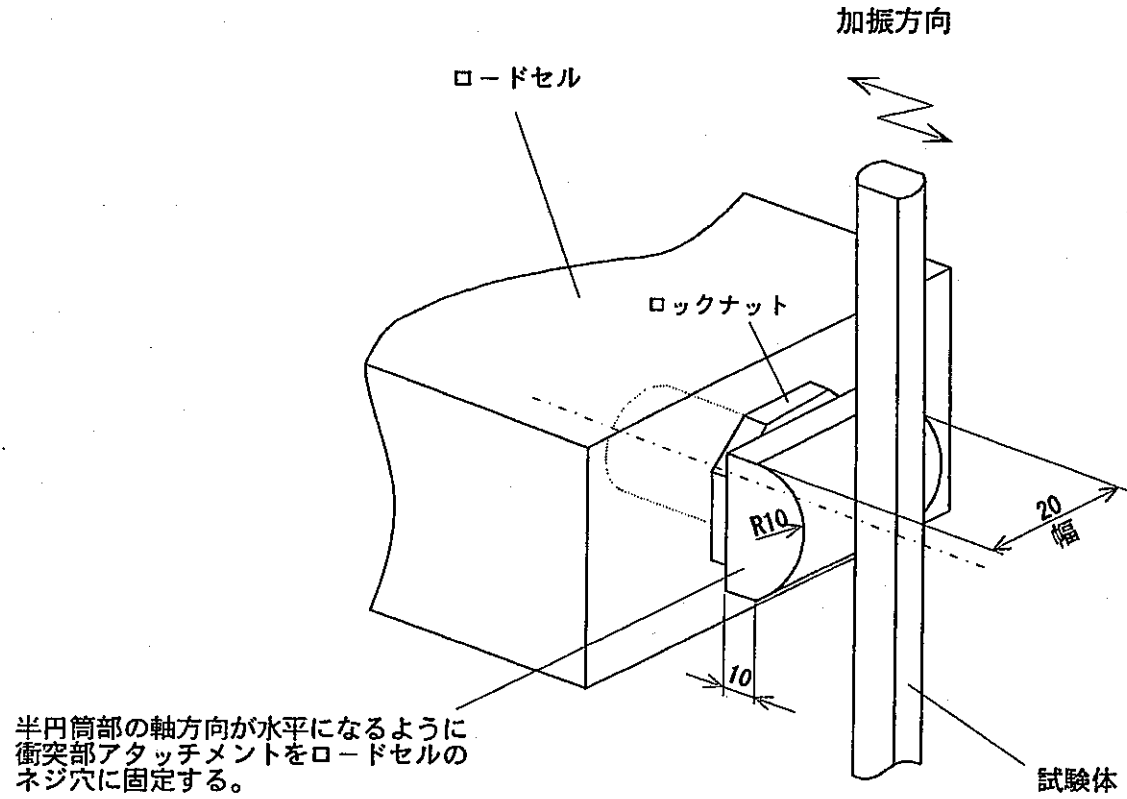


図2.1-5 衝突部アタッチメント形状

材質: SS400

付属部品

六角穴付きボルト M6×50

2個

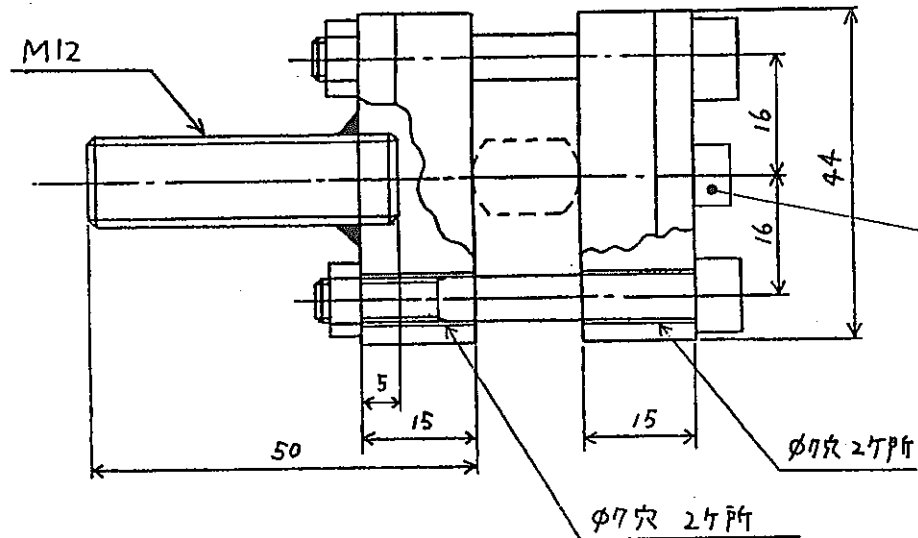
材質 SS

六角ナット 1種 M6

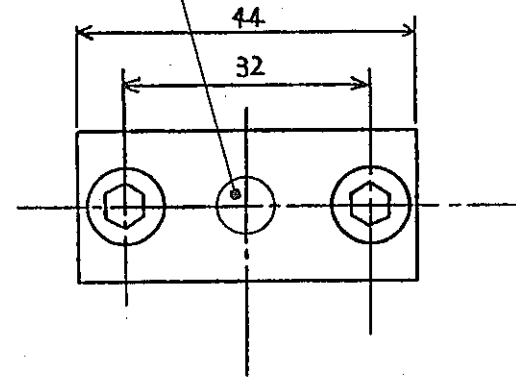
2個

”

JNC TN9400 99-048



ピン支持の場合の  
加速度計 (AX3) 取り  
付け位置



\*衝突部アタッチメントと交換して使用

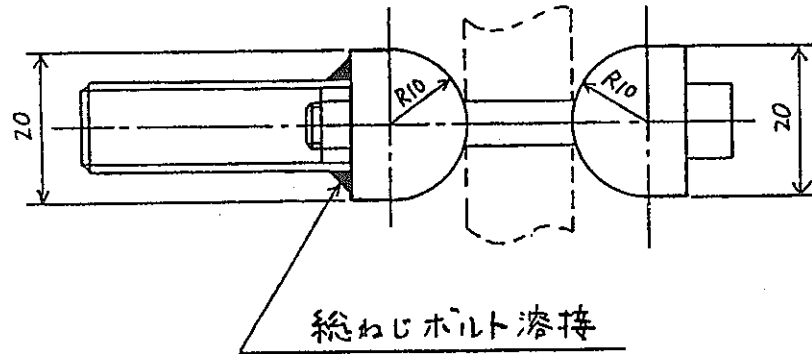


図2.1-6 衝突部変位拘束金具

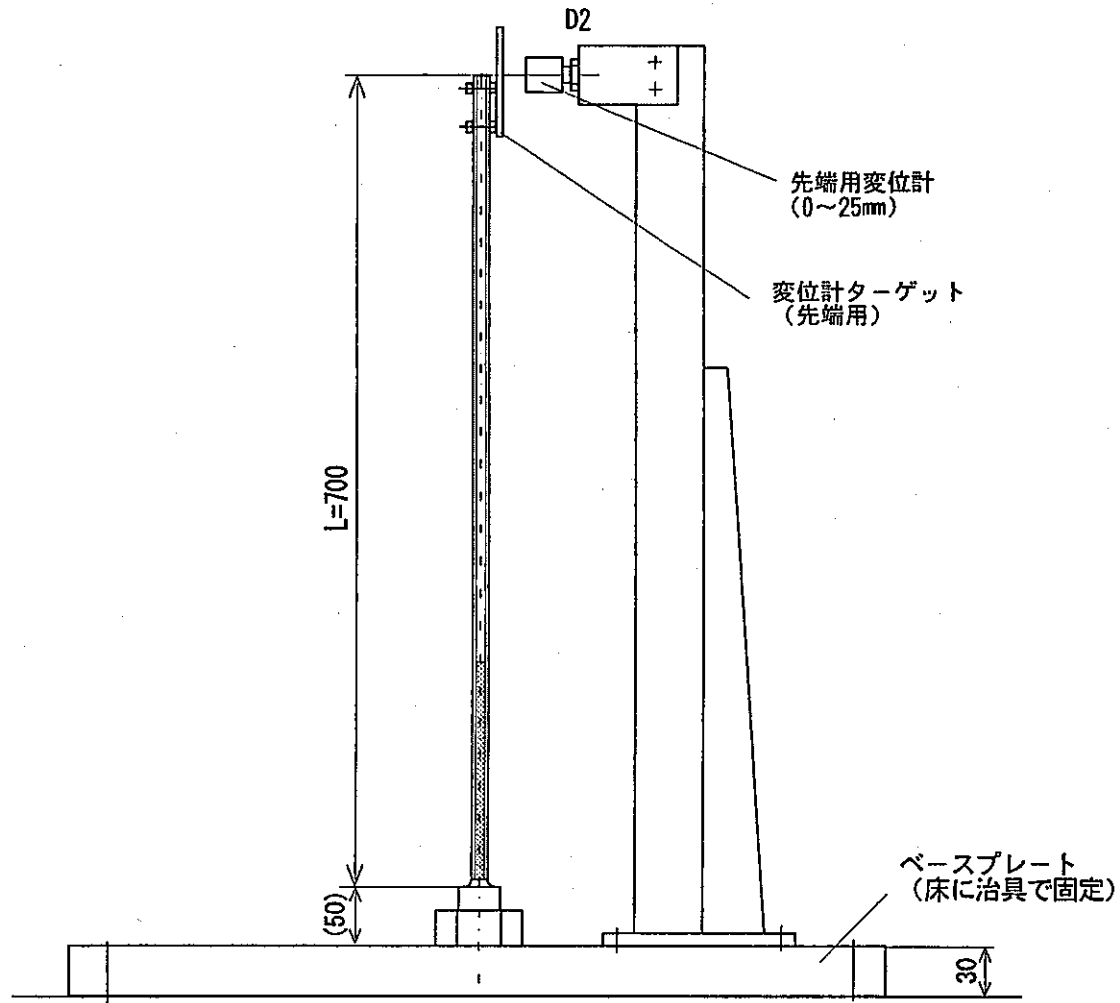


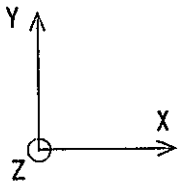


図2. 2-1 打振試験計測位置

 : 加振方向  
 : 加振直角方向



- 注1) 図示位置は加速度ピックアップ測定部のセンター位置  
 注2) AX3はピン支持の場合、試験体衝突部変位拘束金具に固定した

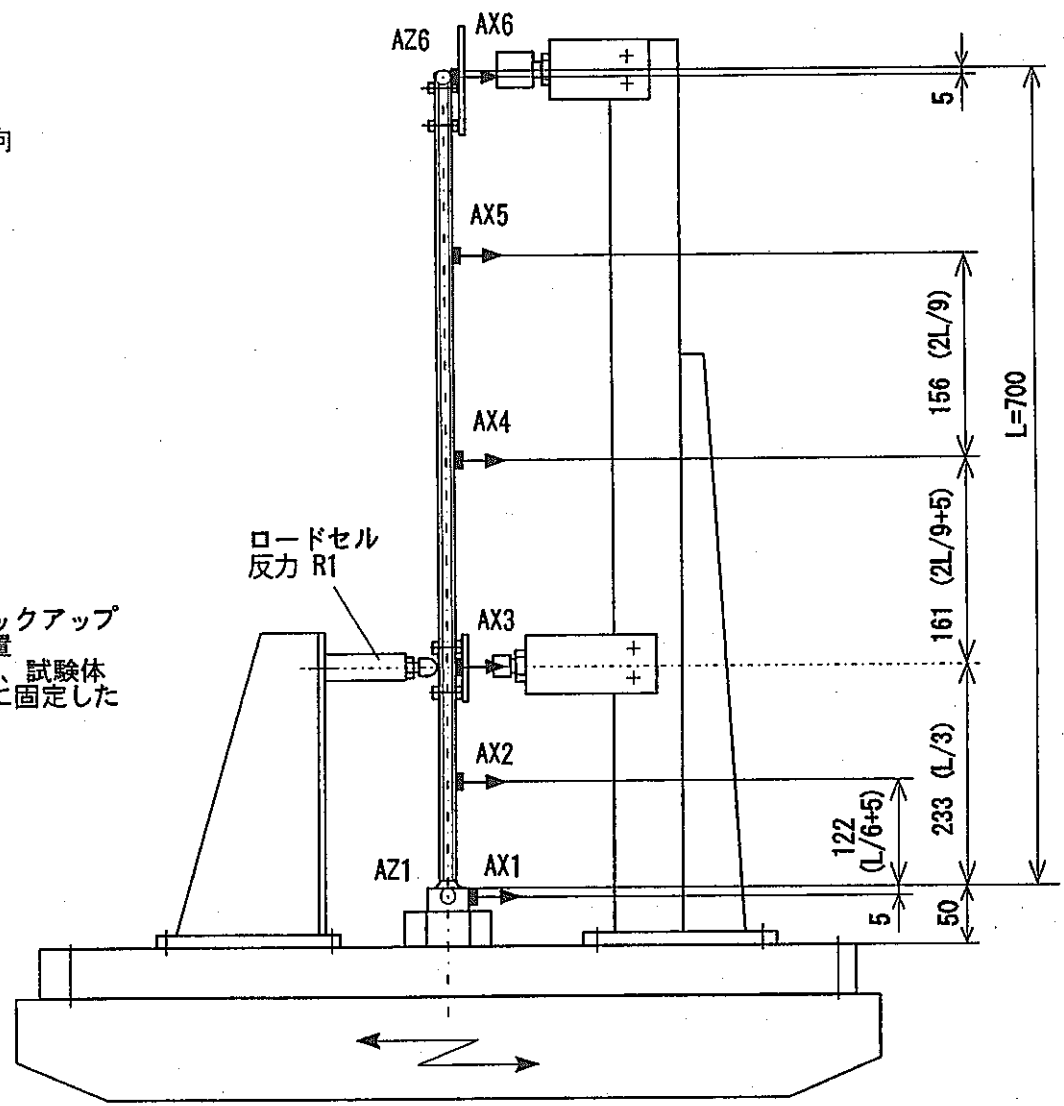
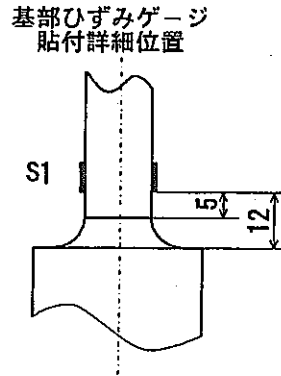
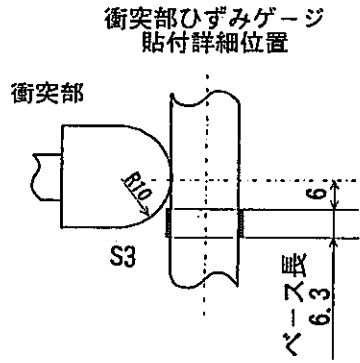


図2. 2-3 加速度、反力計測位置



- 注1) ひずみゲージ (単軸式) を軸方向に貼り付ける。2枚1組で曲げひずみを計測した。
- 注2) 詳細位置を図示していないひずみゲージ (S2、S4、S5) の位置は、ゲージベース上端が図示の位置とした。

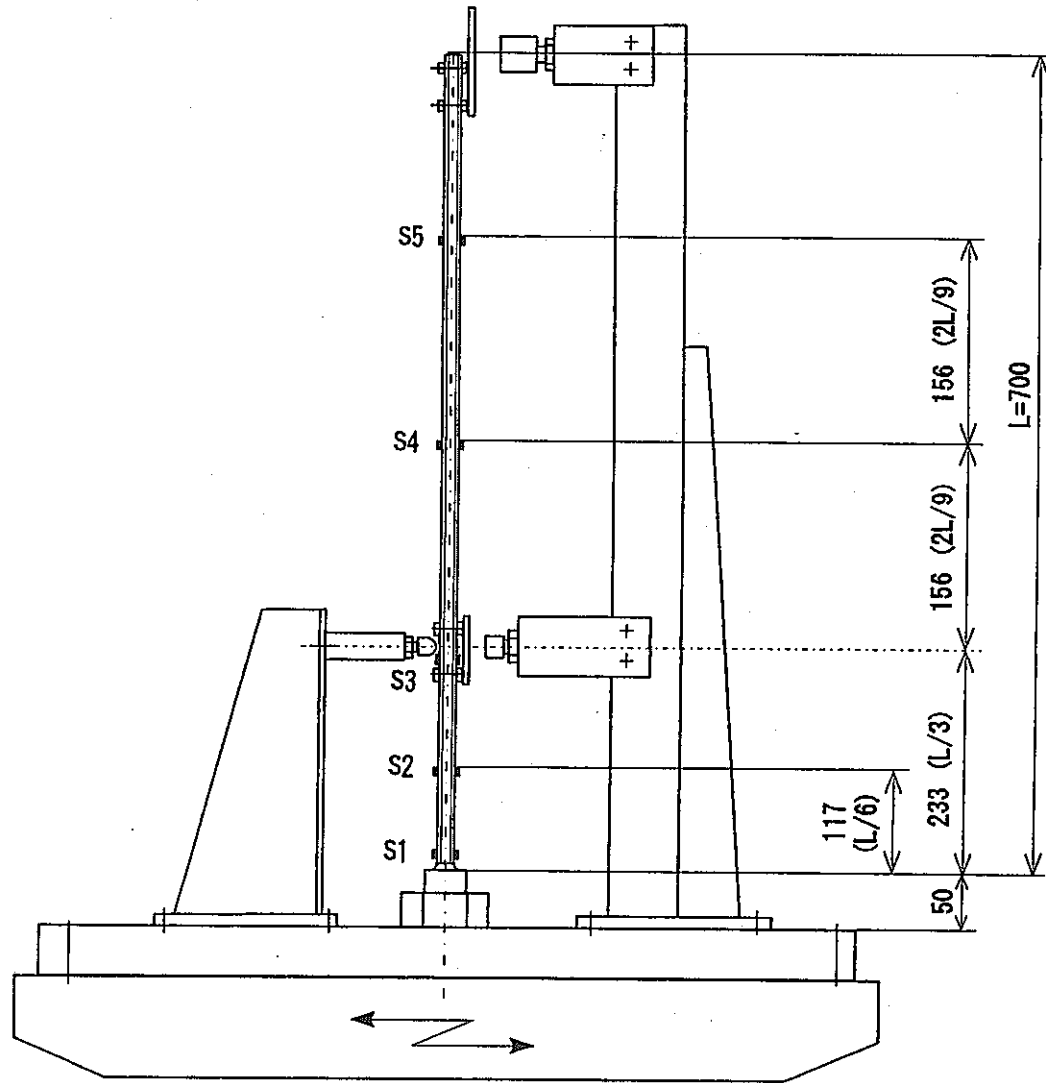


図2.2-4 ひずみゲージ貼付位置



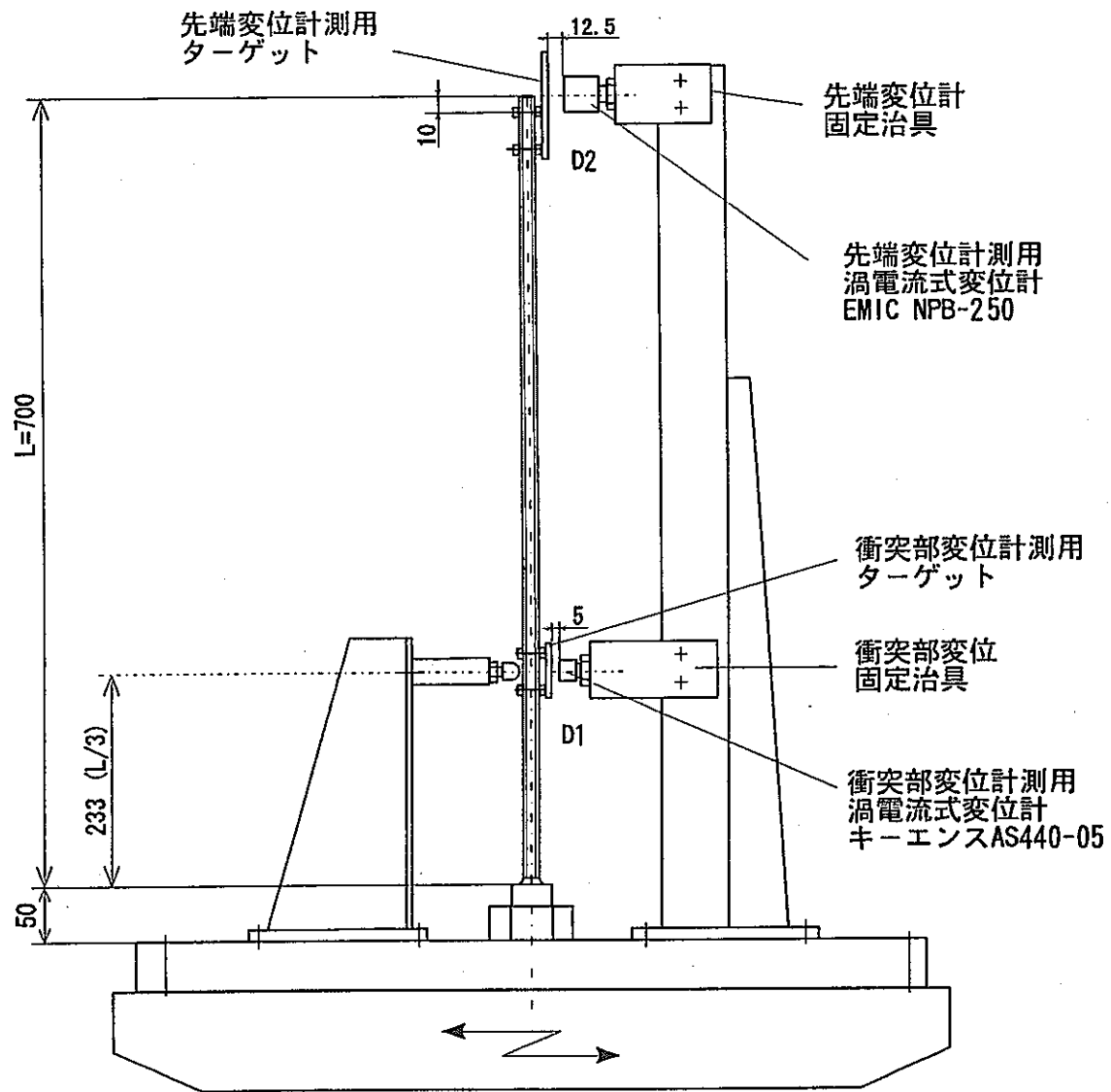
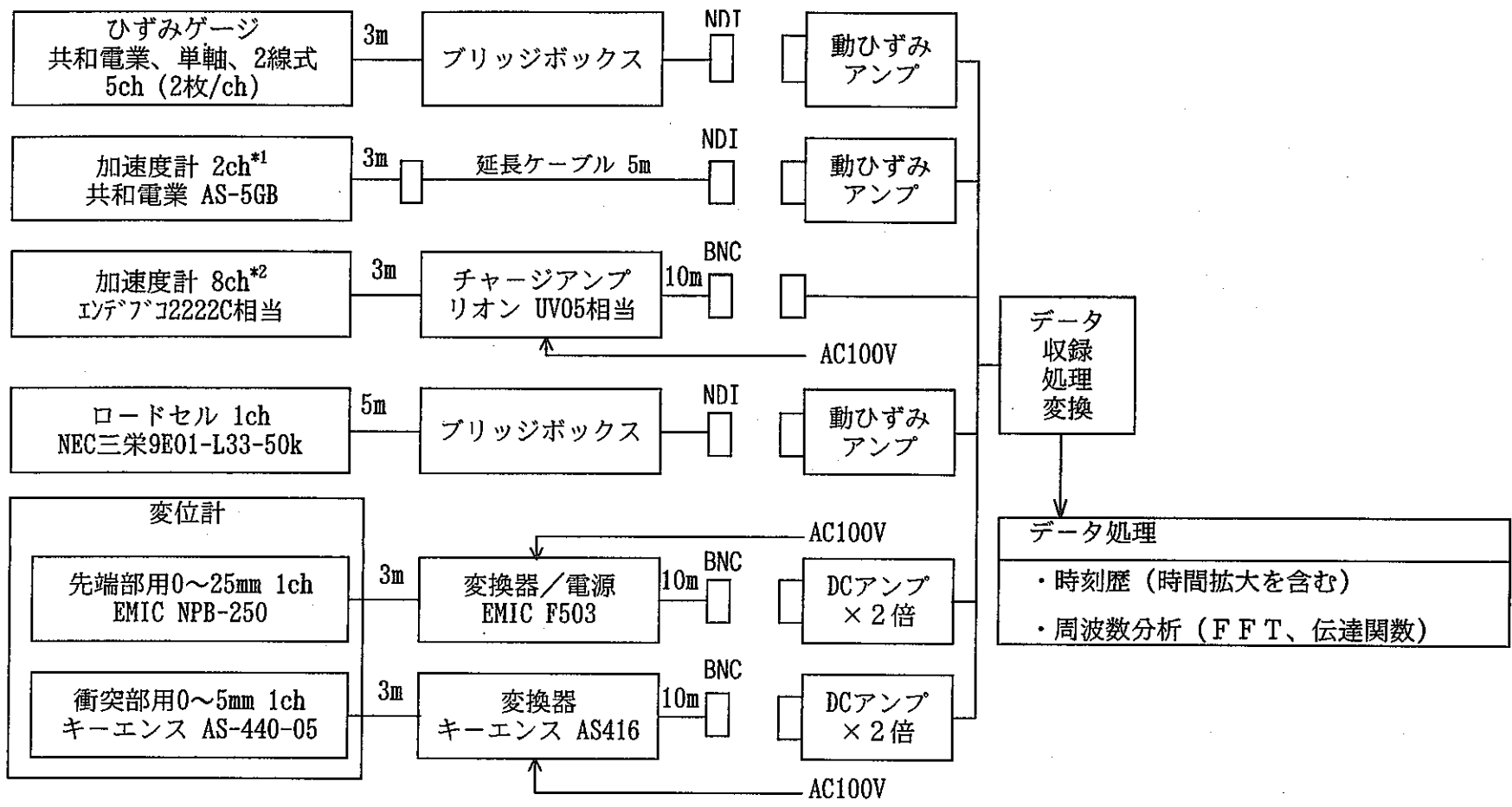


図2.2-5 変位計測位置



\*1 振動台ピッチング確認用 (ひずみゲージ式)  
 \*2 試験体応答加速度計測用 (圧電式)

図2.2-6 計測ブロックチャート

### 3. 予備試験結果

#### 3.1 打振試験

打振試験によって得られた自由振動波形から試験体の固有振動数と減衰比を求めた。結果を以下に示す。

##### 3.1.1 計測結果

各打振における先端変位(D2)の時刻歴波形, FFT 結果, 及び波数に対する振幅の対数プロットを図3.1-1～図3.1-5に示す。減衰比は最下段に示したカットオフ振動数0Hz～40Hzのバンドパスフィルタ処理した先端変位の時刻歴波形の対数減衰率より算出した。下から2番目の時刻歴波形はフィルタ処理をしていない計測波形である。

各打振における, 先端変位(D2)の最大値, 固有振動数, 及び減衰比の計算結果を表3.1.1に示す。

##### 3.1.2 考察

打振による予備試験の結果, 本試験用試験体の固有振動数, 及び減衰比の平均値として以下の値を得た。

固有振動数 : 16.6 Hz

減衰比 : 1.2 %

試験結果より以下のことが言える。

固有振動数の実験値は2.1で示した断面形状を選定するための解析値21Hzより低い値である。これは, 変位を計測するために試験体に取り付けた変位計ターゲットの質量と, 減衰を付加するために取り付けた粘弾性体及び拘束板の剛性及び質量の影響と考えられる。変位計ターゲットの質量と拘束板の剛性及び質量の影響は, 後項4.2定常正弦波加振試験で検討する。

一般の鋼の材料減衰は非常に小さく0.1%程度であるのに対して実験結果では減衰比1.2%を得た。これは粘弾性体が有効に作用し減衰比を大きくしているためである。

振動数, 減衰比ともにばらつきがない。よって, 試験体の固定部, 粘弾性体取り付け

部等にゆらみ、がた等はないと考えられる。また、波数に対する振幅の対数プロットがほぼ直線になることから、最大変位 4.4mm 以下では減衰比の変位依存性は小さく無視できる。

## 3.2 正弦波掃引試験

予備試験における正弦波掃引試験より、本試験での加振レベルと正弦波掃引試験での掃引速度を決定した。結果を以下に示す。

### 3.2.1 計測結果

各掃引速度での試験体の先端及び衝突部の最大変位を以下に示す。加振レベルは全て 100gal である。

- ・掃引速度 0.04 Hz/sec

先端最大変位 : 3.80mm , 衝突部最大変位 : 0.63mm

- ・掃引速度 0.02 Hz/sec

先端最大変位 : 3.84mm , 衝突部最大変位 : 0.63mm

### 3.2.2 掃引速度及び加振レベルの決定

- ・本試験の掃引速度

予備試験の結果より、試験体の応答最大変位は掃引速度が 0.04Hz/sec の場合と 0.02Hz/sec の場合で差がない。従って、本試験での掃引速度は試験時間の短縮、取込データ数の抑制のため 0.04Hz/sec とした。

- ・加振レベル

予備試験の結果より得られた加振レベル(100gal)と応答変位の関係から、本試験での加振レベルを決定した。本試験における掃引試験での加振レベルは表 2.2-3 の試験マトリクスに示している。

表3.1-1 固有振動数、減衰比測定結果

ケース名	先端変位最大値 mm	1次固有振動数 Hz	減衰比 %
FRE30_03	3.61	16.6	1.20
FRE30_04	3.60	16.6	1.20
FRE30_05	3.25	16.6	1.20
FRE30_06	3.25	16.6	1.20
FRE30_7	4.44	16.6	1.20
平均	—	16.6	1.20

FRE30\_03 (D2 )

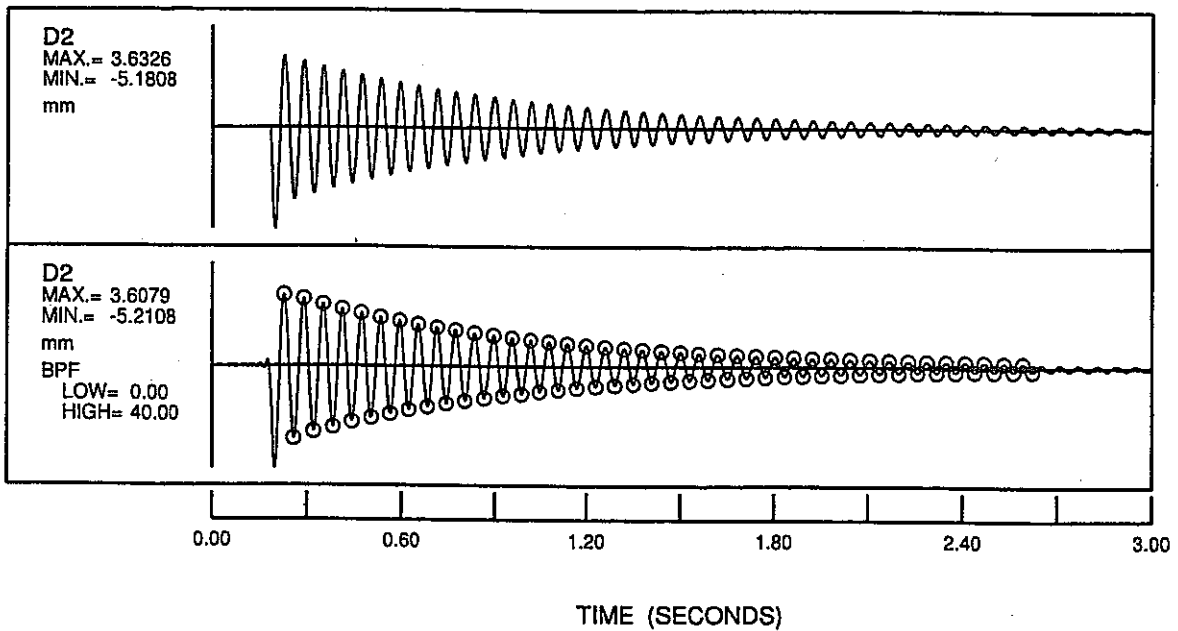
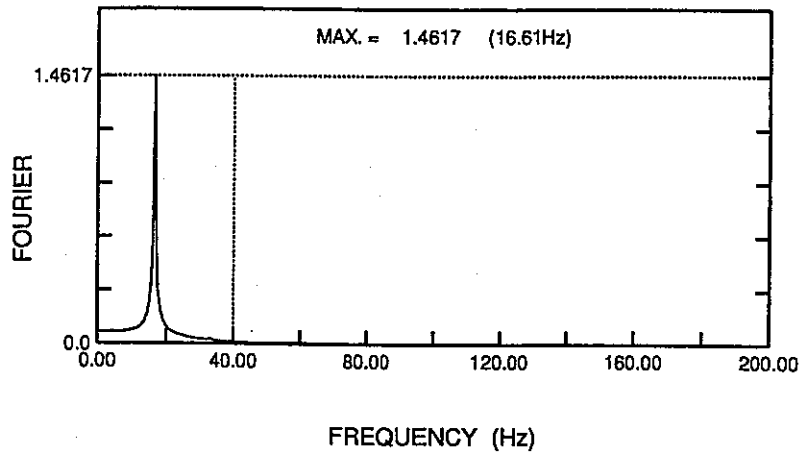
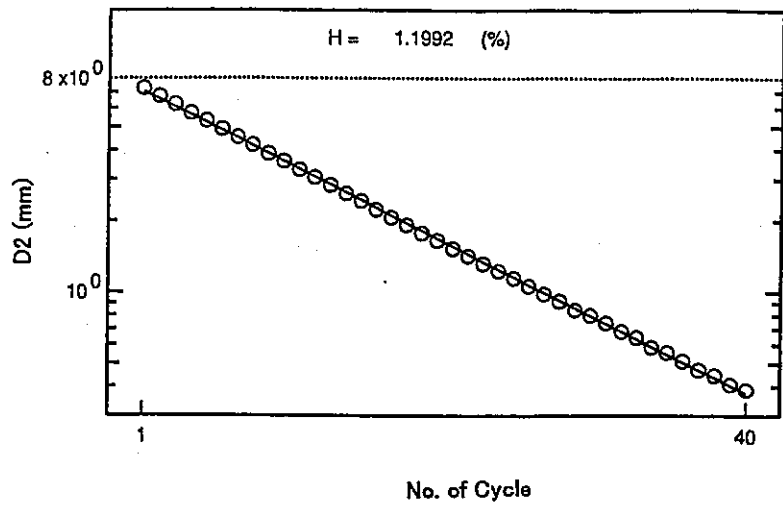


図 3.1-1 固有振動数及び減衰比計測結果(1/5)

FRE30\_04 (D2 )

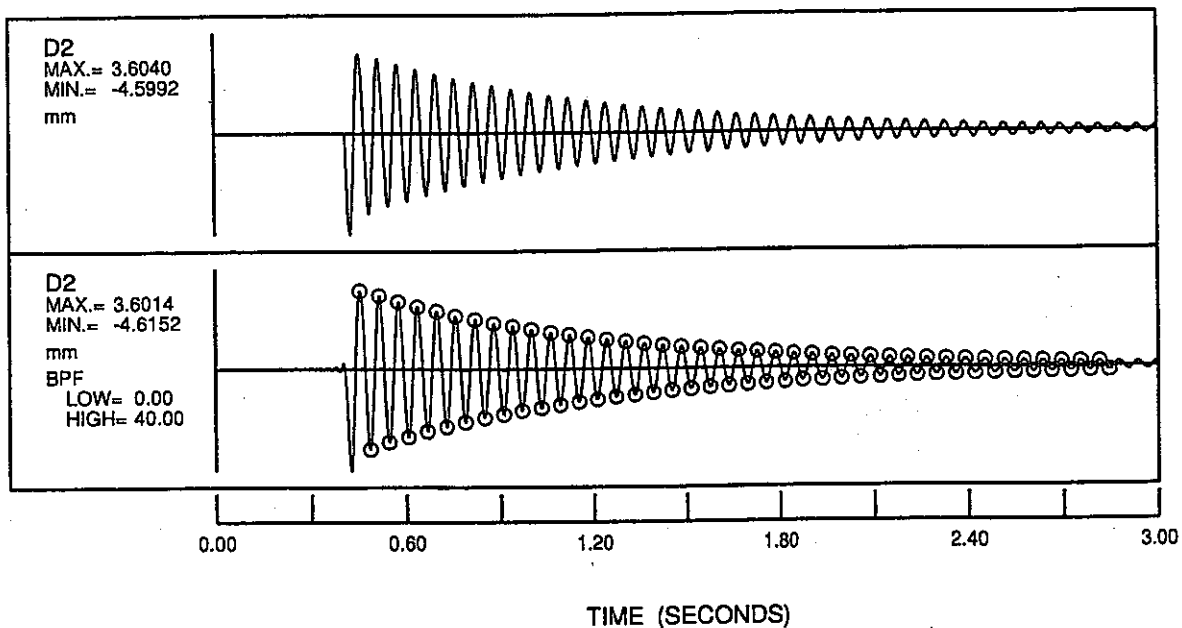
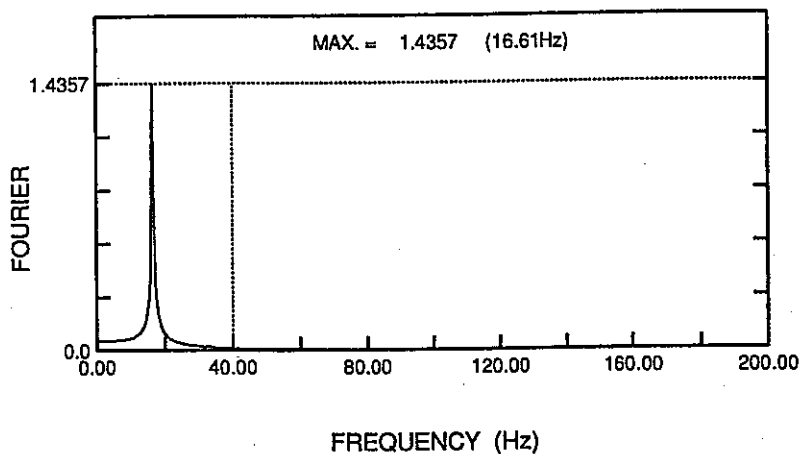
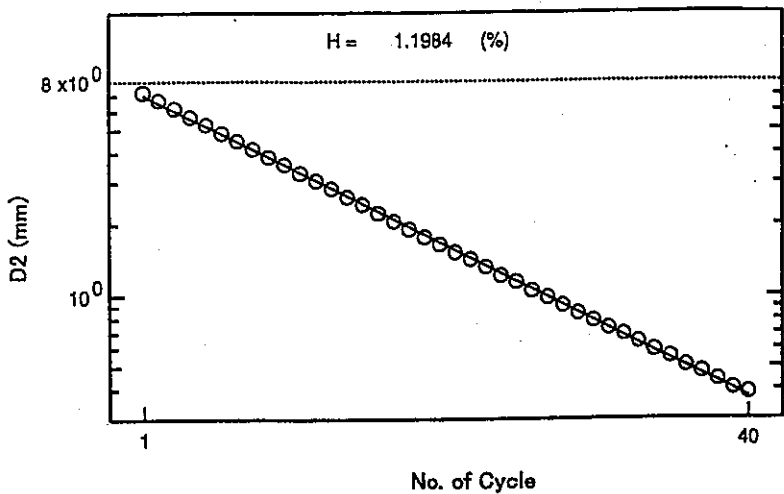


図 3.1-2 固有振動数及び減衰比計測結果(2/5)

FRE30\_05 (D2 )

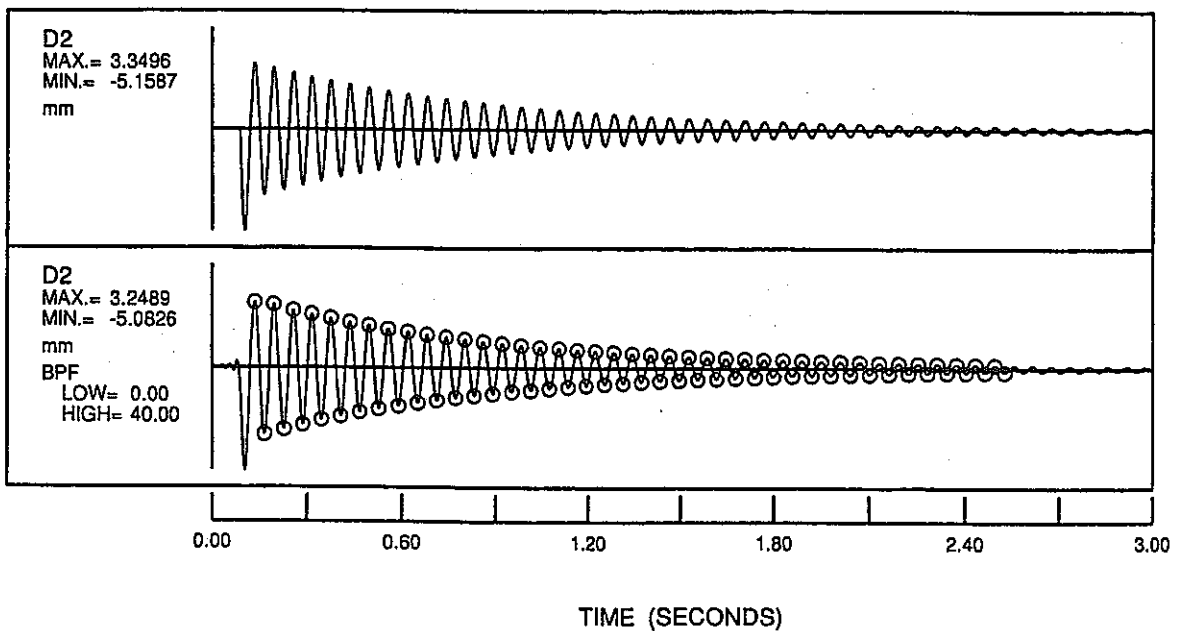
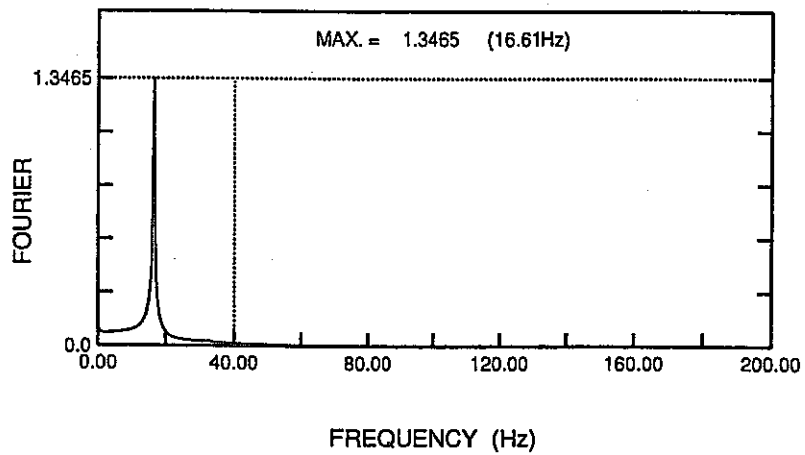
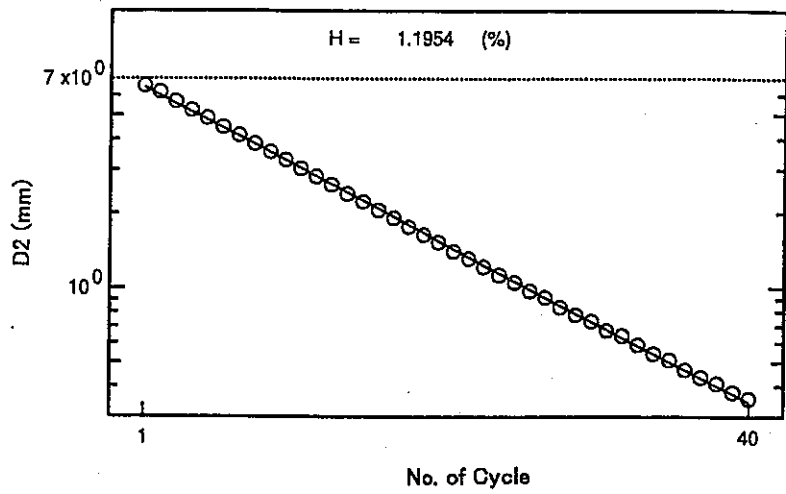


図 3.1-3 固有振動数及び減衰比計測結果(3/5)



FRE30\_06 (D2 )

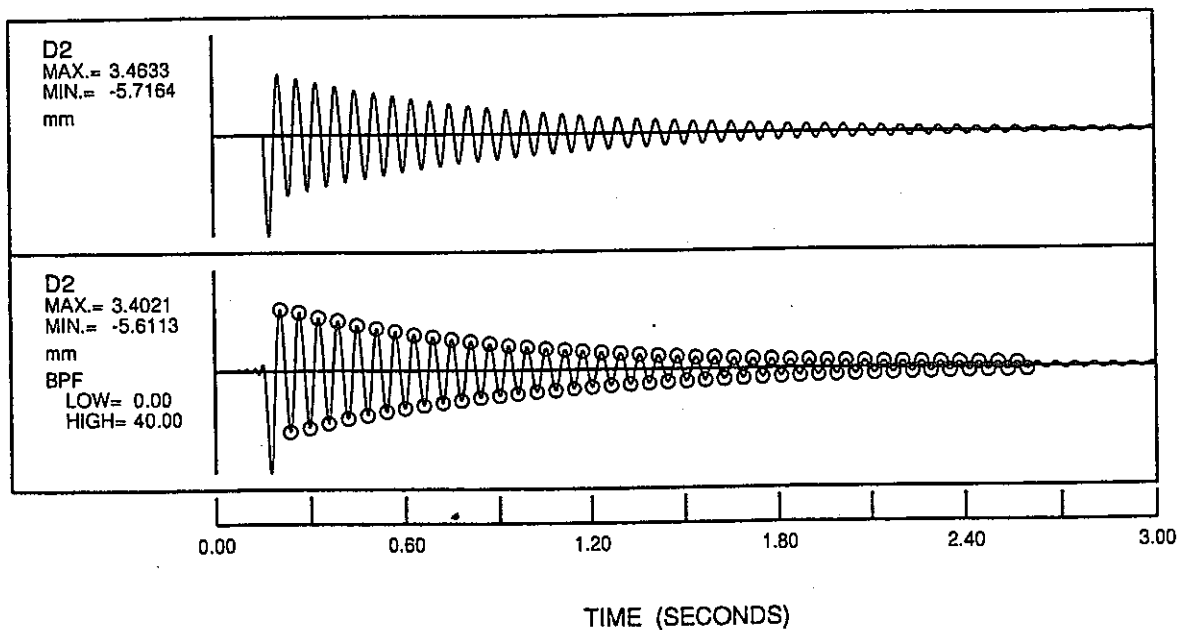
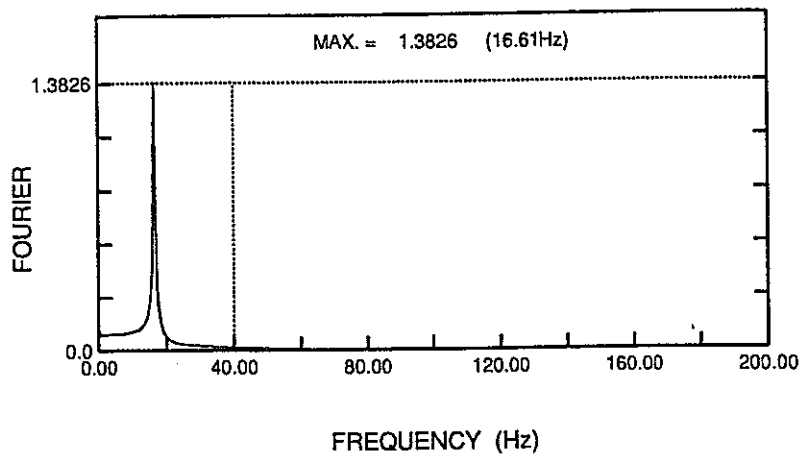
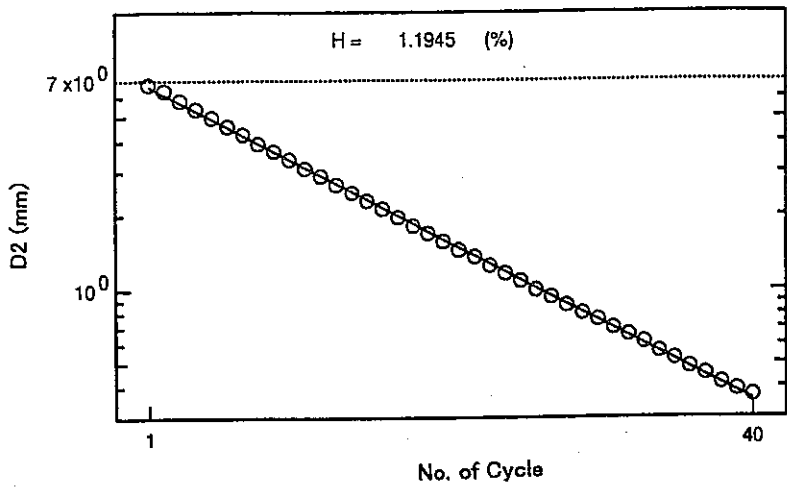


図 3.1-4 固有振動数及び減衰比計測結果(4/5)

FRE30\_07 (D2 )

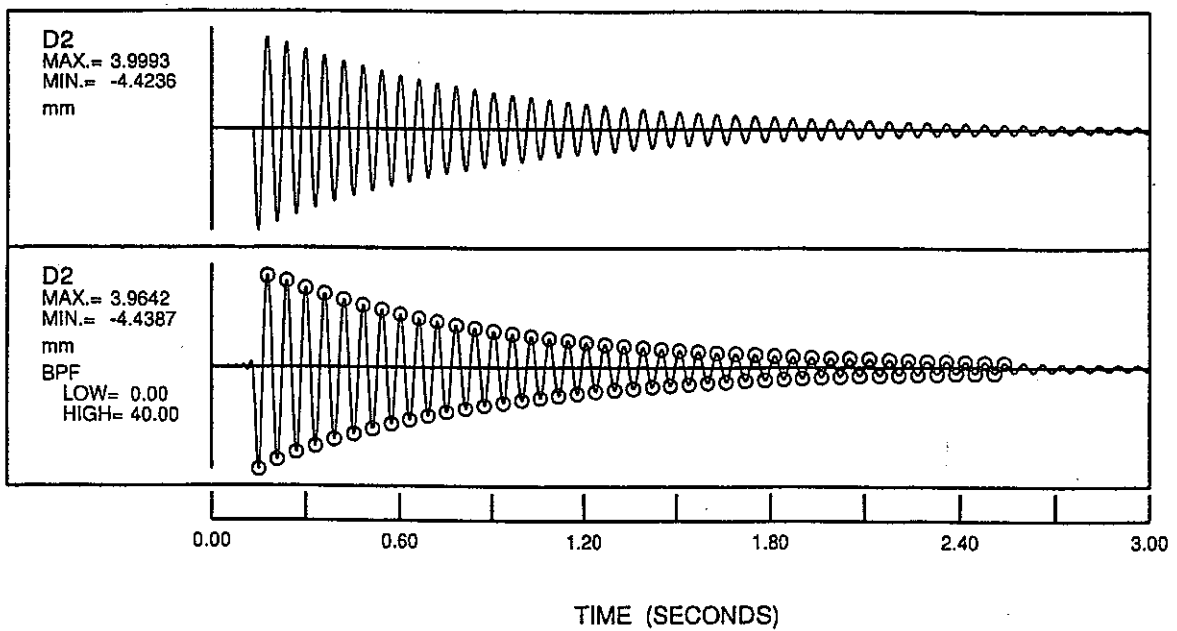
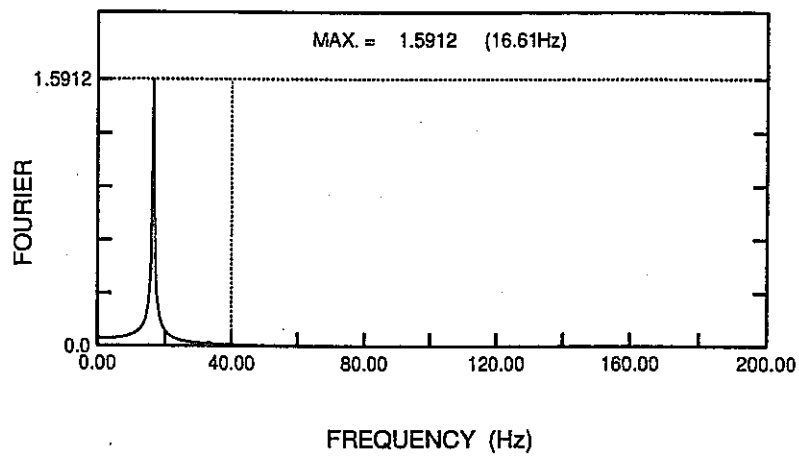
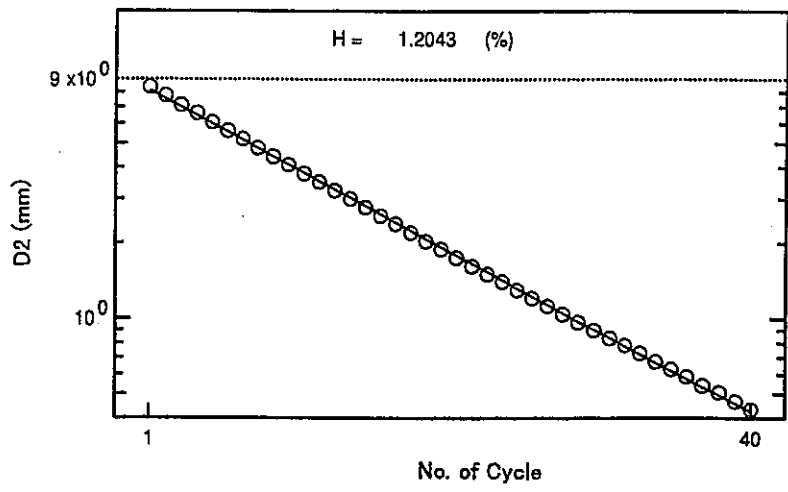


図 3.1-5 固有振動数及び減衰比計測結果(5/5)

## 4. 本試験結果

### 4.1 正弦波掃引試験 \*

#### (1) 周波数応答関数の加振レベルに対する依存性

各ギャップ条件における先端変位(D2)と先端加速度(AX6)の加振加速度(AX1)に対する周波数応答関数(応答倍率)を図 4.1-1(1/12)～4.1-1(12/12)に示す。衝突が発生する試験ケースの各図中に、線形の結果を加えて比較した。

衝突がある場合の卓越振動数は、ギャップ∞の時の卓越振動数とピン支持の場合の卓越振動数の間になる。これは衝突のある振動中では、試験体が衝突していない(ロードセルに接触していない)間は試験体のギャップ∞での固有振動数で振動し、衝突している(ロードセルに接触)間はピン支持の固有振動数で振動しているためと考えられる。

#### ・ギャップ 0 のケース

加振レベルが大きくなるに従い卓越振動数が小さくなるソフトニング特性を有する。振動振幅が小さいと1周期における試験体とロードセルの接触時間が相対的に長く(振幅 0 では常時接触)なり、振動振幅が大きいと相対的に試験体とロードセルの接触時間が短くなり卓越振動数が小さく(ギャップ∞の固有振動数に近づく)なってくるためと考えられる。

#### ・ギャップが 0.4mm 以上のケース

加振レベルが大きくなるに従い卓越振動数が大きくなるハードニング特性を有する。振動振幅が大きいほど1周期における試験体とロードセルの接触時間が相対的に長くなり、卓越振動数が大きく(ピン支持の固有振動数に近づく)なってくるためと考えられる。

---

\* ギャップ量及び加振レベルをパラメータとした正弦波掃引試験の各試験ケースの全チャンネル(加速度:AX1～AX6、変位:D1～2、反力:R1、ひずみ:S1～S6)の時刻歴波形を APPENDIX-E に示す。

加振加速度(AX1)に対する各チャンネル(加速度:AX2～AX6、変位:D1～2、ひずみ:S1～S6)の周波数応答関数を APPENDIX-F に示す。周波数応答関数は、2048 データを切り出し、ハニングウィンドウ処理を行い、75%のオーバーラップ処理で算出した。

また周波数応答関数の形状から、ギャップ 0 のケースでは周波数応答関数が左に倒れており系のソフトニング（応答の増加とともに見かけの剛性が低下する）が、ギャップ 0.4mm 以上のケースでは周波数応答関数が右に倒れるておりハードニング（応答の増加とともに見かけの剛性が増加する）が見られる。

## (2) スイープアップとスイープダウンの周波数応答関数の比較

ギャップ 0mm(G0)の加振レベル 120gal と 240gal, ギャップ 0.4mm(G1), 0.8mm(G2) の加振レベル 240gal の条件で、スイープ UP とスイープ DOWN の周波数応答関数の比較を図 4.1-2(1/8)～4.1-2(8/8)に示す。

全てのケースでスイープ UP の周波数応答関数とスイープ DOWN の周波数応答関数が異なる形をしている。共振の前後でスイープ UP とスイープ DOWN 周波数応答関数が重なるが、衝突が発生する共振近傍ではずれが生じ、振動数に対する応答のヒステリシスがある。スイープ DOWN の周波数応答関数の卓越振動数は、スイープ UP の卓越振動数より低い振動数である。

### ・ギャップ 0 のケース

加振レベルによらず、スイープ DOWN の周波数応答関数の最大応答倍率は、スイープ UP の最大応答倍率より大きい。これは系のソフトニングによる周波数応答関数の跳躍現象のためと考えられる。

### ・ギャップが 0.4mm 以上のケース

スイープ UP の周波数応答関数の最大応答倍率は、スイープ DOWN の最大応答倍率より大きい。これは系のハードニングによる周波数応答関数の跳躍現象のためと考えられる。

## (3) ギャップ量及び加振レベルと卓越振動数の関係

先端変位 (D2) と先端加速度 (AX6) の卓越振動数の、ギャップ量及び加振レベルに対する依存性を整理した。各加振レベルにおける、ギャップ量と卓越振動数の関係を表 4.1-1 及び図 4.1-3 に示す。

この結果から、ギャップが大きくなるに従い卓越振動数はギャップ $\infty$ の固有振動数に近づき、ギャップが小さくなるに従い卓越振動数はピン支持の卓越振動数に近づくことがわかる。

## (4) ギャップ量及び加振レベルと応答倍率の関係

先端変位 (D2) と先端加速度 (AX6) の最大応答倍率の、ギャップ量及び加振レベルに対する依存性を整理した。各加振レベルにおける、先端変位の最大応答倍率(先端変位/入力加速度)とギャップ量の関係、及び先端加速度の最大応答倍率(先端加速度/入力加速度)とギャップ量関係をそれぞれ図 4.1-4(1/2), 4.1-4(2/2)に示す。

この結果、ギャップが相対的に小さいケース(ギャップ 0, 0.4mm)では各加振レベルとも先端の応答倍率はギャップ $\infty$ のケースより小さくなる。ギャップが大きいケース(ギャップ 0.8mm, 1.2mm)ではギャップ $\infty$ のケースと同等の応答倍率となる。

## (5) 応答倍率と減衰比の関係

線形ケースであるギャップ $\infty$  (GI) とピン支持 (GP) の、先端変位 (D2) と先端加速度 (AX1) の周波数応答関数にハーフパワー法を適用し減衰比を算出した(計算結果を APPENDIX-G に示す)。先端変位の応答倍率(先端変位/入力加速度)と減衰比の関係、及び先端加速度の応答倍率(先端加速度/入力加速度)と減衰比関係をそれぞれ図 4.1-5(1/2), 図 4.1-5(2/2)に示す。試験体の減衰比を粘性と仮定すると、減衰比は応答倍率に反比例することを考慮し、近似曲線を図中に示した。

この結果、応答倍率と減衰比の関係は反比例の関係にあり、試験体の減衰は粘性減衰と考えることができる。また、先端加速度の応答倍率と減衰比の関係より、ギャップ $\infty$  とピン支持の応答倍率と減衰比の関係がほぼ一致することがわかる。また、ギャップ $\infty$  とピン支持の先端変位の応答倍率と減衰比の関係には、共振振動数の相違による差がある。(APPENDIX-H 応答倍率から計算される減衰比についてを参照)

## (6) ギャップ量及び加振レベルと等価減衰比の関係

ギャップがある場合の振動形状は、ギャップ $\infty$  (GI) とピン支持 (GP) の間にあると考えられ、GI と GP の刺激係数の差が小さいことから(参照 APPENDIX-H), 図 4.1-5(2/2)のギャップ $\infty$  (GI) とピン支持 (GP) の場合の先端加速度応答倍率と減衰比の関係を用いて、ギャップがある場合の先端加速度の応答倍率から等価減衰比を推定した。この等価減衰比とギャップ量及び加振レベルの関係を図 4.1-6 に示す。

この結果、ギャップ 0mm で加振レベルが小さい(60, 120gal)ケースで等価減衰比は顕

著に大きくなり、ギャップ 0.8mm 以上ではギャップ $\infty$ と同等の減衰比となる。

#### (7) 時刻歴波形の比較

先端変位(D2)と先端加速度(AX6)について、最大応答発生時付近の時刻歴波形の、ギャップ量による比較を図 4.1-7(1/10)~4.1-7(10/10)に示す。試験ケースによって掃引振動数範囲が異なるため、卓越振動数付近の 100sec 間を拡大して示す。表示開始及び表示終了時刻の加振振動数を図中に示す。また、表示時刻が図下部の時刻と異なる場合は、各図中に表示開始時刻と表示終了時刻を示す。

この結果からもギャップが大きくなるに従い卓越振動数はギャップ $\infty$ の固有振動数に近づき、ギャップが小さくなるに従い卓越振動数はピン支持の卓越振動数に近づくことがわかる。

#### (8) 反力と変位のヒステリシス

反力と衝突部変位のヒステリシスにより、見かけの剛性の加振振動数に対する依存性を検討した。ギャップ 0.4mm, 加振レベル 240gal, スイープ UP のヒステリシスを図 4.1-8(1/6), (2/6)に、ギャップ 0mm, 加振レベル 240gal, スイープ UP のヒステリシスを図 4.1-8(3/6), (4/6)に、ギャップ 0mm, 加振レベル 120gal, スイープ DOWN のヒステリシスを図 4.1-8(5/6), (6/6)に示す。

この結果、全ての図よりヒステリシスが折れ曲がる傾向が得られ、反力と衝突部変位の関係のデータが精度良く得られていることが分かる。ヒステリシスの角の内側が鈍くなっているが、これはサンプリングの制約(サンプリング振動数 200Hz)から速度が大きい衝突直前及び直後に計測データが無くなり、衝突前のサンプリングデータと衝突後のサンプリングデータを直線で結んでいるためである。

##### ・ギャップ0mm のケース

応答が大きくなるに従い見かけの剛性が低下(図中変位最大の点と反力最大の点を結んだ一点鎖線の傾きが減少)する。

##### ・ギャップ 0.4mm 以上のケース

応答が大きくなるに従い見かけの剛性が増加(図中一点鎖線の傾きが増加)する。

以上より、ギャップ0のケースではソフトニング、ギャップ 0.4mm 以上のケースではハードニング現象が起きていることを衝突部の反力-変位特性からも確認できた。

## 4.2 定常正弦波加振試験

掃引試験(各ギャップ条件, 加振レベル 240gal)における卓越振動数での正弦波定常加振試験結果を以下に示す。

### (1) 時刻歴波形

各ギャップ条件で衝突力の大きいケースの時刻歴波形の約2周期分を図 4.2-1(1/6)～4.2-1(6/6)に示す。この波形は計測時にカットオフ振動数 100Hz のアンチエイリアシングフィルタ処理をしている。図中に衝突部反力のパルス出力継続時間を記す。

変位, 反力及びひずみに対して, 加速度は $40^\circ$ 程度の位相ずれが見られる。これは圧電式の加速度計及びチャージアンプで計測した加速度に発生しており計測系またはデータ収録系の特性によるものと考えられる。(参照 APPENDIX-D 圧電式加速度計によって計測した加速度波形の位相ずれ)

衝突がある試験ケースの波形には高次の振動波形が含まれている。参考として, 高次の振動を除去するためにカットオフ振動数 30Hz のローパスフィルタ処理した時刻歴波形を APPENDIX-I に示す。但し, 衝突発生時点を明確にするため, 変位と反力についてはカットオフ振動数 100Hz で固定した。

### (2) 最大応答値の高さ方向分布

各ギャップ条件におけるひずみ, 変位及び加速度の最大応答値(図 4.2-1(1/6)～(6/6)の最大値)の試験体の高さ方向分布を図 4.2-2(1/5)に示す。また, カットオフ振動数 30Hz のローパスフィルタ処理によって高次の振動を除去したひずみ, 加速度(参照 APPENDIX-I)の最大応答値の試験体の高さ方向分布を図 4.2-2(2/5)に示す。

また, ギャップ $\infty$ とピン支持における加速度(変位)分布, ひずみ分布(カットオフ振動数 30Hz のローパスフィルタ処理した波形の最大応答値の分布)の試験結果と解析結果との比較をそれぞれ図 4.2-2(3/5), (4/5)に示す。ここで, 解析は変位計ターゲットの質量及び拘束板の質量, 剛性を推定(板厚 93%相当の剛性, 拘束板端部は拘束板の剛性をモデル化しない)によりモデル化したモード解析とした。解析の詳細を5章に示す。

ピン支持において, 掃引加振と定常加振の応答加速度最大値より求めた加速度モードの比較を図 4.2-2(5/5)に示す。

この結果、はりに発生する各部のひずみは、衝突部より上部ではピン支持の場合が最も大きく、衝突部より下部ではギャップ $\infty$ の場合が最も大きい。

・カットオフ振動数 100Hz のローパスフィルタ処理での分布

ギャップ 0mm の試験ケースの加速度分布では、AX5(高さ 550mm)がその下の計測位置 AX4(高さ 394mm)より小さい。これは、ギャップ 0mm の試験ケースの時刻歴波形に加振振動数より高い振動波形が含まれていることから、衝突によって生じる高次振動モードの影響であると考えられる。(解析結果によれば、ギャップ $\infty$ の 2 次振動数は 109Hz となる。)

・カットオフ振動数 30Hz のローパスフィルタ処理での分布

ギャップがある (0, 0.4, 0.8, 1.2mm) 場合の加速度分布も、先端ほど大きい加速度分布になり、ギャップ $\infty$ に類似した分布となる。また、時刻歴波形の高振動数成分も除去されている。よって、カットオフ振動数 30Hz のローパスフィルタによって、衝突によって生じる高次の振動を除去し、1次モードのみの振動を抽出することができると考えられる。

・拘束板端部でのひずみの不連続

実験結果のひずみ分布の固定端部より 230mm 付近に不連続がある。これは、拘束板を考慮した解析結果において、拘束板端部位置でひずみ分布が不連続となることとほぼ一致する。このため、実験結果のひずみ分布にある不連続は、拘束板の剛性の影響であると言える。よって、シミュレーション解析においては拘束板の剛性を考慮したモデル化が必要である。

(3) 衝突反力と衝突部変位のヒステリシス

定常加振(ギャップ 0mm(G0), 0.4mm(G1), 0.8mm(G2), 1.2mm(G3), 240gal)における、反力と衝突部変位のヒステリシスを図 4.2-3 に示す。図中にピン支持の反力の範囲を併記した。

この結果より、衝突部の変位(D1)がほぼ設定したギャップの大きさになったときに衝突が発生していることが確認できた。また、ギャップサイズが大きいほど発生する反力は小さく、ギャップ 0 の場合に最も大きくなる。これは、ギャップサイズが大きいほど衝突速度が小さくなるためであると考えられる。反力が最大となるギャップ 0 の場合では、ピン支持し



た場合の支持反力の 1.7 倍の衝突力となる。

#### (4) 反力のスペクトル

定常加振時の、衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトルを図 4.2-4(1/4)～(4/4)に示す。反力波形はパルス状に発生するため、2, 3, 4, …倍の倍調波がスペクトルに現れる。反力波形のFFTに変位波形のFFTよりも強い倍調波が現れる。これは、変位時刻歴波形が衝突(接触)していない時間でギャップ $\infty$ の正弦波となるのに対し、反力時刻歴波形は 0 で一定となるためである。(図 4.2-1(4/6)の D1 と R1 を比較) また、ギャップが大きい(ギャップ 0.8mm, 1.2mm)場合には衝突時間が短く、変位波形はピークが少しつぶれるだけであるから、変位波形のFFTスペクトルでは加振振動数のスペクトルに対して倍調波のスペクトルが相対的に小さくなる。

### 4.3 正弦波加振加速度掃引試験

#### (1) 加振振動数と衝突開始／終了の加振加速度

加振加速度掃引試験結果より得られた、各加振振動数での加振加速度と試験体の衝突の開始／終了時点の関係を図 4.3-1 に示す。ここで、衝突の開始と終了は衝突部での反力により判定した。

この結果、加振振動数が 16Hz では衝突開始と終了の加振加速度が一致するが、17Hz 以上では衝突開始よりも衝突終了の加振加速度が小さい。また、加振振動数が高いほど衝突開始と終了の加振加速度の差が大きいことがわかる。

以上の結果の考察を以下に示す。

加振加速度掃引試験結果の先端変位応答の概念図を図 4.3-2 に示す。図中の曲線はギャップ 0.4mm の条件での振動数掃引試験結果より推定した先端変位の周波数応答曲線である。

振動数掃引試験結果より推定した先端変位の周波数応答曲線は、加振加速度が大きいほど上方に位置する(図中 加振加速度小:曲線 a→加振加速度大:曲線 e)と考えられる。また、振動数掃引試験結果より、加振振動数 17Hz 以上で周波数応答曲線の跳躍現象が見られたため、図中曲線の波線部分に不安定領域があると考えられる。

これらの曲線と比較し、加振加速度掃引試験での先端変位の応答履歴を次のように推定した。

- ・加振振動数が 17Hz 以上の場合(ギャップ∞での固有振動数約 16.5Hz 以上の場合)
  - 1)加振加速度が小さい場合、衝突は生じない(図中①の位置)
  - 2)加振加速度が徐々に上昇すると先端変位応答は増加する(図中①→②方向移動)
  - 3)加振加速度があるレベルに達し、そのレベルでの周波数応答曲線(図中曲線 b)の不安定領域に到達(図中②)すると衝突が開始し、応答は跳躍現象を示す(図中③)。この時跳躍後の応答は跳躍前と同一の周波数応答曲線上になると考えられる。
  - 4)さらに加振加速度が上昇すると、衝突を有した状態で応答が増加する。
  - 5)衝突を有する状態から加振加速度を低下させると衝突が発生した状態で応答が低下する(図中③→④)。
  - 6)加振加速度があるレベルまで低下し、そのレベルでの周波数応答曲線(図中曲線 a)

の不安定領域に到達(図中④)すると衝突が終了し、応答は跳躍現象を示す(図中⑤)。この時跳躍後の応答は跳躍前と同一の周波数応答曲線上になると考えられる。

この結果、衝突開始の加振加速度レベル(図中曲線 b)が衝突終了の加振加速度レベル(図中曲線 a)より大きくなると考えられる。また加振振動数が大きくなる(図中①'→⑤')と不安定領域の幅が大きくなるため、衝突開始の加振加速度と衝突終了の加振加速度の差が大きくなると考えられる。

・ 加振振動数が 17Hz 以下の場合

この領域では、周波数応答曲線に不安定領域が無いいため、加振加速度掃引試験においても跳躍現象は発生しない。したがって、衝突開始の加振加速度と衝突終了の加振加速度は一致する。

以上のような挙動により、加振加速度掃引試験では図 4.3-1 に示すような結果となつたと考えられる。

(2) 衝突開始加振加速度の推定値との比較

ギャップ∞の振動数掃引試験結果より、加速度掃引試験の衝突開始加速度を推定できるか検討するため、以下の方法で衝突開始加振加速度を推定し、加振加速度掃引試験結果と比較した。その結果を表 4.3-1 に示す。

- a. 衝突部変位(D1)が 0.47mm(ギャップ量実測値, 参照 図 4.3-3)となる時の先端変位(D2)及び先端加速度(AX6)を、ギャップ∞の振動モードから算出
- b. ギャップ∞の振動数掃引試験結果の周波数応答関数より、各加振振動数における D2 及び AX6 の加振加速度に対する応答倍率を求める。
- c. a.で算出した衝突開始時(D1=0.47)の D2 及び AX6 を、b.で算出した各振動数の応答倍率(D2/AX1 及び AX6/AX1))で除算し、各加振振動数における衝突開始時の加振加速度を推定

この結果より、推定した衝突開始加速度と加振加速度掃引試験結果には 10%~30%の差が有る。これは、加振加速度掃引試験での応答倍率と振動数掃引試験での応答倍

率が異なっていたためであると考えられる。しかし、この応答倍率の差は試験ケースの違いによるばらつきと判断した。

表4.1-1 ギャップ量及び加振レベルと卓越振動数の関係

ギャップ量 mm	掃引 方向	卓越振動数 Hz			
		加振レベル gal			
		60	120	180	240
ピン支持	UP	26.6	26.6	26.6	26.5
0	UP	24.3	22.3	20.8	20.4
	DOWN	—	20.7	—	20.4
0.4	UP	—	17.2	18.0	18.3
	DOWN	—	—	—	17.1
0.8	UP	—	—	16.8	17.7
	DOWN	—	—	—	16.6
1.2	UP	—	—	—	16.8
$\infty$	DOWN	16.7	16.6	16.6	16.6

表4.3-1 加振加速度掃引試験結果と推定値の比較

振動数 Hz	衝突開始加振加速度 gal (加振加速度掃引 試験結果)	衝突開始加速度推定値* gal		応答倍率 (GI-4U2)	
		D2から算定	AX6から算定	D2/AX1 mm/gal	AX6/AX1 gal/gal
15.0	衝突無し (400以上)	434	465	0.0063	7.29
16.0	141	195	205	0.0141	16.55
17.0	123	108	111	0.0255	30.59
17.5	281	232	235	0.0119	14.42
18.0	413	369	371	0.0074	9.15
18.5	衝突無し (483以上)	525	521	0.0052	6.50

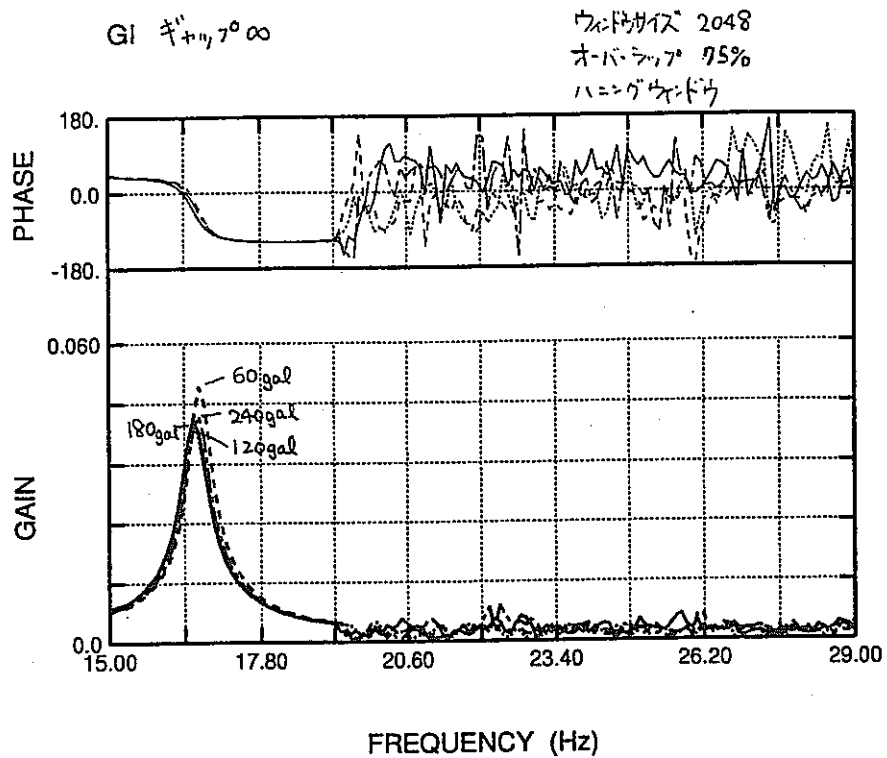
\*)下記の方法で推定した。

衝突部変位(D1)がギャップ0.47mm(実測値)と等しくなる時の先端変位(D2)と先端加速度(AX6)はギャップ∞の振動モード形状より以下のとおり。

D2 : 2.75 mm

AX6 : 3390 gal

ギャップ∞、240gal加振の振動数掃引試験(試験ケースGI-4U2)の周波数応答関数より求めた各加振振動数における応答倍率で、上記のD2、AX6(D1=0.47)を除算



<p>120gal D2-2 A1-2</p> <p>MAX. = 0.0448 (16.57Hz)</p>	<p>180gal D2-3 A1-3</p> <p>MAX. = 0.0441 (16.57Hz)</p>
<p>D2-1 A1-1 60gal</p> <p>MAX. = 0.0514 (16.66Hz)</p>	<p>D2-4 A1-4 240gal</p> <p>MAX. = 0.0456 (16.66Hz)</p>

図 4.1-1(1/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 (キップ∞、先端変位)

GI  $\ddot{x} = 700$

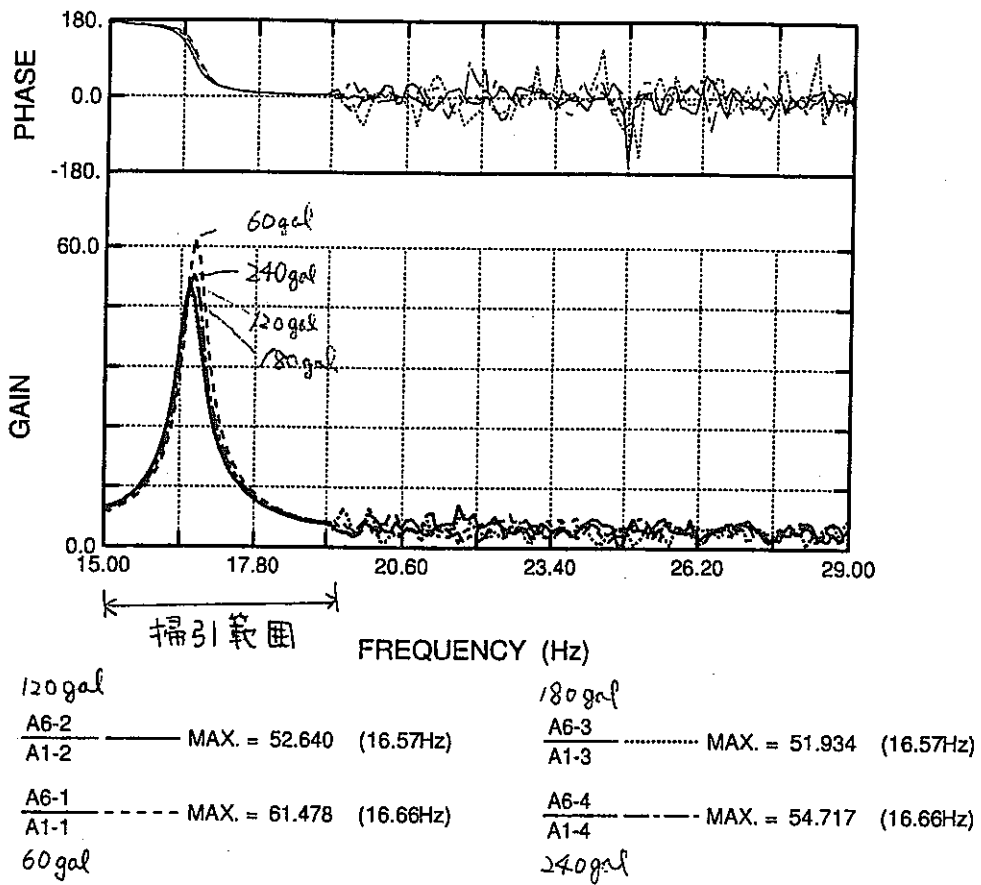
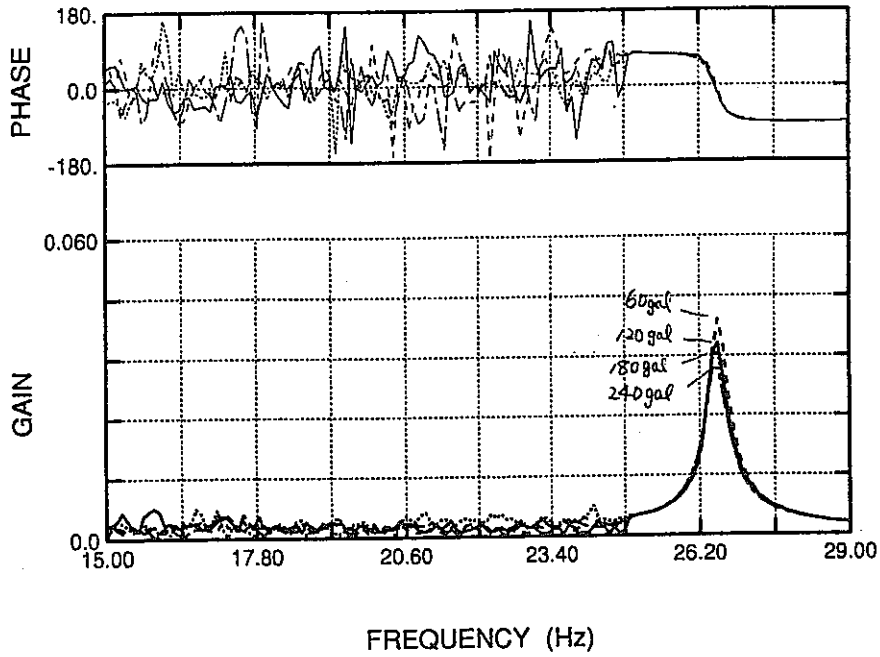


図 4.1-1(2/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 ( $\ddot{x} = 700$ 、先端加速度)



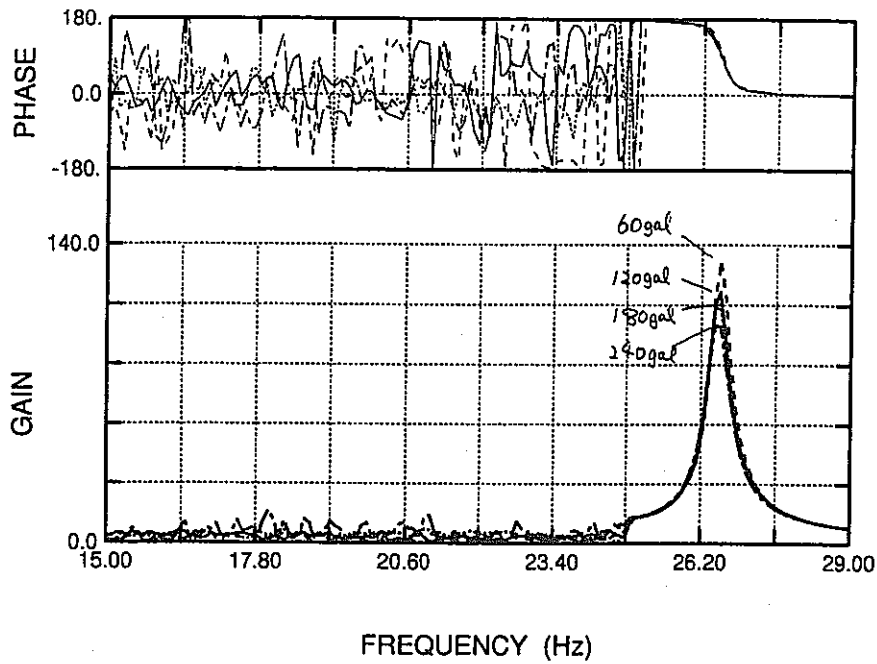
GP ヒール支持



$\frac{D2-2}{A1-2}$ ——— MAX. = 0.0387 (26.55Hz)	$\frac{D2-3}{A1-3}$ ..... MAX. = 0.0367 (26.55Hz)
$\frac{D2-1}{A1-1}$ - - - - - MAX. = 0.0434 (26.55Hz)	$\frac{D2-4}{A1-4}$ - - - - - MAX. = 0.0335 (26.45Hz)

図4.1-1(3/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ピン支持、先端変位)

GP ピン支持



$\frac{A6-2}{A1-2}$ ——— MAX. = 118.30 (26.55Hz)	$\frac{A6-3}{A1-3}$ ..... MAX. = 112.39 (26.55Hz)
$\frac{A6-1}{A1-1}$ - - - - - MAX. = 132.62 (26.55Hz)	$\frac{A6-4}{A1-4}$ - - - - - MAX. = 102.34 (26.45Hz)

図4.1-1(4/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性(ピン支持、先端加速度)

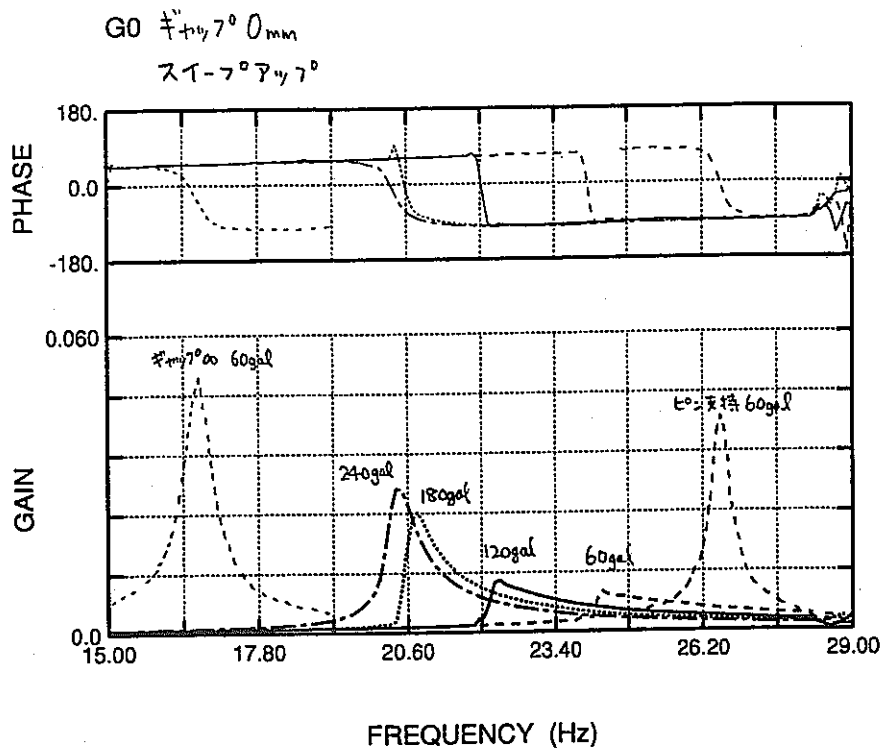
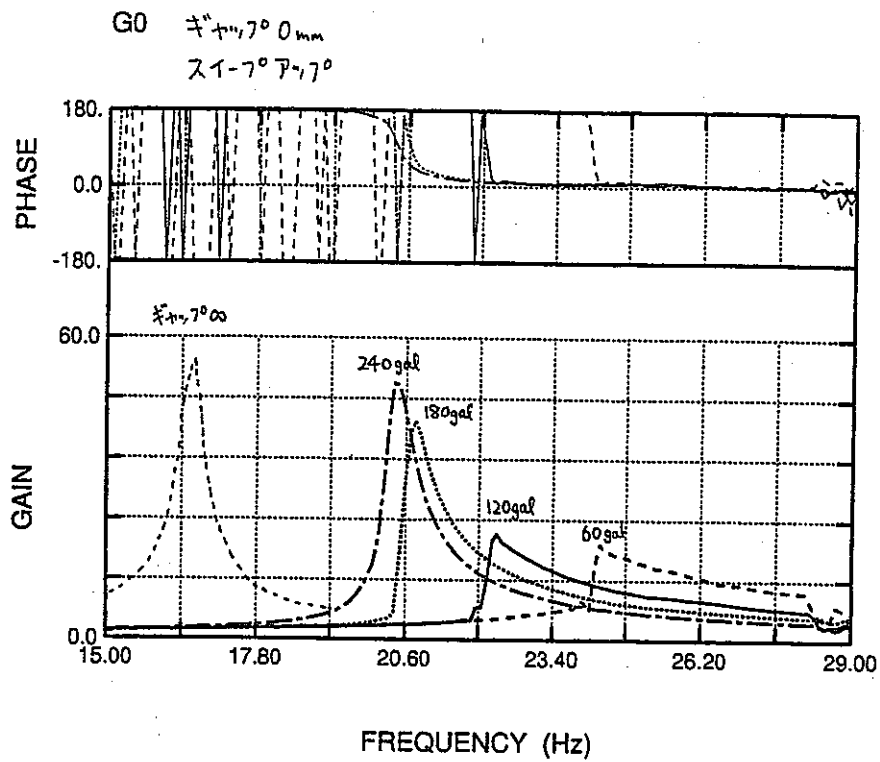
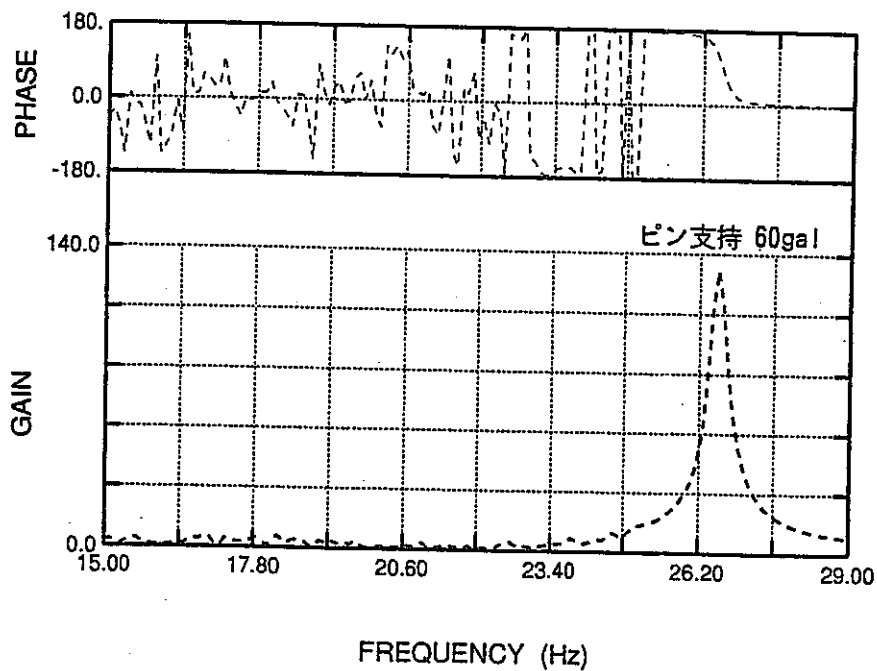


図 4.1-1(5/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 ( $\xi_{\text{トップ}} 7^\circ 0$ 、先端変位)



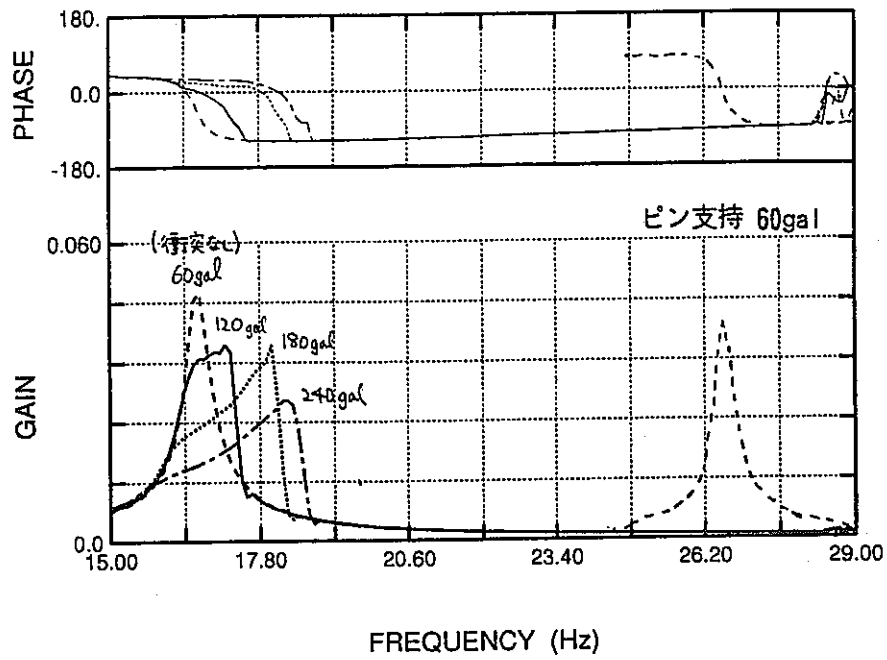
$\frac{A6-2}{A1-2}$ ——— MAX. = 21.162 (22.34Hz)	$\frac{A6-3}{A1-3}$ ..... MAX. = 43.567 (20.78Hz)
$\frac{A6-1}{A1-1}$ - - - - - MAX. = 19.212 (24.30Hz)	$\frac{A6-4}{A1-4}$ - - - - - MAX. = 51.066 (20.38Hz)



$\frac{A6-1}{A1-1}$ - - - - - MAX. = 132.62 (26.55Hz)
---

図 4.1-1(6/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 (キップ0、先端加速度)

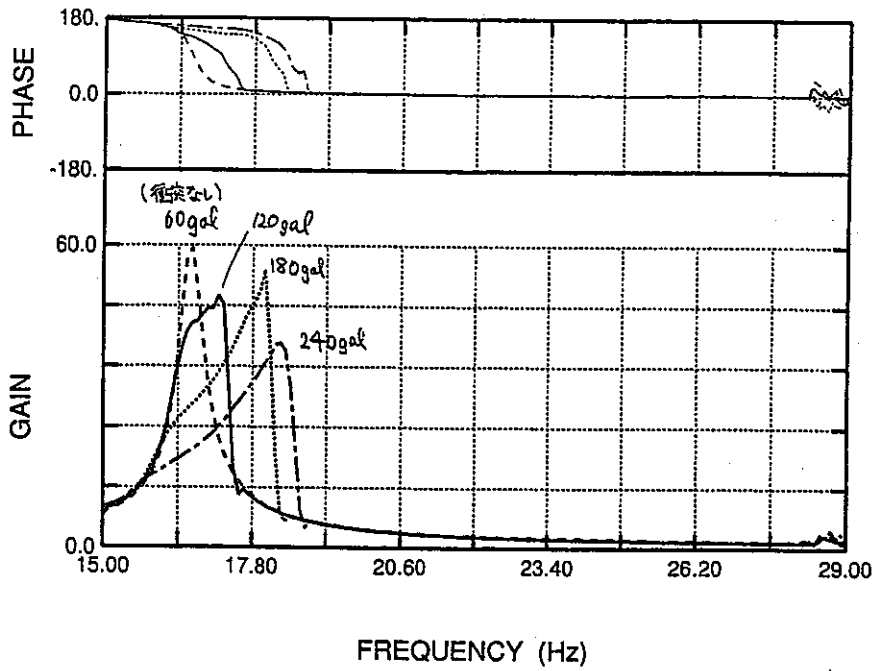
G1  $\pm$   $\gamma$   $7^\circ$  0.4mm



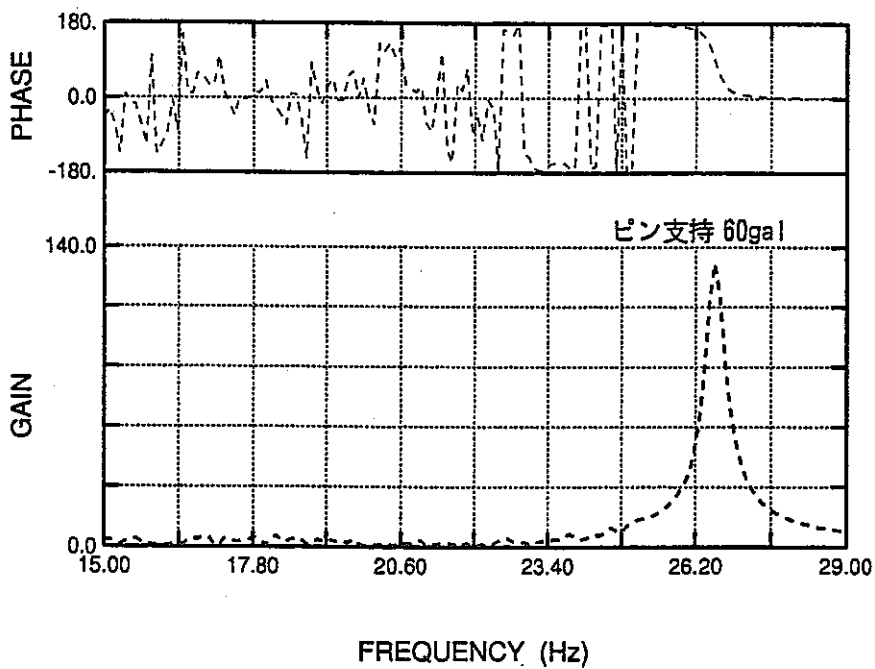
$\frac{D2-2}{A1-2}$ ——— MAX. = 0.0396 (17.15Hz)	$\frac{D2-3}{A1-3}$ ..... MAX. = 0.0395 (18.03Hz)
$\frac{D2-1}{A1-1}$ - - - - - MAX. = 0.0500 (16.66Hz)	$\frac{D2-4}{A1-4}$ - - - - - MAX. = 0.0283 (18.33Hz)

図 4.1-1(7/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 ( $\pm$   $\gamma$   $7^\circ$  0.4mm、先端変位)

G1 キヤップ<sup>0.4mm</sup>



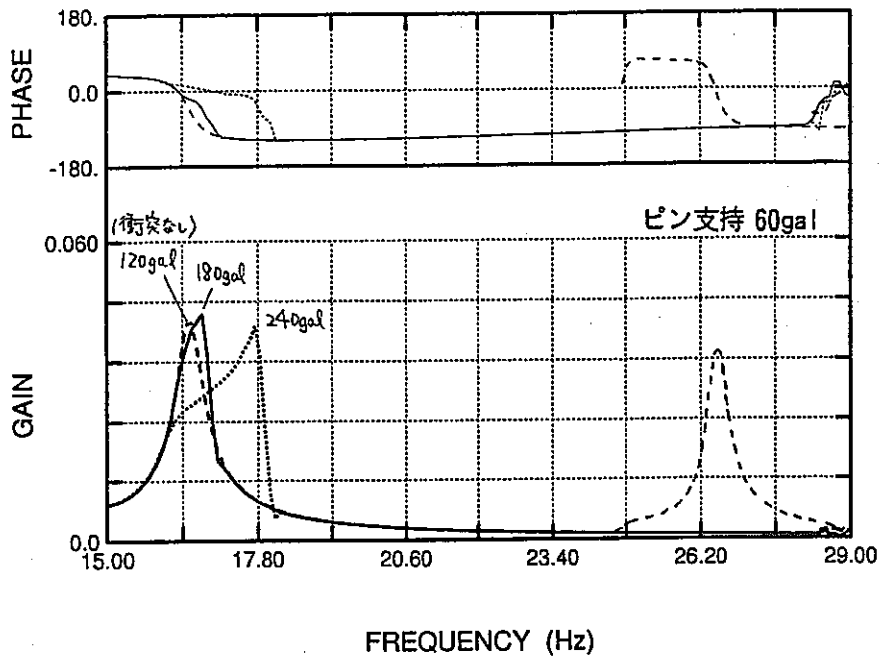
$\frac{A6-2}{A1-2}$ ———	MAX. = 50.046	(17.15Hz)	$\frac{A6-3}{A1-3}$ - - - - -	MAX. = 55.176	(18.03Hz)
$\frac{A6-1}{A1-1}$ - - - - -	MAX. = 59.542	(16.66Hz)	$\frac{A6-4}{A1-4}$ - - - - -	MAX. = 40.660	(18.33Hz)



$\frac{A6-1}{A1-1}$ - - - - -	MAX. = 132.62	(26.55Hz)
-------------------------------	---------------	-----------

図 4.1-1(8/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 (キヤップ<sup>0.4mm</sup>、先端加速度)

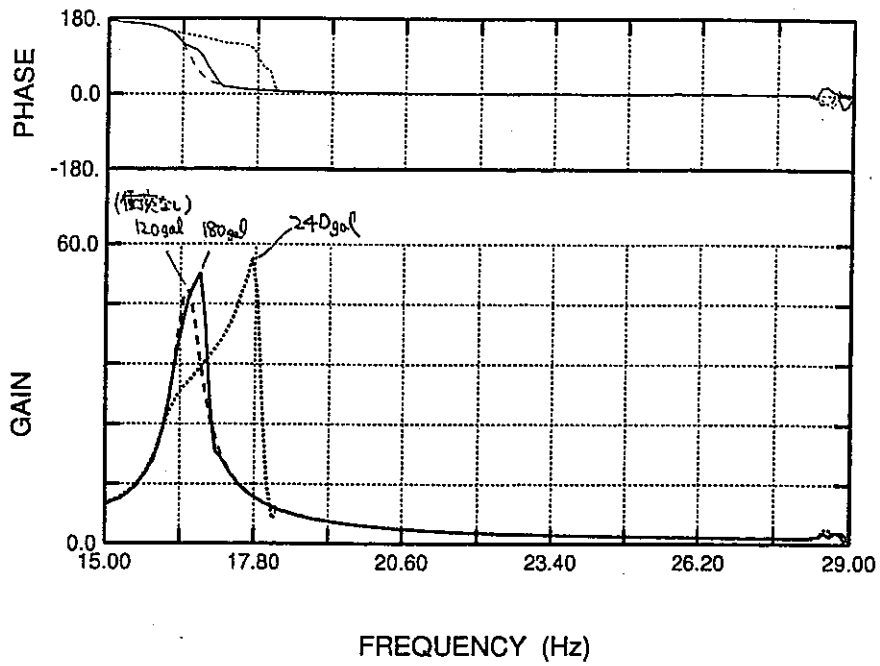
G2 キップ<sup>0</sup> 0.8mm



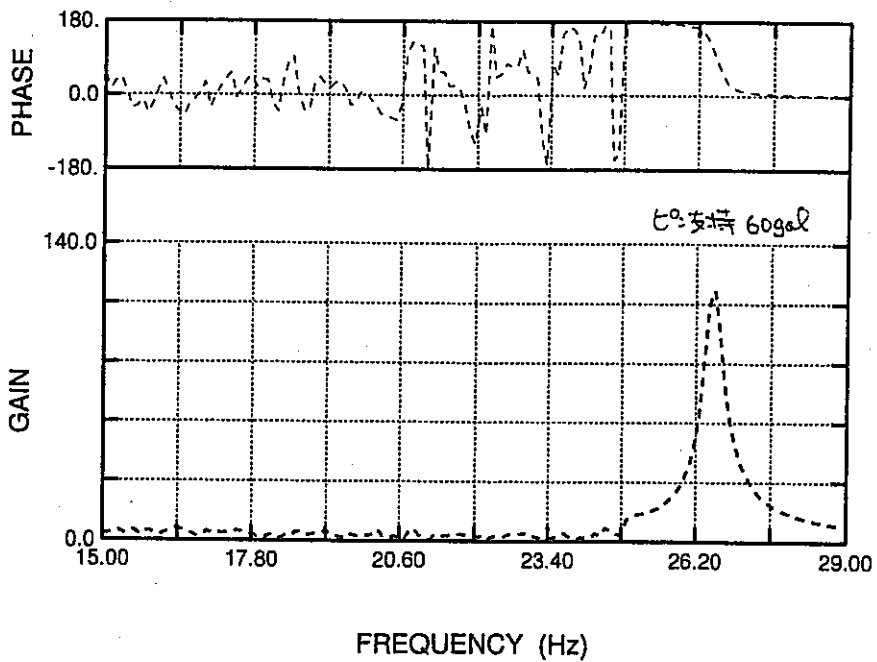
$\frac{D2-3}{A1-3}$	——	MAX. = 0.0455	(16.76Hz)	$\frac{D2-4}{A1-4}$	-----	MAX. = 0.0430	(17.74Hz)
$\frac{D2-2}{A1-2}$	----	MAX. = 0.0438	(16.57Hz)				

図 4.1-1(9/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 (キップ<sup>0</sup> 0.8mm、先端変位)

G2 ギャップ 0.8 mm



$\frac{A6-3}{A1-3}$ ———	MAX. = 54.160 (16.76Hz)	$\frac{A6-4}{A1-4}$ - - - - -	MAX. = 57.337 (17.74Hz)
$\frac{A6-2}{A1-2}$ - - - - -	MAX. = 50.661 (16.57Hz)		

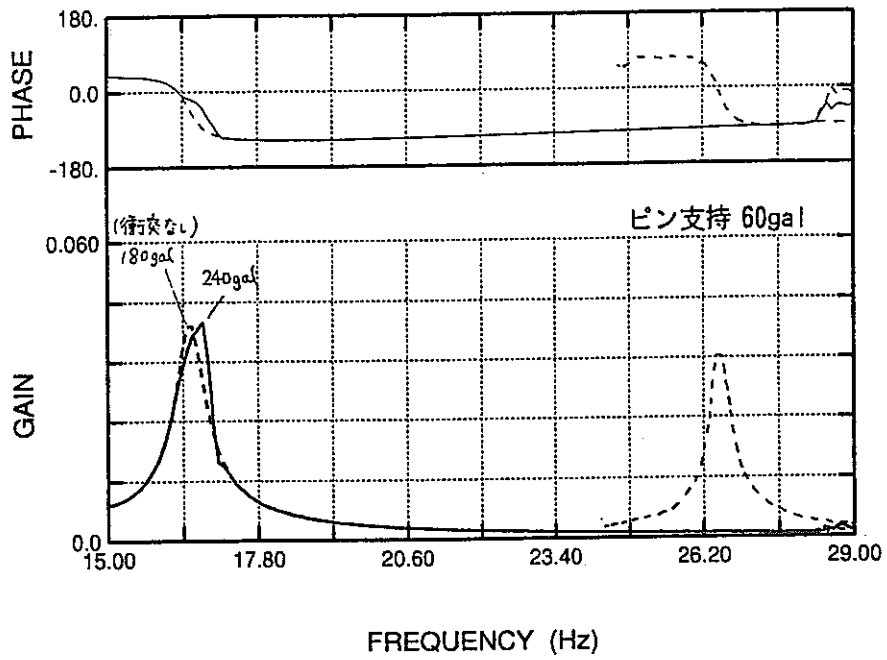


$\frac{A6-4}{A1-4}$ - - - - -	MAX. = 118.30 (26.55Hz)
-------------------------------	-------------------------

図 4.1-1(10/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 (ギャップ 0.8mm、先端加速度)



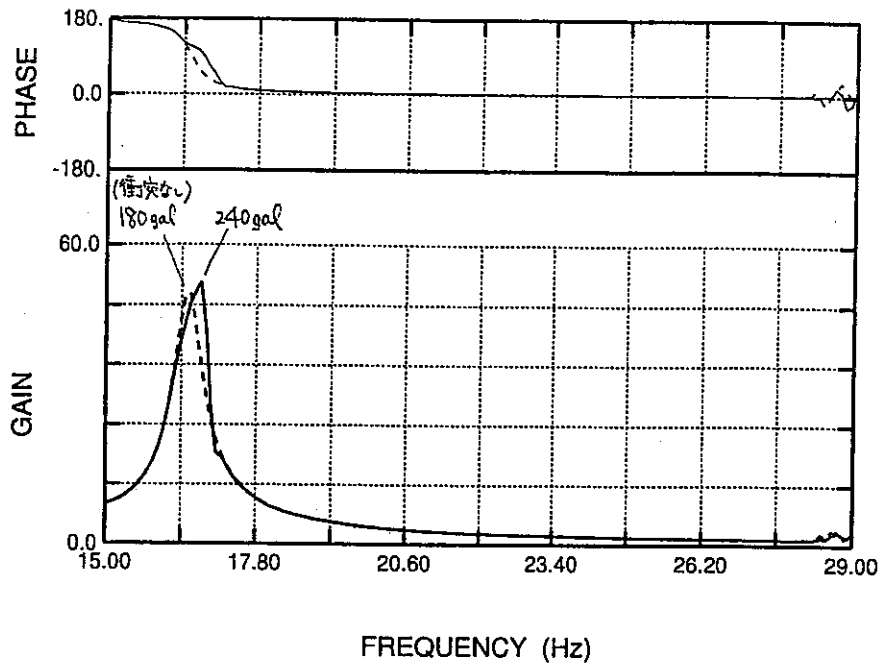
G3  $\xi_{\text{トップ}} 1.2\text{mm}$



D2-4	——	MAX. = 0.0439	(16.76Hz)
A1-4			
D2-3	----	MAX. = 0.0432	(16.57Hz)
A1-3			

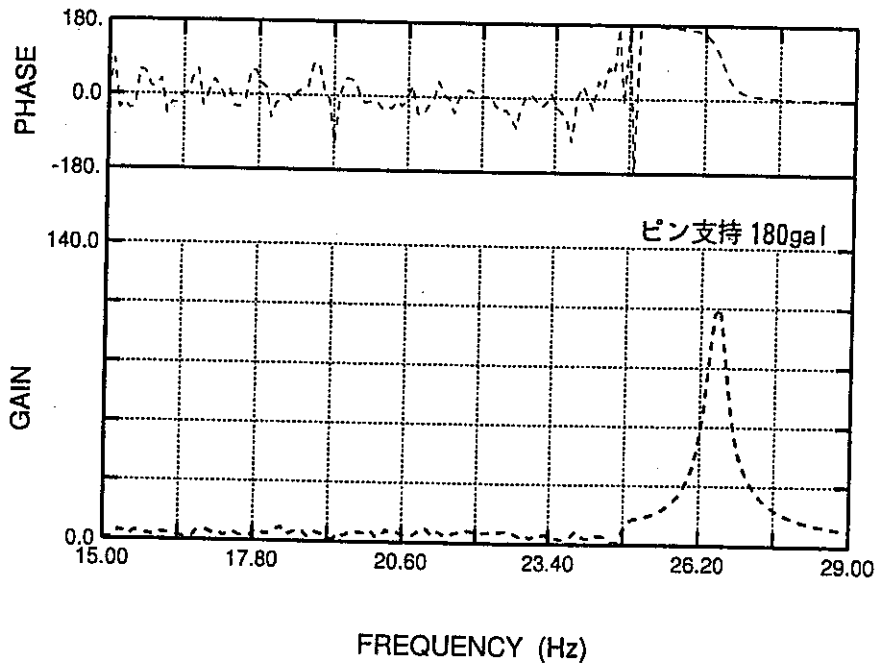
図 4.1-1(11/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 ( $\xi_{\text{トップ}} 1.2\text{mm}$ 、先端変位)

G3 キップ 1.2mm



A6-4 / A1-4 ——— MAX. = 52.474 (16.76Hz)

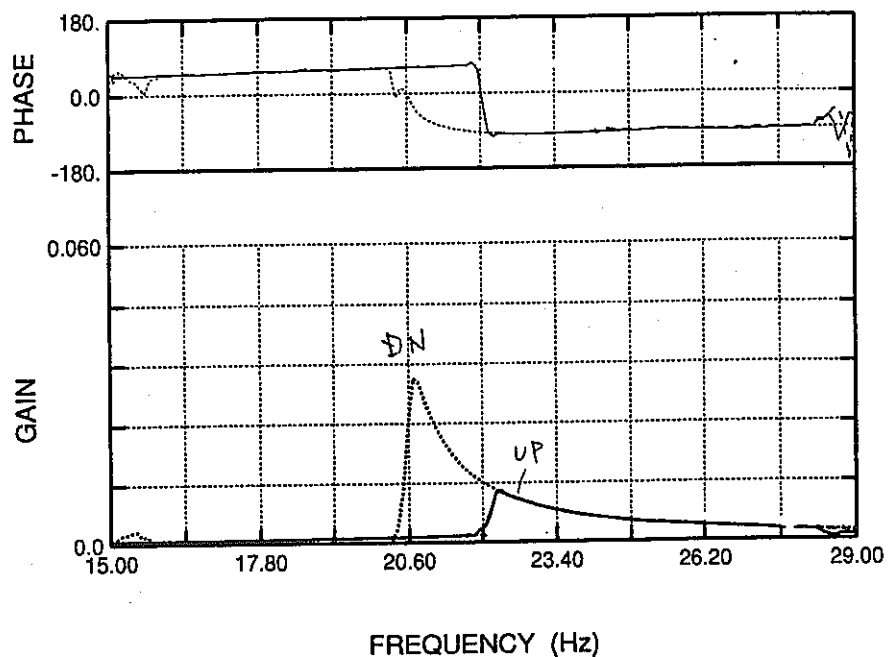
A6-3 / A1-3 - - - - - MAX. = 50.137 (16.57Hz)



A6-3 / A1-3 - - - - - MAX. = 112.39 (26.55Hz)

図 4. 1-1(12/12) 周波数応答関数の加振レベル依存性 (キップ 1.2mm、先端加速度)

GO UP/DN



(UP)		(DN)
$\frac{D2-2}{A1-2}$ ———	MAX. = 0.0105 (22.34Hz)	$\frac{D2-2D}{A1-2D}$ ..... MAX. = 0.0331 (20.68Hz)

図 4.1-2(1/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(キ ャツ 0mm、120gal、先端変位)

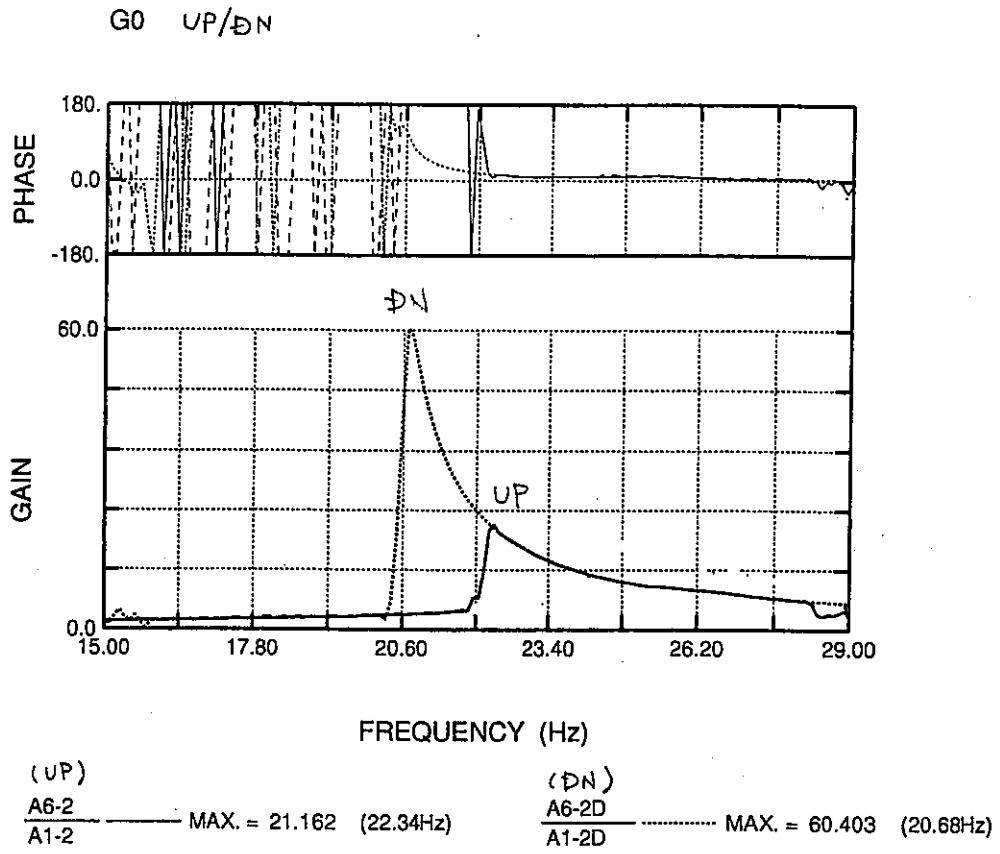


図 4.1-2(2/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(キック7°0mm、120gal、先端加速度)

G0 UP/DN

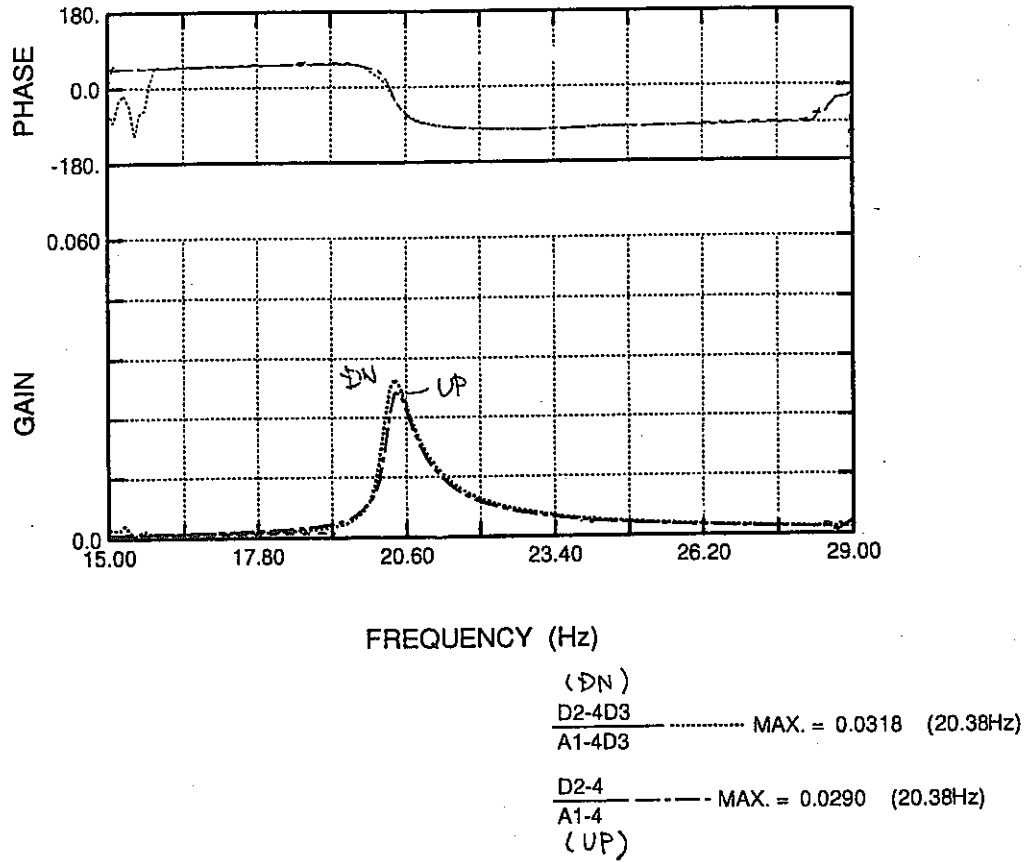


図 4. 1-2(3/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(キ ャツ 0mm、240gal、先端変位)

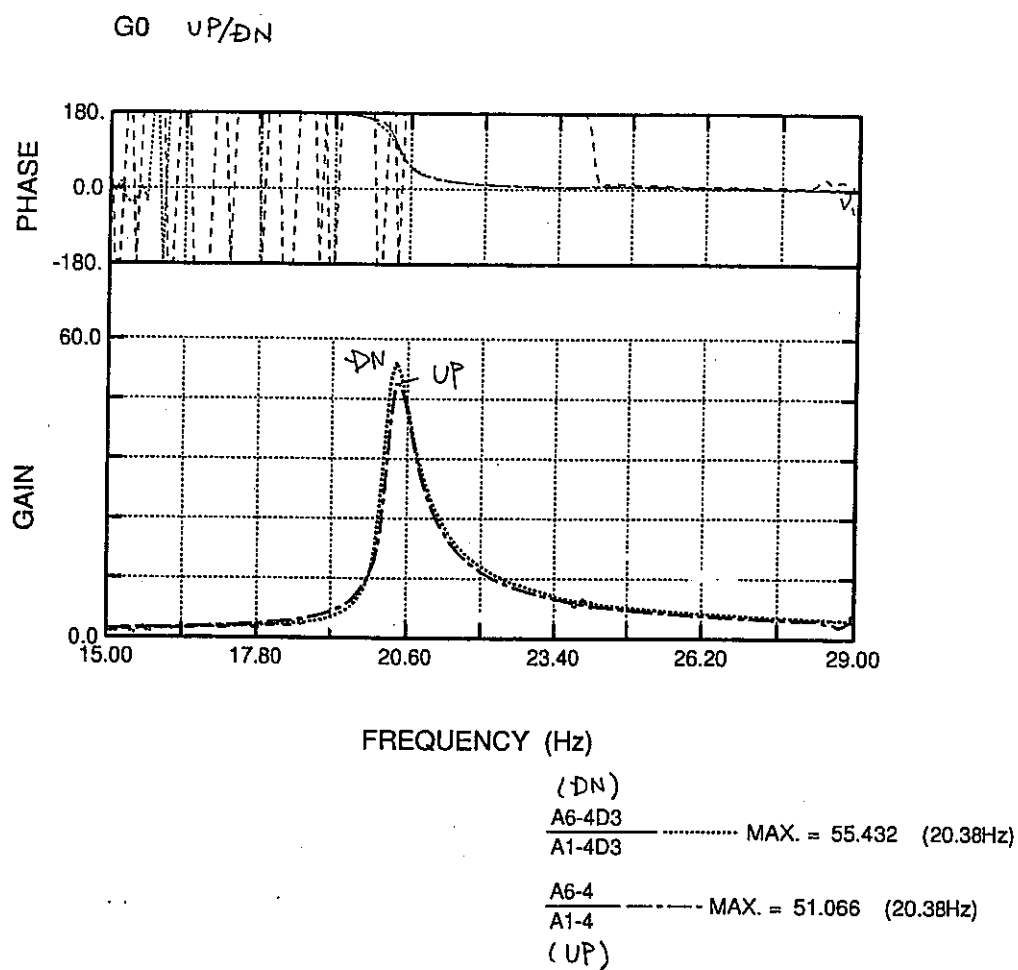


図 4.1-2(4/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(± 77° 0mm、240gal、先端加速度)

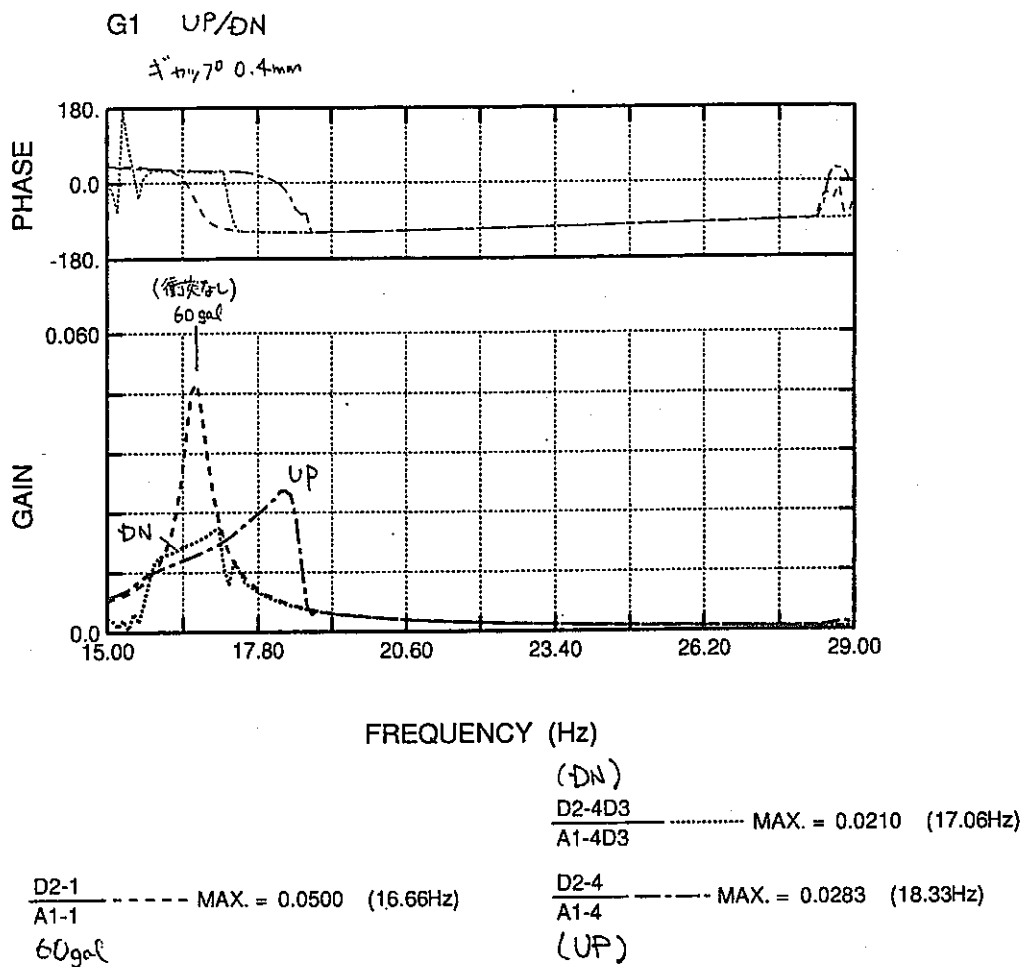
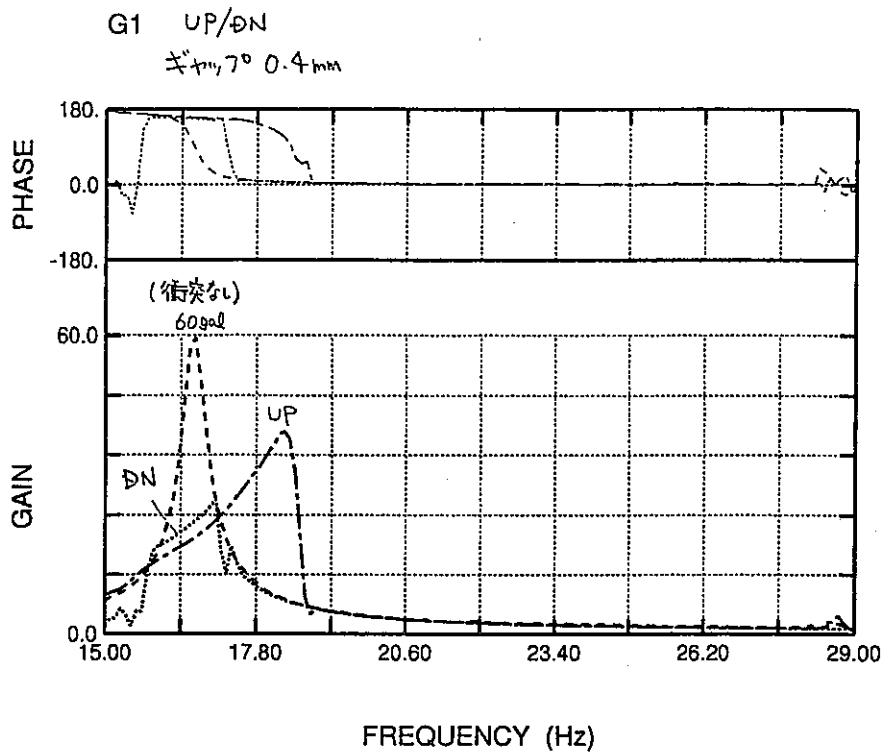


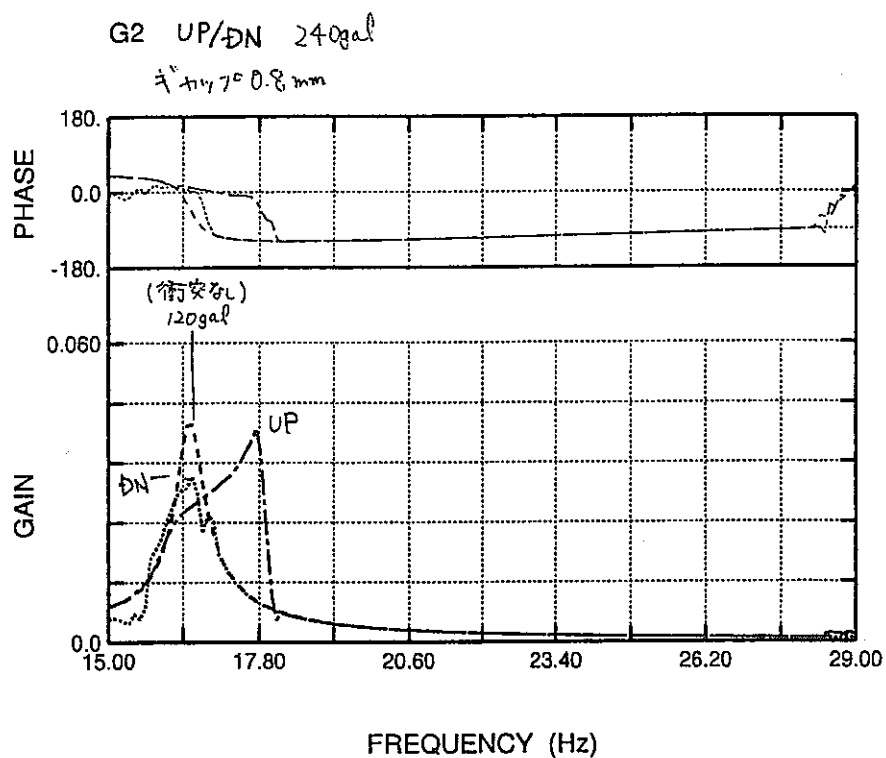
図 4.1-2(5/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性( $\lambda = 70^\circ 0.4\text{mm}$ 、240gal、先端変位)



		(DN)	
		$\frac{A6-4D3}{A1-4D3}$	MAX. = 27.094 (17.06Hz)
$\frac{A6-1}{A1-1}$	MAX. = 59.542 (16.66Hz)	$\frac{A6-4}{A1-4}$	MAX. = 40.660 (18.33Hz)
60gal		(UP)	

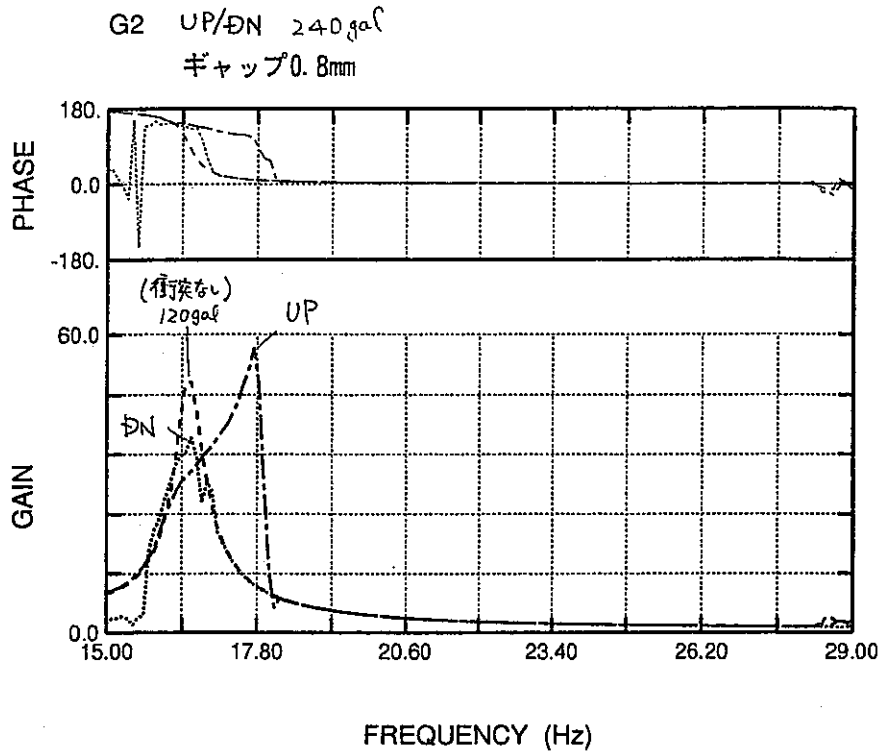
図 4.1-2(6/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性( $\pm 7^\circ 0.4\text{mm}$ 、240gal、先端加速度)





	$\frac{D2-4D2}{A1-4D2}$ ----- MAX. = 0.0333 (16.57Hz)
$\frac{D2-2}{A1-2}$ ----- MAX. = 0.0438 (16.57Hz)	$\frac{D2-4}{A1-4}$ ----- MAX. = 0.0430 (17.74Hz)

図 4.1-2(7/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性( $\pm$ アップ $^{\circ}$ 0.8、240gal、先端変位)



	$\frac{A6-4D2}{A1-4D2}$ ----- MAX. = 39.476 (16.57Hz)
$\frac{A6-2}{A1-2}$ ----- MAX. = 50.661 (16.57Hz)	$\frac{A6-4}{A1-4}$ ----- MAX. = 57.337 (17.74Hz)

図 4.1-2(8/8) 周波数応答関数の掃引方向依存性(ギャップ0.8、240gal、先端加速度)

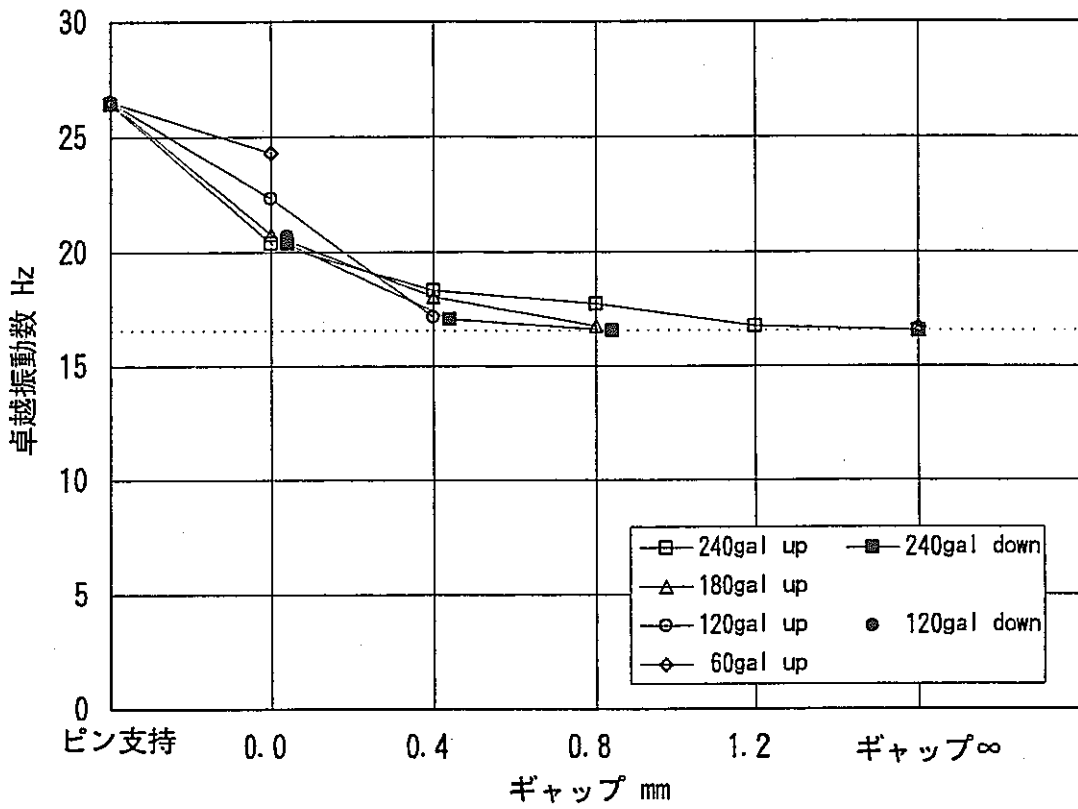


図4.1-3 ギャップ量と卓越振動数の関係

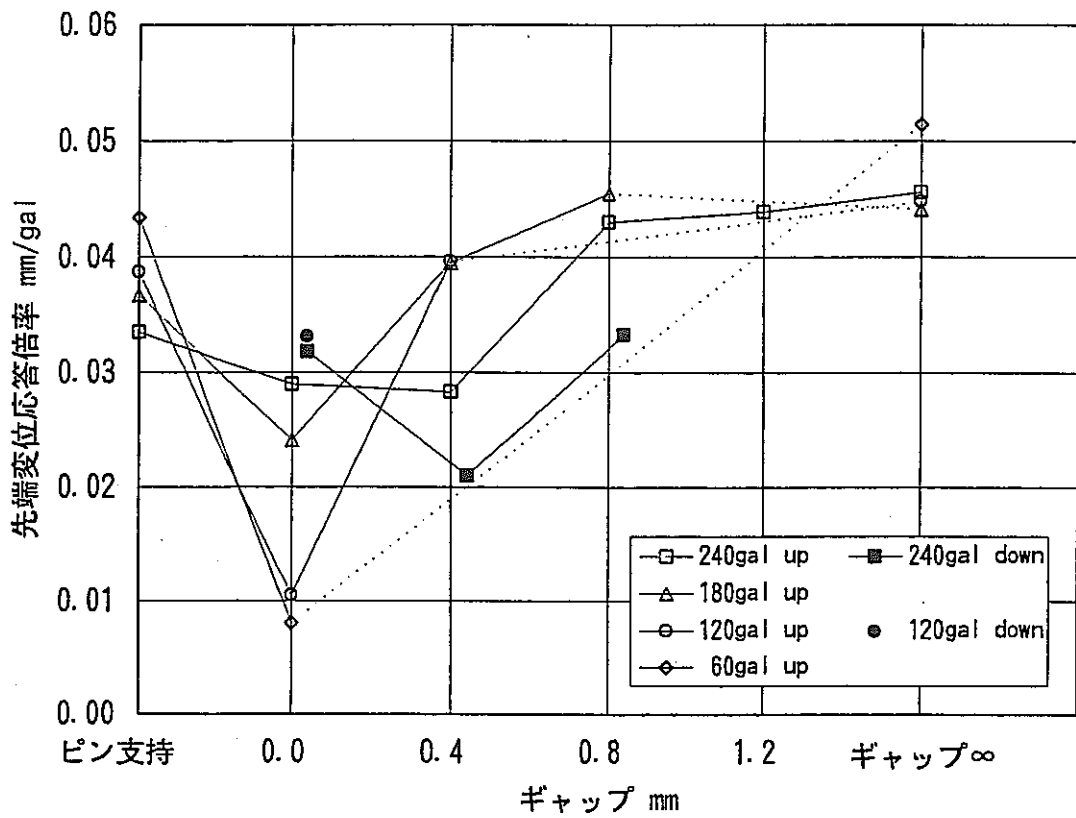


図4.1-4(1/2) ギャップ量と先端変位応答倍率の関係

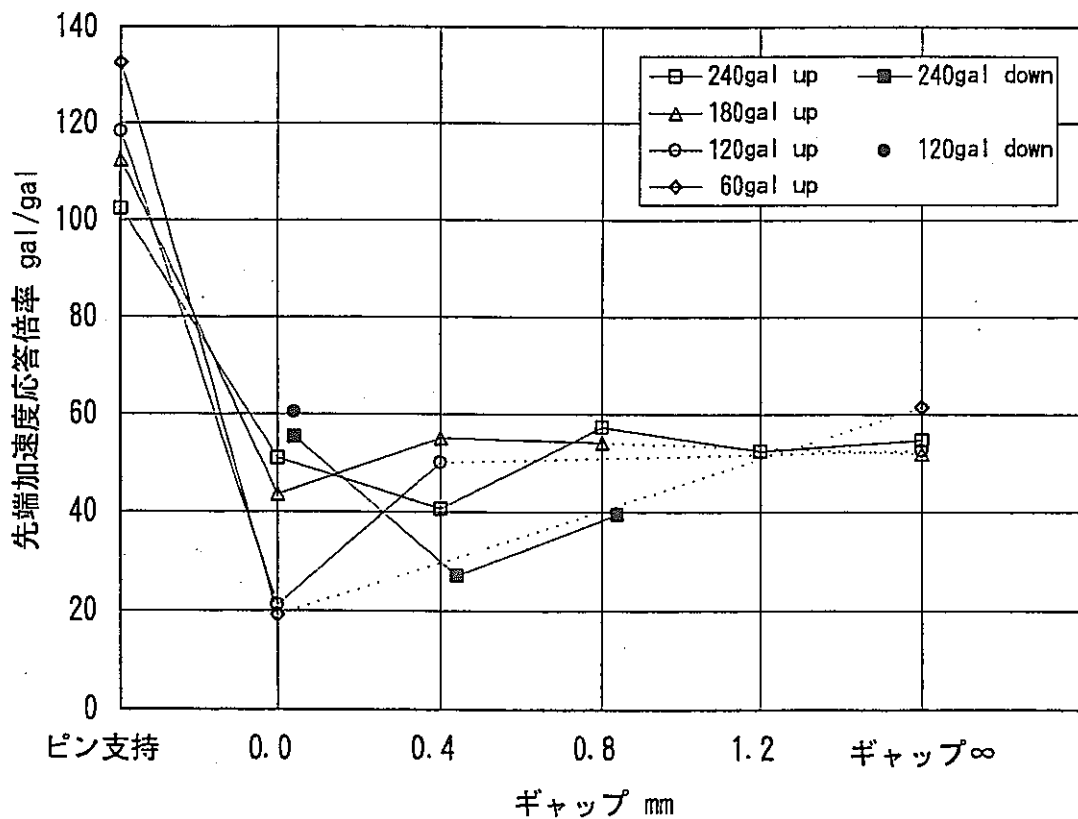


図4.1-4(2/2) ギャップ量と先端加速度応答倍率の関係

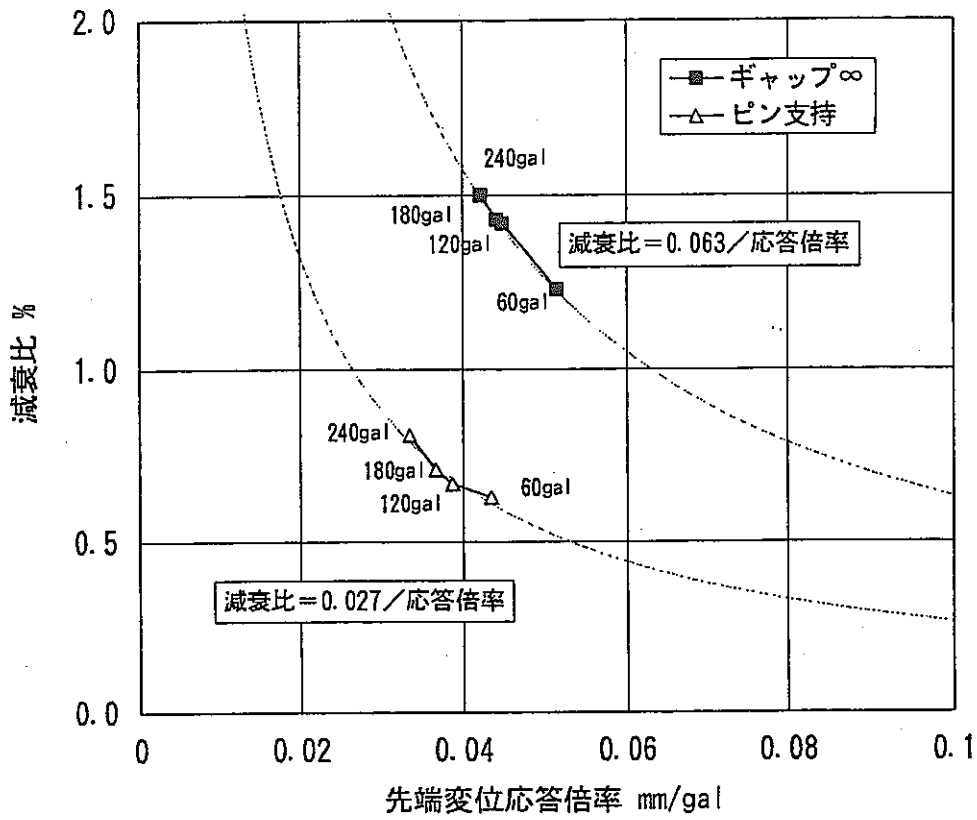


図4.1-5(1/2) 先端変位応答倍率と減衰比の関係

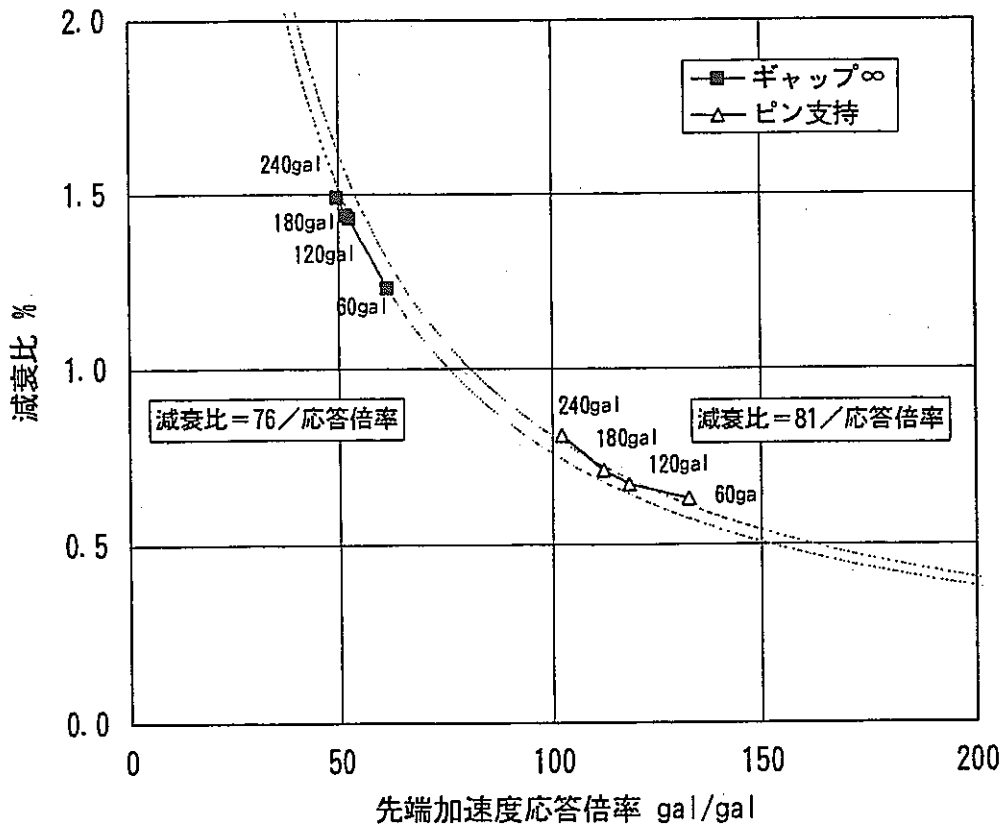
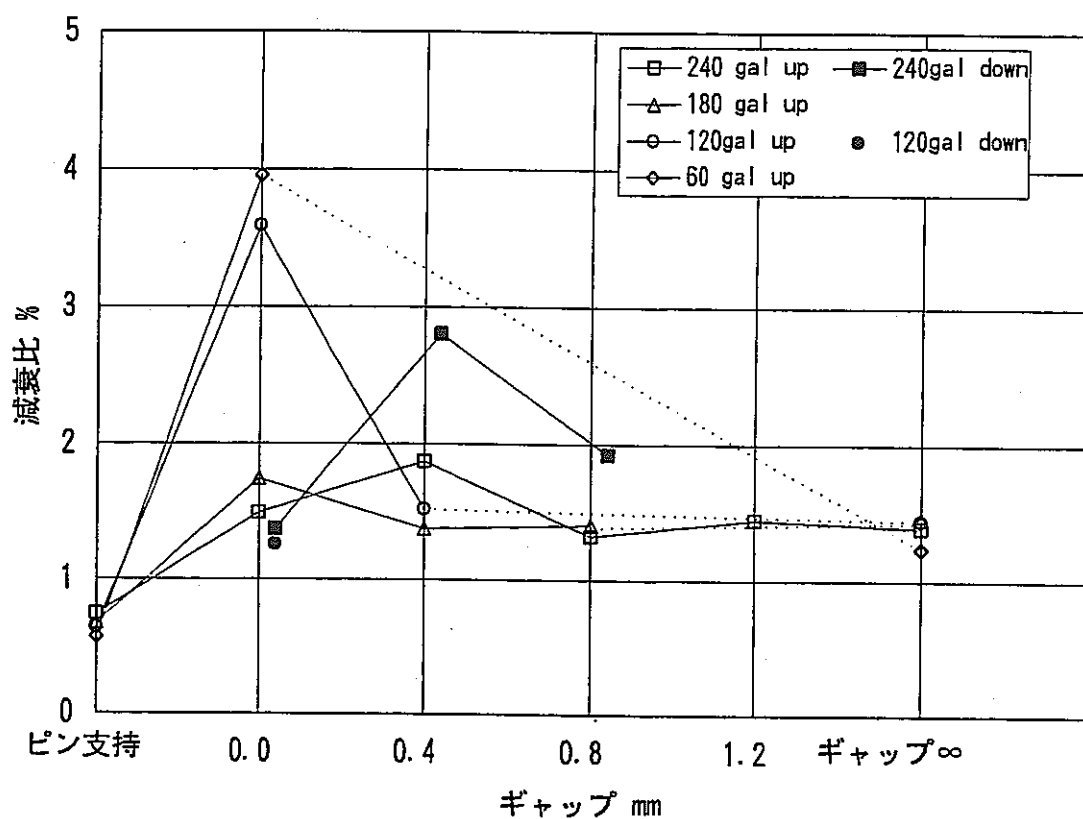
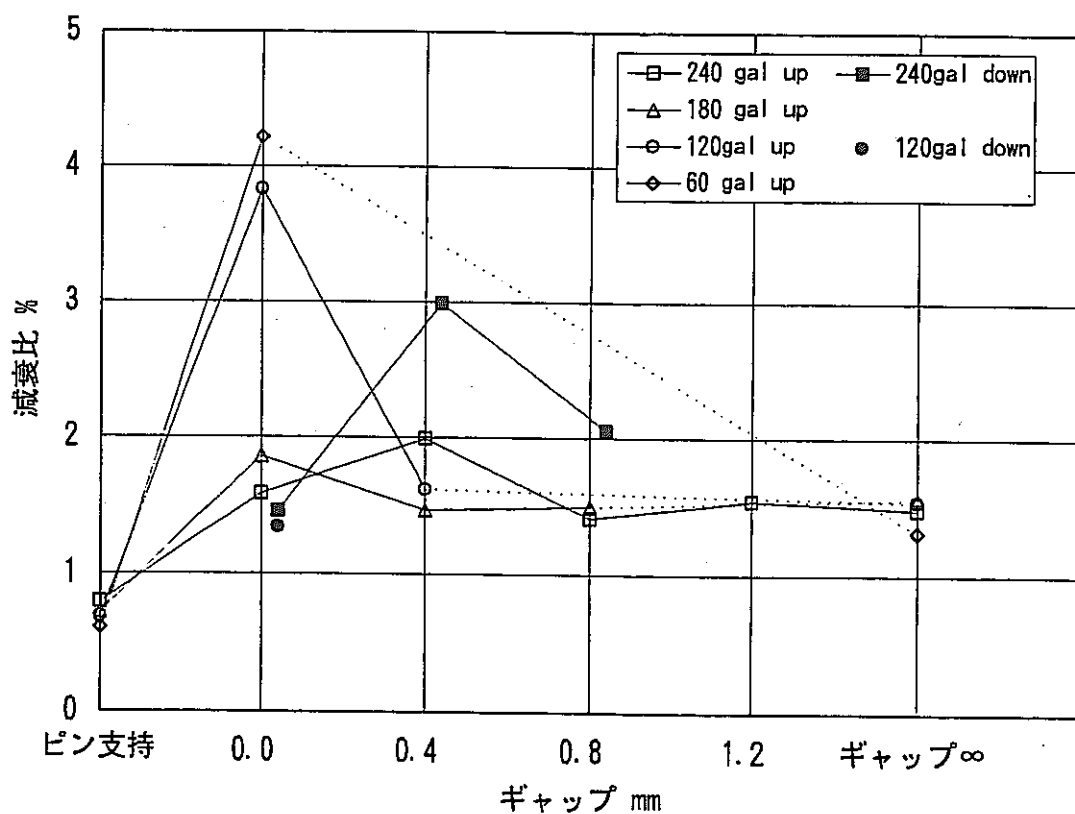


図4.1-5(2/2) 先端加速度応答倍率と減衰比の関係



(a) ギャップ∞の先端加速度応答倍率と減衰比の関係で換算



(b) ピン支持の先端加速度応答倍率と減衰比の関係で換算

図4.1-6 ギャップ量と等価減衰比の関係 (先端加速度応答倍率より換算)

LEVEL 1 60gal

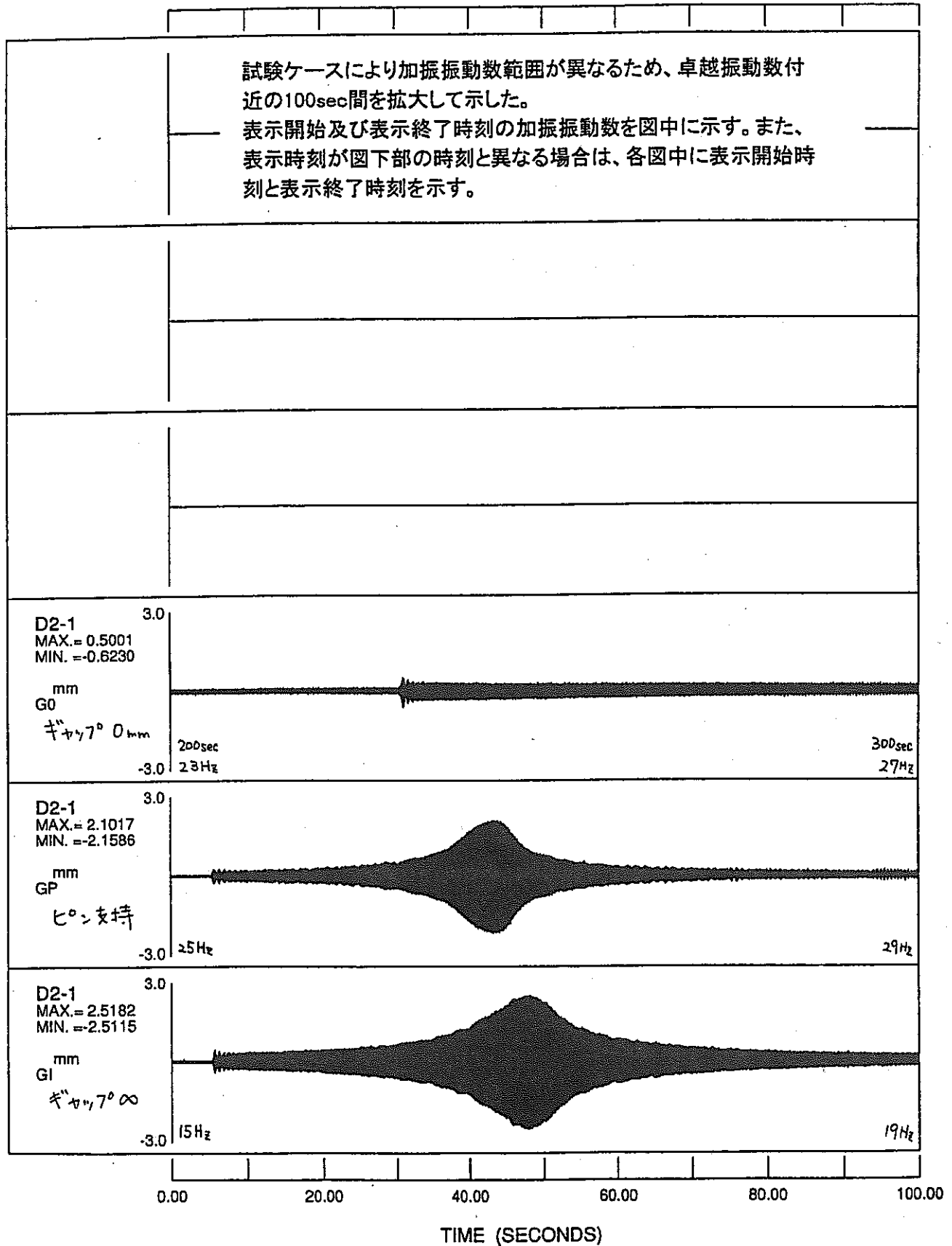


図 4.1-7(1/10) 先端変位時刻歴波形の比較 (加振レベル 60gal)

LEVEL 1 60gal

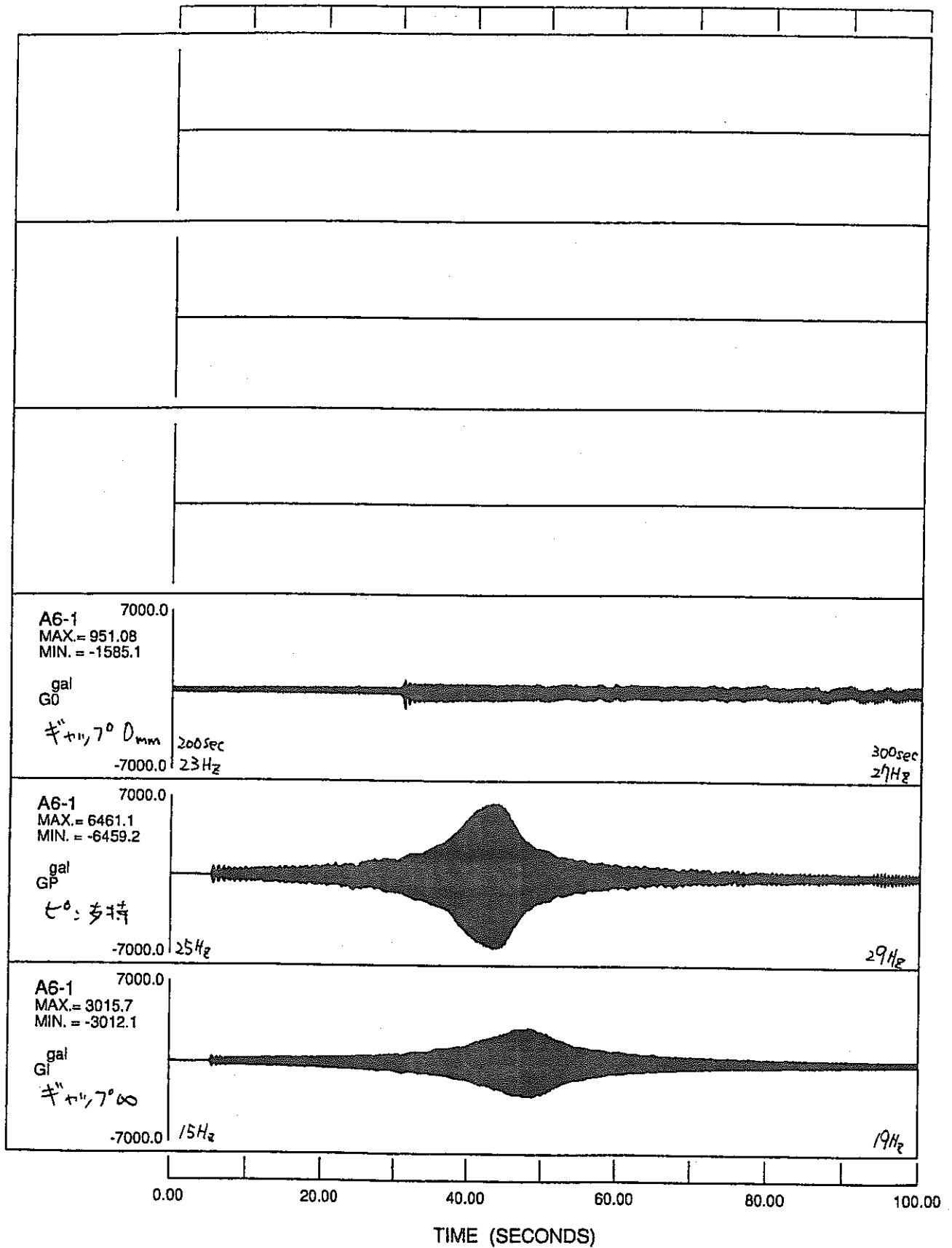


図 4.1-7(2/10) 先端加速度時刻歴波形の比較 (加振レベル 60gal)



LEVEL 2 120gal

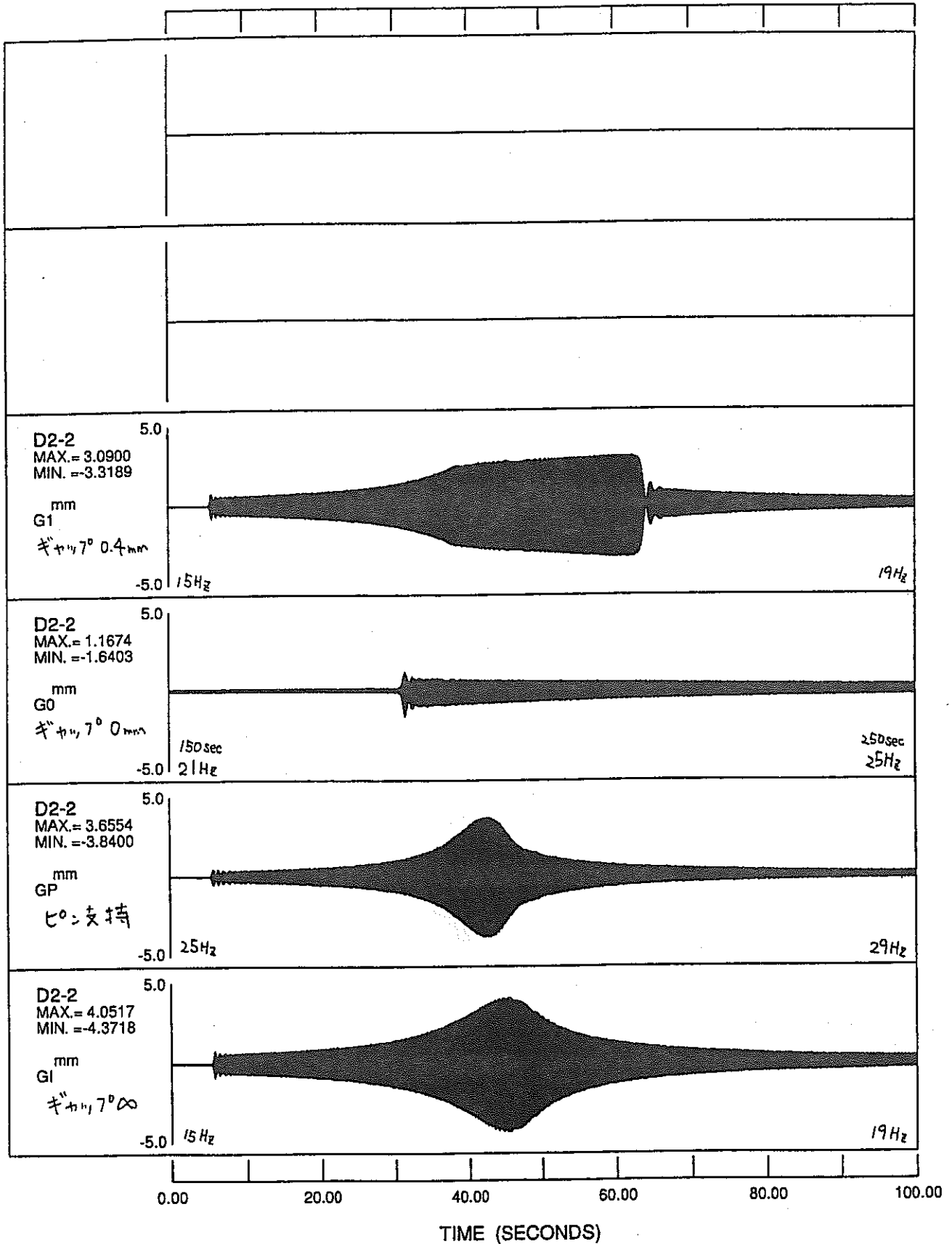


図 4.1-7(3/10) 先端変位時刻歴波形の比較 (加振レベル 120gal)

LEVEL 2 120 gal

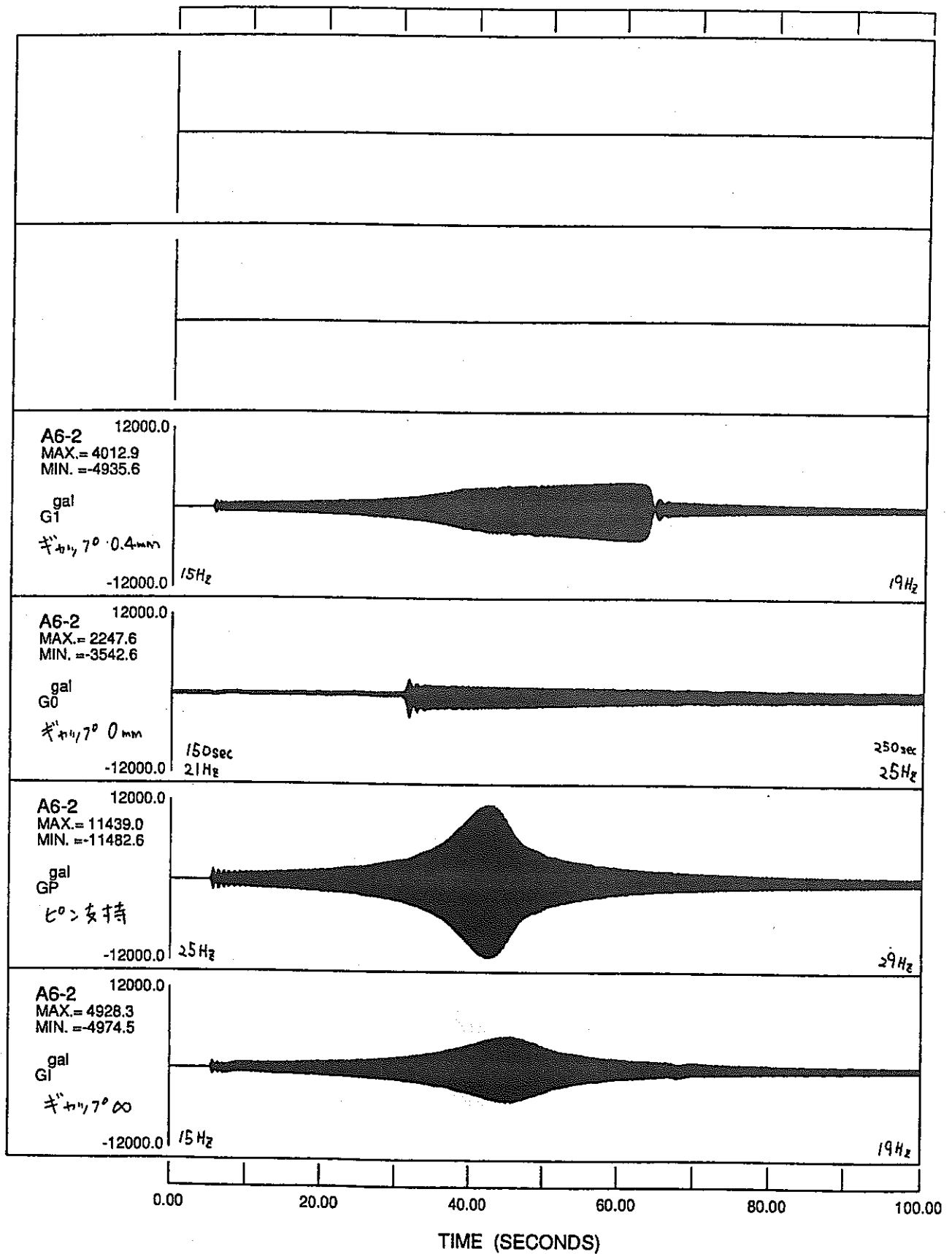


図 4.1-7(4/10) 先端加速度時刻歴波形の比較 (加振レベル 120gal)

LEVEL 3 180 gal

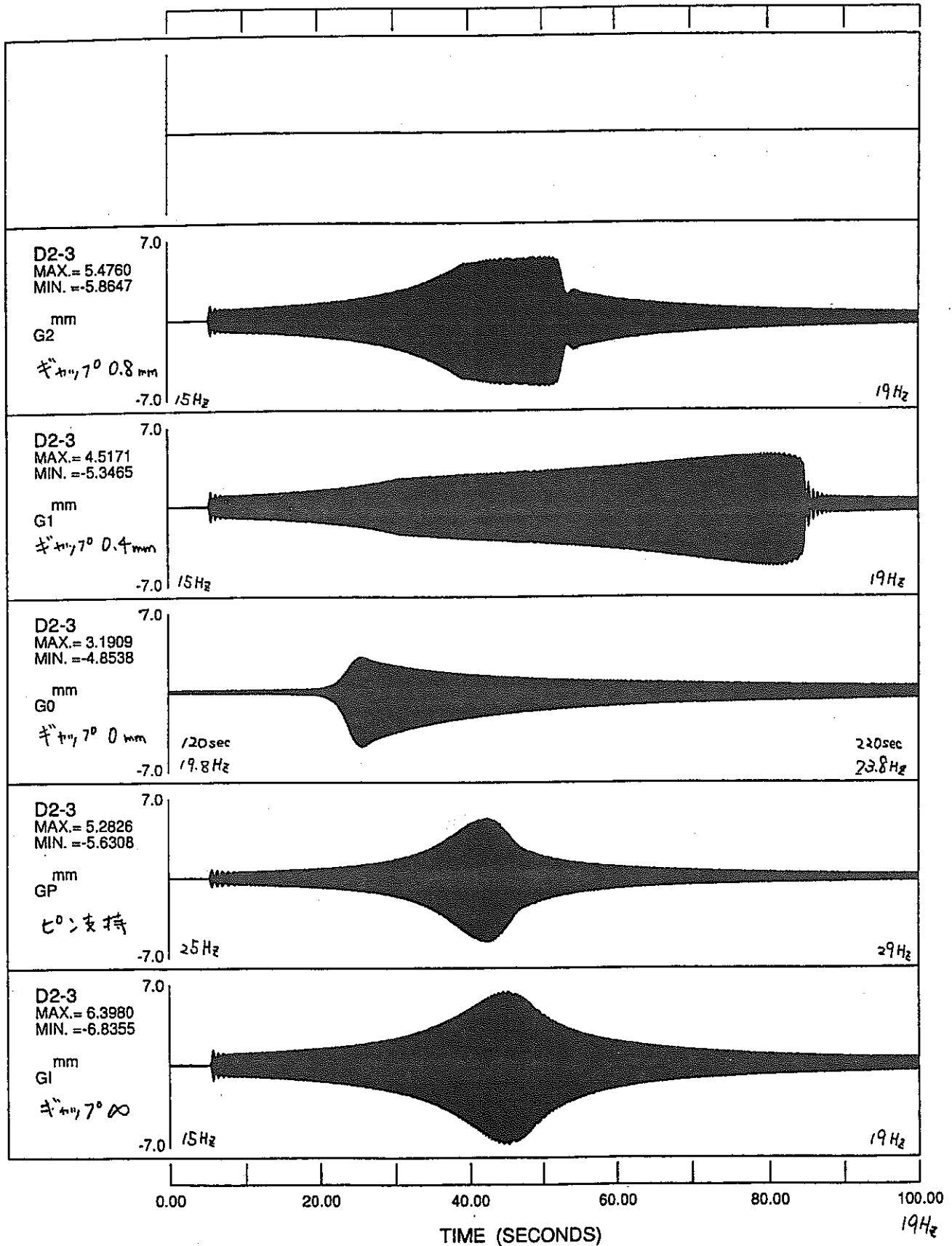


図 4.1-7(5/10) 先端変位時刻歴波形の比較 (加振レベル 180gal)

LEVEL 3 180 gal

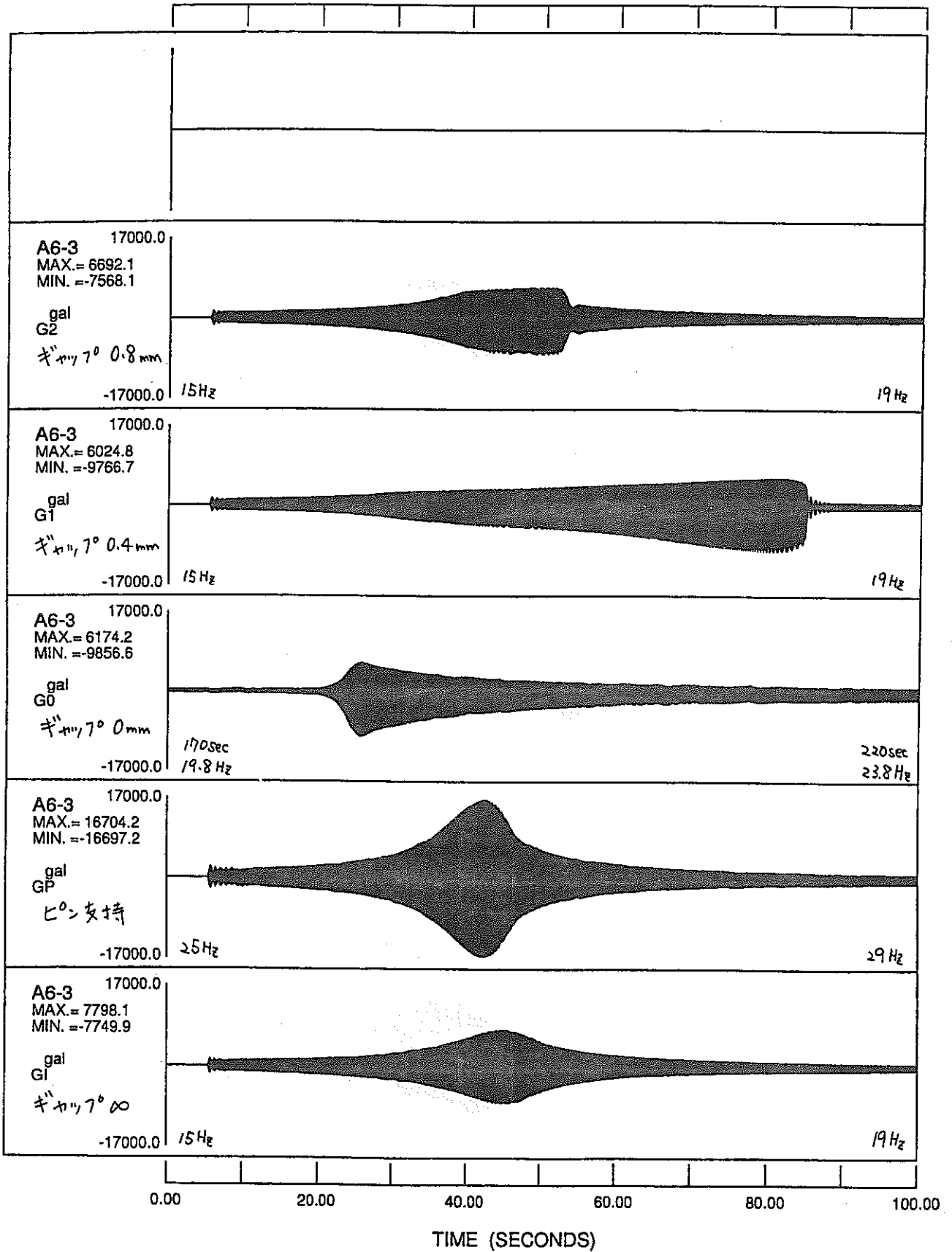


図 4.1-7(6/10) 先端加速度時刻歴波形の比較 (加振レベル 180gal)

LEVEL 4 UP 240gal スイ-7° P<sub>1</sub>7°

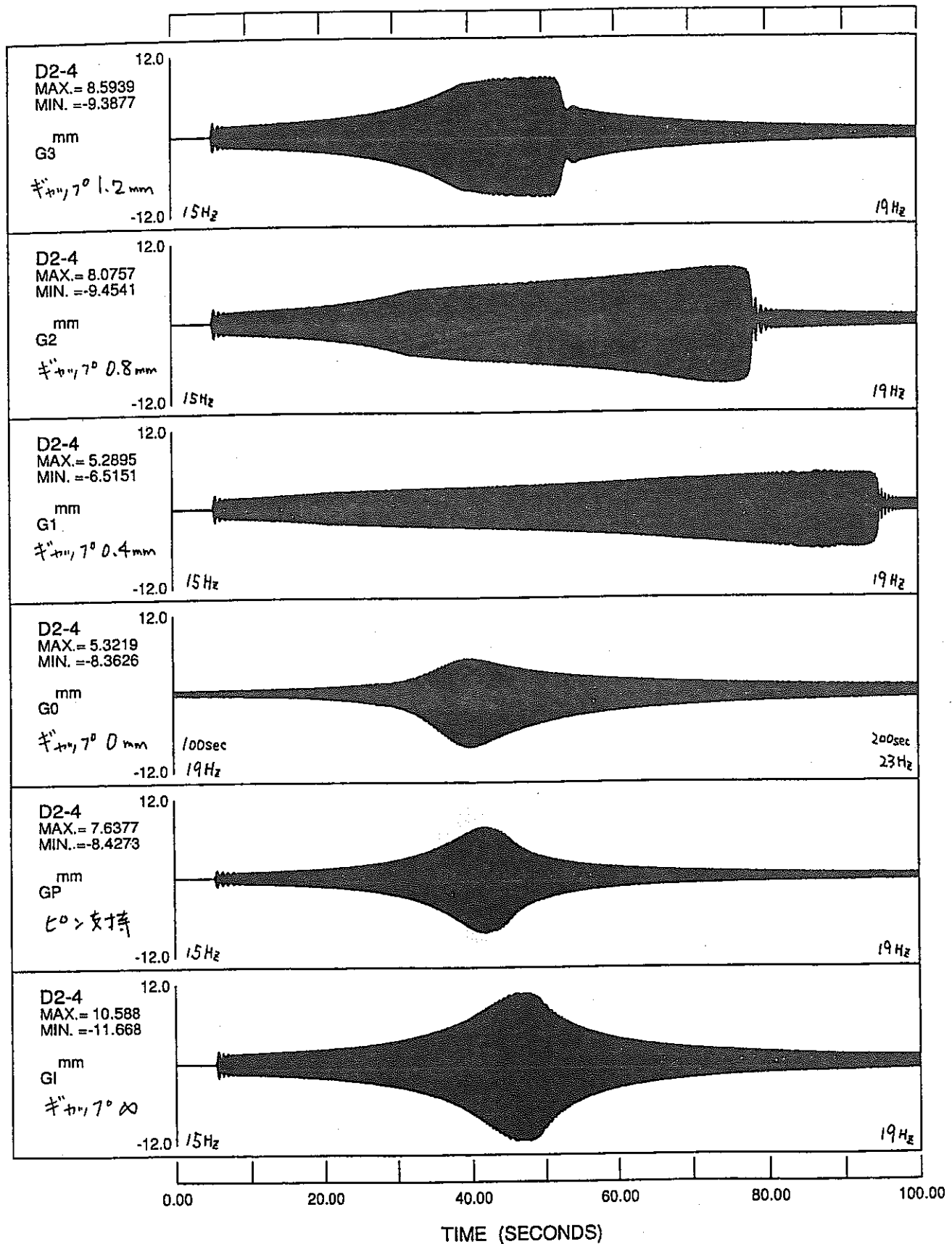


図 4.1-7(7/10) 先端変位時刻歴波形の比較 (加振レベル 240gal、掃引方向 UP)

LEVEL 4 UP 240 gal スイッチ 7°

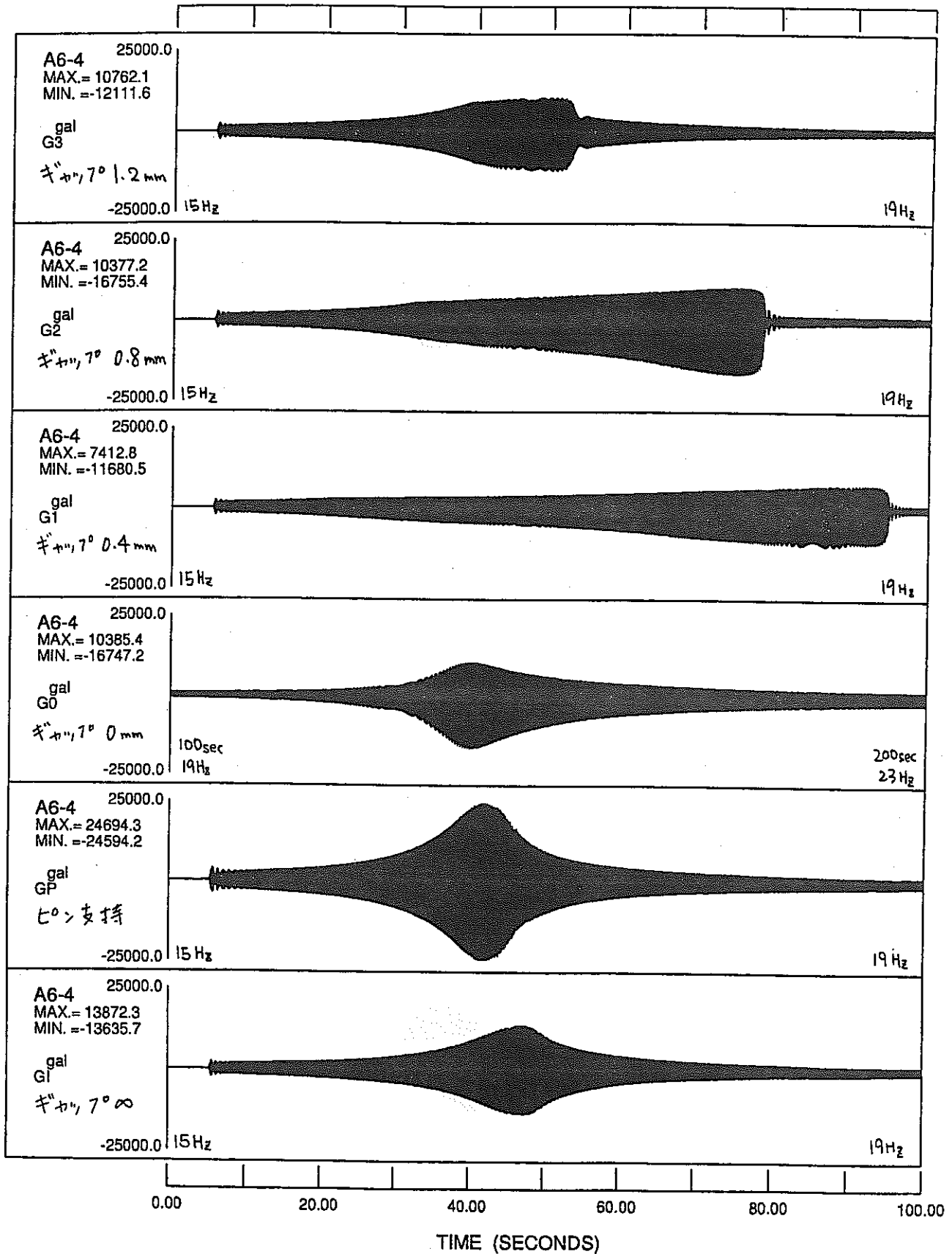


図 4.1-7(8/10) 先端加速度時刻歴波形の比較 (加振レベル 240gal 掃引方向 UP)

LEVEL 4 DN 240gal スイ-7°ダウン

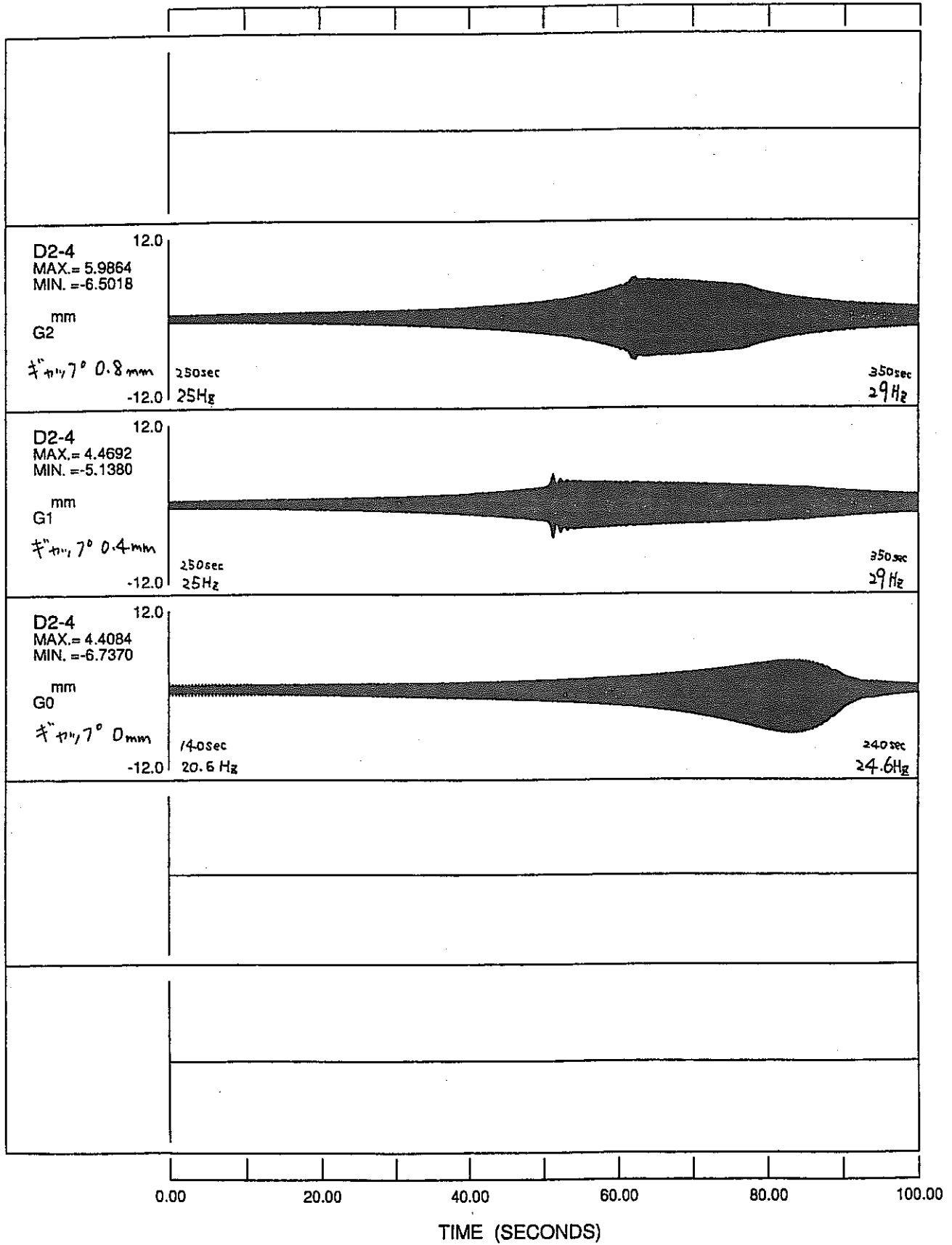


図 4.1-7(9/10) 先端変位時刻歴波形の比較 (加振レベル 240gal 掃引方向 DOWN)

LEVEL 4 DN 240 gal スイ-7°ダウン

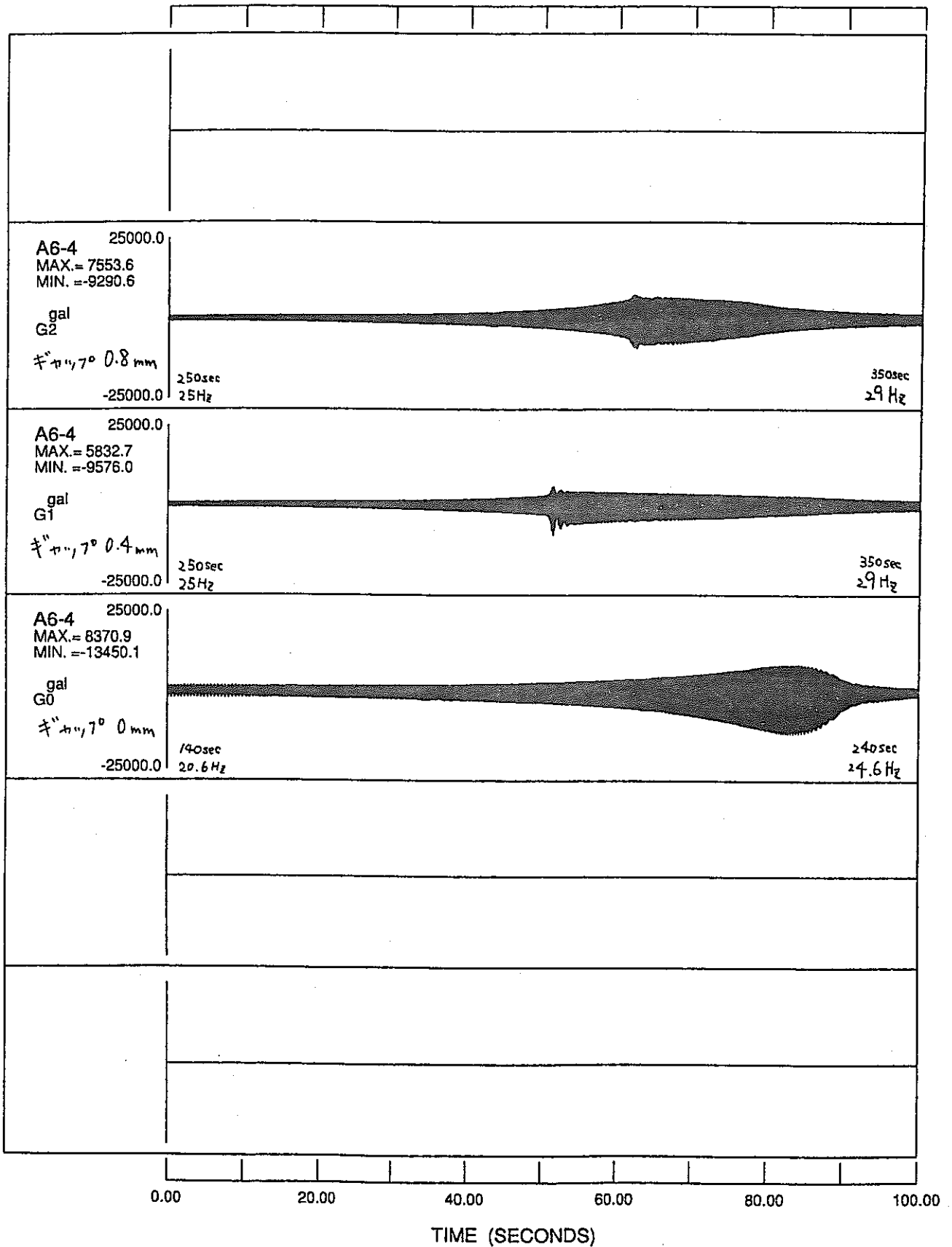
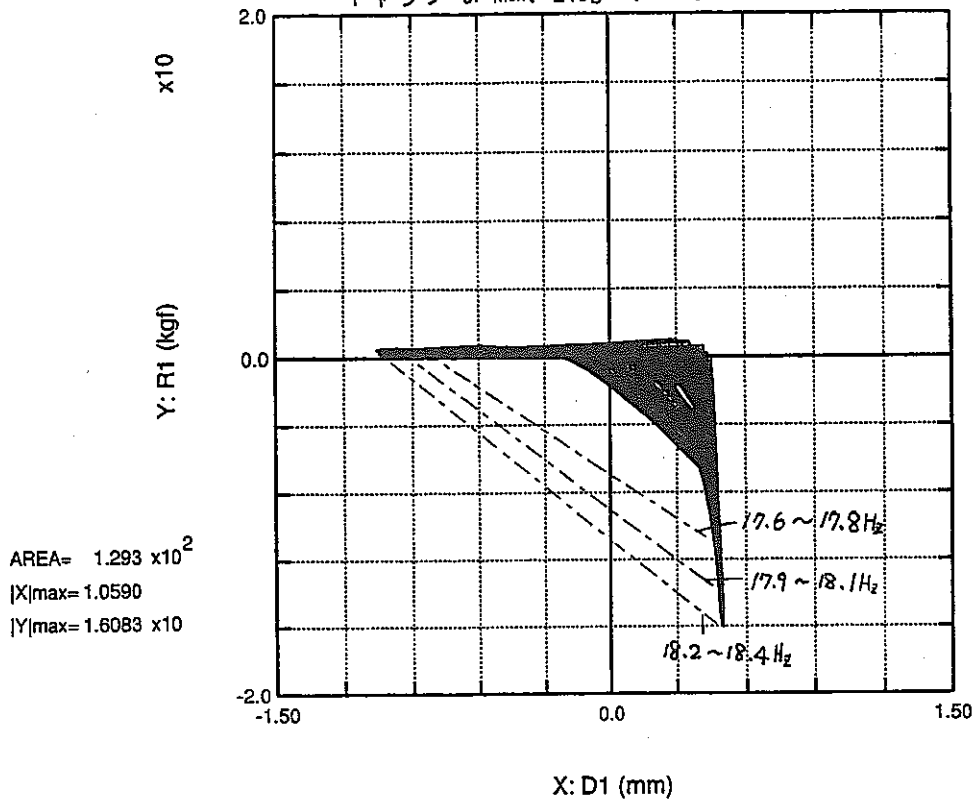


図 4.1-7(10/10) 先端加速度時刻歴波形の比較 (加振レベル 240gal 掃引方向 DOWN)



G1-4U2

ギャップ 0.4mm、240gal、スイープUP



見かけの剛性

- 17.6~17.8Hz :  $8.6 \times 10^4$  N/m
  - 17.9~18.1Hz :  $9.9 \times 10^4$  N/m
  - 18.2~18.4Hz :  $10.6 \times 10^4$  N/m
- 剛性増加

G1-4U2  $\frac{D2}{Ax1}$

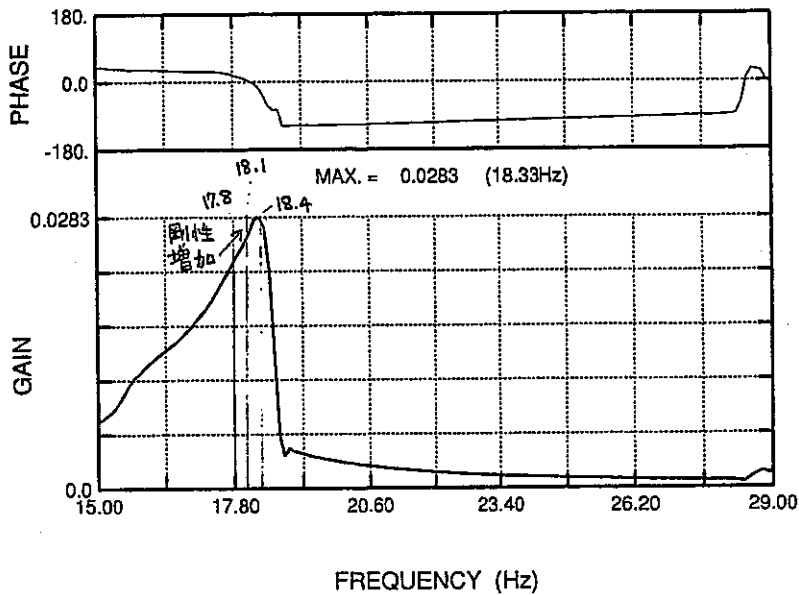
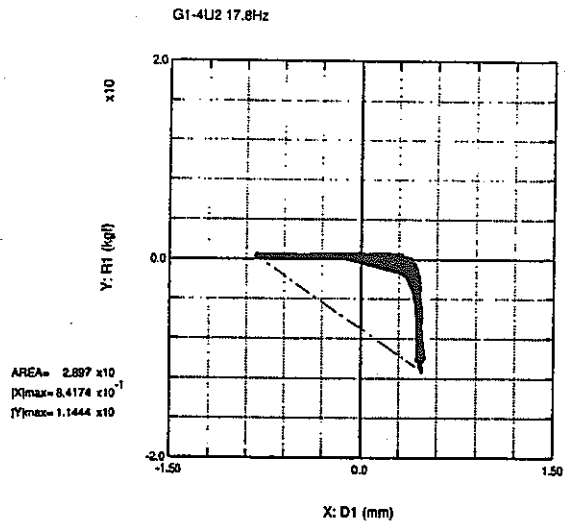
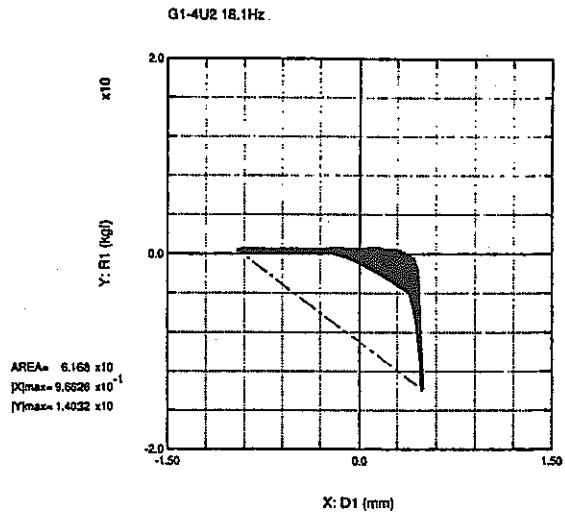


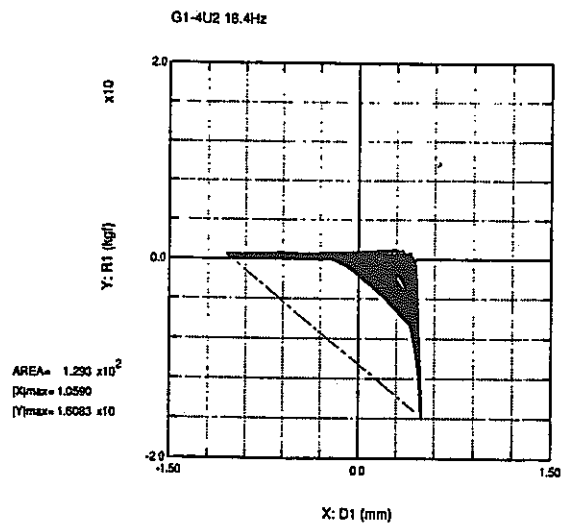
図4.1-8(1/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス (ギャップ0.4mm、240gal、掃引UP)



加振振動数  
17.6~17.8Hz  
見かけの剛性  
 $8.6 \times 10^4$  N/m



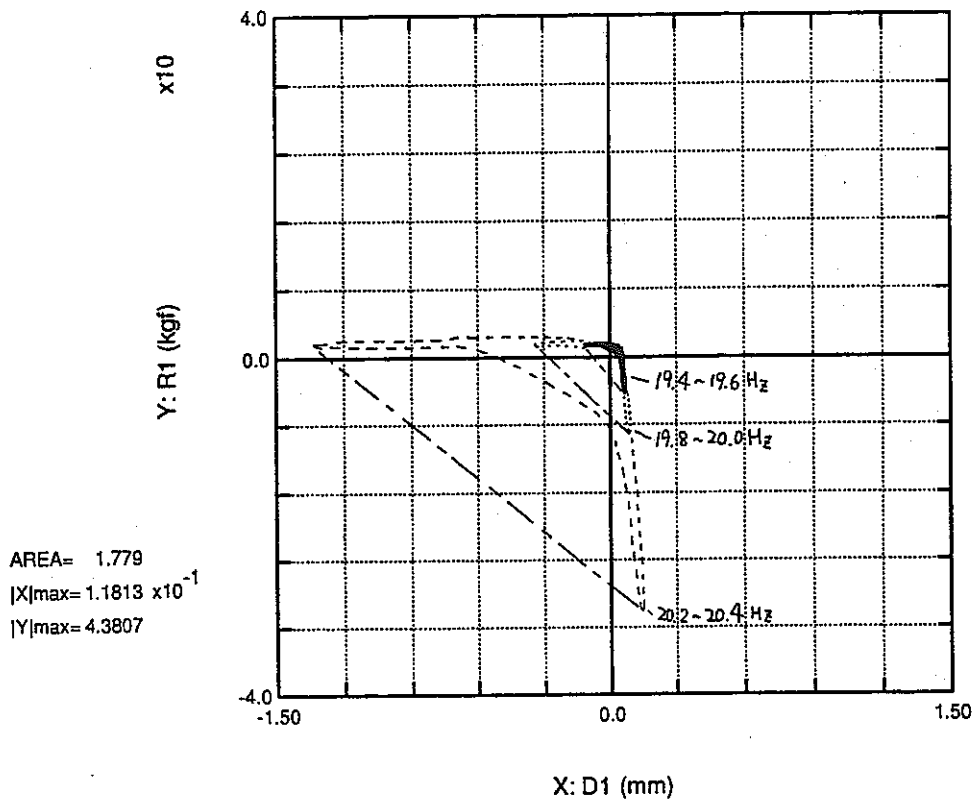
加振振動数  
17.9~18.1Hz  
見かけの剛性  
 $9.9 \times 10^4$  N/m



加振振動数  
18.2~18.4Hz  
見かけの剛性  
 $10.6 \times 10^4$  N/m

図4.1-8(2/6) 反力と変位のヒステリシス (ギャップ0.4mm、240gal、掃引UP)

G0-4 ギャップ0mm、240gal、スイープUP



見かけの剛性

19.4~19.6Hz	: 3.1 × 10 <sup>5</sup> N/m	↓ 剛性低下
19.8~20.0Hz	: 2.5 × 10 <sup>5</sup> N/m	
20.2~20.4Hz	: 2.1 × 10 <sup>5</sup> N/m	

G0-4  $\frac{D2}{Ax1}$  周波数応答関数(先端変位/入力加速度)

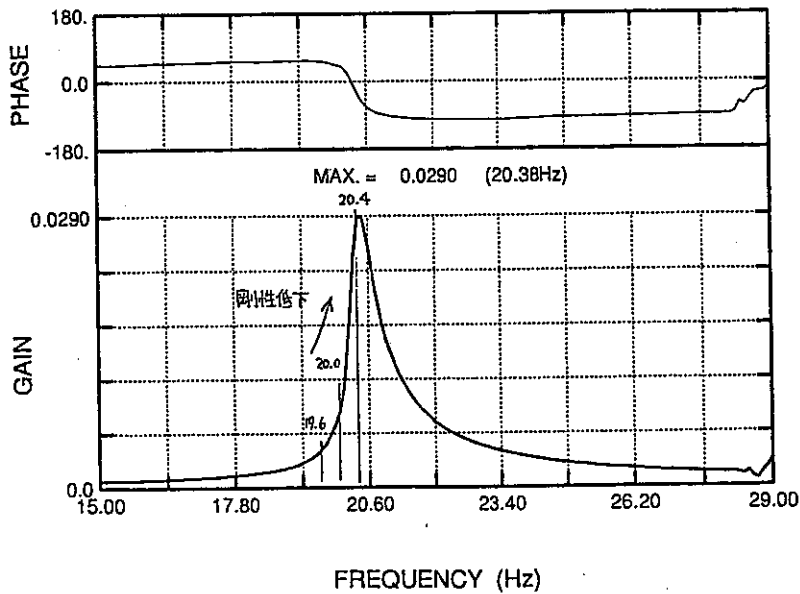
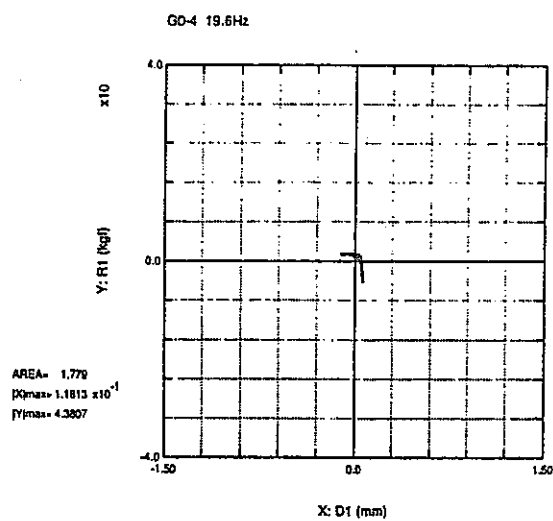
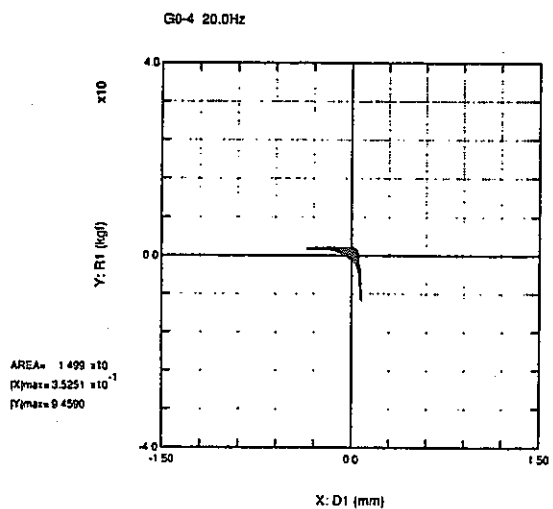


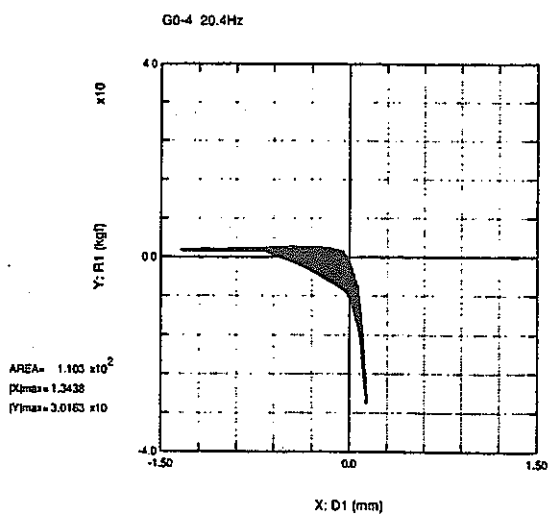
図4.1-8(3/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ0mm、240gal、掃引UP)



加振振動数  
19.4~19.6Hz  
見かけの剛性  
 $3.1 \times 10^5$  N/m



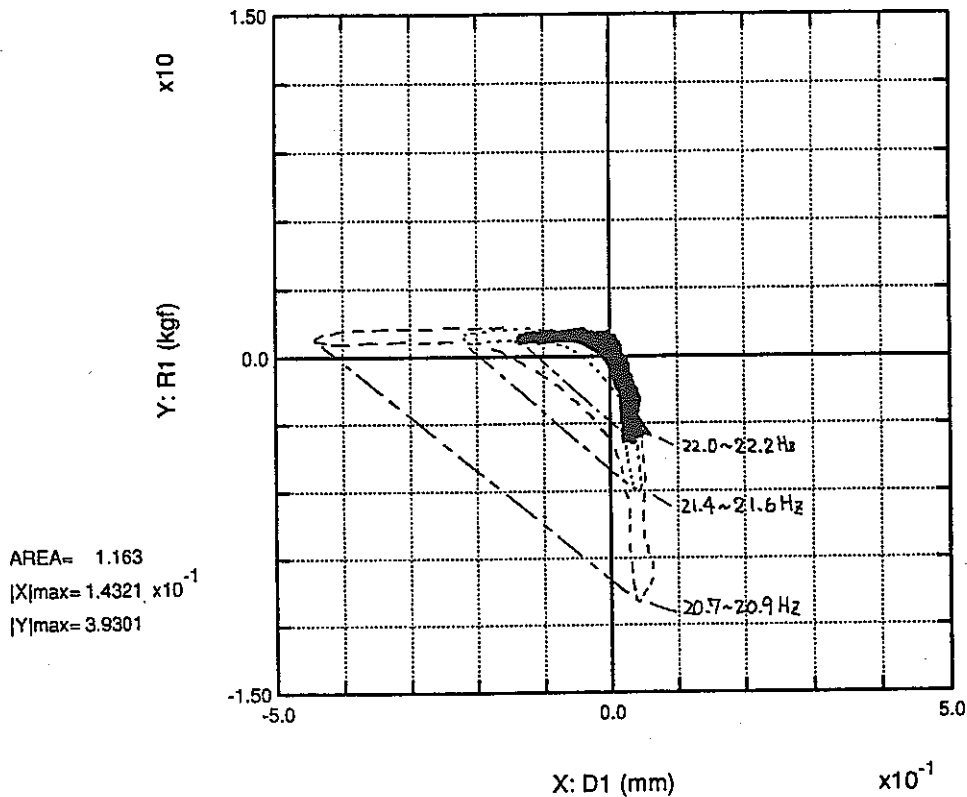
加振振動数  
19.8~20.0Hz  
見かけの剛性  
 $2.5 \times 10^5$  N/m



加振振動数  
20.2~20.4Hz  
見かけの剛性  
 $2.1 \times 10^5$  N/m

図4.1-8(4/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ0mm、240gal、掃引UP)

G0-2D ギャップ0mm、120gal、スイープDOWN



見かけの剛性

20.7~20.9Hz :  $2.4 \times 10^5$  N/m

21.4~21.6Hz :  $2.5 \times 10^5$  N/m

22.0~22.2Hz :  $2.6 \times 10^5$  N/m

G0-2D  $\frac{D2}{Ax1}$  周波数応答関数(先端変位/入力加速度)

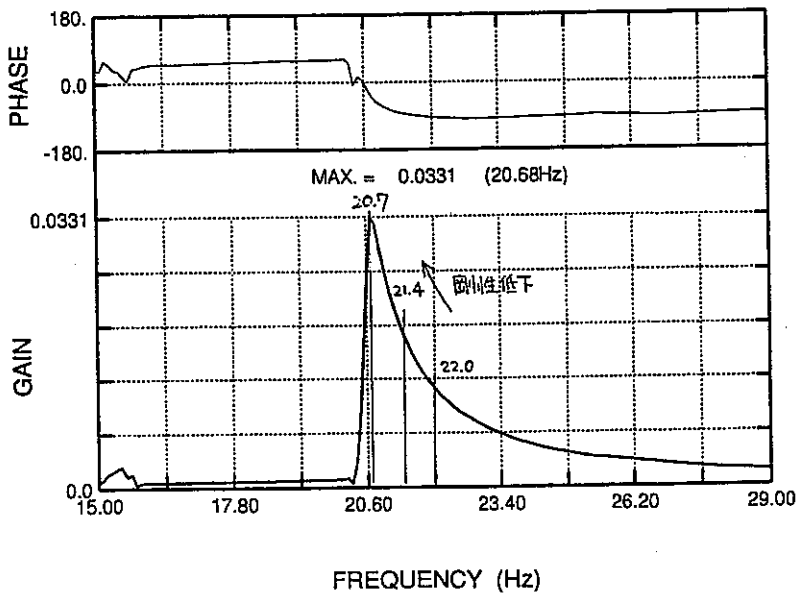
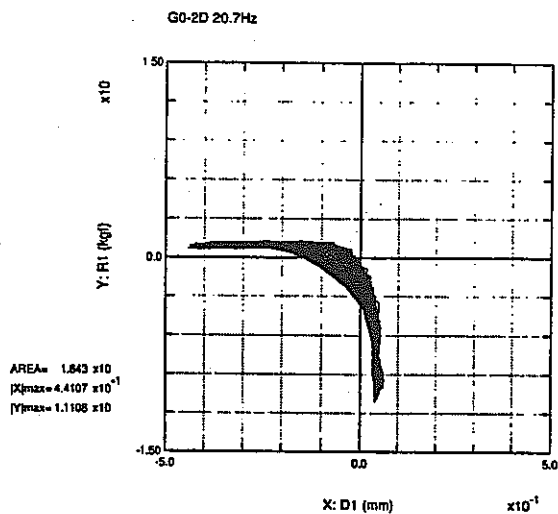
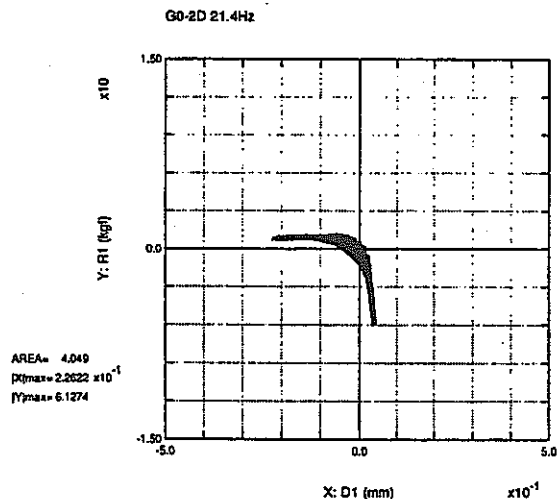


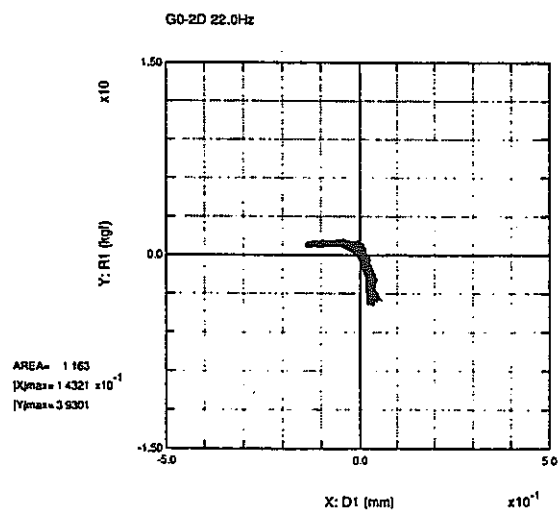
図4.1-8(5/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ0mm、120gal、掃引DOWN)



加振振動数  
 20.7~20.9Hz  
 見かけの剛性  
 $2.4 \times 10^5$  N/m



加振振動数  
 21.4~21.6Hz  
 見かけの剛性  
 $2.5 \times 10^5$  N/m



加振振動数  
 22.0~22.2Hz  
 見かけの剛性  
 $2.6 \times 10^5$  N/m

図4.1-8(6/6) 反力と衝突部変位のヒステリシス(ギャップ0mm、120gal、掃引|DOWN)

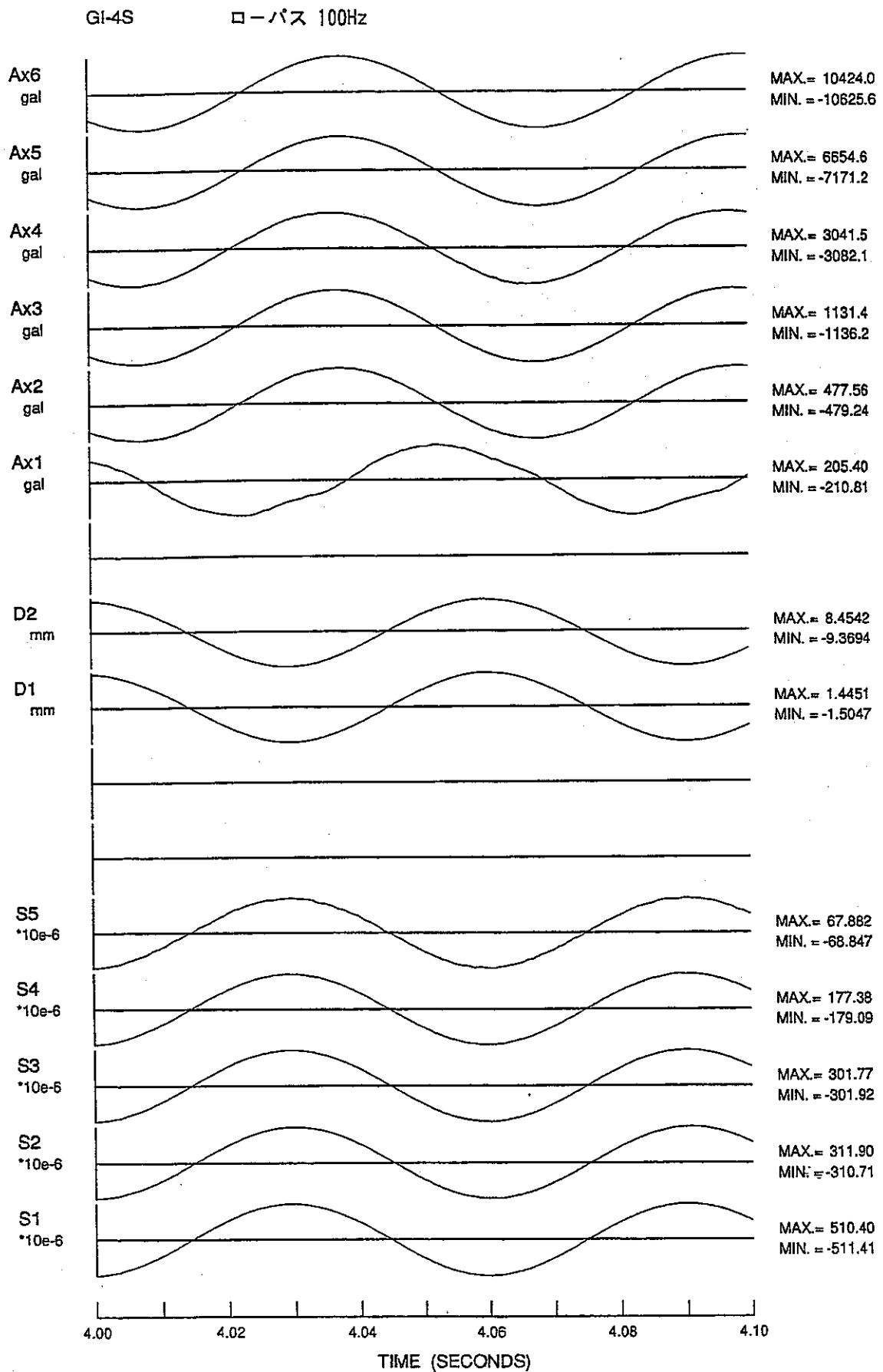


図 4.2-1(1/6) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ∞、240gal、16.5Hz)

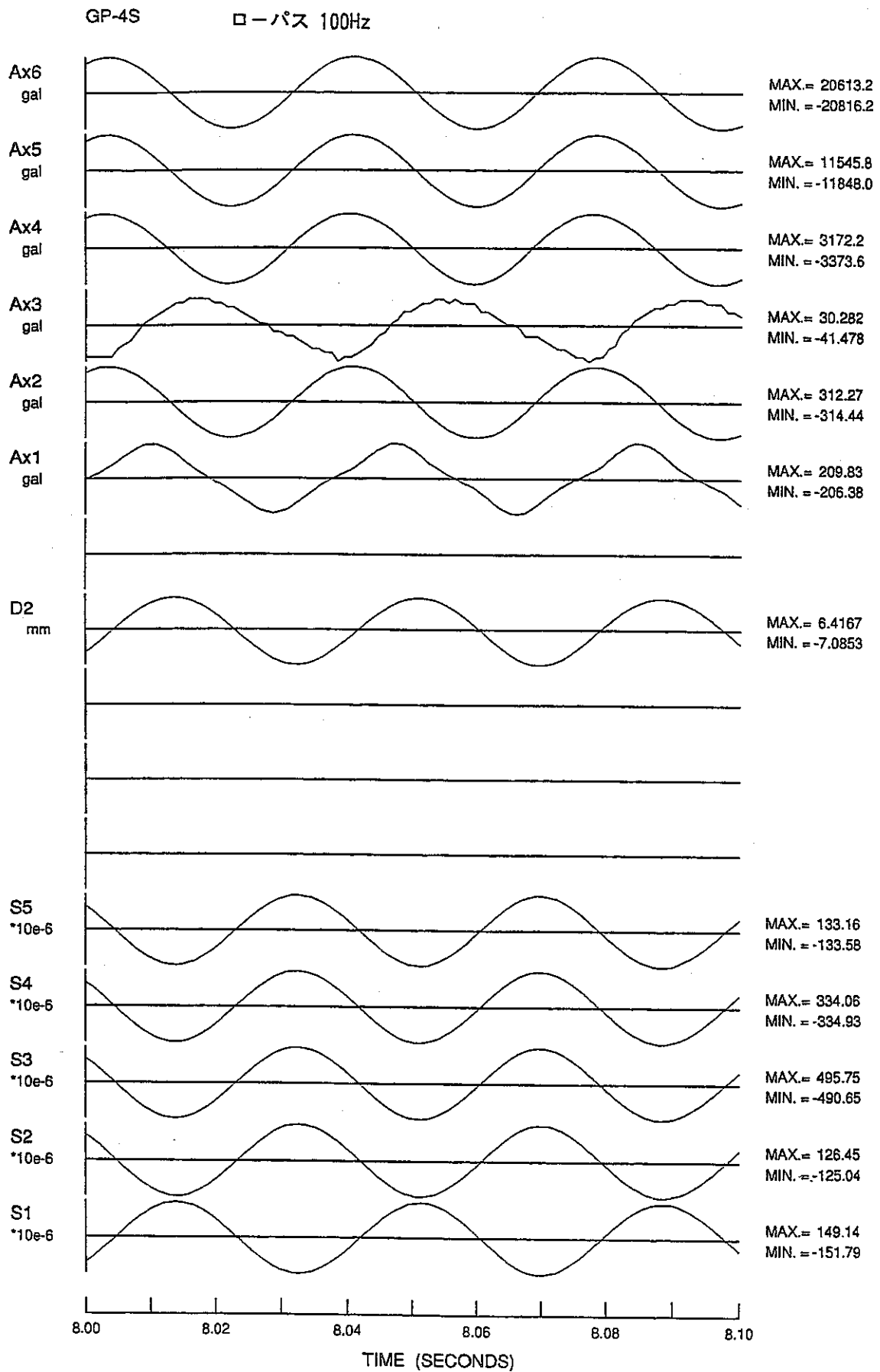


図 4. 2-1(2/6) 定常加振時刻歴波形 (ピン支持、240gal、26. 5Hz)



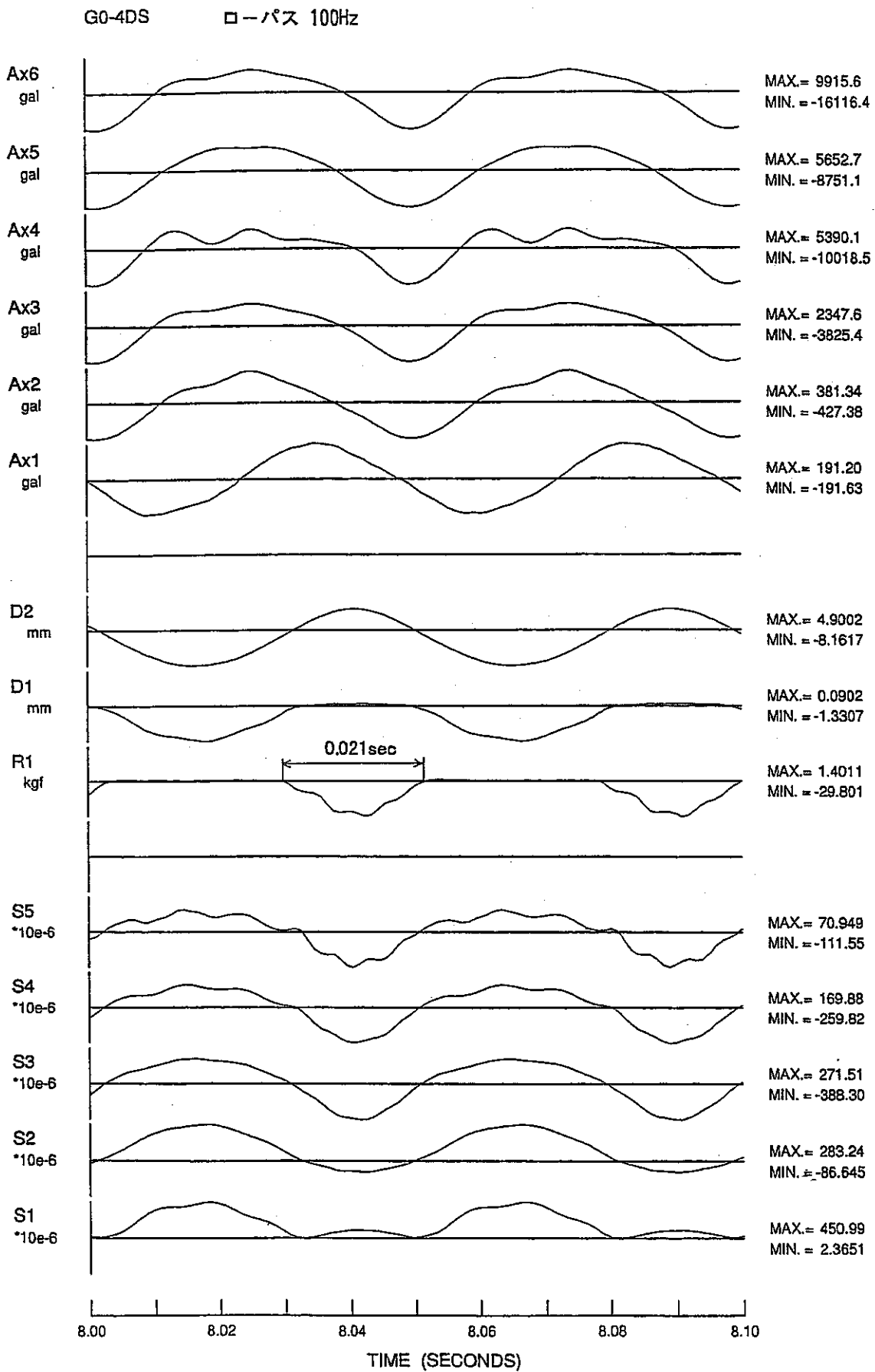


図 4.2-1(3/6) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ 0mm、240gal、20.4Hz)

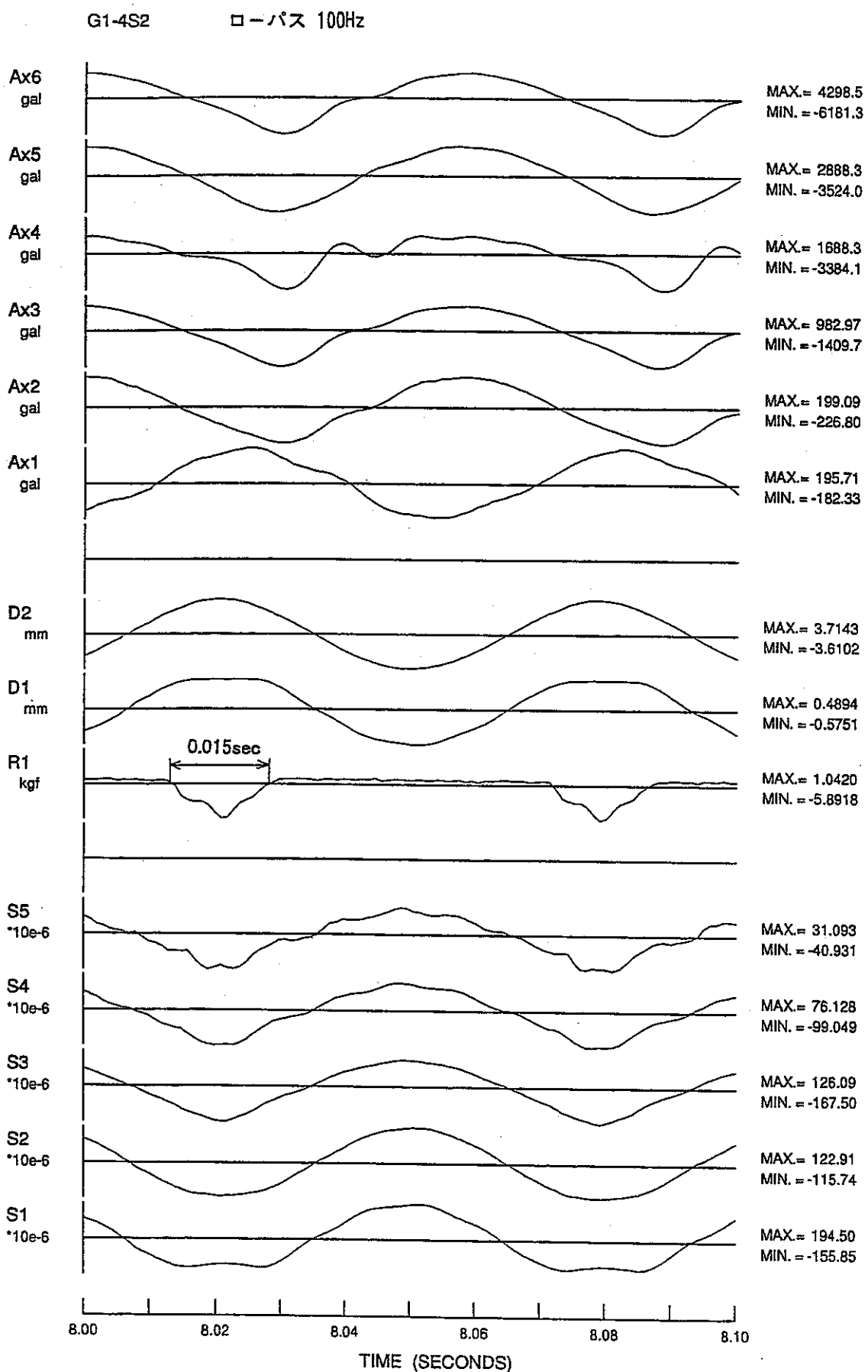


図 4.2-1(4/6) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ 0.4mm、240gal、17Hz)

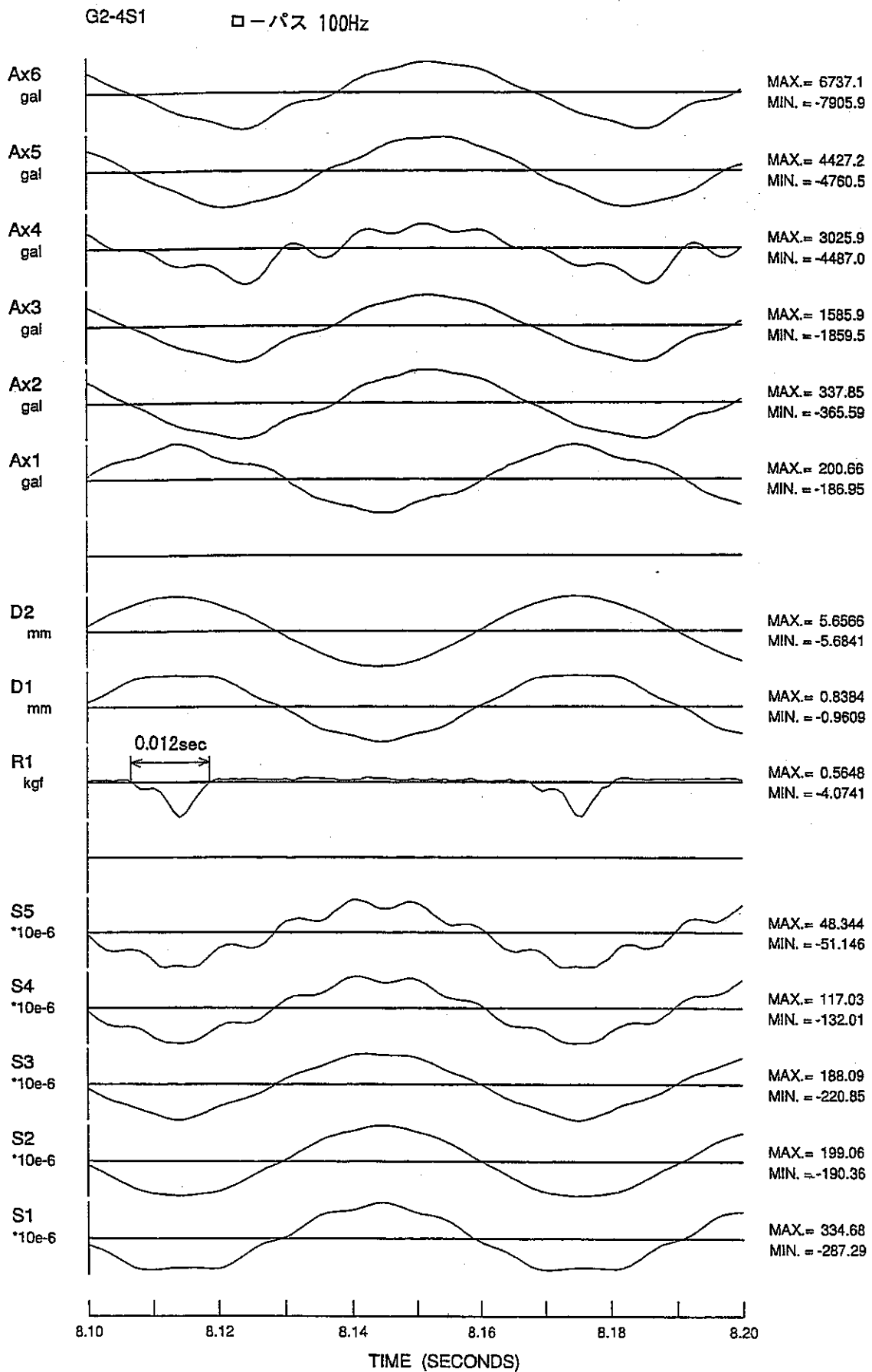


図 4.2-1(5/6) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ 0.8mm、240gal、16.5Hz)

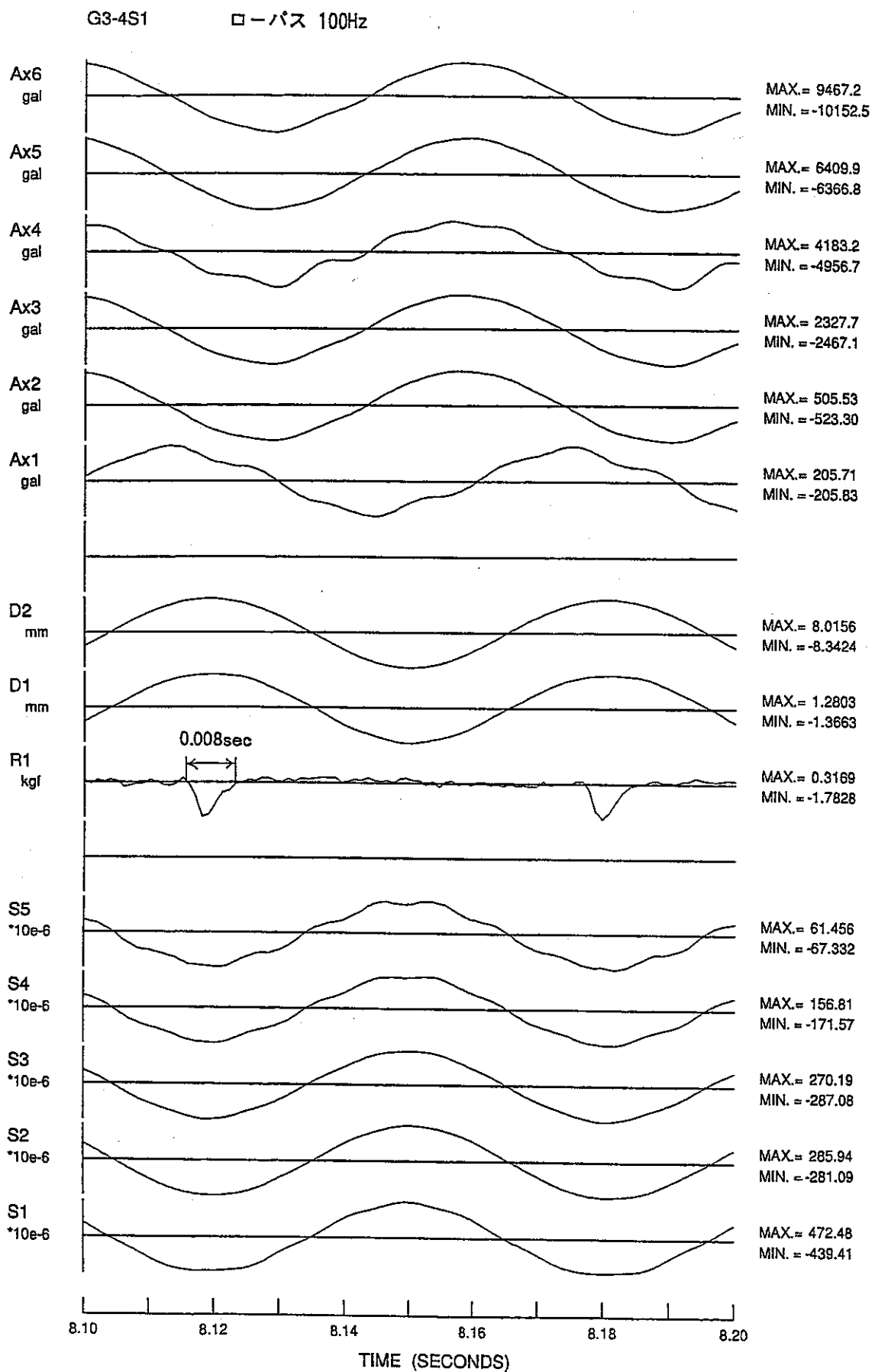


図 4. 2-1(6/6) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ 1.2mm、240gal、16. 5Hz)

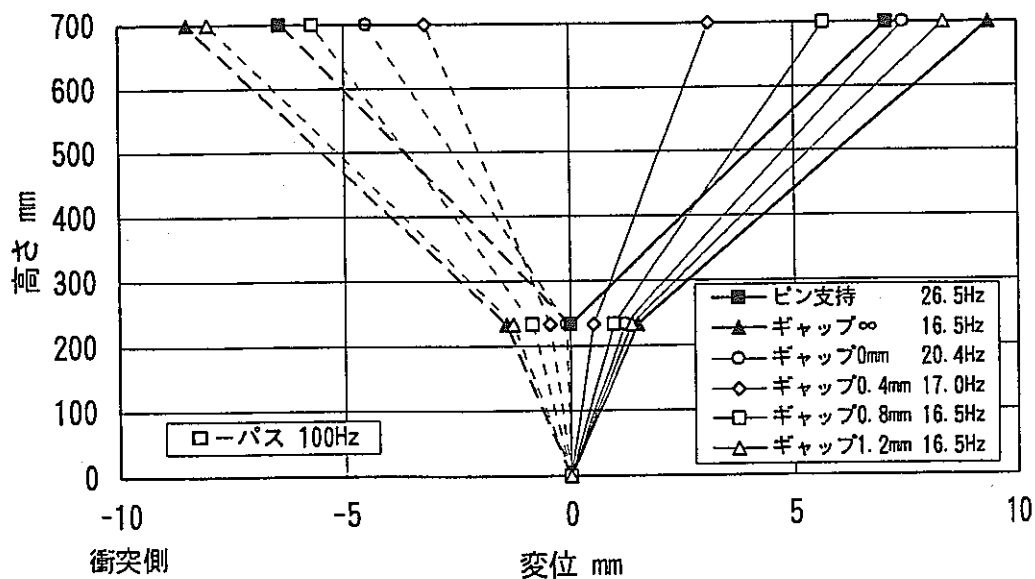
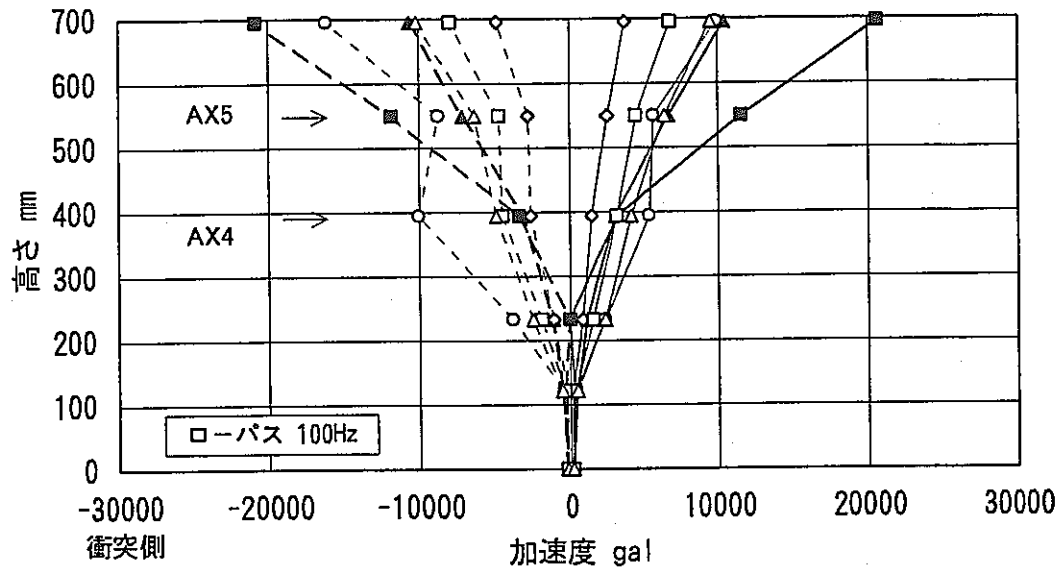
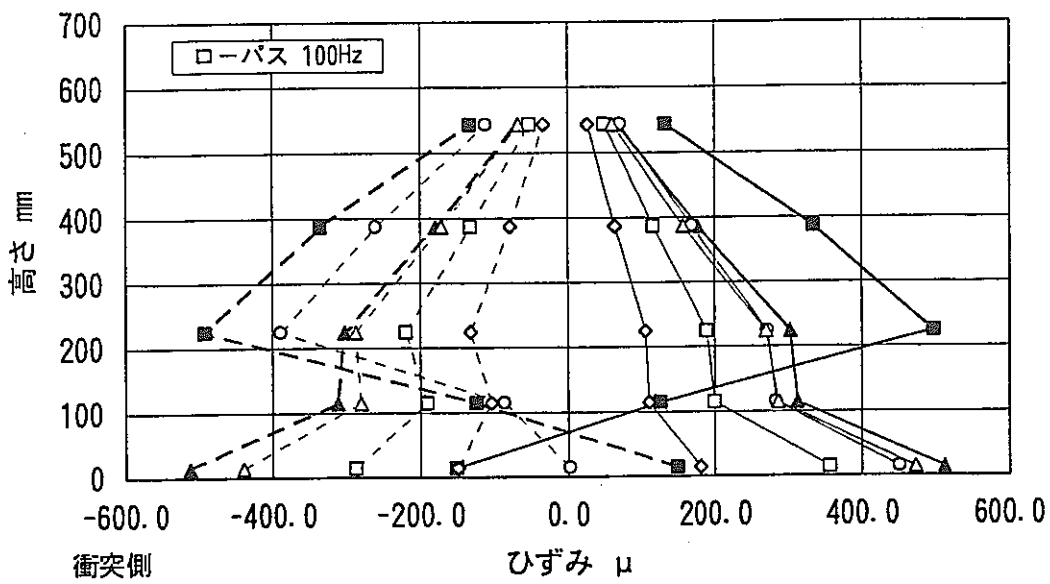


図4.2-2(1/5) ひずみ、加速度、変位の高さ方向分布 (LPF100Hz、定常加振、240gal)

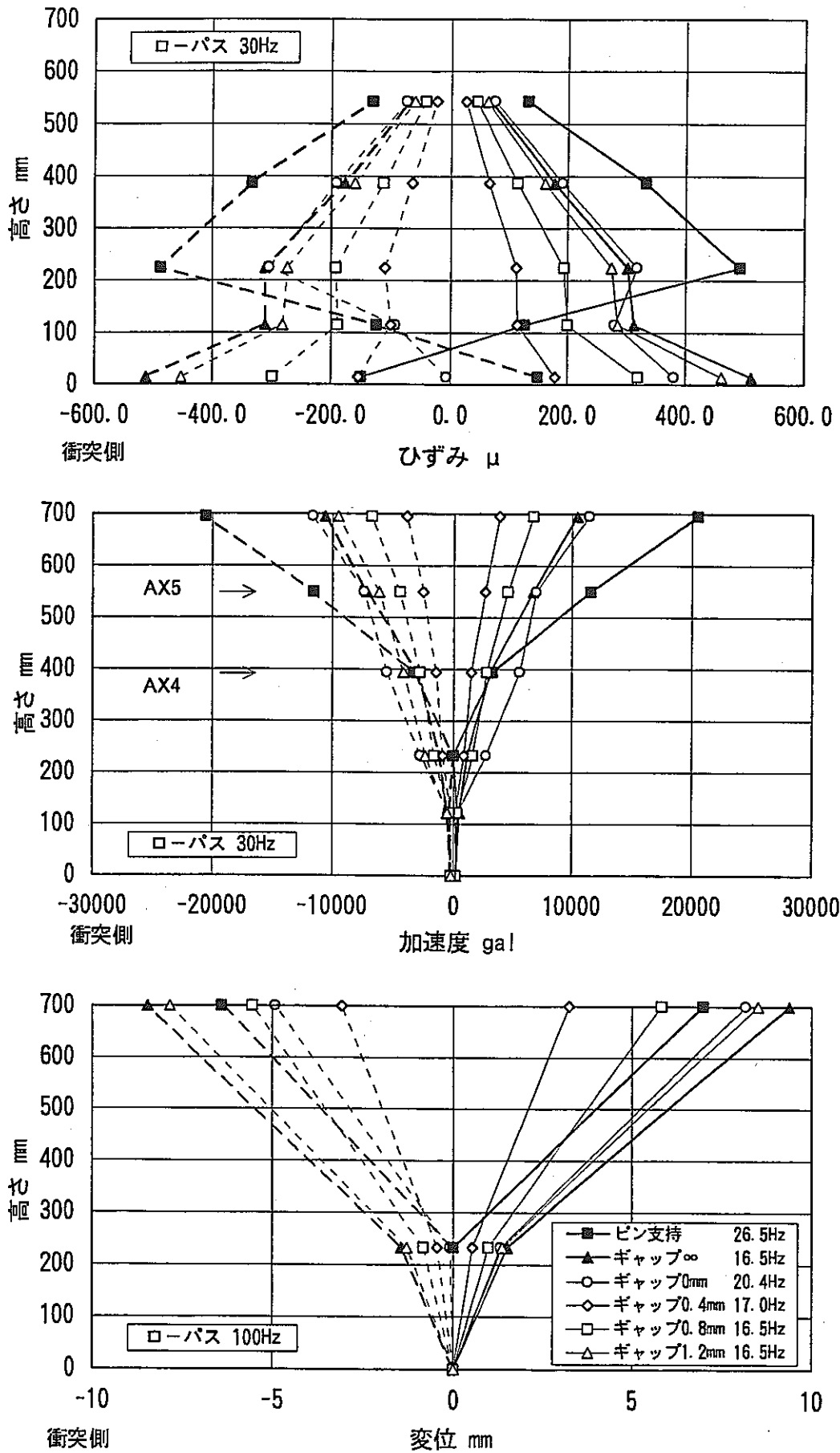
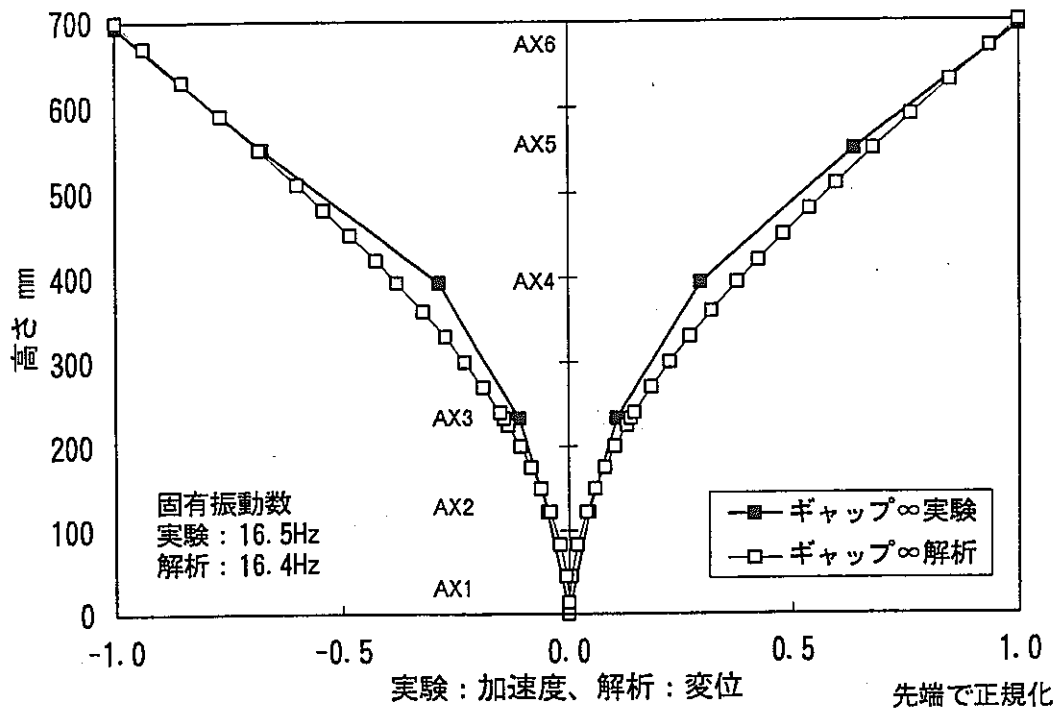
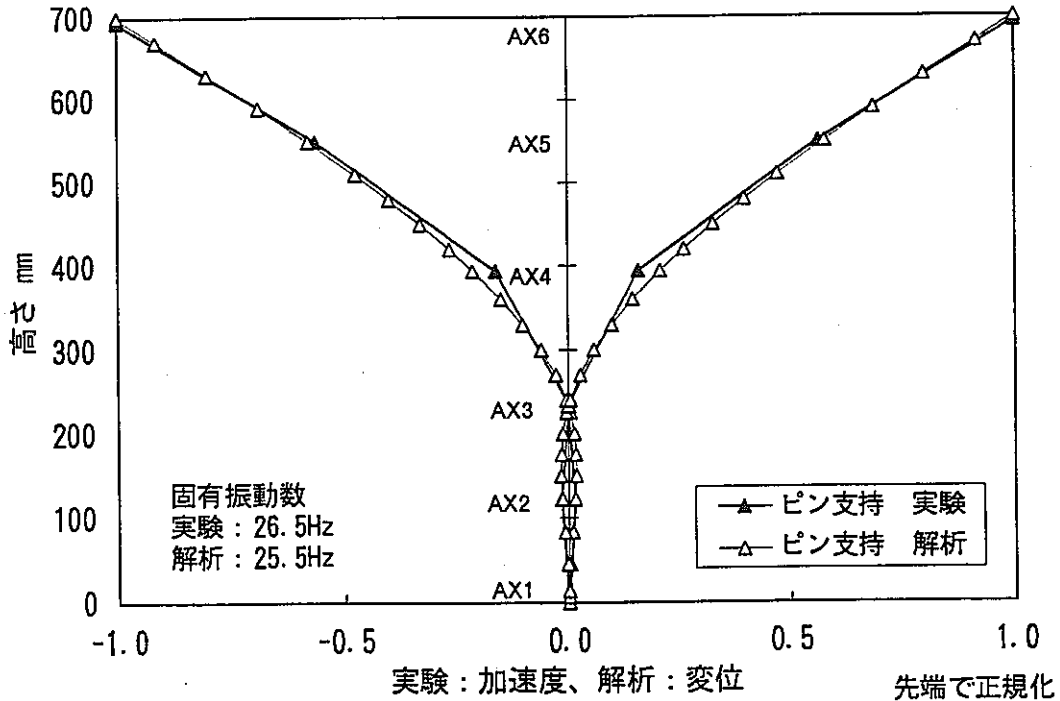


図4.2-2(2/5) ひずみ、加速度、変位の高さ方向分布(LPF30Hz、定常加振、240gal)

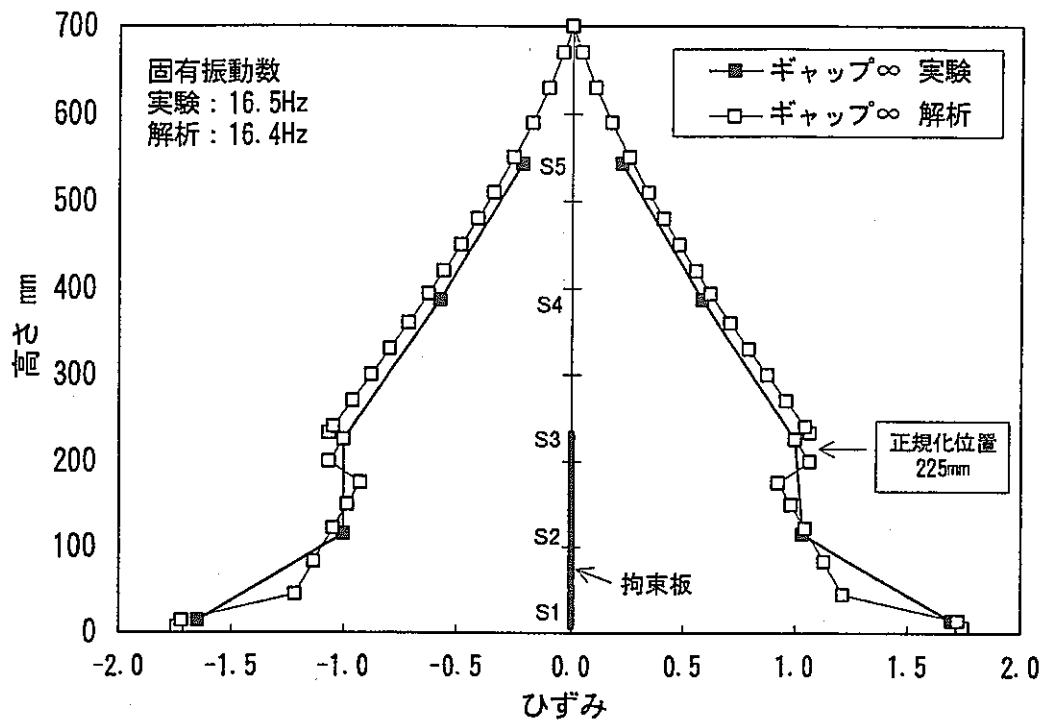


実験と解析のモード比較 (ギャップ $\infty$ )

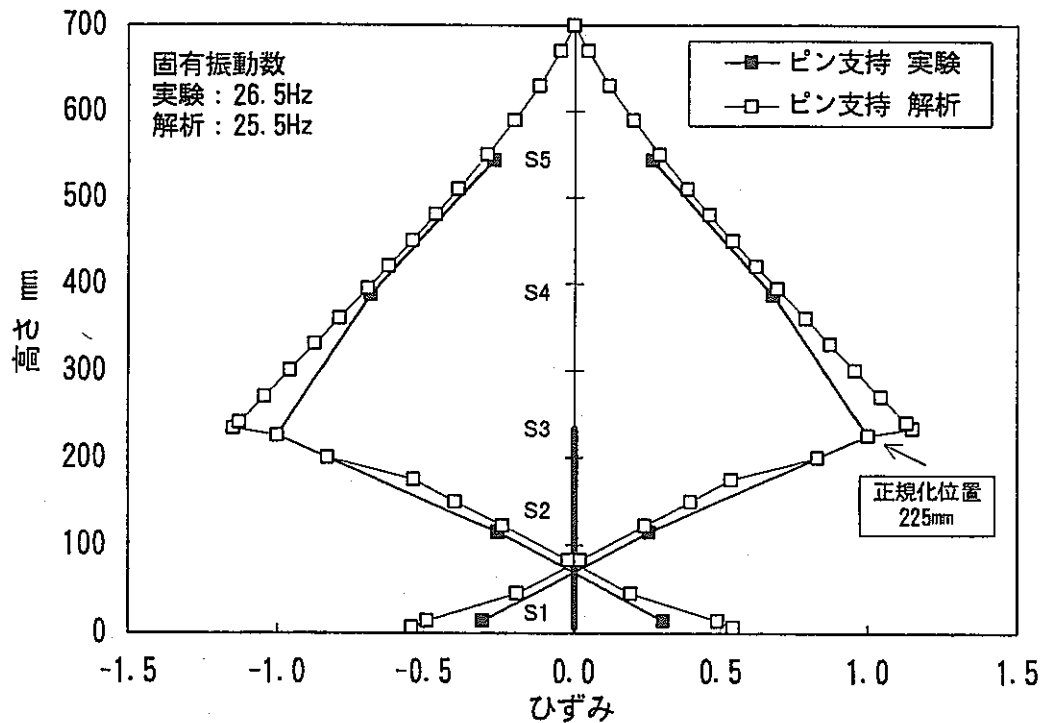


実験と解析のモード比較 (ピン支持)

図4.2-2(3/5) 実験と解析の加速度モードの比較(ギャップ $\infty$ 、ピン支持)



実験と解析のモード比較 (ギャップ∞)



実験と解析のモード比較 (ピン支持)

図4.2-2(4/5) 実験と解析のひずみモードの比較 (ギャップ∞、ピン支持)



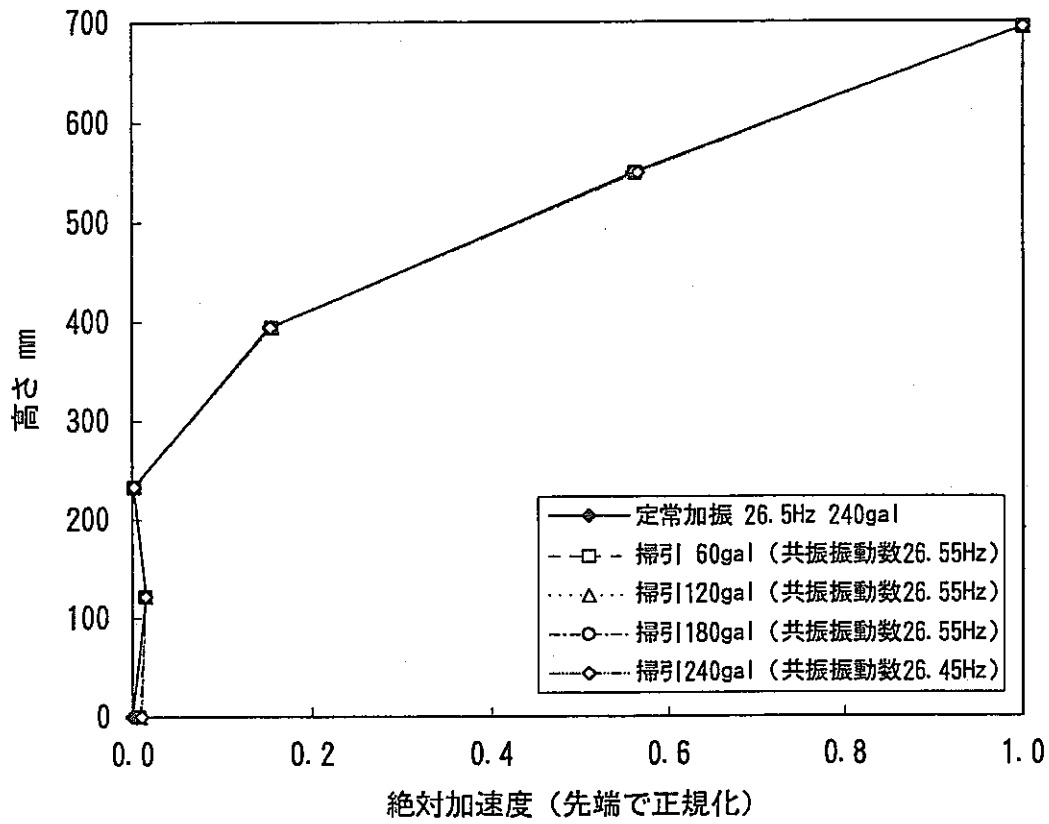


図4.2-2(5/5) 定常加振と掃引加振とのモード比較 (ピン支持)

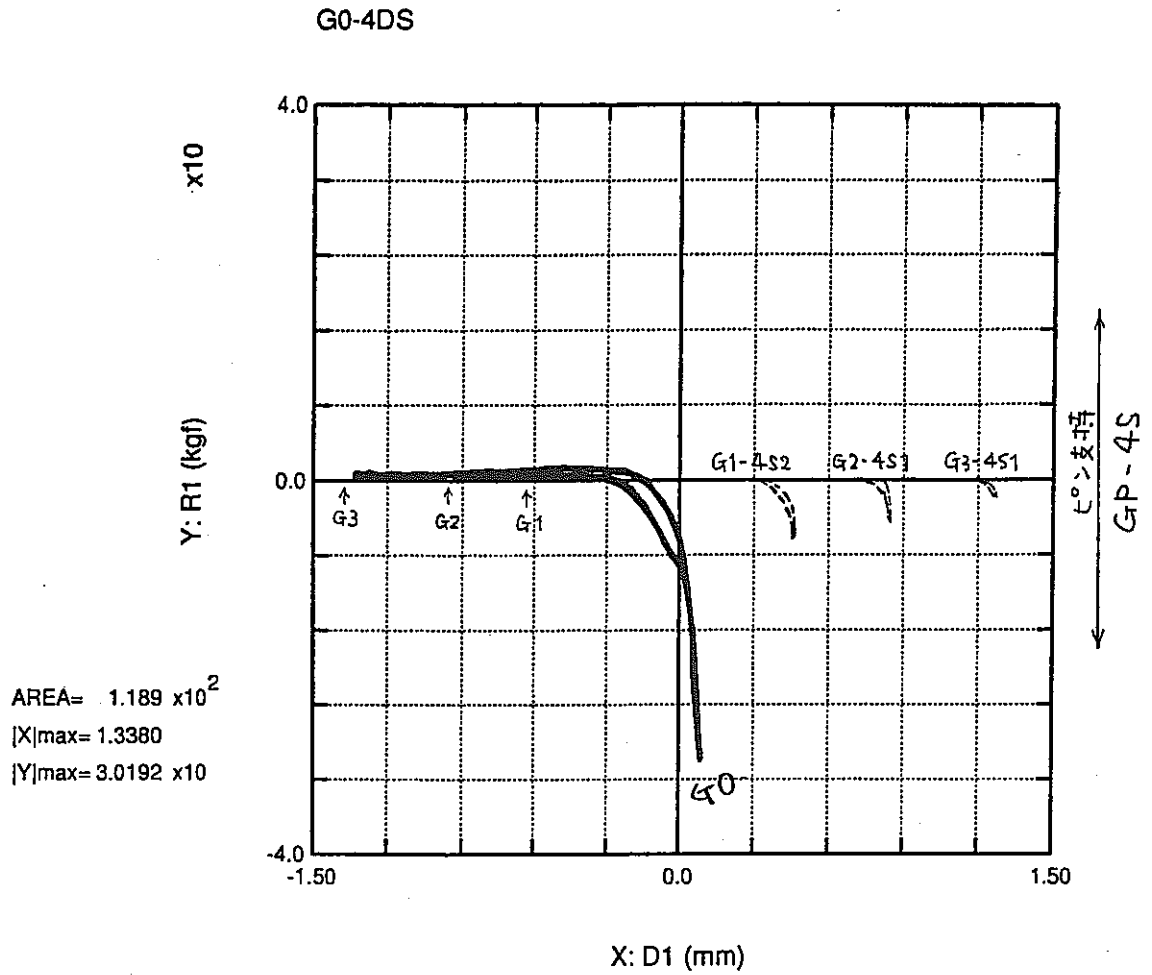


図4.2-3 反力と衝突部変位のヒステリシス(定常加振、240gal)

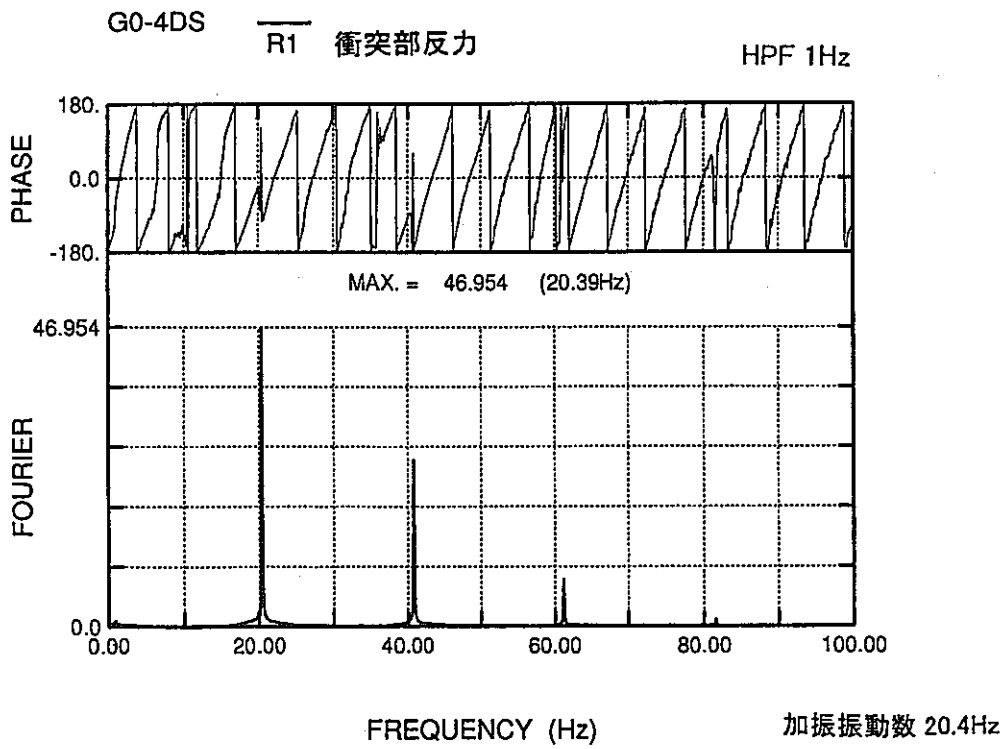
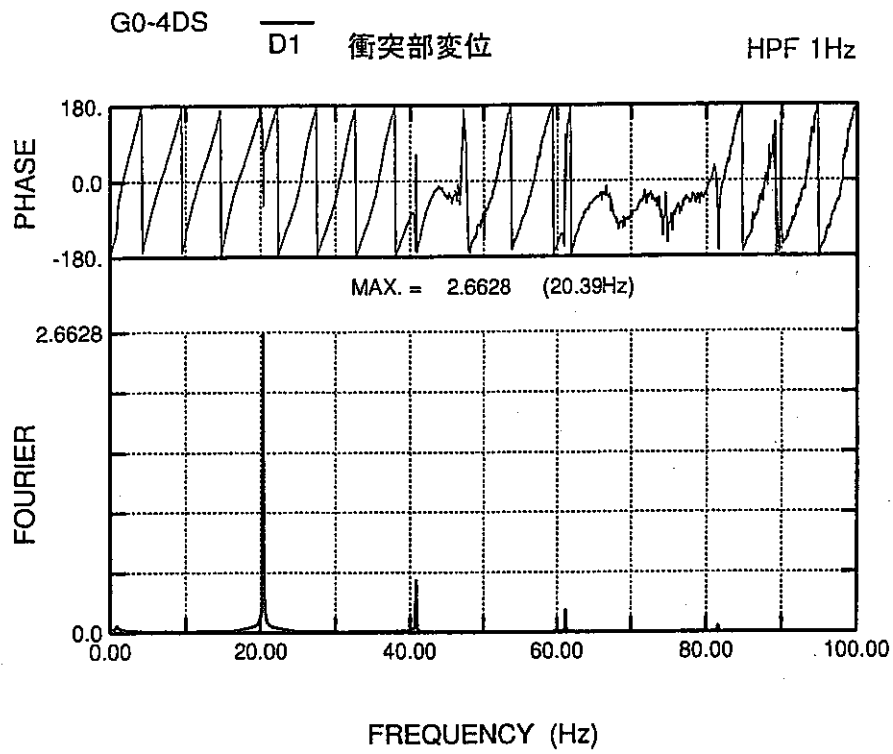


図4.2-4(1/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル (ギャップ 0mm)

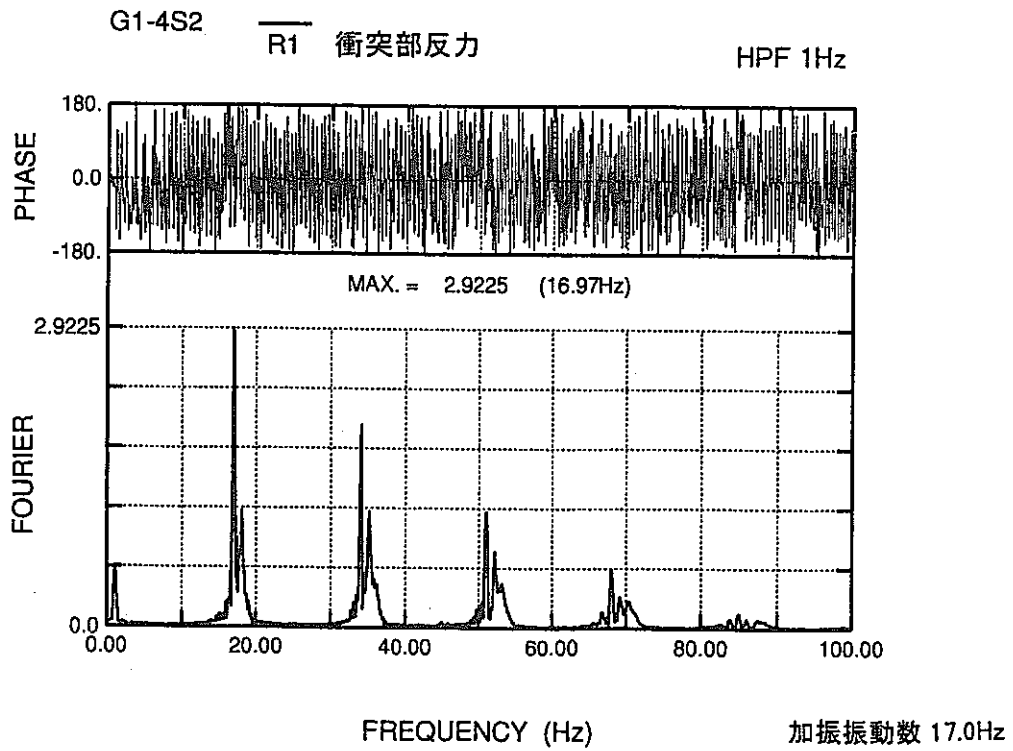
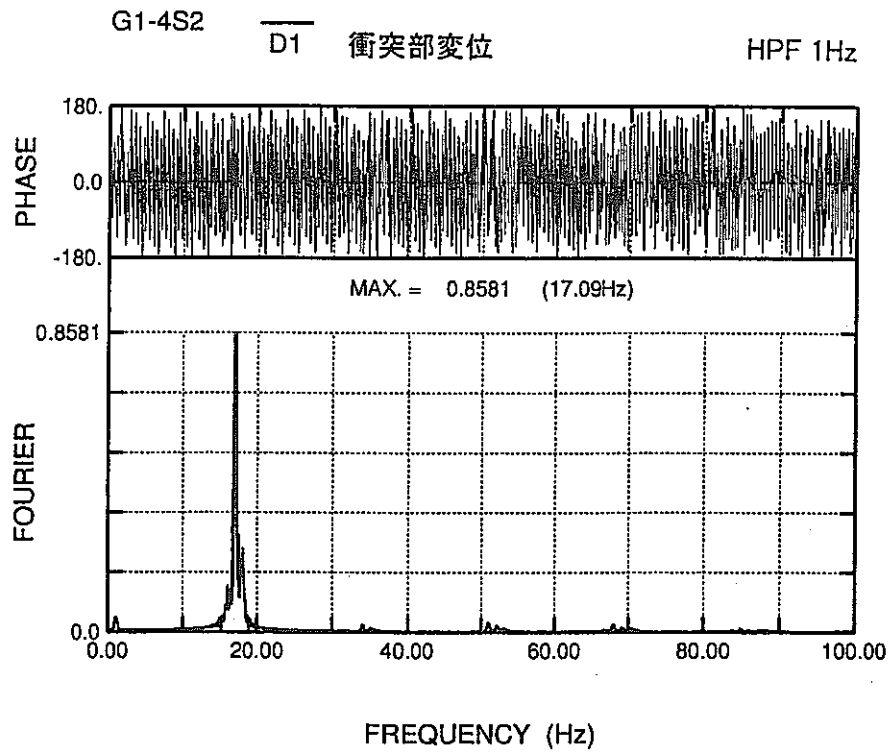


図4.2-4(2/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル (ギャップ 0.4mm)

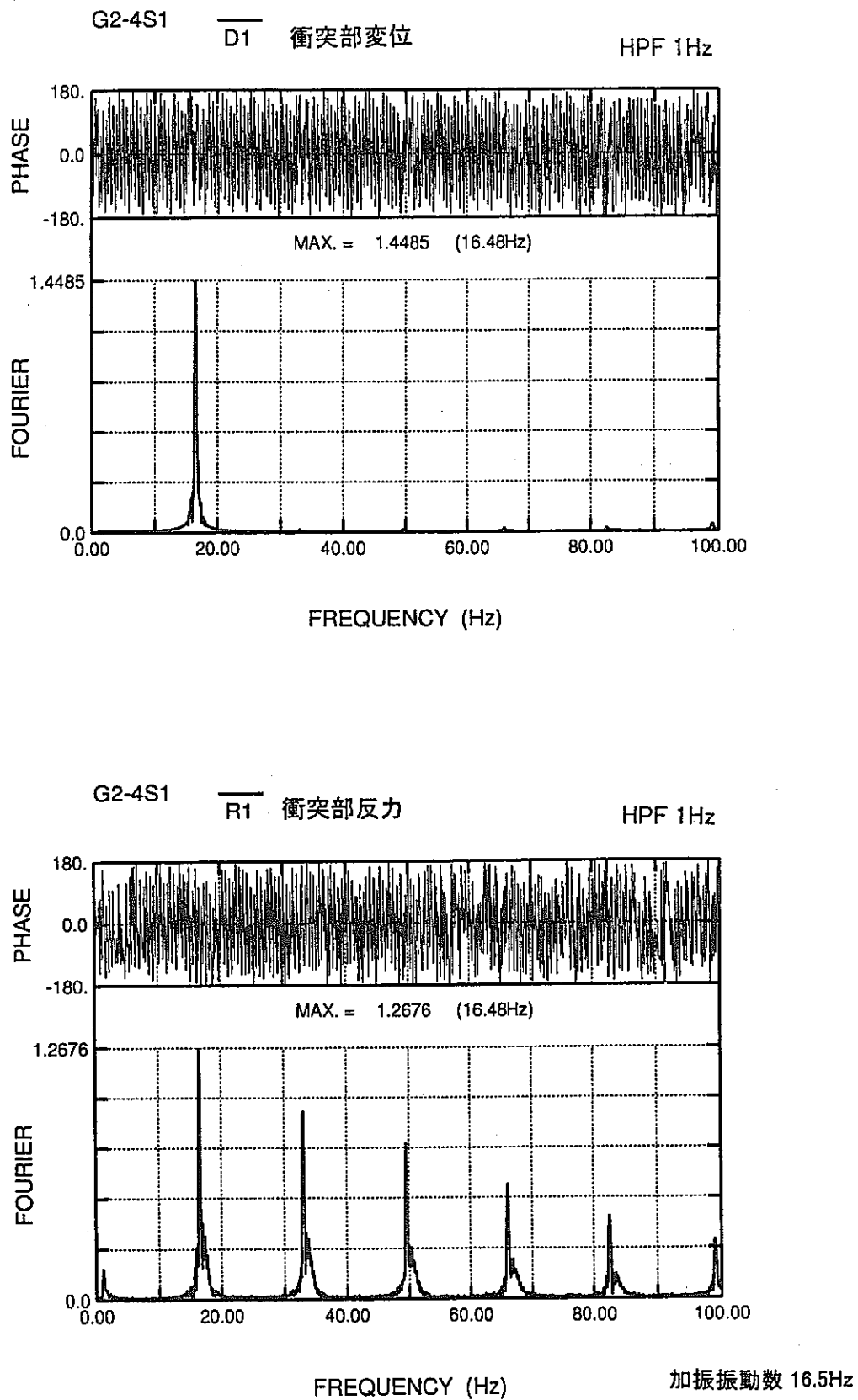


図4.2-4(3/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル (ギャップ 0.8mm)

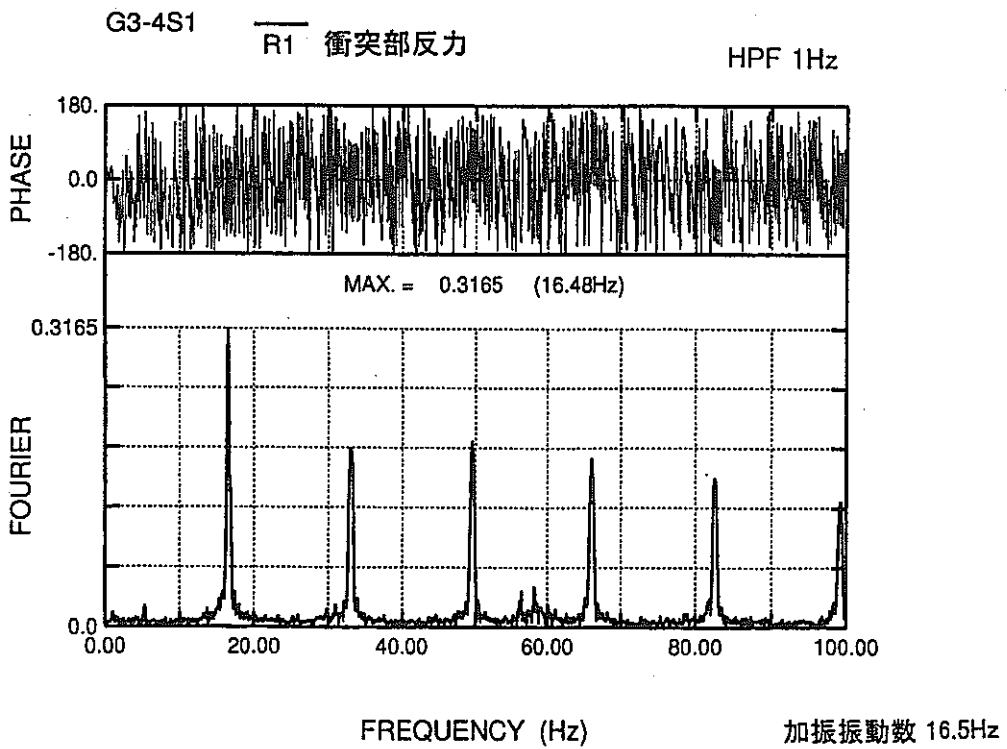
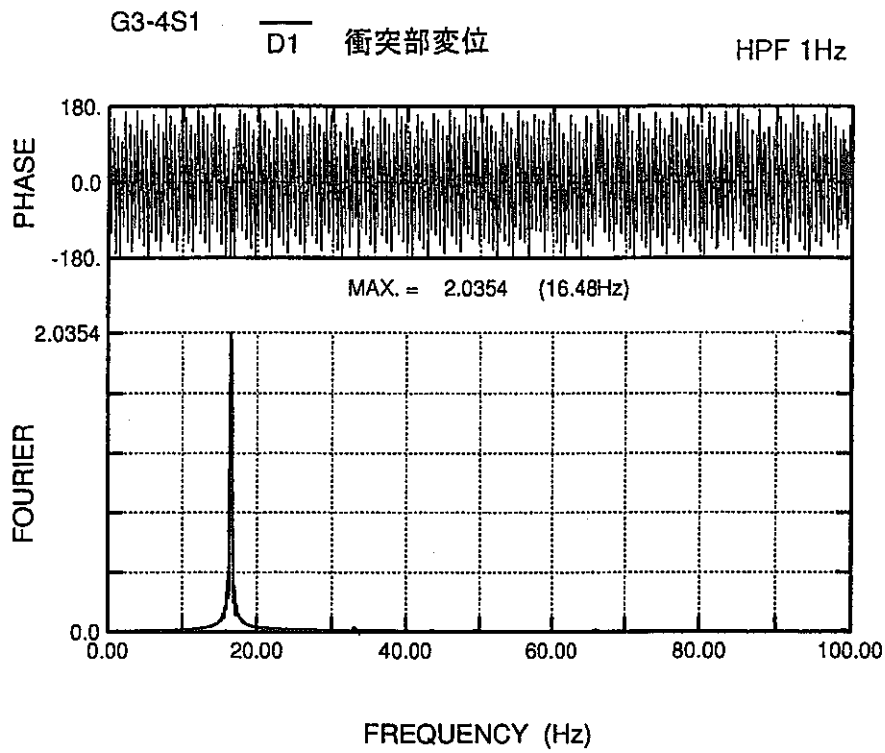


図4.2-4(4/4) 衝突部変位と反力波形のフーリエスペクトル (ギャップ 1.2mm)

加振振動数 Hz	衝突開始の 加振加速度 gal	最大 加振加速度 gal	衝突終了の 加振加速度 gal
15.0	—	400	—
16.0	141	395	138
17.0	123	177	73
17.5	281	306	85
18.0	413	424	113
18.5	—	483	—

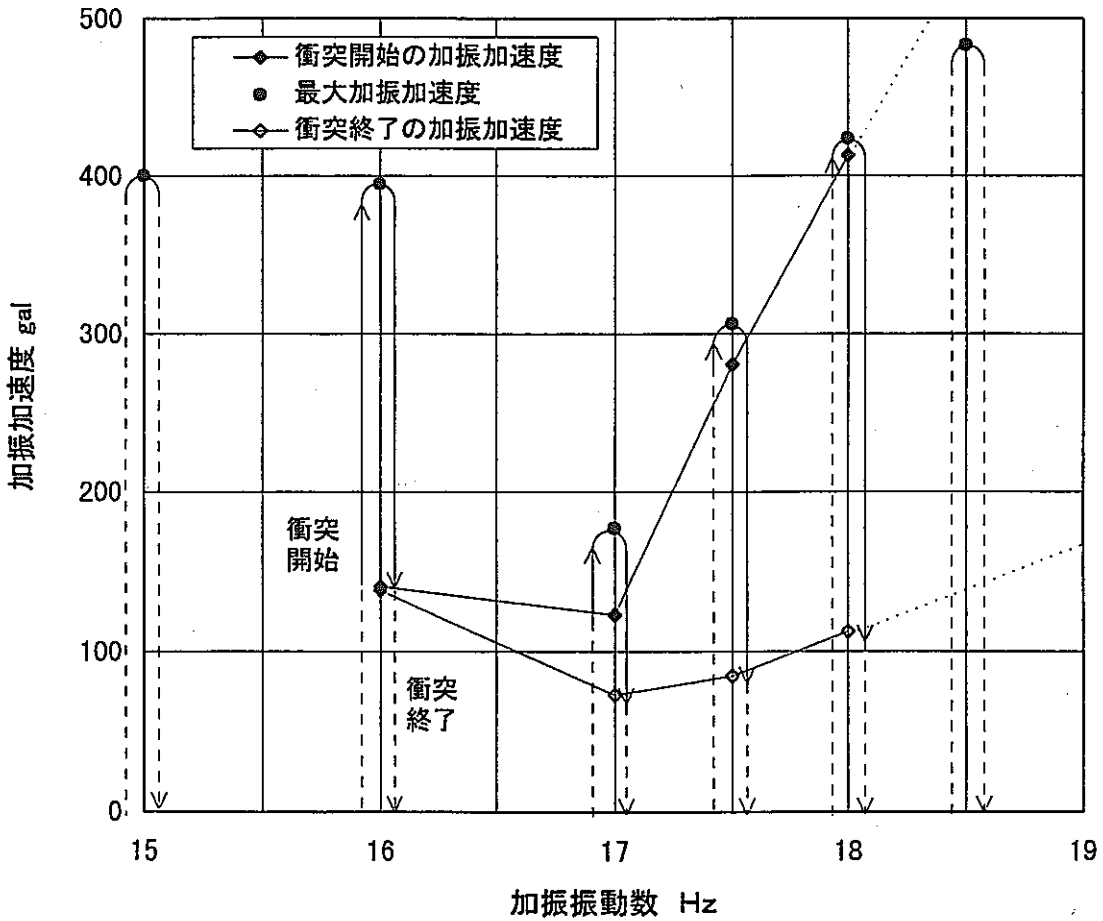


図4.3-1 加振加速度掃引試験結果

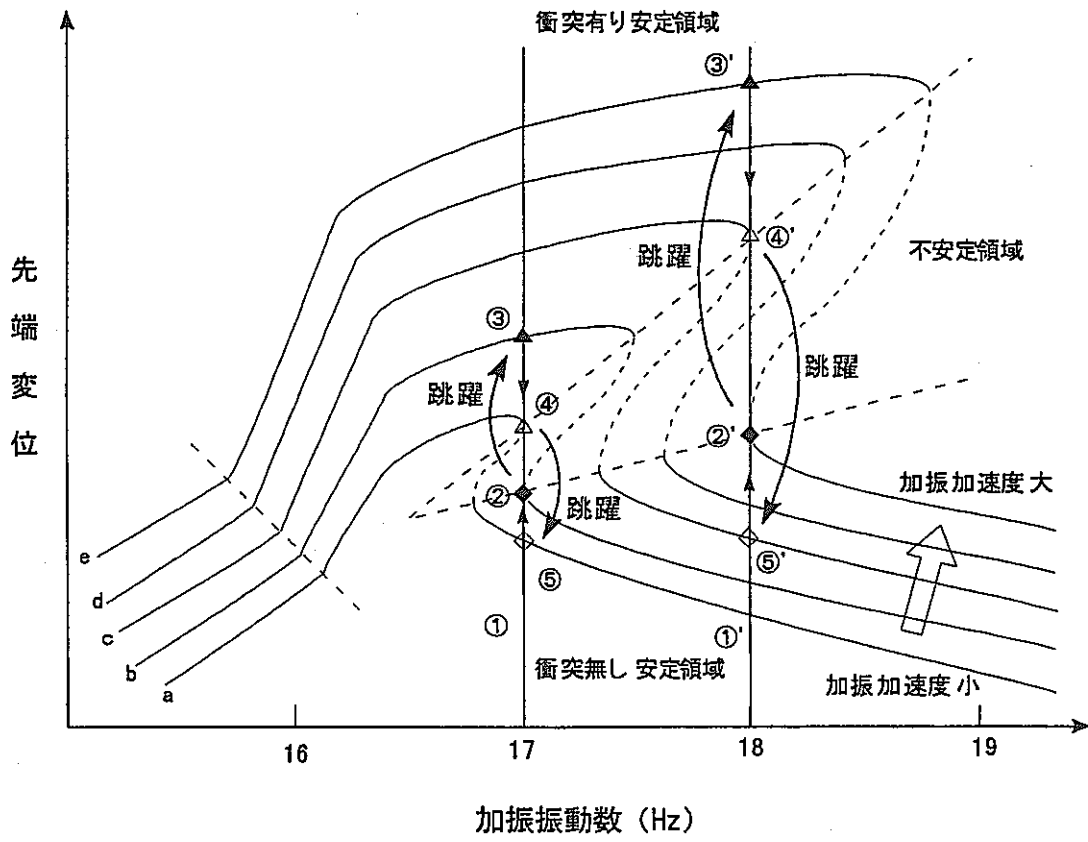


図4.3-2 加振加速度掃引試験結果概念図



G1UD170 加振振動数17.0Hz

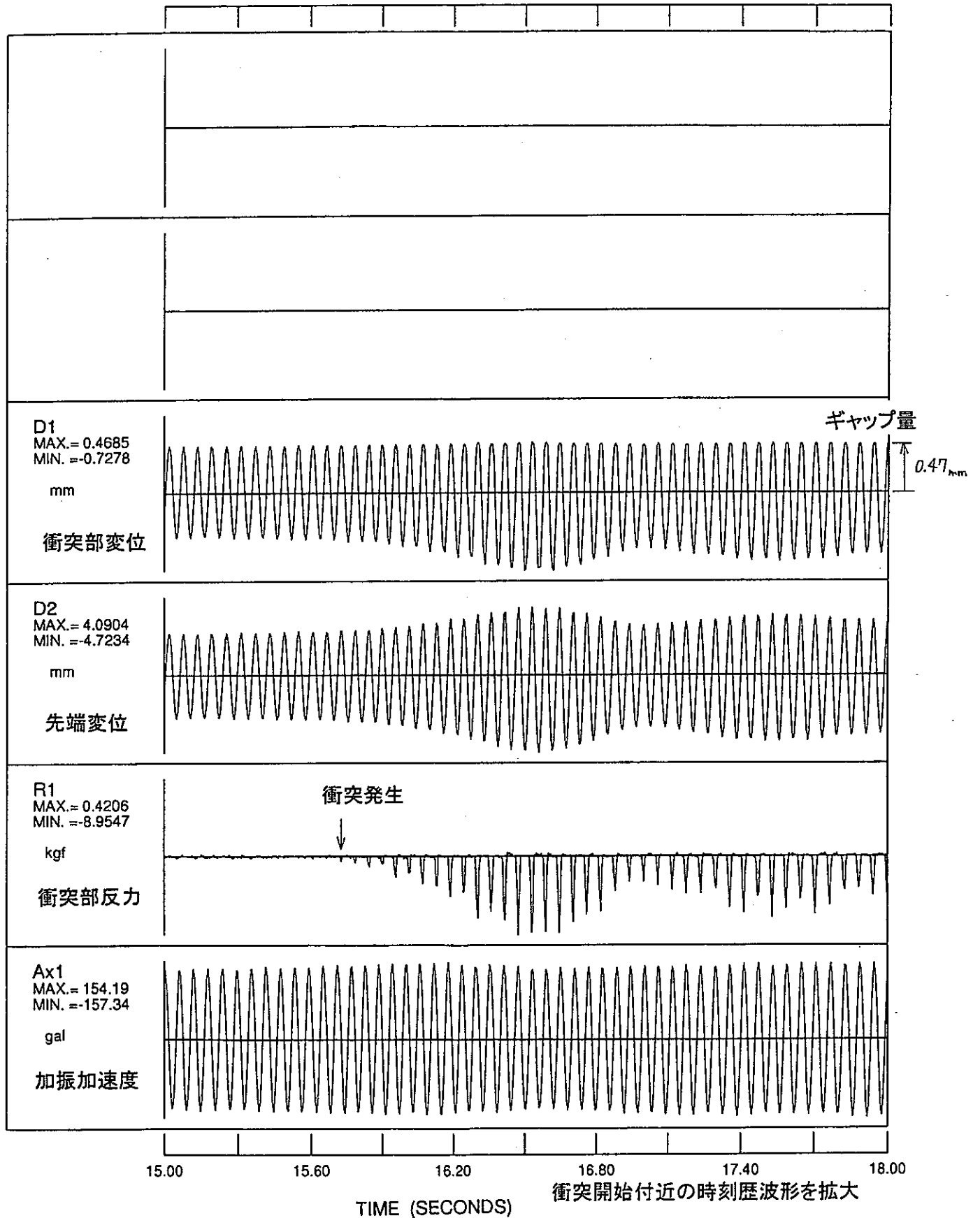


図4.3-3 加振加速度掃引試験結果 代表ケースの時刻歴波形

## 5. 解 析

振動するはり(一端固定)がその一部で剛体と衝突する場合に、振動挙動が衝突によってどのような影響を受けるかを実験的に明らかにした。本章では、解析により同様の振動挙動を把握し試験結果との比較を行う。

### 5.1 解析方法

#### 5.1.1 解析モデル

試験体を一本のはりとして集中質量系で模擬し、拘束板の剛性を考慮した。衝突部は、はり固定端より $L/3$  ( $L=700$  mm)の位置で対応する節点にギャップ距離(ギャップ剛性)とばね要素(接触剛性)を直列配置とし模擬した。また、試験体先端に変位計測用のターゲットを付加しているため相当する質量を先端に付加した。解析モデルの物性値を表 5.1-1 に、試験体と解析モデル図の対応を図 5.1-1 ~ 5.1-2 にまとめて示す。

#### 5.1.2 解析コード

解析には、FINAS Ver.13.0 を用いた。以下に使用した要素と解析方法をまとめて示す。

【使用要素】	3次元弾性梁要素	(SBEAM2)
	3次元バネ減衰要素	(LCOMB2)
【解析方法】	線形固有値解析	
	直接積分線形時刻歴応答解析	

### 5.2 固有値解析

#### 5.2.1 解析ケース

先端の質量の有無、拘束板の剛性有無、支持条件(片持ち、ピン支持)をパラメタとした固有値解析を行った。表 5.2-1 に固有値解析ケース一覧を示す。

## 5.2.2 解析結果

解析結果として各解析ケースの 2 次までの振動数を表 5.2-2 に示し、代表的な振動モードを図 5.2-1 ~ 5.2-2 に示す。なお、表中には試験結果も合わせて示している。

この結果、試験結果を精度良く表しているケースは、先端質量と拘束板を考慮したものと言える。また、先端質量を付加することで振動数は低下し、ピン支持条件で顕著に表れることになる。

固有モードの形状は、片持ち条件を基準とした場合、ピン支持にすると固定端から支持位置までは両端支持モードを示し、支持位置からは片持ちモードを示す。次数が上がると支持位置上部のモードの次数が上がることになる。

## 5.3 応答解析

### 5.3.1 解析ケース

固有値解析で使用した先端質量と拘束板を考慮したモデルに対し、正弦波スイープ (UP,DOWN) と正弦波 (固有振動数と同等) を使用した応答解析を実施する。入力波それぞれの条件は次のとおりとした。

#### 【正弦波スイープ】

入力レベル	:	240(gal)
周波数範囲	:	15~30(Hz)
スイープ速度	:	0.2(Hz/sec)
時間間隔	:	0.0025(sec)

#### 【正弦波】

入力レベル	:	240(gal)
周波数	:	片持ち(16.6 Hz),ピン支持(25.8 Hz)
継続時間	:	10(sec)
時間間隔	:	0.001(sec)

はりモデルは、衝突部にギャップ要素とばね要素を組合わせたモデルとなり解析パラメータには、試験同様のギャップ量 (0~1.2mm) とした(図 5.1-2 参照)。

また、減衰は試験結果で求められた等価減衰定数を構造全体のレイリー減衰として

各々与えた。解析ケースの一覧を表 5.3-1 に示す。

### 5.3.2 解析結果

#### 《正弦波スイープ》

解析結果として正弦波スイープアップでの周波数応答関数図を図 5.3-1～5.3-2 に示す。応答には、はり先端加速度を使用し、実線は解析結果、点線は試験結果である。また、図 5.3-3 には周波数応答関数より求められる固有振動数（卓越振動数）をギャップ量でまとめた結果を示す。表 5.3-2 には各ケースでの固有振動数をまとめて示す。

図より、はり構造物が片側にギャップを有する場合には、振動数は片持ちとピン支持条件の間に存在することになり、解析・試験ともに良い一致を示していることが分かる。

次に、代表ケースとしてギャップ量(0, 0.4mm)の 2 ケースに対して、スイープダウンを行った。スイープの順逆での周波数応答関数比較を図 5.3-4 ～ 5.3-5 にまとめて示す。

一般的に非線形振動の場合には、振動数増加(減少)により周波数応答関数の曲線が急激に変化することが知られている。今、周波数応答関数図を見ると G0 のケースではスイープアップ、ダウンで明瞭な違いは試験、解析双方ともに認められない。一方、更にギャップ量が増す G1 のケースでは、スイープ方向によって周波数応答関数の形状が異なり、スイープアップがダウンの倍率より大きく、振動数が高周波数側に位置することから系は、ハードニングを示すことが分かる。

#### 《正弦波》

正弦波入力には、片持ち、ピン支持と代表例としてギャップ(1.2mm)条件のモデルを使用し、はり高さ方向でのひずみ分布を確認する。正弦波は、固有値解析結果に基づき設定した。なお、ひずみ量は接触位置近傍（ゲージ No S3）の値で正規化を行った。図 5.3-6～5.3-7 に各条件でのひずみ分布を示す。

はじめに片持ち条件を見ると、ひずみは固定端で最大値を示し、高さが上がるに従いひずみは低下する。拘束板によりはりの途中でひずみレベルが一定となる。試験、解析ともに良い一致を示している。

また、ピン支持条件では、ひずみは支持位置で最大を示しその前後で低下する傾向を示す。本ケースも試験、解析ともに良い一致を示している。

次にギャップを持つケースの入力レベルによるひずみ分布の推移を見ると、ひずみは

接触することにより接触部のひずみは増加し、はりは接触位置前後でモードが変わるが、ひずみの最大は固定端であることが示されている。

表 5.1-1 はりの諸元と解析モデルの物性値

長さ	700 (mm)
断面積	1.250E+2 (mm <sup>2</sup> )
断面二次モーメント加振方向	1.735E+3 (mm <sup>4</sup> )
	加振直角方向9.184E+2
材質	SCM435 JIS-G-4105(クロモリ鋼)
縦弾性係数	191.9 (Gpa)
密度	8.000E-6 (kg/mm <sup>3</sup> )

構造部位	断面積(mm <sup>2</sup> )	断面二次モーメント(mm <sup>4</sup> )
①固定端	2.55E+2	5.15E+3
②はり	1.25E+2	1.74E+3
③はり+拘束板(4枚)	1.73E+2	2.40E+3
④はり+拘束板(2枚)	1.45E+2	1.95E+3
先端質量(kg/mm/sec <sup>2</sup> )	1.99E-5	

※各構造部位は、図 5.1-1 を参照

表 5.2-1 固有値解析ケース一覧  
《片持ちはり》

CASE#	モデル条件	
	先端質量	拘束板
I1-1	○	○
I1-2	○	×
I1-3	×	○
I1-4	×	×

《ピン支持はり》

CASE#	モデル条件	
	先端質量	拘束板
P1-1	○	○
P1-2	○	×
P1-3	×	○
P1-4	×	×

表 5.2-2 固有値解析結果一覧（振動数:Hz）

CASE#	1次	2次
I1-1	16.62	108.93
I1-2	14.78	104.11
I1-3	24.74	141.08
I1-4	21.79	136.47
試験結果	16.6	—

CASE#	1次	2次
P1-1	25.76	209.43
P1-2	24.75	203.92
P1-3	41.76	269.57
P1-4	39.90	262.88
試験結果	26.5	—

表 5.3-1 応答解析ケース一覧

CASE#	ギャップ量(mm)	減衰(%)
G0	0(0.01を使用)	1.5
G1	0.4	1.9
G2	0.8	1.3
G3	1.2	1.4

表 5.3-2 応答解析結果一覧 (振動数:Hz)

CASE#	解析結果	試験結果
G0	20.13	20.34
G1	18.18	18.30
G2	18.00	17.68
G3	17.60	16.68



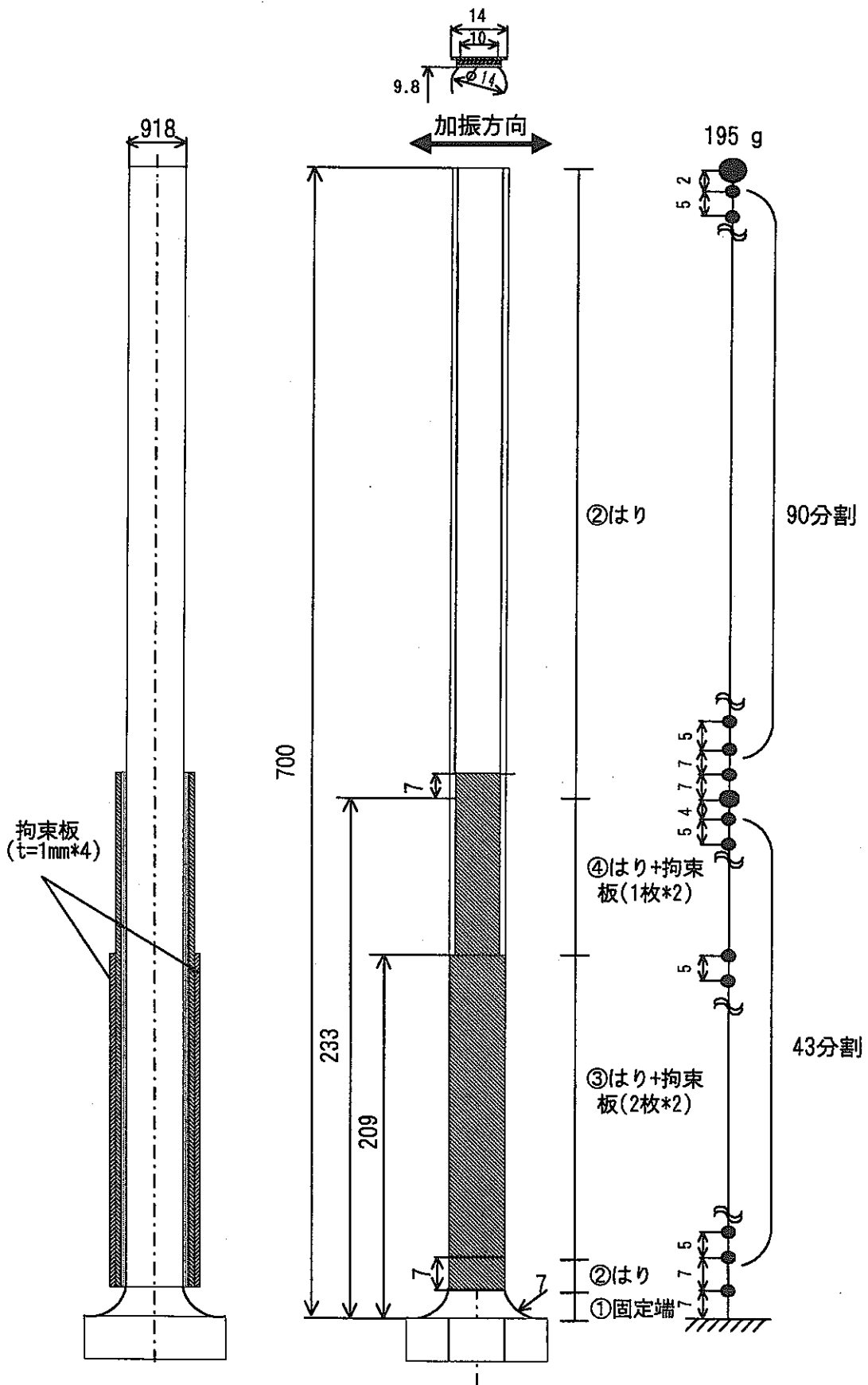


図5.1-1 解析モデル

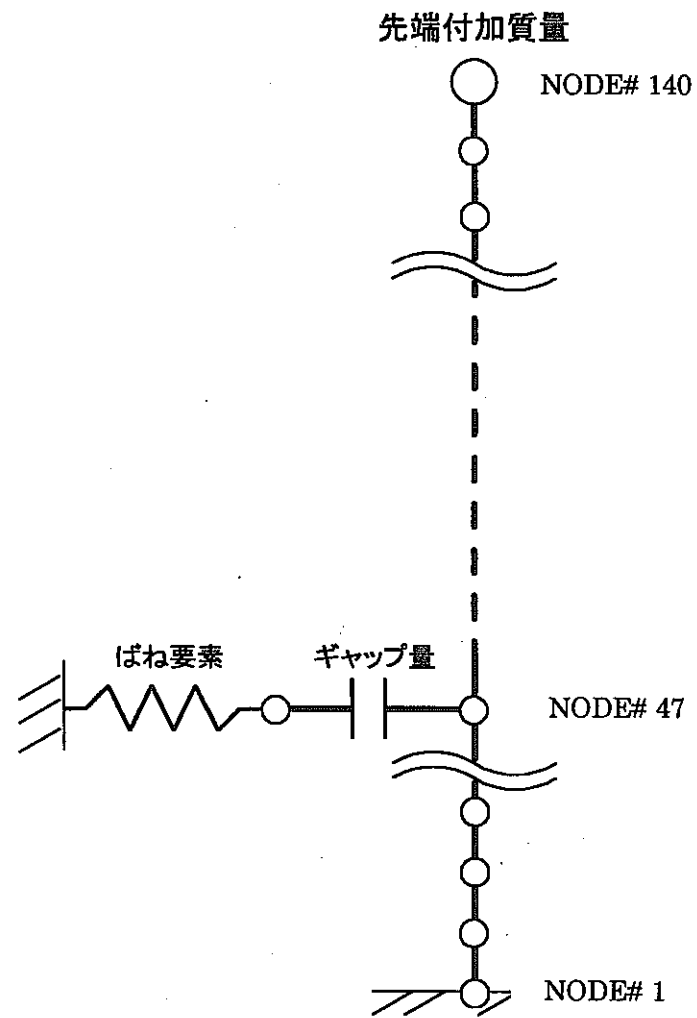
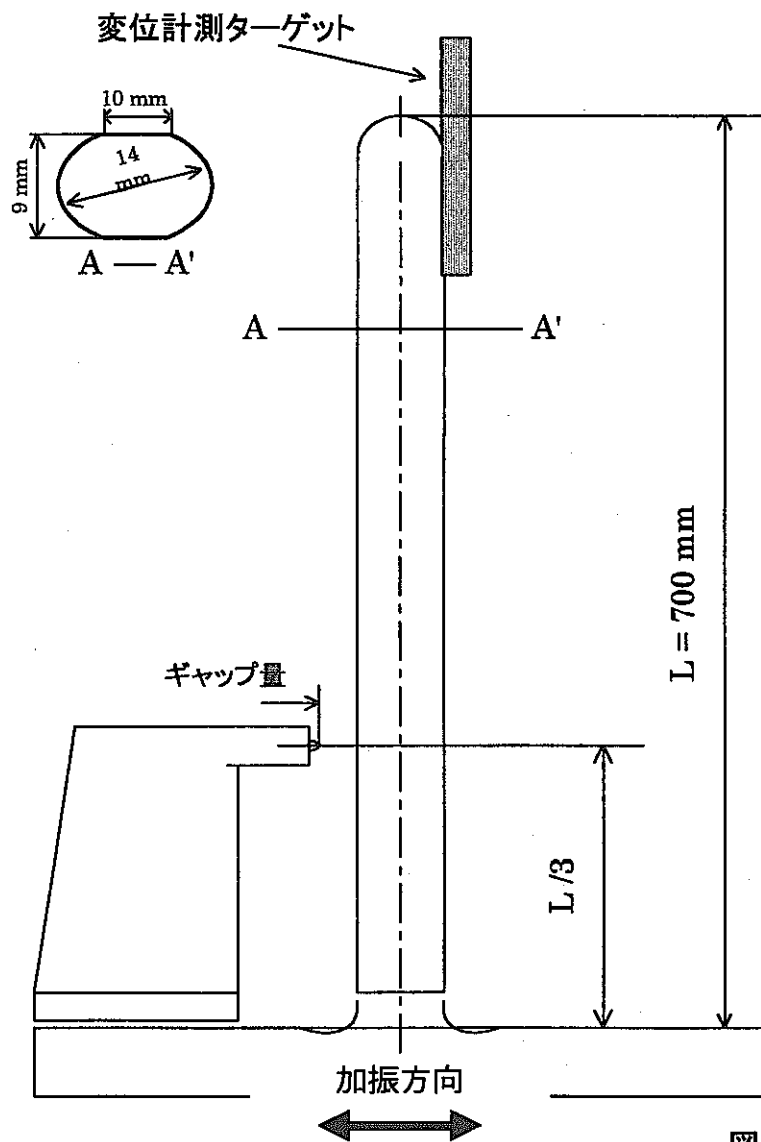
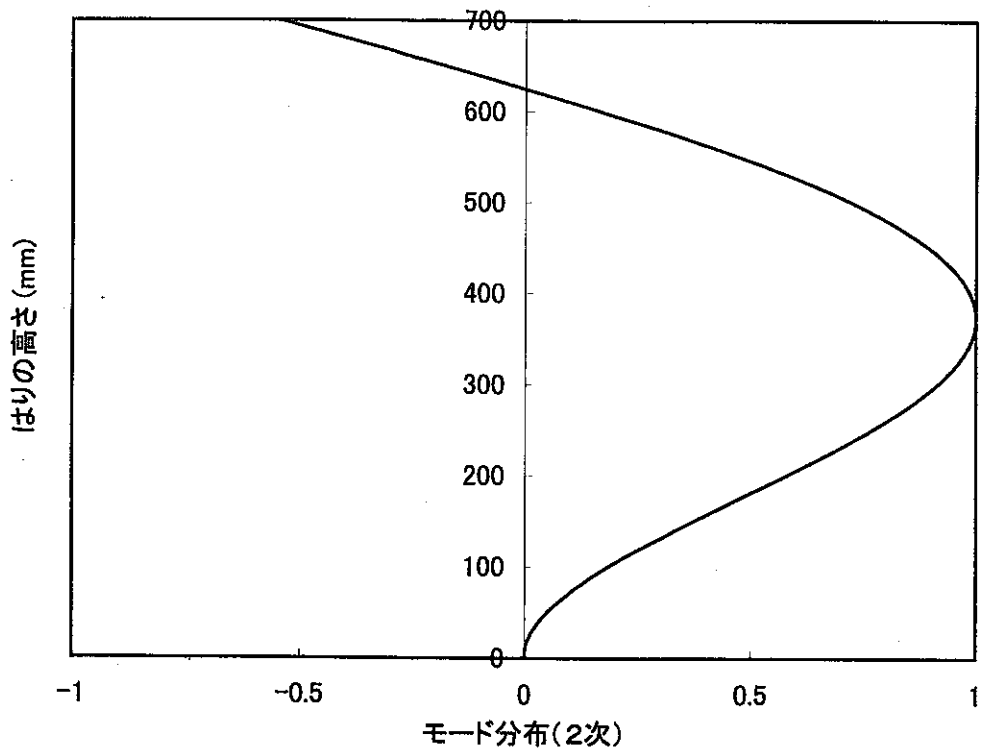
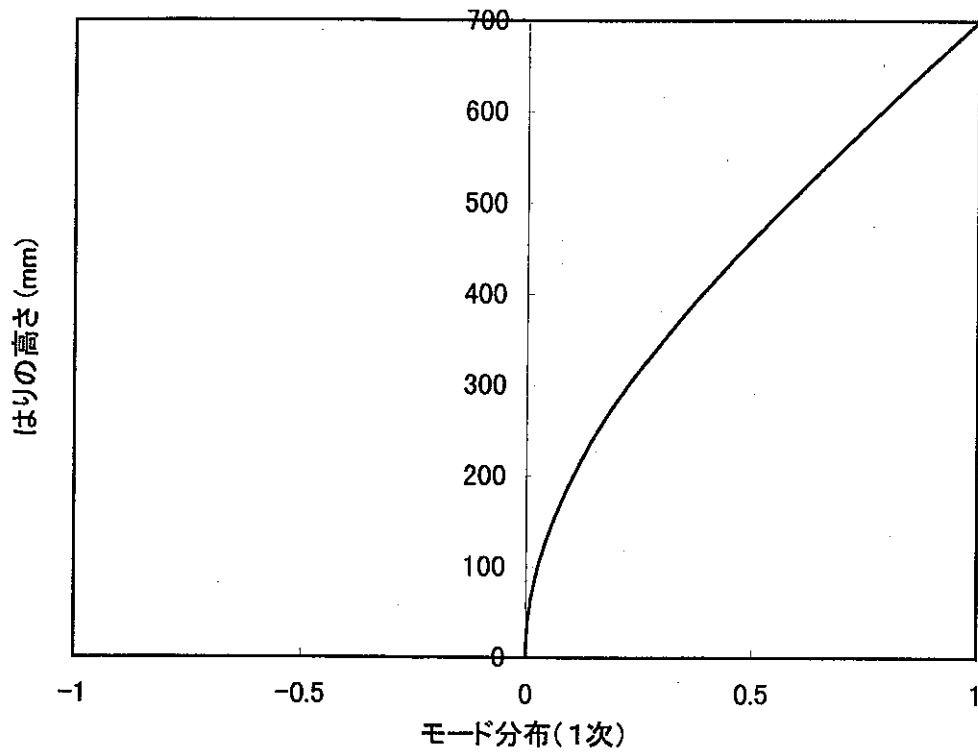
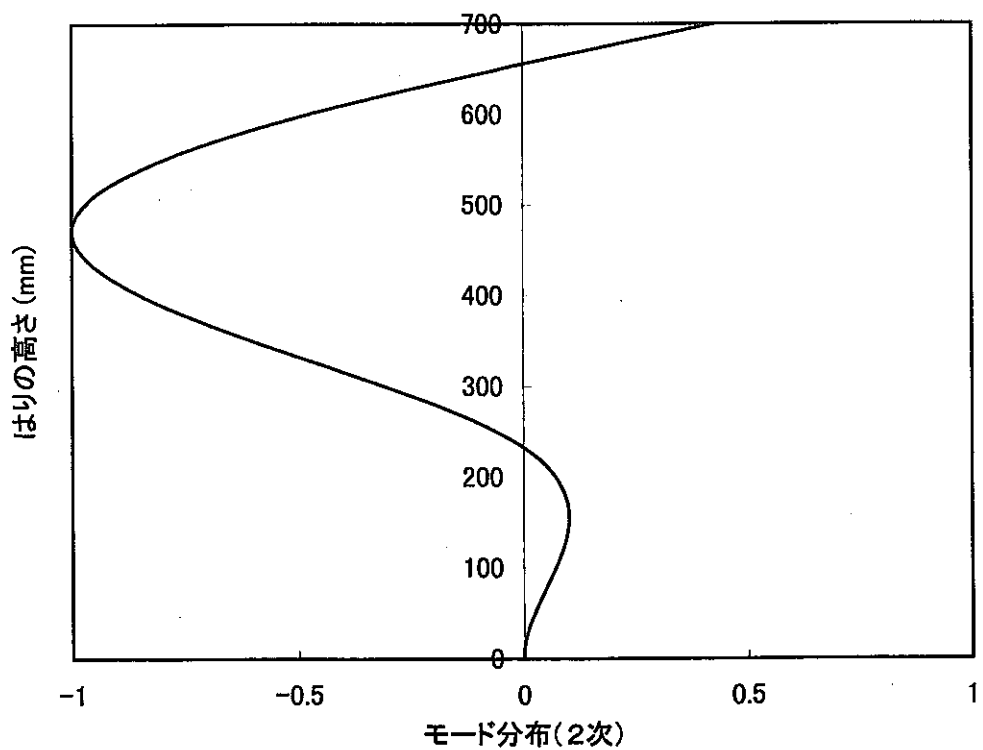
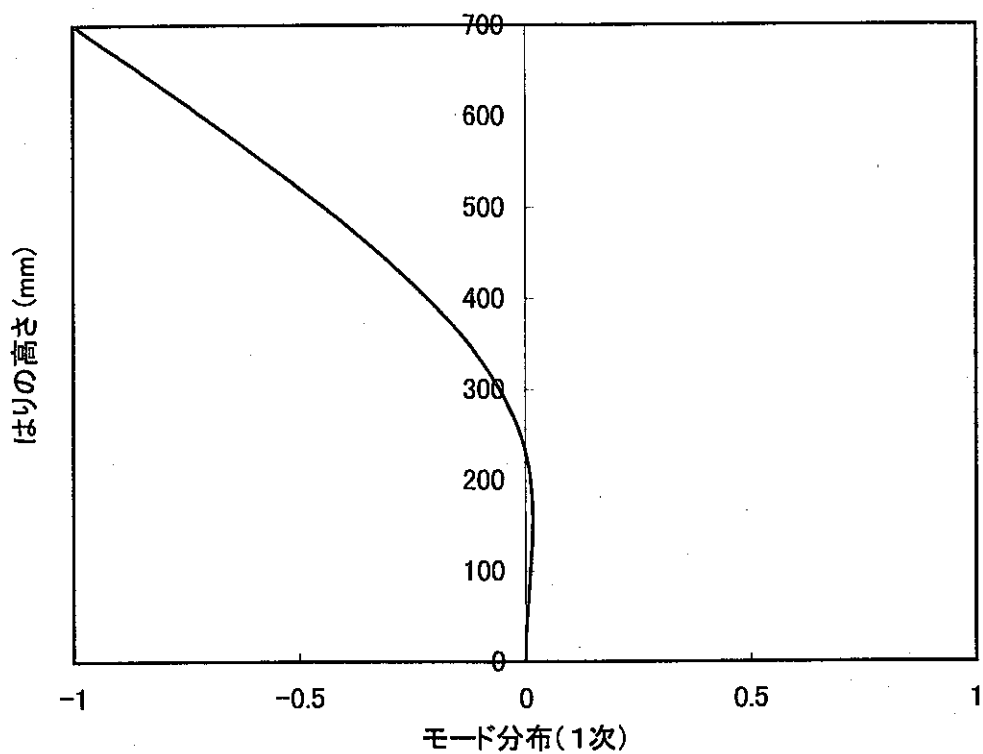


図5.1-2 接触部のモデル化



片持ち(ギャップ量 $\infty$ )の固有モード

図 5.2-1 先端質量と拘束板を考慮したモード(1/2)



ピン支持(ギャップ量0)の固有モード

図 5.2-2 先端質量と拘束板を考慮したモード(2/2)

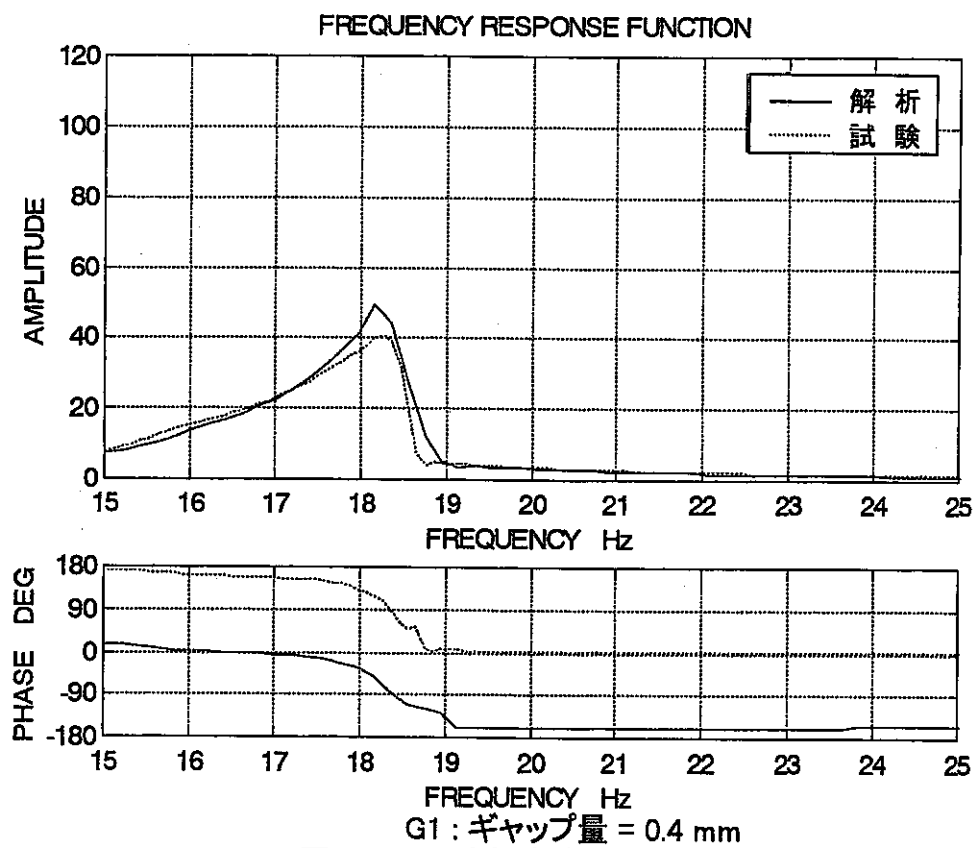
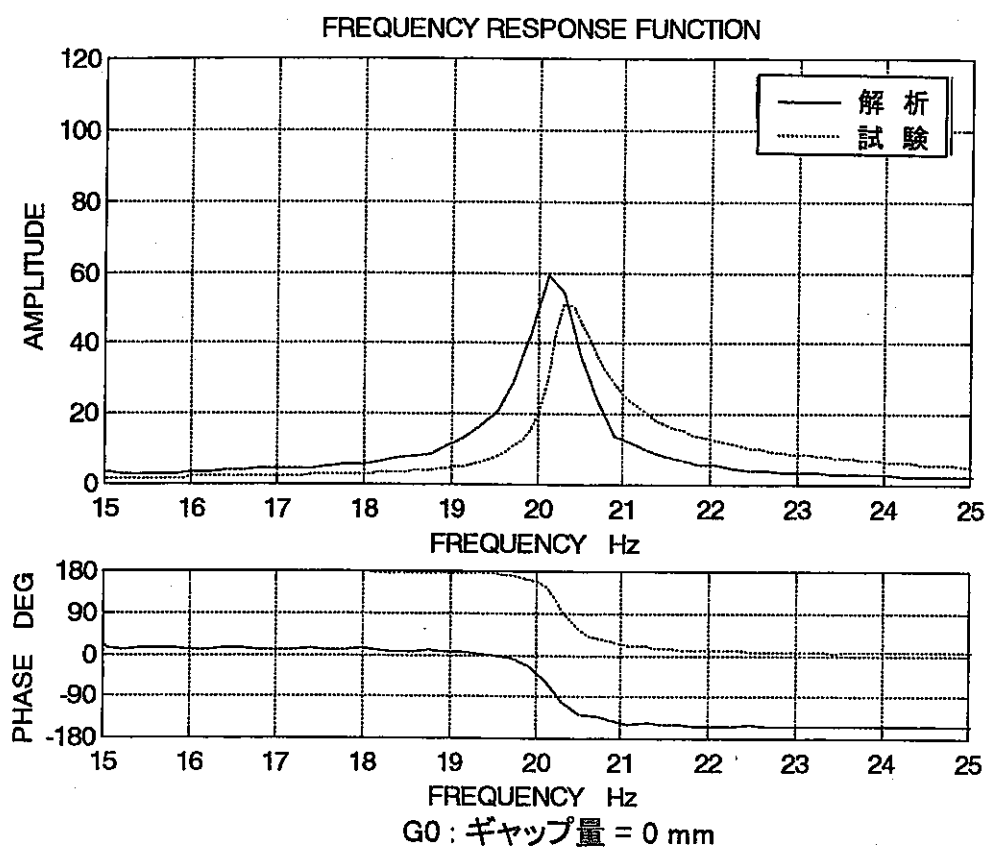


図 5.3-1 周波数応答関数図 (1/2)

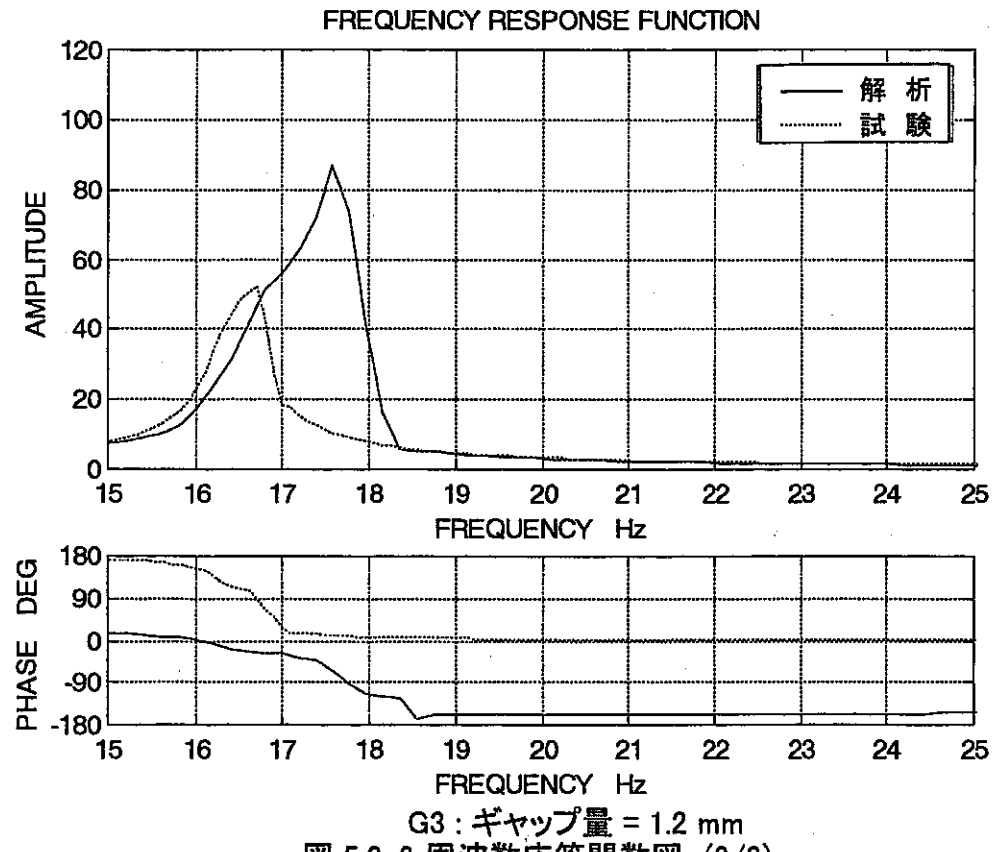
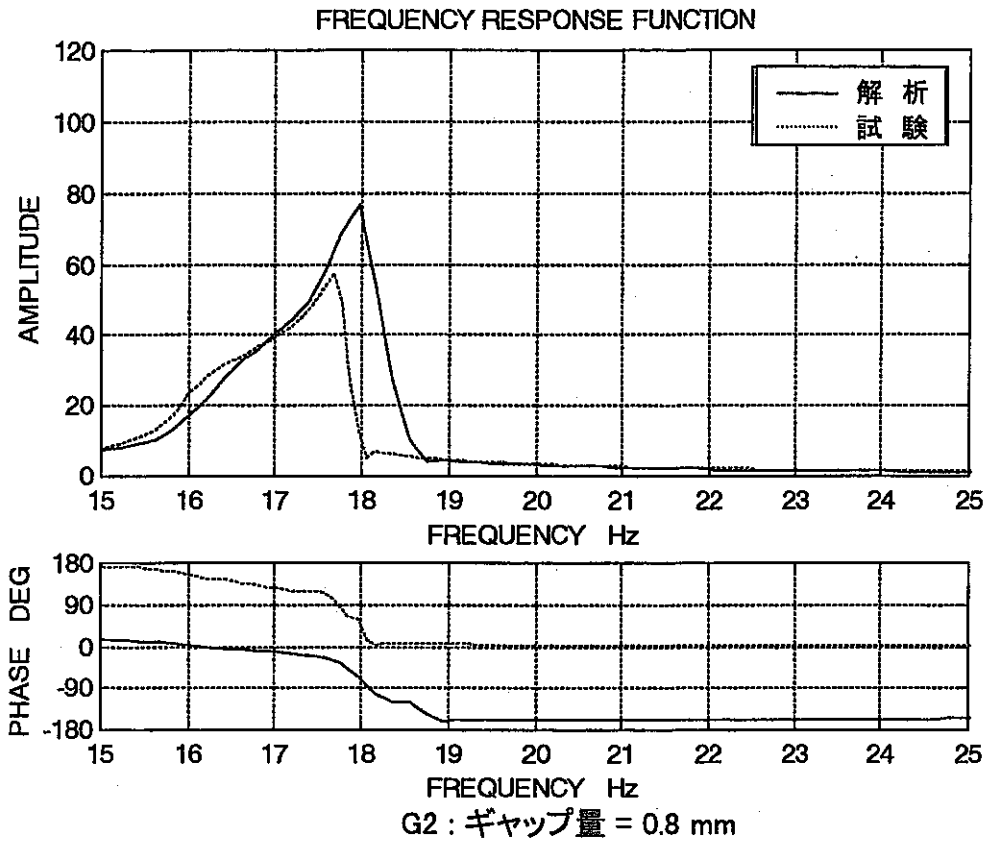


図 5.3-2 周波数応答関数図 (2/2)

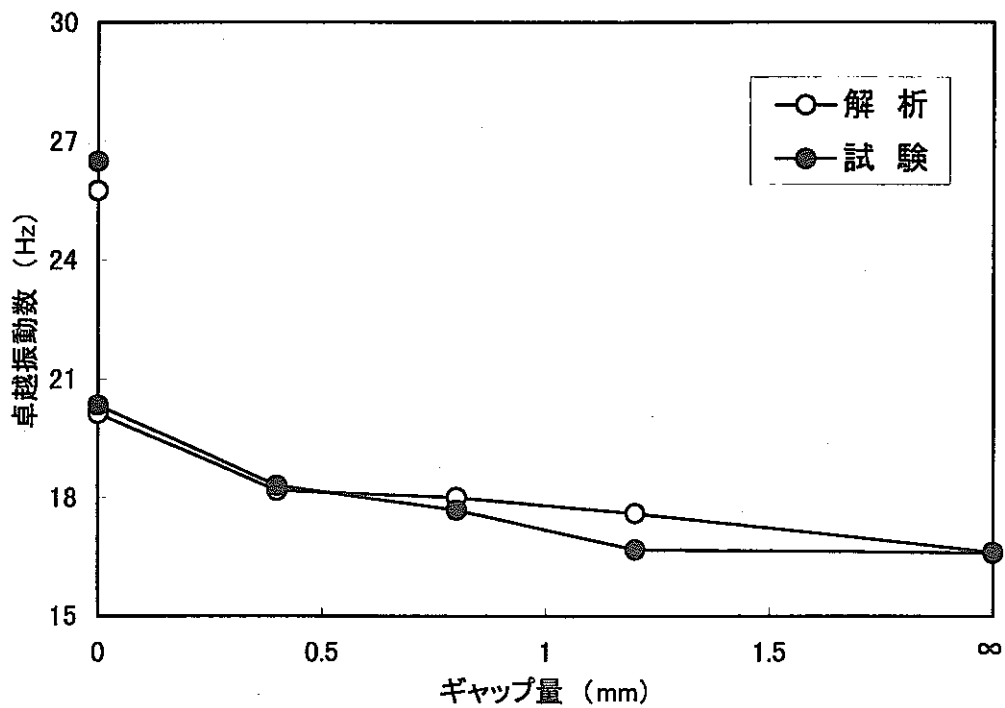


図 5.3-3 ギャップ量による卓越振動数の傾向

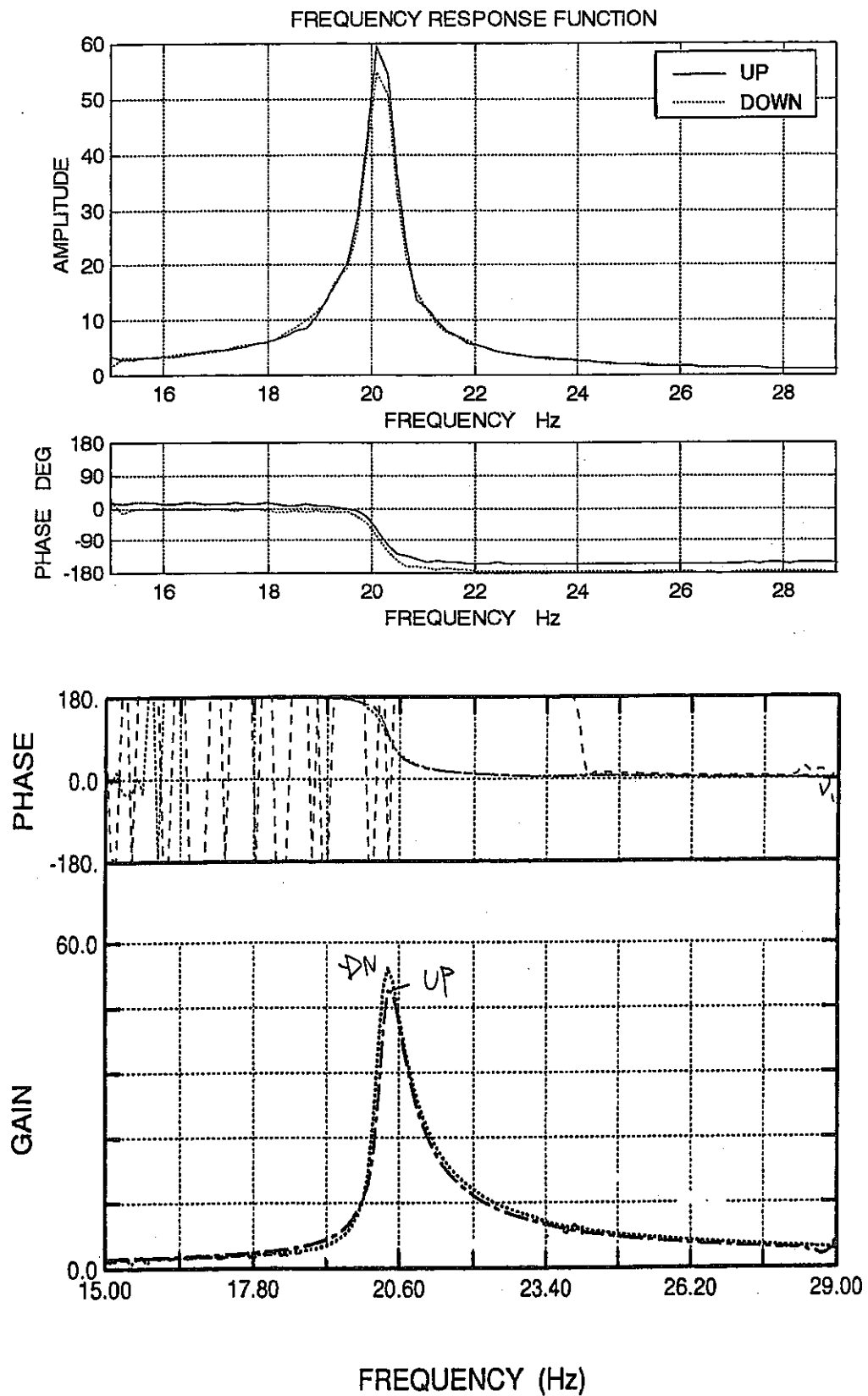


図 5.3-4 スイープ順逆での周波数応答関数図: G0 (1/2)



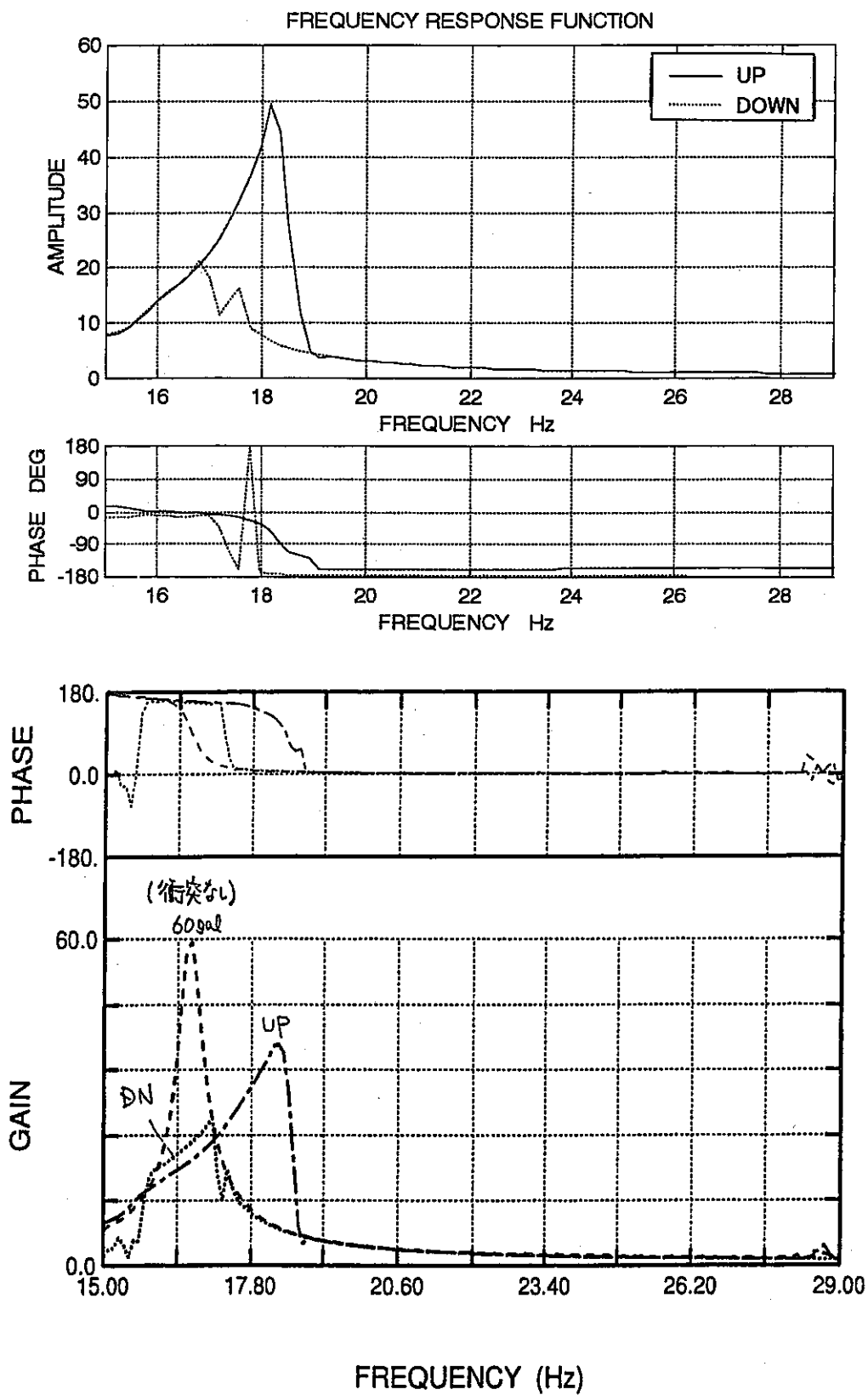
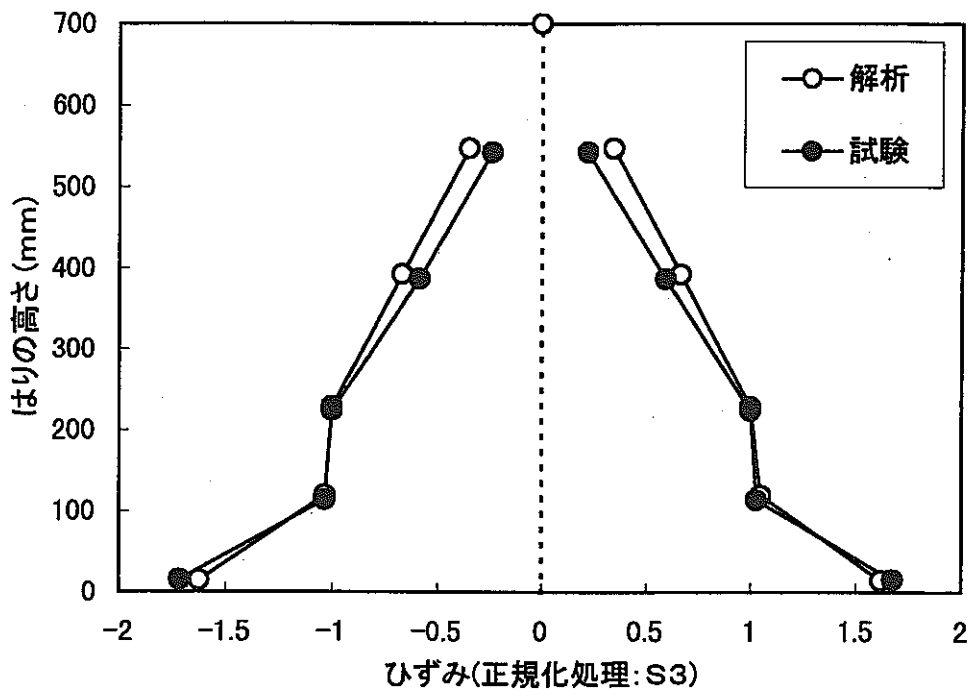
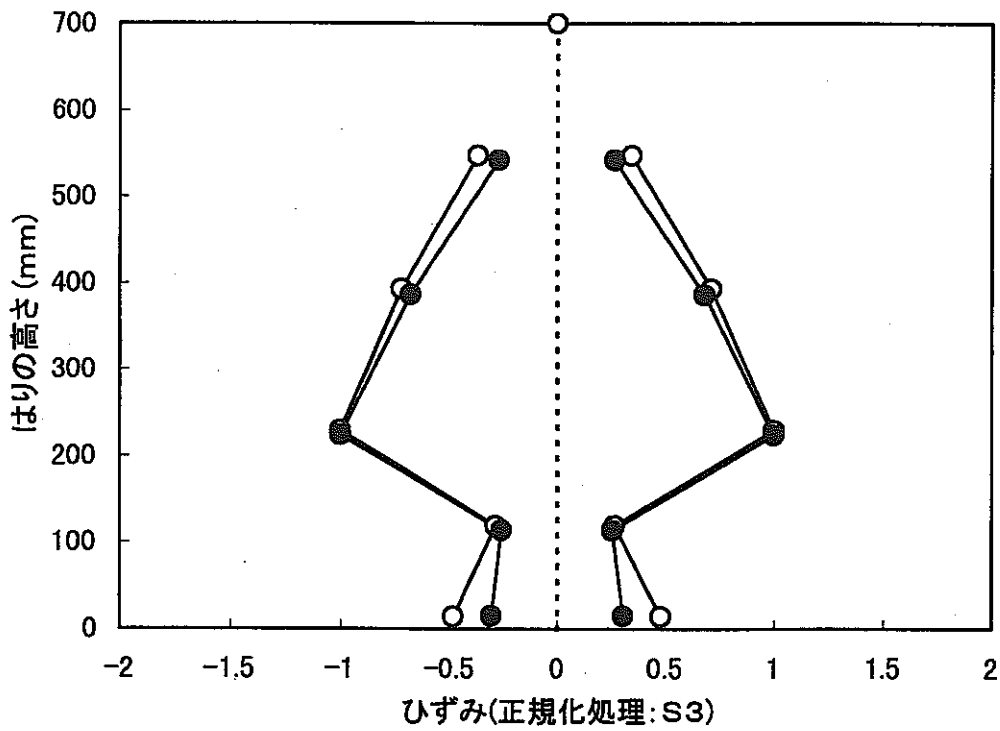


図 5.3-5 スイープ順逆での周波数応答関数図: G1 (2/2)



片持ちはり



ピン支持はり

図 5.3-6 ひずみモード分布

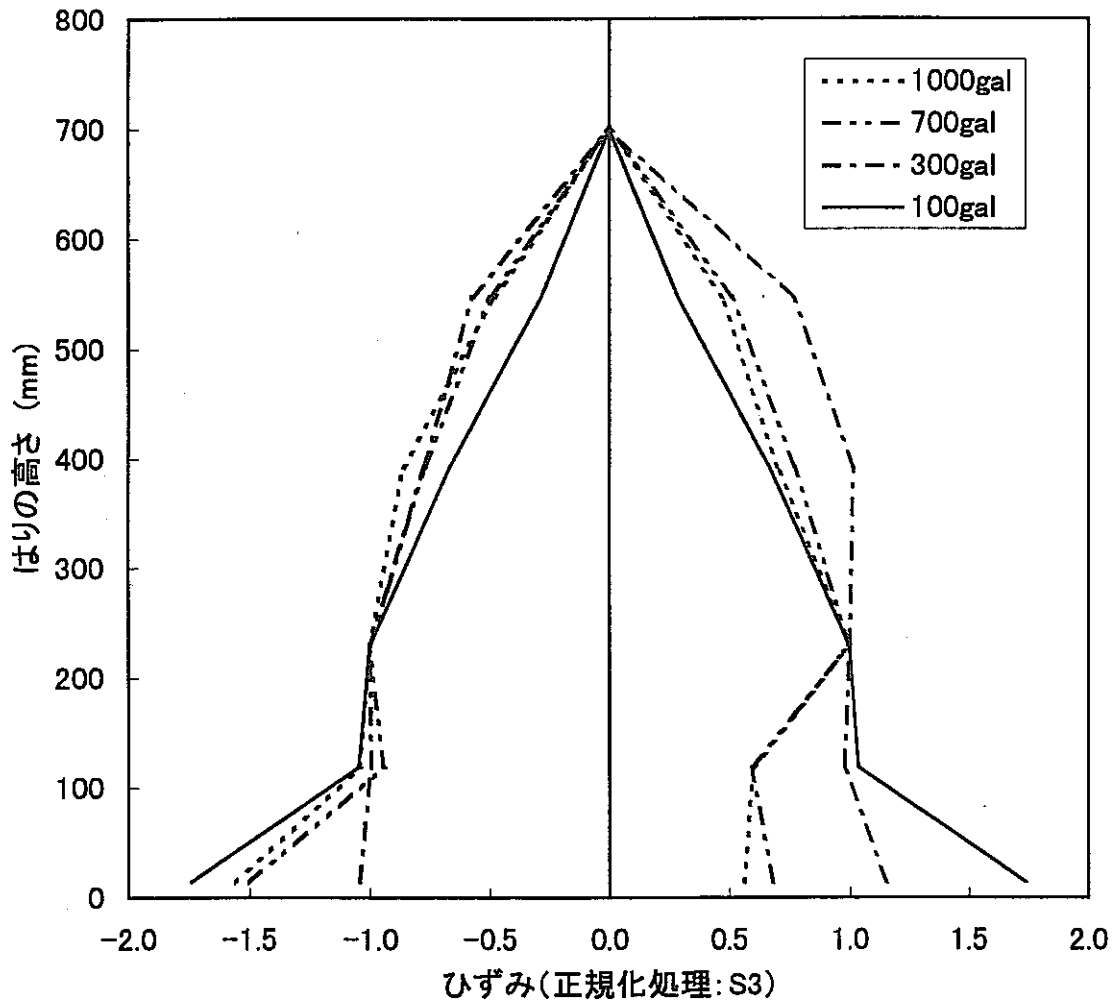


図.5.3-7 入力レベルによるひずみ分布:ギャップ=1.2mm

## 6. 考 察

### 6.1 予備試験

#### (1) 振動特性

初期変位を与えた試験体の解放後の自由振動波形より、試験体の固有振動数、減衰比(単純な片持ちはりとしての)を計測した。その結果、固有振動数 16.6Hz、減衰比 1.2%を得た。さらに、固有振動数、減衰比とも変位依存性がないこと、再現性があることが確認された。これにより、はりの途中に衝突部がある場合の振動特性、応答特性を調査するに適した(減衰比がある程度大きく、線形性のある)試験体であることが確認できた。

#### (2) 衝突部の反発係数

衝突部までの長さの試験体を用い、衝突部の試験体とロードセル先端の相対速度の比より反発係数を算出した。その結果、衝突発生及び終了時刻の決め方により反発係数は 0.55~0.77 の値となる。反発係数をパラメータとしたシミュレーションを行い、衝突力やはりの応答が試験結果と一致するような最適な反発係数を特定する必要がある。

### 6.2 本試験

#### (1) 振動特性

正弦波掃引加振試験より、ギャップを有する片持ちはりの振動特性は以下のようになることが確認できた。

##### a. ハードニング/ソフトニング

ギャップ 0 の場合はソフトニング特性を有し、ギャップが有限の場合はハードニング特性を有する。これは、衝突後の剛性が非常に大きく、ギャップ 0 では振幅が大きくなるに従い、衝突しない側の応答変位は大きくなるが、それに比例して衝突反力値が大きくなるに起因すると考えられる(掃引加振試験における反力と衝突部変位のヒステリシス参照)。

b. 卓越振動数

先端変位の加振加速度に対する応答倍率はギャップ $\infty$ またはピン支持(線形条件)に比べ、衝突部にギャップがある場合が小さくなる。これは、衝突部でのエネルギー逸散(反発係数が1でないことによる)、衝突によるはりの2次モード以上の高次モードの励振に伴う1次モードの振動エネルギーのシフトによる見かけのエネルギー逸散などによるものと考えられる。

c. 応答倍率(減衰)

衝突部にギャップがある場合の試験体の卓越振動数は、ギャップの大きさと共に低下するが、衝突部をピン支持とした場合と自由(ギャップ $\infty$ )の場合の卓越振動数の範囲内にある。

(2) 応答特性

定常正弦波加振試験より、ギャップを有する片持ちはりの応答特性は以下のようになることが確認できた。

はりの衝突部より上部に発生するひずみは、衝突部がピン支持の場合に最大となり、衝突部より下部ではギャップ $\infty$ の場合に最大となる。これは衝突現象による応答倍率の低下と、変形形状の違いによるものと考えられる。従って、衝突振動によって生じるひずみの最大値は、衝突部をピン支持およびギャップ $\infty$ として安全側に評価できると言える。

## 7. 結 論

振動するはり状構造物がその一部で剛体(はりの剛性に比べ十分に剛性が高い)に衝突する場合に、その振動挙動が衝突部の状況(ギャップの大きさ、加振レベルの大きさなど)によってどのような影響を受けるかについて実験的に明らかにした。

予備試験より、線形(固有振動数、減衰比に変位依存性がない)で解析結果との比較検証が容易な試験体であることを明らかにした。また、衝突部を有するはりの応答特性を左右する反発係数についても実験的に明らかにすることができた。

正弦波掃引試験より、衝突の発生によってはり先端の応答倍率は低下し、はり各部の発生ひずみは衝突部で支持した場合または衝突部のギャップが $\infty$ (いずれも線形の振動となる)の場合に比べ小さくなることが確認できた。

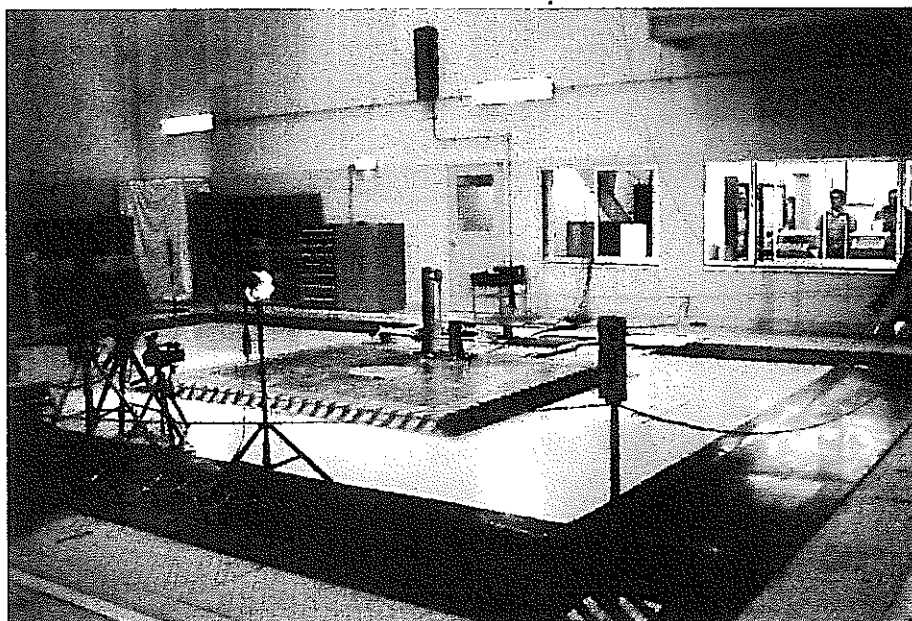
## 8. 謝 辞

本研究の実施に当たっては、試験の着眼点など、全体の研究計画を練る上で横浜国立大学・亀本喬司教授に有益なご指導を頂いた。また、衝突試験の試験体設計・製作、及び試験データの処理等には(株)石川島播磨重工業 小林博栄氏のご協力を得た。ここに感謝の意を表わす。

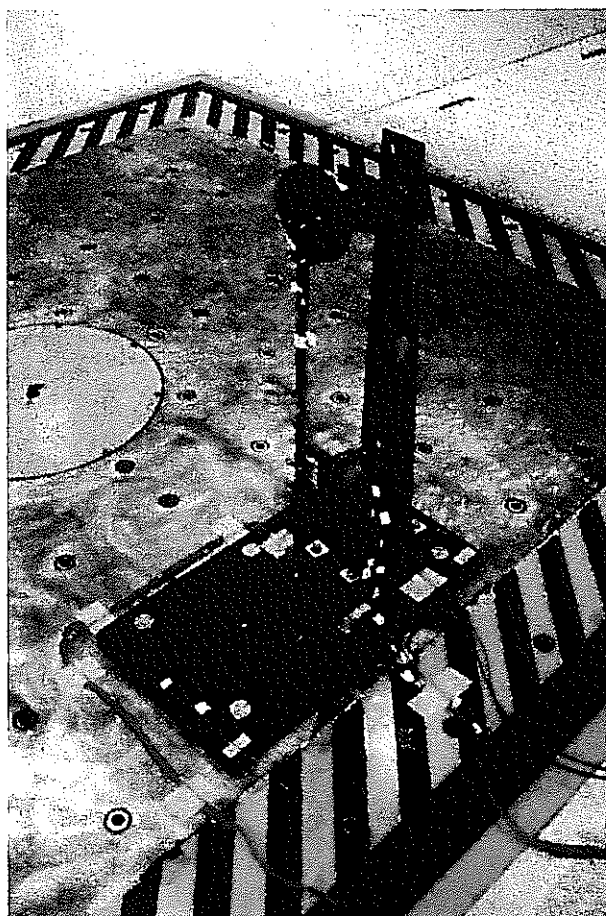
## APPENDIX-A

### 試験実施状況

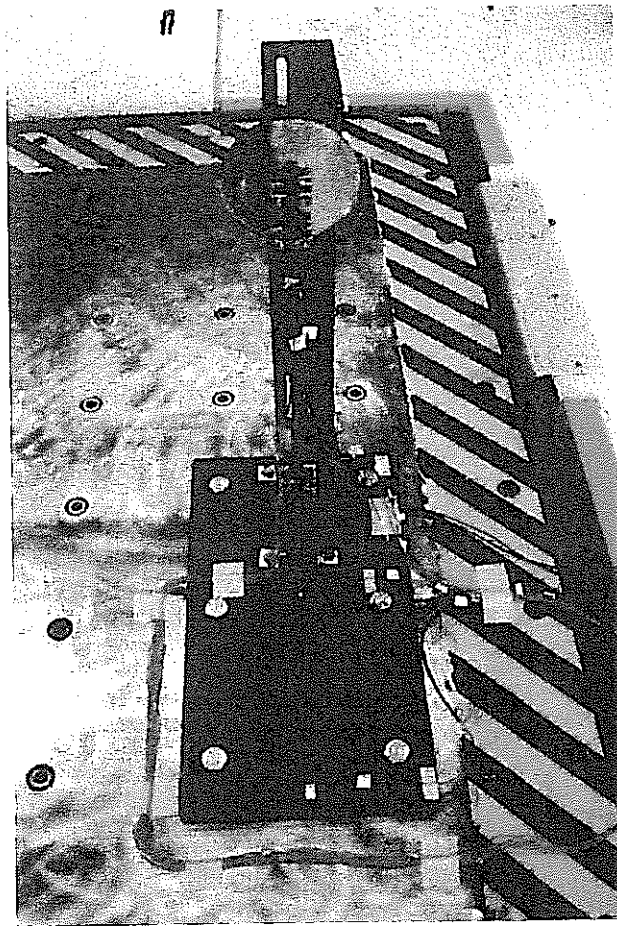




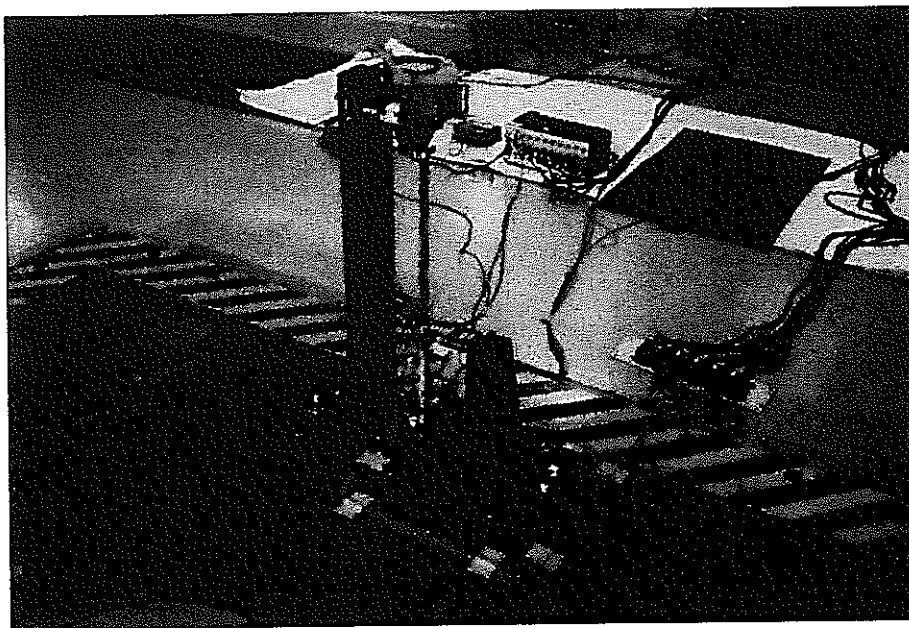
試験全景



試験装置 (ギャップ $\infty$ )



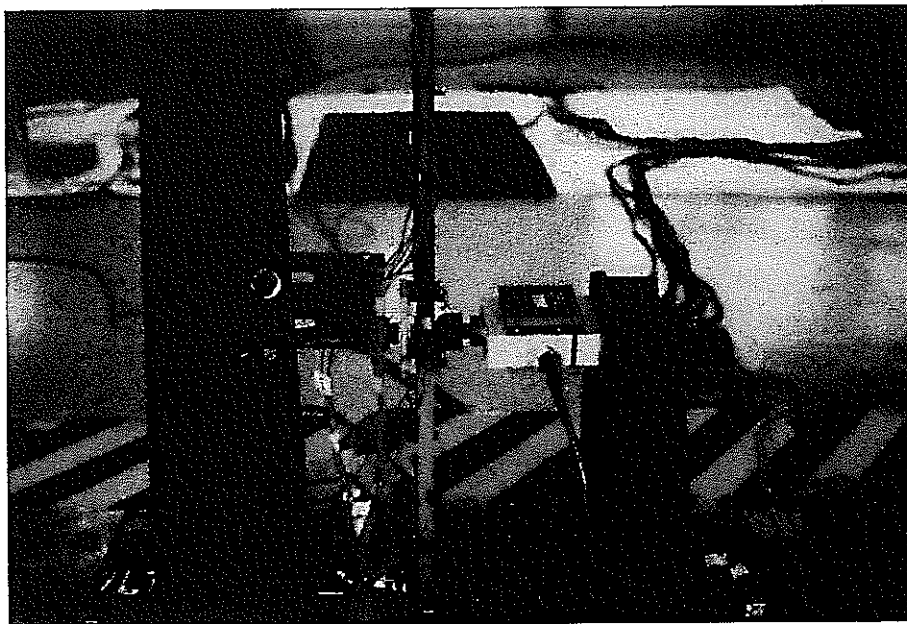
試験装置 (ギャップ $\infty$ )



試験装置 (ギャップ 0mm)



ピン支持部



試験装置 (ギャップ 0.8mm)

## APPENDIX-B

### 試験体形状の検討

## 試験体形状の検討

### 1. 試験体断面形状の検討

試験体は、φ14mm、長さ700mmの片持ちはりを基本とし、はりの振れまわりを防止するため、加振方向と加振直角方向の剛性に差を付けた断面形状とした。

#### 1.1 検討方法

以下の検討方法により、はりの断面形状を決定した。

一様断面の片持ちはりの固有振動数は、次式で表される。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

$\lambda = 1.875$  (片持ちはり1次)、 $l$ : はり長さ

$E$ : 縦弾性係数、 $I$ : 断面2次モーメント、 $\rho$ : 密度、 $A$ : 断面積

上式によって、断面形状と固有振動数との関係を求めた。

#### 1.2 検討条件

試験体の断面形状を決めるために、振動数と形状について次の条件を考慮した。

##### a. 振動数に関する条件

- 1) スイープ試験の加振範囲を考慮して、加振方向と加振直角方向の1次固有振動数に5Hz程度の差を付ける。
- 2) 非線形振動挙動によって発生のある倍調波、分調波の振動数を避ける。

##### b. 形状に関する条件

- 1) 減衰付加のための粘弾性体を貼り付けるため、加振直角方向を法線方向とする面に十分な面積を設ける。
- 2) モード形状を変えないように、断面形状は基部から先端まで一様とする。但し、基部には応力集中がないようR部を設ける。

### 1.3 検討結果

#### a. 加振直角方向の剛性を下げた場合

断面形状と固有振動数の関係を図 B-1 に示した。

この結果、幅 $h$ を10mmとすると、加振方向と加振直角方向の振動数差が約5Hzとなる。さらに、加振直角方向の振動数と、加振方向振動数の1/2分調波とを分離することができる。

#### b. 加振直角方向の剛性を上げた場合

断面形状と固有振動数の関係を図 B-2 に示した。

ギャップが閉じることによって上がる振動数と加振直角方向の振動数を分離するため、加振直角方向の振動数を衝突部ピン支持の振動数より高くし、かつ加振方向振動数の倍調波から離すためには、加振方向の断面長さを大きく取る必要がある。図 B-2 から、加振直角方向の断面長さを直径の2倍以上にする必要がある。

#### c. 採用断面形状

以上の検討結果より、加振方向の剛性を下げた方が加振条件上良いと判断される。さらに、断面形状がスマートとなり、加工性も良い。よって、試験体は、加振方向の剛性を下げ幅 $h$ が10mmの断面形状とした。

## 2. FEM固有値解析による試験体固有値の詳細検討

1項で検討した断面形状の試験体についてFEMによる固有値解析を行い、衝突部ギャップ $\infty$ 及びピン支持した場合の1、2次固有振動数を確認した。

### 2.1 解析条件

#### a. 解析モデル

解析モデル図を図 B-3 に示す。解析モデルは、10 分割のはり要素でモデル化した。解析モデルの形状値及び物性値を表 B-1 に示す。

#### b. 解析ケース

衝突部ギャップ $\infty$ とピン支持した場合について、振動試験の加振方向及び加振直角方向それぞれの1次及び2次固有値を求めた。

#### c. 解析コード

MSC/NASTRAN Ver.68

### 2.2 解析結果

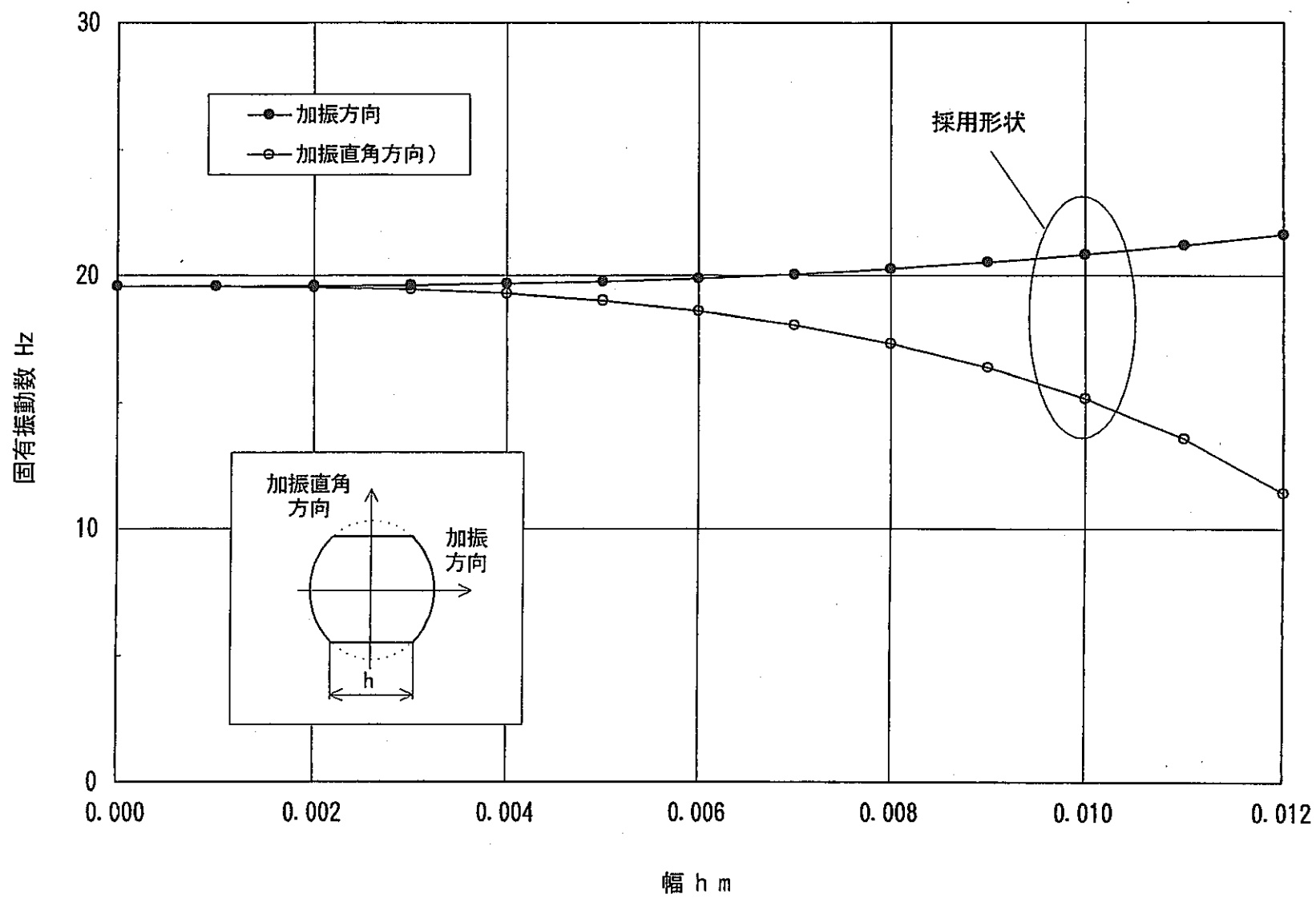
衝突部ギャップ $\infty$ とピン支持した場合について、加振方向及び加振直角方向それぞれの1次と2次の固有振動数を表 B-2 に示す。

### 2.3 試験体固有振動数の検討

FEMによる固有値解析の結果より、以下のことがわかる。

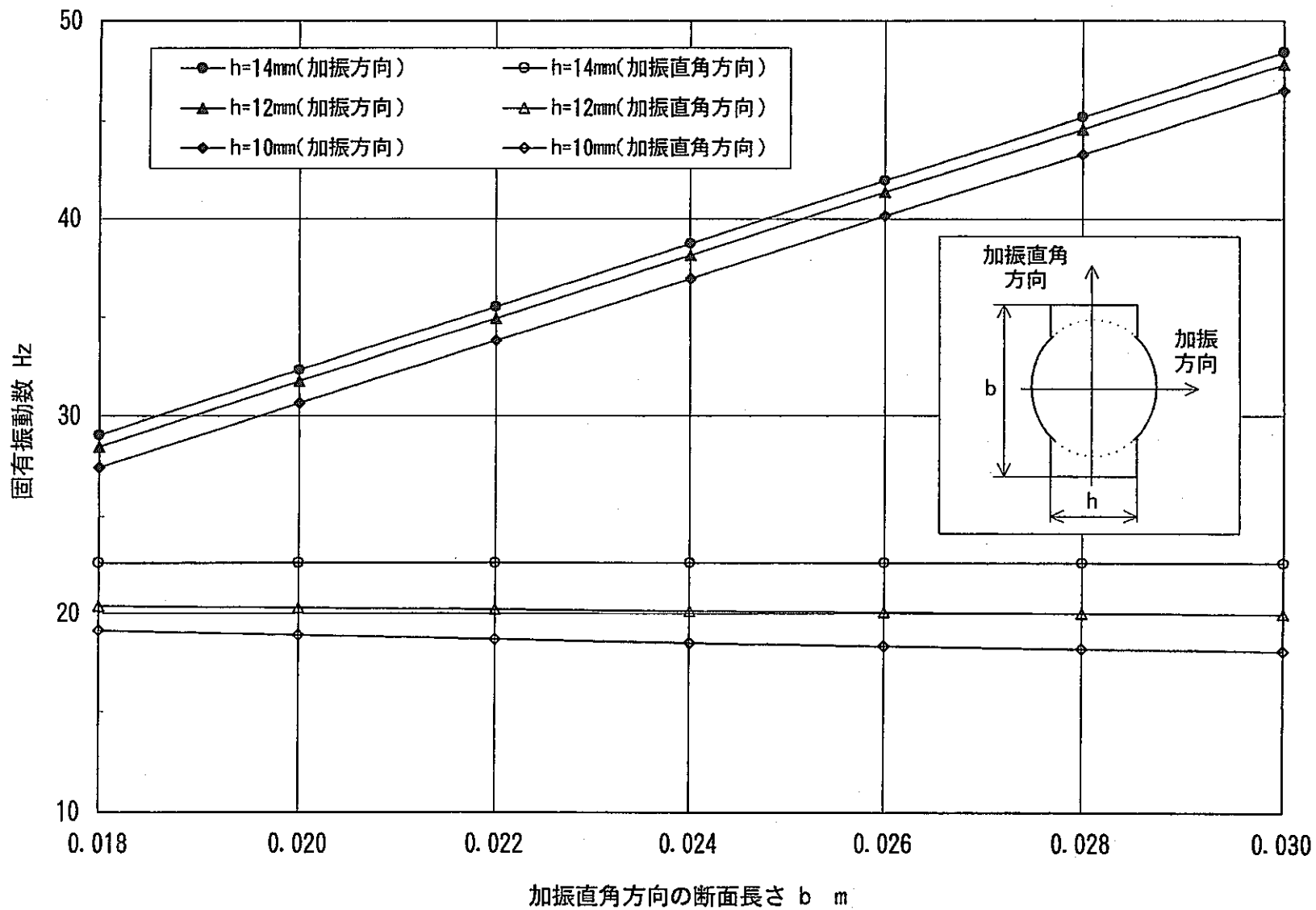
- ・ギャップ $\infty$ の1次固有振動数は、1. の理論計算式による計算結果と一致する。
- ・衝突部をピン支持した場合も、加振方向と加振直角方向で固有振動数に十分な差がある。
- ・ギャップ $\infty$ の加振直角方向の振動数は、衝突部ピン支持の加振方向振動数 1/2 分調波を避けている。

以上により、1項で採用した断面形状の試験体は、衝突を伴う振動挙動試験に相当であると考えられる。



図B-1 加振直角方向の剛性を下げた場合の固有振動数(加振方向、加振直角方向)



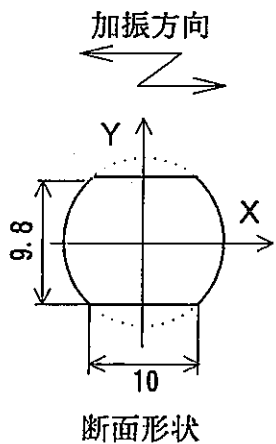


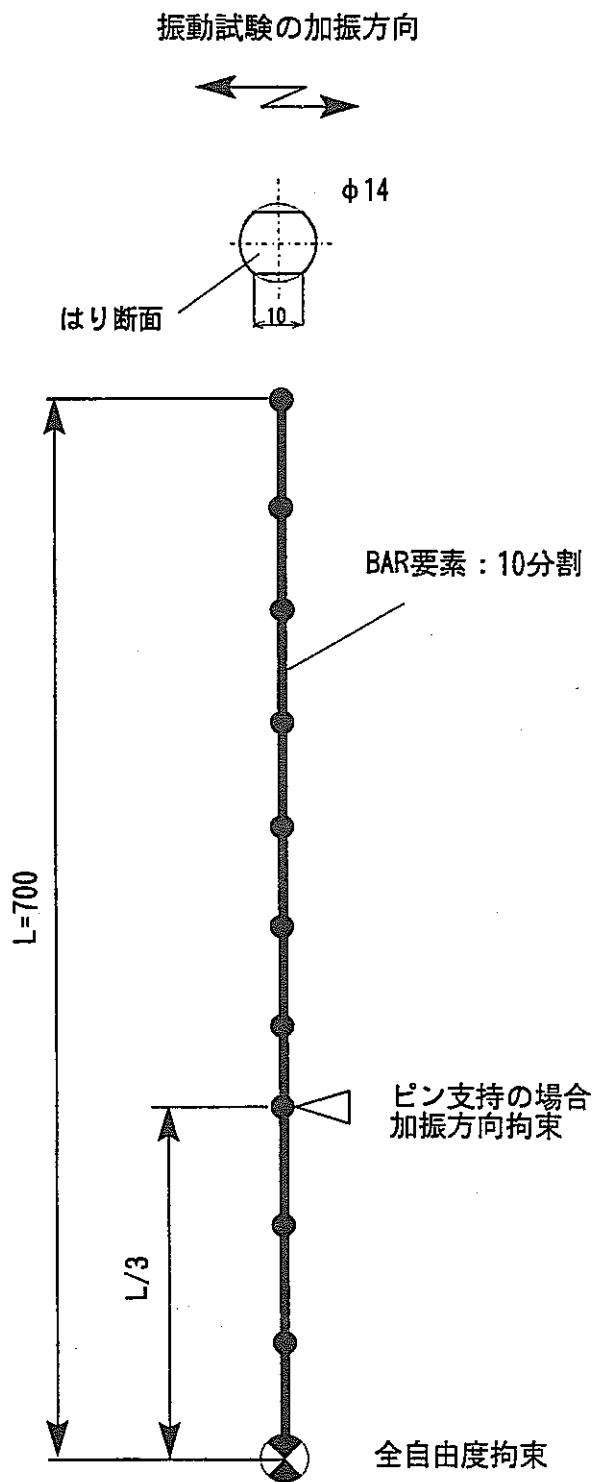
図B-2 加振直角方向の剛性を上げた場合の固有振動数(加振方向、加振直角方向)

表B-1 FEM解析モデルの形状及び物性値

項目		単位	値
断面積		$m^2$	1.25E-04
断面 2次モーメント	加振方向	$m^4$	1.74E-09
	加振直角方向		9.18E-10
ヤング率		$N/m^2$	1.92E+11
密度		$kg/m^3$	8.00E+00

表B-2 ギャップ $\infty$ とピン支持のFEM固有値解析結果

			ギャップ $\infty$	ピン支持
 <p>断面形状</p>	加振方向 固有振動数 Hz	1次	20.9	37.9
		2次	129.4	245.1
	加振直角方向 固有振動数 Hz	1次	15.2	27.6
		2次	94.2	178.3



図B-3 解析モデル図

## APPENDIX-C

### 反発係数の測定

## 反発係数の測定

試験体とロードセルの衝突部アタッチメントとの反発係数を算出するための試験を実施した。

### C.1 試験方法

試験体と衝突部の反発係数計測用の試験体を図 C.1 に示す。この試験体は、衝突部より先の試験体の弾性応答(振動モード)が反発係数に影響することを避けるため、衝突部までの長さとした。材質は本試験用試験体と同一(SCM435)とした。なお、反発係数計測用試験体には粘弾性体及び拘束板は貼付していない。

試験条件は以下に示すとおりである。

- ・ 衝突部のギャップ:0
- ・ 加振方法:試験体先端の加振方向に強制変位を与え、その強制変位を解放することにより加振した。
- ・ 計器及び計測位置:使用計測器を表 C.1 に、計測位置を図 C.2 に示す。
- ・ サンプルング:20kHz

### B.2 試験結果

試験結果の衝突前後(衝突開始及び衝突終了時)の試験体とロードセル先端の相対速度比より反発係数を算出した。結果を以下に示す。

#### (1) 計測結果

各ケースの計測波形を図 C.3-1～図 C.3-5 に示す。全チャンネルの時刻歴波形に対して、2.5kHz のローパスフィルタ処理を行った。

予備計測の結果、サンプルング 20kHz と 1kHz での衝撃力ピーク値の差は 3%程度であり、1kHz のサンプルングでもピーク値を精度良く得られた。但し、変位波形を微分処理して精度良く速度波形を得るために、サンプルングを 20kHz とした。

速度の測定方法を以下に示す。

- ・ 試験体の速度:変位計で計測した変位を微分して算出

- ・ロードセル先端の速度:ロードセル先端に取り付けた加速度計の加速度出力をアンプで積分し、速度波形として収録(アンプで積分した場合、速度と同時に積分前の加速度を出力できないため、加速度波形データは無し)

## (2) 反発係数の計算

衝突前後の試験体とロードセル先端の衝突開始時及び終了時の相対速度比から反発係数を計算した。計算式を以下に示す。

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

$v_1, v_1'$ :試験体の衝突開始時及び終了時の速度

$v_2, v_2'$ :ロードセルセル先端の衝突開始時及び終了時の速度

衝突力が発生し始める時刻、試験体速度が最大となる時刻、ロードセルの速度が発生し始める時刻(衝突開始時刻)は本来一致すると考えられる。しかし、図 C.3-1 よりわかるように、実験結果では最大速度の発生時刻が衝突力の発生時刻より先に現れている。同じ計測機器で計測した予備試験では位相遅れがないため、計測器の特性による位相ずれではないと判断している。(参照 APPENDIX-D) よって、フィルタ処理や微積分演算処理による位相ずれが原因と考えられるが特定できていない。また、衝突前に衝突力の波形に高調波(約 2.5kHz)が現れているが、これはフィルタ処理によってパルス波形が鈍ったものであり、実際の振動波形ではないと考えられる。

以上の理由より、衝突開始時刻及び終了時刻をひとつに特定できないため、衝突開始時刻及び終了時刻を次の2とおりの方法で決めて反発係数を算出した。

### (a) 衝突力基準

衝突力(ロードセル出力)が発生し始める時刻の速度を衝突直前の速度、衝突力がピークから減じ再び0となる時刻の速度を衝突直後の速度とする。

### (b) 試験体速度基準

試験体速度が最大となり増加から減少に変わる時刻の速度を衝突直前の速度、速度の向きが反転し再びピークとなり減少から増加に変わる時刻の速度を衝突直後の速度とする。

反発係数の計算結果を表 C.2 に示す。

### (3) 考 察

#### (a) 衝突力を基準として衝突開始と終了の時刻を決めた場合

反発係数の平均値は 0.58, その範囲は 0.56~0.59 でばらつきつきは小さい。この値は、文献(例えば、入江 敏博著 詳解工業力学 理工学社 表 9.1 反発係数 p.139) に示される鋼-鋼の反発係数(0.55)に対応し、ほぼ妥当な値と思われる。

#### (b) 速度を基準として衝突開始と終了の時刻を決めた場合

反発係数の平均値は 0.77, その範囲は 0.73~0.82 となった。衝突力を基準として衝突の開始と終了の時刻を決める場合より、30%程度大きくなった。

試験結果より得られる反発係数は、衝突開始及び終了時刻の決め方により変化する。よって、シミュレーションにおいて衝突力や試験体の応答特性が試験結果と一致するようパラメータスタディ等を行い、最適な反発係数を算出し、試験結果と比較する必要がある。



表2.2-2 反発係数計測試験使用計測機器

機器名	型式	メーカー	計測周波数レンジ	備考
加速度計	2222C	エンデブコ	1~10kHz	圧電式
振動計	UV-12、05	リオン	1~15kHz	チャージアンプ
変位計	AS-440-05、AH-416	キーエンス	DC~3kHz	渦電流式 0~5mm
ロードセル	9E01-L33-50K	NEC 三栄	50kg(定格容量)	ひずみゲージ式
動ひずみアンプ	DPM713B	共和電業	DC~10kHz	
データレコーダ	PC216AX	ソニーマグネ スケール	DC~20kHz	

表3.3-1 反発係数計測結果

衝突時間の 判定基準	ケース名	試験体		ロードセル先端		反発係数 $e^{*3}$
		衝突直前 速度 <sup>*1</sup>	衝突直後 速度 <sup>*1</sup>	衝突直前 速度 <sup>*2</sup>	衝突直後 速度 <sup>*2</sup>	
		$v_1$ mm/sec	$v_1'$ mm/sec	$v_2$ mm/sec	$v_2'$ mm/sec	
衝突力 <sup>*4</sup>	REB60_1	71.1	-41.6	-26.0	13.7	0.57
	REB60_2	62.0	-35.8	-26.6	16.4	0.59
	REB60_3	73.3	-42.6	-34.8	20.0	0.58
	REB60_4	99.0	-62.9	-50.6	23.6	0.58
	REB60_5	75.9	-40.9	-25.8	16.3	0.56
	平均	—	—	—	—	0.58
速度 <sup>*5</sup>	REB60_1	85.1	-48.7	-2.0	15.7	0.74
	REB60_2	75.2	-44.0	-3.1	15.4	0.76
	REB60_3	89.9	-57.1	-6.2	21.7	0.82
	REB60_4	126.8	-75.9	-0.3	27.3	0.81
	REB60_5	87.3	-49.3	-1.8	16.0	0.73
	平均	—	—	—	—	0.77

\*1)変位計で計測した変位波形を差分して算出

\*2)加速度計ピックアップの出力をアンプで積分し、速度波形として収録

\*3)反発係数計算式

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

\*4)衝突力が発生する時刻を衝突直前、0となる時刻を衝突直後とした。

\*5)試験体速度が最大・最小となる時刻を衝突直前・直後とした。

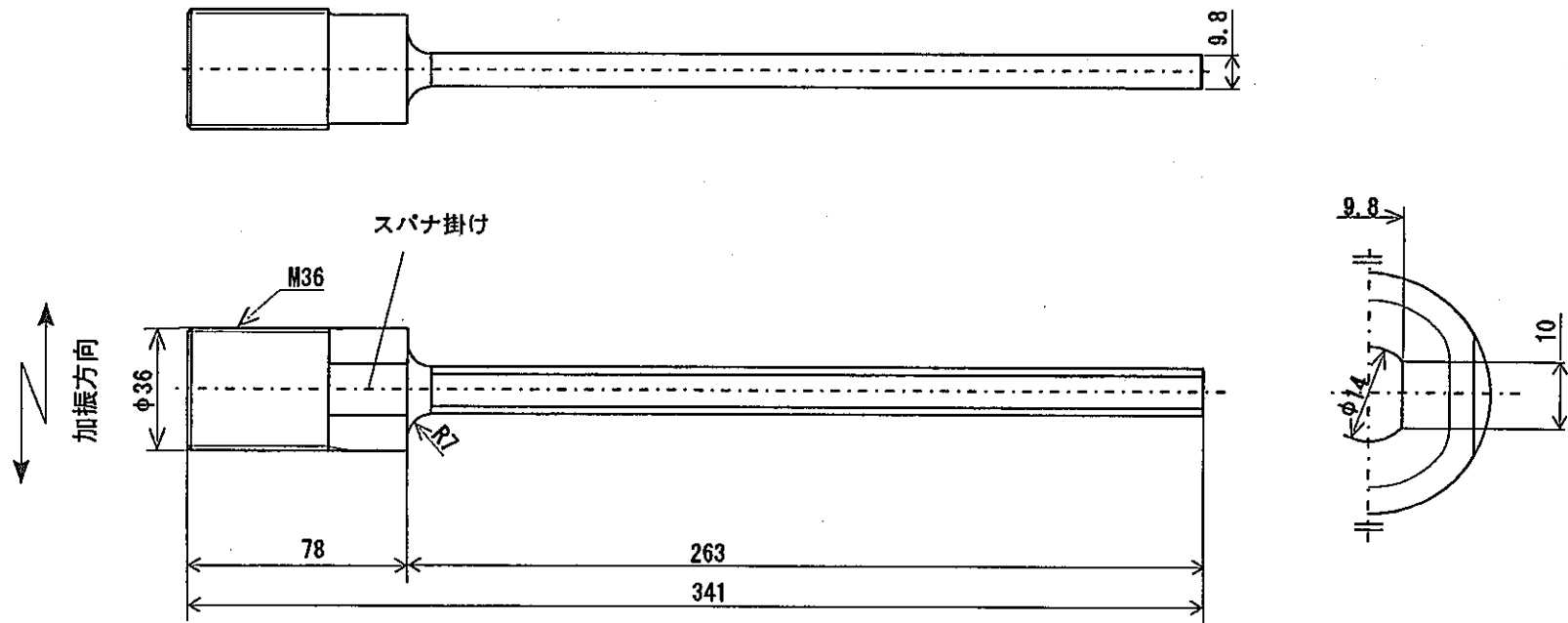


図2.1-7 反発係数計測用試験体

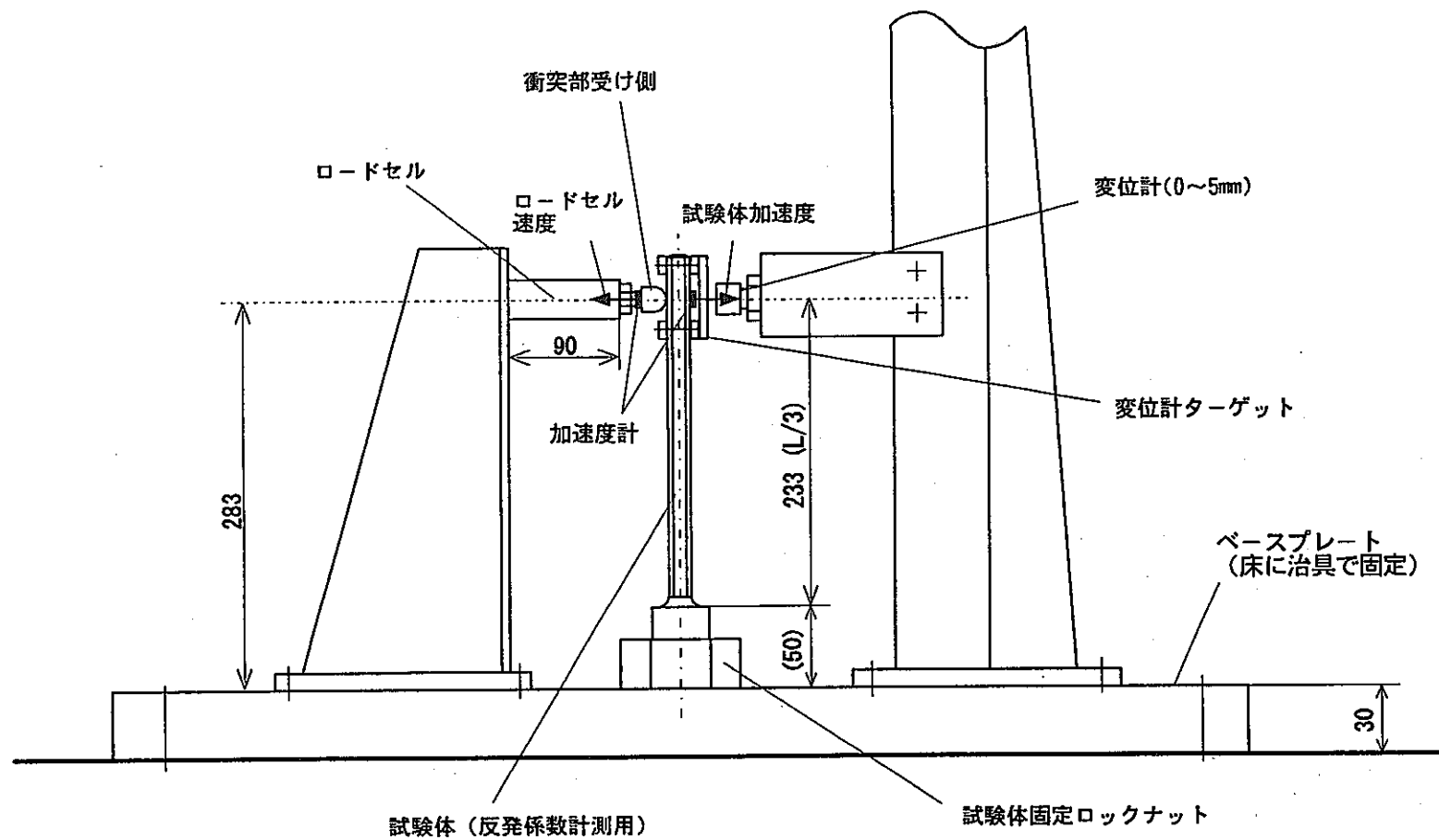


図2.2-2 反発係数計測試験計測位置

ケース REB60\_1

サンプリング 20kHz  
ローパスフィルタ 2.5kHz

----- 衝突力基準の衝突開始、終了時刻  
- - - - - 速度基準の衝突開始、終了時刻

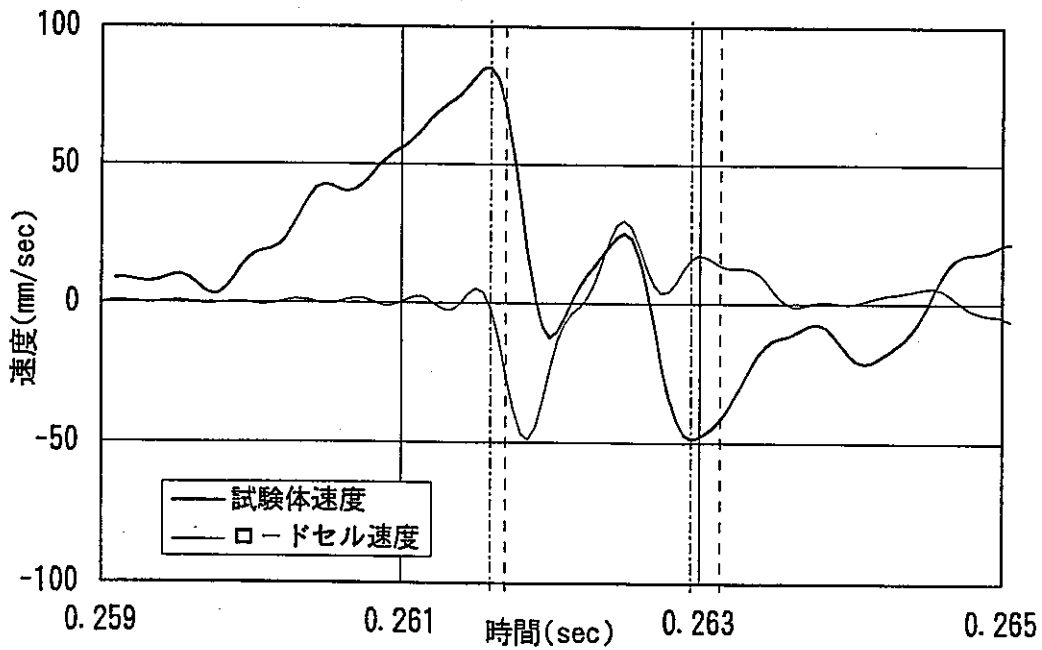
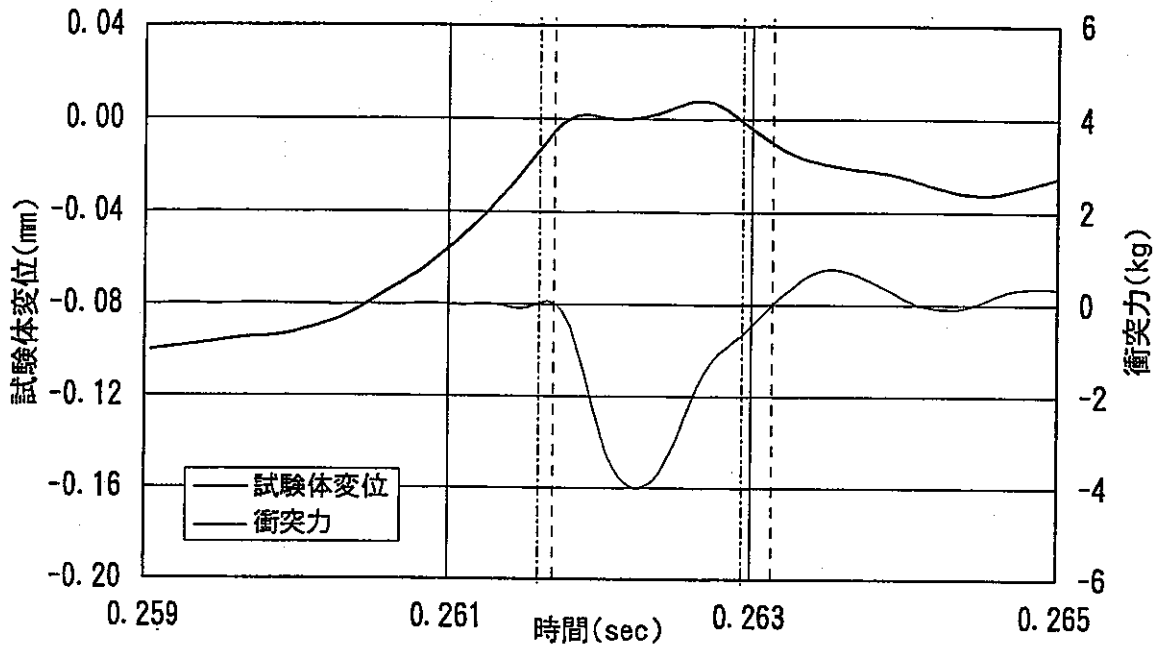


図3.3-1 反発係数計測結果 時刻歴波形(1/5)

ケース REB60\_2

サンプリング 20kHz  
ローパスフィルタ 2.5kHz

-----衝突力基準の衝突開始、終了時刻  
- - - - -速度基準の衝突開始、終了時刻

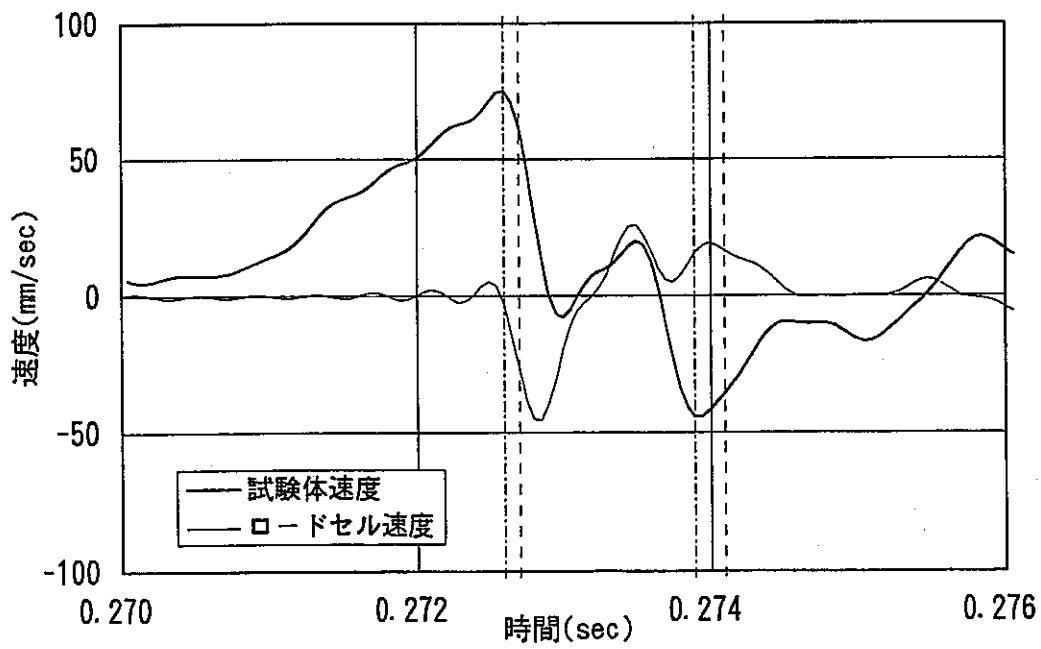
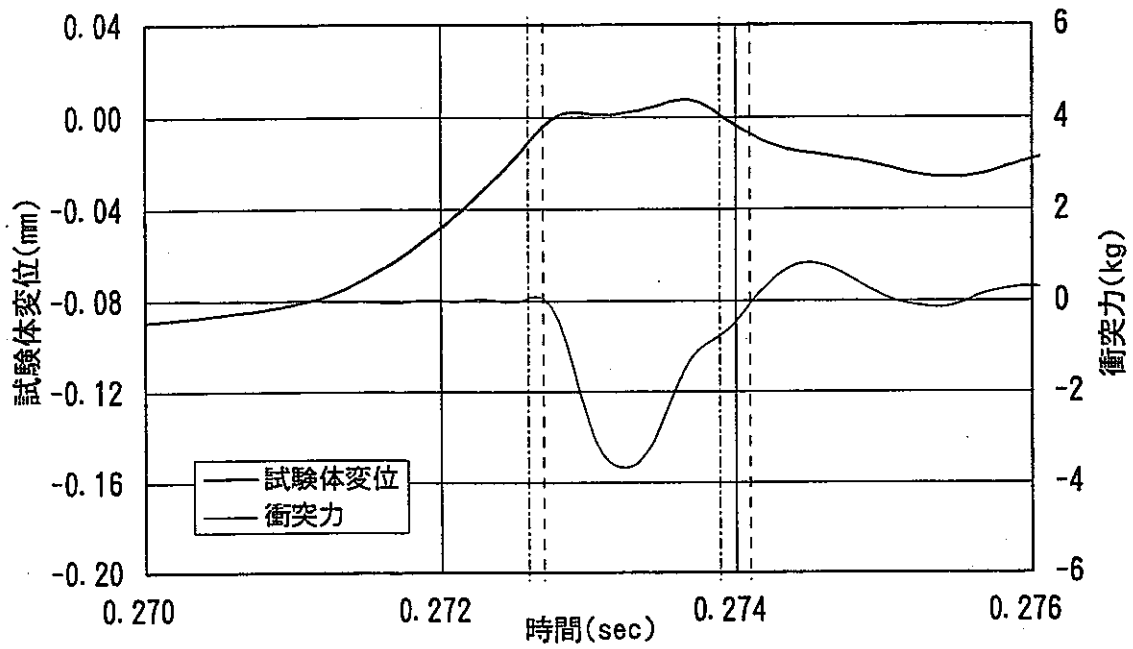


図3.3-2 反発係数計測結果 時刻歴波形(2/5)

ケース REB60\_3

サンプリング 20kHz

ローパスフィルタ 2.5kHz

-----衝突力基準の衝突開始、終了時刻  
 -.-.-.-.-速度基準の衝突開始、終了時刻

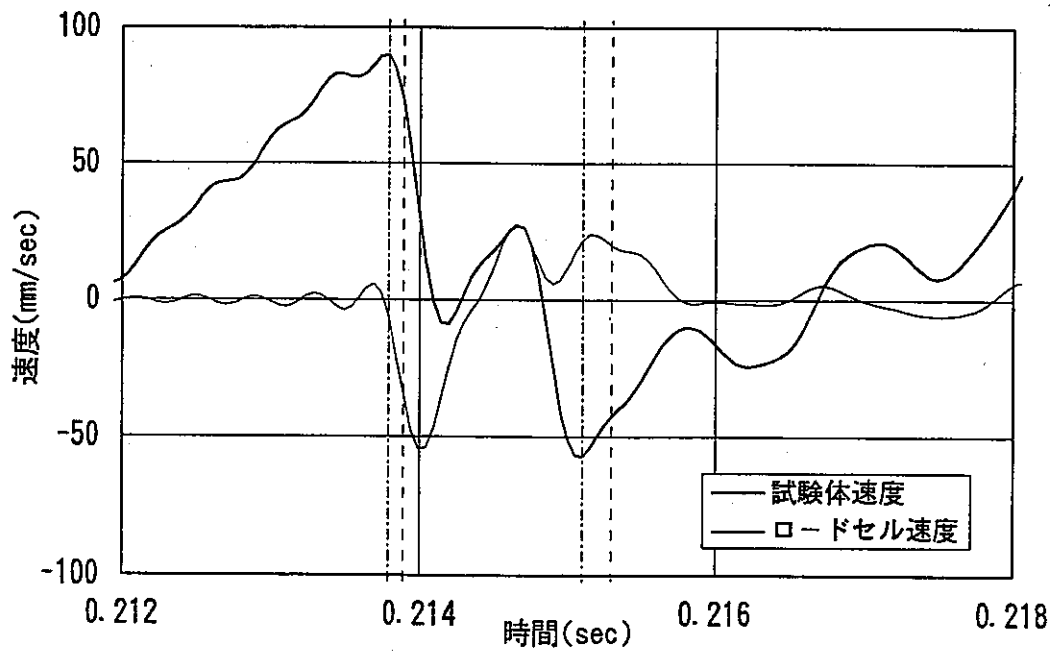
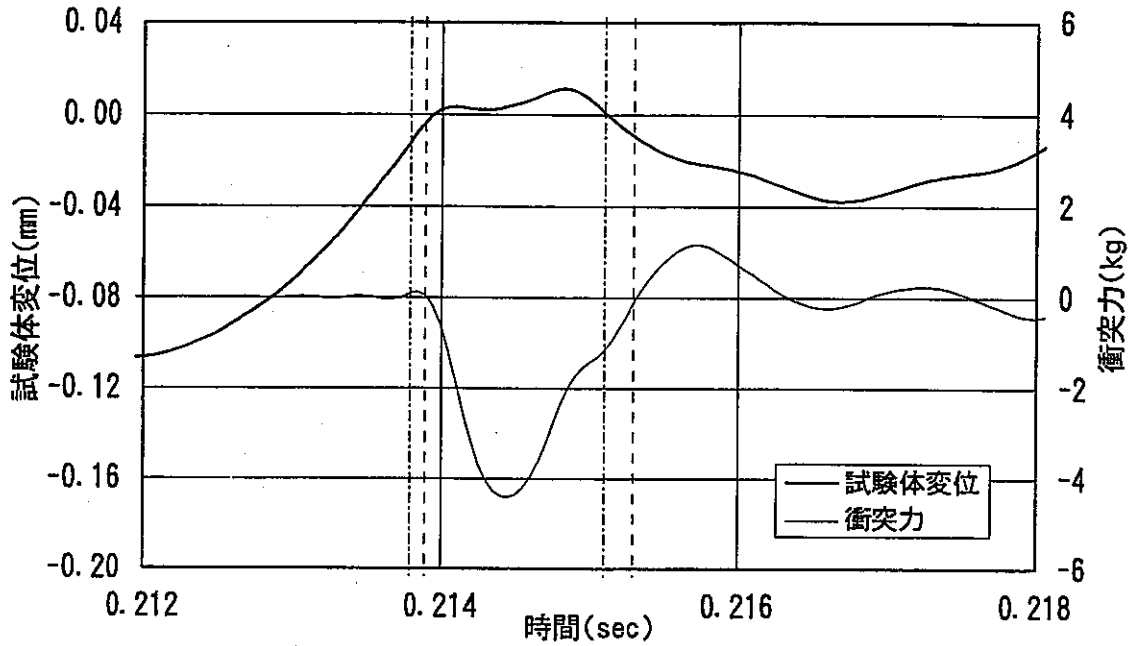


図3.3-3 反発係数計測結果 時刻歴波形(3/5)

ケース REB60\_4

サンプリング 20kHz  
ローパスフィルタ 2.5kHz

----- 衝突力基準の衝突開始、終了時刻  
- - - - - 速度基準の衝突開始、終了時刻

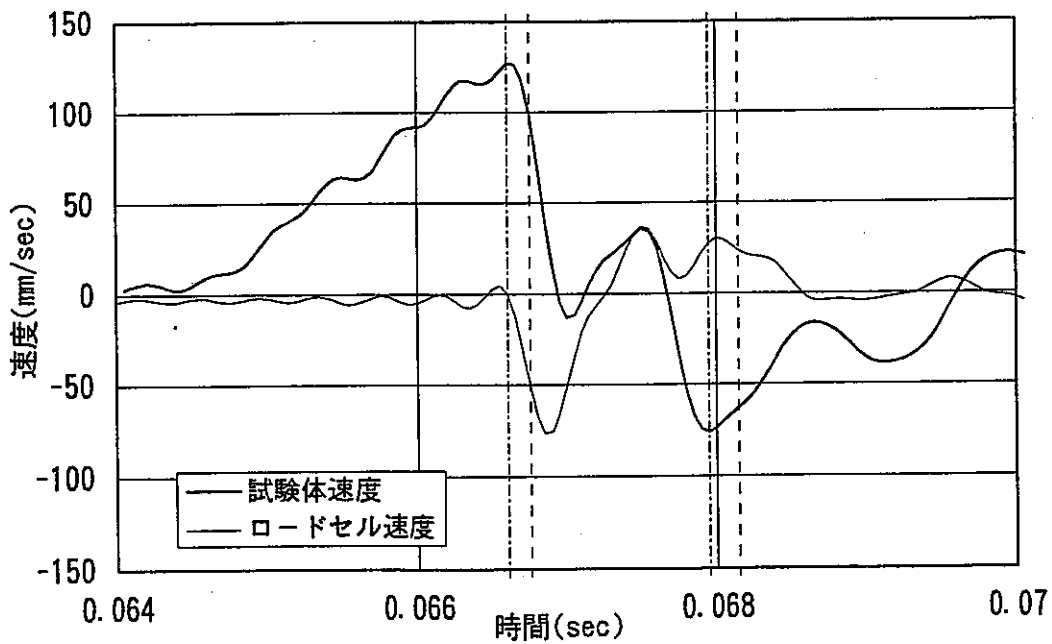
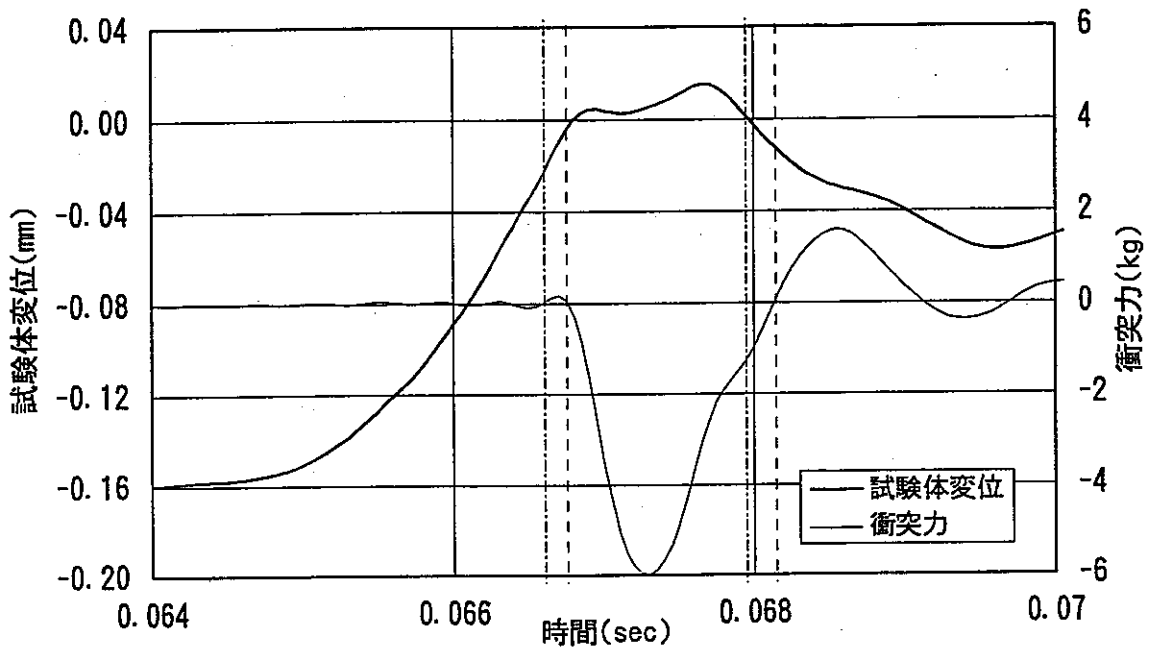


図3.3-4 反発係数計測結果 時刻歴波形(4/5)



ケース REB60\_5

サンプリング 20kHz  
ローパスフィルタ 2.5kHz

----- 衝突力基準の衝突開始、終了時刻  
----- 速度基準の衝突開始、終了時刻

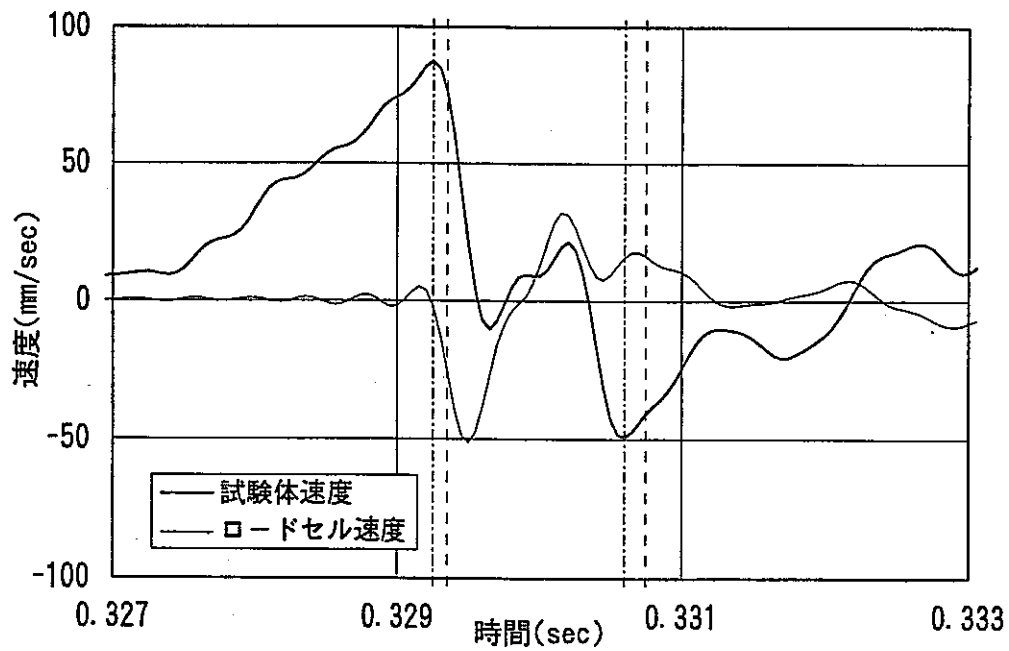
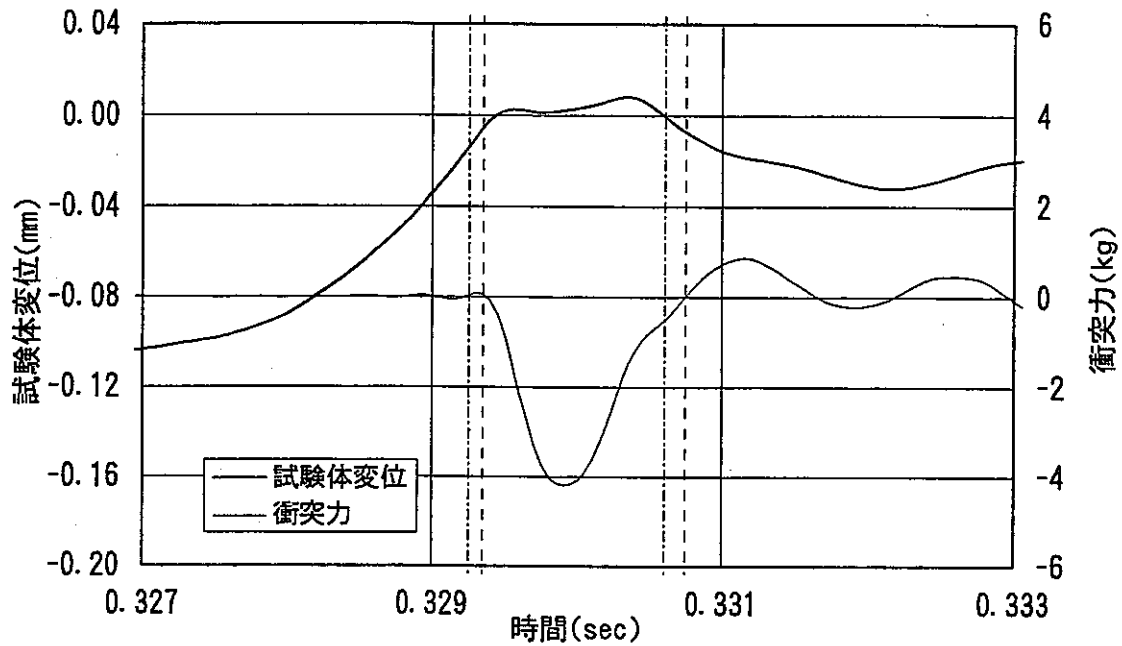


図3.3-5 反発係数計測結果 時刻歴波形(5/5)

## APPENDIX-D

圧電式加速度計によって計測した加速度波形の位相ずれ

## 圧電式加速度計によって計測した加速度波形の位相ずれ

### 1. 概要

圧電式加速度計による加速度波形のひずみ波形及び変位波形に対する位相を計測条件によって比較し、本試験結果の位相ずれの原因を検討した。

### 2. 位相ずれの比較

本試験、加速度計校正試験およびIHI予備試験において、圧電式加速度計を用いて計測した加速度波形の位相ずれを比較した。各試験の位相ずれを計測条件とともに表 D-1 に示す。各試験の方法、使用機器、及び位相ずれの比較結果を以下に示す。

#### 2.1 本試験

定常正弦波加振試験の加速度、ひずみ及び変位波形の位相を比較した。

##### (1) 試験方法

試験体を振動台に固定し水平1方向加振（参照 報告書本文 2.2.2 (2)）

##### (2) 計測機器

計測ブロックチャートを図 D-1 に示す。計測チャンネル数は18チャンネル。

##### (3) 比較結果

ギャップ $\infty$ とピン支持の定常加振（ギャップ $\infty$ : 16.5Hz、ピン支持: 26.5Hz、240gal）時の波形をそれぞれ図 D-2(1/3)、D-2(2/3)に示す。衝突があるギャップ 0mm の定常加振（20.4Hz、240gal）時の波形を図 D-2(3/3)に示す。

これらの図より、本試験結果では衝突の有無に関わらず、ひずみ波形及び変位波形に対して加速度波形の位相が約  $36^\circ$  遅れている。

ひずみ波形はこれまでの経験から位相遅れは生じないと考えられる。変位波形はひずみ波形と同位相であるため、変位波形も位相ずれは無いと考えられる。また、衝突のあるケースでは、衝突部の変位が 0 になる時刻と反力の発生する時刻が一致するため、反力波形も位相ずれは無いと考えられる。

以上より、本試験での加速度波形の位相が遅れていると判断できる。

## 2.2 加速度計校正試験

位相遅れが無いと考えられるひずみゲージ式加速度計と圧電式加速度計を同時に加振した加速度計校正試験の結果より、2種類の加速度計で計測した波形の位相を比較した。

### (1) 試験方法

本試験で使用した圧電式加速度計を、ひずみゲージ式加速度計とともに振動台に直接接着し、鉛直加振(1G、16.5Hz 定常)した。

### (2) 計測機器

圧電式加速度計、計測ケーブル、チャージアンプ、動ひずみアンプ、A/D変換器、及び記録装置は、本試験と同一とした。計測チャンネル数は9チャンネル。

### (4) 比較結果

図 D-3 に比較結果を示す。

経験的に位相遅れが無いと考えられるひずみゲージ式加速度計で計測した波形に対して、圧電式加速度計で計測した波形は約  $13^\circ$  位相が遅れている。この位相遅れは本試験の約  $1/3$  である。

## 2.3 予備試験

予備試験で実施した打振試験の加速度波形と、ひずみ及び変位波形の位相を比較した。

### (1) 試験方法

反力床上に治具によりベースプレートを固定し、ギャップ $\infty$ の条件で、試験体の先端を打撃した。

### (2) 計測機器

圧電式加速度計、チャージアンプ、変位計、及びひずみゲージは本試験と同一とした。記録はデジタルデータレコーダで行い、記録時及び A/D 変換時にフィルタ処理を行っていない。計測チャンネル数は 16 チャンネル。

### (3) 比較結果

加速度波形と、ひずみ及び変位波形を図 D-4 に示す。打振では高次モードが発生するが、10~20Hz のバンドパスフィルタを使用し、1次モードのみを分

離れた。

この図から、チャージアンプにてフィルタ処理しない場合、加速度波形 (AX2～AX6)と、ひずみ及び変位波形に位相ずれが無いことが分かる。

AX1は位相が一致していない。これは試験体固定部のため打振では応答が小さく、フィルタ処理によってノイズ成分が現れているためであると考えられる。

### 3. チャージアンプの位相特性

圧電式加速度計用のチャージアンプの位相特性を図 D-5 に示す。

本試験の設定(ローパス 300Hz)では、対象としている 20Hz 近傍において約  $5^\circ$  の位相遅れがアンプのフィルタ特性によって生じる。

### 4. 位相遅れ原因の検討

#### 4.1 チャージアンプのフィルタ特性の影響

圧電式加速度計及びチャージアンプを用いて加速度を計測した場合に、チャージアンプのフィルタ特性により位相遅れが生じる。加速度計校正試験結果より、その位相差は大きくても  $13^\circ$  程度であると判断される。このため、本試験結果に見られる過大な位相遅れは、このチャージアンプのフィルタ特性が主原因でないと考えられる。

#### 4.2 線形・非線形の相違

本試験結果より、線形・非線形に関わらず同一の位相遅れが生じる。また、加振振動数範囲(15～29 Hz)では、位相ずれの周波数依存性は無い。

#### 4.3 収録チャンネル数・サンプリングレート

本試験と加速度計校正試験の計測条件の違いは、収録チャンネル数とサンプリングレートである。

本試験の収録では加速度計校正試験よりチャンネル数が多く、A/D 変換及びデータ収録の際に時間ずれが発生する可能性が残されている。

#### 4.4 アンチエイリアシングフィルタの影響

アンチエイリアシングフィルタ処理によっても位相のずれが生じると考えられる。しかし、本試験と加速度計校正試験では、全てのチャンネルを同一のカットオフ振動数 100Hz のローパスフィルタ処理している。このため、アンチエイリアシングフィルタは本試験の過大な位相遅れの原因ではないと言える。

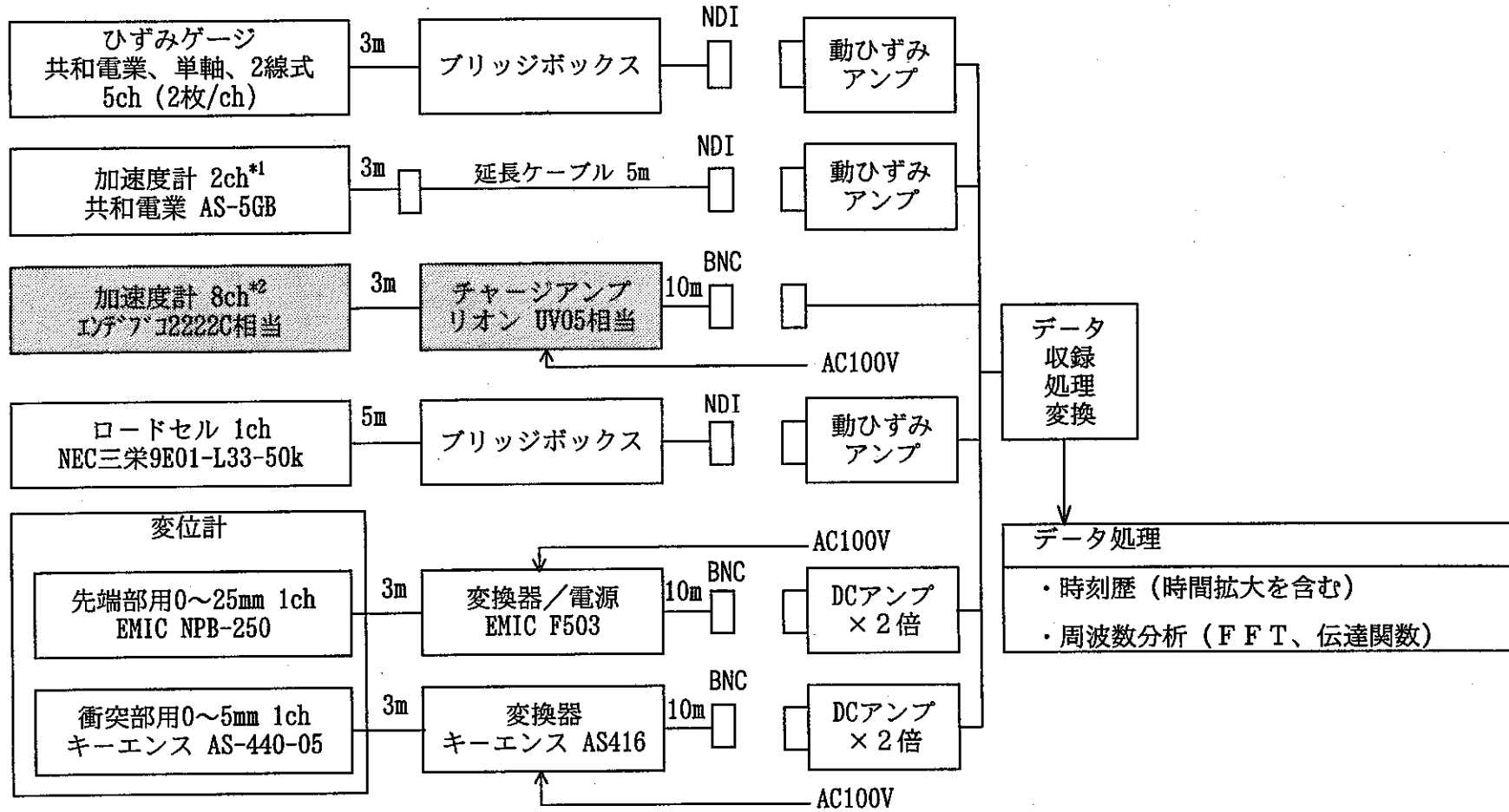
表D-1 圧電式加速度計波形の位相ずれ比較

試験	位相遅れ <sup>*1</sup>	ケース	入力	ch数	サンプリング	チャージアンプ LPフィルタ	アンチエイリア シングフィルタ	波形処理 のフィルタ
本試験	36度	GI-4S	定常正弦波 16.5Hz 240gal	18	1kHz	300Hz	100Hz	無
	37.5度	GP-4S	定常正弦波 26.5Hz 240gal	18	1kHz	300Hz	100Hz	無
	36度	G0-4DS	定常正弦波 20.4Hz 240gal	18	1kHz	300Hz	100Hz	LP30Hz
加速度計校正試験	13度	—	定常正弦波 16.5Hz 1G(鉛直)	9	200Hz	300Hz	100Hz	LP30Hz
予備試験	0度	—	先端打振	16 <sup>*2</sup>	1kHz	OFF	OFF	BP10-20Hz
チャージアンプ位相特性	5度	—	20Hz	—	—	300Hz	—	—
	0度	—	20Hz	—	—	OFF	—	—

\*1) 本試験及び予備試験は、加速度波形のひずみに対する位相(変位とひずみの位相は一致)

加速度計校正試験は、圧電式加速度計で計測した波形のひずみゲージ式加速度計で計測した波形に対する位相

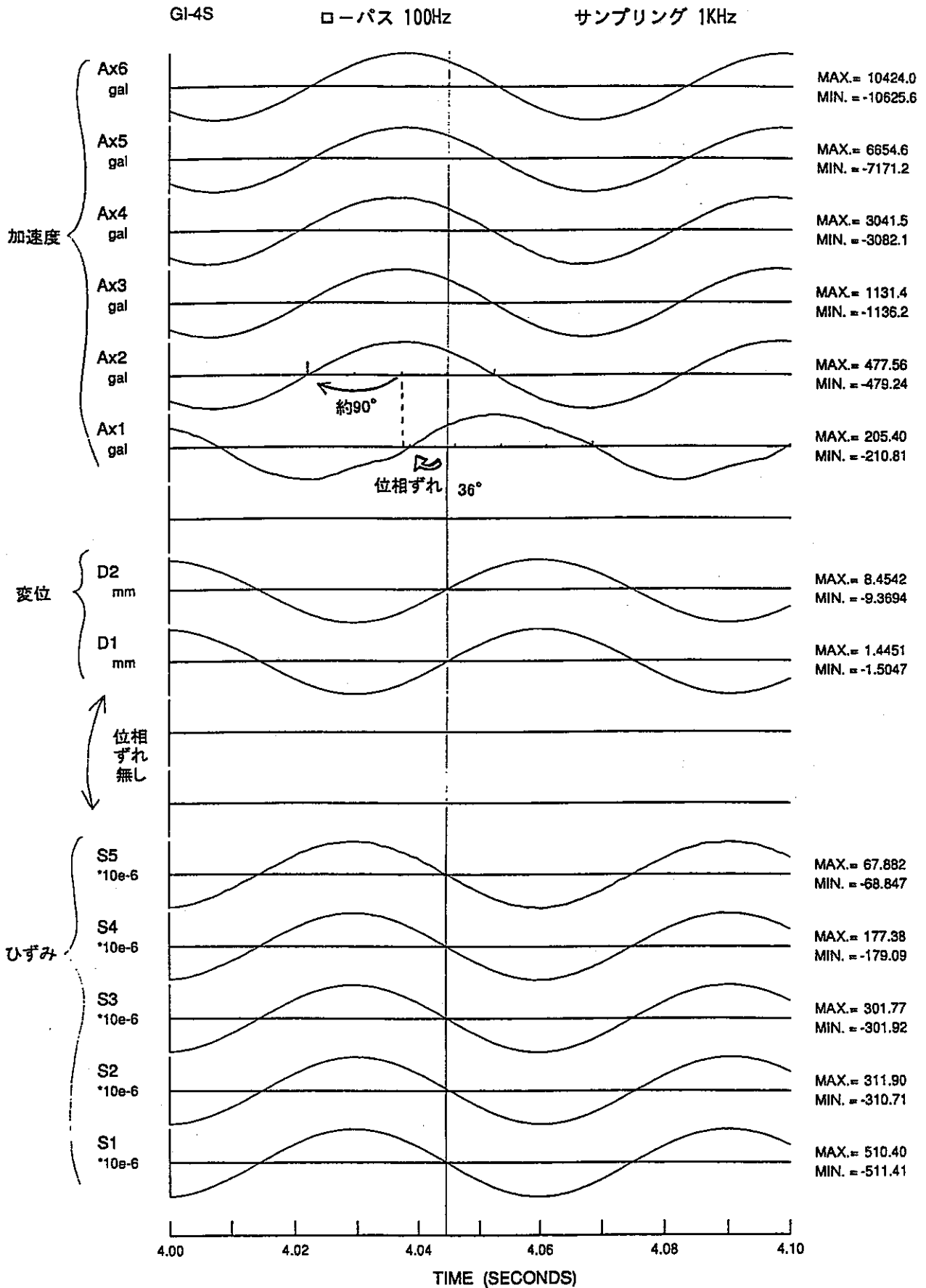
\*2) デジタルデータレコーダで収録



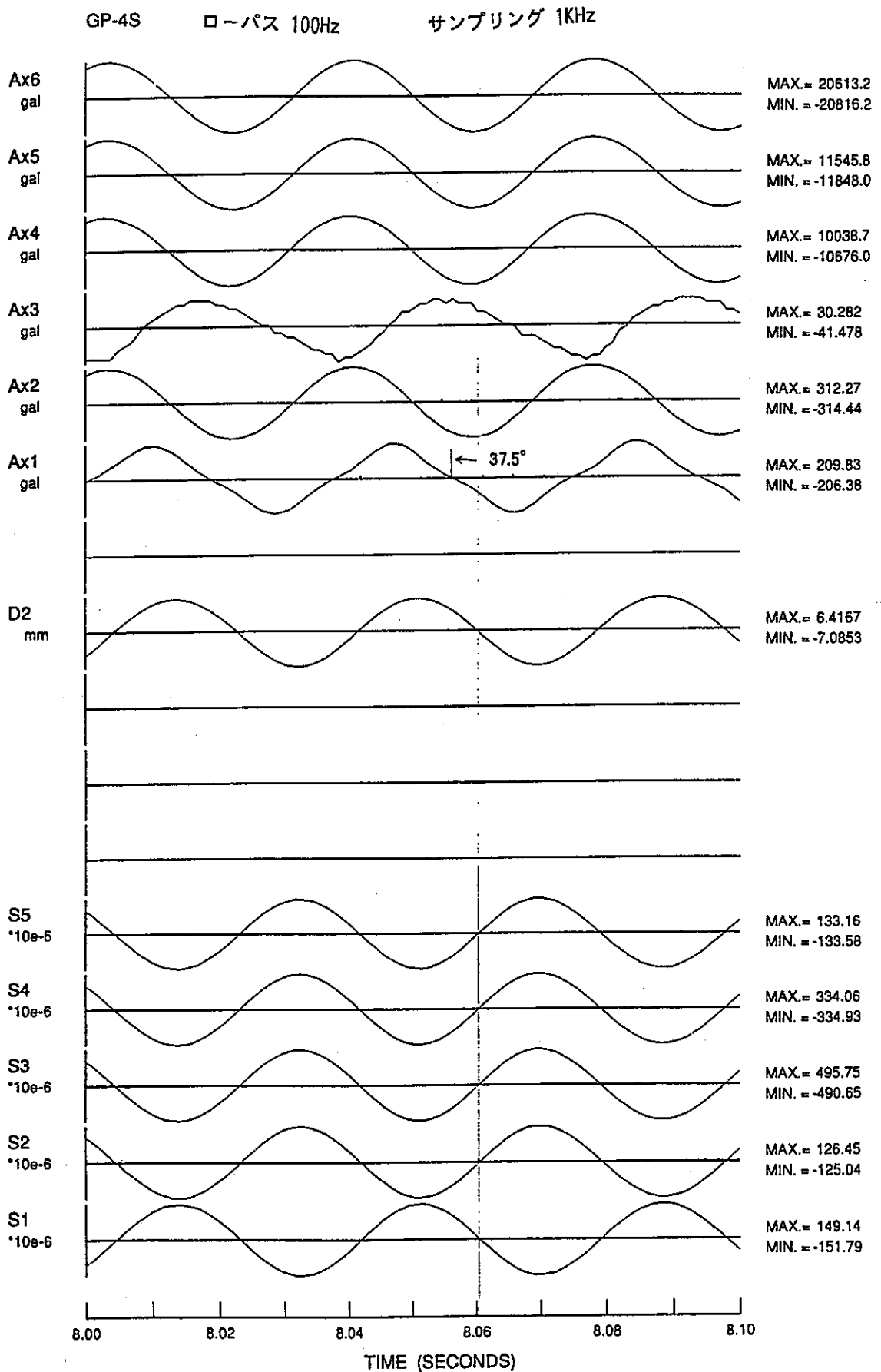
\*1) 振動台ピッチング確認用 (ひずみゲージ式)  
 \*2) 6ch(試験体)+2ch(入力点)

図D-1 計測ブロックチャート

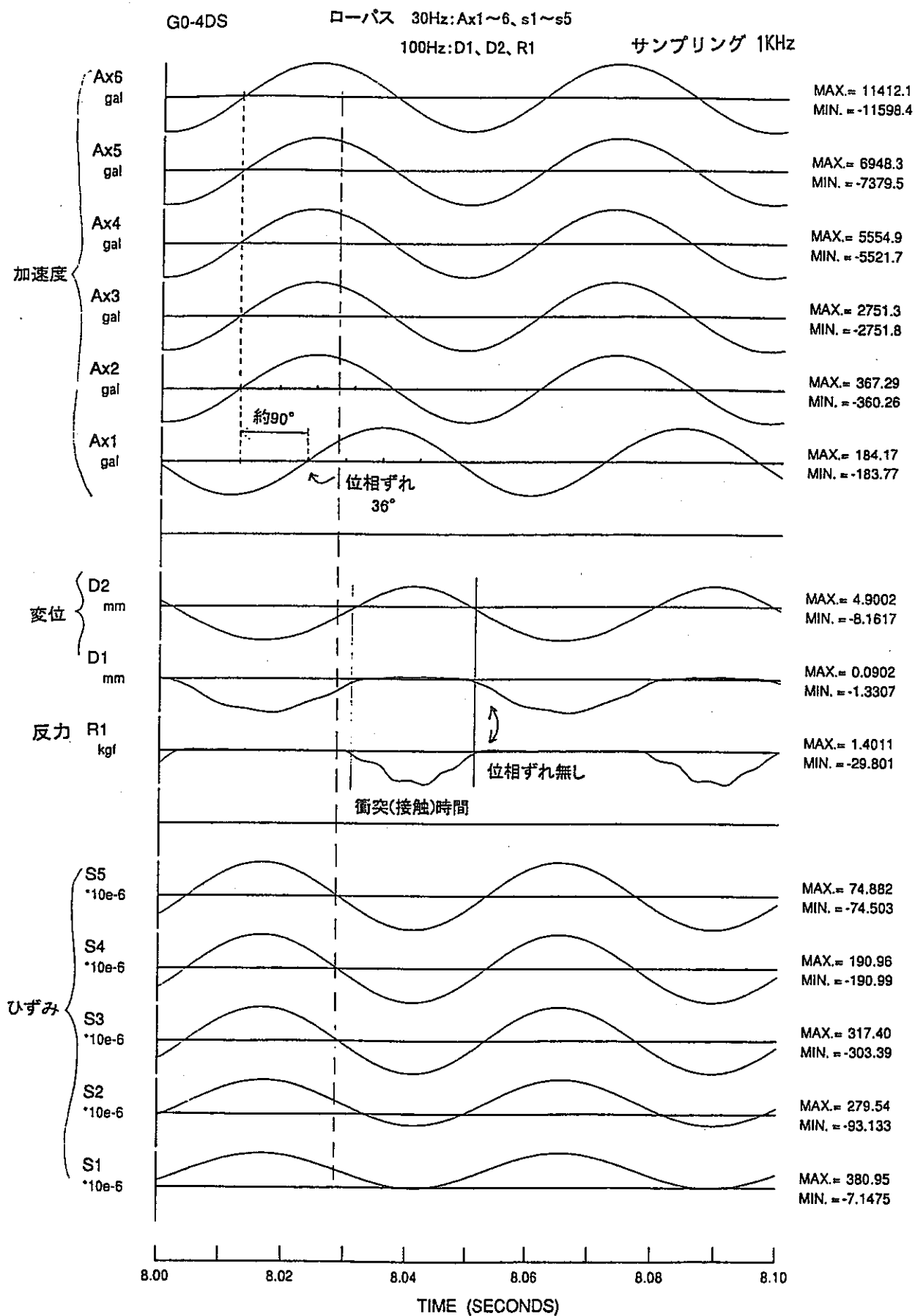




図D-2(1/3) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ $\infty$ 、240gal、16.5Hz)



図D-2(2/3) 定常加振時刻歴波形 (ピン支持、240gal、26.5Hz)

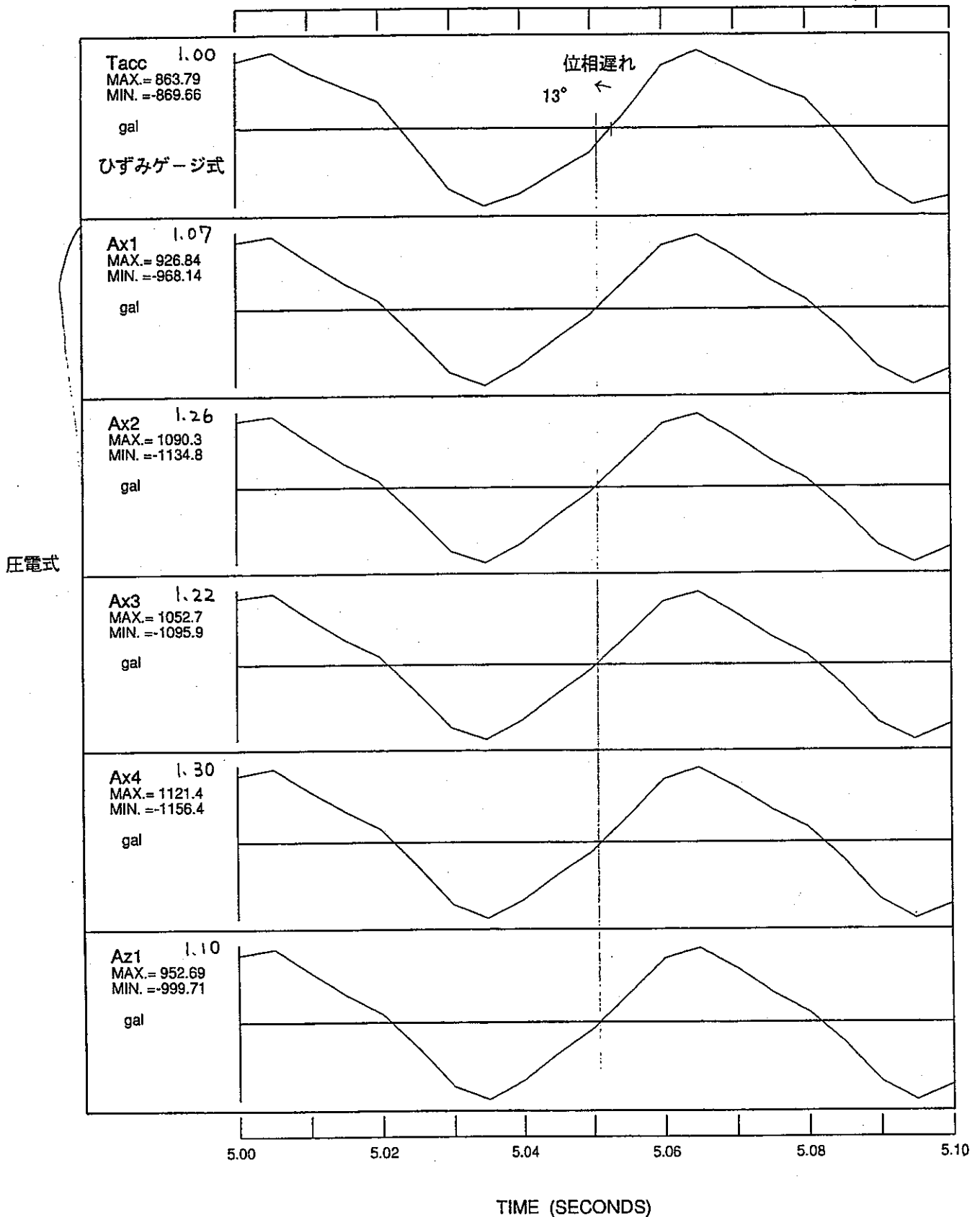


図D-2(3/3) 定常加振時刻歴波形 (ギャップ0、240gal、20.4Hz)

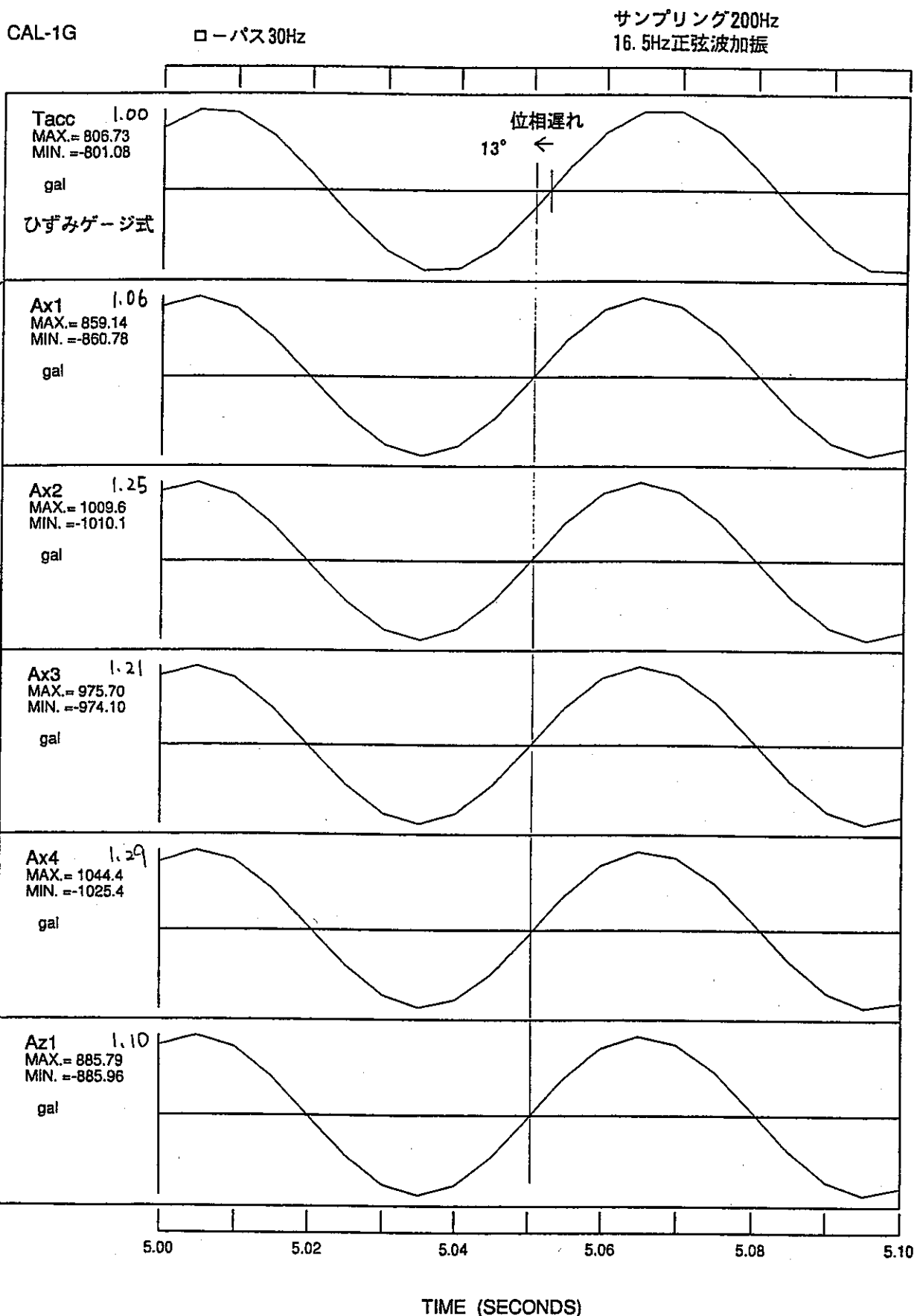
CAL-1G

フィルタ無し

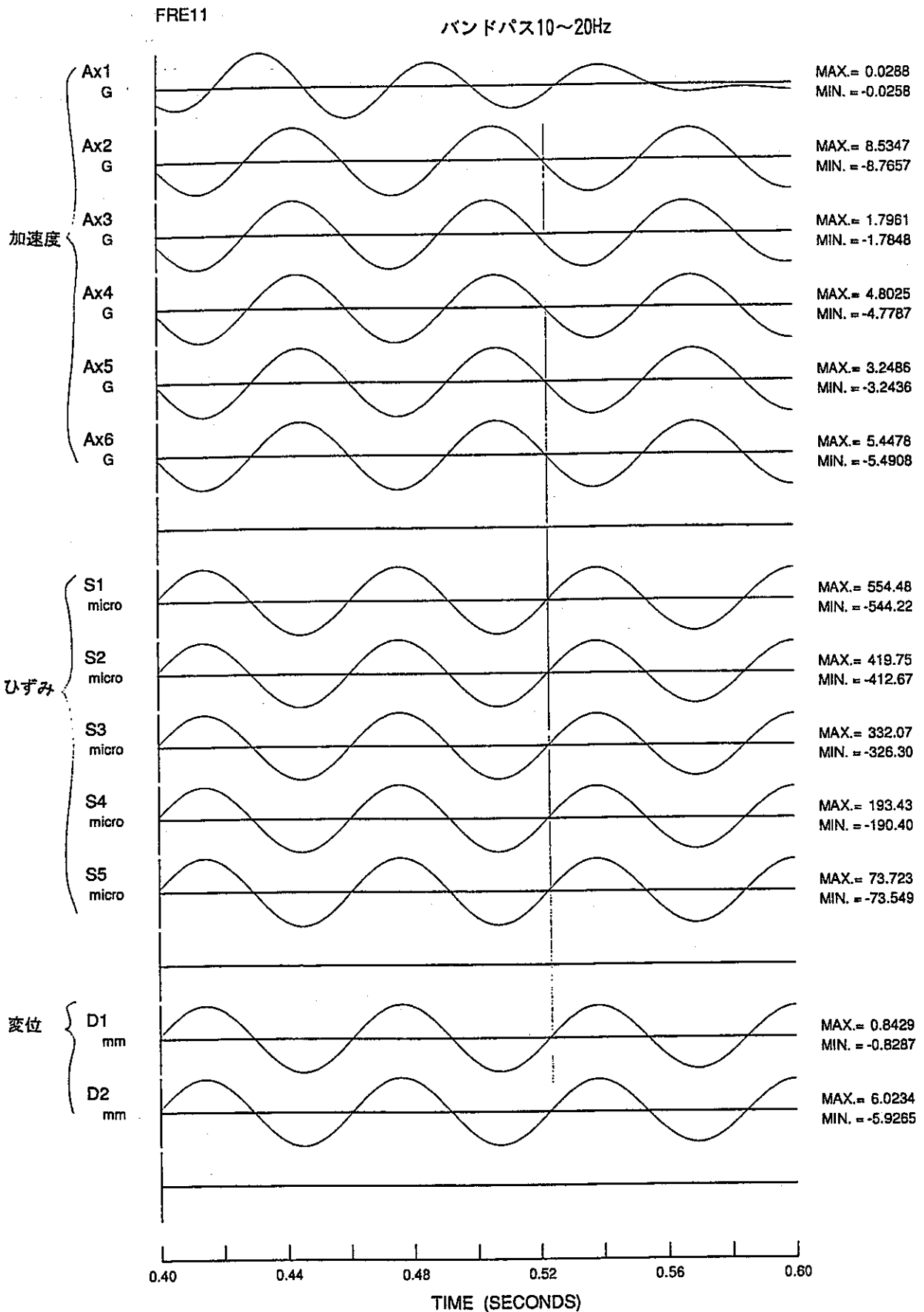
サンプリング200Hz  
16.5Hz正弦波加振



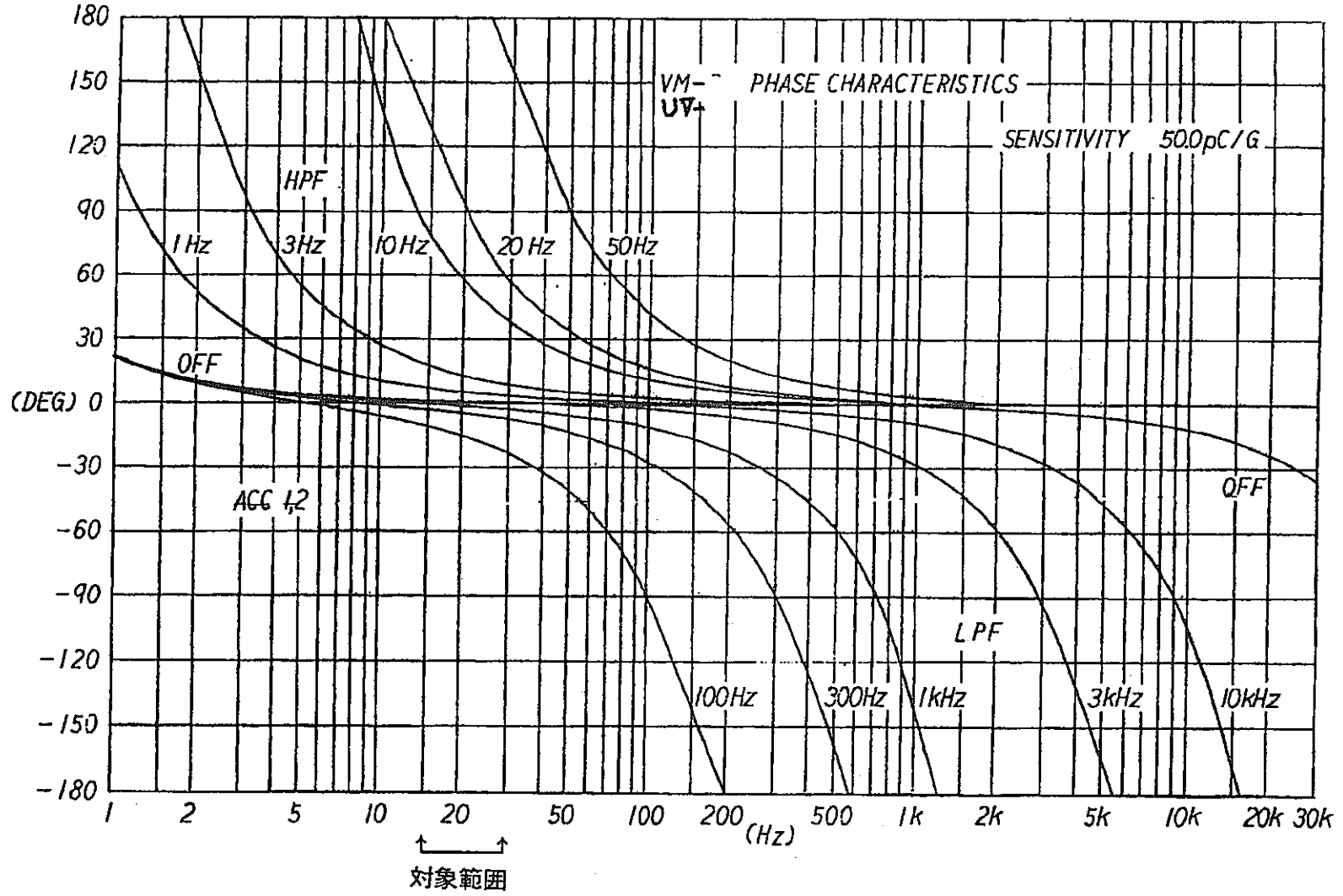
図D-3(1/2) 加速度計校正試験結果 (ひずみゲージ式と圧電式の位相比較)



図D-3(2/2) 加速度計校正試験結果 (ひずみゲージ式と圧電式の位相比較)



図D-4 予備試験打振結果(位相比較)



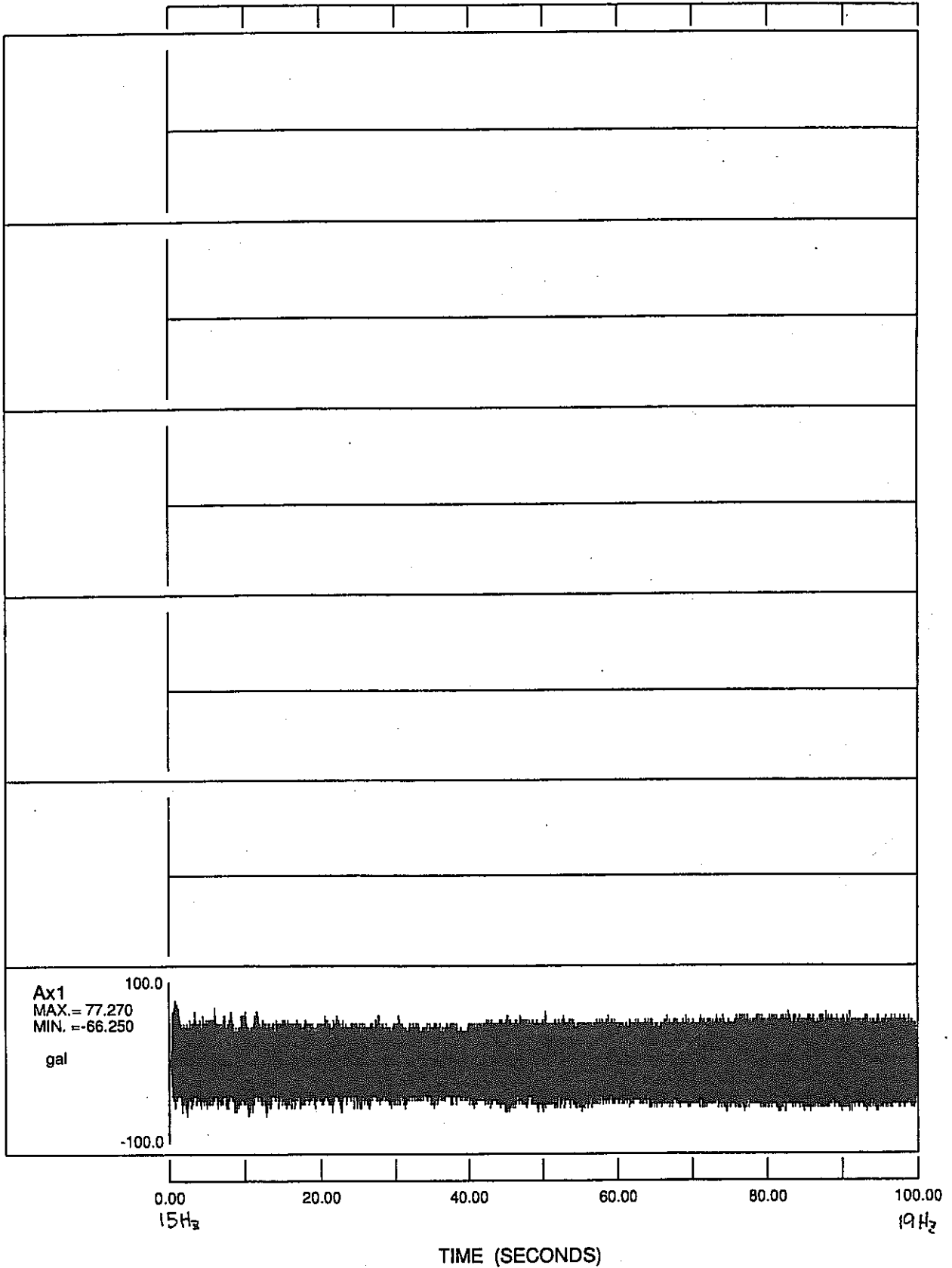
図D-5 チャージアンプの位相特性

## APPENDIX-E

試驗結果 掃引加振時刻歷波形

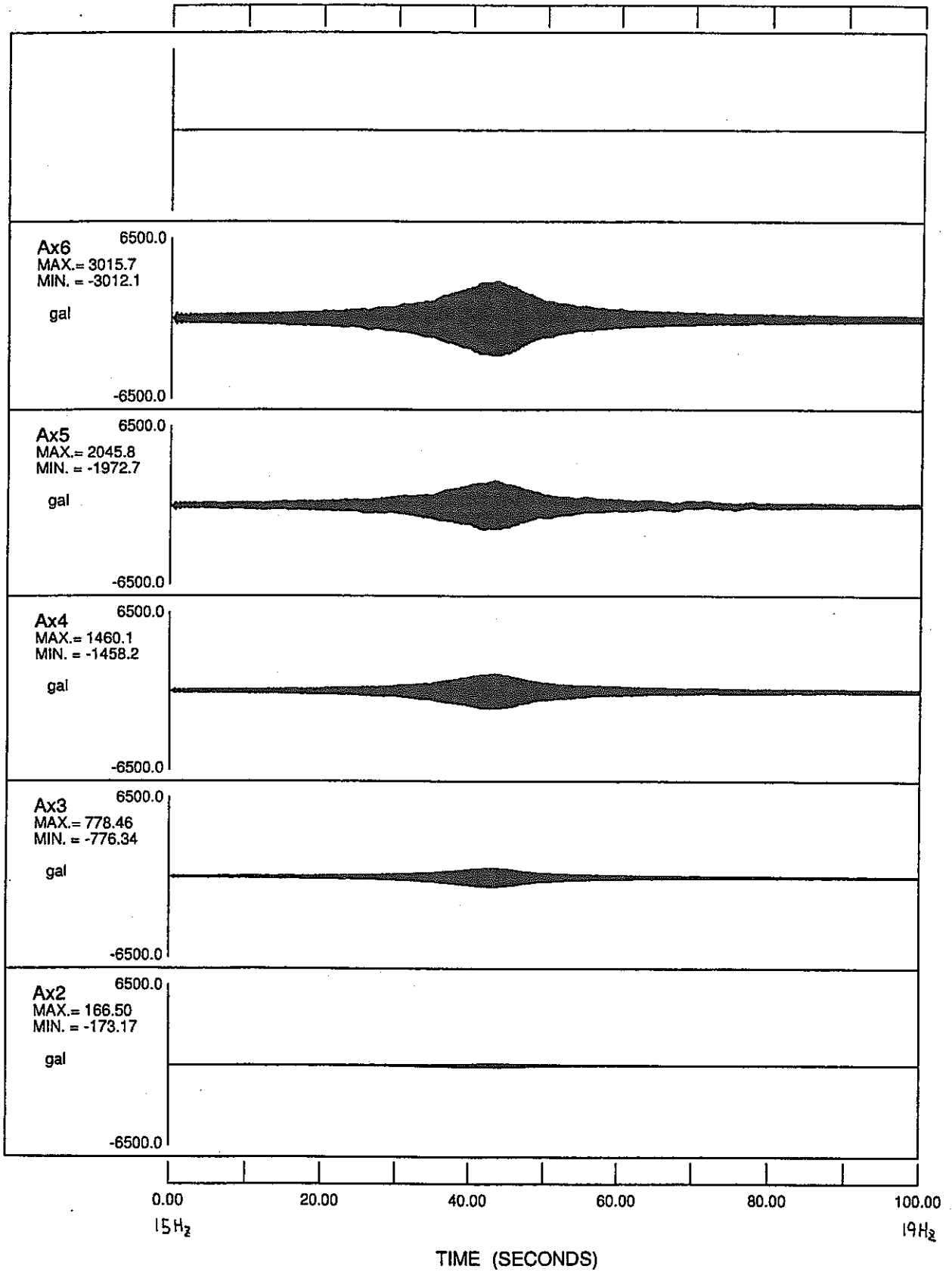


GI-1U2



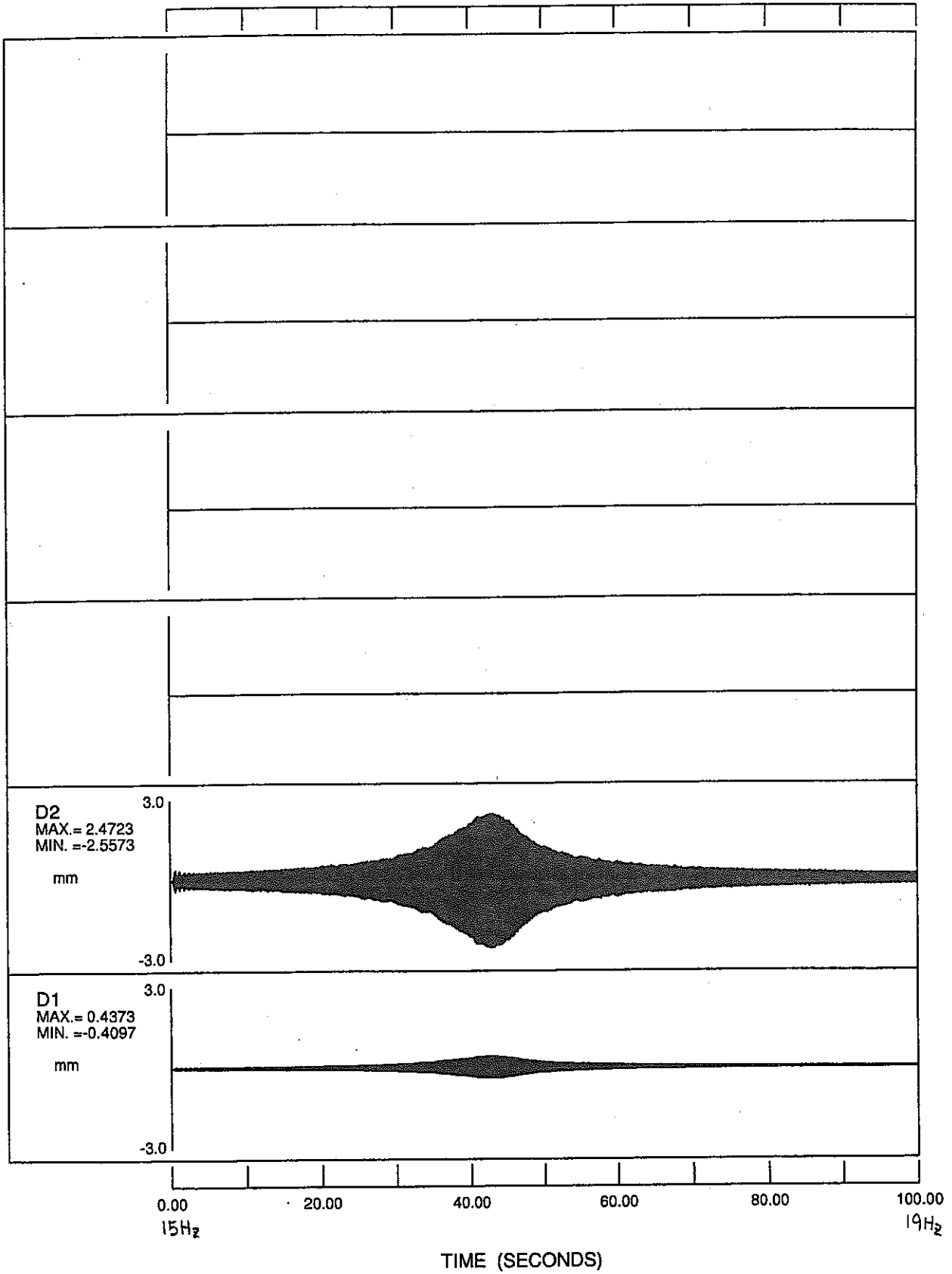
加振加速度時刻歴波形 (キップ $\infty$ 、60gal、スイプUp)

GI-1U2



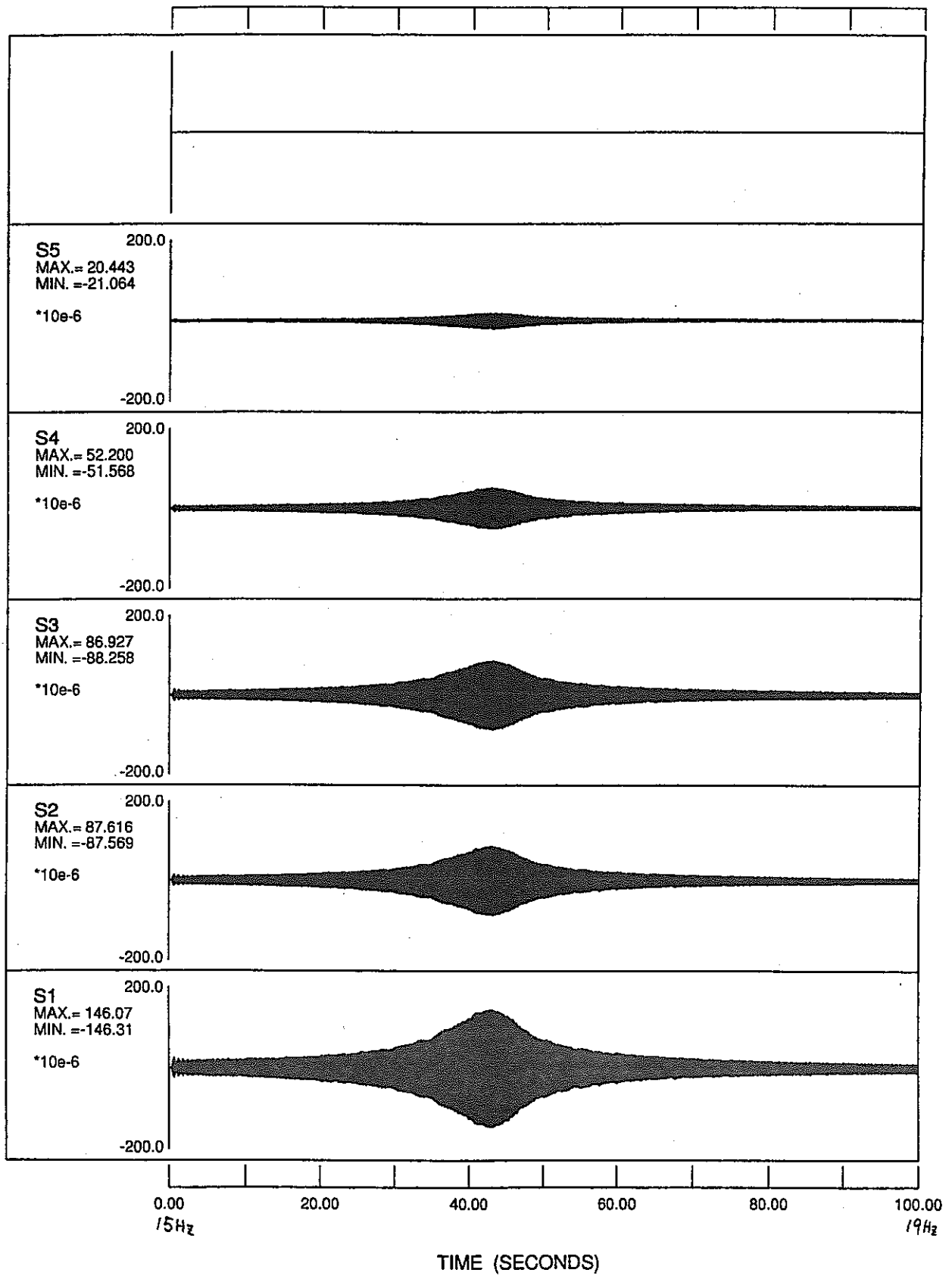
加速度時刻歴波形 (北緯7° 00'、60gal、スイ7° Up)

GI-1U2



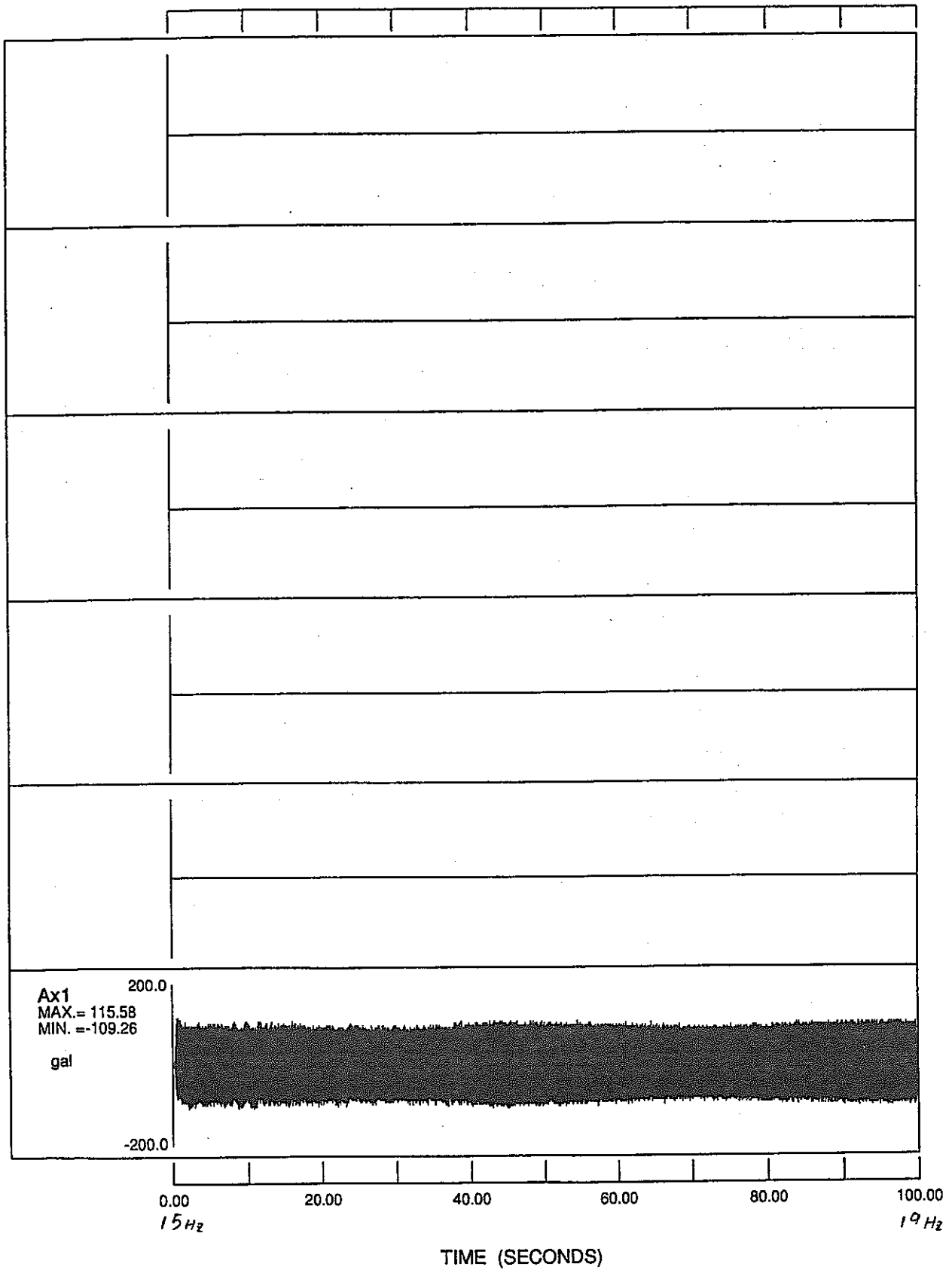
変位時刻歴波形 (キヤブ<sup>°</sup>∞、60gal、スイブ<sup>°</sup>Up)

GI-1U2



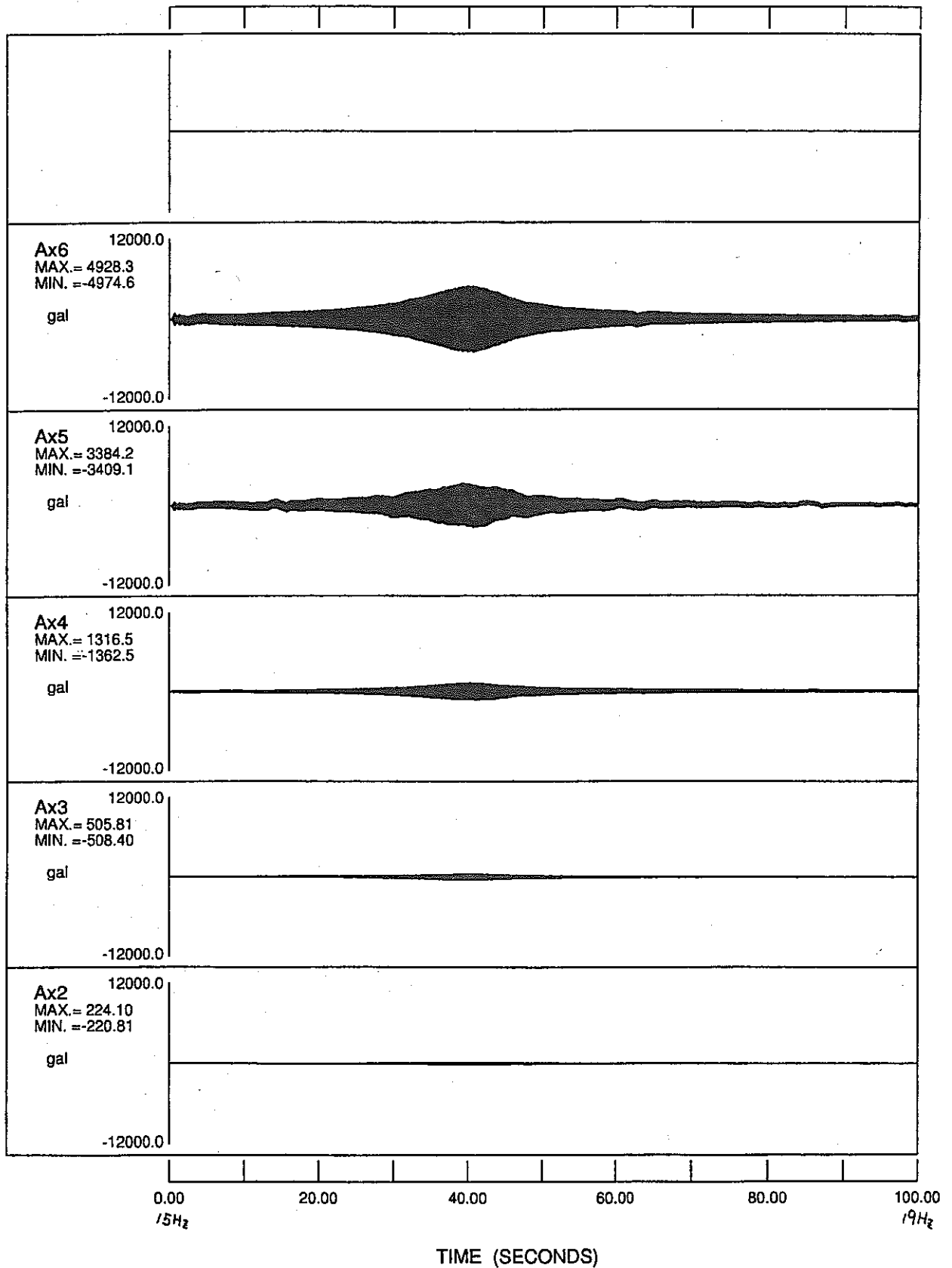
ひずみ時刻歴波形 (ｷｯﾌﾟ7°∞、60gal、ｽｲｰﾌﾟUp)

GI-2



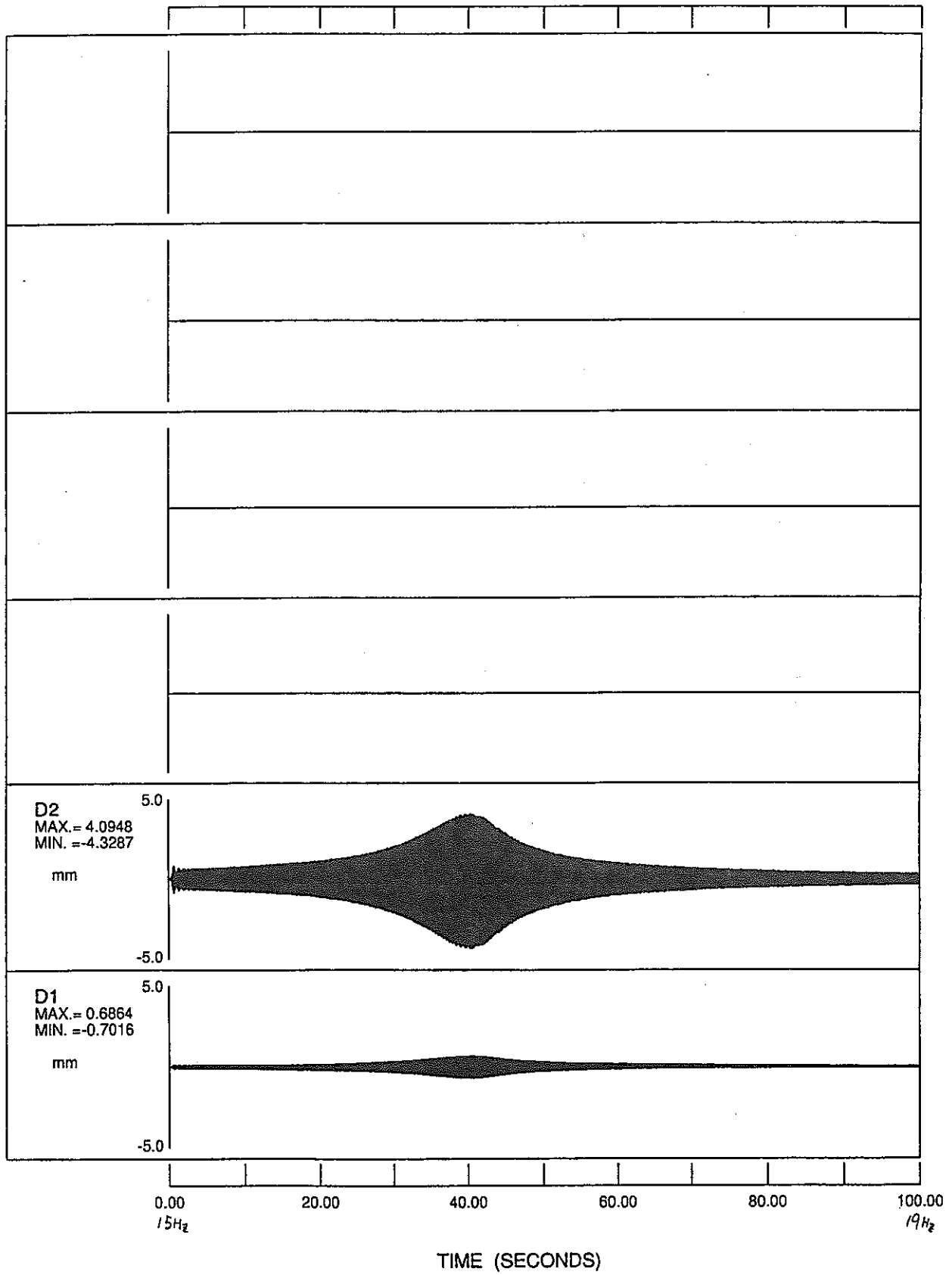
加振加速度時刻歴波形 (ｷｯｯ7°∞、120gal、ｽｲ-7°Up)

GI-2



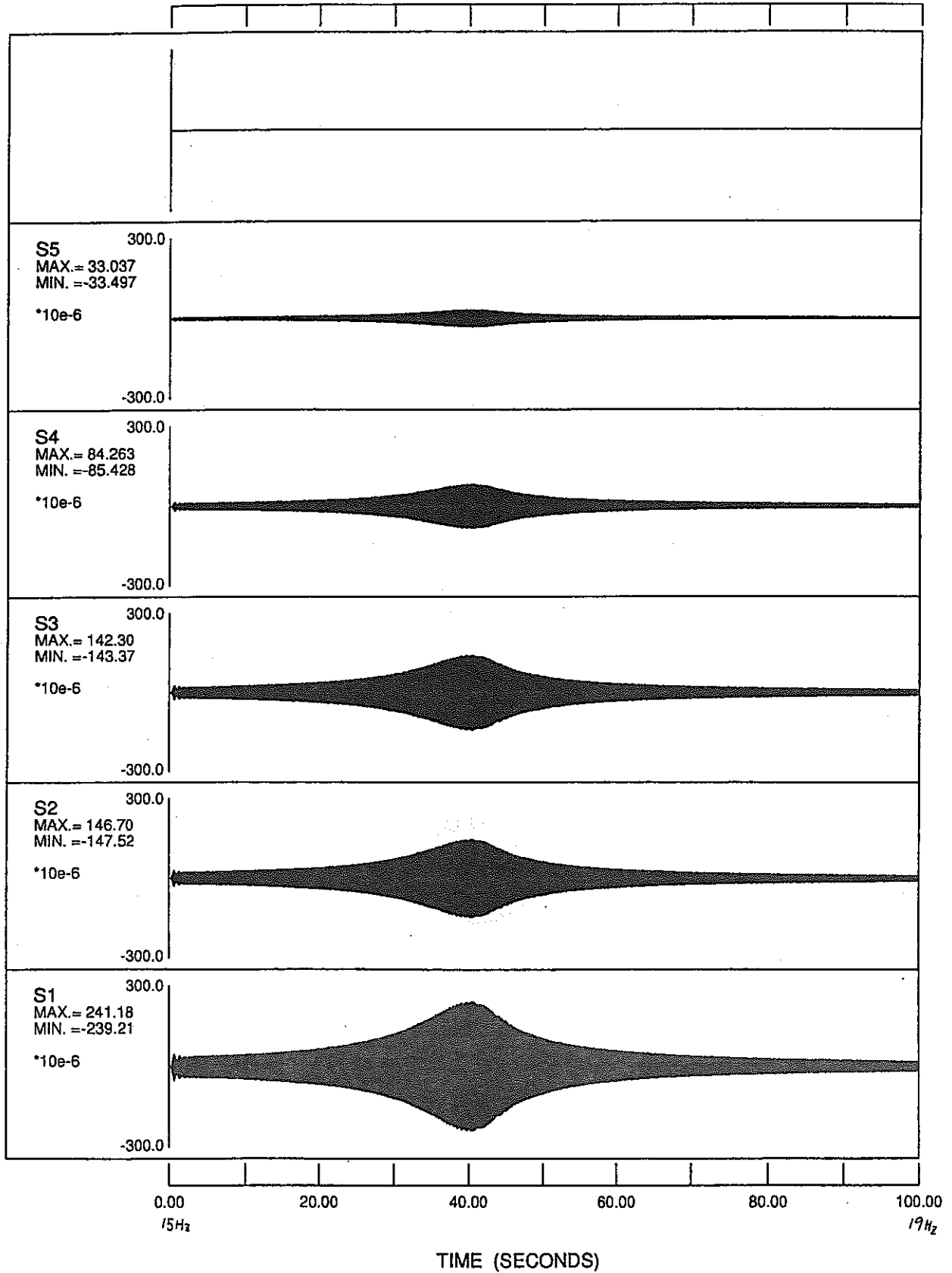
加速度時刻歴波形 (1/5<sup>th</sup>、120gal、1/19<sup>th</sup> Up)

GI-2



変位時刻歴波形 (3°、120gal、スイ-7°Up)

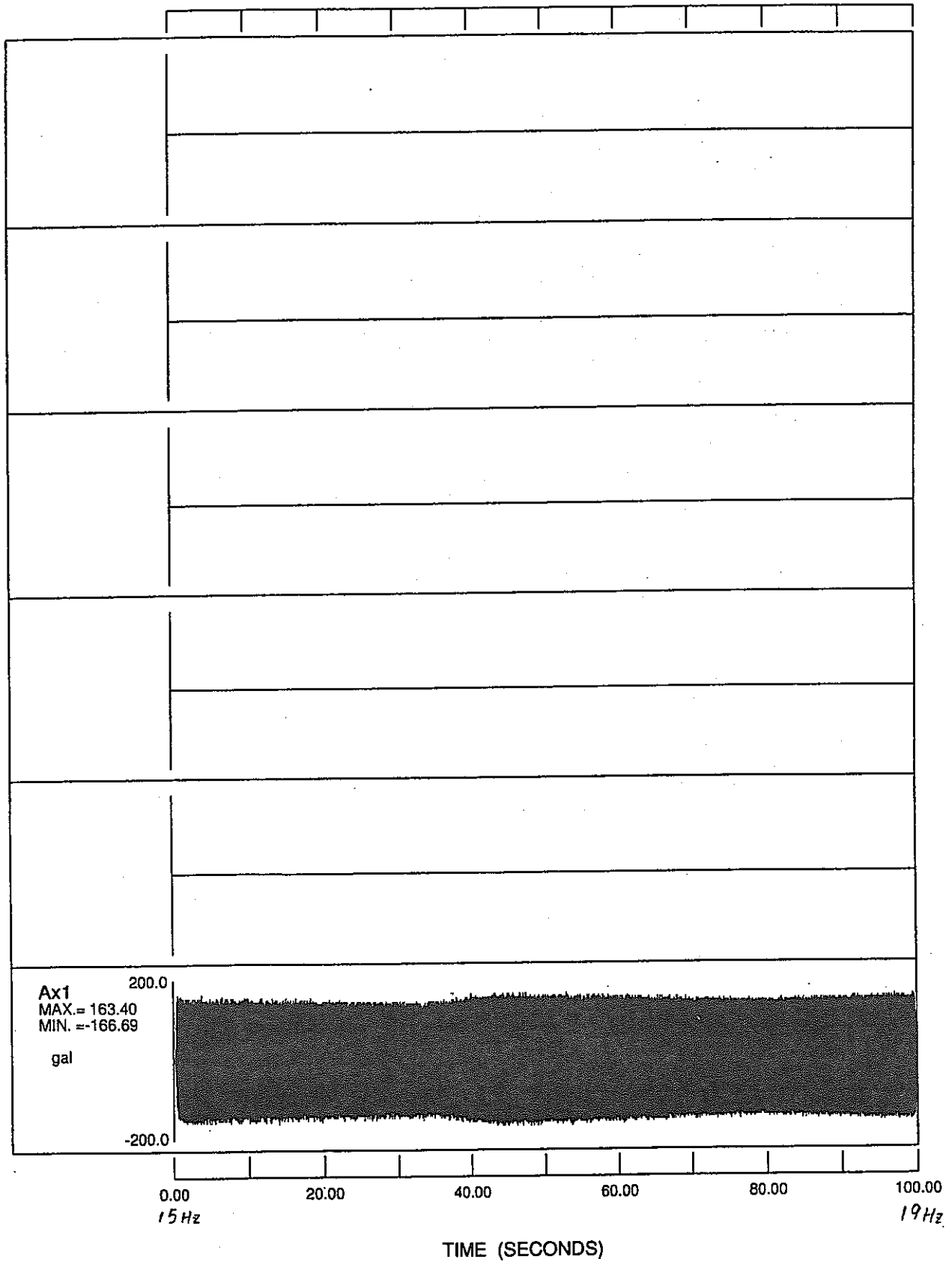
GI-2



ひずみ時刻歴波形 (キ+77°∞、120gal、スイ-7°Up)

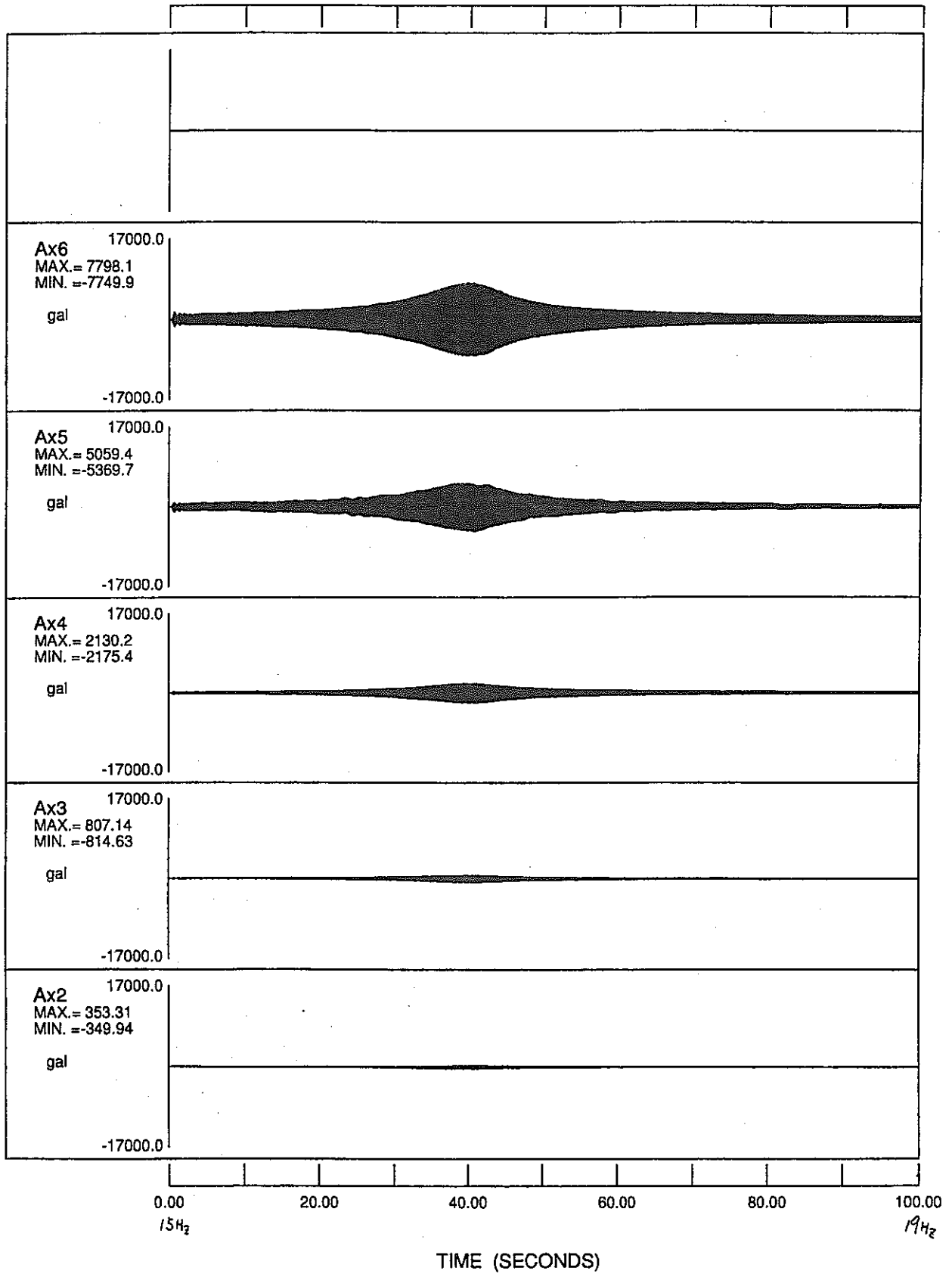


GI-3



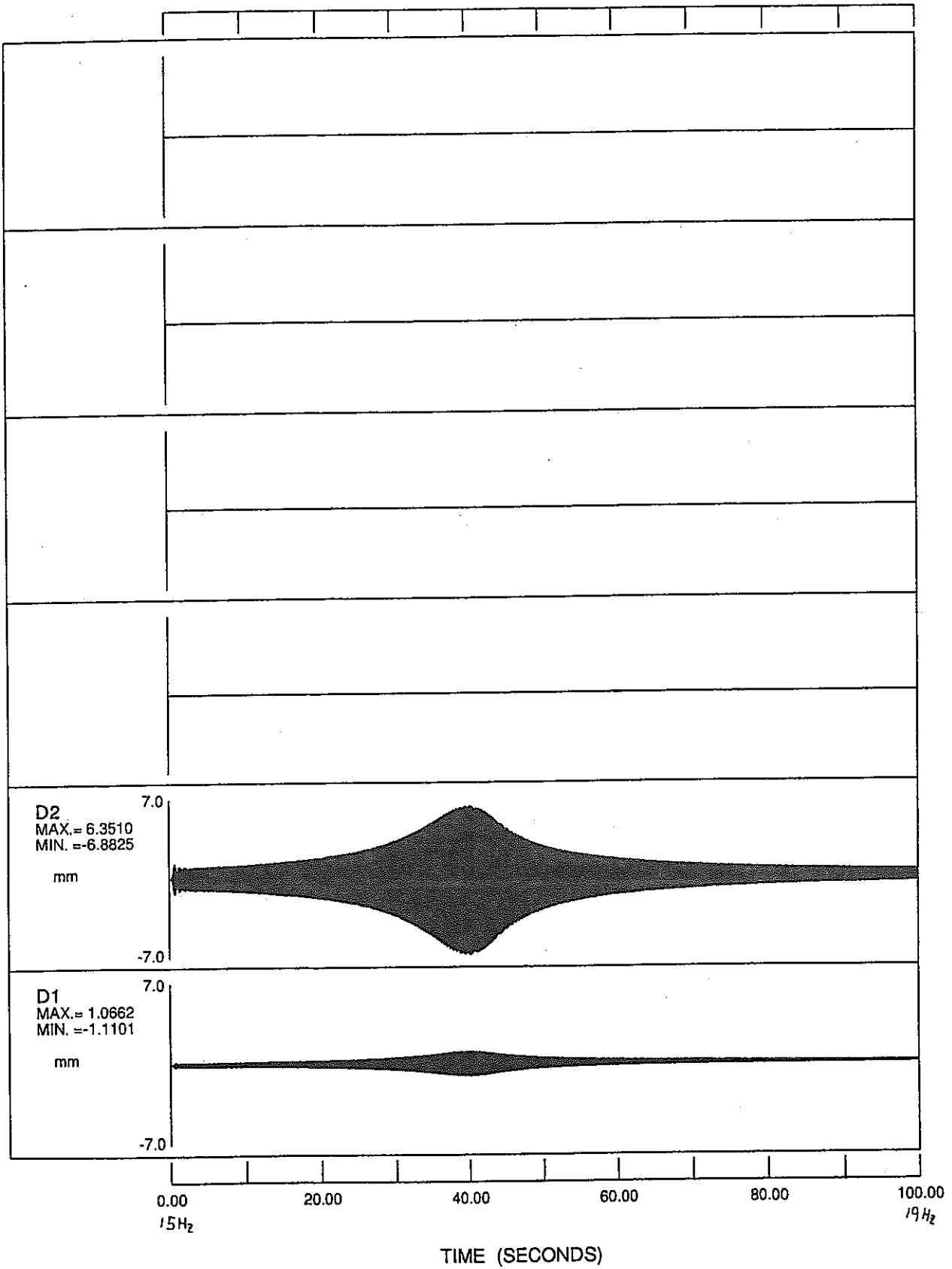
加振加速度時刻歴波形 (47°、180gal、47° Up)

GI-3



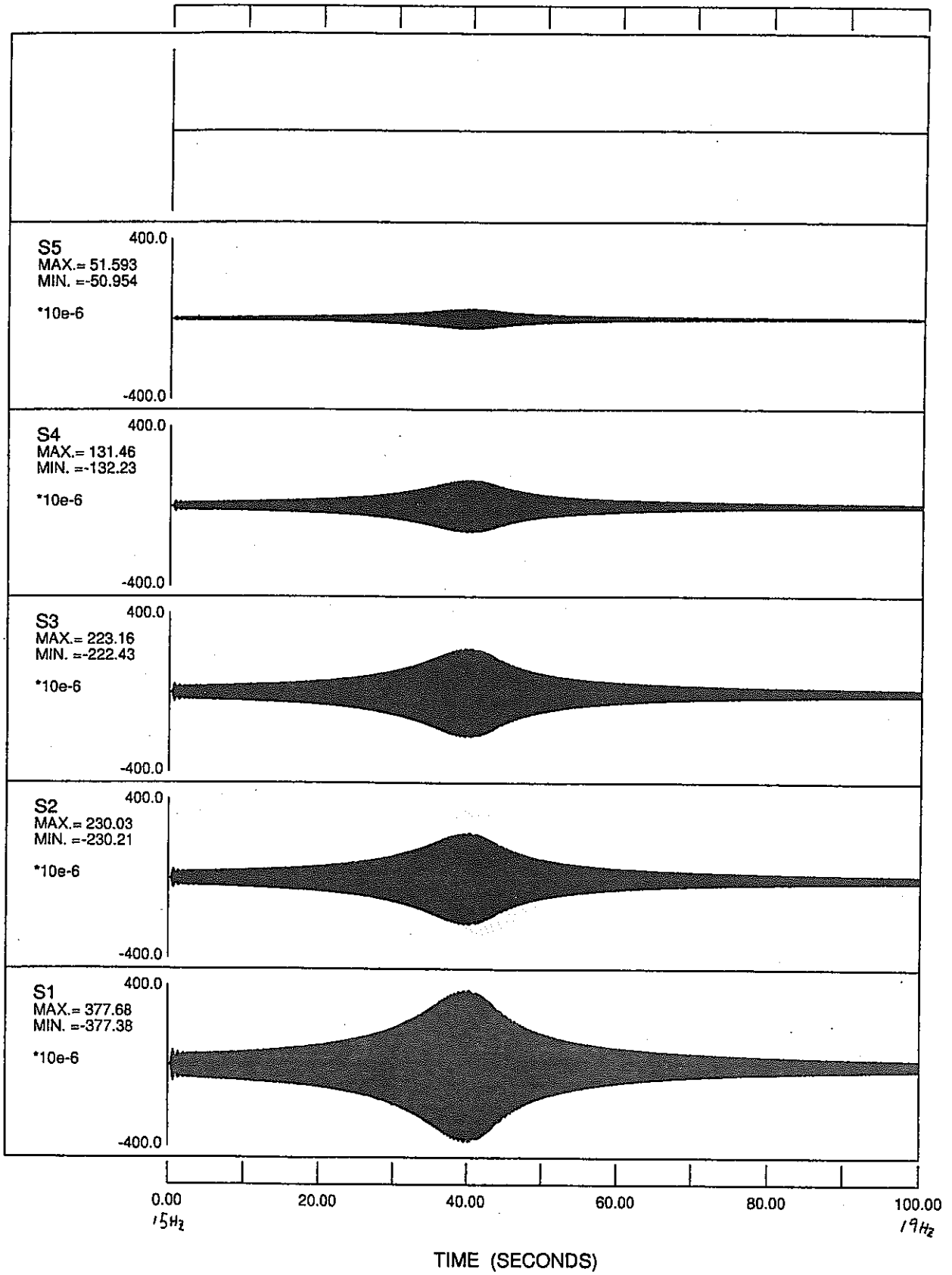
加速度時刻歴波形 (キップ $\infty$ 、180gal、スイブ $^{\circ}$ Up)

GI-3

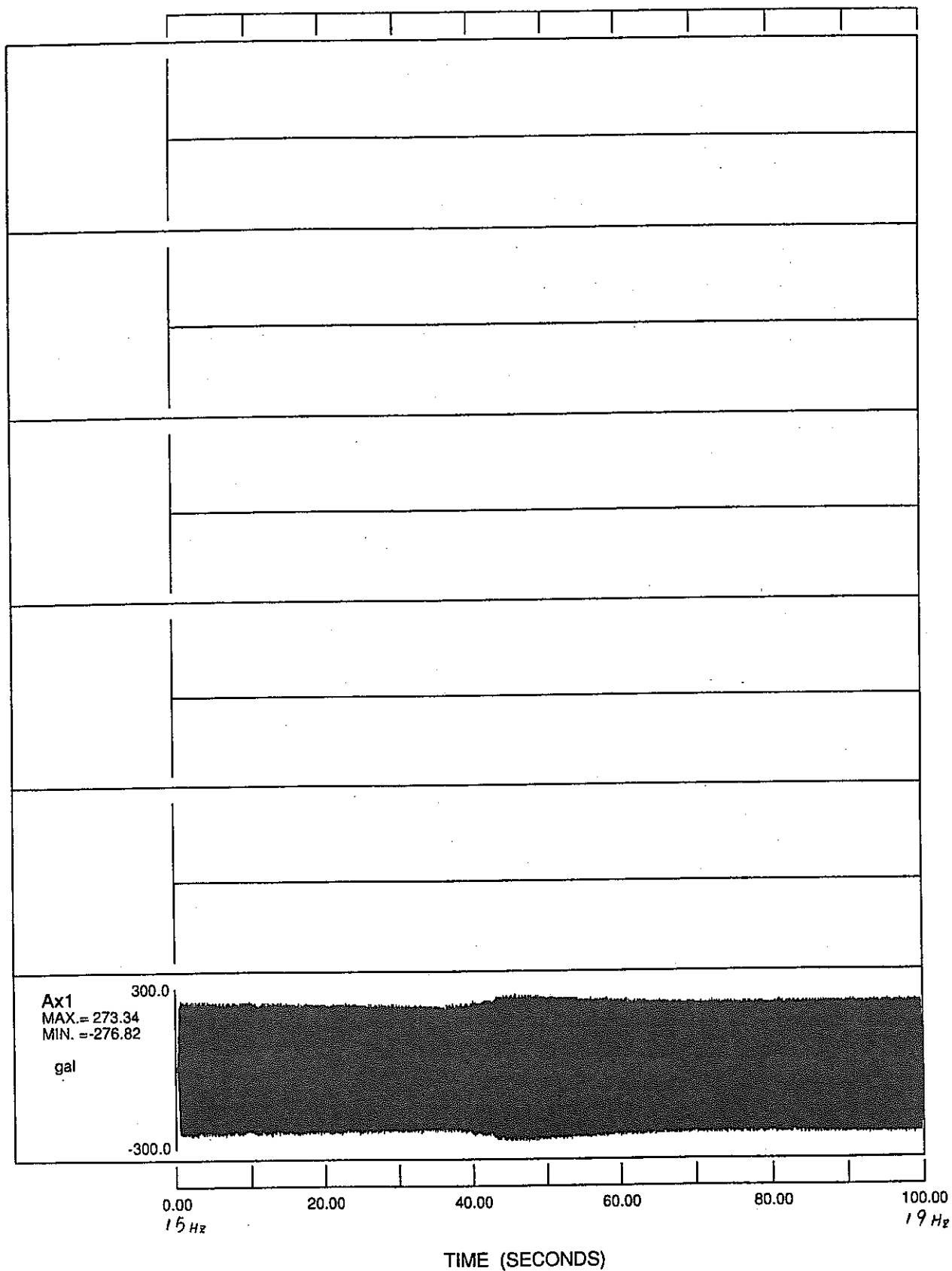


変位時刻歴波形 (キップ°∞、180gal、スイブ°Up)

GI-3

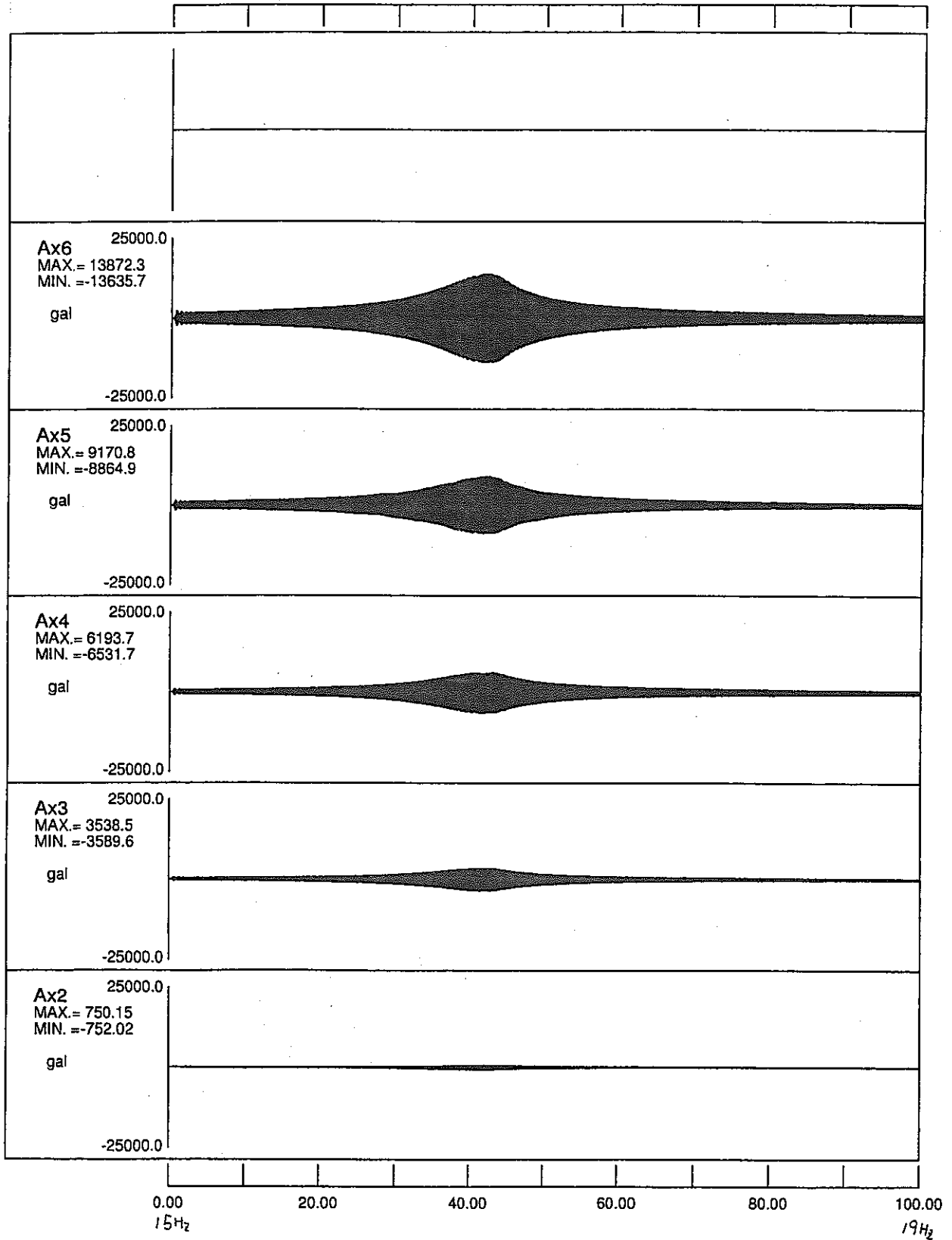


GI-4U2



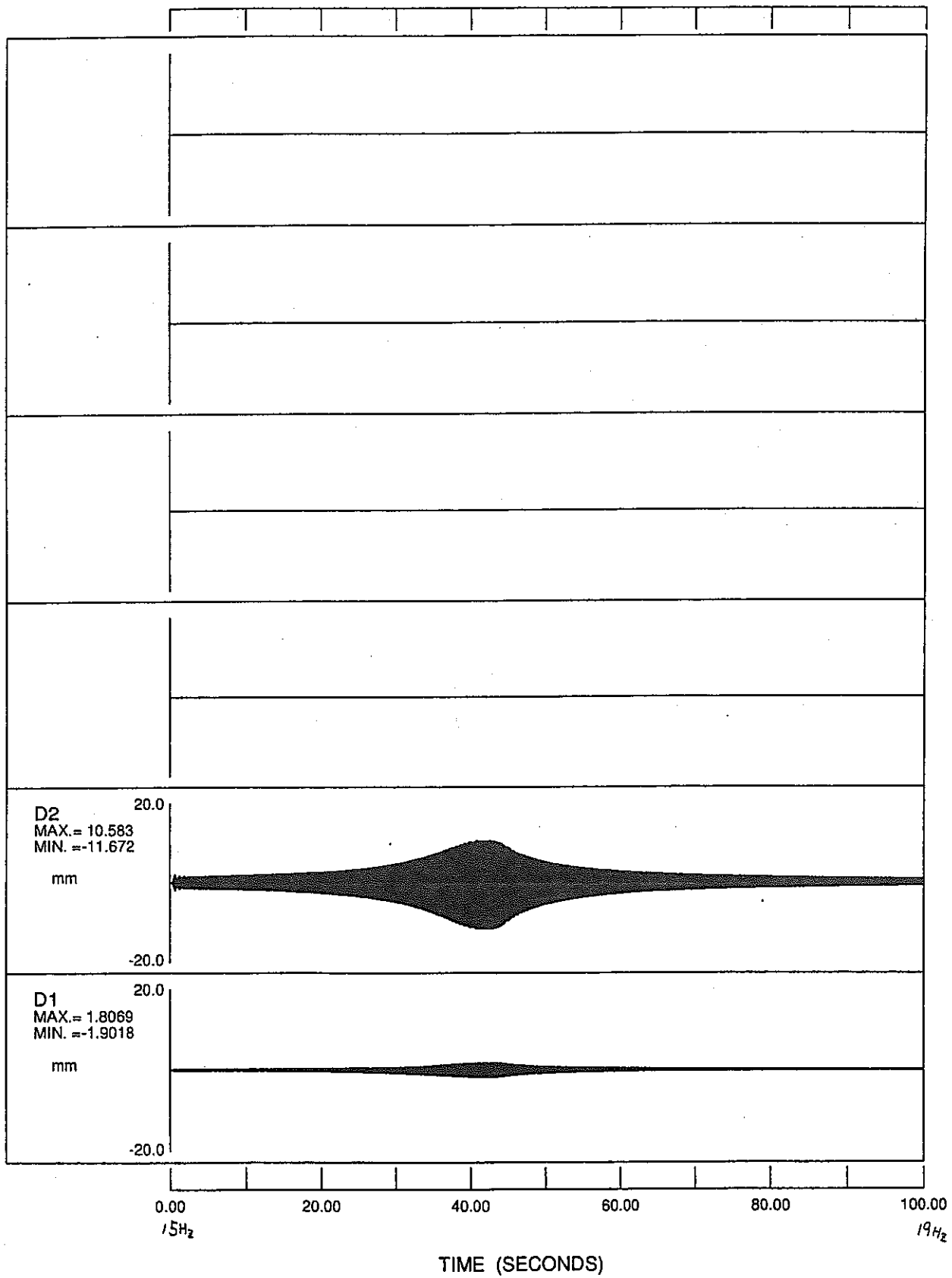
加振加速度時刻歴波形 (キヤブ<sup>°</sup>∞、240gal、スイブ<sup>°</sup>Up)

GI-4U2



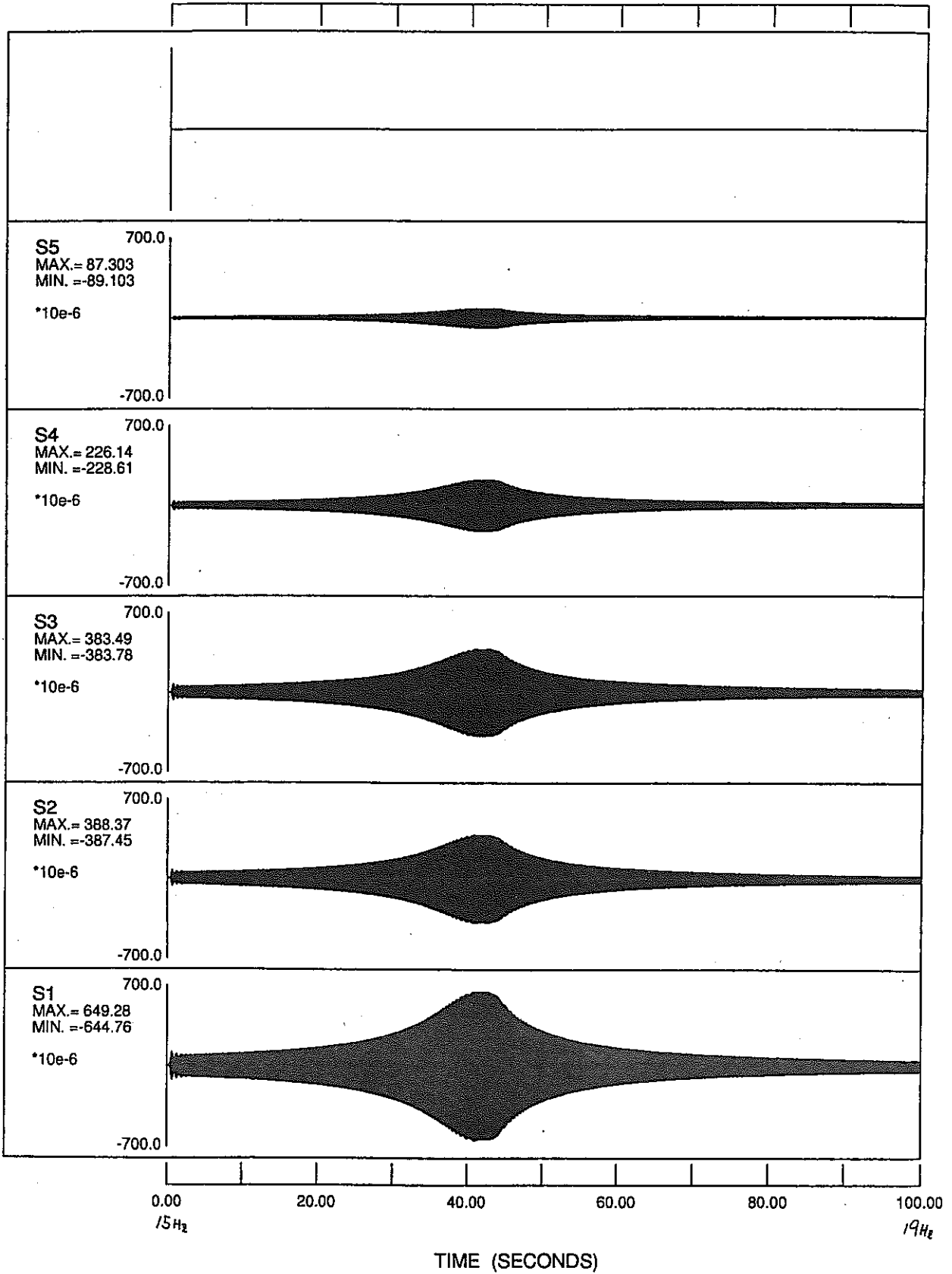
加速度時刻歴波形 (キップ<sup>∞</sup>、240gal、スイブ<sup>Up</sup>)

GI-4U2



変位時刻歴波形 (φ<sup>+</sup> 77° ∞、240gal、φ<sup>-</sup> 7° Up)

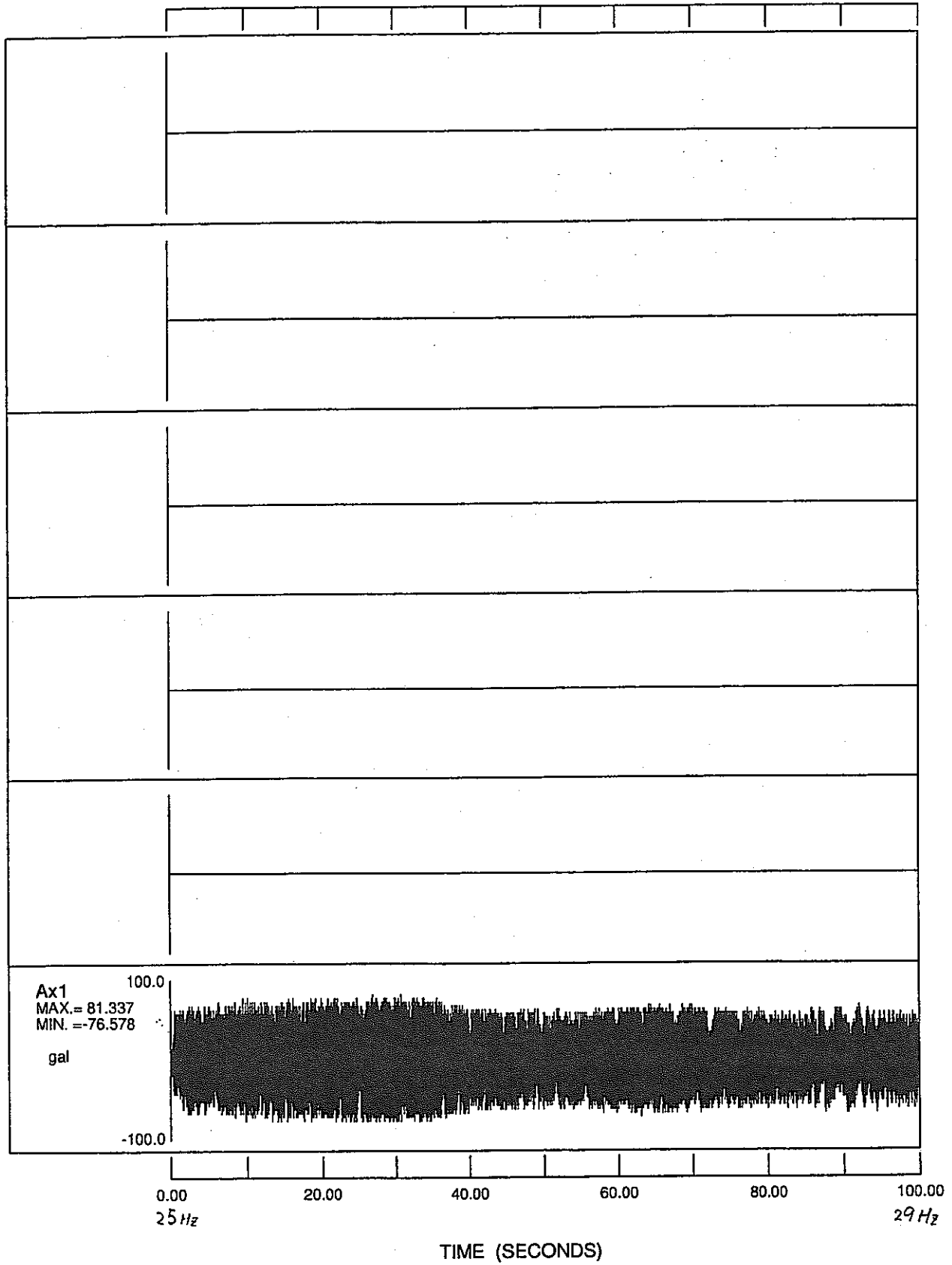
GI-4U2



ひずみ時刻歴波形 (キップ<sup>∞</sup>、240gal、スイブ<sup>∞</sup>Up)

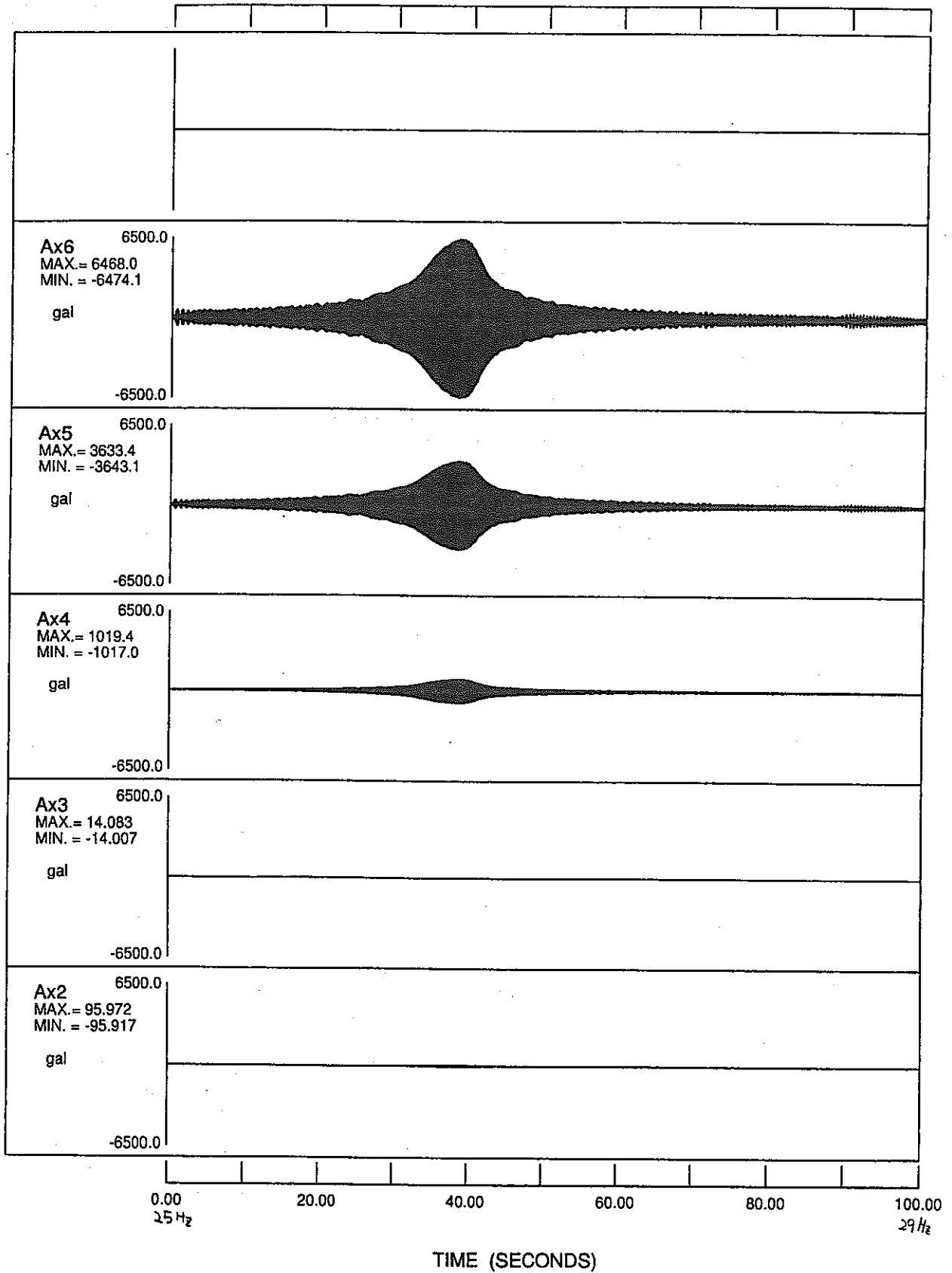


GP-1



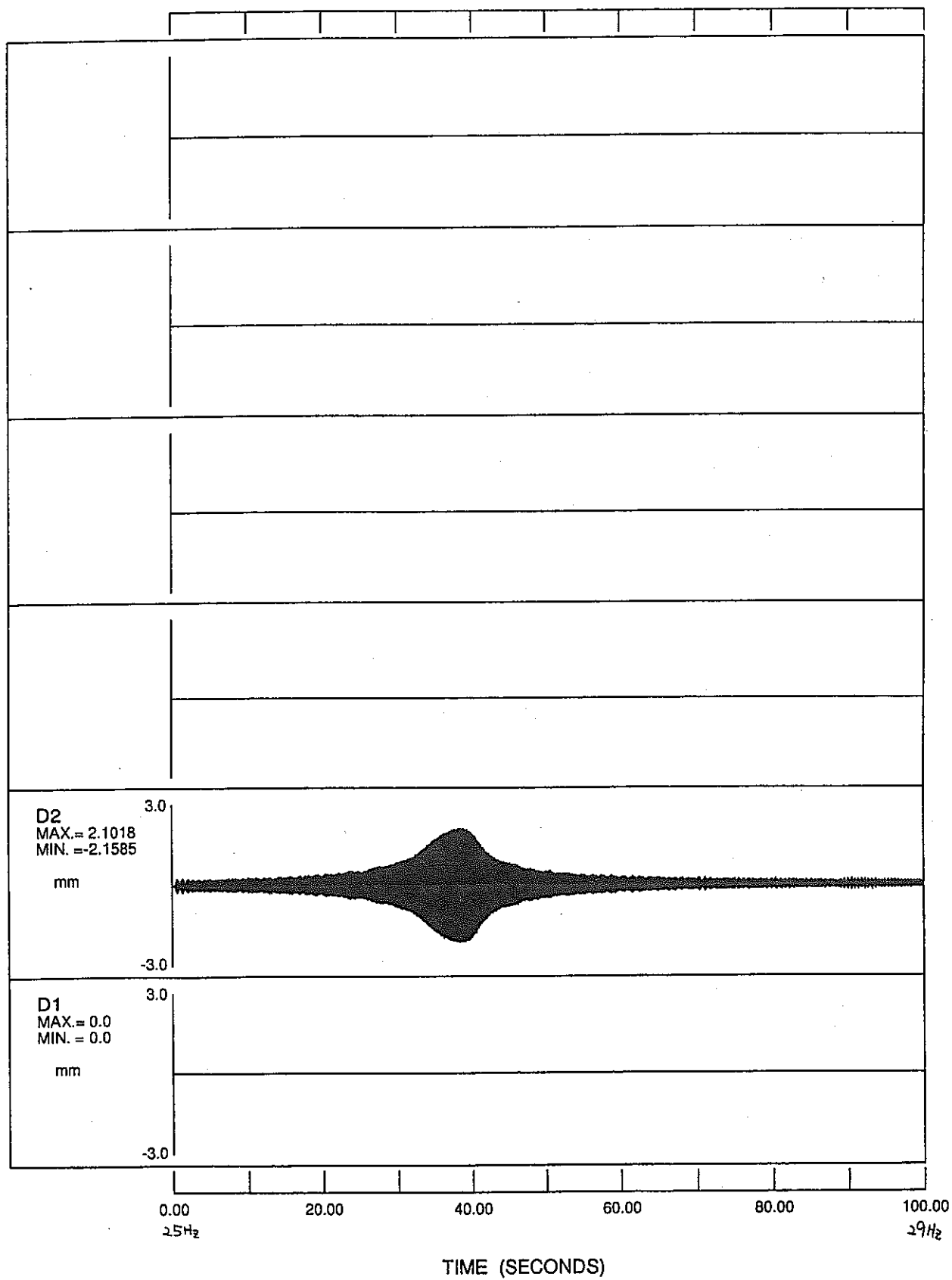
加振加速度時刻歴波形 (ピソ支持、60gal、スI-7° Up)

GP-1



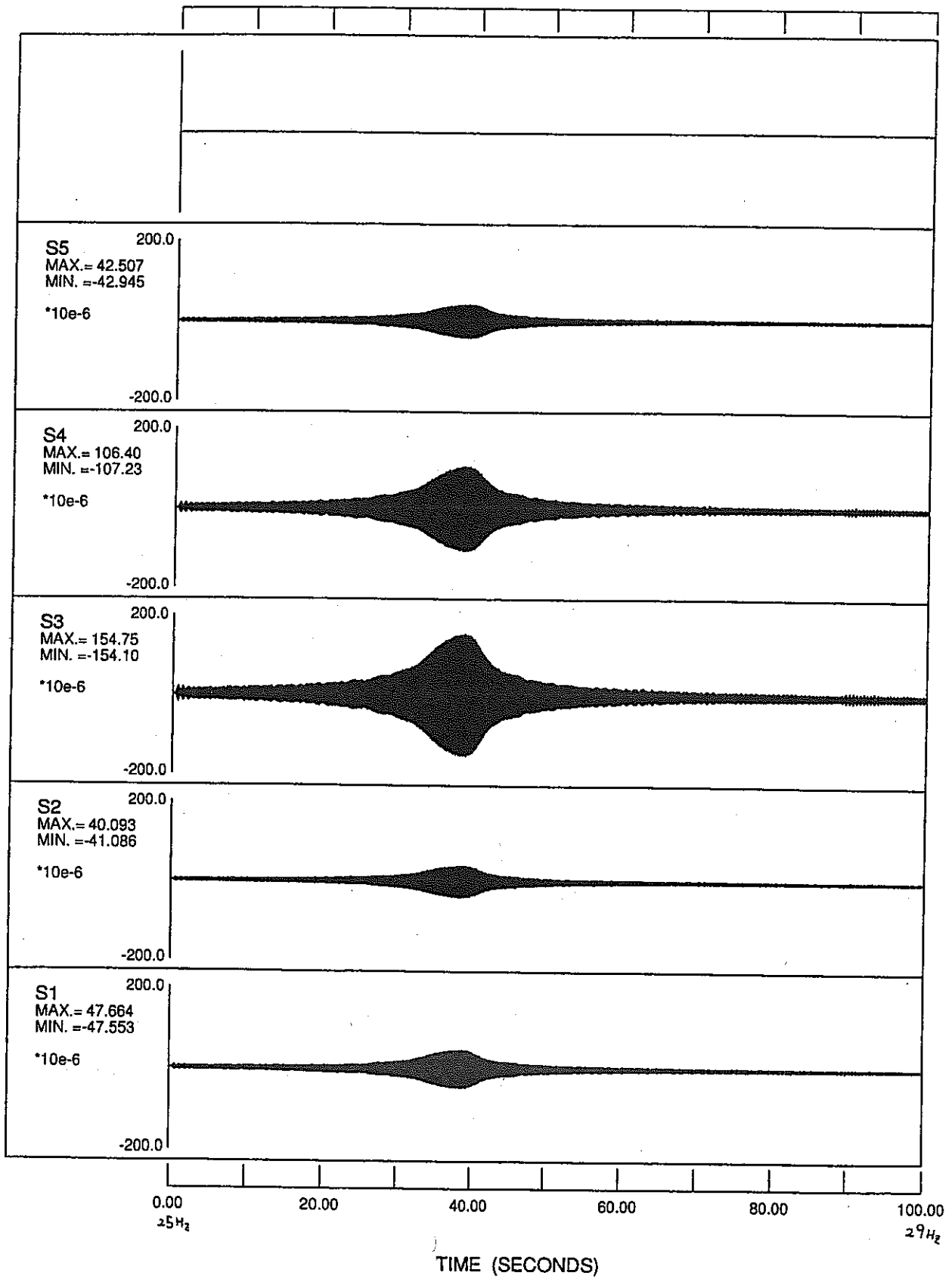
加速度時刻歴波形 (ピン支持、60gal、スイーブ Up)

GP-1



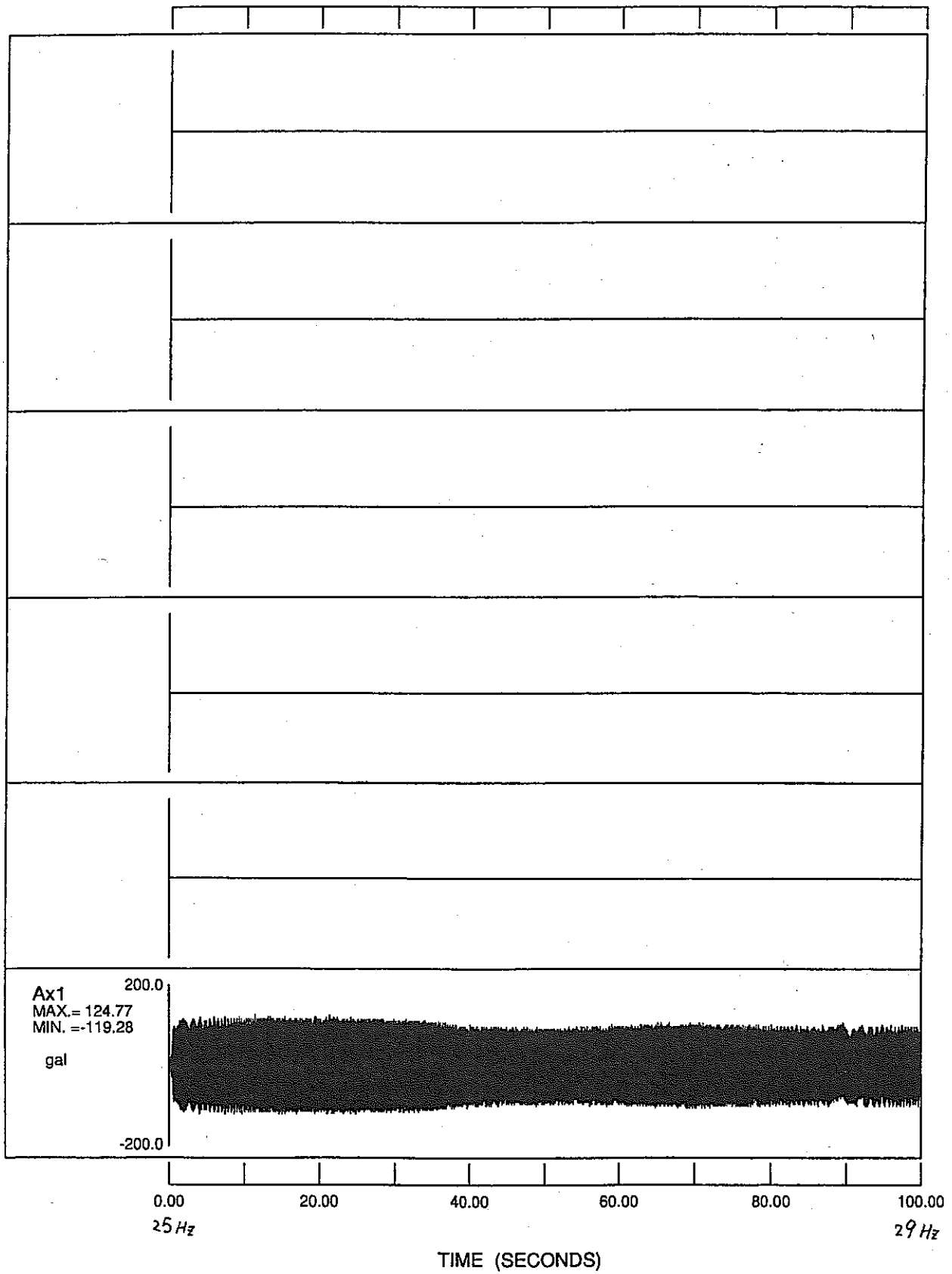
変位時刻歴波形 (トソ支持、60gal、スィーフUp)

GP-1



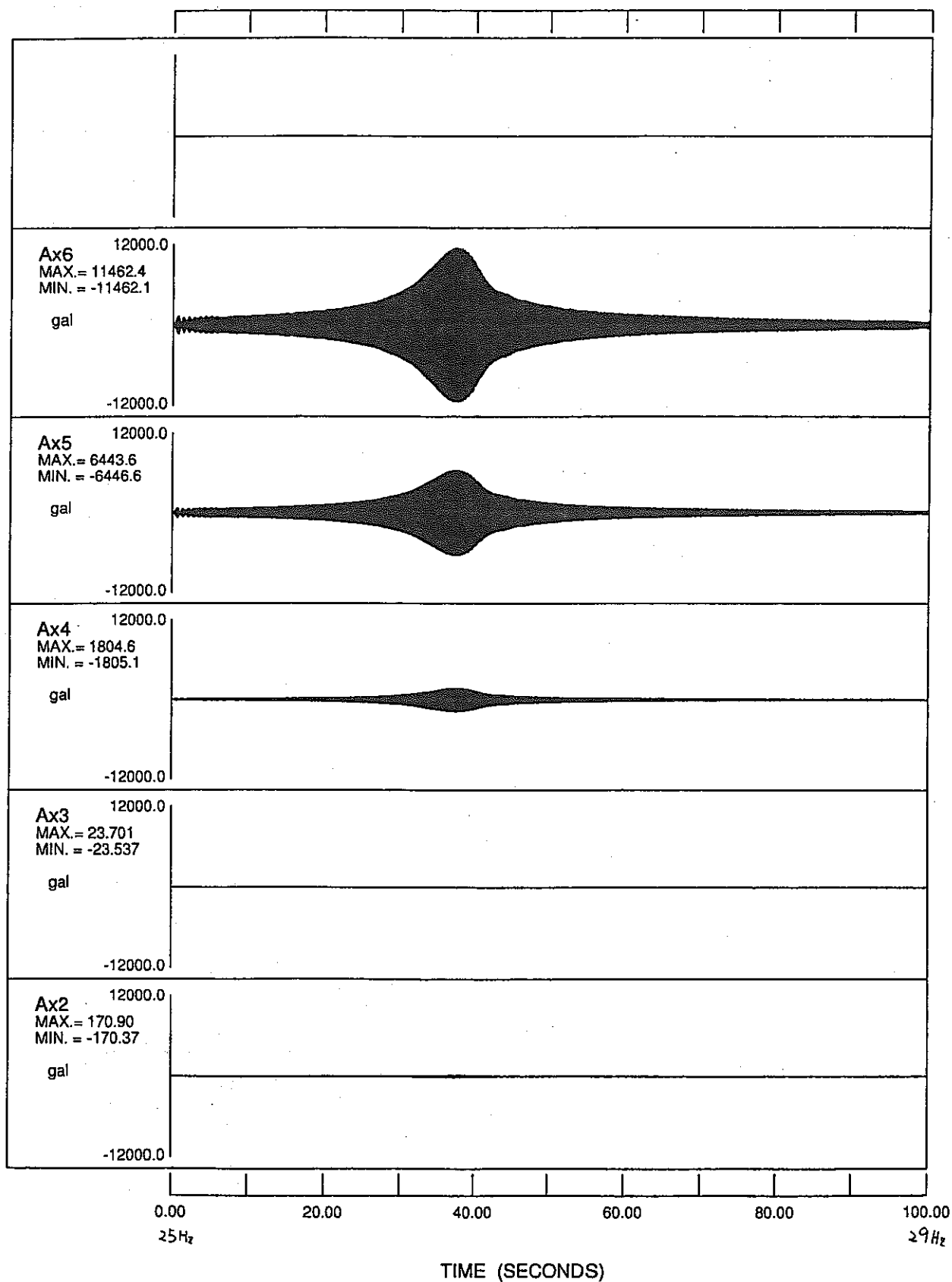
ひずみ時刻歴波形 (ピン支持、60gal、スイーブUp)

GP-2



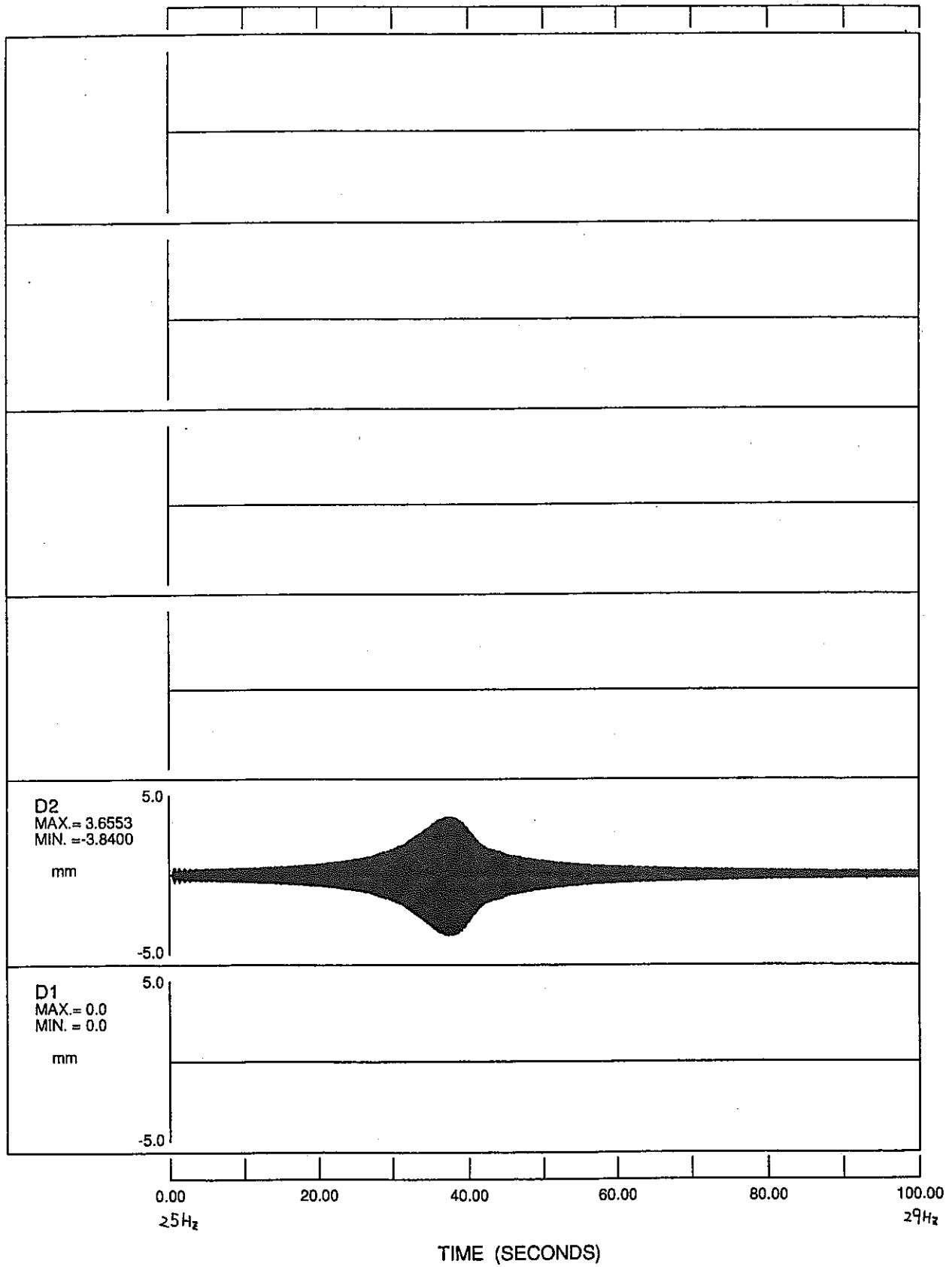
加振加速度時刻歴波形 (E°ン支持、120gal、スイ-フ°Up)

GP-2



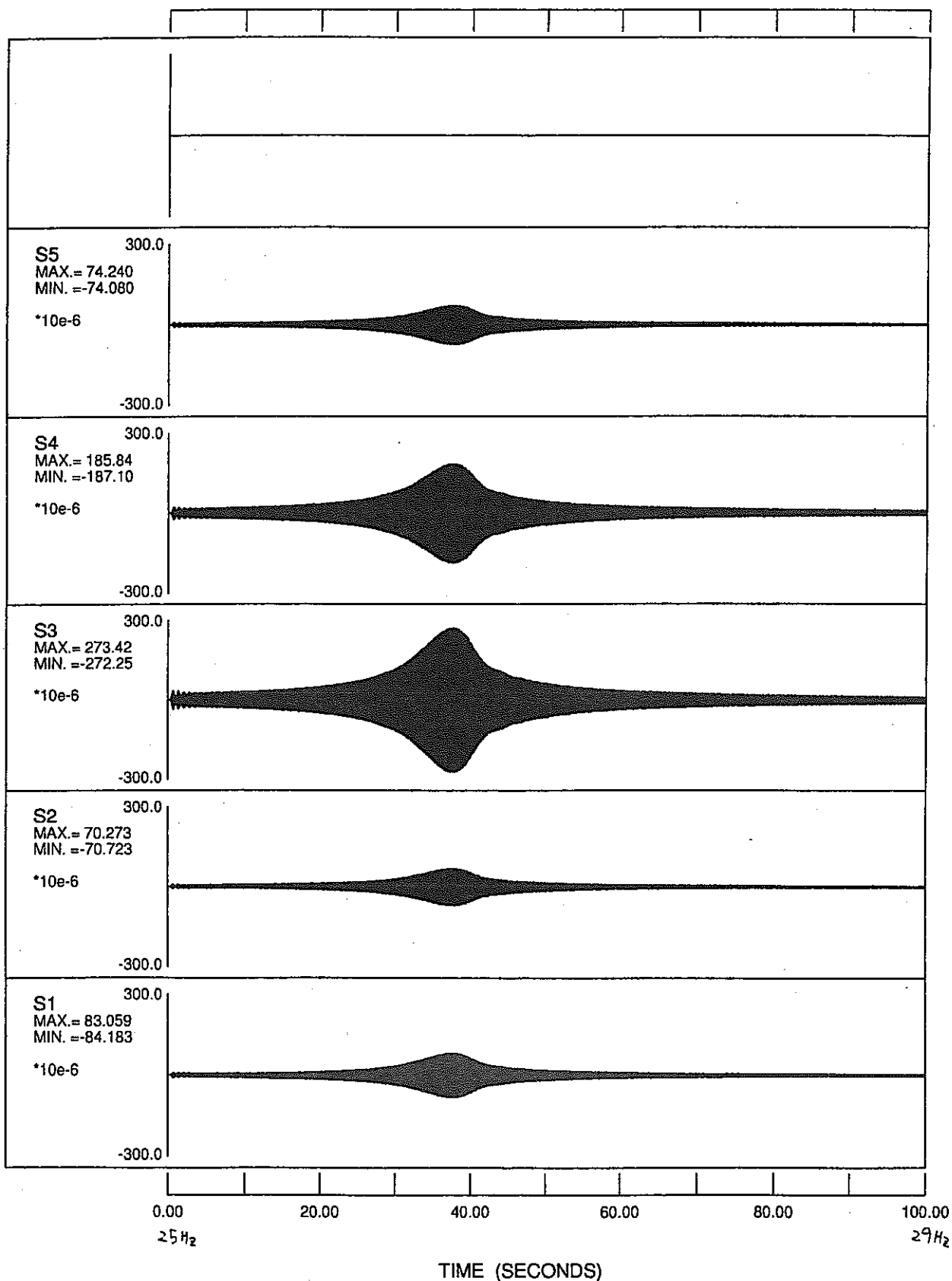
加速度時刻歴波形 (L<sup>1</sup>ノ支持、120gal、スイ-7° Up)

GP-2



変位時刻歴波形 (ピソ支持、120gal、スイプアップ)

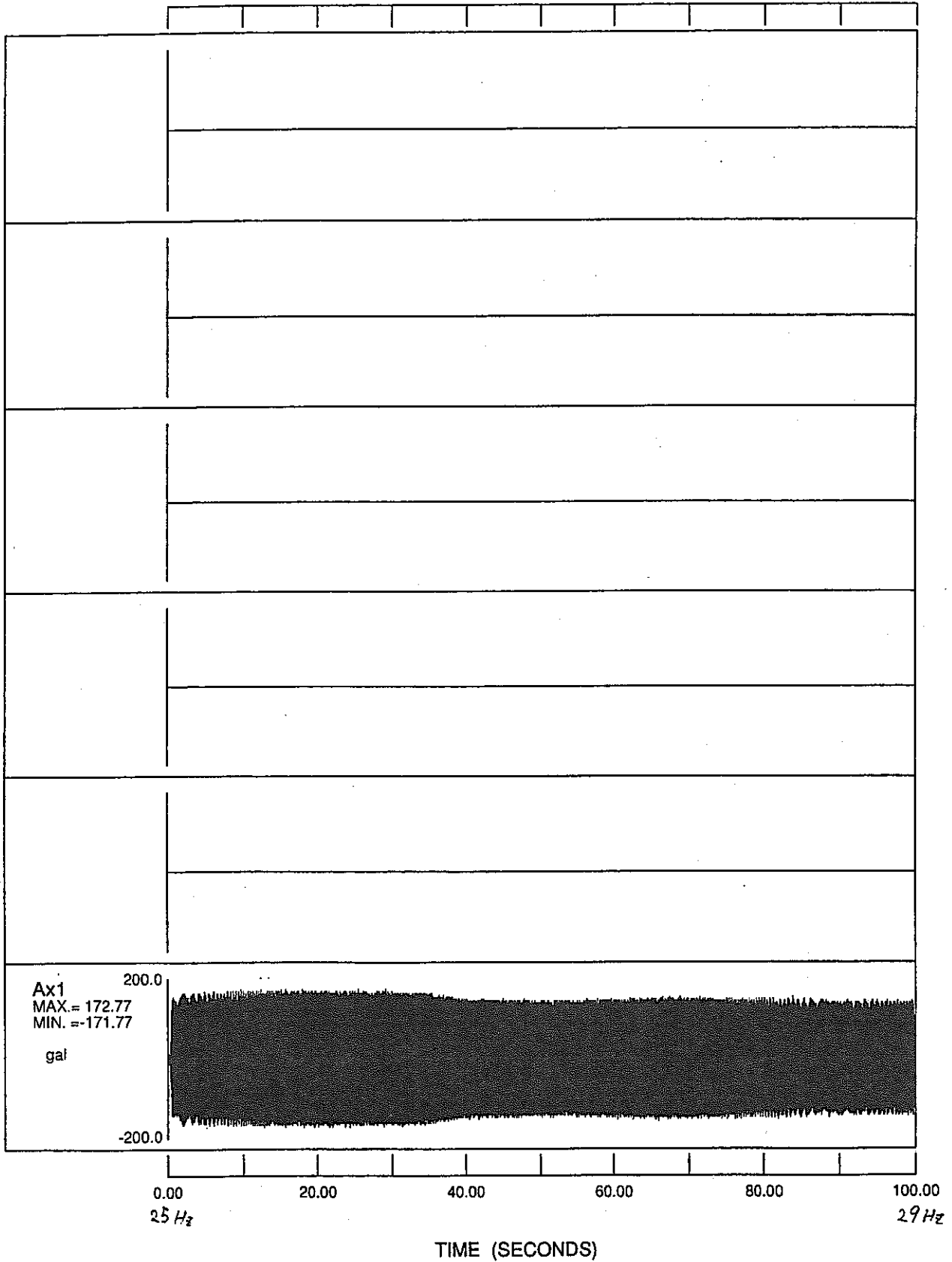
GP-2



ひずみ時刻歴波形 (ピン支持、120gal、スイ-7° Up)

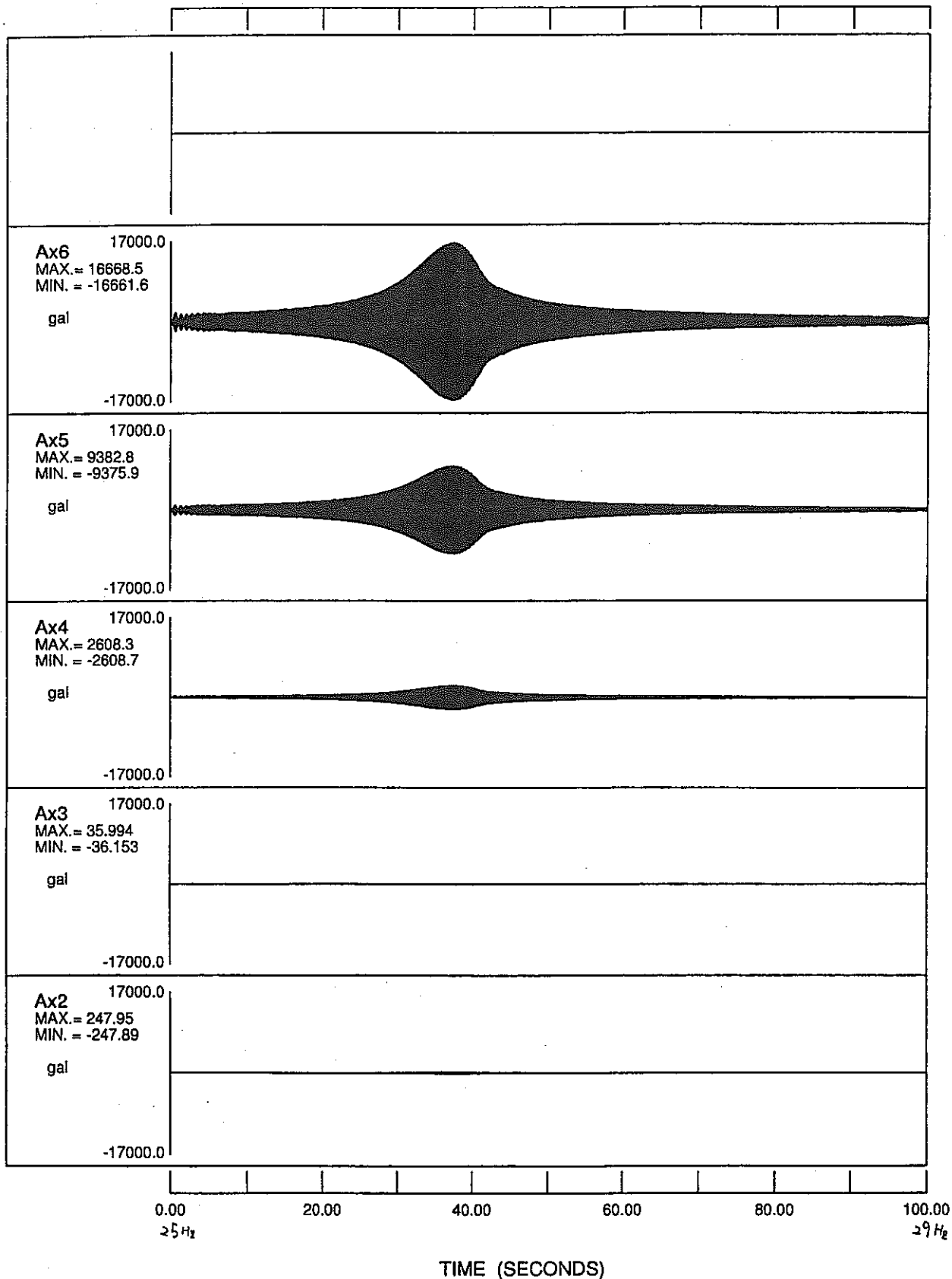


GP-3



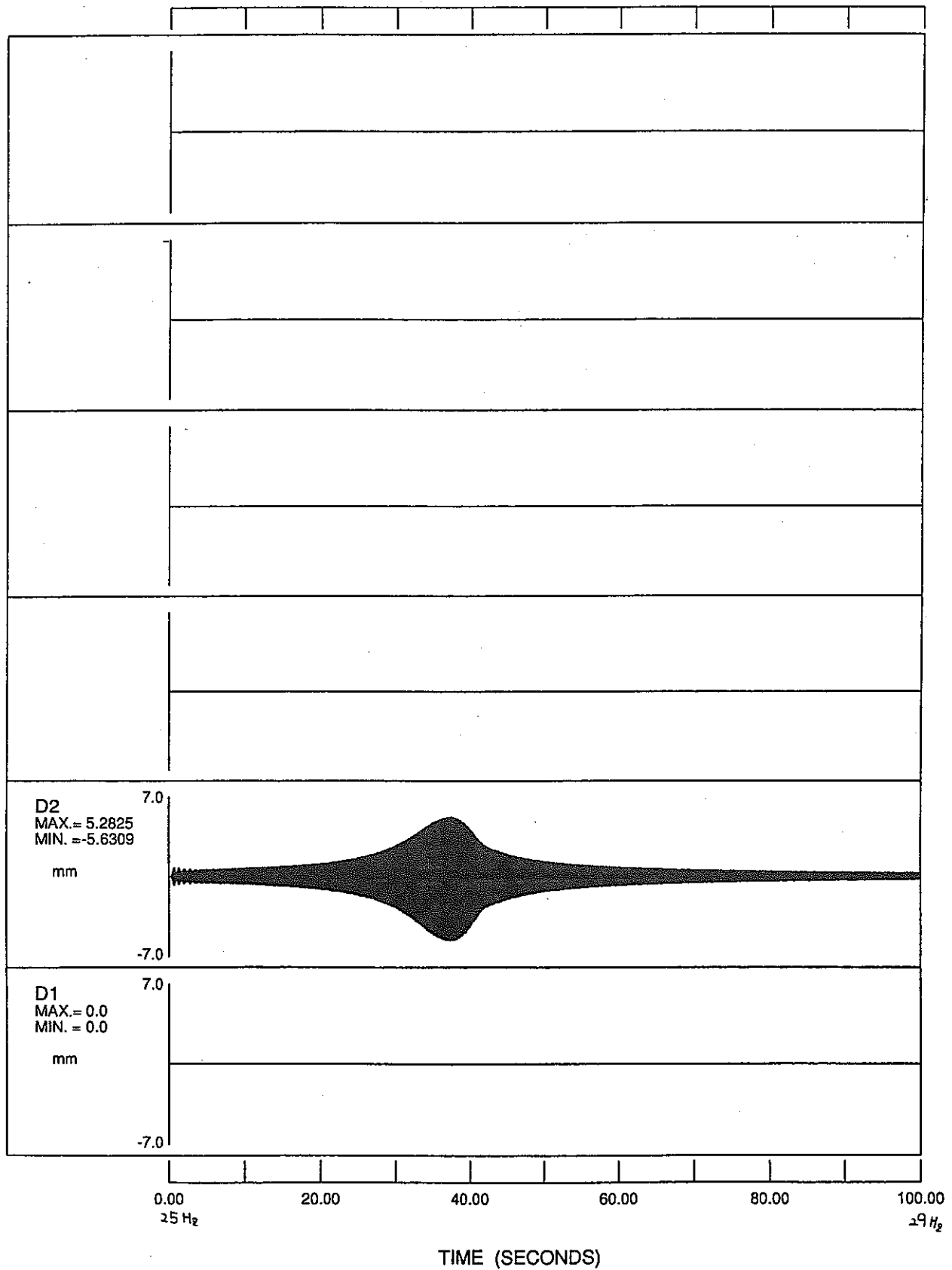
加振加速度時刻歴波形 (L<sup>o</sup>ン支持、180gal、スイ-7<sup>o</sup> Up)

GP-3



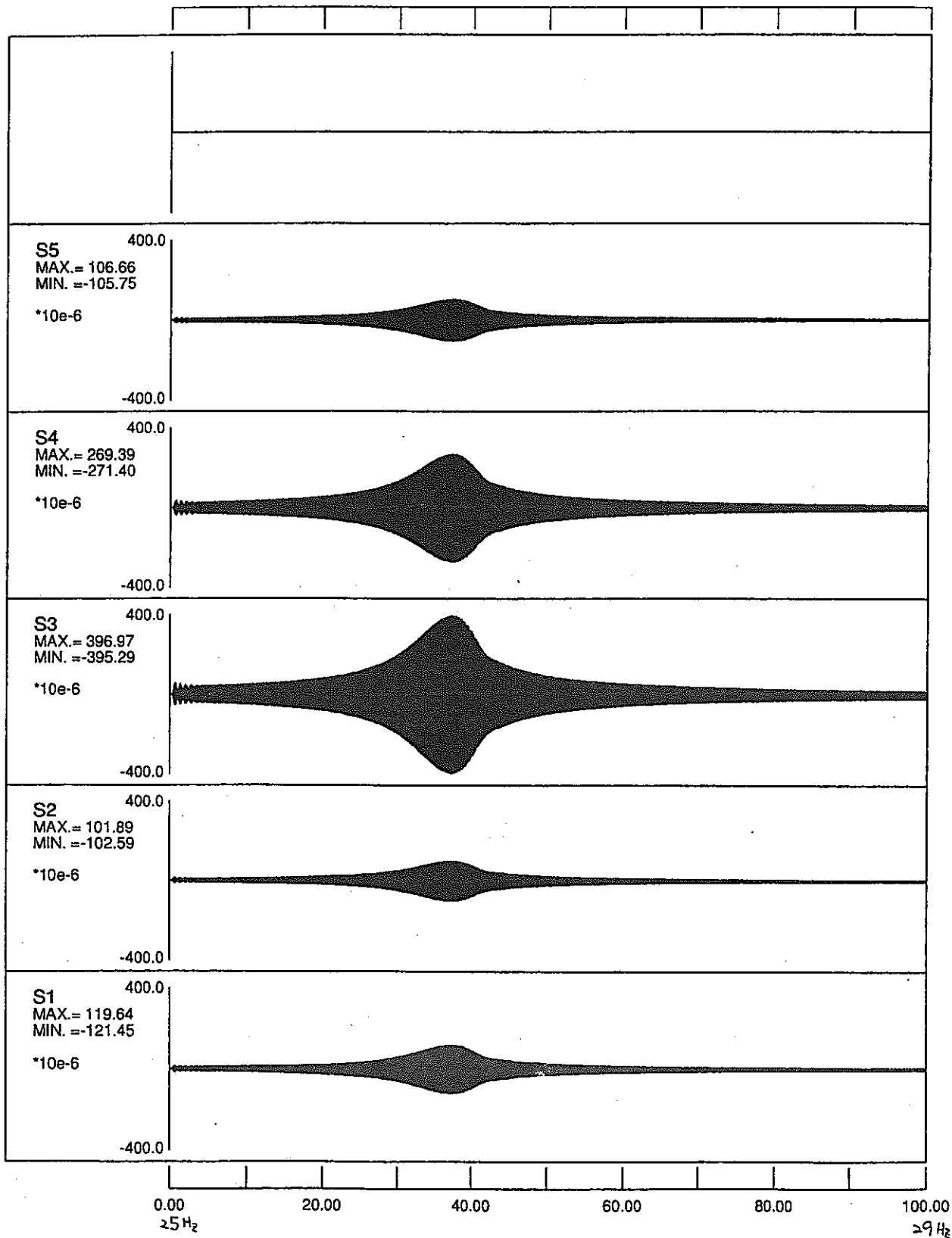
加速度時刻歴波形 (ピソ支持、180gal、スイ7° Up)

GP-3



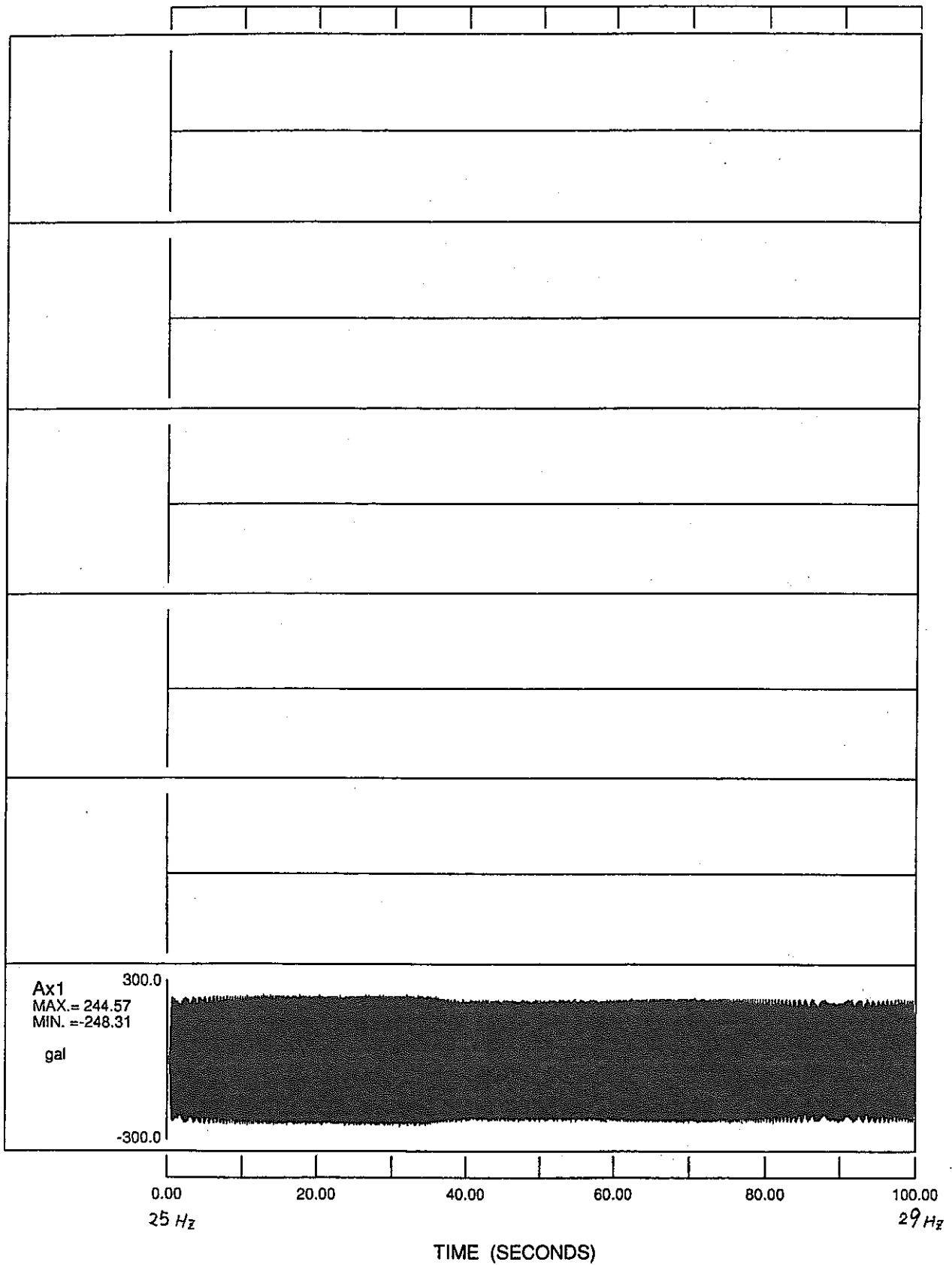
変位時刻歴波形 (ピソ支持、180gal、スイ-7°Up)

GP-3



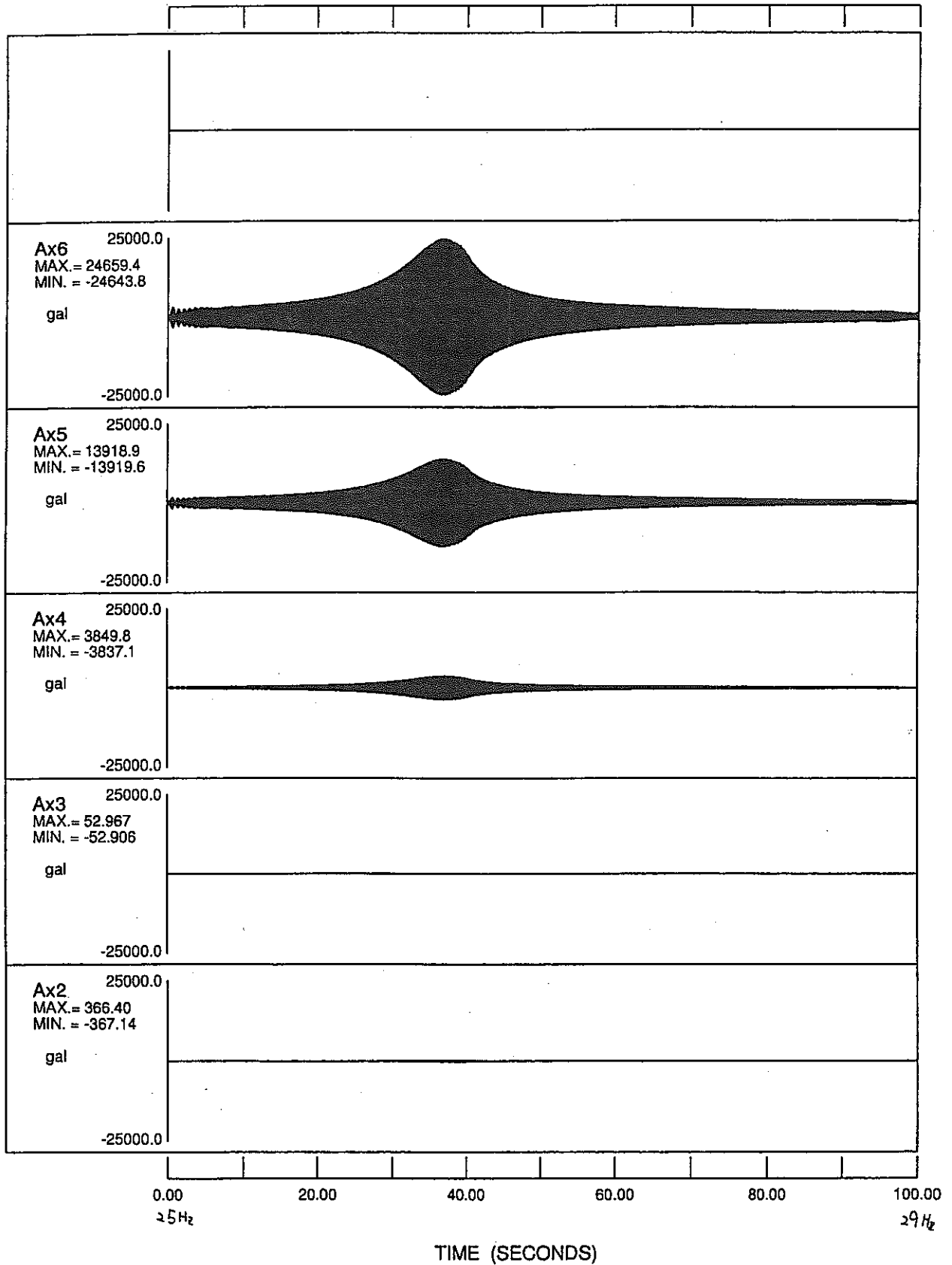
ひずみ時刻歴波形 (ピン支持、180gal、 $\Delta 7^\circ$  Up)

GP-4



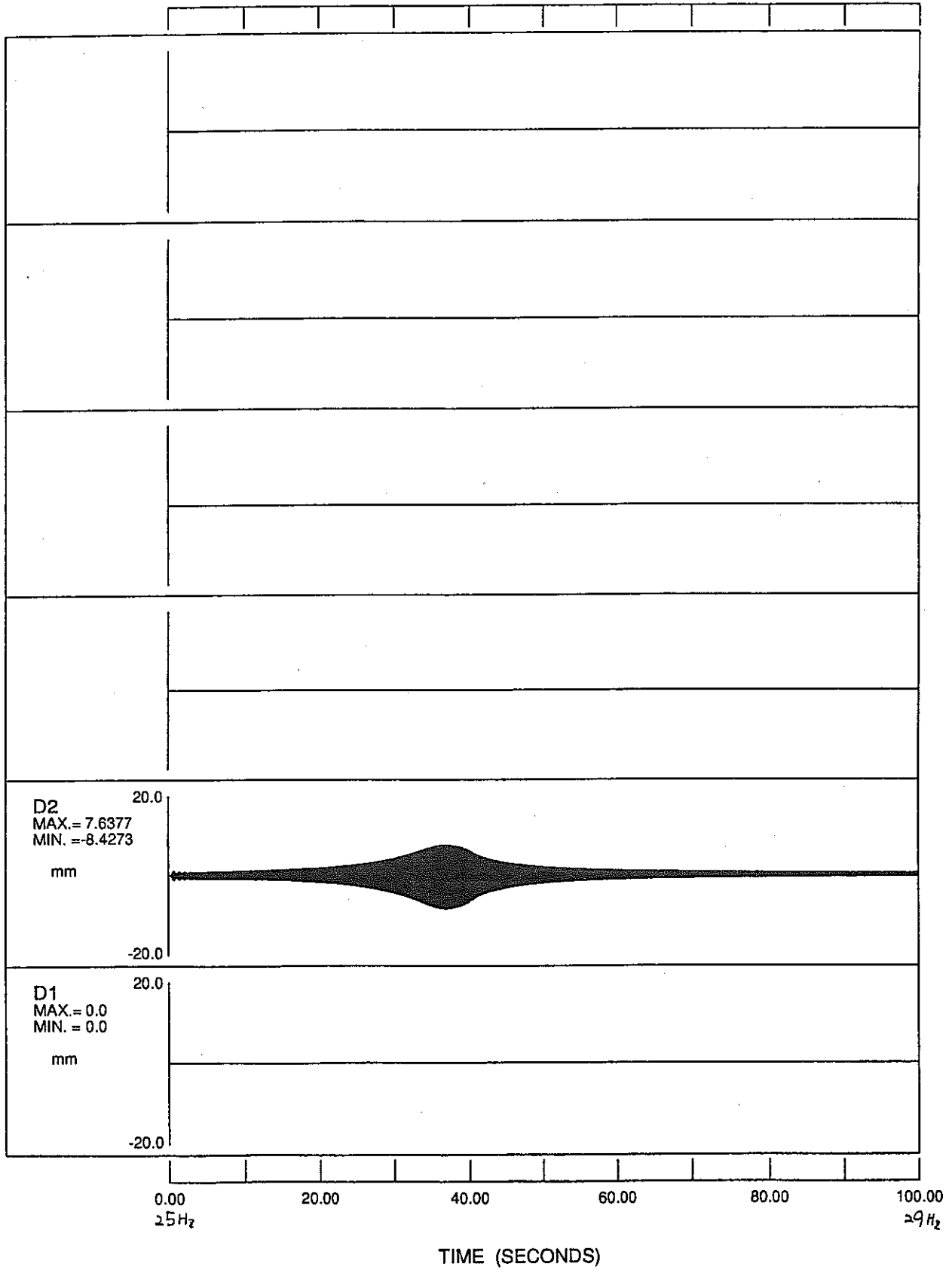
加振加速度時刻歴波形 (ピン支持、240gal、スイ-7° Up)

GP-4



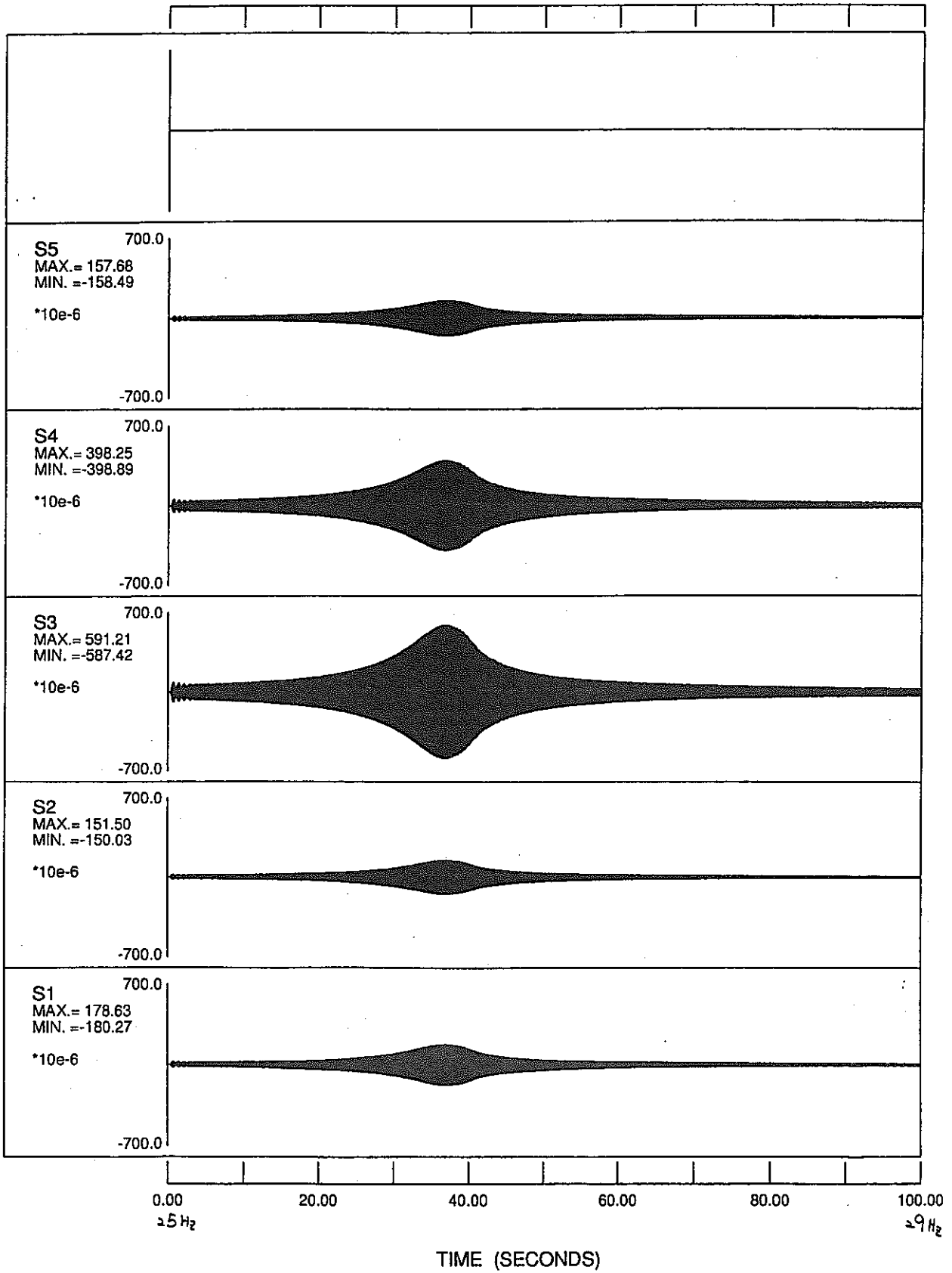
加速度時刻歴波形 (ピン支持、240gal、スイ-7° Up)

GP-4



変位時刻歴波形 (E°ン支持、240gal、スイ-7°Up)

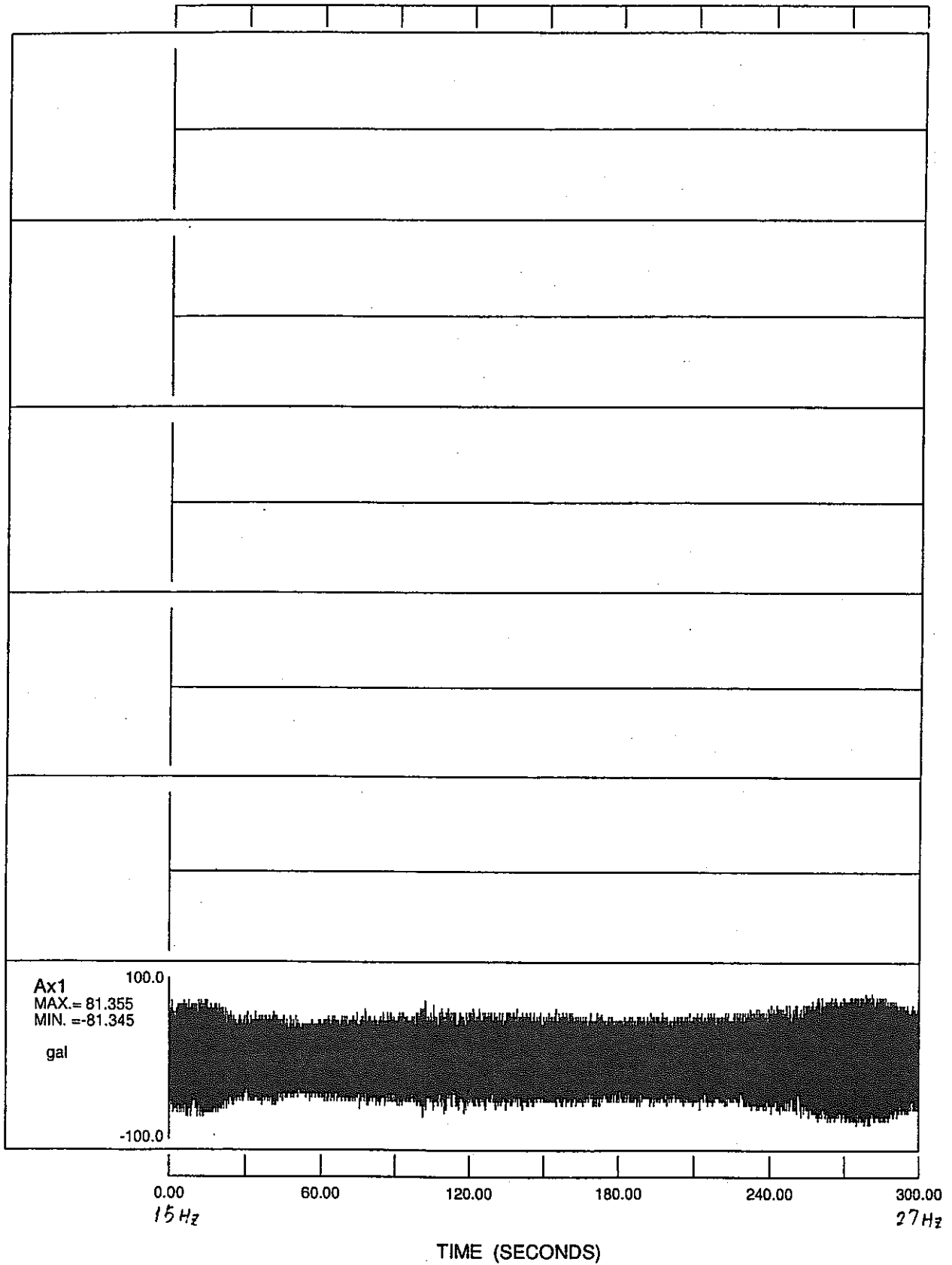
GP-4



ひずみ時刻歴波形 (ヒン支持、240gal、 $\Delta 7^\circ$  Up)

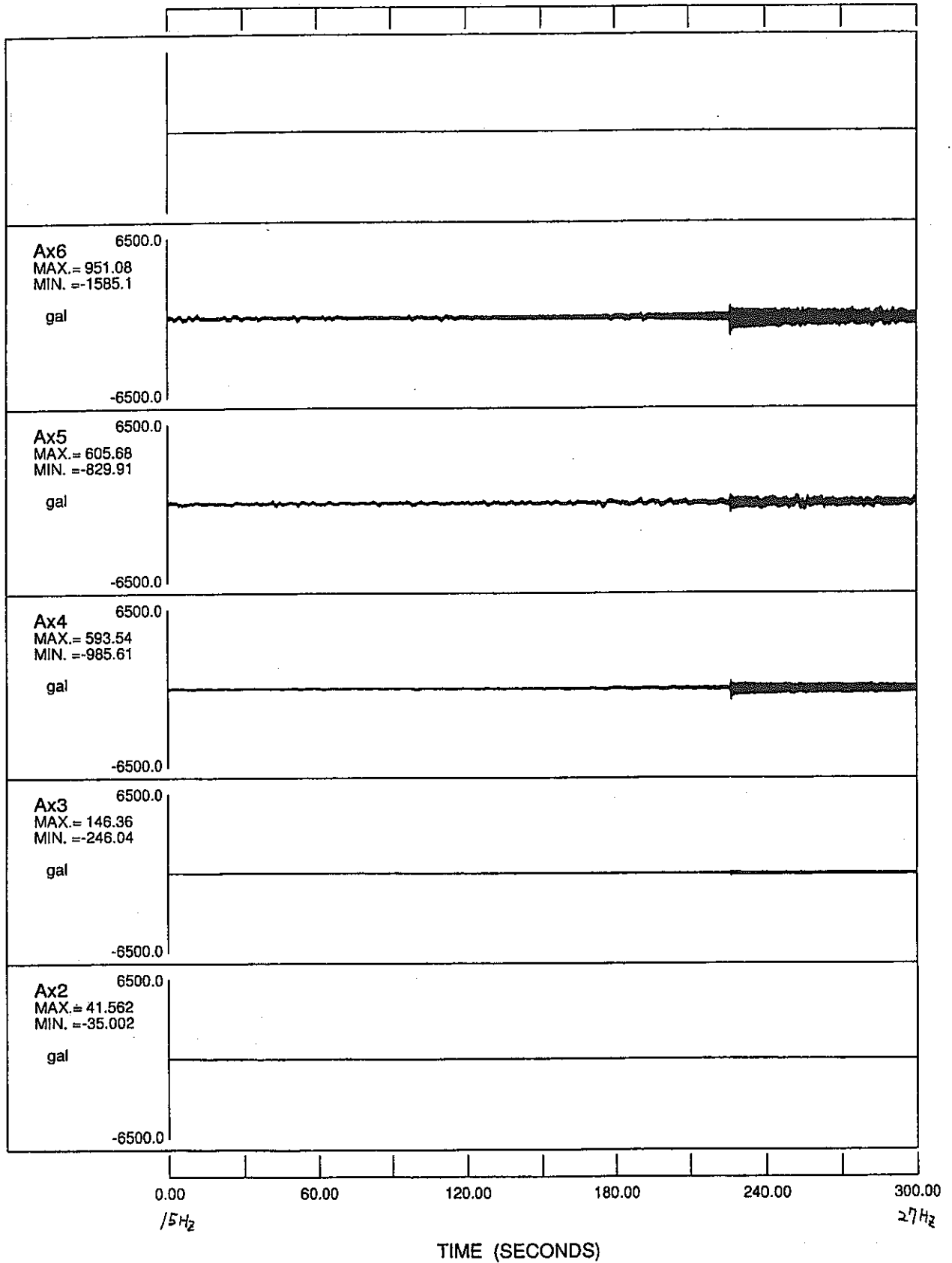


G0-1



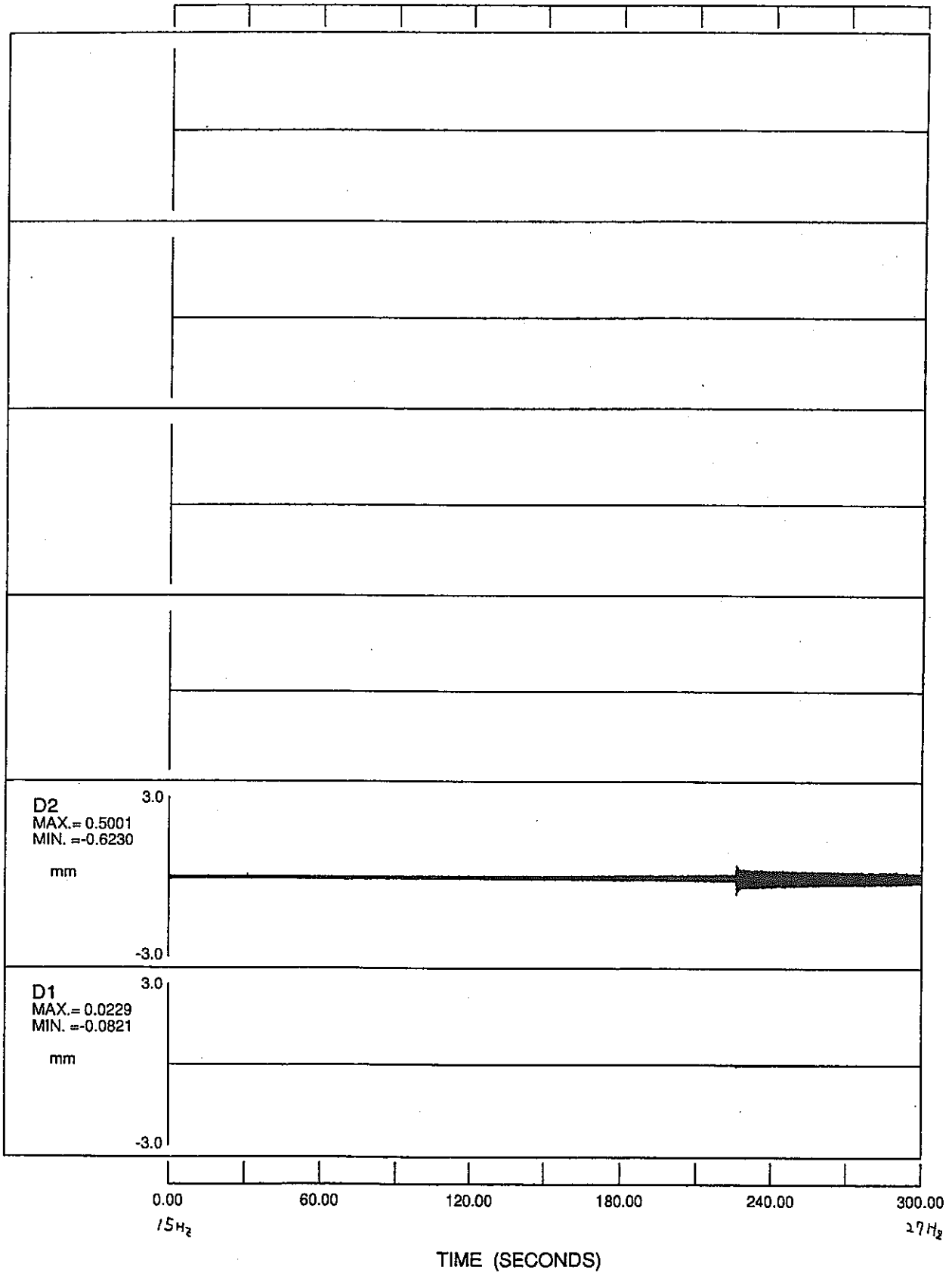
加振加速度時刻歴波形 (キヤッチ° 0mm、60gal、スイフ° Up)

G0-1



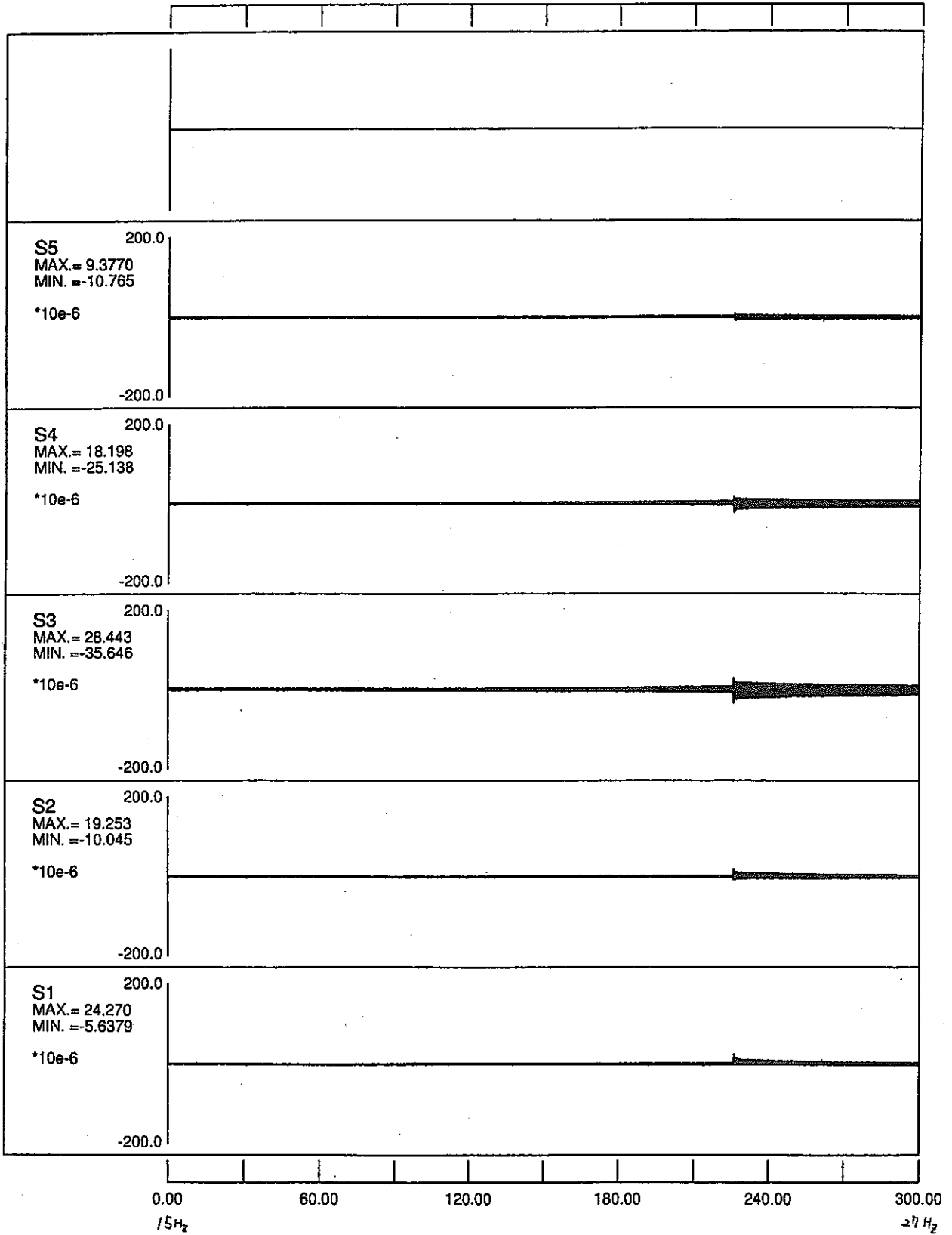
加速度時刻歴波形 (キック7° 0mm、60gal、スイブ° Up)

G0-1



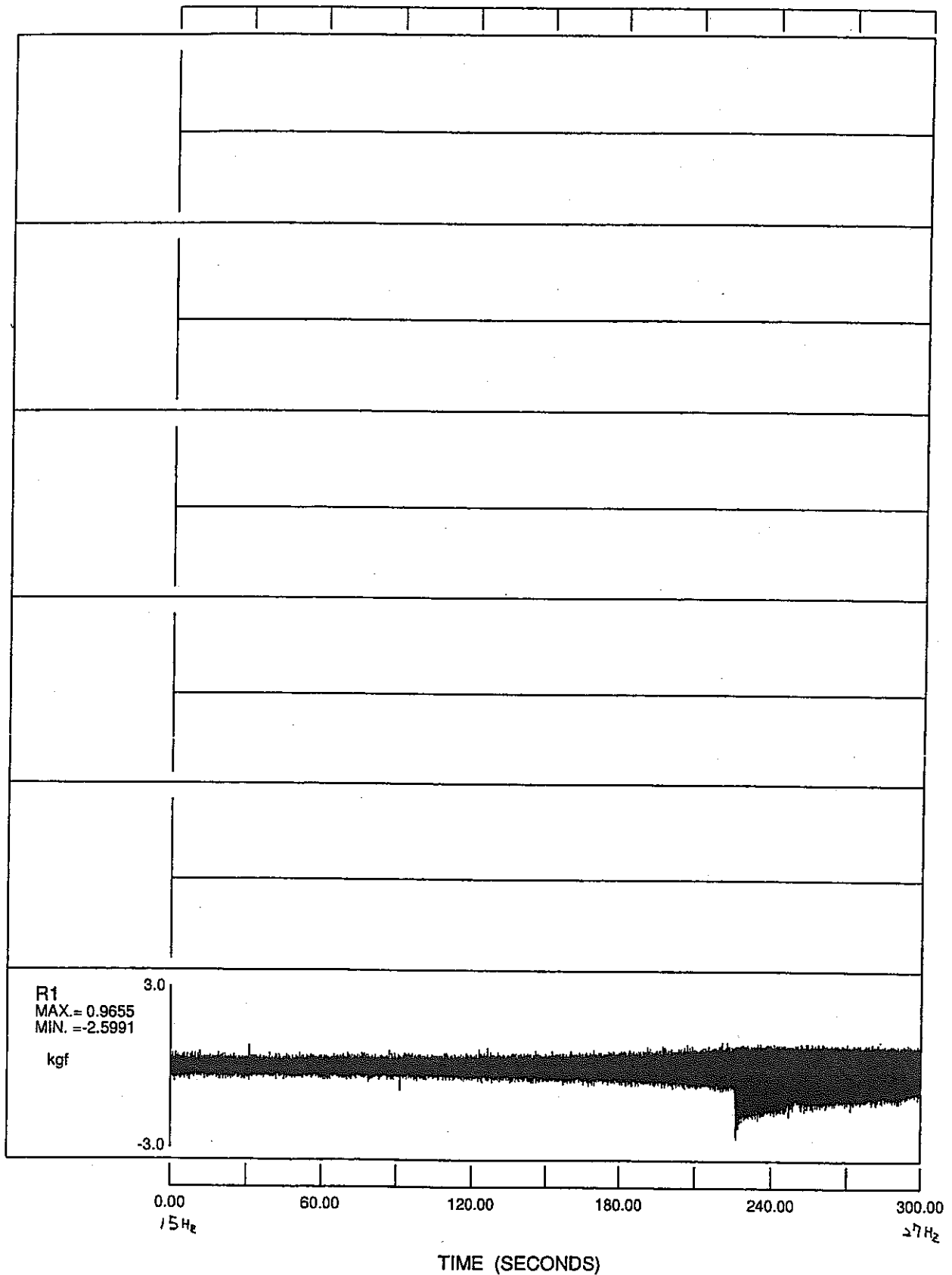
変位時刻歴波形 (キヤップ 0mm、60gal、スイフ Up)

G0-1



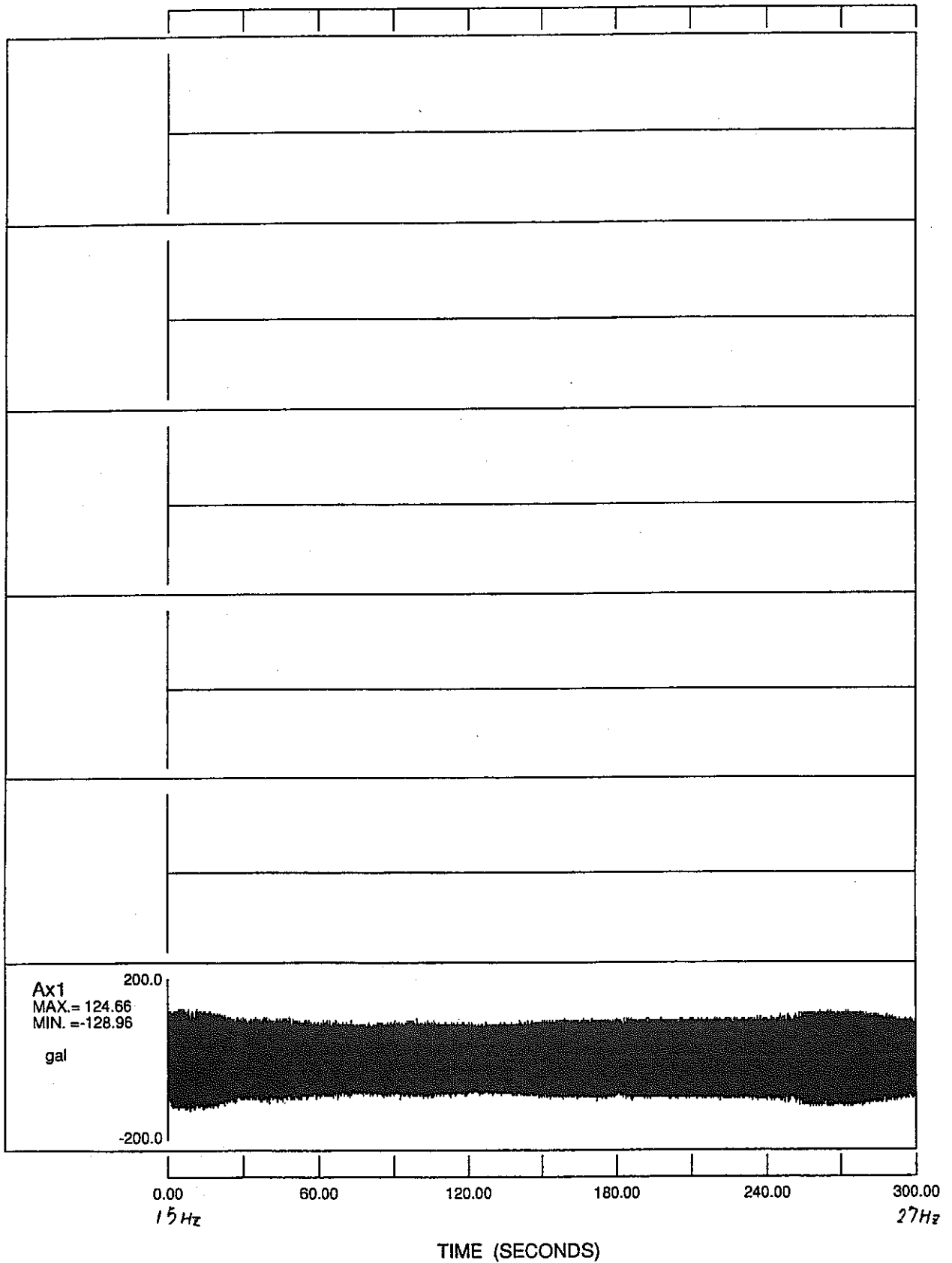
ひずみ時刻歴波形 (キ+77° 0mm、60gal、スイ-7° Up)

G0-1



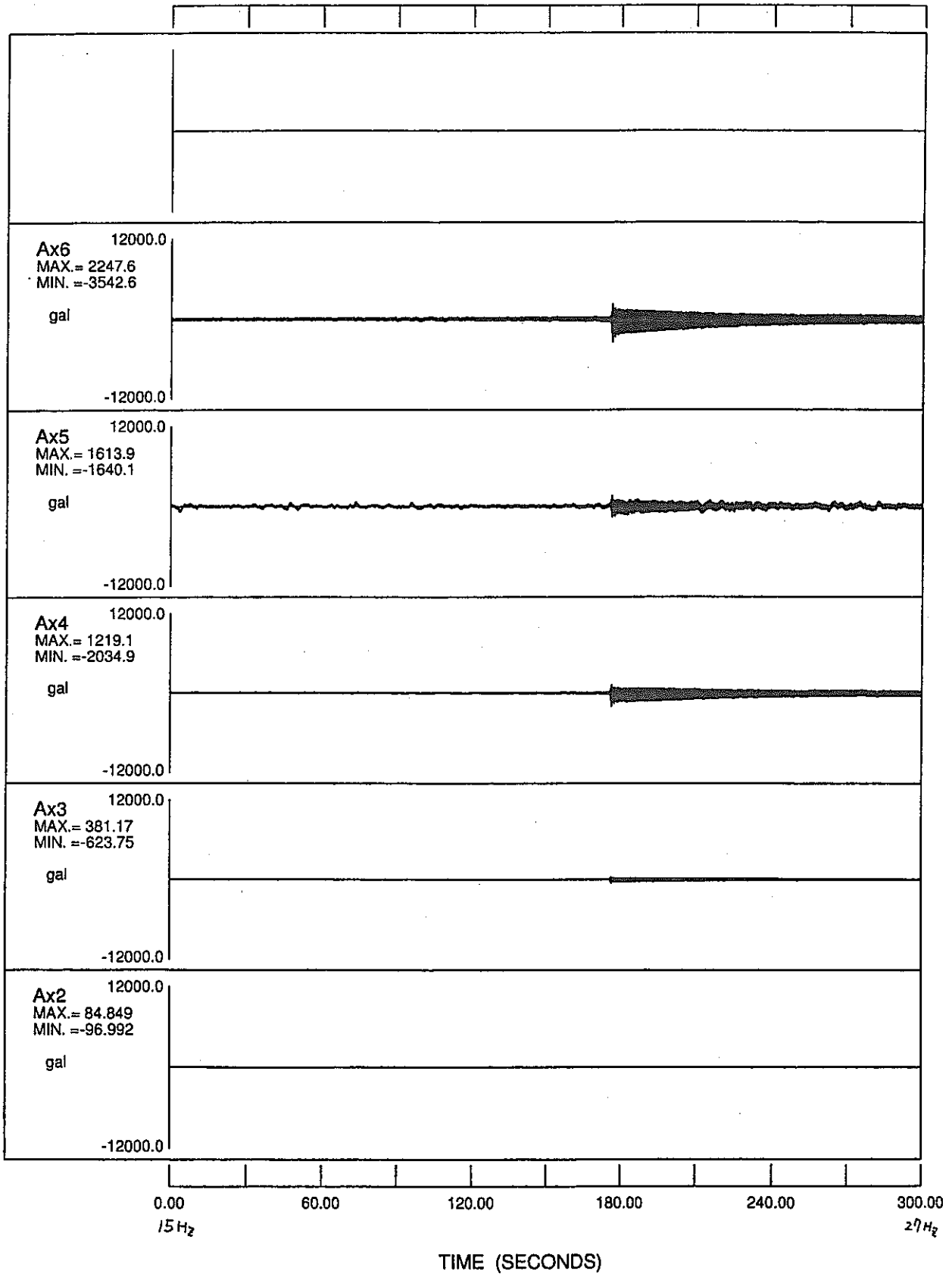
反力時刻歴波形 (キ+77° 0mm、60gal、スイ-7° Up)

G0-2



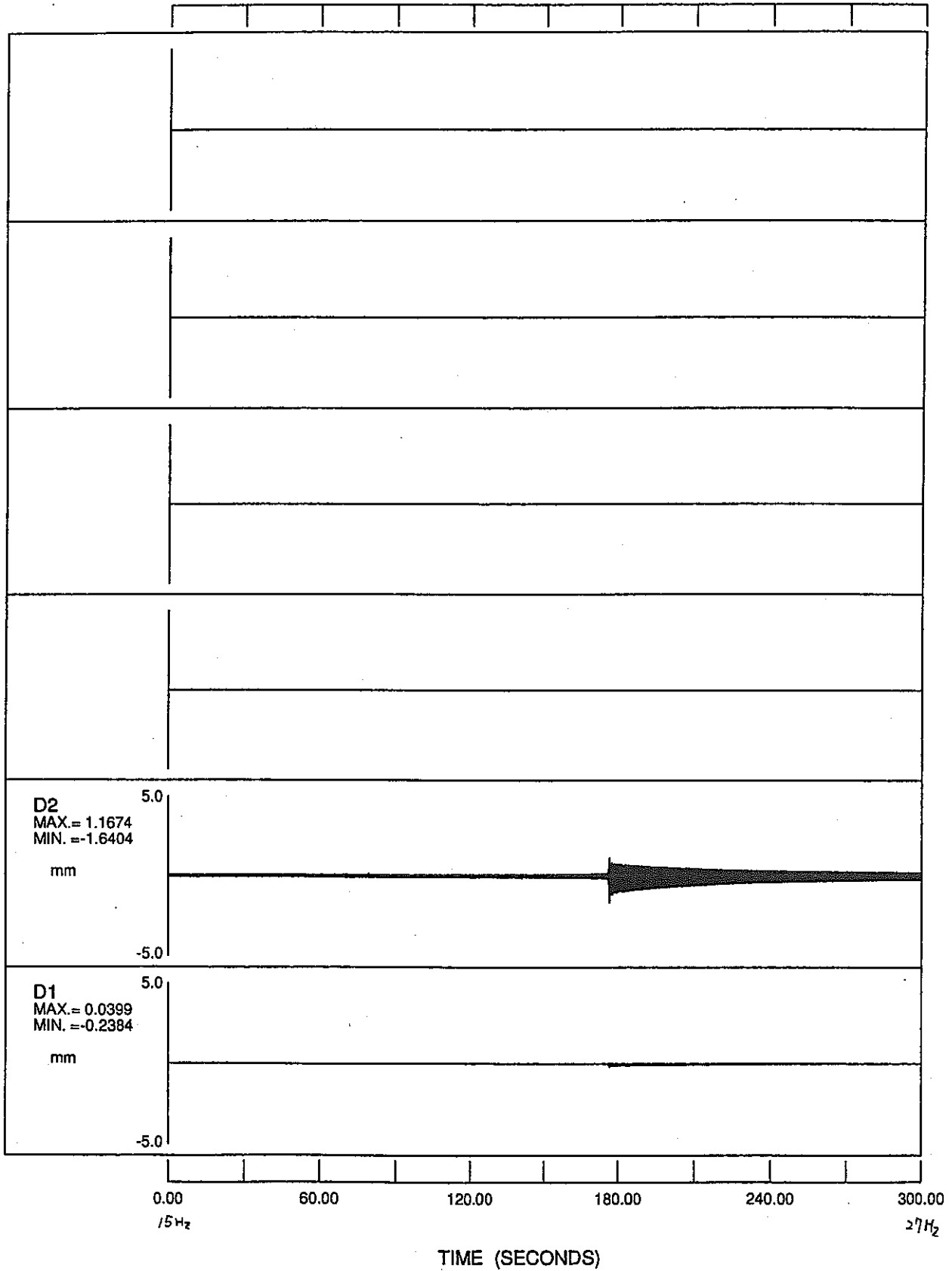
加振加速度時刻歴波形 (キック7° 0mm、120gal、スイフ° Up)

G0-2



加速度時刻歴波形 (キック<sup>0</sup>mm、120gal、スイフ<sup>0</sup>Up)

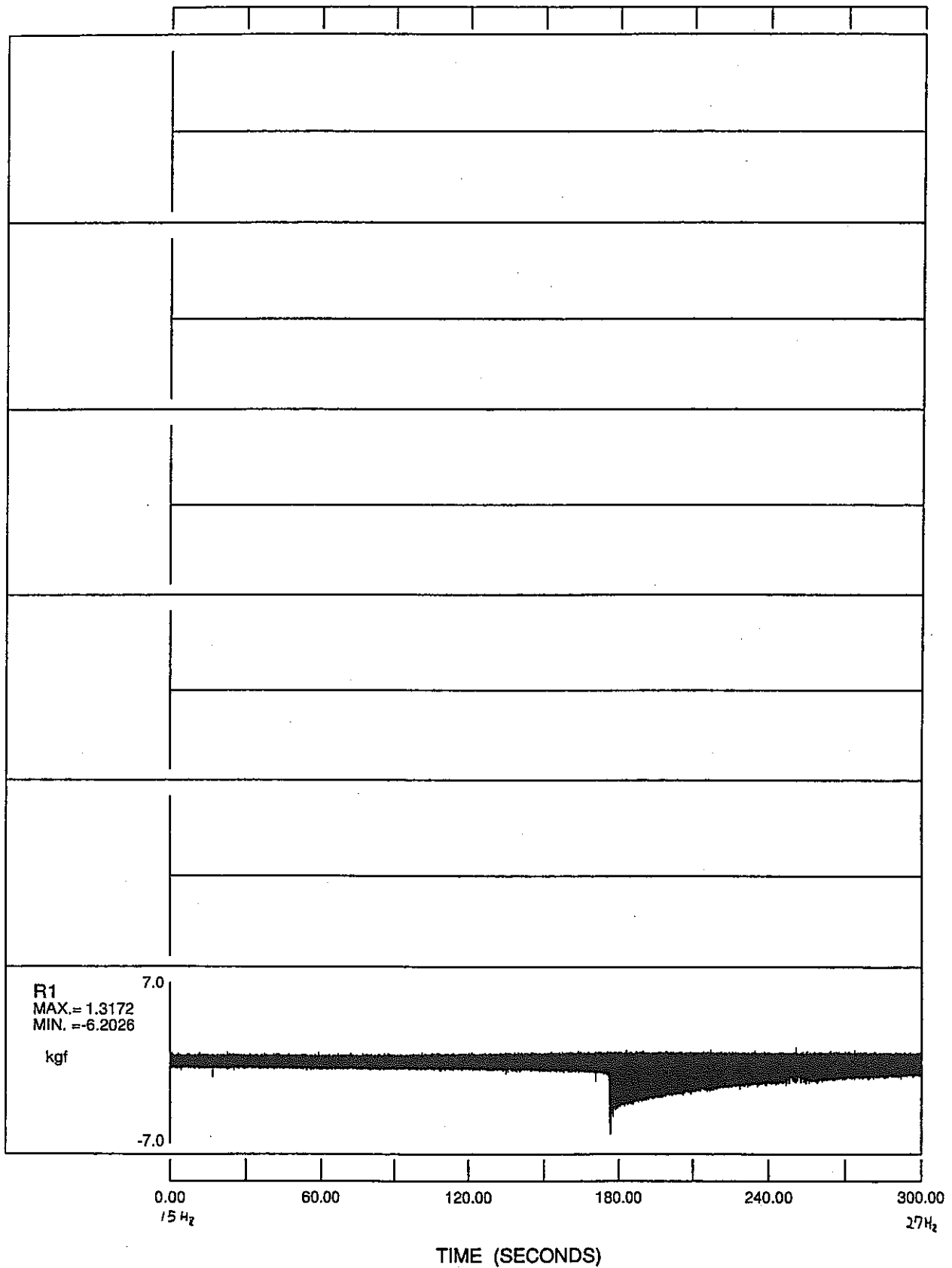
G0-2



変位時刻歴波形 (キップ7° 0mm、120gal、スイフ° Up)

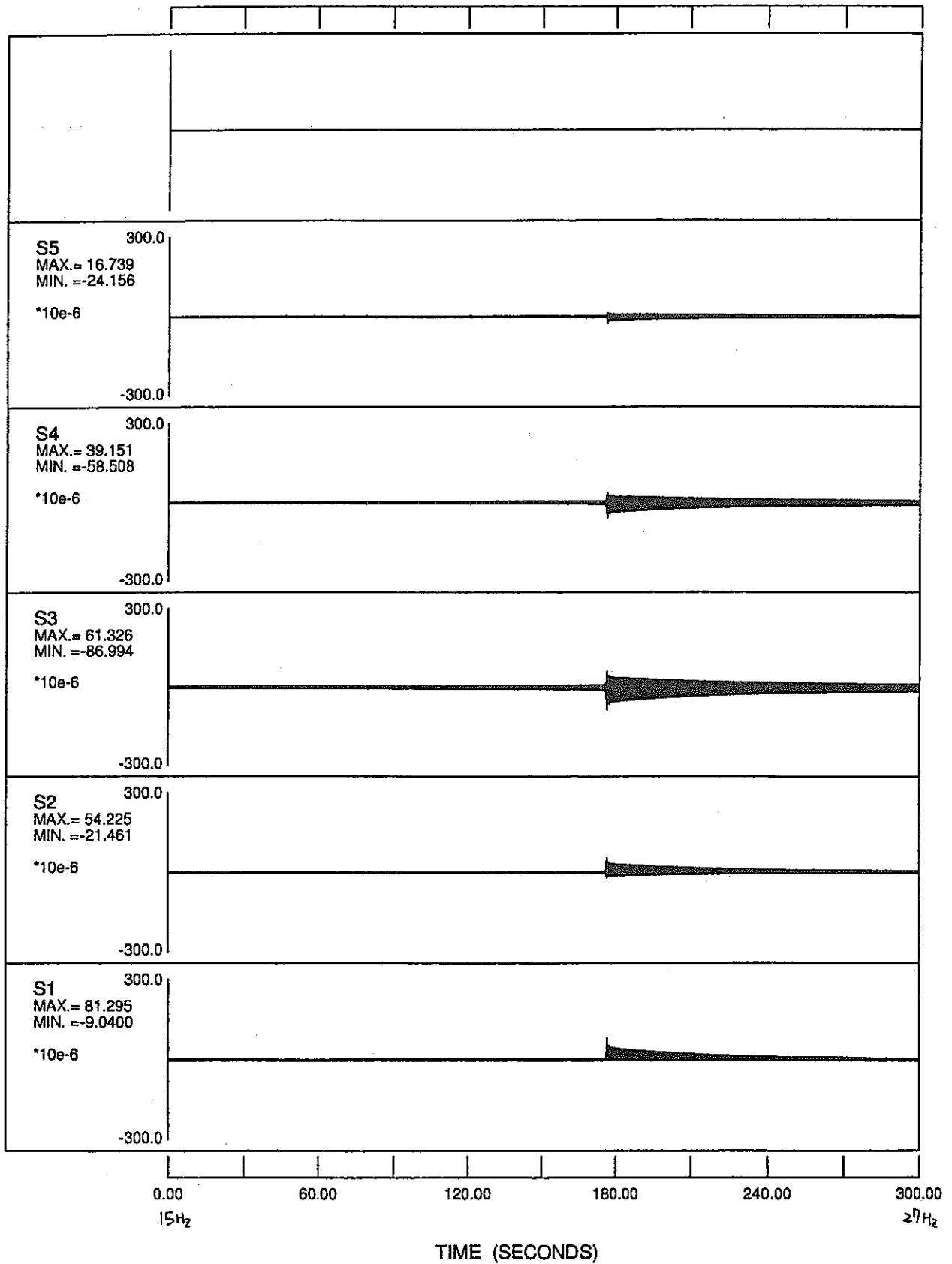


G0-2



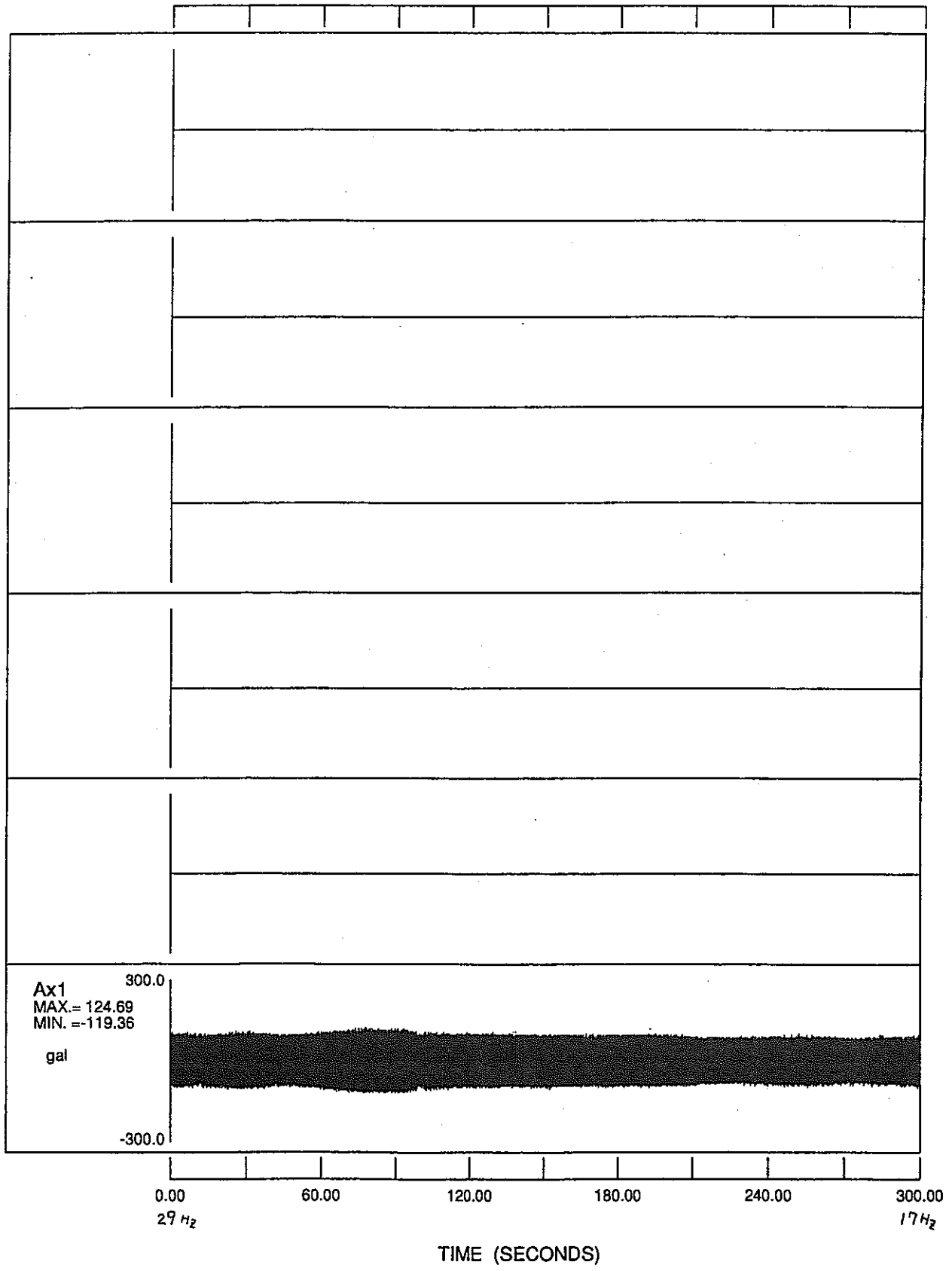
反力時刻歴波形 (キ ャツ7° 0mm、120gal、スイ-7° Up)

G0-2



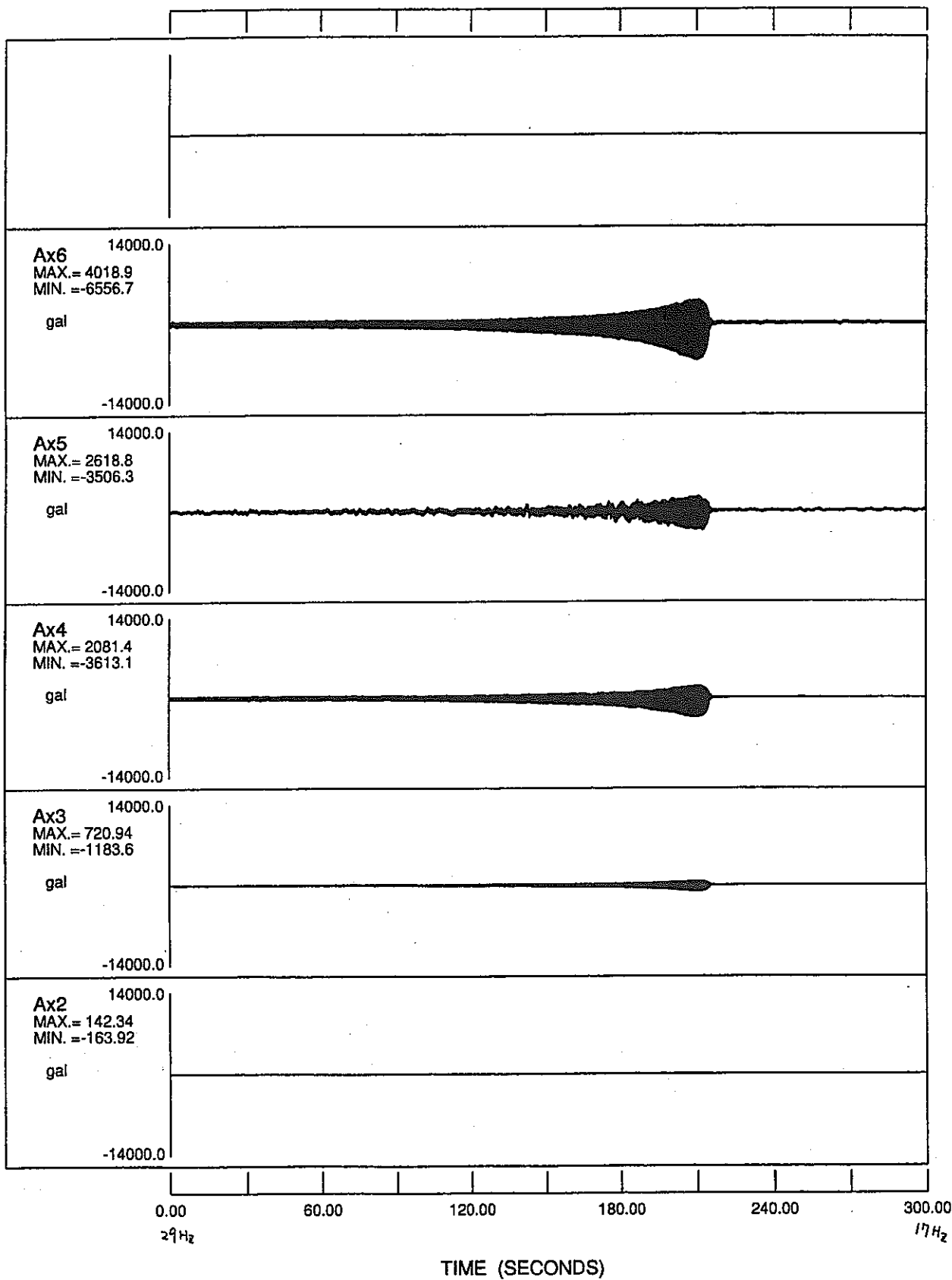
ひずみ時刻歴波形 (キャップ 0mm、120gal、スイフ Up)

G0-2D



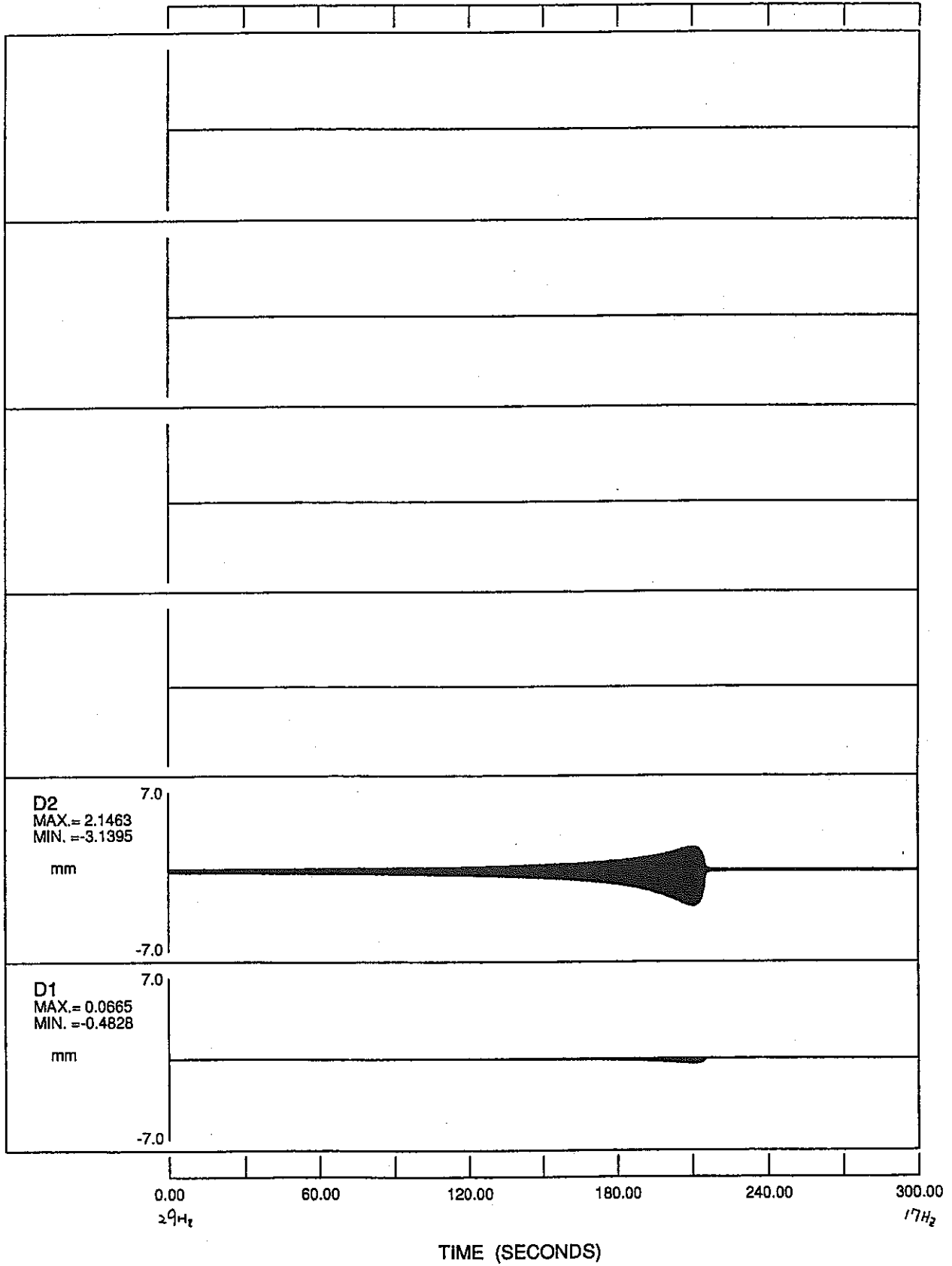
加振加速度時刻歴波形 (キック7° 0mm、120gal、スイ7° Down)

G0-2D



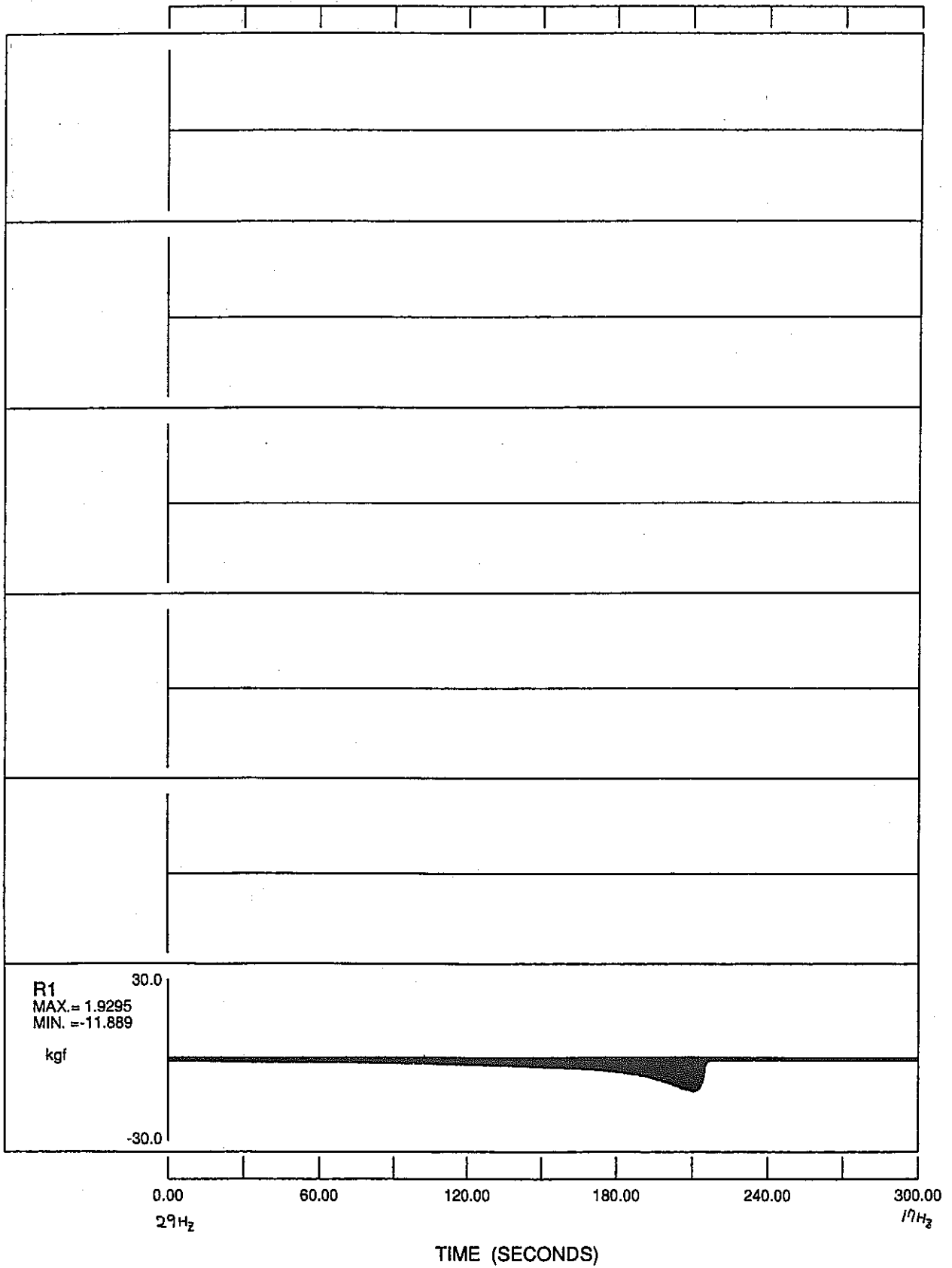
加速度時刻歴波形 (キップ 0mm、120gal、スイフ° Down)

G0-2D



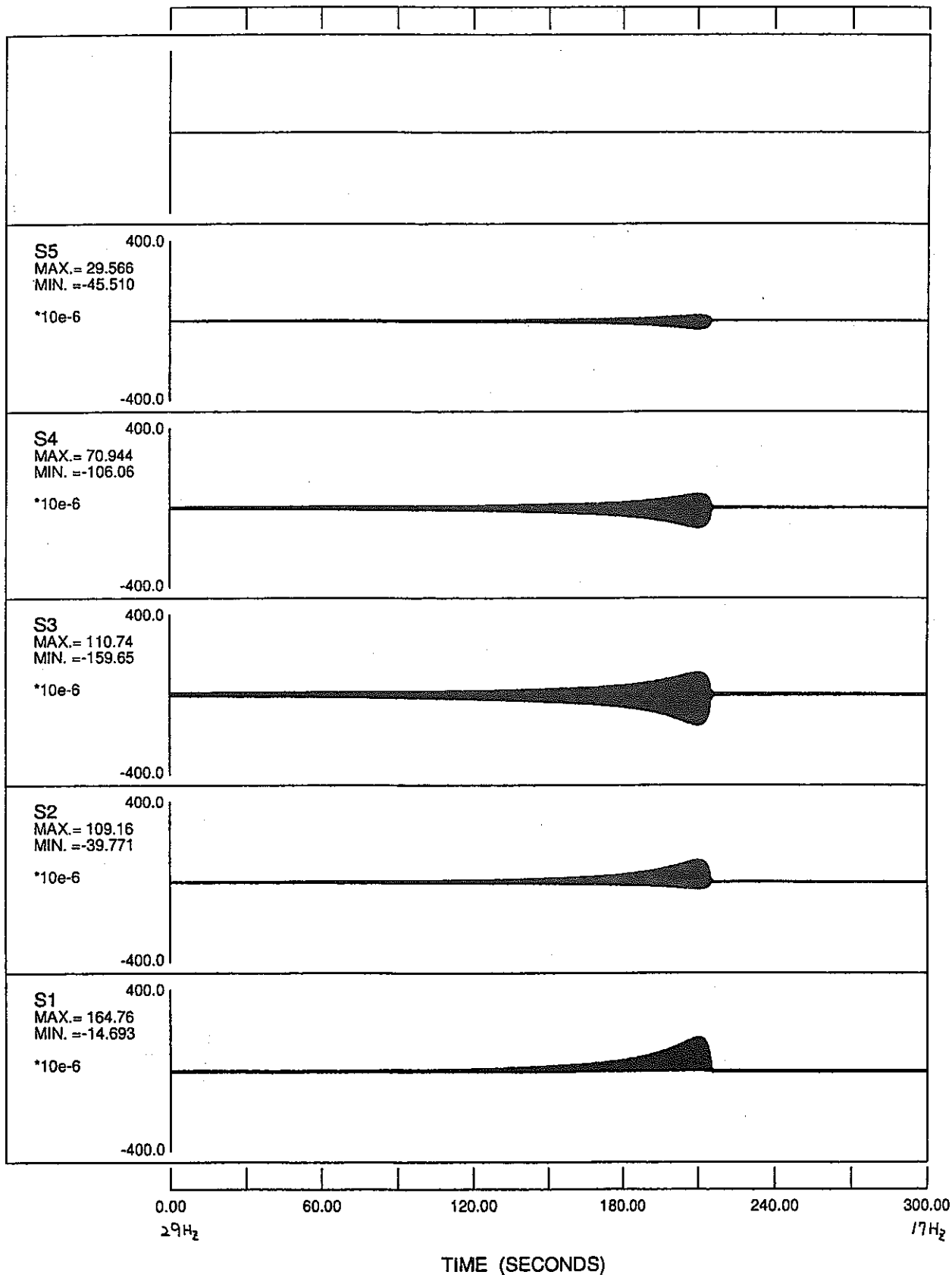
変位時刻歴波形 (キ+7° 0mm、120gal、スイ-7° Down)

G0-2D



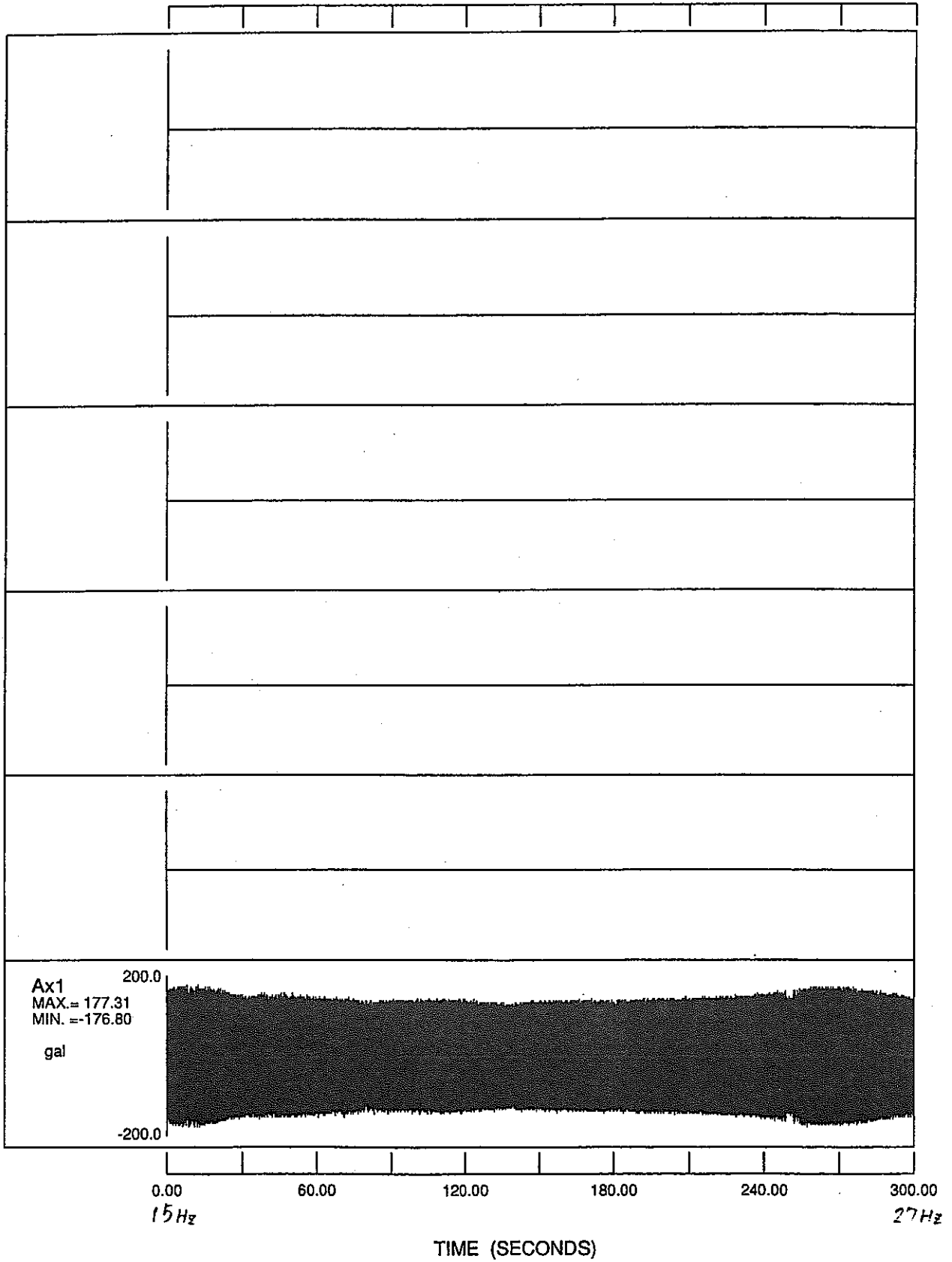
反力時刻歴波形 (キップ 0mm、120gal、スイプ Down)

G0-2D



ひずみ時刻歴波形 (キップ 0mm、120gal、スイフ Down)

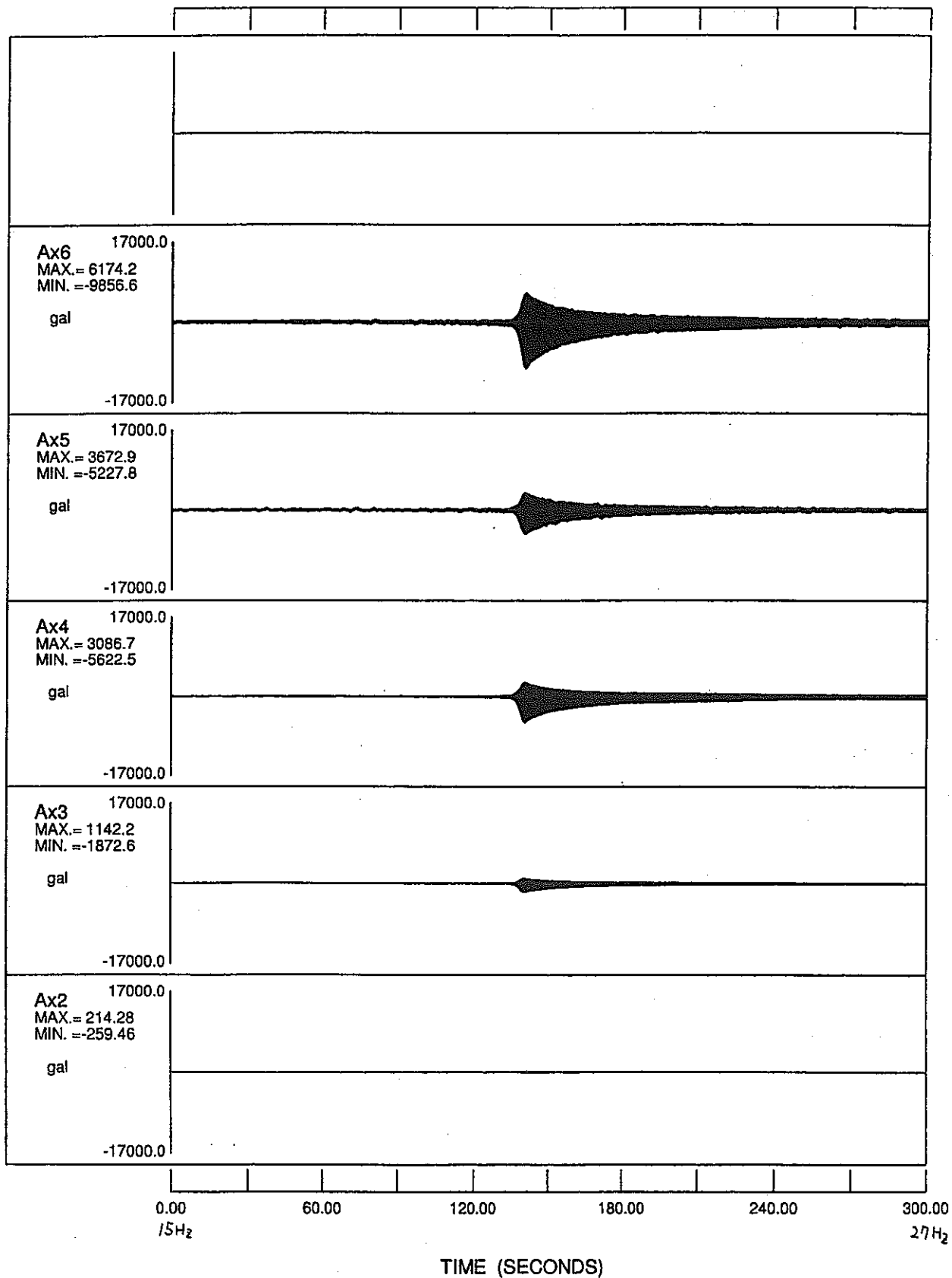
G0-3



加振加速度時刻歴波形 (キック<sup>0</sup>0mm、180gal、スイ<sup>0</sup>Up)

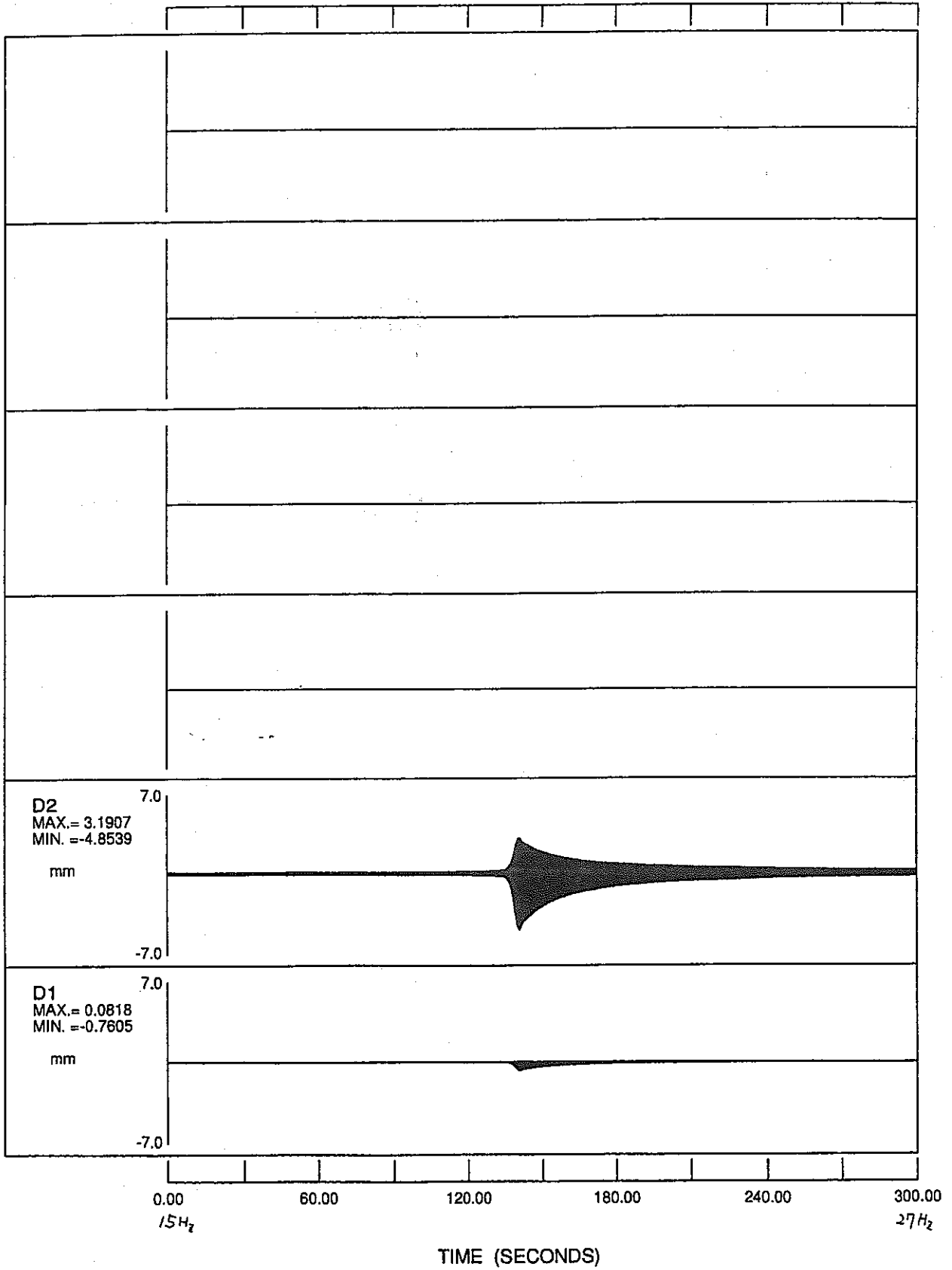


G0-3



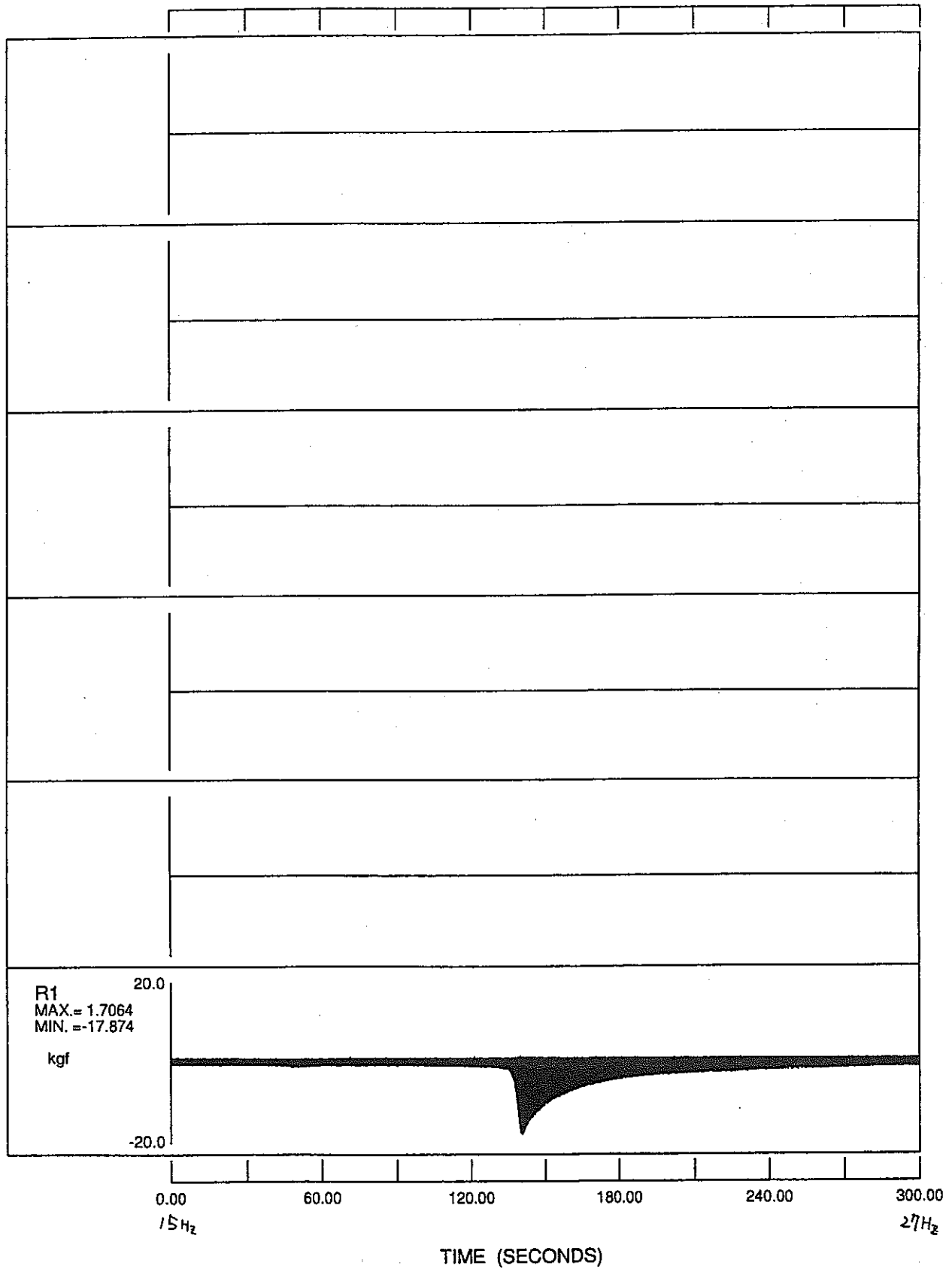
加速度時刻歴波形 (キック7°0mm、180gal、スイーブUp)

G0-3



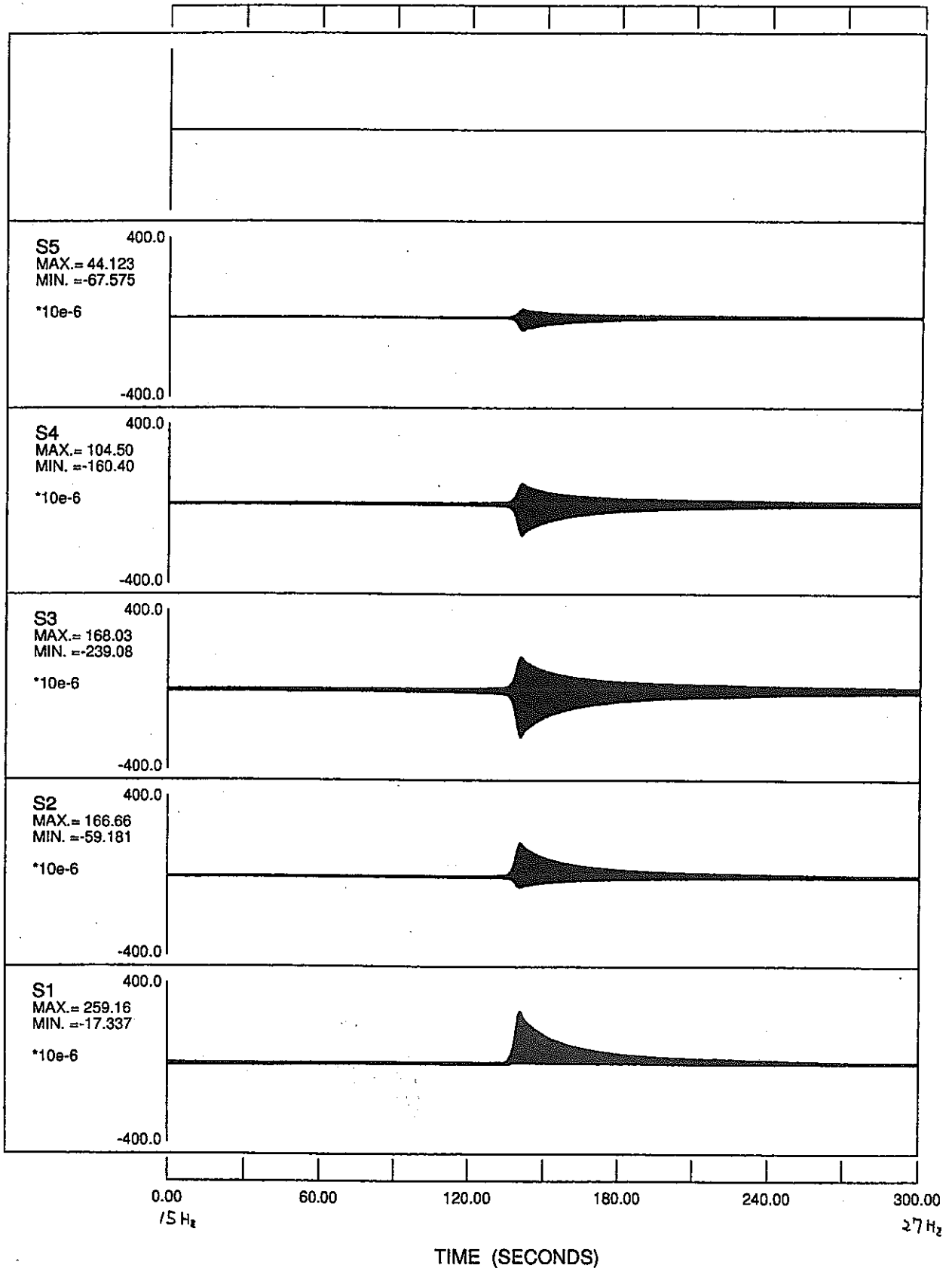
変位時刻歴波形 (キップ 0mm、180gal、スイフ° Up)

G0-3



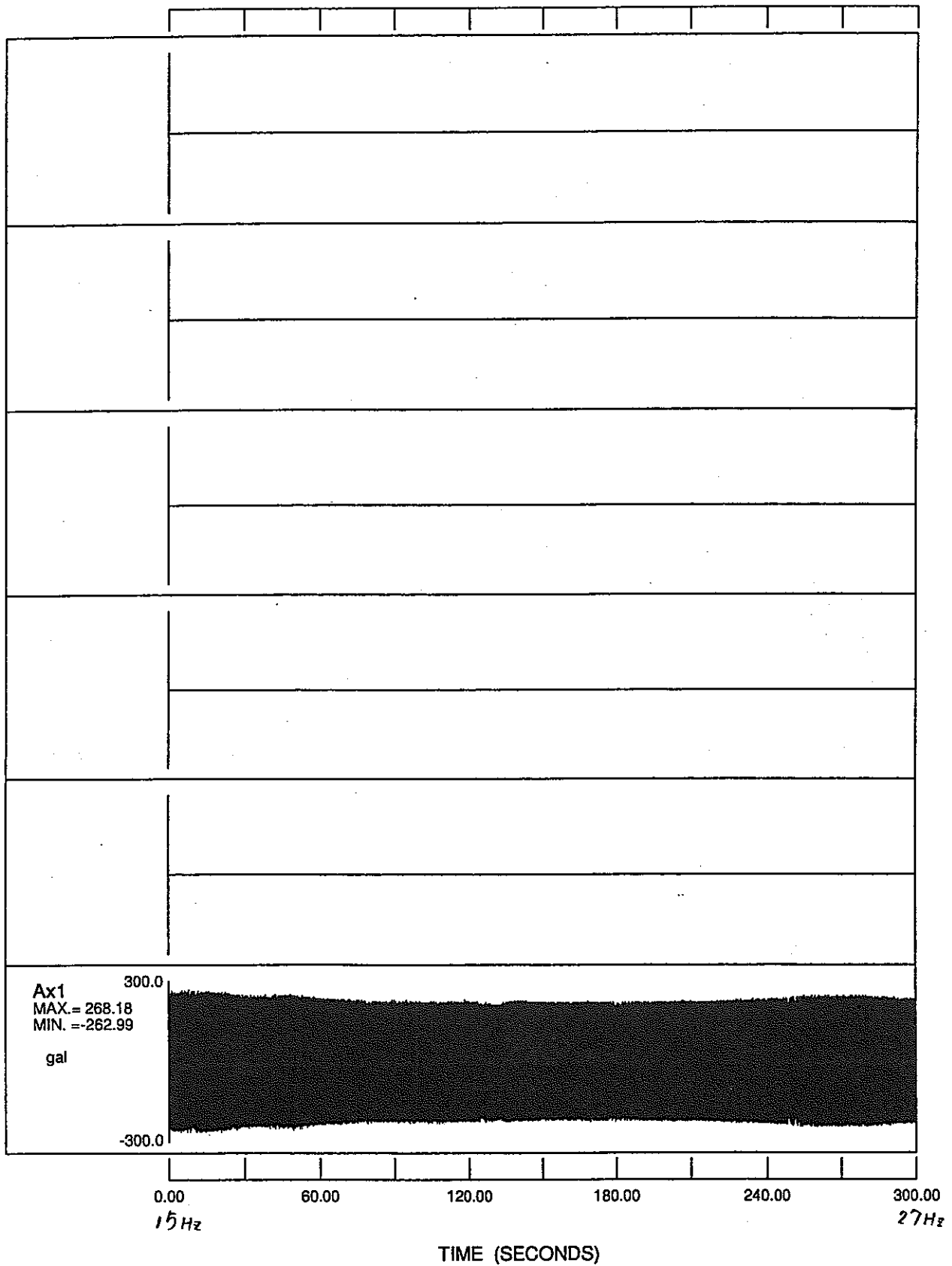
反力時刻歴波形 (キップ7° 0mm、180gal、スイ7° Up)

G0-3



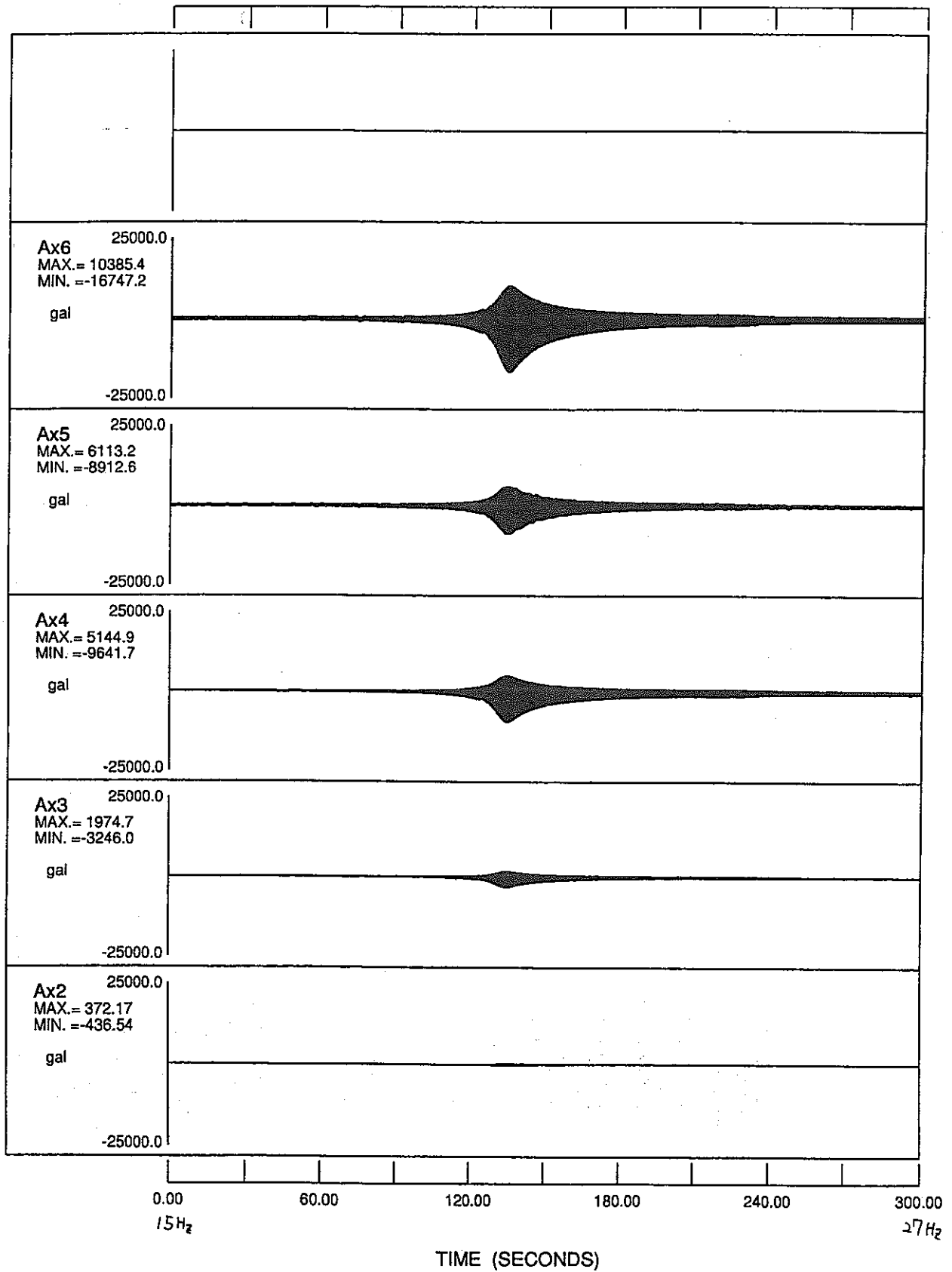
ひずみ時刻歴波形 (キャップ 0mm、180gal、スイフ Up)

G0-4



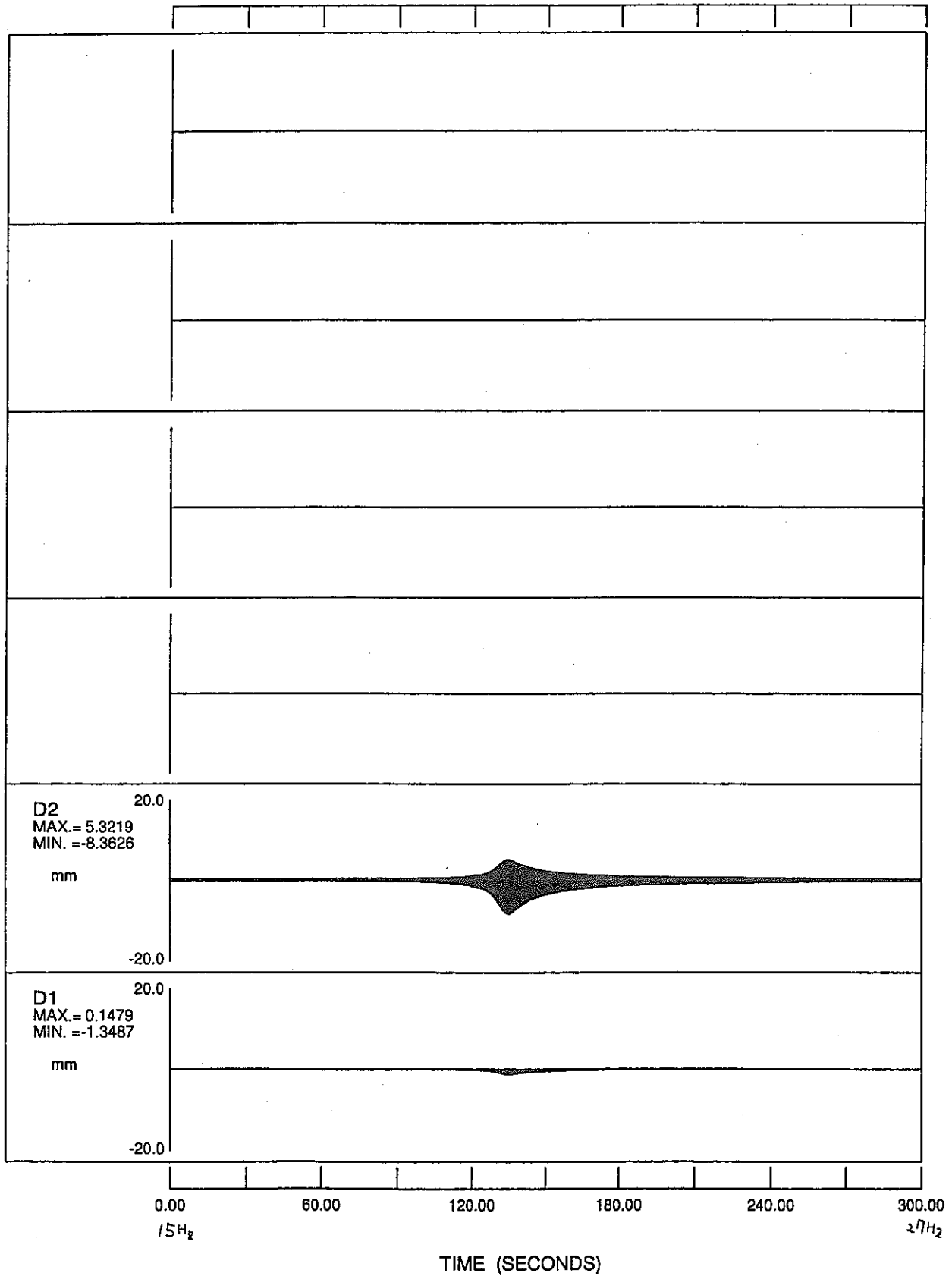
加振加速度時刻歴波形 (キック $^{\circ}$  0mm、240gal、スイブ $^{\circ}$  Up)

G0-4



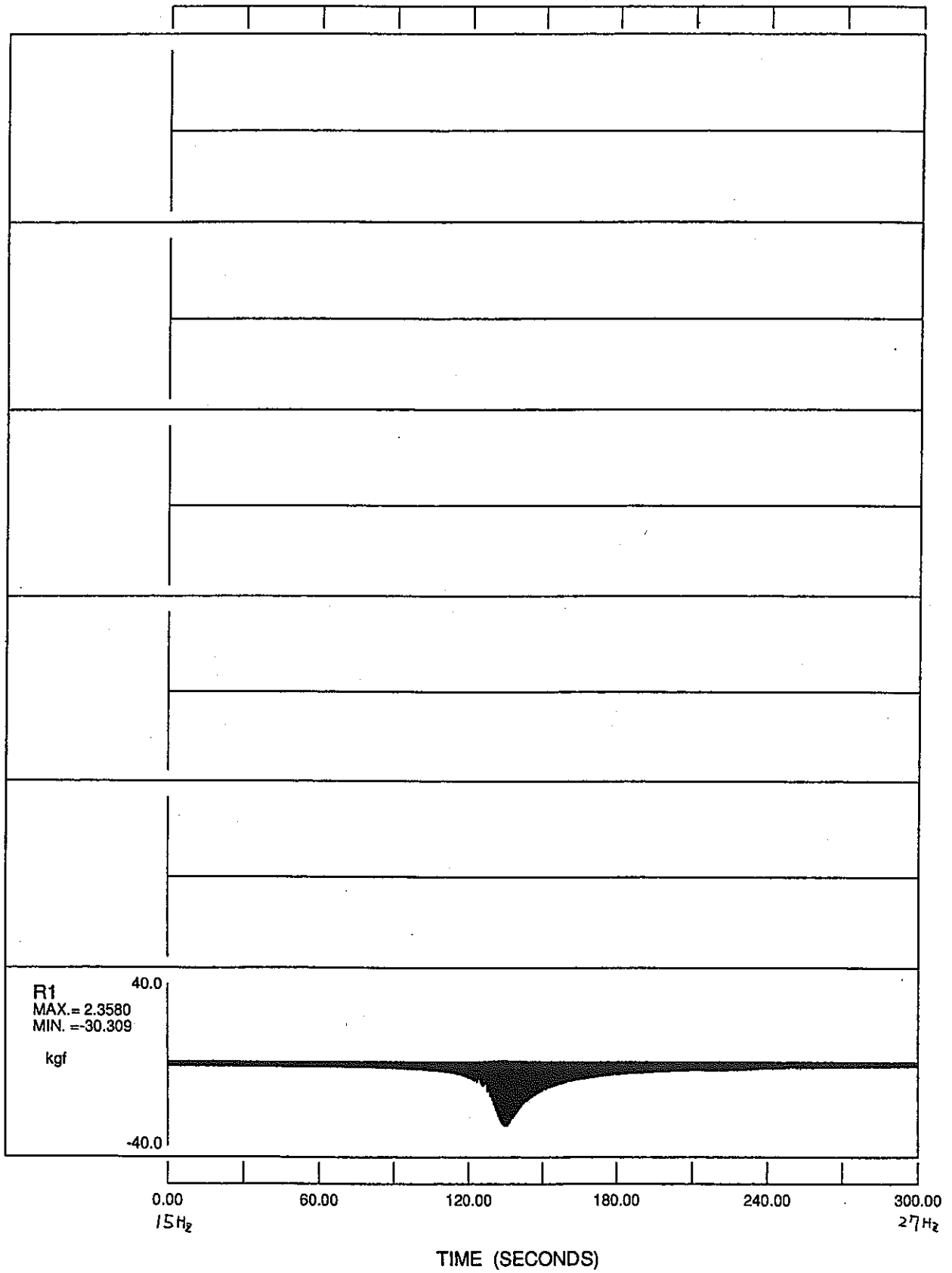
加速度時刻歴波形 (キック7° 0mm、240gal、スイフ° Up)

G0-4



変位時刻歴波形 (キップ 0mm、240gal、スイフ Up)

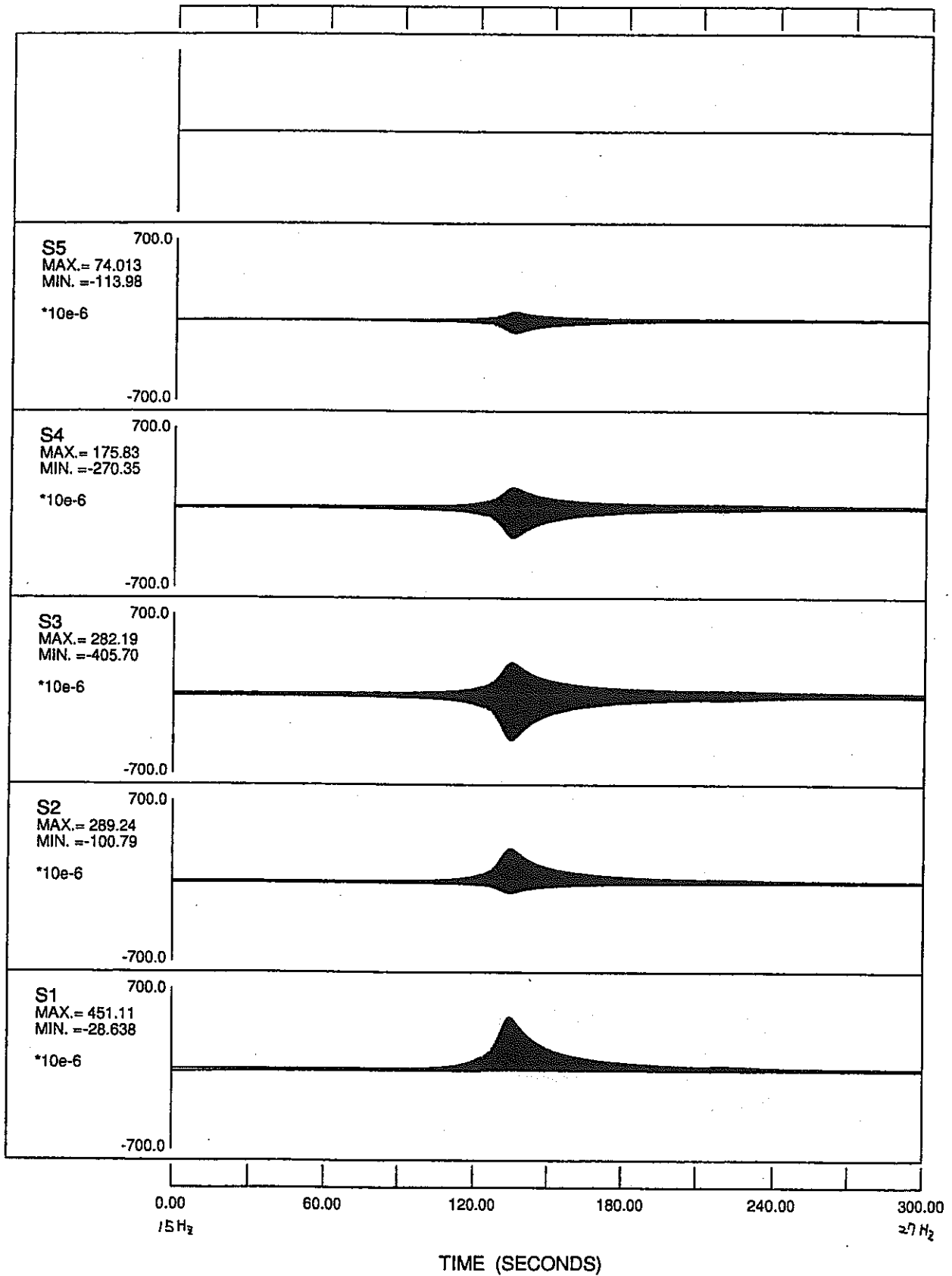
G0-4



反力時刻歴波形 (キップ° 0mm、240gal、スイブ° Up)

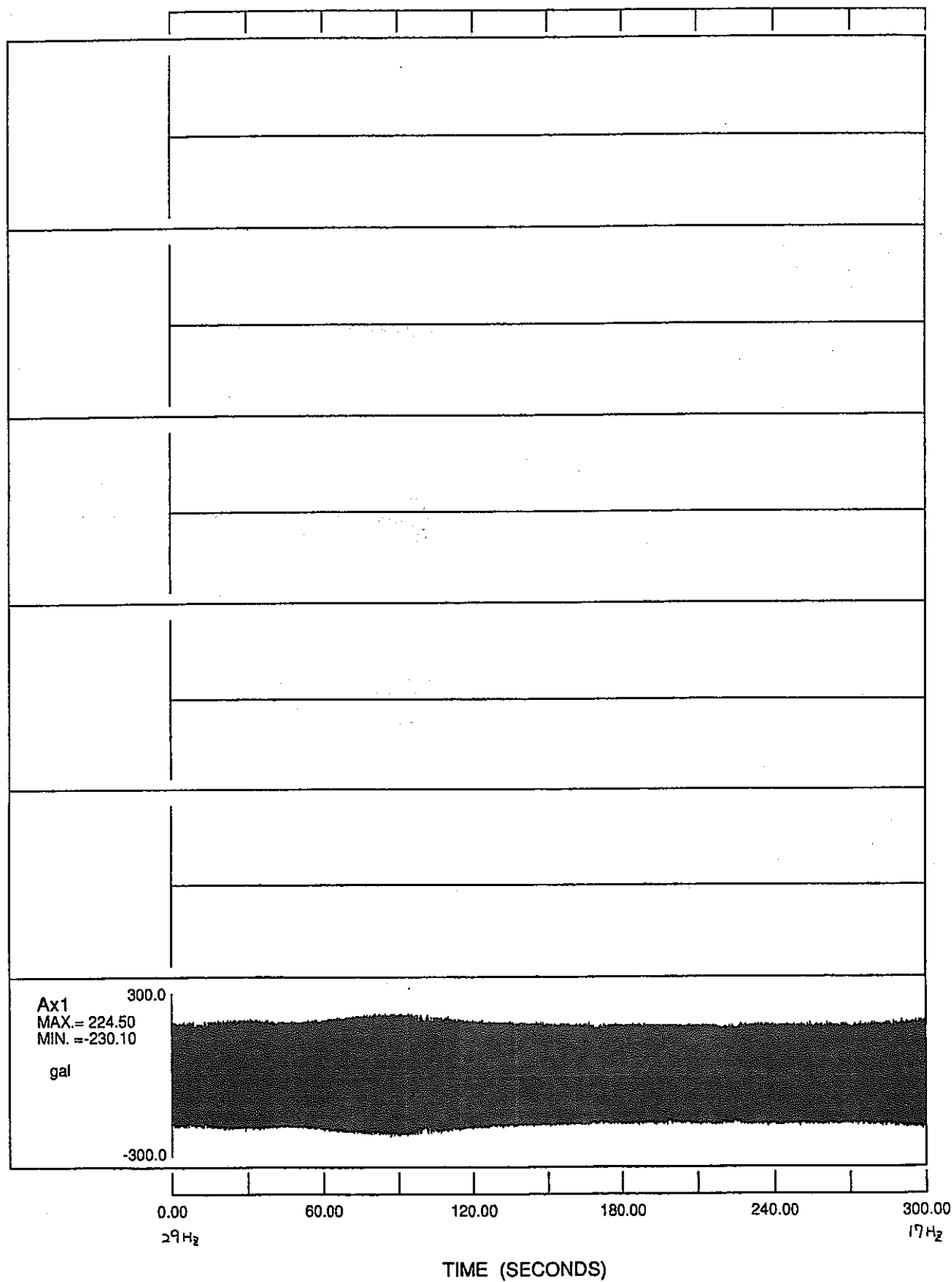


G0-4



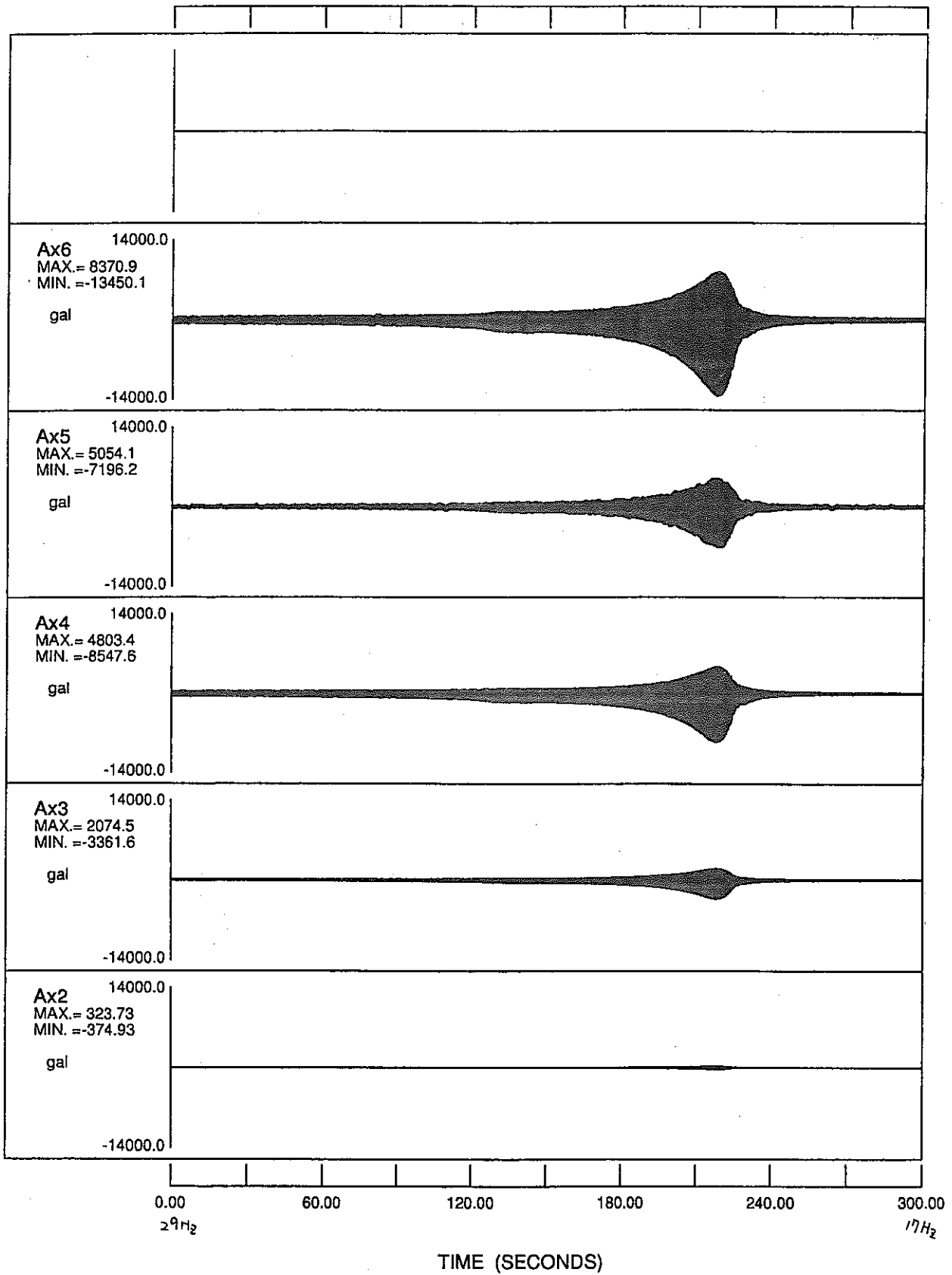
ひずみ時刻歴波形 (キヤップ 0mm、240gal、スイフ° Up)

G0-4D3



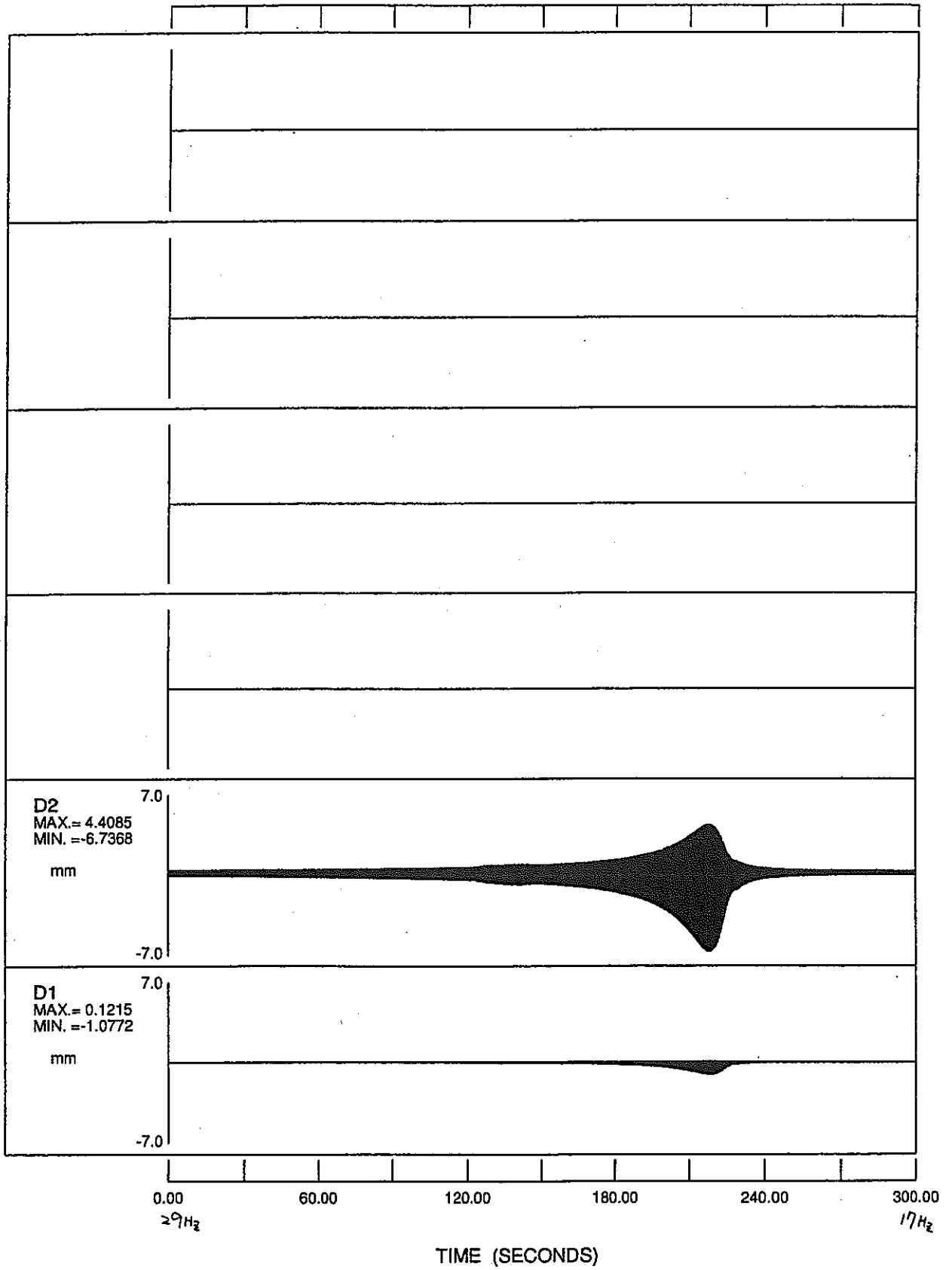
加振加速度時刻歴波形 (キ ャ ッ 7° 0mm、240gal、ス イ - 7° Down)

G0-4D3



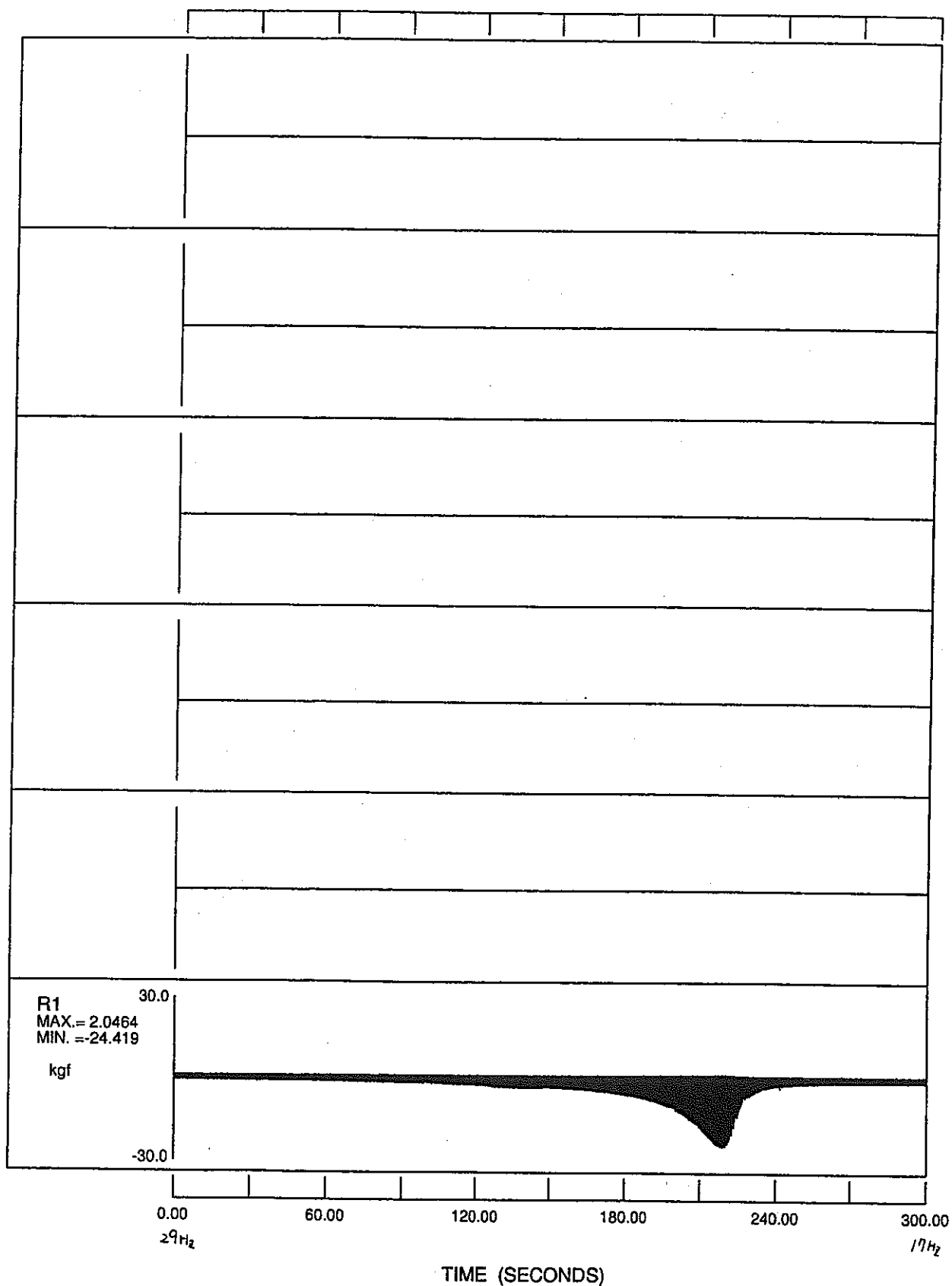
加速度時刻歴波形 (キック7° 0mm、240gal、スイーブ° Down)

G0-4D3



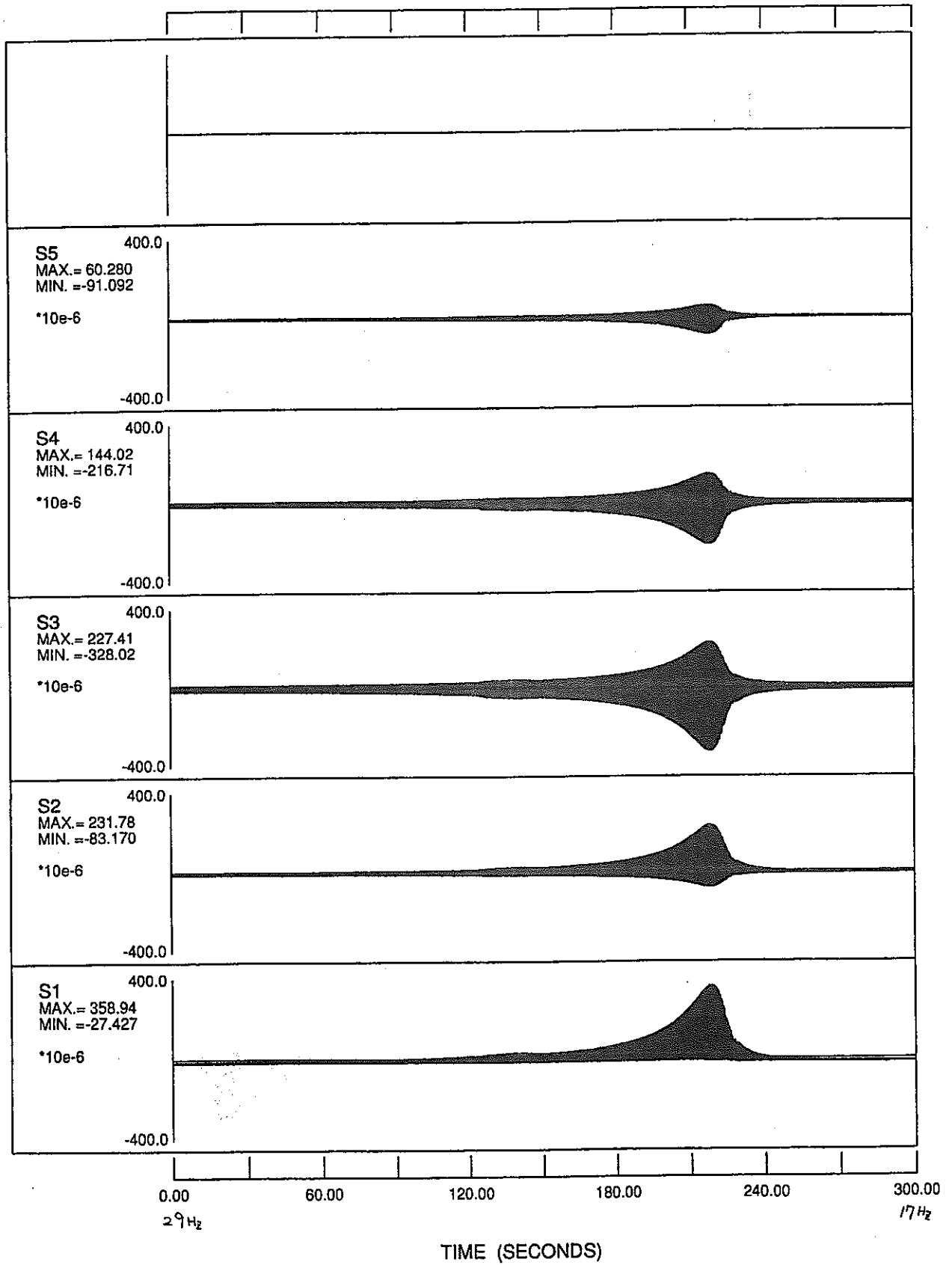
変位時刻歴波形 (キ+7° 0mm、240gal、スI-7° Down)

GO-4D3



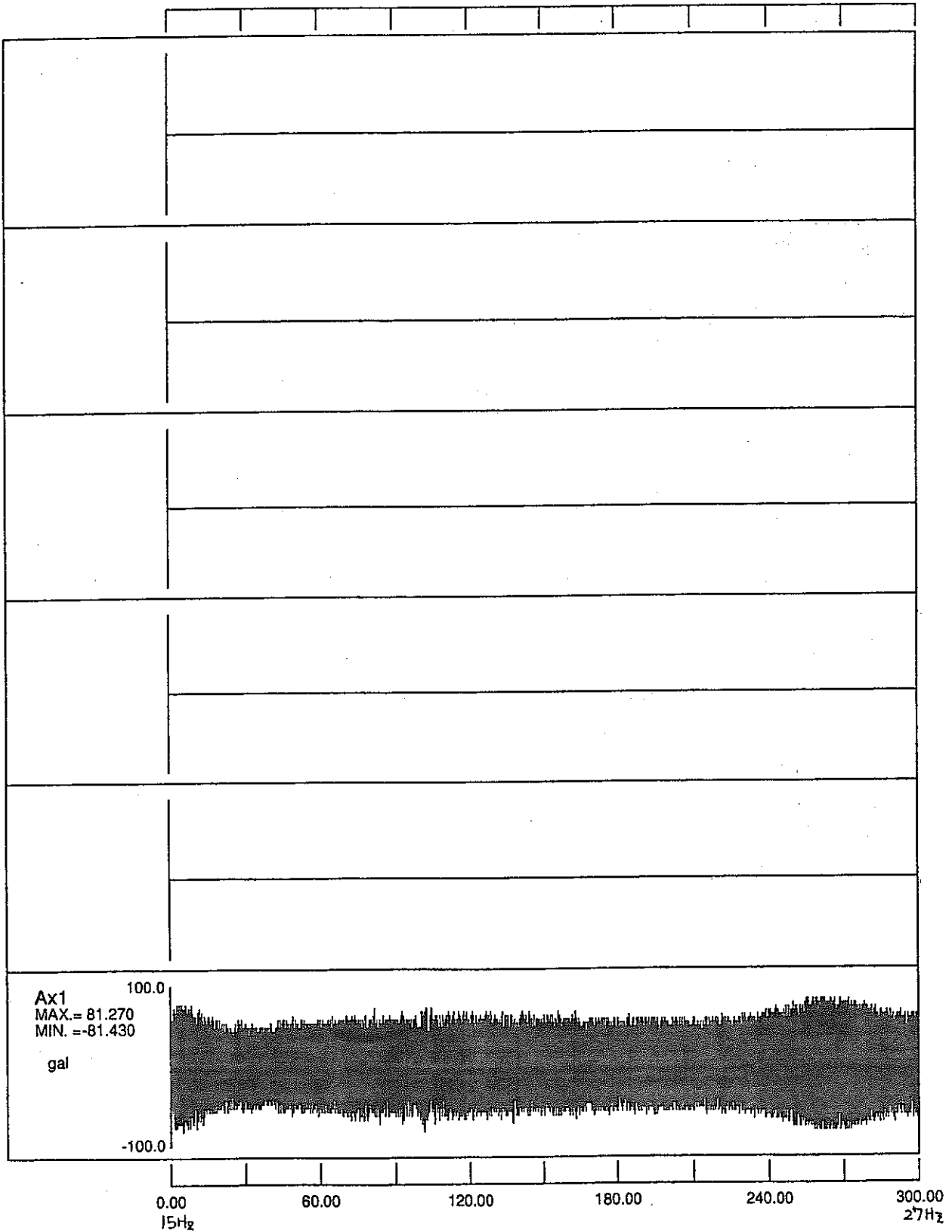
反力時刻歴波形 (キップ7° 0mm、240gal、スイ-7° Down)

G0-4D3



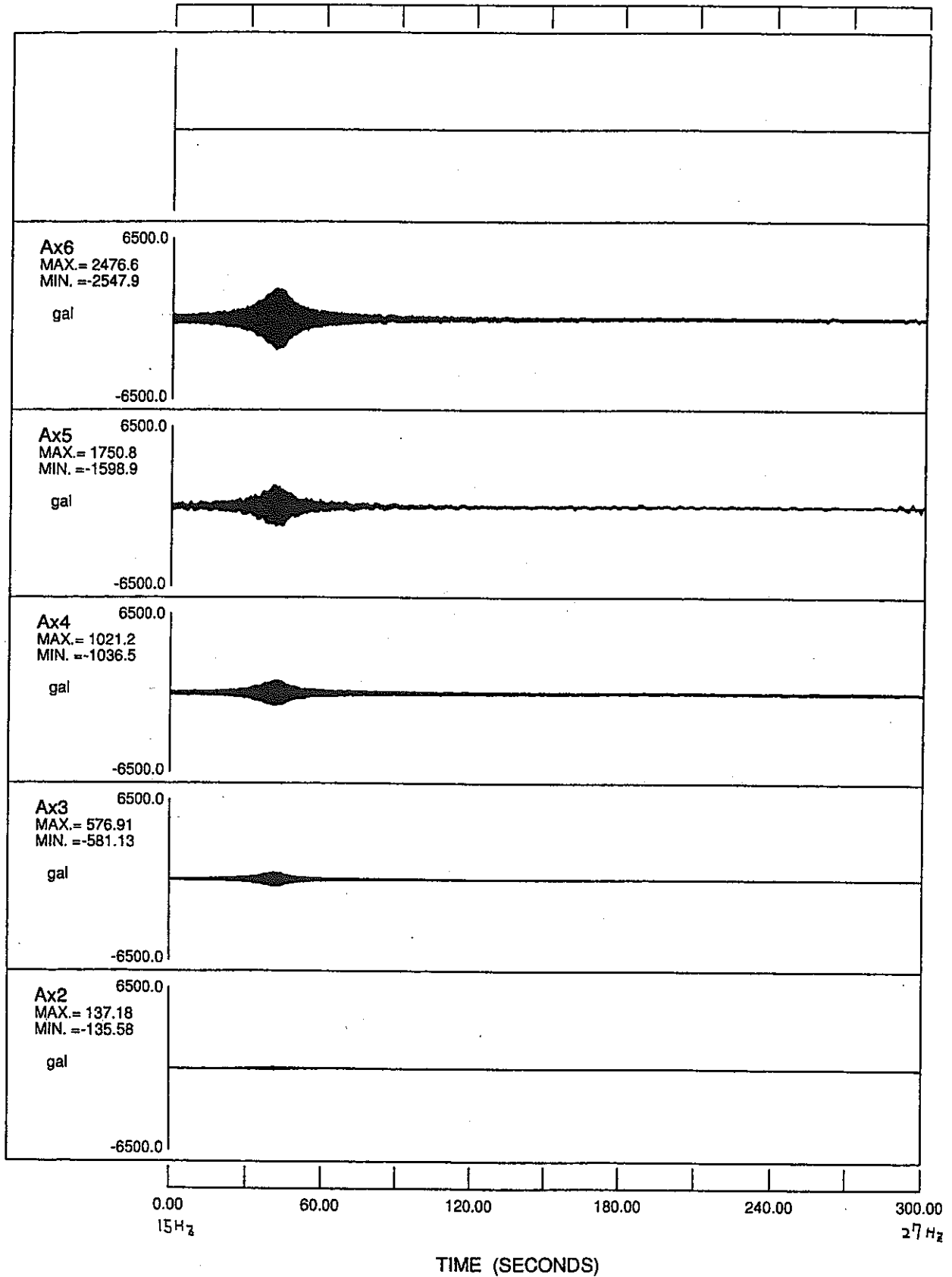
ひずみ時刻歴波形 (キヤップ 0mm、240gal、スイブ° Down)

G1-1



加振加速度時刻歴波形 (キック $\theta$  0.4mm、60gal、スイ $\theta$  Up)

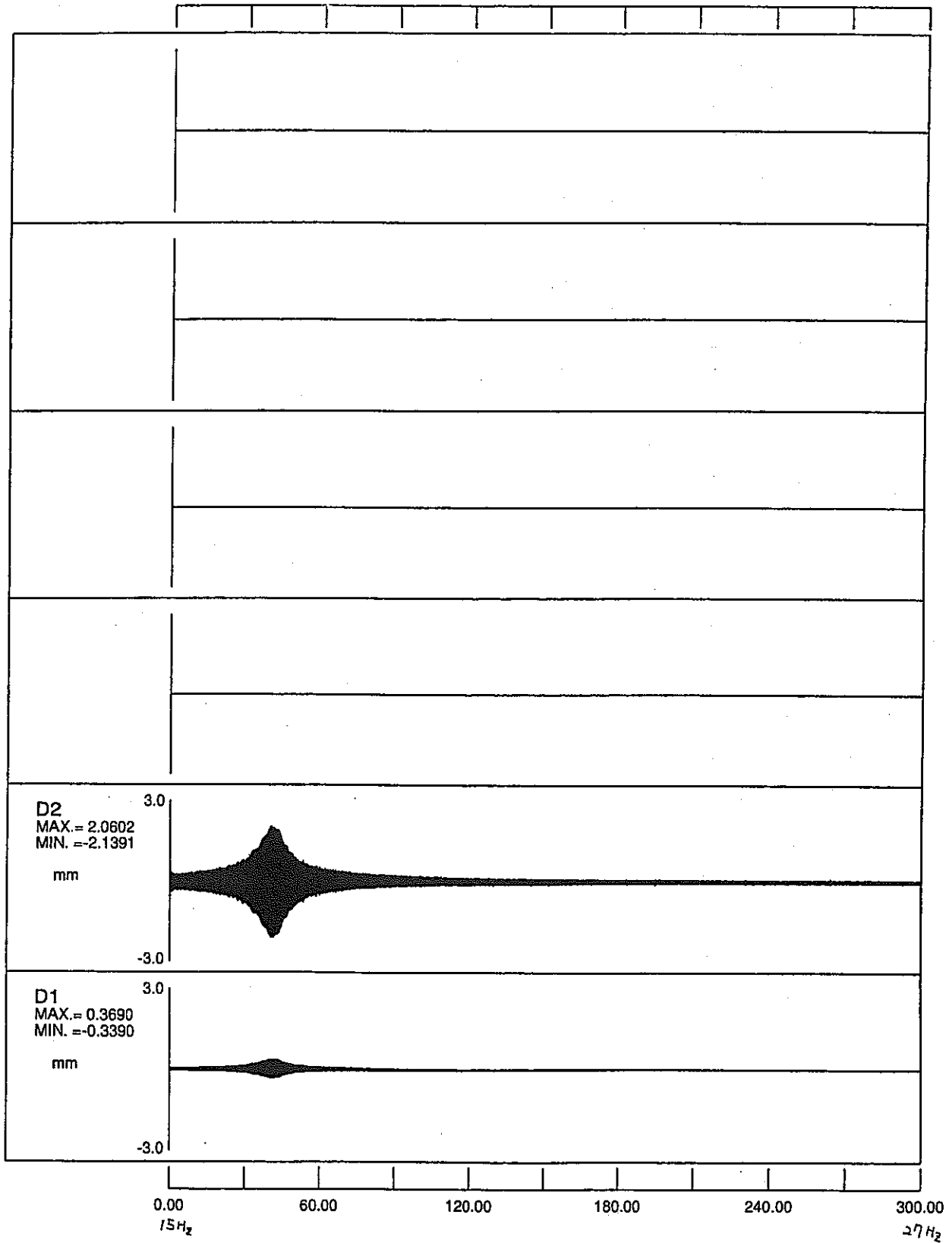
G1-1



加速度時刻歴波形 (キック<sup>0</sup> 0.4mm、60gal、スイーブ<sup>0</sup> Up)

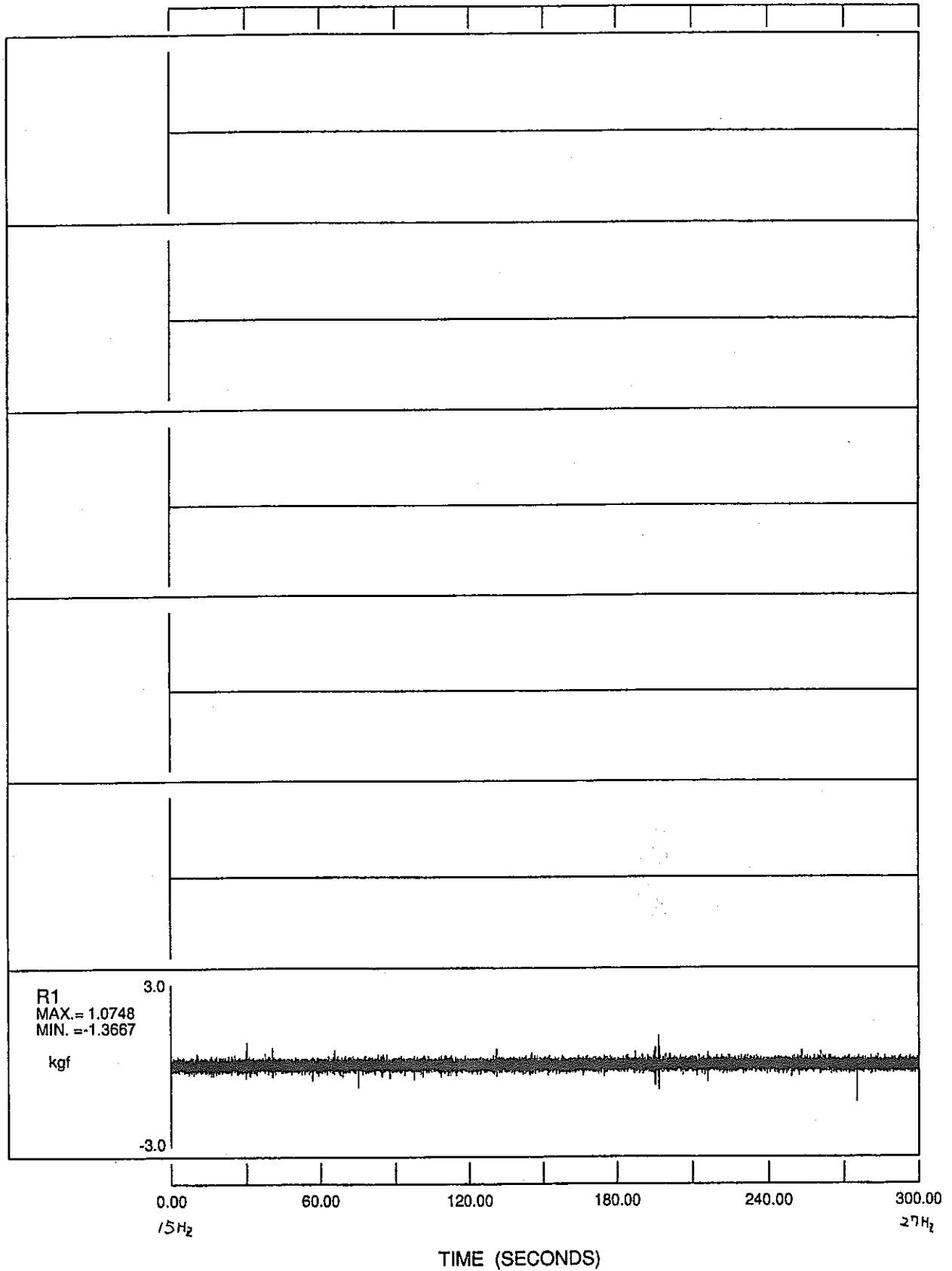


G1-1



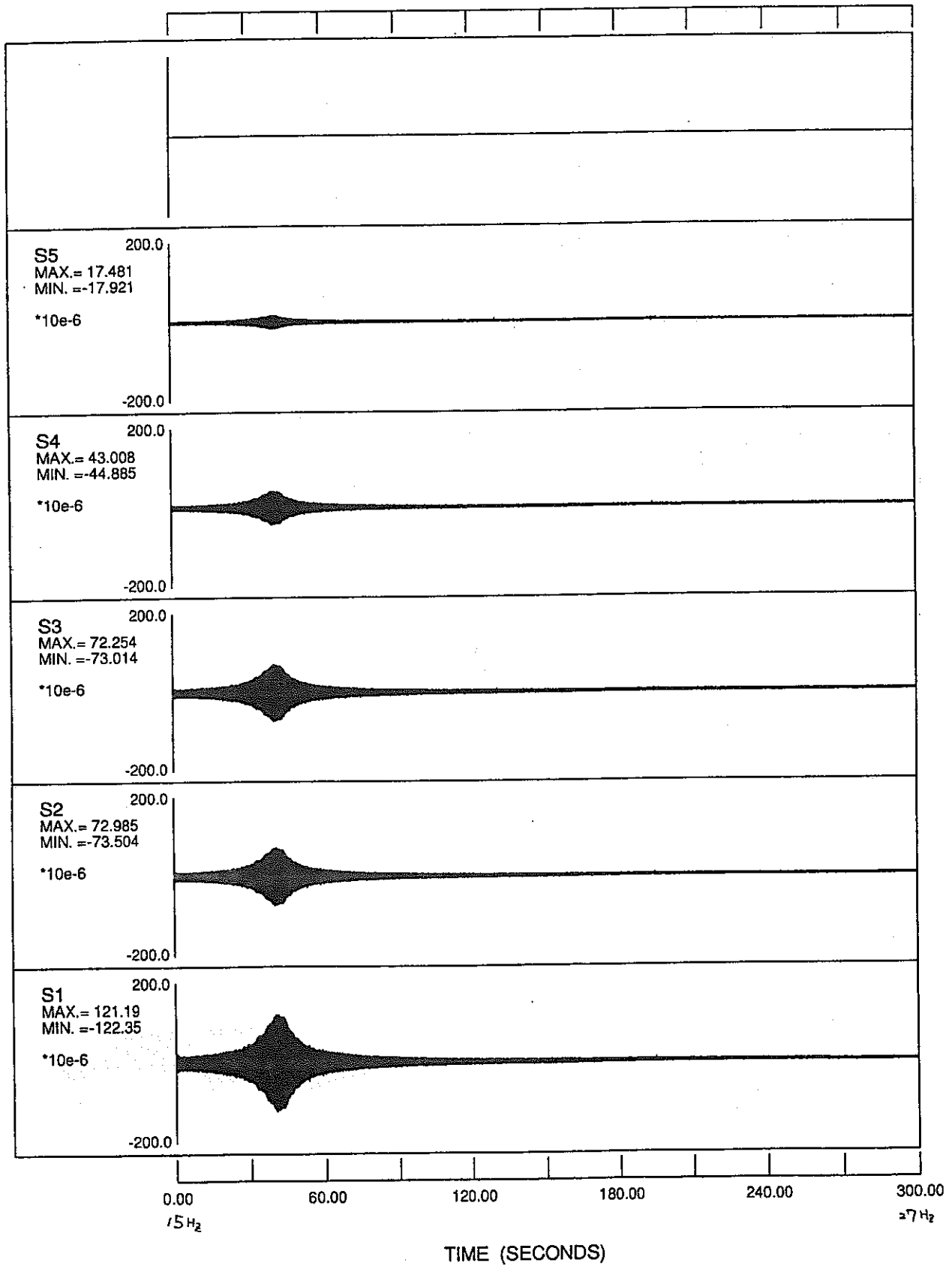
変位時刻歴波形 (キップ<sup>0</sup> 0.4mm、60gal、スイブ<sup>0</sup> Up)

G1-1



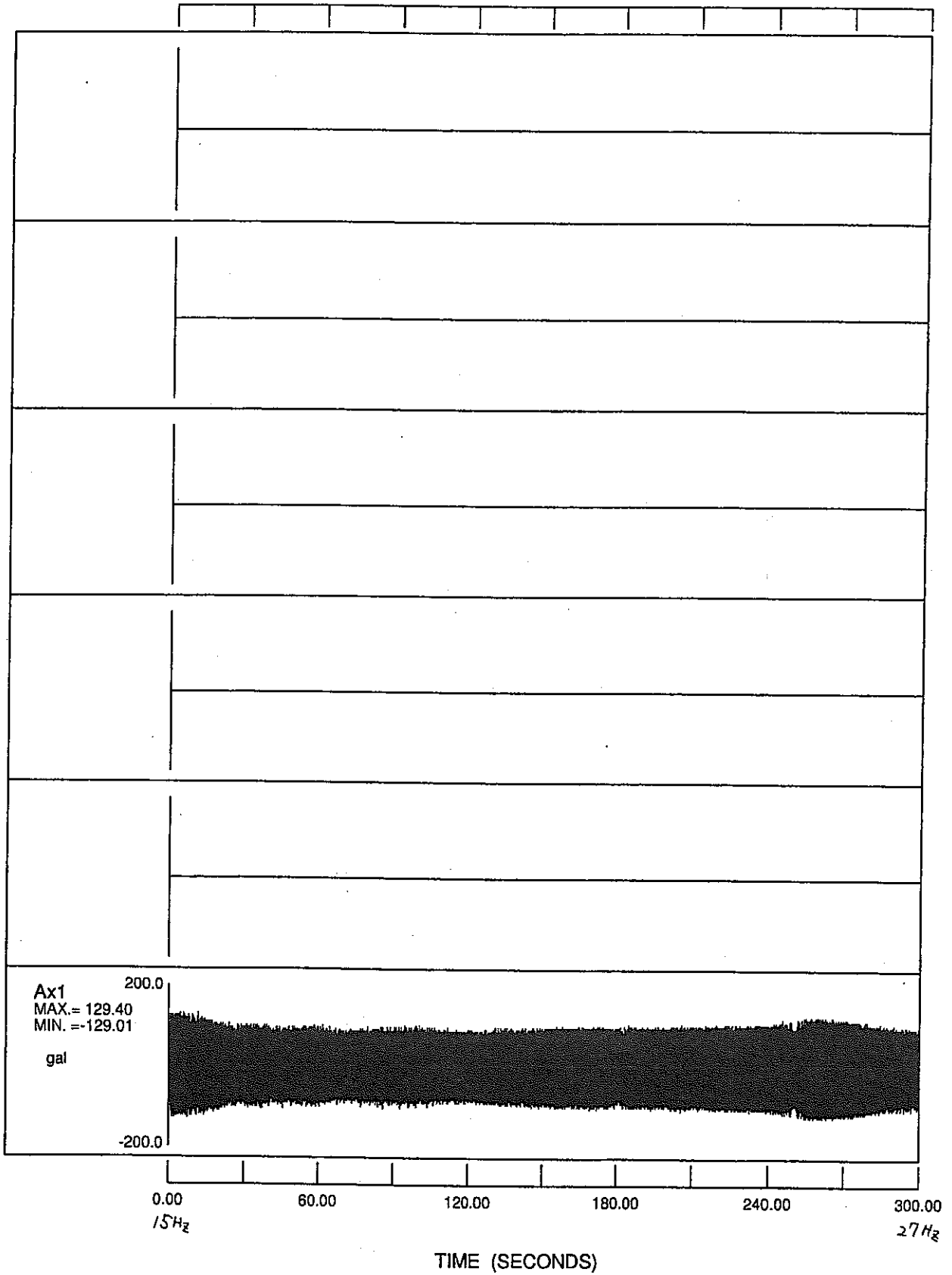
反力時刻歴波形 (キップ<sup>0</sup> 0.4mm、60gal、スイ<sup>7</sup> Up)

G1-1



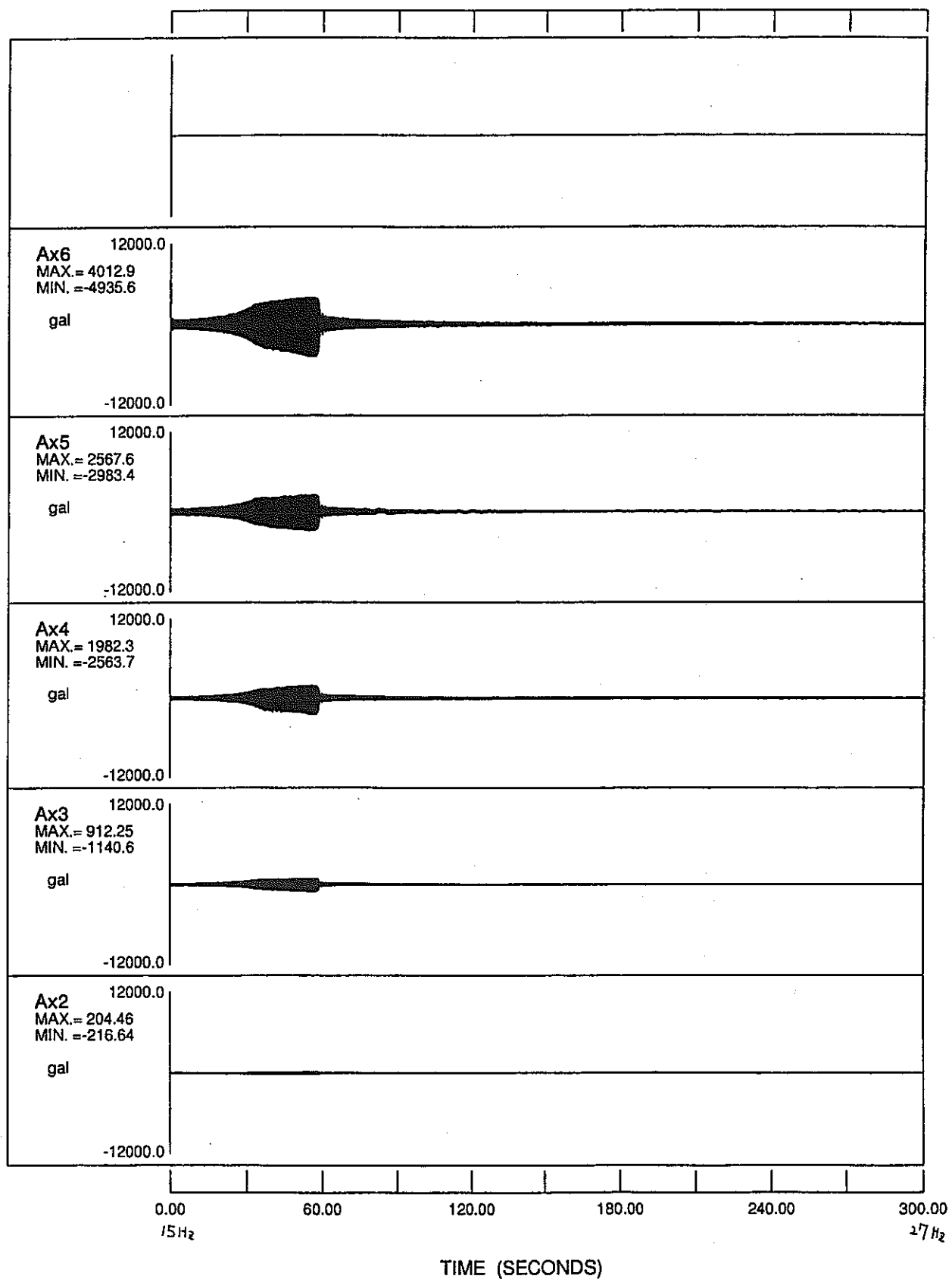
ひずみ時刻歴波形 (キップ° 0.4mm、60gal、スイフ° Up)

G1-2



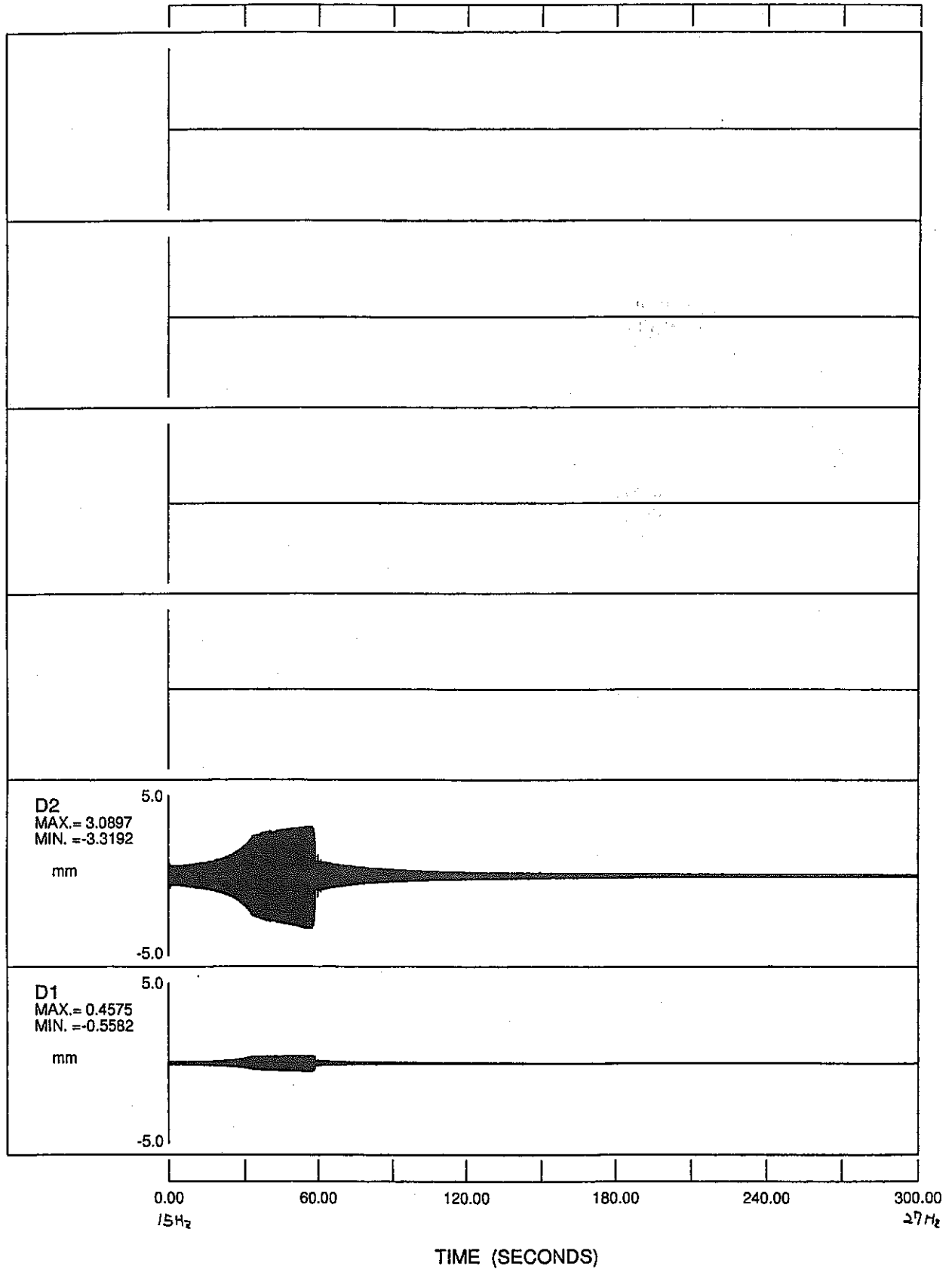
加振加速度時刻歴波形 (キック<sup>0</sup> 0.4mm、120gal、スイブ<sup>0</sup> Up)

G1-2



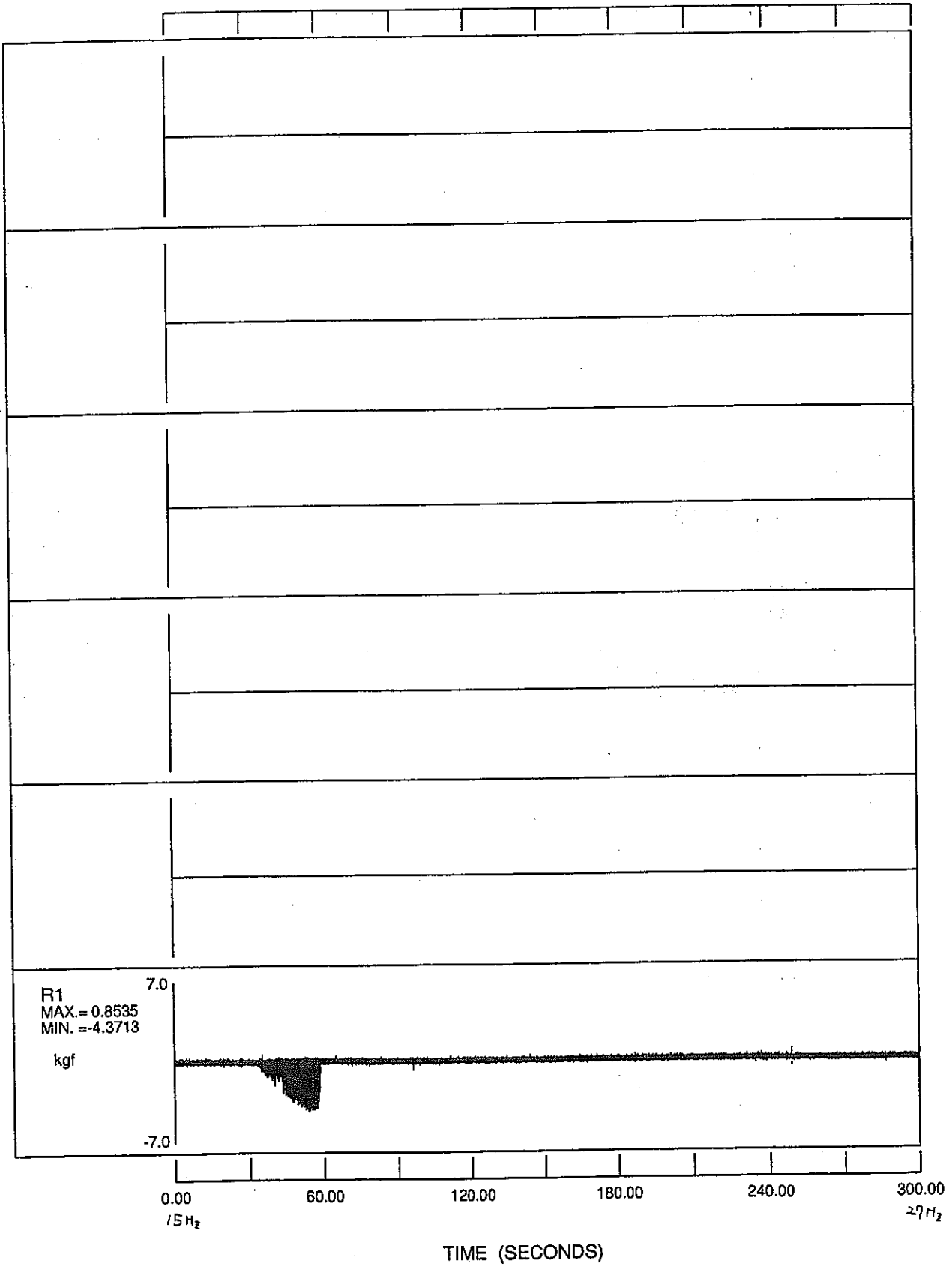
加速度時刻歴波形 (キック 0.4mm、120gal、スイブ Up)

G1-2



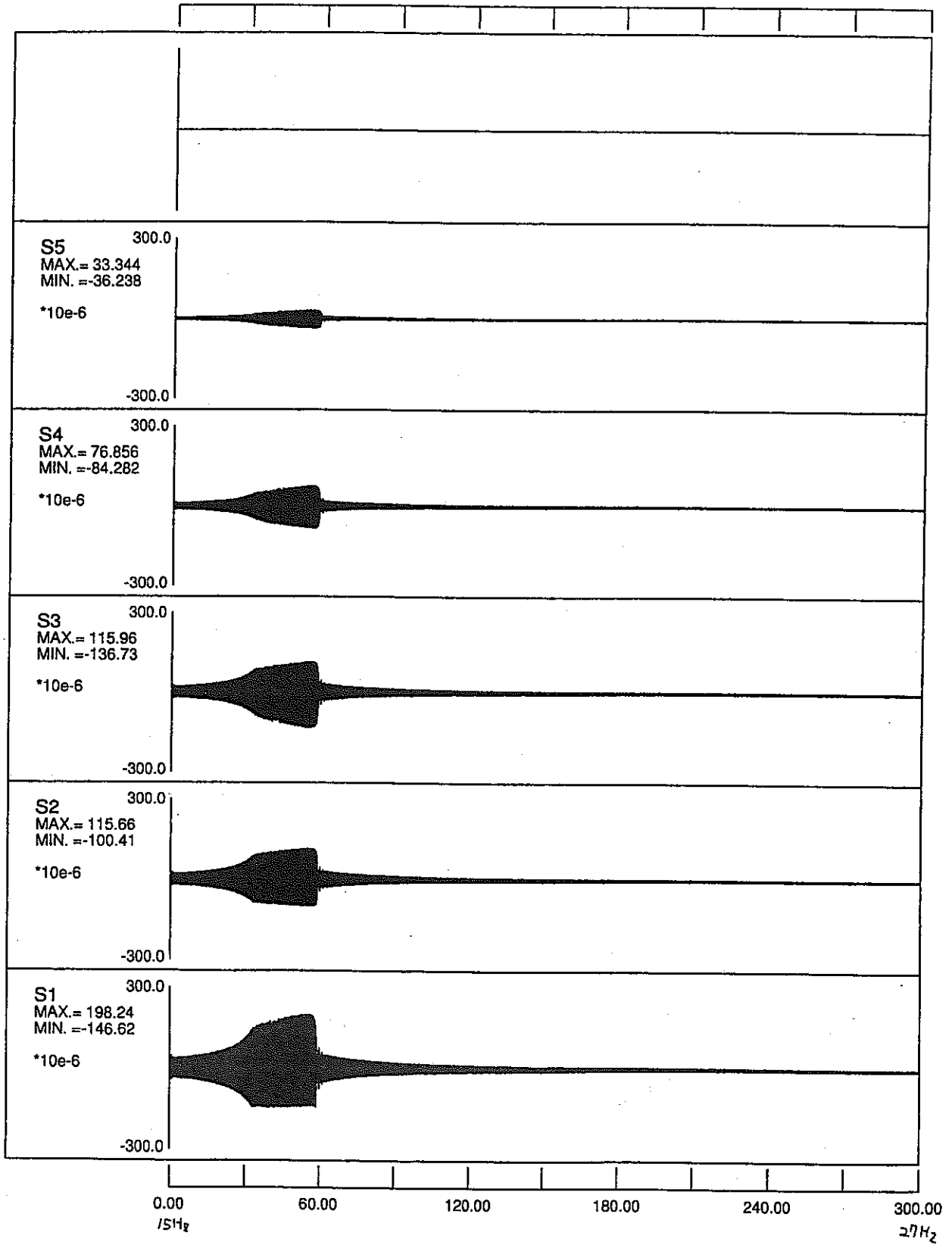
変位時刻歴波形 (ｷｯｯ7° 0.4mm、120gal、ｽｲ-7° Up)

G1-2



反力時刻歴波形 (キップ 0.4mm、120gal、スイプ Up)

G1-2

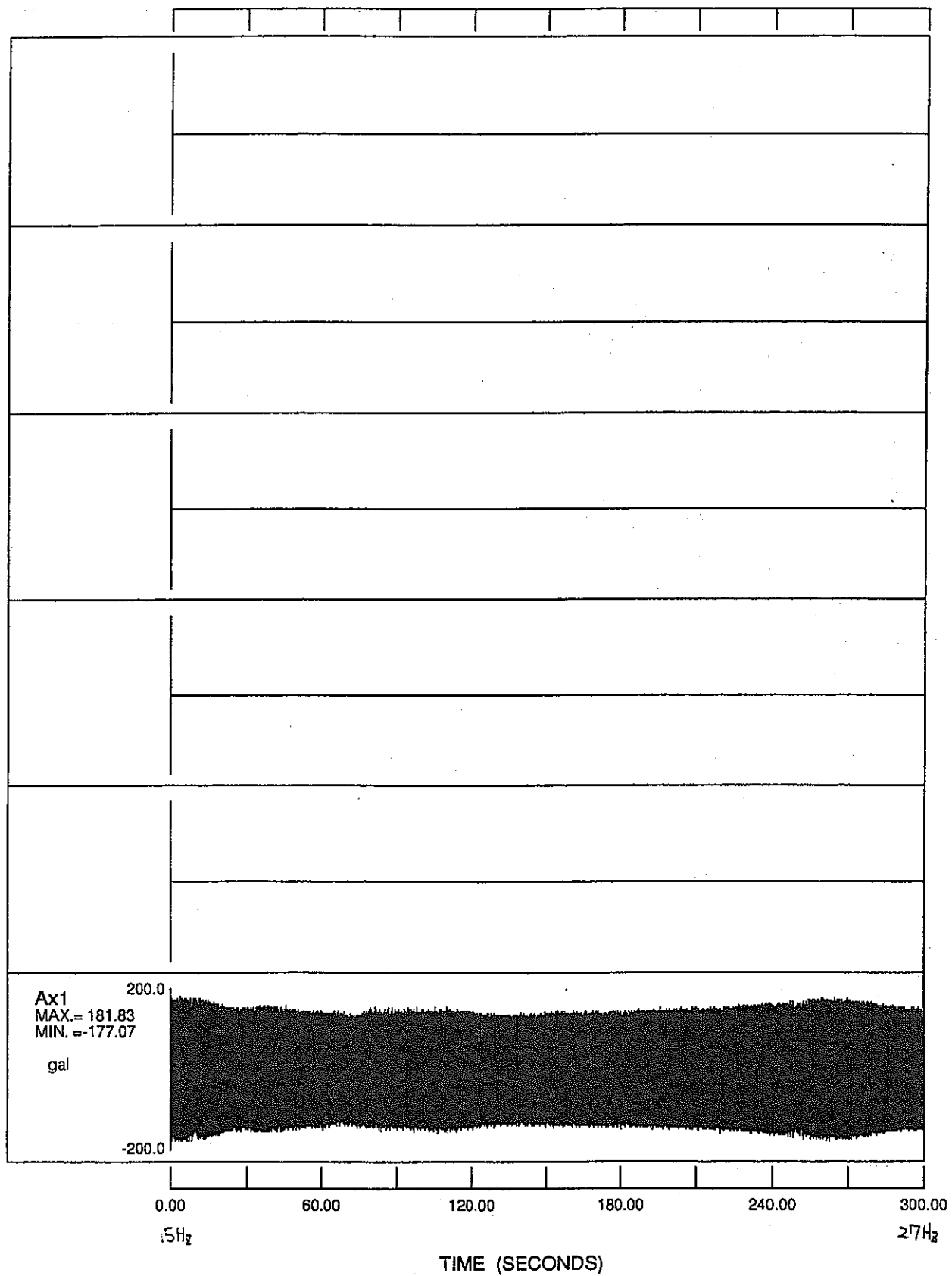


TIME (SECONDS)

ひずみ時刻歴波形 (キップ° 0.4mm、120gal、スイブ° Up)

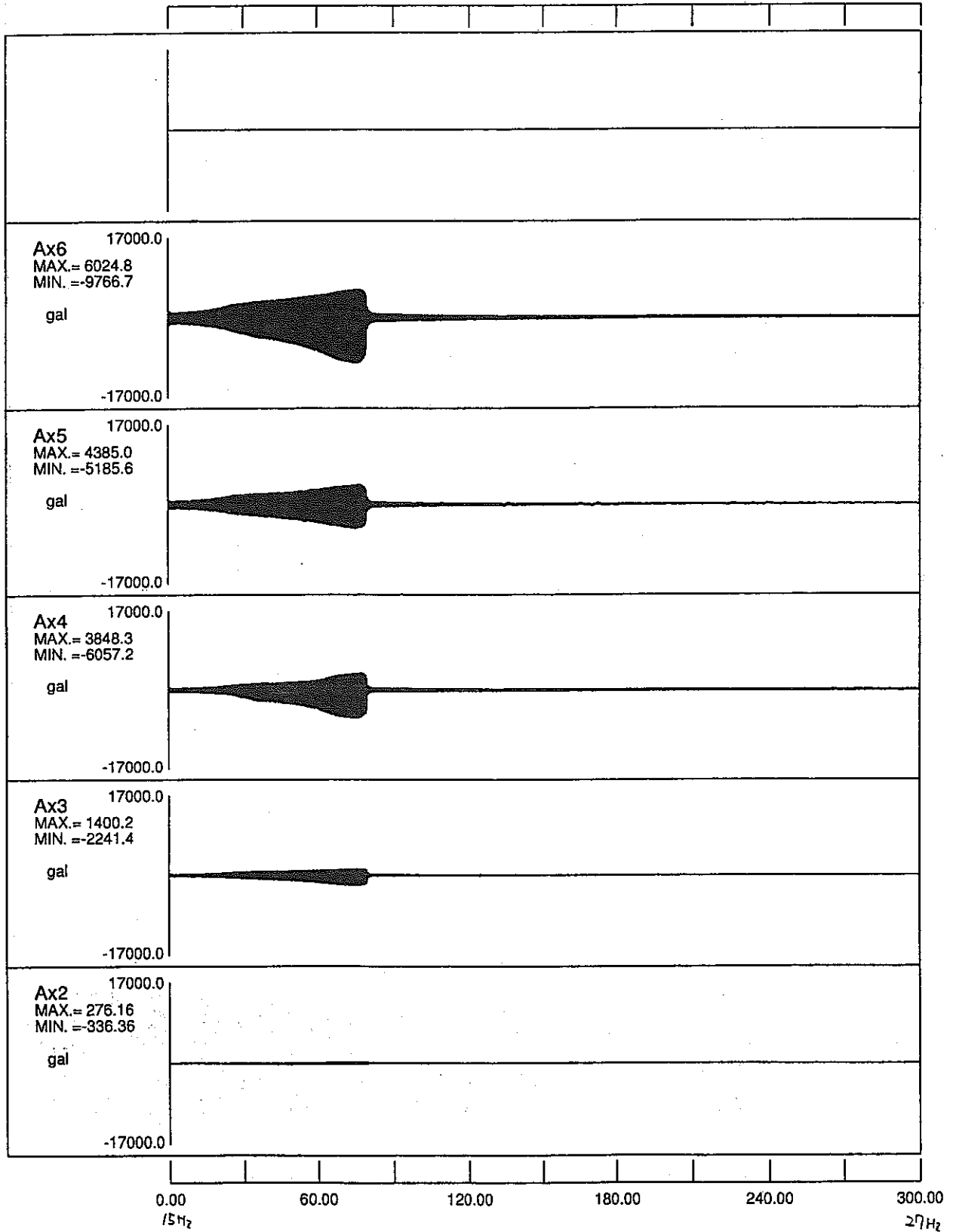


G1-3



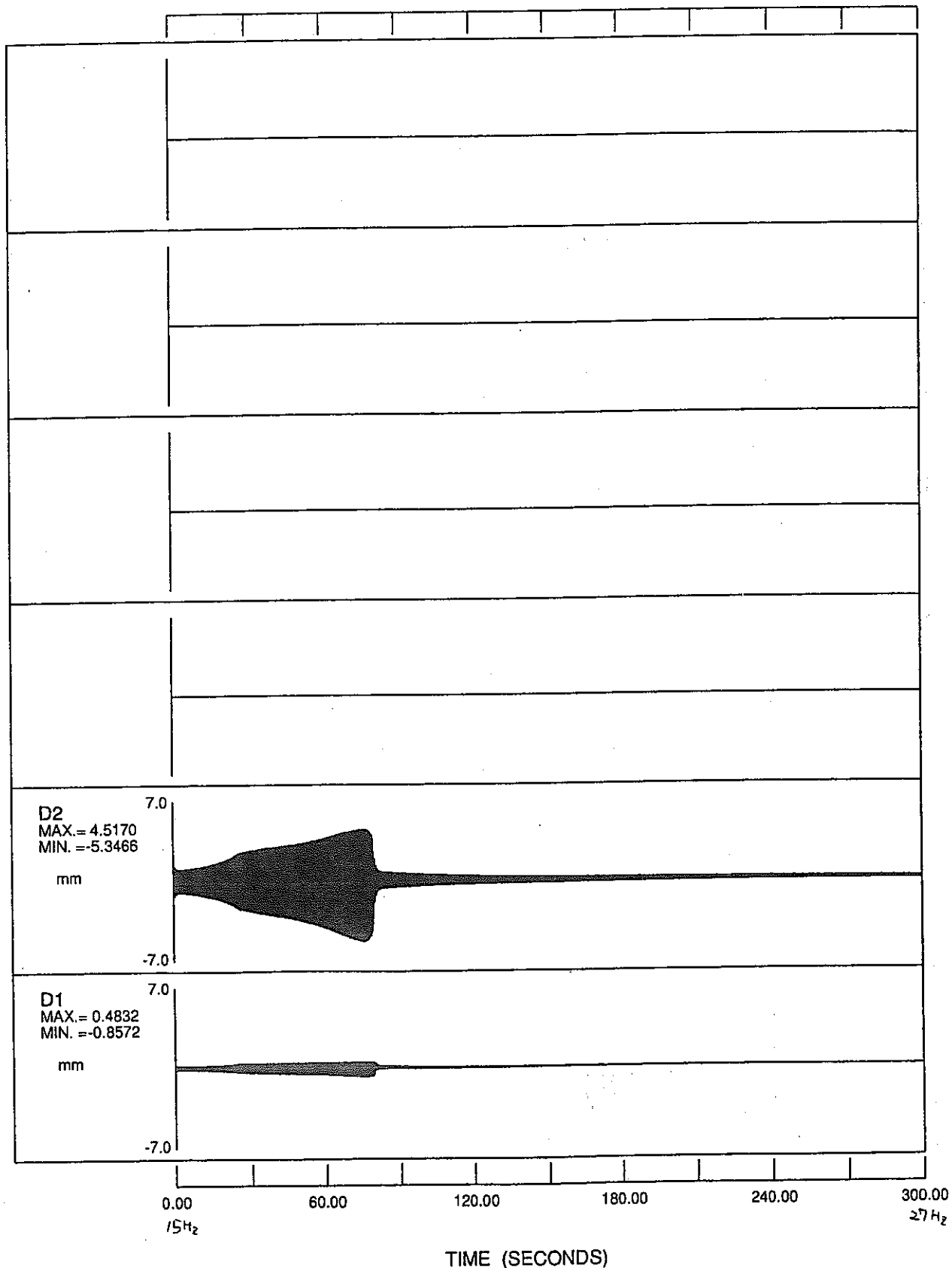
加振加速度時刻歴波形 (キック<sup>0</sup> 0.4mm、180gal、スイブ<sup>0</sup> Up)

G1-3



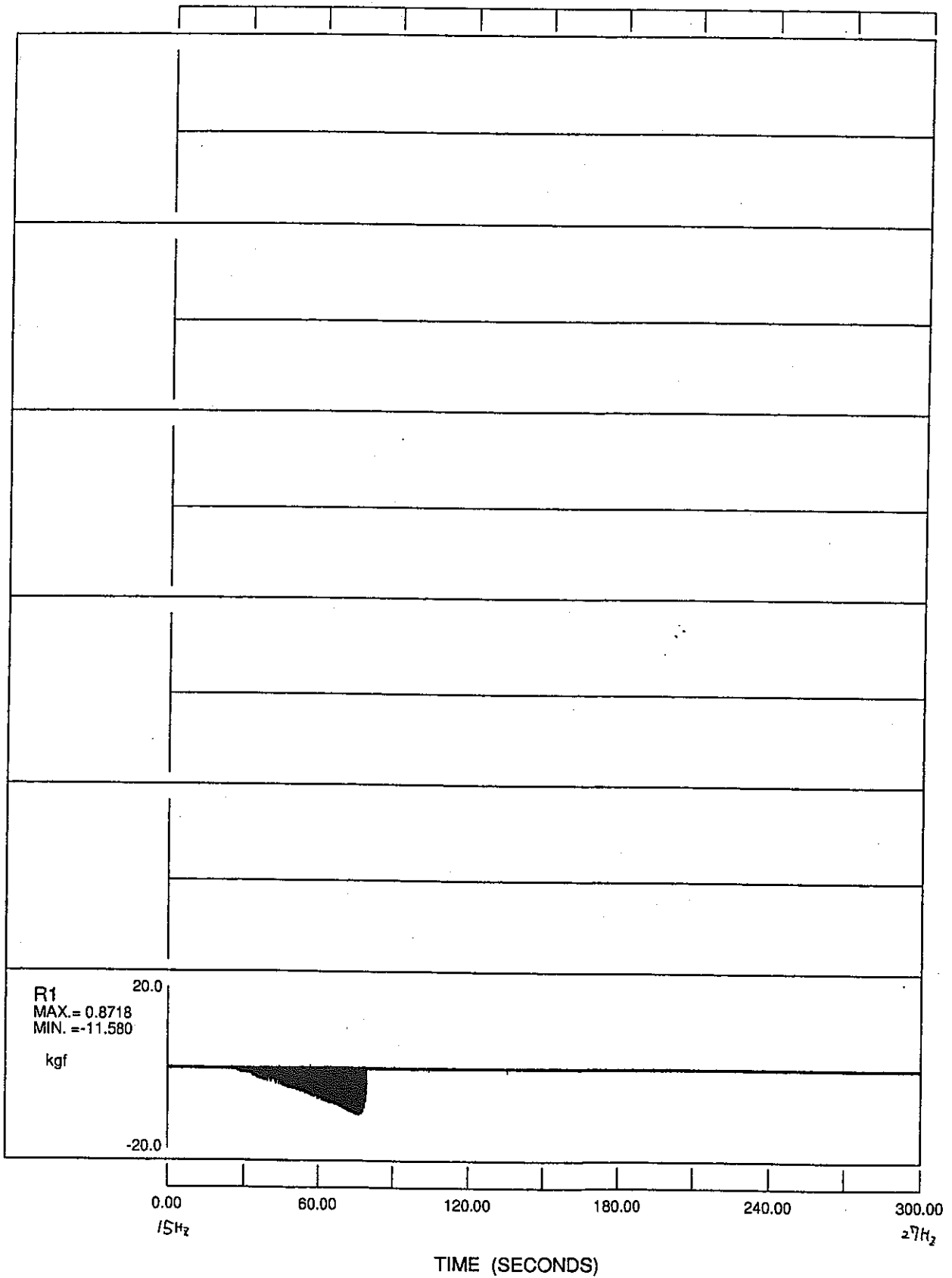
加速度時刻歴波形 (キック7° 0.4mm、180gal、スイブ° Up)

G1-3



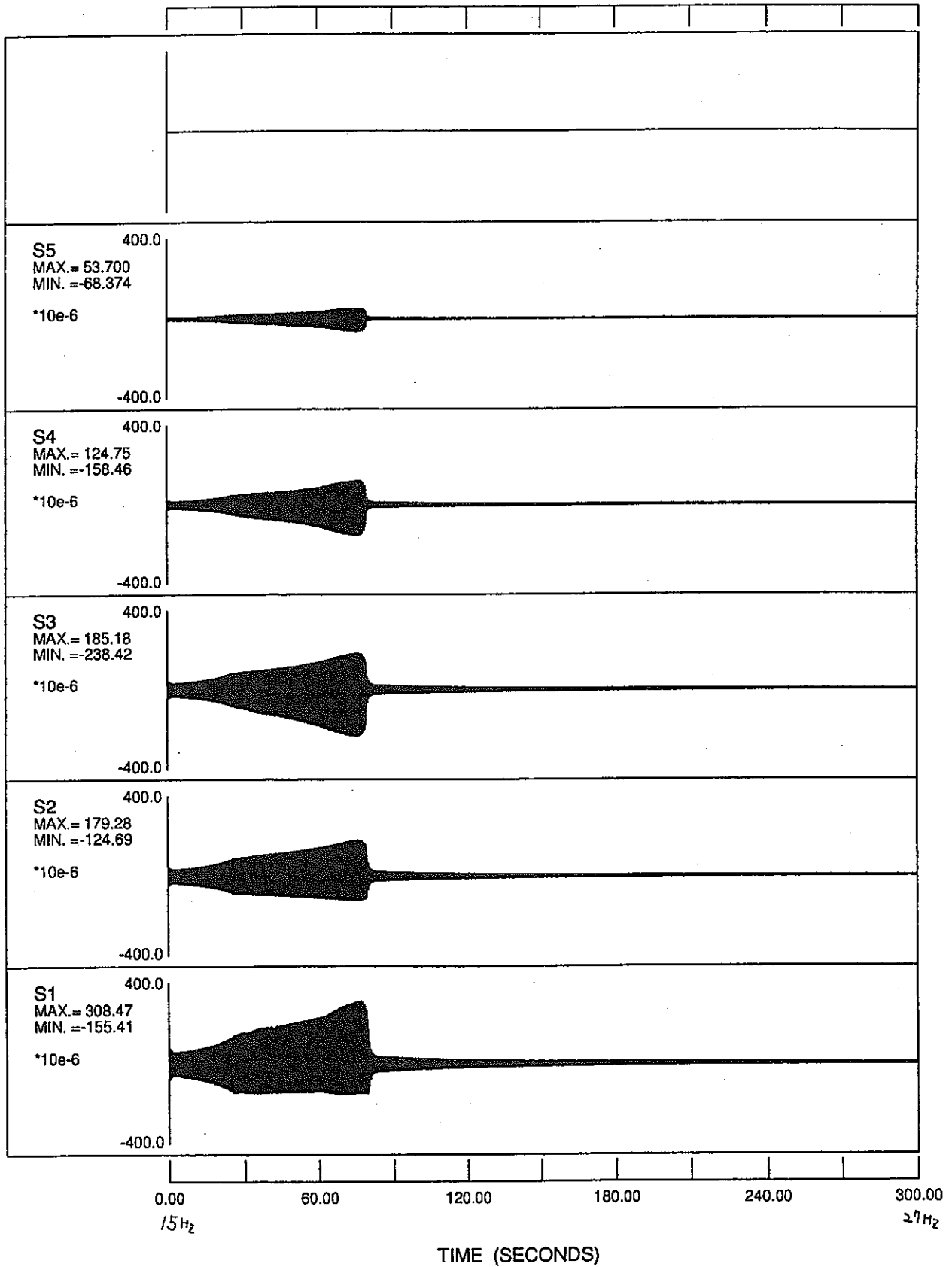
変位時刻歴波形 (キップ 0.4mm、180gal、スイフ Up)

G1-3



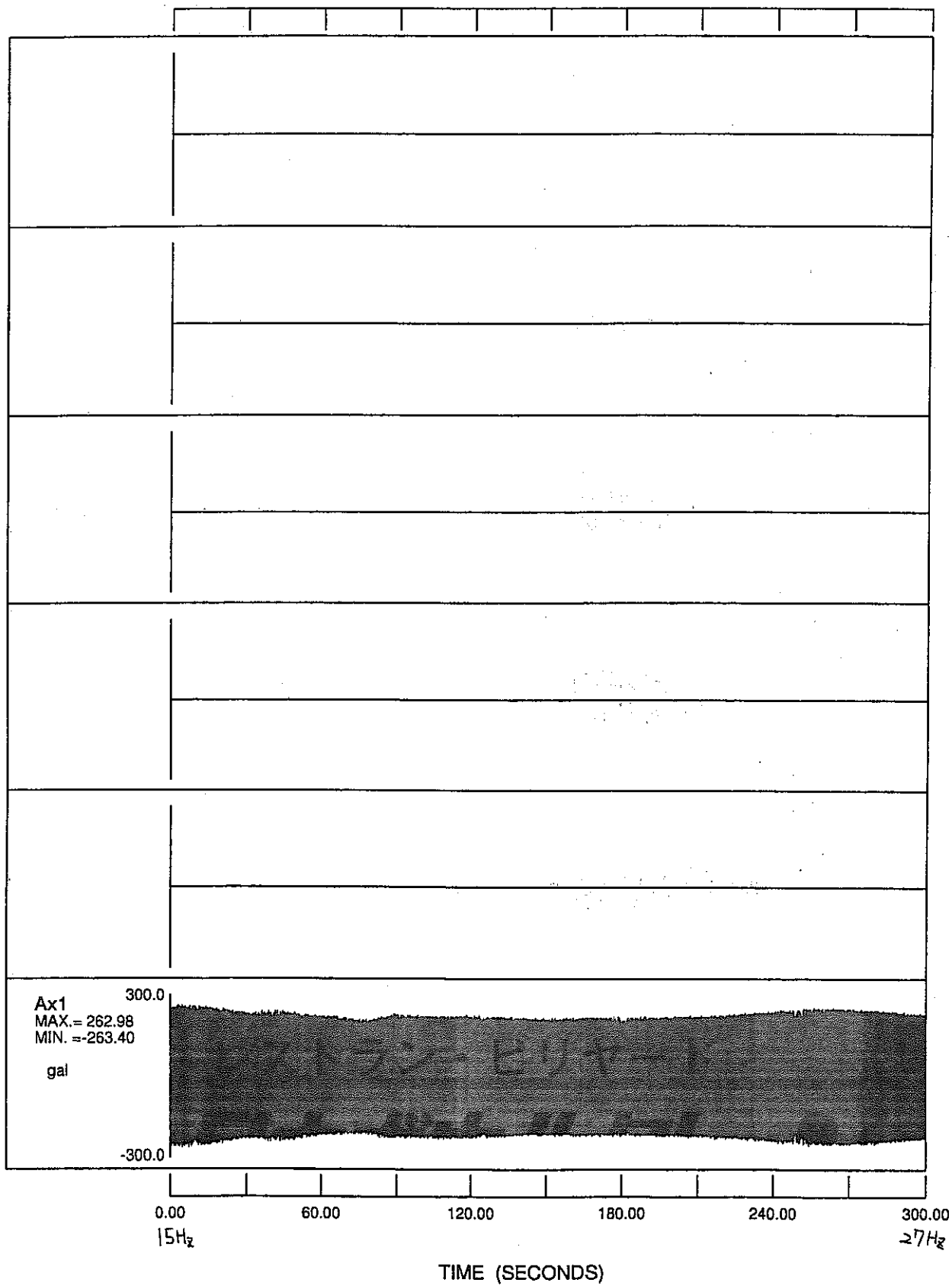
反力時刻歴波形 (キ+ツ7° 0.4mm、180gal、スイ-7° Up)

G1-3



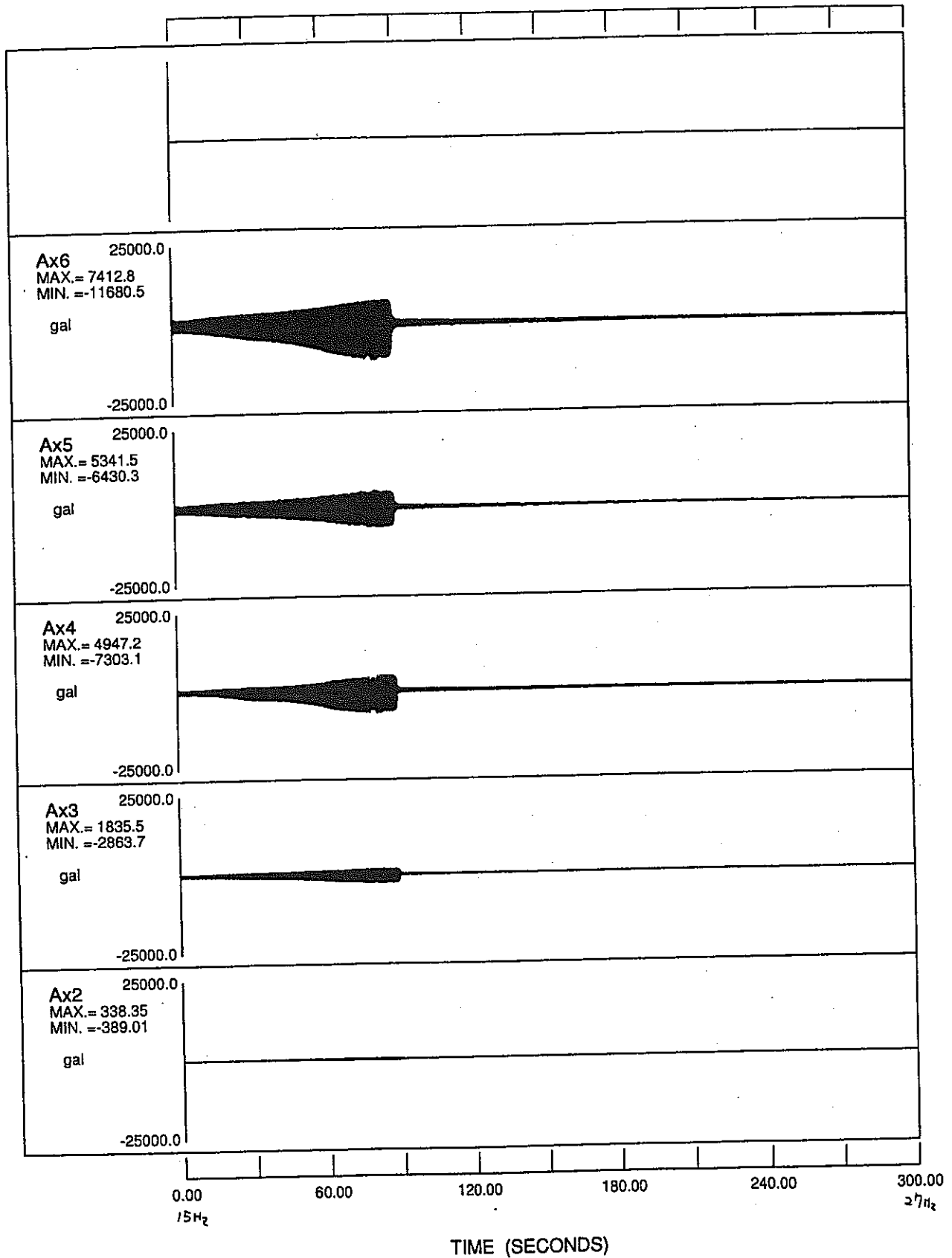
ひずみ時刻歴波形 (キップ $0.4\text{mm}$ 、 $180\text{gal}$ 、スイフ $^{\circ}\text{Up}$ )

G1-4U2



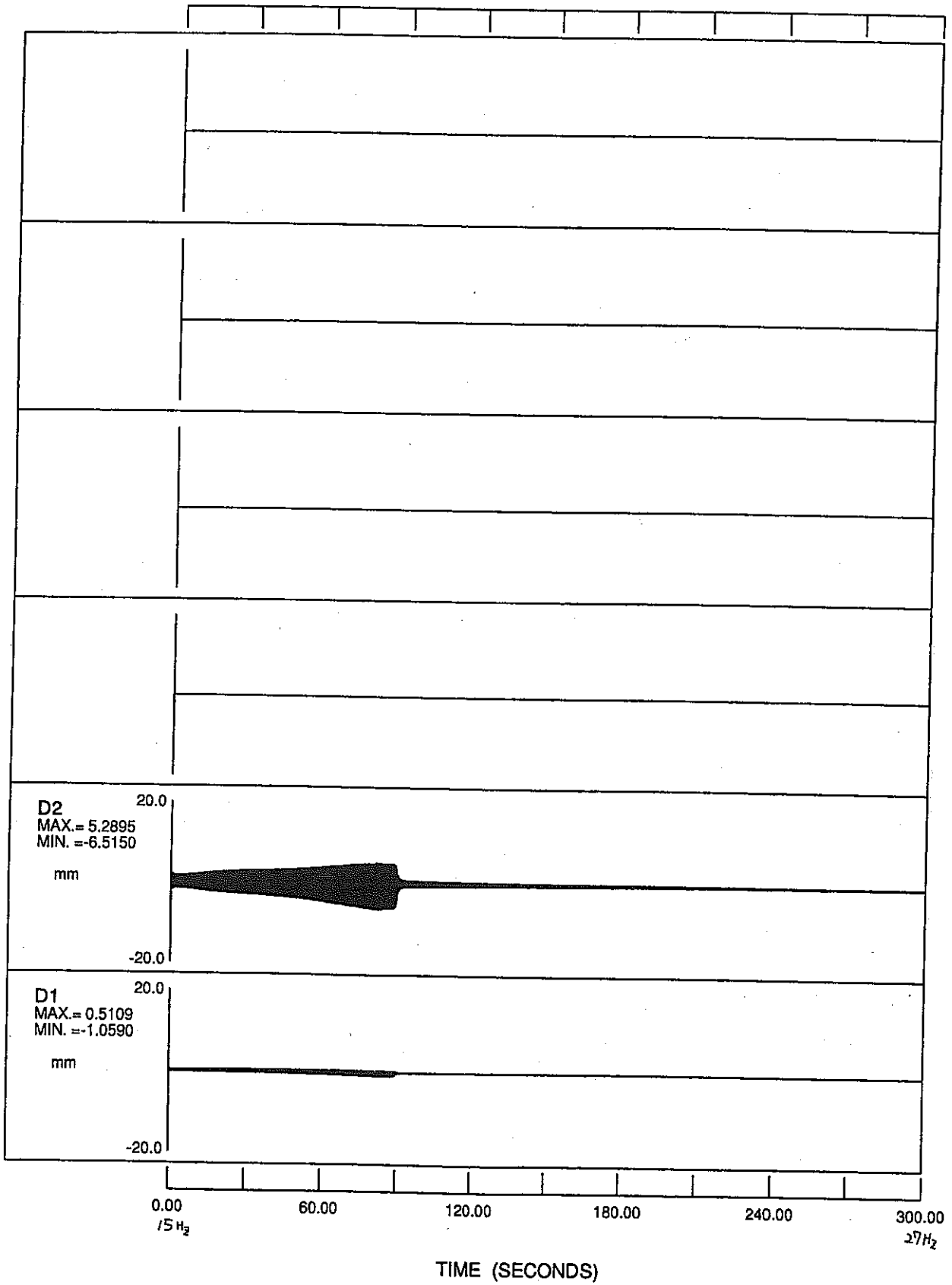
加振加速度時刻歴波形 (キック $\gamma$ ° 0.4mm、240gal、スィー $\gamma$ ° Up)

G1-4U2



加速度時刻歴波形 (キック $\phi$  0.4mm、240gal、スイーブ $\phi$  Up)

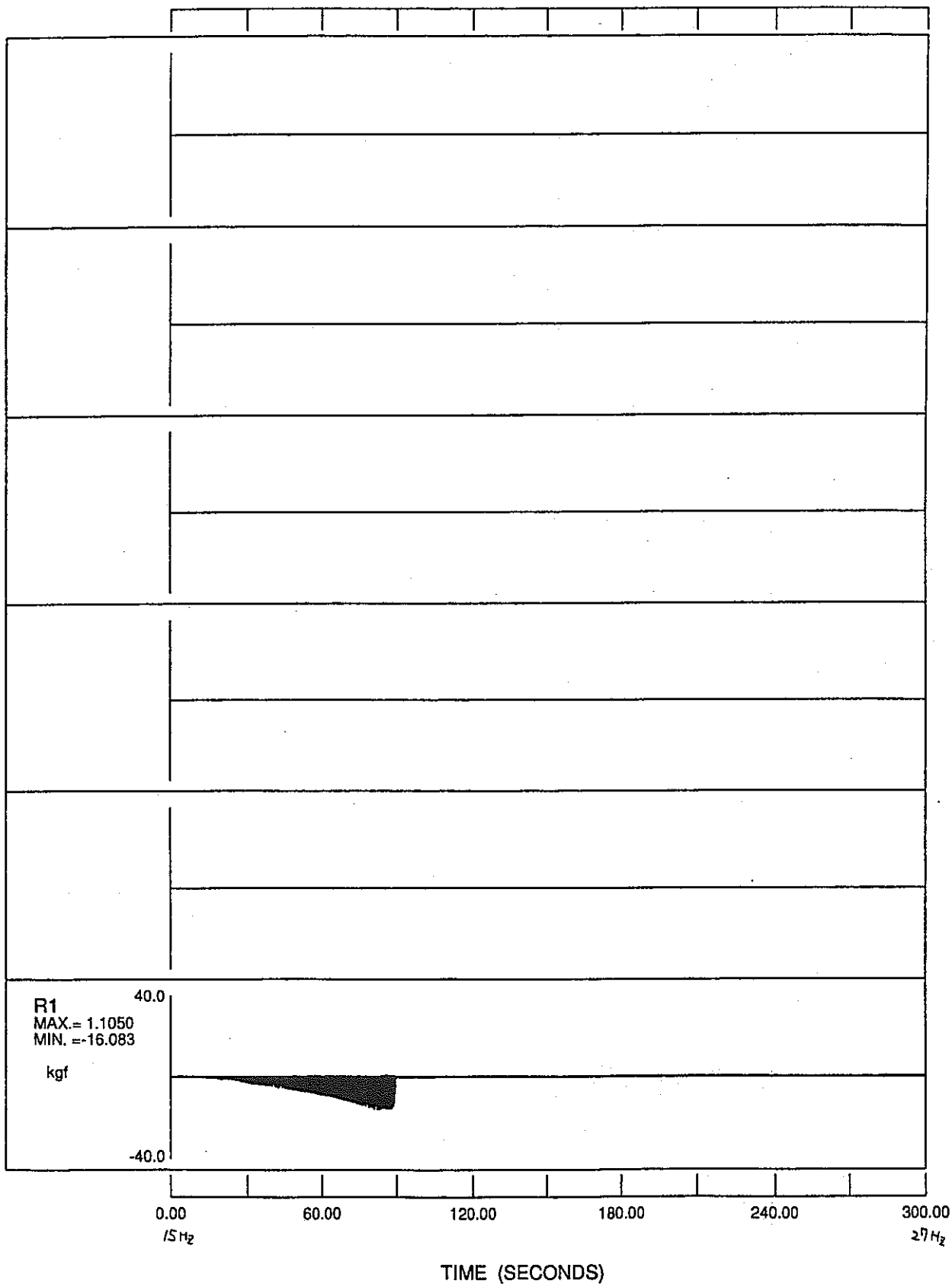
G1-4U2



変位時刻歴波形 (キップ 0.4mm、240gal、スイブ Up)

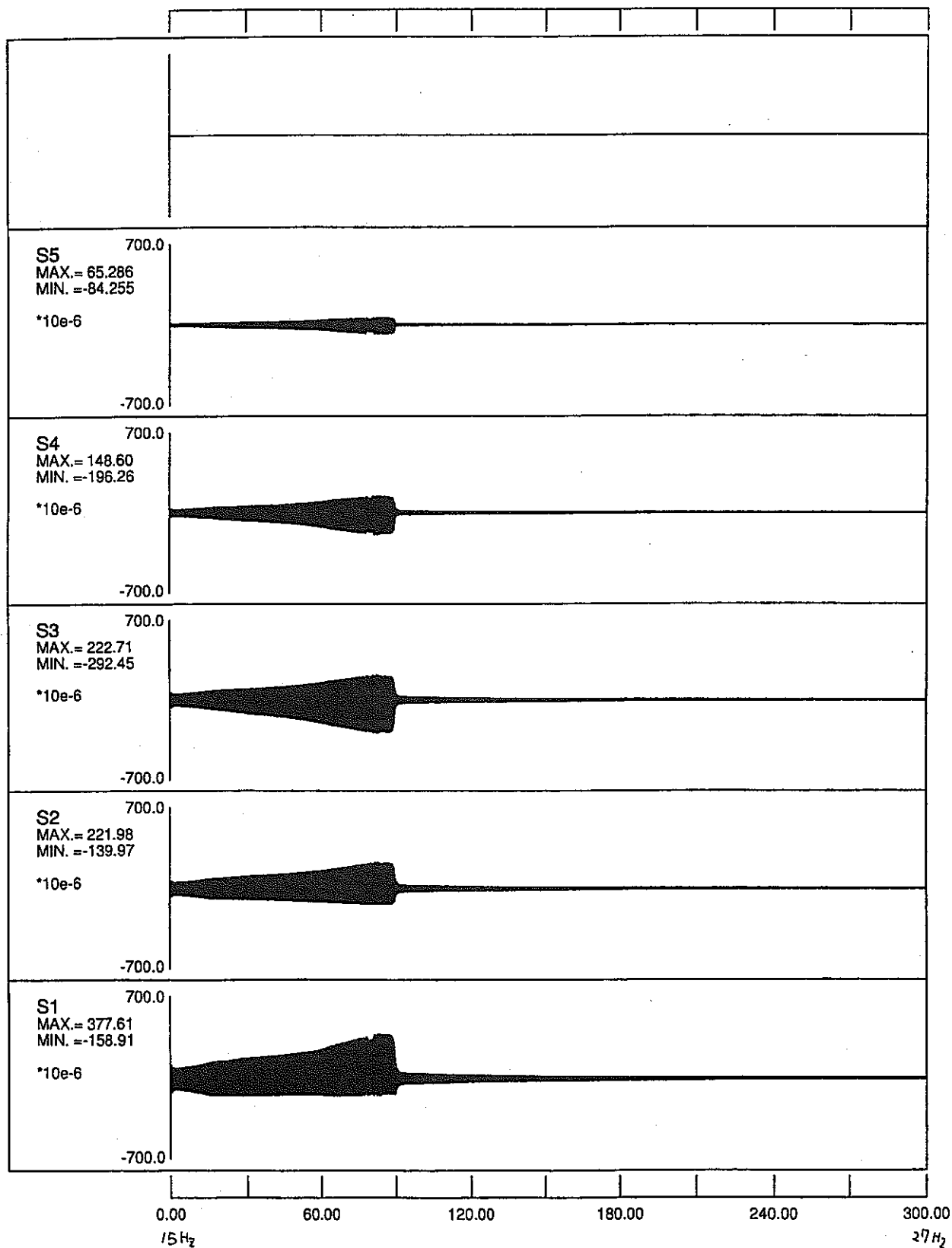


G1-4U2



反力時刻歴波形 (キップ 0.4mm、240gal、スイ-7° Up)

G1-4U2

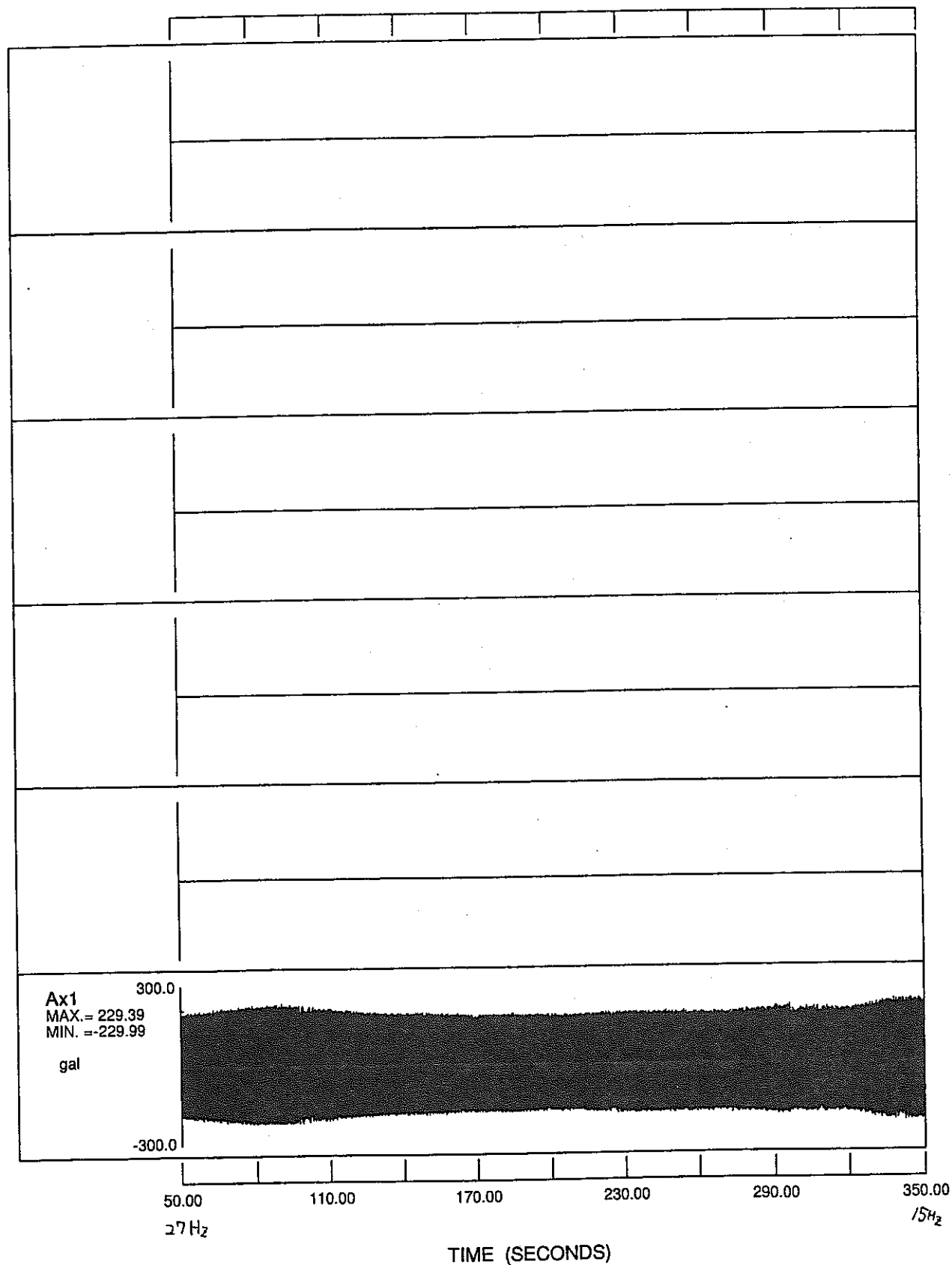


0.00 60.00 120.00 180.00 240.00 300.00  
 15 Hz 27 Hz

TIME (SECONDS)

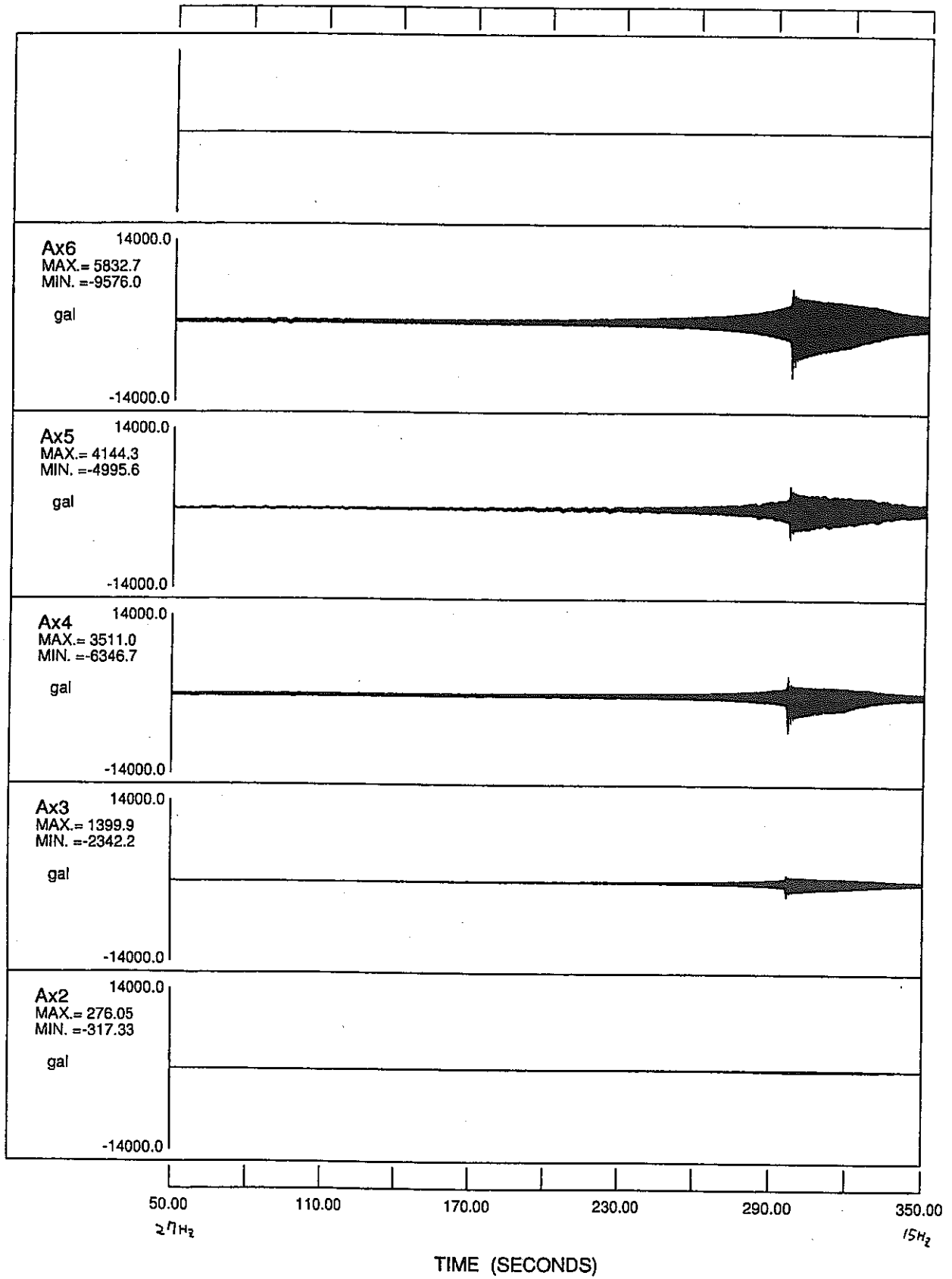
ひずみ時刻歴波形 (キップ 0.4mm、240gal、スイフト Up)

G1-4D3



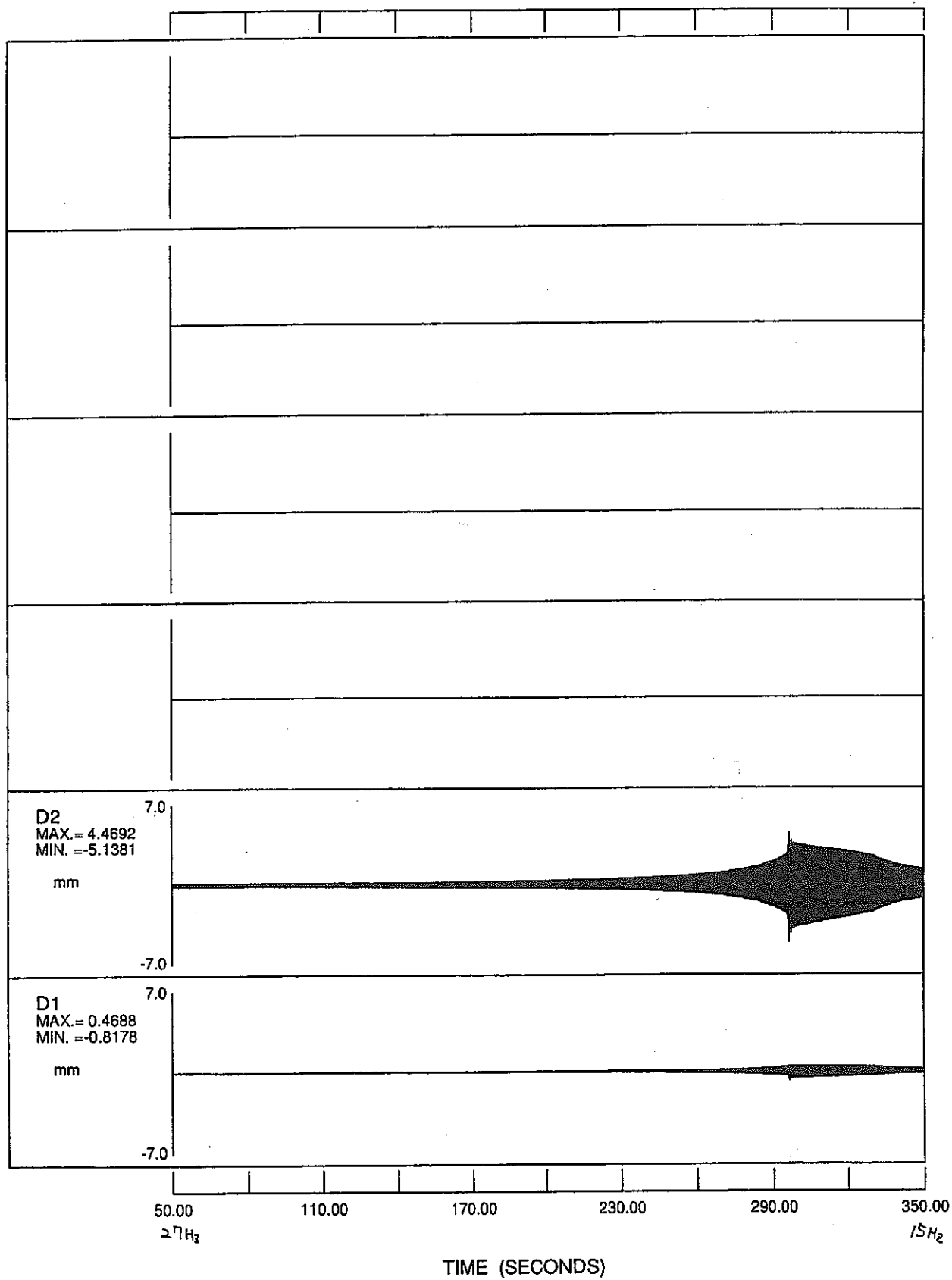
加振加速度時刻歴波形 (キヤット° 0.4mm、240gal、スイ-7° Down)

G1-4D3



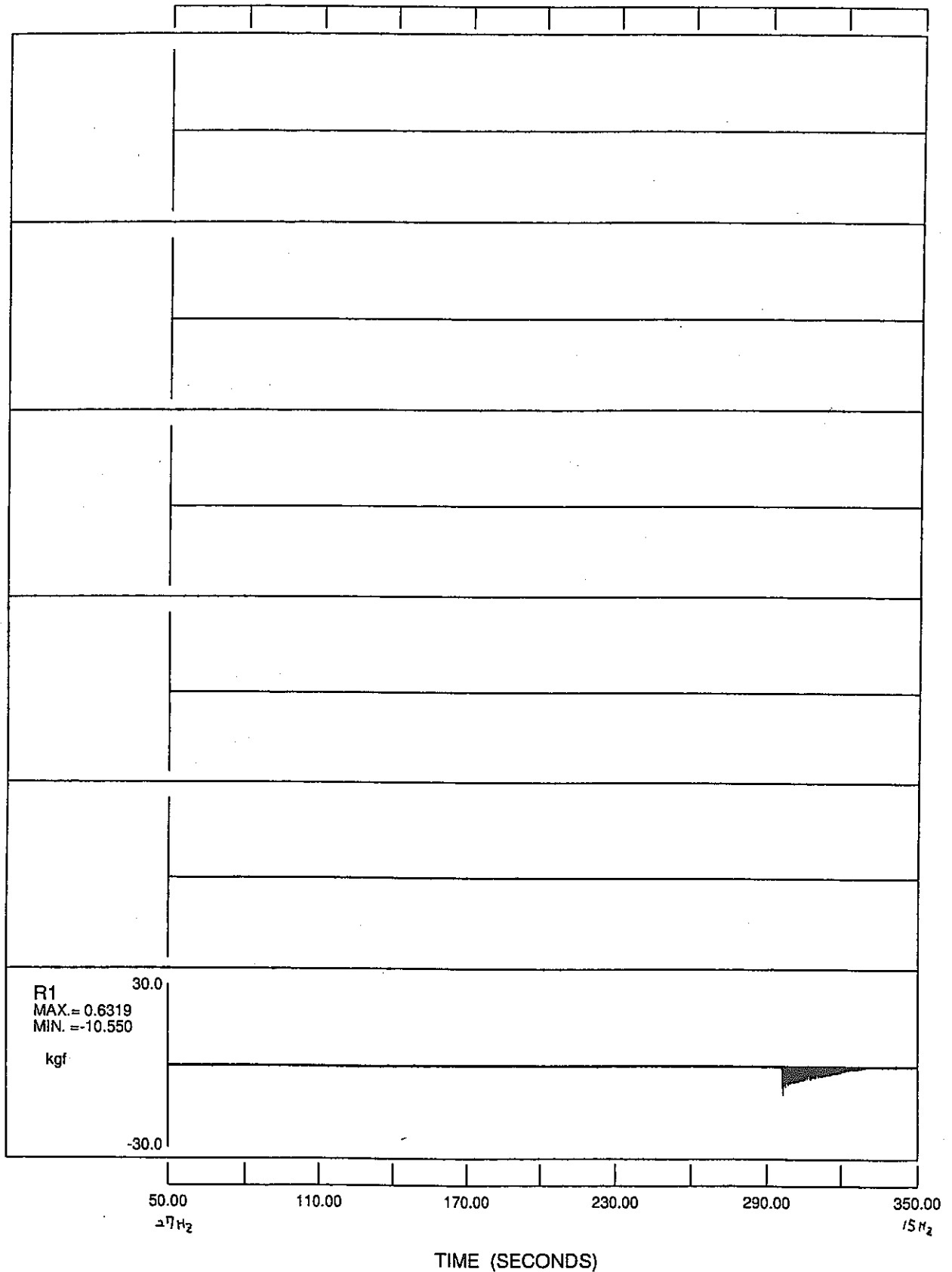
加速度時刻歴波形 (キ ャブ 0.4mm、240gal、スイ-7° Down)

G1-4D3



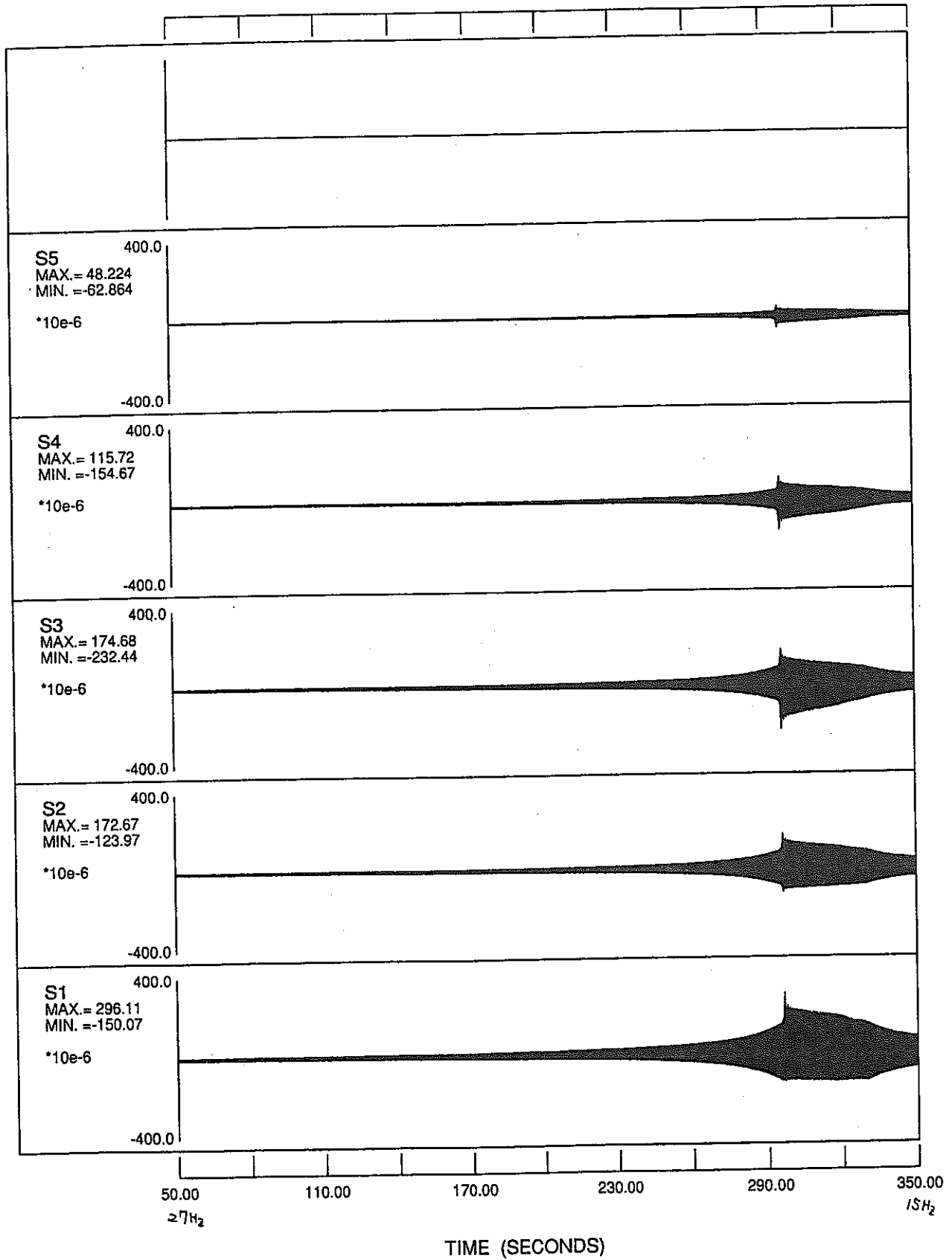
変位時刻歴波形 (※+7° 0.4mm、240gal、スィ-7° Down)

G1-4D3



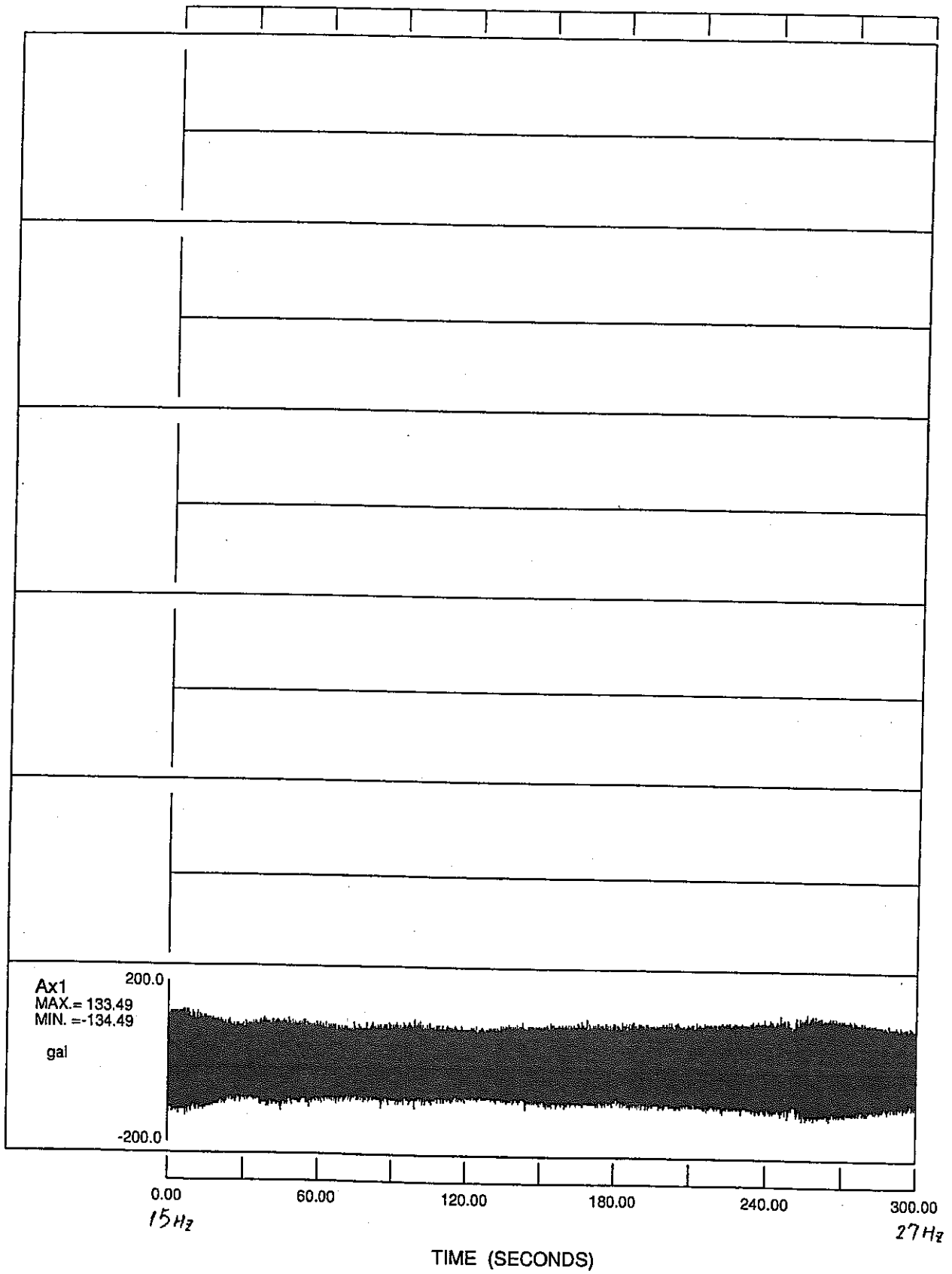
反力時刻歴波形 (キップ 0.4mm、240gal、スロー Down)

G1-4D3



ひずみ時刻歴波形 (キヤッチ 0.4mm、240gal、スイ-7° Down)

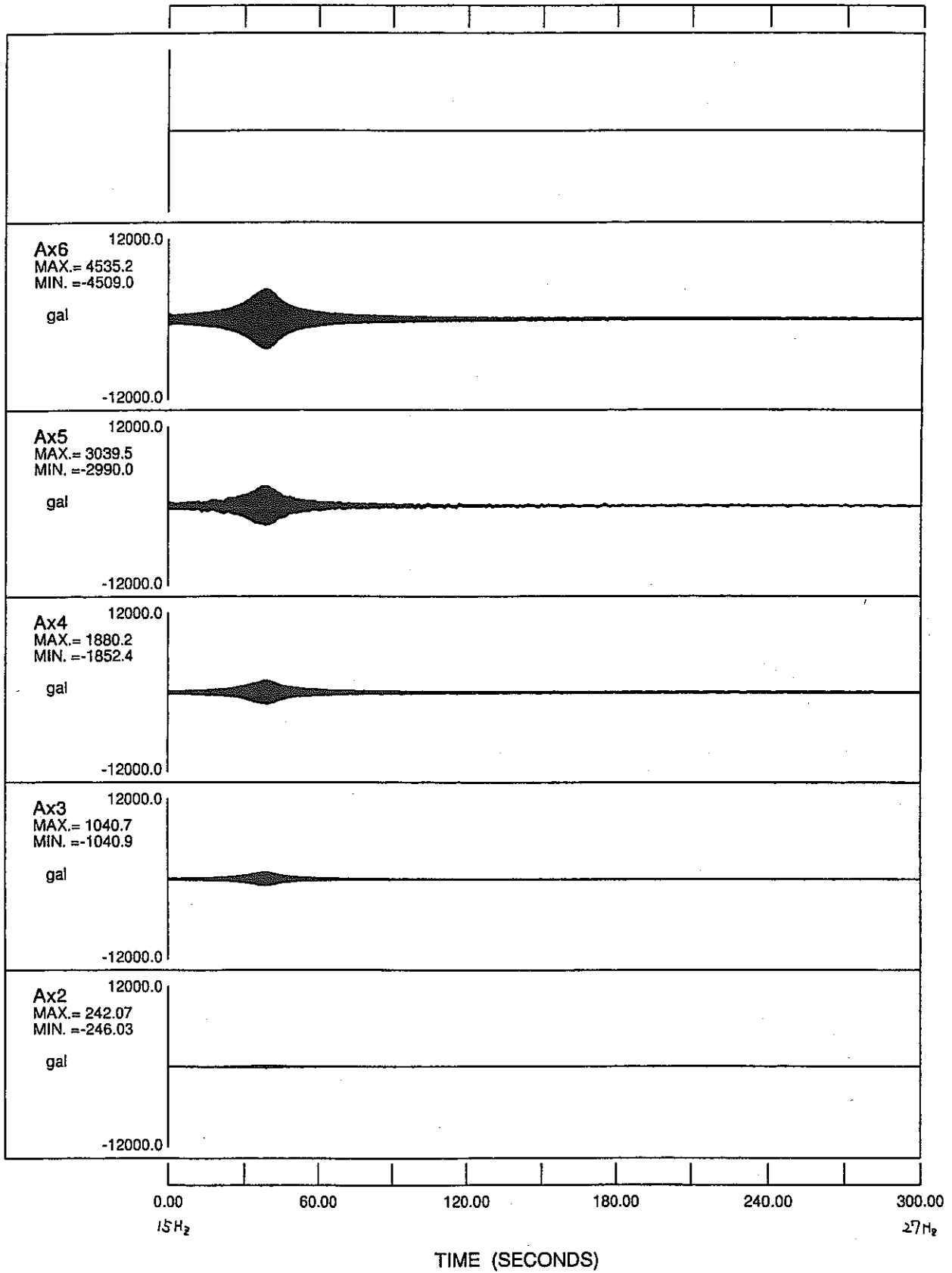
G2-2



加振加速度時刻歴波形 (キ ャッ7° 0.8mm、120gal、スイ-7° Up)

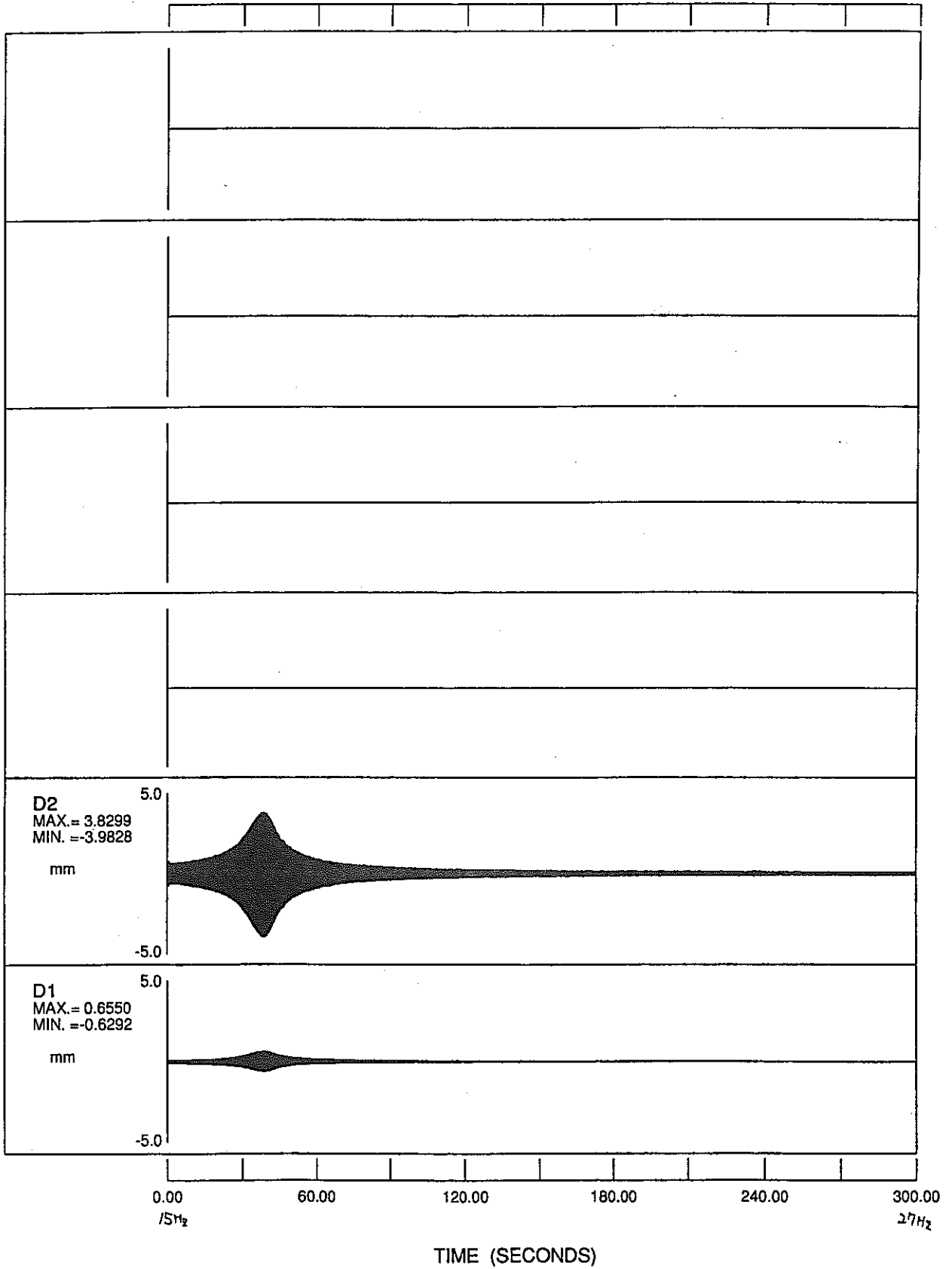


G2-2



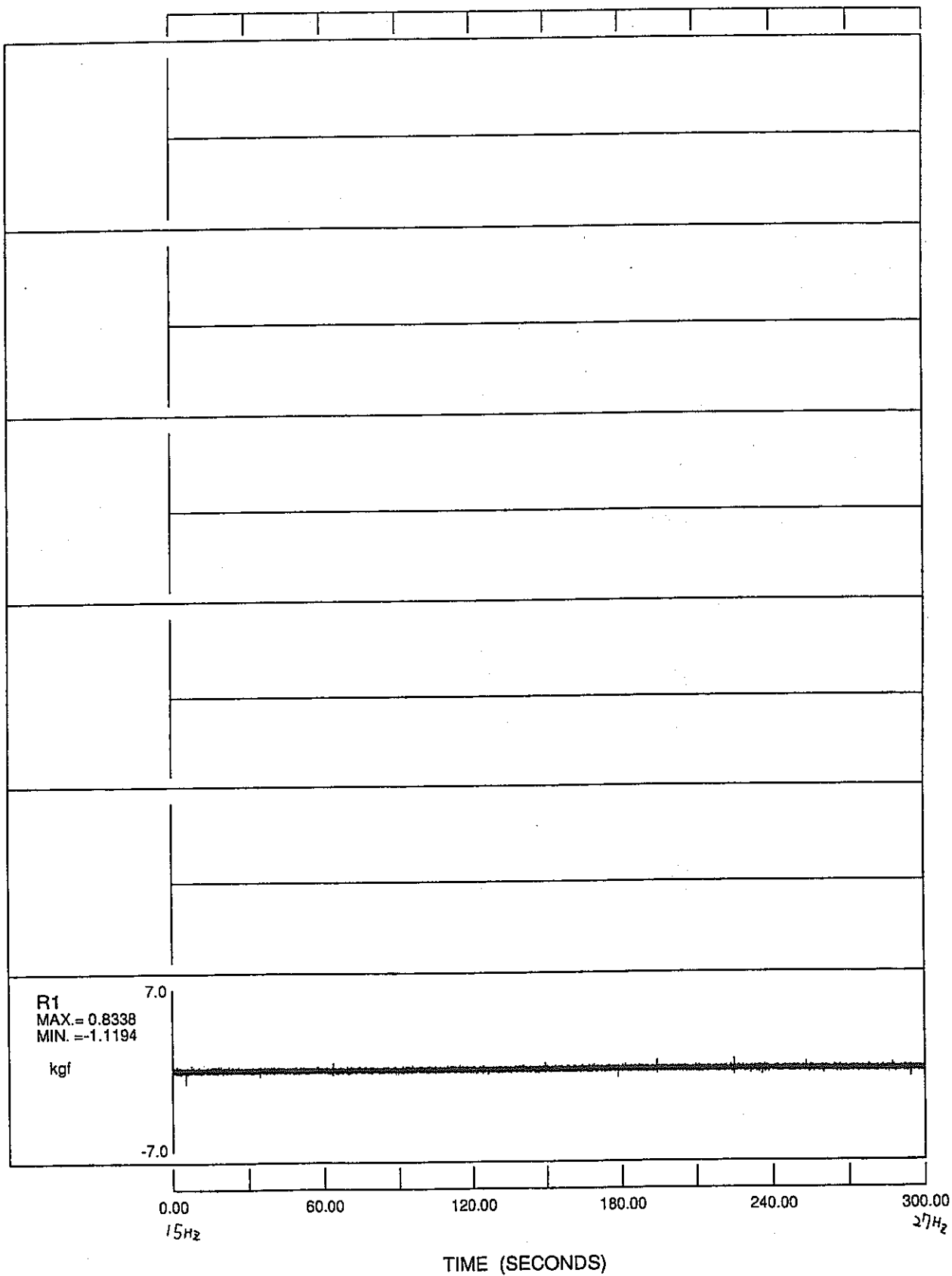
加速度時刻歴波形 (ｷｯﾌﾟﾙ 0.8mm、120gal、ｽｲｰﾌﾟ Up)

G2-2



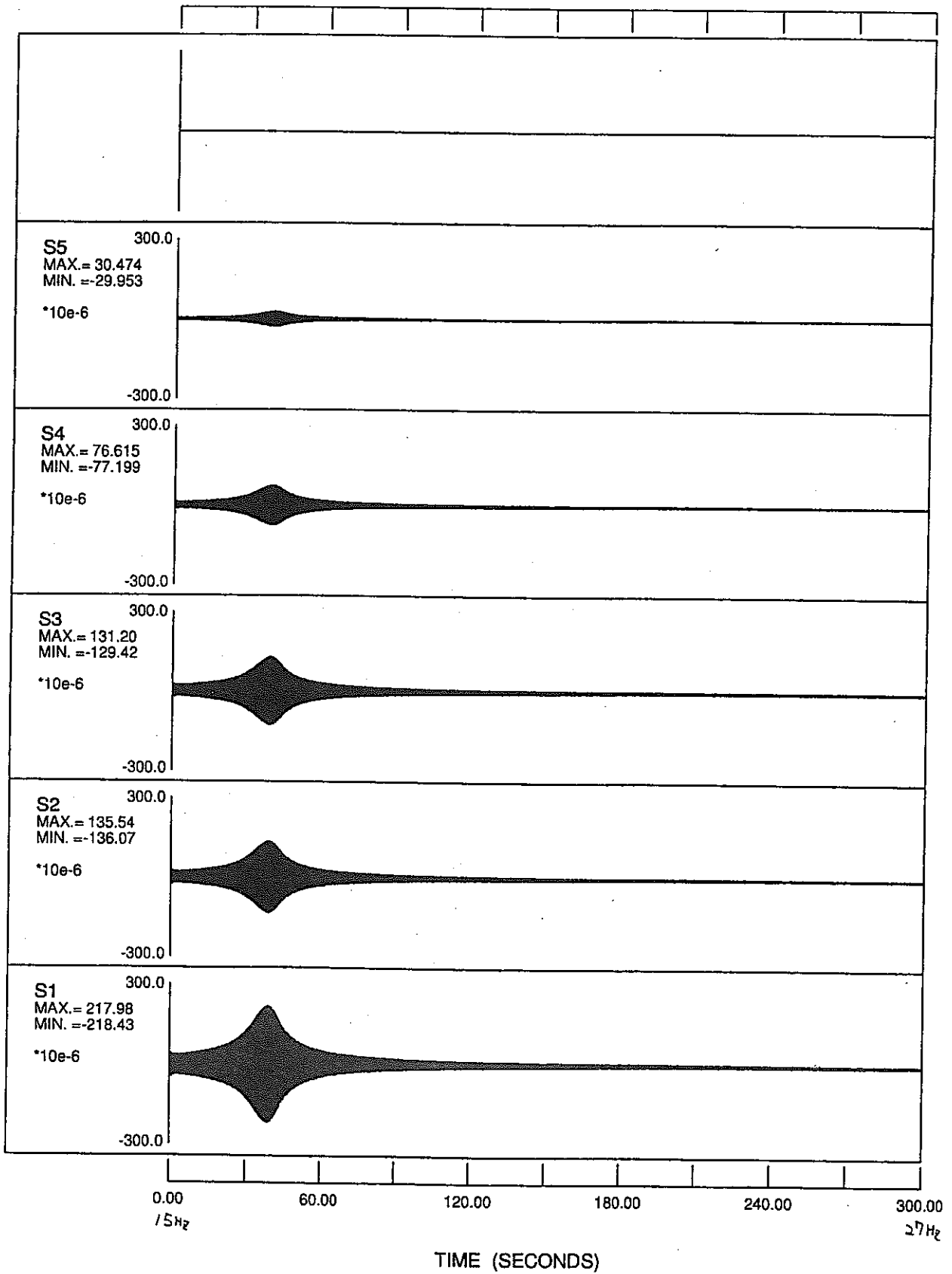
変位時刻歴波形 (ギョウツプ 0.8mm、120gal、スイブ Up)

G2-2



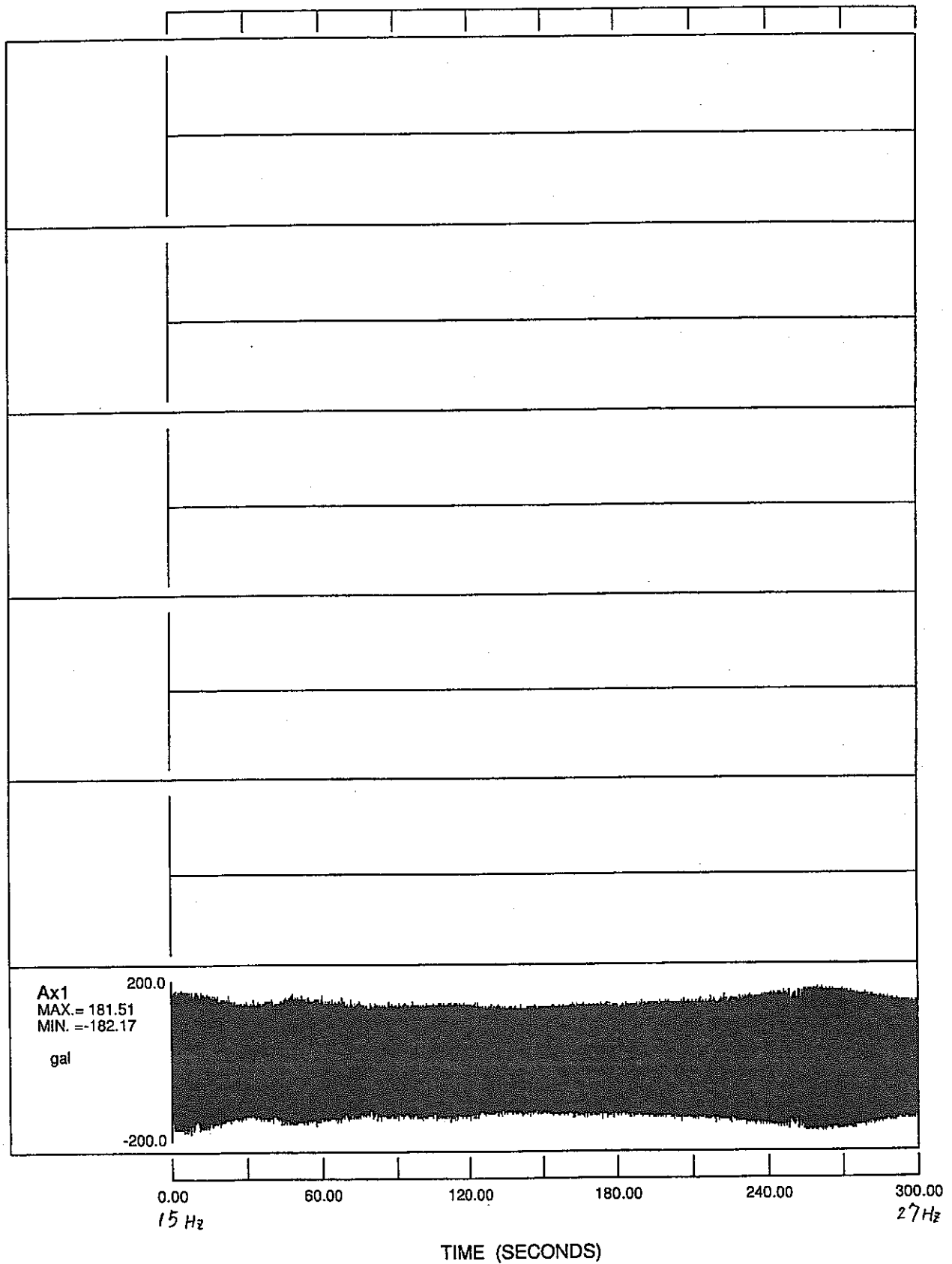
反力時刻歴波形 (キップ<sup>0</sup> 0.8mm、120gal、ス1-7° Up)

G2-2



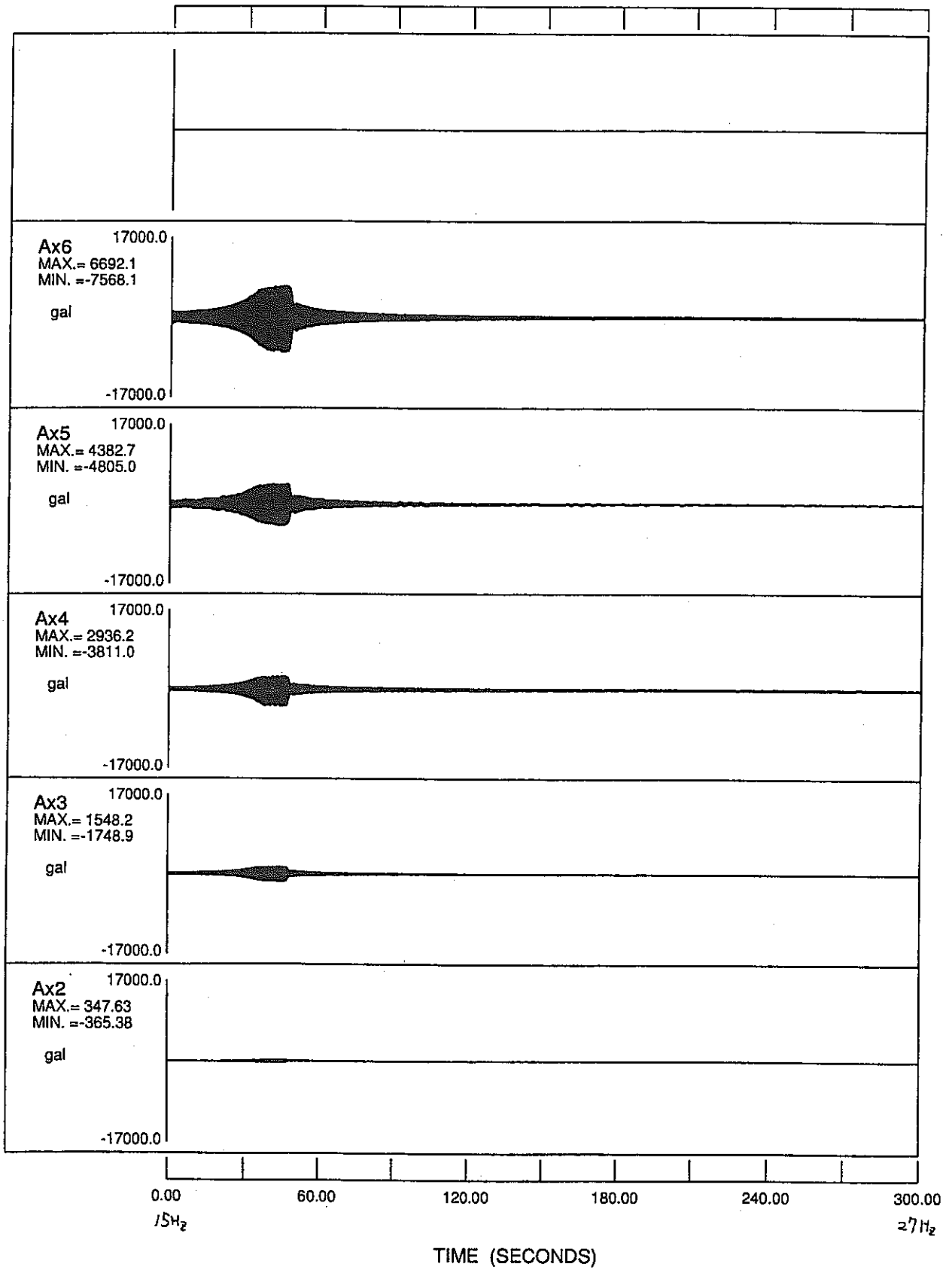
ひずみ時刻歴波形 (ギヤップ° 0.8mm、120gal、スイプ Up)

G2-3



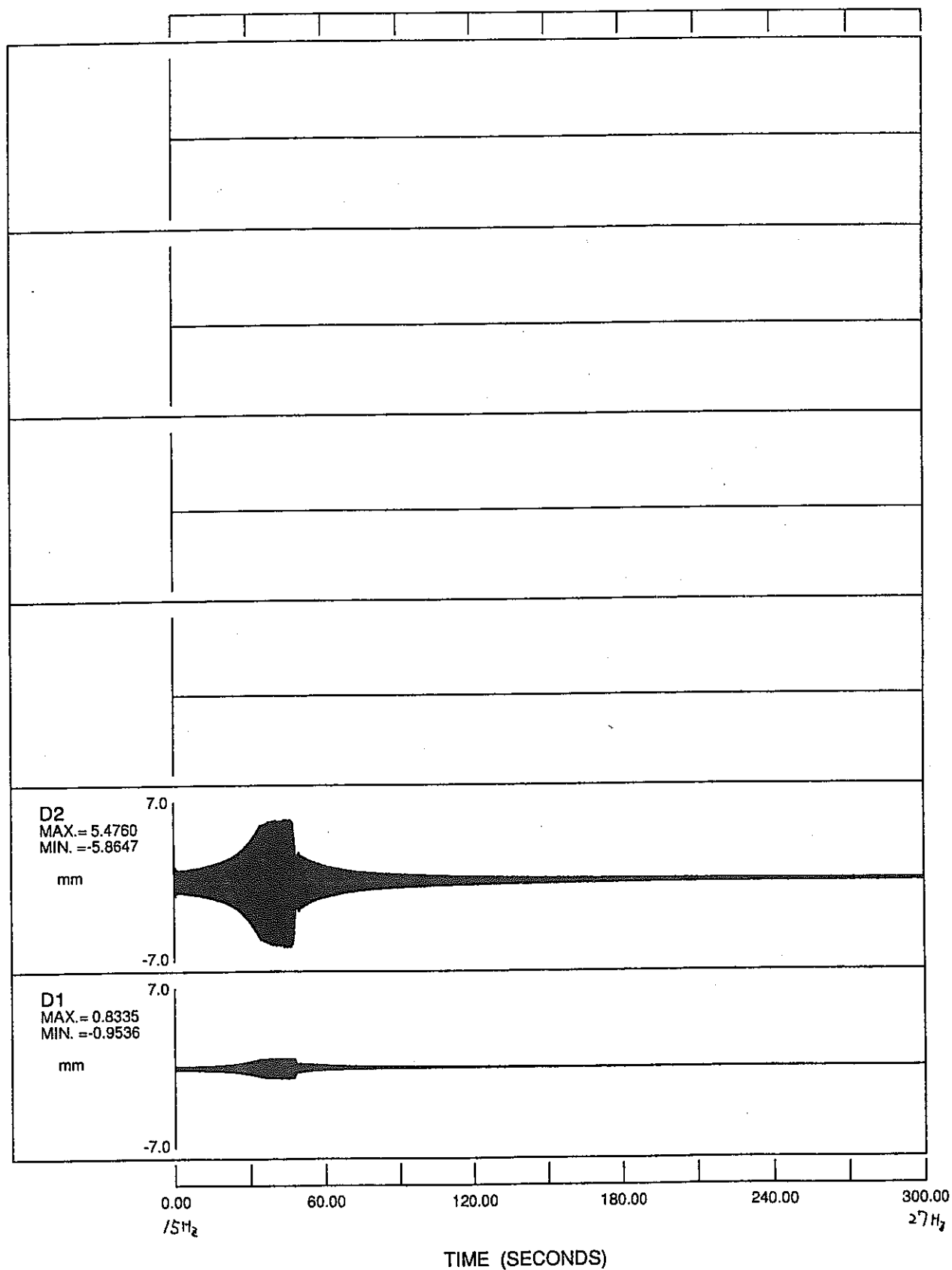
加振加速度時刻歴波形 (振幅 $\phi$  0.8mm、180gal、 $\phi$ -7° Up)

G2-3



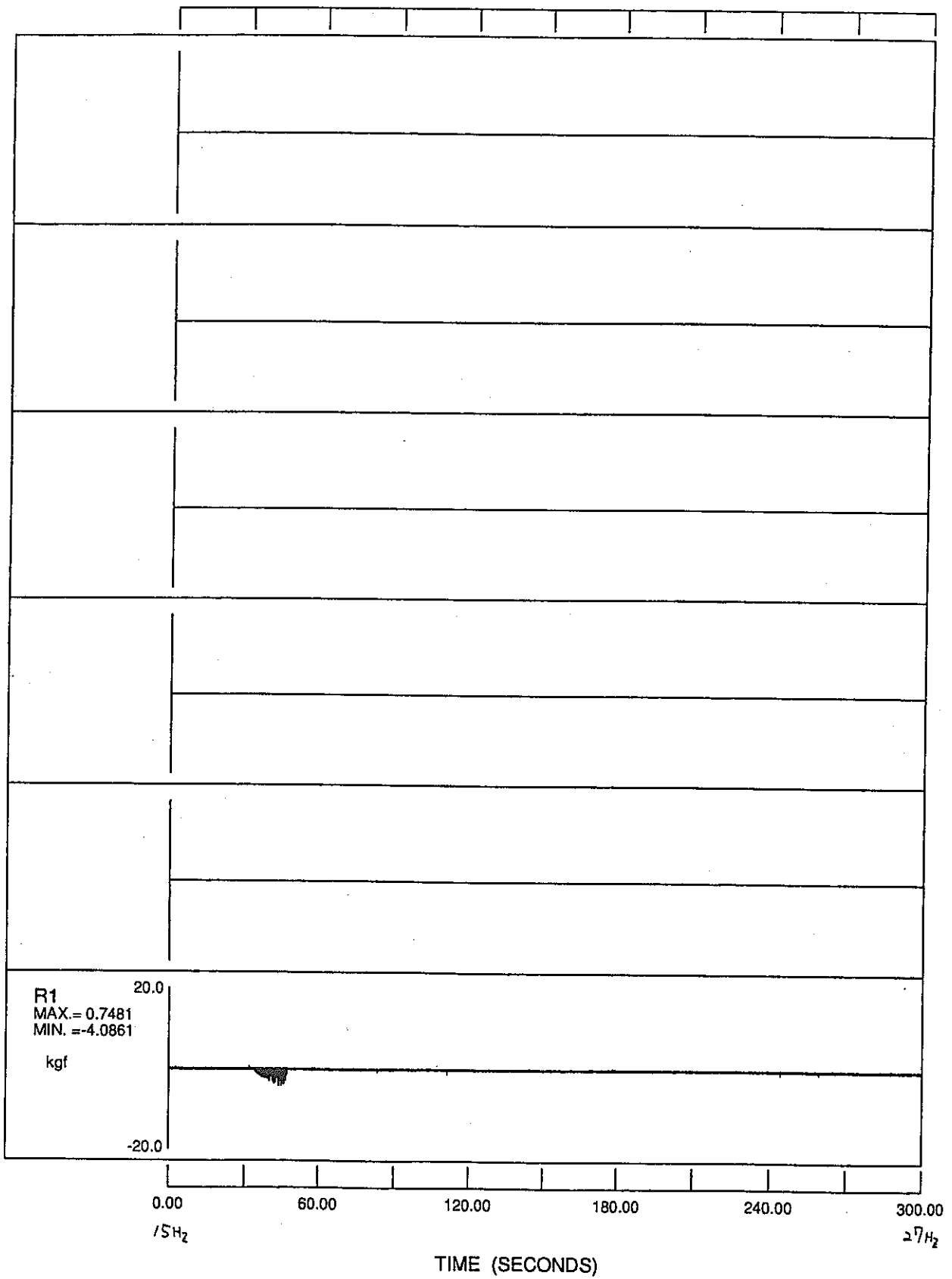
加速度時刻歴波形 (キップ<sup>0</sup> 0.8mm、180gal、スイフ<sup>0</sup> Up)

G2-3



変位時刻歴波形 (キャップ 0.8mm、180gal、スイフ Up)

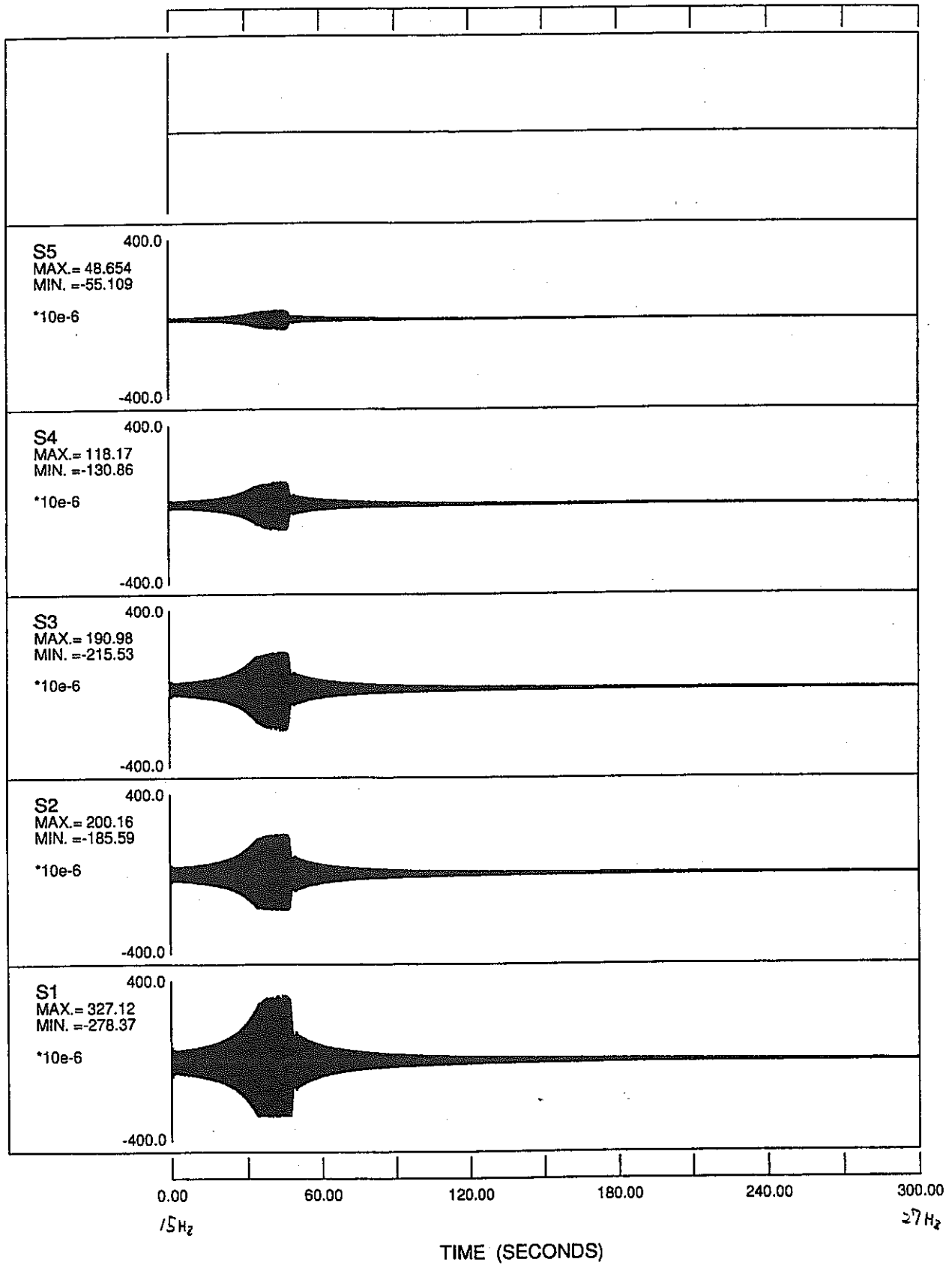
G2-3



反力時刻歴波形 (キップ7° 0.8mm、180gal、スイブ7° Up)

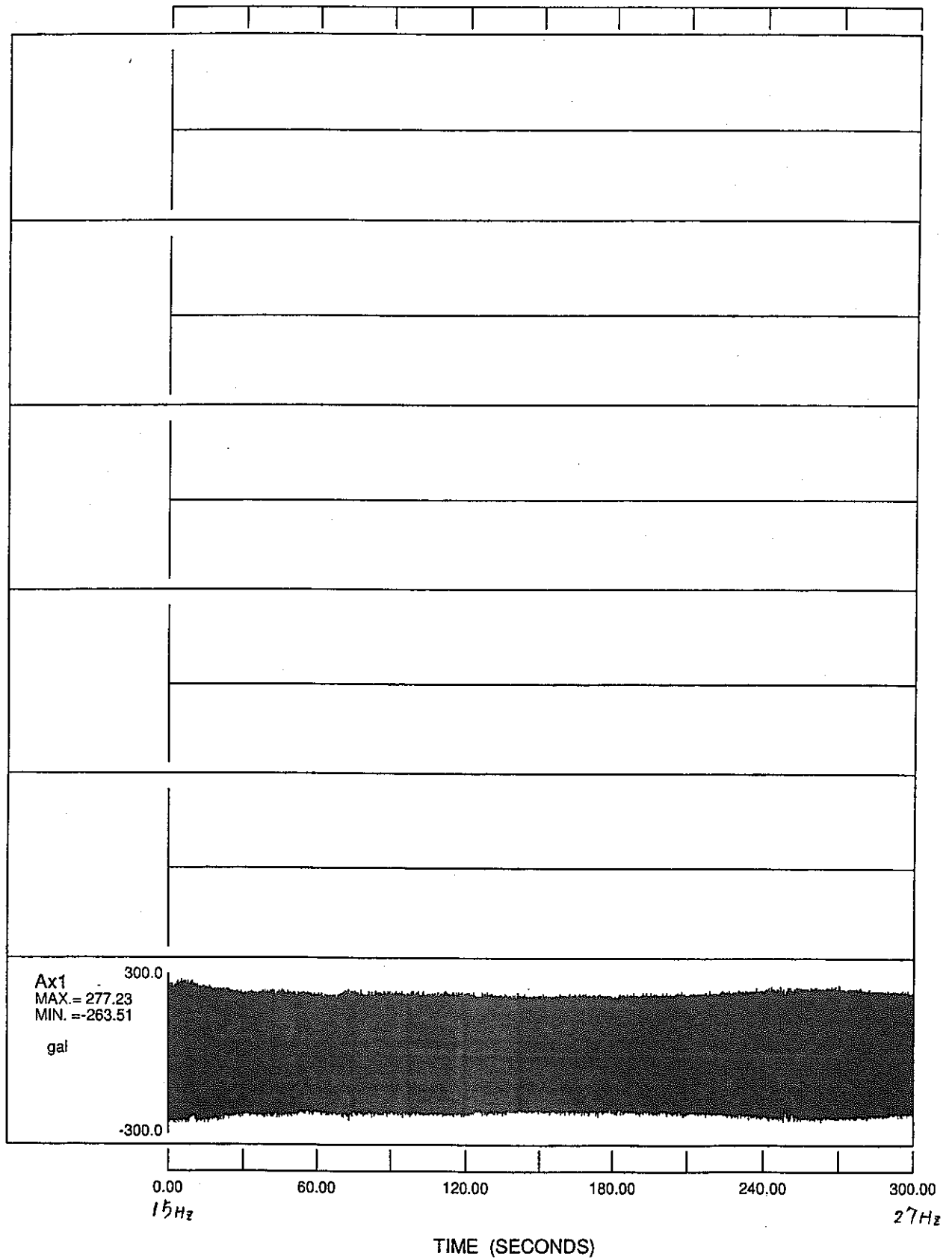


G2-3



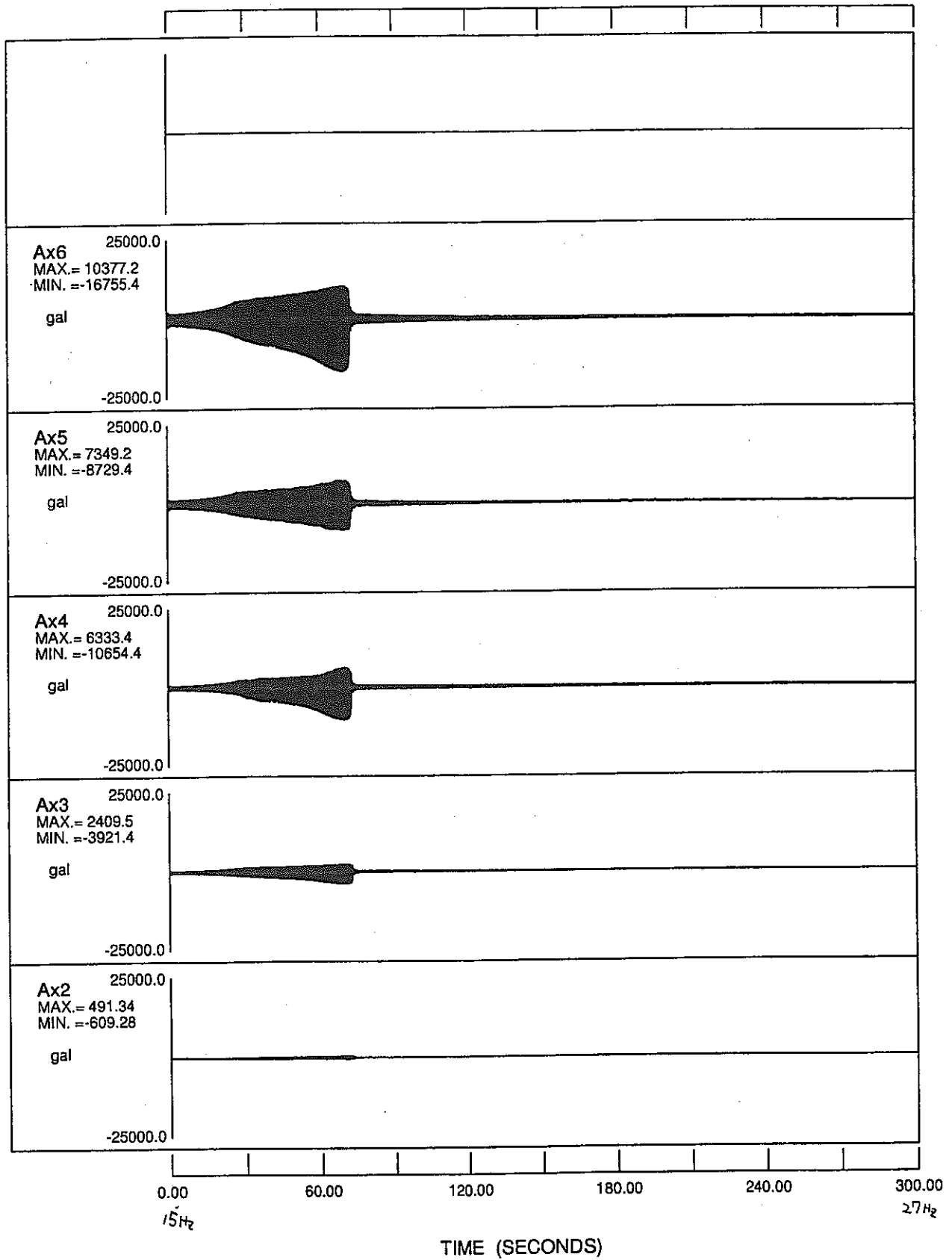
ひずみ時刻歴波形 (キック7° 0.8mm、180gal、スイ7° Up)

G2-4



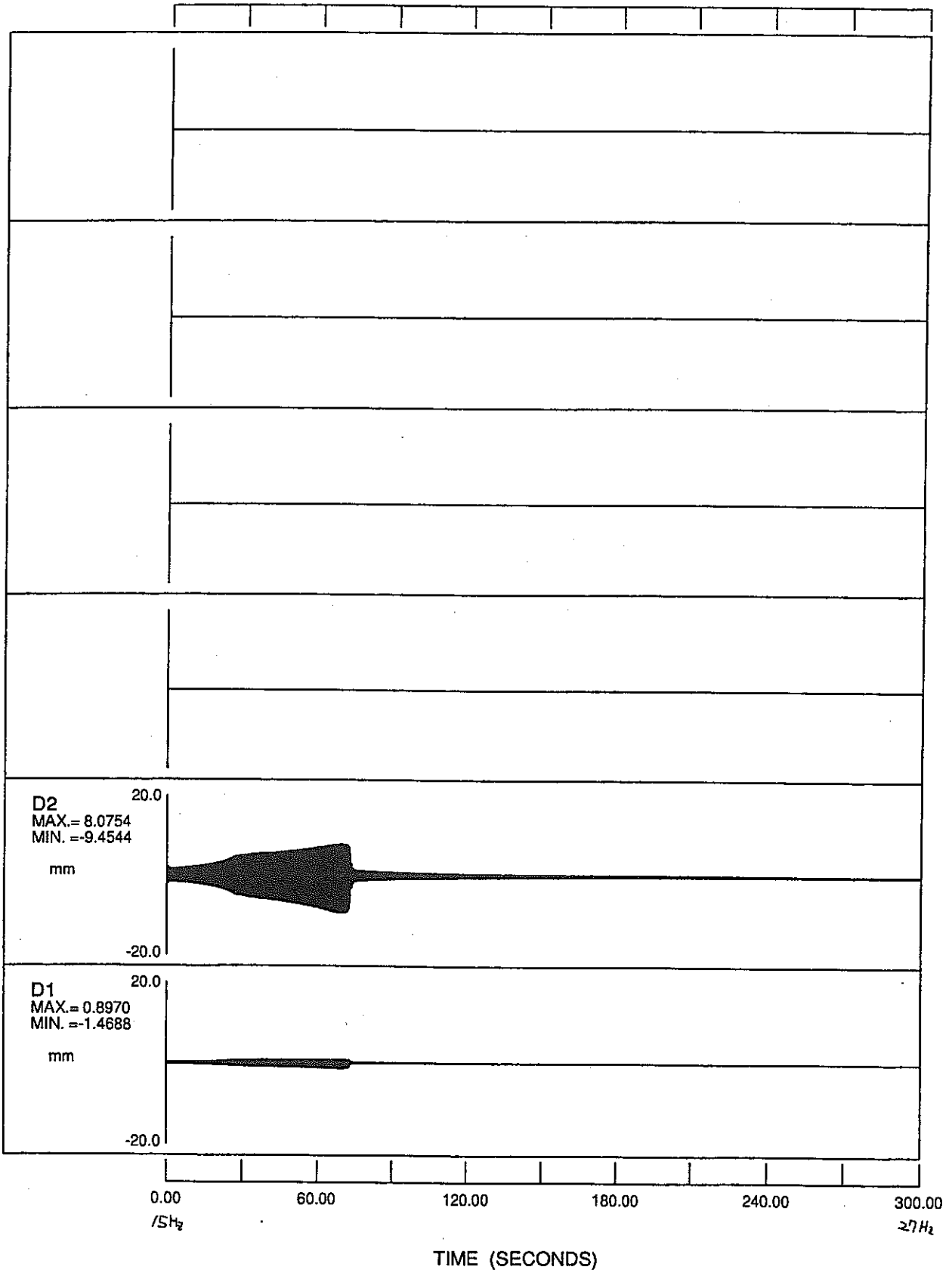
加振加速度時刻歴波形 (キヤッ7° 0.8mm、240gal、スィ-7° Up)

G2-4



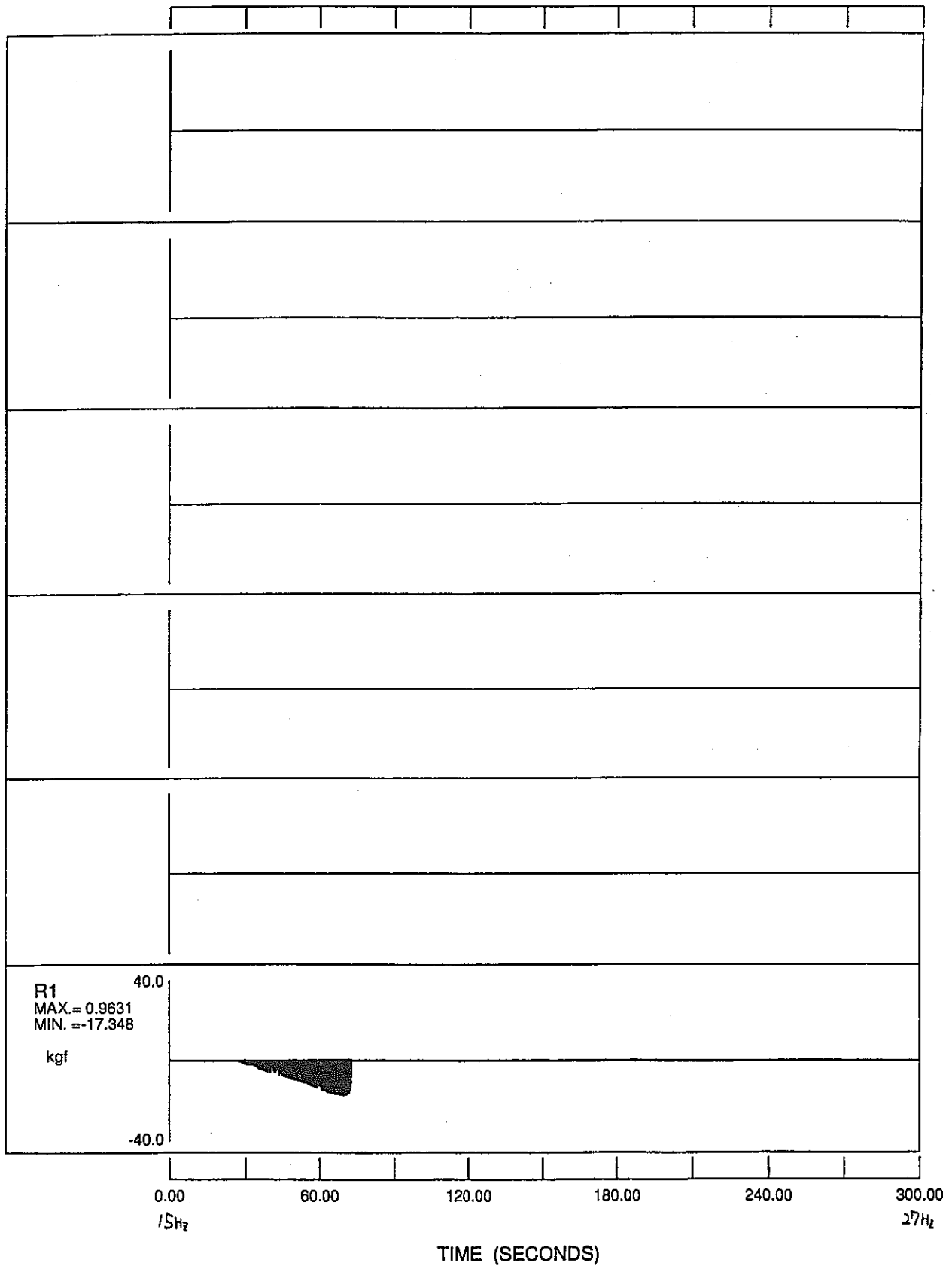
加速度時刻歴波形 (キック幅° 0.8mm、240gal、スイープ Up)

G2-4



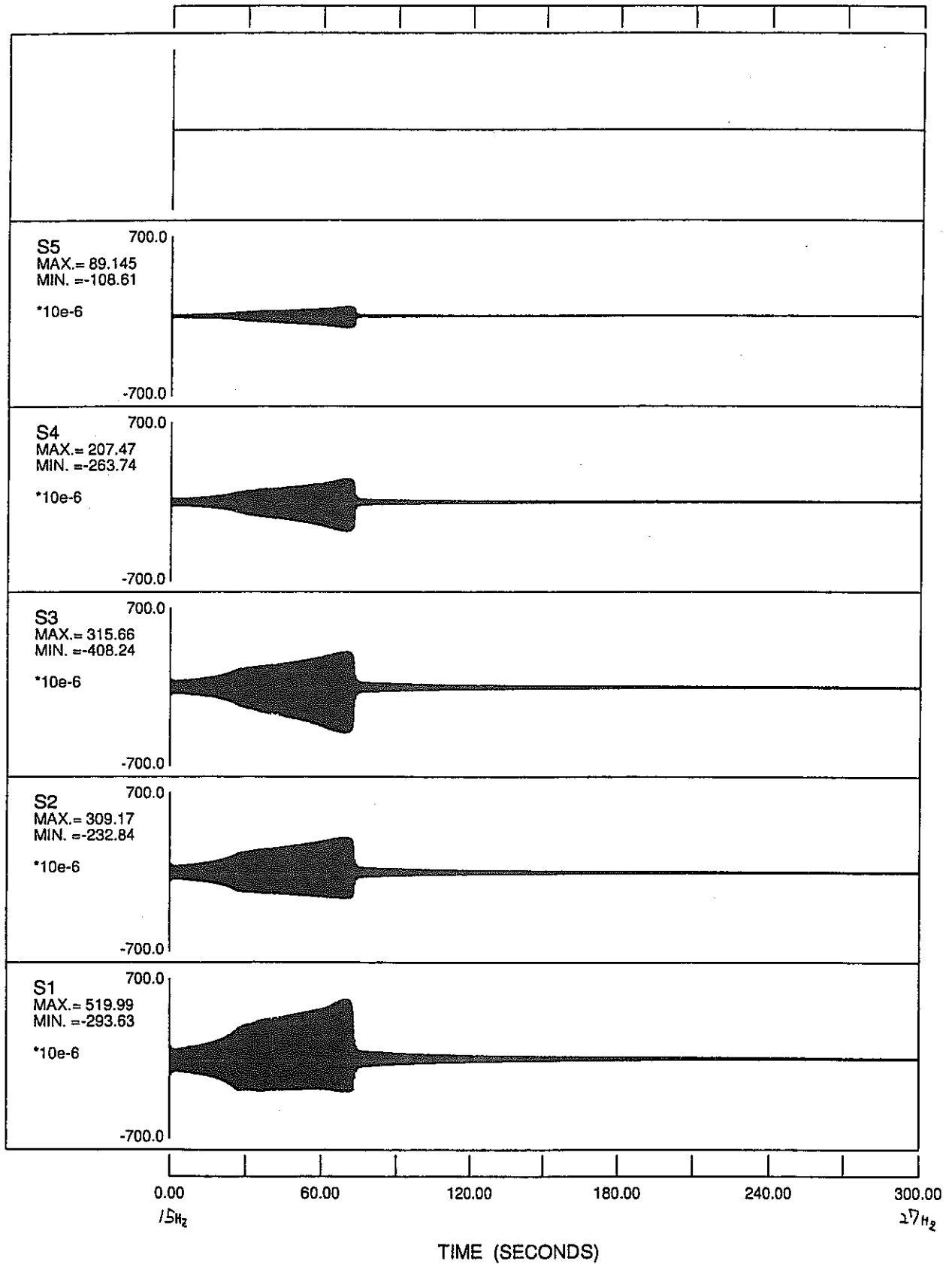
変位時刻歴波形 (キック 0.8mm、240gal、スイブ Up)

G2-4



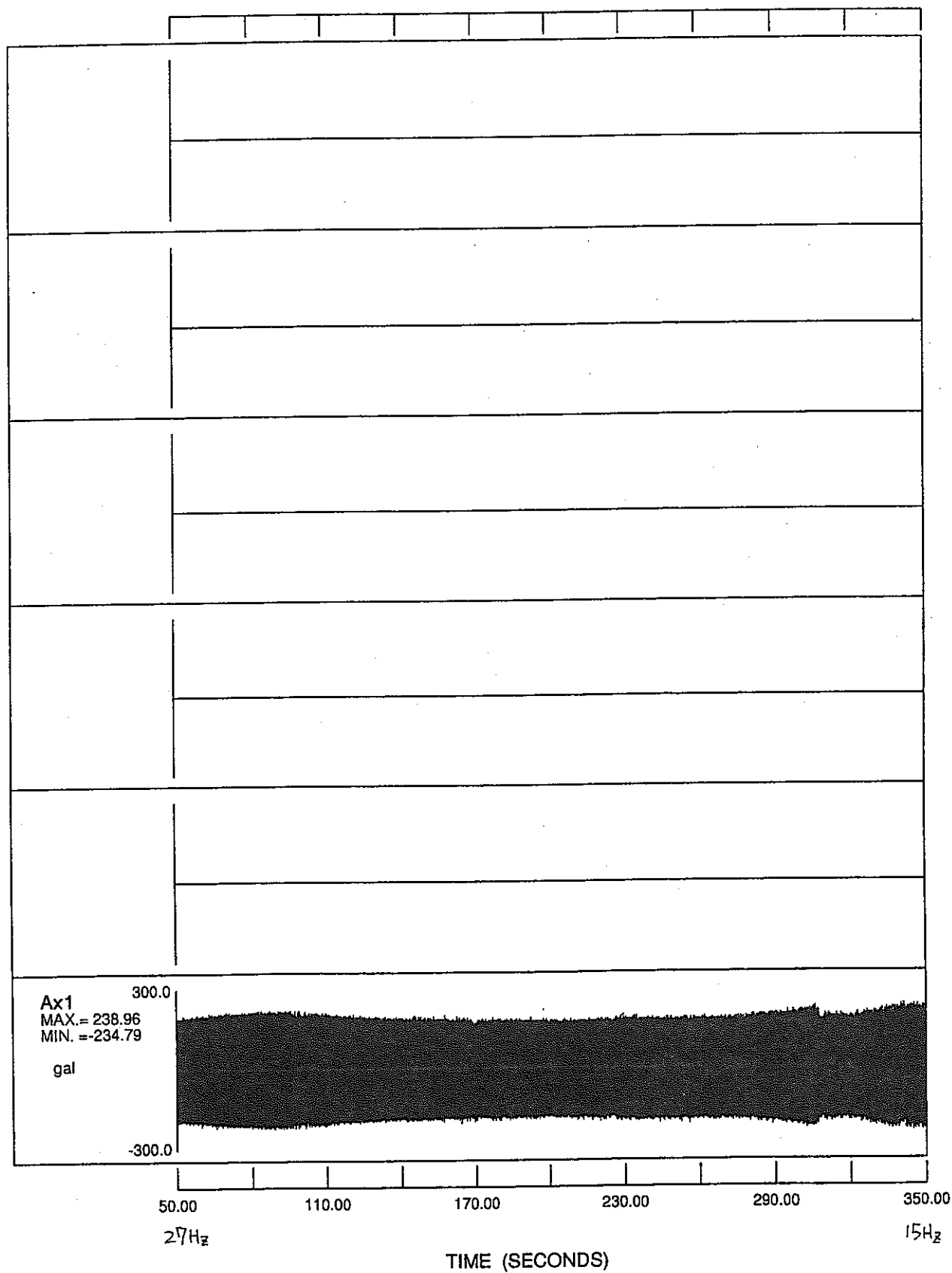
反力時刻歴波形 (キップ 0.8mm、240gal、スイブ Up)

G2-4



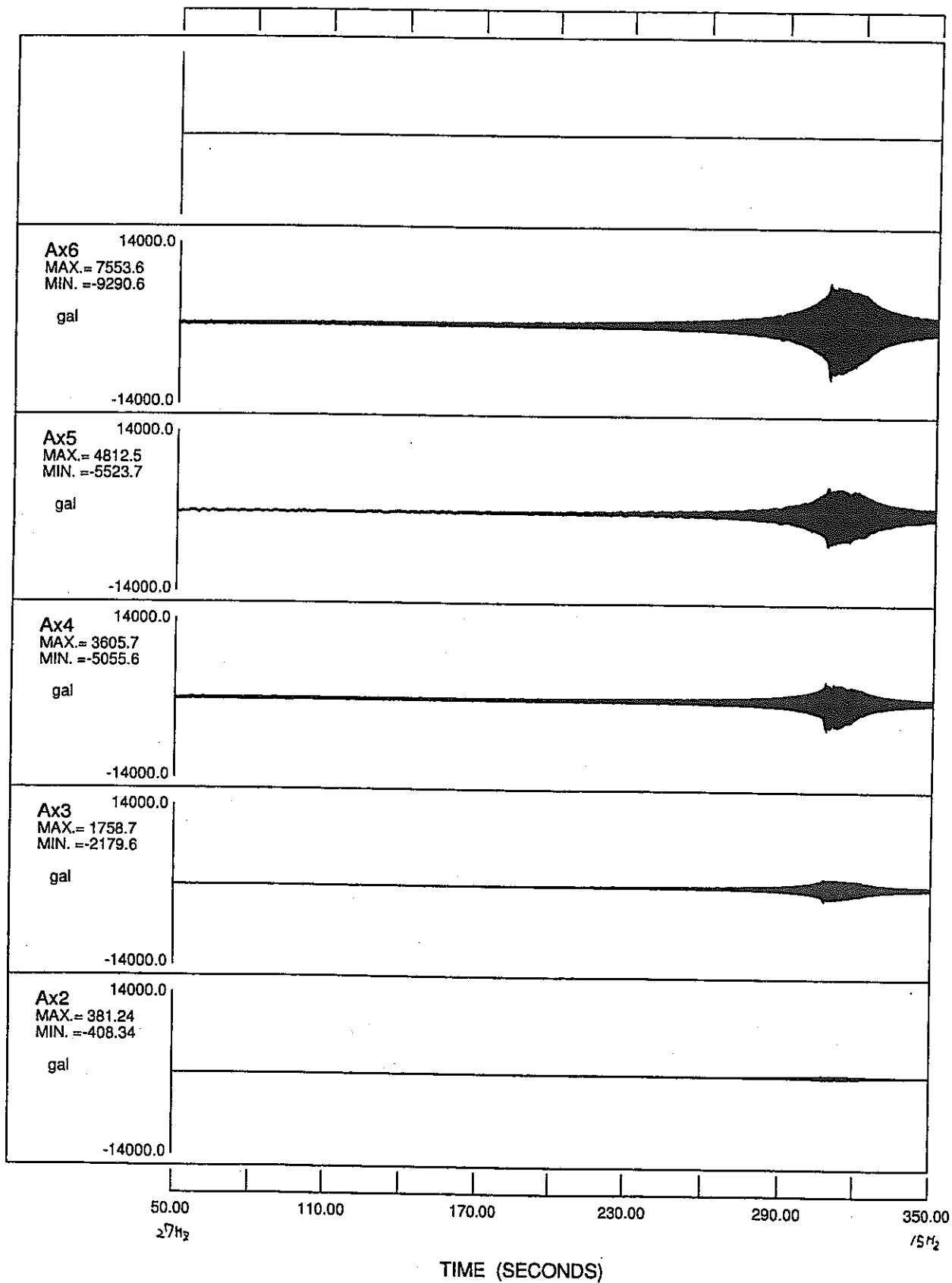
ひずみ時刻歴波形 (キップ 0.8mm、240gal、スイブ°Up)

G2-4D2



加振加速度時刻歴波形 (キック7° 0.8mm、240gal、スイ7° Down)

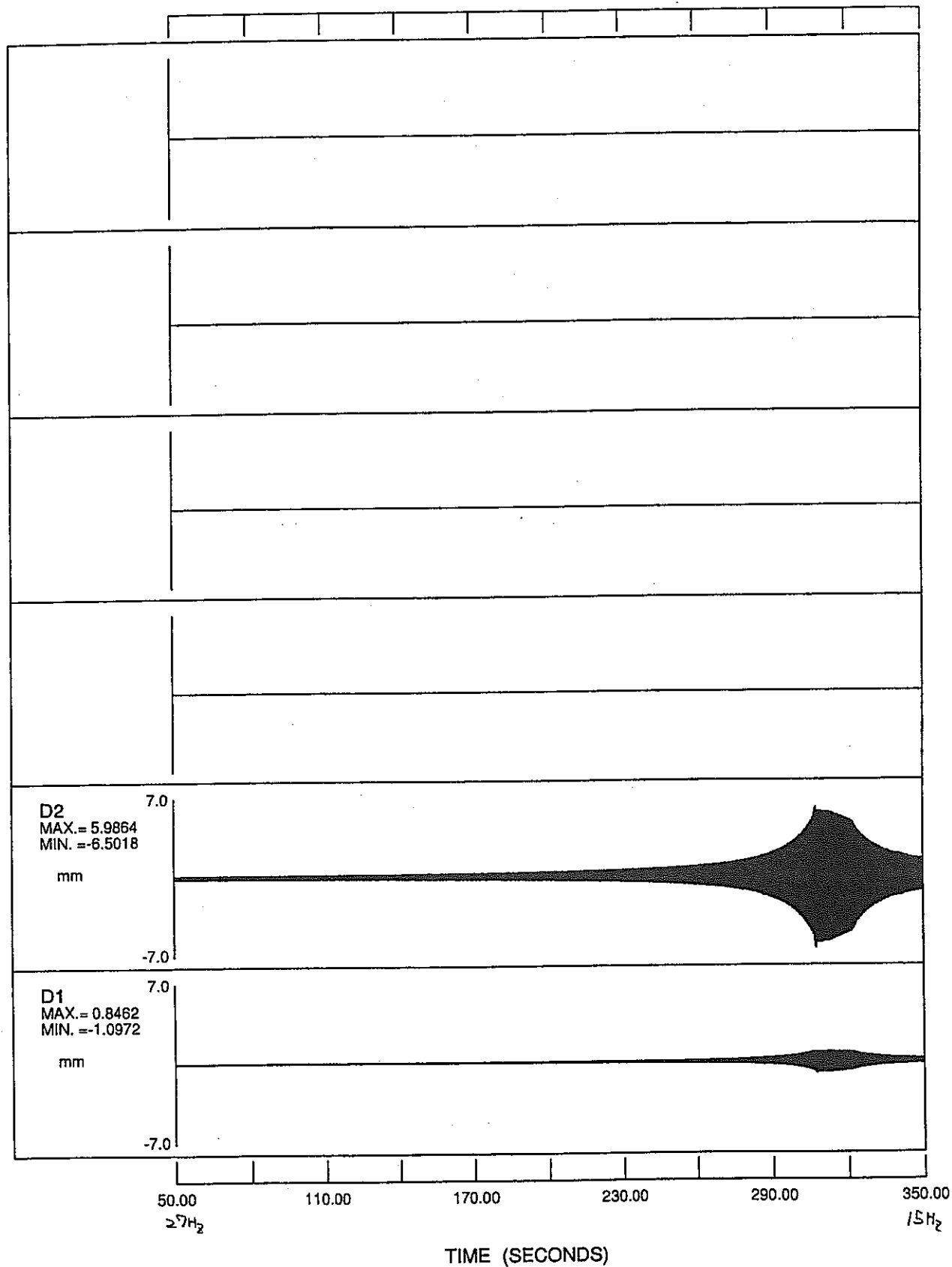
G2-4D2



加速度時刻歴波形 (ギヤップ 0.8mm、240gal、スイープ Down)

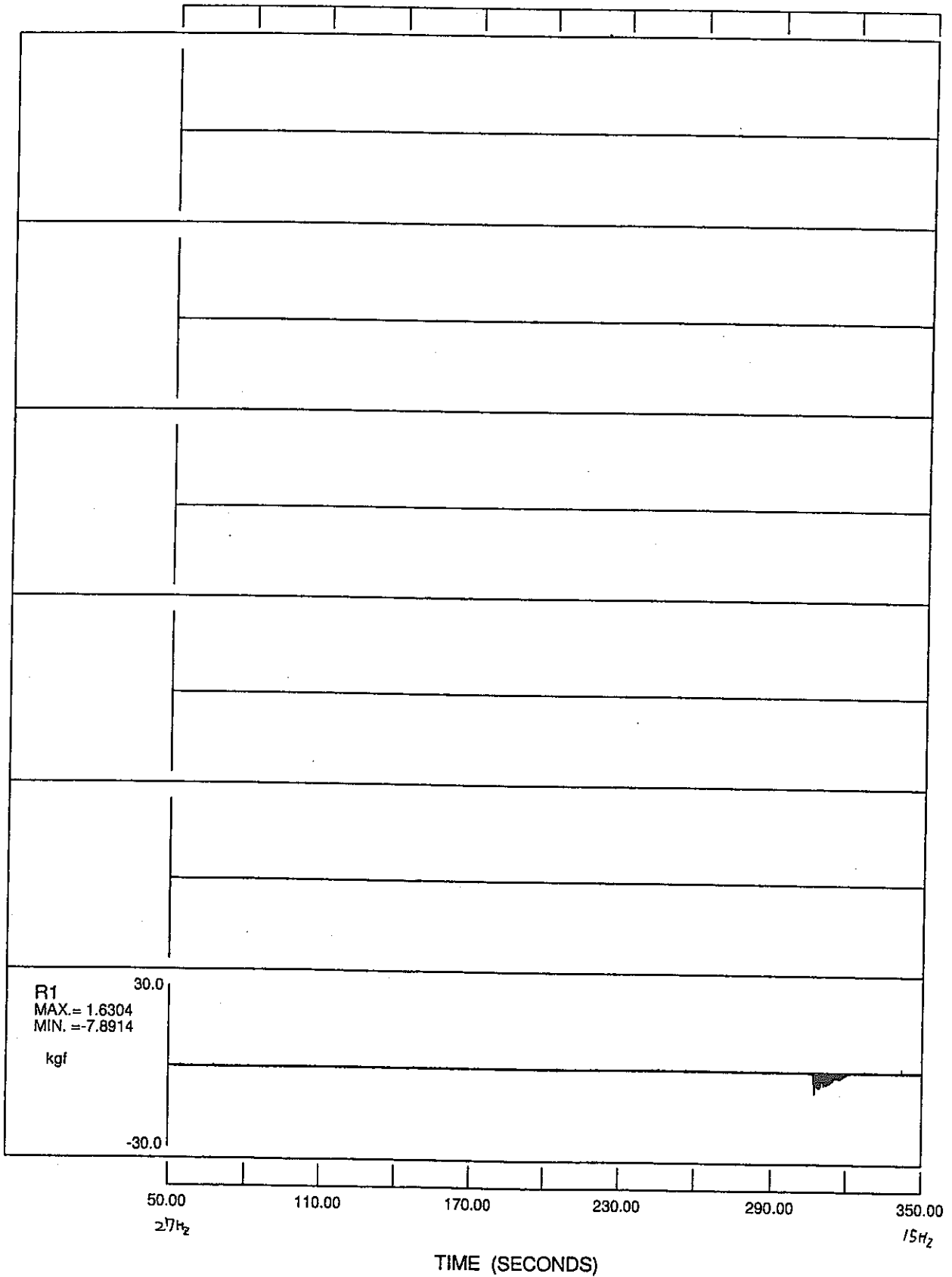


G2-4D2



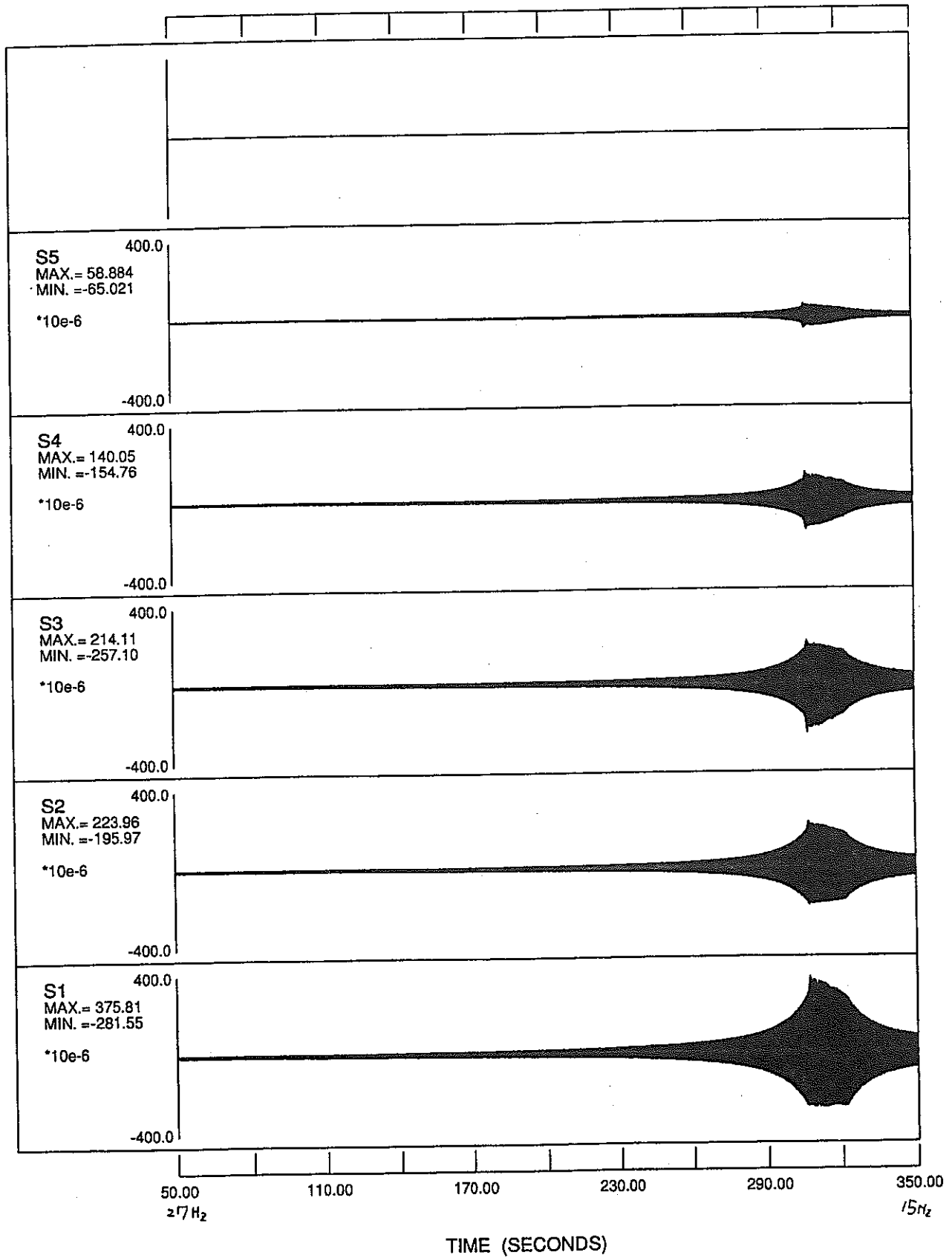
変位時刻歴波形 (針 1mm、240gal、スィ-7° Down)

G2-4D2



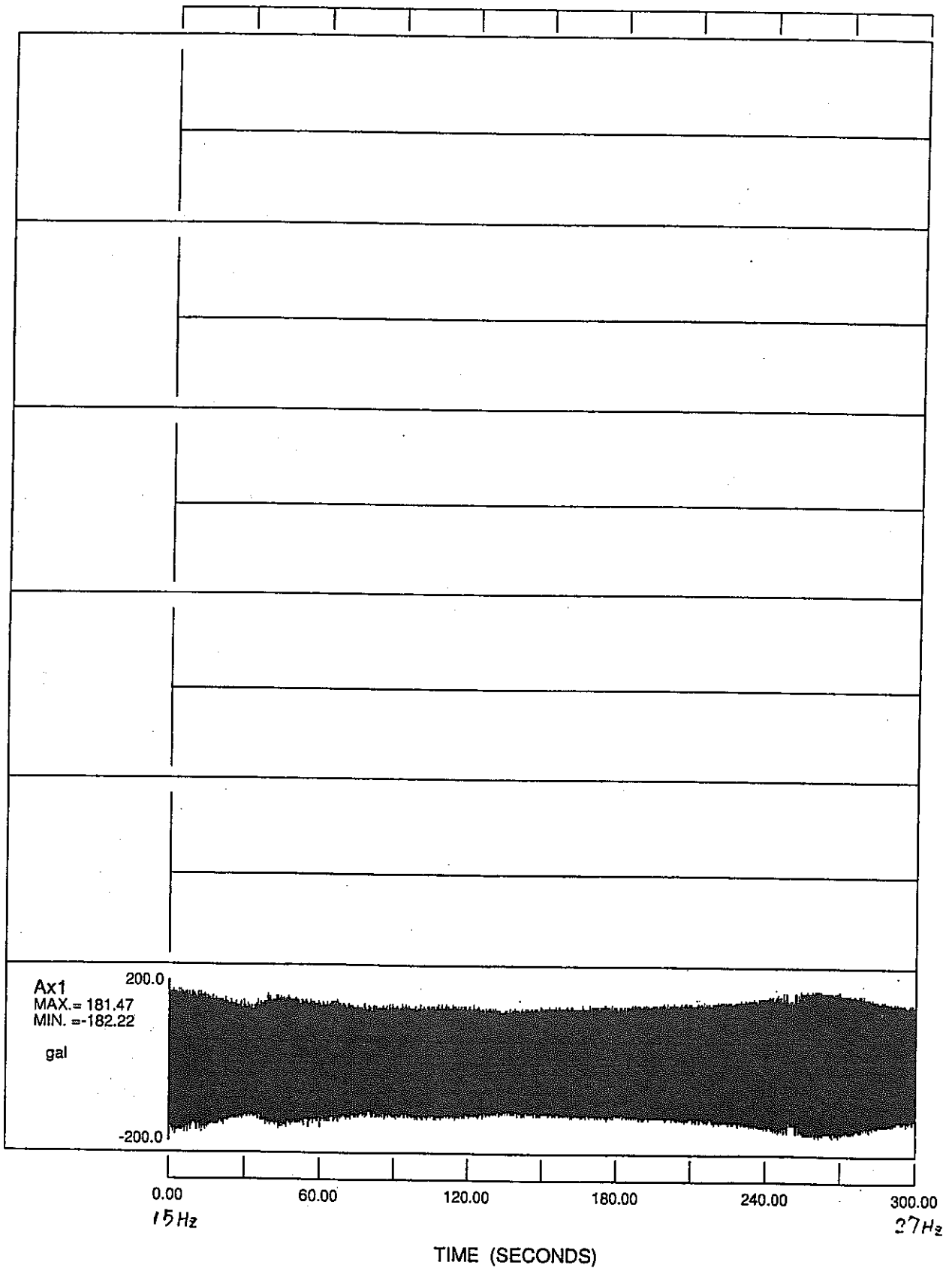
反力時刻歴波形 (ｷｯﾌﾟﾌﾟ0.8mm、240gal、ｽｲｰﾌﾞDown)

G2-4D2



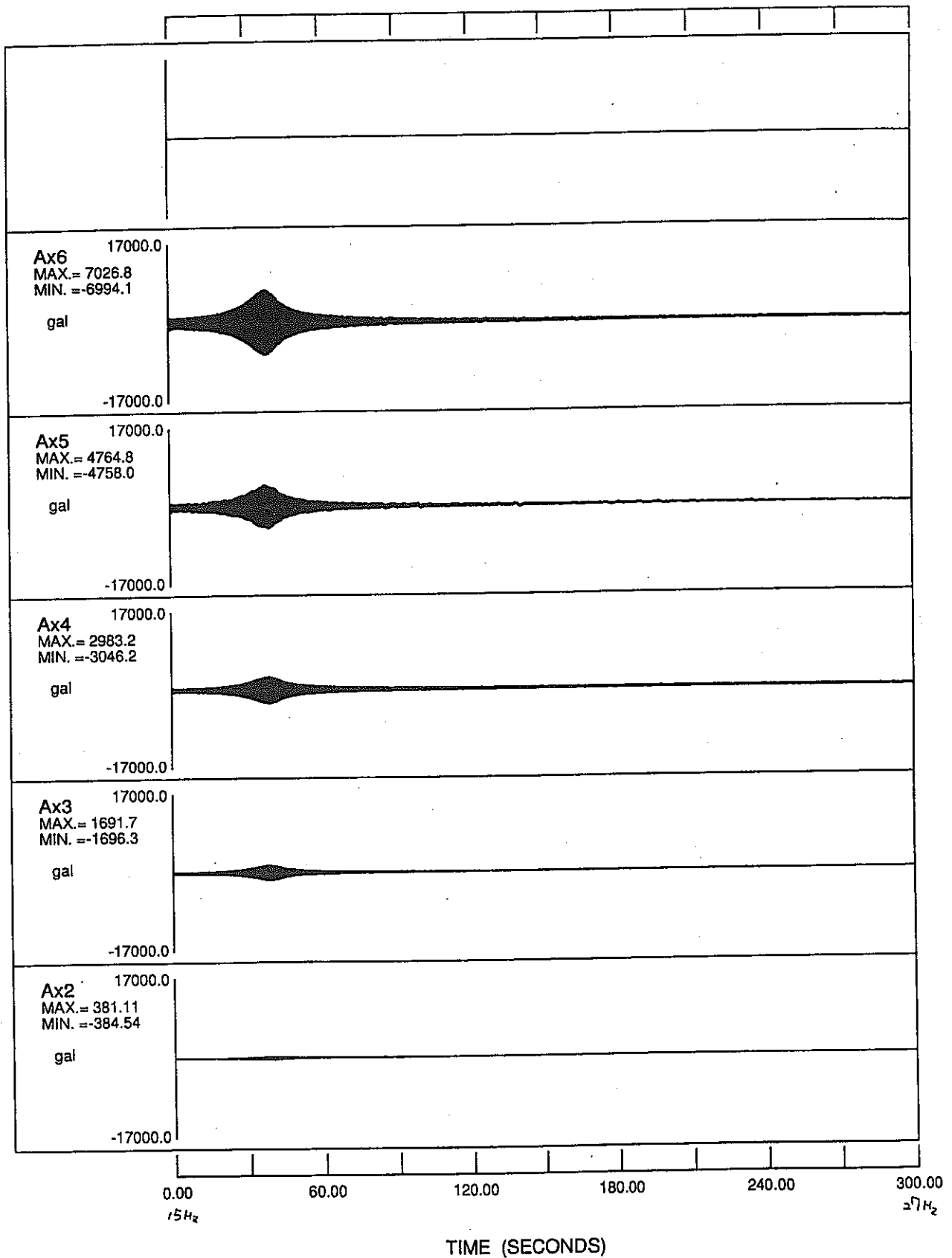
ひずみ時刻歴波形 (キ+77° 0.8mm、240gal、スイ-7° Down)

G3-3



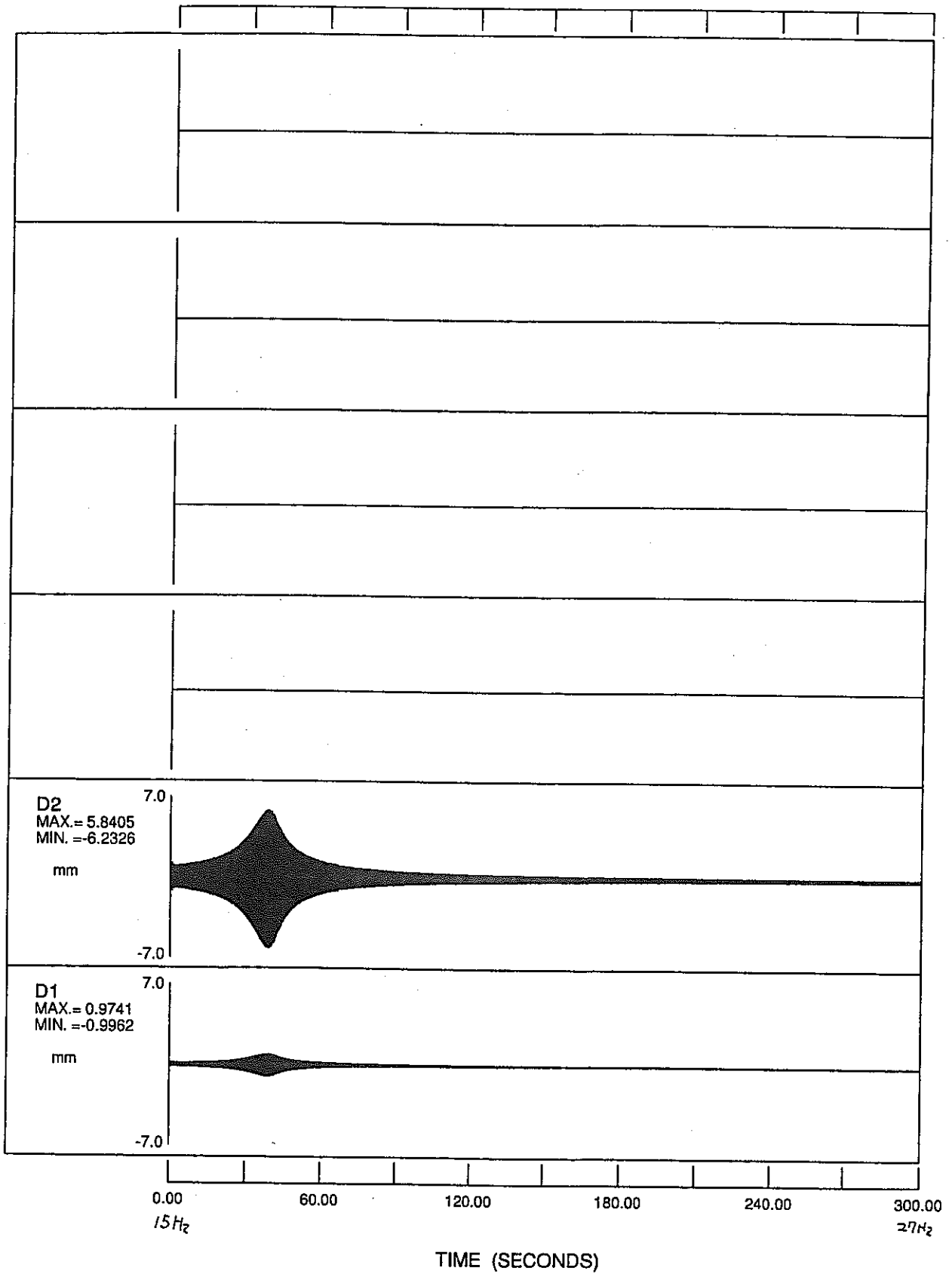
加振加速度時刻歴波形 (振幅 $1.2\text{mm}$ 、 $180\text{gal}$ 、 $45^\circ$  Up)

G3-3



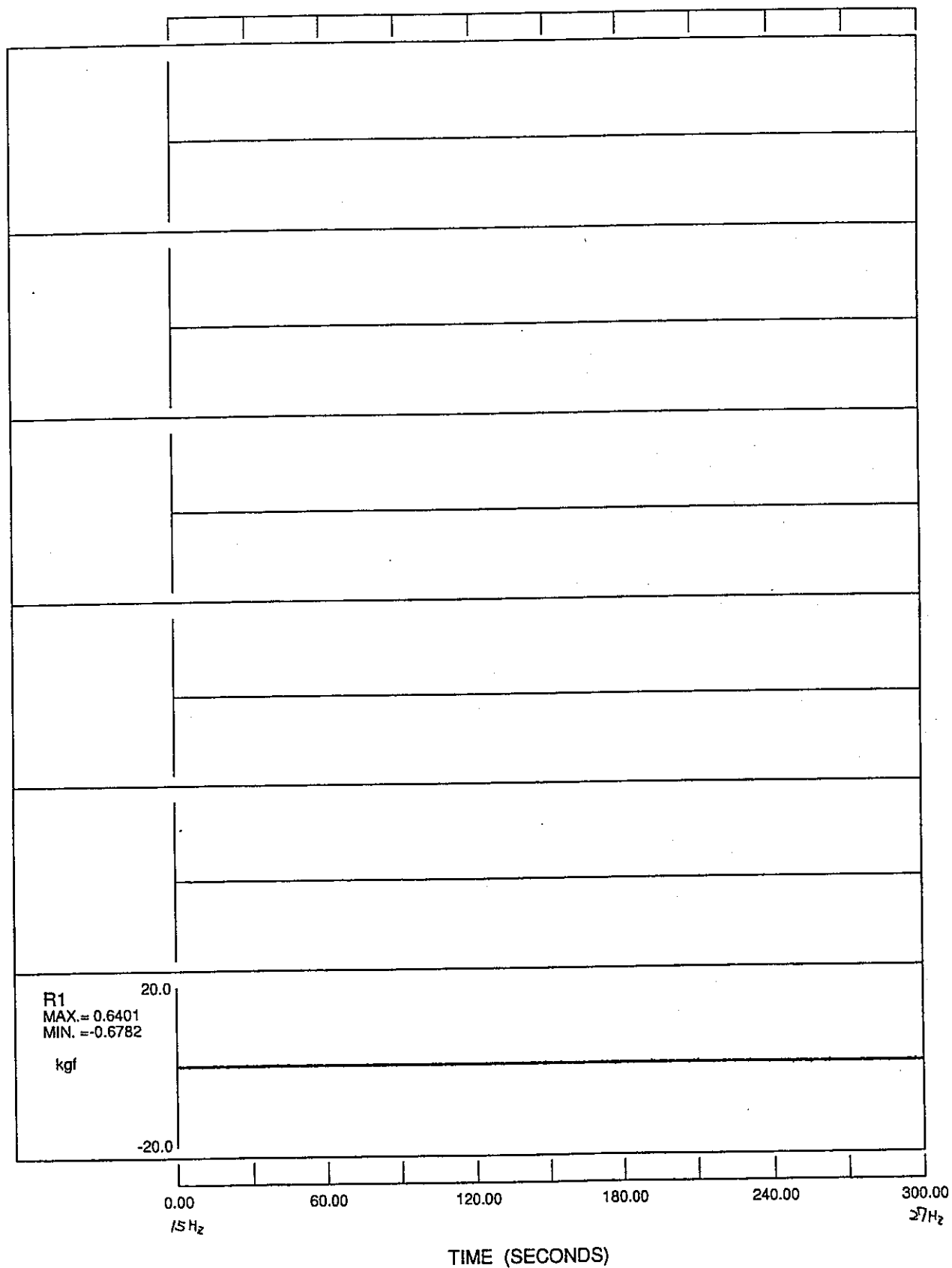
加速度時刻歴波形 (キップ<sup>°</sup>1.2mm、180gal、スィ7° Up)

G3-3



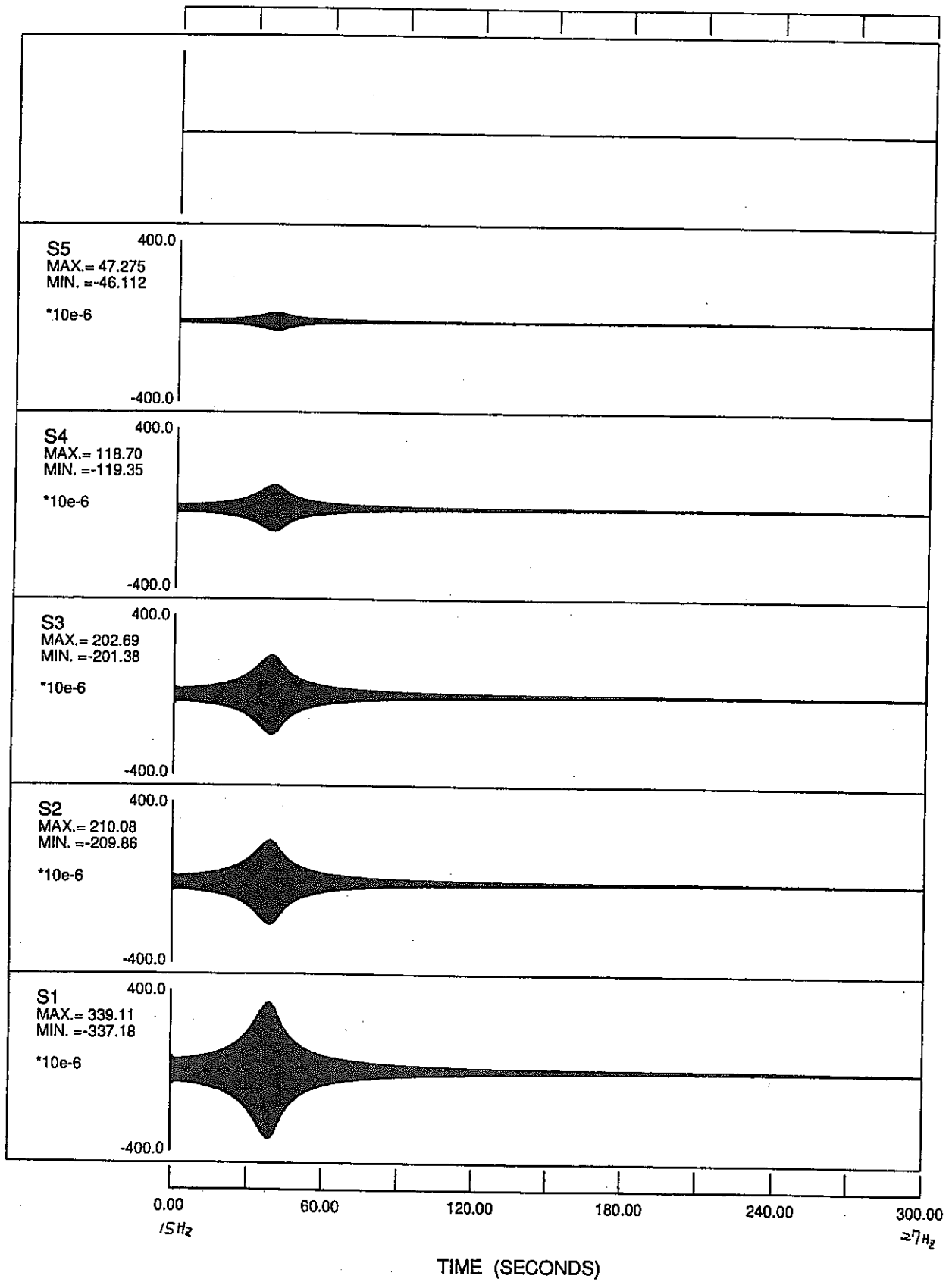
変位時刻歴波形 (キ ャ ッ 7° 1.2mm、180gal、ス イ -7° Up)

G3-3



反力時刻歴波形 (キップ<sup>°</sup> 1.2mm、180gal、スイフ<sup>°</sup> Up)

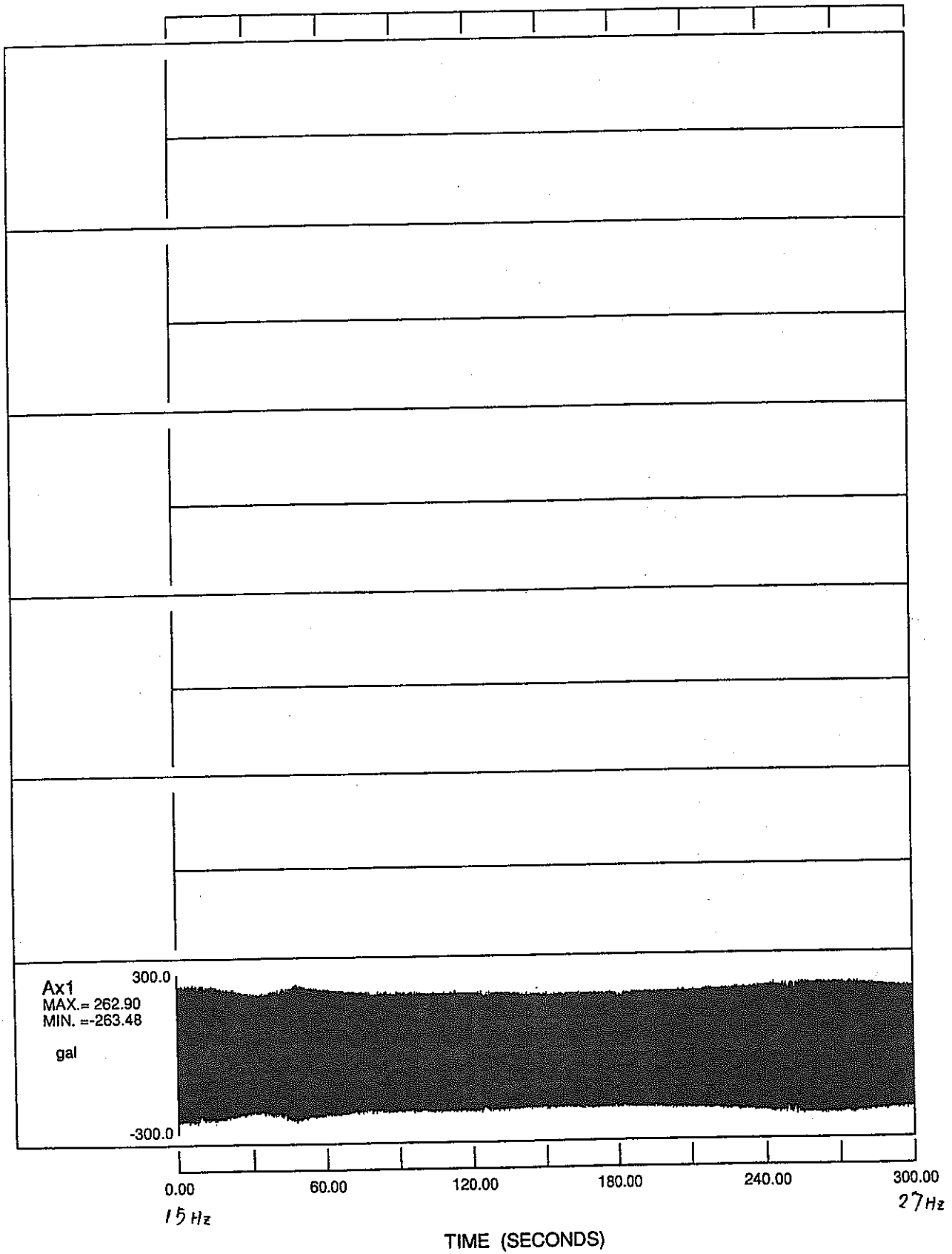
G3-3



ひずみ時刻歴波形 (キ+77° 1.2mm、180gal、スイ7° Up)

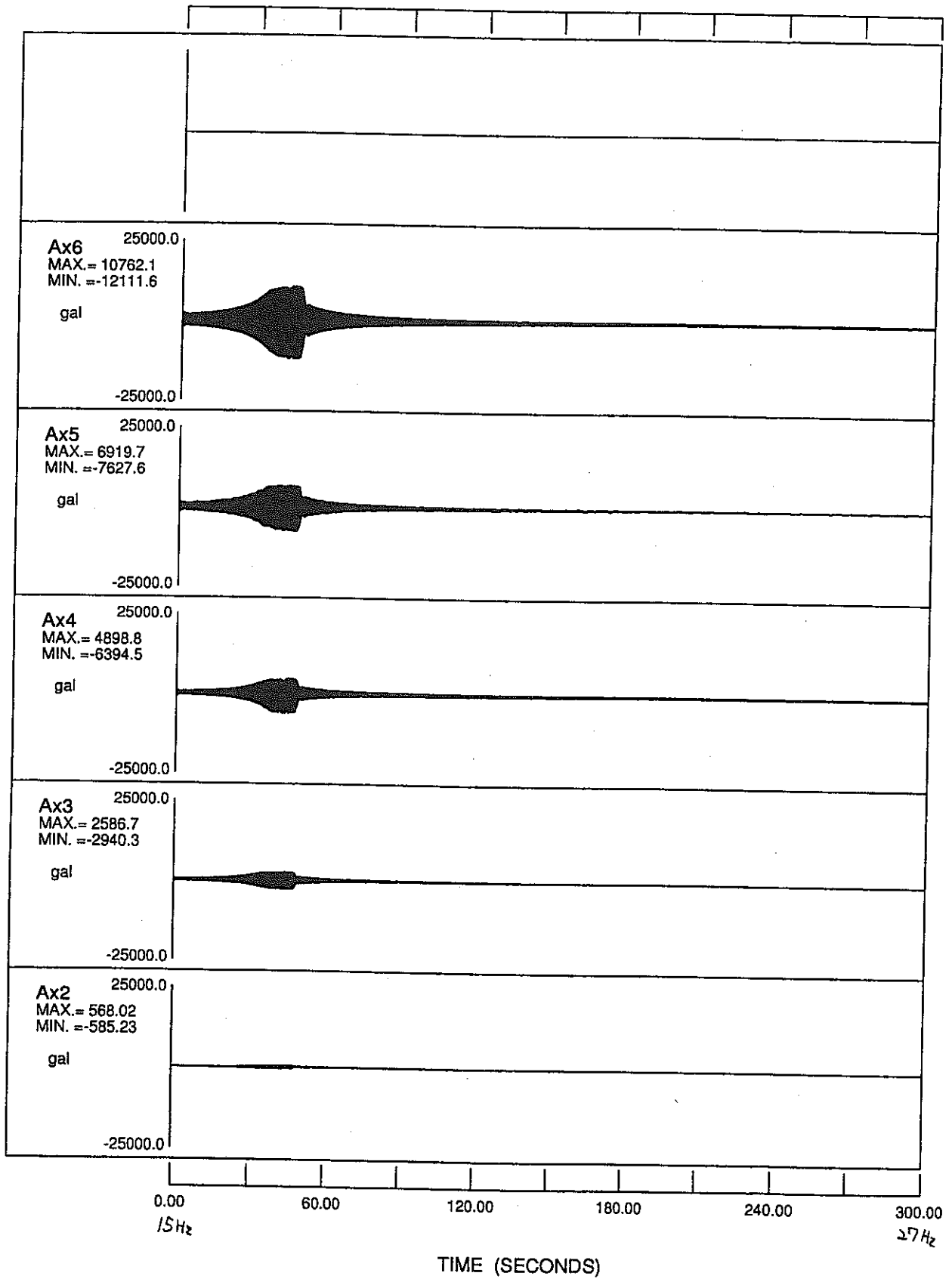


G3-4



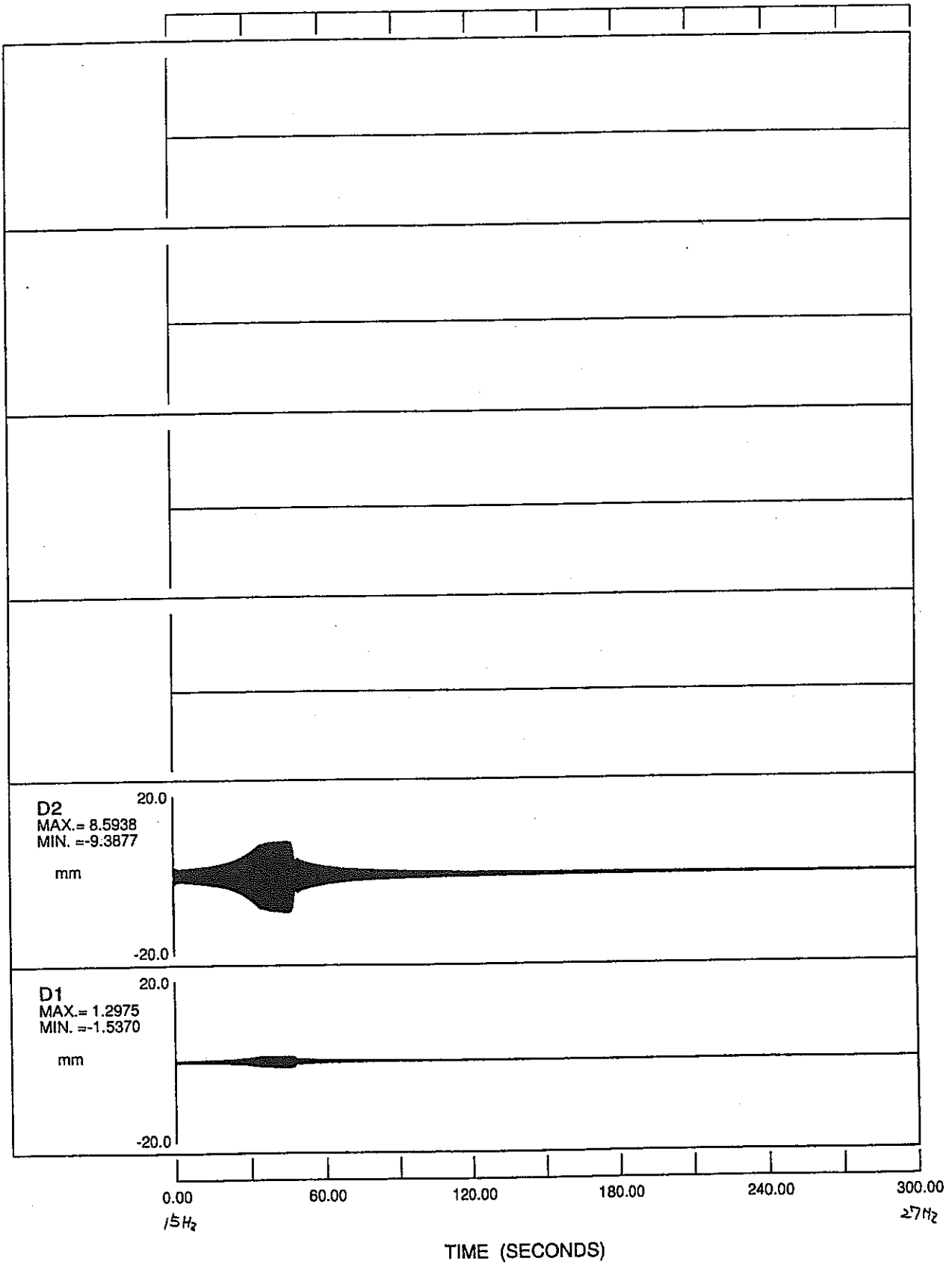
加振加速度時刻歴波形 (振幅 $1.2\text{mm}$ 、 $240\text{gal}$ 、 $7^\circ\text{Up}$ )

G3-4



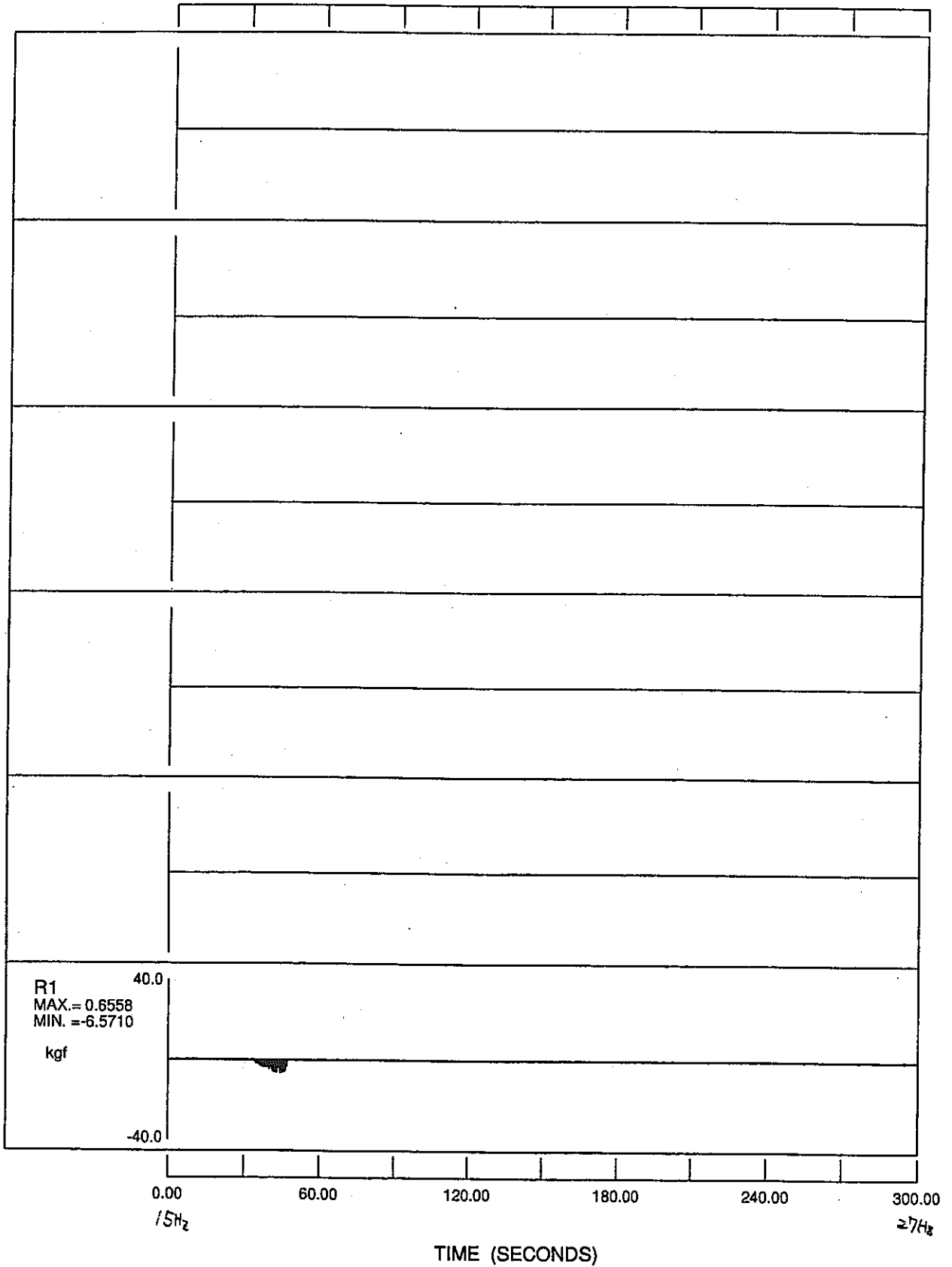
加速度時刻歴波形 (キ ャッ° 1.2mm、240gal、スイ-7° Up)

G3-4



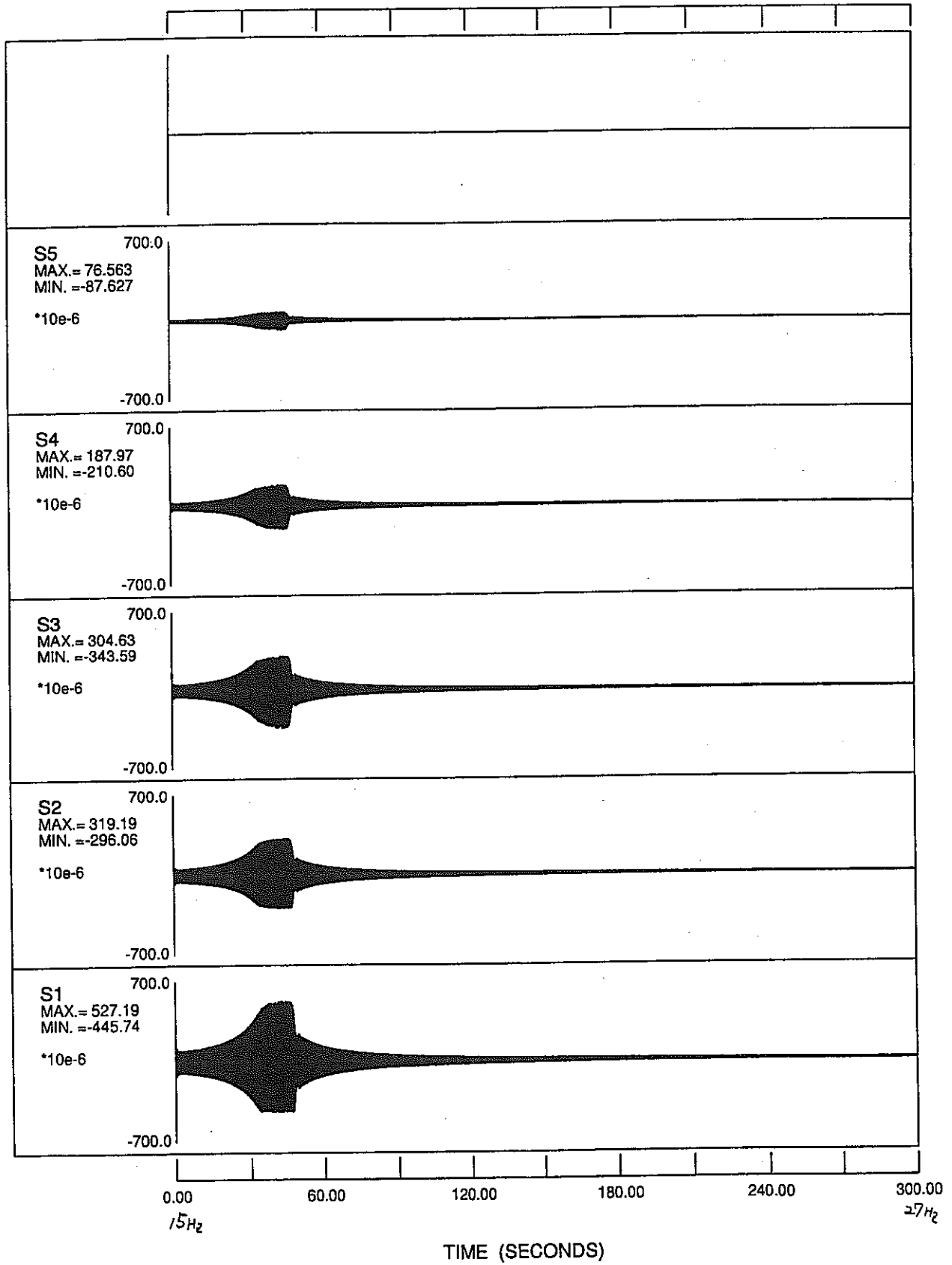
変位時刻歴波形 (キップ1.2mm、240gal、スイブUp)

G3-4



反力時刻歴波形 (キップ 1.2mm、240gal、スイブ Up)

G3-4



ひずみ時刻歴波形 (キップ° 1.2mm、240gal、スイブ° Up)

## APPENDIX-F

試験結果 周波数応答関数

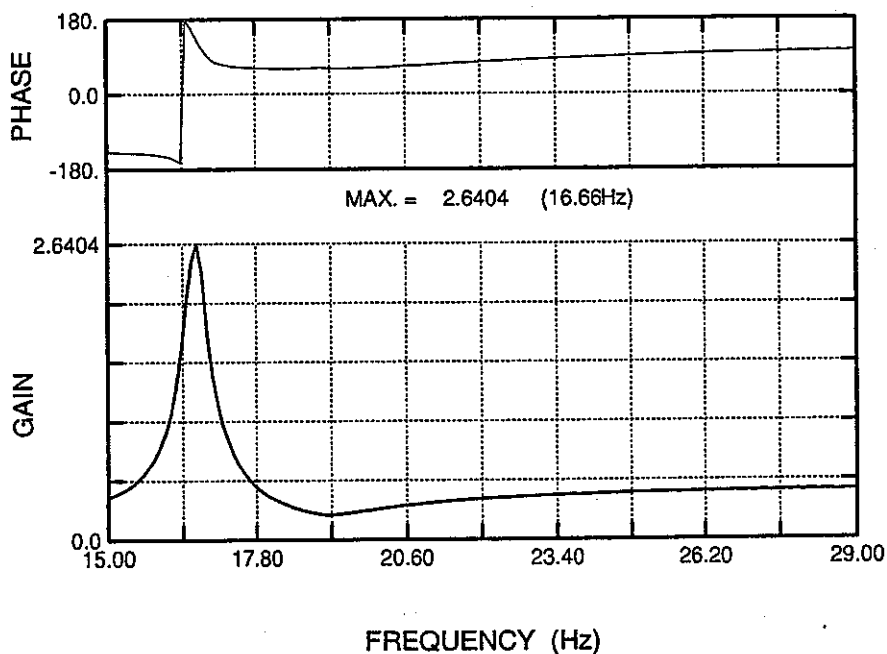
試験結果 (周波数応答関数)

加振加速度に対する、各計測位置のひずみ、変位及び加速度に周波数応答関数

試験ケース名及び変数名表記方法

試験ケース名 (ギヤ7<sup>00</sup>, レベル4, 掃引UP, 2回目)

↓  
GI-4U2       $\frac{S1}{Ax1}$  : 変数



波形処理条件

(1) GI、GP

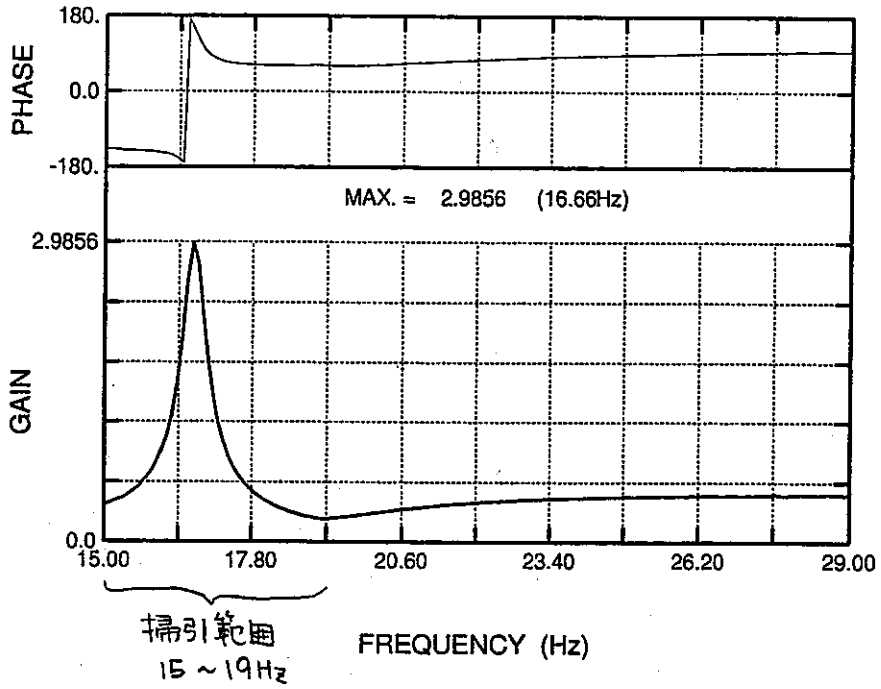
- データ数           : 20,000 (サンプリング 200Hz×100sec)
- ウィンドウサイズ : 2048
- オーバーラップ   : 75%
- ウィンドウ        : ハニングウィンドウ
- フィルタ         GI : 15~19Hz (掃引範囲と同一)
- GP : 25~29Hz (掃引範囲と同一)

(2) G0、G1、G2、G3

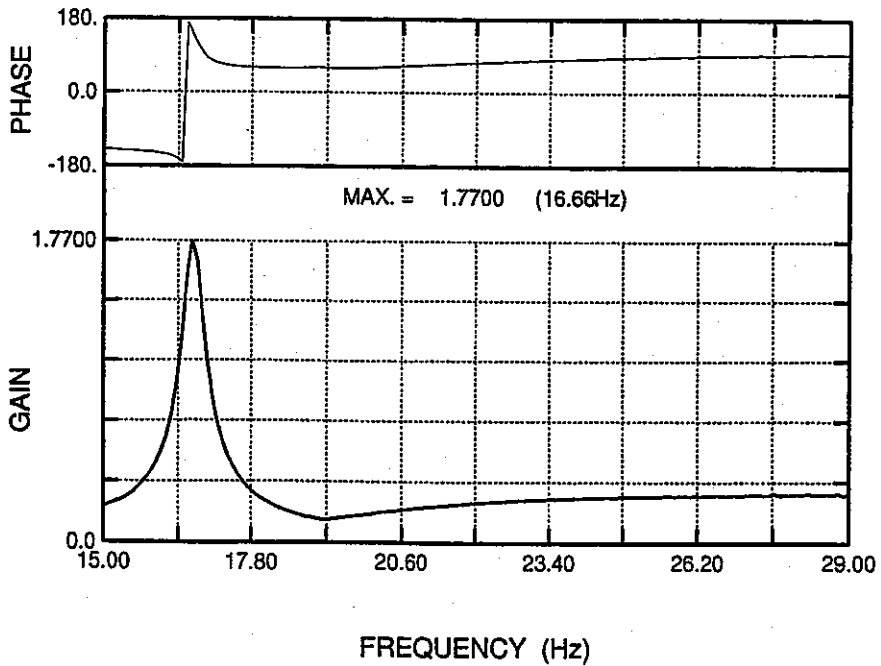
- データ数           : 654,000 (サンプリング 200Hz×327sec)
- ウィンドウサイズ : 2048
- オーバーラップ   : 75%
- ウィンドウ        : ハニングウィンドウ
- フィルタ           : 無し

GI-1U2  $\frac{S1}{Ax1}$

バンドパス 15 ~ 19Hz  
 ウィンドウサイズ 2048  
 オーバースAMPLE 75%

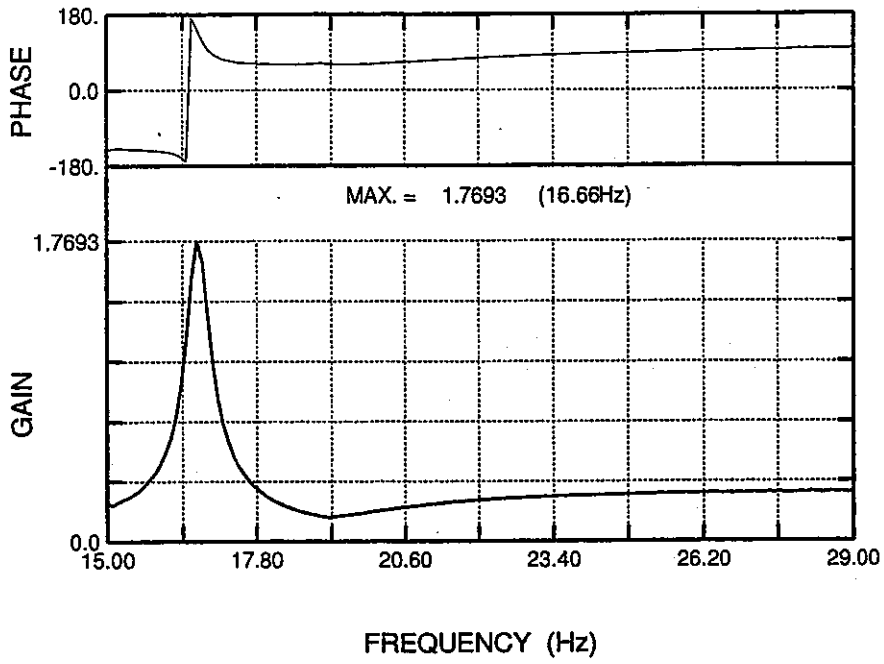


GI-1U2  $\frac{S2}{Ax1}$

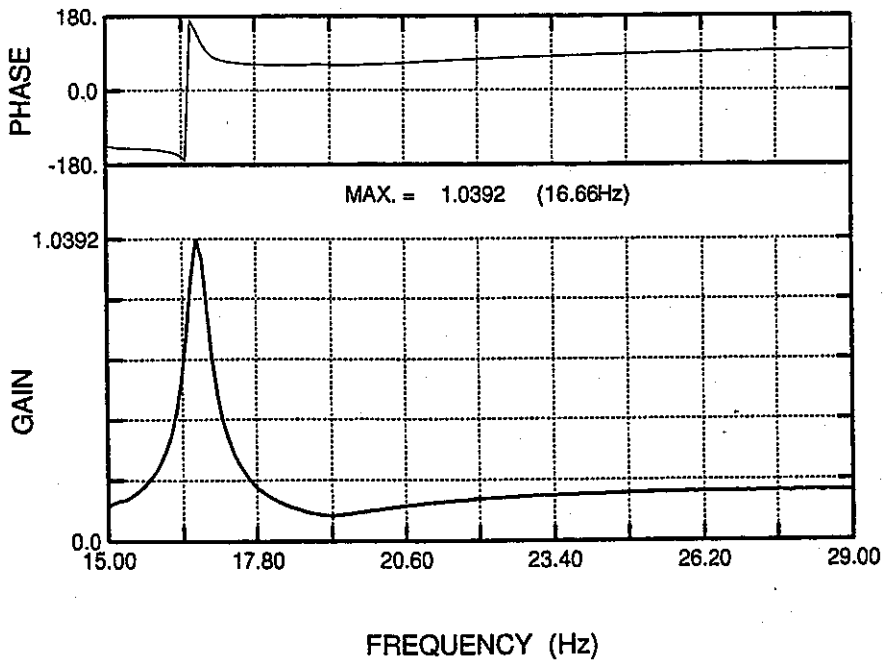




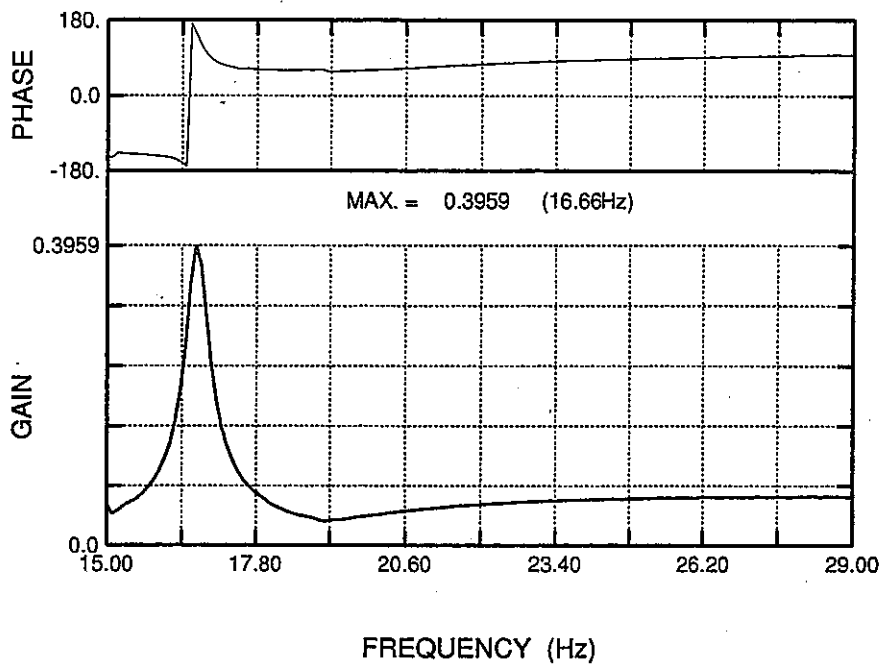
GI-1U2     S3  
              Ax1

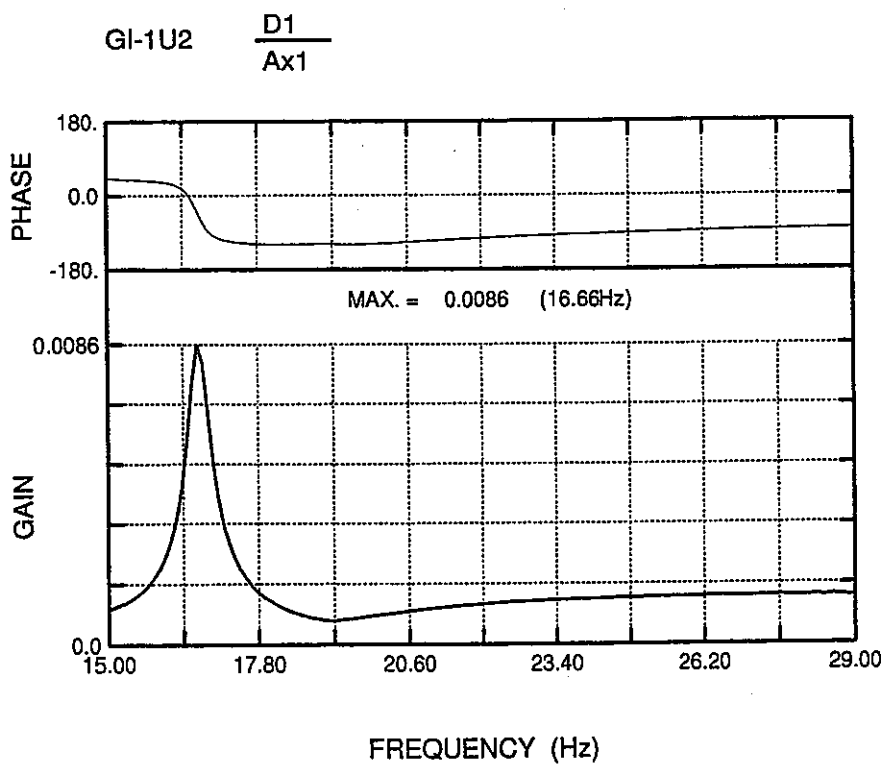
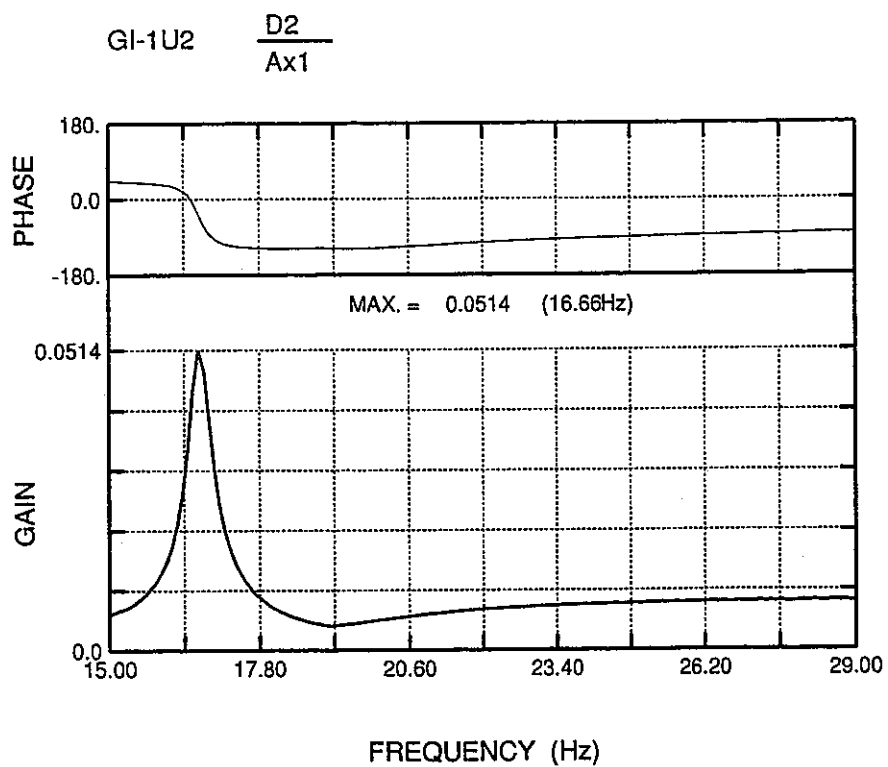


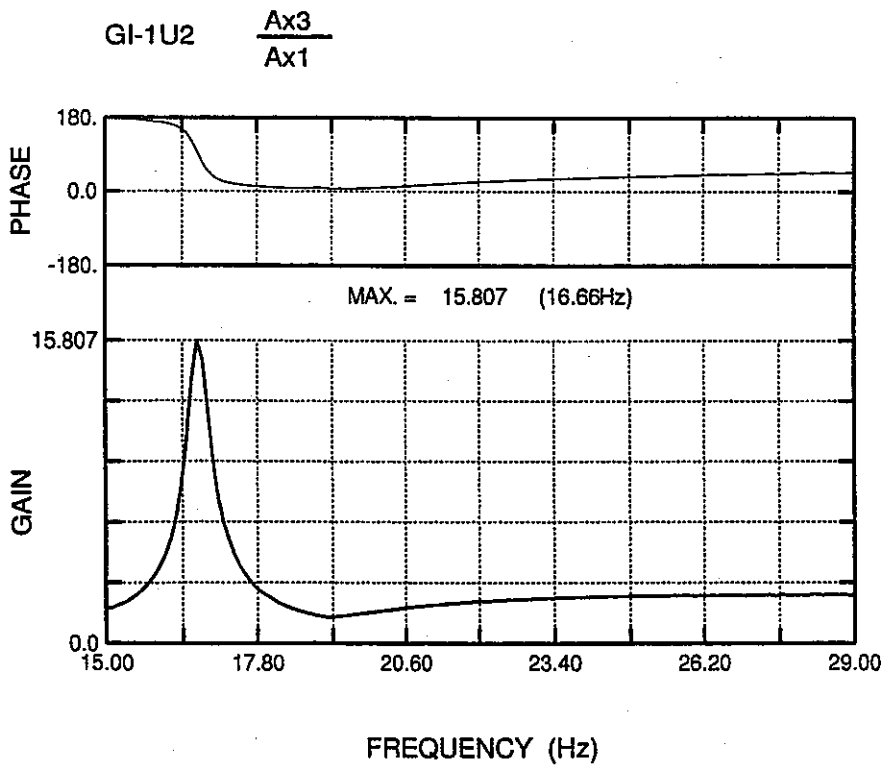
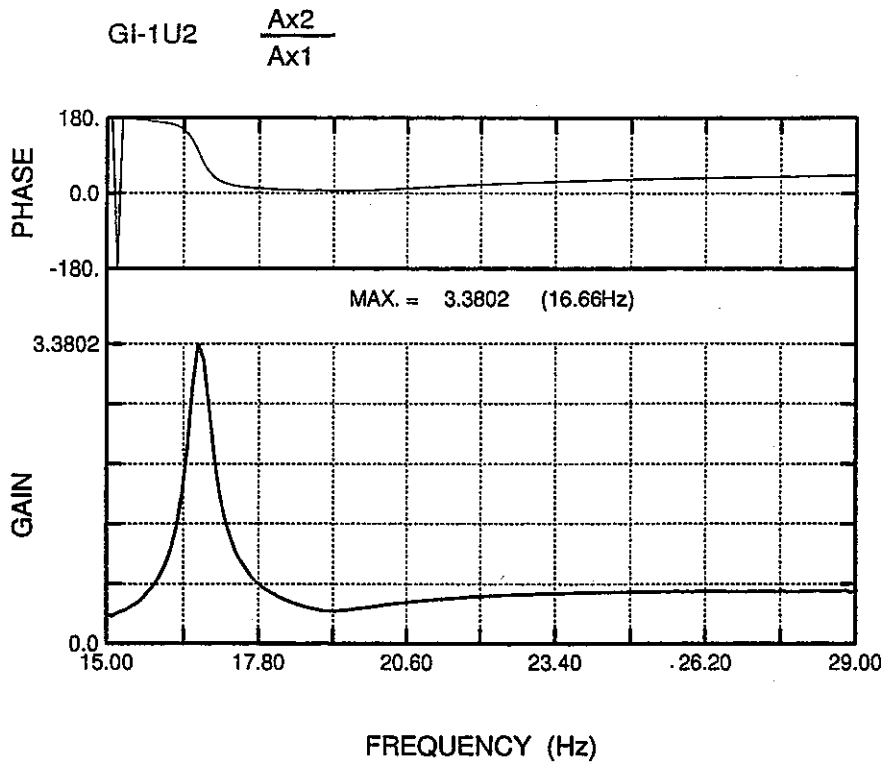
GI-1U2     S4  
              Ax1



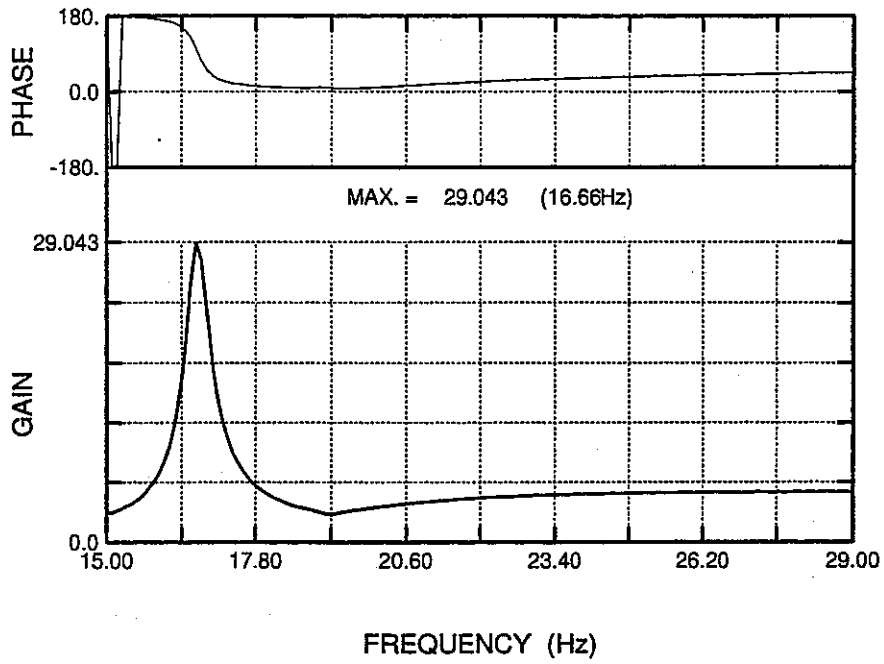
GI-1U2  $\frac{S5}{Ax1}$



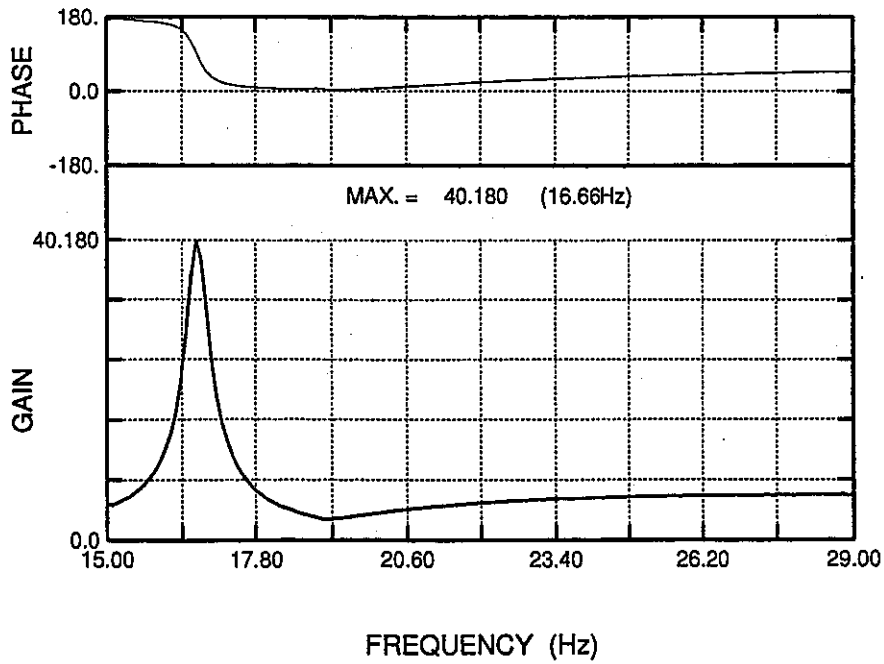




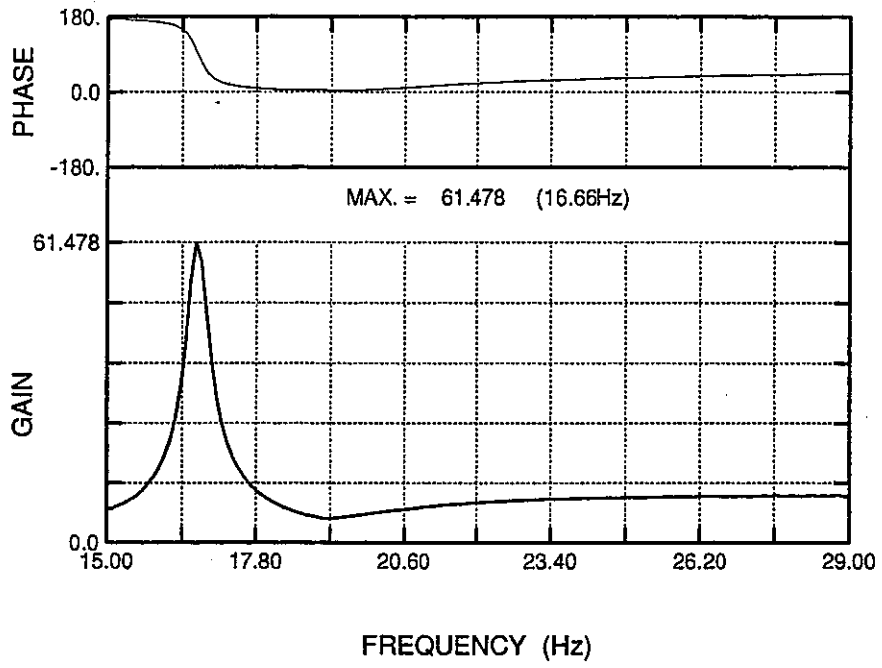
GI-1U2  $\frac{Ax4}{Ax1}$



GI-1U2  $\frac{Ax5}{Ax1}$

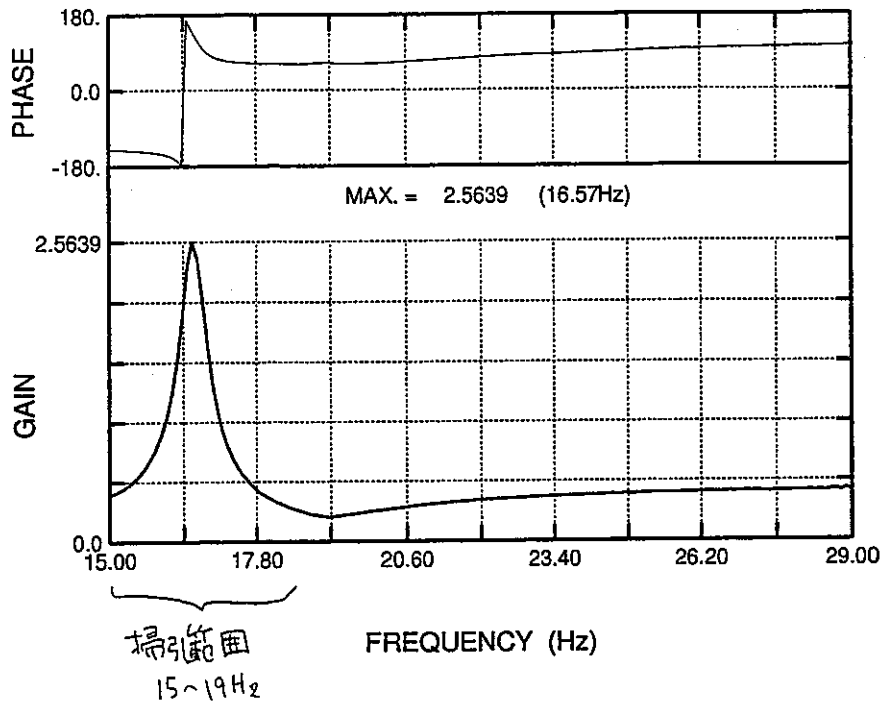


GI-1U2  $\frac{Ax6}{Ax1}$

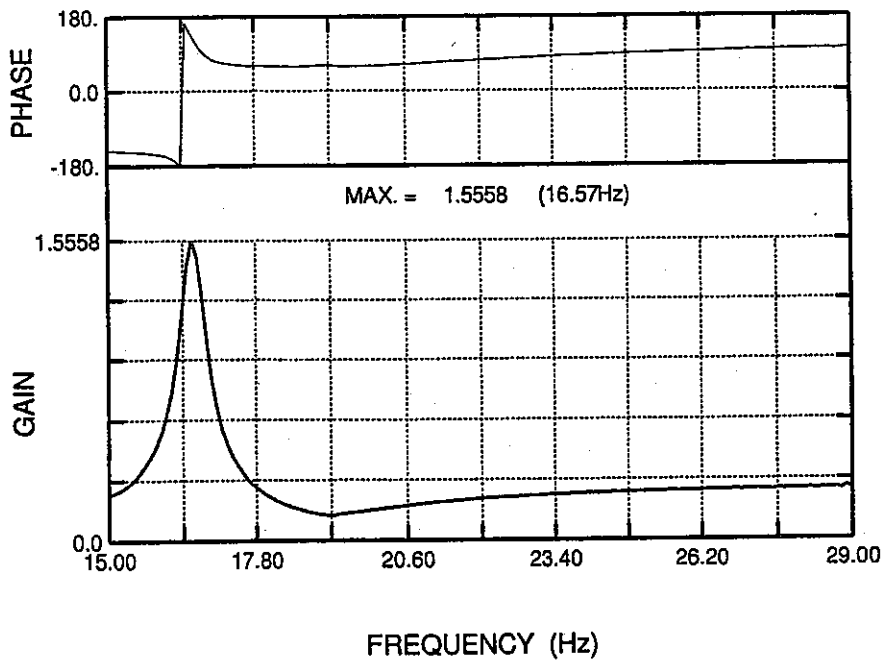


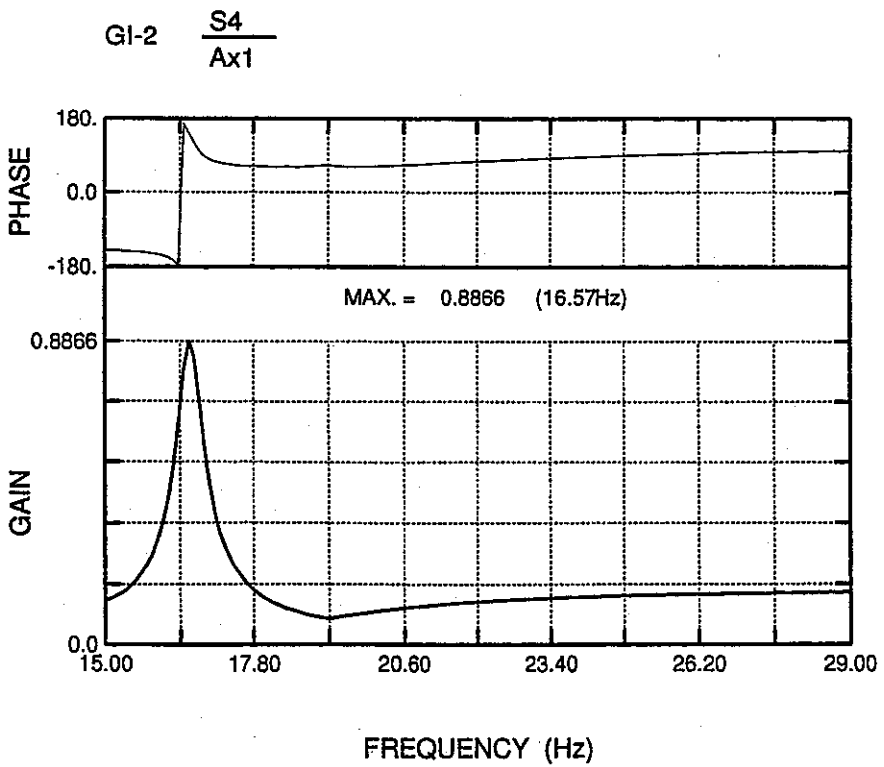
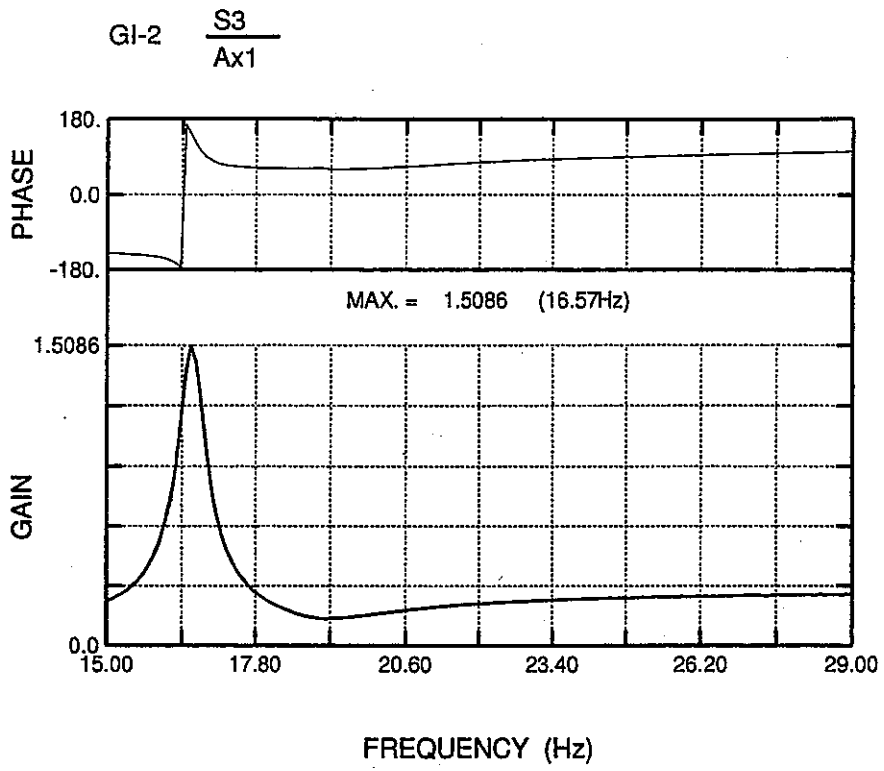
GI-2  $\frac{S1}{Ax1}$

バンドパス 15-19Hz



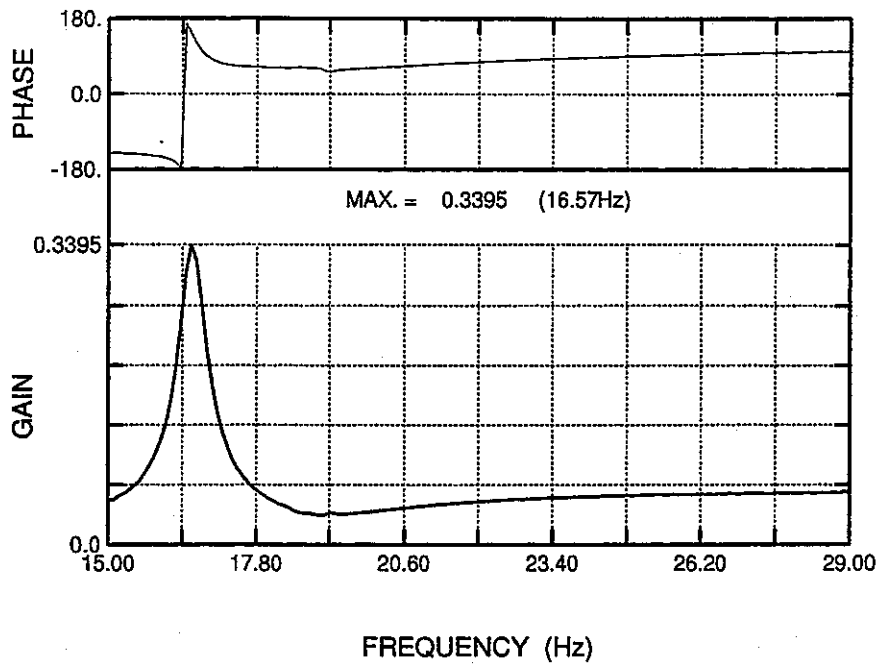
GI-2  $\frac{S2}{Ax1}$



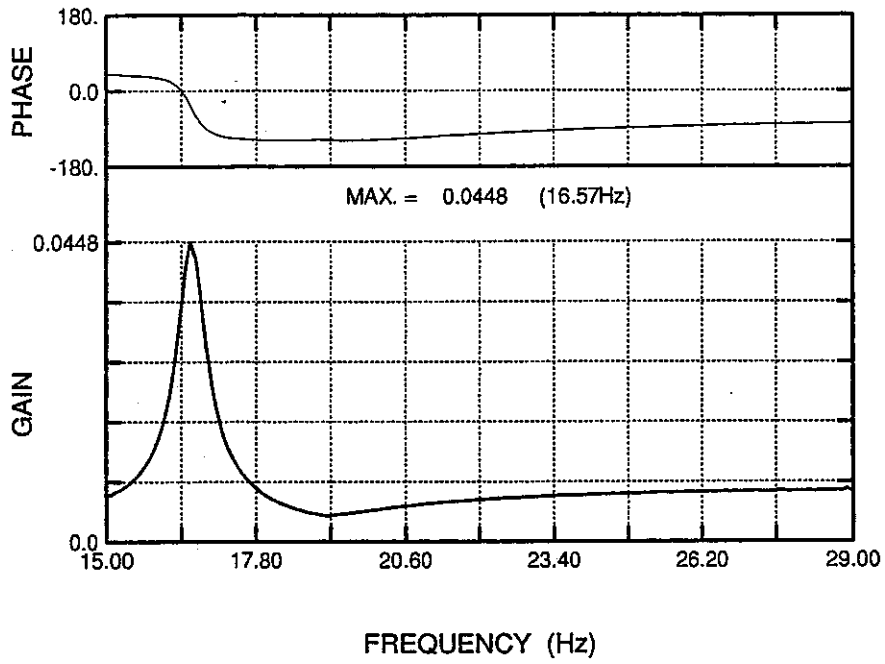




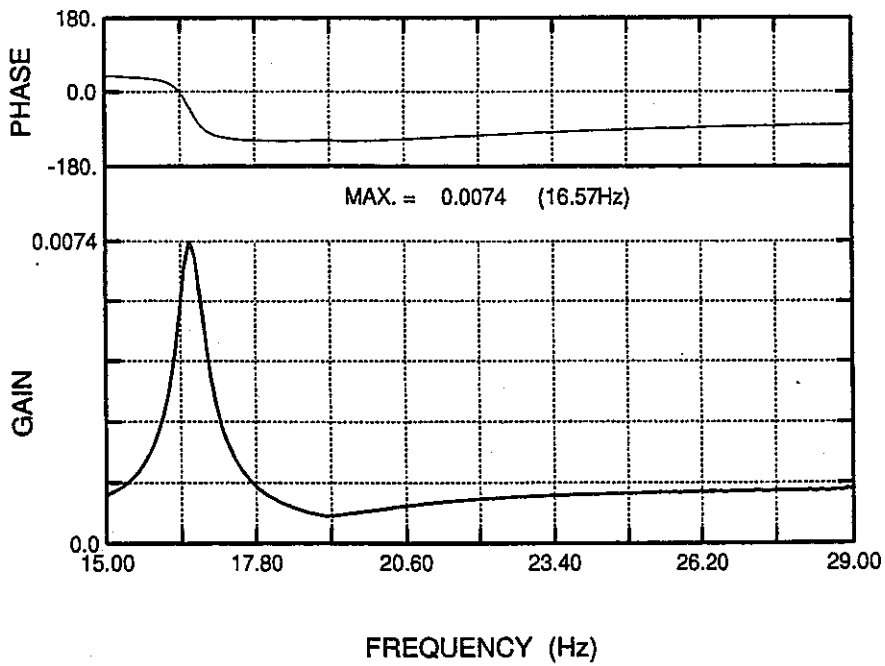
GI-2  $\frac{S5}{Ax1}$

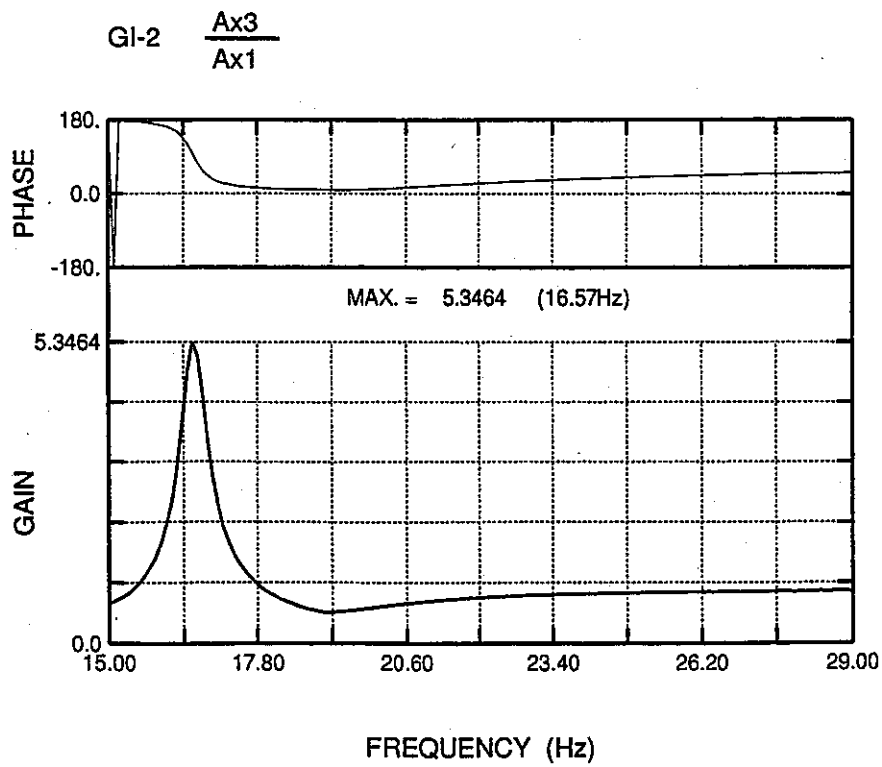
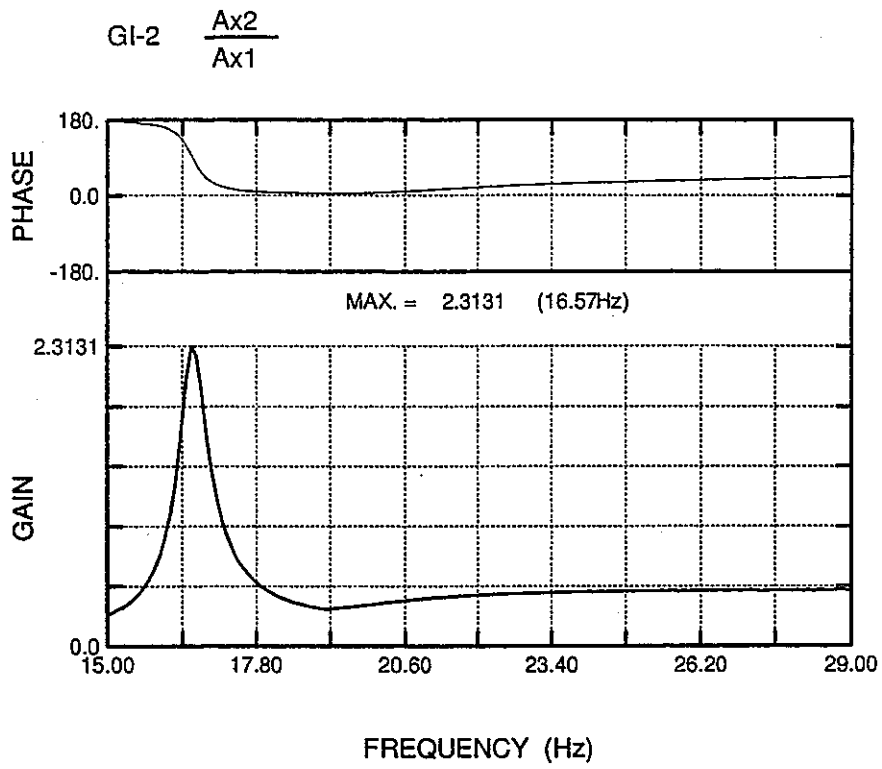


$$GI-2 \quad \frac{D2}{Ax1}$$

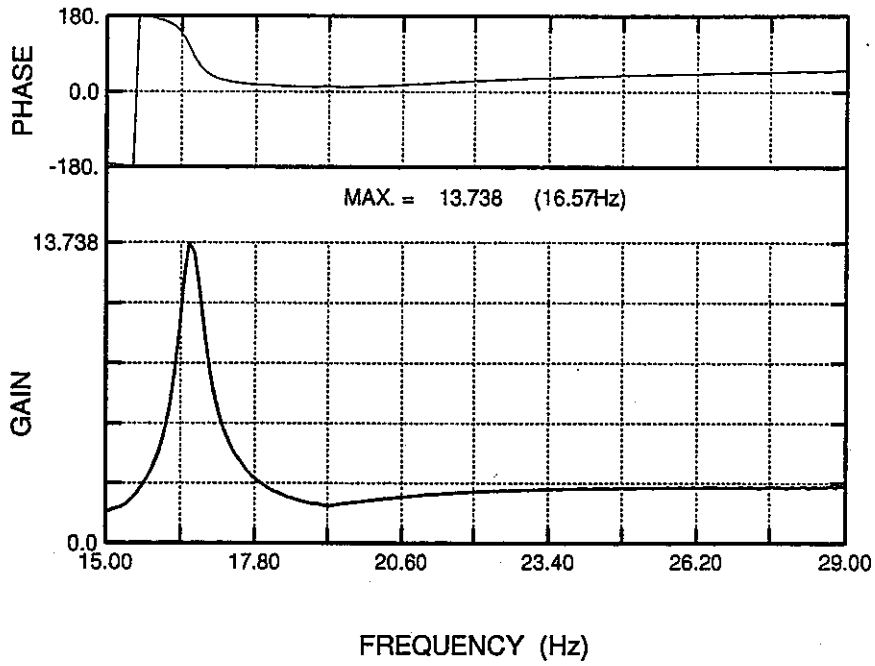


$$GI-2 \quad \frac{D1}{Ax1}$$

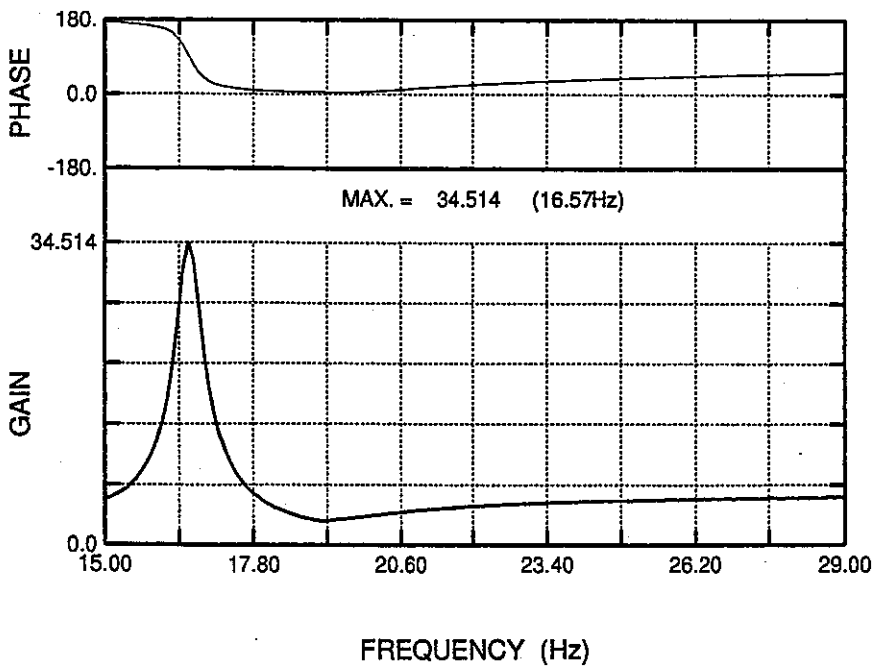




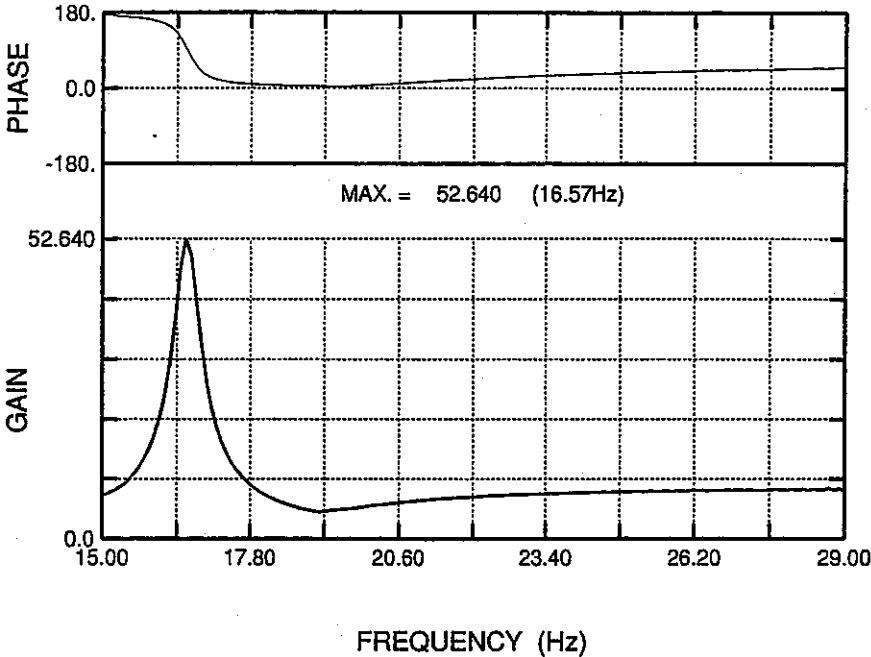
GI-2  $\frac{Ax4}{Ax1}$



GI-2  $\frac{Ax5}{Ax1}$

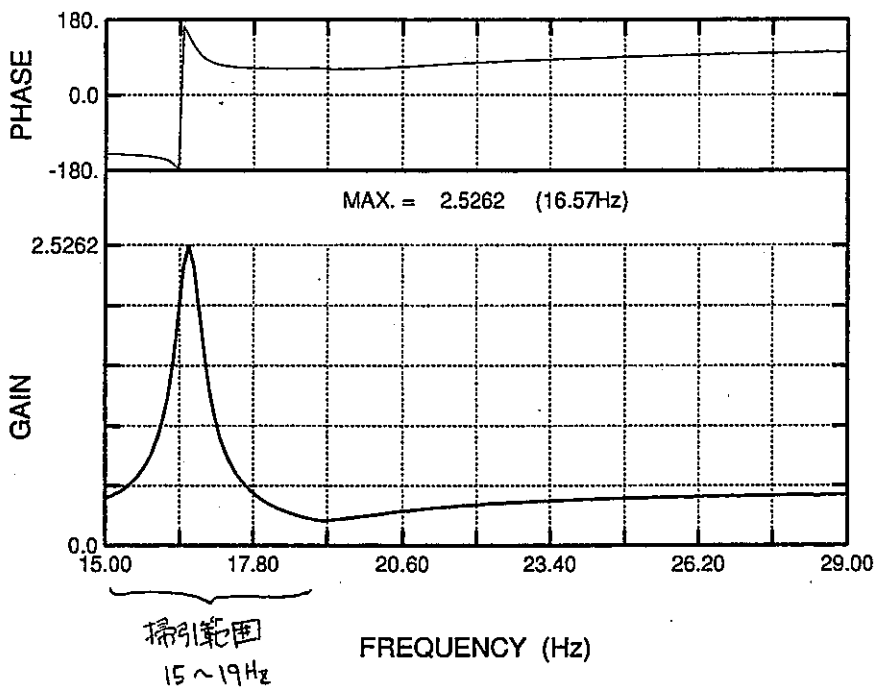


GI-2  $\frac{Ax6}{Ax1}$

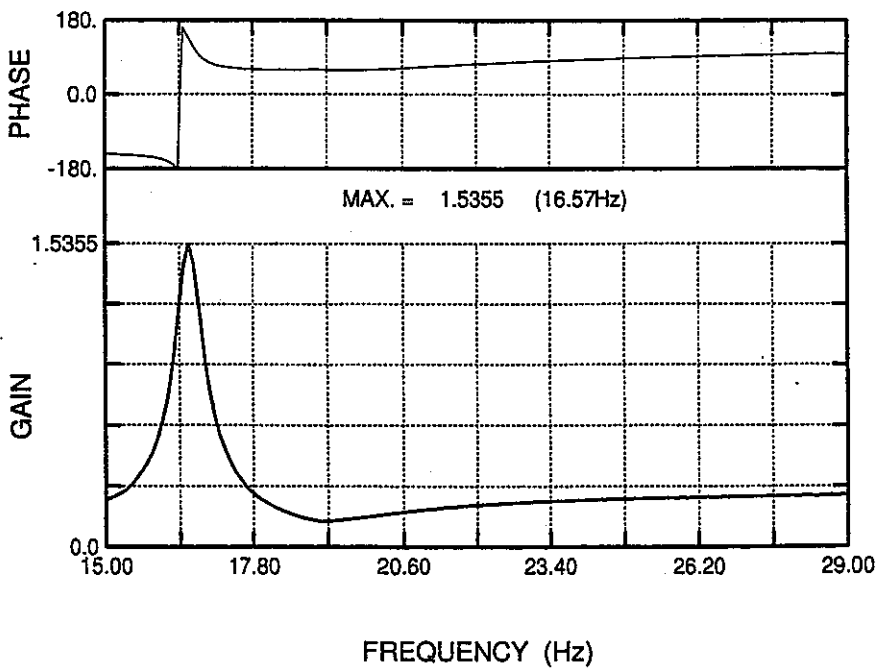


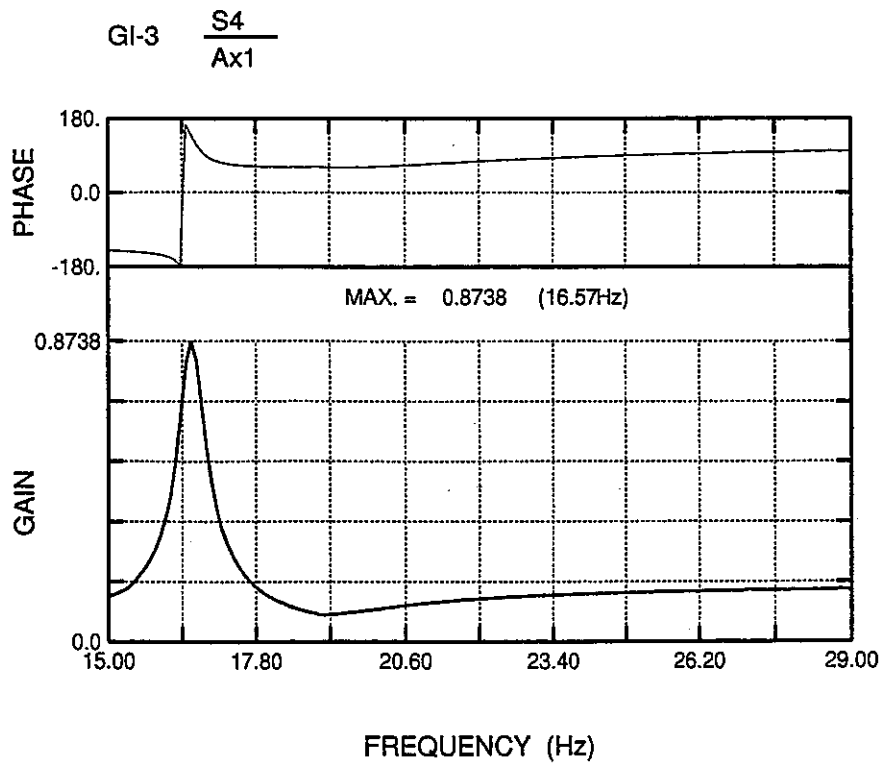
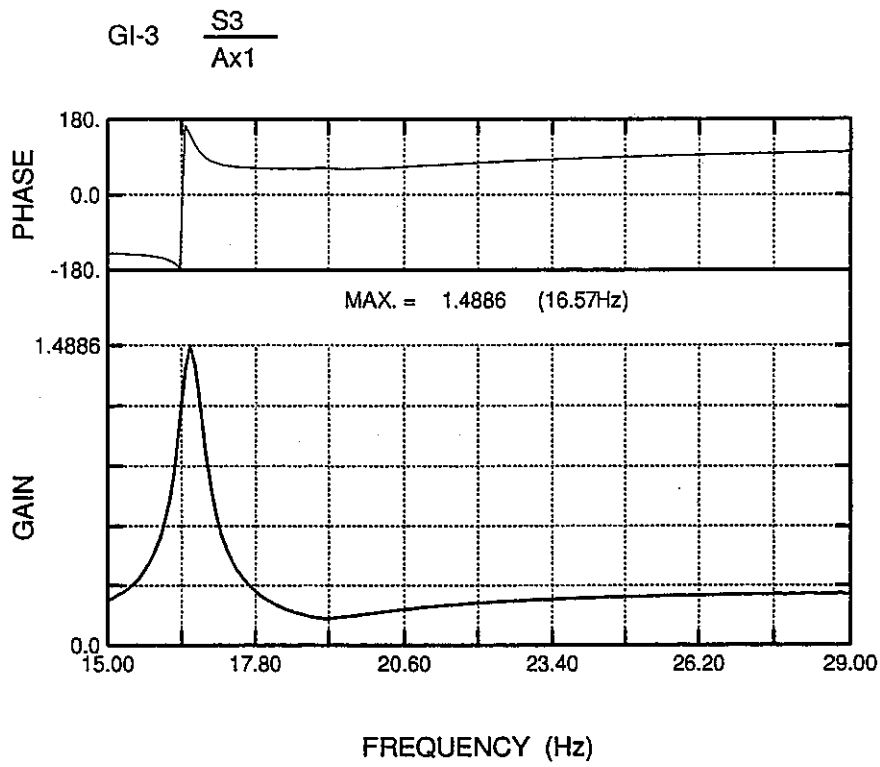
GI-3  $\frac{S1}{Ax1}$

15 ~ 19Hz

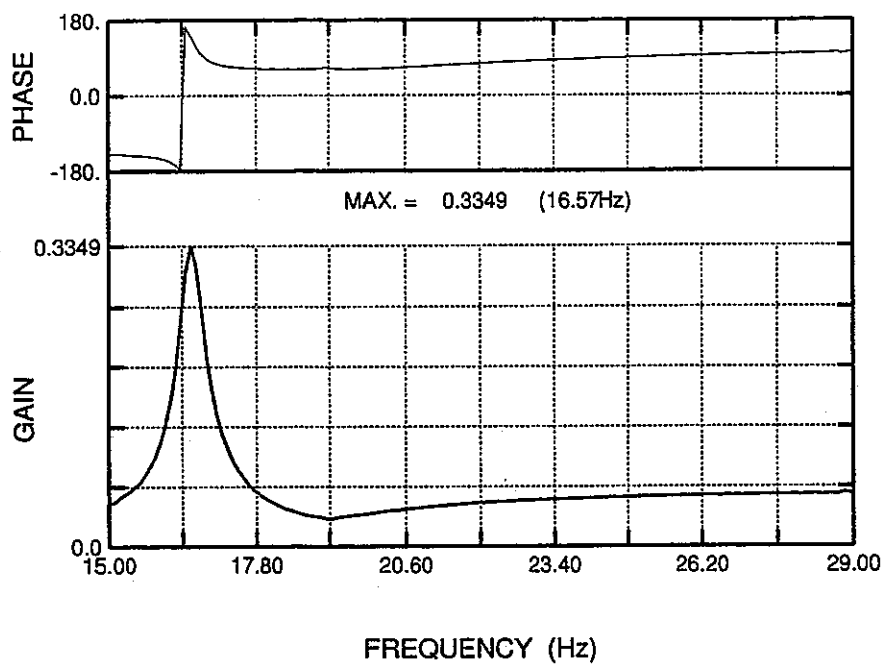


GI-3  $\frac{S2}{Ax1}$



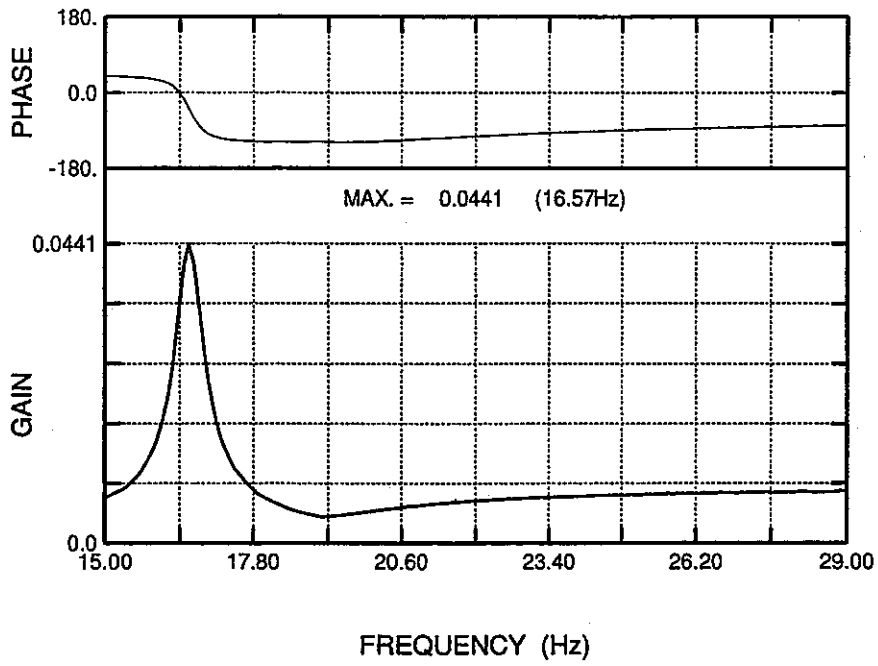


GI-3  $\frac{S5}{Ax1}$

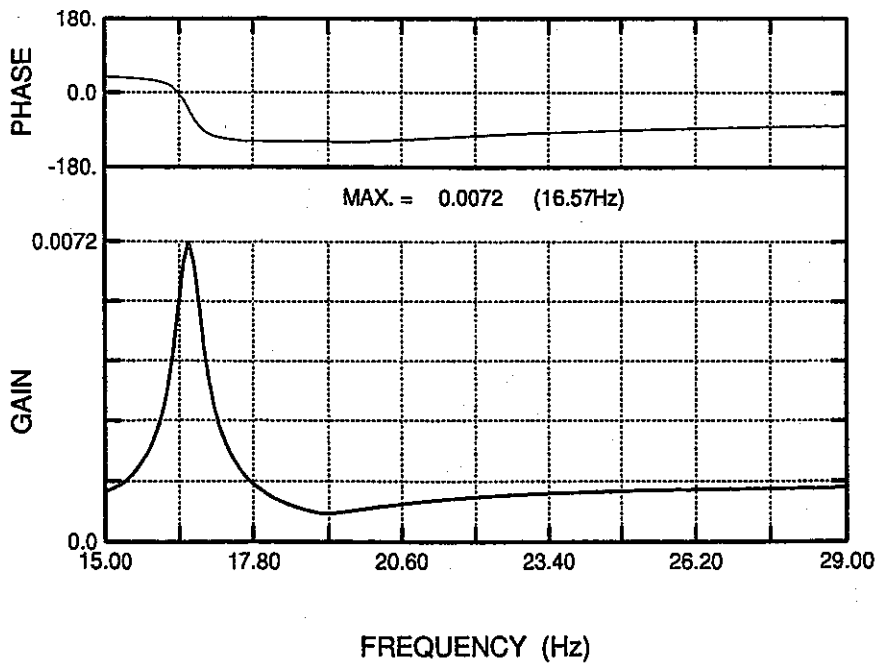


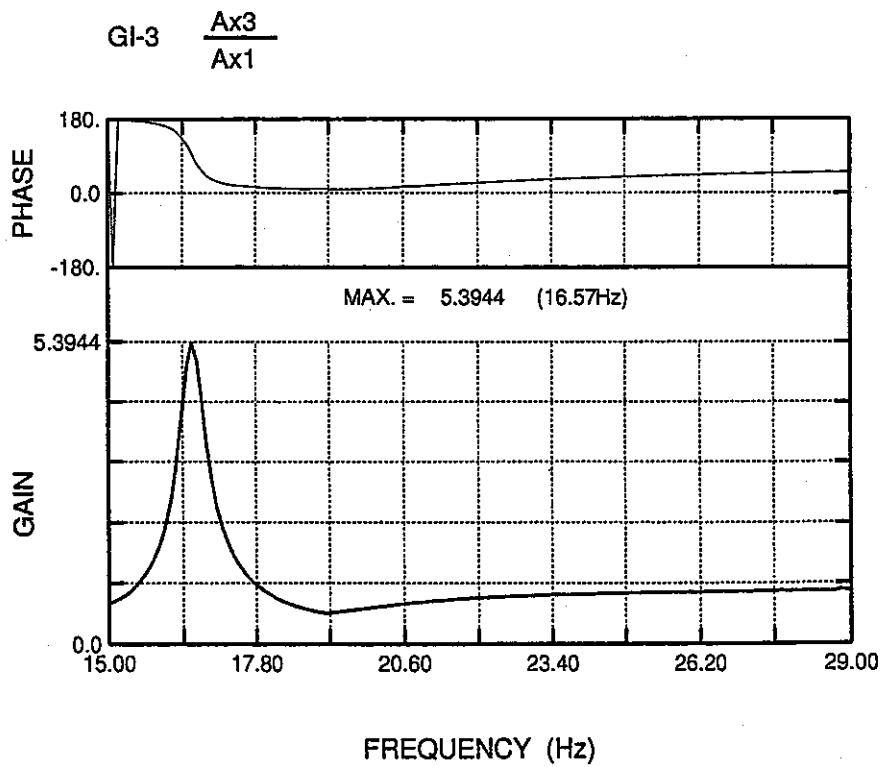
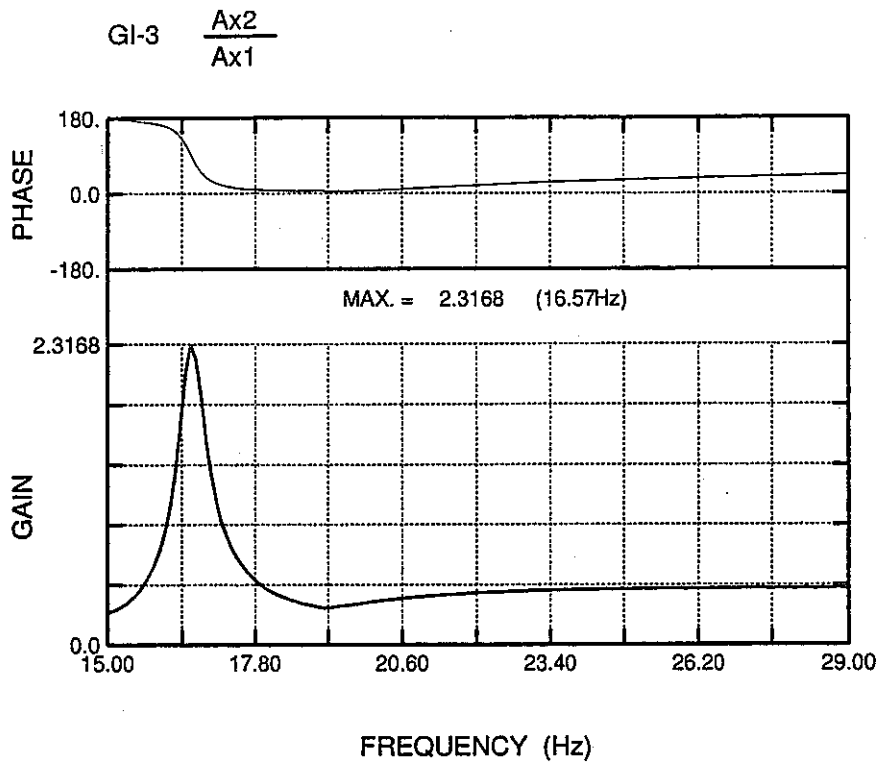


GI-3  $\frac{D2}{Ax1}$

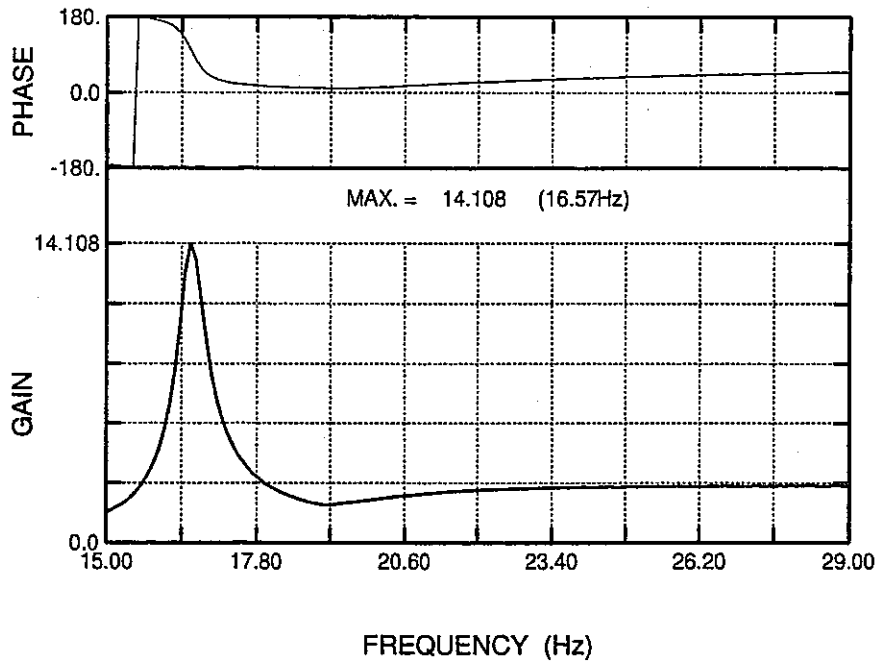


GI-3  $\frac{D1}{Ax1}$

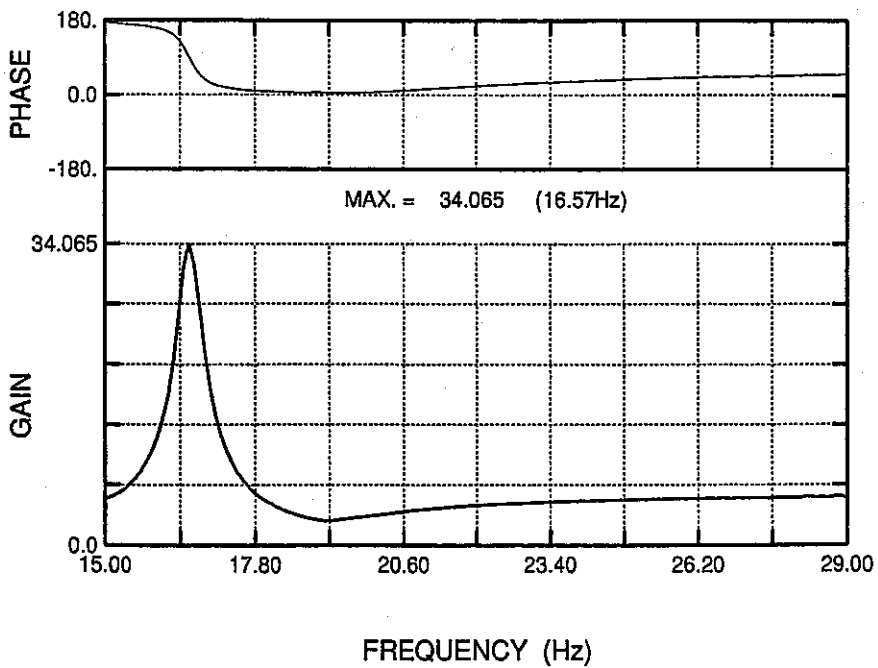




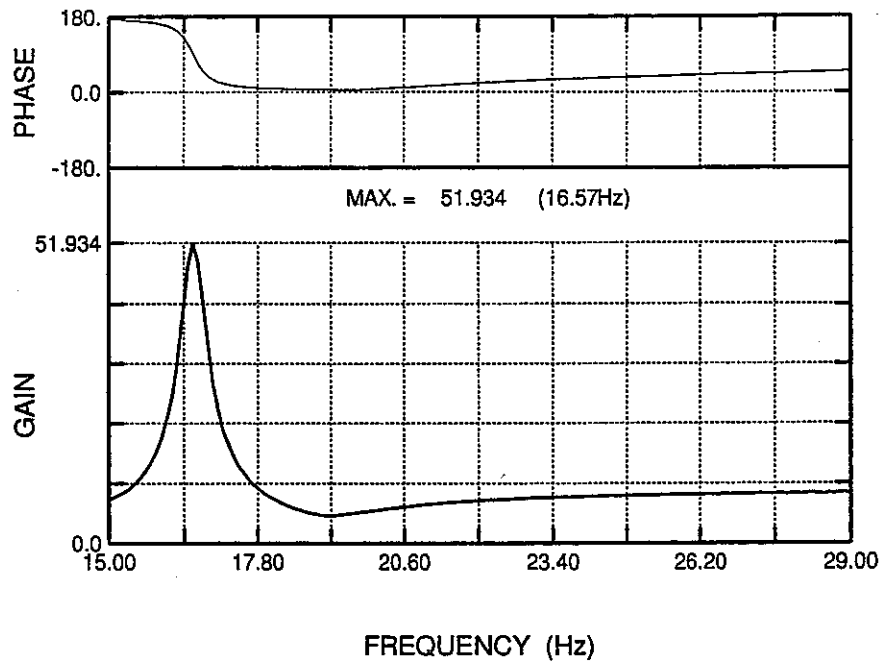
GI-3  $\frac{Ax4}{Ax1}$



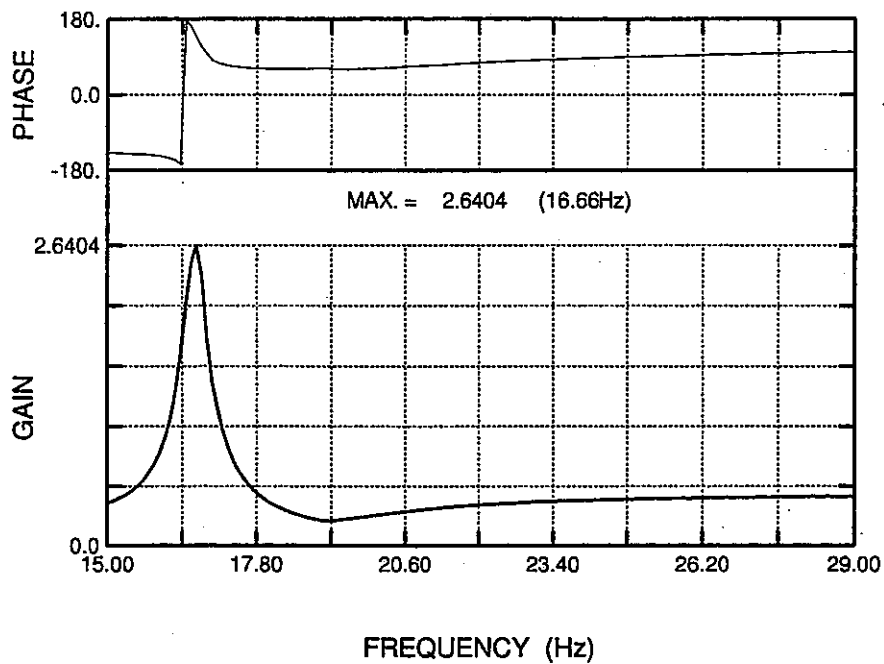
GI-3  $\frac{Ax5}{Ax1}$



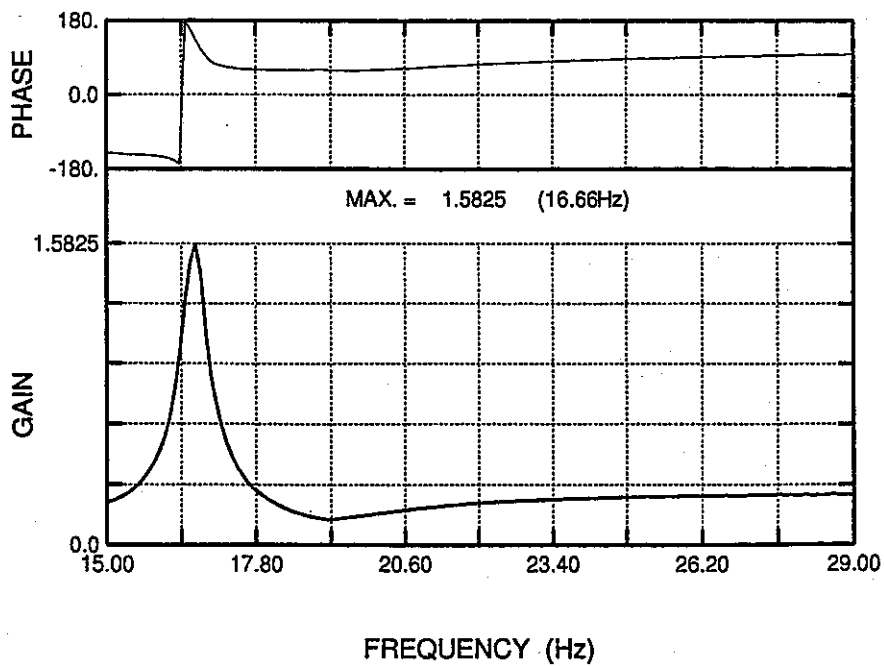
GI-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

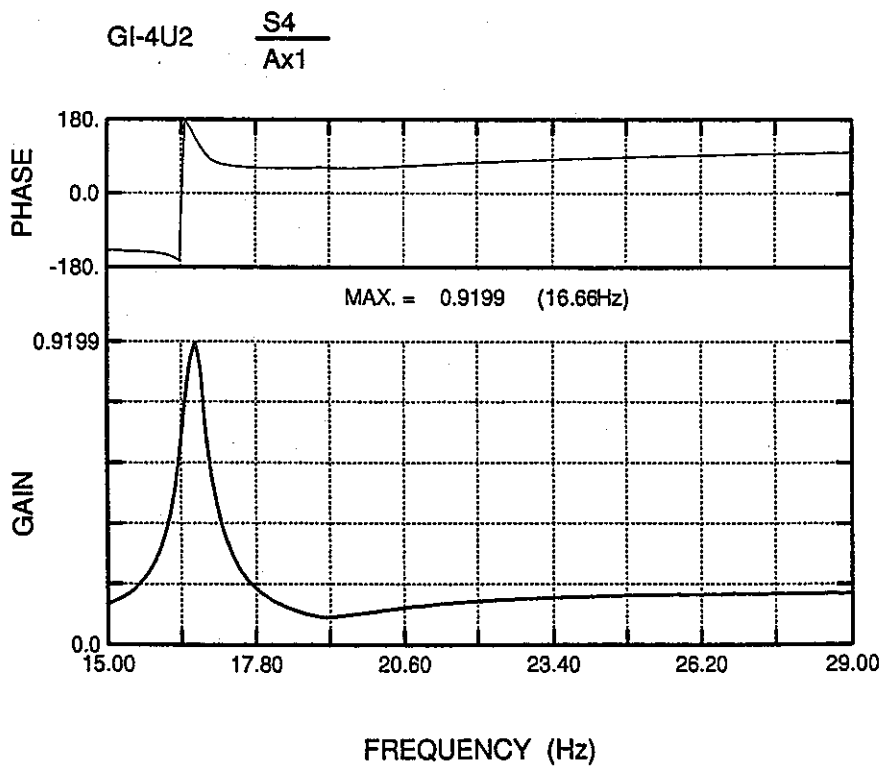
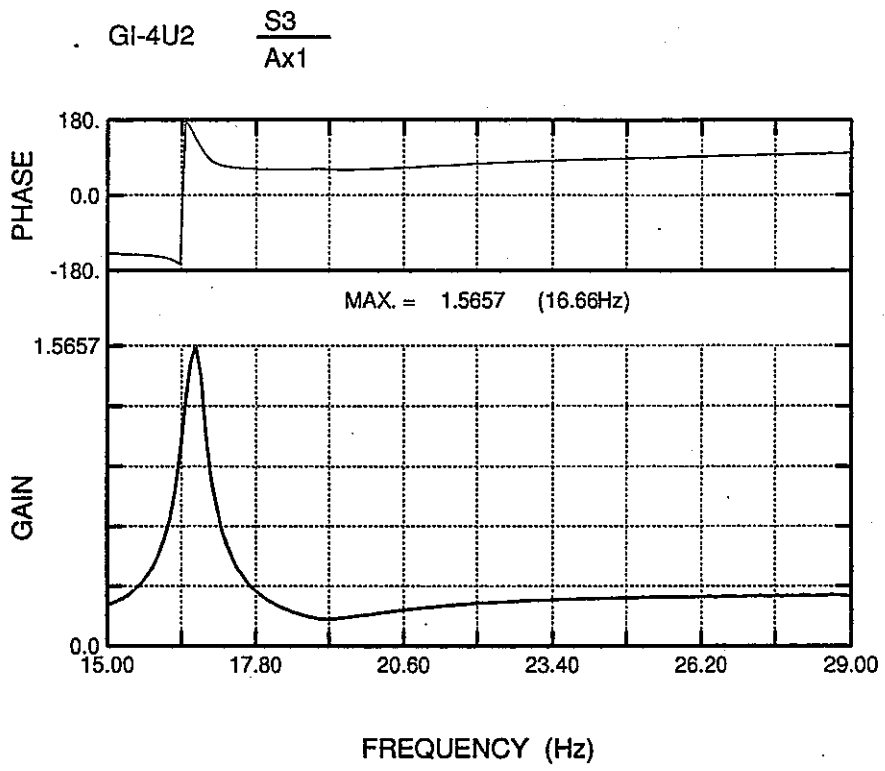


GI-4U2  $\frac{S1}{Ax1}$

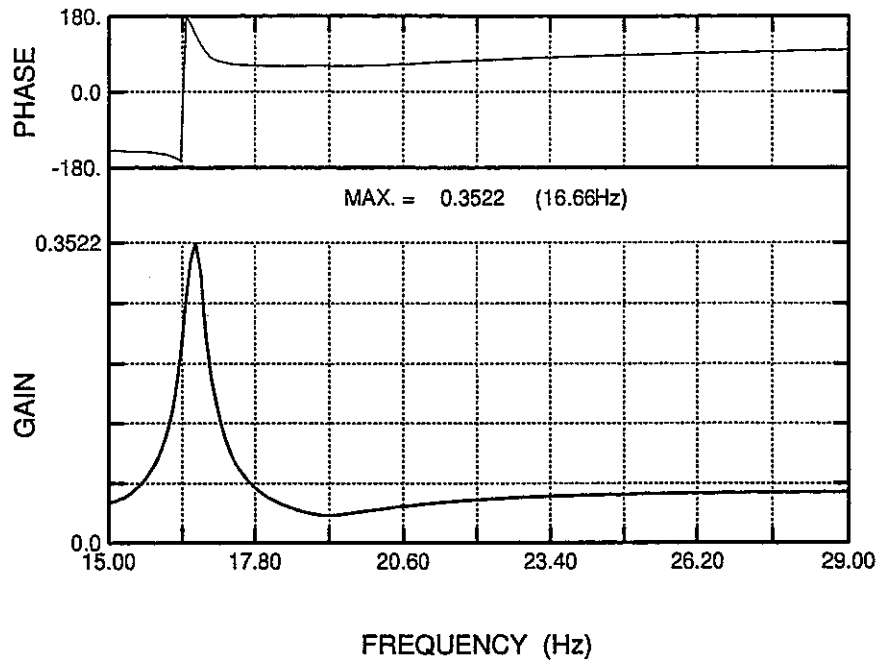


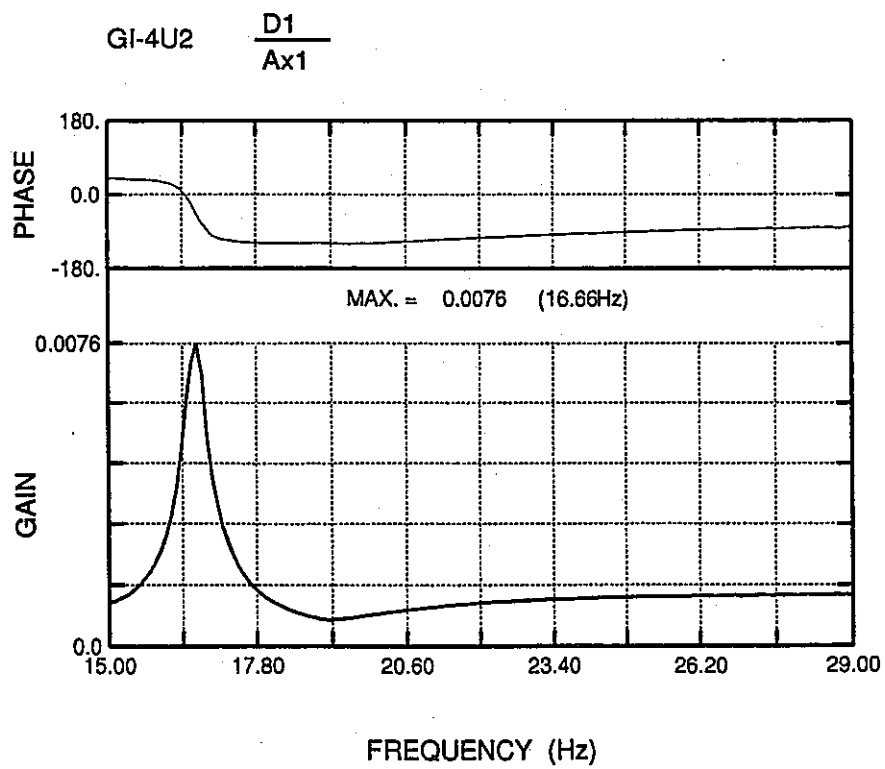
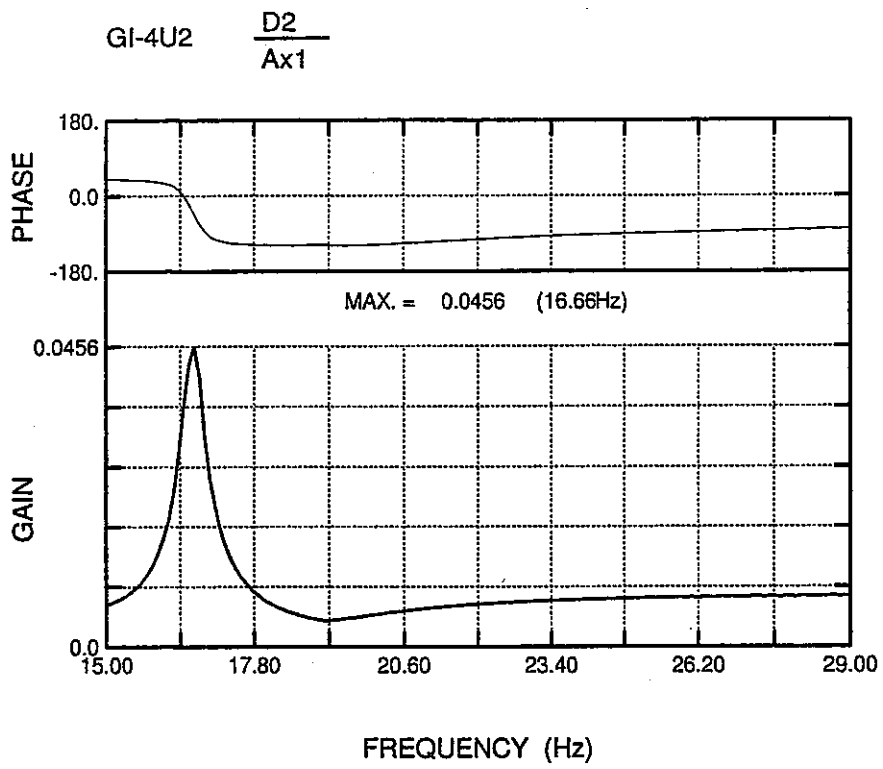
GI-4U2  $\frac{S2}{Ax1}$



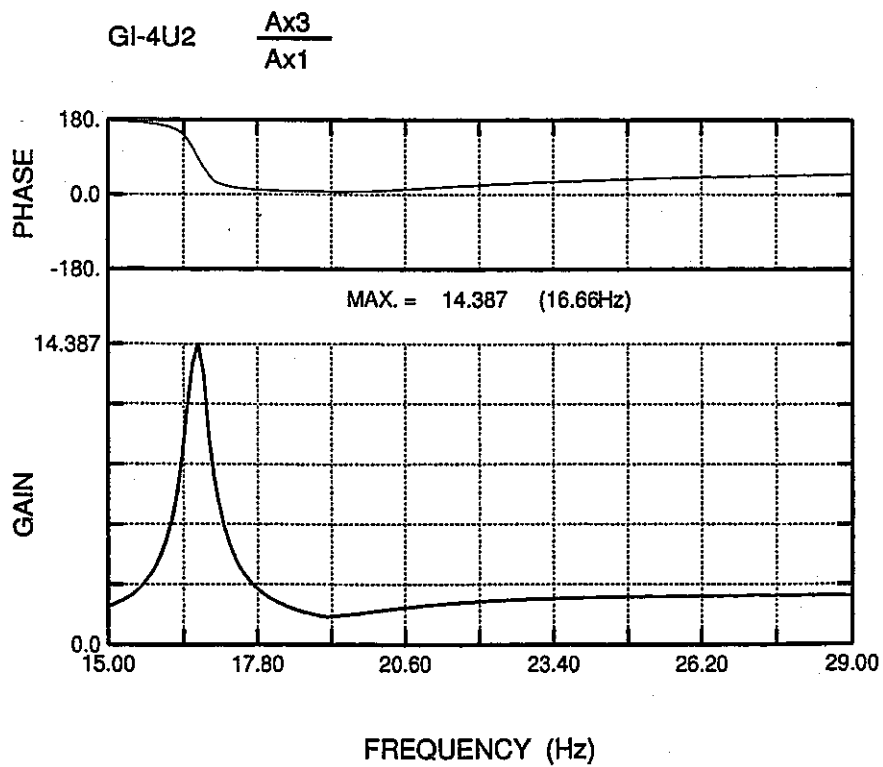
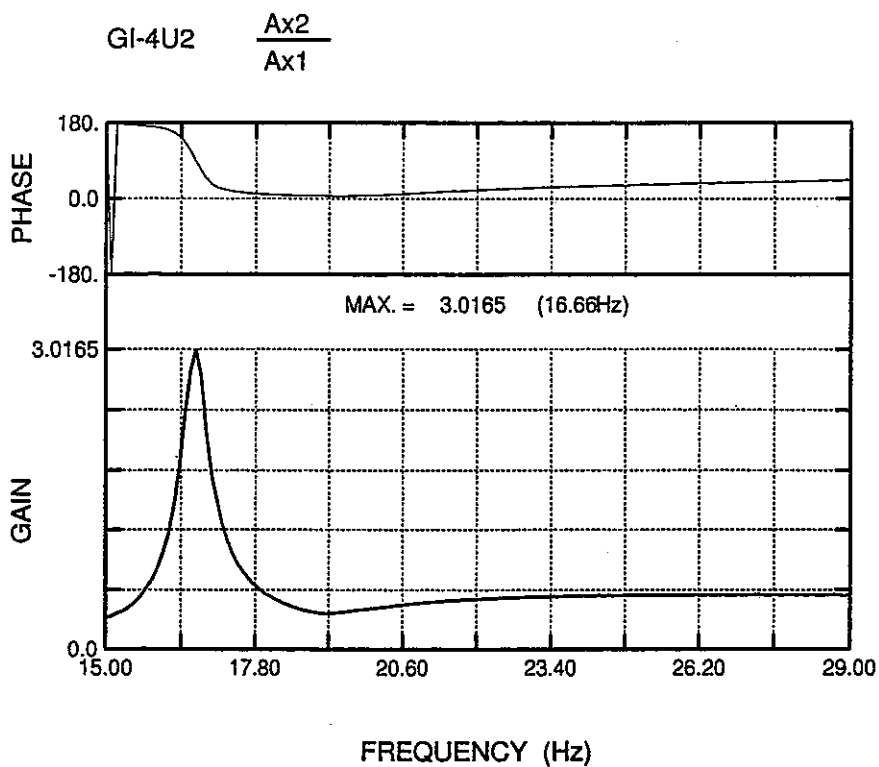


GI-4U2      $\frac{S5}{Ax1}$

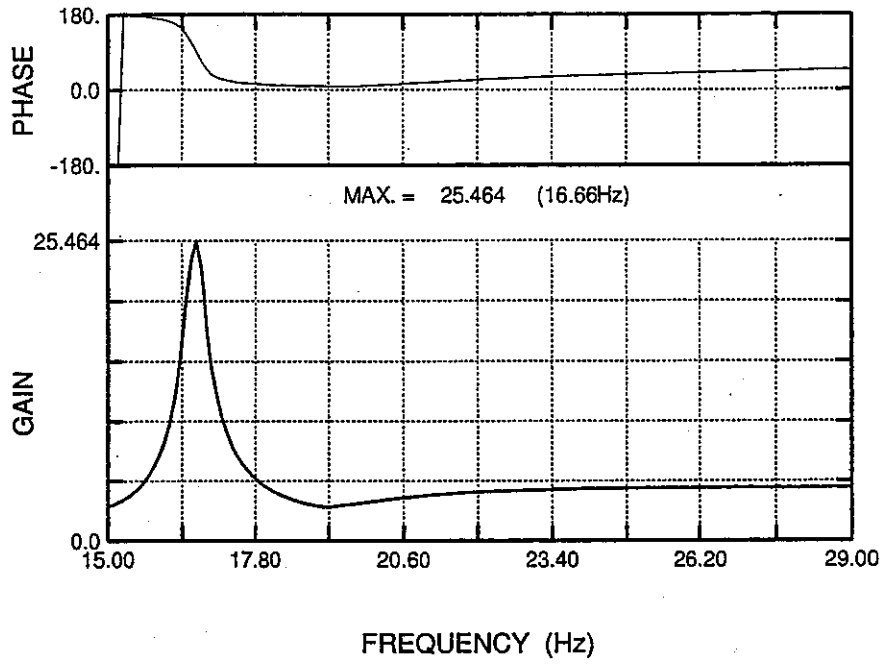




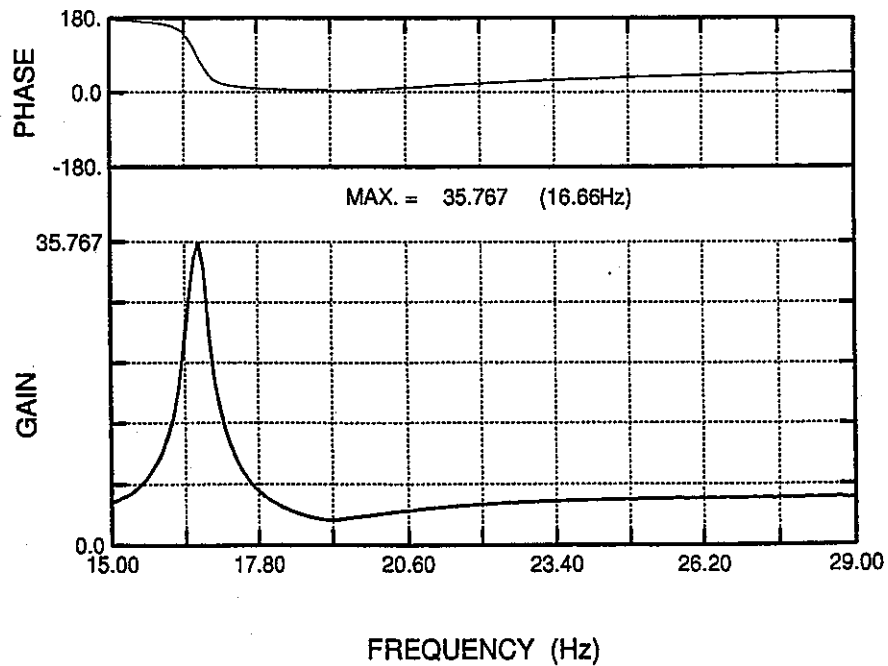




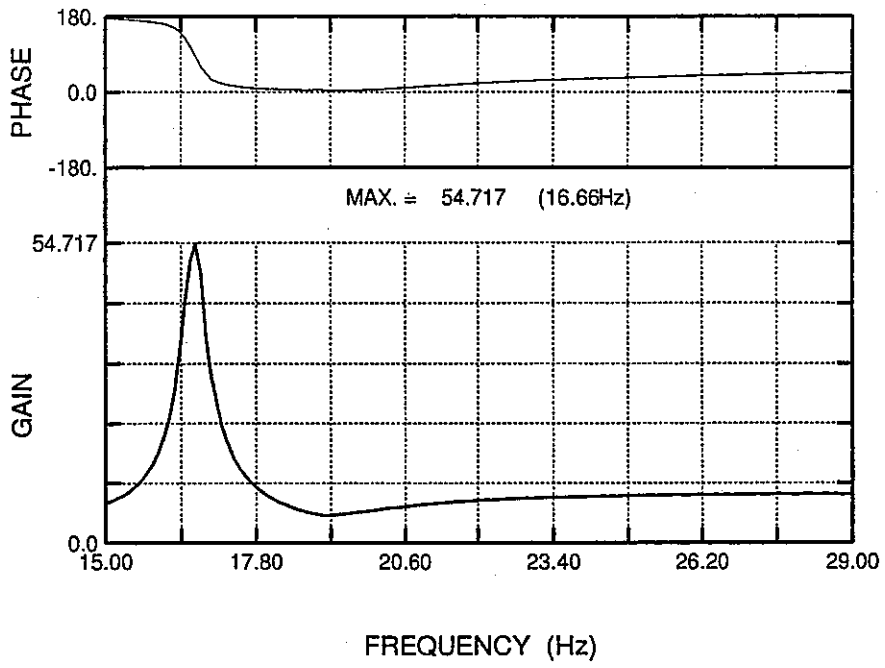
GI-4U2  $\frac{Ax4}{Ax1}$

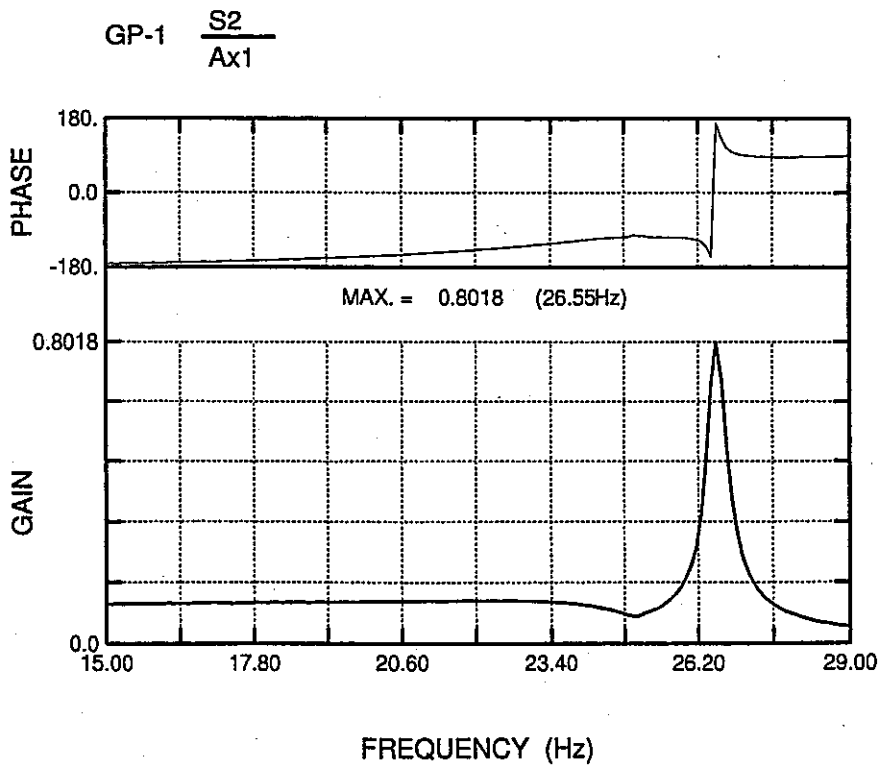
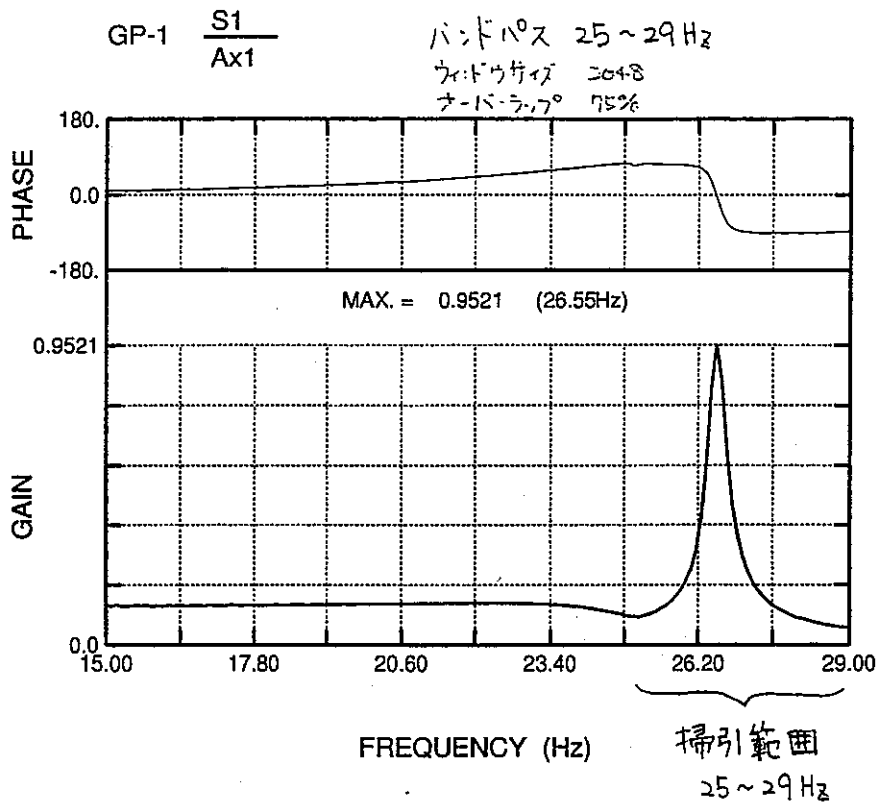


GI-4U2  $\frac{Ax5}{Ax1}$

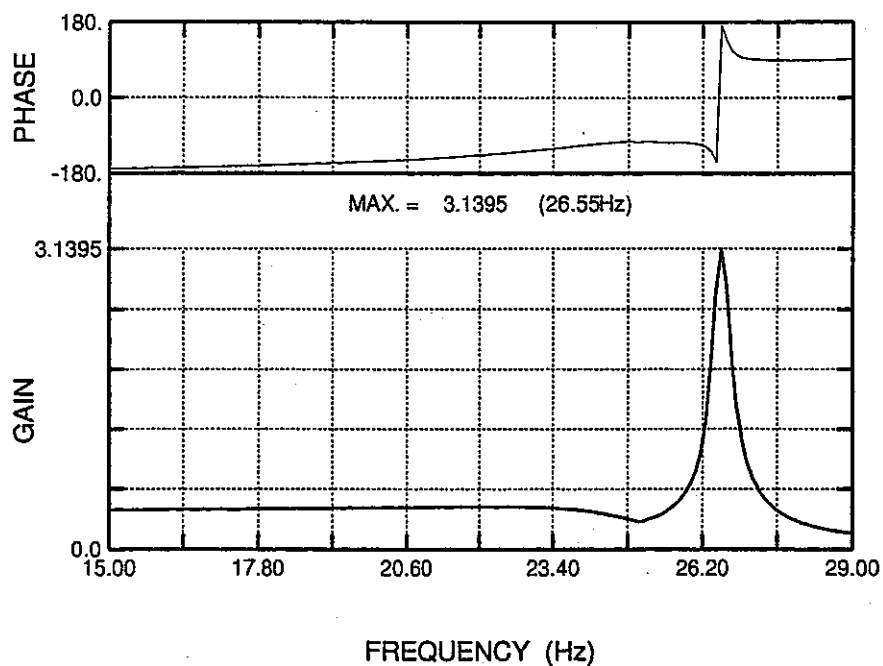


GI-4U2  $\frac{Ax6}{Ax1}$

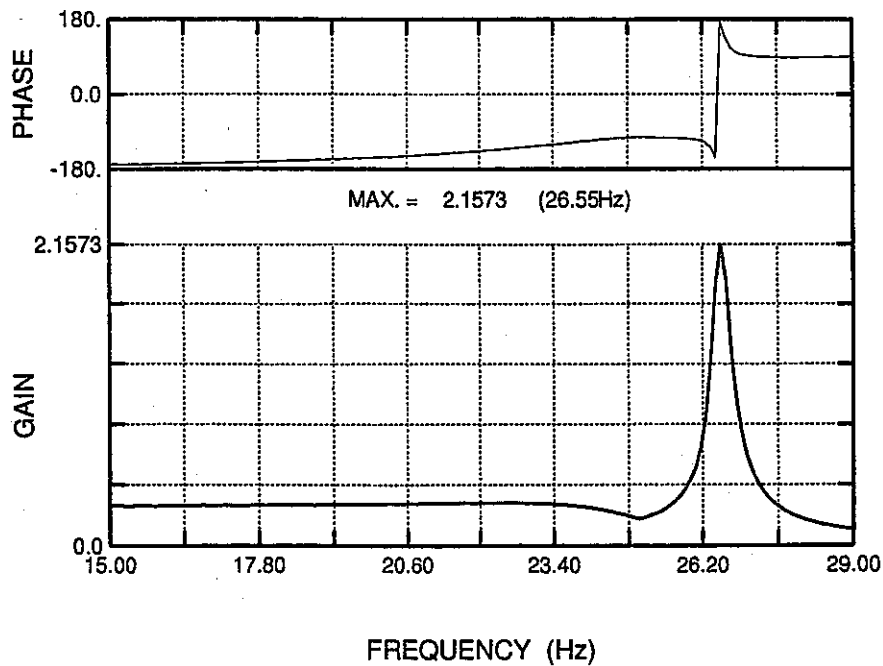


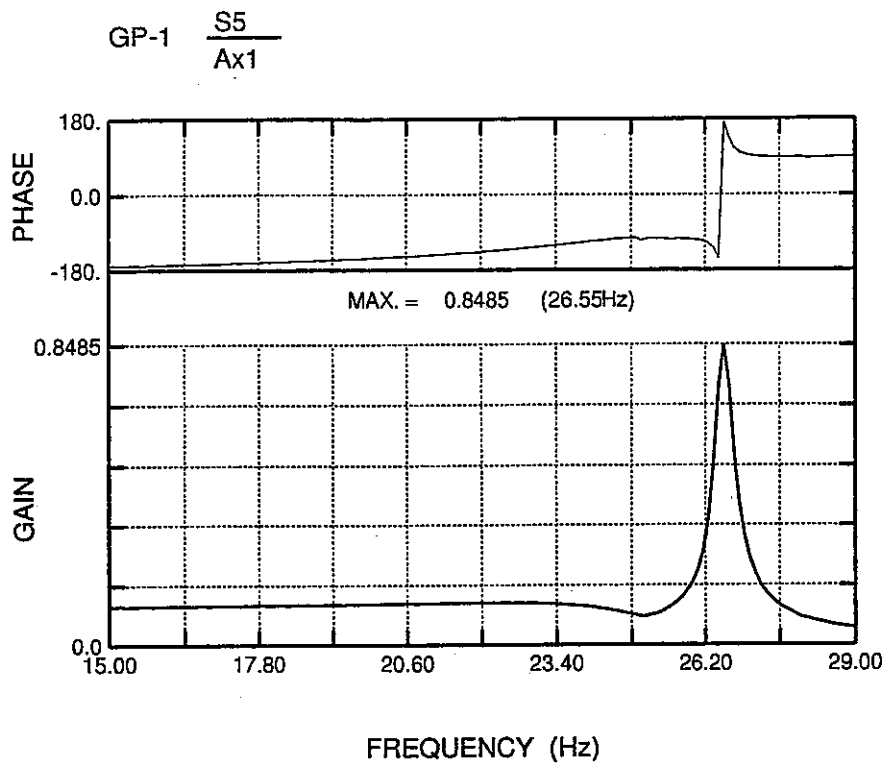


GP-1  $\frac{S3}{Ax1}$

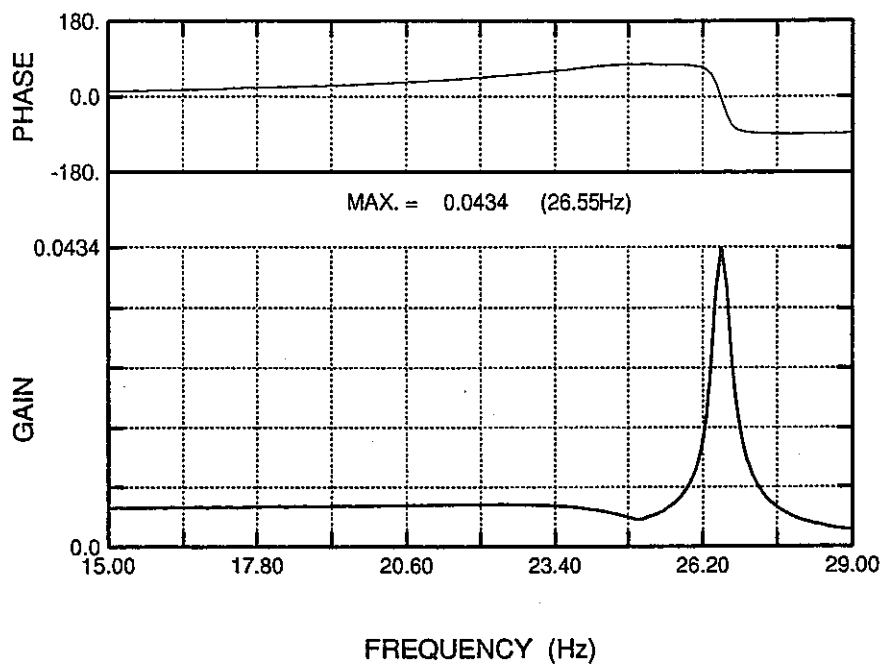


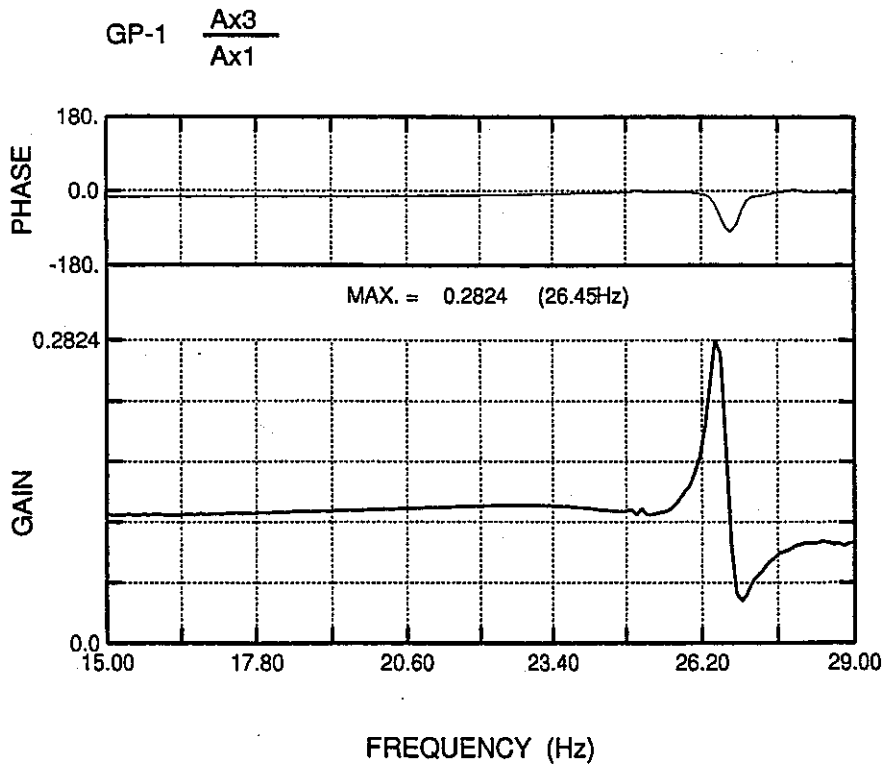
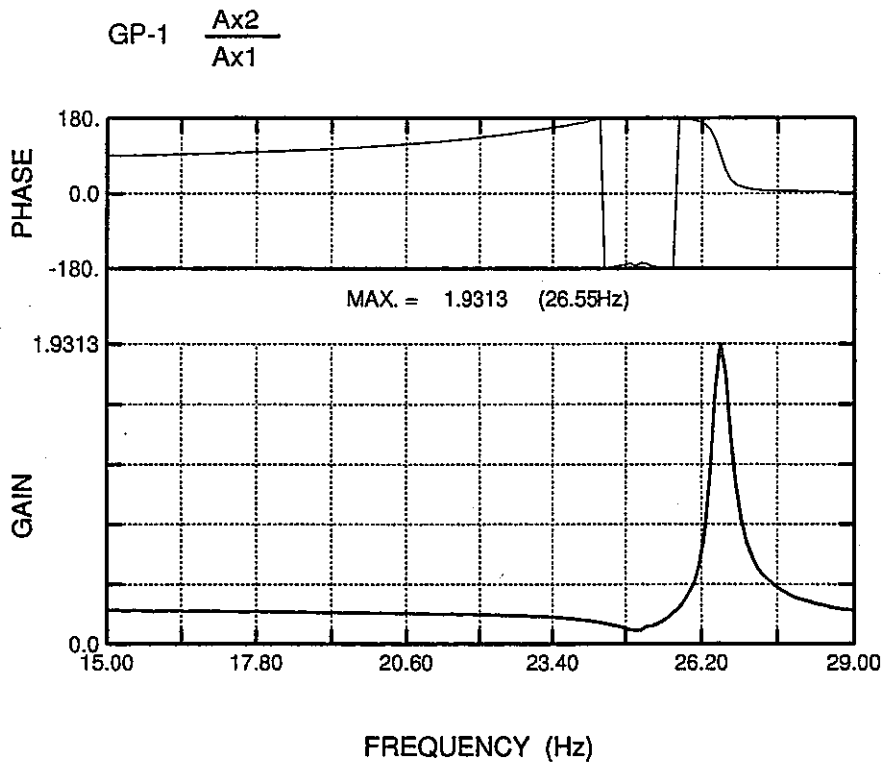
GP-1  $\frac{S4}{Ax1}$





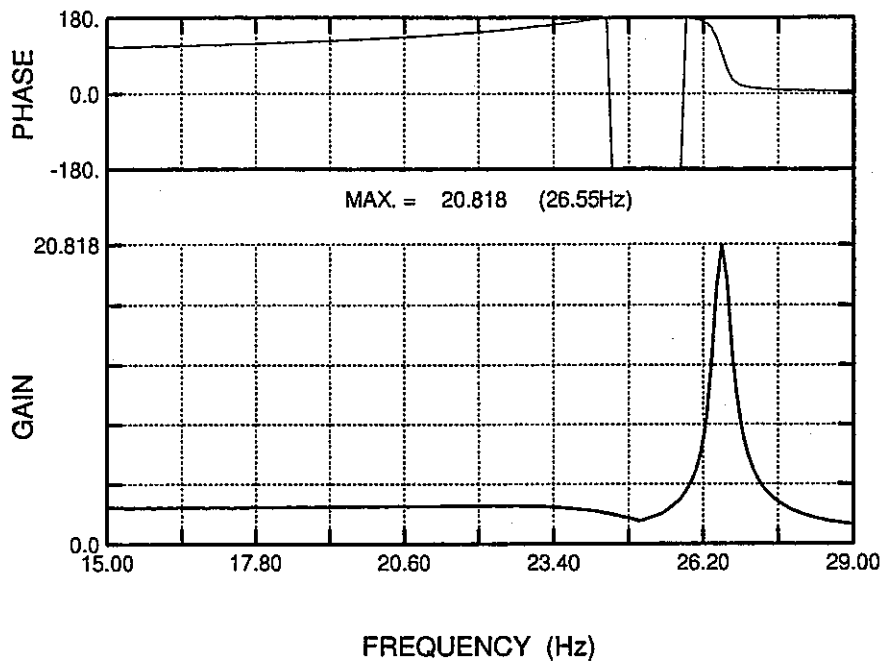
GP-1  $\frac{D2}{Ax1}$



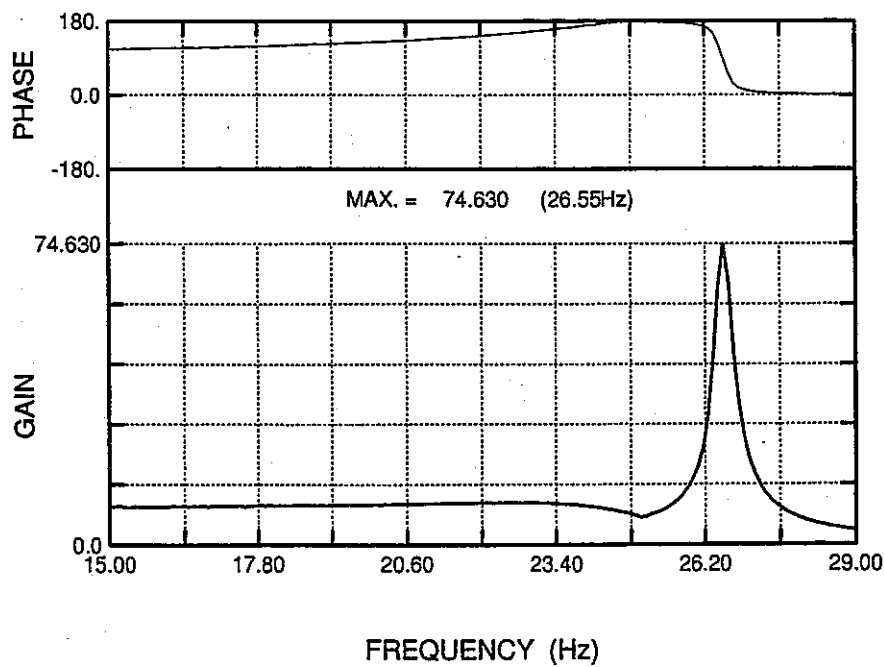




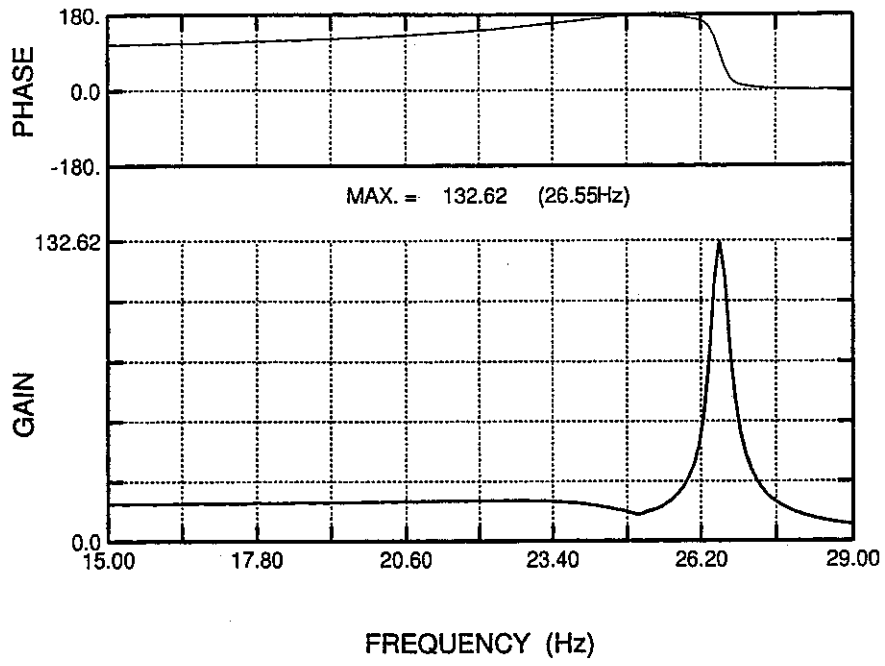
GP-1  $\frac{Ax4}{Ax1}$



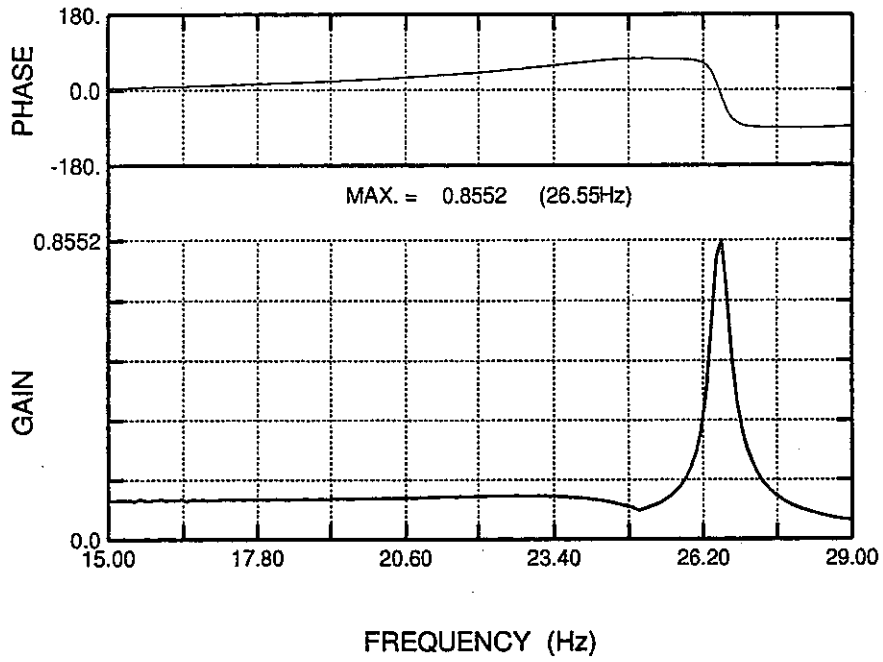
GP-1  $\frac{Ax5}{Ax1}$



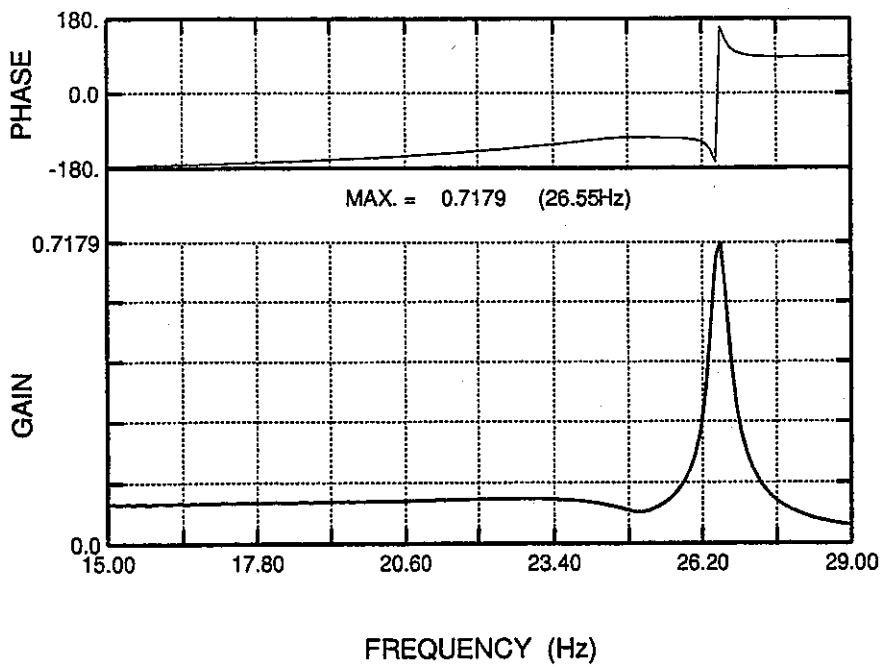
GP-1  $\frac{Ax6}{Ax1}$



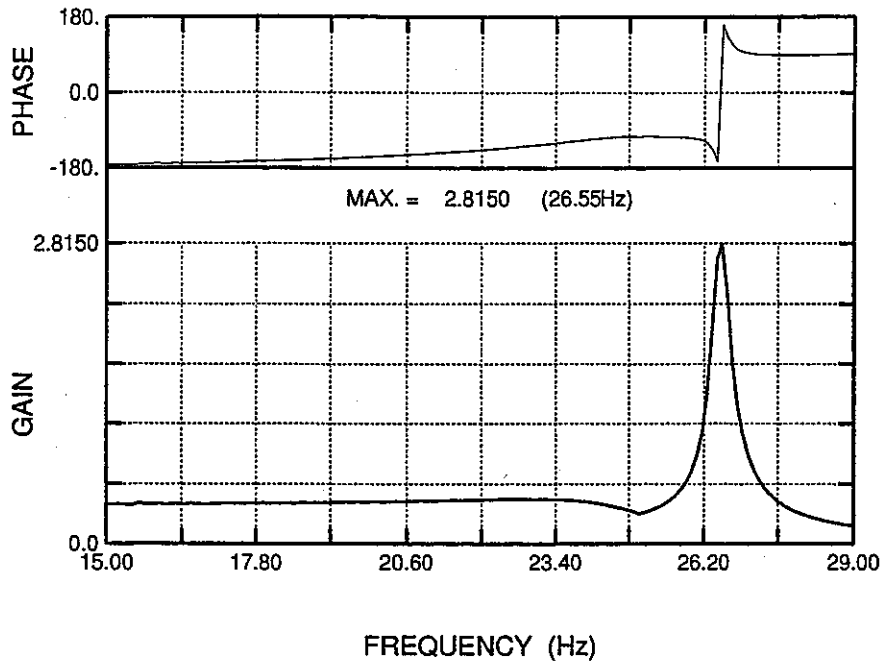
GP-2  $\frac{S1}{Ax1}$



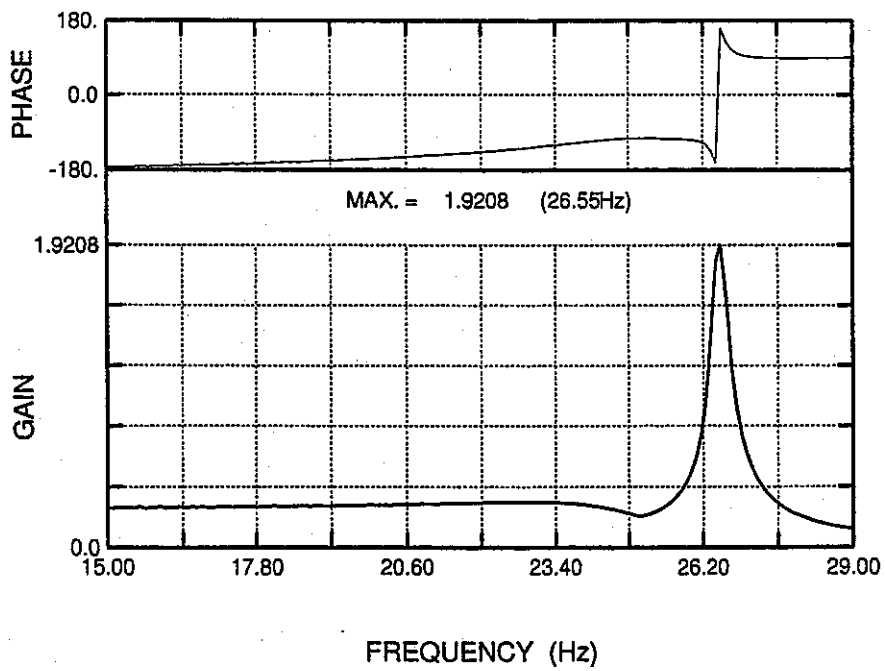
GP-2  $\frac{S2}{Ax1}$



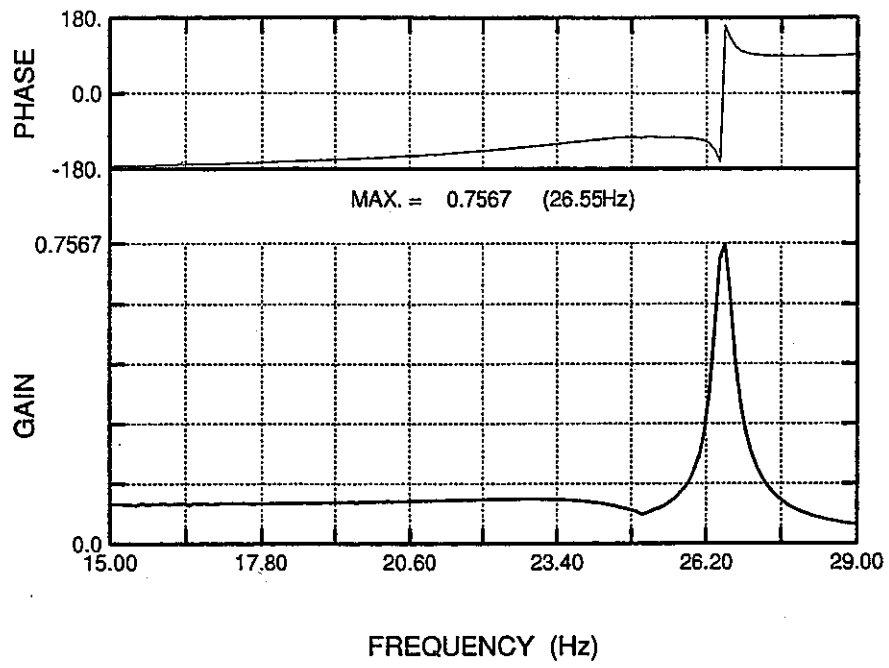
GP-2  $\frac{S3}{Ax1}$



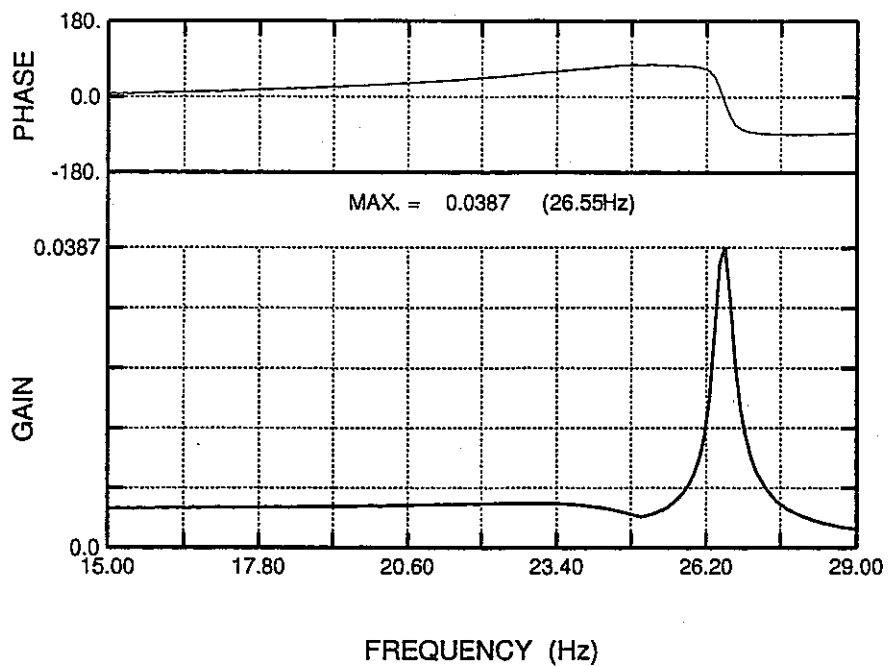
GP-2  $\frac{S4}{Ax1}$



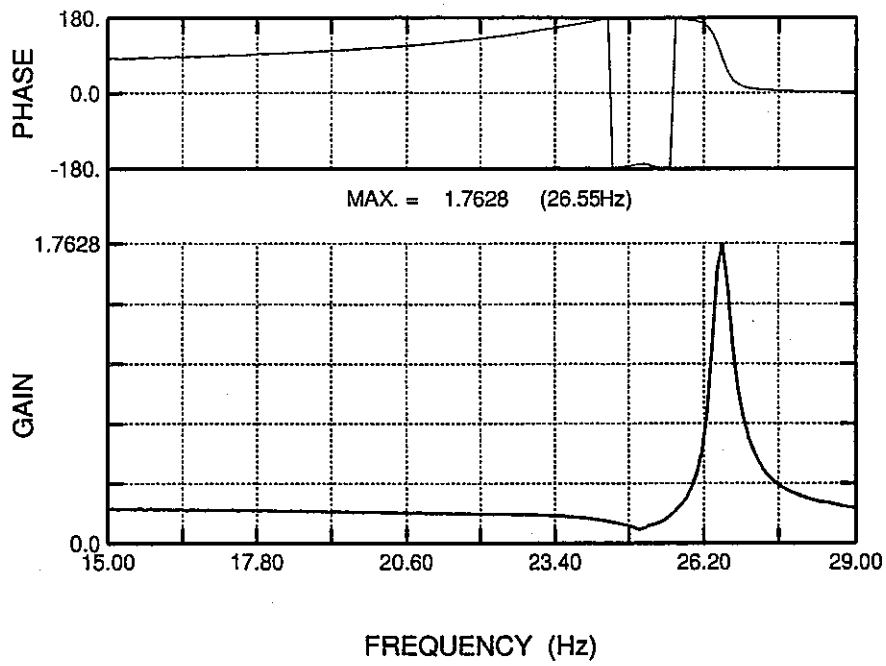
GP-2  $\frac{S5}{Ax1}$



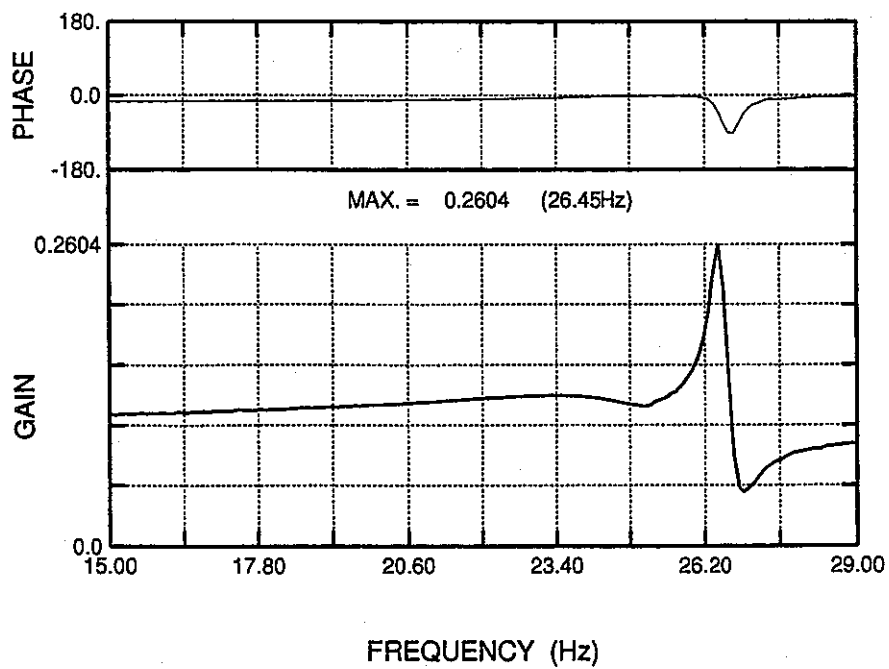
GP-2  $\frac{D2}{Ax1}$



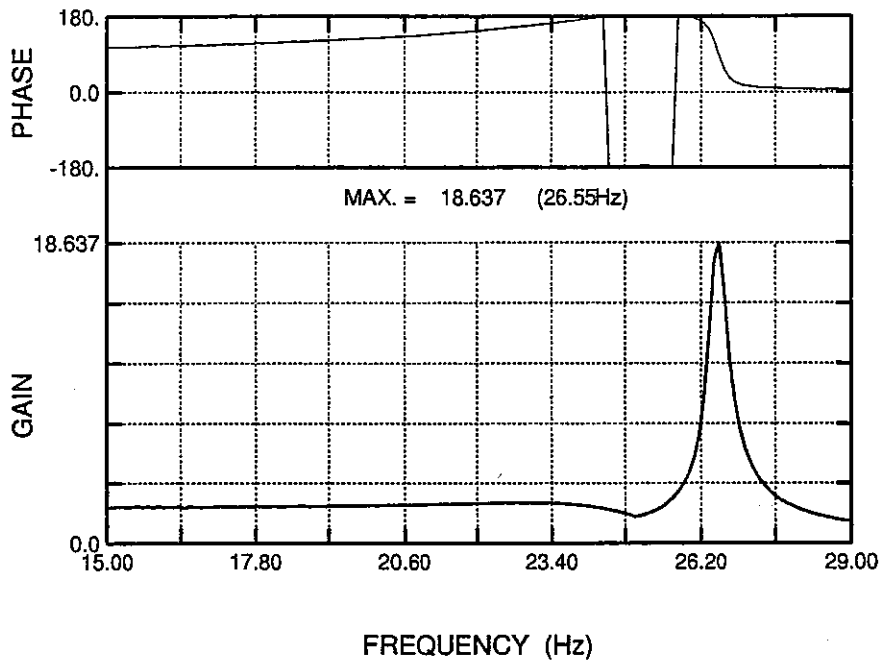
GP-2  $\frac{Ax2}{Ax1}$



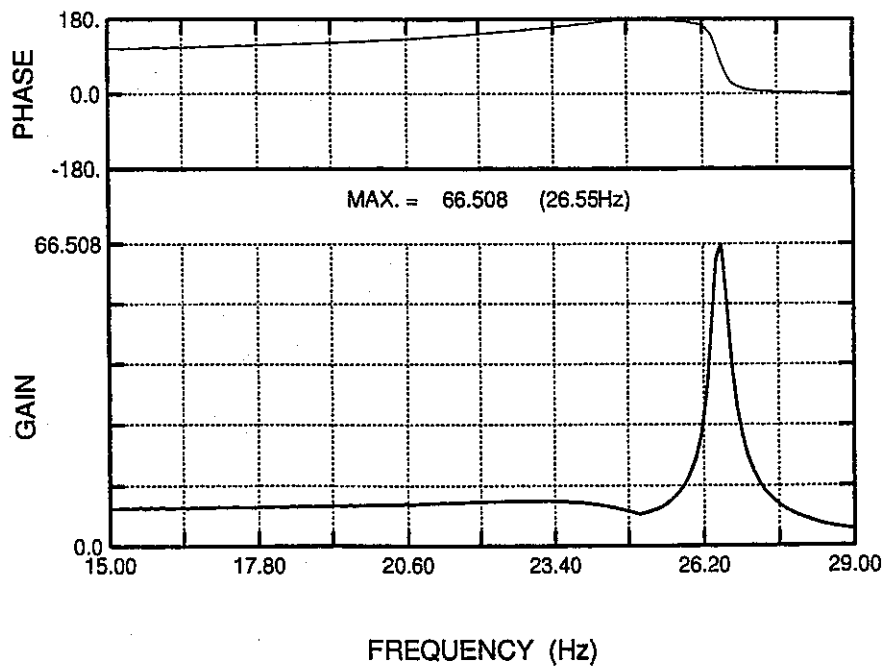
GP-2  $\frac{Ax3}{Ax1}$



GP-2  $\frac{Ax4}{Ax1}$

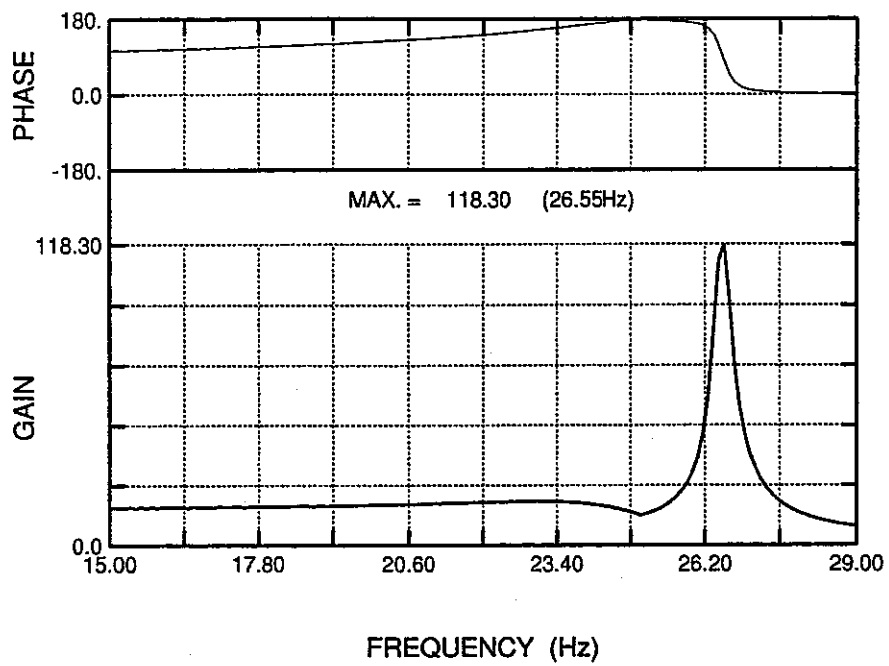


GP-2  $\frac{Ax5}{Ax1}$

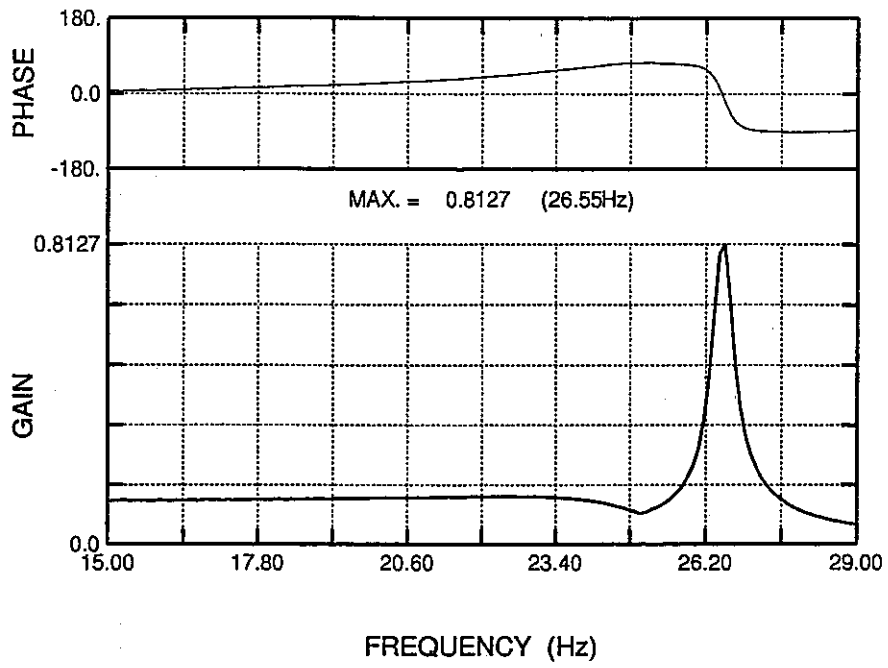




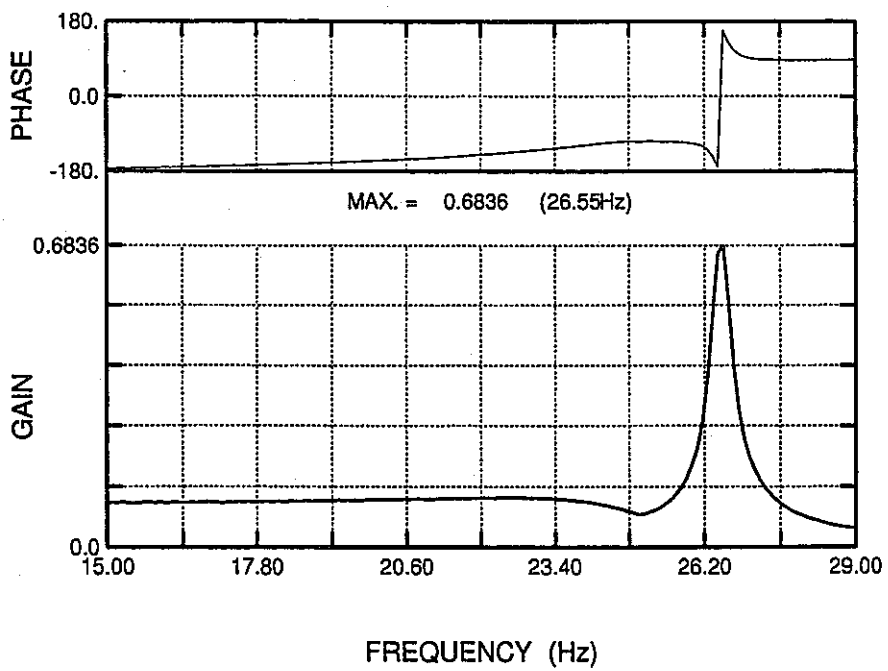
GP-2  $\frac{Ax6}{Ax1}$



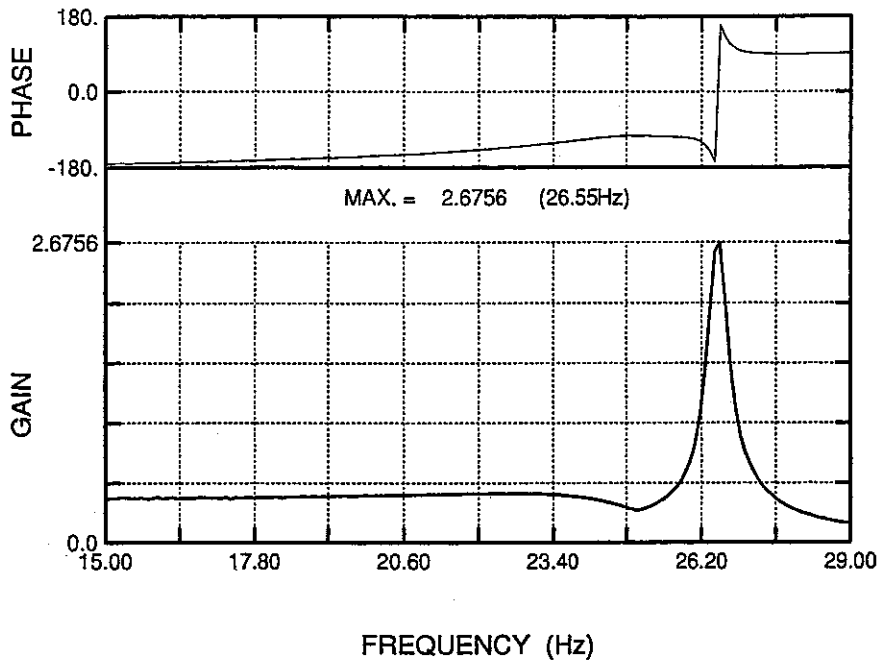
GP-3  $\frac{S1}{Ax1}$



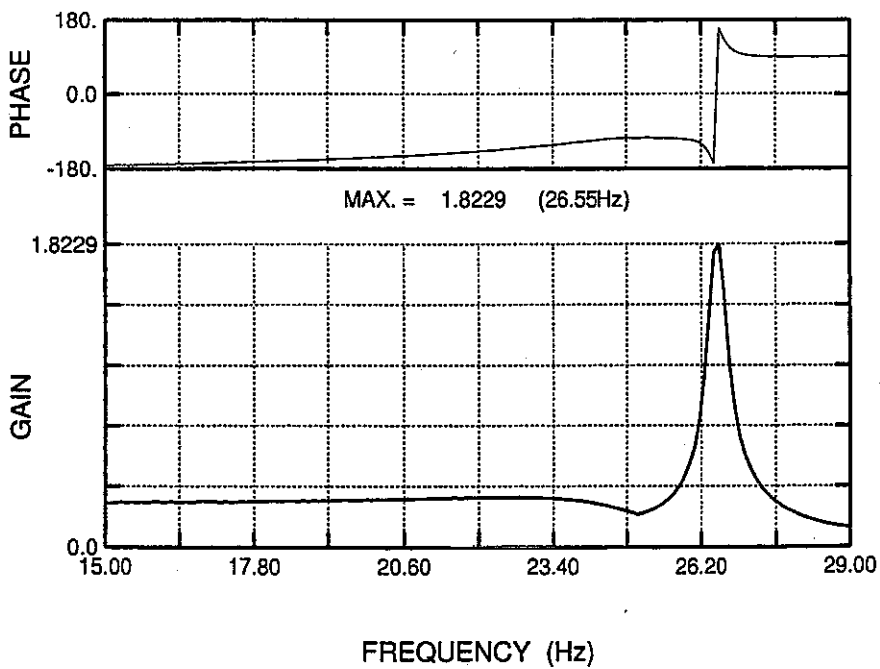
GP-3  $\frac{S2}{Ax1}$



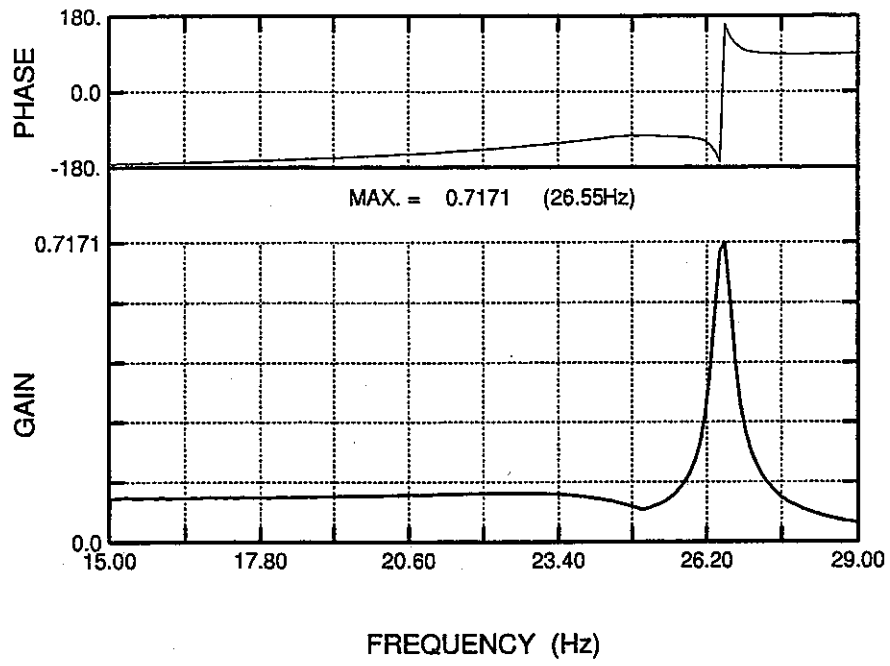
GP-3  $\frac{S3}{Ax1}$



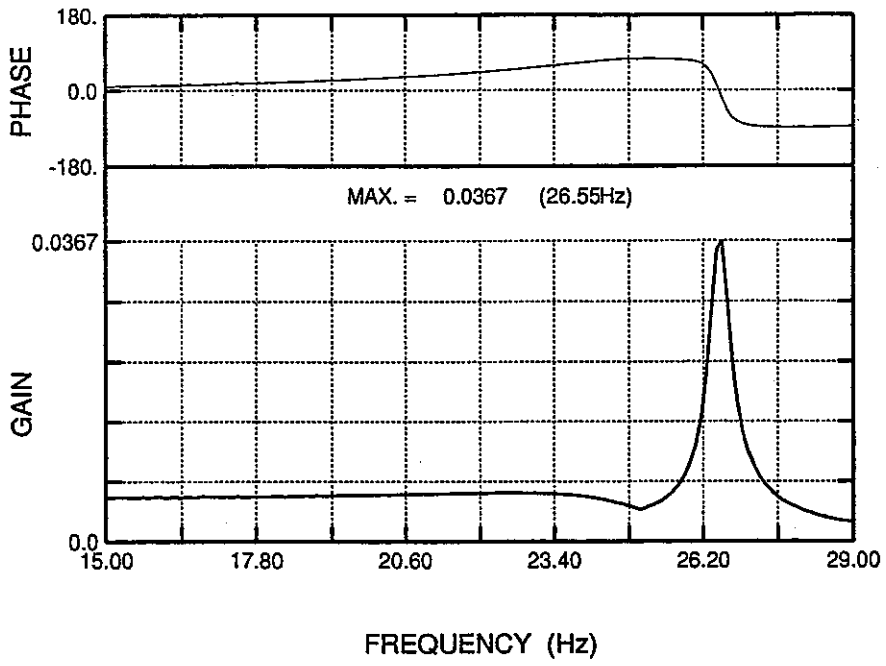
GP-3  $\frac{S4}{Ax1}$



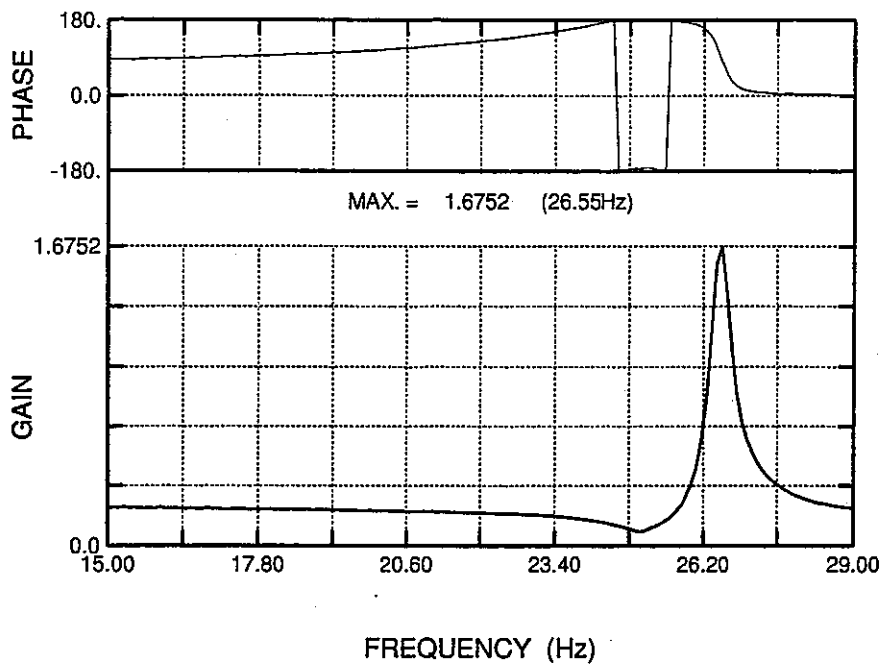
GP-3  $\frac{S5}{Ax1}$



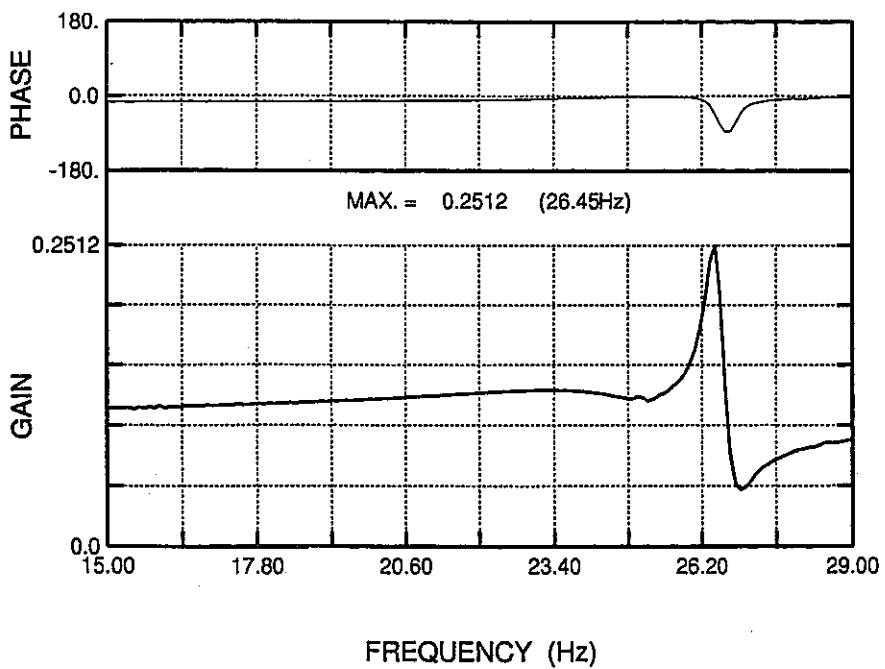
GP-3  $\frac{D2}{Ax1}$



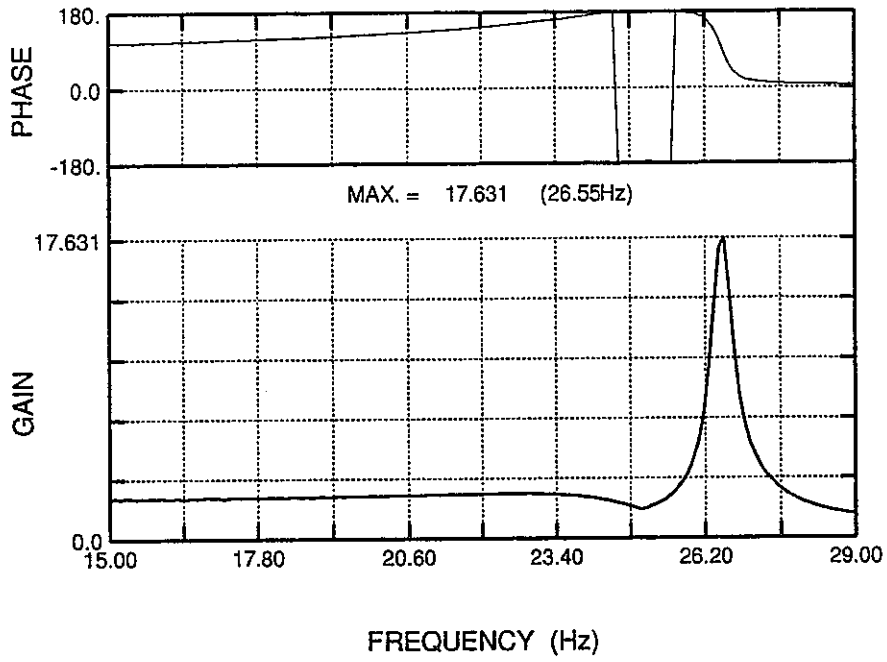
GP-3  $\frac{Ax2}{Ax1}$



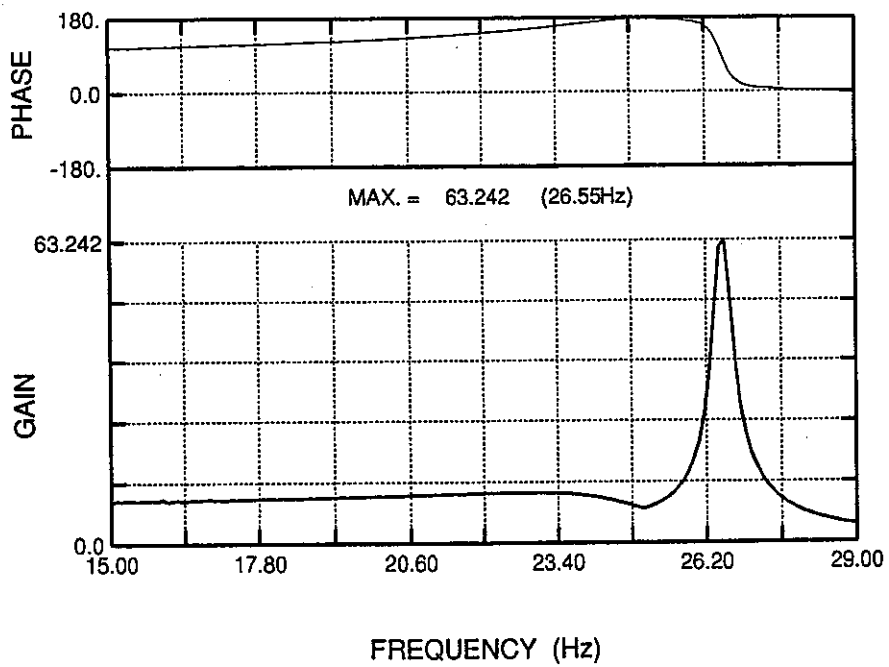
GP-3  $\frac{Ax3}{Ax1}$



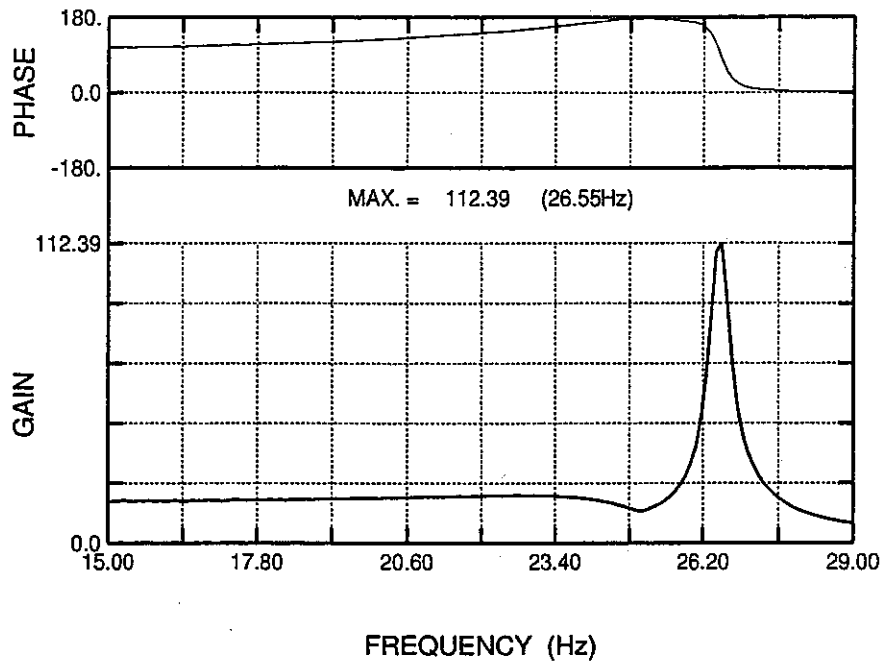
GP-3  $\frac{Ax4}{Ax1}$



GP-3  $\frac{Ax5}{Ax1}$

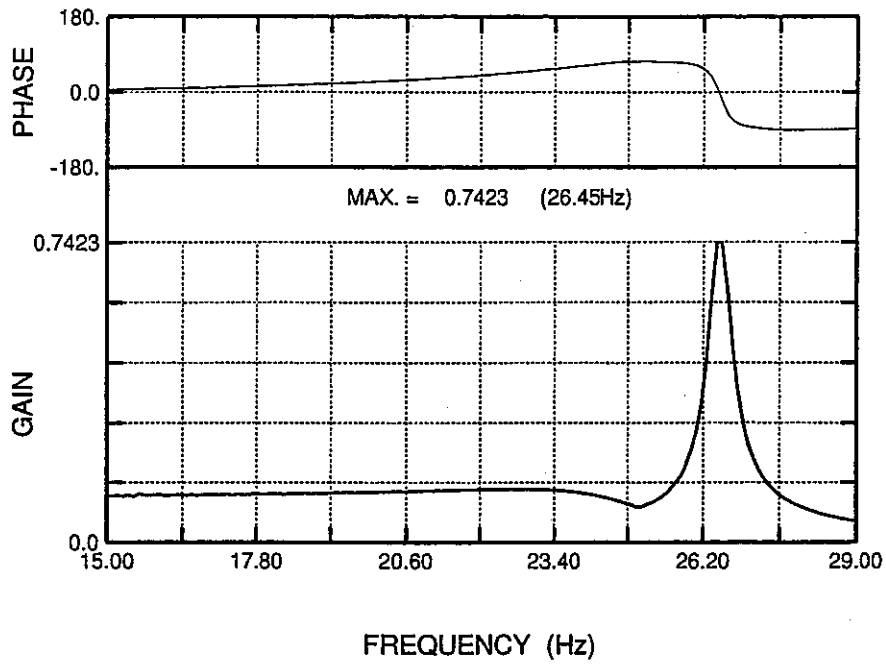


GP-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

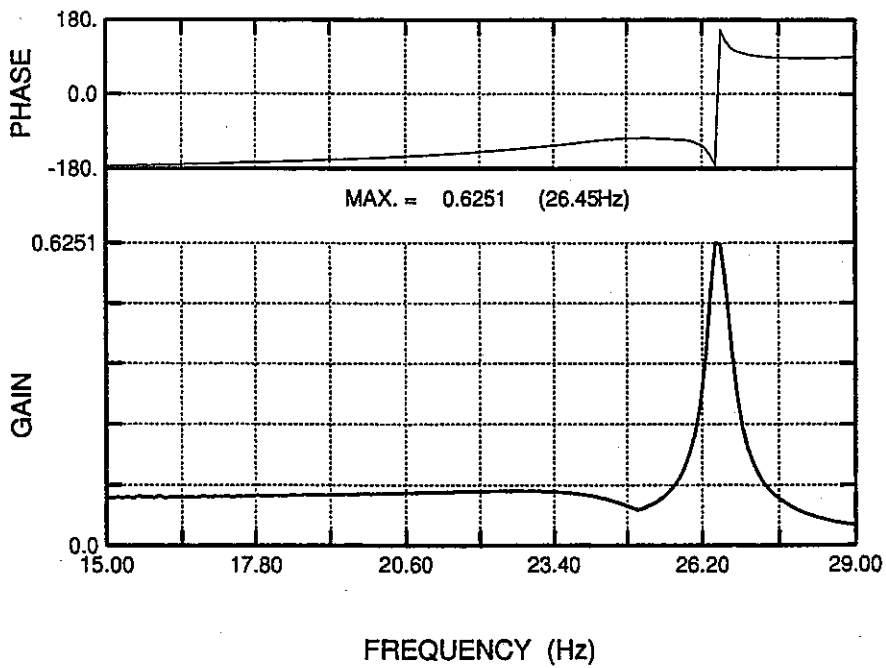




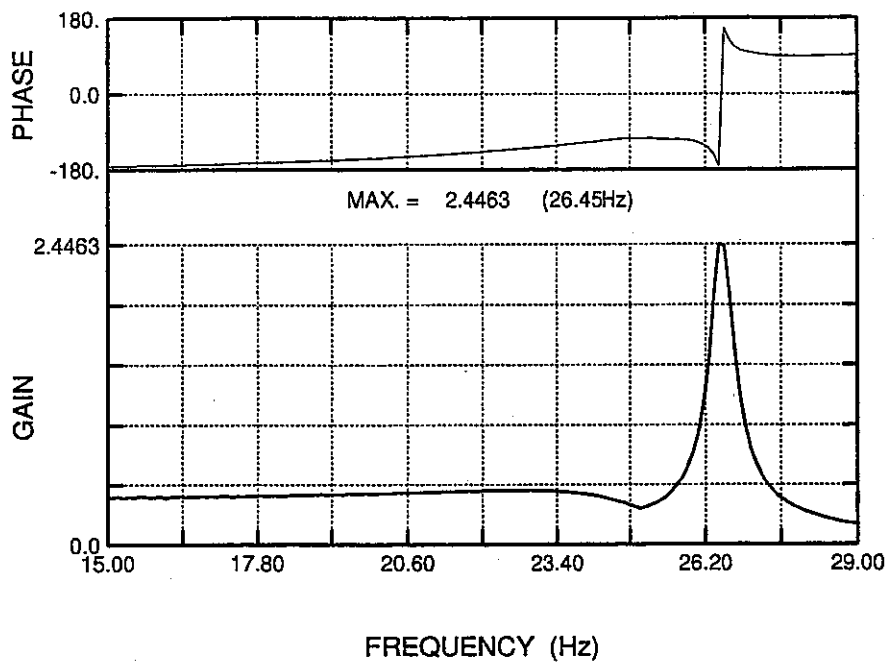
GP-4  $\frac{S1}{Ax1}$



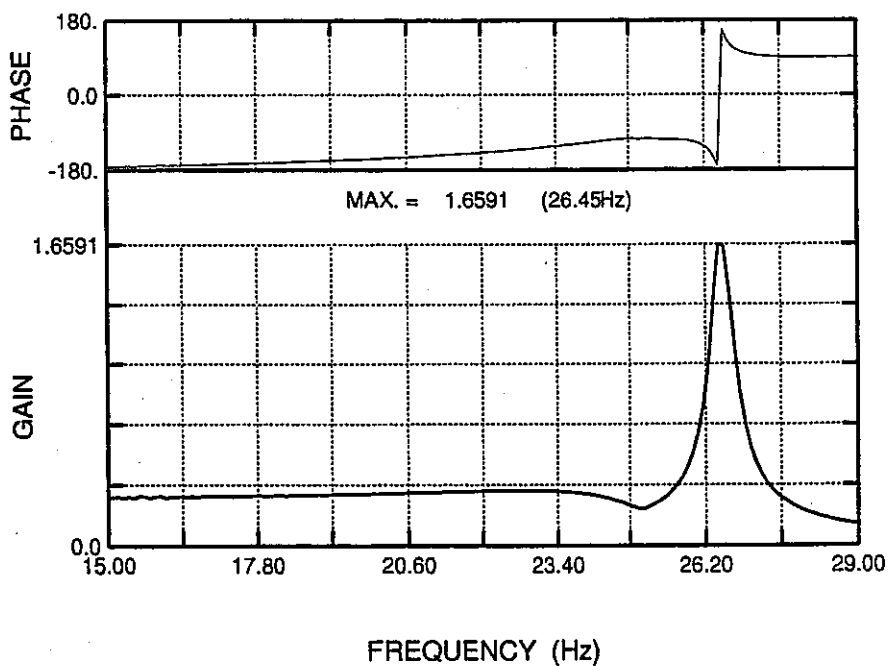
GP-4  $\frac{S2}{Ax1}$



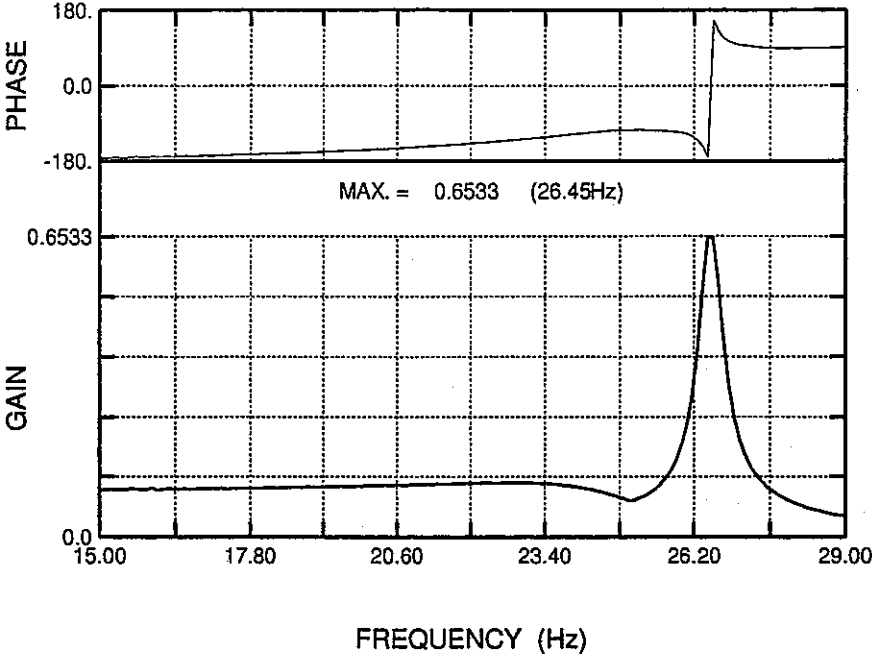
GP-4  $\frac{S3}{Ax1}$



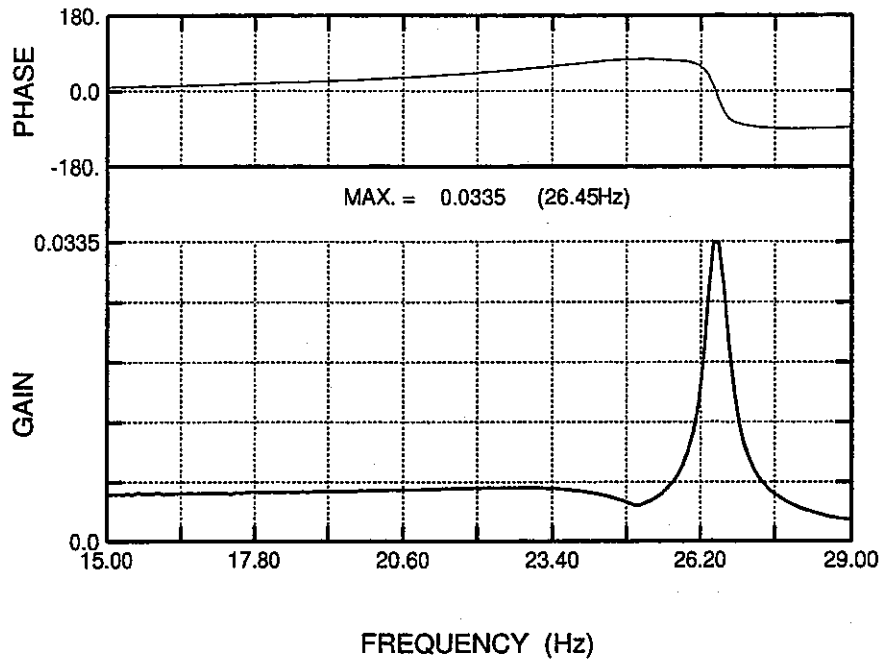
GP-4  $\frac{S4}{Ax1}$

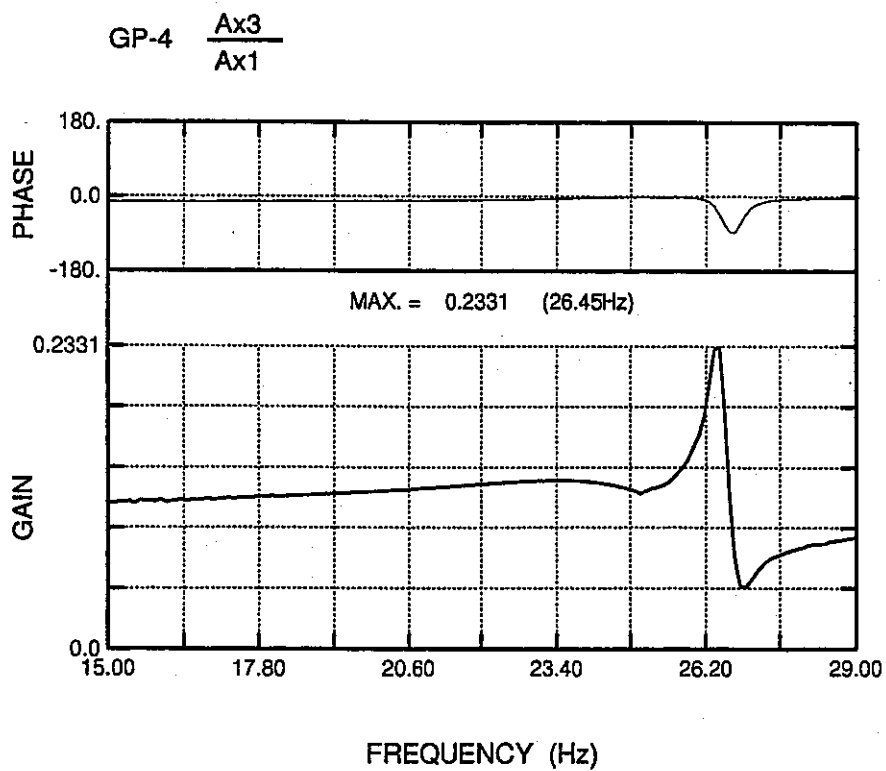
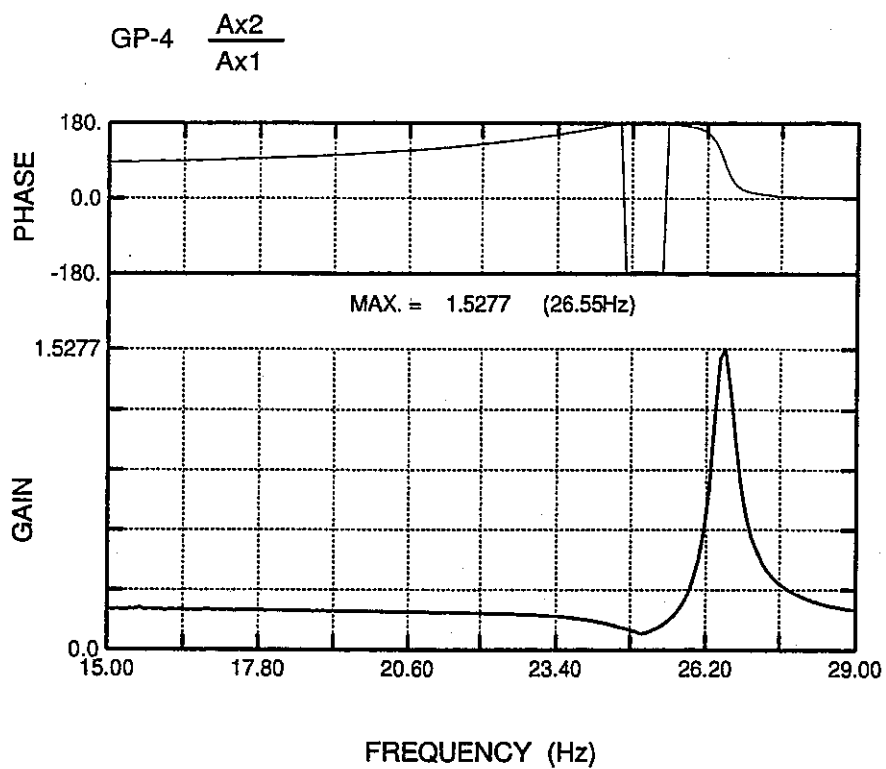


GP-4  $\frac{S5}{Ax1}$

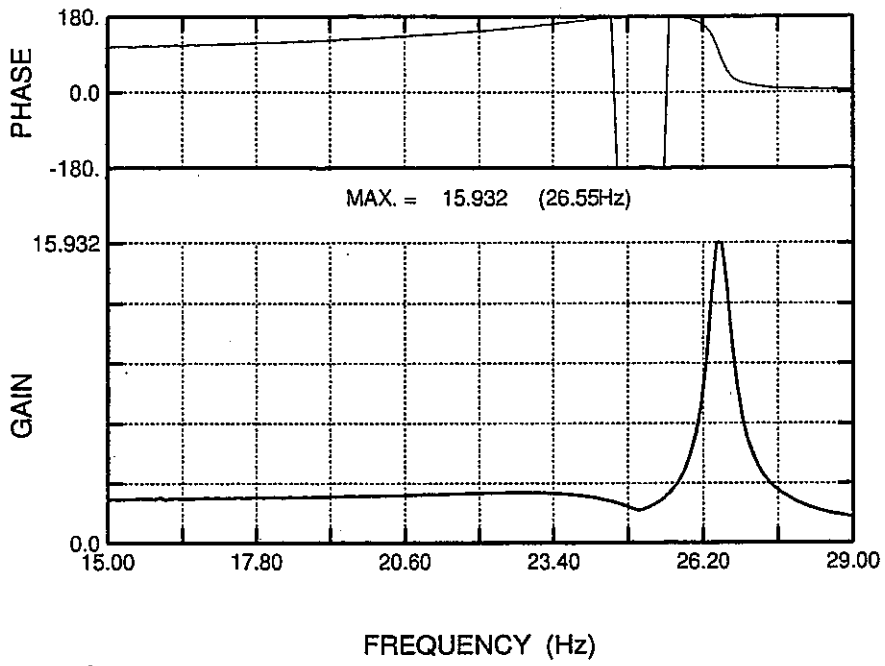


GP-4  $\frac{D2}{Ax1}$

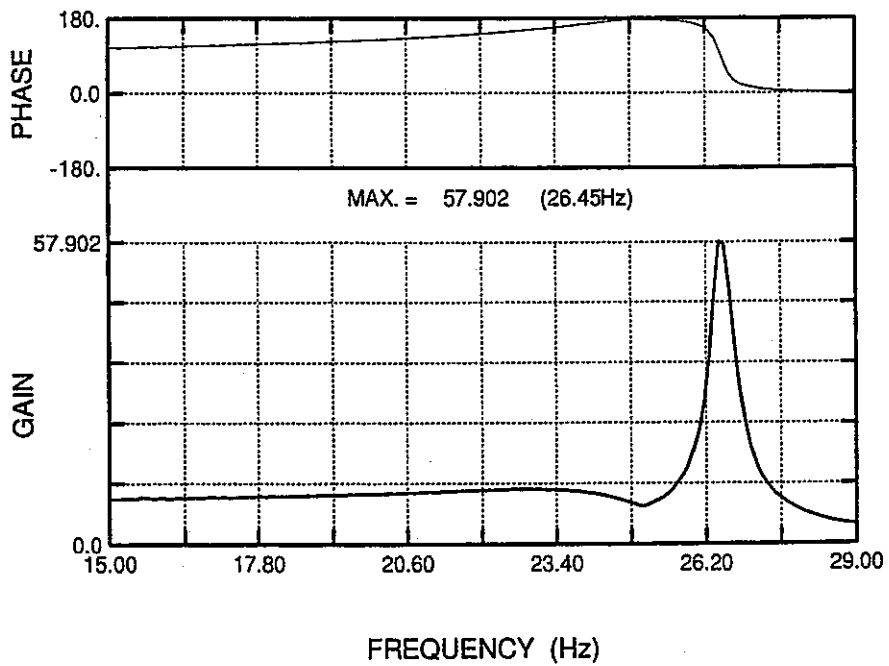




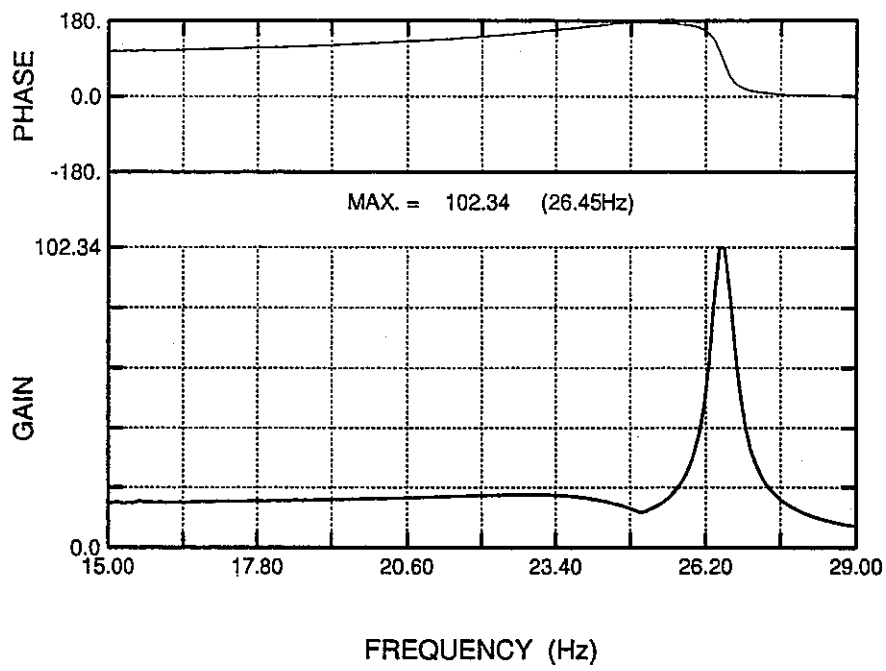
GP-4  $\frac{Ax4}{Ax1}$



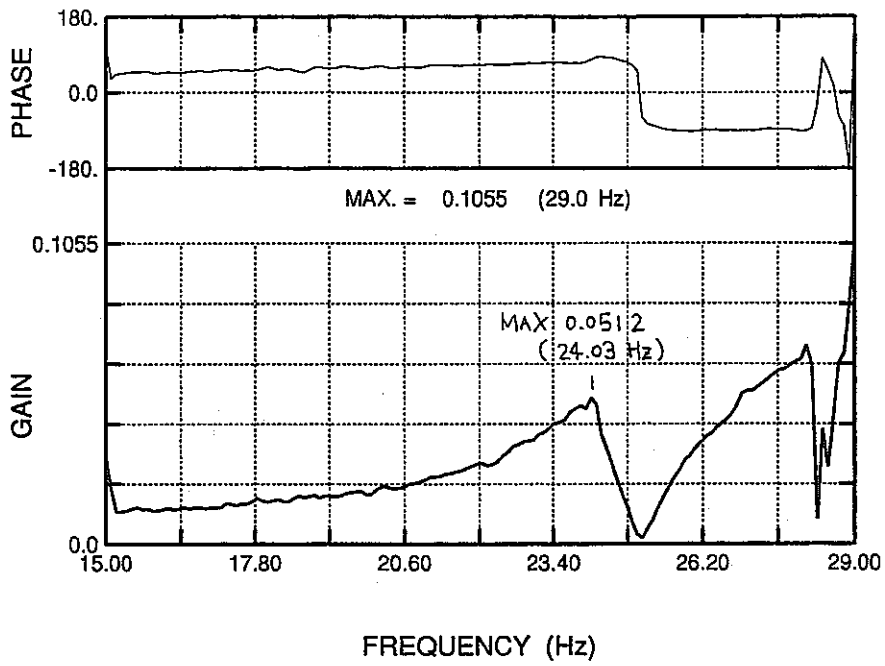
GP-4  $\frac{Ax5}{Ax1}$



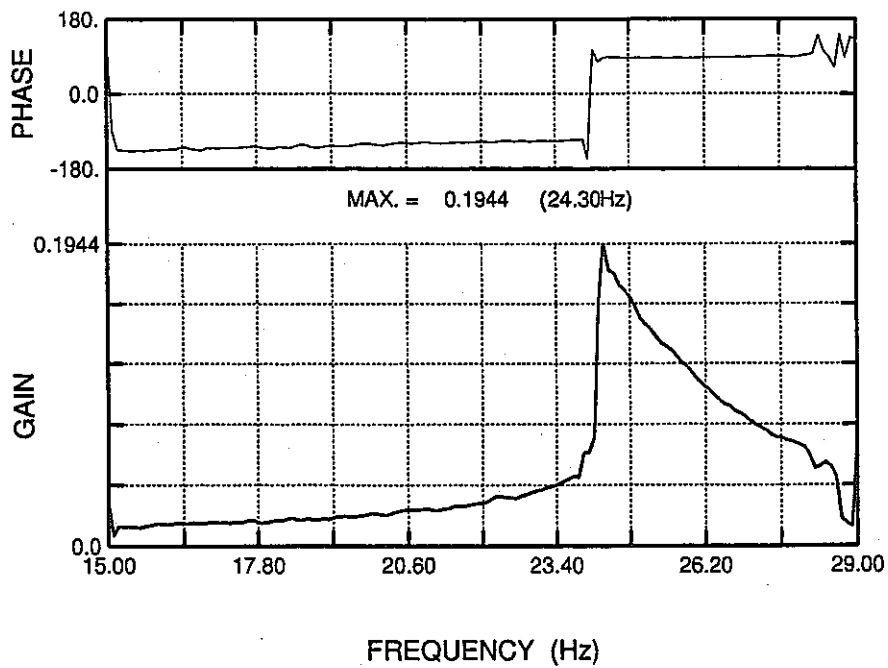
GP-4  $\frac{Ax6}{Ax1}$



G0-1  $\frac{S1}{Ax1}$

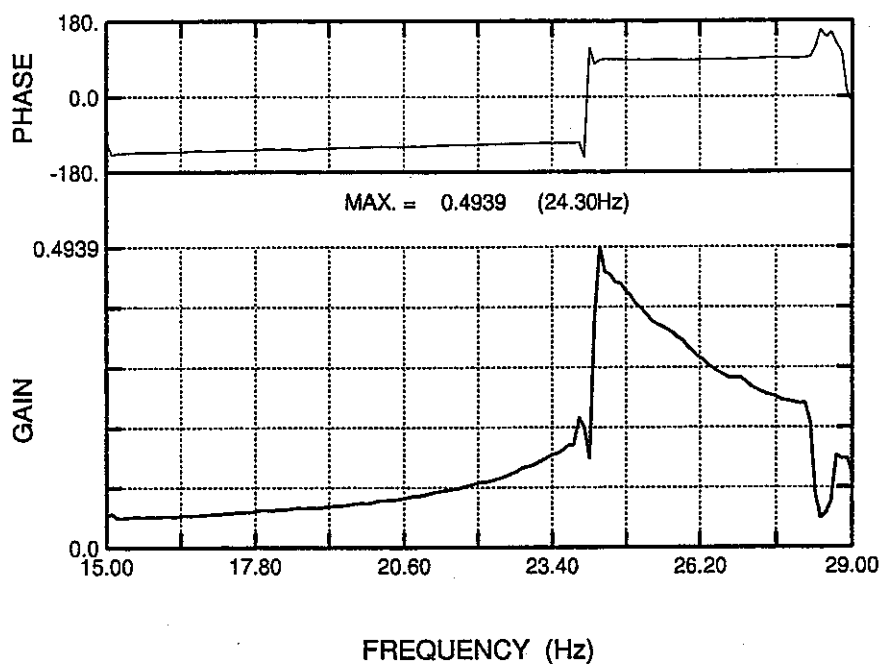


G0-1  $\frac{S2}{Ax1}$

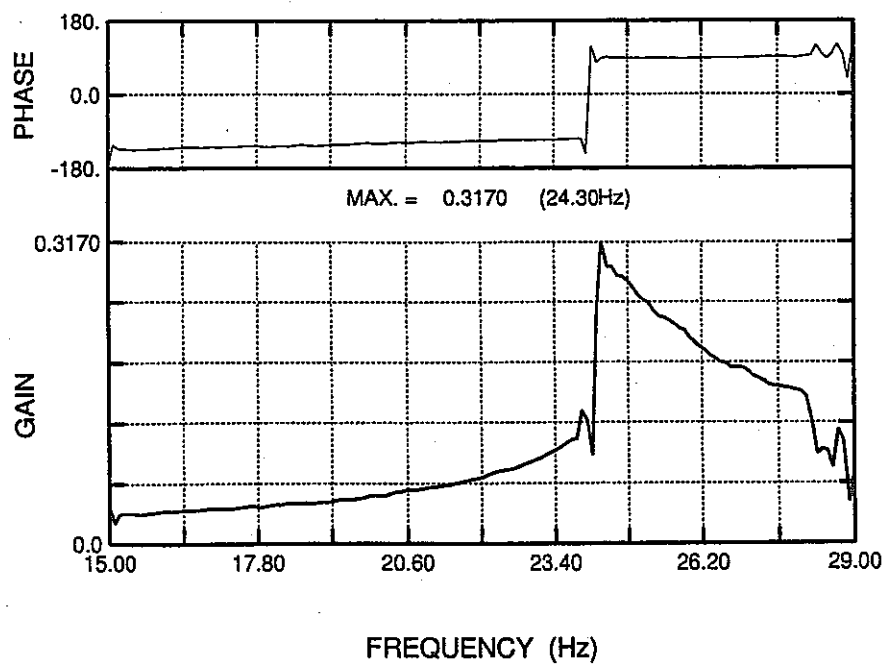




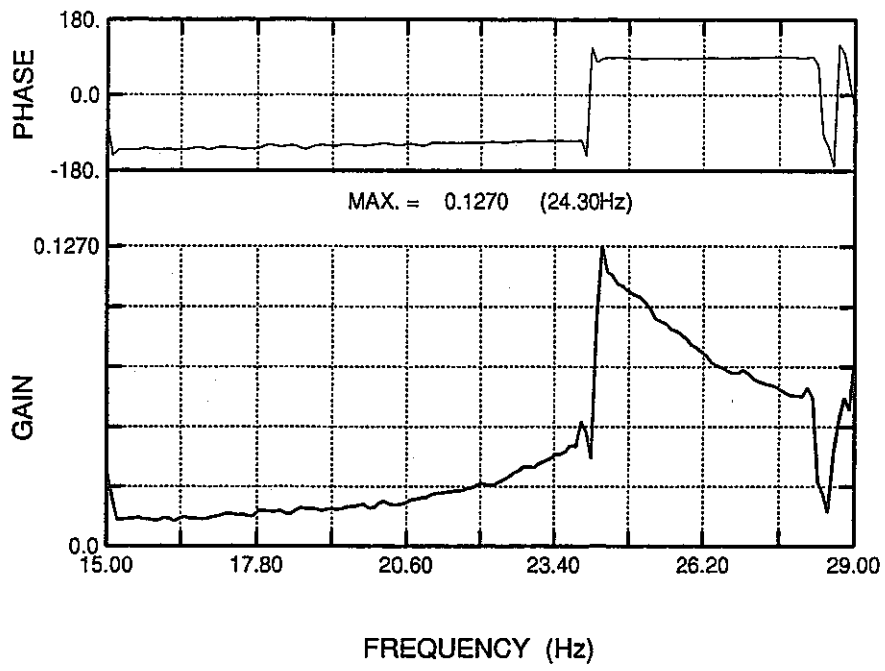
G0-1  $\frac{S3}{Ax1}$



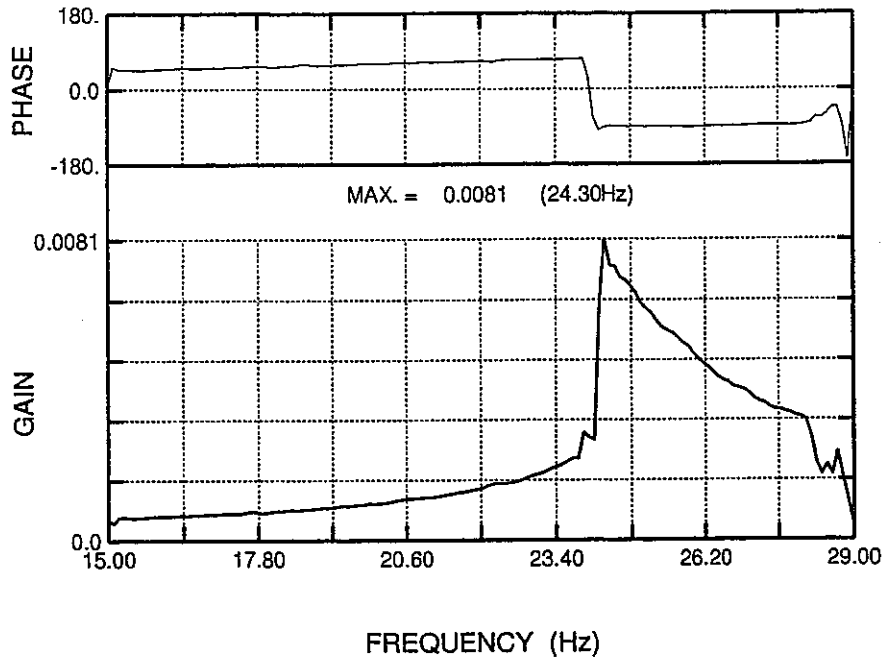
G0-1  $\frac{S4}{Ax1}$



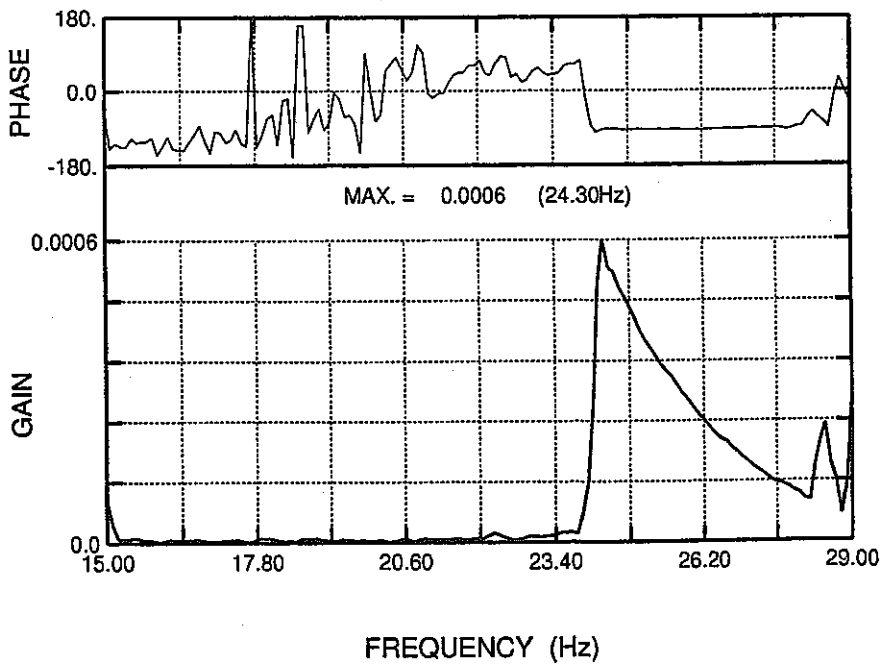
G0-1  $\frac{S5}{Ax1}$



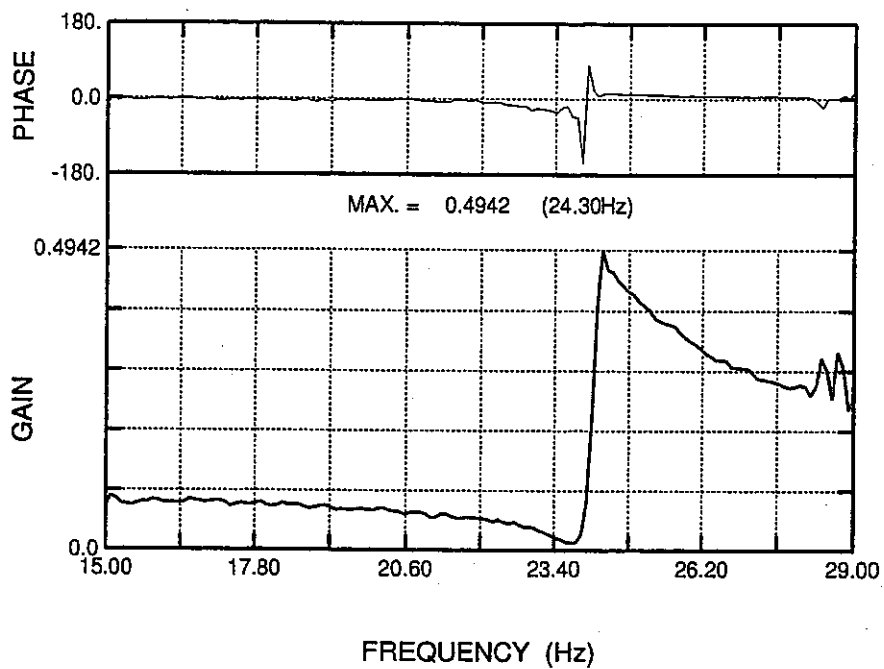
G0-1  $\frac{D2}{Ax1}$



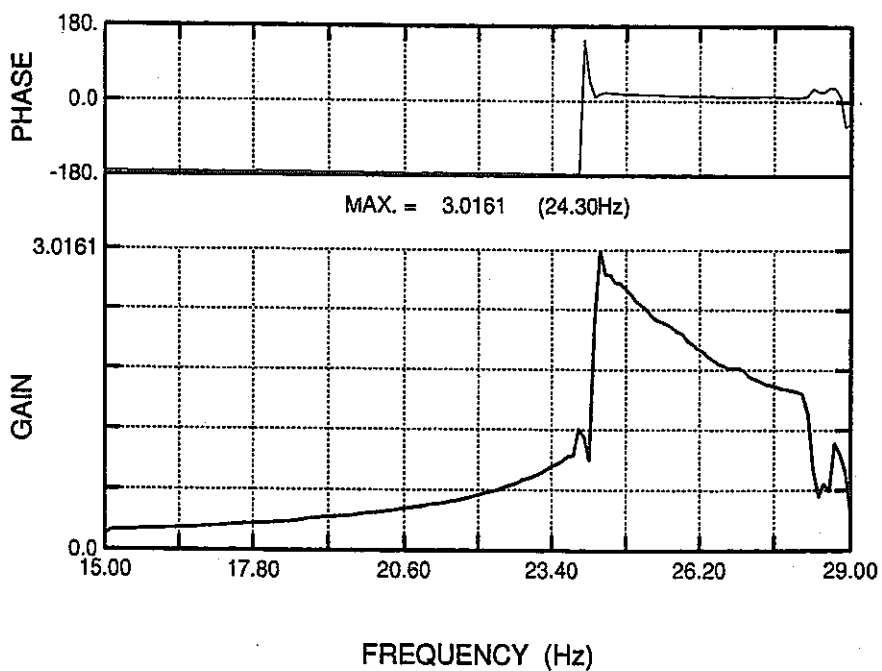
G0-1  $\frac{D1}{Ax1}$



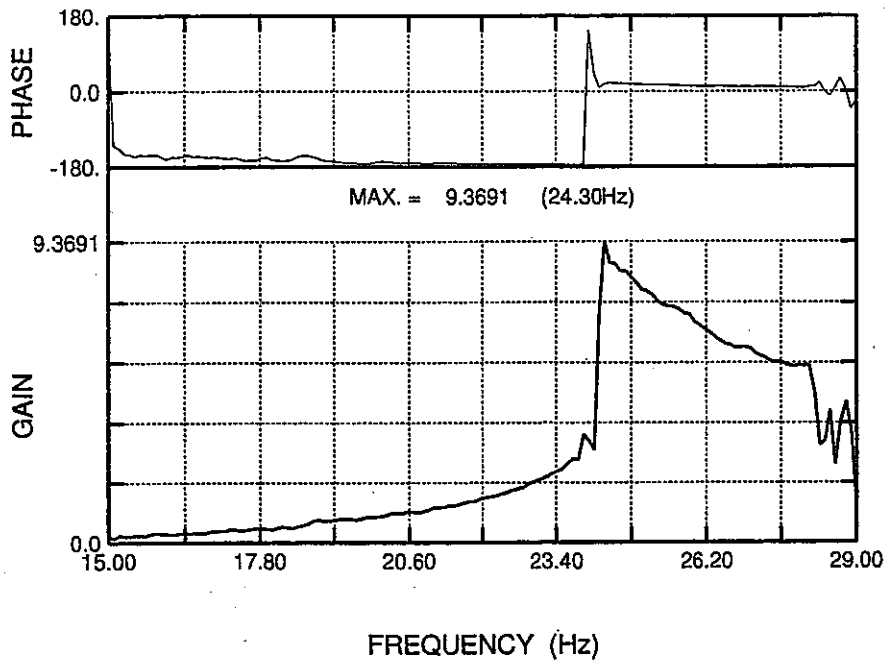
G0-1  $\frac{Ax2}{Ax1}$



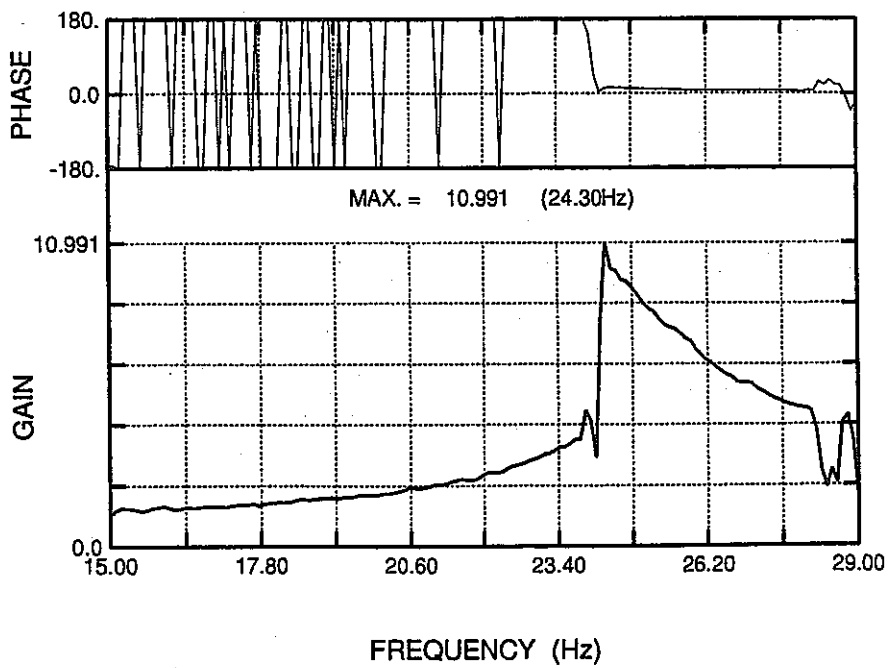
G0-1  $\frac{Ax3}{Ax1}$



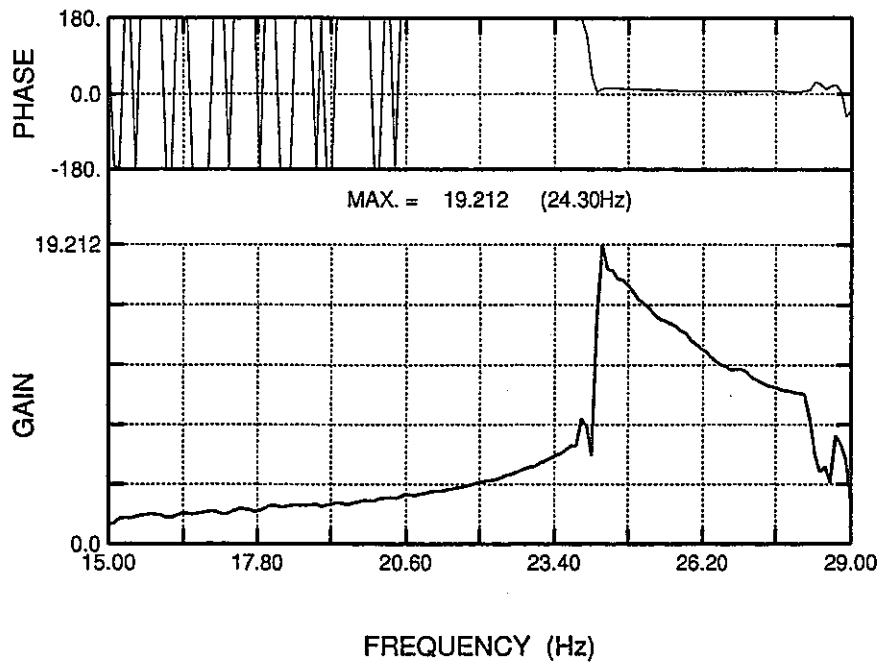
G0-1  $\frac{Ax4}{Ax1}$



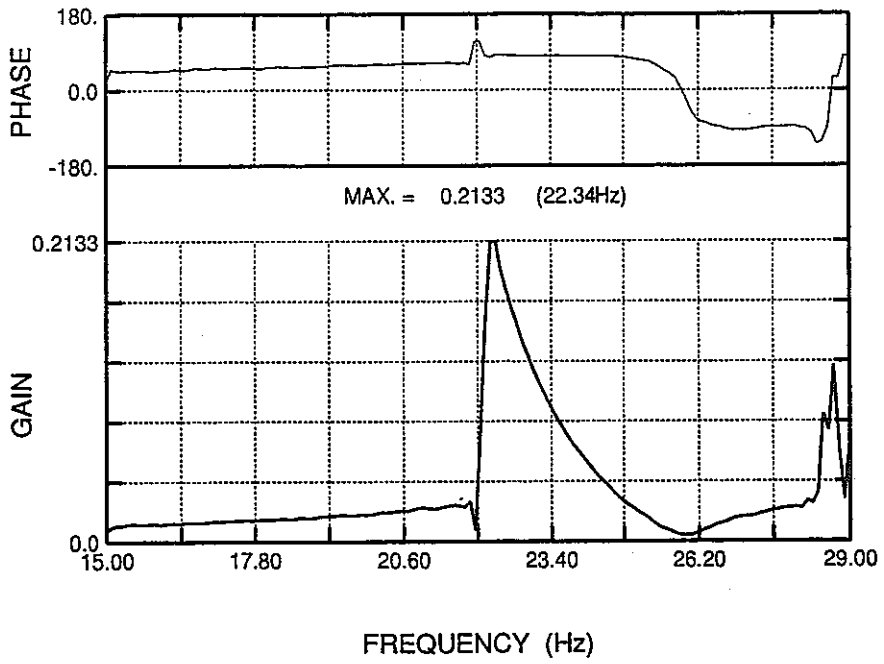
G0-1  $\frac{Ax5}{Ax1}$



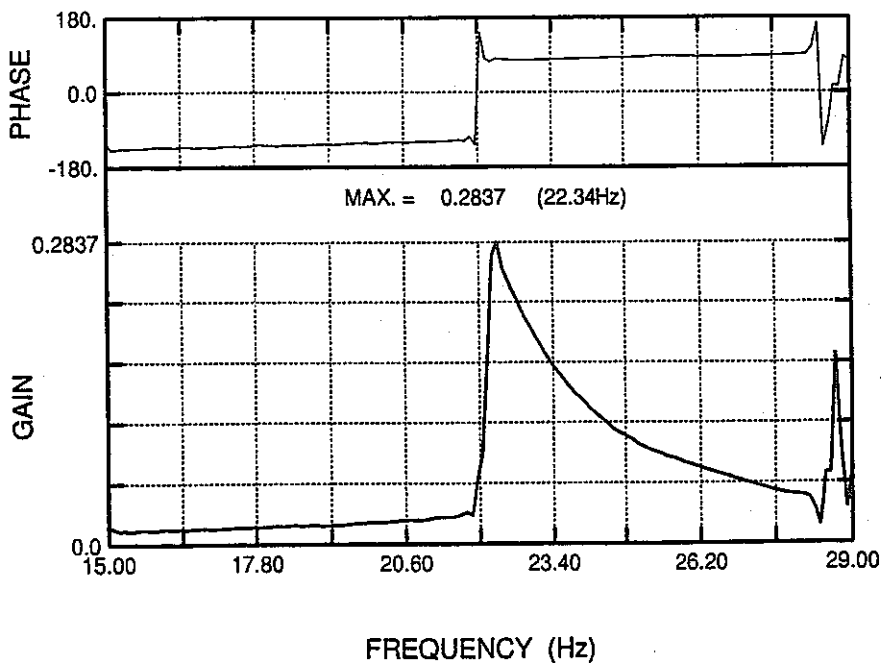
G0-1  $\frac{Ax6}{Ax1}$



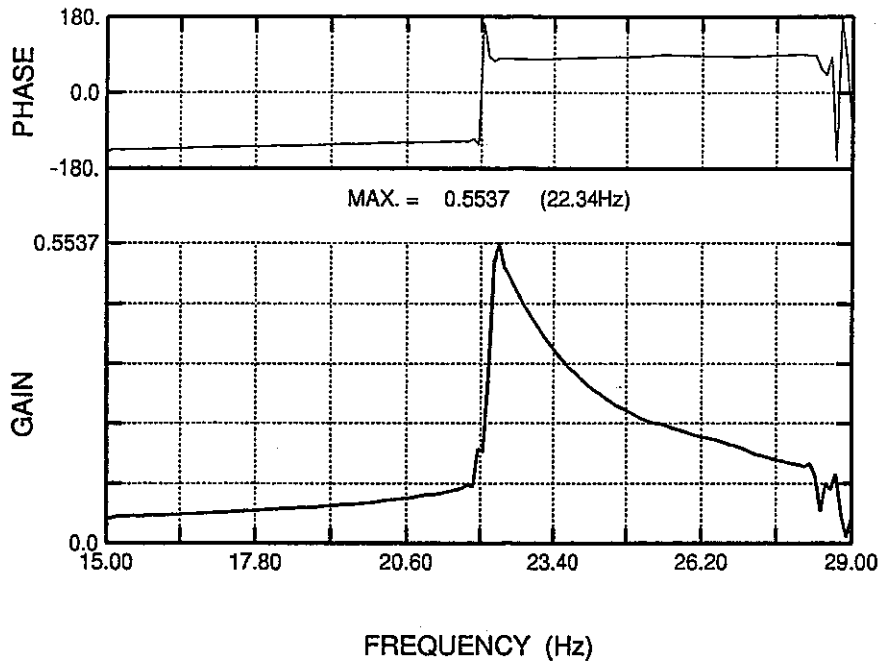
G0-2  $\frac{S1}{Ax1}$



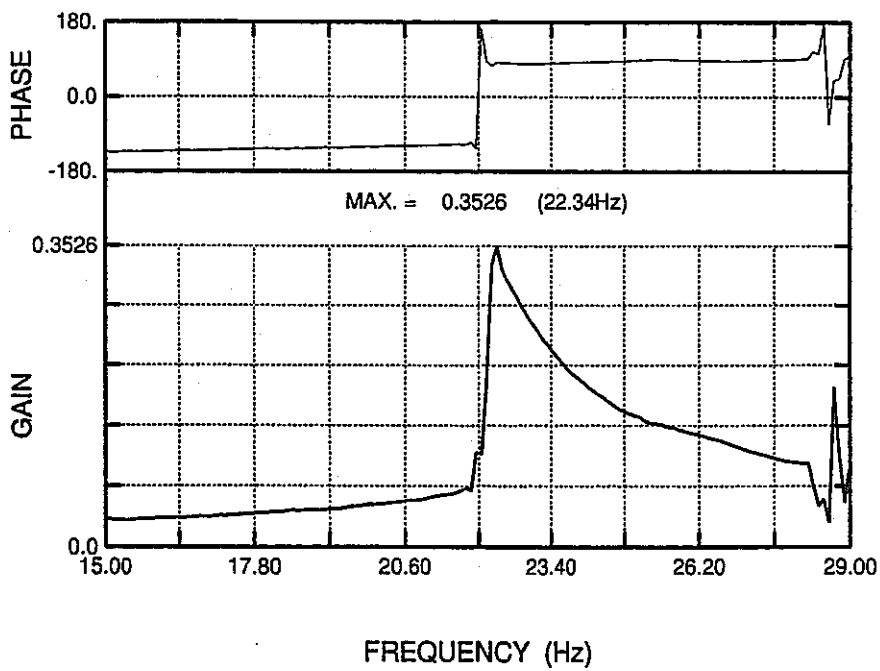
G0-2  $\frac{S2}{Ax1}$



G0-2  $\frac{S3}{Ax1}$

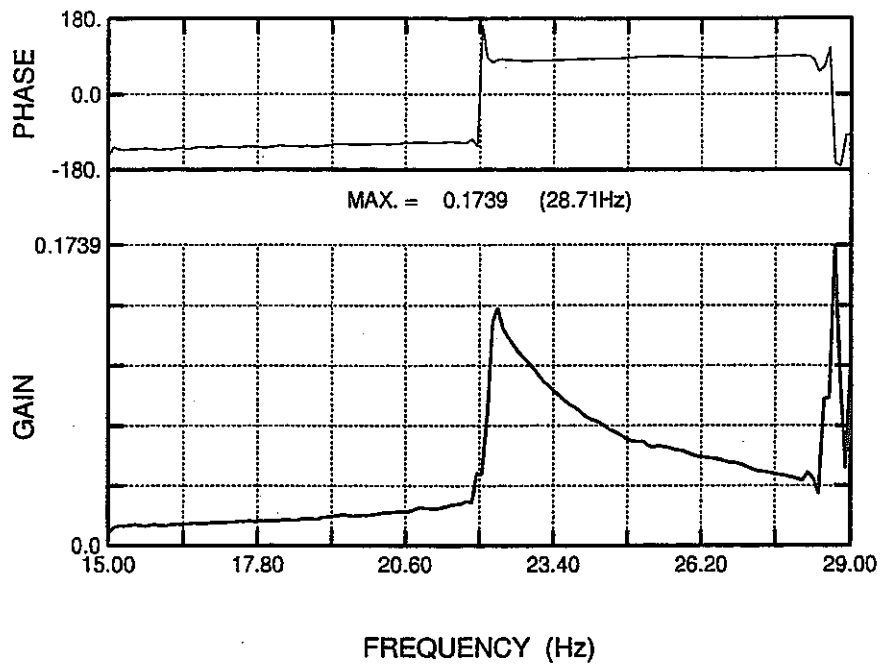


G0-2  $\frac{S4}{Ax1}$

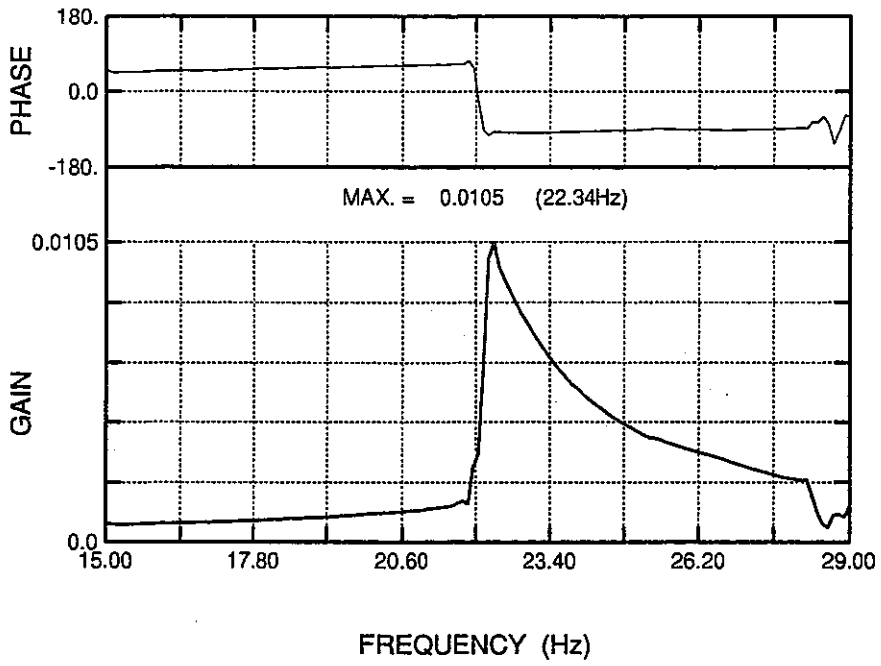




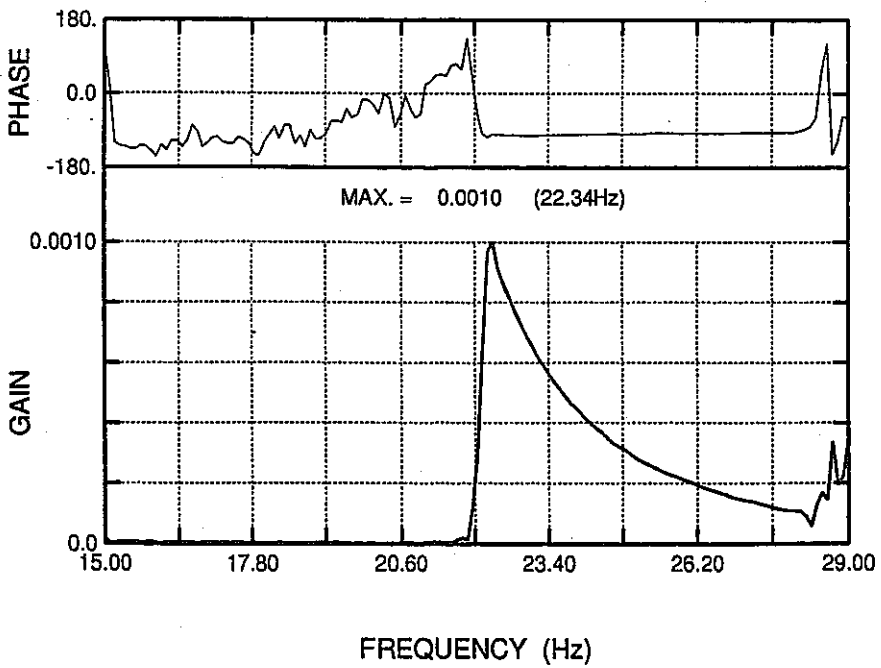
G0-2  $\frac{S5}{Ax1}$



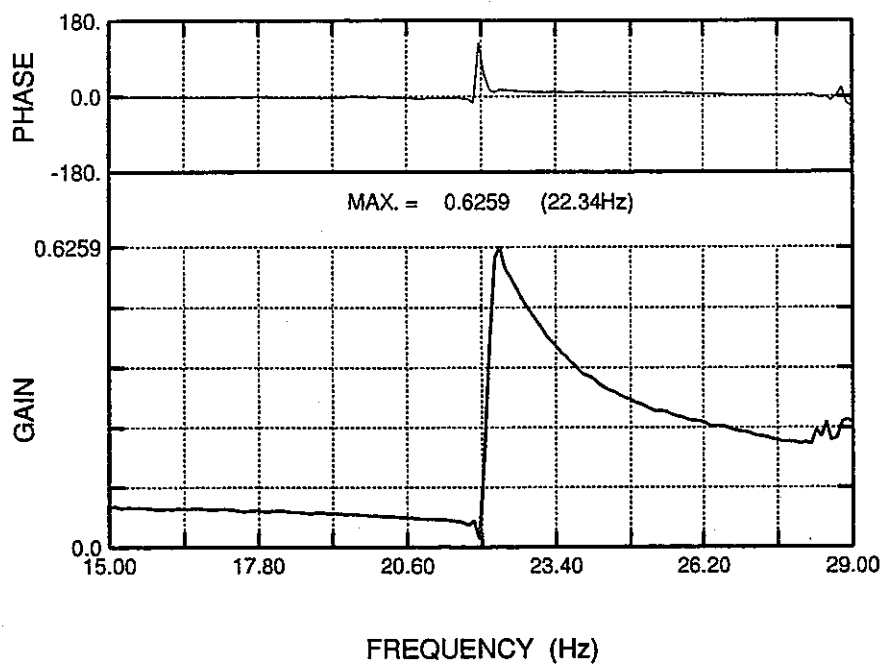
G0-2  $\frac{D2}{Ax1}$



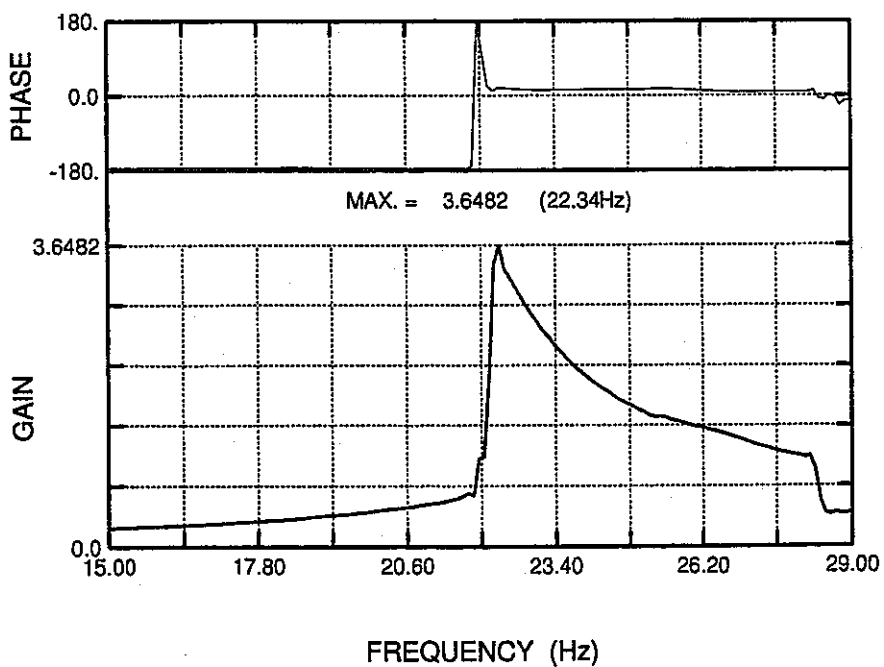
G0-2  $\frac{D1}{Ax1}$



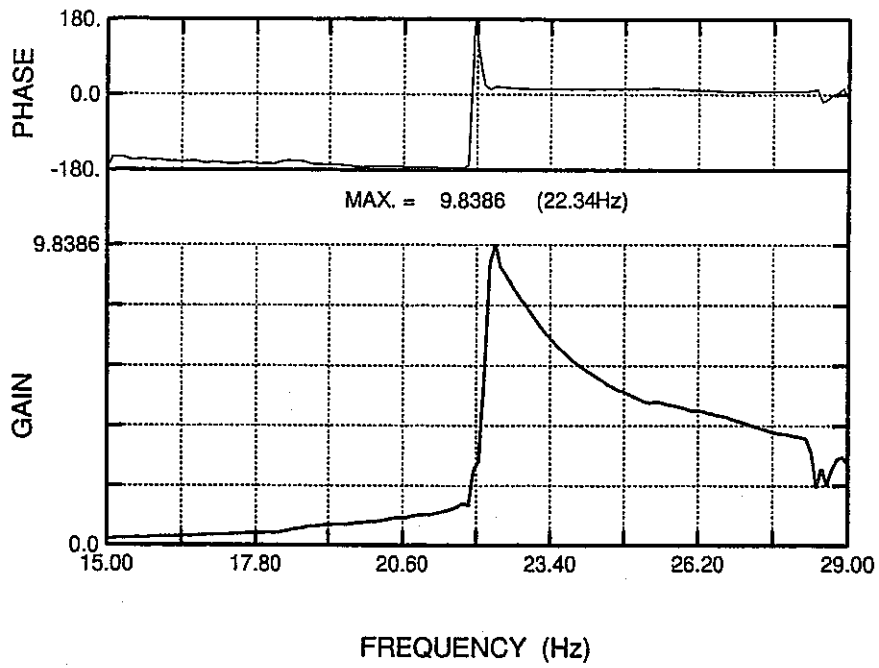
$$G0-2 \quad \frac{Ax2}{Ax1}$$



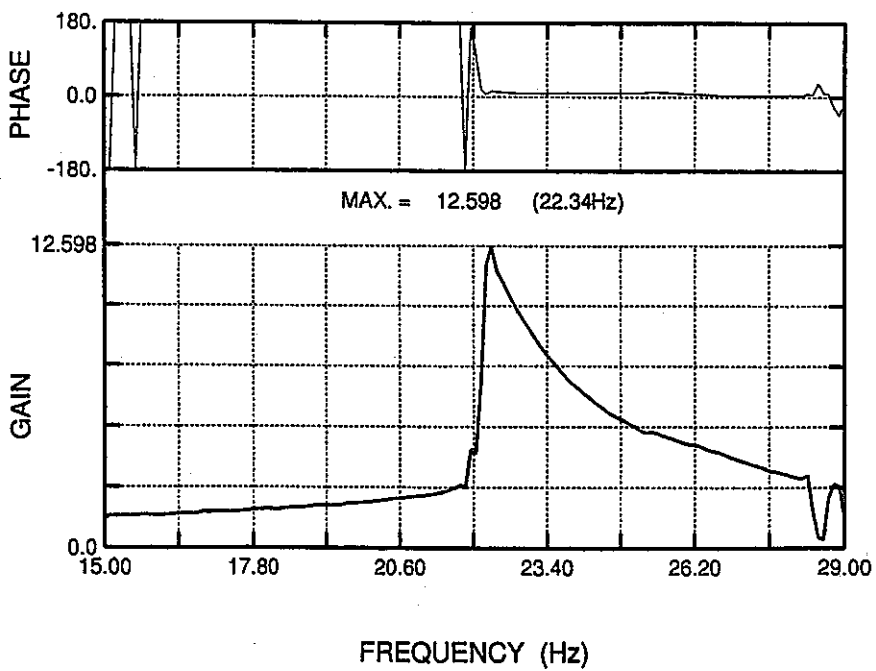
$$G0-2 \quad \frac{Ax3}{Ax1}$$



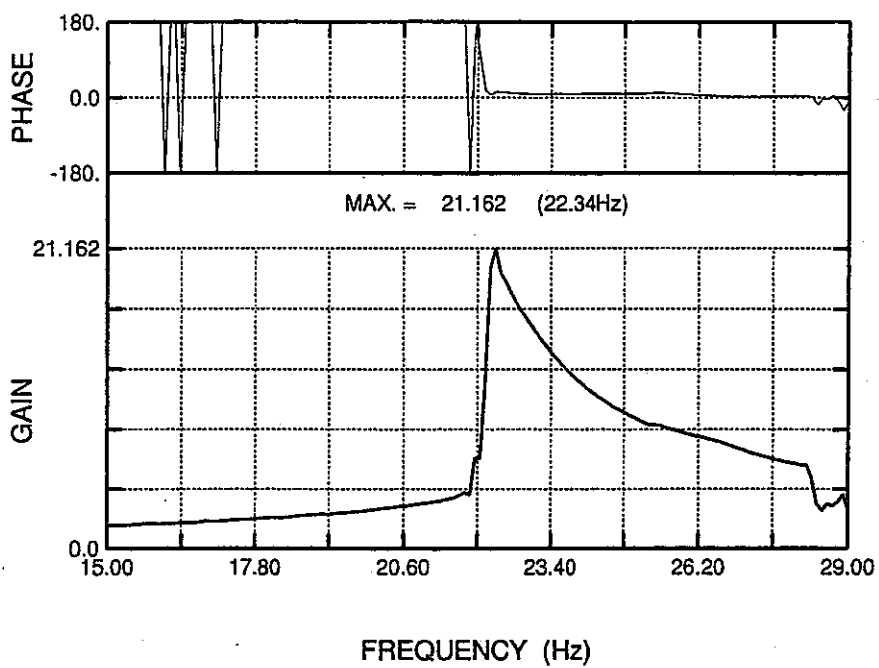
G0-2  $\frac{Ax4}{Ax1}$



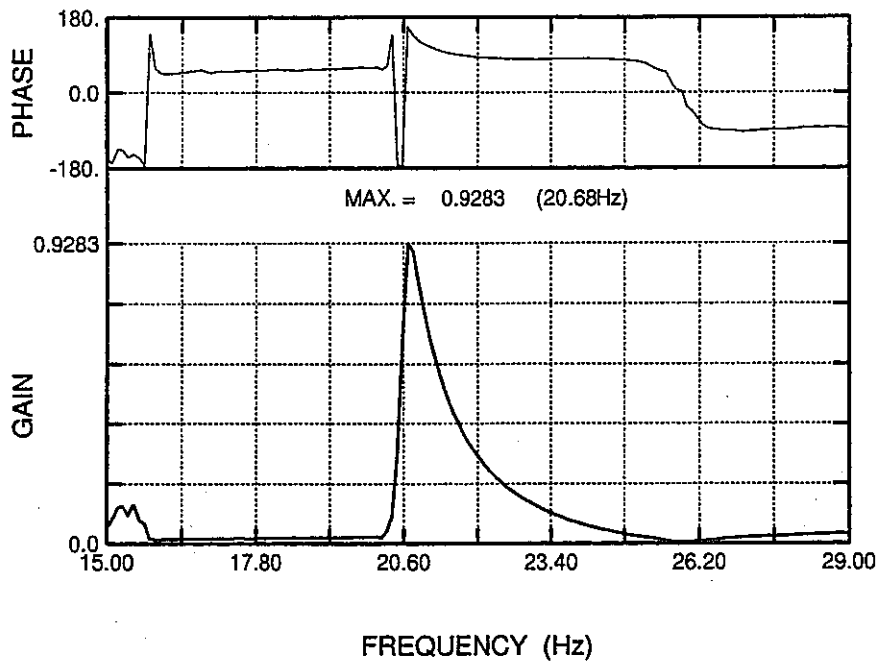
G0-2  $\frac{Ax5}{Ax1}$



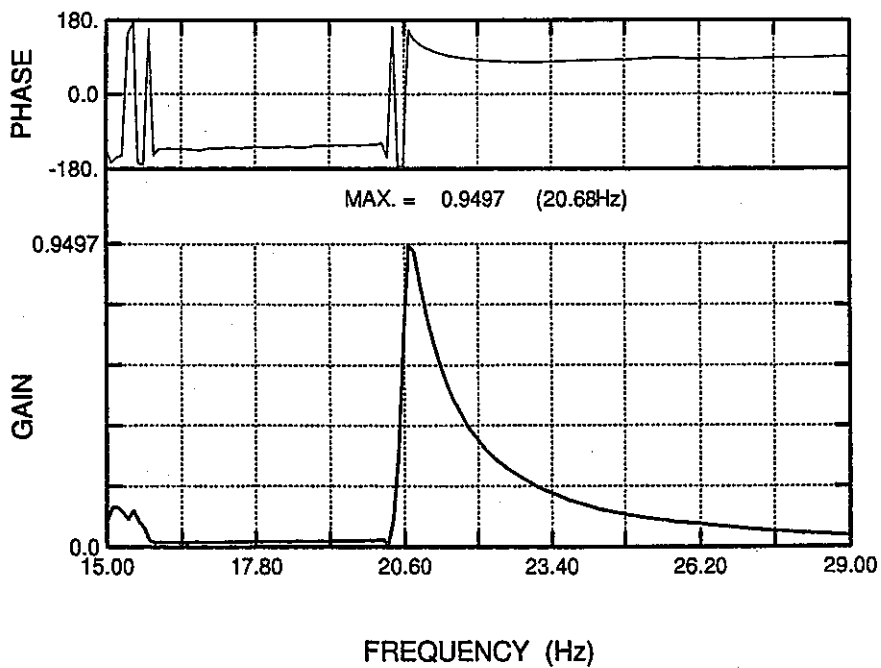
G0-2  $\frac{Ax6}{Ax1}$

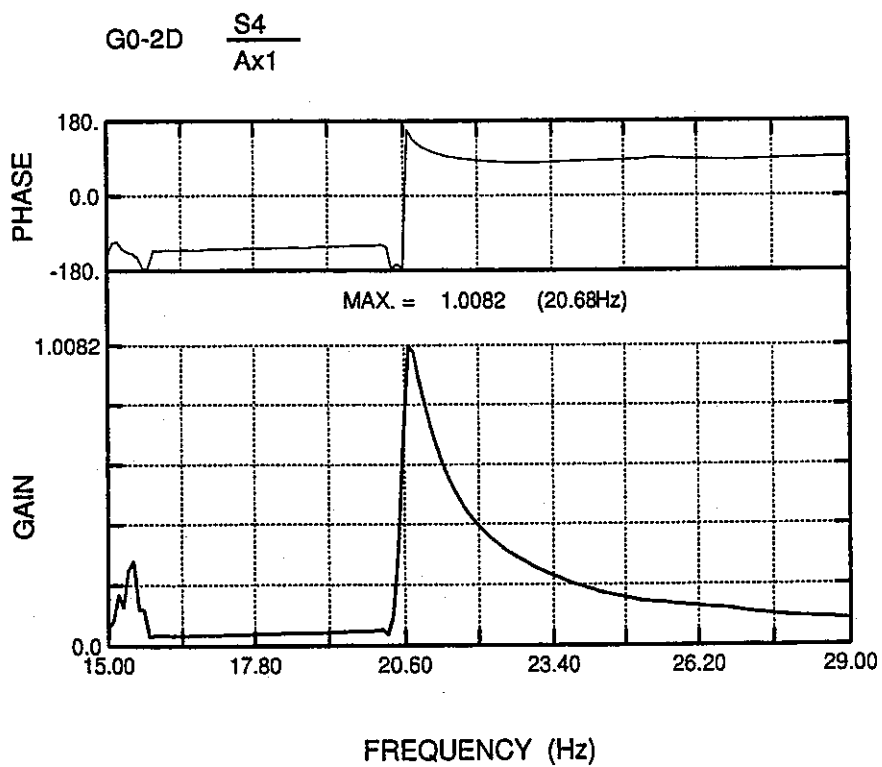
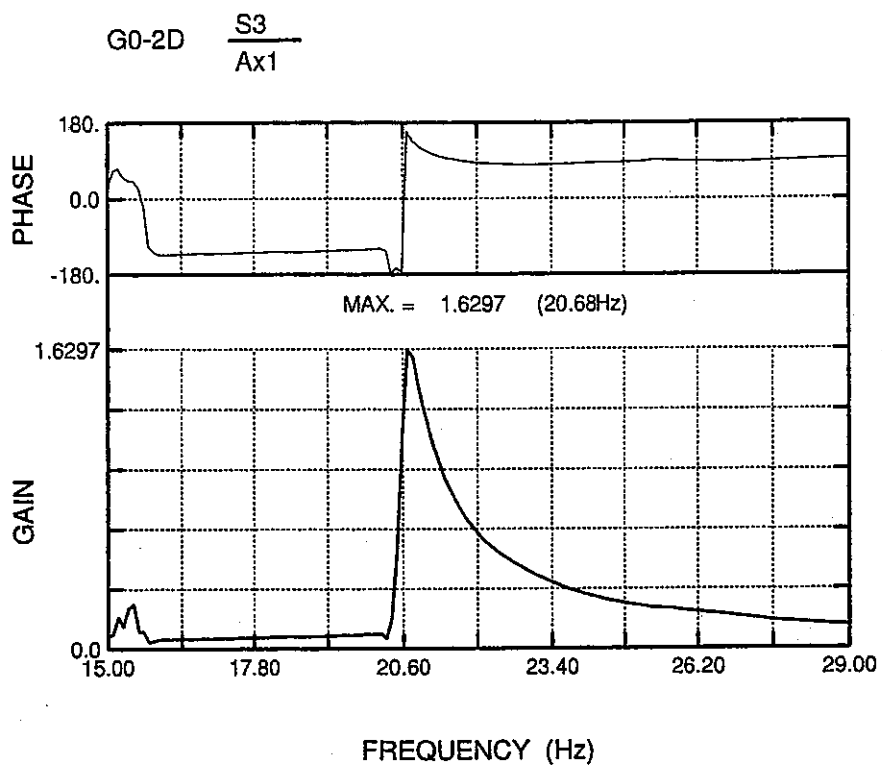


G0-2D  $\frac{S1}{Ax1}$

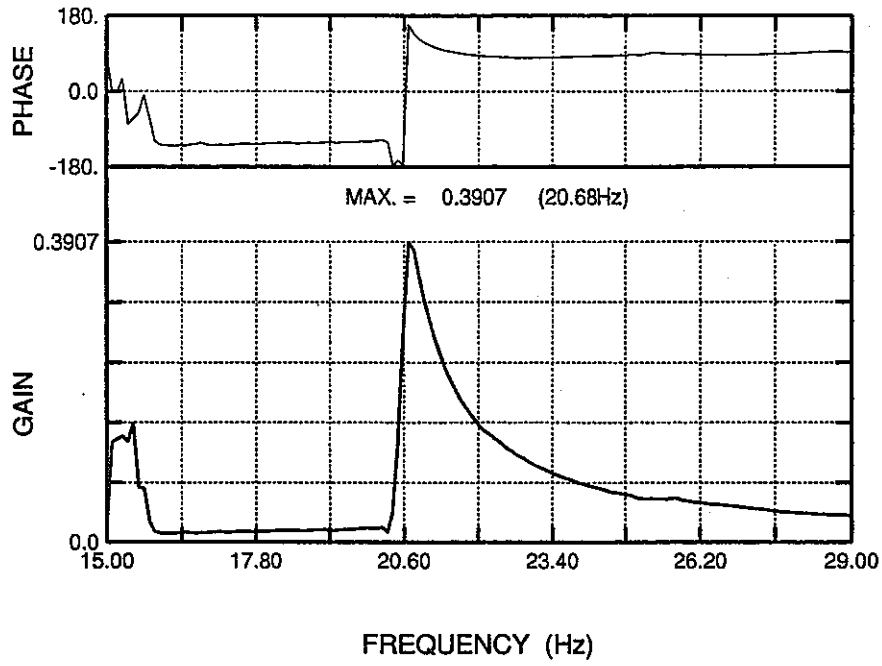


G0-2D  $\frac{S2}{Ax1}$



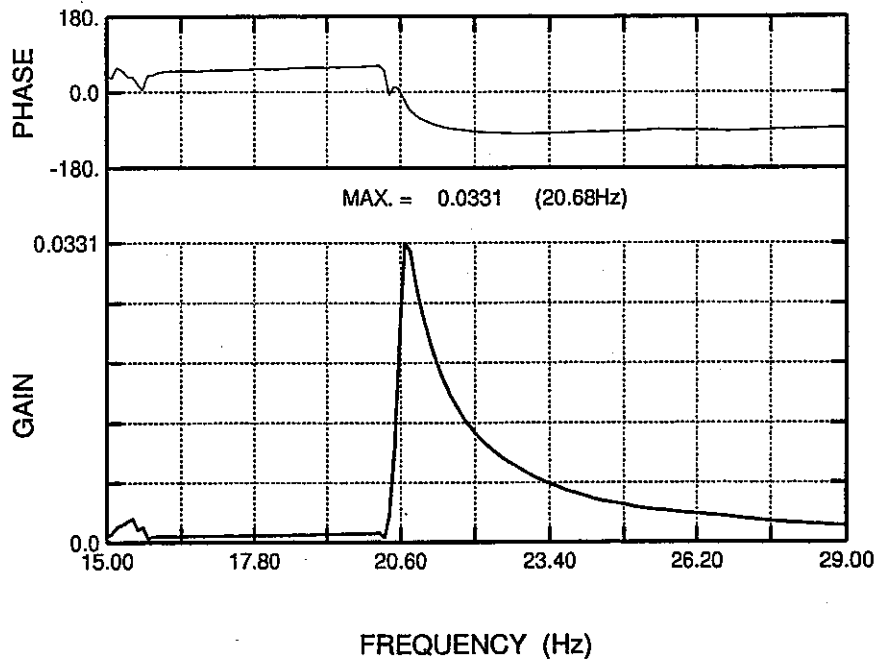


G0-2D  $\frac{S5}{Ax1}$

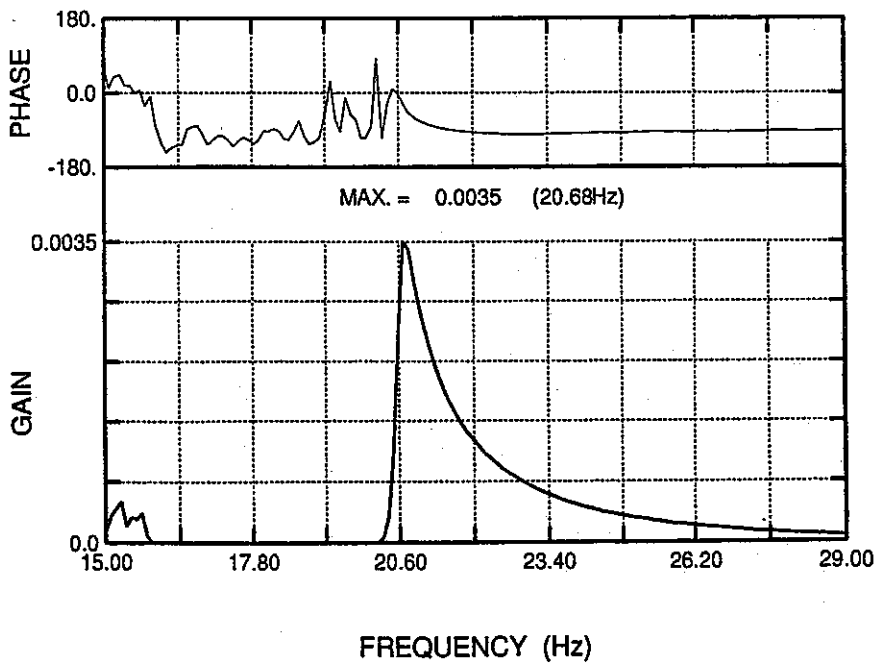


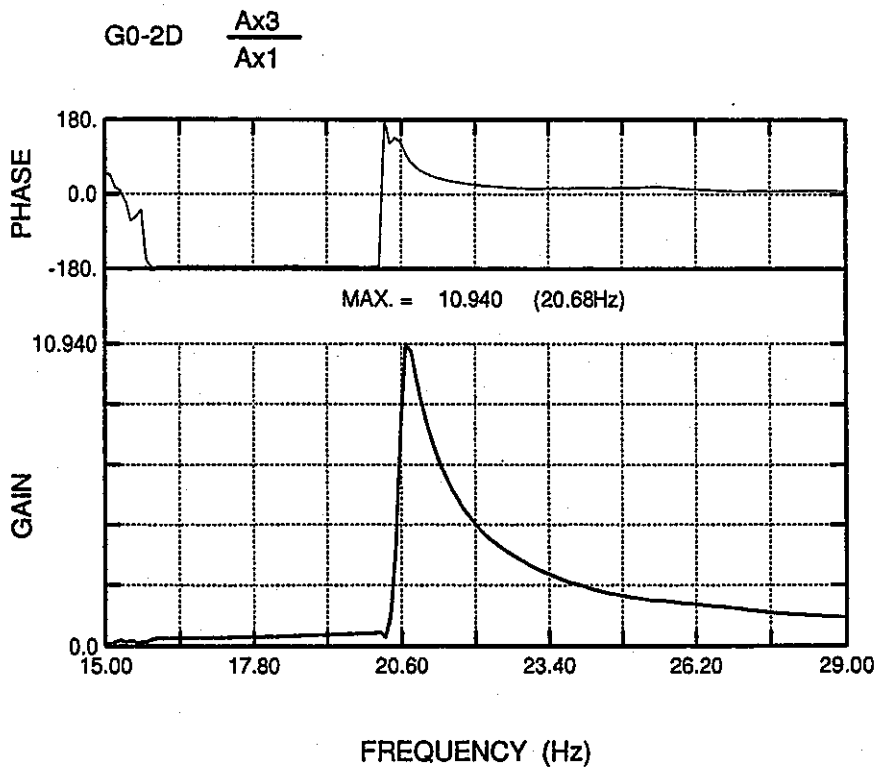
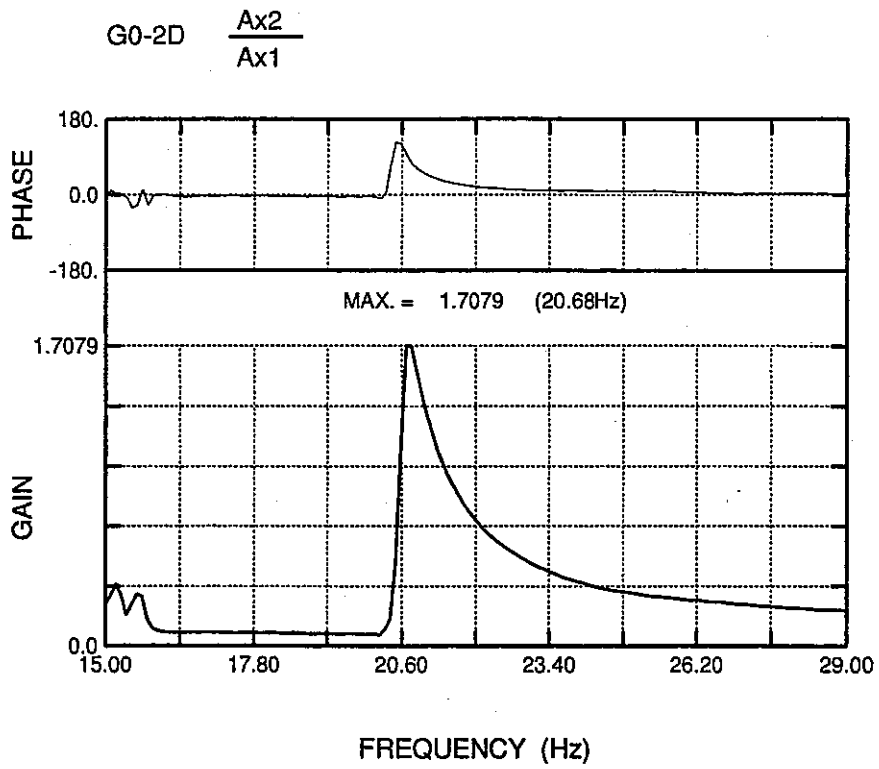


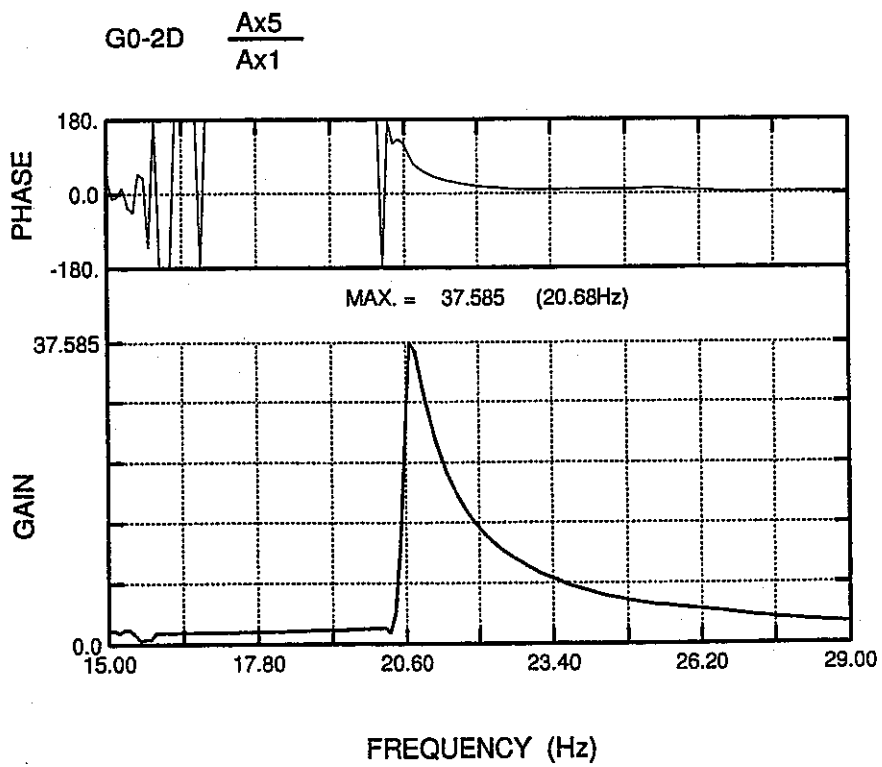
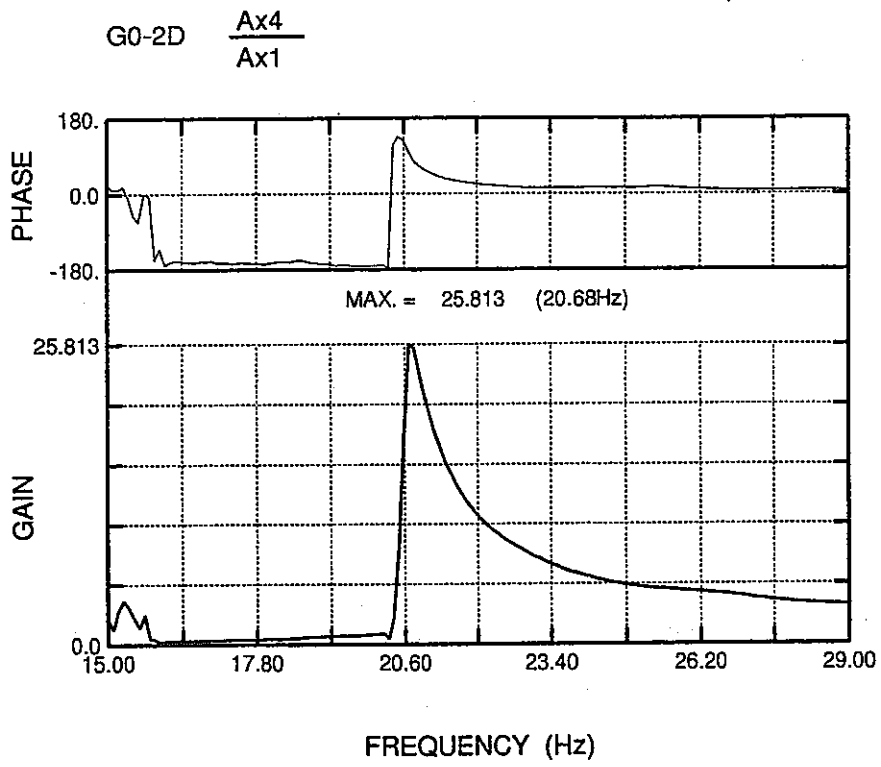
G0-2D  $\frac{D2}{Ax1}$



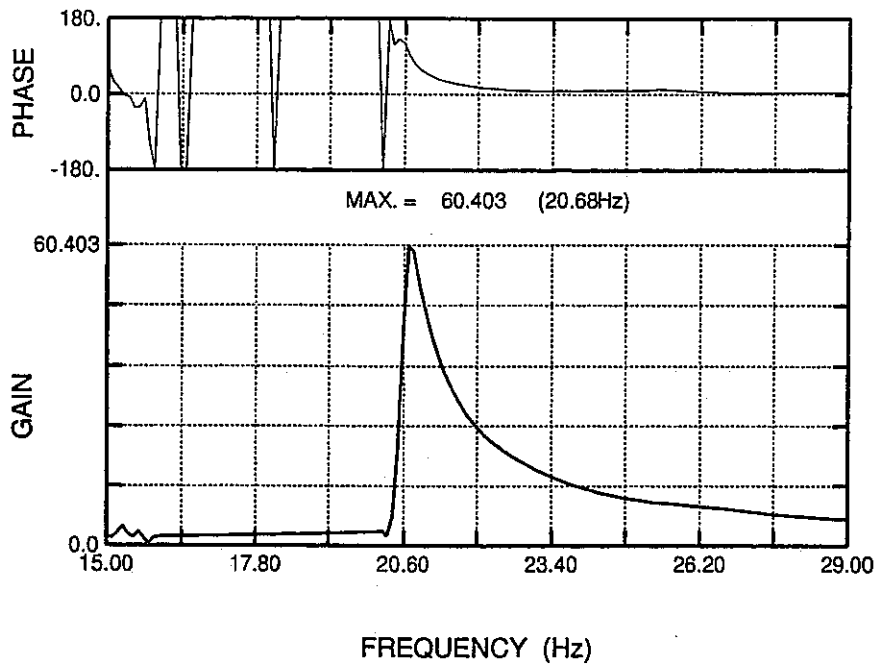
G0-2D  $\frac{D1}{Ax1}$



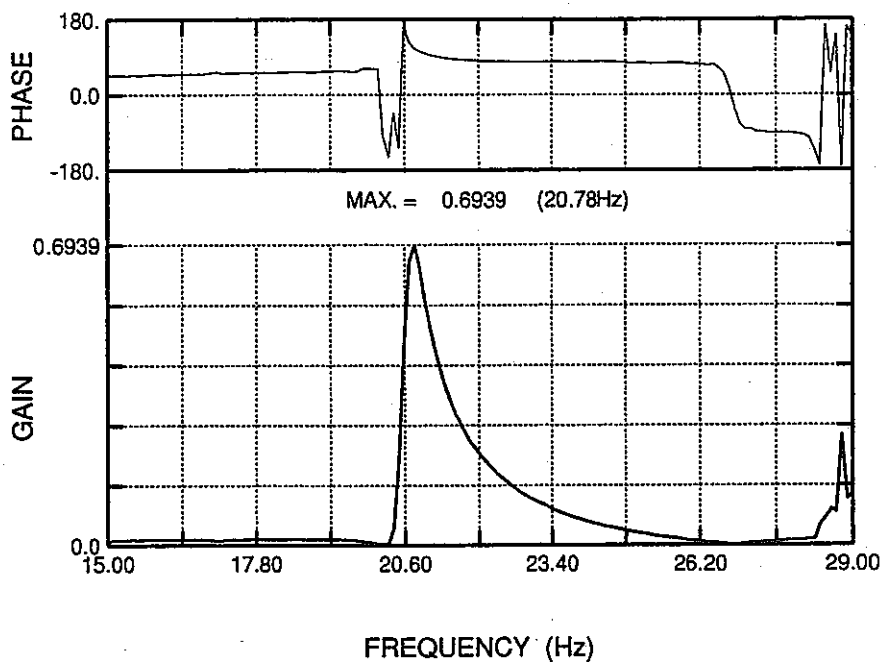




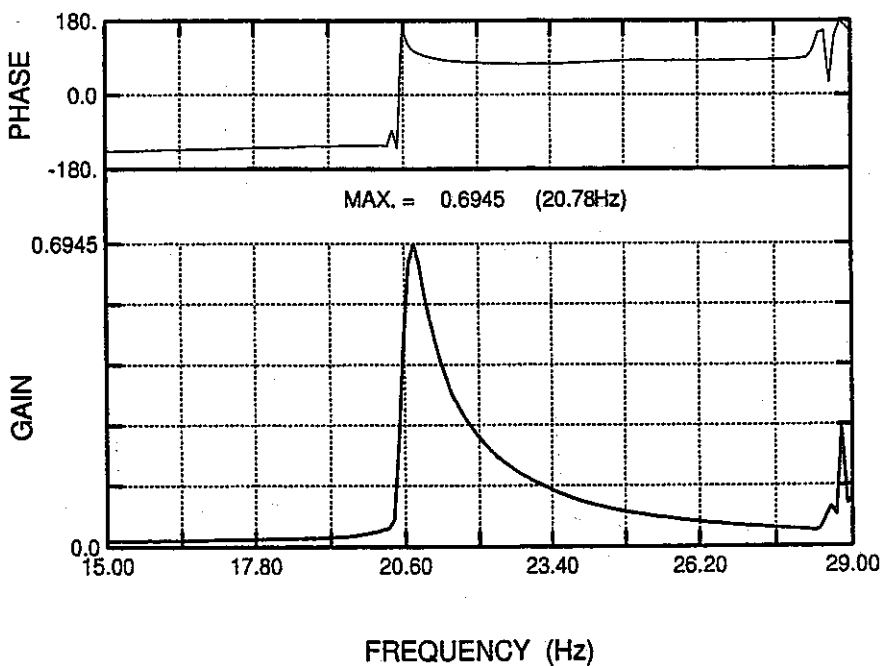
G0-2D  $\frac{Ax6}{Ax1}$



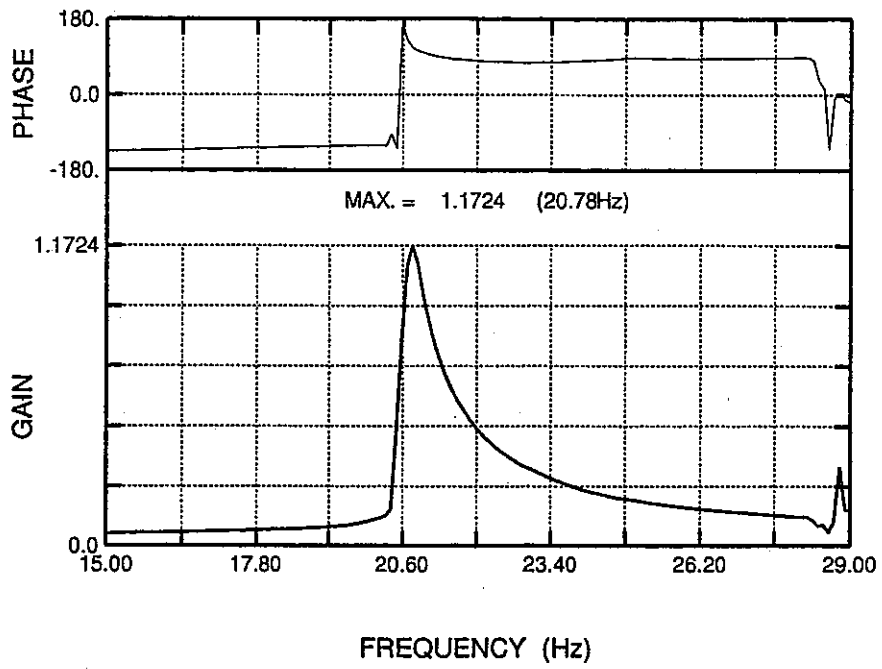
G0-3  $\frac{S1}{Ax1}$



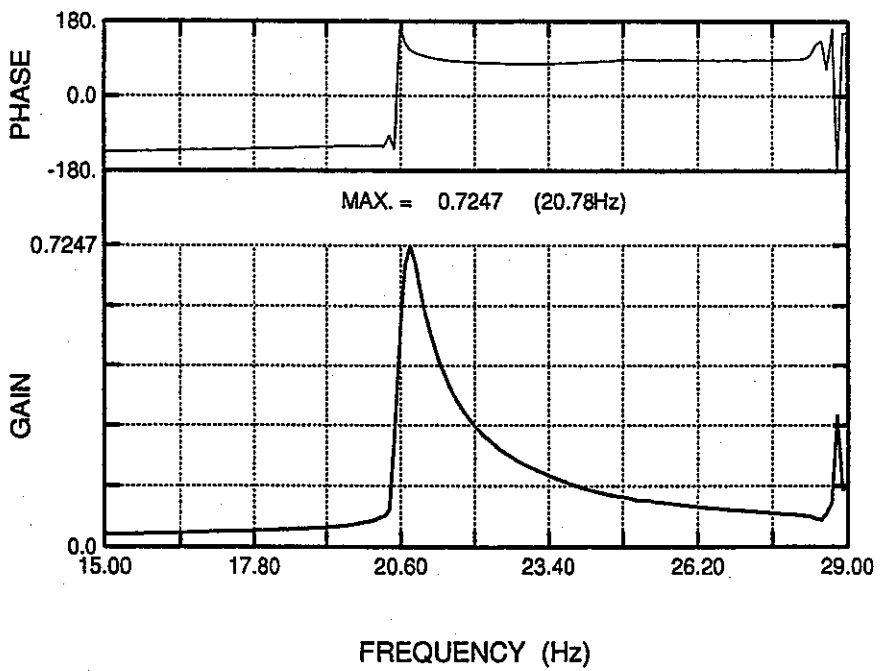
G0-3  $\frac{S2}{Ax1}$



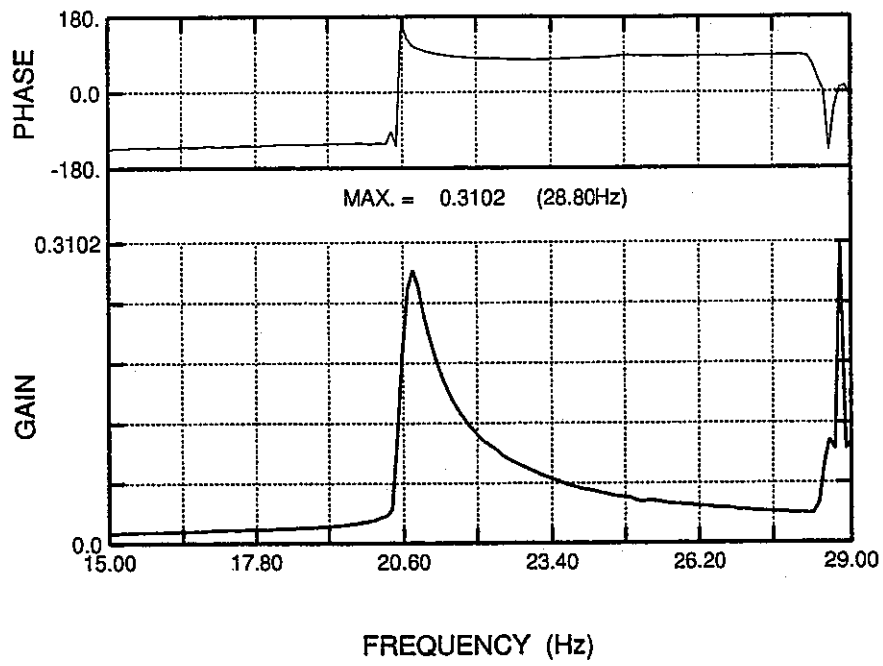
G0-3  $\frac{S3}{Ax1}$



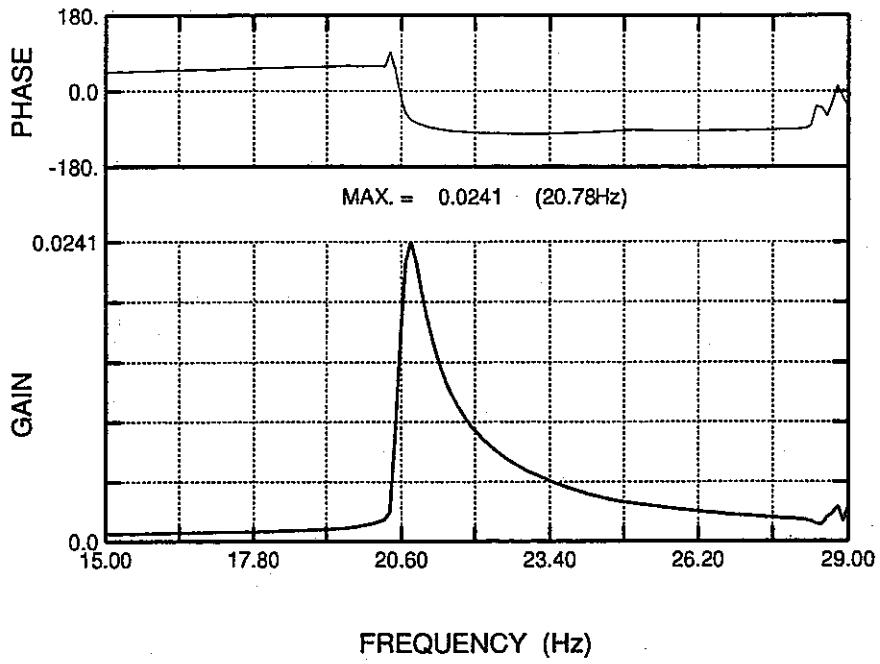
G0-3  $\frac{S4}{Ax1}$



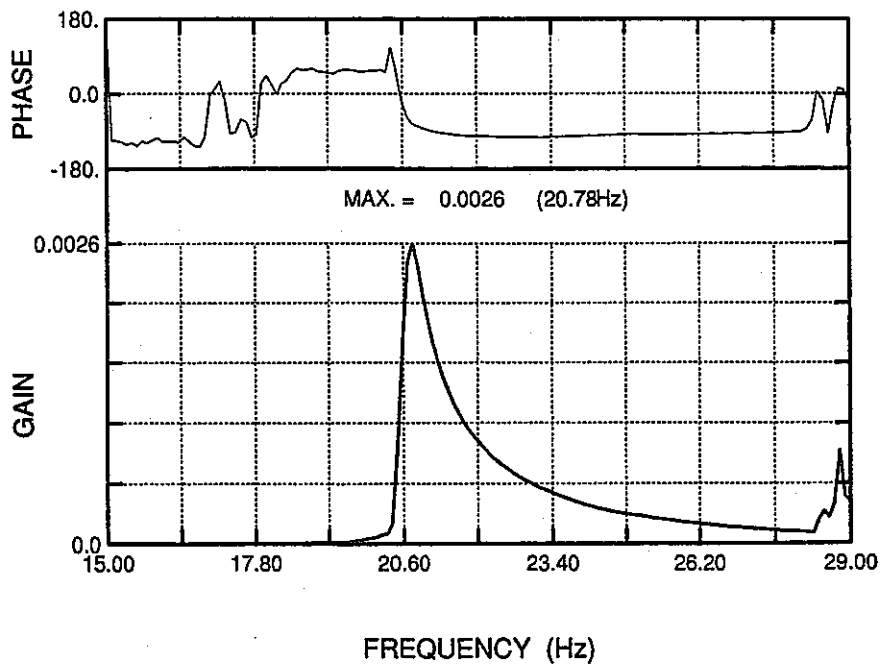
G0-3  $\frac{S5}{Ax1}$



G0-3  $\frac{D2}{Ax1}$

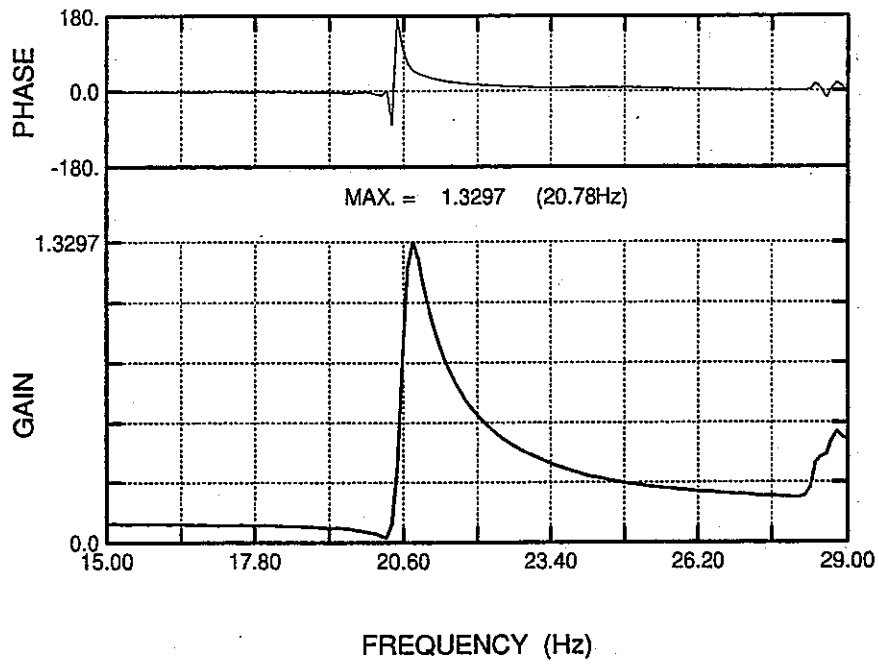


G0-3  $\frac{D1}{Ax1}$

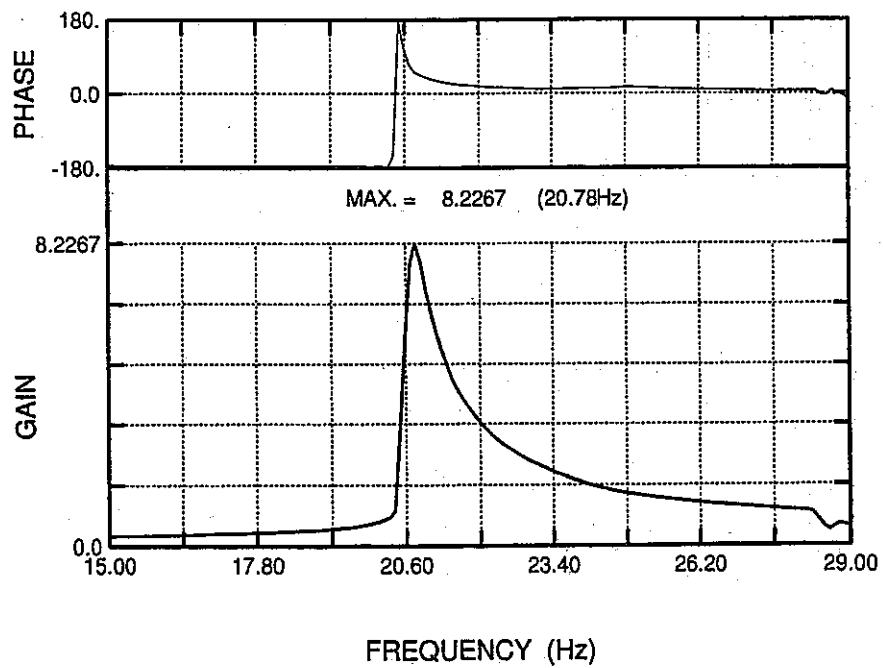




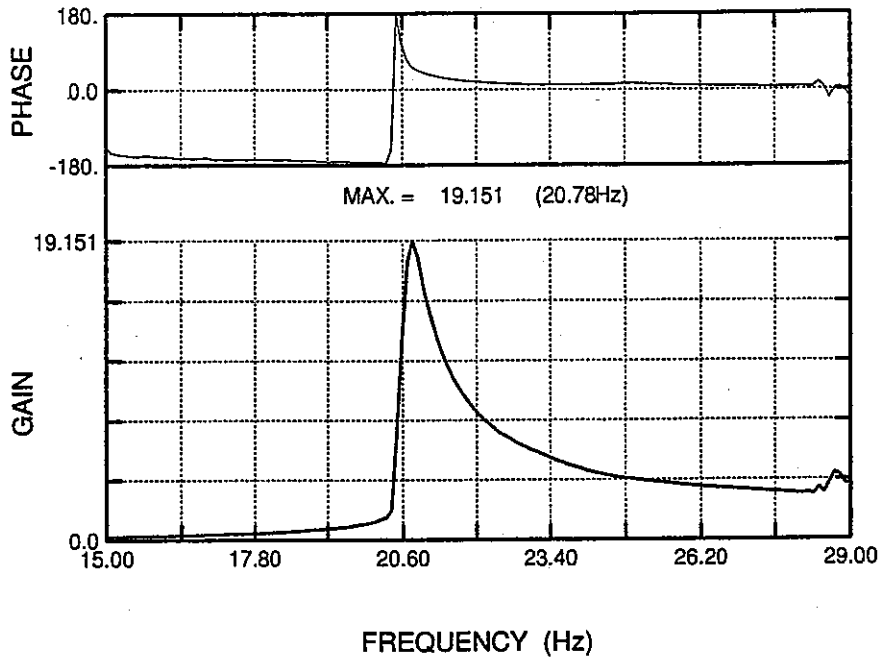
G0-3  $\frac{Ax2}{Ax1}$



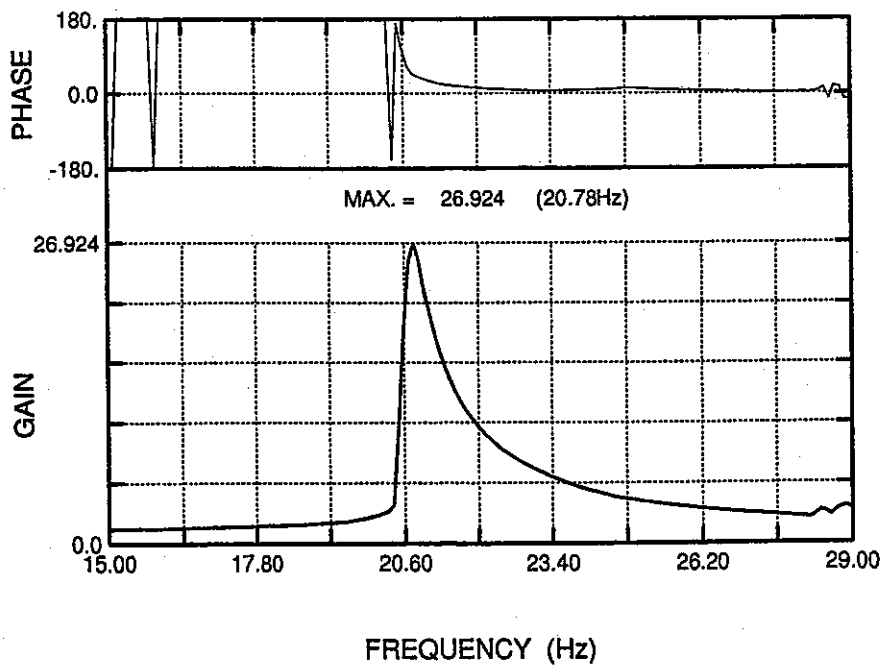
G0-3  $\frac{Ax3}{Ax1}$



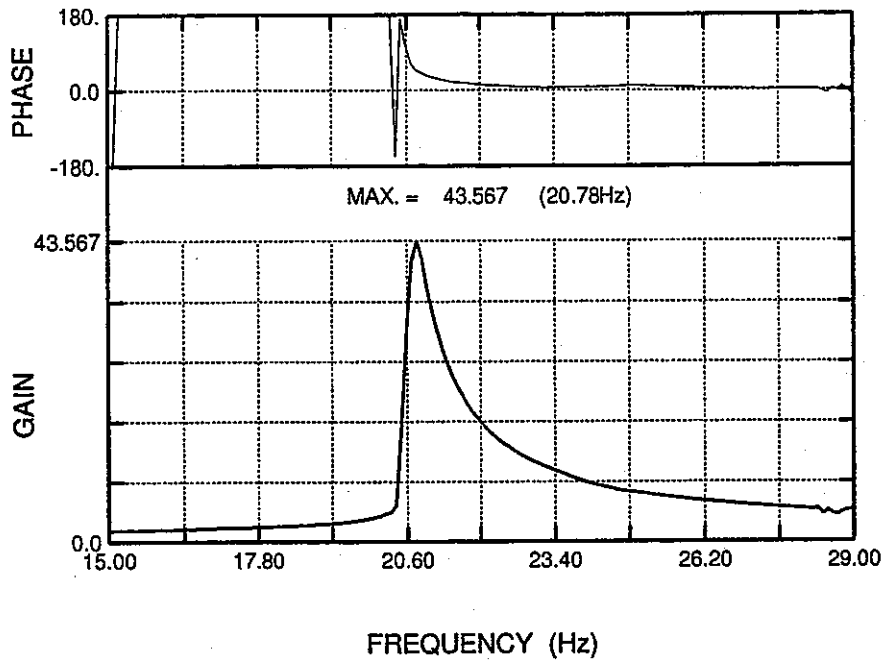
G0-3  $\frac{Ax4}{Ax1}$

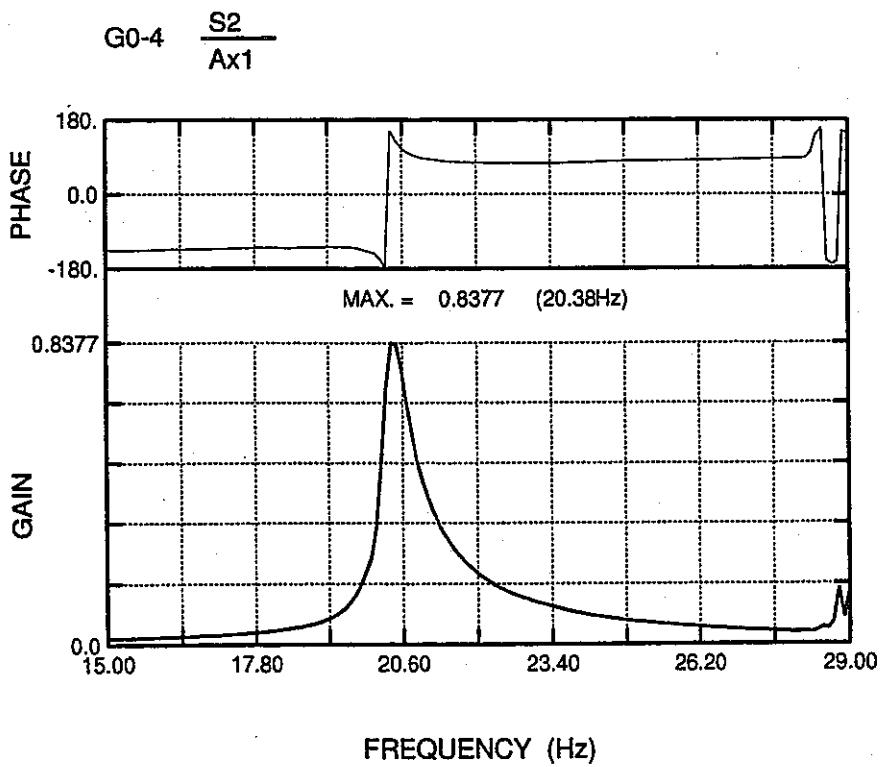
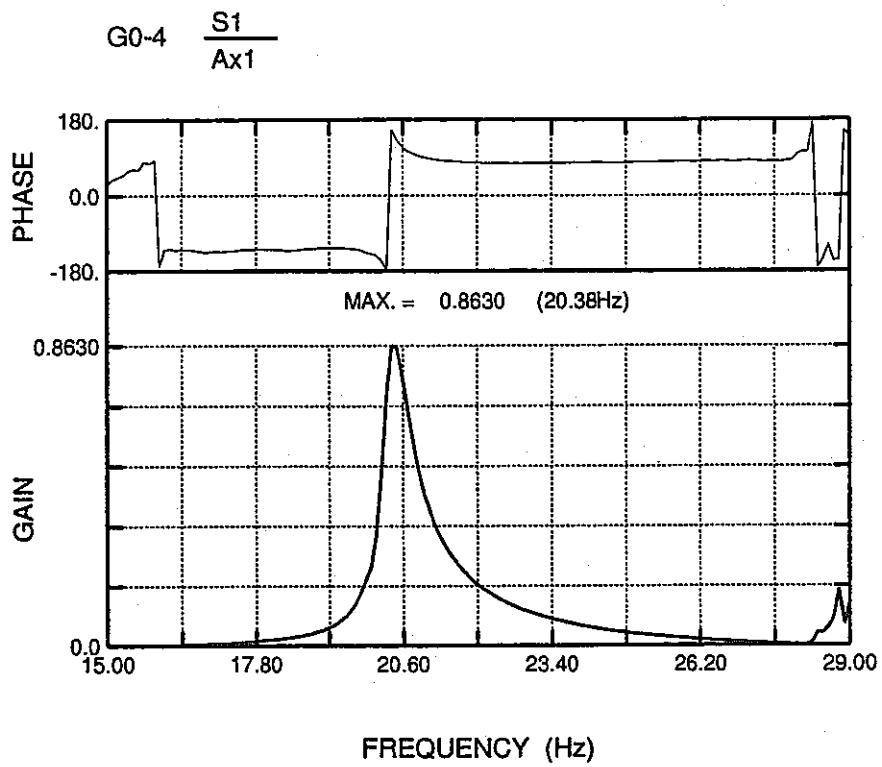


G0-3  $\frac{Ax5}{Ax1}$

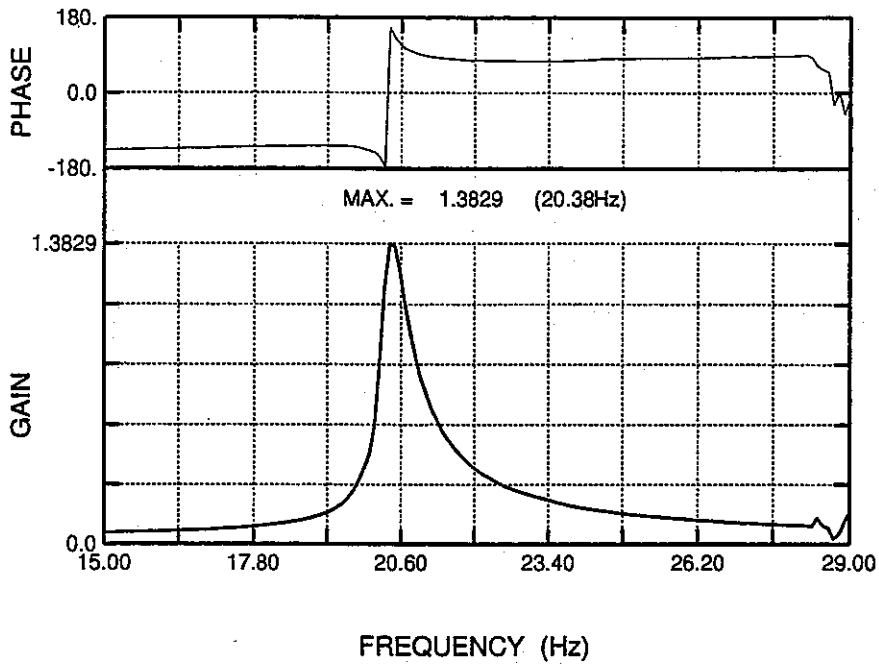


G0-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

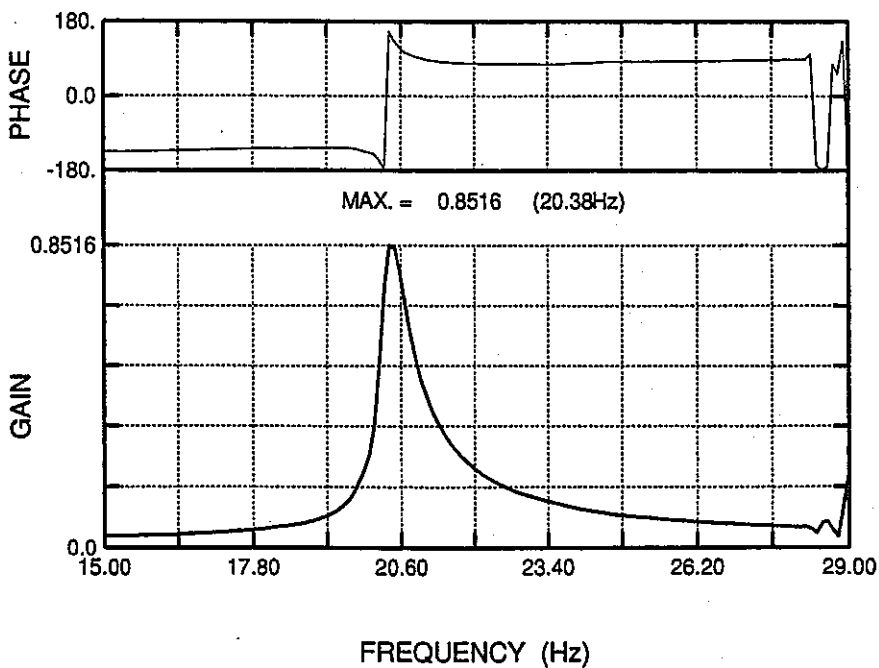




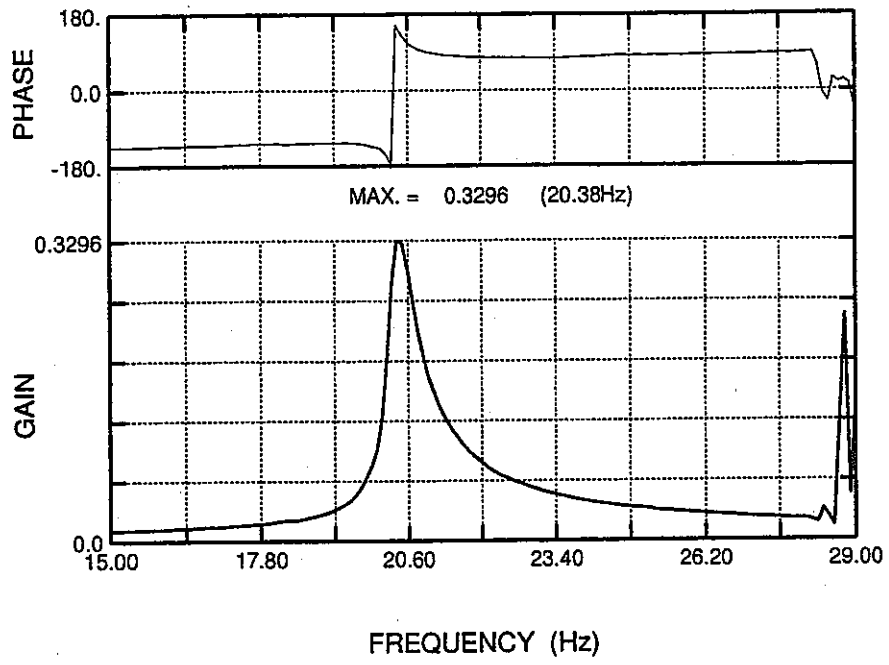
G0-4  $\frac{S3}{Ax1}$



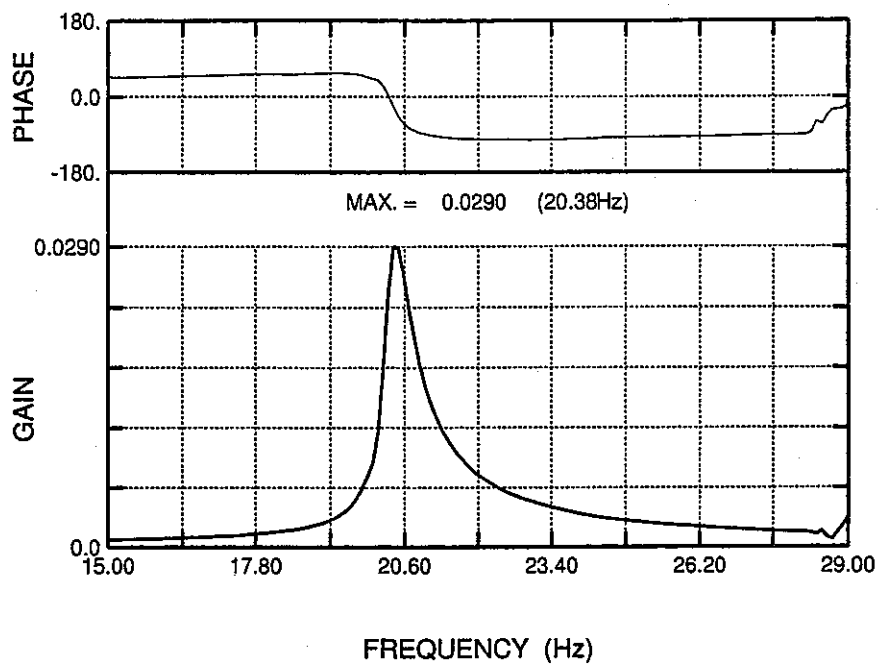
G0-4  $\frac{S4}{Ax1}$



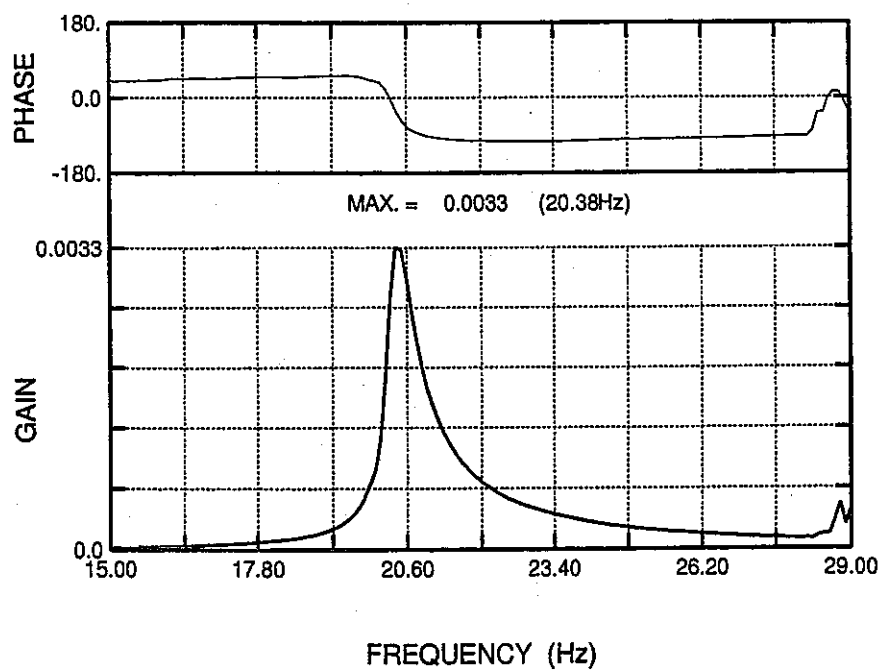
G0-4  $\frac{S5}{Ax1}$



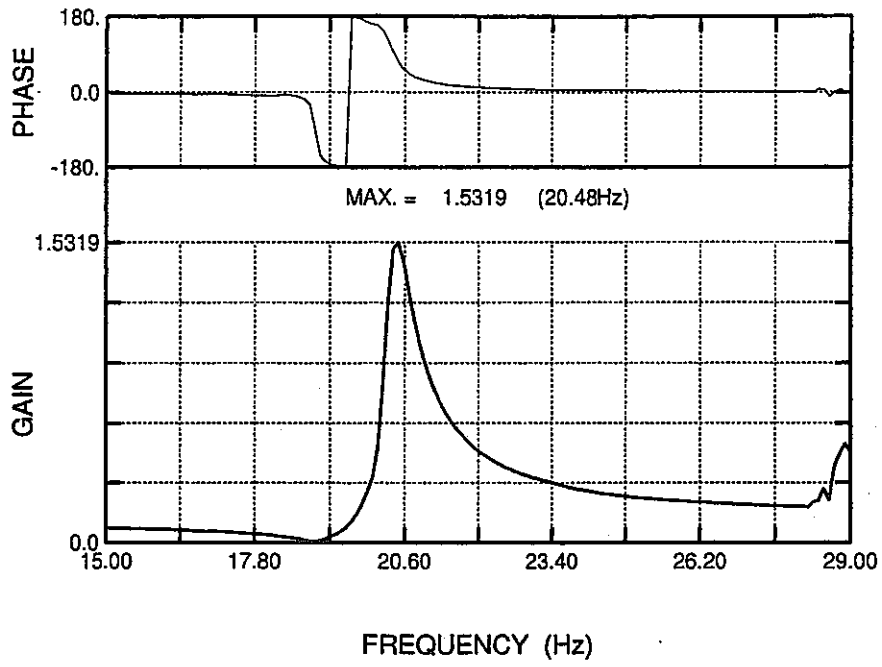
G0-4  $\frac{D2}{Ax1}$



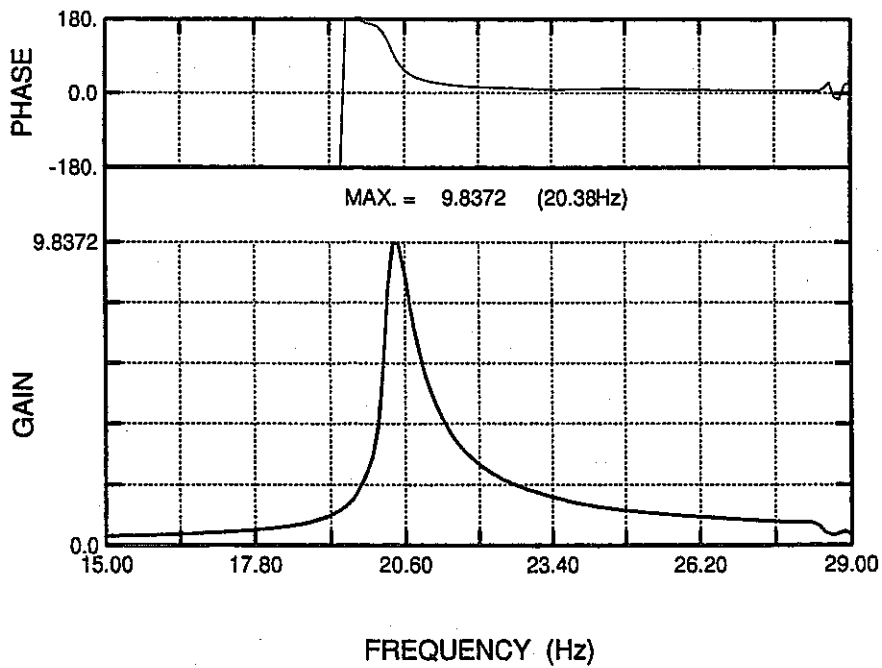
G0-4  $\frac{D1}{Ax1}$



$$G0-4 \frac{Ax2}{Ax1}$$

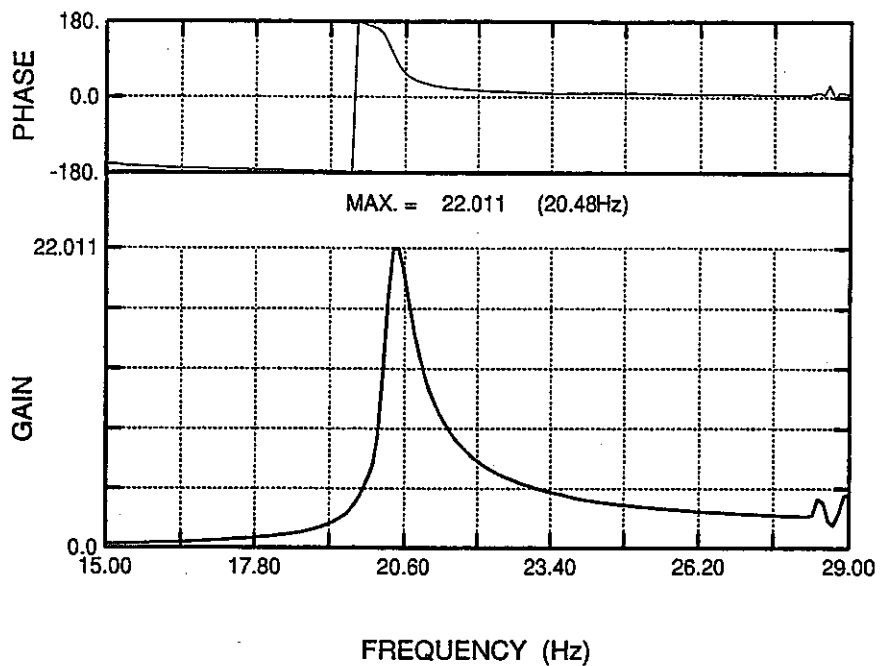


$$G0-4 \frac{Ax3}{Ax1}$$

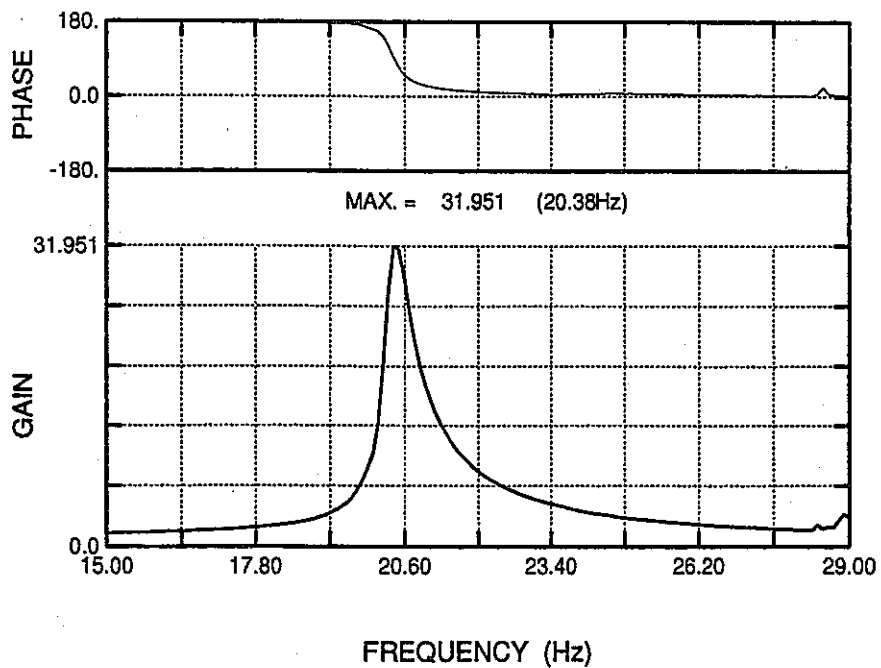




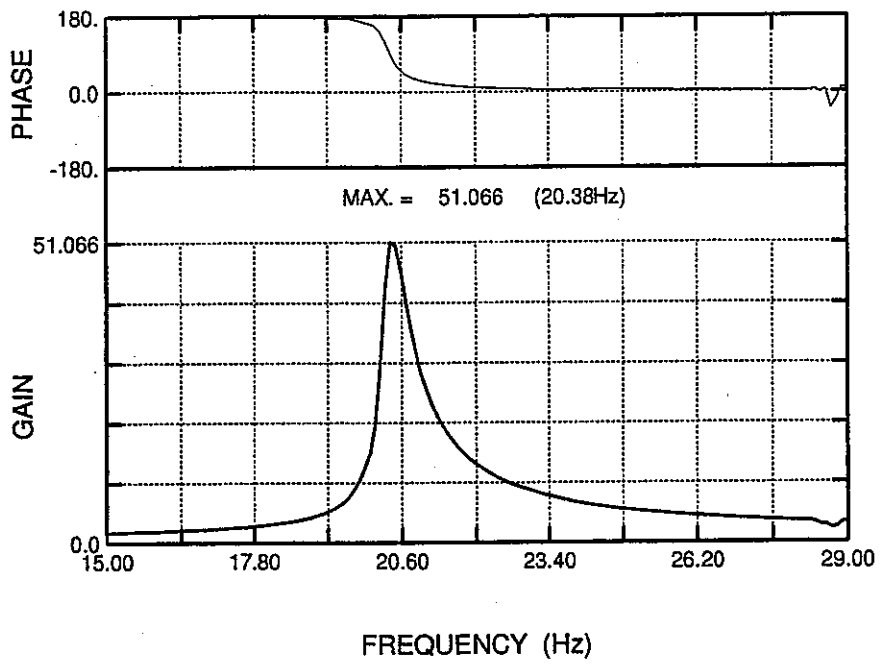
G0-4  $\frac{Ax4}{Ax1}$



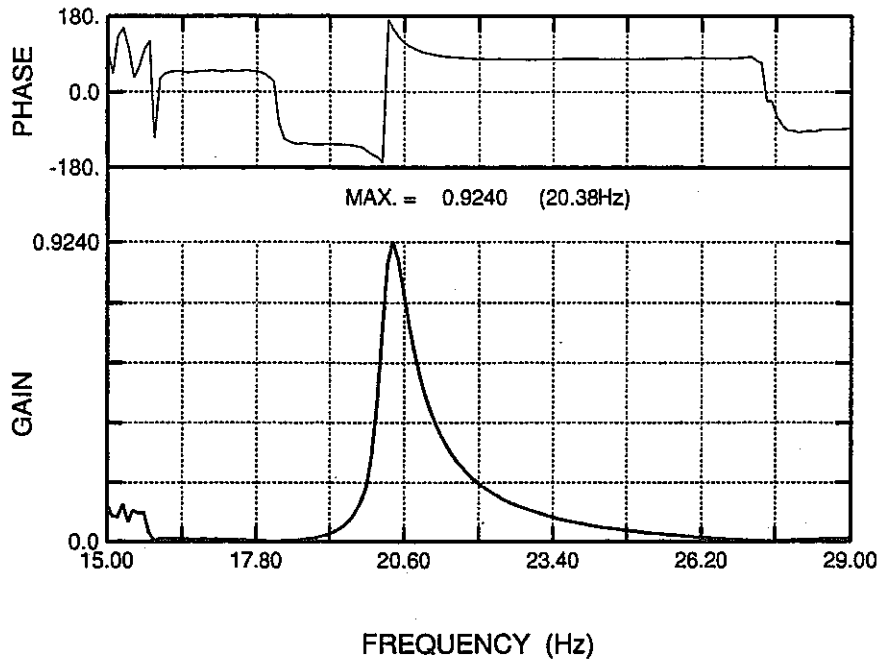
G0-4  $\frac{Ax5}{Ax1}$



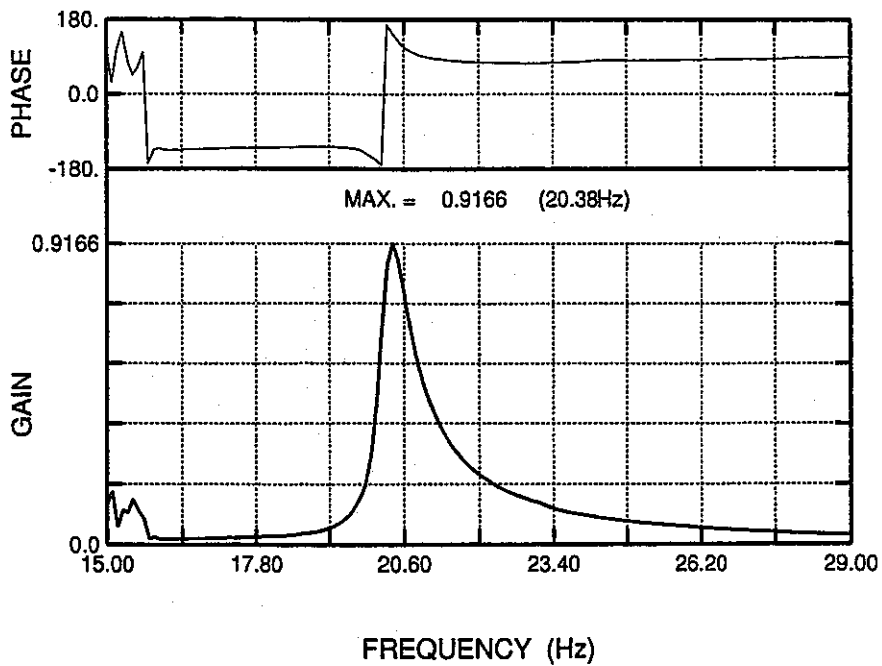
G0-4  $\frac{Ax6}{Ax1}$

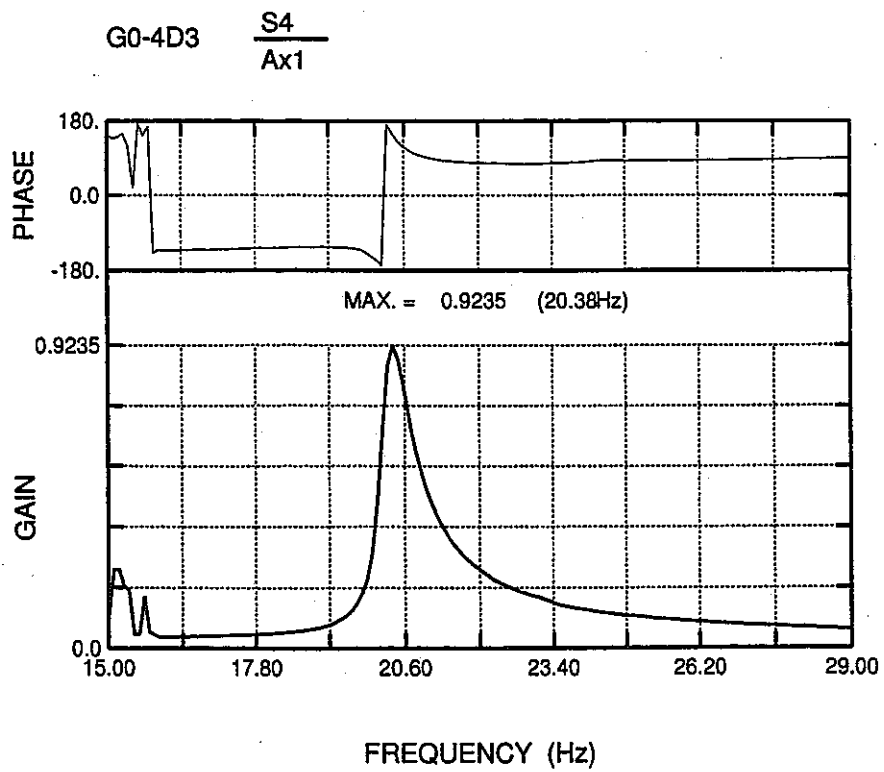
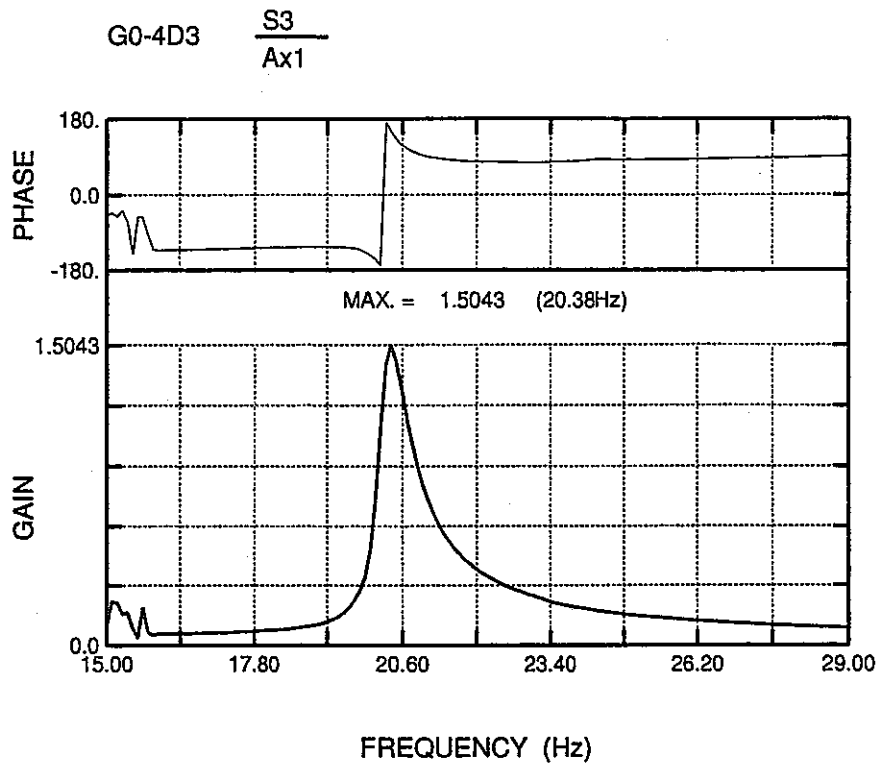


G0-4D3  $\frac{S1}{Ax1}$

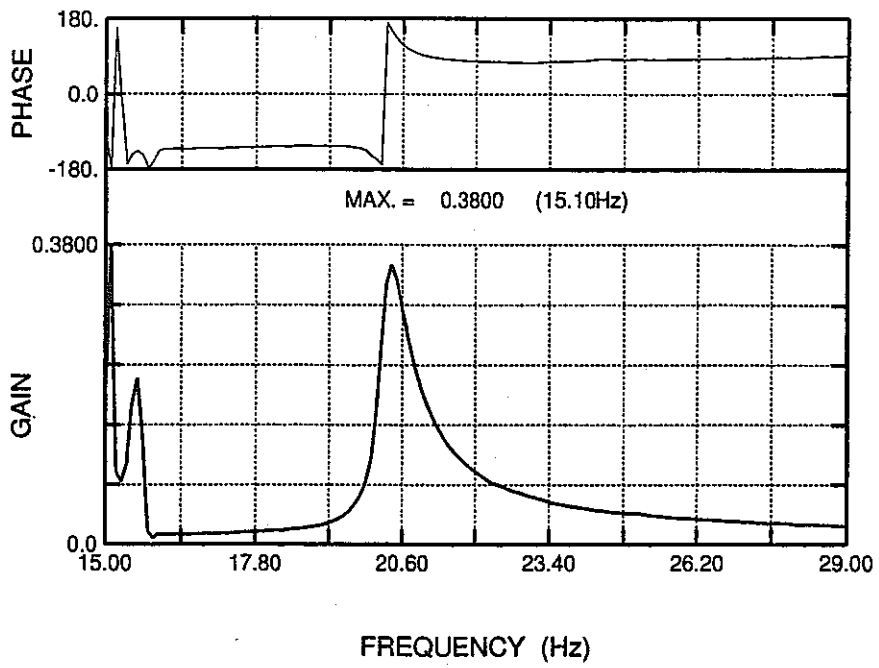


G0-4D3  $\frac{S2}{Ax1}$

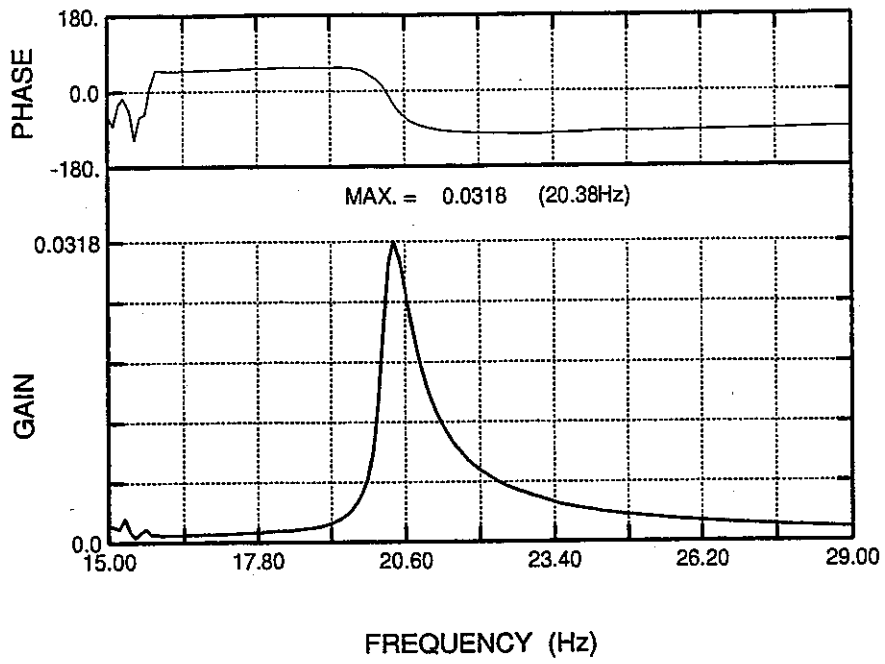




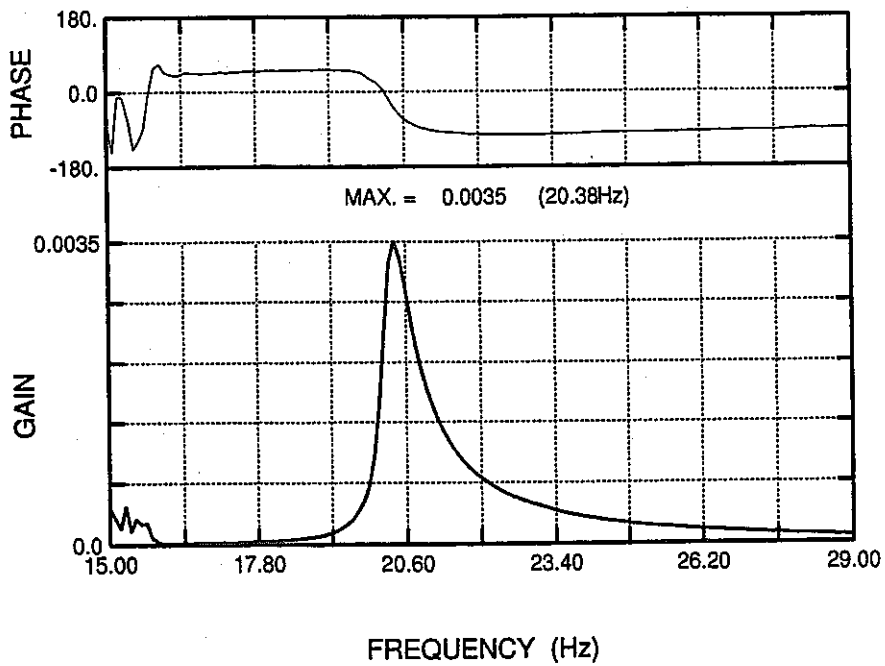
G0-4D3  $\frac{S5}{Ax1}$

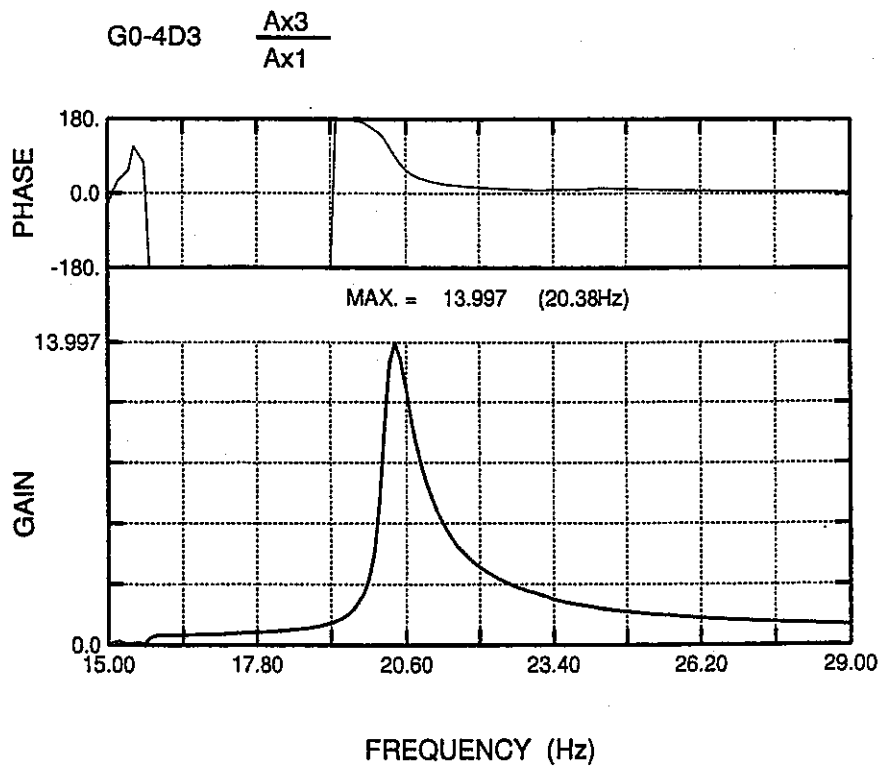
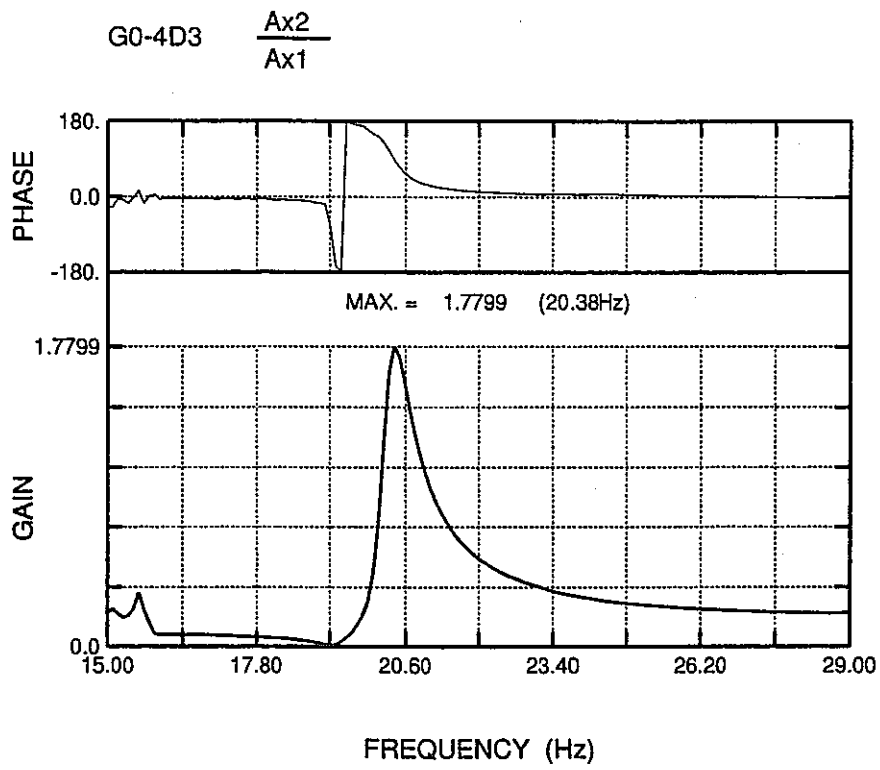


G0-4D3  $\frac{D2}{Ax1}$

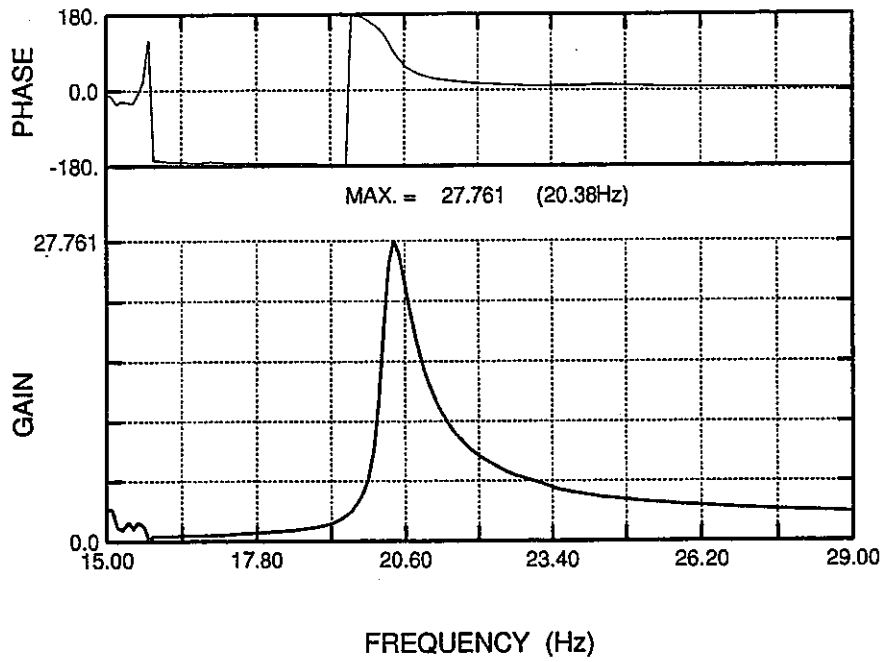


G0-4D3  $\frac{D1}{Ax1}$

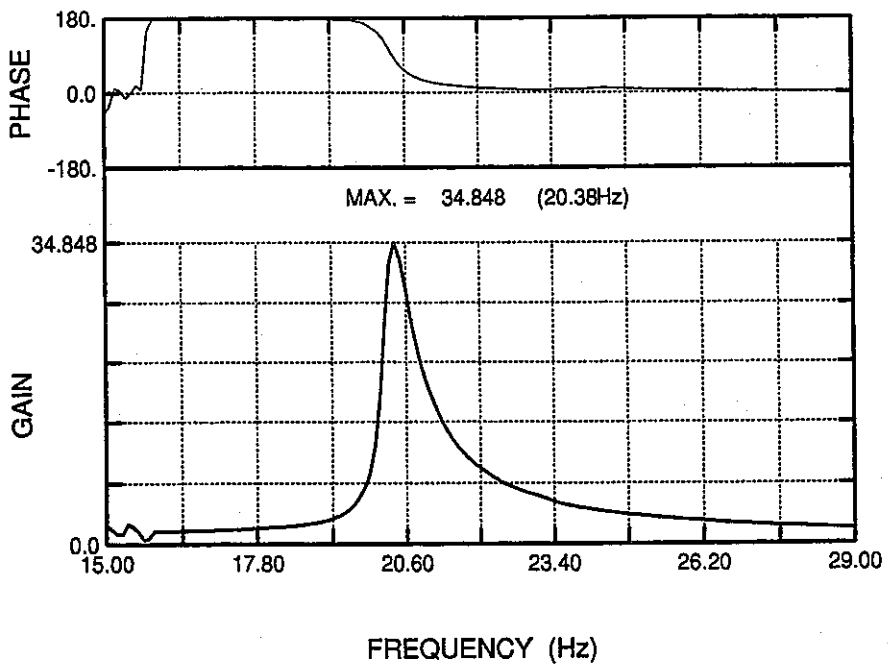




G0-4D3  $\frac{Ax4}{Ax1}$

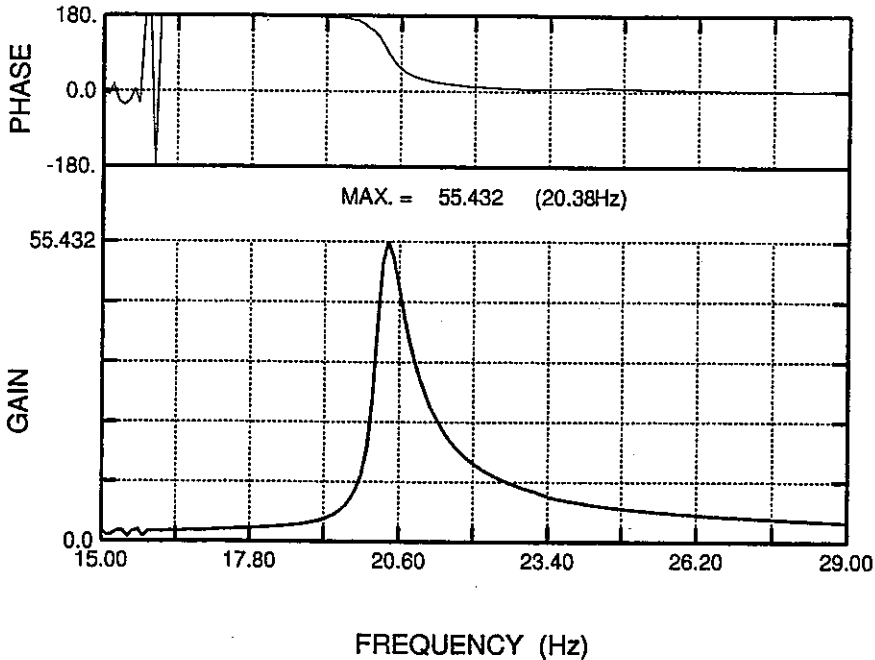


G0-4D3  $\frac{Ax5}{Ax1}$

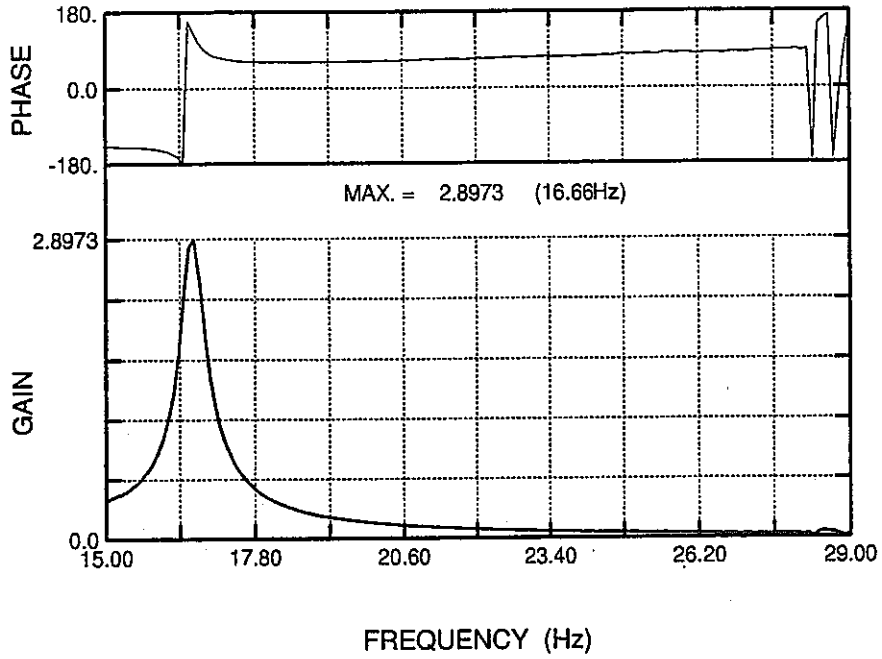




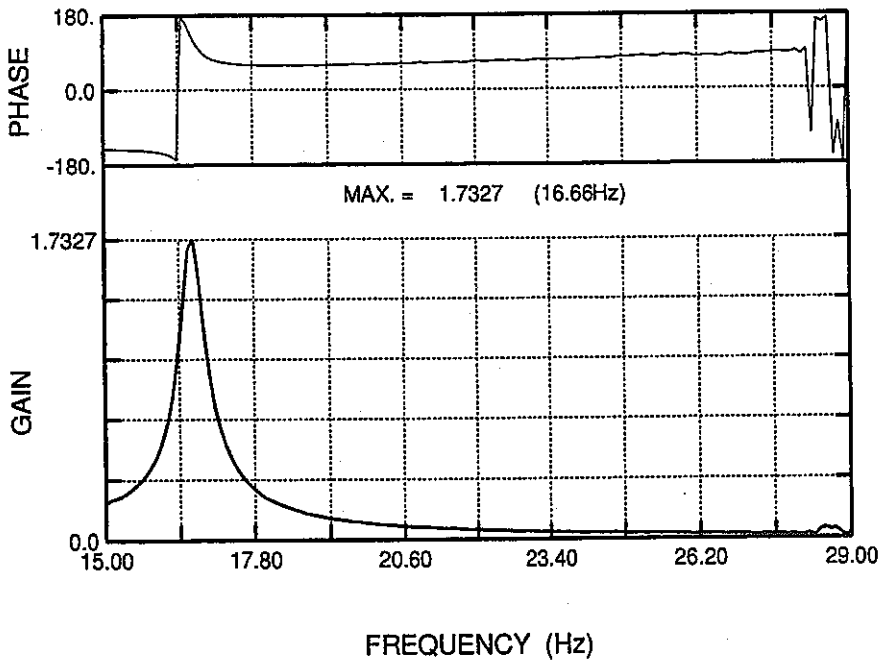
G0-4D3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

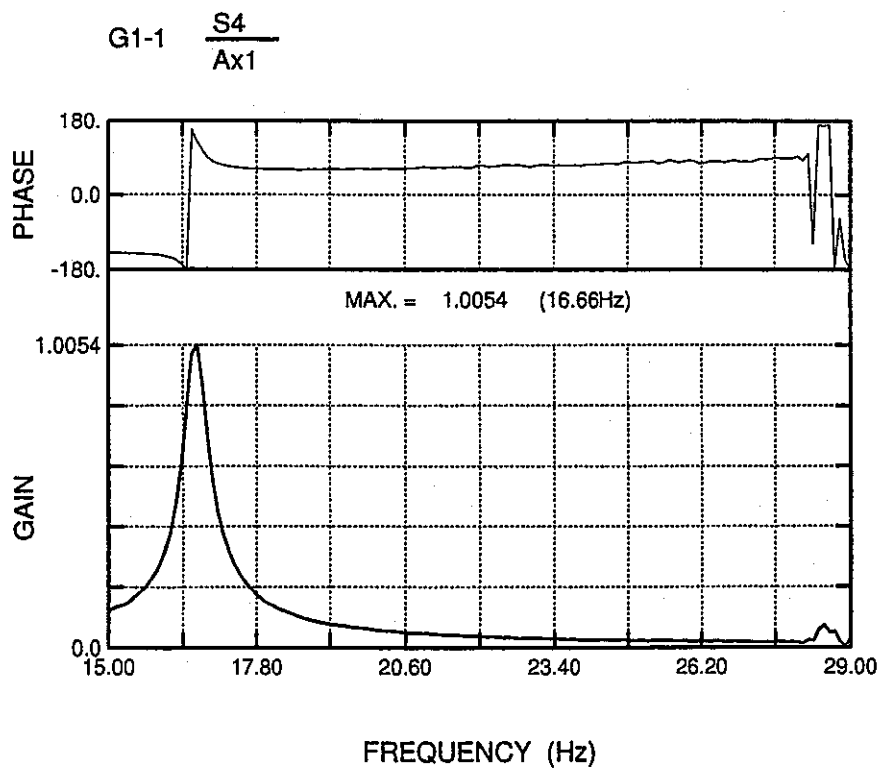
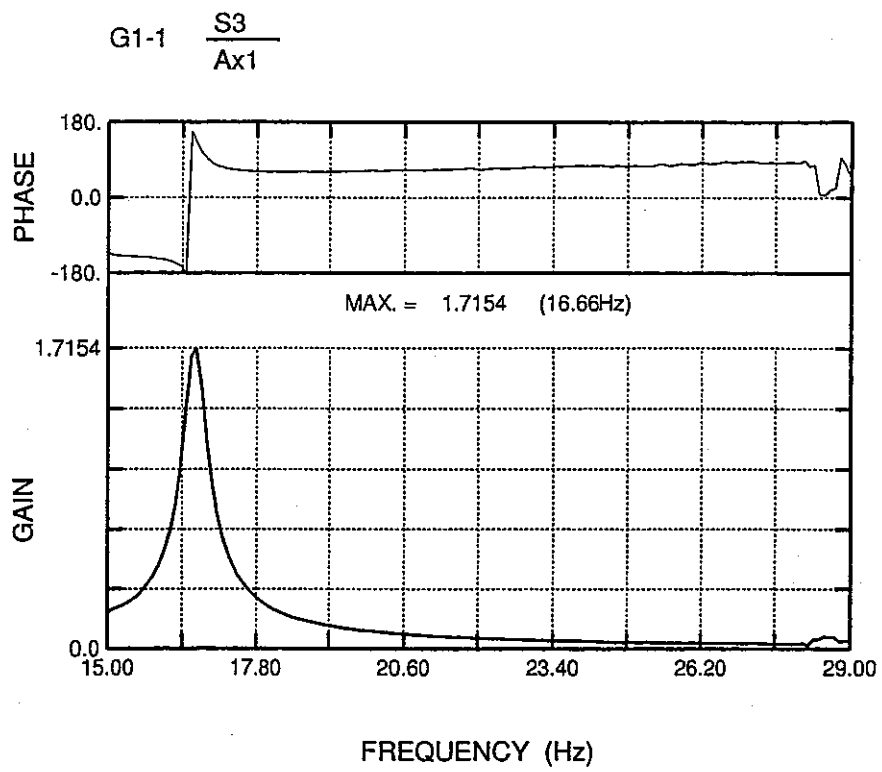


G1-1  $\frac{S1}{Ax1}$

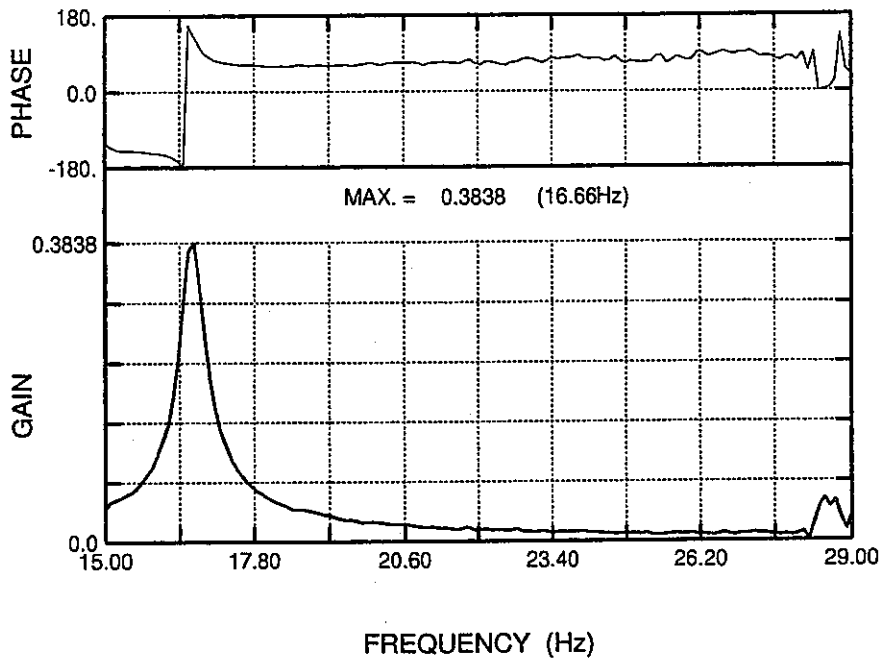


G1-1  $\frac{S2}{Ax1}$

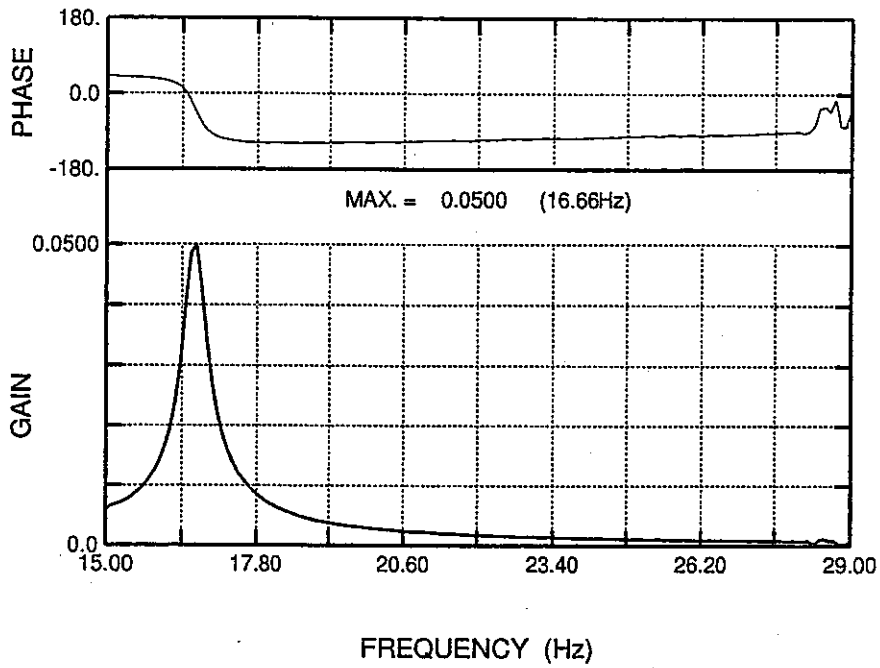




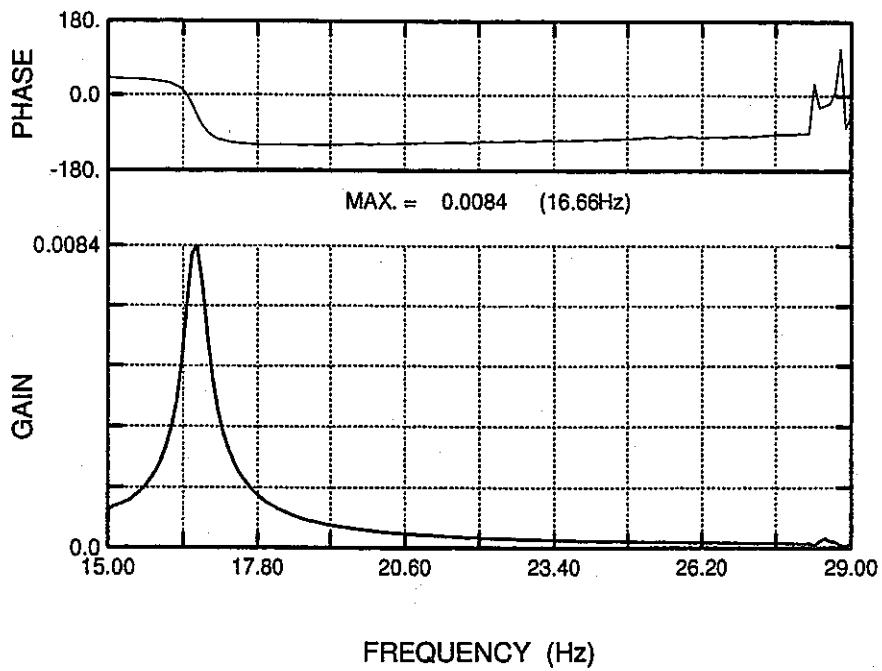
G1-1  $\frac{S5}{Ax1}$



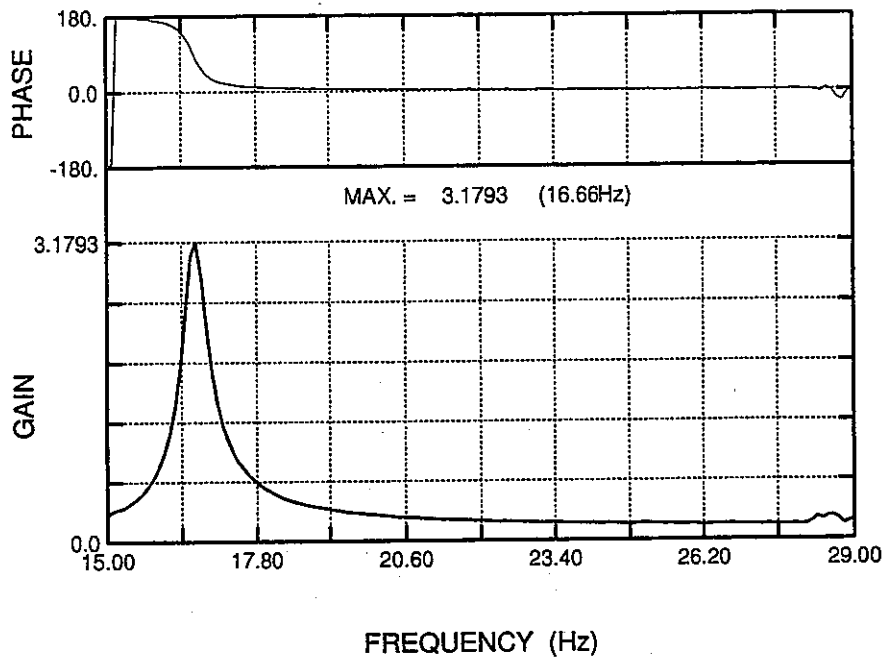
G1-1  $\frac{D2}{Ax1}$



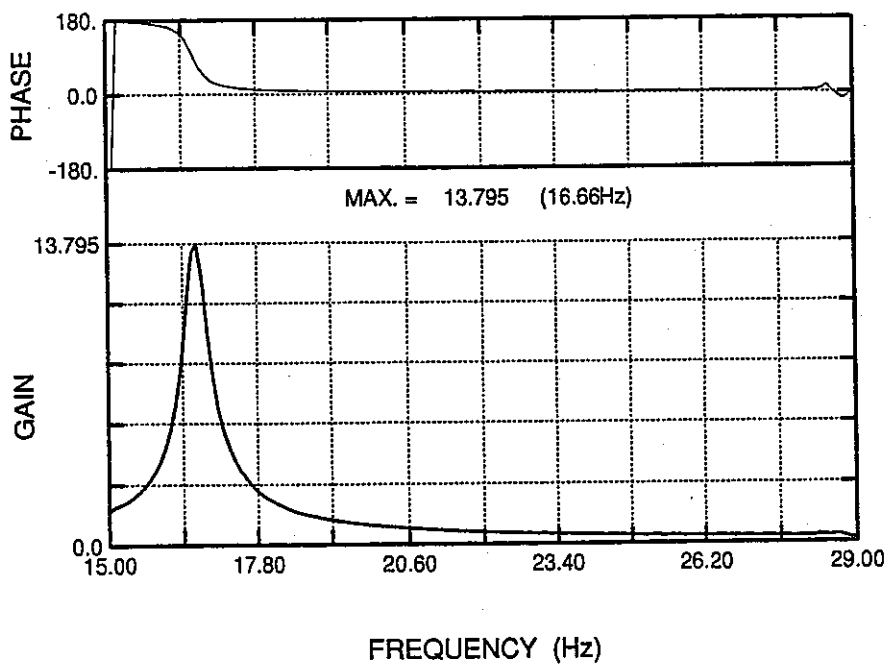
G1-1  $\frac{D1}{Ax1}$



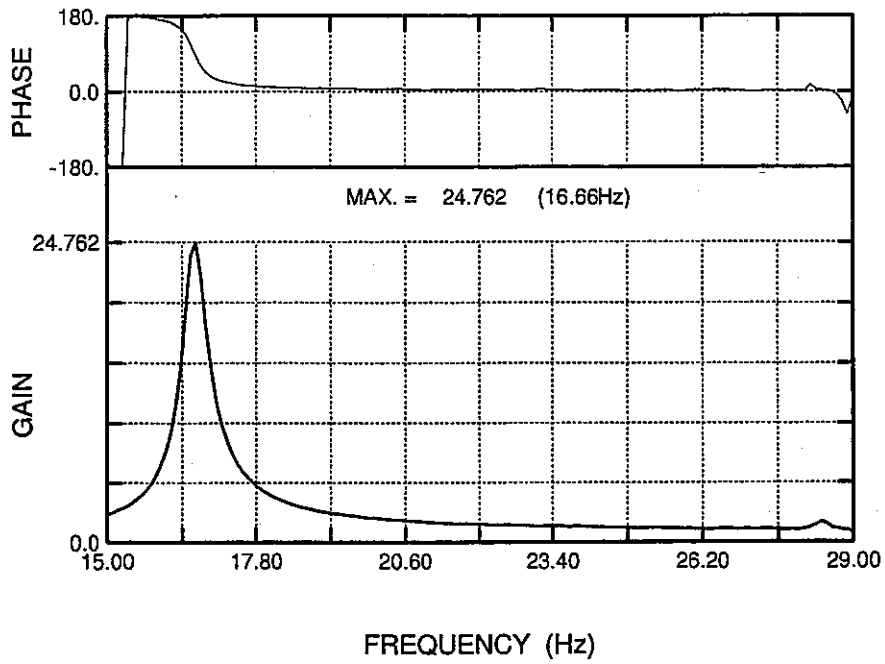
$$G1-1 \quad \frac{Ax2}{Ax1}$$



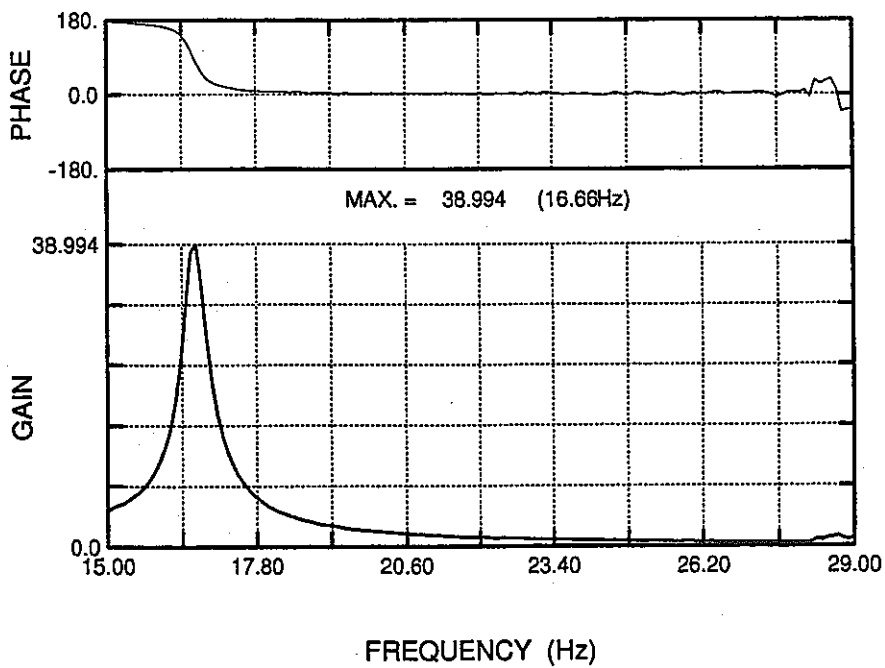
$$G1-1 \quad \frac{Ax3}{Ax1}$$



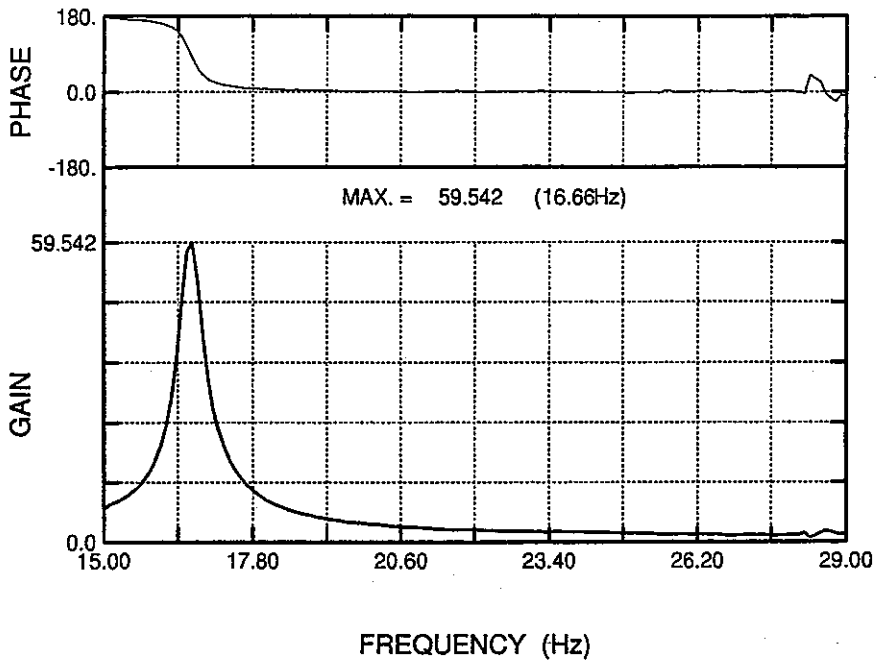
$$G1-1 \frac{Ax4}{Ax1}$$



$$G1-1 \frac{Ax5}{Ax1}$$

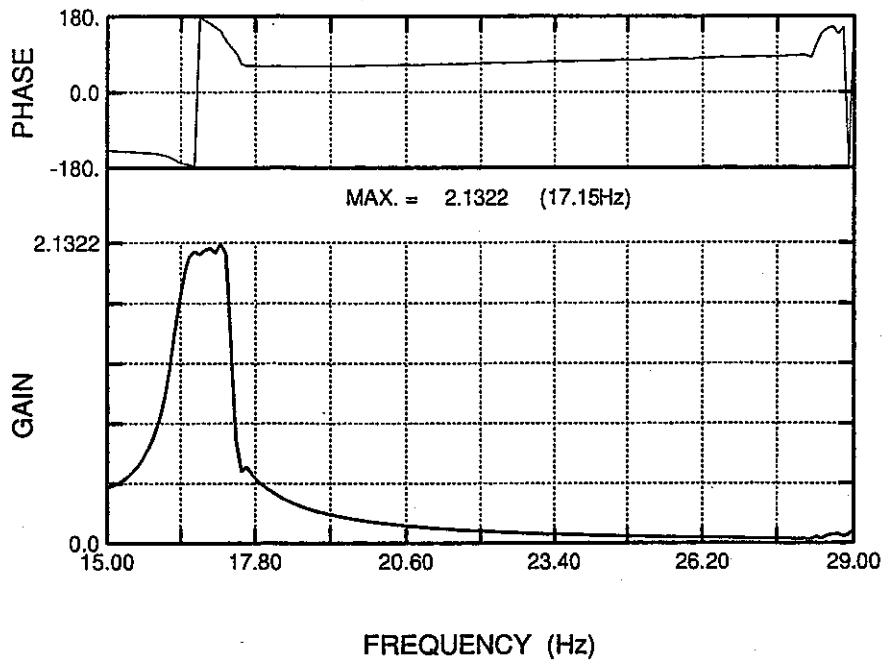


G1-1  $\frac{Ax6}{Ax1}$

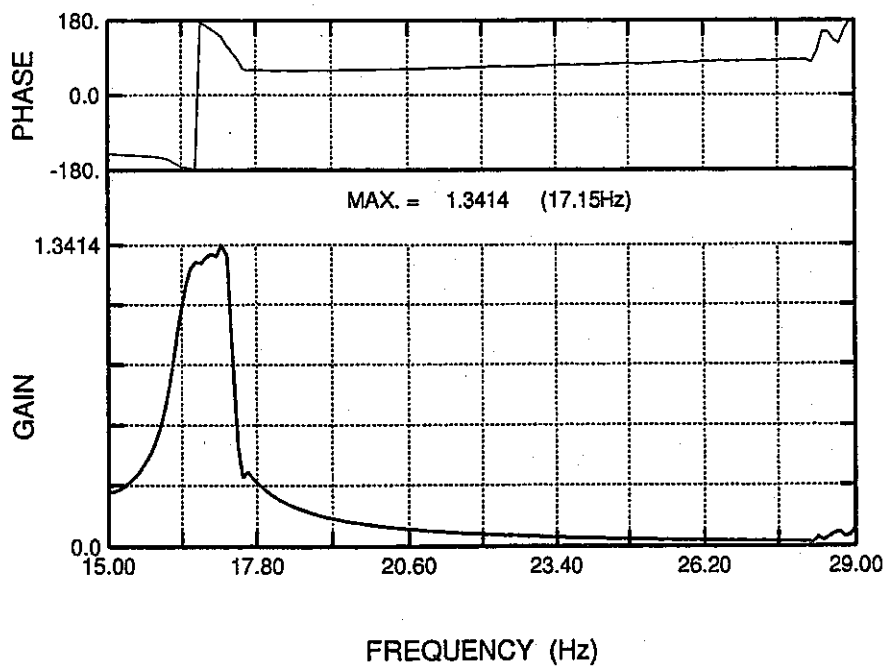




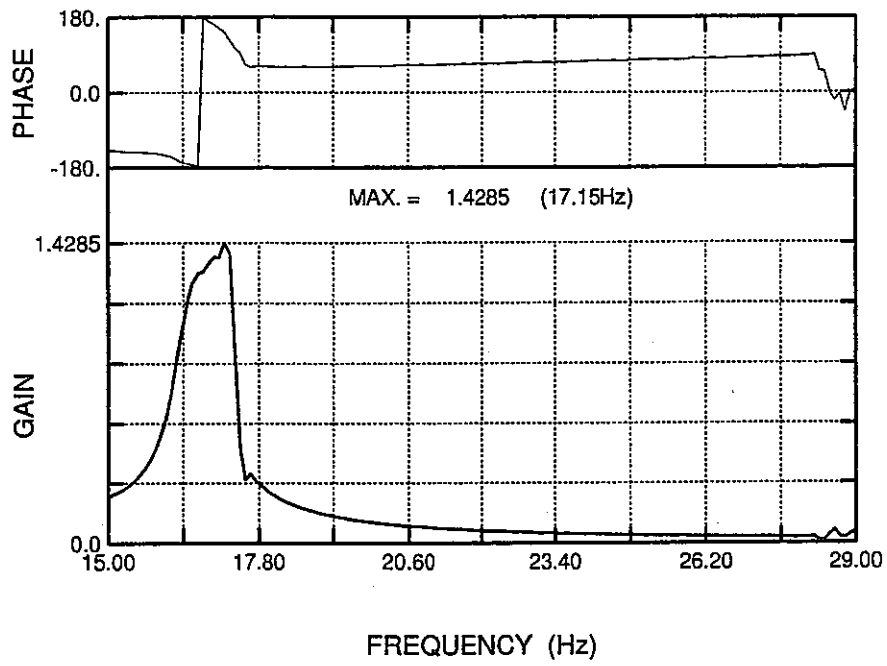
G1-2  $\frac{S1}{Ax1}$



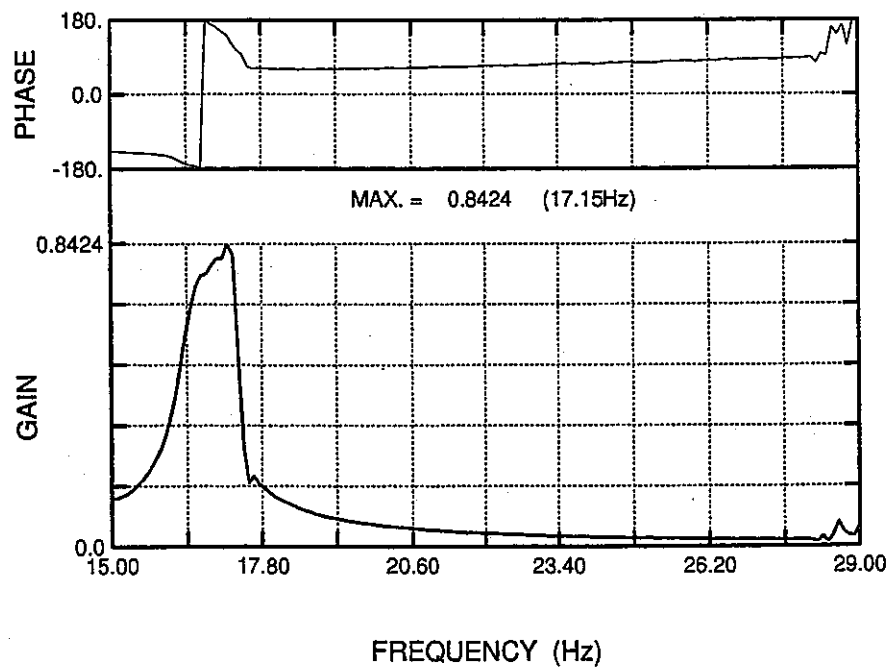
G1-2  $\frac{S2}{Ax1}$



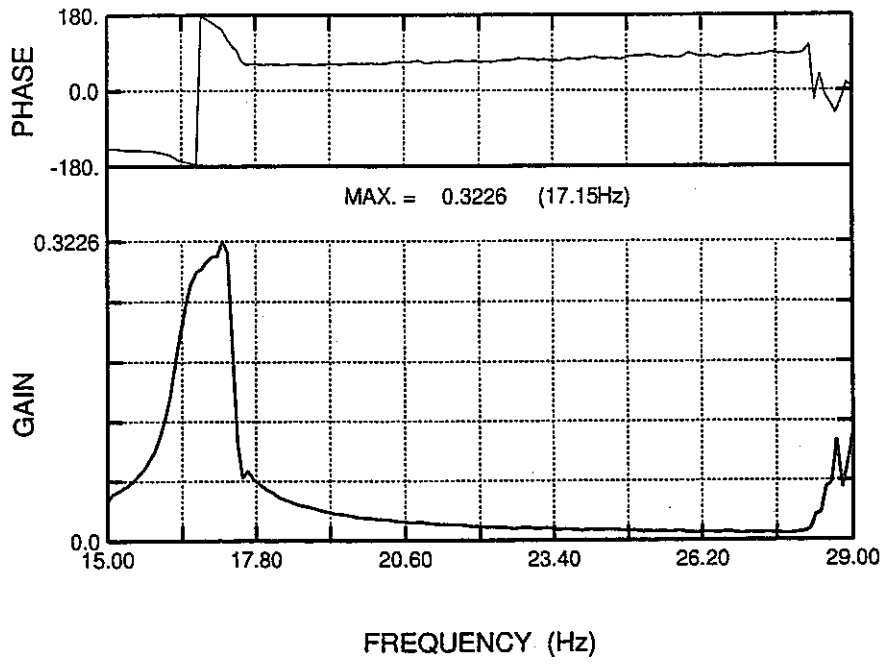
G1-2  $\frac{S3}{Ax1}$

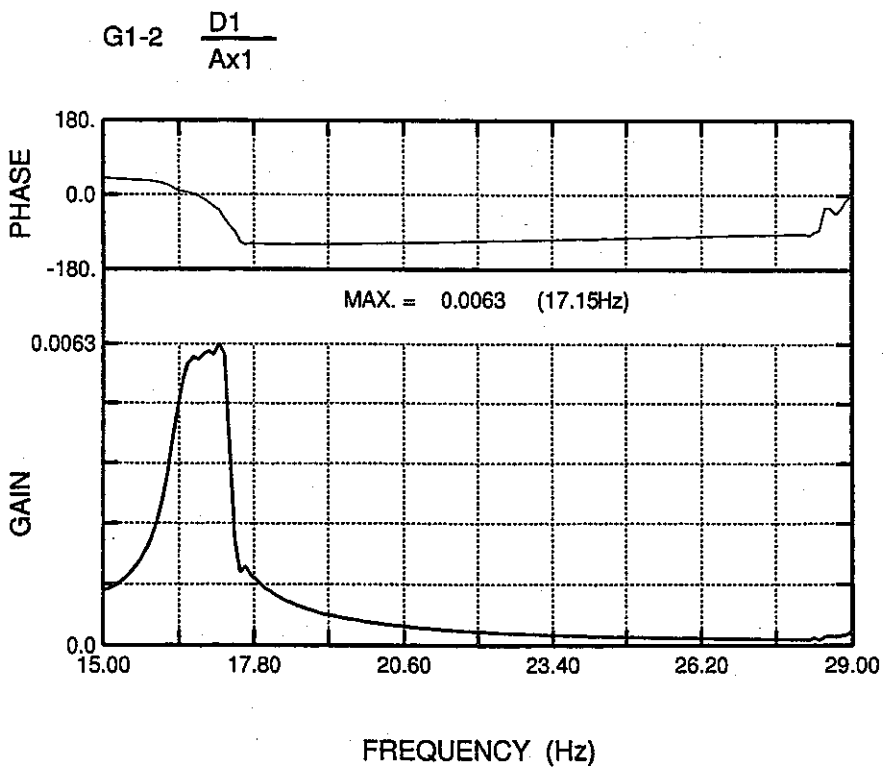
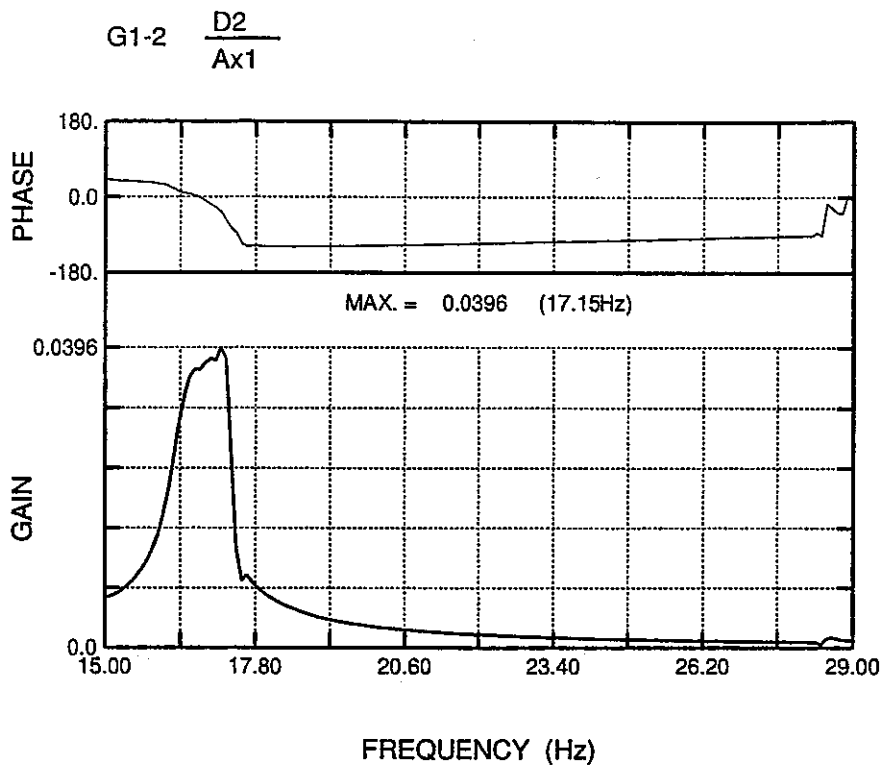


G1-2  $\frac{S4}{Ax1}$

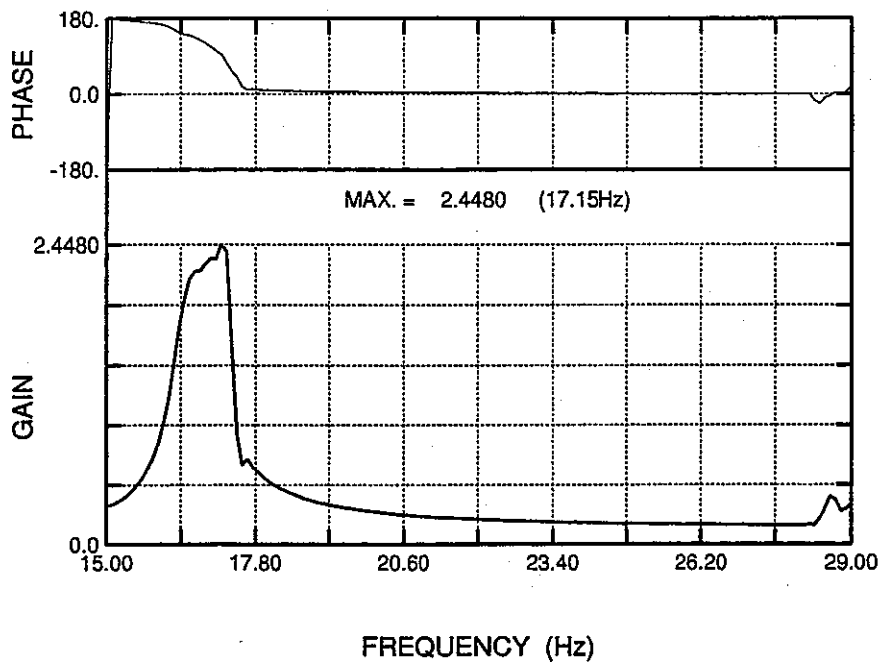


G1-2  $\frac{S5}{Ax1}$

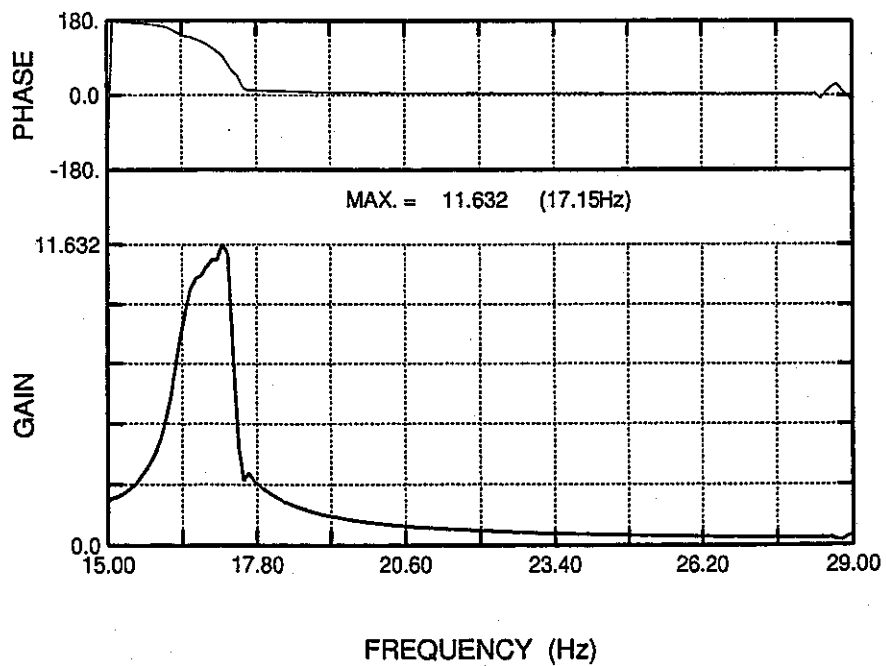




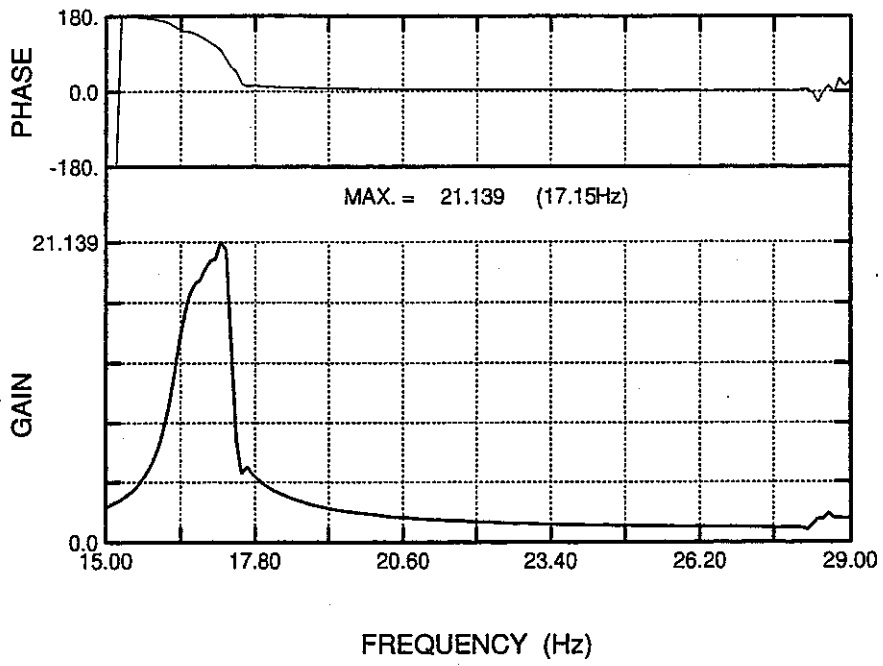
$$G1-2 \frac{Ax2}{Ax1}$$



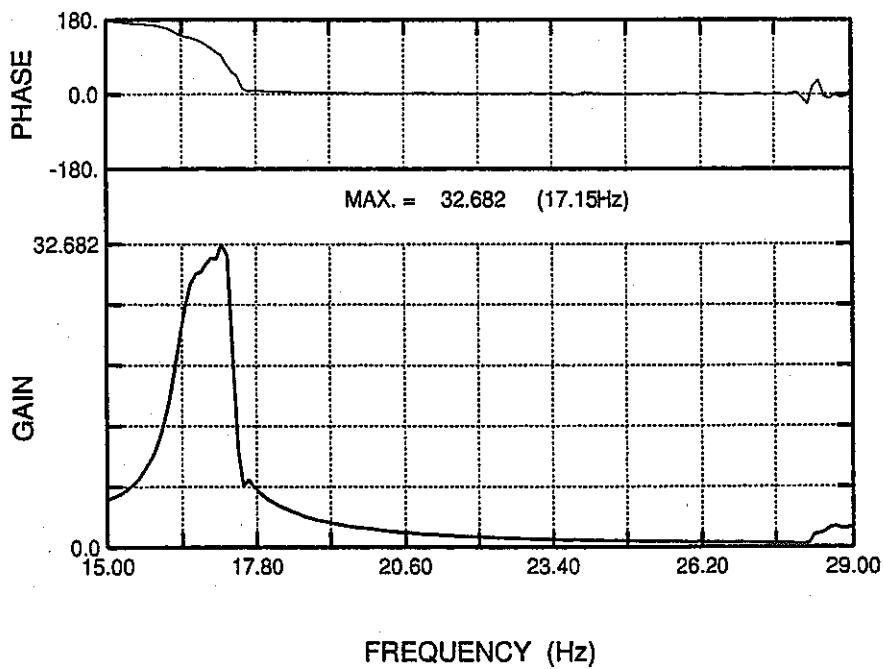
$$G1-2 \frac{Ax3}{Ax1}$$



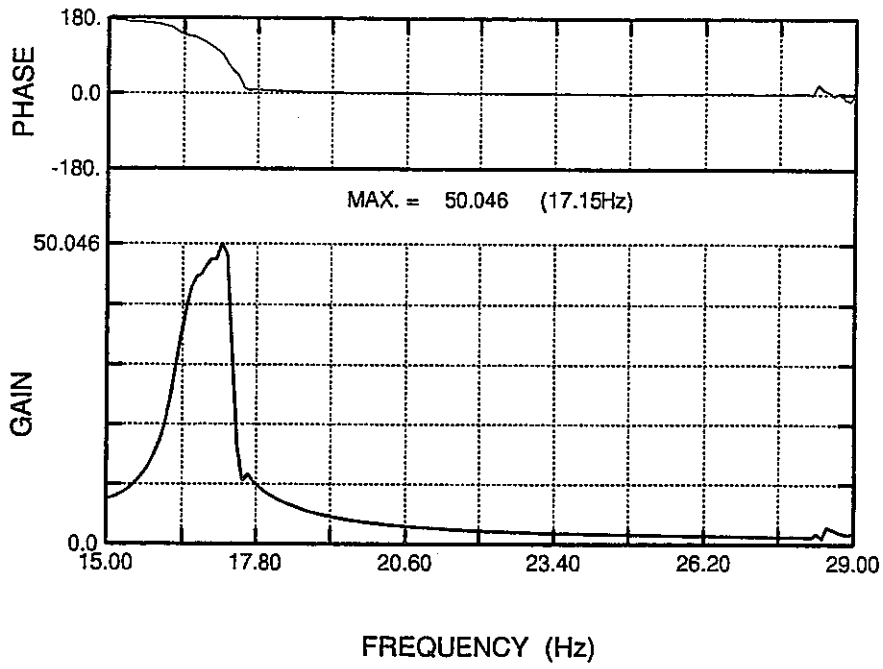
G1-2  $\frac{Ax4}{Ax1}$



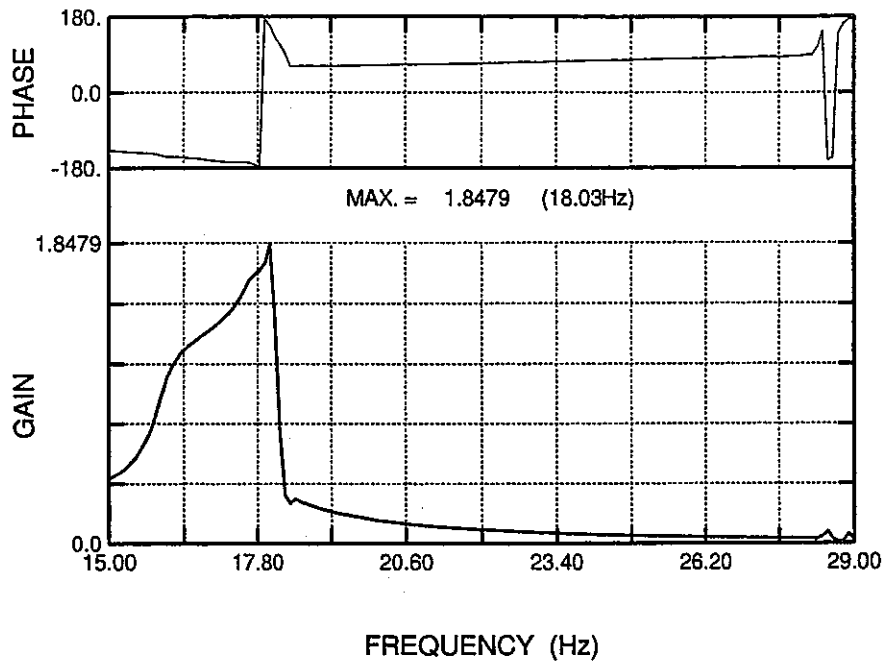
G1-2  $\frac{Ax5}{Ax1}$



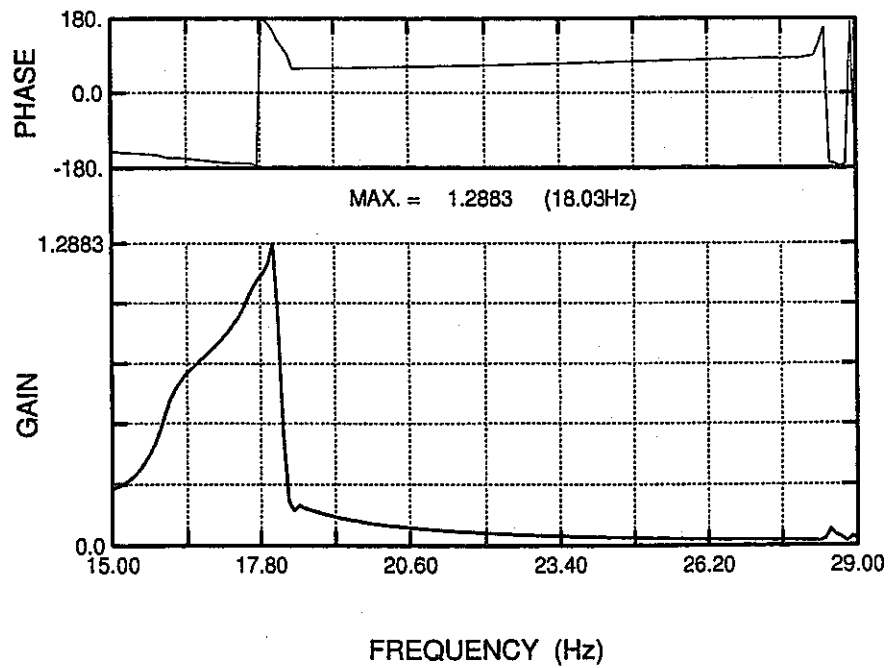
G1-2  $\frac{Ax6}{Ax1}$



G1-3  $\frac{S1}{Ax1}$

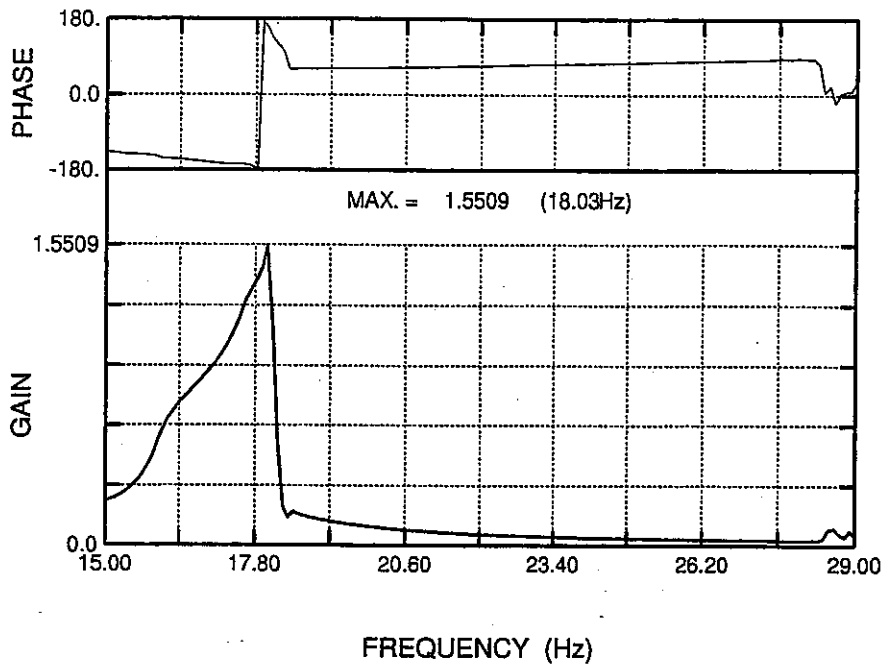


G1-3  $\frac{S2}{Ax1}$

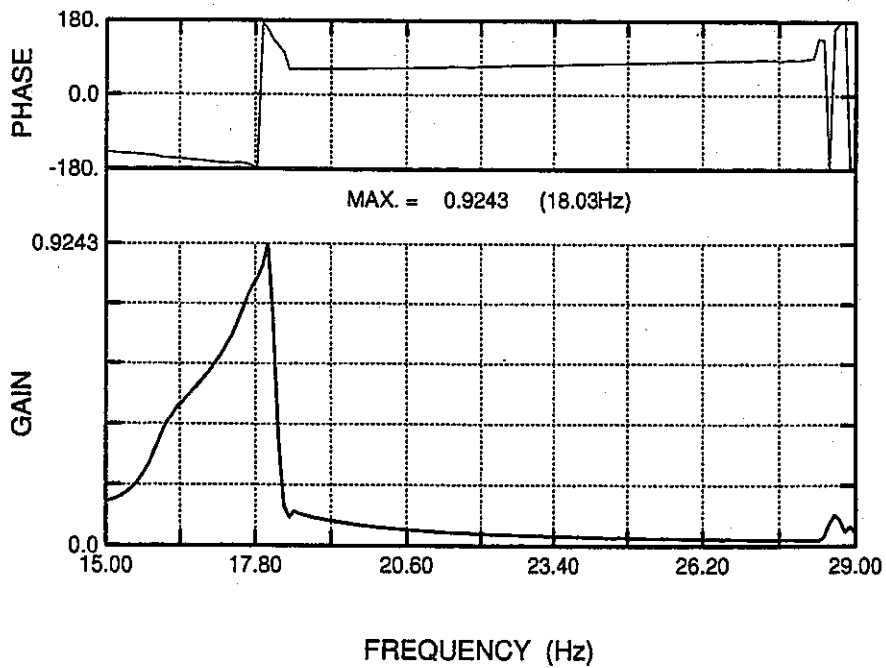




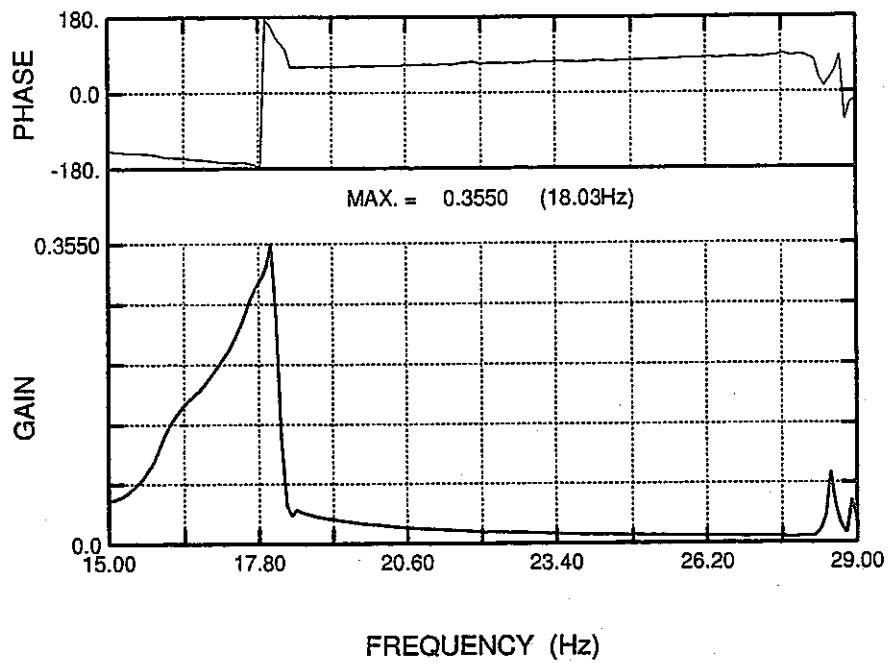
G1-3  $\frac{S3}{Ax1}$

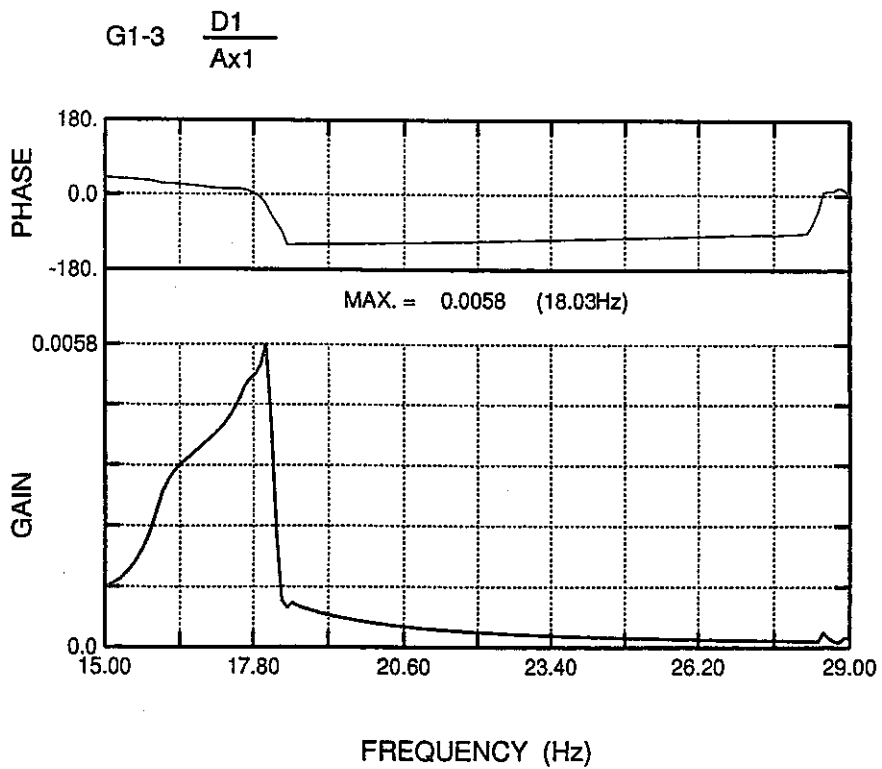
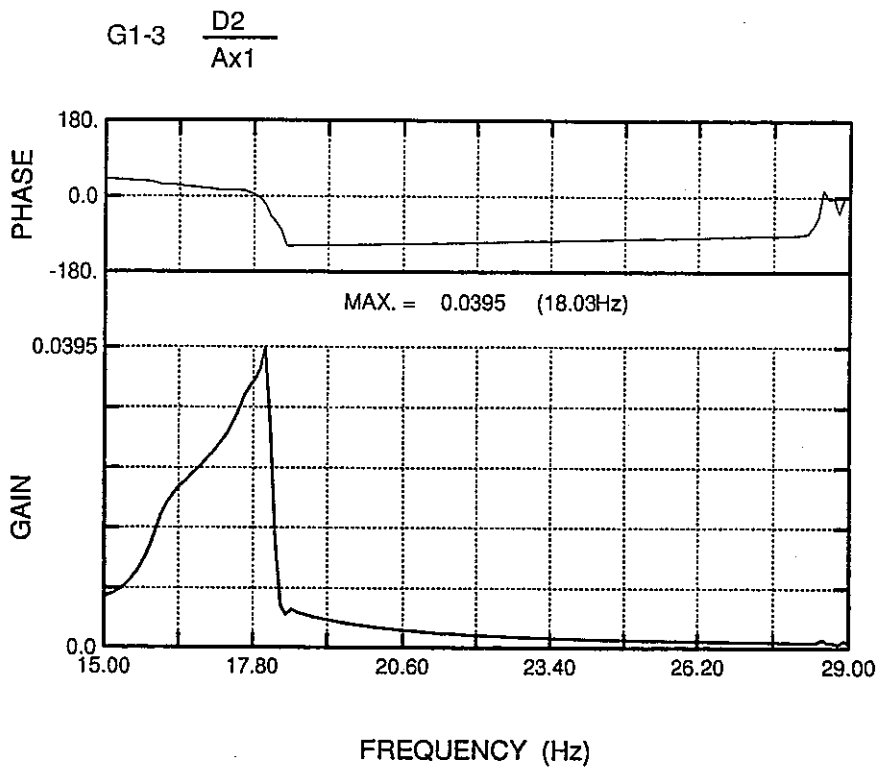


G1-3  $\frac{S4}{Ax1}$

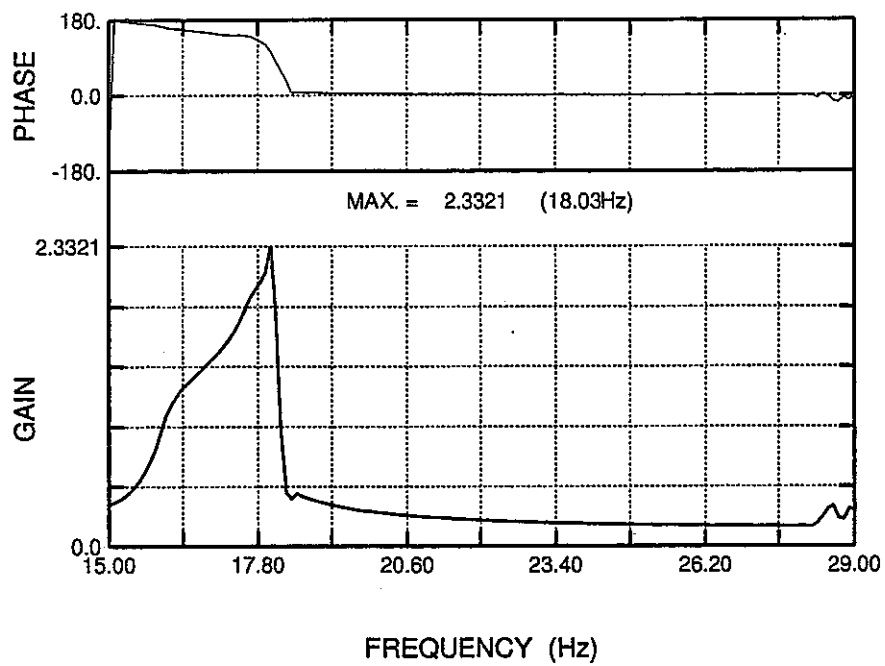


G1-3  $\frac{S5}{Ax1}$

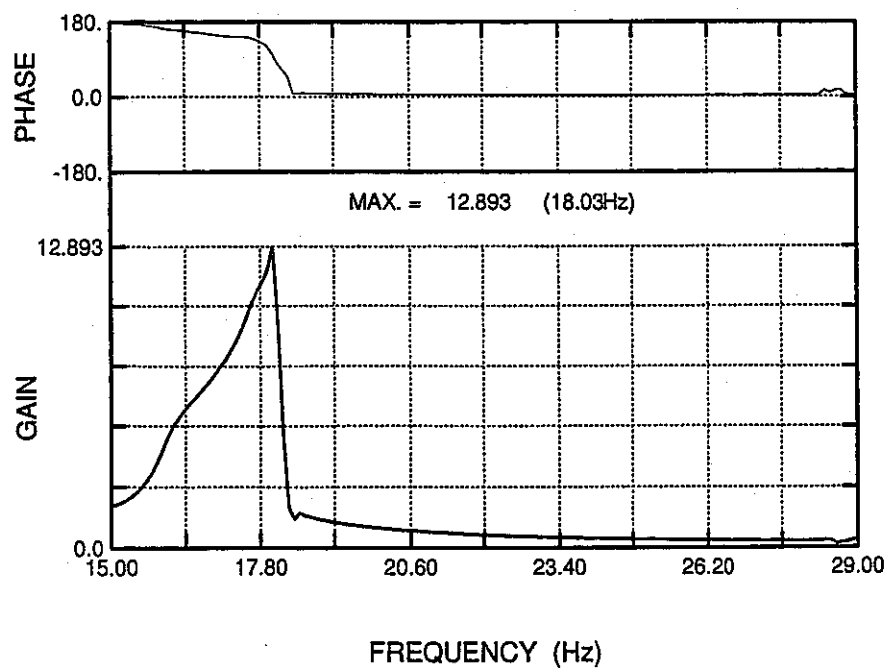




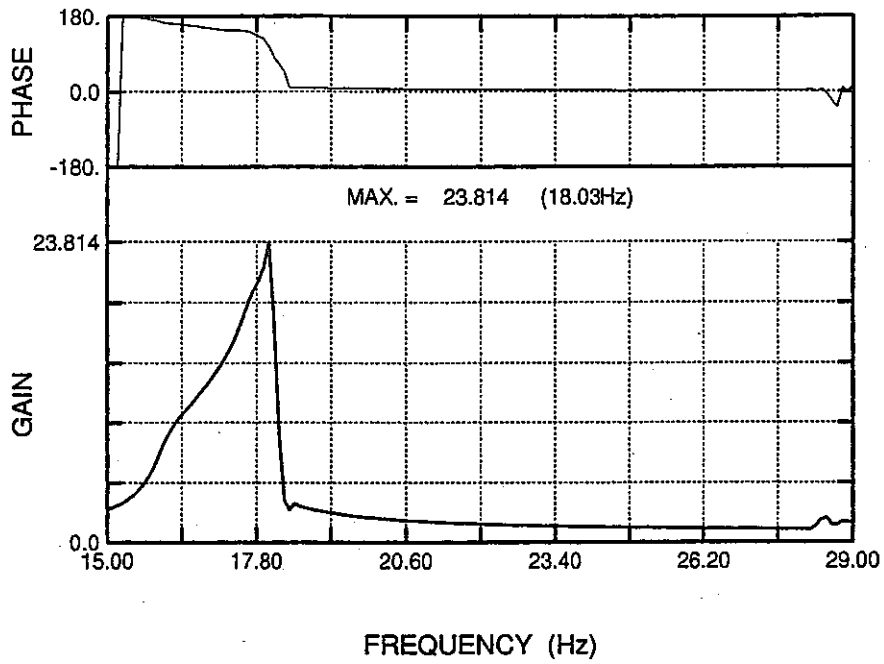
$$G1-3 \frac{Ax2}{Ax1}$$



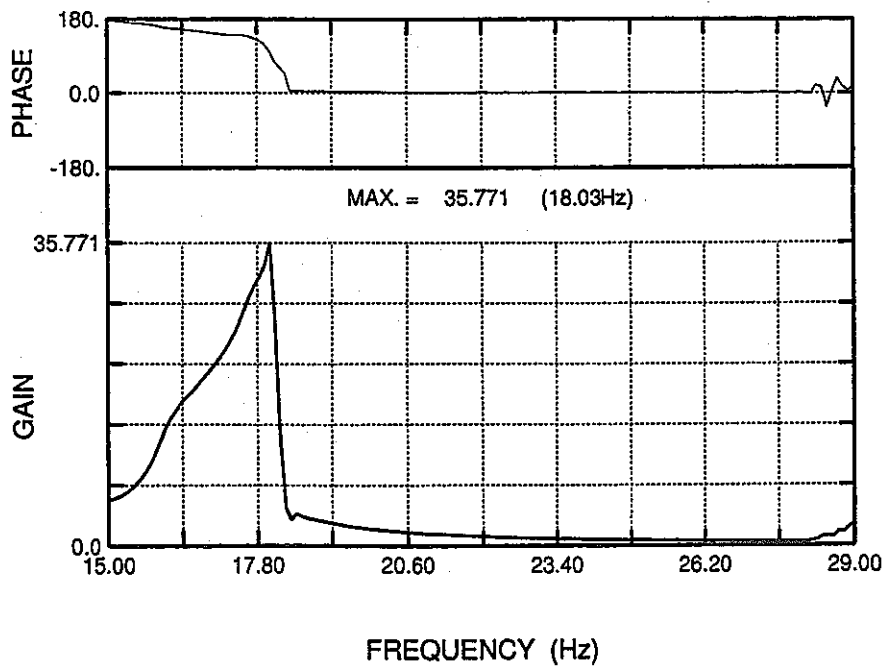
$$G1-3 \frac{Ax3}{Ax1}$$



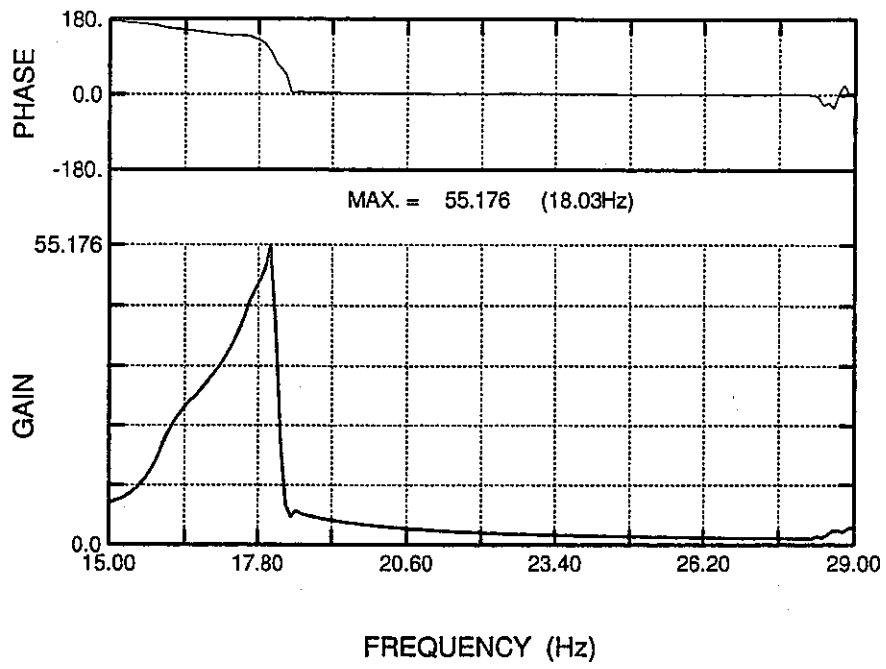
$$G1-3 \frac{Ax4}{Ax1}$$



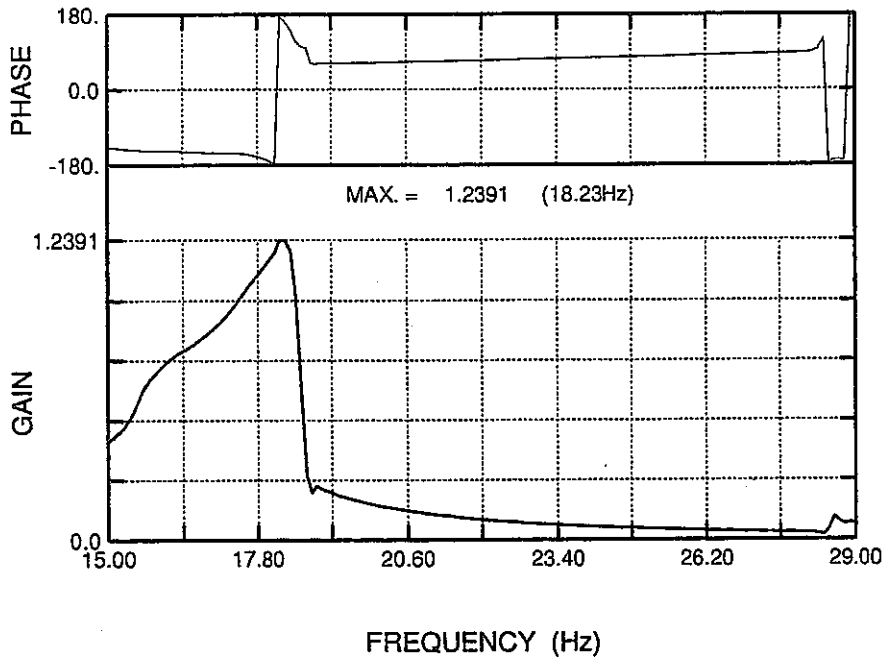
$$G1-3 \frac{Ax5}{Ax1}$$



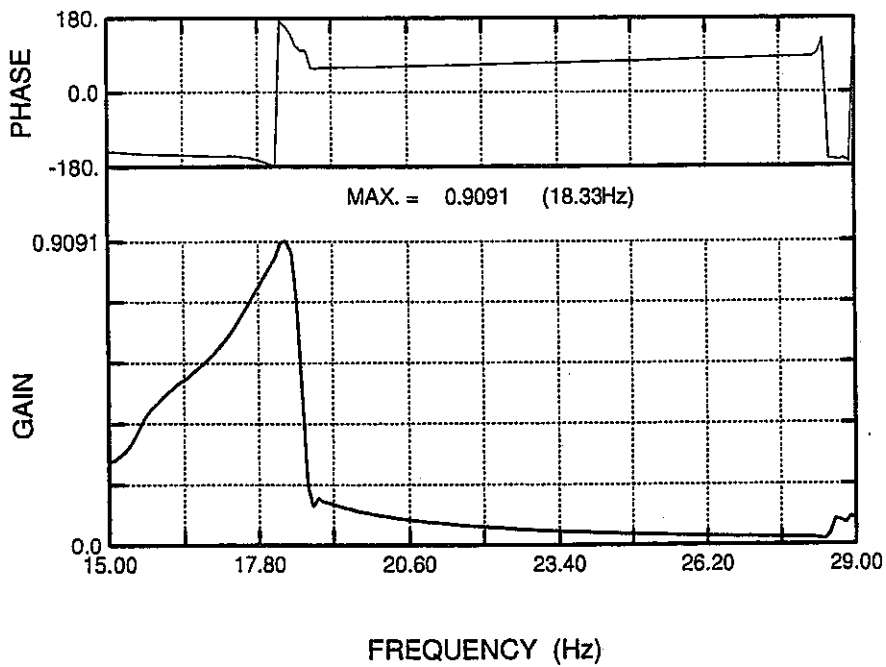
G1-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

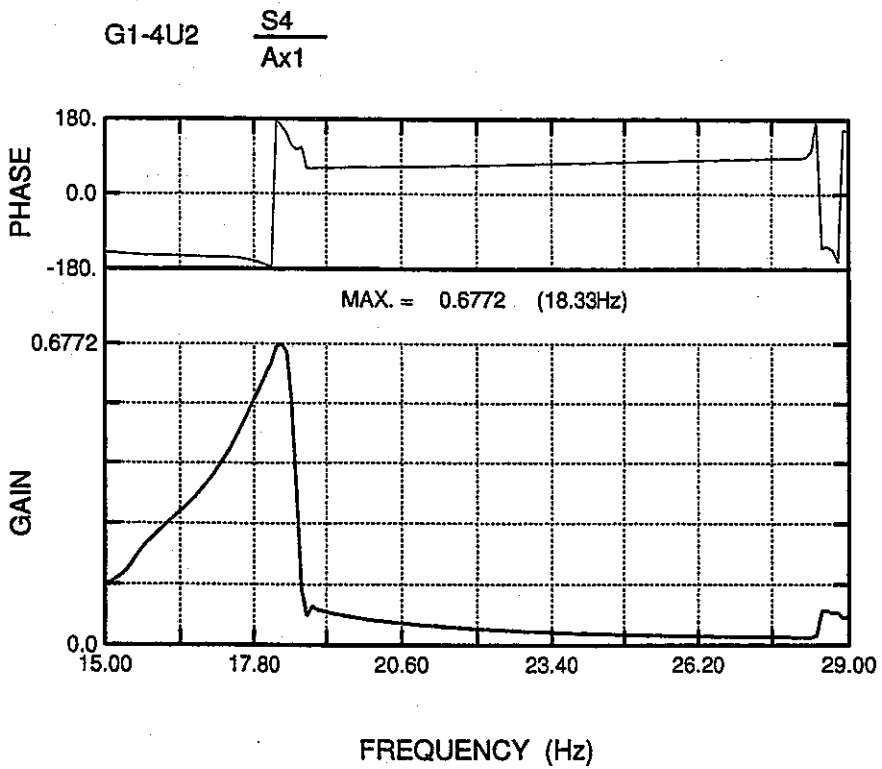
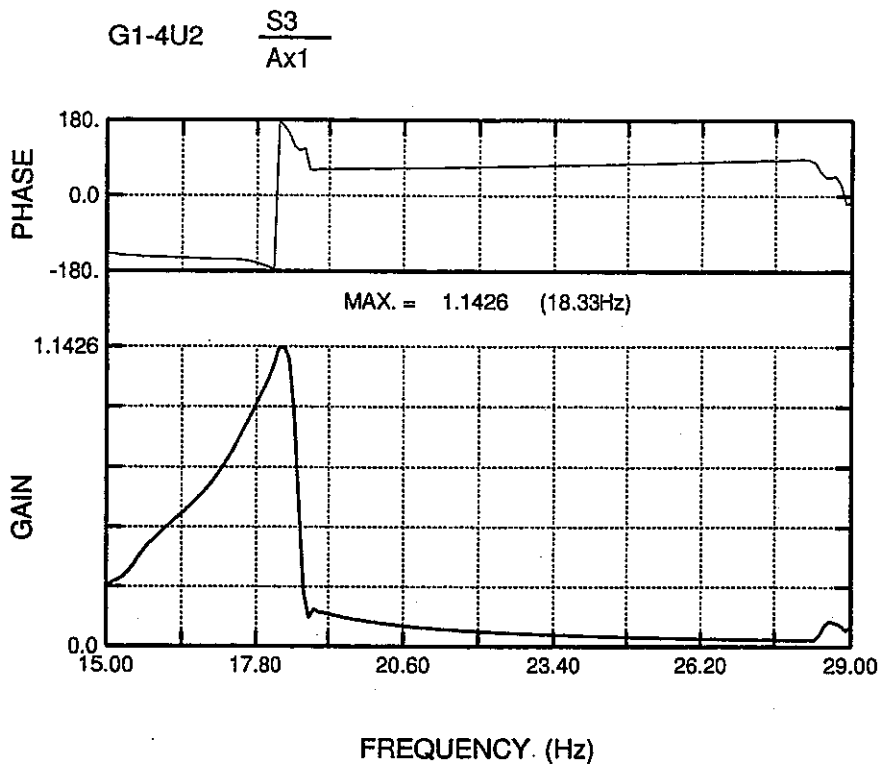


G1-4U2  $\frac{S1}{Ax1}$



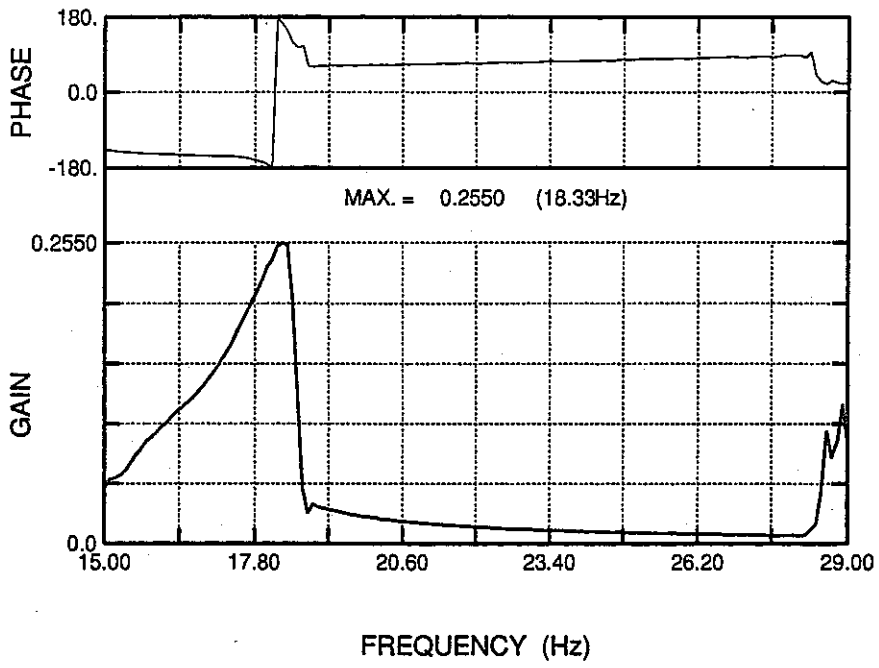
G1-4U2  $\frac{S2}{Ax1}$

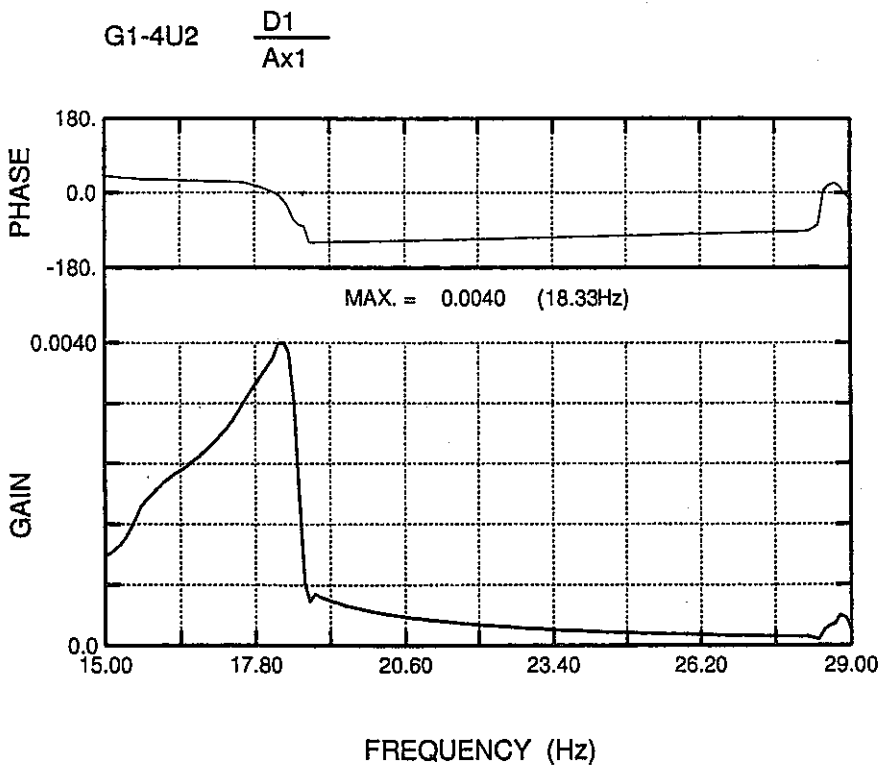
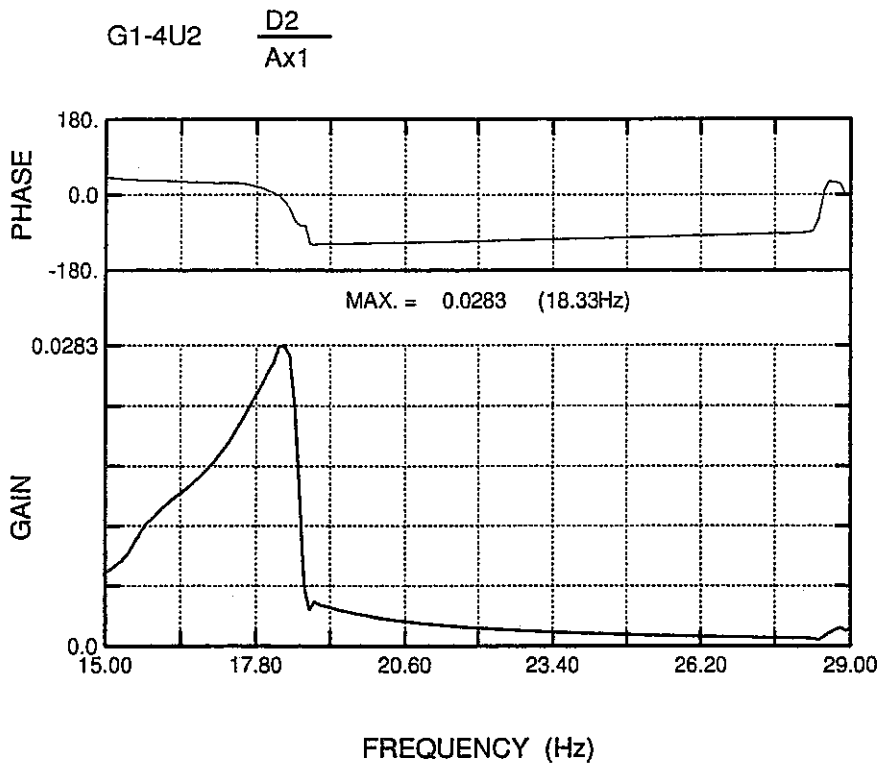




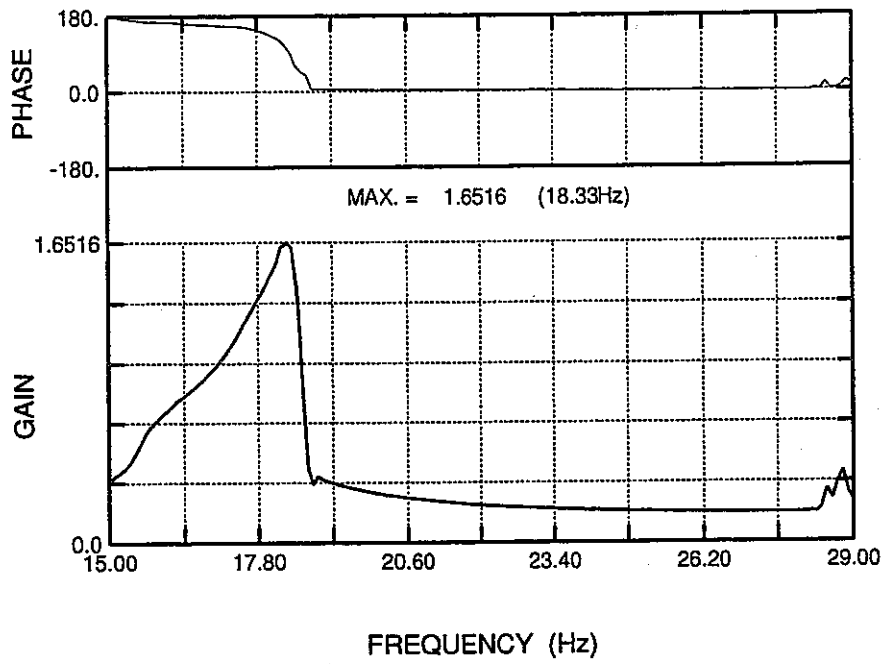


G1-4U2  $\frac{S5}{Ax1}$

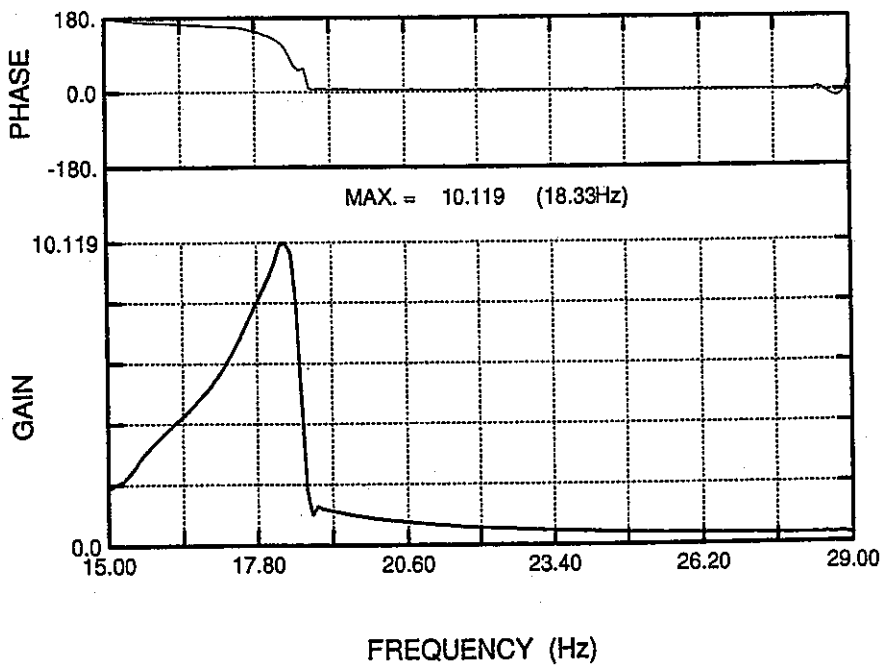




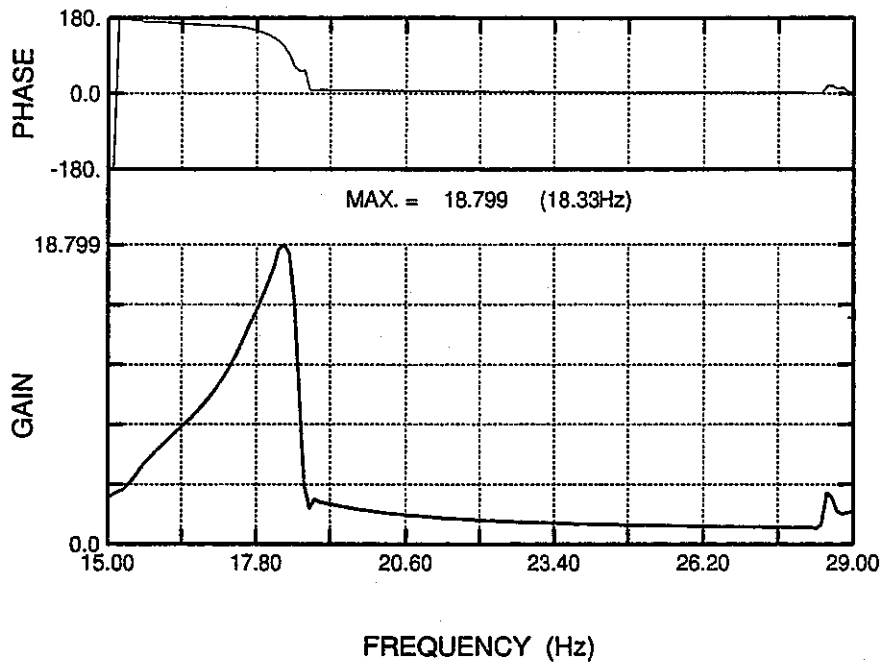
$$G1-4U2 \quad \frac{Ax2}{Ax1}$$



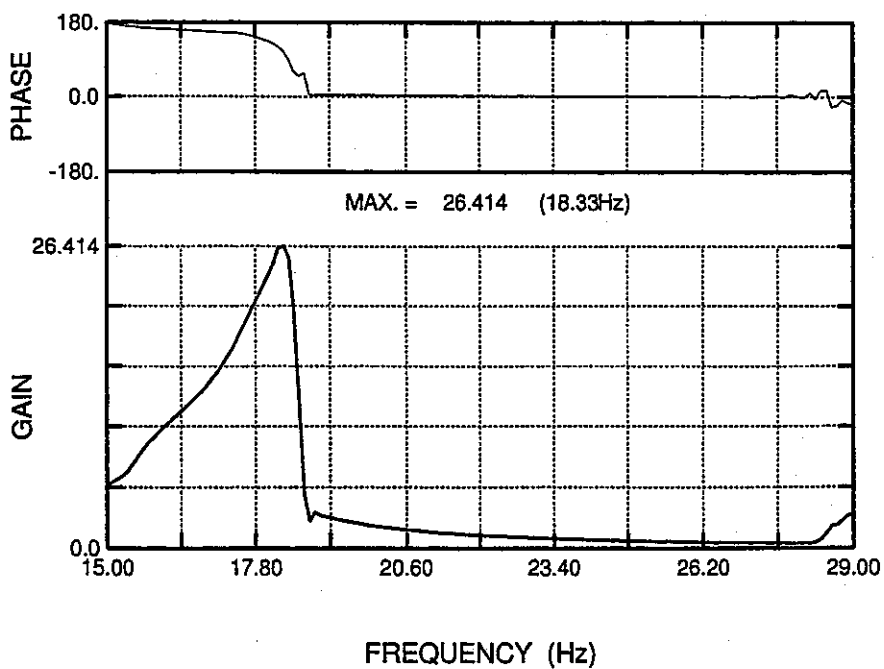
$$G1-4U2 \quad \frac{Ax3}{Ax1}$$



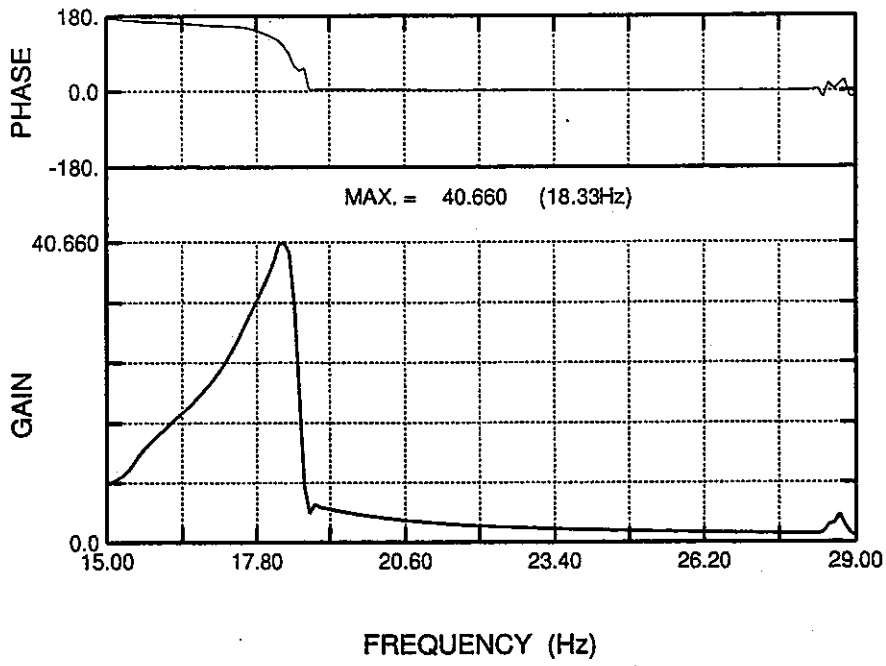
G1-4U2  $\frac{Ax4}{Ax1}$



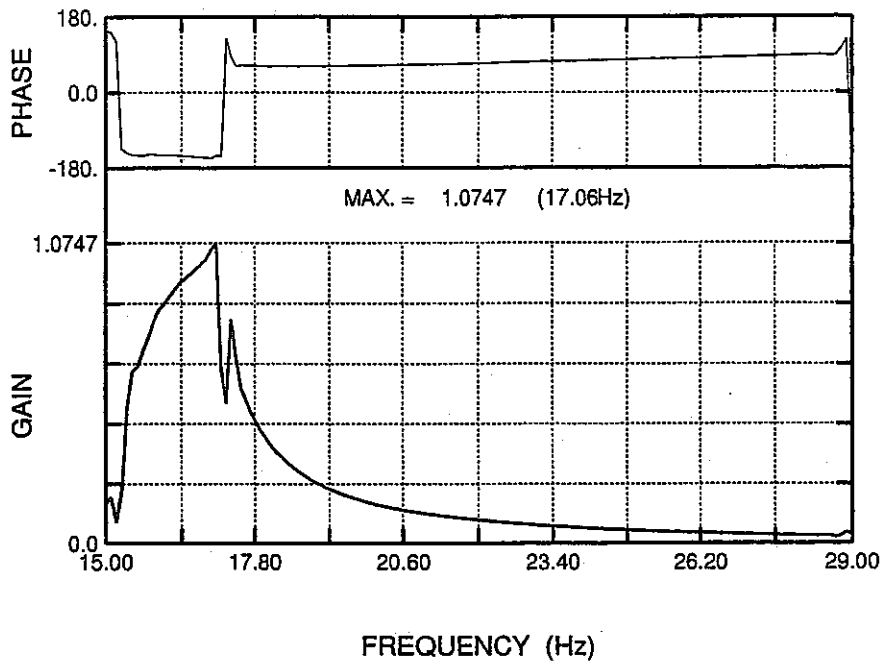
G1-4U2  $\frac{Ax5}{Ax1}$



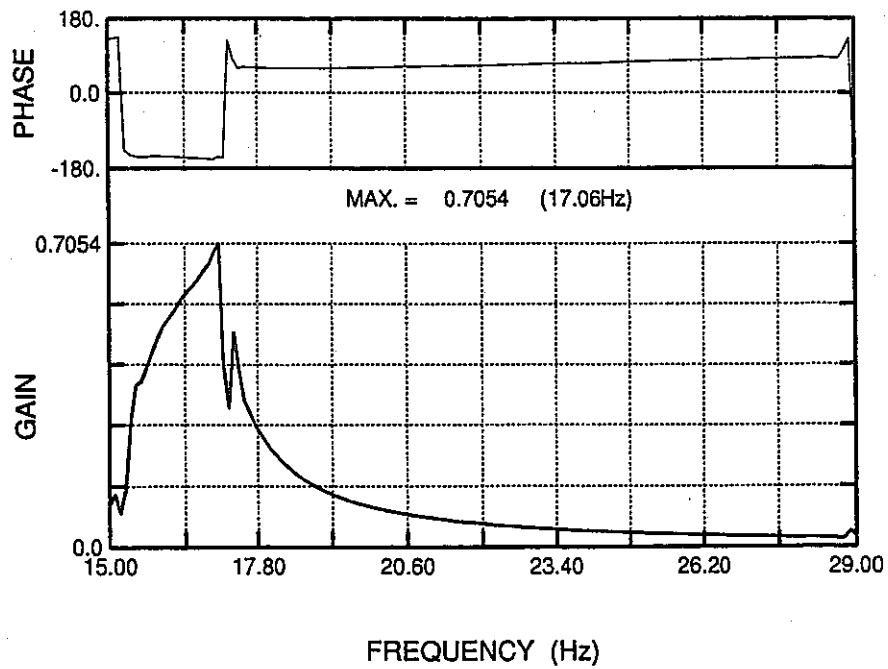
G1-4U2  $\frac{Ax6}{Ax1}$



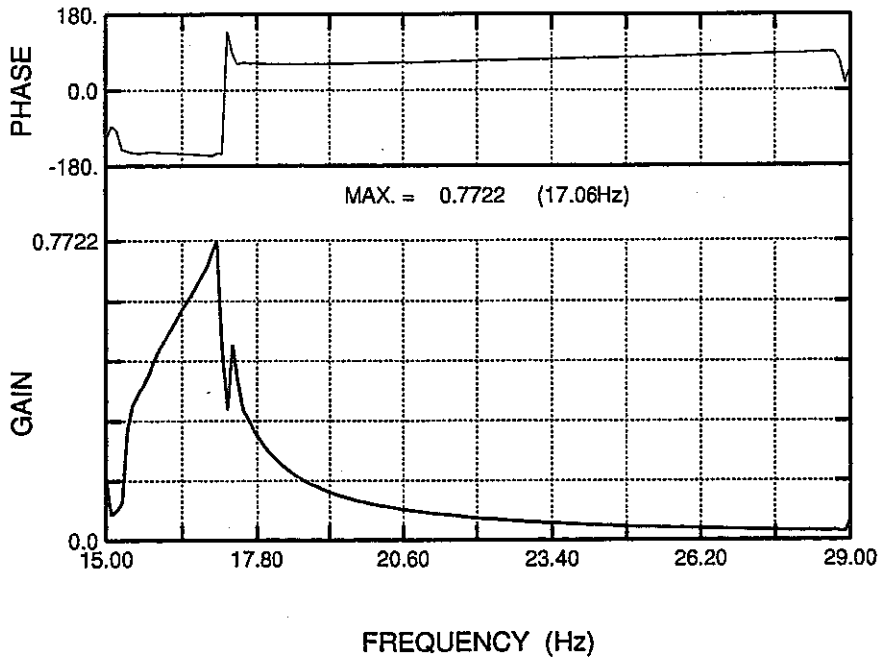
G1-4D3  $\frac{S1}{Ax1}$



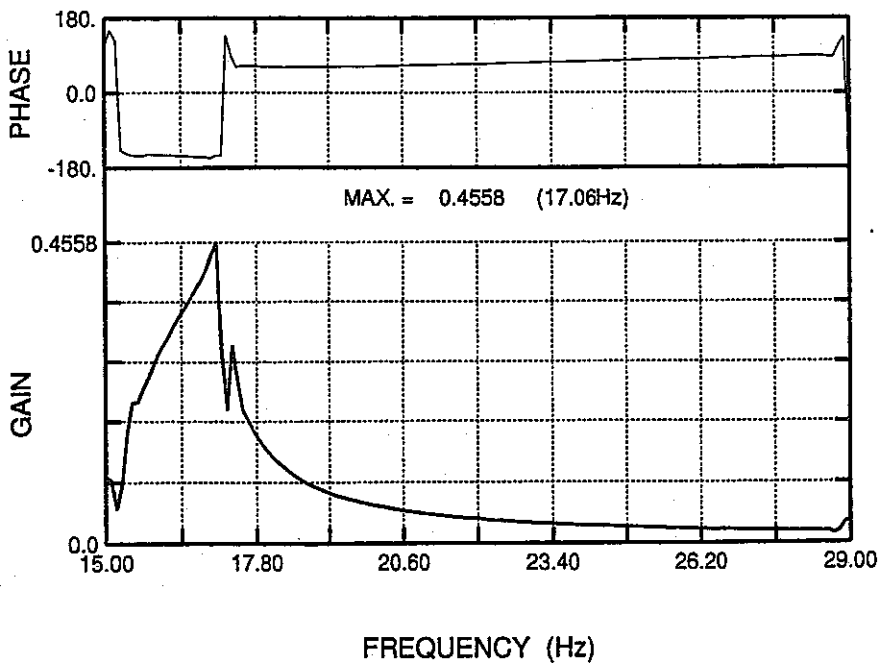
G1-4D3  $\frac{S2}{Ax1}$



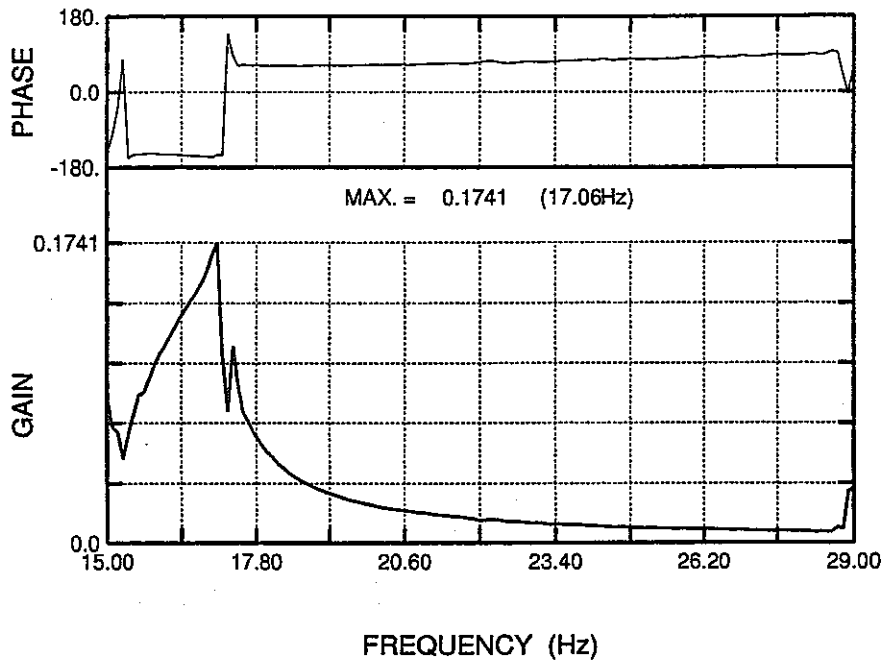
G1-4D3  $\frac{S3}{Ax1}$



G1-4D3  $\frac{S4}{Ax1}$

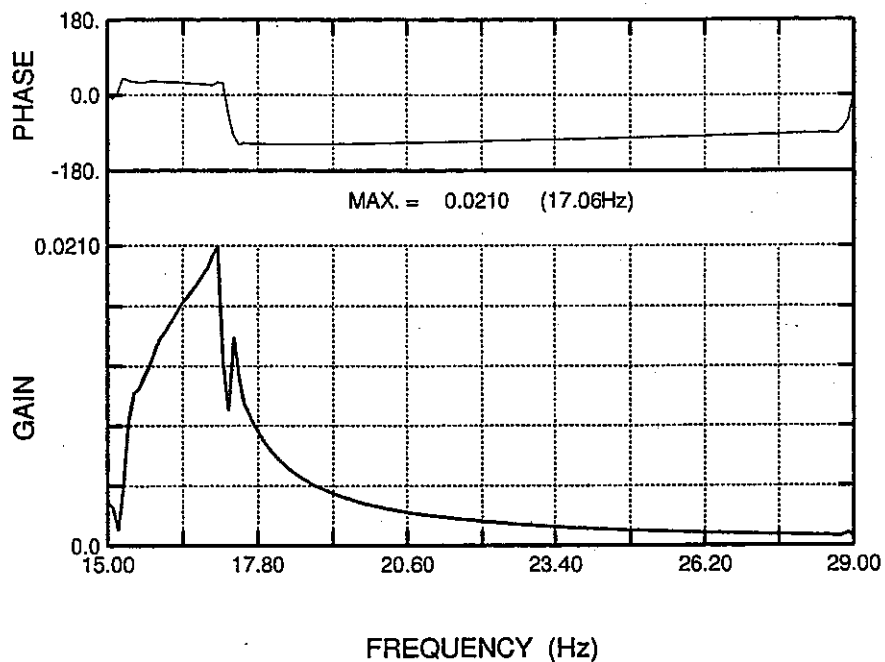


G1-4D3  $\frac{S5}{Ax1}$

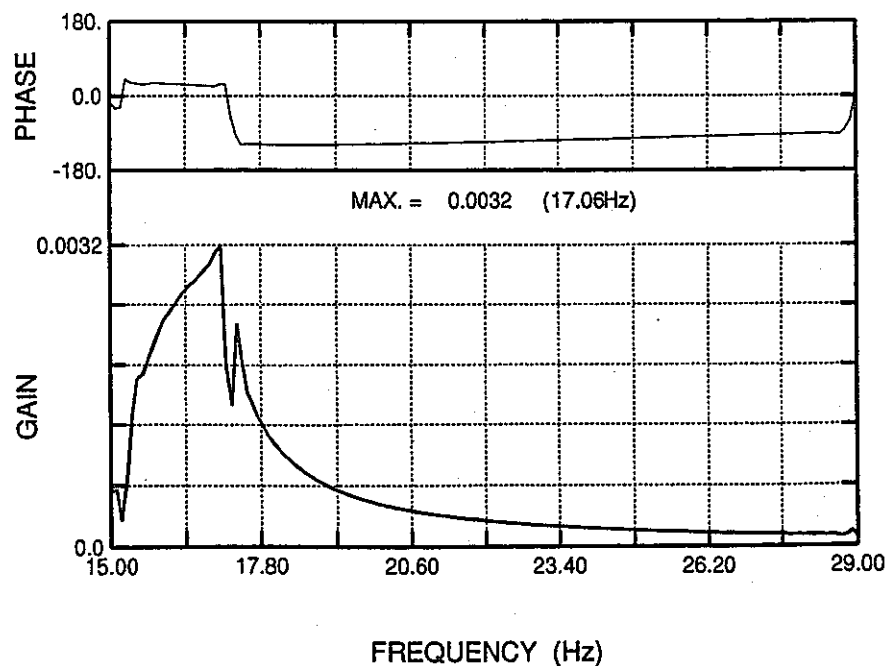


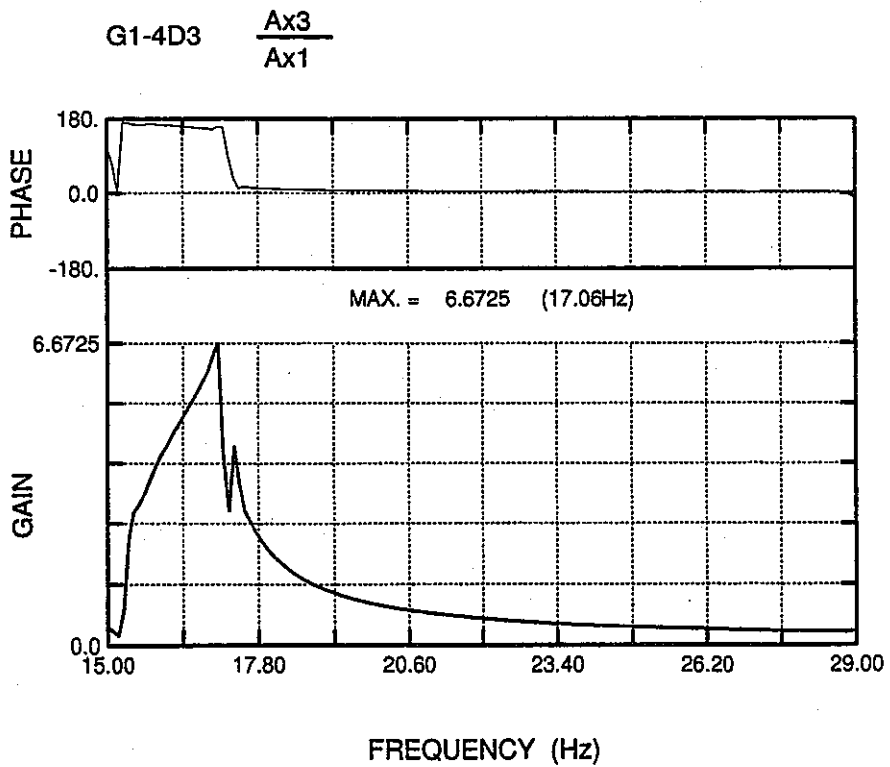
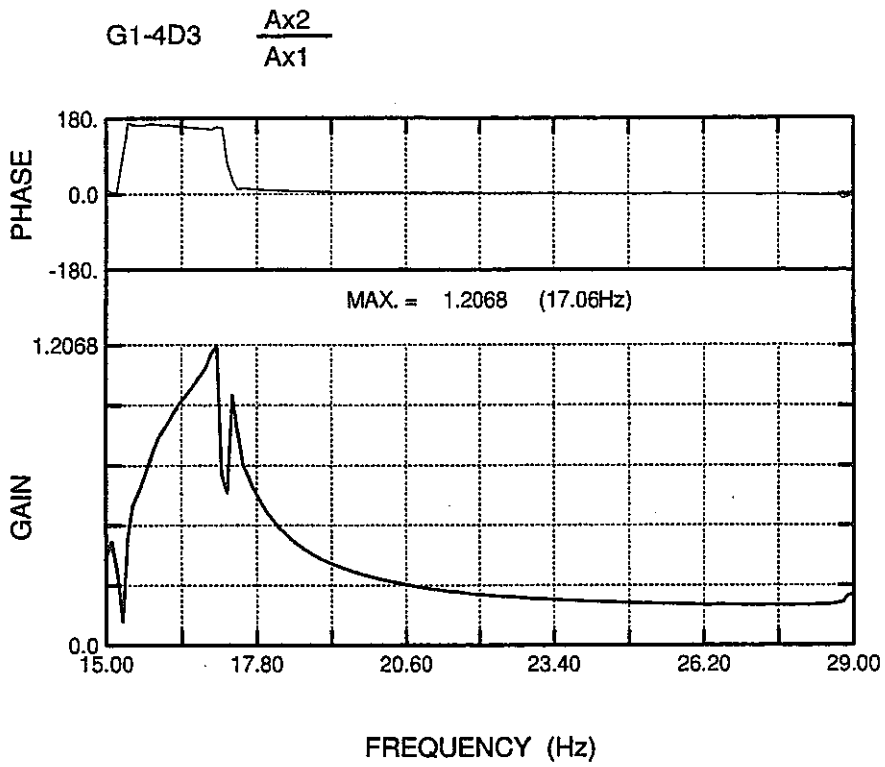


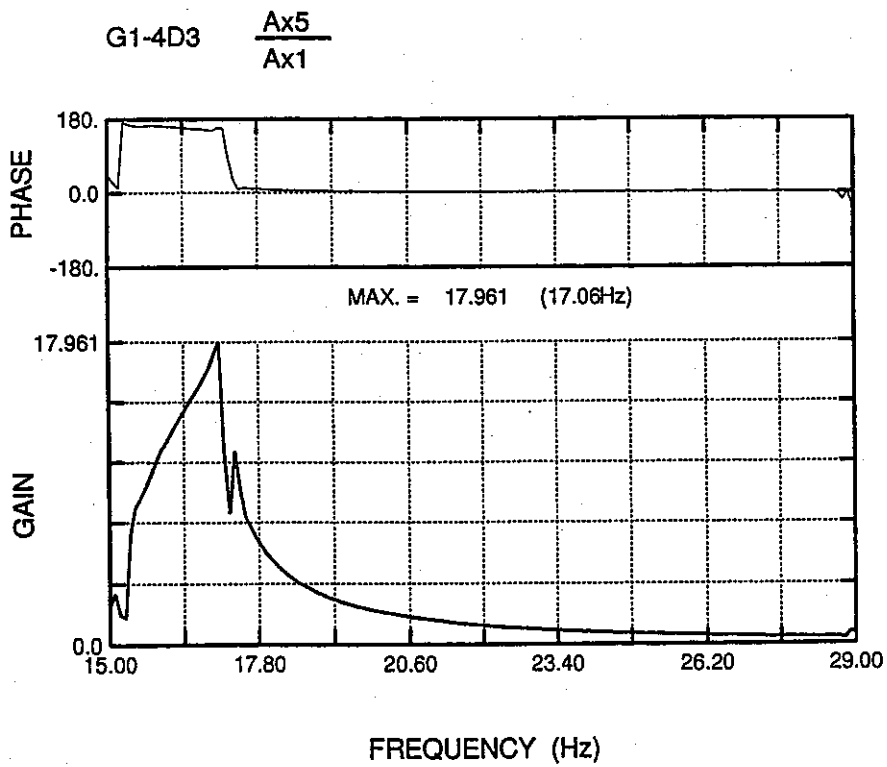
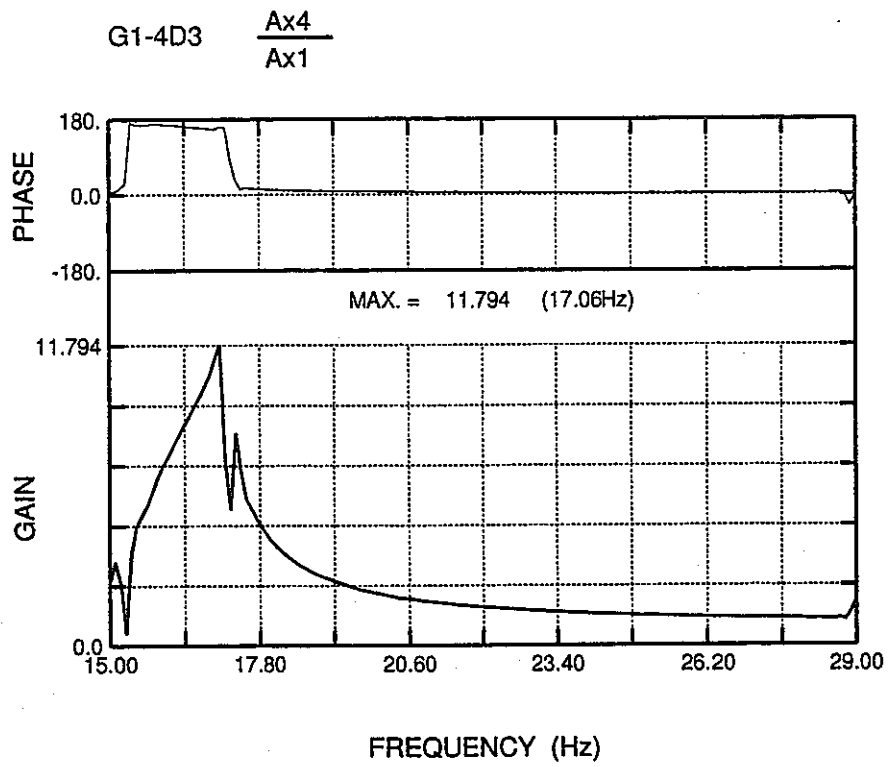
G1-4D3  $\frac{D2}{Ax1}$



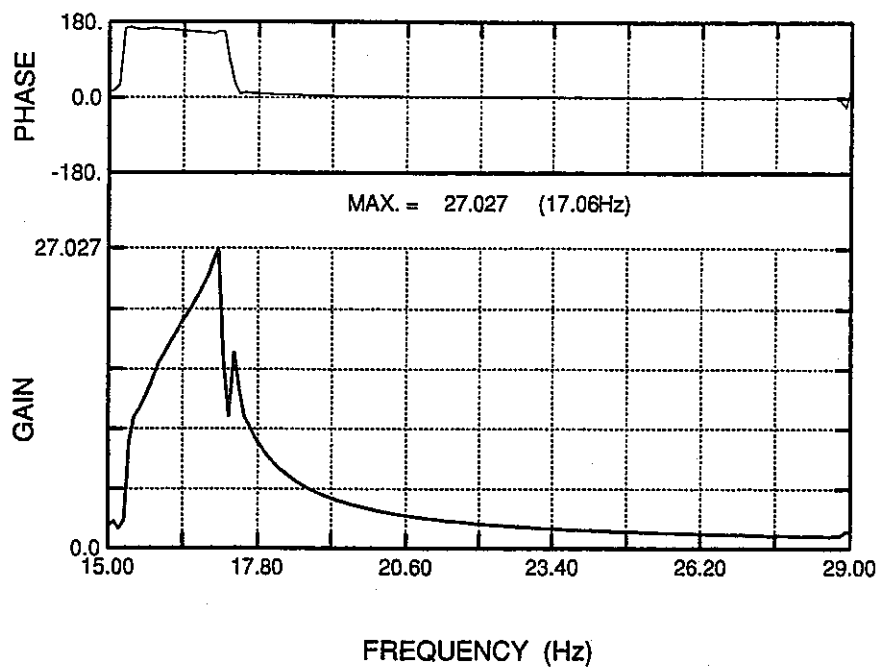
G1-4D3  $\frac{D1}{Ax1}$



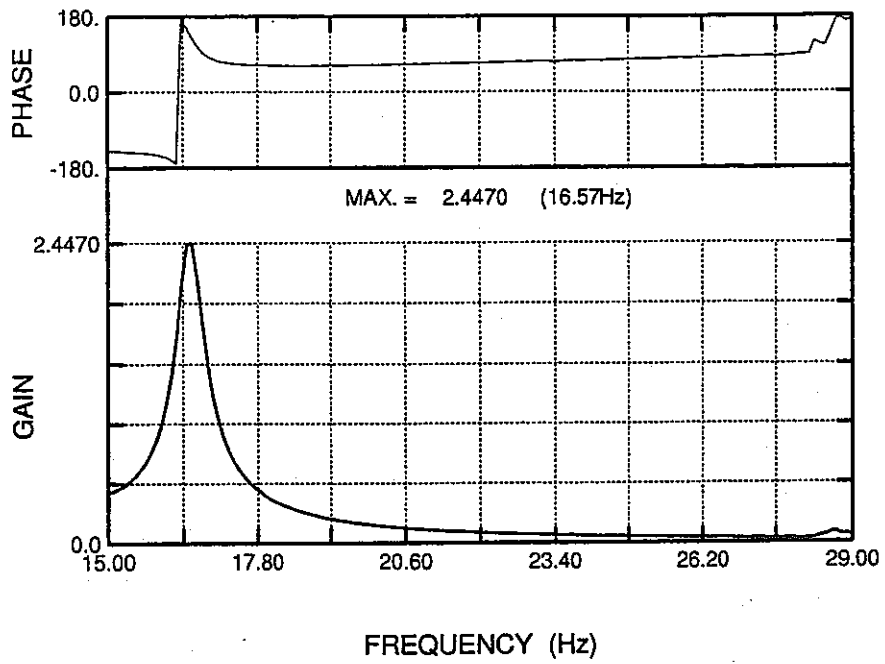




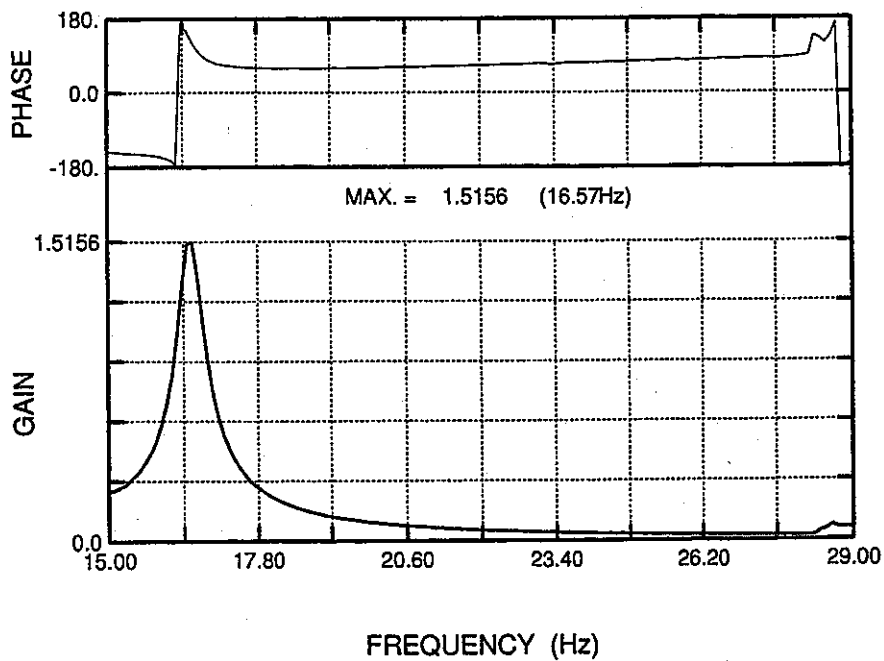
G1-4D3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

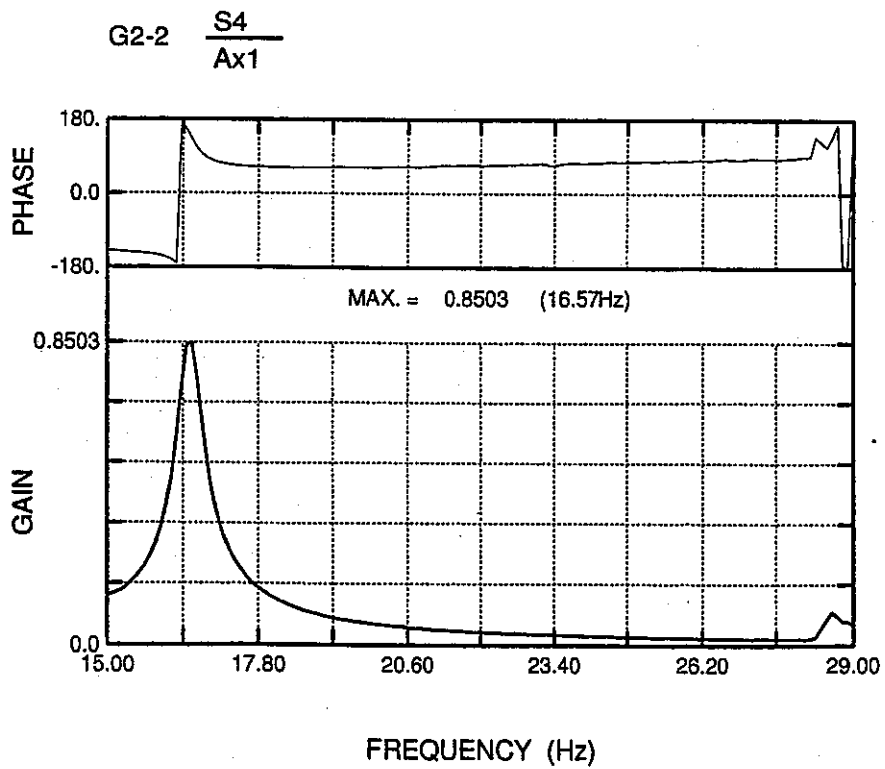
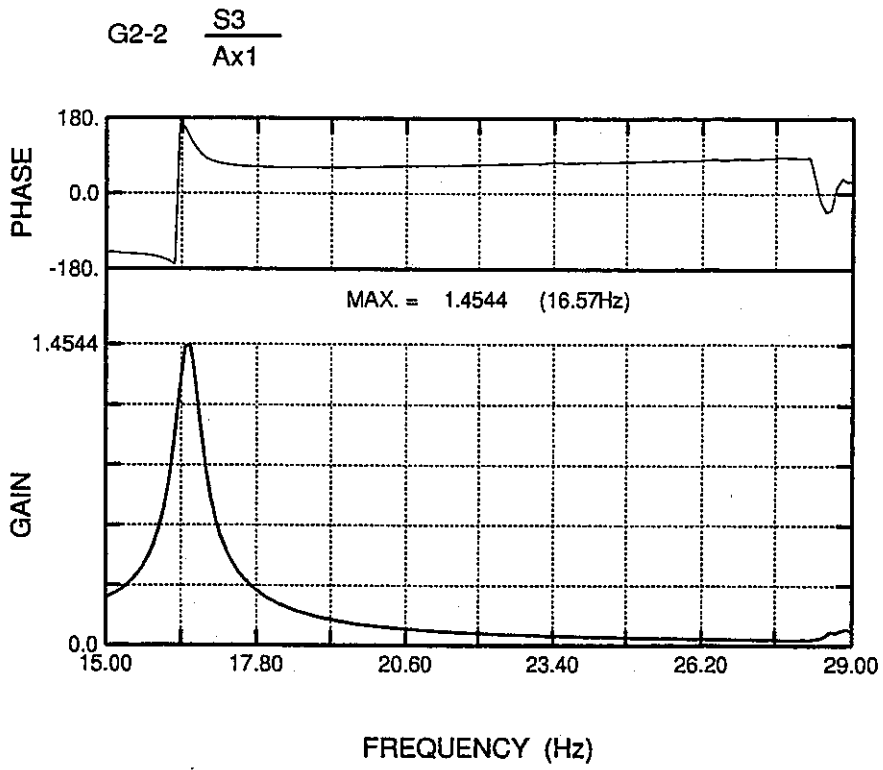


G2-2  $\frac{S1}{Ax1}$

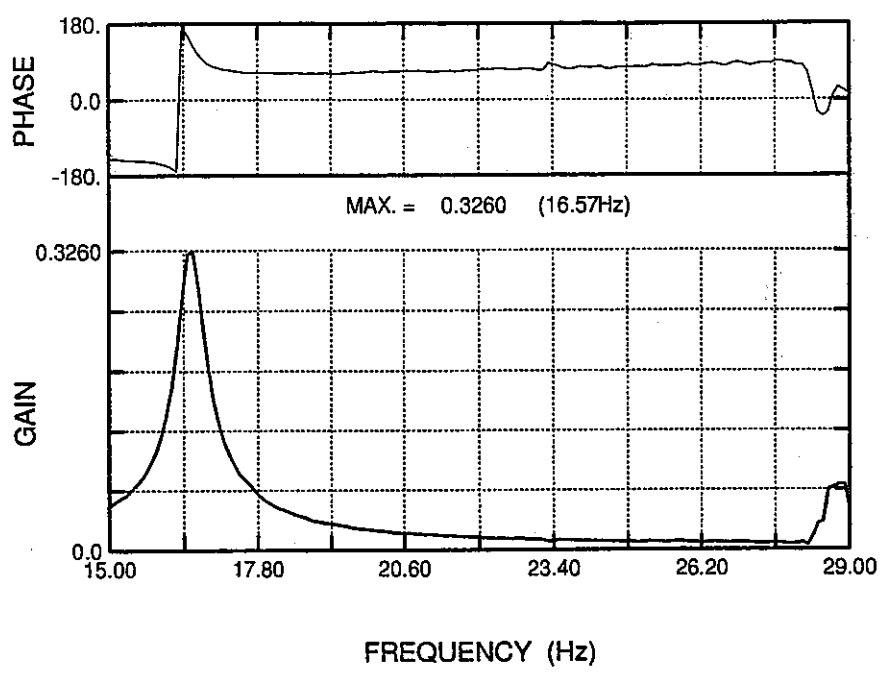


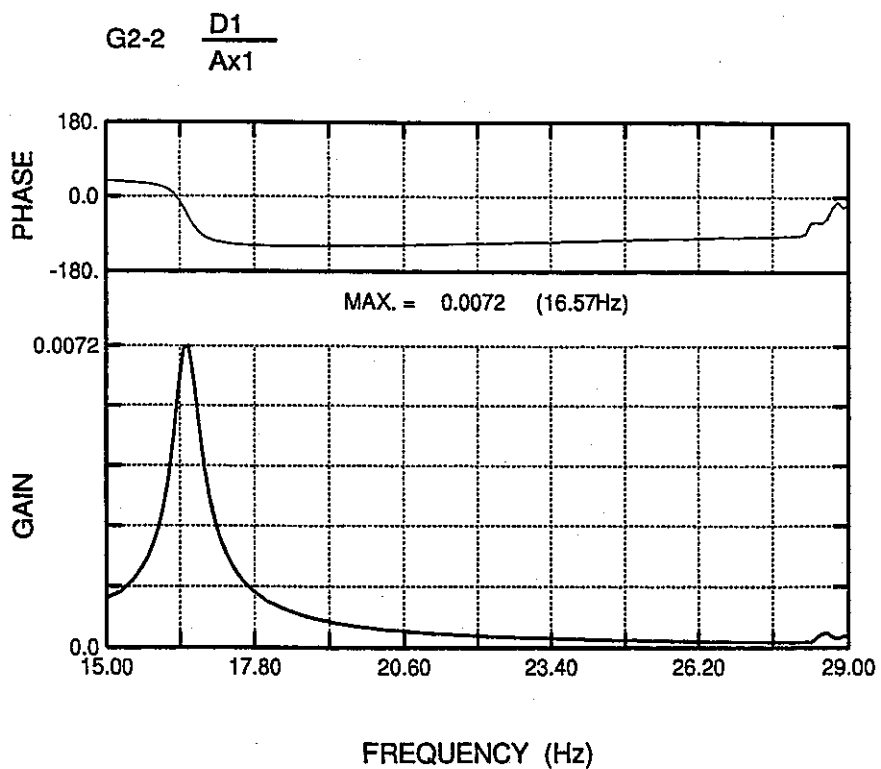
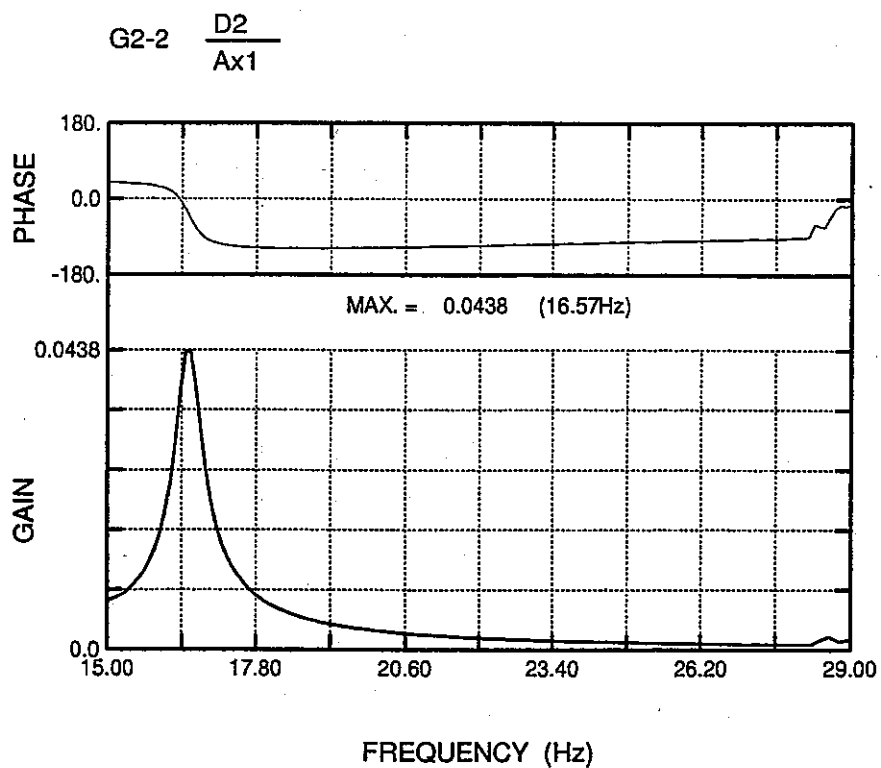
G2-2  $\frac{S2}{Ax1}$





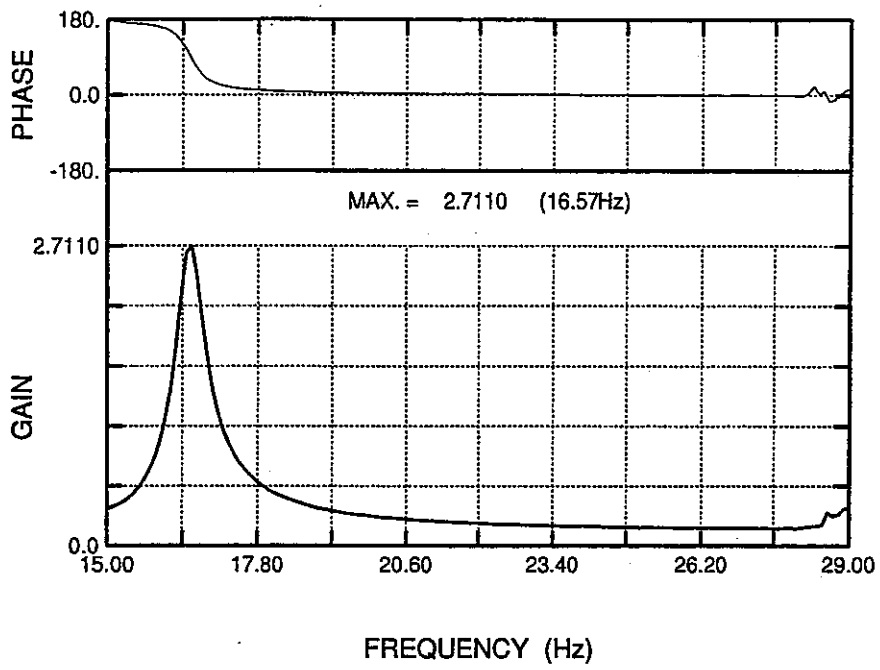
G2-2  $\frac{S5}{Ax1}$



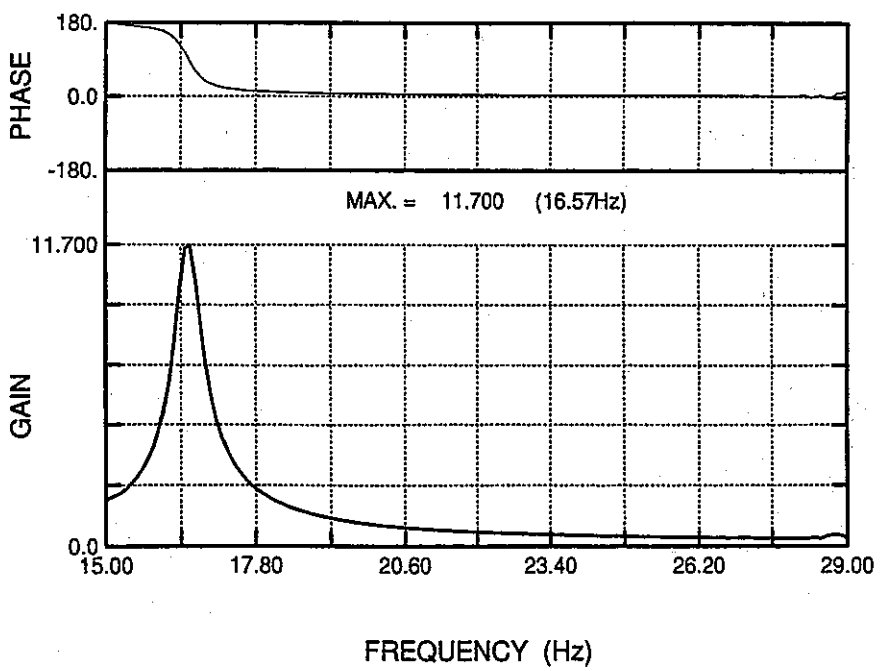




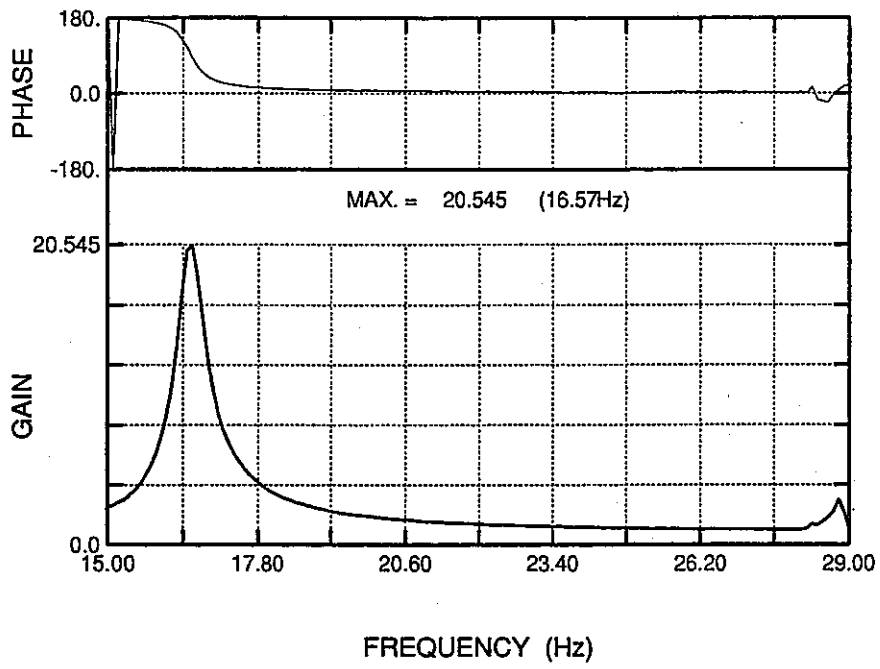
$$G2-2 \quad \frac{Ax2}{Ax1}$$



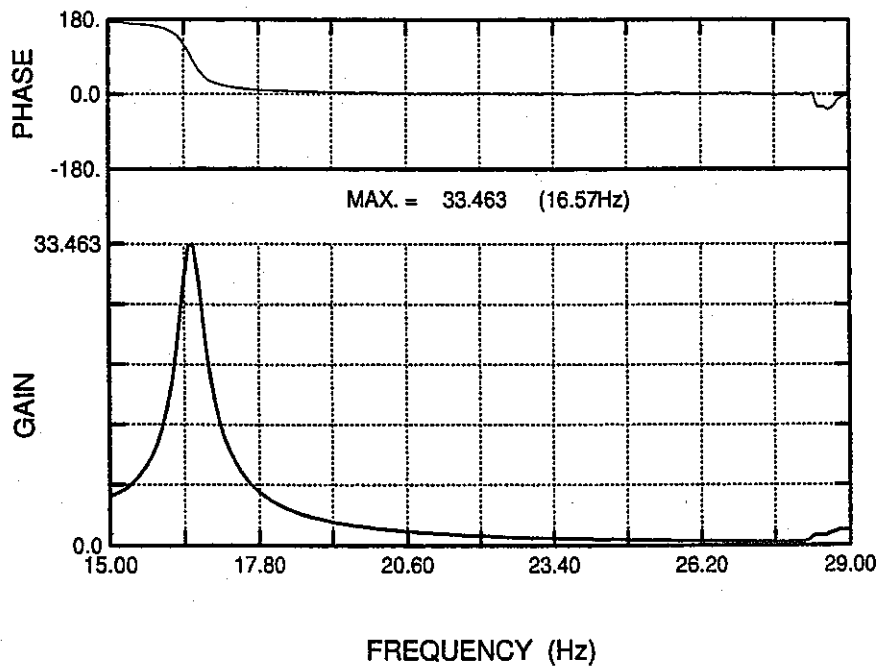
$$G2-2 \quad \frac{Ax3}{Ax1}$$



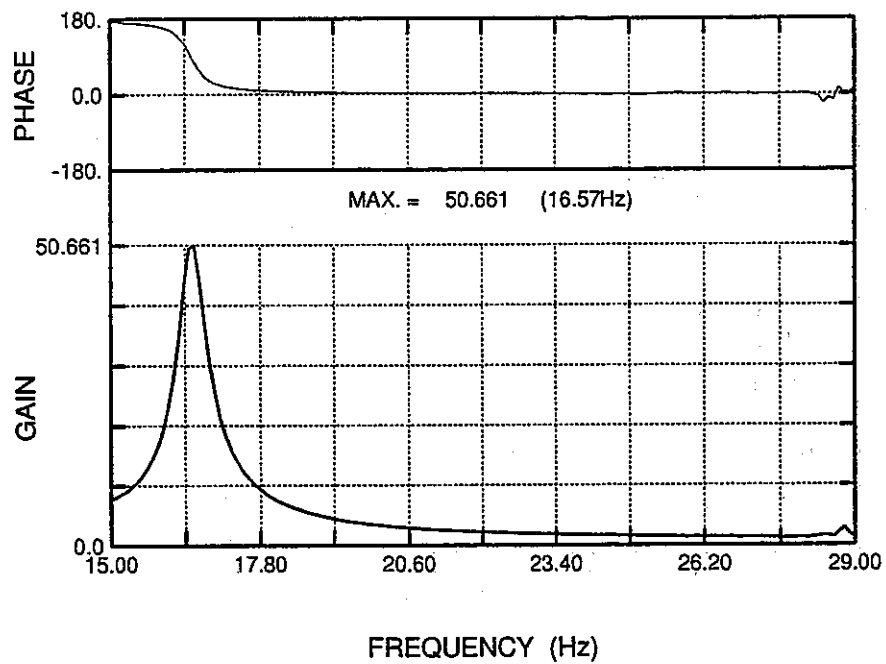
G2-2  $\frac{Ax4}{Ax1}$



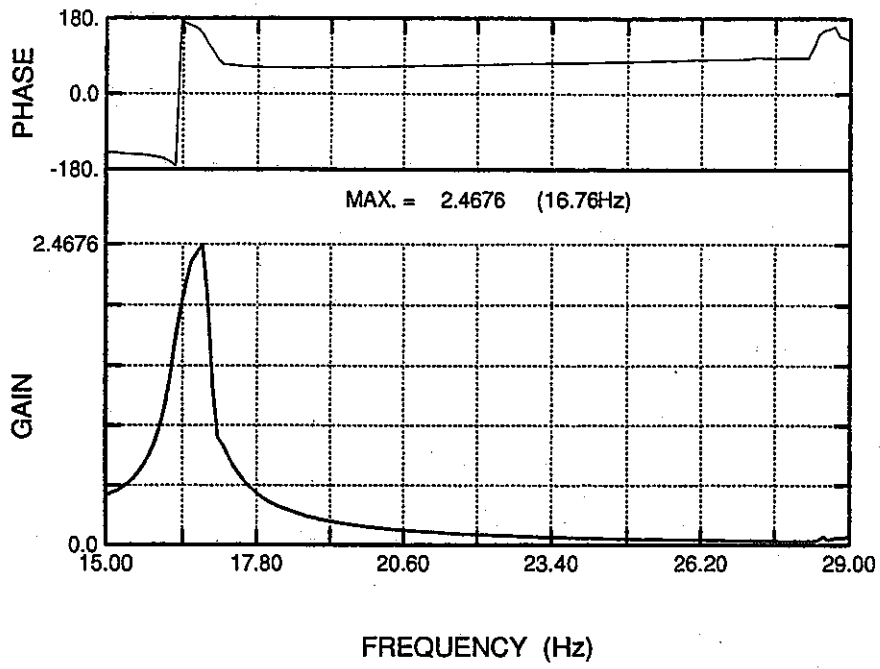
G2-2  $\frac{Ax5}{Ax1}$



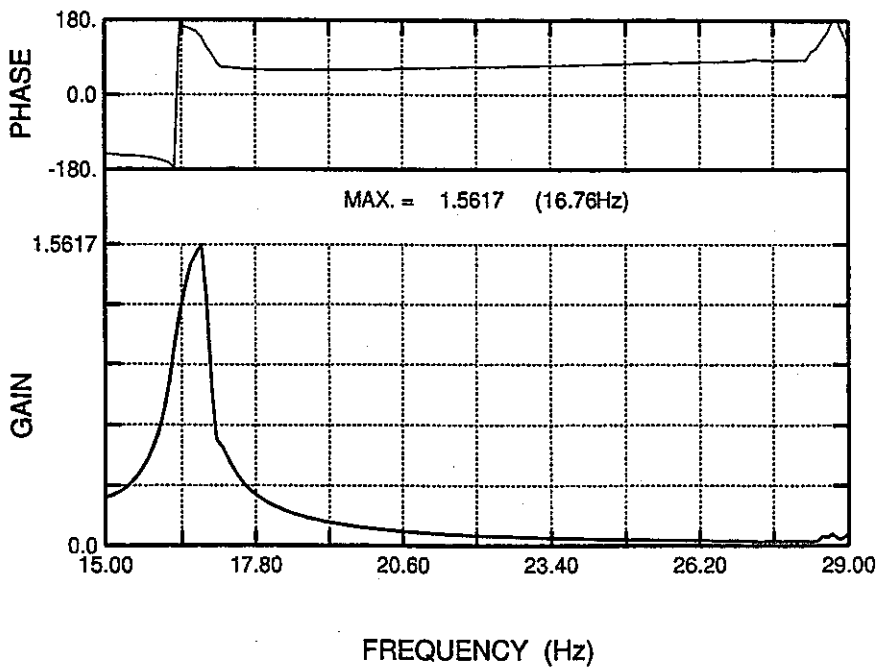
G2-2  $\frac{Ax6}{Ax1}$



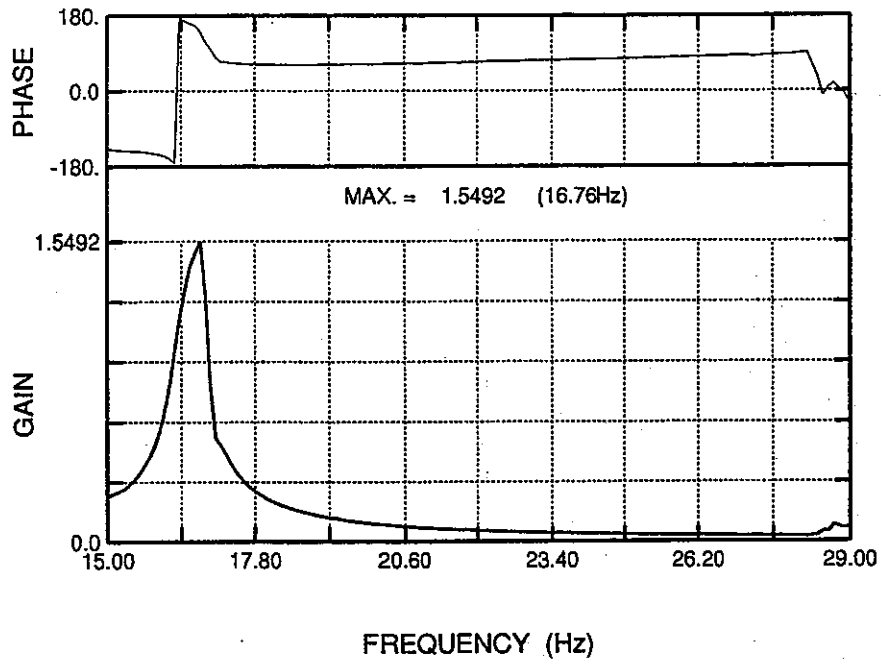
G2-3  $\frac{S1}{Ax1}$



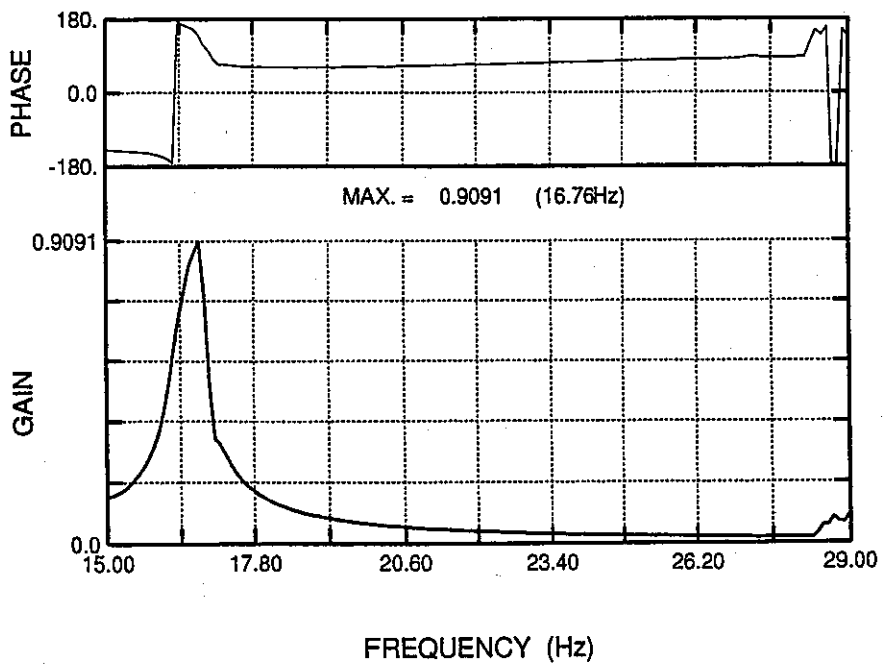
G2-3  $\frac{S2}{Ax1}$



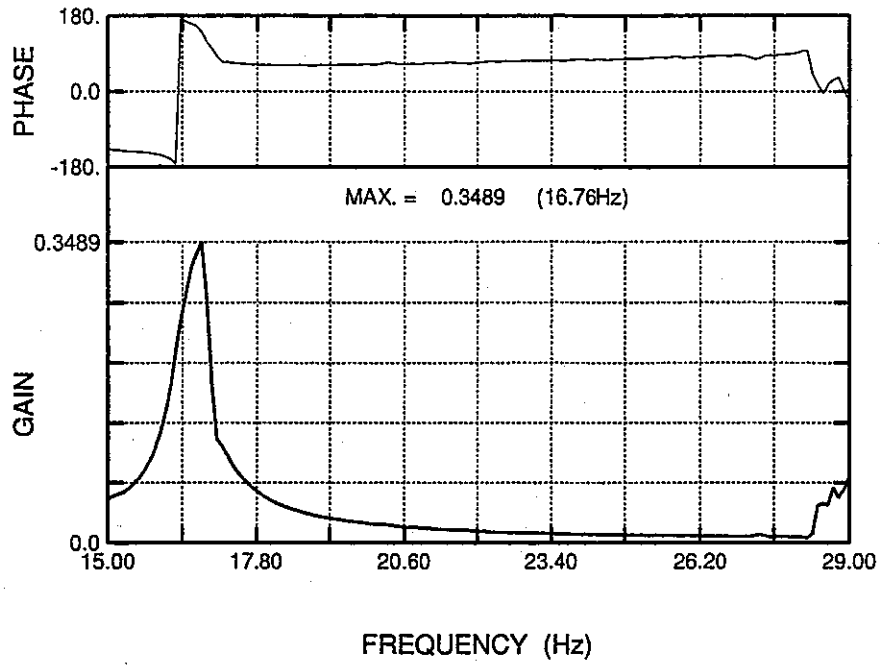
G2-3  $\frac{S3}{Ax1}$

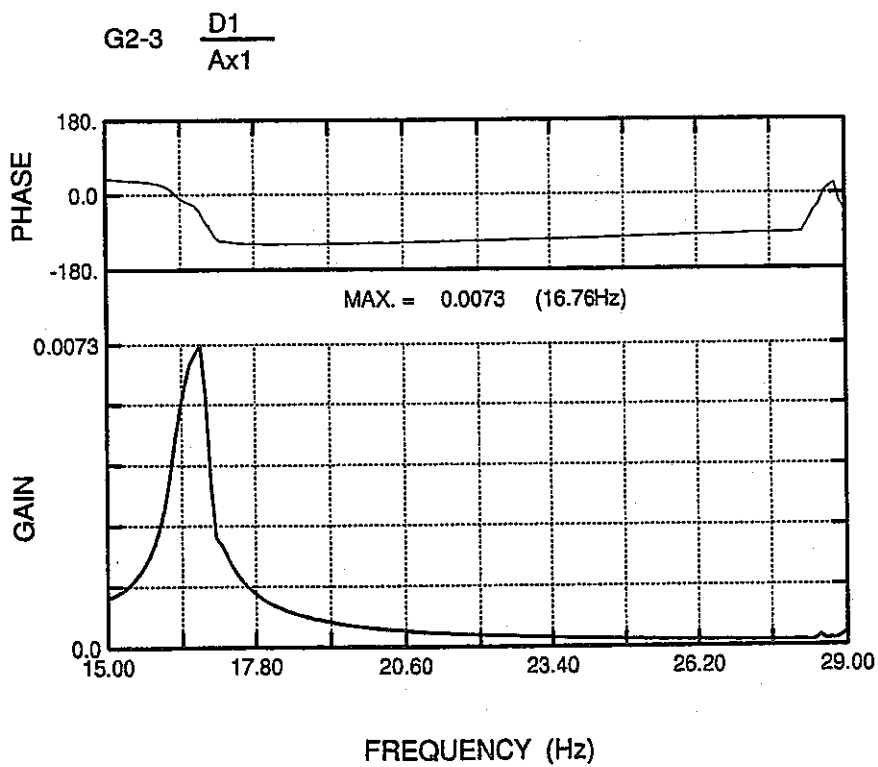
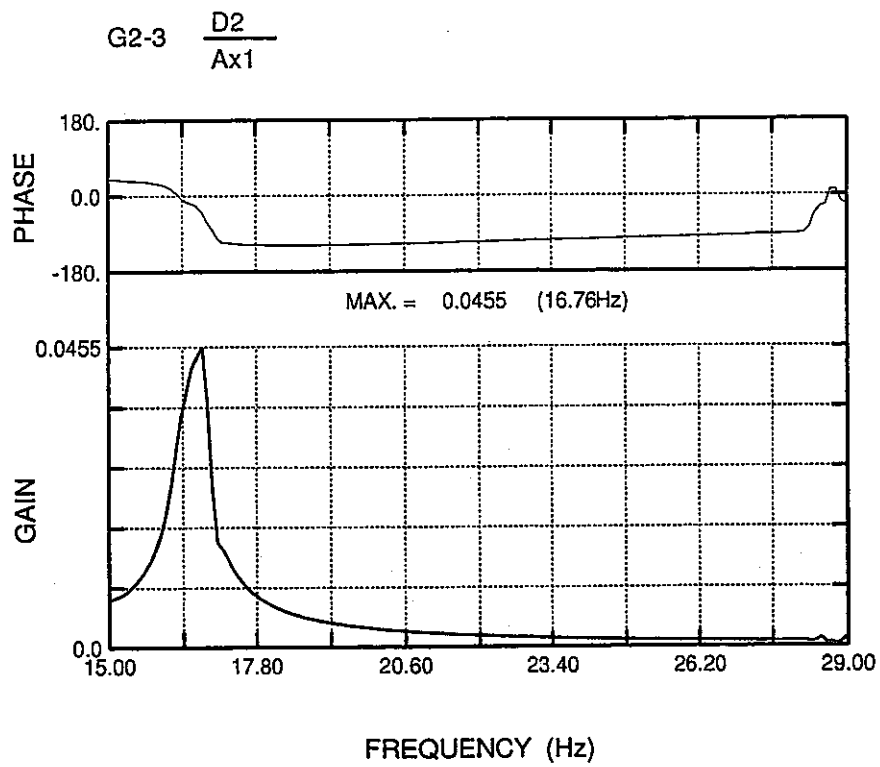


G2-3  $\frac{S4}{Ax1}$

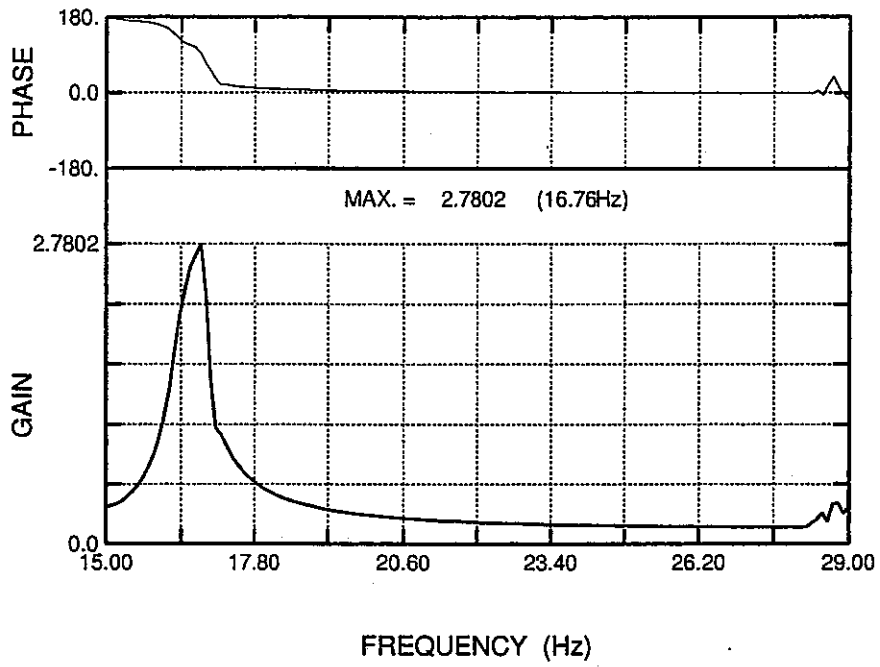


G2-3  $\frac{S5}{Ax1}$

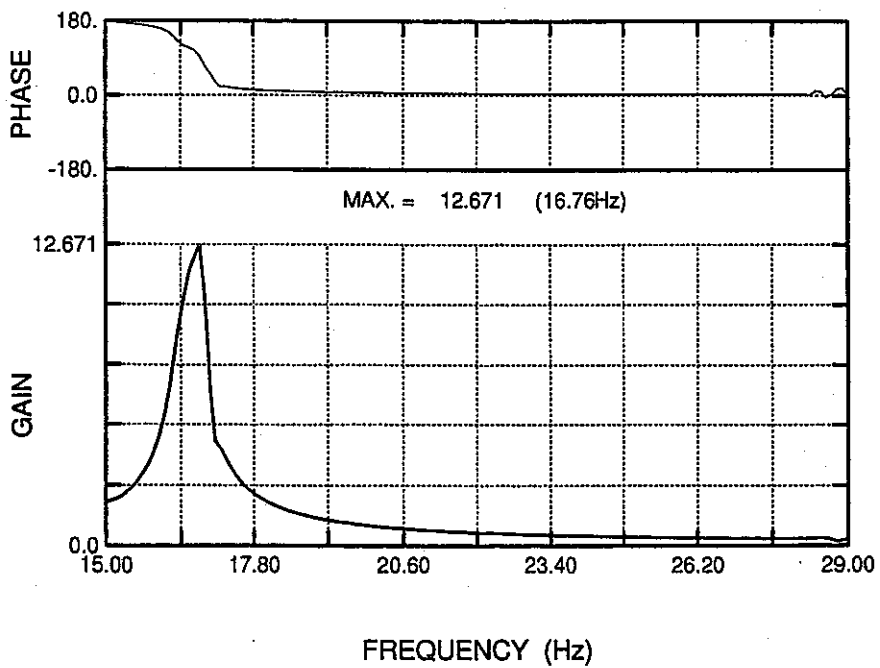




$$G2-3 \frac{Ax2}{Ax1}$$

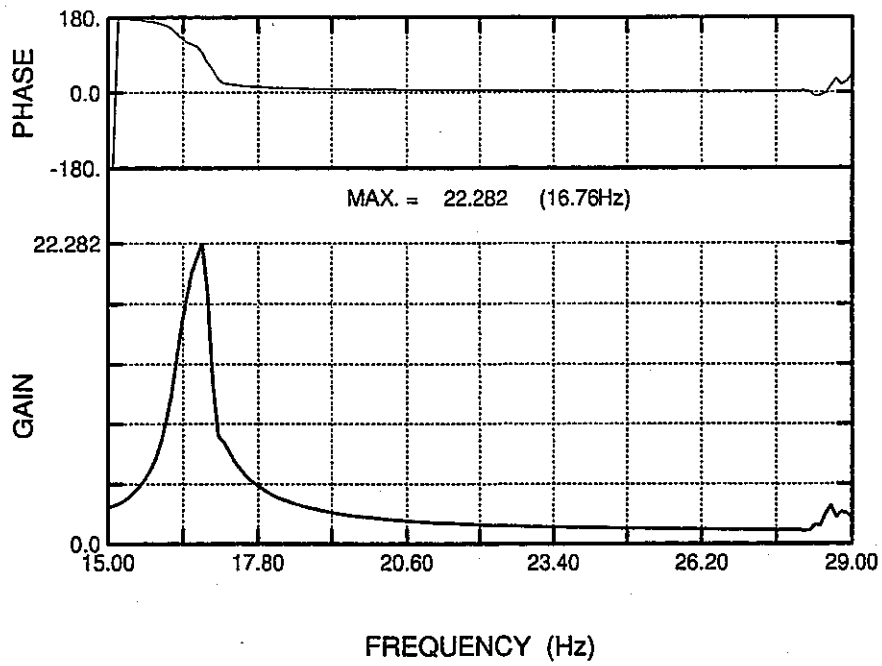


$$G2-3 \frac{Ax3}{Ax1}$$

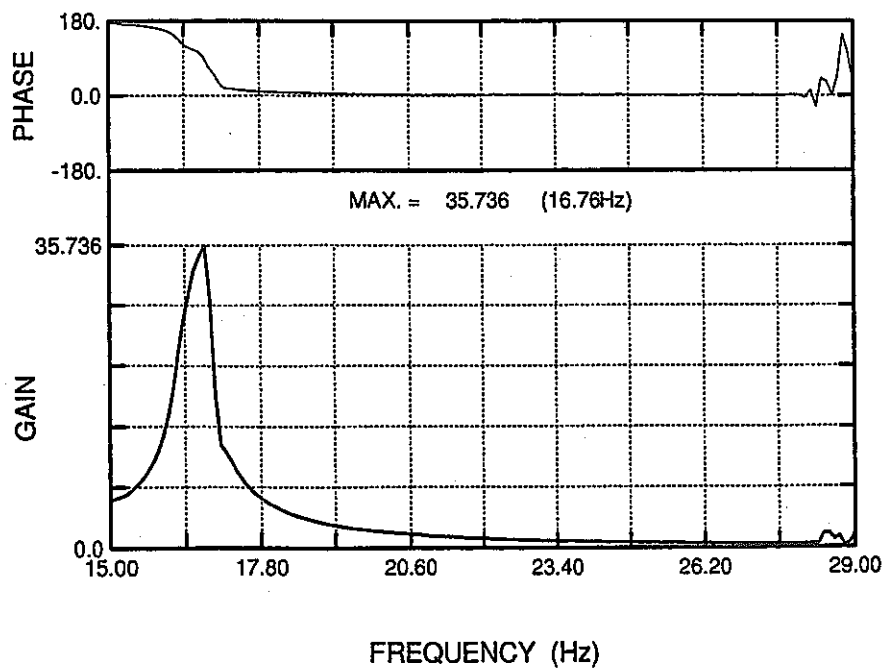




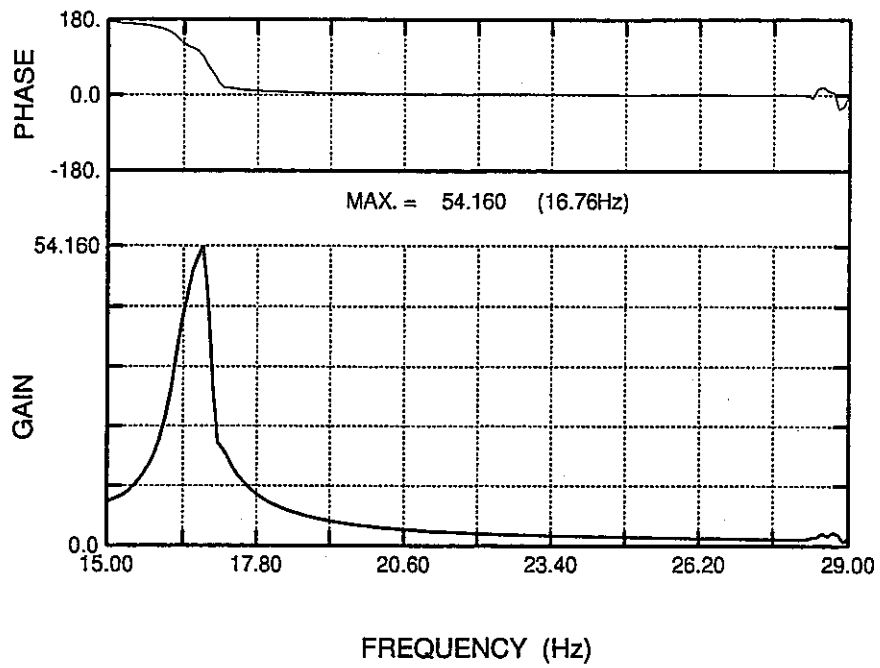
G2-3  $\frac{Ax4}{Ax1}$

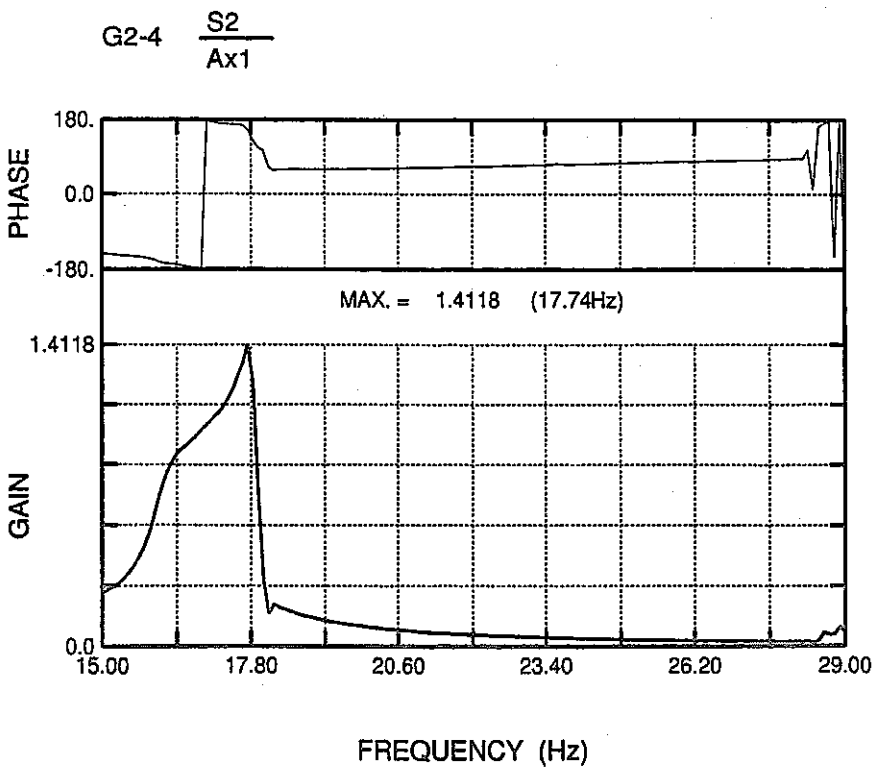
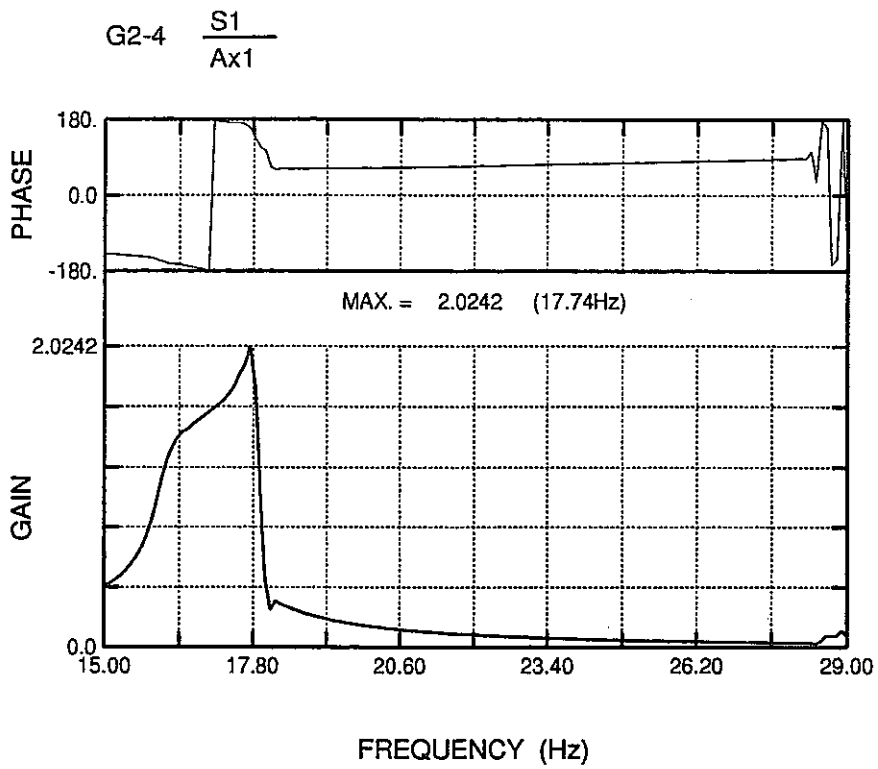


G2-3  $\frac{Ax5}{Ax1}$

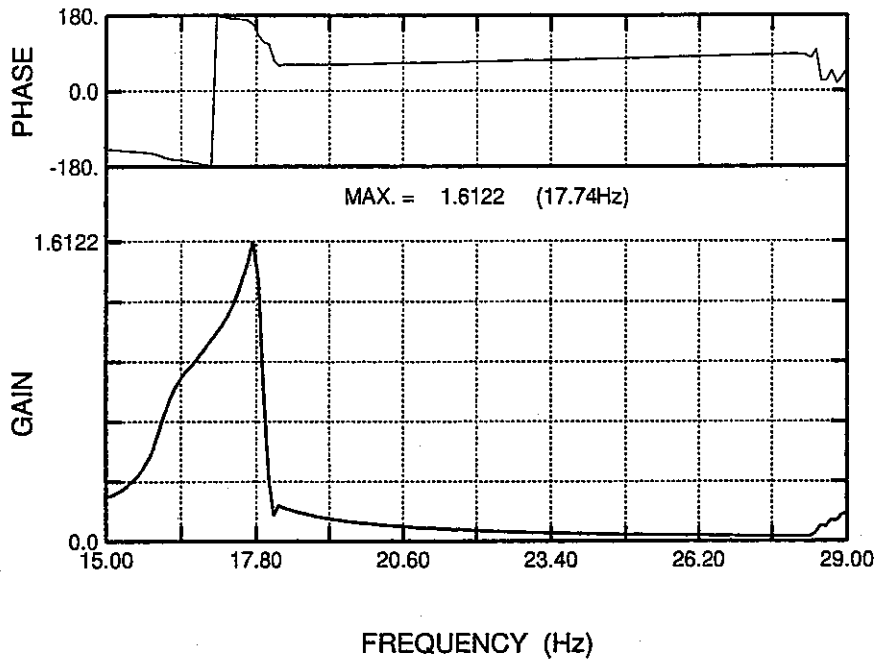


G2-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$

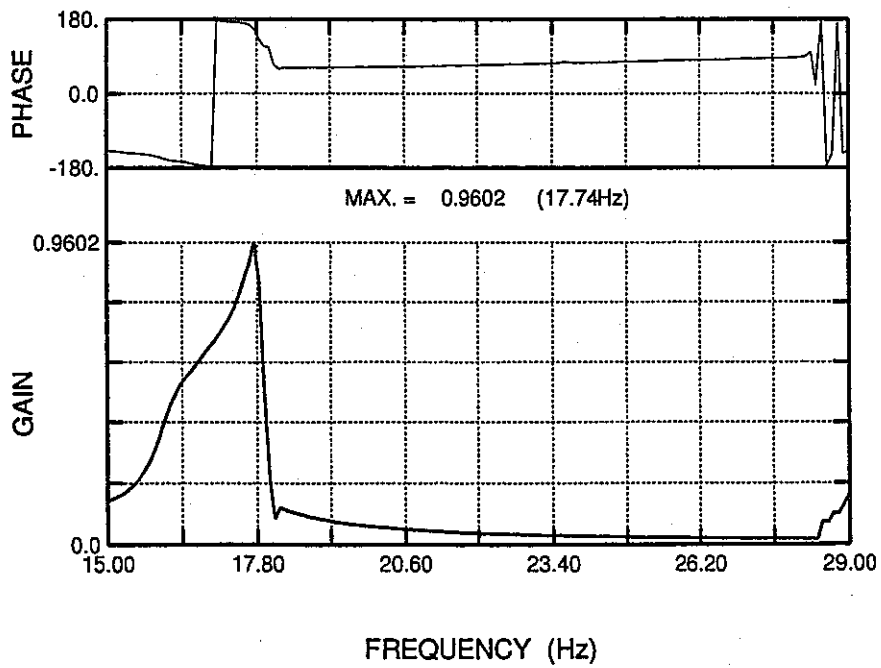




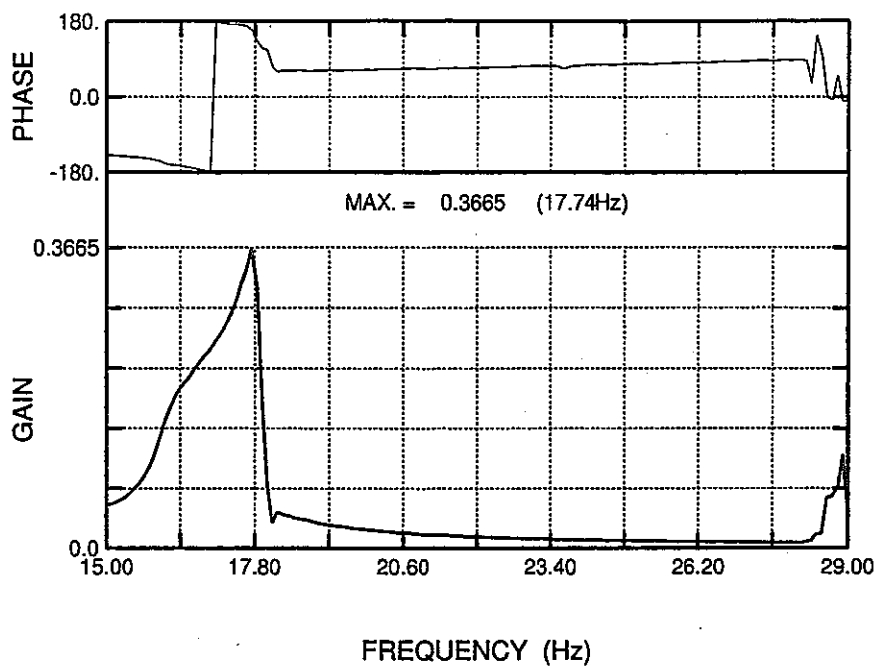
G2-4  $\frac{S3}{Ax1}$



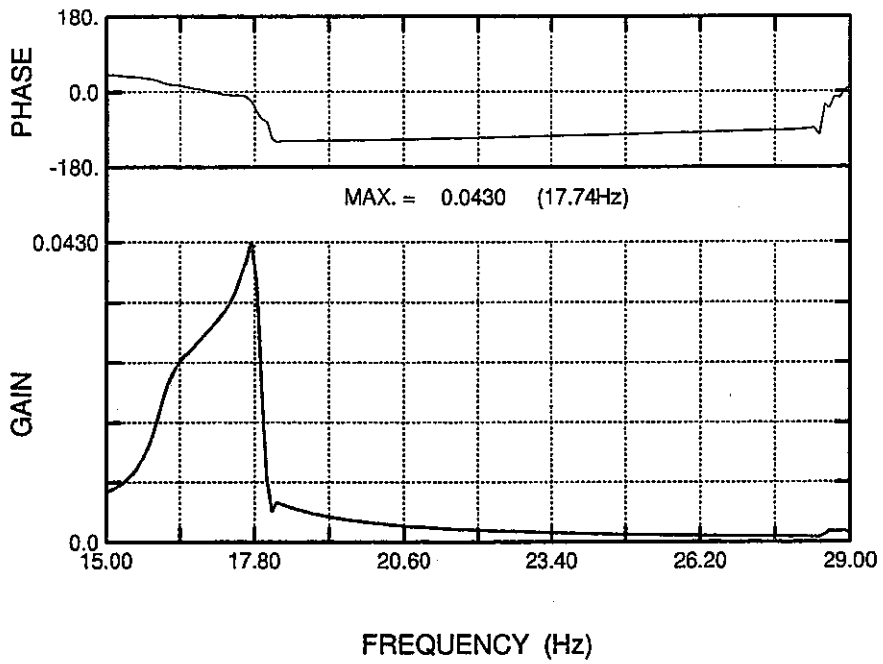
G2-4  $\frac{S4}{Ax1}$



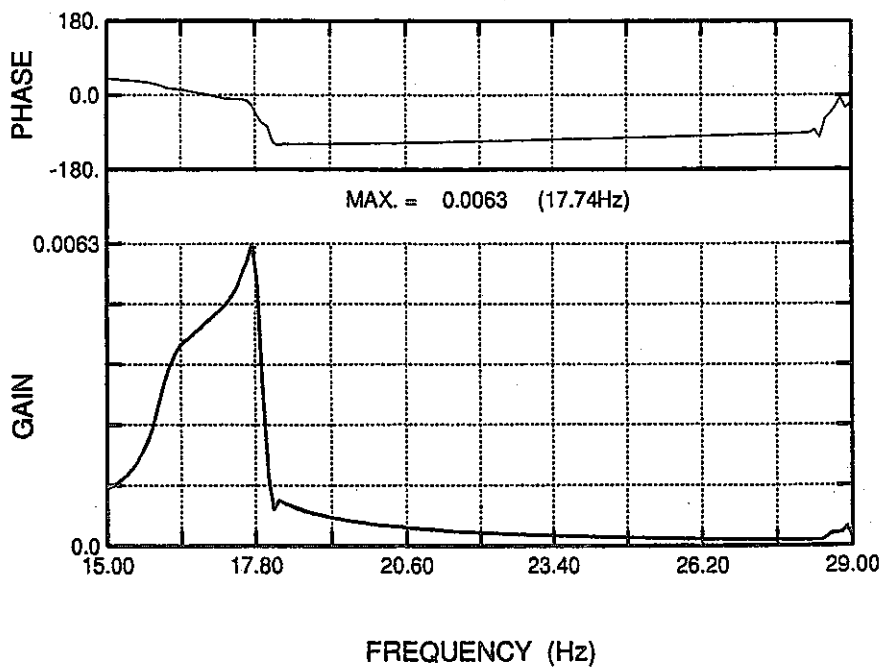
G2-4  $\frac{S5}{Ax1}$



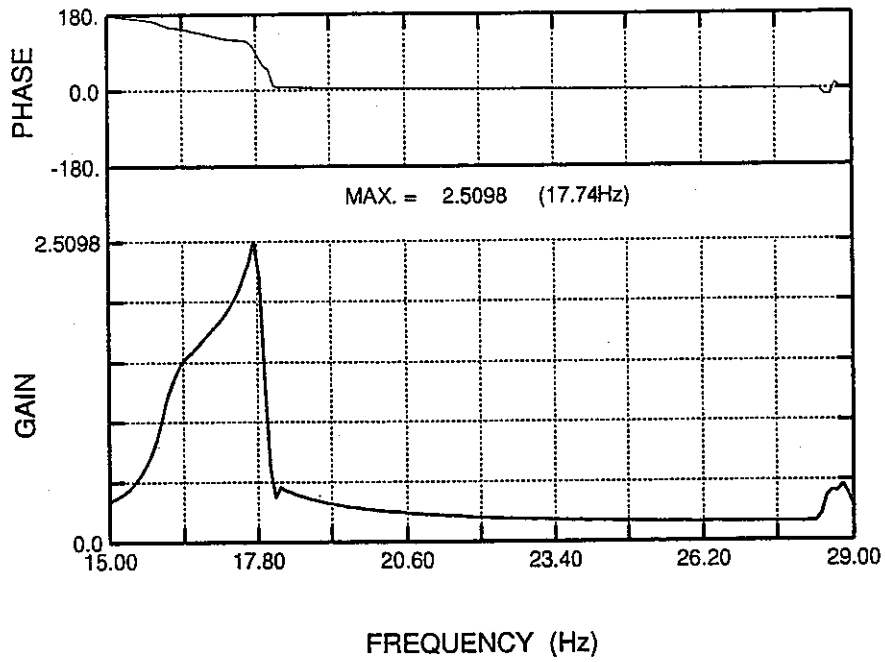
G2-4  $\frac{D2}{Ax1}$



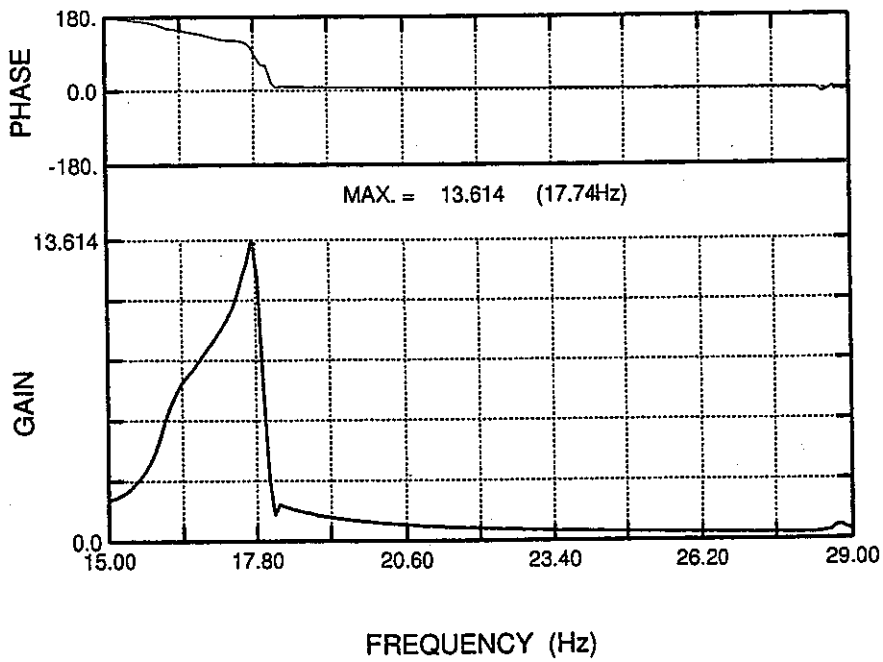
G2-4  $\frac{D1}{Ax1}$



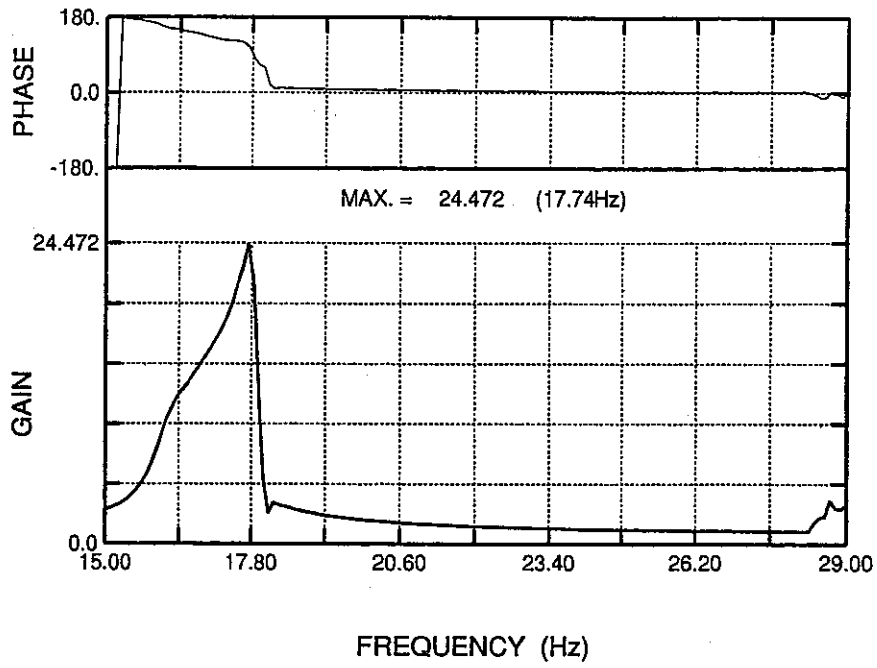
$$G2-4 \frac{Ax2}{Ax1}$$



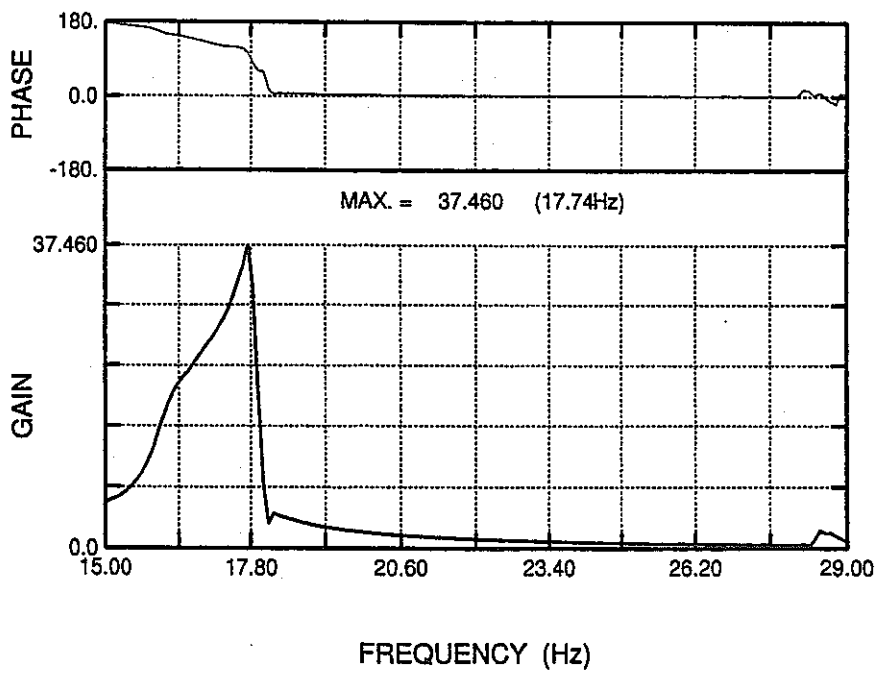
$$G2-4 \frac{Ax3}{Ax1}$$



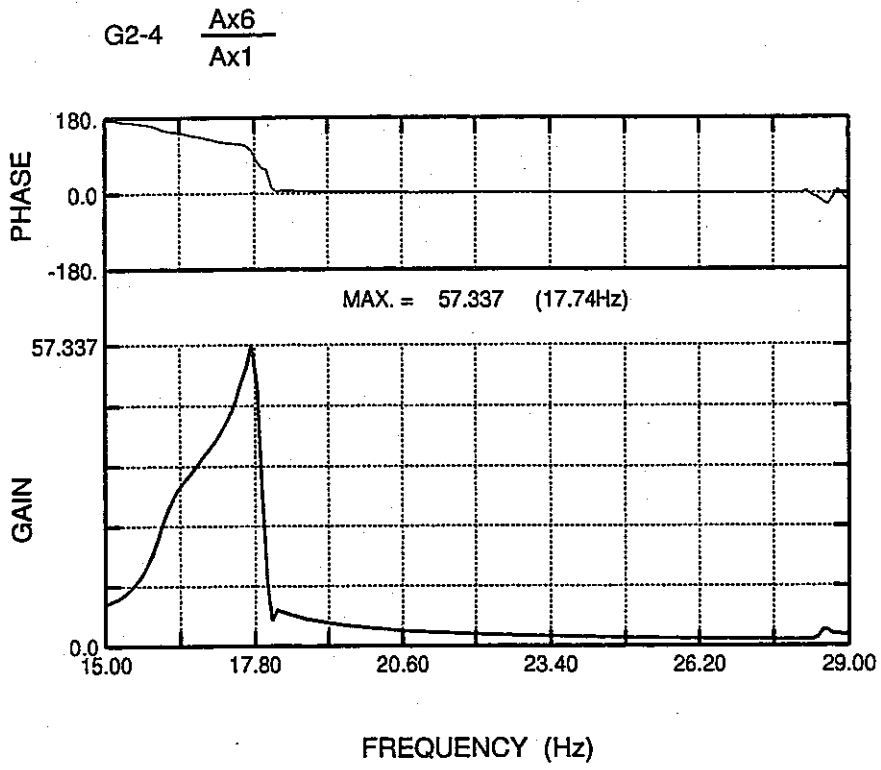
$$G2-4 \frac{Ax4}{Ax1}$$

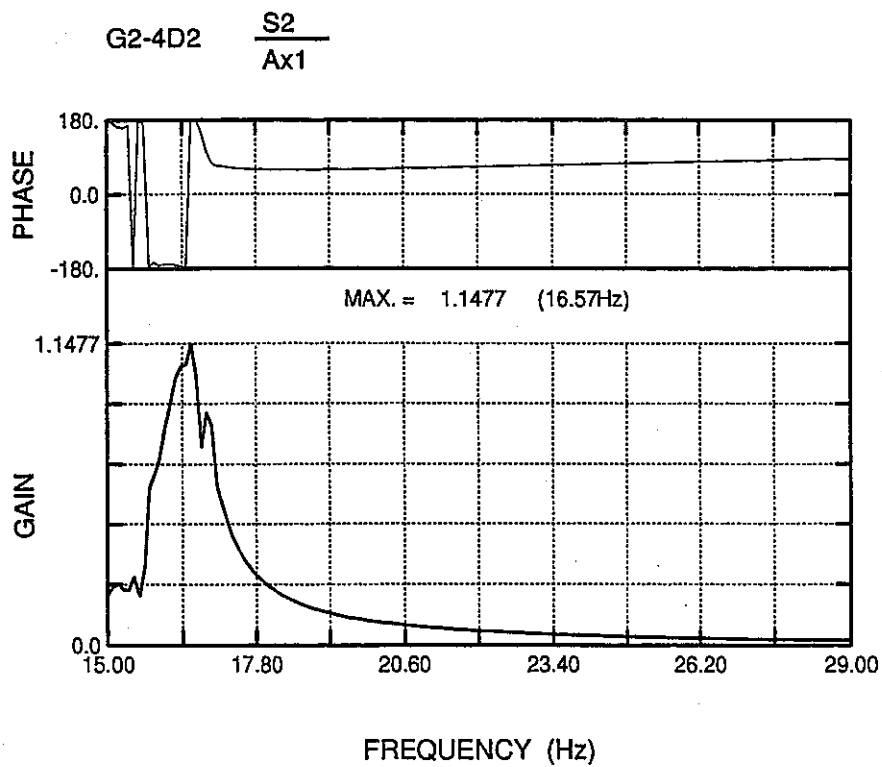
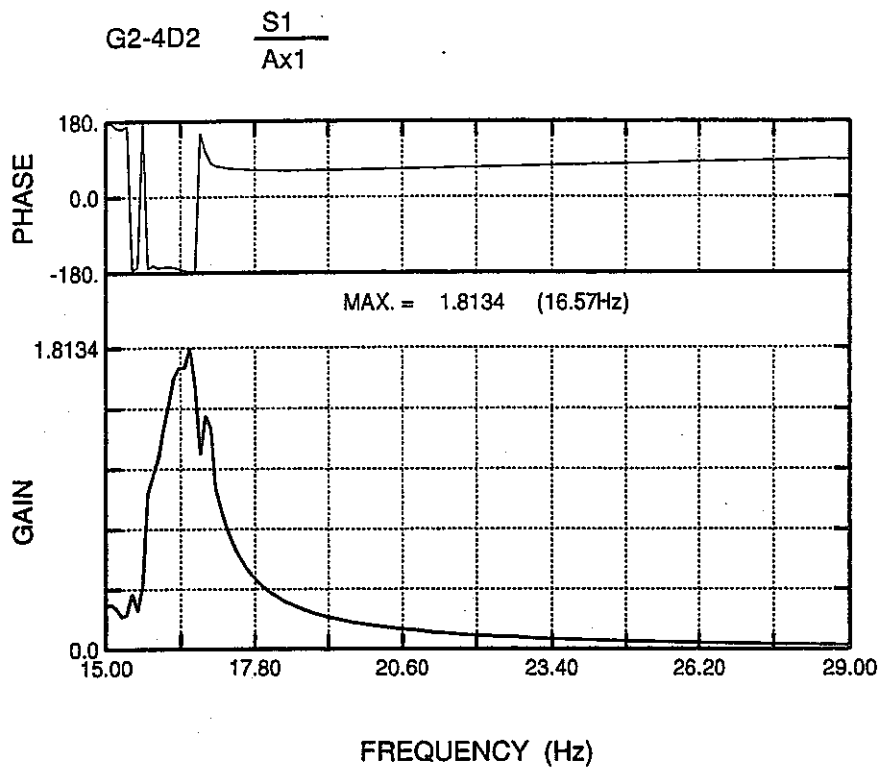


$$G2-4 \frac{Ax5}{Ax1}$$

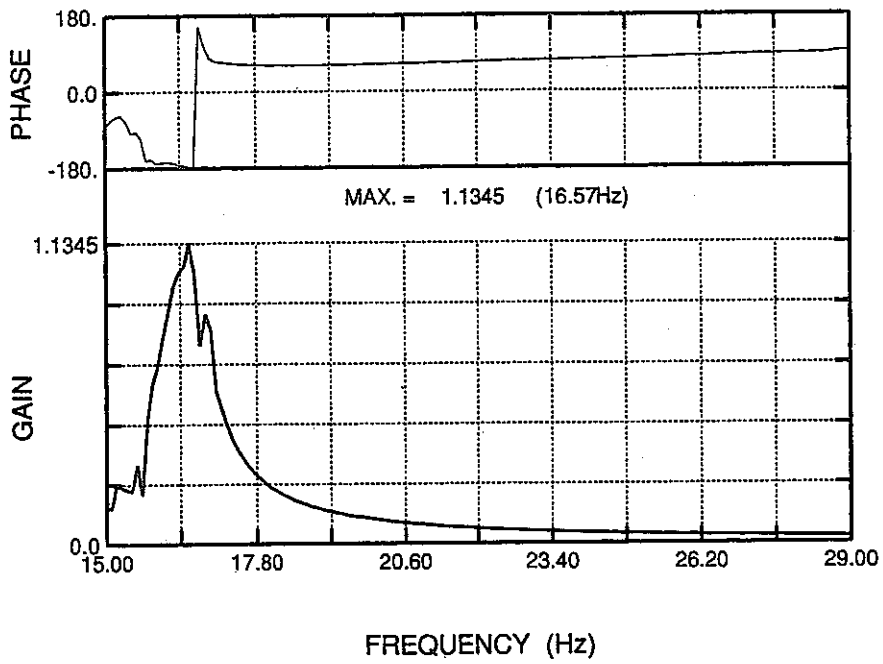




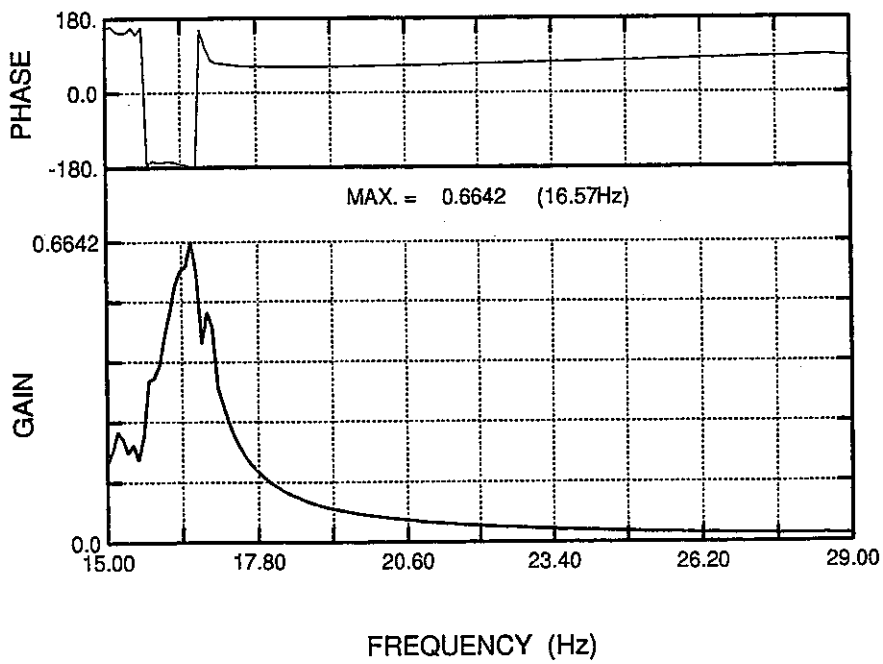




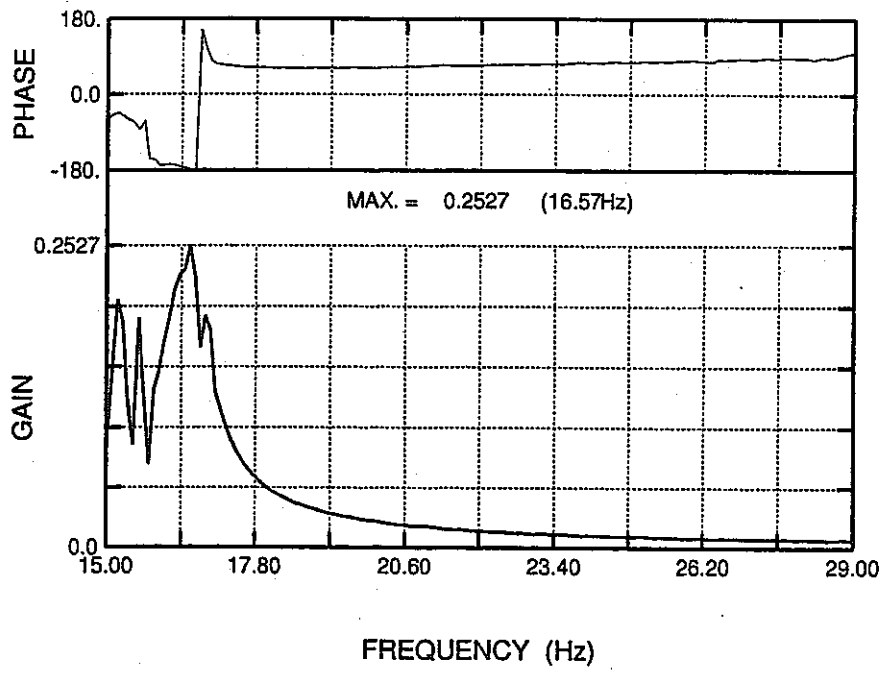
G2-4D2  $\frac{S3}{Ax1}$

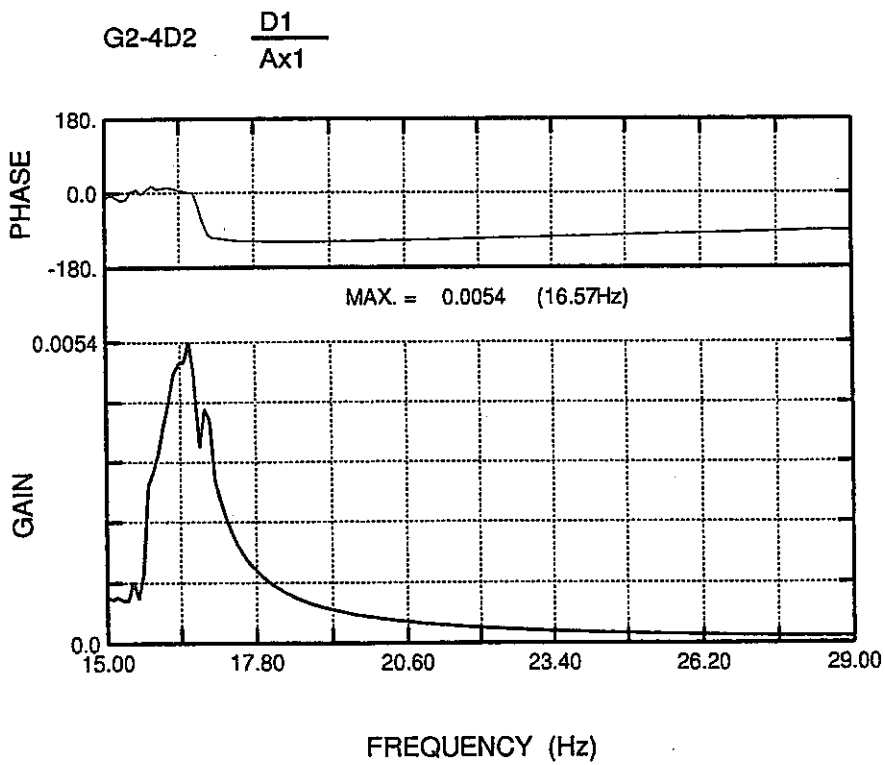
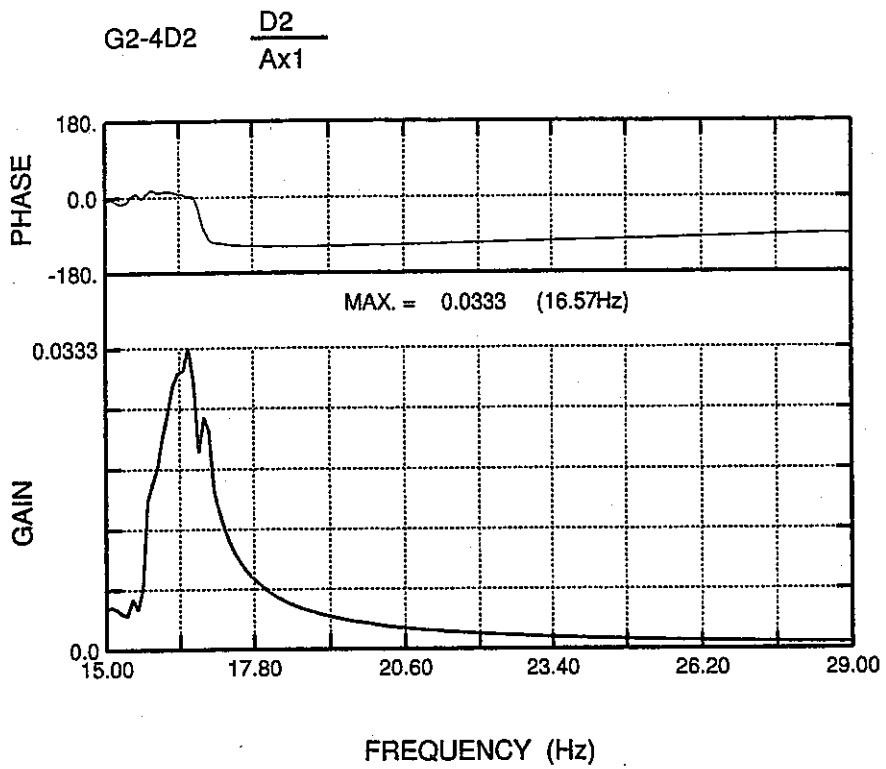


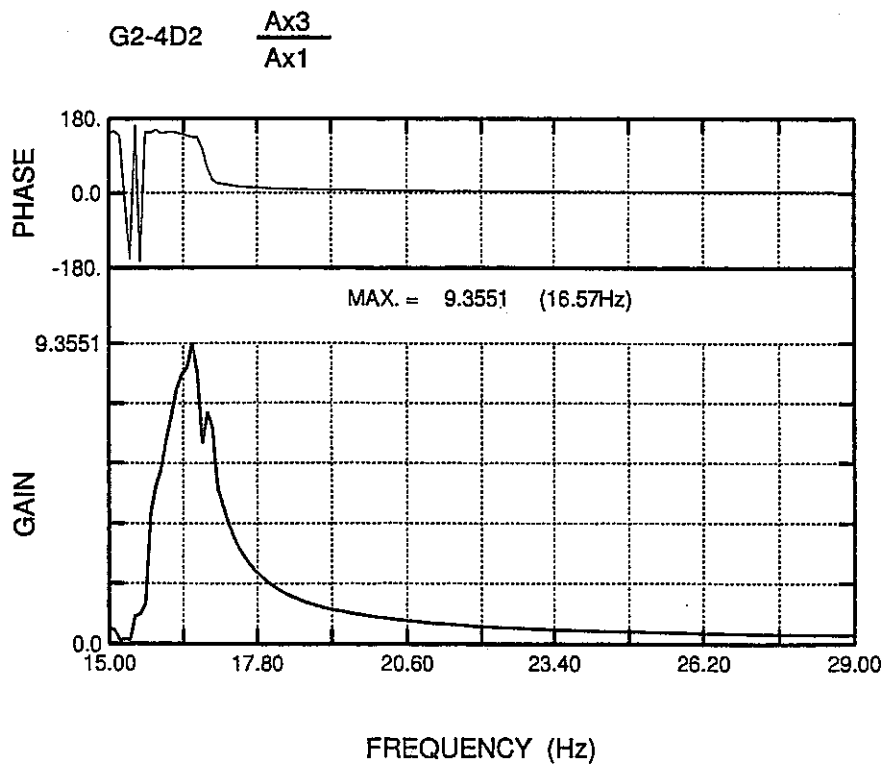
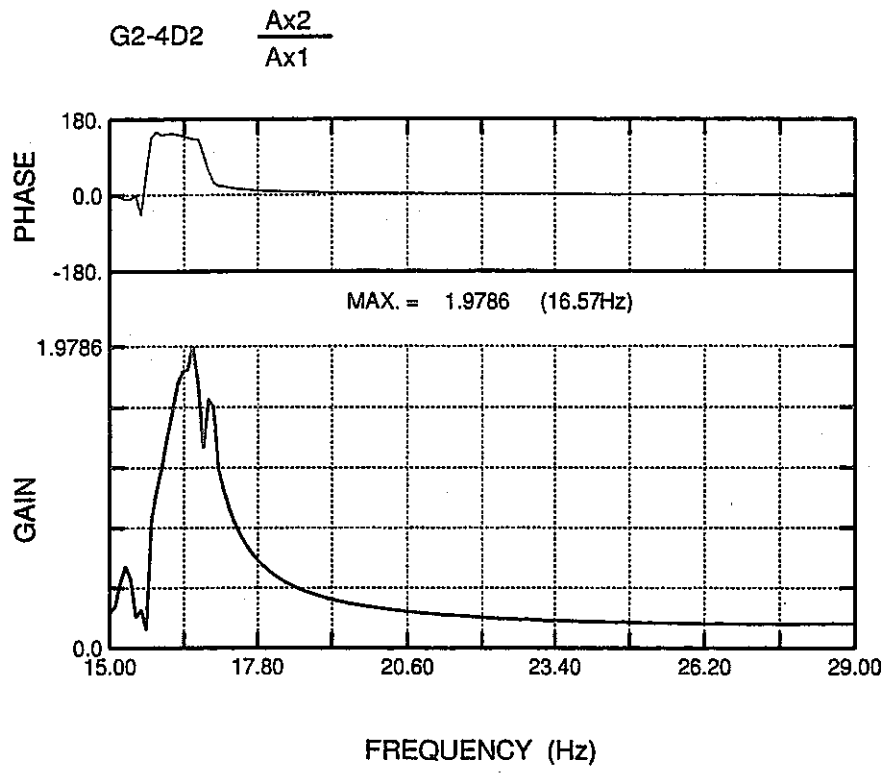
G2-4D2  $\frac{S4}{Ax1}$

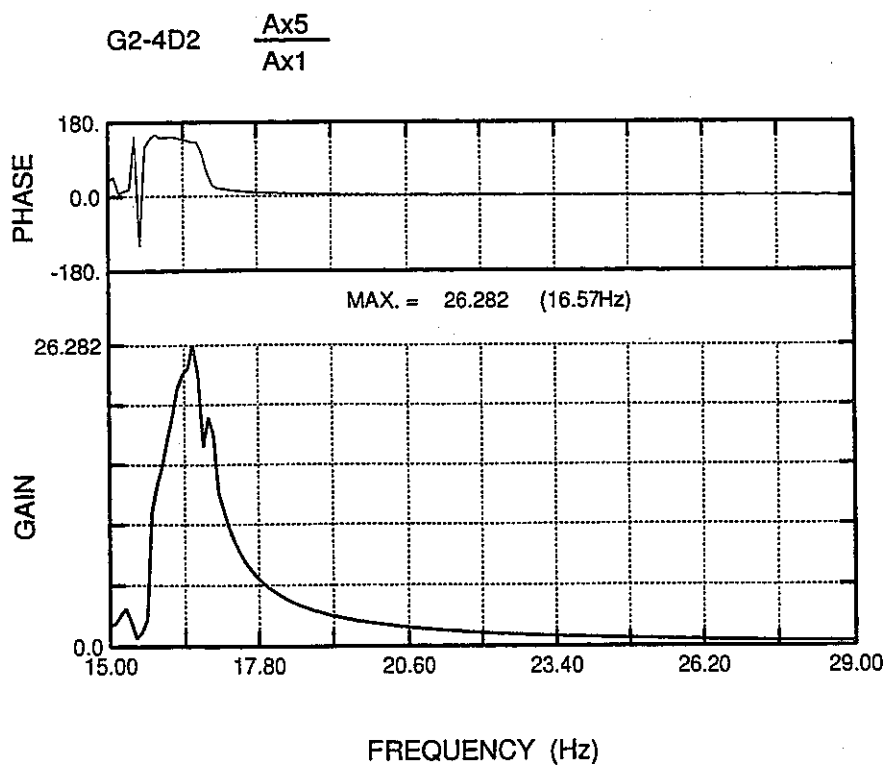
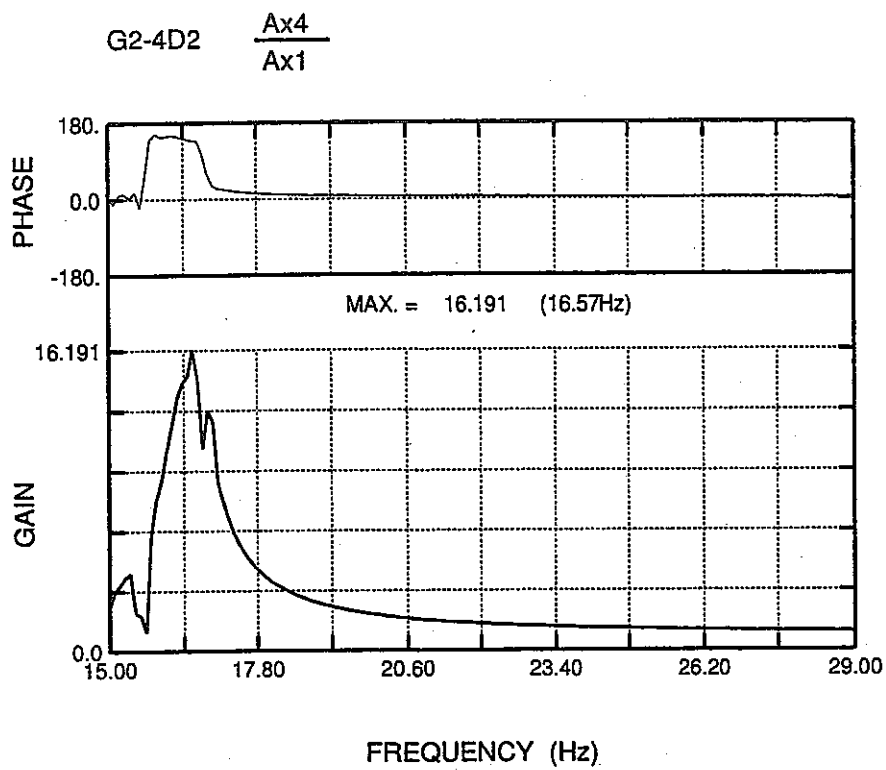


G2-4D2  $\frac{S5}{Ax1}$

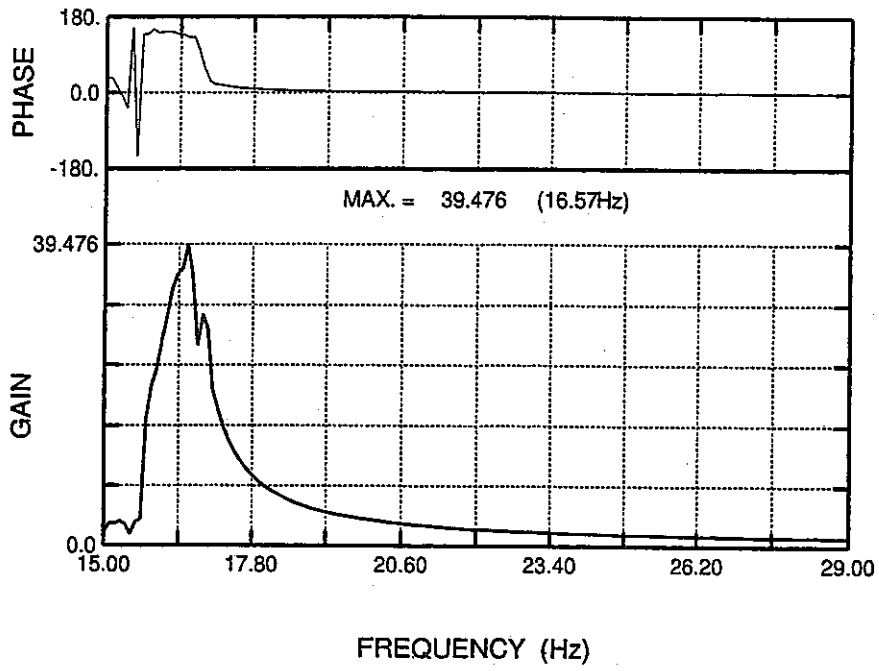






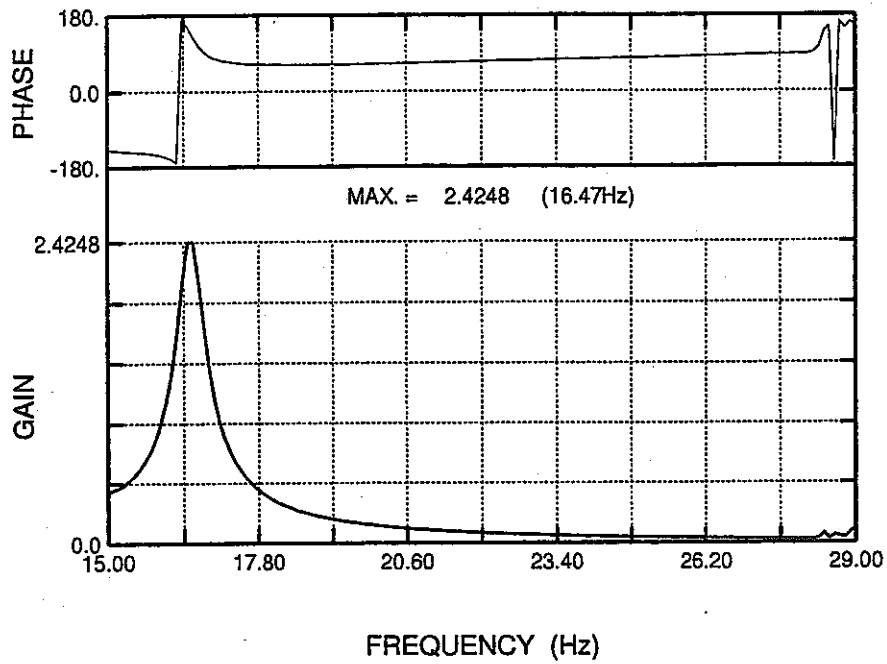


G2-4D2  $\frac{Ax6}{Ax1}$

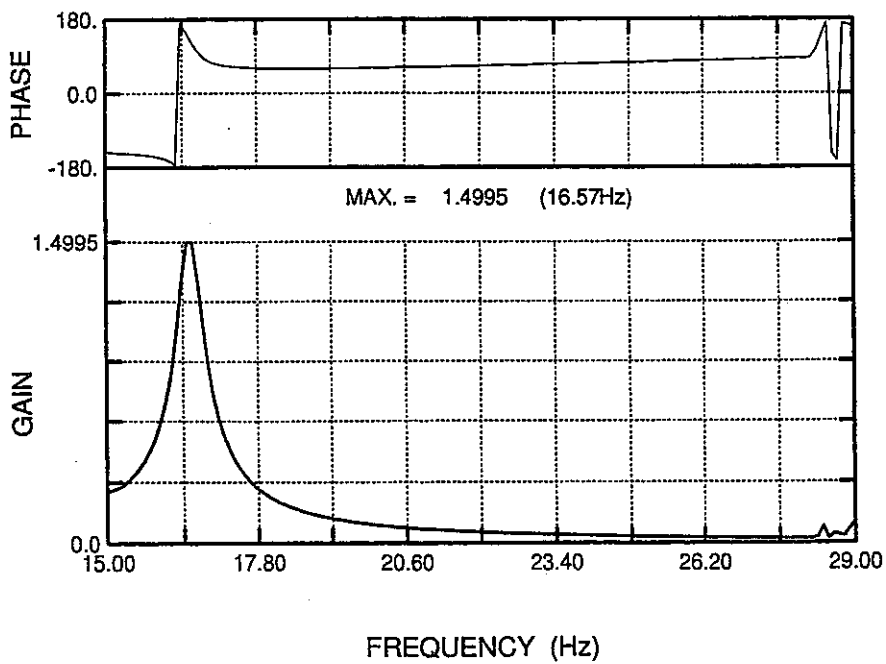




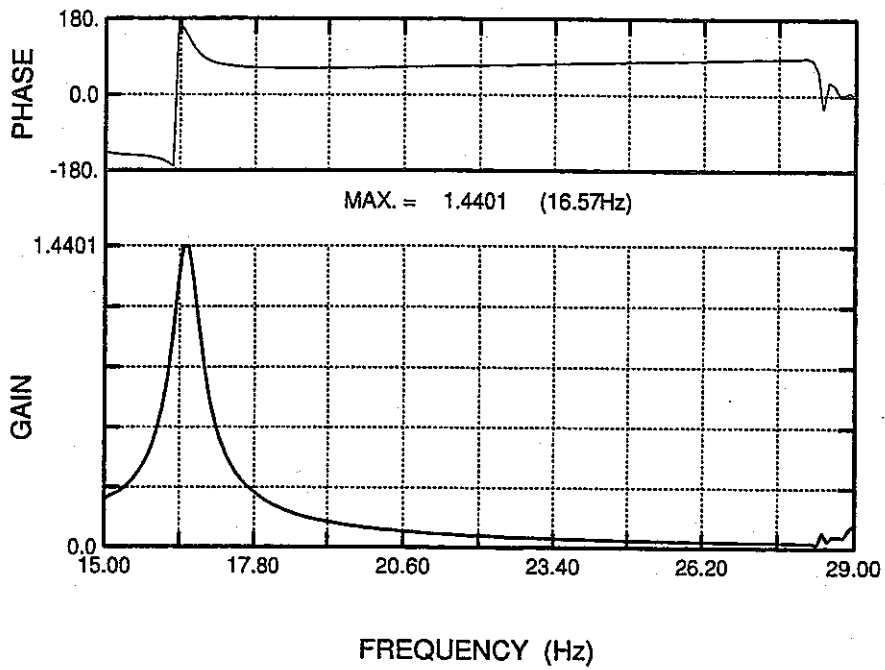
G3-3  $\frac{S1}{Ax1}$



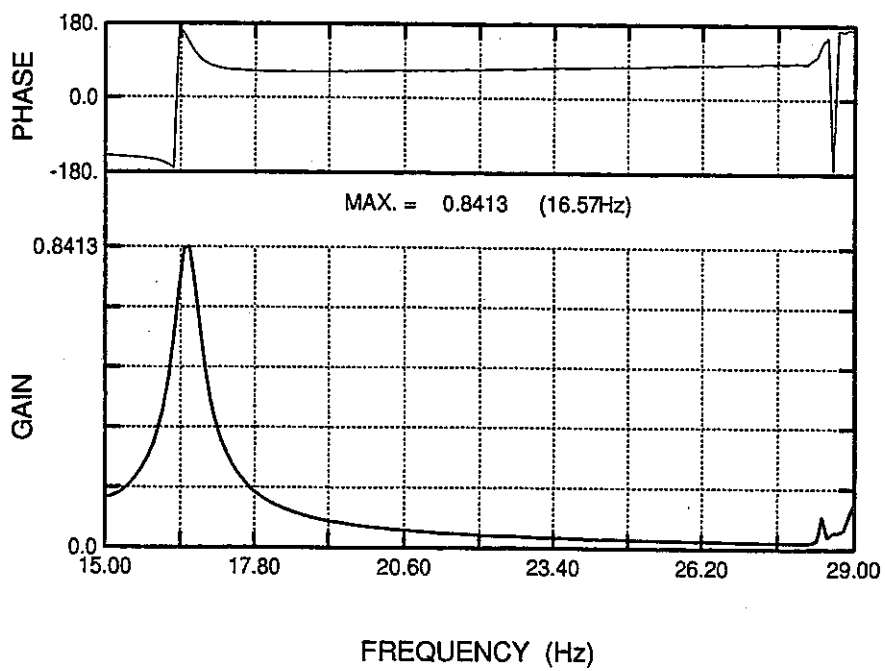
G3-3  $\frac{S2}{Ax1}$



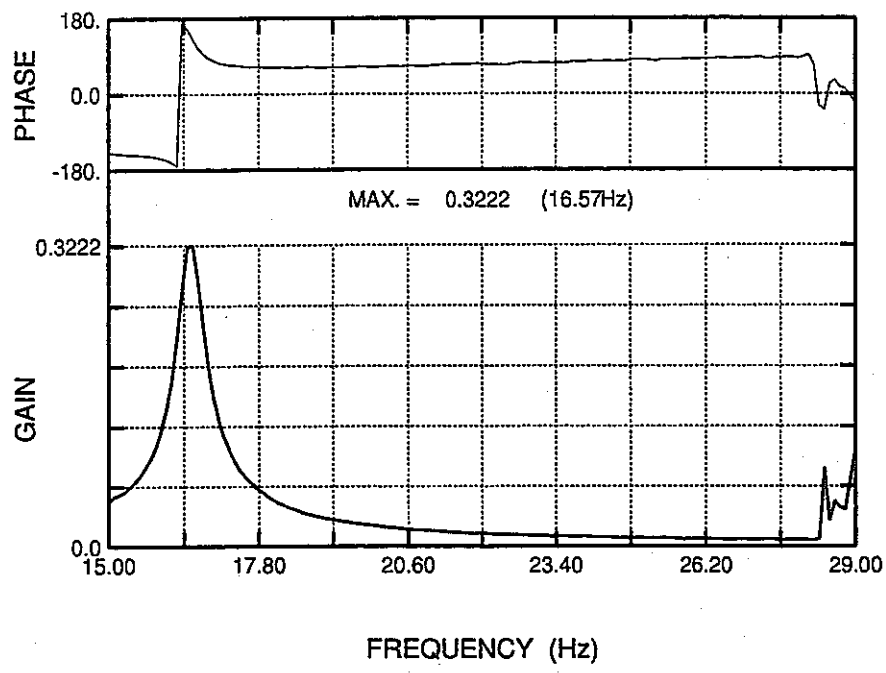
G3-3  $\frac{S3}{Ax1}$



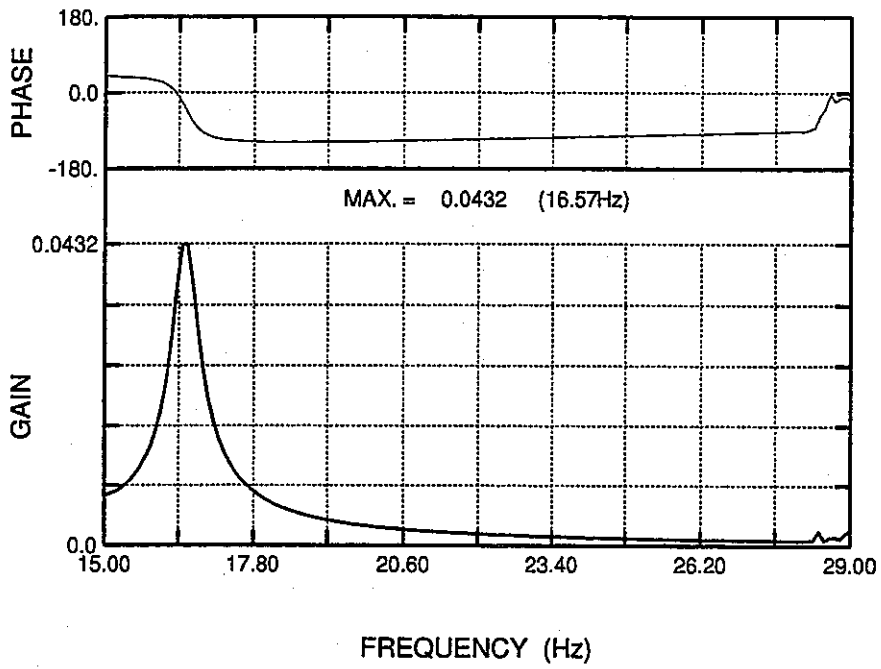
G3-3  $\frac{S4}{Ax1}$



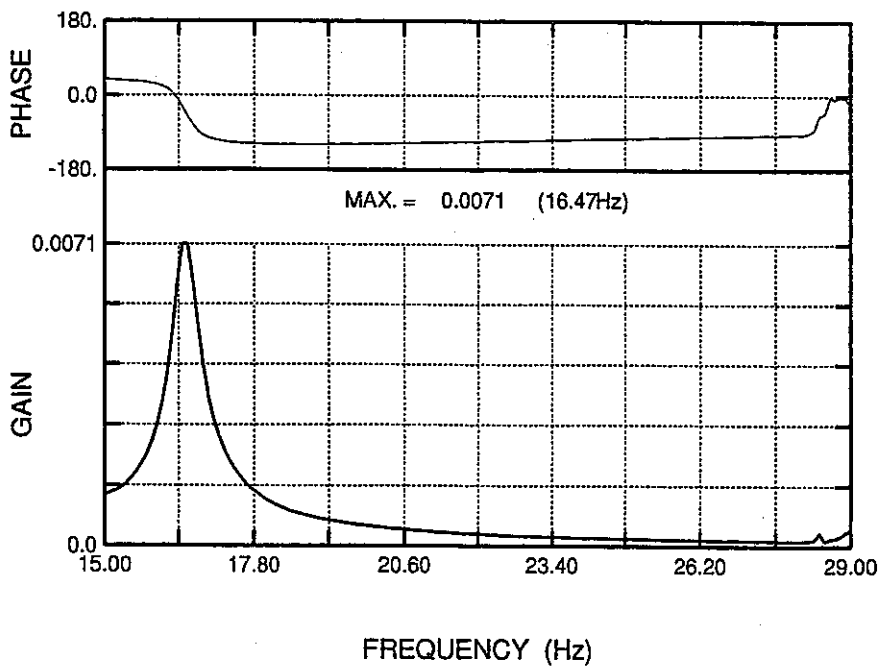
G3-3  $\frac{S5}{Ax1}$



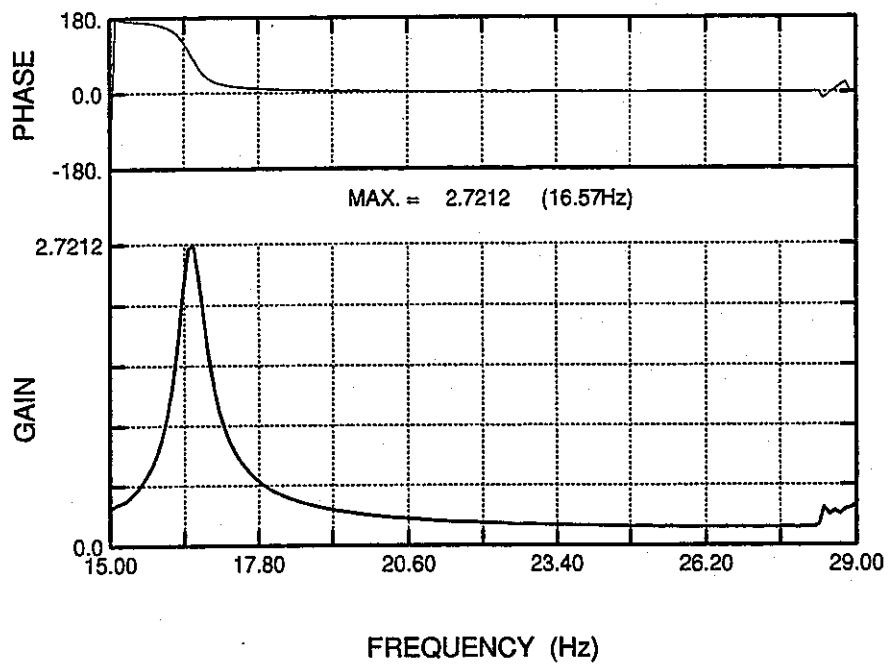
G3-3  $\frac{D2}{Ax1}$



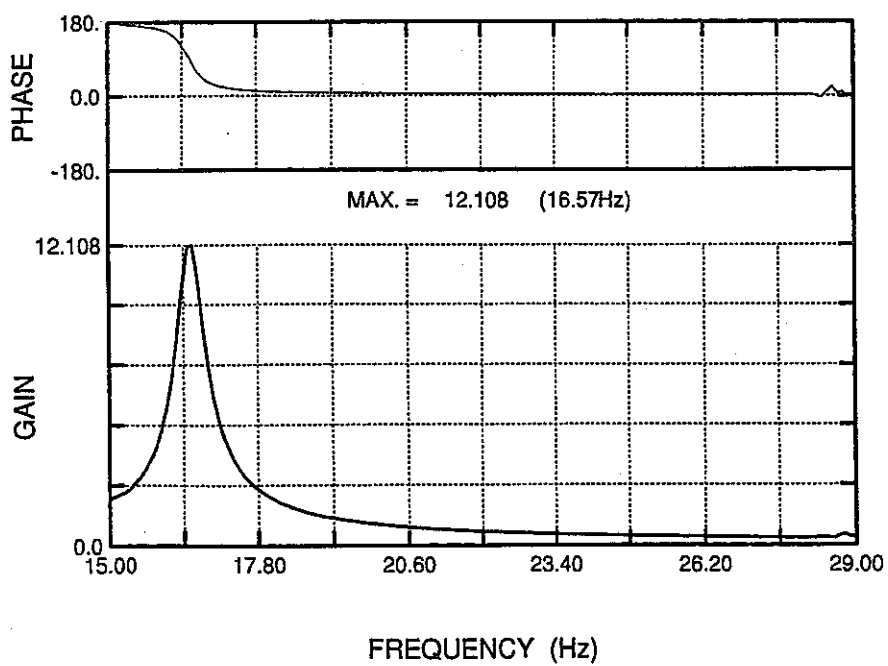
G3-3  $\frac{D1}{Ax1}$



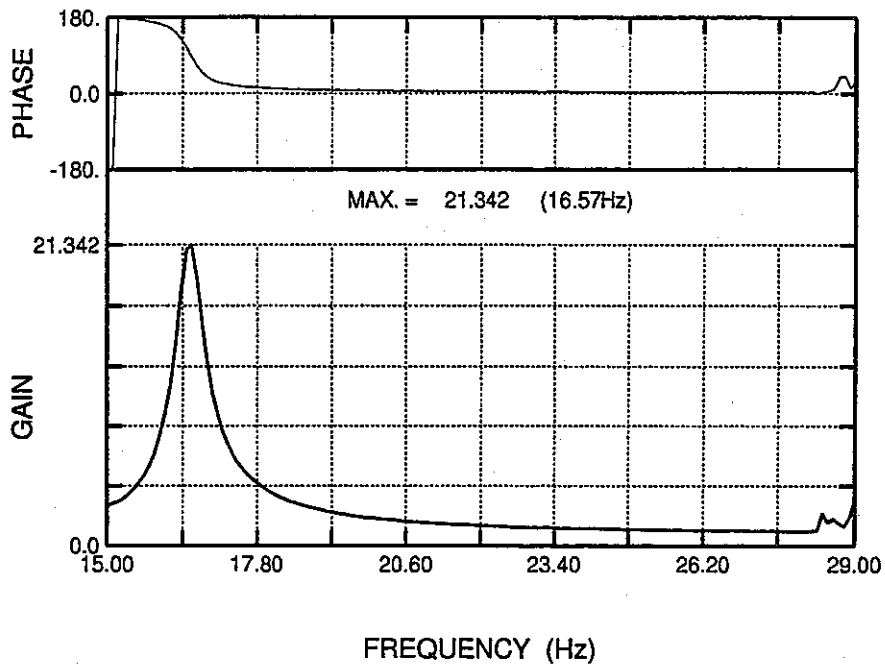
G3-3  $\frac{Ax2}{Ax1}$



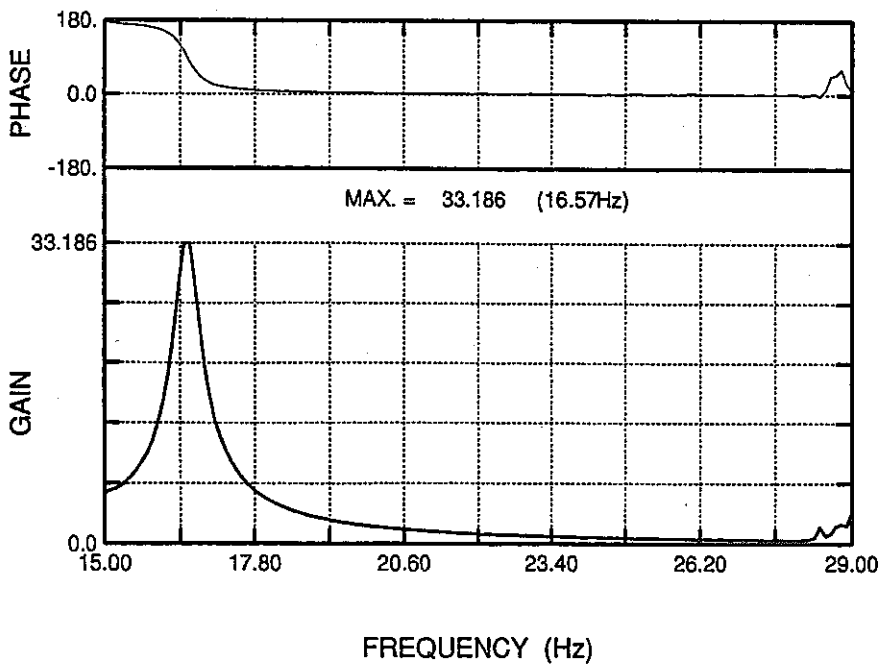
G3-3  $\frac{Ax3}{Ax1}$



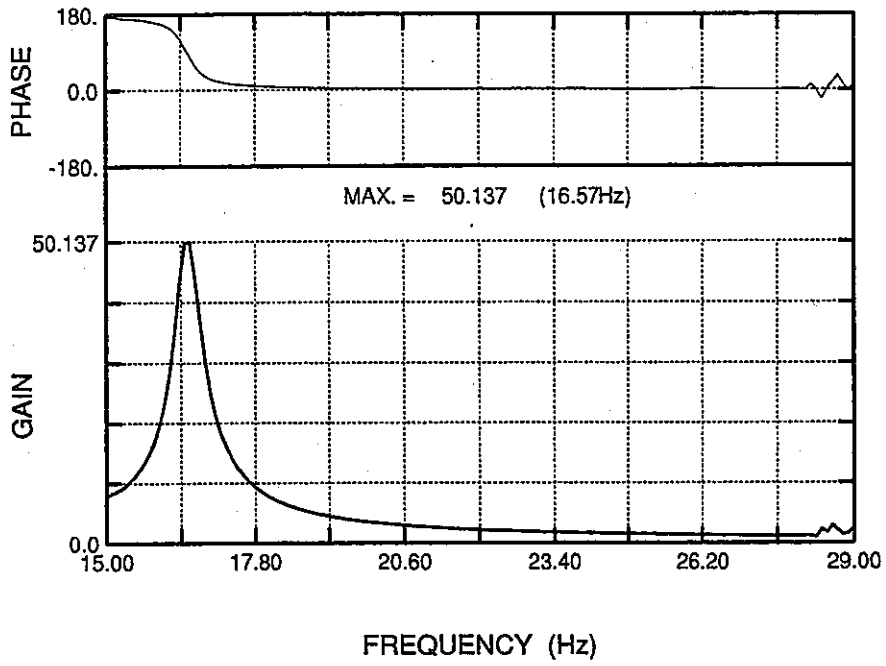
G3-3  $\frac{Ax4}{Ax1}$



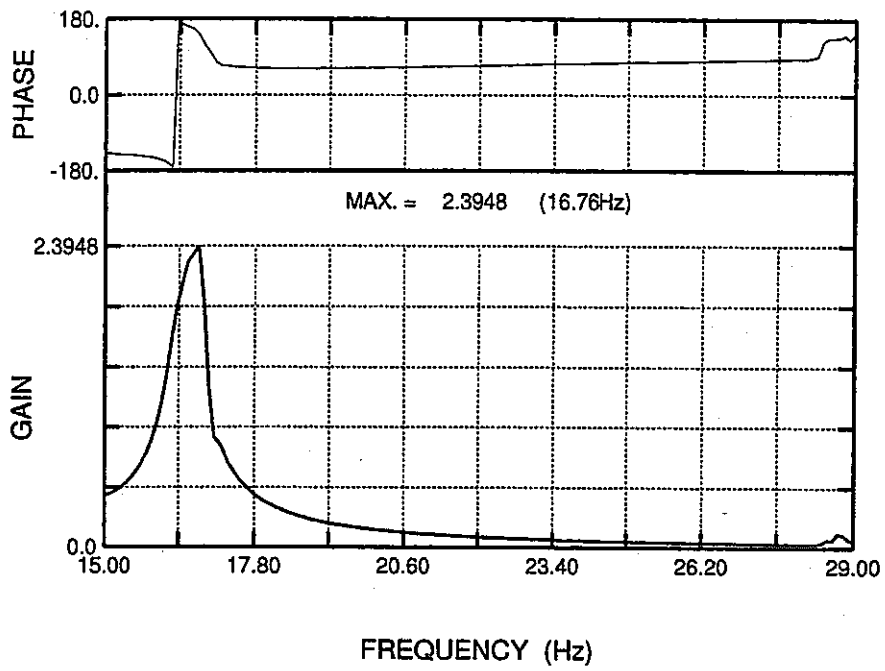
G3-3  $\frac{Ax5}{Ax1}$



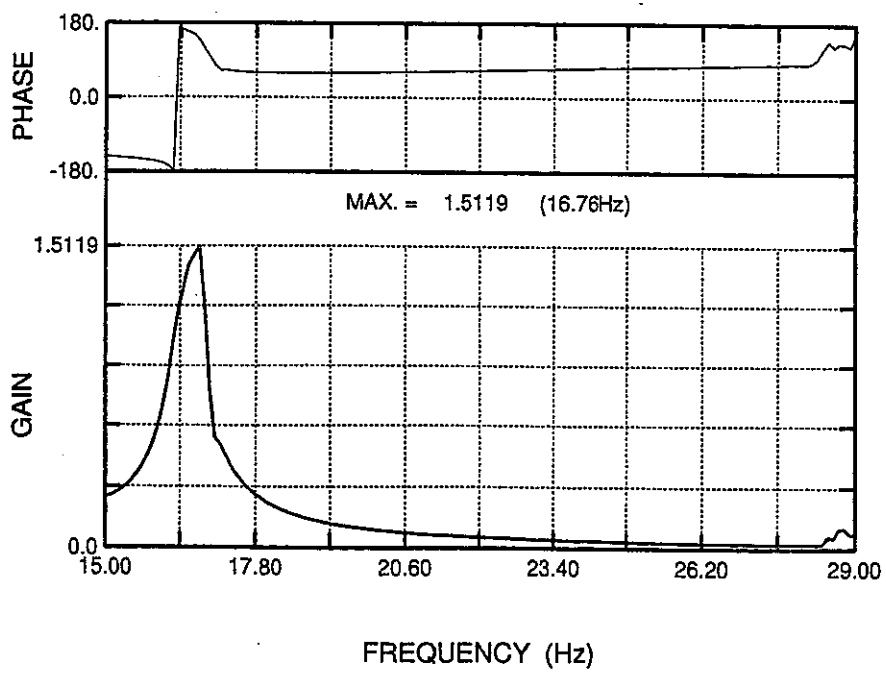
G3-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$



G3-4  $\frac{S1}{Ax1}$

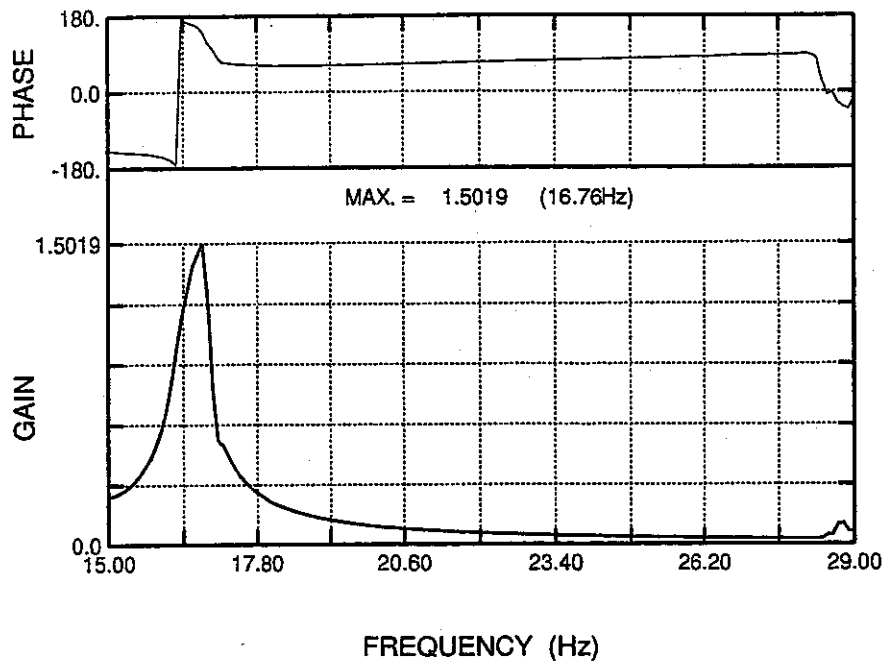


G3-4  $\frac{S2}{Ax1}$

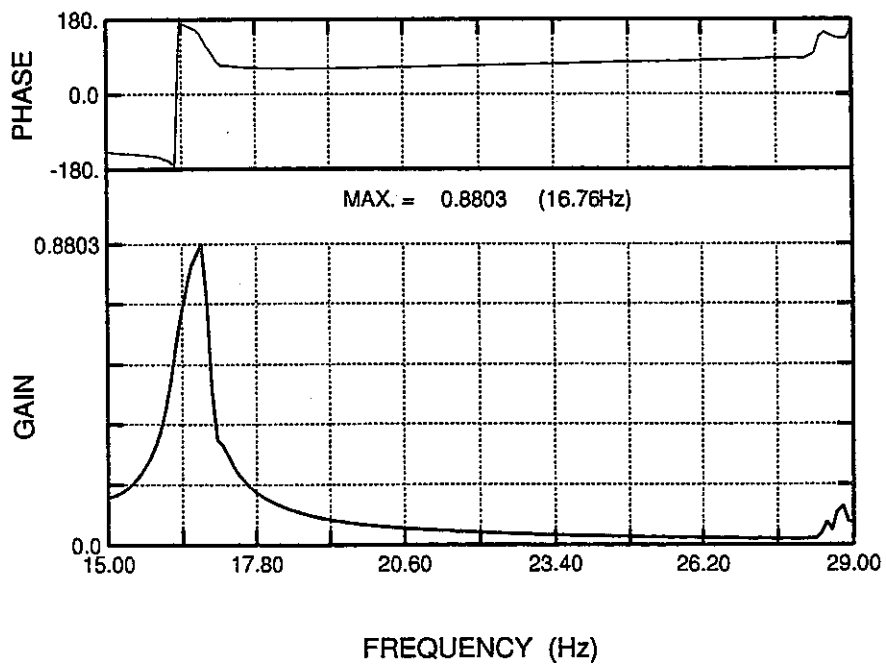




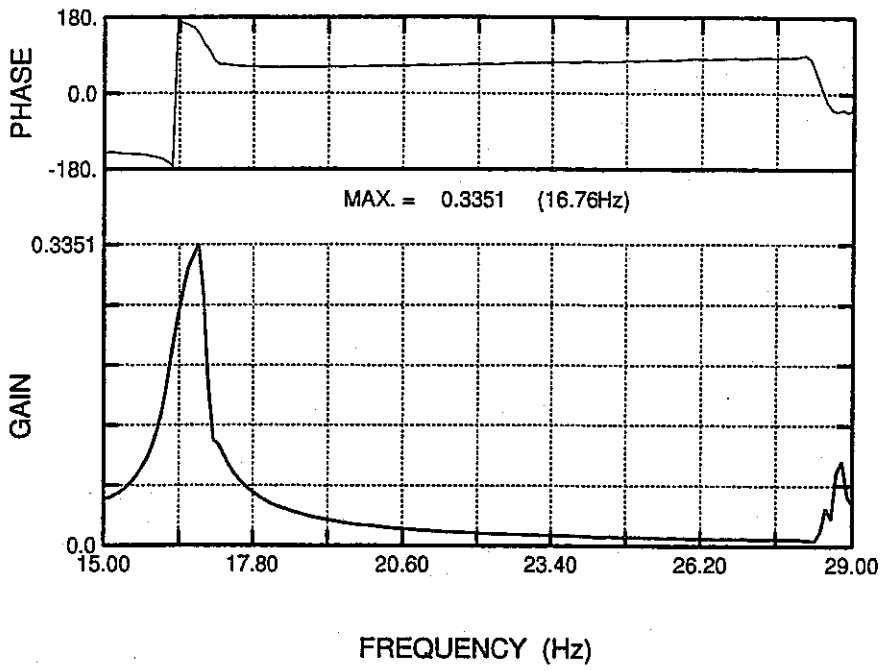
G3-4  $\frac{S3}{Ax1}$



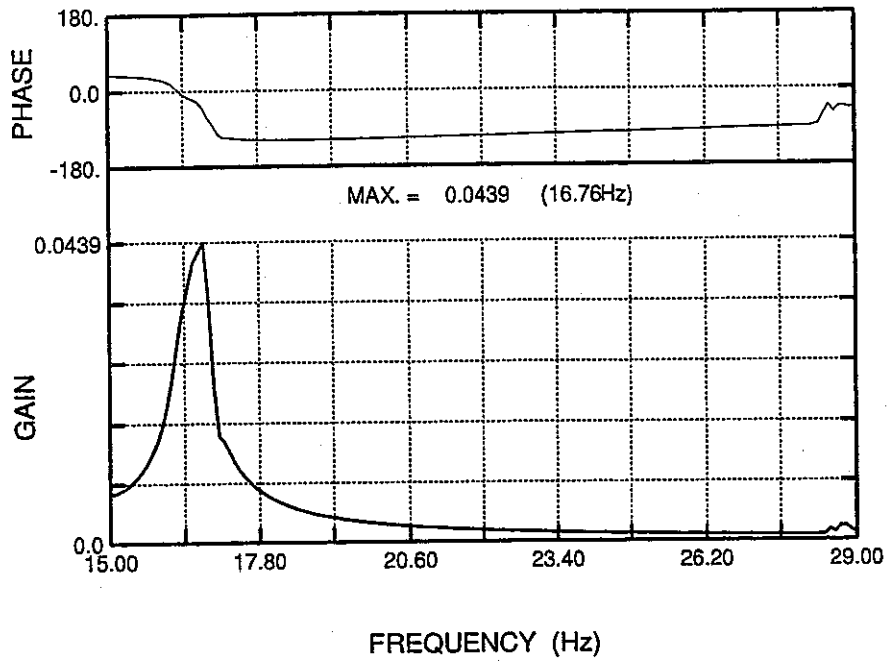
G3-4  $\frac{S4}{Ax1}$



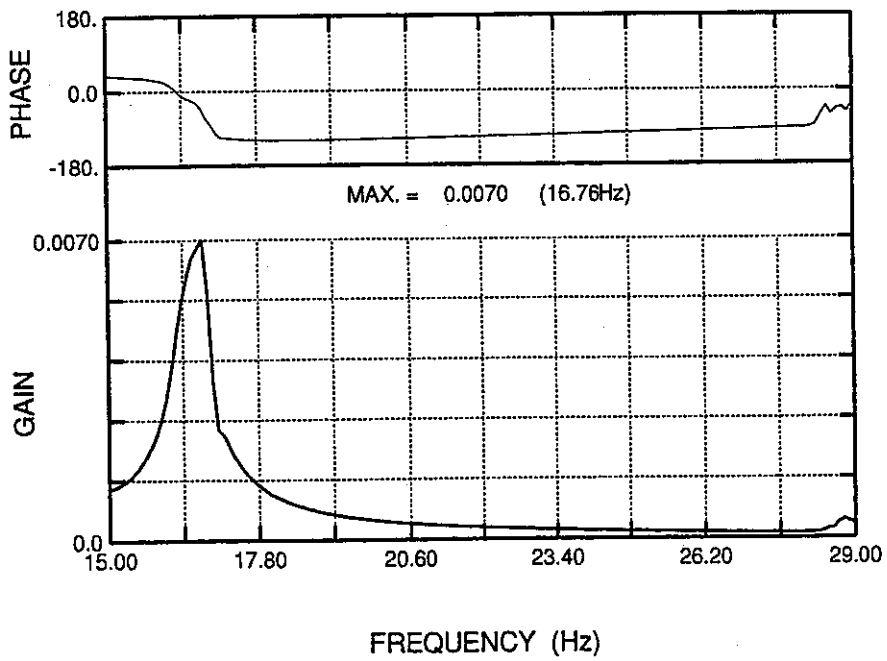
G3-4  $\frac{S5}{Ax1}$



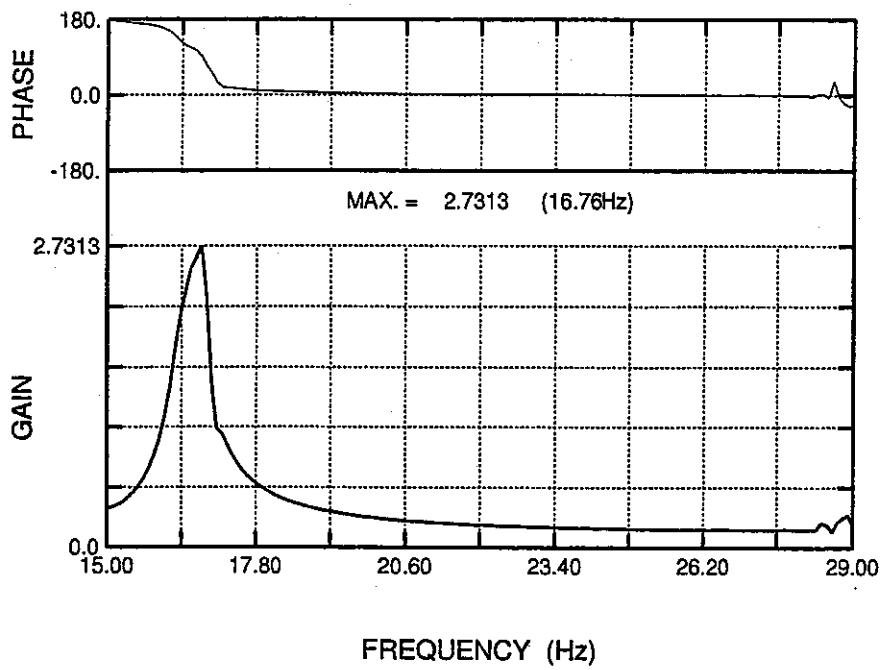
G3-4  $\frac{D2}{Ax1}$



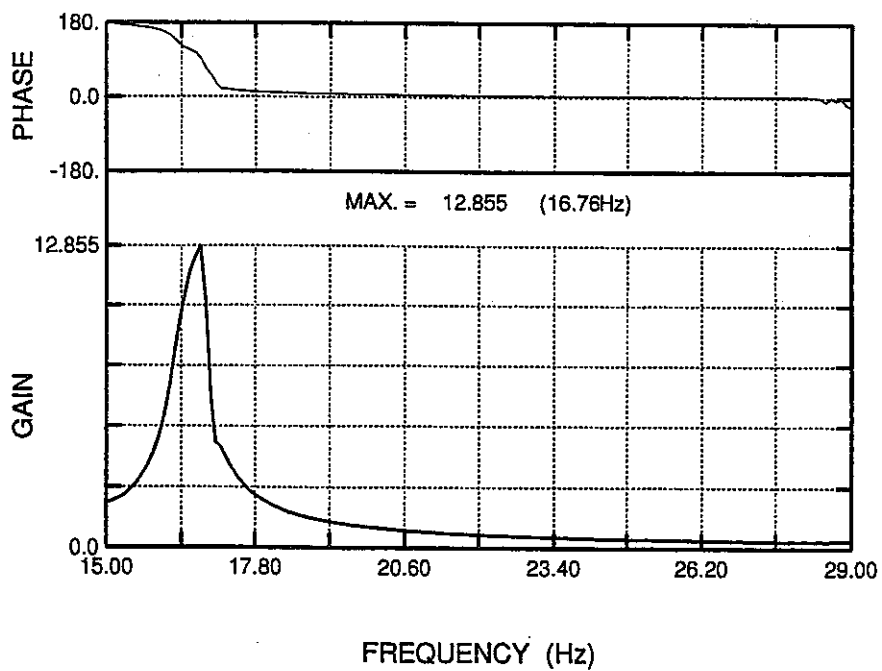
G3-4  $\frac{D1}{Ax1}$



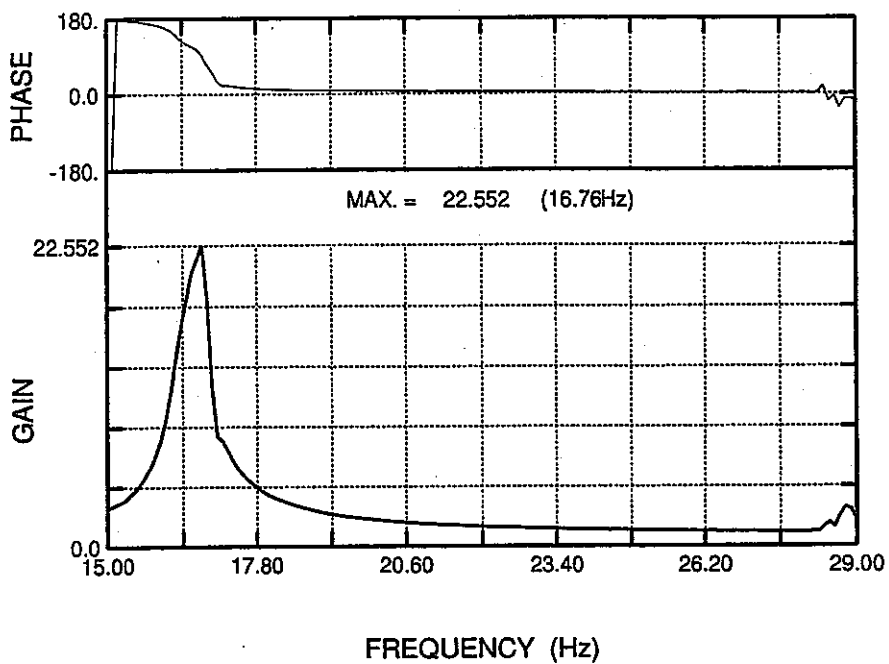
$$G3-4 \frac{Ax2}{Ax1}$$



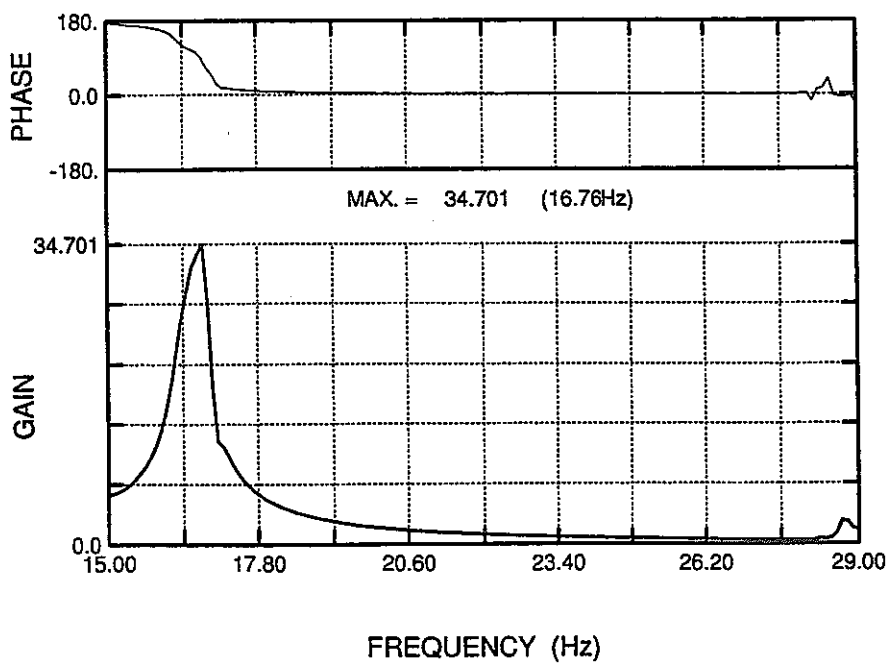
$$G3-4 \frac{Ax3}{Ax1}$$



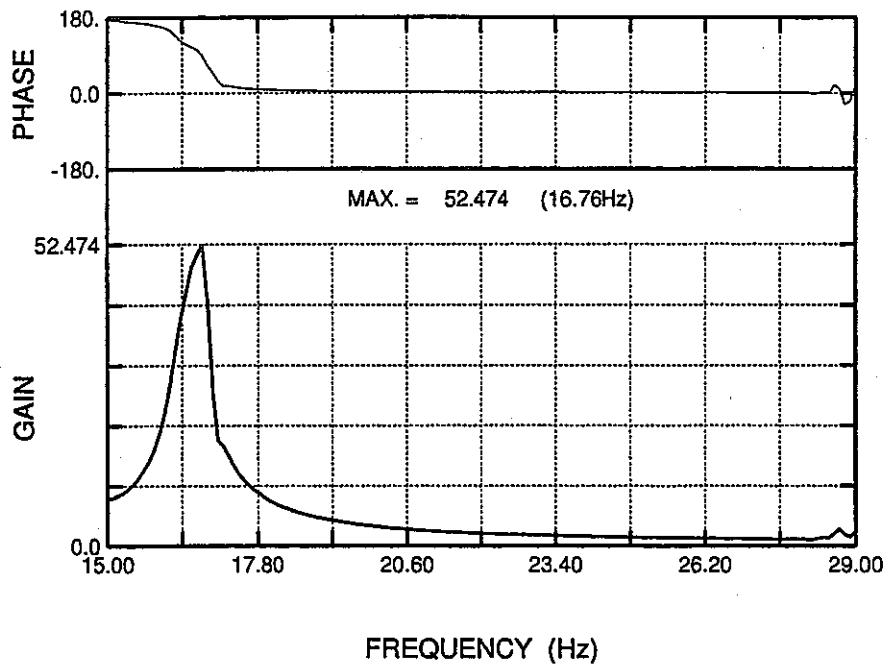
G3-4  $\frac{Ax4}{Ax1}$



G3-4  $\frac{Ax5}{Ax1}$



G3-4  $\frac{Ax6}{Ax1}$

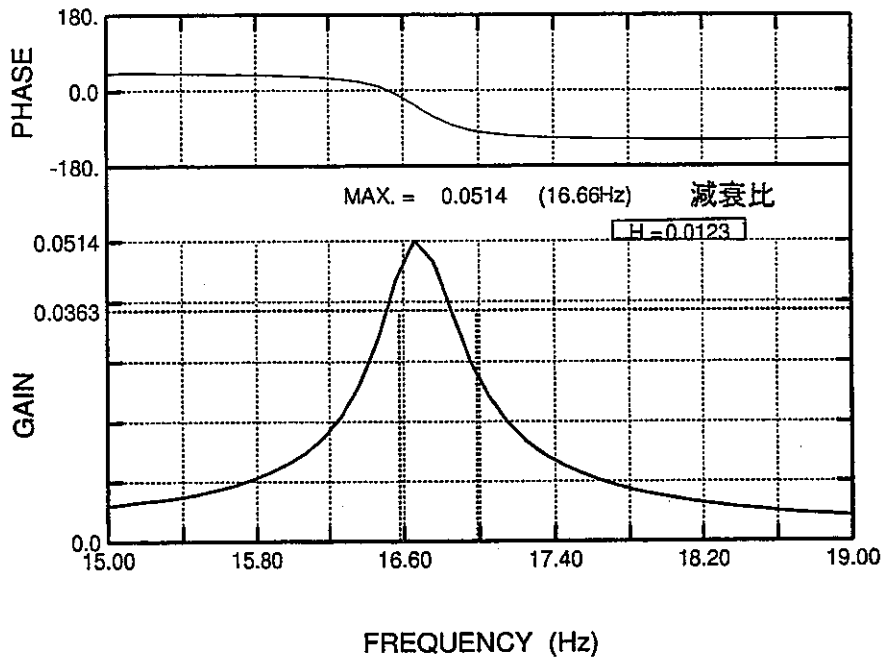


## APPENDIX-G

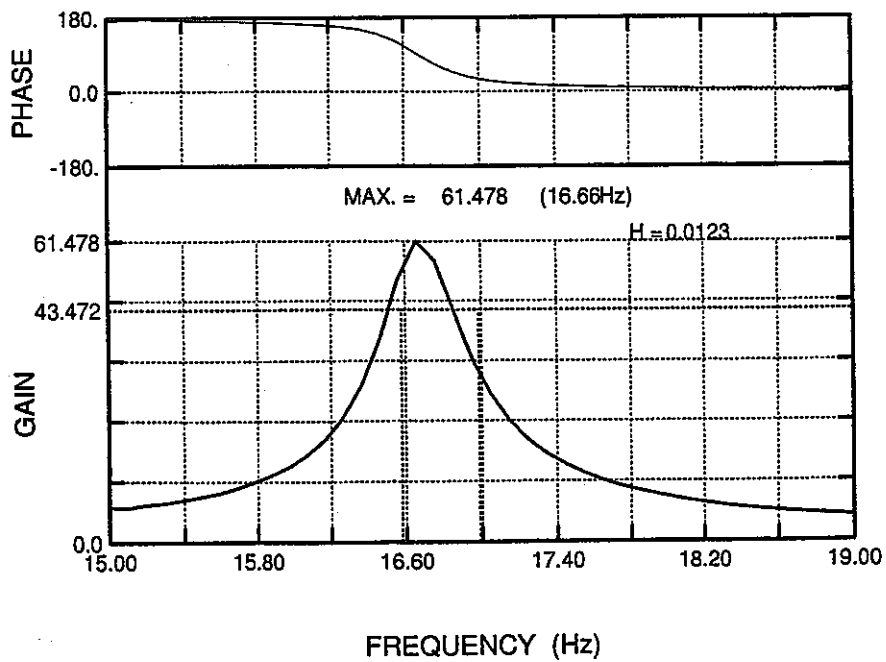
試驗結果 減衰比算出結果

試験ケース 伝達関数  
 GI-1U2  $\frac{D2}{Ax1}$  - 応答  
 Ax1 - 入力

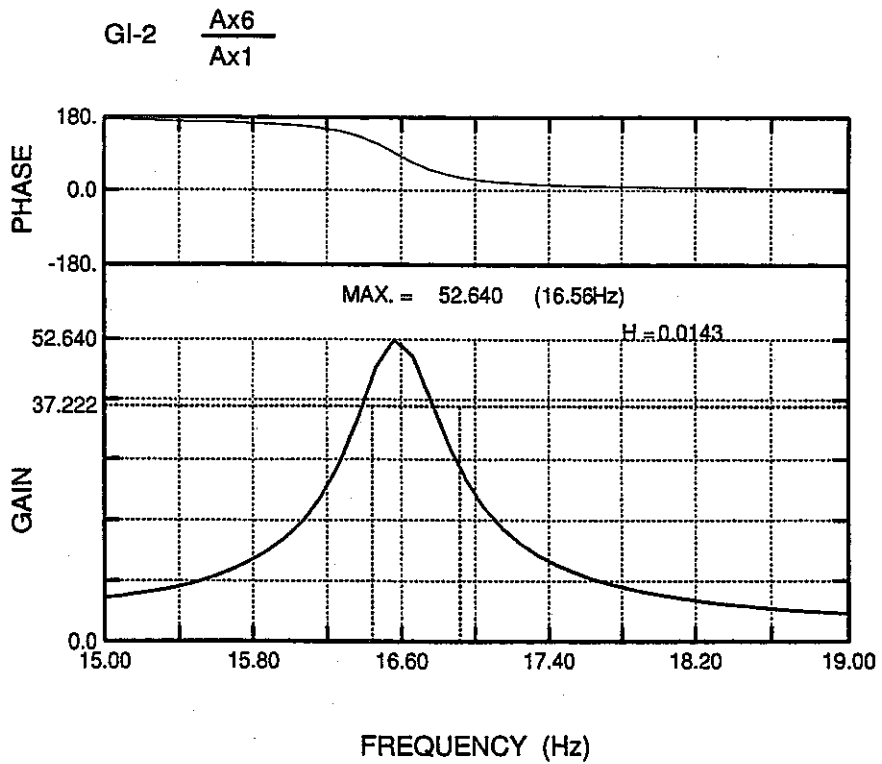
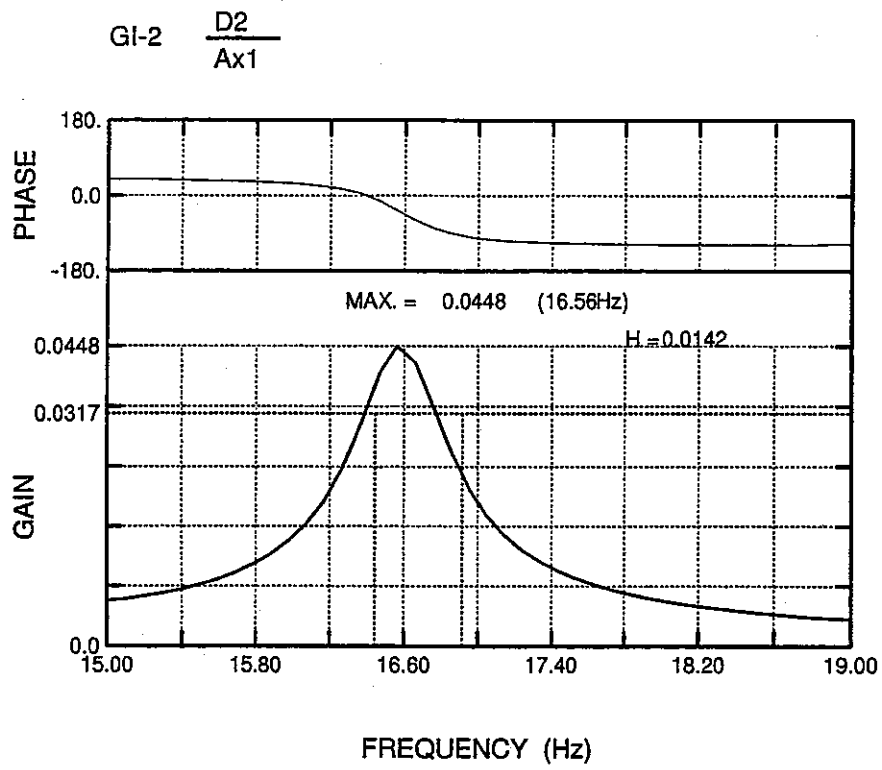
\*試験ケース、伝達関数、減衰比の  
 表記方法は他のケースも同一



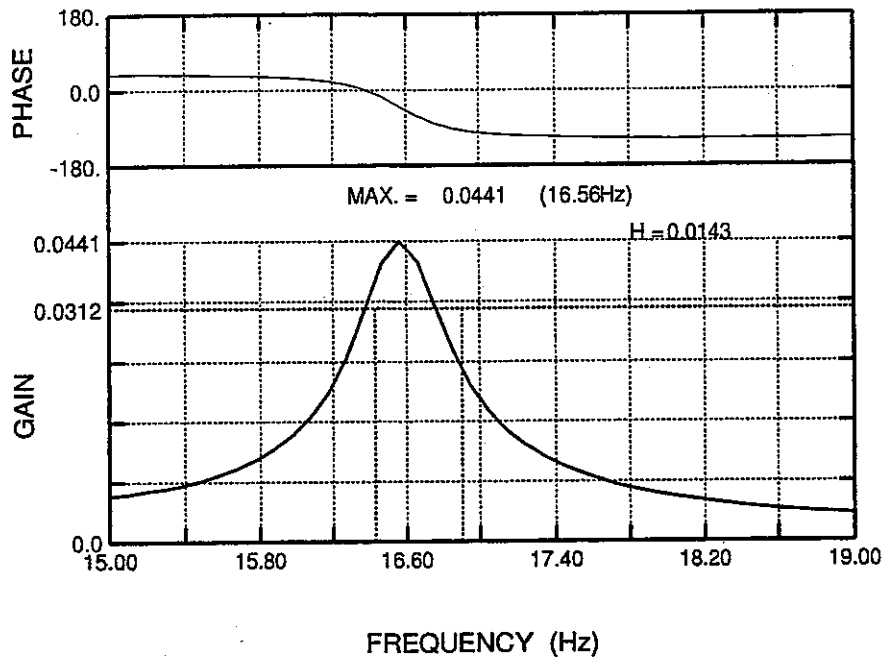
GI-1U2  $\frac{Ax6}{Ax1}$



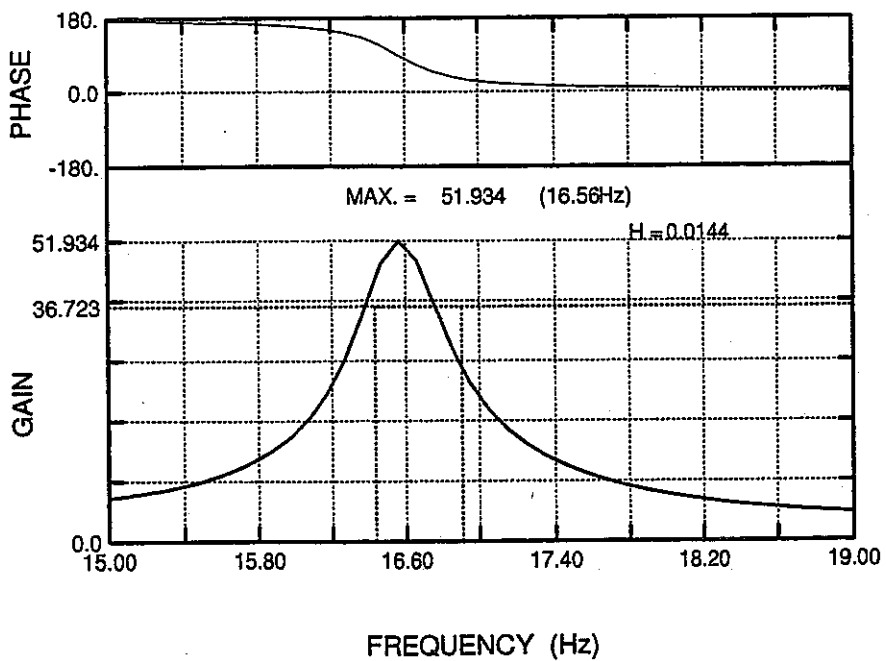




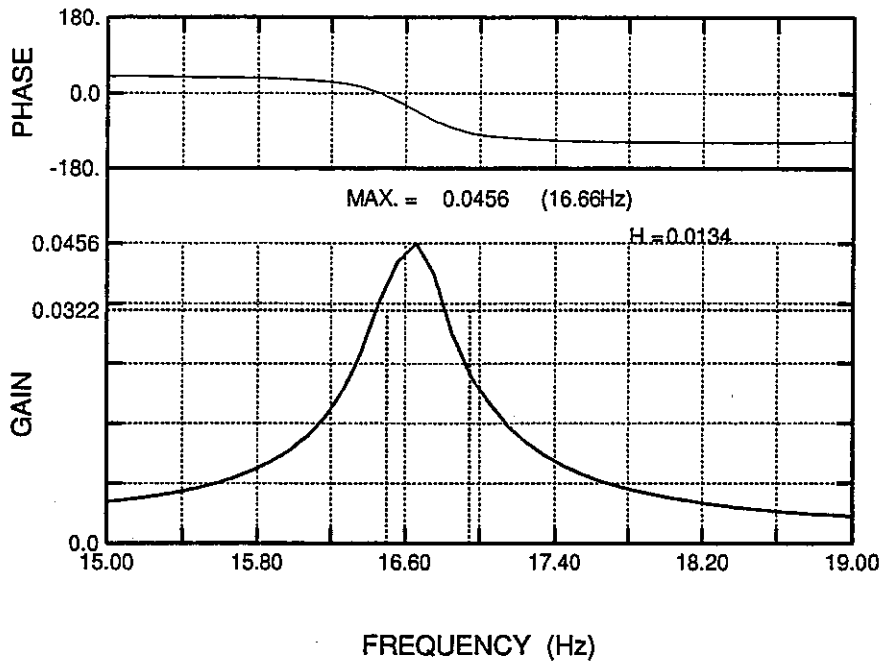
GI-3  $\frac{D2}{Ax1}$



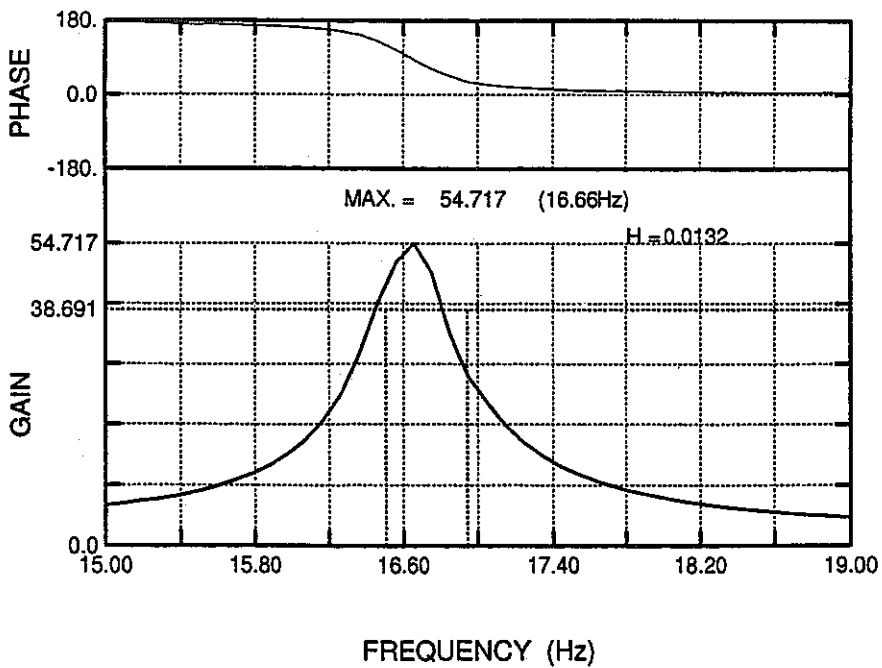
GI-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$



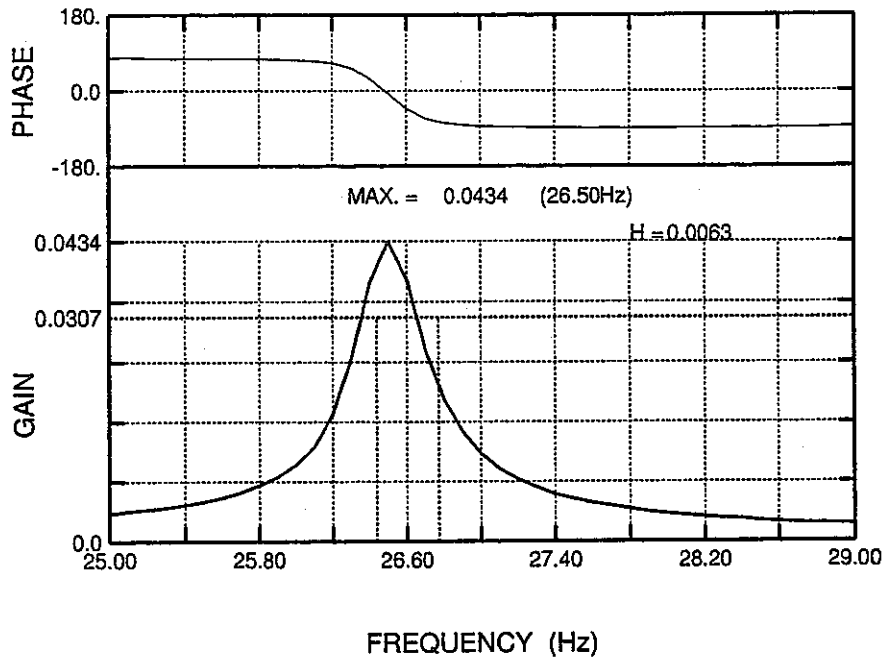
GI-4U2  $\frac{D2}{Ax1}$



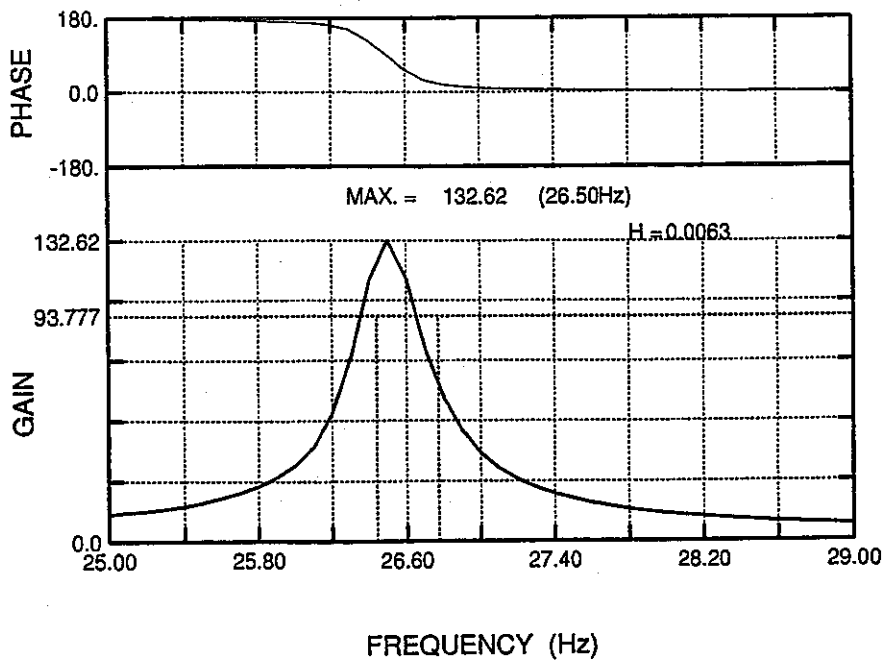
GI-4U2  $\frac{Ax6}{Ax1}$



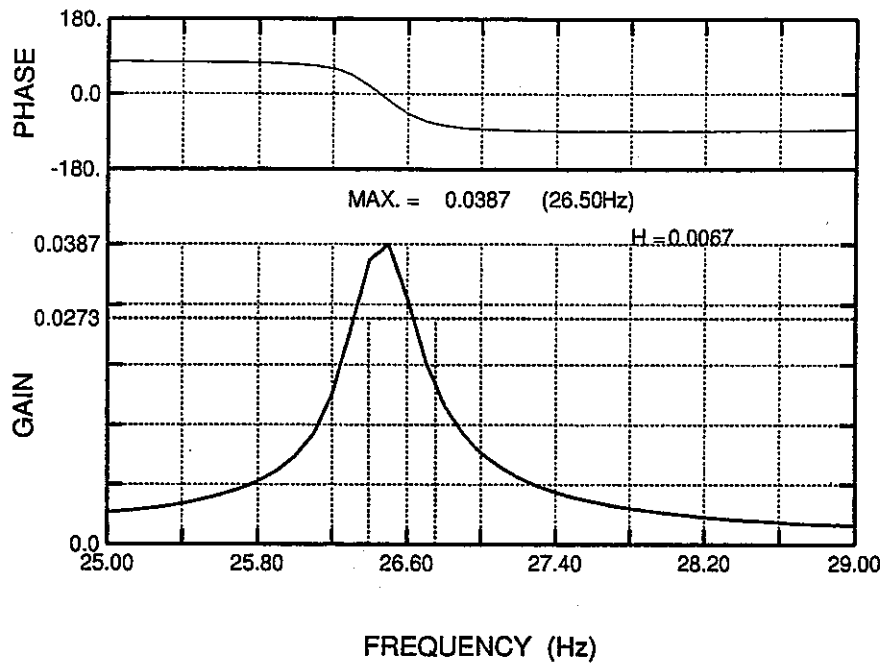
GP-1  $\frac{D2}{Ax1}$



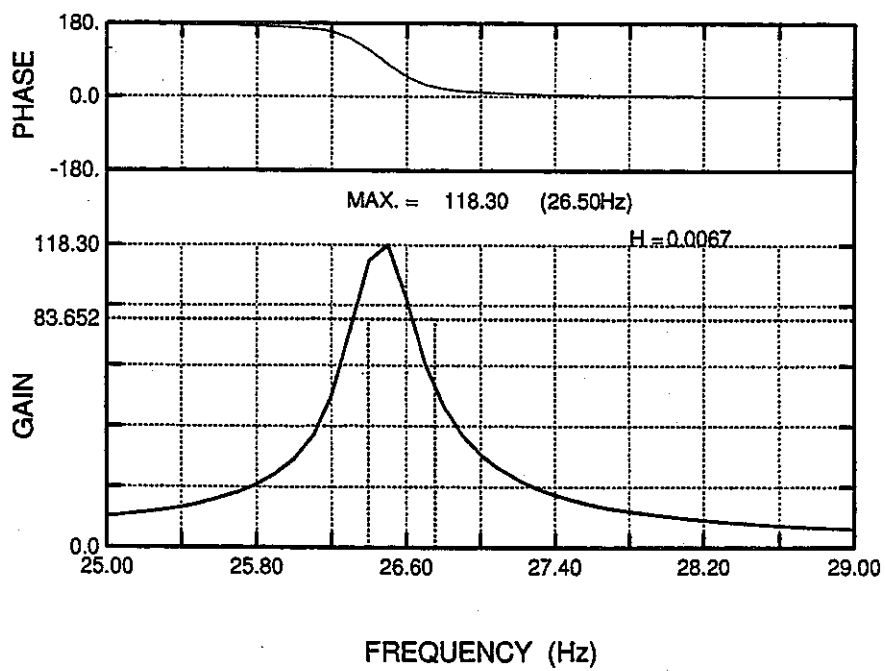
GP-1  $\frac{Ax6}{Ax1}$



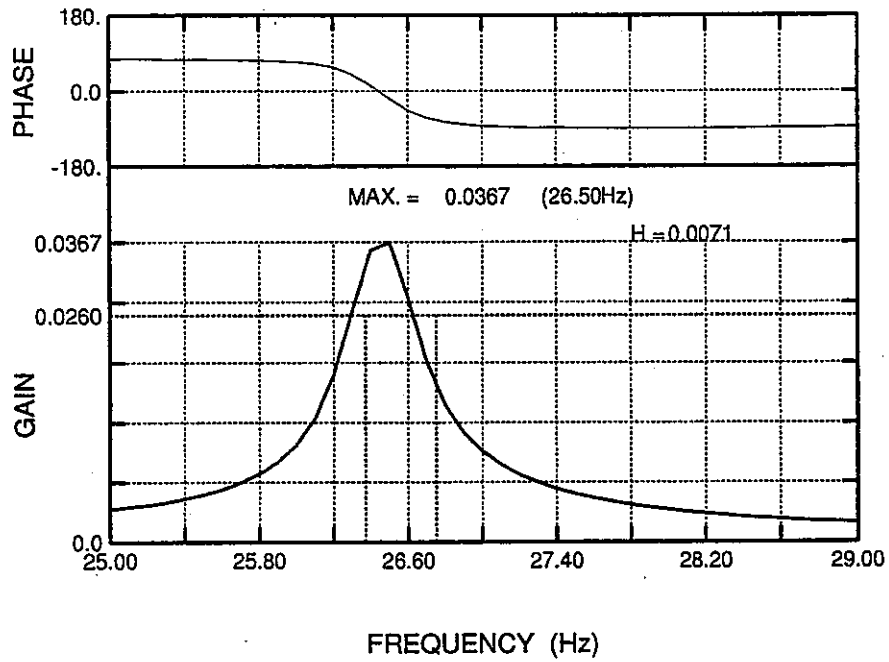
$$\text{GP-2 } \frac{D2}{Ax1}$$



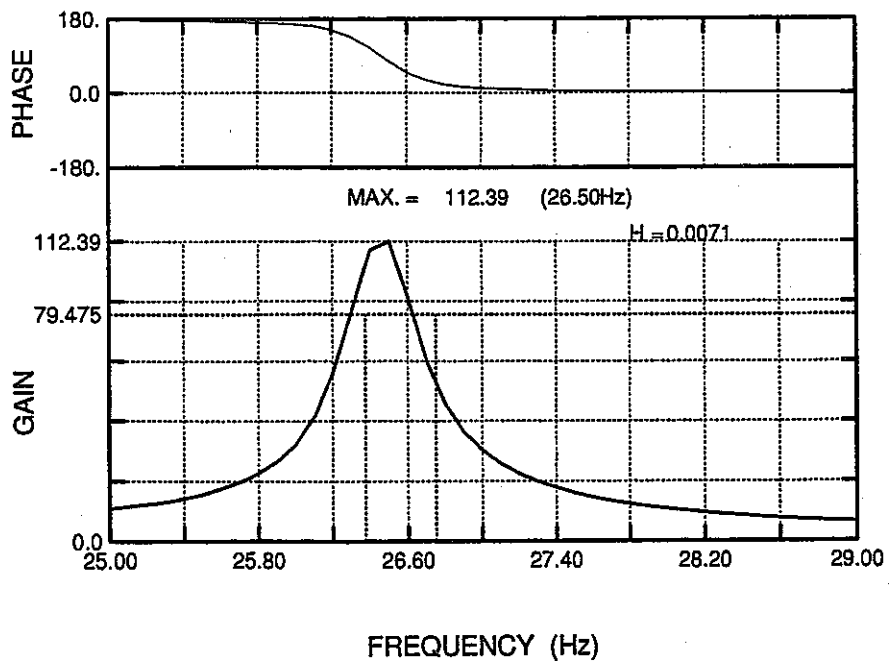
$$\text{GP-2 } \frac{Ax6}{Ax1}$$



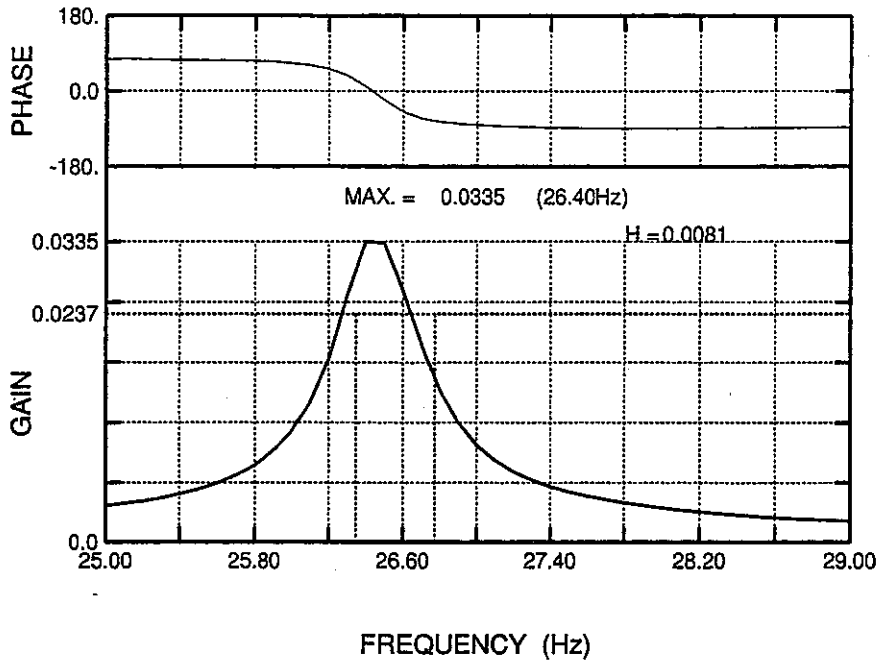
GP-3  $\frac{D2}{Ax1}$



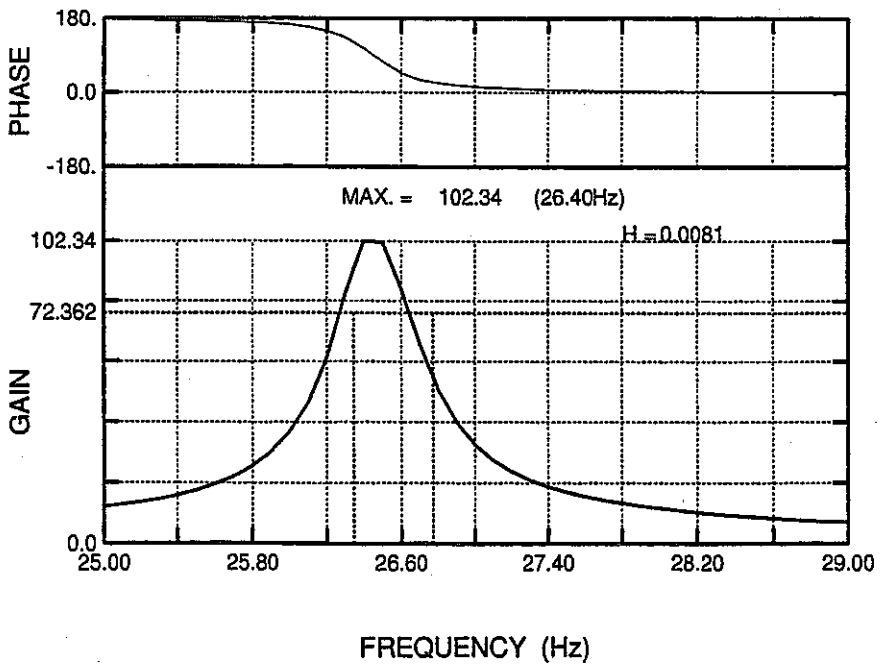
GP-3  $\frac{Ax6}{Ax1}$



GP-4  $\frac{D2}{Ax1}$



GP-4  $\frac{Ax6}{Ax1}$



## APPENDIX-H

応答倍率から計算される減衰比について



## 応答倍率から計算される減衰比について

多自由度系のモード減衰比  $h_i$  は正弦波掃引加振の加速度応答倍率より以下の式で計算される。

$$h_i = \frac{1}{2D}$$

$$D = \frac{\alpha_R}{\beta \alpha_I}$$

ここで、 $\beta$  は応答加速度の計測点のモーダル変位を1で正規化した場合の刺激係数

$\alpha_I$  は入力加速度

$\alpha_R$  は応答加速度

を示す。

今、ギャップ部がピン支持と $\infty$ の刺激係数は固有値解析より

$$\beta_{GP} = 1.208$$

$$\beta_{GI} = 1.295$$

を得る。両者の刺激係数の差は7%程度と小さい。本文図 4.1-5(1/2)及び図 4.1-5(2/2)よりギャップのある場合の加速度応答倍率から減衰比を算出する場合、厳密には計測された加速度応答倍率に対して刺激係数の補正を行う必要がある。しかし、ピン支持(GP)とギャップ $\infty$ (GI)で刺激係数の差が小さいことから、両者の補正方法を同一としても差は小さいと判断される。加速度応答倍率と減衰比の関係は両者で一致していることから明らかである。一方、ギャップがある場合のはりの刺激係数は厳密に求められない。しかし、ギャップがあるはりの共振時の振動形状(いわゆるモード)はGPとGIの間にあると考えられること、GP、GIの刺激係数の差が小さいことから、両者のほぼ一致する加速度応答倍率から減衰比を直接推定してよいと考えられる。

変位応答倍率は加速度応答倍率に変換する必要がある。GP、GIの共振振動数を用いて変位応答倍率を加速度応答倍率に変換すると

$$f_{GP} = 26.5\text{Hz}$$

$$f_{GI} = 16.4\text{Hz}$$

$$(f_{GP}/f_{GI})^2 = 2.616$$

これは、減衰比1%の時の応答倍率の比に対応している。

$$\begin{aligned} D_{GP}/D_{GI} &= 0.063/0.027 \\ &= 2.333 \end{aligned}$$

これより、変位応答倍率から減衰比を求める場合は各ギャップに応じた共振振動数による補正を行う必要がある。このため、ギャップありのほりの減衰比を応答倍率から算定する場合は加速度応答倍率を使用する必要がある。

## APPENDIX-I

試驗結果 定常加振時刻歷波形(LPF30Hz)

