

保管番号

U. D. C.

発行年月日 1972 . 10 . 20

高エネルギー物理学研究所振動測定とその解析

担 当

伊藤哲次

渡辺弘之

山原 浩

所 長



清水建設株式会社研究所

高エネルギー物理学研究所振動測定とその解析

測定場所：筑波学園都市内高エネルギー物理学研究所内

測定日時：1972年9月27日(水)

概 要

筑波学園都市内に建設中の高エネルギー物理学研究所の諸施設は極めて安全性を強く要求されるものである。特に日本のように地震の多い所ではその耐震性が強く求められる。それ故本振動測定においては、周辺地盤及び重要機器が設置される建屋の卓越周期、固有周期を知るために常時微動測定を行った。又重要機器については自由振動測定を行うことにより、それらの固有周期、減衰定数を求めた。

次に得られた資料に基いて、特に安全性の強く要求される機器の振動解析を行い、それらの地震に対する安全対策の資料の一部とした。

目 的

本測定の目的は次のとおりとする。

(1) 地表における常時微動測定

施設上特に重要かつ安全性を要求される次の3地点の地盤の卓越周期を知るために、それぞれの地表上で常時微動測定を行った。

- i) 主リングと実験棟の継目の地点
- ii) ラースターと主リングの継目の地点
- iii) イオン源建屋前庭

(2) イオン源建屋屋上での常時微動測定

イオン源建屋には重要機器が入るため、その固有周期を知る目的で、建屋屋上において常時微動測定を行った。

(3) 重要機器の自由振動測定

特に安全性の強く要求される次の機器類については、振動解析の資料とするために、自由振動試験（人間加力による）を行い、それらの固有周期（1次）および減衰定数を測定した。

i) 高圧ステーション独立系

ii) コッククロフト独立系

iii) 高圧ステーションとコッククロフトの連成系

iv) 加速管

又振動解析の目的は次のとおり。

- (4) 特に地震時にその安全性が強く要求される重要機器類（高圧ステーション、コッククロフト、加速管）については、以上の振動測定から得られた資料に基いて地震時の振動モデル解析を行い、それらの安全対策の資料の一部とした。

測定方法

本測定ならびにその解析に使用した測定計器および計算機を図-1に示す。又測定点については図-2、3に示す。なお測定時の様子を写真-1～3に付す。

測定結果

地盤および建屋の常時微動測定波形およびそれらの周波数分析（パワースペクトル）結果を図-4～12に示す。又これら周波数分析の結果をまとめて表-1に示す。

以上の結果からもわかるとうり、地盤の卓越周期については、水平両成分とも測定点の違いによつて多少の差はあつても、0.17秒付近にあるものと言えよう。一方当敷地内いくつかの地点でのボーリングによる地盤調査によると、地表面から-7、8 m付近までは比較的軟かく、N値が10前後、更

に深い所でN値が急激に増している。それ故この表層の特性を重複反射理論により求めてみると、表層の卓越周期： T_n ，横波伝播速度： $V_s \div 150m/秒$ 程度，層厚： $H = 7m$ より

$$T_n = \frac{4H}{V_s} = \frac{4 \times 7}{150} \div 0.19 (\text{sec})$$

となり、常時微動測定より得られた値に近いものが計算からも求められる。

次にイオン源建屋屋上での常時微動測定結果からは、H-1（建屋短手方向、図-3参照）およびH-2（長手方向）の両方向共、卓越周期が0.21秒付近にある。それ故建屋の固有周期が両成分共ほぼ0.21秒付近であるものと考えられるが、本構造物の様にかなり剛な建屋の正確なる固有周期は常時微動測定のみからは断定しにくい。しかしながら、地盤の卓越周期が0.17秒付近、建屋の固有周期が0.21秒付近と、建屋と地盤の卓越周期が0.2秒前後近くにあるので、実際の地震時においてもこの付近の周期成分が卓越した地震波が入って来るものと思われる。それ故建屋内の重要機器類で地震時に被害を出来る限り少なくする為には、それら機器類の固有周期を0.2秒付近から遠ざける必要があろう。

重要機器類の自由振動測定より得られた変位波形を図-13～17に、又それらの波形から読み取った、固有周期および減衰定数を表-2に示す。

これらの結果からもわかるとうり、高圧ステーションおよびコッククロフトの減衰定数はH-1，H-2両方向共非常に小さく、又固有周期も比較的大きく柔かい構造体をしている為、地震時にはかなり大きな振幅に達するものと思われる。一方加速管については、自由振動波形からもわかるとうり、減衰定数は非常に大きな値を示している。それ故マンパワー（man-power）による繰り返し荷重を与えると、構造体自身の固有周期が現われず、繰り返し荷重自体の周期が現われている（図-17参照）。一方高圧ステーションとコッククロフトの連成系については、H-2方向にはほとんど現われず、H-1方向についてのみ現われている。しかしながらH-1方向の固有周期

は両機器共ほぼ0.33秒であることと、継手パイプをゆるめた後での自由振動波形（図-13）においてもH-1方向の波形に連成系のものが見られることからすると、高圧ステーションとコッククロフトの連成系ではなくて、高圧ステーション自身のもつ別の振動波形との連成によつて現われたものと思われる。

振 動 解 析

以上得られた測定結果に基いて、特に安全性が強く要求される、高圧ステーション、コッククロフト、加速管について地震応答解析を行うことにする。モデルとしては、すべて1質点系から成るものとし、各機器単独の場合の応答解析、ならびに高圧ステーションとコッククロフトの連成系からなる場合の応答解析を行い、地震応答時の最大加速度、変形、さらにその変形を静的変形と見なした場合の等価荷重を参考までに求めた。なお入力地震波としては、地盤および建屋の常時微動測定結果を参考にして、建屋床上で測定され得る地震波を考慮した。すなわち地震波の応答スペクトルのピーク値が0.2秒付近で最大となる地震波：広尾 N-S 1970.1.21 最大値403.4 gal（図-18, 19参照）と、筑波学園都市に比較的近い東海村で観測された地震波：東海 E-W 1963.5.8 最大値55.9 gal（図-18, 20参照）を水平方向に対しての地震波とした。又加速管については上下方向が問題となる為、上下方向の地震波：釧路 U-D 1962.4.23 最大値381.4 gal（図-21）を使用した。

高圧ステーションおよびコッククロフトのモデル、諸定数は図-22、および30頁に、又加速管については31頁に示す。

以上のデータから応答解析して得られた、解析結果を表-3に、又解析波形を参考までに付記する。

これらの結果からもわかるとおり、広尾地震の様な大地震が来た場合、高圧ステーションおよびコッククロフトに大変形が生じて、支えのガイシが耐

えられなくなることは十分考えられる。又 H-2 方向の連成系については、高圧ステーション側の重量が軽い為、単独の場合に比べて極端に大きくなっている。H-1 方向については継手パイプの剛性が大きい為、両方共全く同じ動きをしている。それ故単独として考えた場合の応答値とはほぼ一致している。又加速管については減衰定数が非常に大きい為、釧路のような大地震でも余り大きな変形を示さない。

結 論

今回の実測と振動解析を通して明らかになった事は、地盤の卓越周期がほぼ 0.17 秒程度である事から、地震時の安全性が強く要求される構造物は出来る限りこの周期付近の固有周期を持たないことが望ましい。

又高圧ステーションおよびコッククロフトについては、それらの減衰定数が 1% 以下と非常に小さいことと、剛性が比較的小さい為、柔らかな構造体となつてゐる。それ故大地震時には大変形を起こすことは十分考えられるので、特に安全対策の面からの補強が必要と思われる。一方加速管については減衰が非常に大きい為、大地震時でもその変形が余り大きくならない。しかしながら、その構造体自身は複雑で余り強度があるとも考えられないので、出来るものであれば何らかの補強をした方が良いと思われる。

表 - 1 地盤および建屋の常時微動測定結果

卓越周期 sec

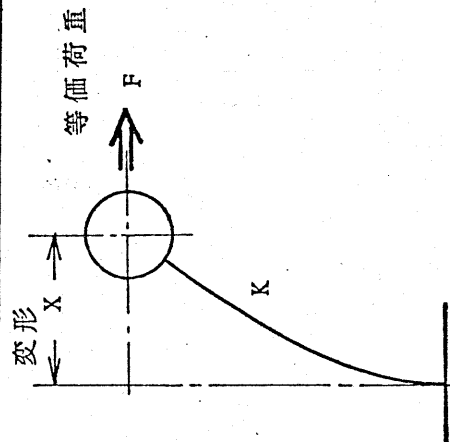
	N - S	E - W	上下
主リングと実験棟の継目の地点	0.10 0.13	0.10 0.36	—
プースターと主リングの継目の地点	0.17	0.17	—
イオン源建屋前庭	0.17 0.27 0.37	0.17 0.21	0.14 0.21
	H - 1	H - 2	
イオン源建屋屋上	0.21 0.13 0.16	0.21 0.13 0.16	—

表 - 2 自由振動 測定結果

	固有周期 sec		減衰定数	
	H - 1	H - 2	H - 1	H - 2
高圧ステーション	0.33	0.30	0.009	0.007
コッククロフト	0.33	0.23	0.007	0.007
加速管	0.46	—	0.5	—

表 - 3 解析結果

地震波		東海 E-W 1963.5.8			広尾 N-S 1970.1.21		
方向		H-1			H-2		
モデル		連成系	1 質点系		連成系	1 質点系	
高圧ステーション		最大加速度 gal	250.0		272.3	1113	
		Max.X ₁ (cm)	0.70		0.62	3.13	
		Max.F ₁ (kg)	153		167	681	
コッククロフト		最大加速度 gal	—		278.9	—	
		Max.X ₂ (cm)	—		0.44	—	
		Max.F ₂ (kg)	537		671	—	
継手パイプ		Max.X ₁₋₂ (cm)	—		1.21	—	
		Max.F ₁₋₂ (kg)	—		106	—	
地震波			* 1	* 2			
		最大加速度 gal	42.88	191.6			
		Max.X(cm)	0.16	0.49			
加速管		Max.F(kg)	15.6	47.7			



地震波

* 1 : 東海 E-W 1963.5.8

* 2 : 釧路 U-D 1962.4.23

図 - 1

測定系統

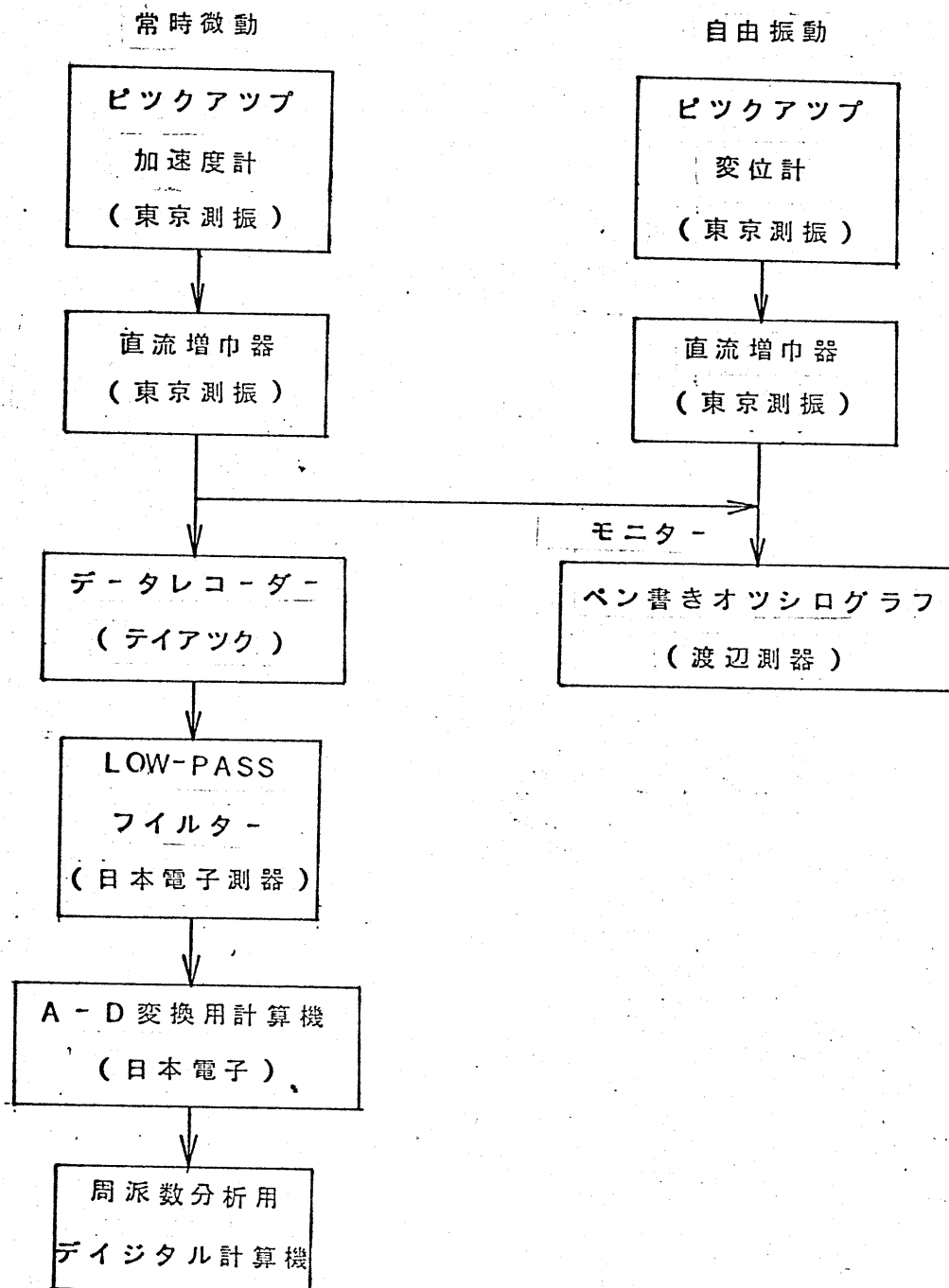
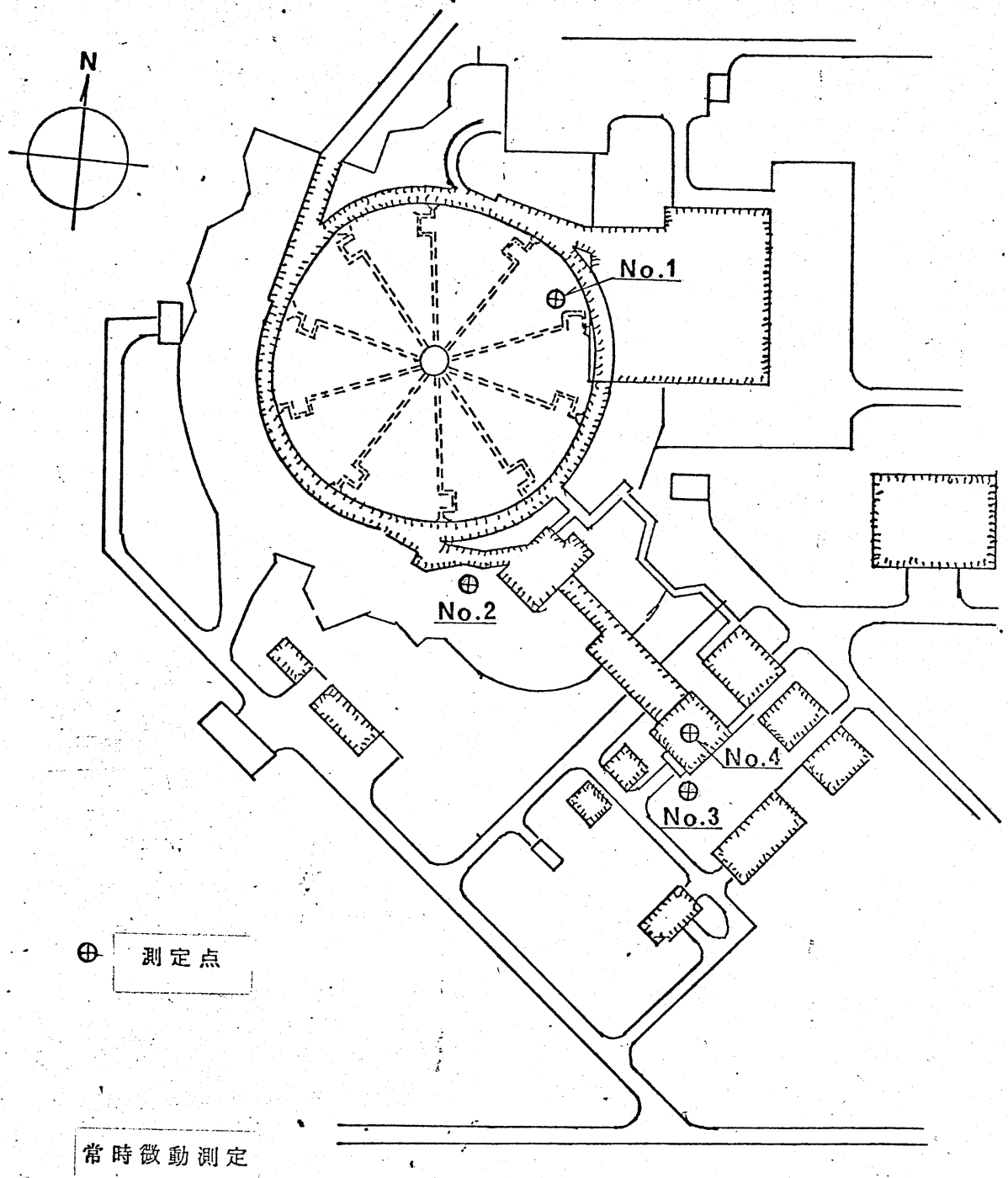


図 - 2

実験概要図



- No. 1 主リングと実験棟の継目の地点
- . 2 プラスターと主リングの継目の地点
- . 3 イオン源建屋前庭
- . 4 イオン源建屋屋上

図 - 3 イオン源建屋

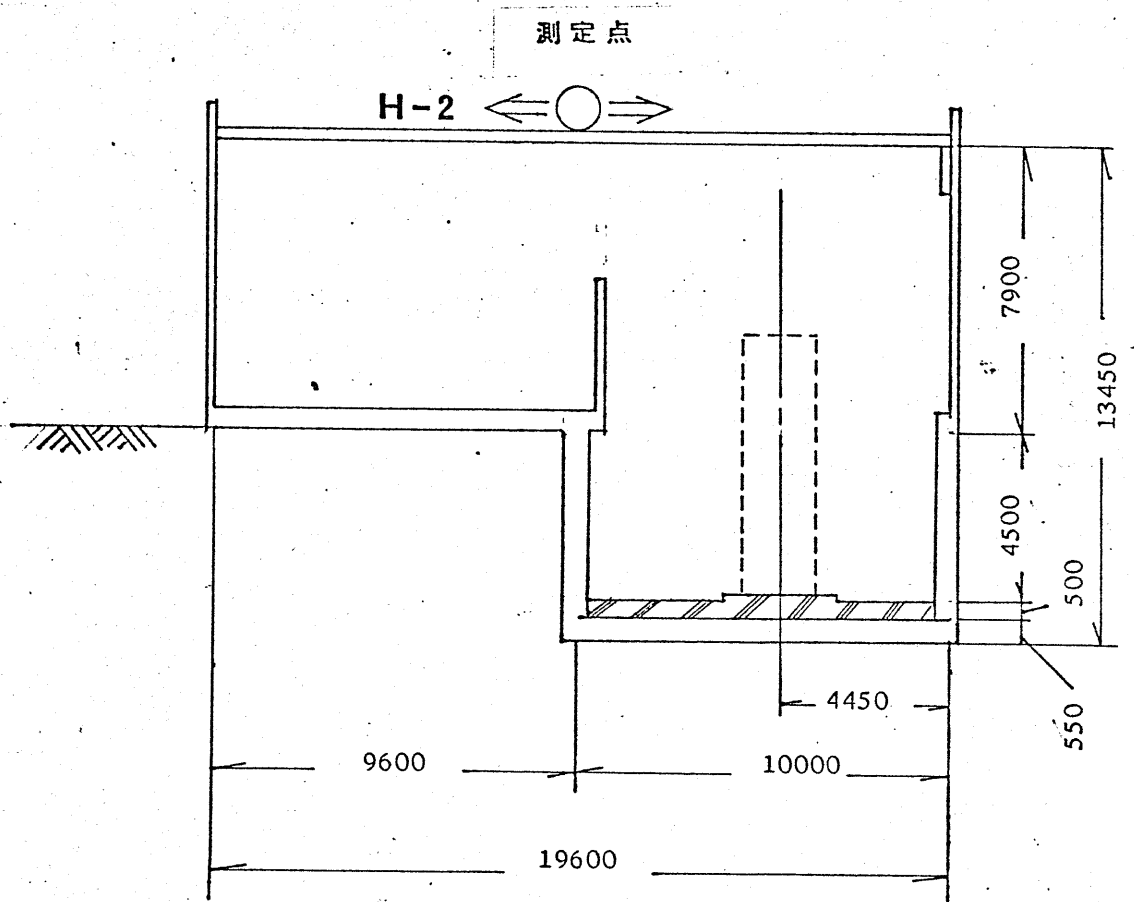
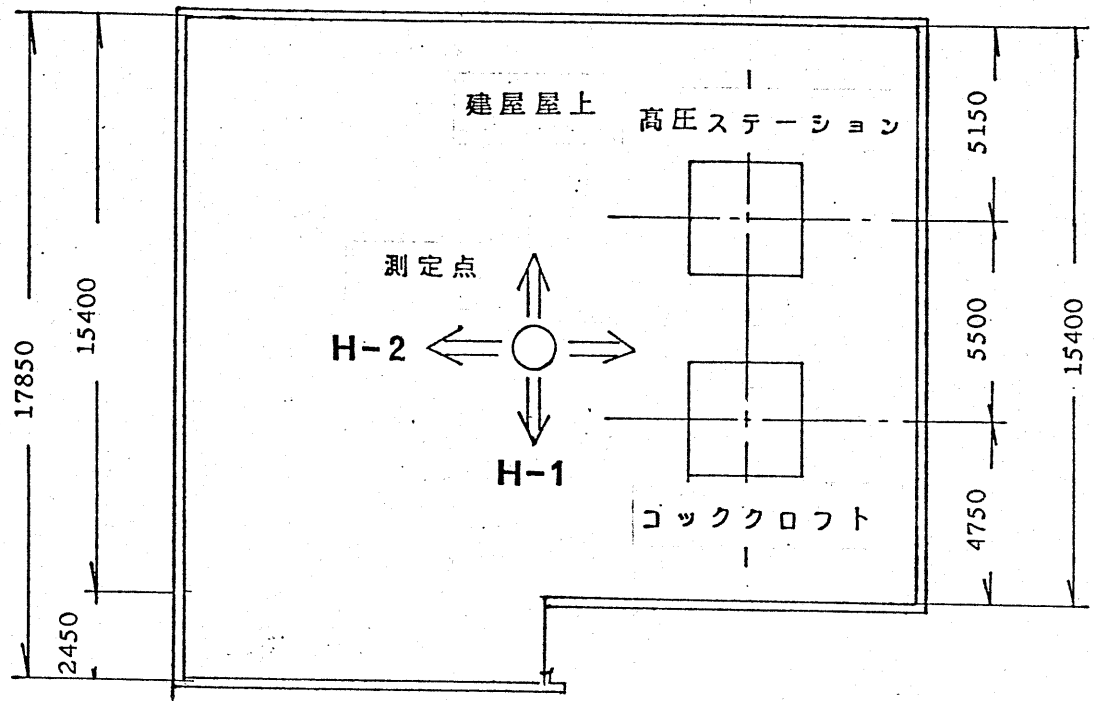
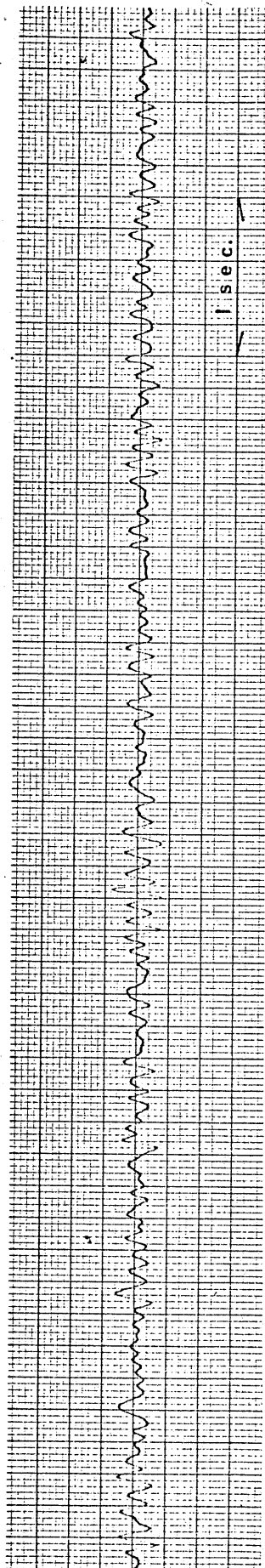


図 - 4 常時微動波形 主リングと実験棟の継目の地点

加速度波形

N - S

倍率 0.083 gal/cm



E - W

倍率 0.083 gal/cm

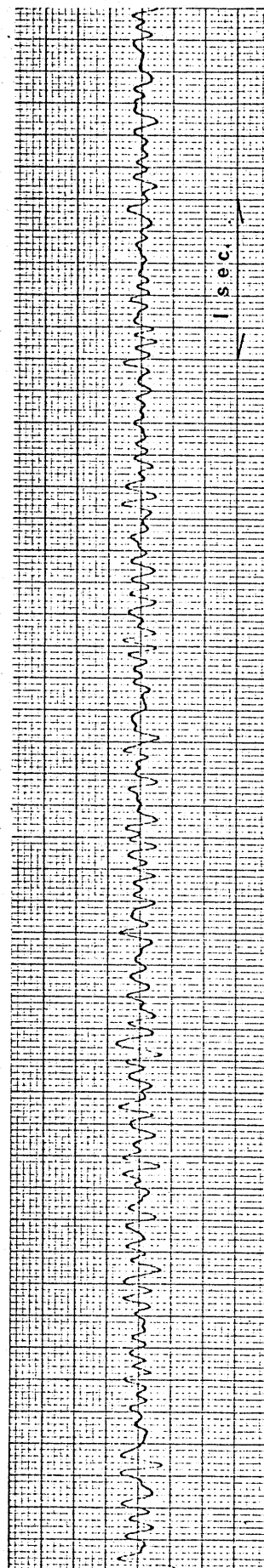
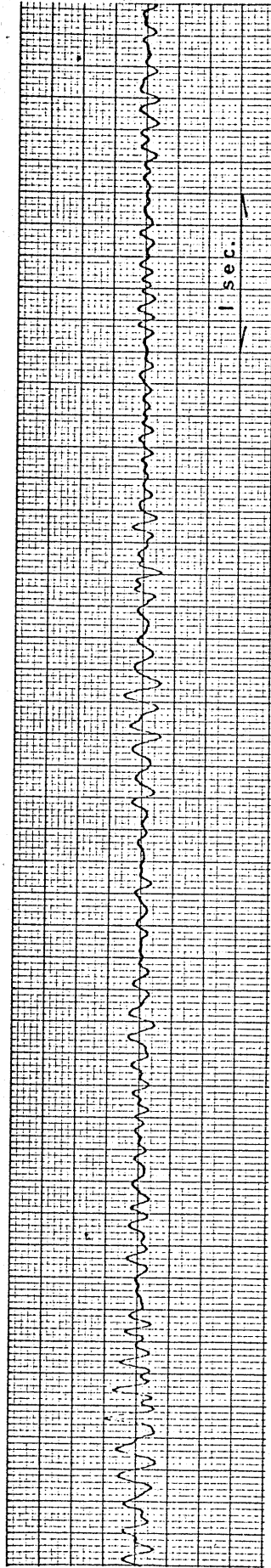


図 - 5 常時微動波形 プースターと主リングの継目の地点

加速度波形

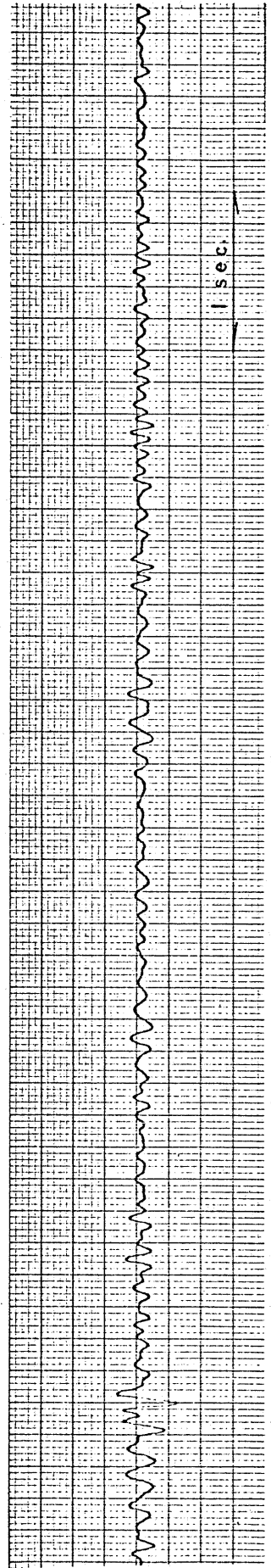
N - S

倍率 0.10 gal/cm



E - W

倍率 0.10 gal/cm



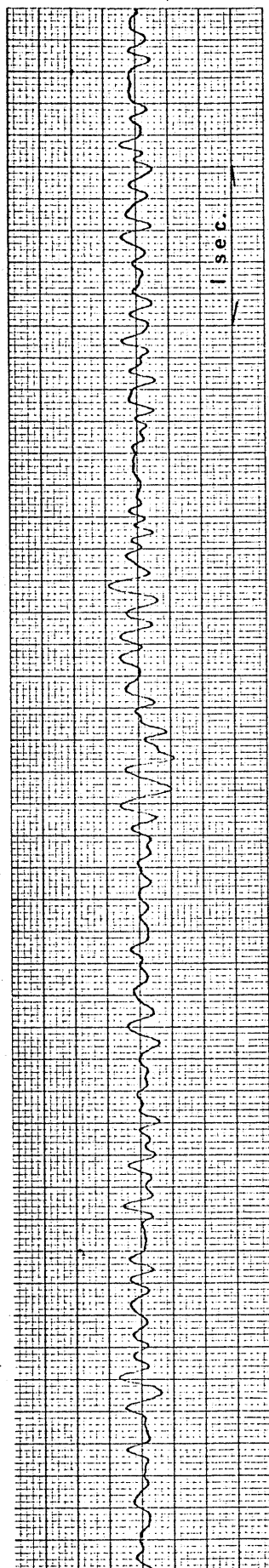
イオン源建屋前庭

図 - 6 常時微動波形

加速度波形

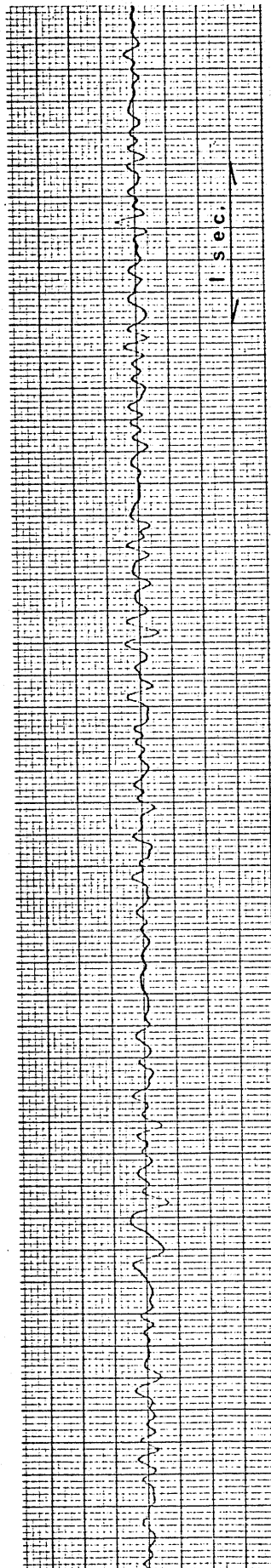
N - S

倍率 0.10 gal/cm



E - W

倍率 0.10 gal/cm



イオン源建屋前庭

常時微動波形
加速度波形

上下
倍率 0.666 gal/cm

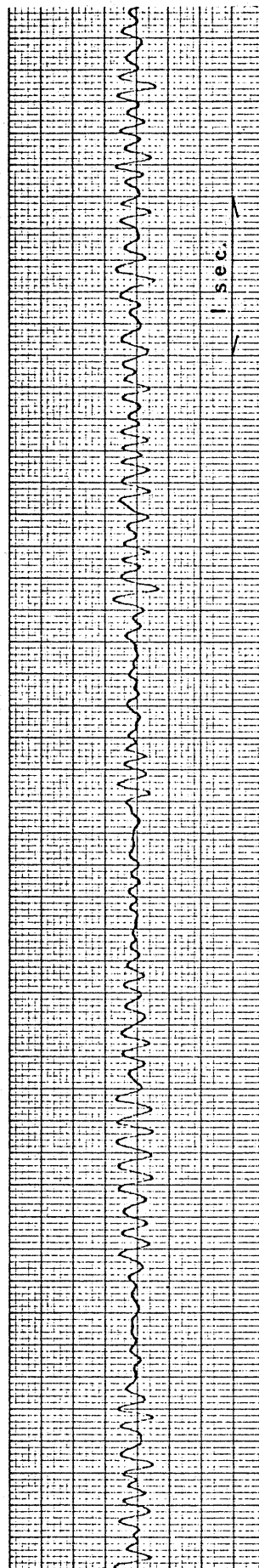
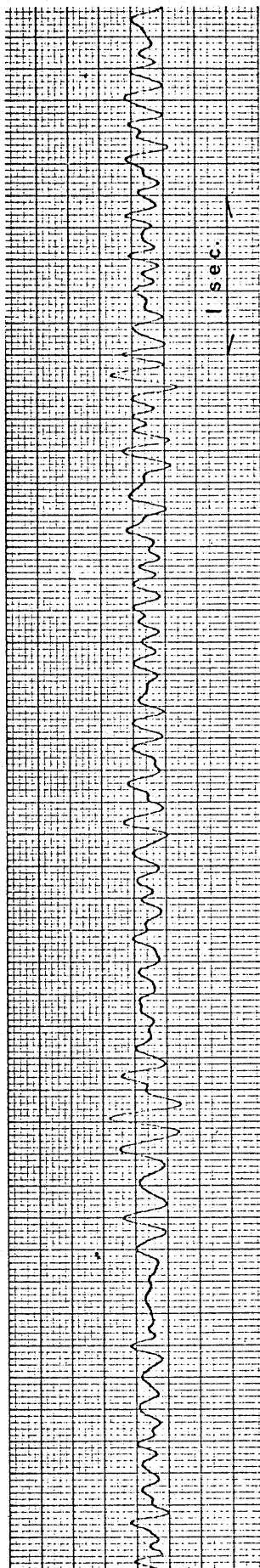


図 - 8 常時微動測定波形
イオン源建屋屋上
変位波形

H - 1

倍率 0.0025 mm/cm



H - 2

倍率 0.0025 mm/cm

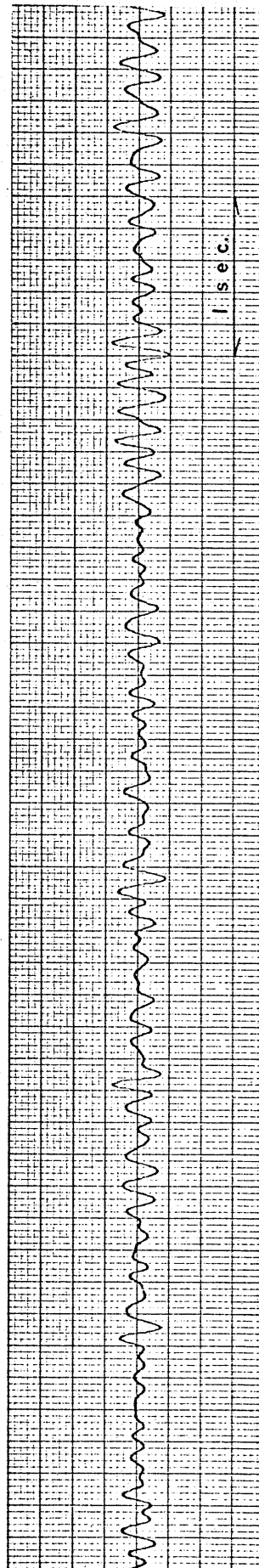


図 - 9 パワー スペクトル

主リングと実験棟の継目の地点

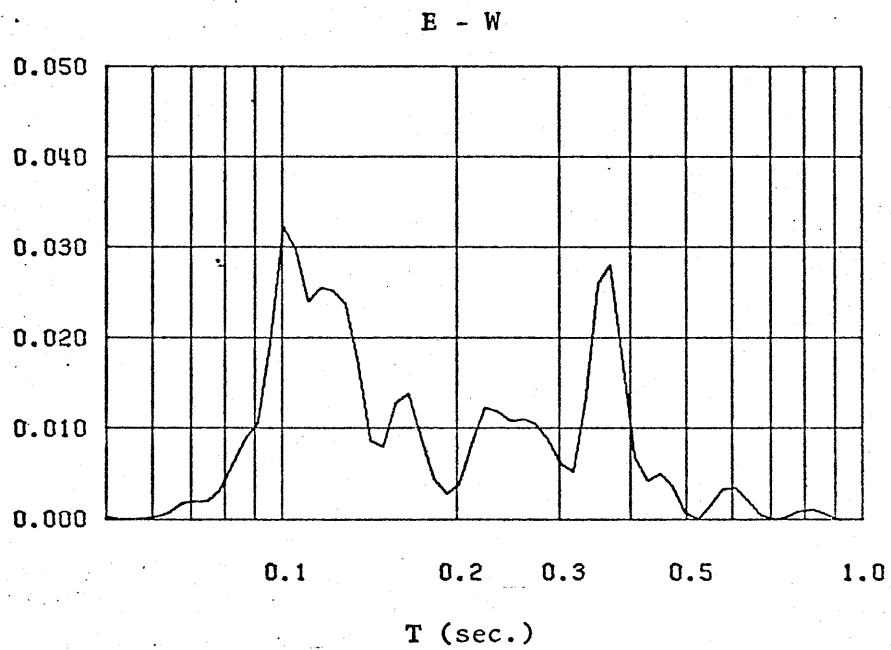
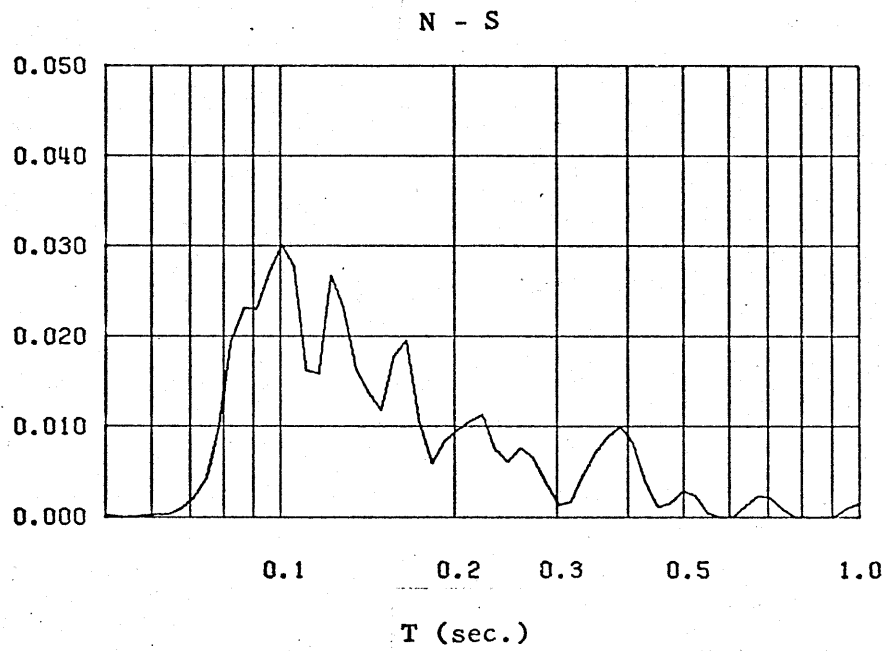


図 - 10 パワー スペクトル
 ラースターと主リングの継目の地点

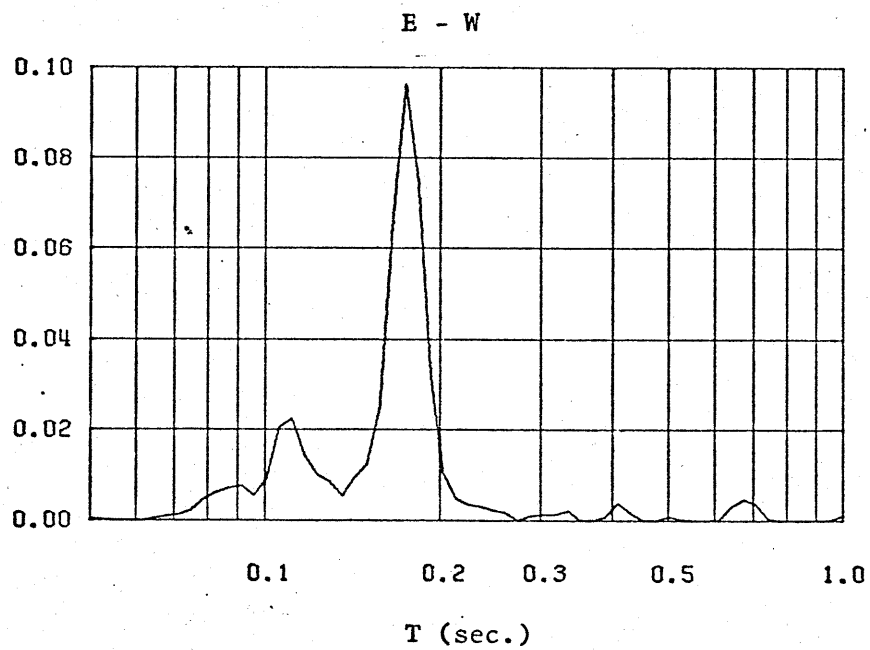
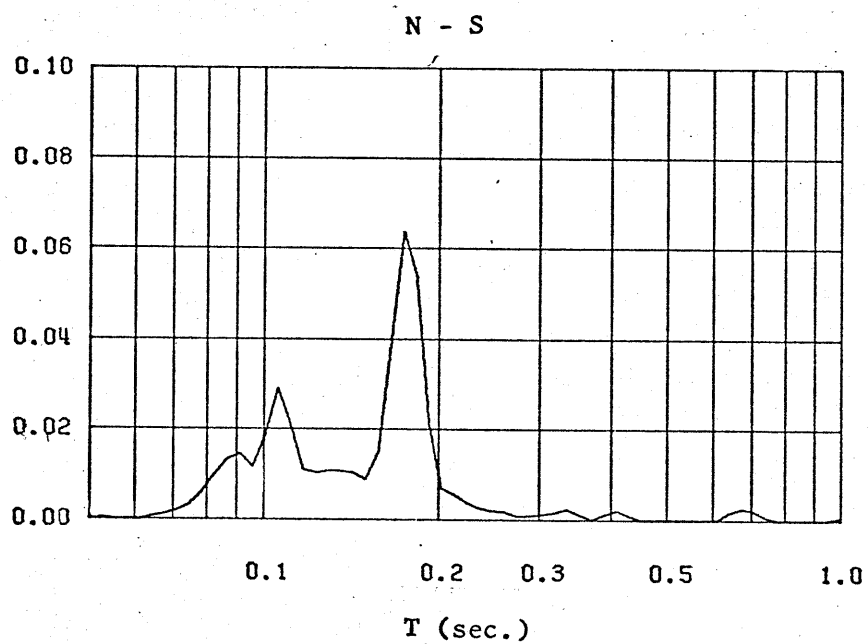
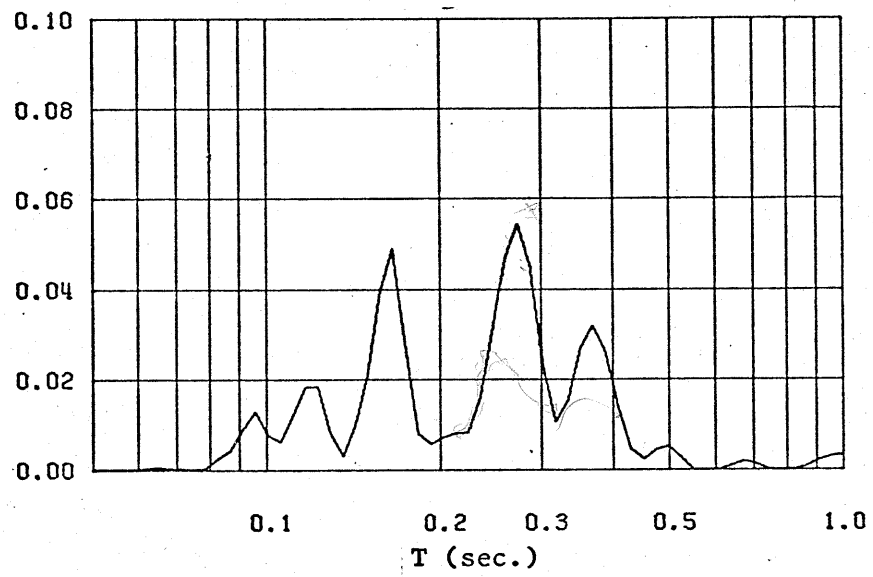


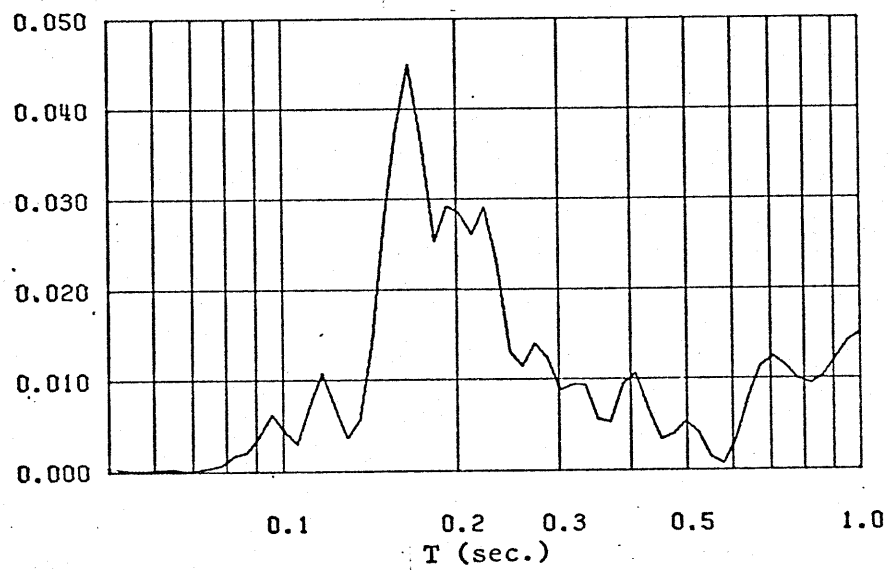
図 - 11 パワー スペクトル

イオン源建屋前庭

N - S



E - W



上下

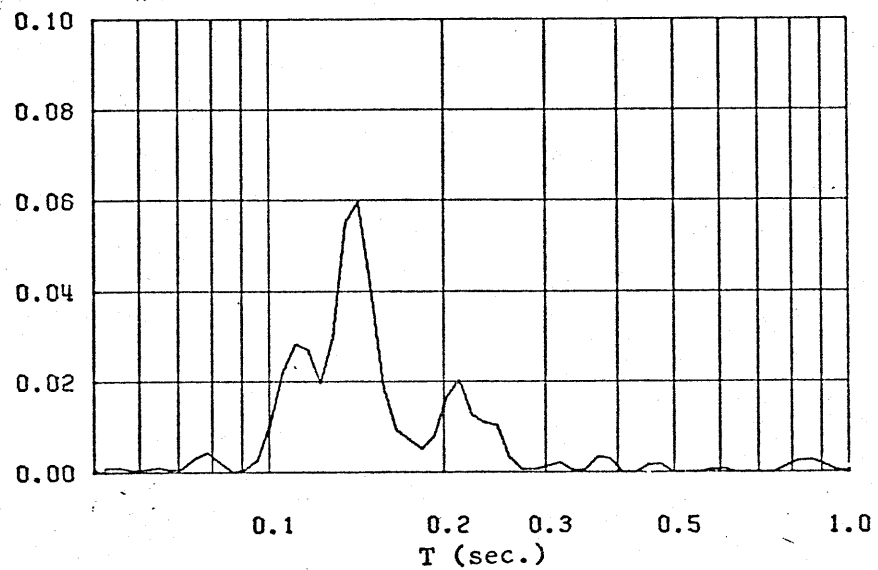
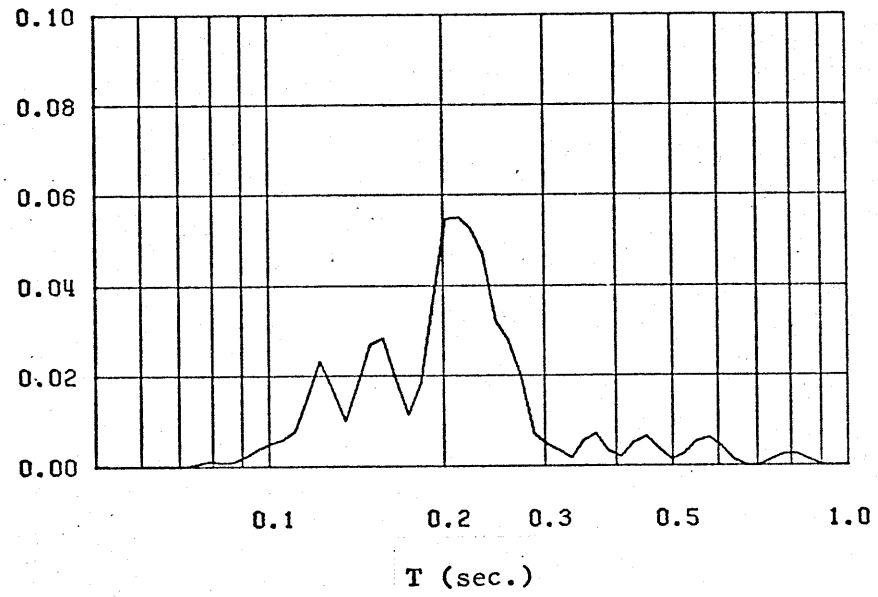


図 - 12 パワー スペクトル

イオン源建屋屋上

H - 1



H - 2

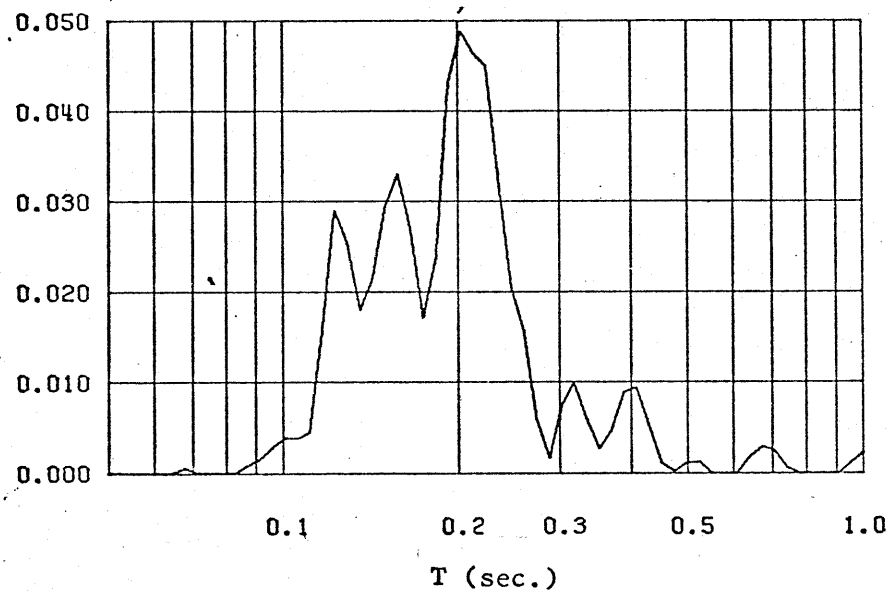
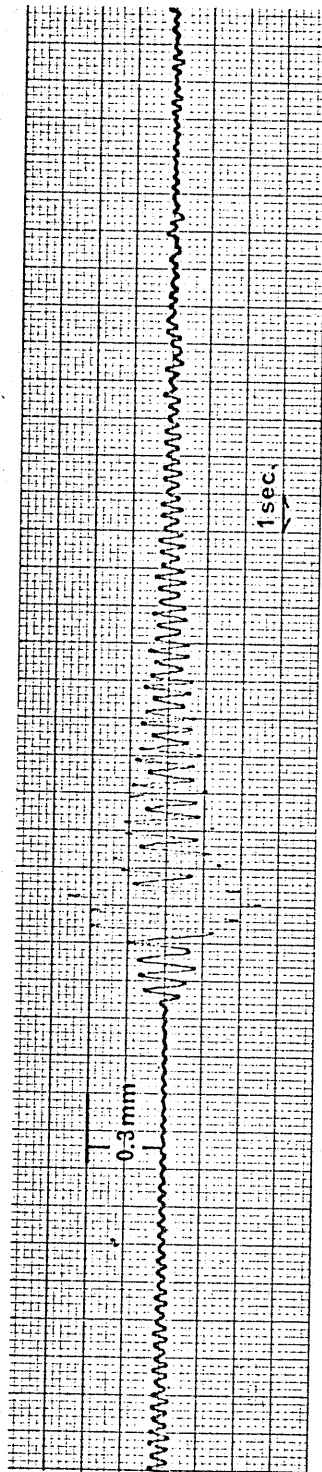


図 - 13 自由振動波形 高圧ステーション 加振方向 H - 1
変位波形

H - 1



H - 2

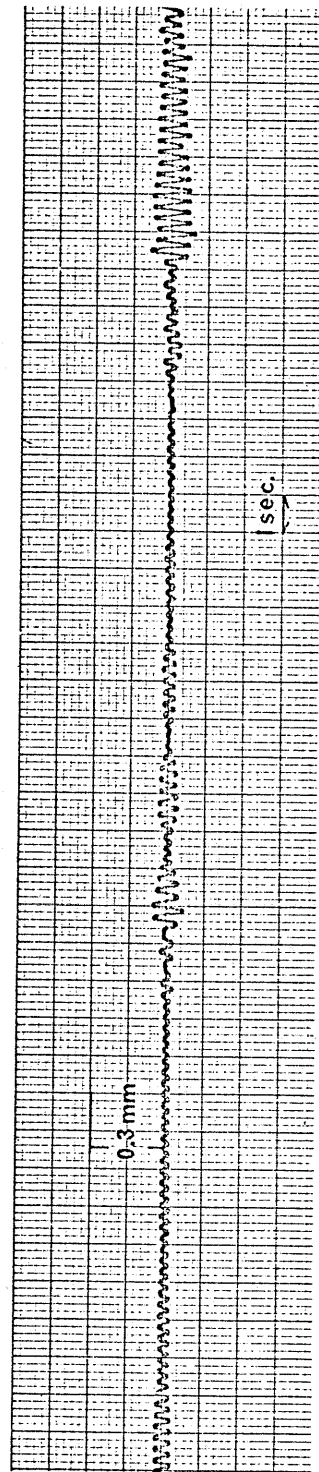
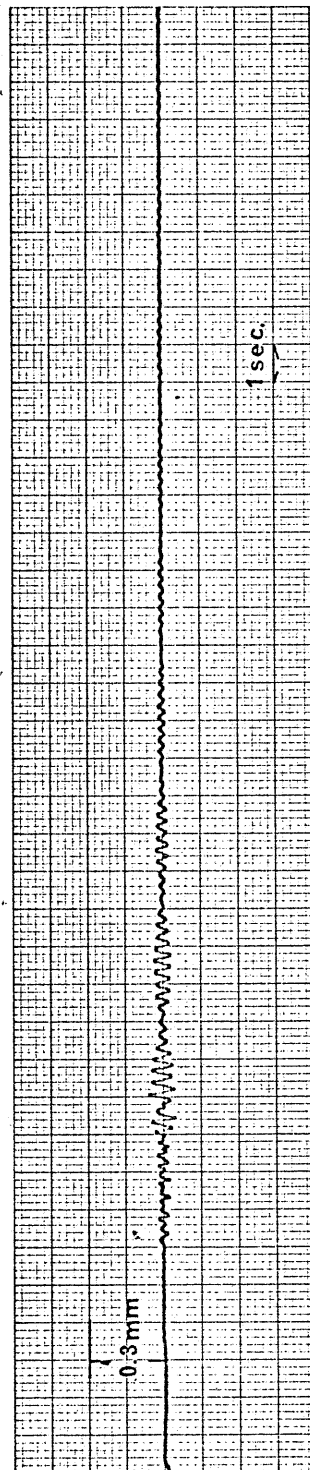


図 - 14 自由振動波形 高圧スレーション 加振方向 H - 2

変位波形

H - 1



H - 2

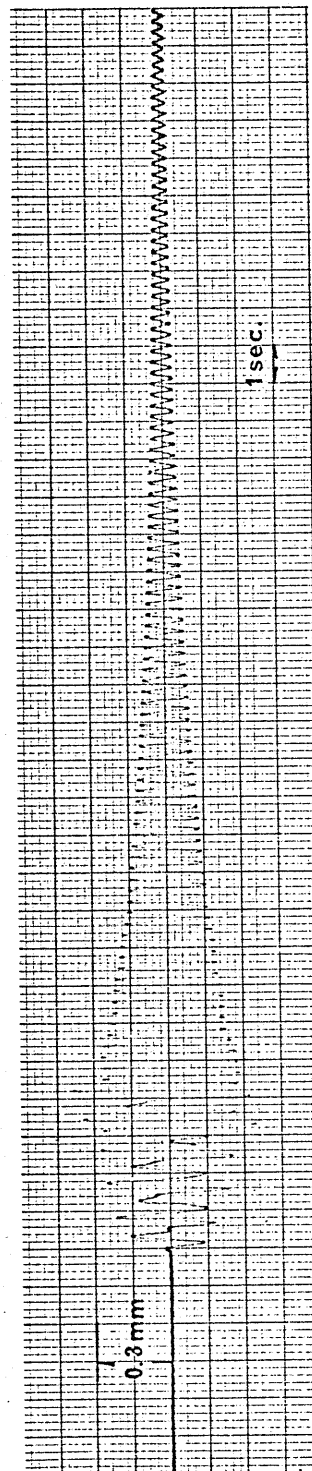
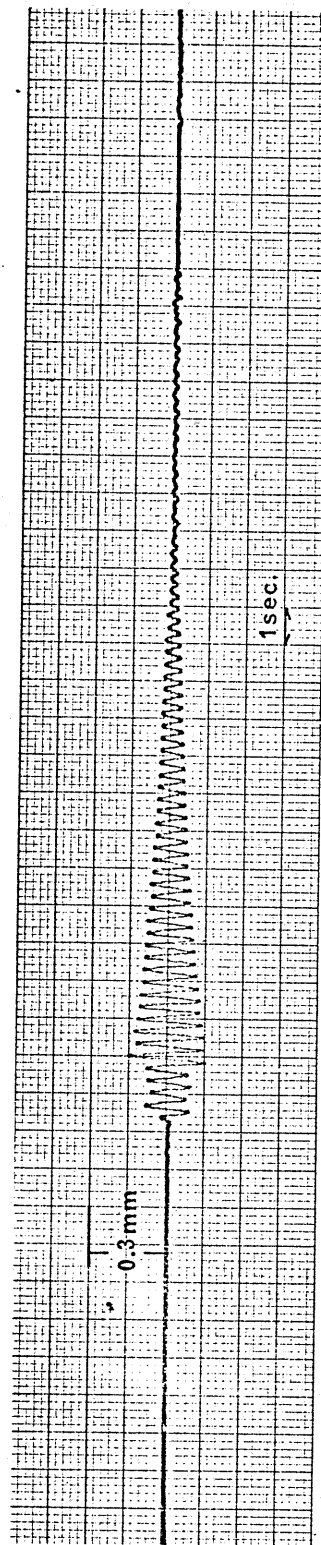


図-15 自由振動波形 コッククロフト
変位波形

H-1 加振方向 H-1



H-2 加振方向 H-2

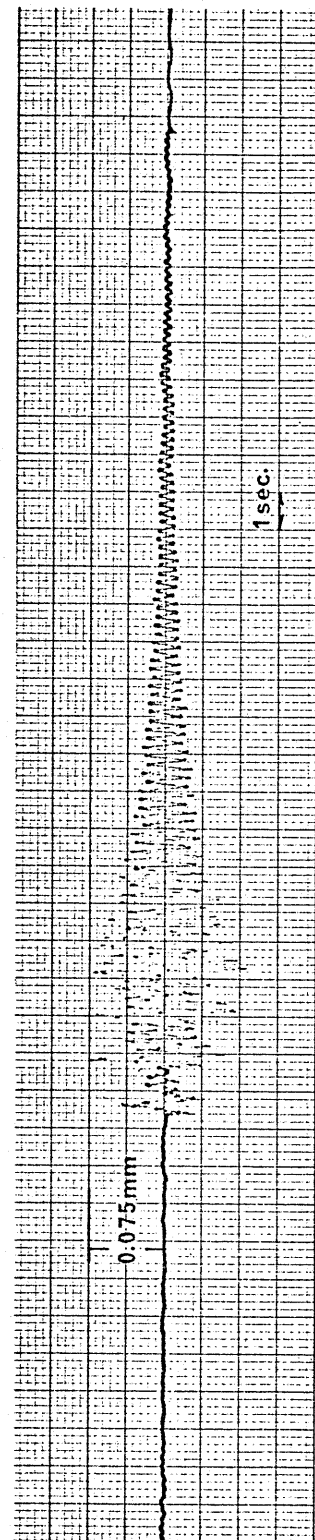
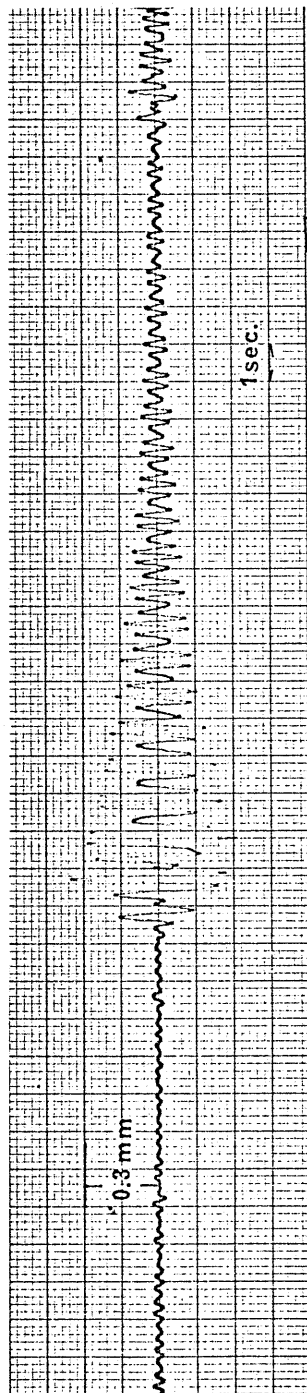


図-16 自由振動波形 高圧ステーションとコッククロフトの連成系 加振方向 H-1
変位波形

H-1



H-2

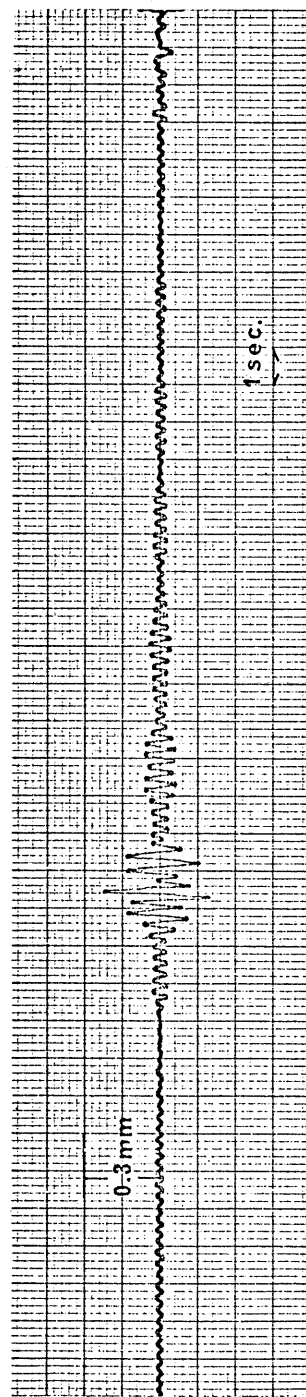
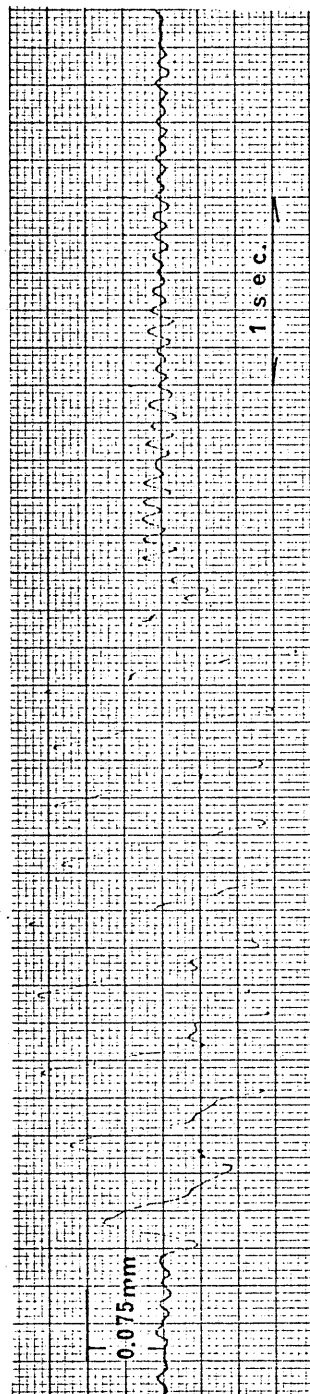


图-17 自由振動波形，
變位波形 加速管

水平



平水

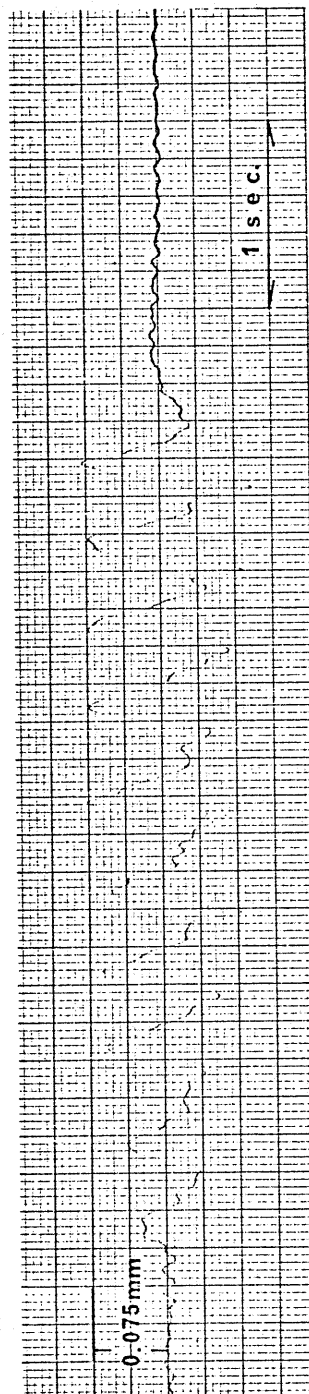


図 - 18 入力地震波

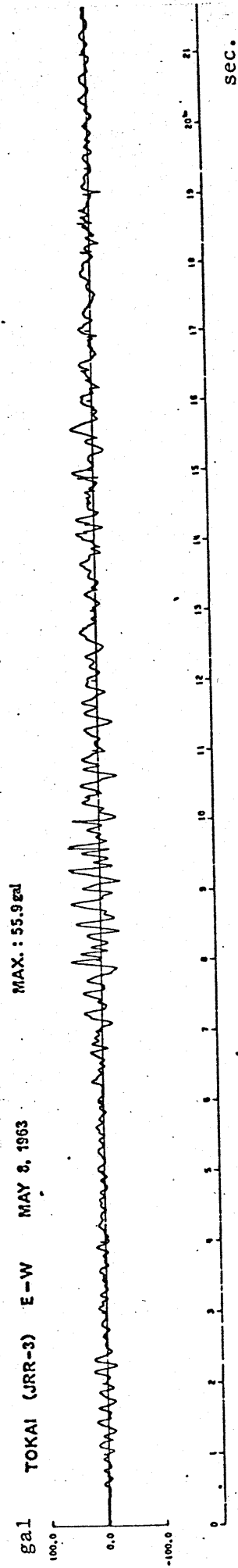
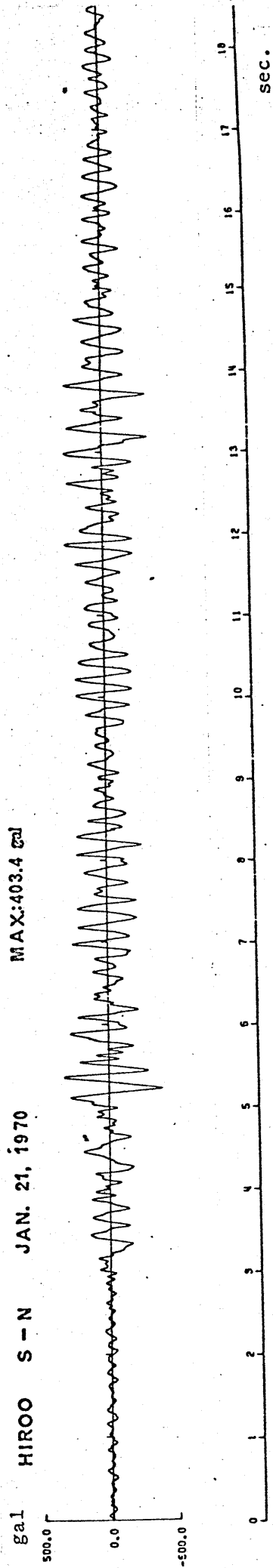


図-19 応答スペクトル

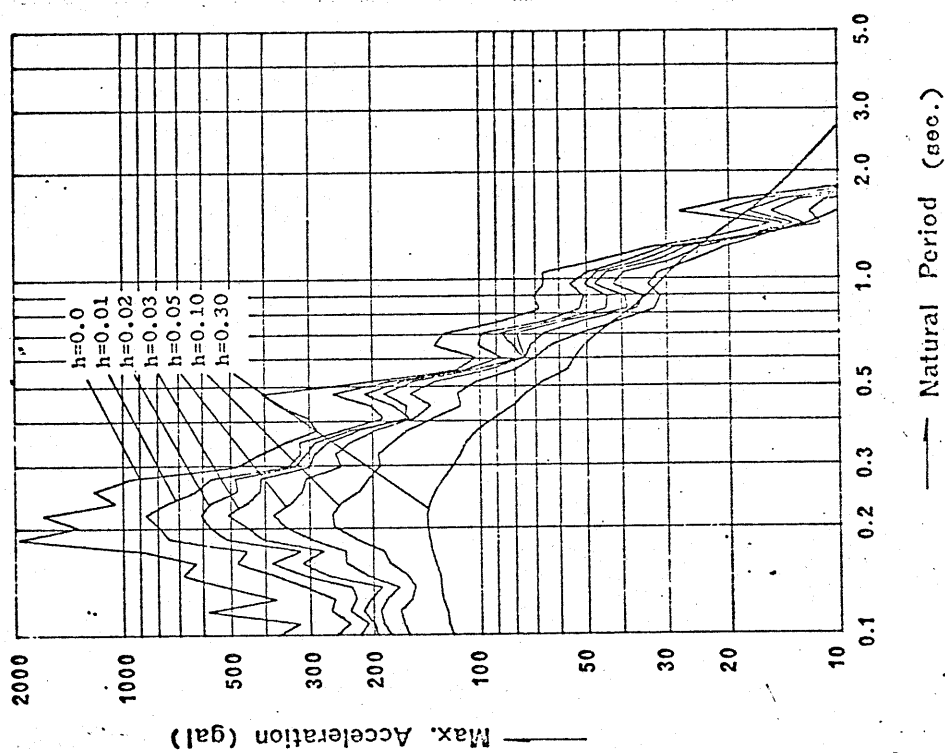
HIROO

S-N

$\ddot{Z}_{max} = 100 \text{ gal}$

$T_{max} = 20 \text{ sec.}$

ACCELERATION SPECTRA



DISPLACEMENT SPECTRA

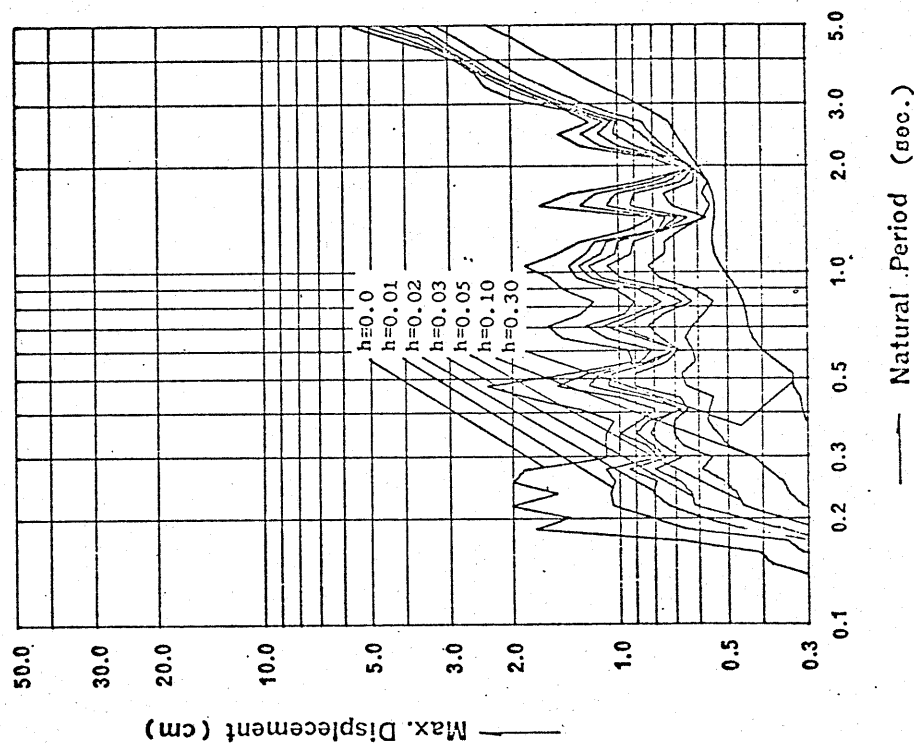
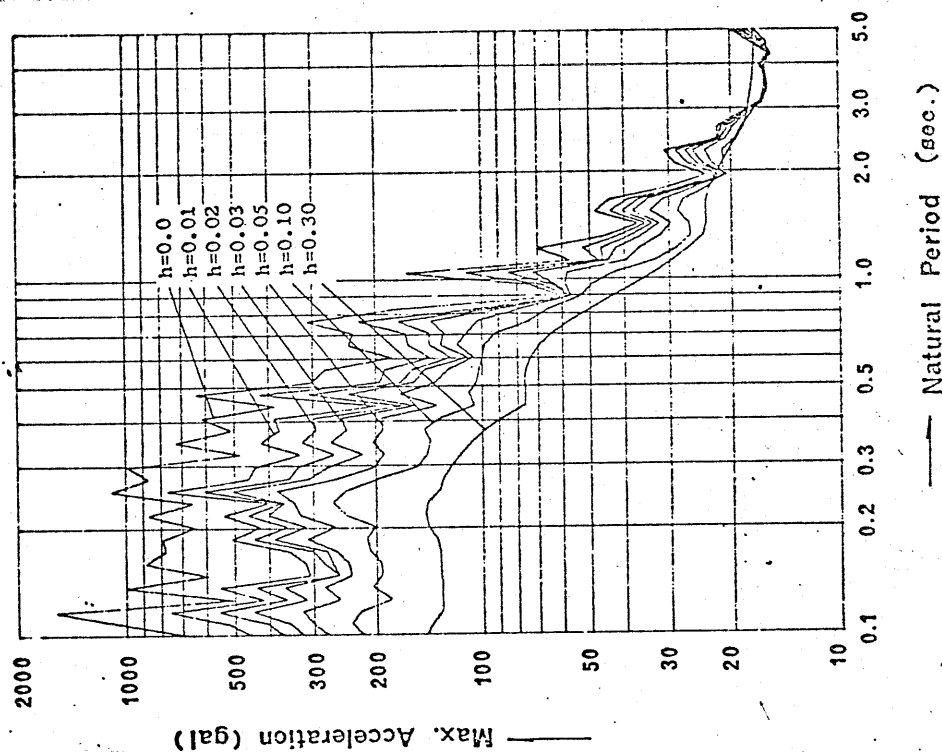


図 - 20 応答スペクトル

TOHKAI (JRR-3) E-W

$\ddot{Z}_{max} = 100 \text{ gal}$
 $T_{max} = 24 \text{ sec.}$

ACCELERATION SPECTRA



DISPLACEMENT SPECTRA

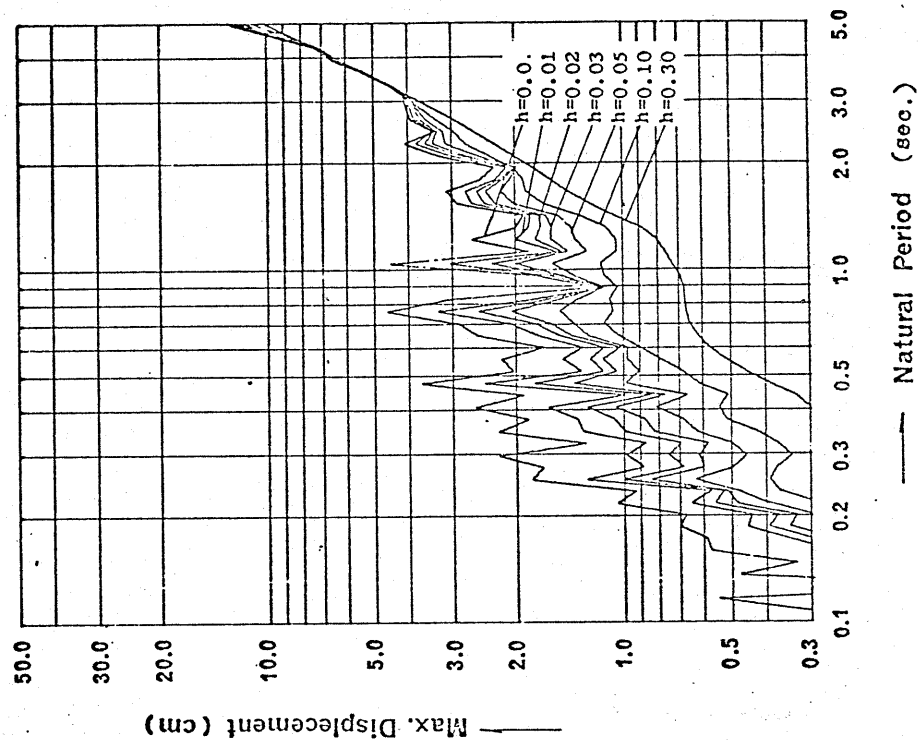


図-21 入力地震波

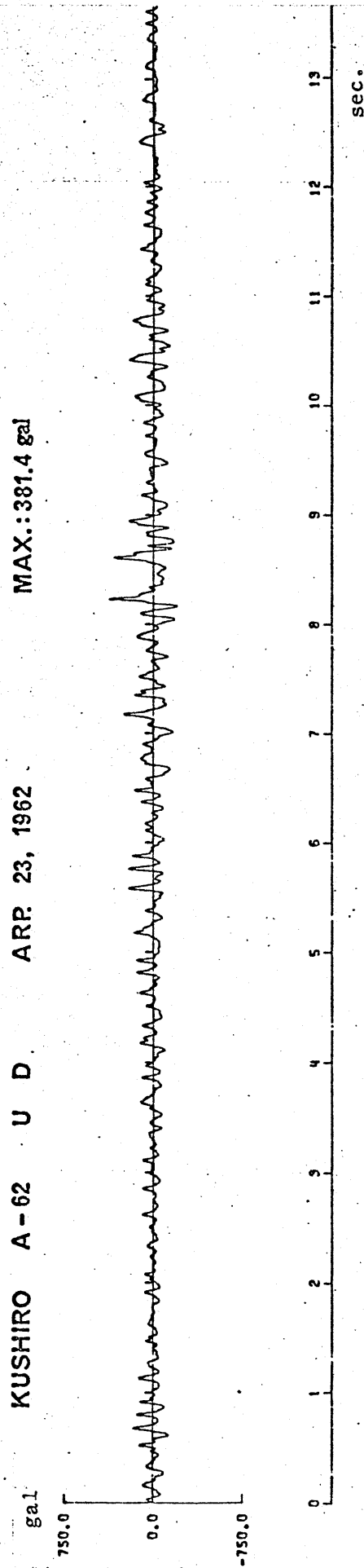
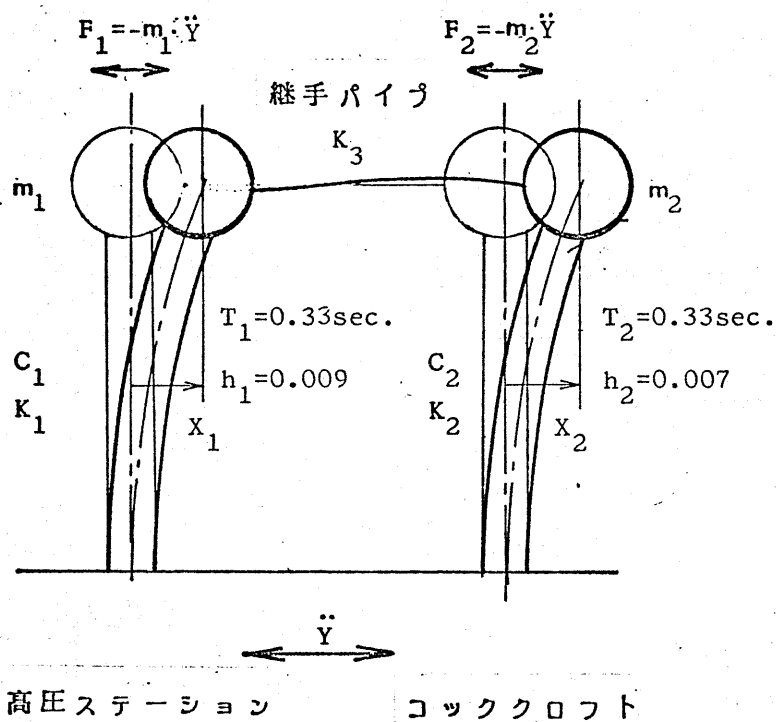


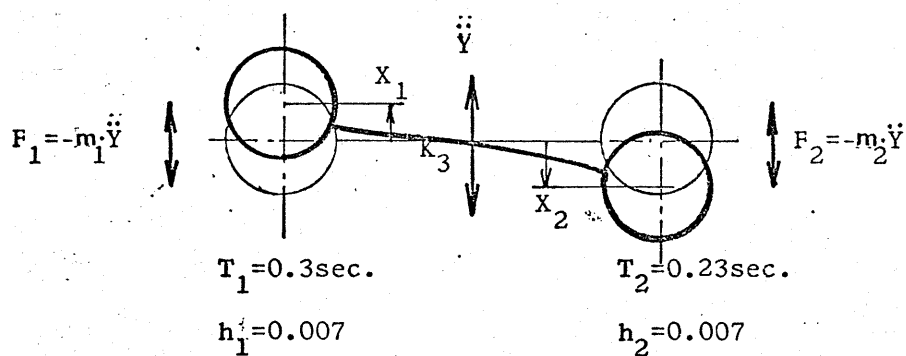
図-22 地震時の振動モデル

高圧ステーションとコッククロフトの連成系

(H-1)



(H-2)



$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_3 & -K_3 \\ -K_3 & K_2 + K_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{Y}$$

高圧ステーションおよびコッククロフトのモデル, 諸定数

MASS - MATRIX

$$m_1 = W_1/g = 600/980 = 0.6122 \text{ (Kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm)}$$

$$m_2 = W_2/g = 2000/980 = 2.041 \text{ (")}$$

DAMPING - MATRIX

(H-1)

$$C_1 = 2h_1 w_1 m_1 = 2 \times 0.009 \times 2 \times 3.14 \times 3 \times 0.6122 = 0.2077 \text{ (Kg} \cdot \text{sec/cm)}$$

$$C_2 = 2h_2 w_2 m_2 = 2 \times 0.007 \times 2 \times 3.14 \times 3 \times 2.041 = 0.5386 \text{ (")}$$

(H-2)

$$C_1 = 2h_1 w_1 m_1 = 2 \times 0.007 \times 2 \times 3.14 \times 3.33 \times 0.6122 = 0.1793 \text{ (")}$$

$$C_2 = 2h_2 w_2 m_2 = 2 \times 0.007 \times 2 \times 3.14 \times 4.35 \times 2.041 = 0.7810 \text{ (")}$$

STIFFNESS - MATRIX

(H-1)

$$K_1 = w_1^2 m_1 = (2 \times 3.14 \times 3)^2 \times 0.6122 = 217.5 \text{ (Kg/cm)}$$

$$K_2 = w_2^2 m_2 = (2 \times 3.14 \times 3)^2 \times 2.041 = 725.2 \text{ (")}$$

(H-2)

$$K_1 = w_1^2 m_1 = (2 \times 3.14 \times 3.33)^2 \times 0.6122 = 268.0 \text{ (")}$$

$$K_2 = w_2^2 m_2 = (2 \times 3.14 \times 4.35)^2 \times 2.041 = 1525 \text{ (")}$$

$$* w_1 = 2 \times 3.14 \times f_1, w_2 = 2 \times 3.14 \times f_2$$

(H-1)

$$K_3 = 9.7 \times 10^3 \text{ (Kg/cm)}$$

(H-2)

$$K_3 = 88 \text{ (")}$$

* 1: 高圧ステーション

2: コッククロフト

加速管

$$m = W/g = 500/980 = 0.51 \text{ (Kg sec}^2/\text{cm)}$$

$$C = 2h w m = 2 \times 0.5 \times 2 \times 3.14 \times 2.2 \times 0.51 = 7.05 \text{ (Kg sec/cm)}$$

$$K = w^2 m = (2 \times 3.14 \times 2.2)^2 \times 0.51 = 97.35 \text{ (Kg/cm)}$$

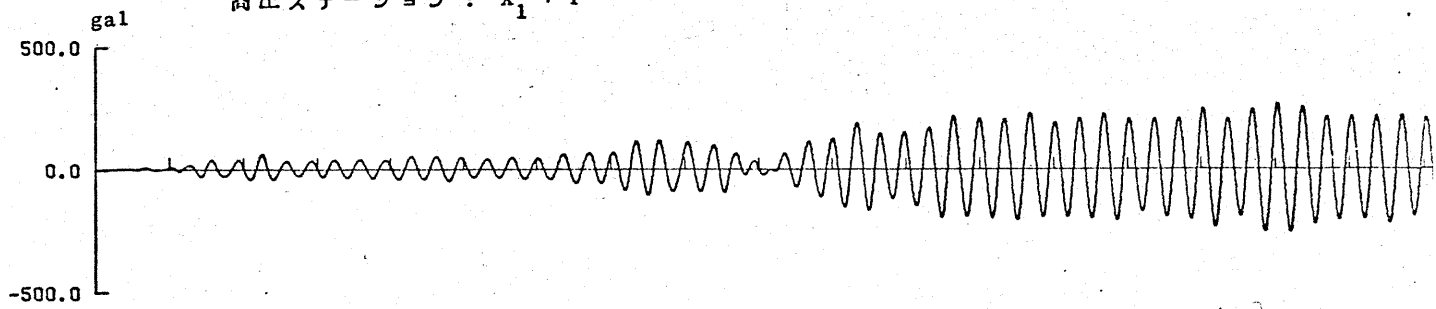
$$m \ddot{X} + C \dot{X} + K X = - m \ddot{Y}$$

TOKAI E - W MAY. 8, 1963 Max. 55.9 gal

高圧ステーション : $\ddot{x}_1 + \ddot{y}$

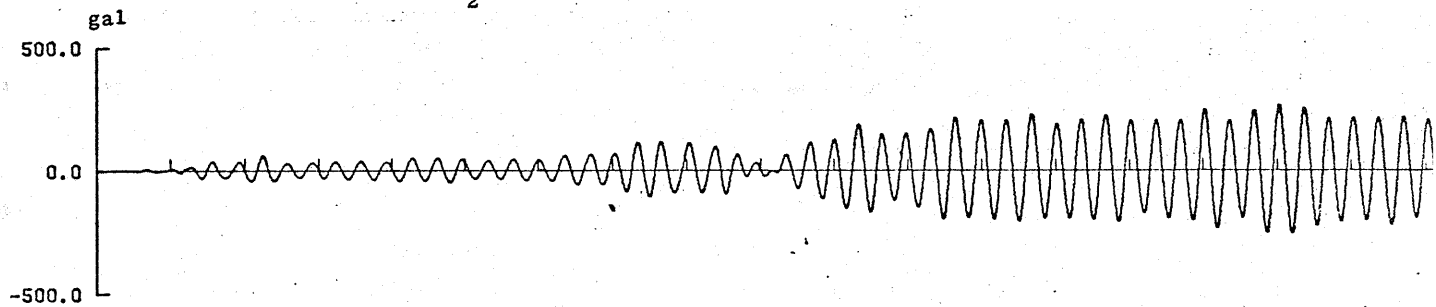
A (GAL)

MAX. = 264.2

コッククロフト : $\ddot{x}_2 + \ddot{y}$

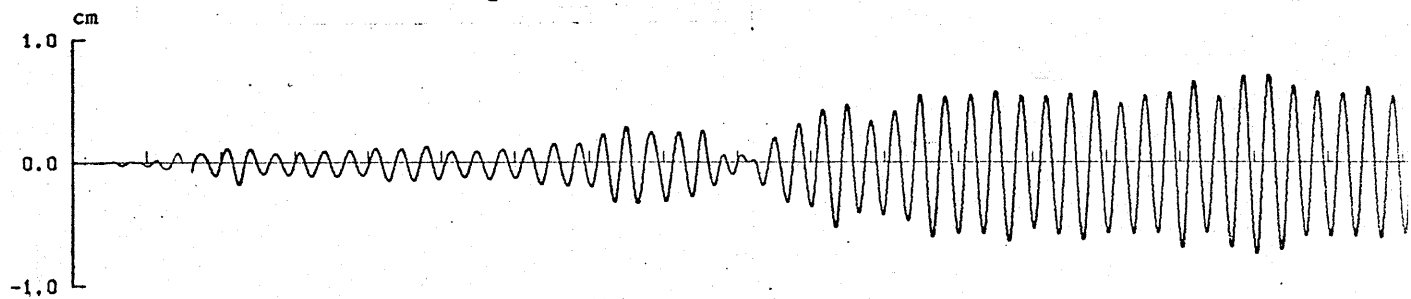
A (GAL)

MAX. = 264.2

高圧ステーション : x_1

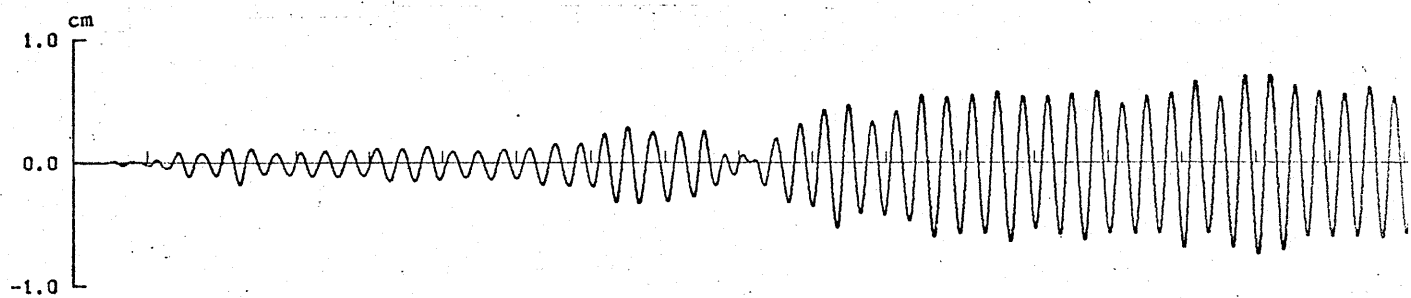
U (C M)

MAX. = 0.7

コッククロフト : x_2

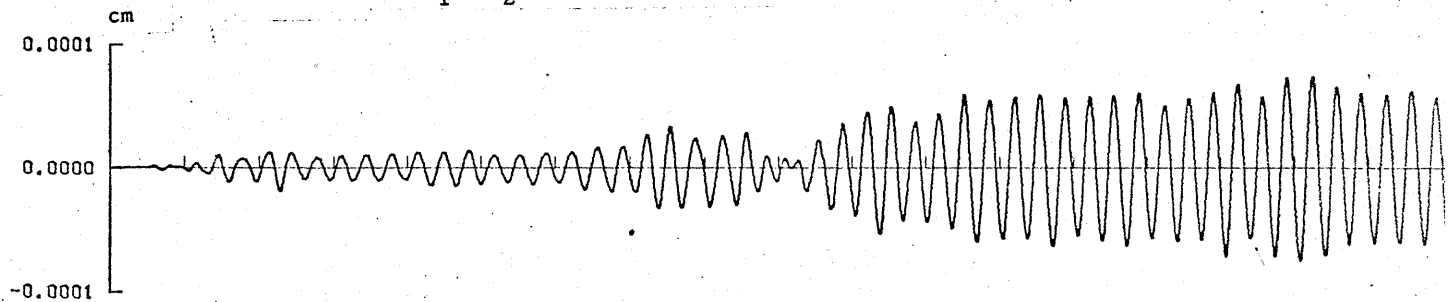
U (C M)

MAX. = 0.7

継手パイプ : $x_1 - x_2$

U (C M)

MAX. = 0.000



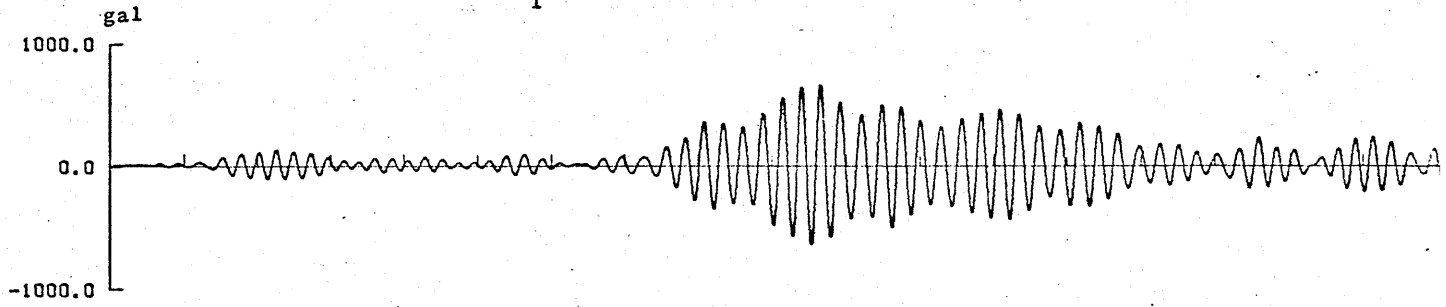
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 sec.

TOKAI E - W MAY. 8, 1963 Max. 55.9 gal

高圧ステーション : $\ddot{x}_1 + \ddot{y}$

A (GAL)

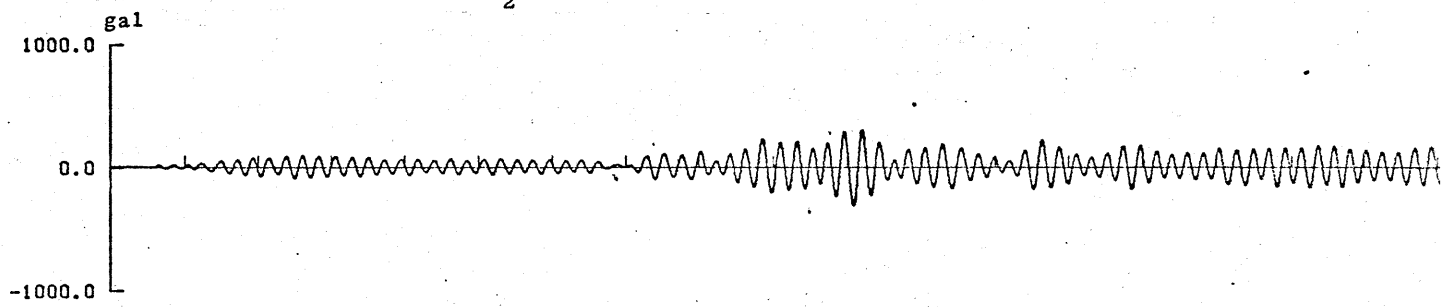
MAX. = 651.1



コッククロフト : $\ddot{x}_2 + \ddot{y}$

A (GAL)

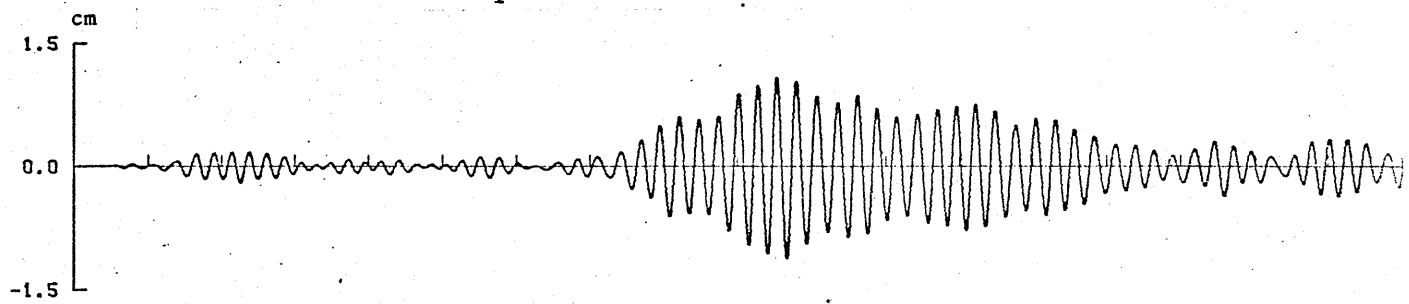
MAX. = 315.7



高圧ステーション : x_1

U (C M)

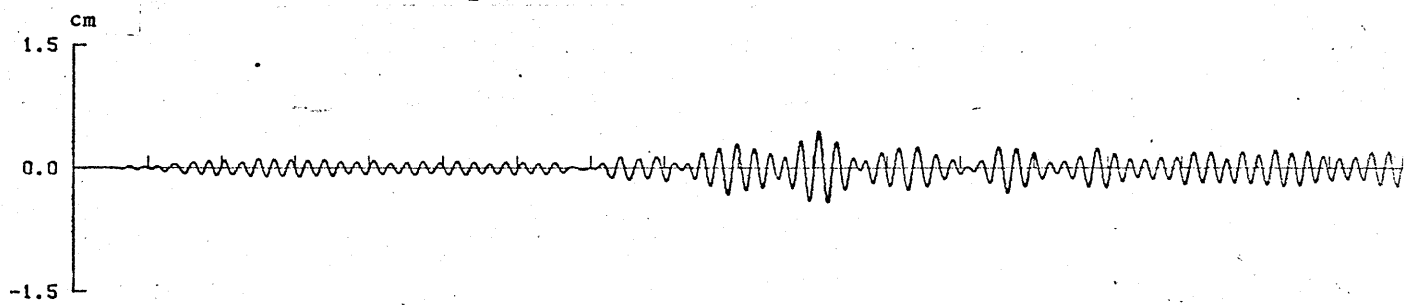
MAX. = 1.1



コッククロフト : x_2

U (C M)

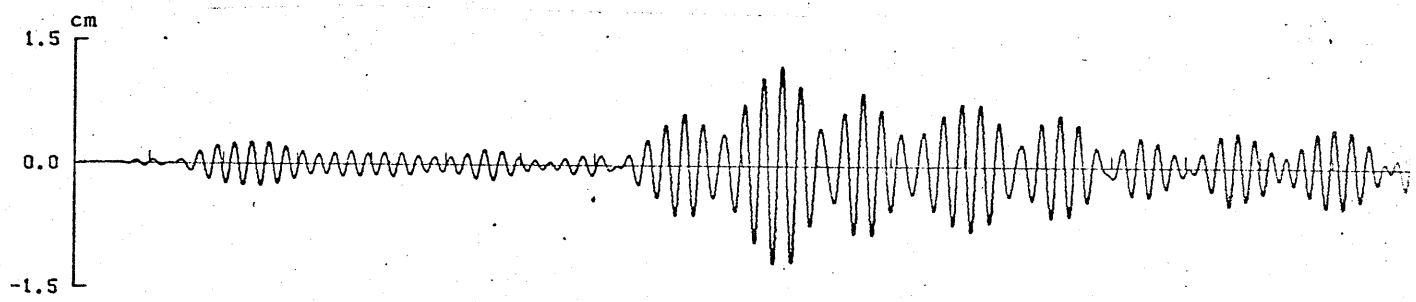
MAX. = 0.4



継手パイプ : $x_1 - x_2$

U (C M)

MAX. = 1.2

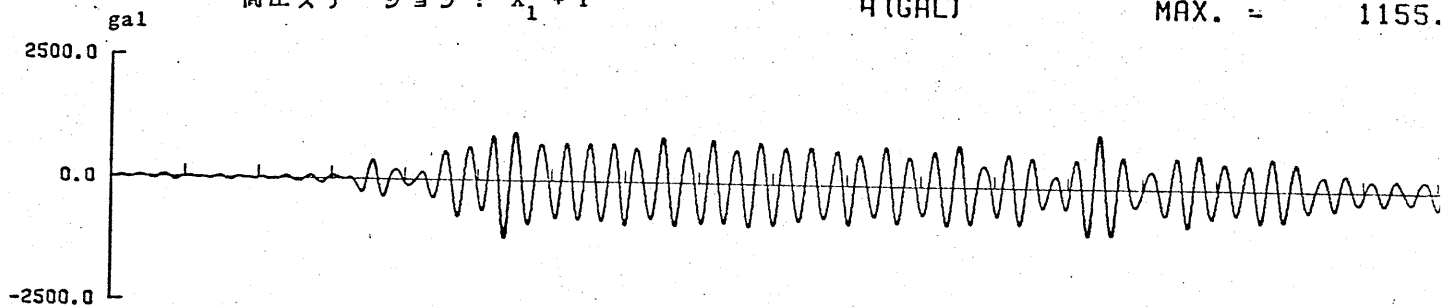


0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 sec.

高圧ステーション : $\ddot{X}_1 + \ddot{Y}$

A (GAL)

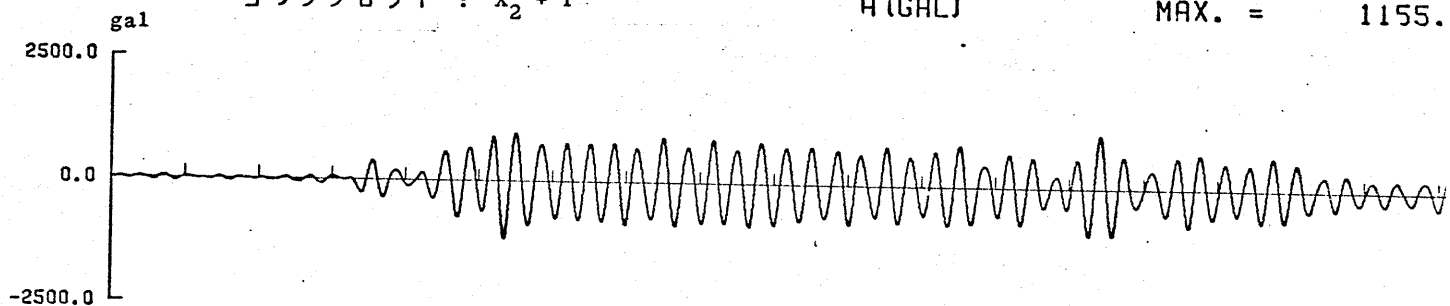
MAX. = 1155.



コッククロフト : $\ddot{X}_2 + \ddot{Y}$

A (GAL)

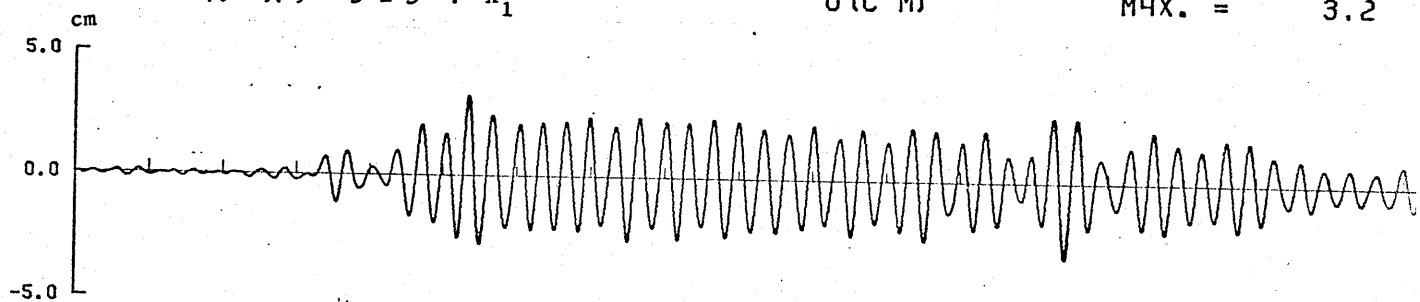
MAX. = 1155.



高圧ステーション : X_1

U (C M)

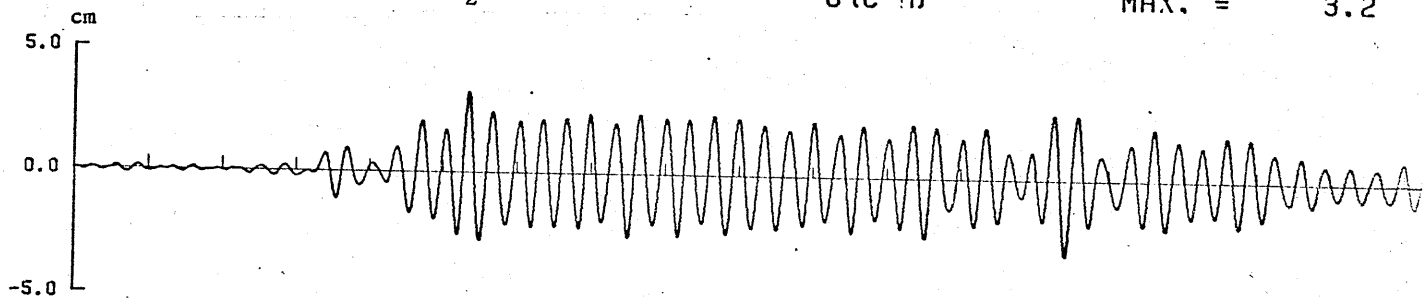
MAX. = 3.2



コッククロフト : X_2

U (C M)

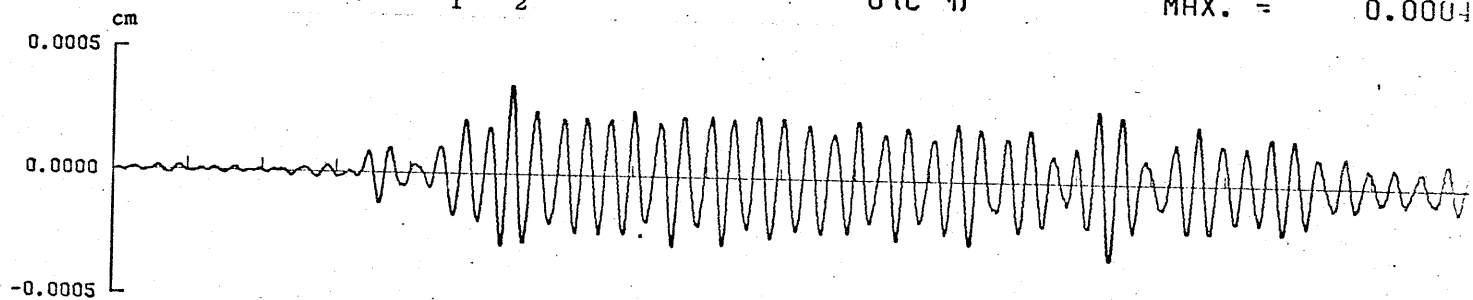
MAX. = 3.2



継手パイラ : $X_1 - X_2$

U (C M)

MAX. = 0.0004



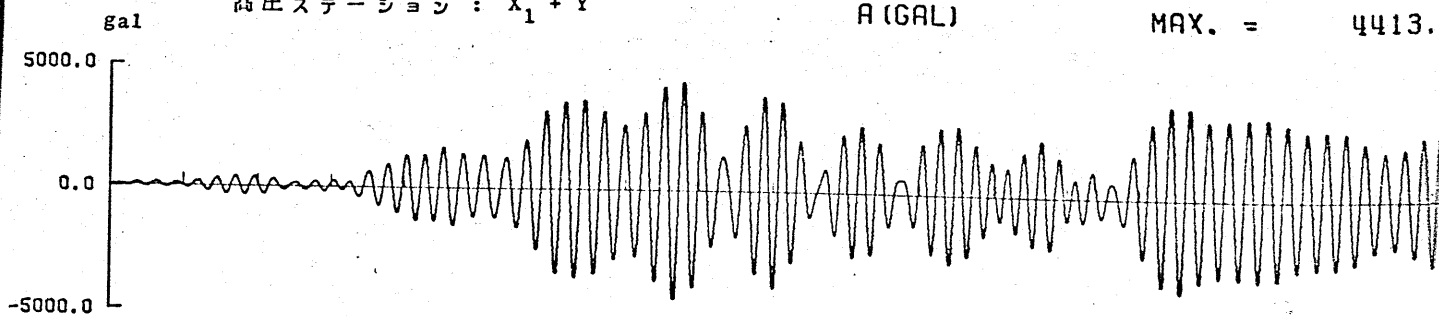
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 sec.

HIROO N - S JAN. 21, 1970 Max. 403.4 gal

高圧ステーション : $\ddot{x}_1 + \ddot{y}$

A (GAL)

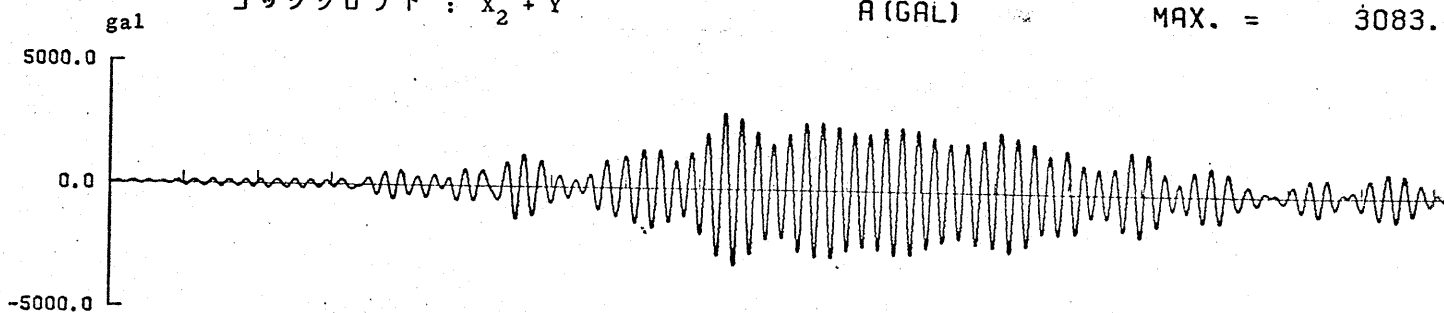
MAX. = 4413.



コッククロフト : $\ddot{x}_2 + \ddot{y}$

A (GAL)

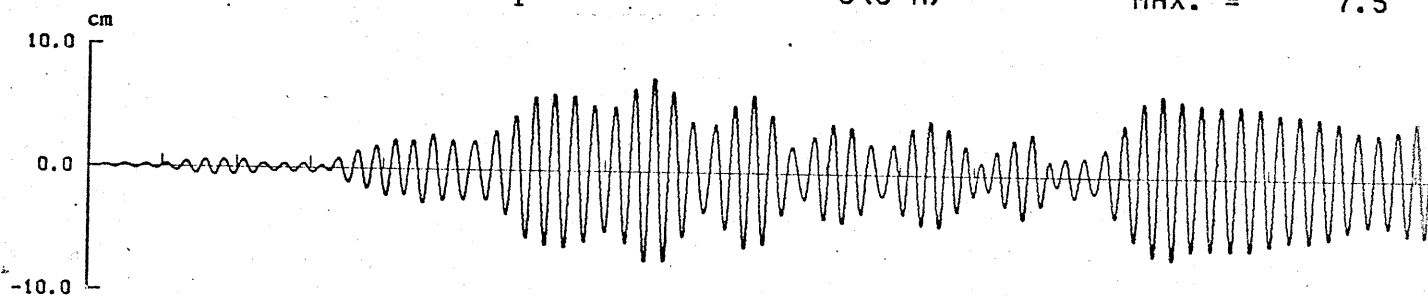
MAX. = 3083.



高圧ステーション : x_1

U (C M)

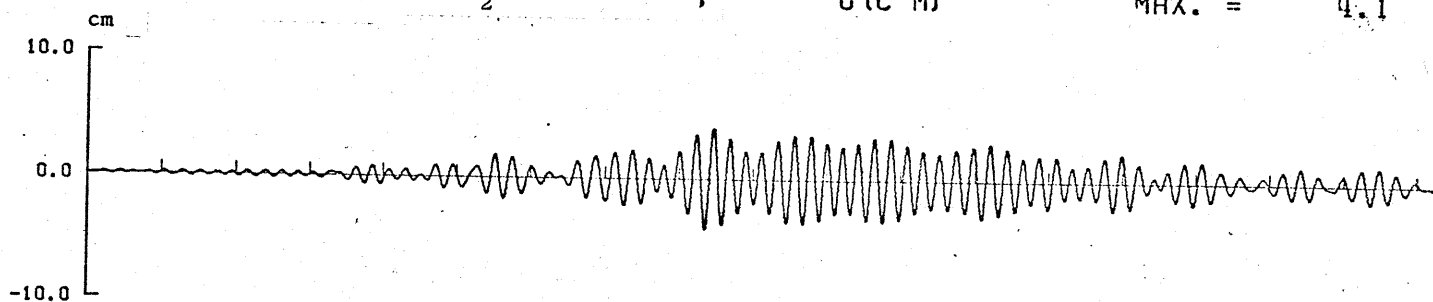
MAX. = 7.5



コッククロフト : x_2

U (C M)

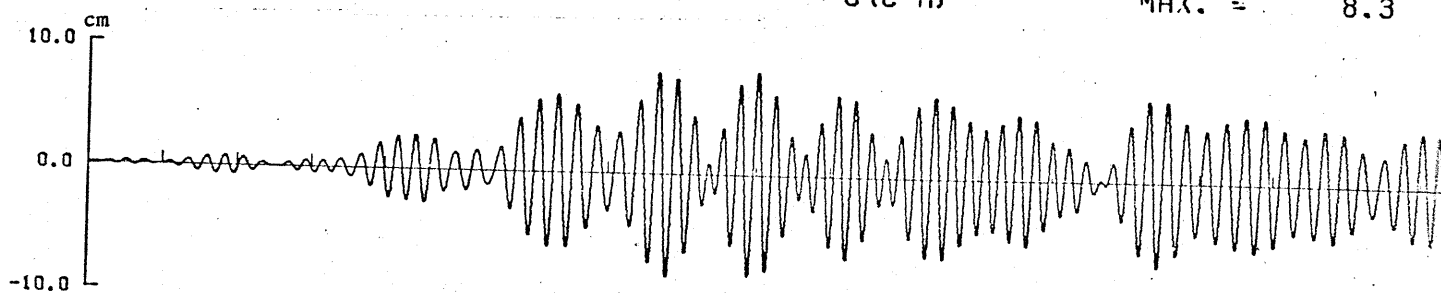
MAX. = 4.1



継手パイプ : $x_1 - x_2$

U (C M)

MAX. = 8.3



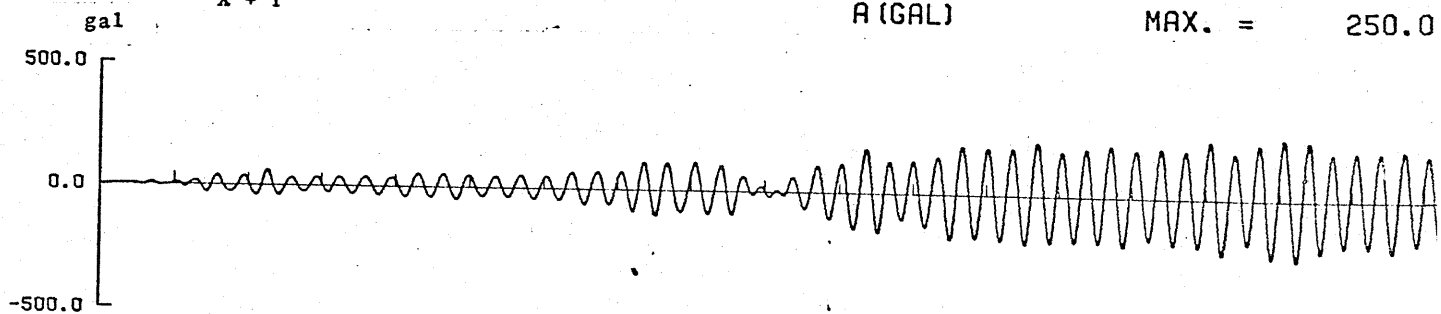
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 sec.

高圧ステーション独立系

TOKAI E - W MAY. 8, 1963 Max. 55.9 gal

H - 1

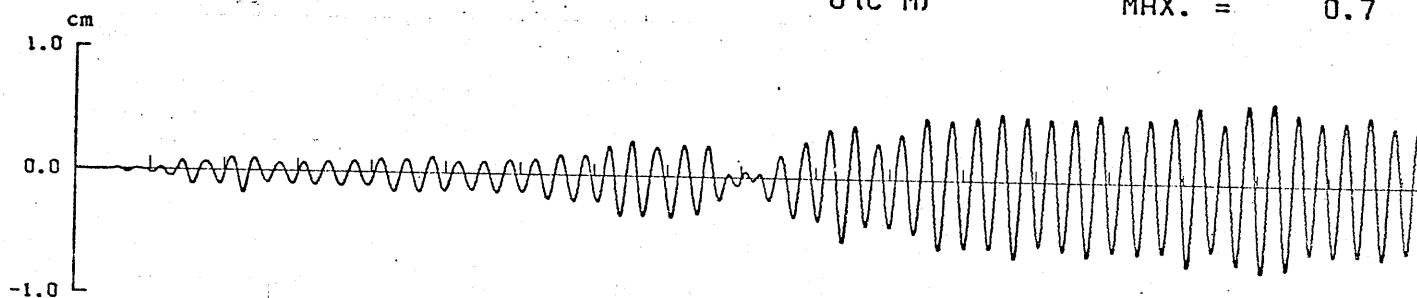
$\ddot{X} + \ddot{Y}$



X

U (C M)

MAX. = 0.7

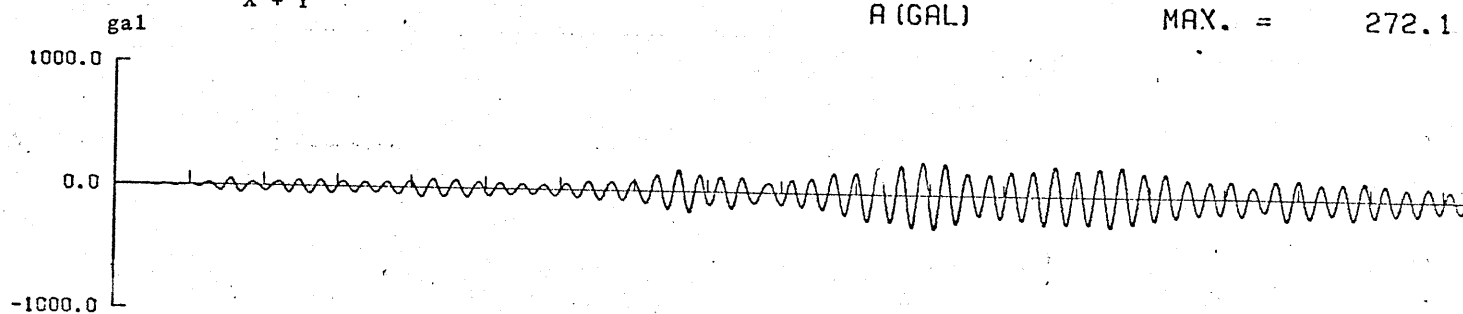


H - 2

$\ddot{X} + \ddot{Y}$

A (GAL)

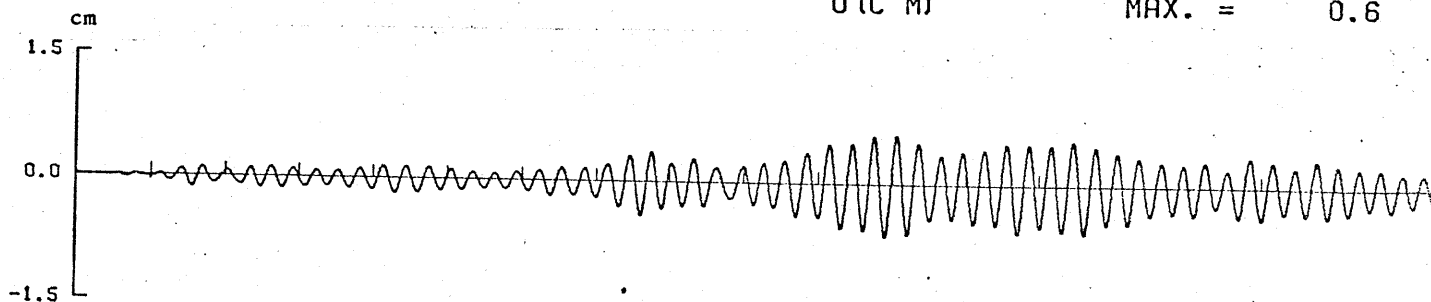
MAX. = 272.1



X

U (C M)

MAX. = 0.6



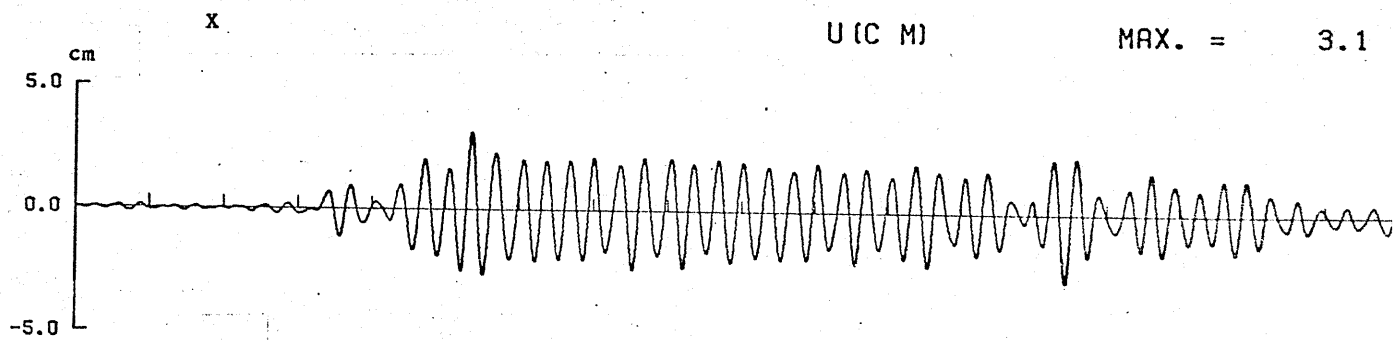
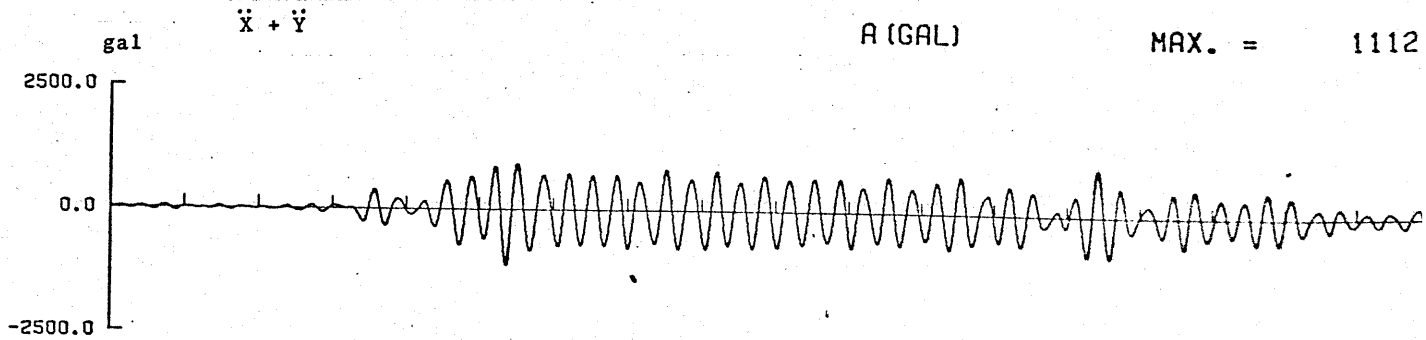
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

sec.

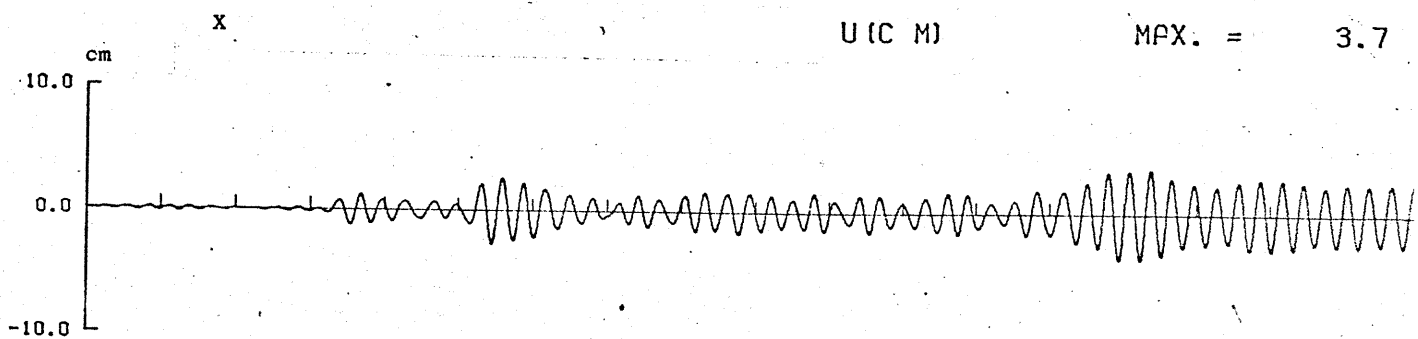
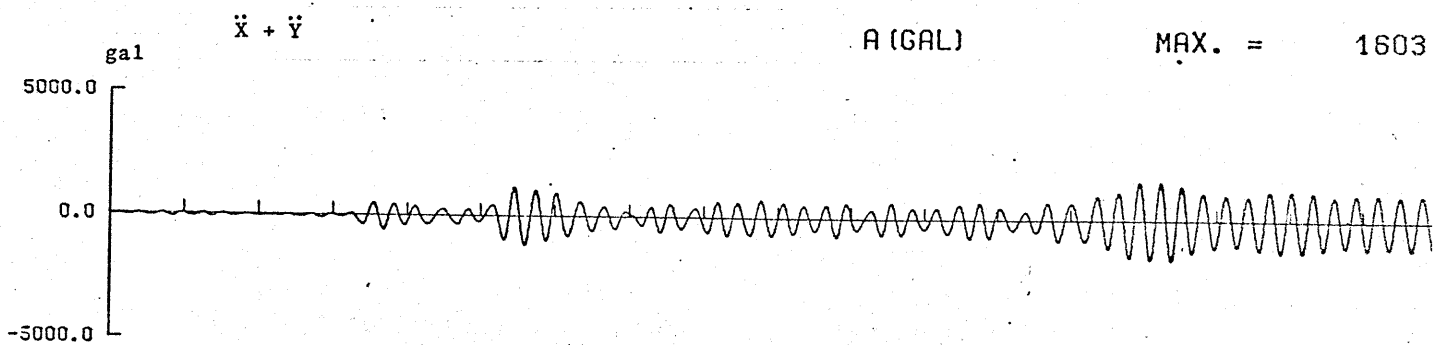
高圧ステーション独立系

HIROO N - S JAN. 21, 1970 Max. 403.4 gal

H - 1



H - 2



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 sec.

コッククロフト独立系

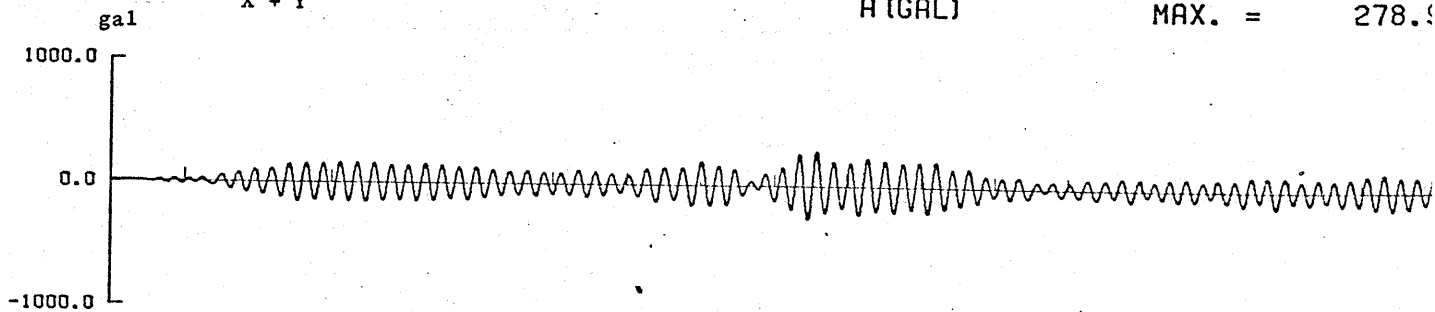
H - 2

TOKAI E - W MAY. 8, 1963 Max. 55.9 gal

$\ddot{x} + \ddot{y}$

A (GAL)

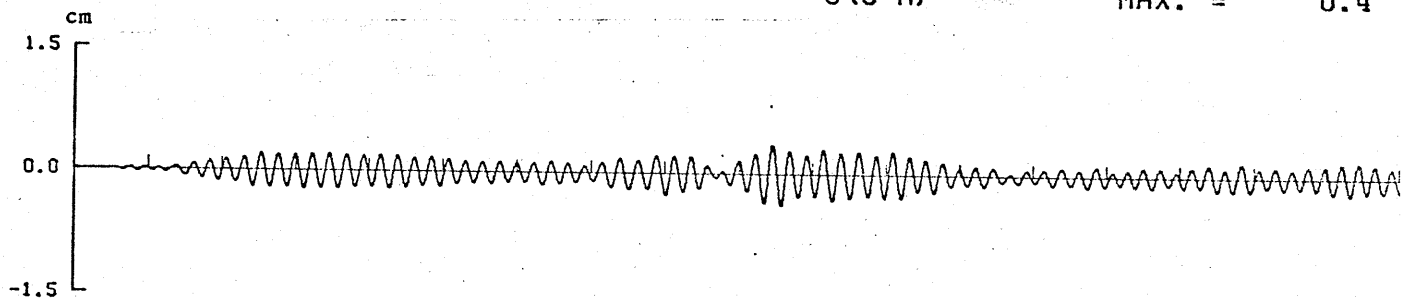
MAX. = 278.9



X

U (C M)

MAX. = 0.4

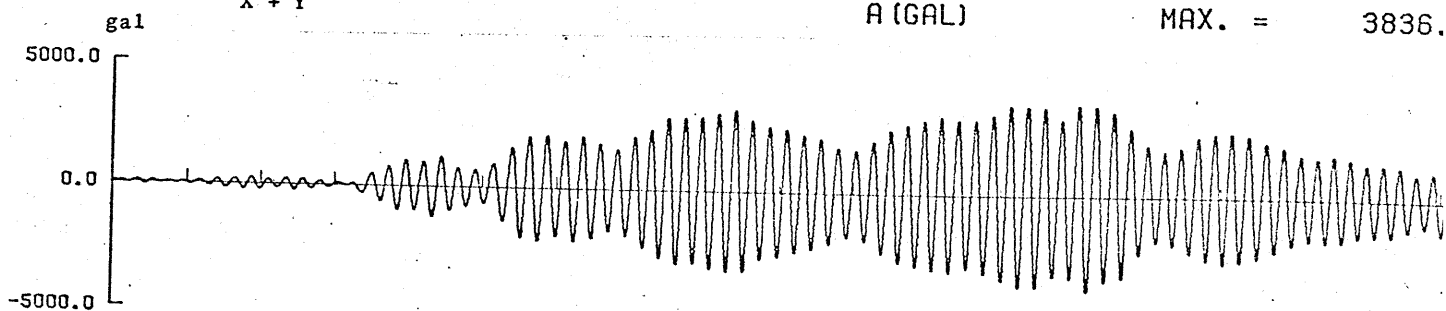


HIROO N - S JAN. 21, 1970 Max. 403.4 gal

$\ddot{x} + \ddot{y}$

A (GAL)

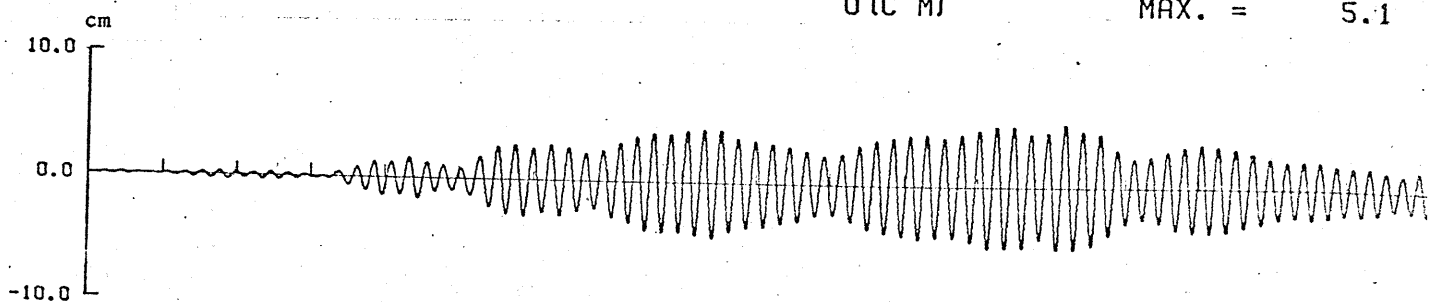
MAX. = 3836.



X

U (C M)

MAX. = 5.1

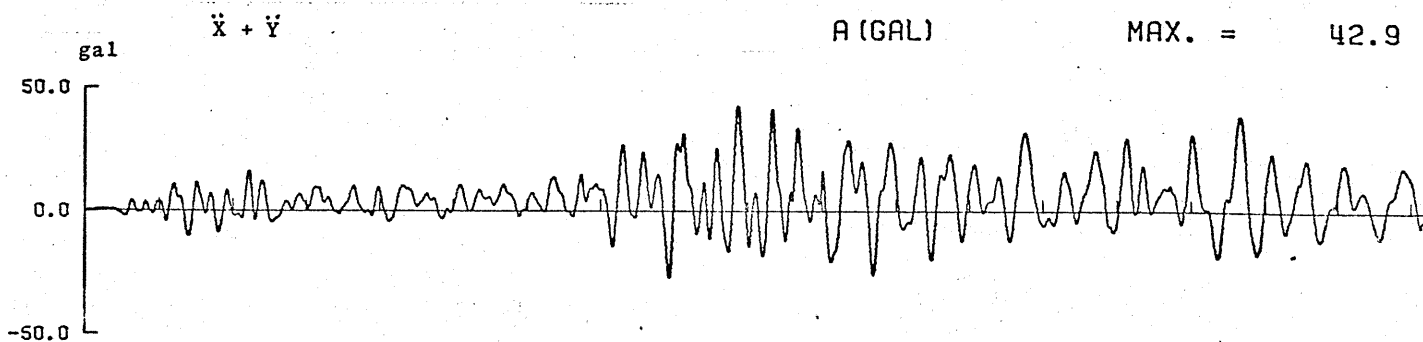


sec.

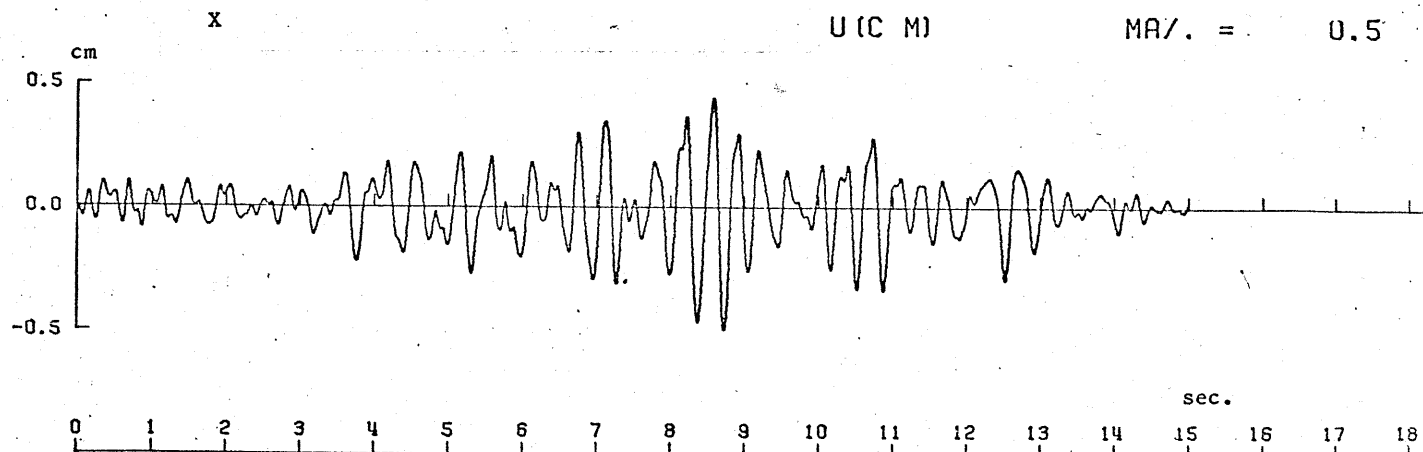
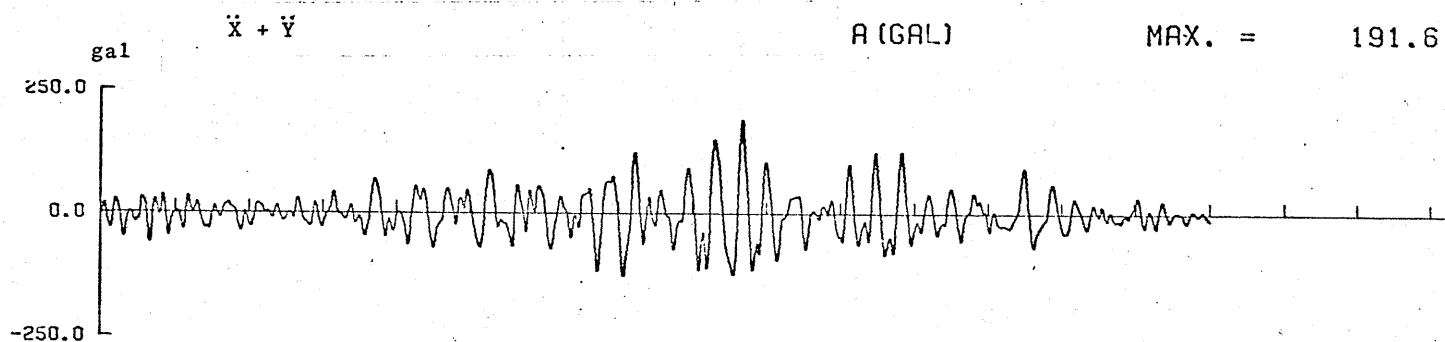
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

加速管

TOKAI E - W MAY. 8, 1963 Max. 55.9 gal



KUSHIRO U - D APR. 23, 1962 Max. 381.4 gal



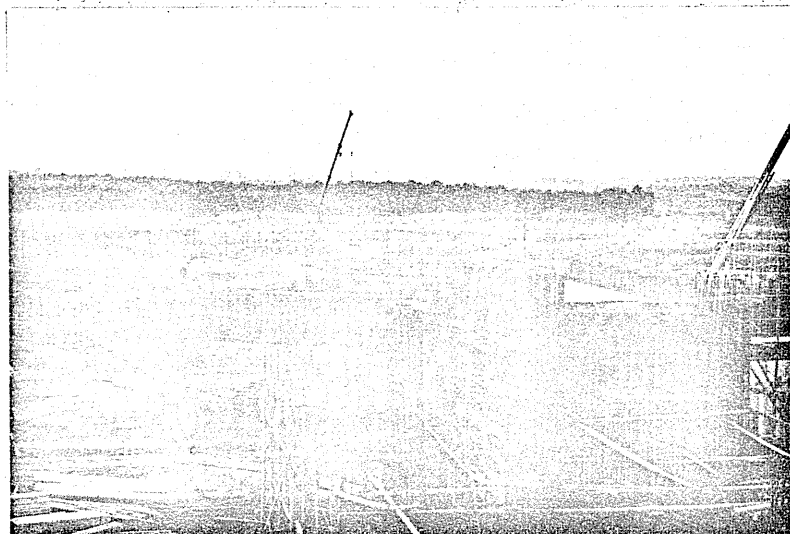


写真 - 1

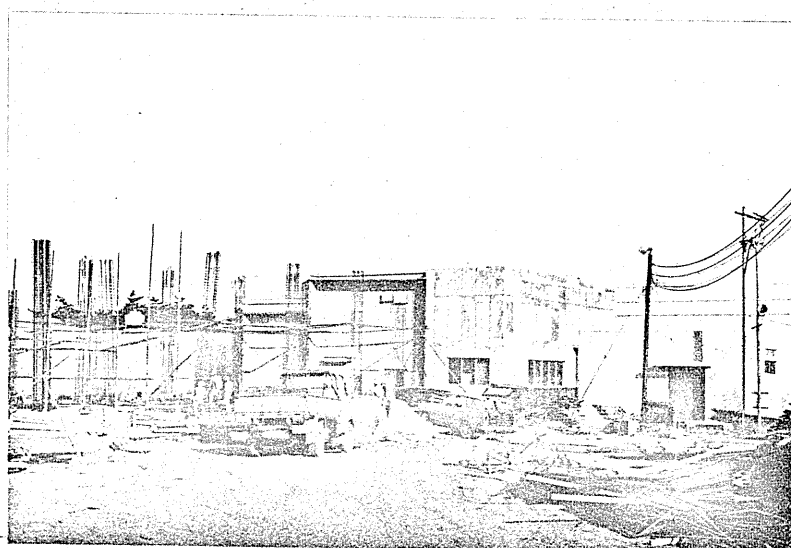


写真 - 2

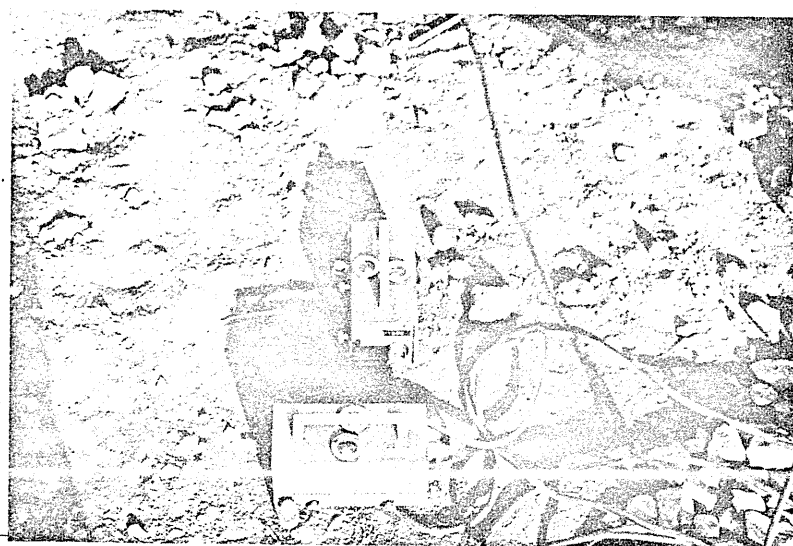


写真 - 3