

大型高速増殖炉要素技術設計研究 (II)

炉心構成要素耐震性の検討

1986年8月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1986年8月

森下 正樹*、五十幡直文*

要 旨

高速炉の炉心構成要素は地震時に、パッド部での隣接要素間の衝突相互作用を含む複雑な非線型群振動挙動を呈する。従って、地震荷重に対する炉心構成要素の健全性、冷却材流路の確保、及び制御棒挿入性の確保の各観点から、高速炉炉心の耐震性を評価するためには、この群振動挙動を精度良く把握する必要がある。

本報告書は、昭和60年度の設計研究において設定された大型炉の炉心体系について群振動解析を行い、概略の耐震性を検討した結果について示すものである。群振動解析は、もんじゅを対象として開発された専用解析コード“VIOLLON”を用いて行った。

本検討によって得られた成果をまとめると以下のようなものである。

- 1) 大型炉炉心の群振動特性は5 Hz前後に1次の卓越振動数があり、これは要素単体の1次固有振動数より約2 Hz程度高い。
- 2) 暫定的に定めたS1及びS2地震に対し、炉心構成要素に発生する応力は許容値と比較して十分低い値となる。従って、大型炉炉心の耐震設計の成立性は十分見通しがある。
- 3) 耐震設計の観点からは、大型炉炉心構成要素の構造形態は合理化、最適化の余地があり得る。

なお、本検討は昭和60年度大型高速増殖炉要素技術設計研究(Ⅱ)の一環として実施された。

* 機器構造開発部 構造工学室

Key Technological Design Study for Large LMFBR (Phase II)
Seismic Safety Assessment of Large LMFBR Core

M. Morishita *, N. Ikehata *

Abstract

The core components of an LMFBR may show a complex nonlinear vibration behavior as a cluster during a seismic event, which is induced by interaction between neighboring components due to collisions taking place at the load pads of hex-can ducts. Therefore, an analytical evaluation on this cluster vibration is essential when assessments are made on seismic safety of an LMFBR core in lights of structural integrity of core components, maintenance of coolant flow-path, and maintenance of control rods insertability.

Described in this report are the results of cluster vibration analysis and seismic safety assessment on the Large LMFBR core which was established during the course of the design study performed in FY 1986. The cluster vibration analyses were performed using a special purpose code "VIOLLON" that had been developed for the seismic design of Monju core.

The results of this study can be summarized as follows.

- i) The dominant frequency of cluster vibration of the Large LMFBR core is around 5.0 Hz, which is about 2 Hz higher than the 1st natural frequency of a single element.
- ii) Stresses arising in a core component due to an earthquake load are sufficiently lower than the allowable limits, leading to a successful expectation of seismic design of the Large LMFBR core.
- iii) The design and configurations of the Large LMFBR core may be further rationalized and optimized as far as the seismic design viewpoint is concerned.

* Structural Engineering Section, Components and Structures Development Division

目 次

要 旨	
表リスト	
図リスト	
1. 緒 言	1
2. 炉心構成要素単体の詳細解析	3
2.1 解析対象	3
2.2 固有値解析	3
2.3 衝突解析	7
3. 基本群振動特性解析	4 2
3.1 解析条件	4 2
3.2 解析結果	4 3
4. 地震応答解析	8 4
4.1 解析条件	8 4
4.2 解析結果	8 5
5. 炉心構成要素の耐震性評価	1 1 2
5.1 評価方法	1 1 2
5.2 評価結果	1 1 3
6. 結 言	1 2 1
謝 辞	1 2 2
参考文献	1 2 3
Appendices	
Appendix A 「VIOLLON」コードの拡張整備	1 2 5
Appendix B 単体固有値解析モデルの詳細データ	1 4 2
Appendix C 衝突解析結果	1 4 6

List of Tables

表リスト

Table 2 - 1	Configuration of Fuel Assembly	1 1
Table 2 - 2	Configuration of Radial Blanket Assembly	1 2
Table 2 - 3	Configuration of Newtron Shield Assembly	1 3
Table 2 - 4	Configuration of Control Rod Assembly	1 4
Table 2 - 5	Variation of Eigenvalues with Number of Elements	1 5
Table 2 - 6	Eigenvalues of Core Components	1 6
Table 2 - 7	Eigenvalues of Fuel Assembly by VIOLLN	1 7
Table 2 - 8	Eigenvalues of Radial Blanket Assembly by VIOLLN	1 8
Table 2 - 9	Eigenvalues of Newtron Shield Assembly(B ₄ C) by VIOLLN	1 9
Table 2 - 10	Eigenvalues of Newtron Shield Assembly(SUS) by VIOLLN	2 0
Table 2 - 11	Eigenvalues of Control Rod Assembly by VIOLLN	2 1
Table 2 - 12	Relationship between Velocity and Collision Force	2 2
Table 2 - 13	Effective Mass for Colliding Portion Obtained by	2 3
	Multi-degree of Freedom Collision Analysis	
Table 3 - 1	Parameters for Sine Sweep Analysis	5 4
Table 5 - 1	Allowable Limits for Wrapper Tube	1 1 4
Table 5 - 2	Stress Intensities due to S1 Earthquake and Allowable Stresses...	1 1 5
Table 5 - 3	Stress Intonsities due to S2 Earthquake and Allowable Stresses...	1 1 6

List of Figures

図リスト

Fig. 2 - 1	Conceptual Illustration of Fuel Assembly	2 4
Fig. 2 - 2	Eigenvalue Analysis Model of Fuel Assembly with 4 D.O.F	2 5
Fig. 2 - 3	1st and 2nd Modes of Fuel Assembly with 4 D.O.F Model	2 6
Fig. 2 - 4	Eigenvalue Analysis Model of Fuel Assembly with 6 D.O.F	2 7
Fig. 2 - 5	1st and 2nd Modes of Fuel Assembly with 6 D.O.F Model	2 8
Fig. 2 - 6	Eigenvalue Analysis Model of Fuel Assembly with 10 D.O.F	2 9
Fig. 2 - 7	1st and 2nd Modes of Fuel Assembly with 10 D.O.F Model	3 0
Fig. 2 - 8	Eigenvalue Analysis Model of Fuel Assembly with 15 D.O.F	3 1
Fig. 2 - 9	1st and 2nd Modes of Fuel Assembly with 15 D.O.F Model	3 2
Fig. 2 - 10	Variation of Eigenvalues with Number of Elements	3 3
Fig. 2 - 11	1st and 2nd Modes of Radial Blanket Assembly	3 4
Fig. 2 - 12	1st and 2nd Modes of Neutron Shield Assembly	3 5
Fig. 2 - 13	1st and 2nd Modes of Control Rod Assembly	3 6
Fig. 2 - 14	Time Histories of Results of Collision Analysis on Fuel Assembly...	3 7
Fig. 2 - 15	Relationships between Velocity and Collision Proces	4 1
Fig. 3 - 1	Configurations of Lange LMFBR Coe	5 5
Fig. 3 - 2	Time History of Sine Sweep Wave	5 6
Fig. 3 - 3	Response of Core Components at Top Portion	5 7
	(Nominal Case)	
Fig. 3 - 4	Response of Core Components at Middle Portion	5 8
	(Nominal Case)	
Fig. 3 - 5	Response of Core Components at Top Portion	5 9
	(250gal)	
Fig. 3 - 6	Response of Core Components at Middle Portion	6 0
	(250gal)	

Fig. 3 - 7	Response of Core Components at Top Portion (750gal)	6 1
Fig. 3 - 8	Response of Core Components at Middle Portion (750gal)	6 2
Fig. 3 - 9	Input Dependency of Collision Force at Middle Pad of Newtron Shield	6 3
Fig. 3 - 10	Response of Core Components at Top Portion (1st Mode Damping 5 %)	6 4
Fig. 3 - 11	Response of Core Components at Middle Portion (1st Mode Damping 5 %)	6 5
Fig. 3 - 12	Response of Core Components at Top Portion (1st Mode Damping 10 %)	6 6
Fig. 3 - 13	Response of Core Components at Middle Portion (1st Mode Damping 10 %)	6 7
Fig. 3 - 14	Response of Core Components at Top Portion (Pad Stiffness 0.88/70 ton/mm)	6 8
Fig. 3 - 15	Response of Core Components at Middle Portion (Pad Stiffness 0.88/70 ton/mm)	6 9
Fig. 3 - 16	Response of Core Components at Top Portion (Pad Stiffness 3.52/280 ton/mm)	7 0
Fig. 3 - 17	Response of Core Components at Middle Portion (Pad Stiffness 3.52/280 ton/mm)	7 1
Fig. 3 - 18	Response of Core Components at Top Portion (Gap 0.5/0.5mm)	7 2
Fig. 3 - 19	Response of Core Components at Middle Portion (Gap 0.5/0.5mm)	7 3
Fig. 3 - 20	Response of Core Components at Top Portion (Gap 1.5/1.0mm)	7 4
Fig. 3 - 21	Response of Core Components at Middle Portion (Gap 1.5/1.0mm)	7 5

Fig. 3 - 22	Response of Core Components at Top Portion	7 6
	(Wall Thickness 3 mm)	
Fig. 3 - 23	Response of Core Components at Middle Portion	7 7
	(Wall Thickness 3 mm)	
Fig. 3 - 24	Response of Core Components at Top Portion	7 8
	(Wall Thickness 5 mm)	
Fig. 3 - 25	Response of Core Components at Middle Portion	7 9
	(Wall Thickness 5 mm)	
Fig. 3 - 26	Response of Core Components at Top Portion	8 0
	(Middle Pad Height 1500 mm)	
Fig. 3 - 27	Response of Core Components at Middle Portion	8 1
	(Middle Pad Height 1500 mm)	
Fig. 3 - 28	Resonance Frequencies of Inner Fuel Assembly	8 2
Fig. 3 - 29	Collision Forces at Top Pad	8 3
Fig. 4 - 1	Analysis Model for Soil-Structure-Reactor System	8 9
Fig. 4 - 2	Acceleration Response Time-History of Core Support Plate	9 0
Fig. 4 - 3	Response Spectrum of Core Support Plate	9 1
Fig. 4 - 4	Seismic Response of Core Components (S1, Nominal Case)	9 2
Fig. 4 - 5	Seismic Response of Core Components (S2, Nominal Case)	9 4
Fig. 4 - 6	Radial Distribution of Maximum Collision Force at Middle Pad	9 6
	(Nominal Case)	
Fig. 4 - 7	Radial Distribution of Maximum Collision Force at Top Pad	9 7
	(Nominal Case)	
Fig. 4 - 8	Radial Distribution of Maximum Displacements at Middle Pad	9 8
	(Nominal Case)	
Fig. 4 - 9	Radial Distribution of Maximum Displacements at Top Pad	9 9
	(Nominal Case)	
Fig. 4 - 10	Seismic Response of Core Components(Wall Thickness 3mm)	1 0 0
Fig. 4 - 11	Radial Distribution of Maximum Collision Force at Middle Pad	1 0 2
	(Wall Thickness 3 mm)	

Fig. 4 - 12	Radial Distribution of Maximum Collision Force at Top Pad (Wall Thickness 3 mm)	.....	1 0 3
Fig. 4 - 13	Radial Distribution of Maximum Displacements at Middle Pad (Wall Thickness 3 mm)	.....	1 0 4
Fig. 4 - 14	Radial Distribution of Maximum Displacements at Top Pad (Wall Thickness 3 mm)	.....	1 0 5
Fig. 4 - 15	Seismic Response of Core Components (Middle Pad Height 1500mm)	...	1 0 6
Fig. 4 - 16	Radial Distribution of Maximum Collision Force at Middle Pad (Middle Pad Height 1500 mm)	.....	1 0 8
Fig. 4 - 17	Radial Distribution of Maximum Collision Force at Top Pad (Middle Pad Height 1500 mm)	.....	1 0 9
Fig. 4 - 18	Radial Distribution of Maximum Displacements at Middle Pad (Middle Pad Height 1500 mm)	.....	1 1 0
Fig. 4 - 19	Radial Distribution of Maximum Displacements at Top Pad (Middle Pad Height 1500 mm)	.....	1 1 1
Fig. 5 - 1	Design Stress Intensity S_m for SUS 316 ST	.....	1 1 7
Fig. 5 - 2	Design Stress Intensity S_m for SUS 316 CW	.....	1 1 8
Fig. 5 - 3	Design Ultimate Tensile Strength S_u for SUS 316 ST	.....	1 1 9
Fig. 5 - 4	Design Ultimate Tensile Strength S_u for SUS 316 CW	.....	1 2 0

1. 緒 言

高速増殖炉（以下、単にFBRと呼ぶ）の炉心構成要素は下端を炉心支持板に支持されて自立する六角形断面の棒群であり、頂部と中間部のパッド部で約1mm程度のギャップを介してナトリウム中に密に装荷されている。そのため、地震時には（炉心支持板を通じて入力される地震力に対して）炉心構成要素はパッド部での隣接要素間の衝突相互作用及び流体力による相互作用等によって、群としての複雑な非線型振動挙動を呈する。従って、地震時の炉心構成要素の構造健全性、冷却材流路の確保、及び制御棒挿入性の確保の各観点から炉心構成要素の耐震性を評価するためには、このような群振動挙動とそれによって生じるパッド部の衝突力と要素の曲げ変形とを精度良く予測できる解析手法を整備しておく必要がある。

炉心群振動の専用解析コードとしては、原型炉「もんじゅ」（以下、単にもんじゅという）の炉心体系を対象として動燃で開発されたコード“VIOLLON”がある。

VIOLLONは炉心構成要素単体を2自由度集中質量系の片持ちばりで、衝突部をギャップ要素でそれぞれモデル化し、系の運動方程式を時刻歴直接積分法によって解くことにより群振動を解析する。本コードはもんじゅの炉心構成要素の実機設計において使用されており、実寸大モデルを用いた振動試験による検証も行われている。

本研究では、昭和60年度の大型高速増殖炉要素技術設計研究（Ⅱ）で検討されている大型炉（以下、単に大型炉という）の炉心構成要素の耐震性の検討と、耐震面からの要素の構造形態の最適化の検討に資することとを目的として、VIOLLONを用いた群振動解析と、その結果に基づく要素の地震応力評価を以下の手順で行った。

(1) 要素単体の詳細解析

VIOLLONは計算時間の短縮化を図るために、要素1体あたりの自由度を2自由度に節約している。そのため、モデルの作成（質量マトリクス、剛性マトリクス）と衝突力の評価にあたっては、実現象との対応を考慮した若干の工夫が必要となる。そこで、群振動解析に先立って、大型炉の炉心構成要素単体の詳細固有値解析と衝突解析を実施し、これらの結果にて基づいてVIOLLONのモデルを作成する。

(2) 正弦掃引波入力による群振動解析

大型炉炉心の群振動挙動の基本的特性を把握するために、2～20Hzの正弦掃引波による群振動解析を実施する。さらに、炉心構成要素の構造形態（ラップ管板厚、パッド部位置・剛性）及び減衰定数等の解析パラメタが群振動挙動に及ぼす影響を検討する。

(3) 地震波入力による群振動解析

大型炉炉心の耐震性の検討に資するため、地震波入力に対する群振動解析を行う。地震波入力としては、昭和60年度要素技術設計研究（Ⅱ）で別途実施されている、制御棒挿入性の検討で作られた炉心支持板の加速度時刻歴を用いる（S1及びS2）。また、上記（2）のパラメタ・サーベイのうち、群振動挙動に影響の大きいケースについても地震波による解析を行い、耐震面からの大型炉炉心構成要素の構造形態の最適化に関する検討を加える。

(4) 炉心構成要素の応力評価

群振動解析の結果えられた衝突力及び要素の変位応答に基づき、要素（ラッパ管）に発生する地震応力を算出する。もんじゅの燃料集合体の構造設計方針に基づいて、耐震性評価を行う。なお、群振動解析に先立って、VIOLLON を大型炉の炉心体系に適用するための若干の修正を行った。修正の概要を Appendix A に示す。

2. 炉心構成要素単体の詳細解析

群振動解析に使用するコードVIOLLONは、炉心構成要素1体を2自由度の集中質点系もモデル化するので、剛性データ、質量データの作成にあたっては、実際の各要素の振動特性（単体）を把握し、それを十分模擬できるようなモデルにするための配慮が必要である。また、VIOLLONは衝突部に実際以上の質量を集中させたモデルとなっているので、衝突力を過大に評価する傾向がある。従って、例えば衝突時のパッド部の速度をパラメタとして、実際に生じる衝突力を予め評価しておき、VIOLLONの結果を補正することが必要である。

もんじゅでは、各種炉心構成要素を模擬した実寸大の試験体を用いて単体振動試験、群振動試験及び衝突試験が行われており、これらの結果がVIOLLONのモデル作成に際して参照された。

大型炉の炉心体系についてこのような実験結果に替わる参照データを得ることを目的として、炉心構成要素各単体について、多自由度モデルを用いた固有値解析と衝突解析を行った。

2.1 解析対象

大型炉の炉心は炉心燃料集合体、ブランケット燃料集合体、制御棒、中性子遮蔽体（B₄C又はSUS）から構成される。単体解析は前4者を対象として固有値解析及び衝突解析を実施した。

図2.1に燃料集合体の概念図を、表2.1～2.4に解析に用いた各要素の形状・重量・剛性データを示す。なお、本検討は大型炉設計研究の作業と平行して実施したので、本検討で用いた仕様と最終的な設計仕様とは若干のくい違いがある（設計変更が反映されていない部分がある）。具体的には、図2.1と表2.1～2.4に示される寸法のうち、エントランスノズル長さが50mm異なっているが、この影響が無視できる程度であることは別途確認してある。

2.2 固有値解析

(1) 燃料集合体による要素数のサーベイ

炉心構成要素の固有値解析モデルは軸方向に複数の梁要素を連結して集合体を模擬する。境界条件はエントランスノズル先端及び球面座位置でピン支持とし他の節点は非拘束とした。炉心構成要素の重量は個々の梁要素に一様分布しているものとする。炉心構成要素の固有値を評価するため、最初に燃料集合体で軸方向の要素分割数のサーベイ（4要素～15要素）を行った。図2-2に、4要素の解析モデルを示す。要素分割はエントランス・ノズル、球面座から中間パッド、中間パッドから頂部パッド、頂部パッドから燃料集合体頂部とした。図2-3に、4要素による1次及び2次の固有モード図を示す。1次の固有振

動数は3.227Hz、2次の固有振動数は22.190Hzである。図2-4は、6要素の解析モデルを示している。要素分割はエントランス・ノズル、球面座から中間パッドから頂部パッド迄を2分割、頂部パッドから燃料集合体頂部とした。図2-5は、6要素による1次及び2次の固有モード図を示している。1次の固有振動数は3.119Hz、2次の固有振動数は20.447Hzである。図2-5は、10要素の解析モデルを示している。要素分割はエントランス・ノズル、球面座から中間パッド迄を5分割、中間パッドから頂部パッド迄を3分割、頂部パッドから燃料集合体頂部とした。図2-7は、10要素による1次及び2次の固有モード図を示している。1次の固有振動数は3.352Hz、2次の固有振動数は21.129Hzである。図2-8は、15要素の解析モデルを示している。要素分割はエントランス・ノズル、球面座から中間パッド迄を9分割、中間パッドから頂部パッド迄を4分割、頂部パッドから燃料集合体頂部とした。図2-9は、15要素による1次及び2次の固有モード図を示している。1次の固有振動数は3.363Hz、2次の固有振動数は20.965Hzである。表2-5及び図2-10要素数による固有値の変化を示す。固有振動数が6要素と10要素とで不連続となるのは、10要素と15要素分割では球面座上方の下部遮蔽体の剛性が考慮される為である。10要素と15要素とでの固有値の変化は、固有振動数で1次が-0.3%、2次が0.8%、モード(頂部を1.0とした時の中間パッド位置の比率)で1次が-0.2%、2次が3.2%、励振係数で1次が-0.4%、2次が-0.3%となり、集合体の軸方向要素分割は15要素で最終的な収束値が十分得られている事及び10要素でもかなりの精度が期待出来る事が判った。

(2) 炉心構成要素単体の固有値

燃料集合体による軸方向の要素分割数のサーベイ結果より、他の要素についても15要素による解析結果を参照値とする。表2-6に燃料集合体、ブランケット集合体、中性子遮蔽体、及び制御棒の固有値解析結果をまとめて示す。

図2-11は、ブランケット集合体の1次及び2次の固有モード図を示している。1次の固有振動数は3.254Hz、2次の固有振動数は19.793Hzである。ブランケット集合体の重量分布は、燃料集合体とほとんどかわらず集合体の剛性も等しいため固有値はほぼ等しい値となる。

図2-12は、中性子遮蔽体の1次及び2次の固有モード図を示している。1次の固有振動数は3.727Hz、2次の固有振動数は28.337Hzである。中性子遮蔽体は、集合体の剛性が燃料集合体と等しいが、ペレットの重量が軽いため固有値は全般的に高くなる。

図2-13は、制御棒の1次及び2次の固有モード図を示している。1次の固有振動数は5.633Hz、2次の固有振動数は24.803Hzである。制御棒の重量は燃料集合体とほぼ等しくダクトの剛性も若干小さくなっているのに燃料集合体より固有値が高くなるのは、球面座上方の剛性が高くなっている部分が燃料集合体の約4倍となる995mmだからである。

なお、検討の途中でエントランス・ノズルの長さが50mm短くなり、その分球面座と中間パッド間の長さが50mm増える様な仕様の変更があった。この仕様変更が単体の固有値にどの程度影響を与えるか燃料集合体について検討してみた。その結果、固有振動数に関しては1次が-0.6%、2次が-2.4%、励振計数の1次が0.06%、2次が0.3%、となり仕様変更の影響は無視出来る事が確認出来た。

(3) VIOLLON による固有値

15要素による多自由度固有値解析結果を参照値として、2自由度モデルで単体振動特性をなるべく精度良く模擬できるようなモデル化の手法について検討した。

まず、要素の剛性マトリクスを影響計数法を用いて以下のように算定する。すなわち、下図で、j点に単位力を加えたときのi点の変位を δ_{ij} とすると、次の関係式が成立する。

$$\begin{aligned} X_1 &= -m_1 \ddot{X}_1 \delta_{11} - m_2 \ddot{X}_2 \delta_{12} \dots\dots\dots (2.1) \\ X_2 &= -m_1 \ddot{X}_1 \delta_{21} - m_2 \ddot{X}_2 \delta_{22} \end{aligned}$$

ここで m_1 : 中間部質量
 m_2 : 頂部質量
 X_1 : 中間部変位
 X_2 : 頂部変位

(2.1) 式はマトリクスを用いて(2.2) 式のように表わされる。

$$[D] [M] \{\ddot{X}\} + \{X\} = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで

$$[D] = \begin{Bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{Bmatrix} \quad [M] = \begin{Bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{Bmatrix} \quad \{X\} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix}$$

マトリクス [D] と個性マトリクス [K] の関係は

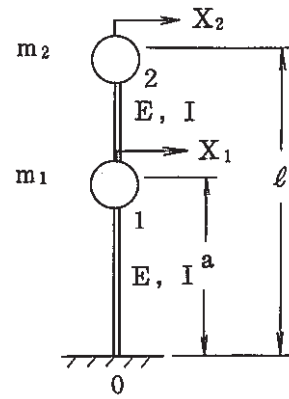
$$[D]^{-1} = [K] \dots\dots\dots (2.3)$$

(2)式に左から [D]⁻¹ をかけると

$$[M] \{\ddot{X}\} + [K] \{X\} = \{0\} \dots\dots\dots (2.4)$$

右図において δ_{ij} は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{a^3}{3EI} \\ \delta_{12} &= \frac{a^2(3\ell - a)}{6EI} \\ \delta_{21} &= \frac{a^2(3\ell - a)}{6EI} \\ \delta_{22} &= \frac{\ell^3}{3EI} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$



2 質点系モデル

ここで、E : ヤング率、I : 断面 2 次モーメント

次に [D] の逆マトリックスを求めると、(2.6) 式のように剛性マトリックスが求まる。

$$[D]^{-1} = [K] = \begin{bmatrix} \frac{12EI\ell^3}{4a^3\ell^3 - a^4(3\ell - a)^2} & -\frac{6EI(3\ell - a)}{4a\ell^3 - a^2(3\ell - a)^2} \\ \frac{6EI\ell^3}{4a\ell^3 - a^2(3\ell - a)^2} & \frac{12EI(3\ell - a)}{4\ell^3 - a(3\ell - a)^2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.6)$$

次に、質量マトリックスについては、以下の 2 とおりの方法を検討した。(表 2-7 参照)

CASE 1 : 頂部パッドより上方の質量と、頂部、中間量両パッド間の質量の 1/2 を頂部 1 ドット部質点とし、頂部、中間両パッド間の質量の 1/2 と中間パッド-下端間の質量の 1/2 を中間パッド部質量とする。

CASE 2 : 頂部パッド部質点の質量は CASE 1 と同一とし、中間パッド部の質量にさらに中間パッド-下端間の質量の 1/2 を加える。

各炉心構成要素について、上記 CASE 1 及び CASE 2 で計算した固有値と、多自由度モデルによる結果の比較を表 2-7 ~ 2-11 に示す。燃料集合体についてみると(表 2-7)、CASE 1 では 1 次、2 次とも若干高めの固有値となっており、2 次モードも大きめの値となっているのに対し、CASE 2 では下部(中間パッド部)の質量を増したことにより固有値、固有モードとも多自由度解析の結果に近づいている。

さらに、CASE 2 の結果を基に、1 次の固有値を多自由度解析結果と一致するよう係数補正を加えたものが CASE 3 である。CASE 3 では、1 次の固有値をあわせるために、多自由度

における1次の固有値とCASE2の1次の固有値の比の2乗を頂部及び中間部の質量に乘じている。

この結果、CASE3では1次の固有値は一致するが、2次の固有値に若干の差が生じる。VIOLLONでは取扱える質点数は2質点であり、1次、2次両方の固有値を合わせることは不可能である。そこで、群振動においても各要素は1次モードが支配的な挙動を示すことを考慮し、CASE3の質量マトリクスを群振動解析に使用することとした。

なお、剛性マトリクスの算定に影響係数法を使用しているので、質量マトリクスにこのような補正を加えても固有モードと刺激係数は変化しない。

多自由度モデル及びVIOLLONの固有値解析に用いた計算条件をAppendix Bに示す。

2.3 衝突解析

VIOLLONによる衝突力計算結果の補正のための参照データを得るために、固有値解析と同じ多自由度モデルを用いて炉心構成要素各単体の非線型衝突解析を実施した。

計算に使用した要素数は集合体1体当たり15要素でエントランス・ノズル及び球面座の境界条件は固有値解析の時と2点のピン支持とした。中間パッドの衝突部バネは1.76ton/mm、頂部パッドの衝突部バネは140.0ton/mm(「もんじゅ」の設計値を参考にして算出した)である。最初に燃料集合体で衝突速度に対する衝突力の依存性をチェックし、次に各炉心構成要素の衝突挙動を評価する。さらに多質点系の計算結果より頂部パッドや中間パッドにおける衝突力の力積を評価してVIOLLONコードの衝突力を補正する衝突部の有効質量を算出する。

(1) 炉心構成要素の衝突挙動

炉心構成要素単体の衝突非線形解析を行う上で、中間パッド及び頂部パッド衝突バネ定数は衝突力に大きく影響を与える。従って、パッド部の圧縮試験及び集合体単体の衝突実験などによって決定する事が望ましい。今回の解析では、実験などによって測定されたパッド部のバネ定数が無いため、「もんじゅ」の3次元FEM解析結果より以下の手順で各パッド部のバネ定数を推定した。

中間パッド部

$$\begin{aligned} K &\simeq K_0 \cdot (l \cdot t^3) / L^3 \\ &\simeq 1.76 \dots\dots\dots (2.7) \end{aligned}$$

ここで、

- K ; 中間パッド部のバネ定数 (ton/mm)
- K₀ ; 「もんじゅ」3次元FEM解析結果より設定した値 (230ton/mm)
- ℓ ; パッドの長さ (100 mm)
- t ; パッド部の板厚 (7 mm)
- L ; 外体面距離 (164.8 mm)

頂部パッド部

$$\begin{aligned}
 K &\simeq K_0 \cdot \left\{ \left(2 / \sqrt{3} \right) \cdot L - D \right\}^3 / L^3 \\
 &\simeq 140 \dots\dots\dots (2.8)
 \end{aligned}$$

ここで、

- K ; 頂部パッド部のバネ定数 (ton/mm)
- K₀ ; 「もんじゅ」3次元FEM解析結果より設定した値 (535ton/mm)
- L ; 外体面距離 (164.8 mm)
- D ; 内径 (85mm)

衝突速度に対する衝突力の依存性をチェックするため、燃料集合体に初期変位を与え、その反動を利用して剛体に衝突させる。初期変位は燃料頂部位置で50.0、100.0、150.0 mmの3種類とした。軸方向の各質点には、固有値解析で得られた変位量と回転角を初期条件として与える。衝突速度に対する衝突力の依存性を評価する際には、頂部パッドと中間パッドの衝突を別々に計算した。図2-14(a)は、頂部に初期変位50.0mmを与えられた燃料集合体の頂部パッドが剛体に衝突する際に発生する衝突力の時刻歴を示している。図2-14(b)は、変位の時刻歴を示している。図2-14(c)は、速度の時刻歴を示している。

図2-14(d)は、加速度の時刻歴を示している。衝突直前の頂部パッド位置の質点の速度は948.1 mm/sec、その時の衝突力は11.2tonである。衝突の継続時間は0.001秒、0.013秒後に再度衝突が生じる。

図2-14(e)は、頂部に初期変位50.0mmを与えられた燃料集合体の中間部パッドが剛体に衝突する際に発生する衝突力の時刻歴を示している。

図 2-14 (f) は、変位の時刻歴を示している。図 2-14 (g) は、速度の時刻歴を示している。図 2-14 (h) は、加速度の時刻歴を示している。衝突直前の中間パッド位置の質点の速度は 542.4 mm/sec、その時の衝突力は 2.6ton である。衝突は中間パッド上方の運動に影響され 0.037 秒迄生じ、この間に 2 度のピークを生じる。

頂部と中間部の衝突力の継続時間は、それぞれのパッド部の固有振動数に対応しており、比較的剛な頂部パッドでは継続時間が非常に短く、比較的薄肉で柔な中間パッドでは継続時間はやや長くなっている。

初期変位 100 mm の場合は、頂部の衝突速度が 1883.6mm/sec、衝突力が 22.3ton、中間パッドの衝突速度が 1084.8mm/sec、衝突力が 5.3ton となった。初期変位 150 mm の場合は、頂部パッドの衝突速度が 2825.4mm/sec、衝突力が 33.57ton、中間パッドの衝突速度が 1627.3mm/sec、衝突力が 7.9ton という結果となった。図 2-15 に衝突直前の速度と衝突力の関係を示すが、衝突力は頂部パッド及び中間パッド共に衝突速度に対し比例関係にあることがわかる。

ブランケット集合体等の他の炉心構成要素についても同様のモデルを用いて、初期変位 100 mm の場合について衝突解析を行った。その結果をまとめて表 2-12 に示す。また、各解析結果の時刻歴は Appendix C にまとめて示す。

(2) 衝突部の有効質量の算出

衝突部近傍を詳細なビームと圧縮バネによりモデル化した多質点モデルでパッド部の衝突を解析すると、衝突時には衝突部近傍での変形が生ずる。これは高次モードによる曲げとせん断変形の効果と考えられる。そこで炉心構成要素単体の非線形解析結果より VIOLLON における衝突力の補正係数を算出する、衝突部の有効質量を計算する手法を以下に示す。解析によって得られた衝突力の時刻歴を $F(t)$ とすると、力積の定義より

$$M_{eff} \cdot V (1.0 + e) = \int^{\Delta T} F(t) dt \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで

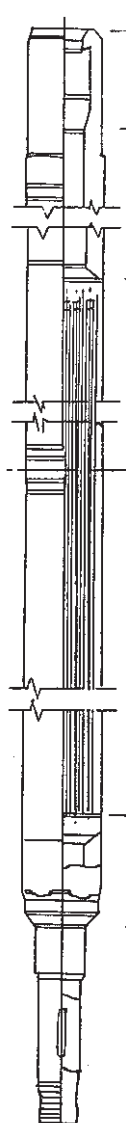
- M_{eff} ; 衝突に寄与する有効質量
- V ; 衝突速度
- $F(t)$; 衝突力
- e ; 反発係数 (= 0.7 ; 「もんじゅ」集合体パッド部測定値)
- ΔT ; 継続時間

表 2 - 13は、多質点解析による衝突部有効質量を示している。燃料集合体の単体非線形解析結果でも明らかな様に、衝突速度と衝突力の関係は線形であるため、力積も衝突速度に比例する。力積を計算する際に若干の誤差が生じるが、燃料集合体の頂部パッドに於ける衝突部有効質量は $3.49 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ で、衝突部の有効質量の約 2 倍となる。中間パッド位置に於ける力積も衝突速度に比例している。燃料集合体の中間パッド位置に於ける衝突部有効質量は $1.57 \times 10^{-2} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量は $2.81 \times 10^{-2} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ で、衝突部の有効質量の約 2 倍となる。

ブランケット集合体、中性子遮蔽体、制御棒は頂部変位を 100 mm とした場合の集合体単体非線形解析結果より衝突部有効質量を算出した。ブランケット集合体の頂部パッド位置に於ける衝突部有効質量は $4.21 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。衝突部の有効質量は、固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量 $7.39 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ の約 6 割となる。ブランケット集合体の中間パッド位置に於ける衝突部有効質量は $1.84 \times 10^{-2} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。衝突部の有効質量は、固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量 $3.08 \times 10^{-2} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ の約 6 割となる。中性子遮蔽体の頂部パッド位置に於ける衝突部有効質量は $4.95 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。衝突部の有効質量は、固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量 $7.17 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ の約 7 割となる。中性子遮蔽の中間パッド位置に於ける衝突部有効質量は $8.13 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。衝突部の有効質量は、固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量 $1.92 \times 10^{-2} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ の約 6 割となる。制御棒の頂部パッド位置に於ける衝突有効質量は $1.33 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。衝突部の有効質量は、固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量 $1.65 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ の約 8 割となる。中性子遮蔽体の中間パッド位置に於ける衝突部有効質量は $5.55 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ となる。衝突部の有効質量は、固有値解析で求められた VIOLLON の頂部パッド位置の質量 $9.86 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{mm} / \text{sec}^2$ の約 6 割となる。

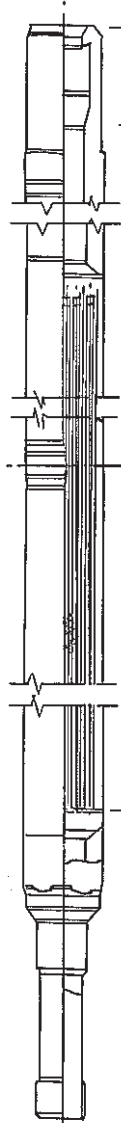
VIOLLON による衝突力の解析結果に対し、各パッド部の有効質量と計算に用いた質量の比を乗じて得られた値を評価に用いた。

表 2 - 1 燃料集合体の形状・剛性データ



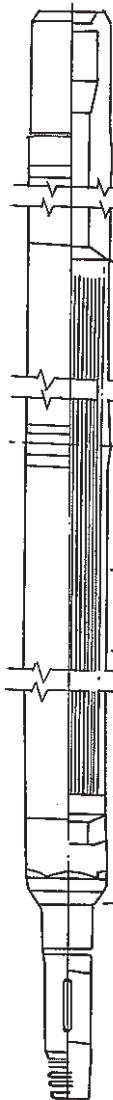
	SUS316 質量 (kg)	Na重量 (kg)	Na付加 質量 (kg)	ペレット 重量 (kg)	合計重量 (kg)	断面積 (mm ²)	断面2次 モーメント(mm ⁴)	軸長 (mm)
	7.2	2.0	2.7	—	11.9	6445.1	1.83×10 ⁷	150
	98.3	3.5	13.6	—	115.4	16164.4	3.57×10 ⁷	760
	11.2	2.8	2.9	—	16.9	2145.0	7.14×10 ⁹	240
	11.9	1.8	5.4	27.9	47.0	2145.0	7.14×10 ⁹	300
	39.6	6.2	18.4	91.8	156	2145.0	7.14×10 ⁹	1000
	11.9	1.9	5.7	27.9	47.4	2145.0	7.14×10 ⁹	300
	39.4	5.7	17.1	—	62.2	2145.0	7.14×10 ⁹	900
	28.2	1.7	4.8	—	34.7	16785.7	3.16×10 ⁷	250
	7.4	2.5	—	—	9.9	2312.5	2.99×10 ⁹	400
合計	255.1			147.6				
		402.7						

表 2 - 2 ブランケット集合体の形状・剛性データ



	SUS316 重量 (kg)	Na重量 (kg)	Na付加 質量 (kg)	ペレット 重量 (kg)	合計重量 (kg)	断面積 (mm ²)	断面2次 モーメント(mm ⁴)	軸長 (mm)
	7.2	2.0	2.7	-	11.9	6445.1	1.83×10 ⁷	150
	98.3	3.5	13.6	-	115.4	16164.4	3.57×10 ⁷	760
	10.7	2.5	2.9	-	16.1	2145.0	7.14×10 ⁶	240
	10.4	1.3	5.4	37.5	54.6	2145.0	7.14×10 ⁶	300
	33.5	4.4	18.4	125.1	181.4	2145.0	7.14×10 ⁶	1000
	10.4	1.4	5.7	37.5	55.0	2145.0	7.14×10 ⁶	300
	35.1	4.0	17.1	-	56.2	2145.0	7.14×10 ⁶	900
	28.2	1.7	4.8	-	34.7	16785.7	3.16×10 ⁶	250
	6.3	2.9	-	-	9.2	1968.8	2.88×10 ⁶	400
合計	240.1			200.1				
44.02								

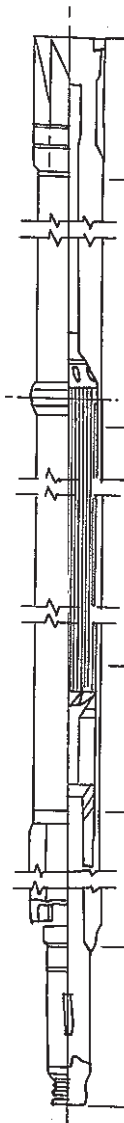
表 2 - 3 中性子遮蔽体の形状・剛性データ



	SUS316 質量(kg)	Na重量 (kg)	Na付加* 質量(kg)	ペレット 質量(kg)	合計重量 (kg)	断面積 (mm ²)	断面2次 モーメント(mm ⁴)	軸長 (mm)
	7.2	2.0	2.7	—	11.9	6445.1	1.83×10 ⁷	150
	98.3	3.5	13.6	—	115.4	16164.4	3.57×10 ⁷	760
	7.1	1.2	4.6	—	12.9	2145.0	7.14×10 ⁶	240
	9.6	0.8	5.7	7.5	23.6	2145.0	7.14×10 ⁶	300
	32.0	2.7	19.0	19.0	25.0	2145.0	7.14×10 ⁶	1000
	9.6	0.8	5.7	7.5	23.6	2145.0	7.14×10 ⁶	300
	28.8	2.4	17.1	—	48.3	2145.0	7.14×10 ⁶	900
	28.2	1.7	4.8	—	34.7	16785.7	3.16×10 ⁷	250
	7.4	2.5	—	—	9.9	2312.5	2.99×10 ⁶	400
合計	228.2	268.2		40.0				

* Naを排除する質量

表 2 - 4 制御棒の形状・剛性データ



	SUS316 質量 (kg)	Na重量 (kg)	N ₂ 付加* 質量 (kg)	ペレット 質量 (kg)	合計重量 (kg)	断面積 (mm ²)	断面2次 モーメント(mm ⁴)	軸長 (mm)	
I	1.9	** 2.9	3.7	6.4	—	34.9	5608	1.72×10 ⁷	340
II	17.3	** 8.4	16.2	19.0	—	60.9	1948	5.85×10 ⁶	1110
III	13.5	** 22.7	13.0	17.1	17.9	86.2	1948	5.85×10 ⁶	1000
IV	4.7	** 12.6	3.8	7.8	—	48.9	1948	5.85×10 ⁶	455
V	120.4	3.3	16.3	—	—	140.1	18046	3.71×10 ⁷	995
VI	7.4	2.5	—	—	—	9.9	2313	2.99×10 ⁶	400
合計	253.8				17.9				
	271.7								

* 排除する Na 質量

** 内部の造物重量 (制御棒)

表 2 - 5 要素数による固有値の変化

		4 要素	6 要素	10 要素	15 要素
固有値 (Hz)	1次	3.227	3.119	3.352	3.363
	2次	22.190	20.447	21.129	20.965
*) モード	1次	0.547	0.549	0.537	0.538
	2次	-0.444	-0.407	-0.425	-0.412
励振 係数	1次	1.436	1.547	1.565	1.572
	2次	-0.452	-0.717	-0.779	-0.781

*) 頂部を1.0とした時の中間パッド位置の比較

表 2 - 6 炉心構成要素の固有値

		燃 料	ブランケット	中性子遮蔽体	制 御 棒
固 有 値 (Hz)	1次	3.363	3.254	3.727	5.633
	2次	20.965	19.793	28.337	24.803
*) モ ー ド	1次	0.538	0.541	0.531	0.499
	2次	-0.412	-0.351	-0.766	-0.497
励 振 係 数	1次	1.572	1.607	1.407	1.673
	2次	-0.781	-0.813	-0.621	-0.983

*)
頂部を1.0としたと時の中間パッド位置の比較

表 2 - 7 VIOLLON による燃料集合体の固有値

		多自由度	CASE 1	CASE 2	CASE 3
固有値 (Hz)	1次	3.363	3.449	3.060	3.365
	2次	20.965	23.152	20.307	22.330
*) モード	1次	0.538	0.551	0.557	0.557
	2次	-0.412	-0.787	-0.471	-0.472
励振係数	1次	1.572	1.336	1.430	1.430
	2次	-0.781	-0.336	-0.430	-0.430

*) 頂部を1.0とした時の中間パッド位置の比率

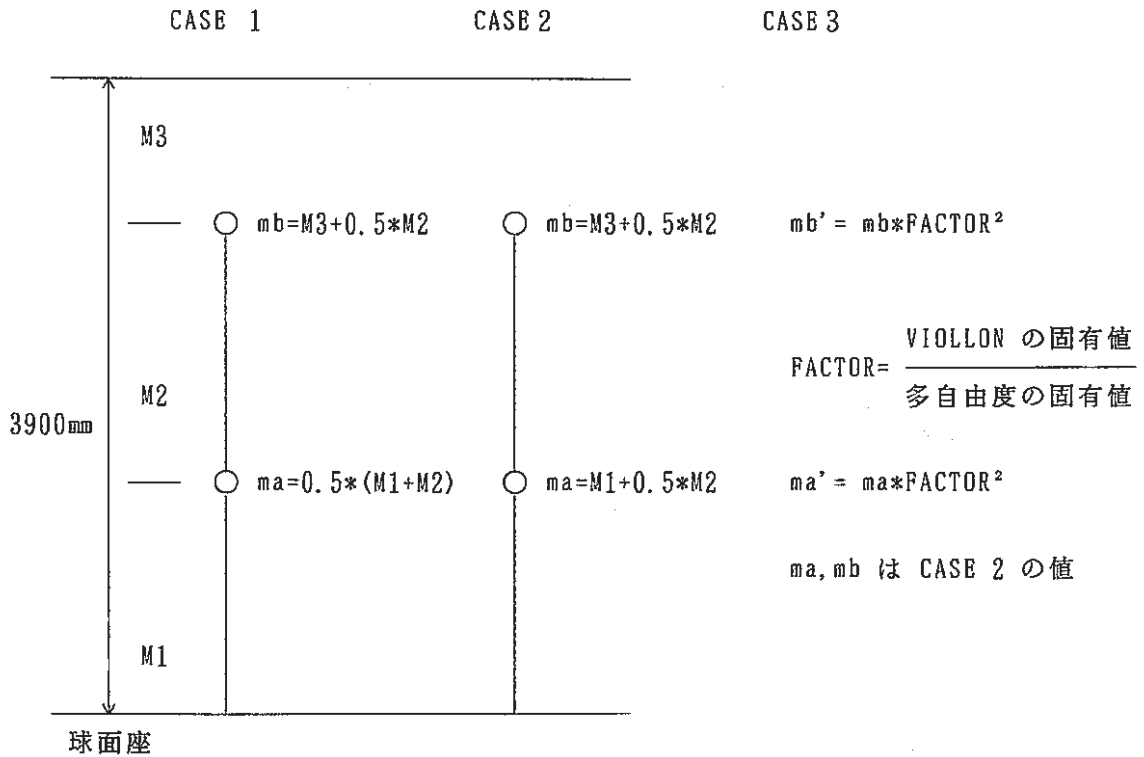


表 2 - 8 VIOLLON によるブランケット集合体の固有値

		多自由度	CASE 1	CASE 2	CASE 3
固有値 (Hz)	1次	3.254	3.356	2.966	3.254
	2次	19.793	22.439	19.732	21.650
*) モード	1次	0.541	0.552	0.558	0.558
	2次	-0.351	-0.747	-0.446	-0.446
励振係数	1次	1.607	1.345	1.440	1.440
	2次	-0.813	-0.345	-0.440	-0.440

*) 頂部を1.0 としたと時の中間パッド位置の比率

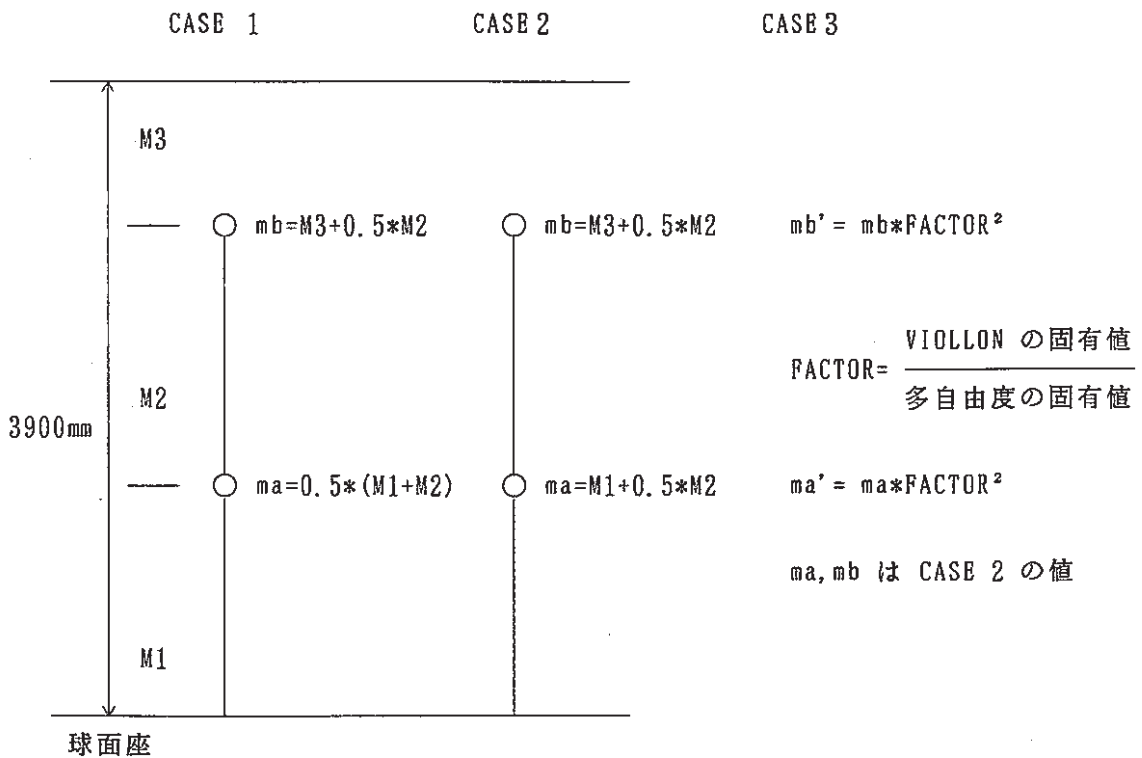


表 2 - 9 VIOLLON による中性子遮蔽体(B₄C)の固有値

		多自由度	CASE 1	CASE 2	CASE 3
固有値 (Hz)	1次	3.727	3.930	3.607	3.727
	2次	28.337	27.318	23.970	24.764
*) モード	1次	0.531	0.548	0.553	0.553
	2次	-0.766	-1.050	-0.675	-0.675
励振係数	1次	1.407	1.283	1.364	1.364
	2次	-0.621	-0.283	-0.364	-0.364

*) 頂部を1.0とした時の中間パッド位置の比率

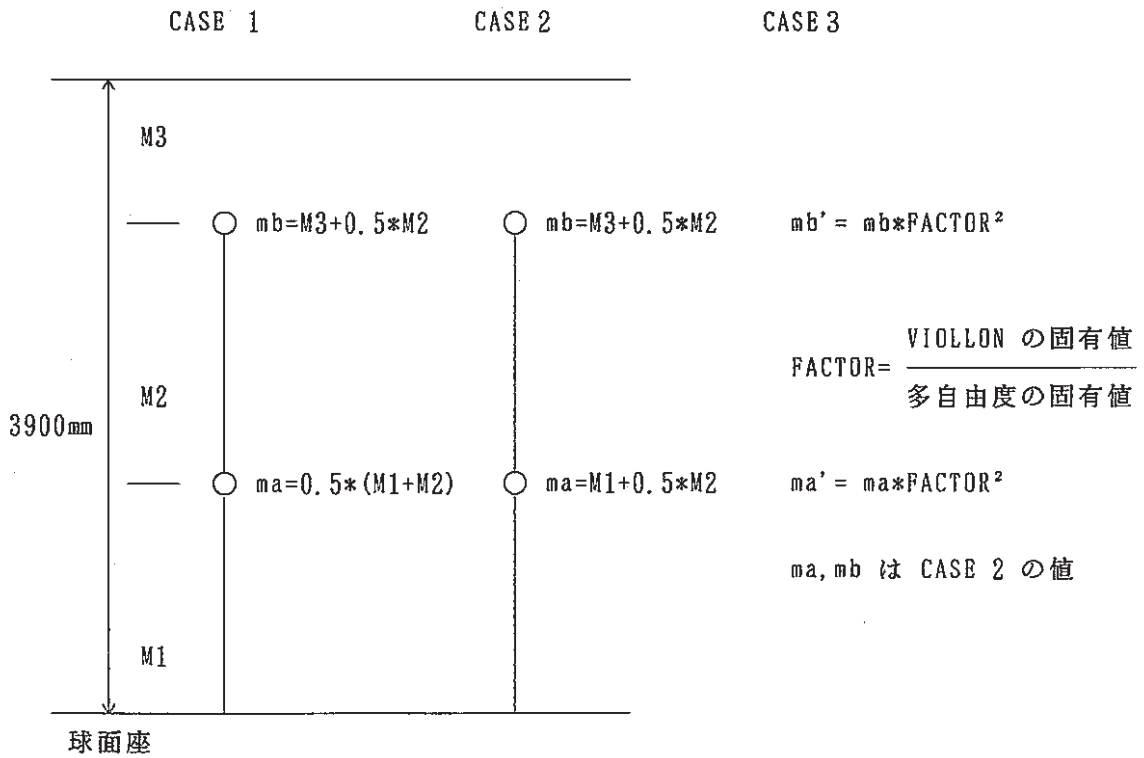


表 2 - 10 VIOLLON による中性子遮蔽体(SUS)の固有値

		多自由度	CASE 1	CASE 2	CASE 3
固有値 (Hz)	1次	3.363	3.373	2.996	3.363
	2次	20.965	22.636	19.881	22.311
*) モード	1次	0.538	0.551	0.558	0.557
	2次	-0.412	-0.782	-0.470	-0.470
励振係数	1次	1.572	1.337	1.430	1.431
	2次	-0.781	-0.337	-0.430	-0.431

*) 頂部を1.0 としたと時の中間パッド位置の比率

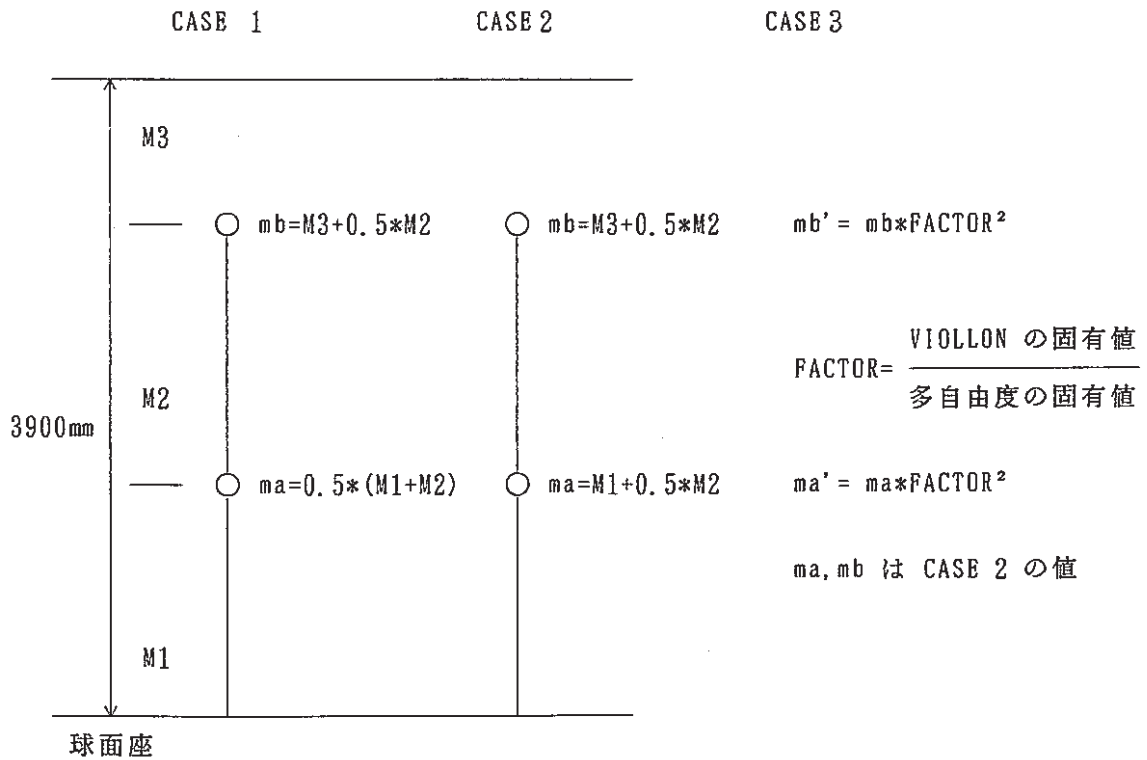


表 2 - 11 VIOLLON による制御棒の固有値

		多自由度	C A S E 1	C A S E 2	C A S E 3
固有値 (Hz)	1次	5.633	4.075	3.429	5.630
	2次	24.803	26.950	23.806	39.069
*) モード	1次	0.499	0.556	0.563	0.563
	2次	-0.497	-0.544	-0.296	-0.297
励振係数	1次	1.673	1.404	1.508	1.508
	2次	-0.983	-0.404	-0.508	-0.508

*) 頂部を1.0とした時の中間パッド位置の比率

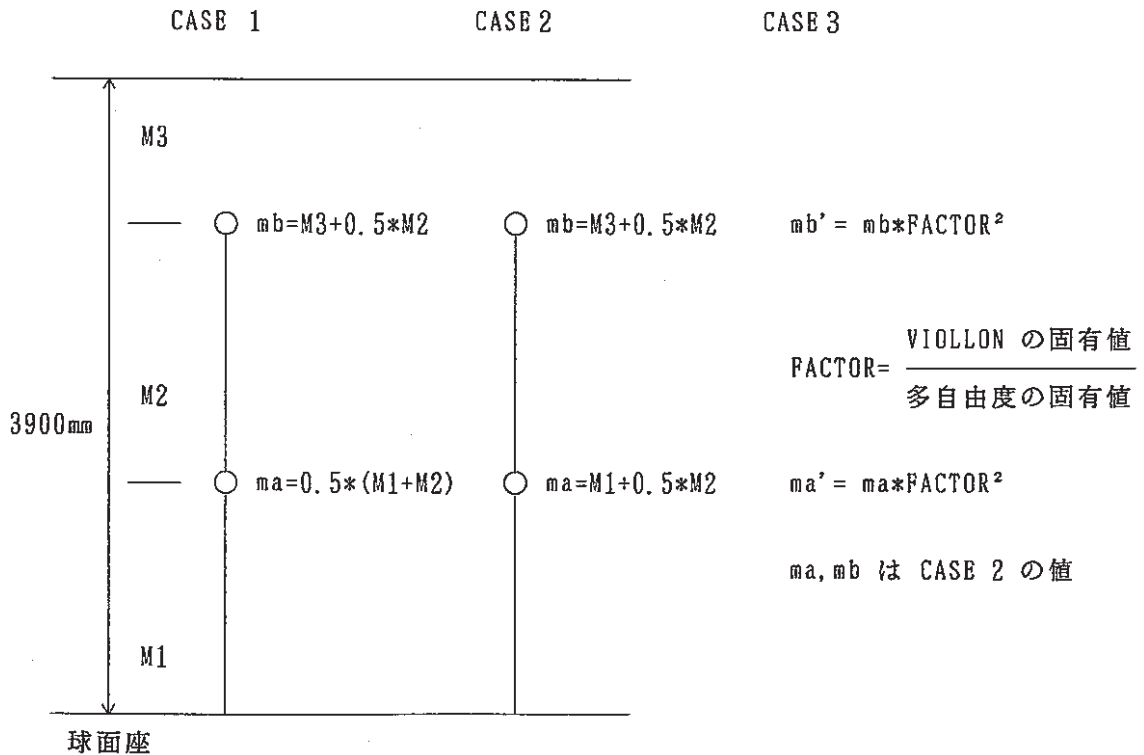


表 2-12 衝突速度と衝突力の関係

初期 変位 mm	燃料集合体		ブランケット集合体		中性子遮蔽体		制御棒	
	頂部	中間部	頂部	中間部	頂部	中間部	頂部	中間部
50	11.2	2.6	—	—	—	—	—	—
	948.1	542.7						
100	22.3	5.3	26.1	5.5	35.1	4.1	28.4	4.1
	1883.6	1084.8	1823.3	1055.9	2084.7	1186.1	3131.3	1684.6
150	33.5	7.9	—	—	—	—	—	—
	2825.4	1627.3						

上段 衝突力 単位：TON

下段 初速度 単位：mm/sec

表 2 - 13 多質点解析による衝突部有効質量

		衝突速度 (mm/sec)	力積 (kg sec)	有効質量 (kg sec ² /mm)	VIOLLON の質量 (kg sec ² /mm)
燃料集合体	頂部パッド	941.8	5.6×10^3	3.50×10^{-3}	7.39×10^{-3}
		1883.6	11.2×10^3	3.48×10^{-3}	
		2825.4	16.8×10^3	3.49×10^{-3}	
	中間パッド	542.4	14.3×10^3	1.55×10^{-2}	2.81×10^{-2}
		1084.8	29.2×10^3	1.58×10^{-2}	
		1627.3	43.5×10^3	1.57×10^{-2}	
ブランケット	頂部	1823.3	13.1×10^3	4.21×10^{-3}	7.67×10^{-3}
	中間部	1055.9	33.0×10^3	1.84×10^{-2}	3.08×10^{-2}
中性子遮蔽体	頂部	2084.7	17.6×10^3	4.95×10^{-3}	7.17×10^{-3}
	中間部	1186.1	16.4×10^3	8.13×10^{-3}	1.92×10^{-2}
制御棒	頂部	3131.3	7.1×10^3	1.33×10^{-3}	1.65×10^{-3}
	中間部	1684.6	15.9×10^3	5.55×10^{-3}	9.86×10^{-3}

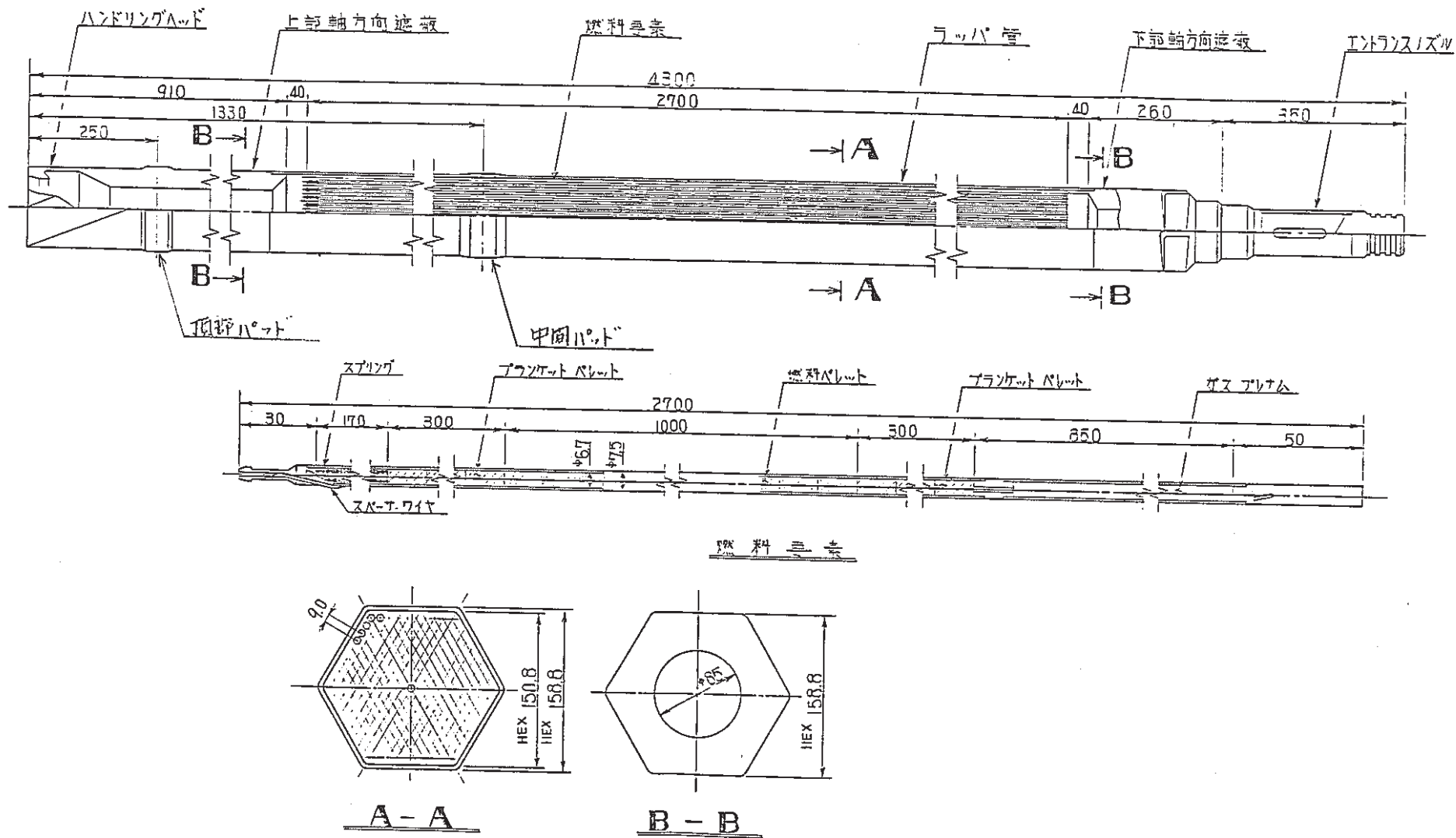


図 2 - 1 燃料集合体概念図 (12)

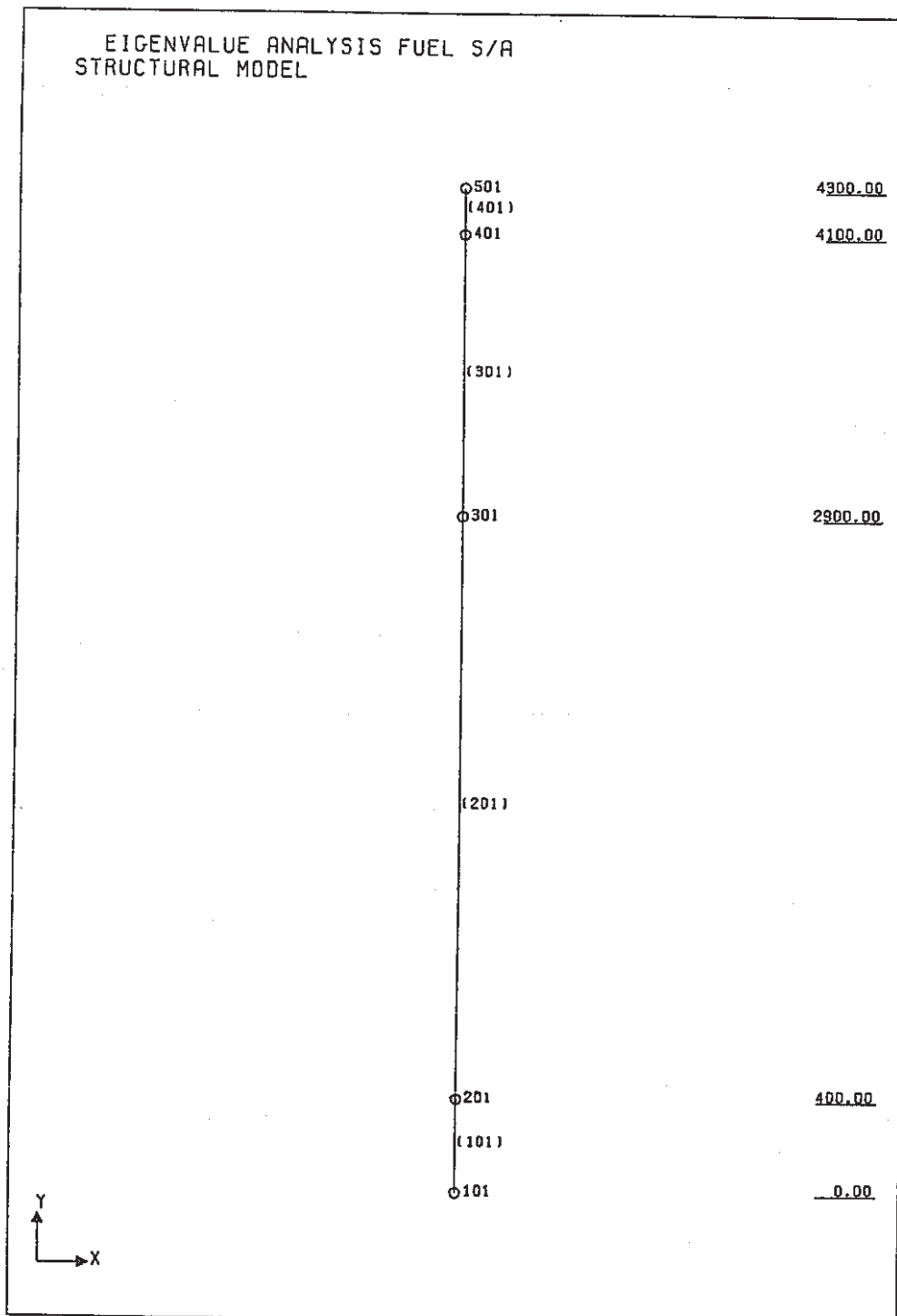


図 2 - 2 4 要素による燃料の固有値解析モデル

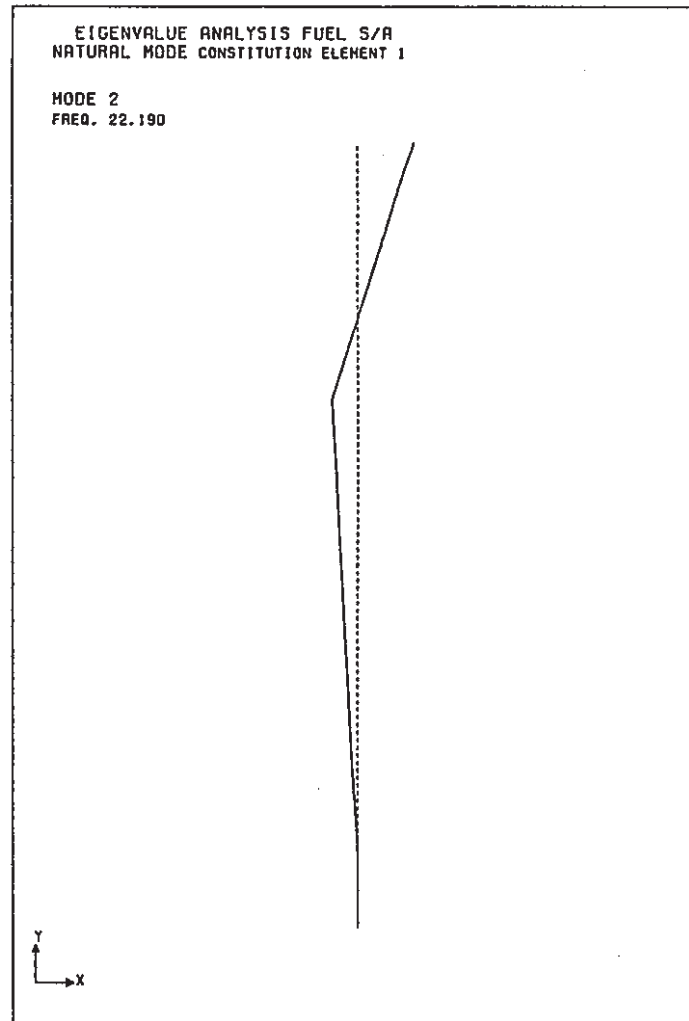
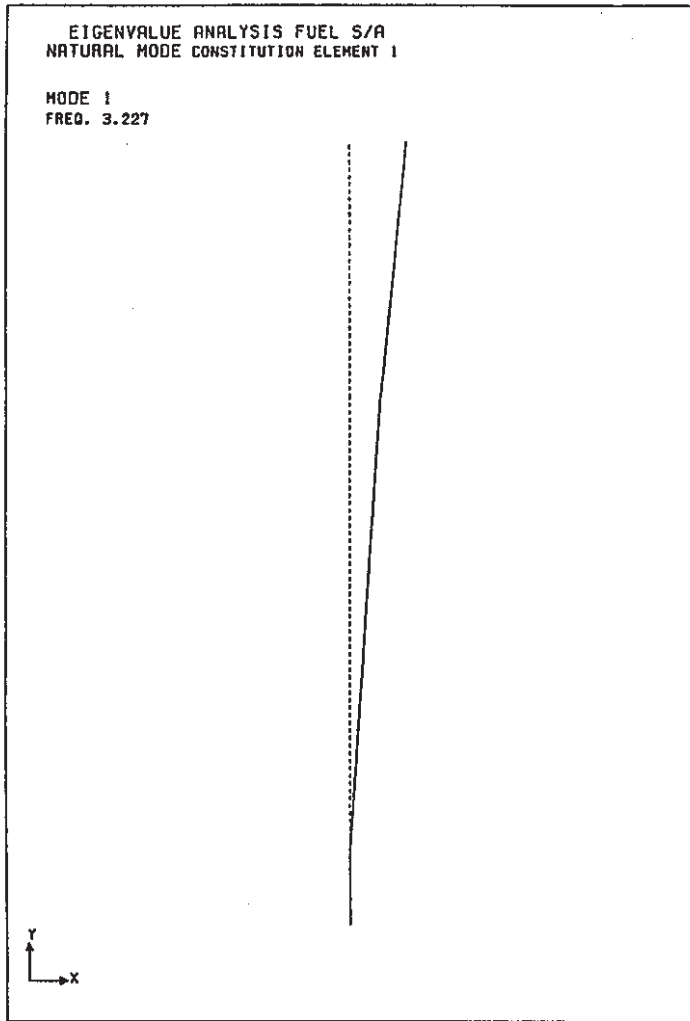


図 2 - 3 4 要素による燃料の 1 次及び 2 次の固有モード

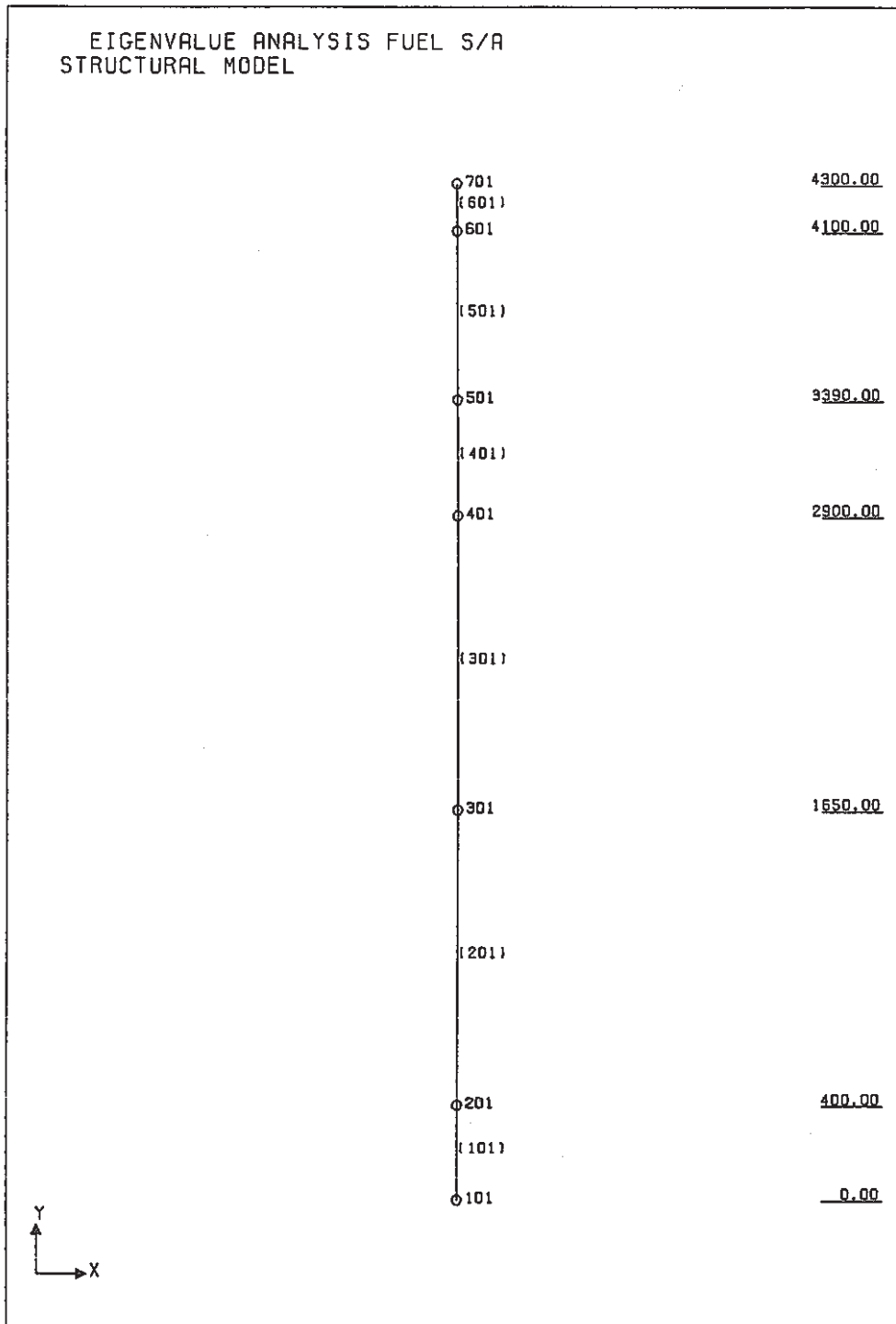


図 2 - 4 6 要素による燃料の固有値解析モデル

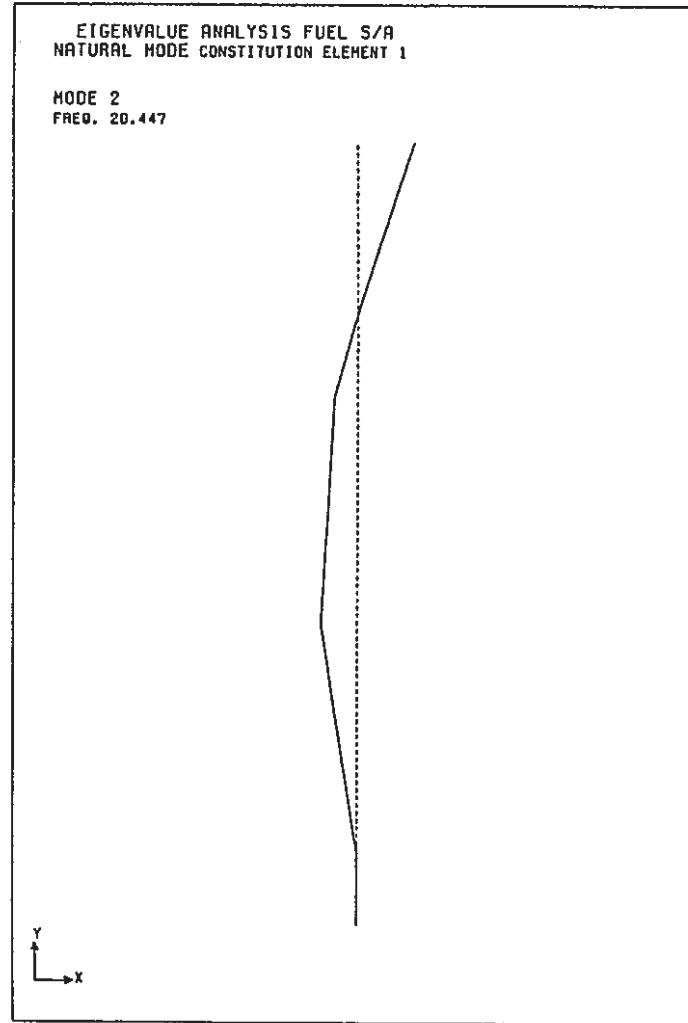
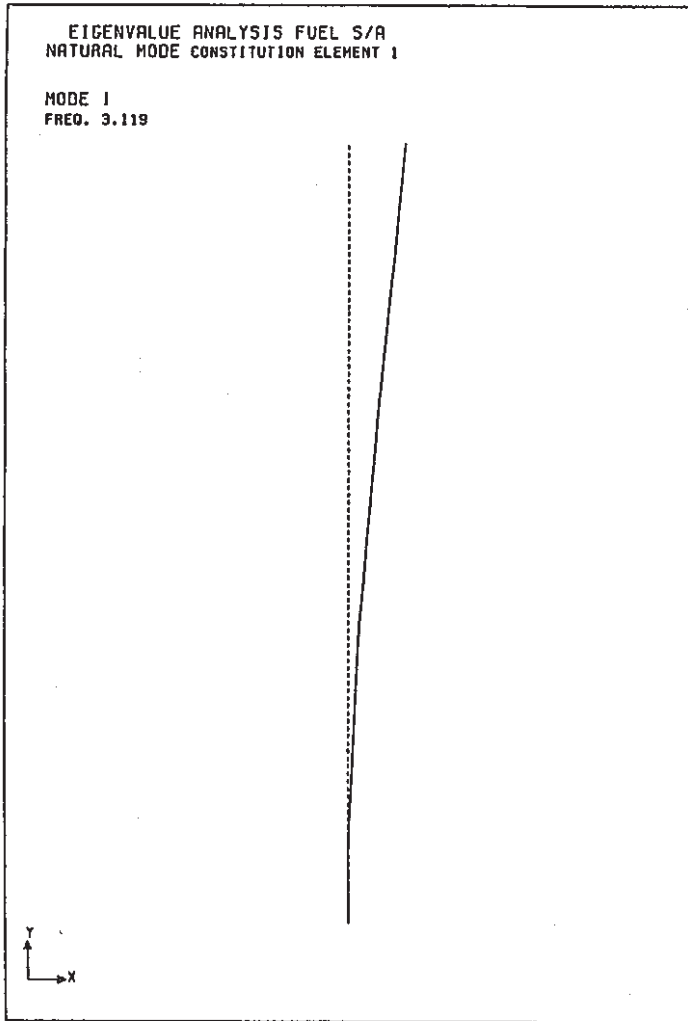


図 2 - 5 6 要素による燃料の 1 次及び 2 次の固有モード

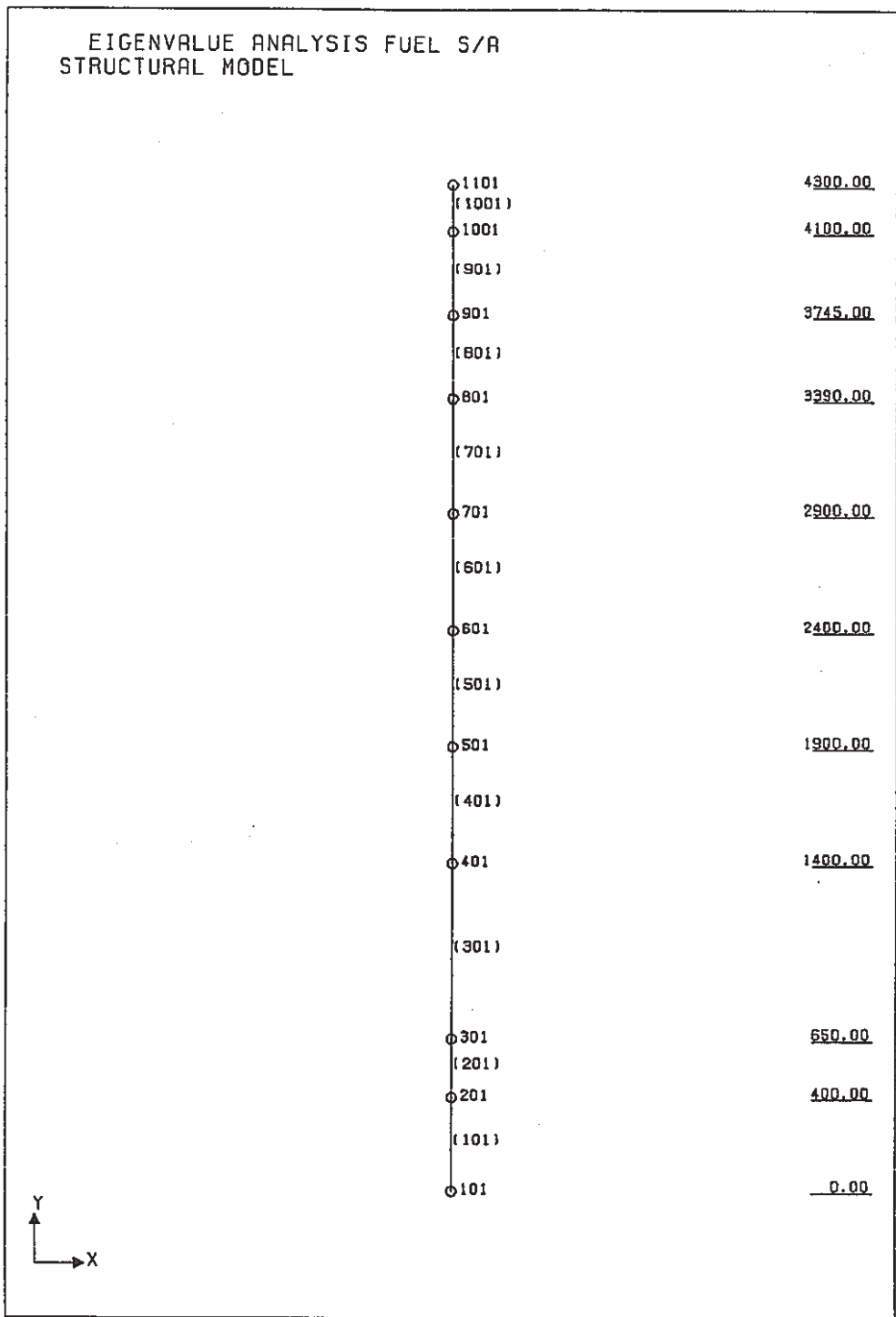


図 2 - 6 10要素による燃料の固有値解析モデル

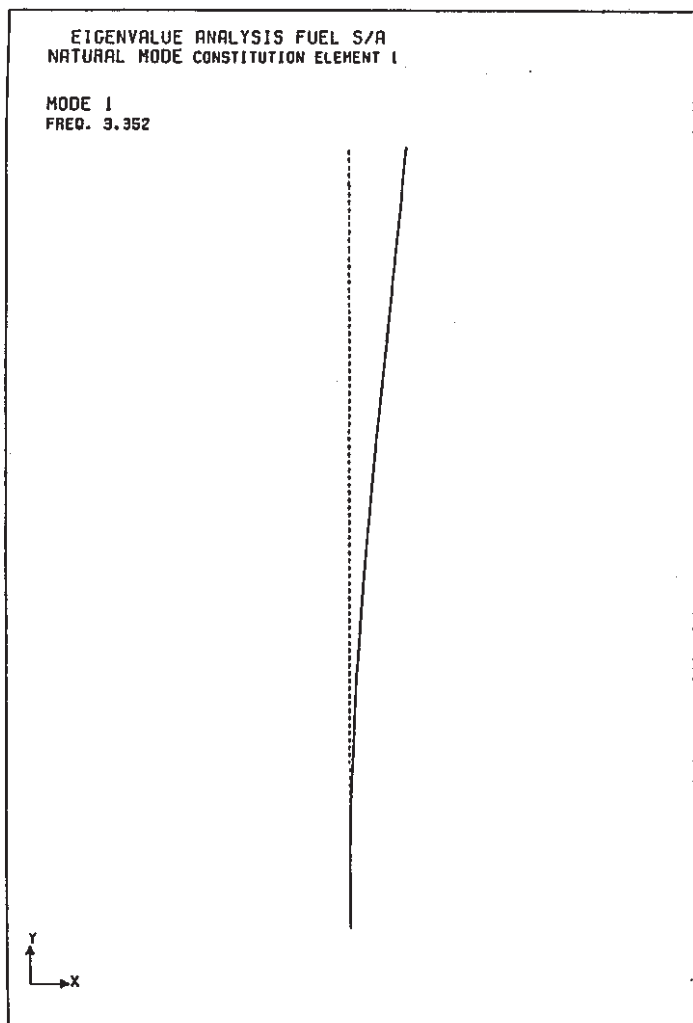


図 2 - 7 10要素による燃料の1次及び2次の固有モード

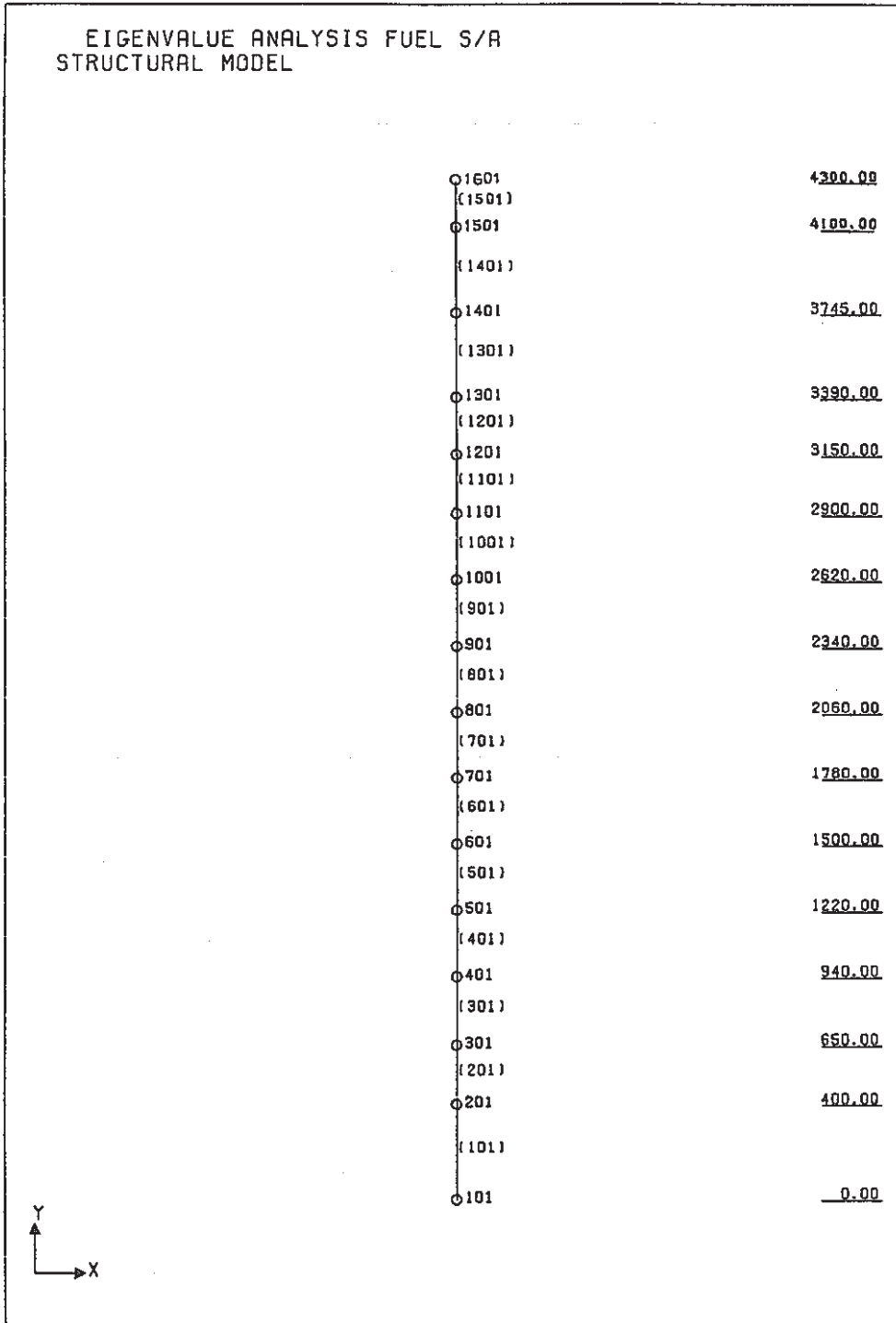


図 2 - 8 15要素による燃料の固有値解析モデル

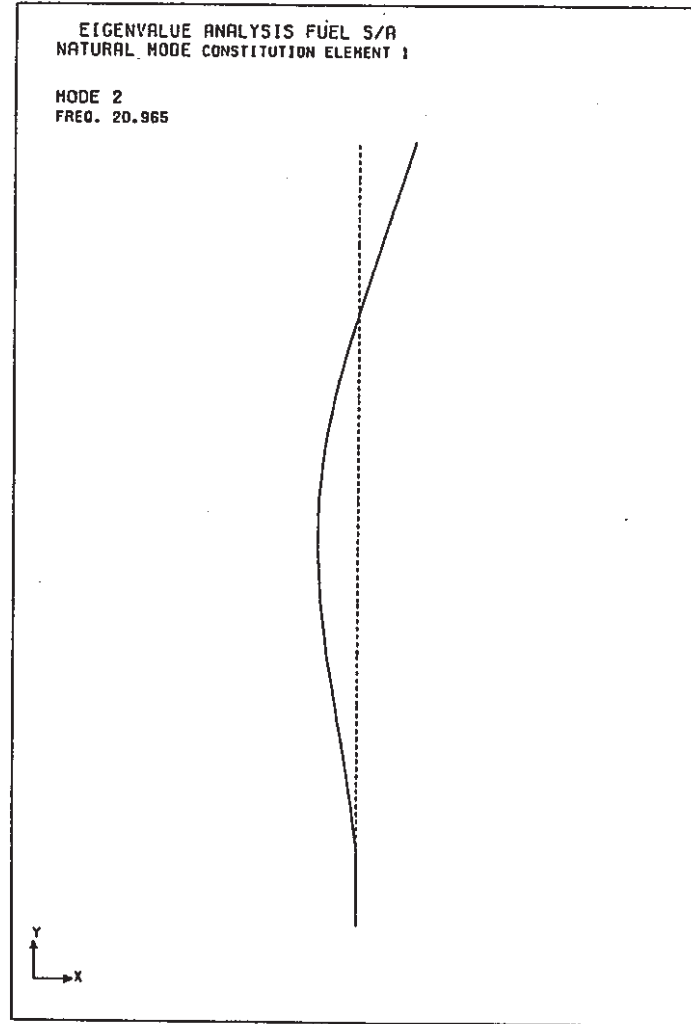
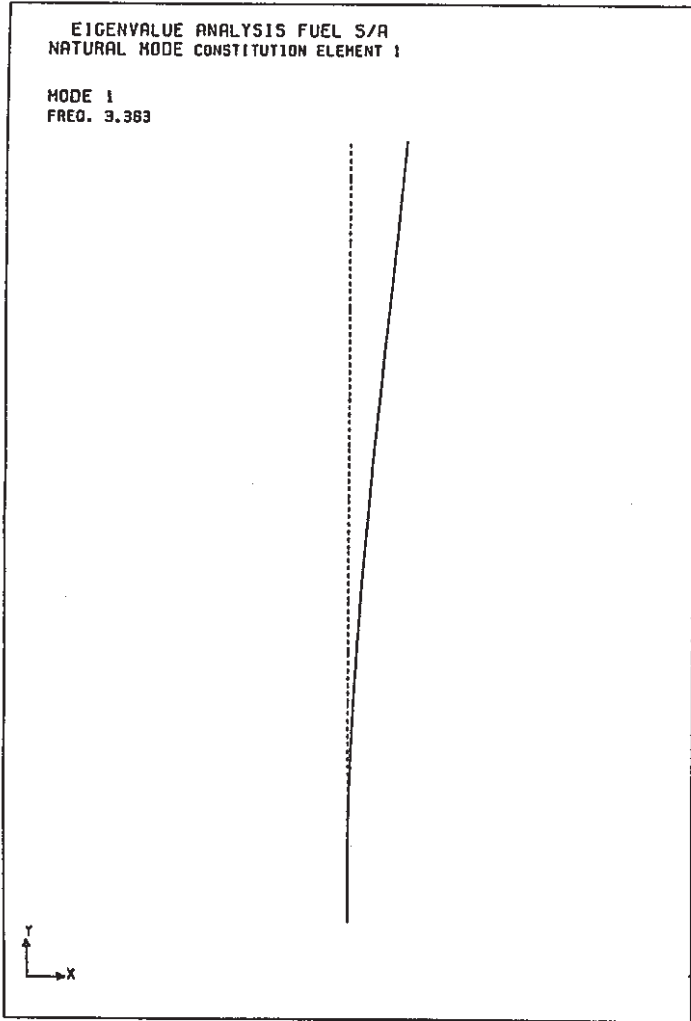


図 2 - 9 15要素による燃料の1次及び2次の固有モード

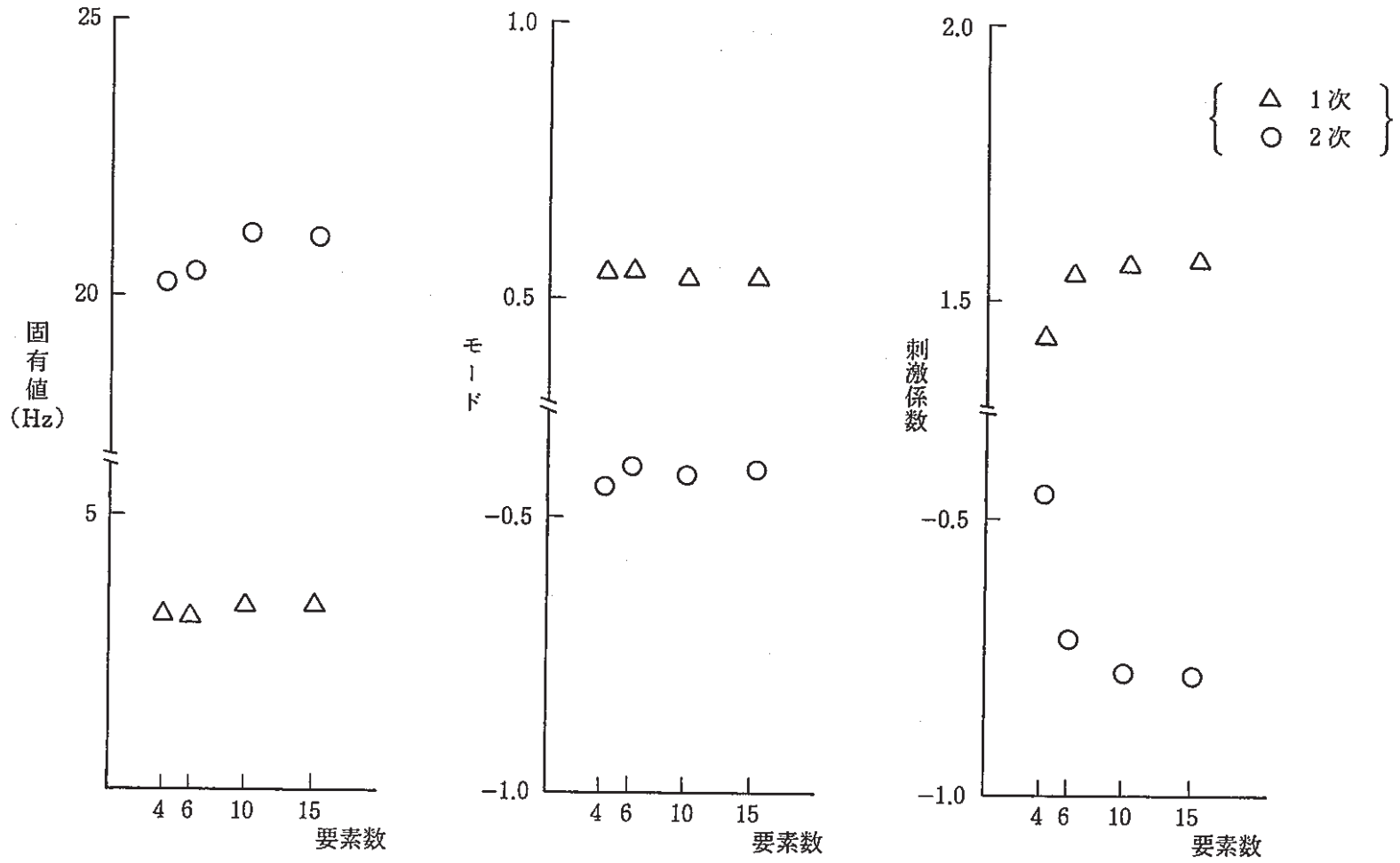


図 2 - 10 要素数による固有値の変化

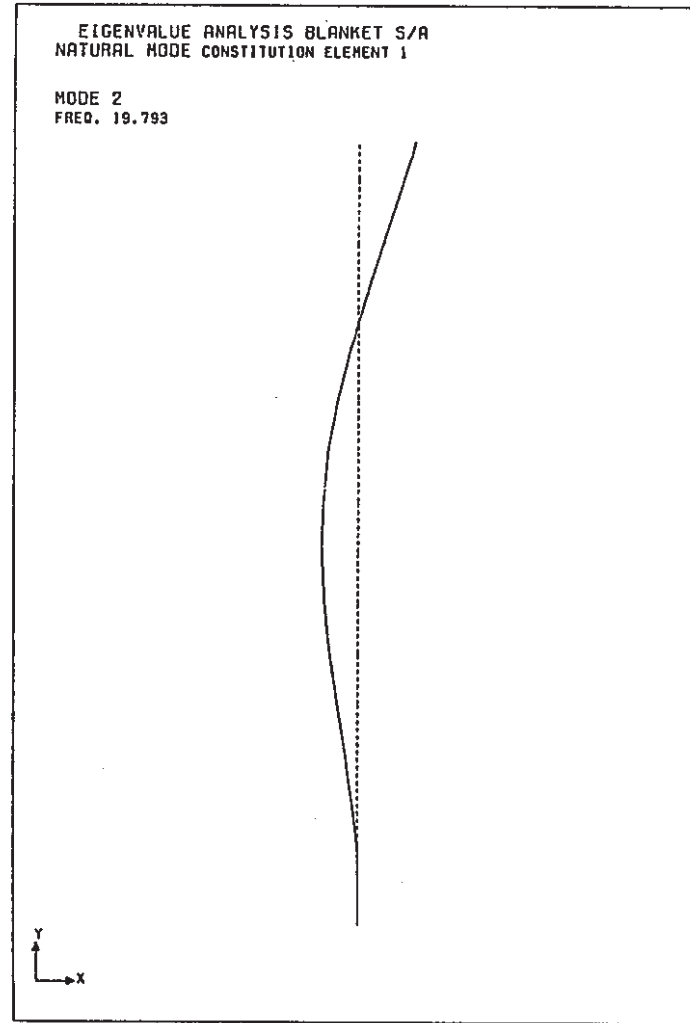
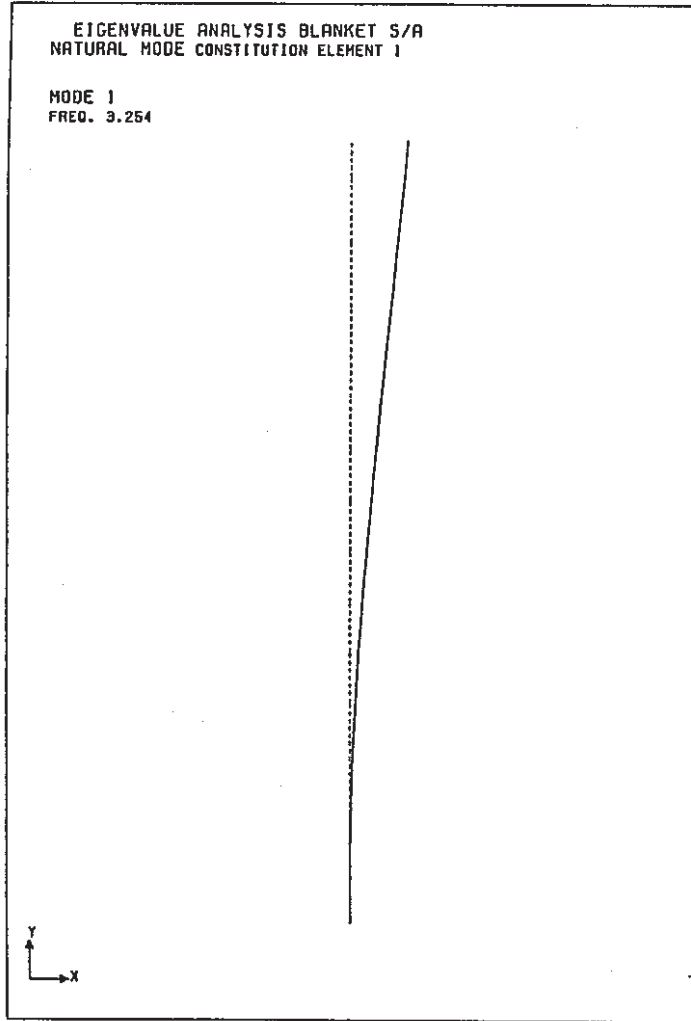


図 2 - 11 ブランケットの 1 次及び 2 次の固有モード

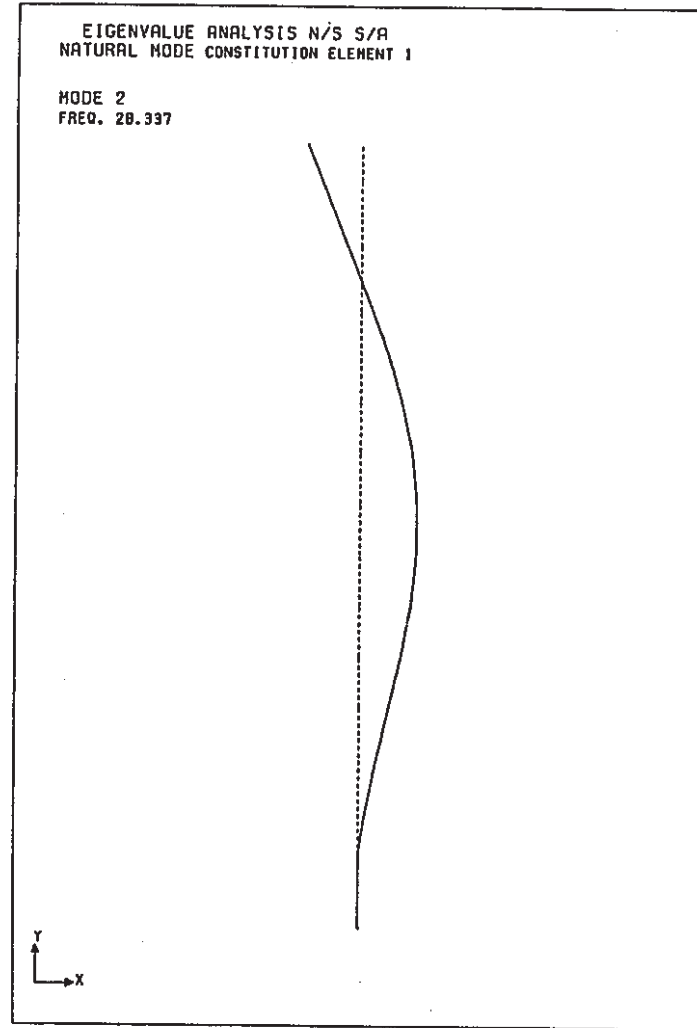
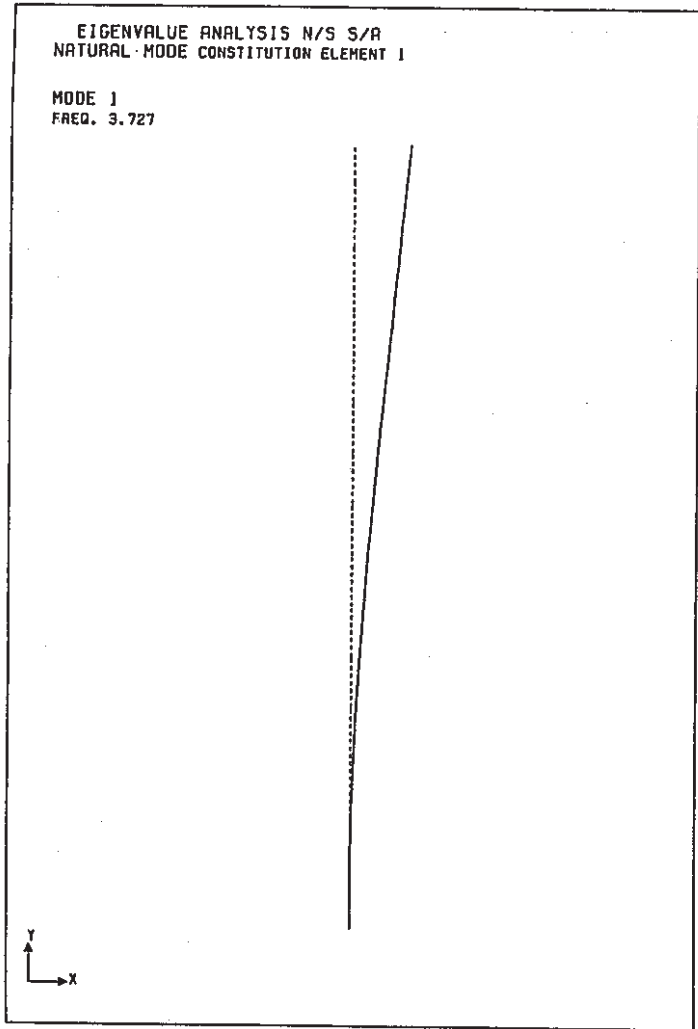


図 2 - 12 中性子遮蔽体の 1 次及び 2 次の固有モード

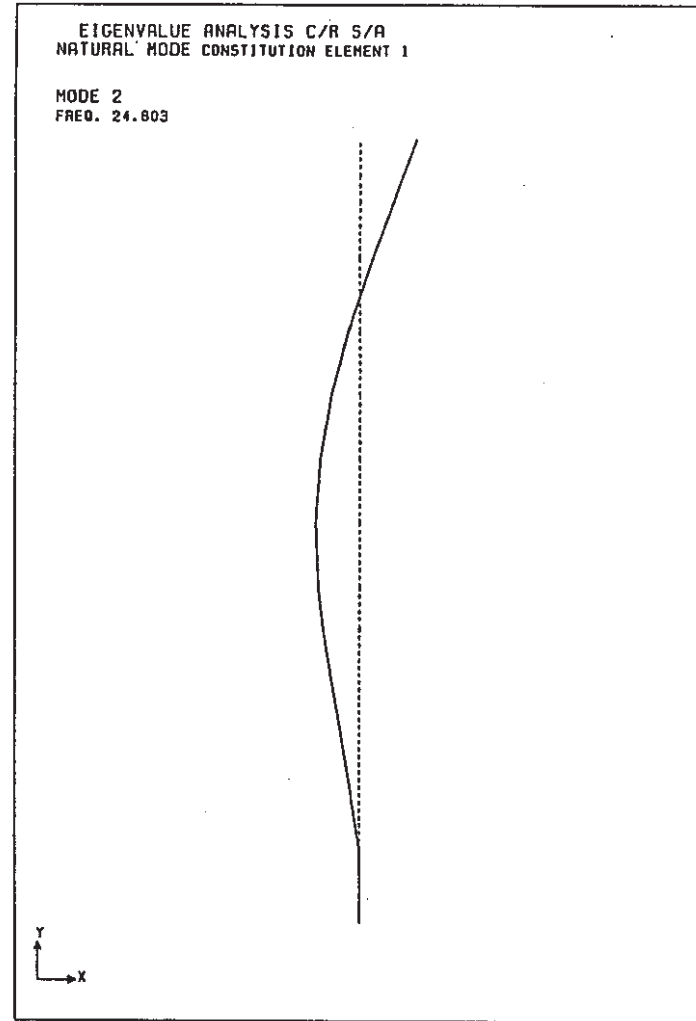
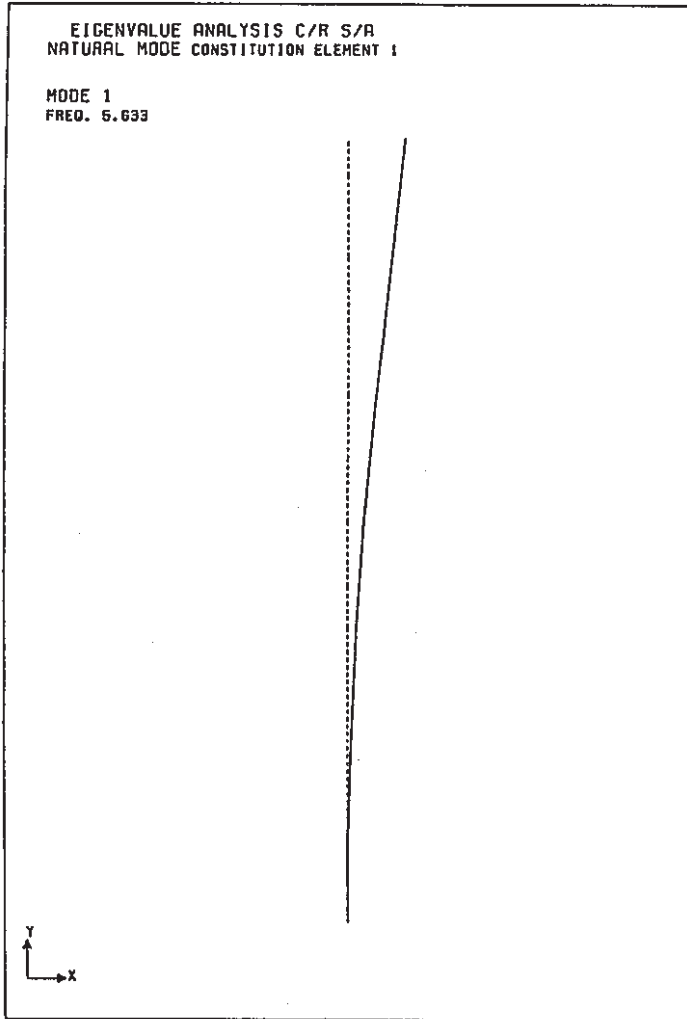
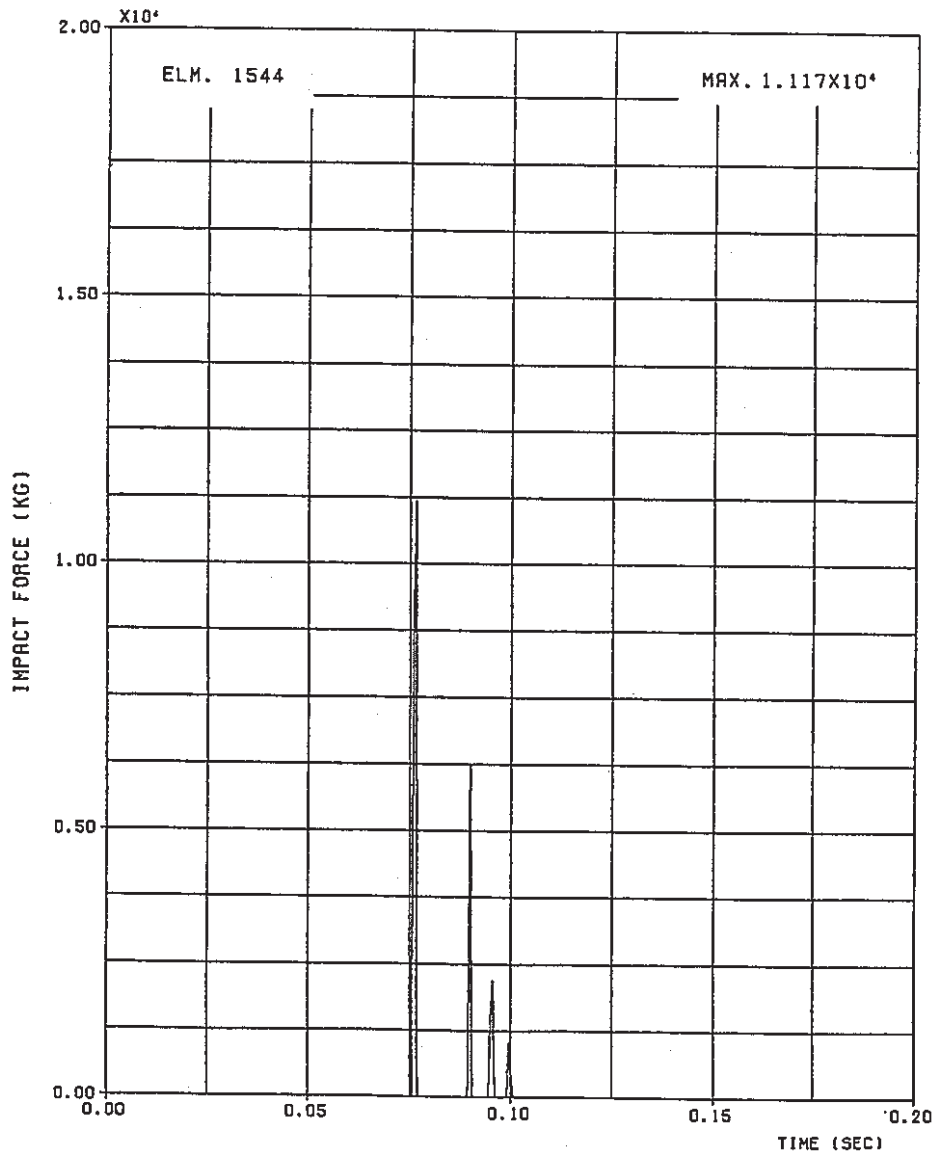


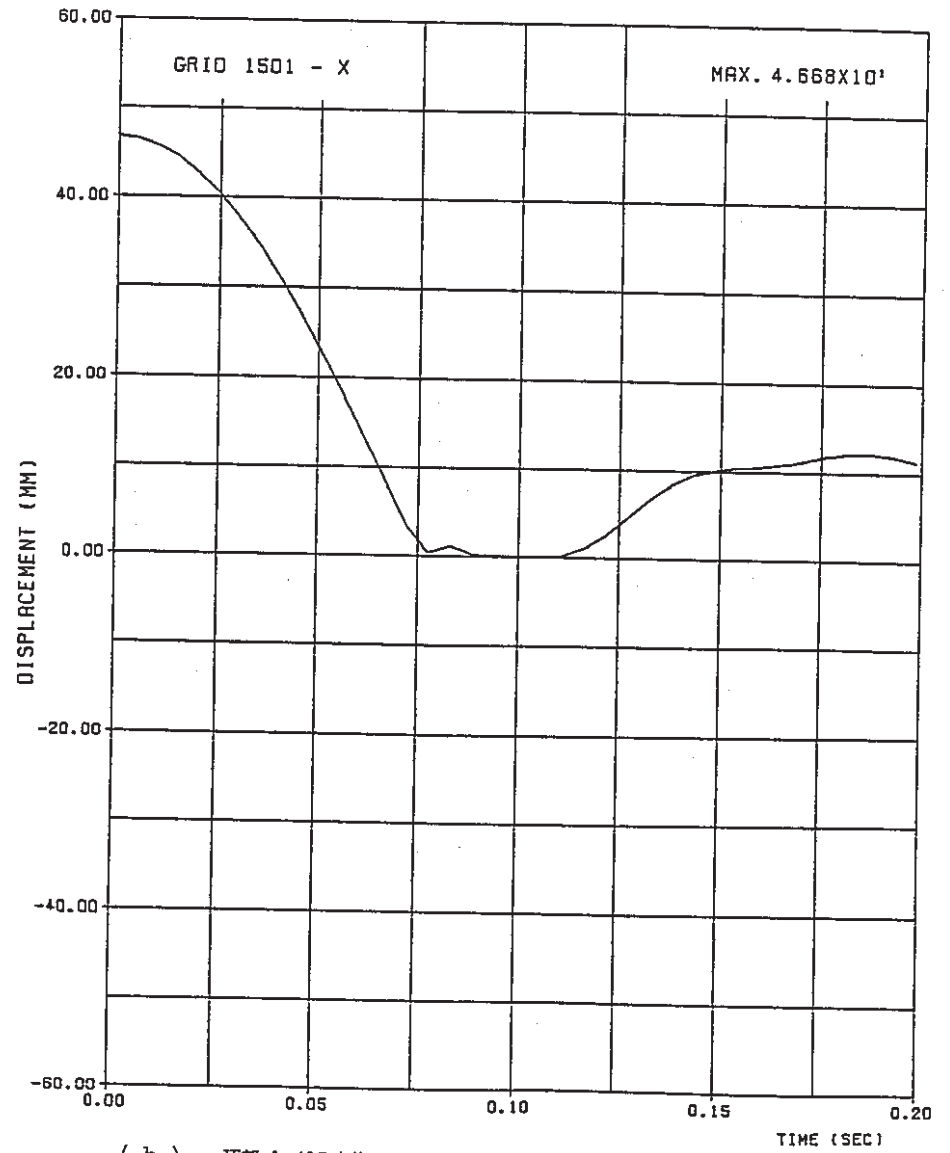
図 2 - 13 制御棒の 1 次及び 2 次の固有モード

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



(a) 頂部パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

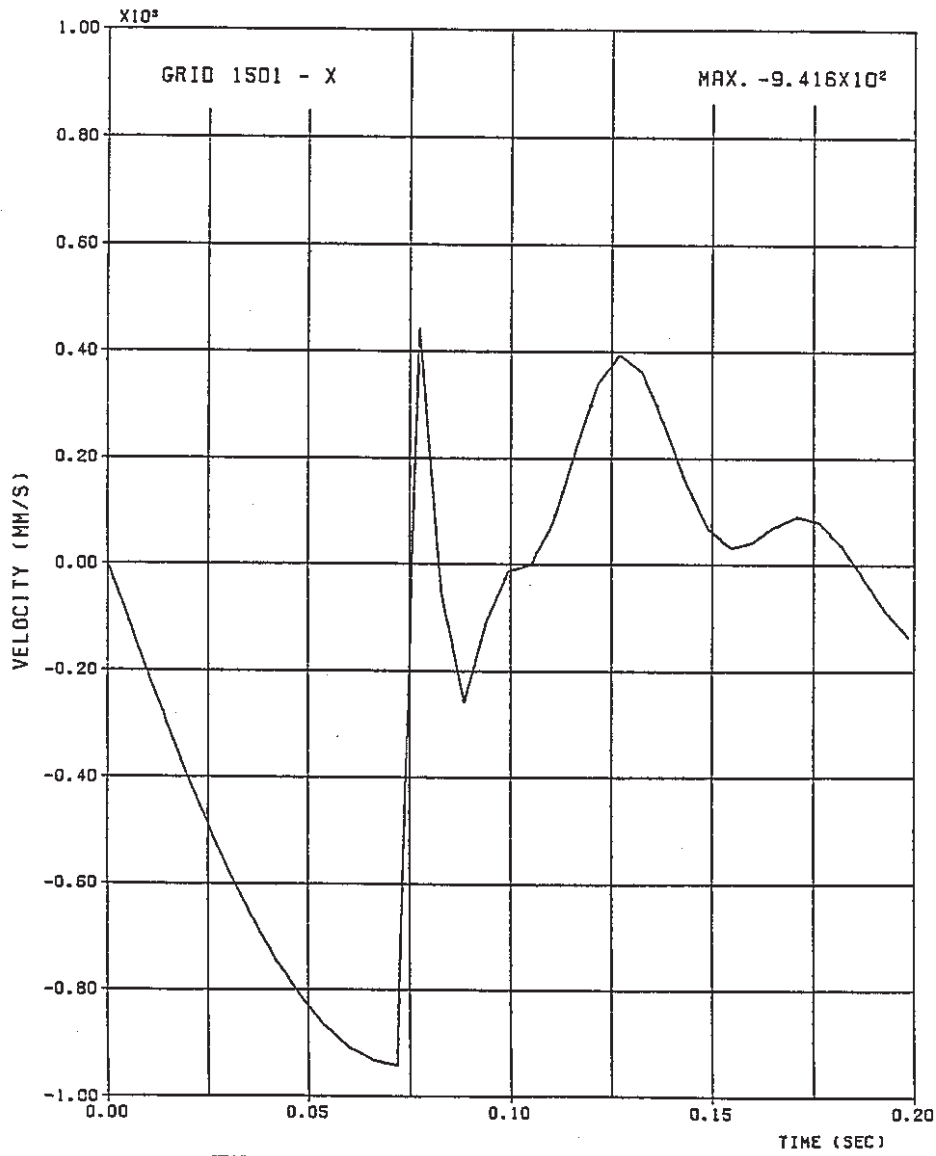
CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



(b) 頂部パッドの変位の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

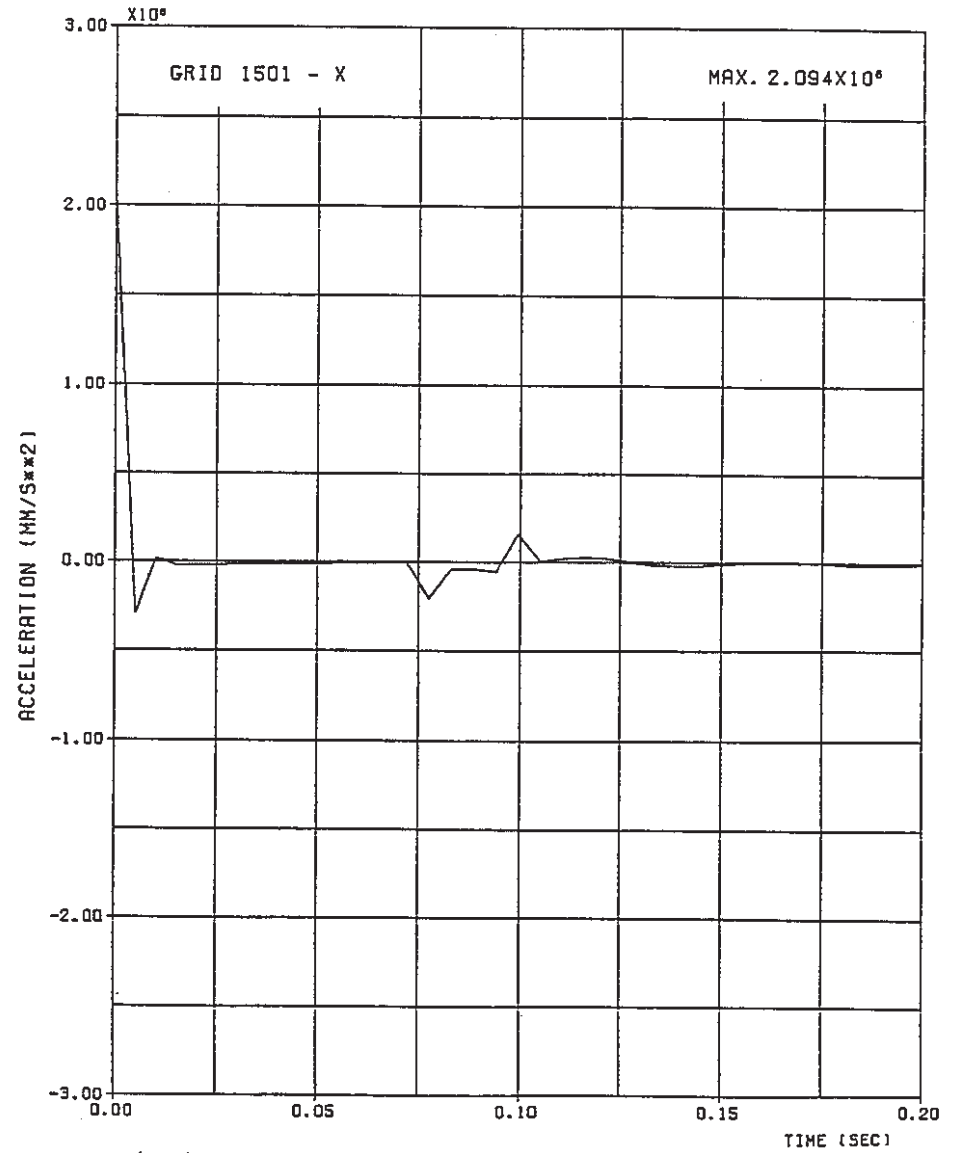
図 2 - 14 燃料集合体の衝突解析結果(1)

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



(c) 頂部パッドの速度の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

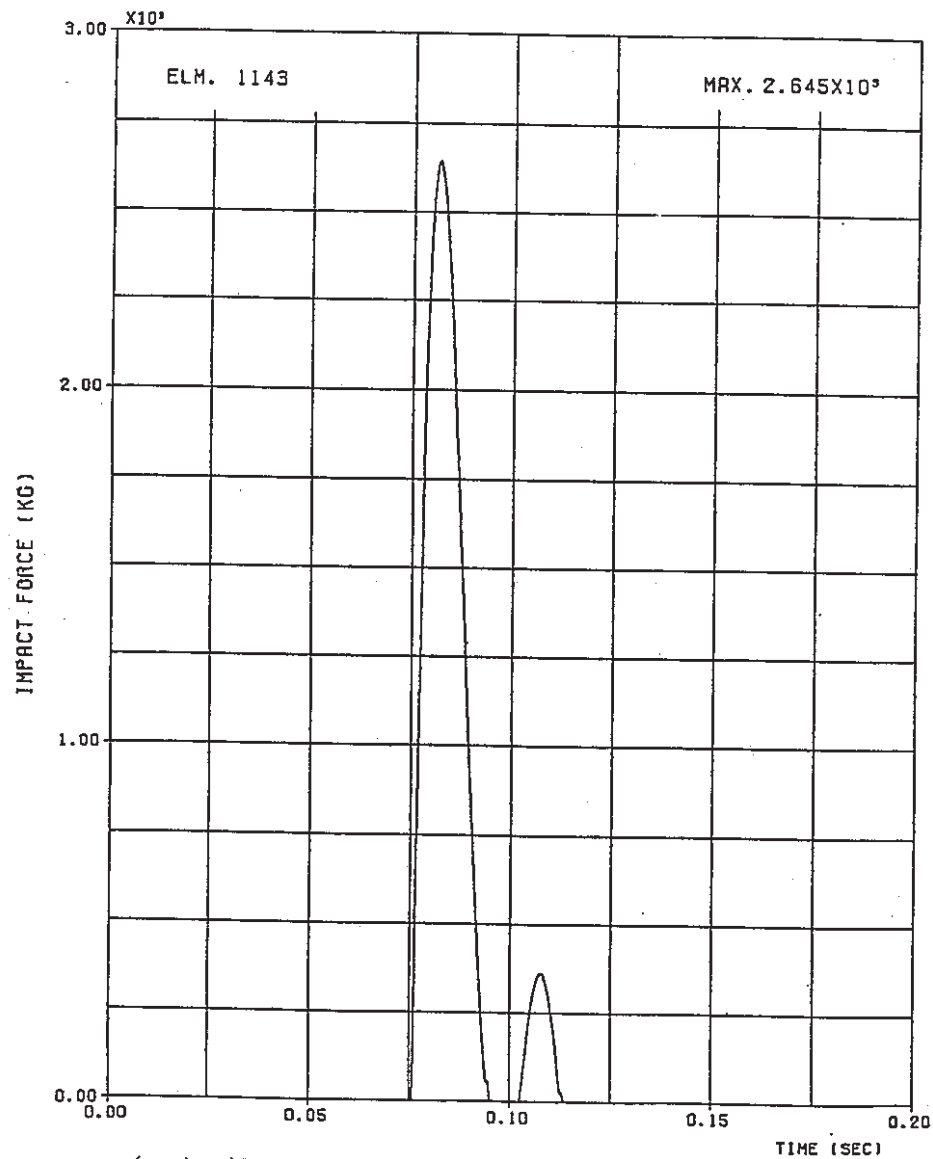
CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



(d) 頂部パッドの加速度の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

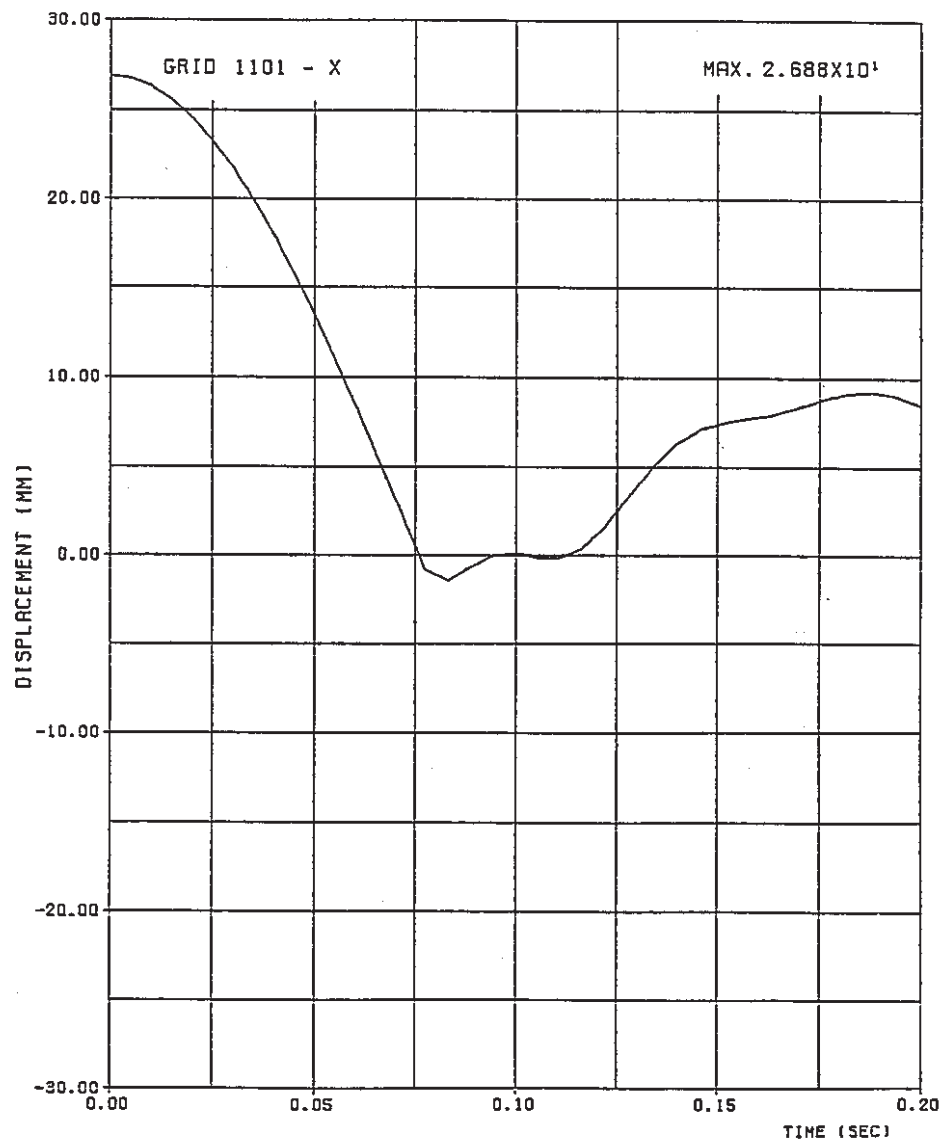
図 2-14 燃料集合体の衝突解析結果(2)

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



(e) 中間パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



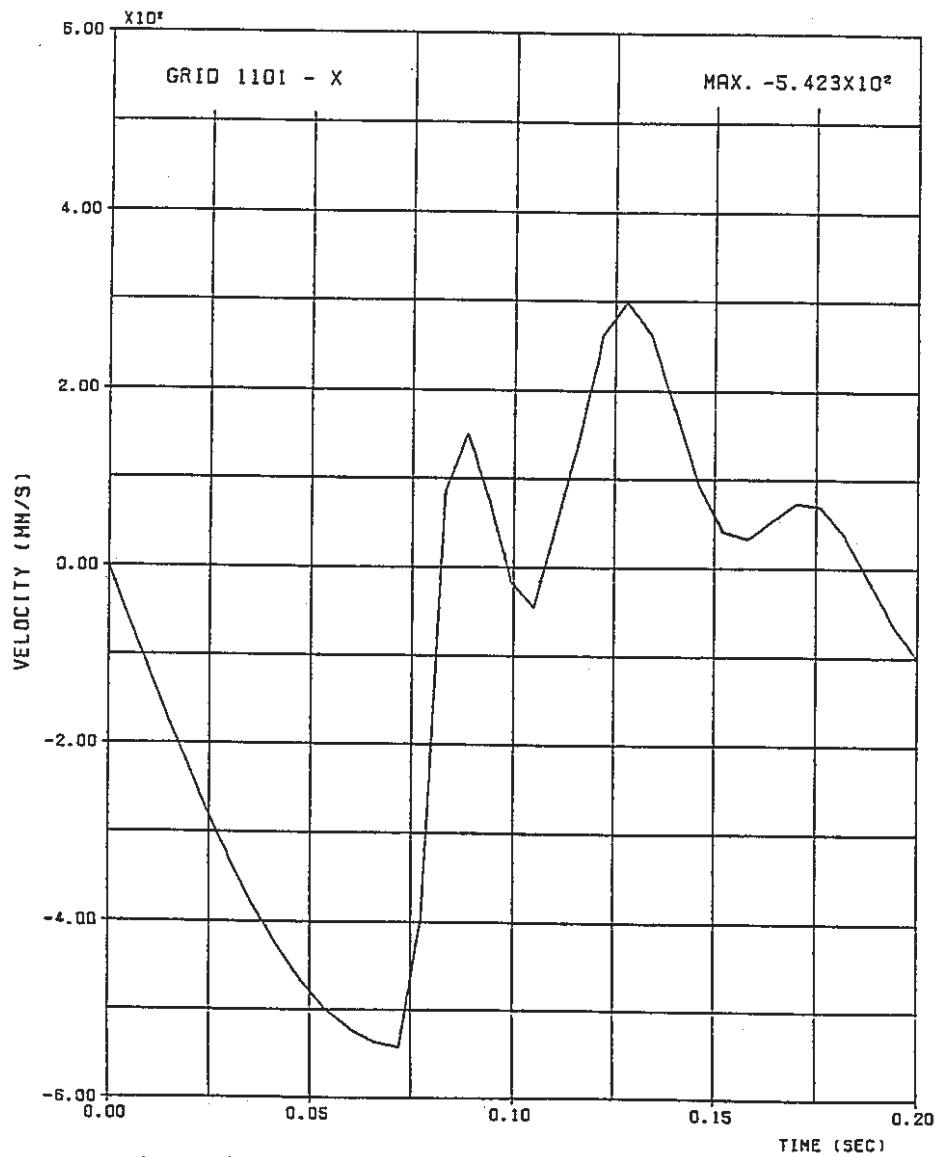
(f) 中間パッドの変位の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

図 2 - 14 燃料集合体の衝突解析結果(3)

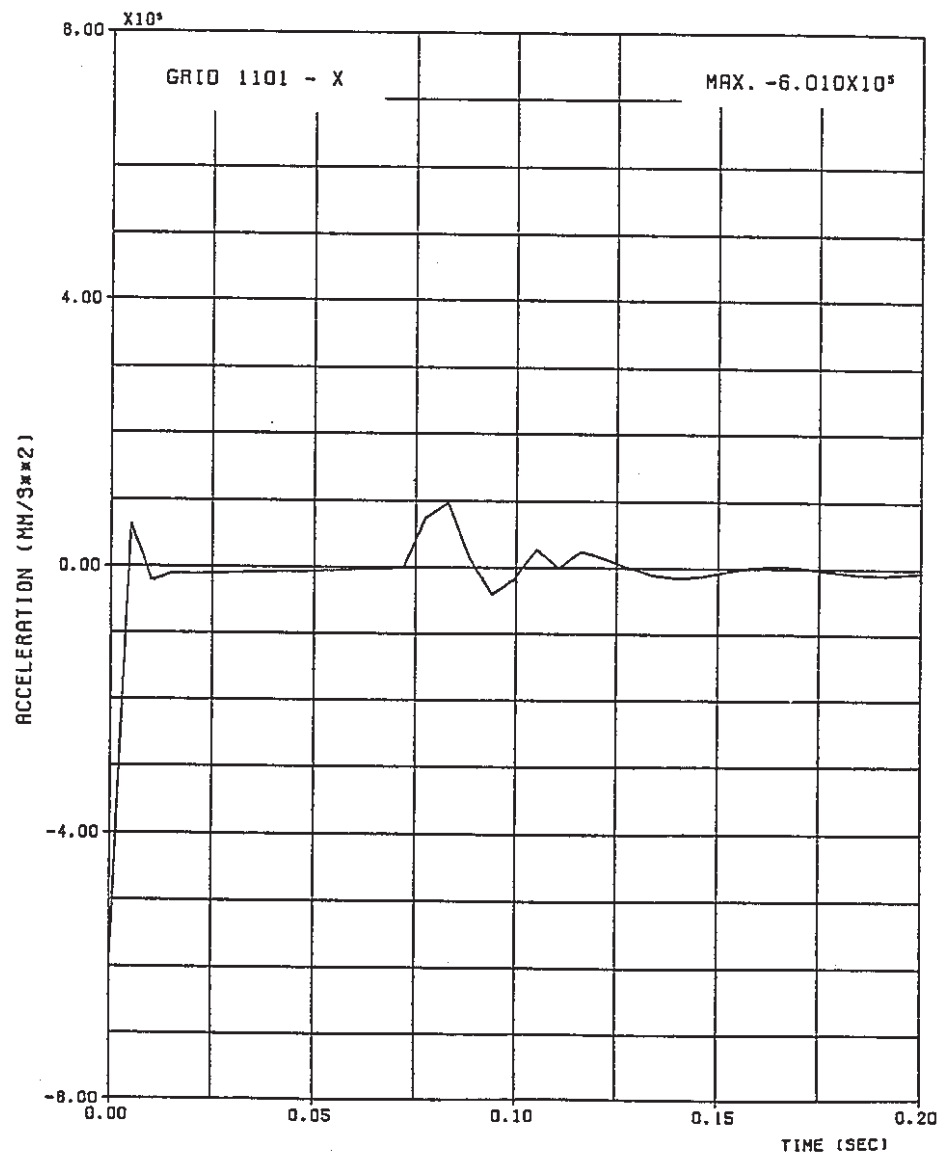
CORE FUEL IMPACT ANALYSIS

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS

— 40 —



(g) 中間バットの速度の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)



(h) 中間バットの加速度の時刻歴 (頂部変位 50.0mm)

図 2 - 14 燃料集合体の衝突解析結果(4)

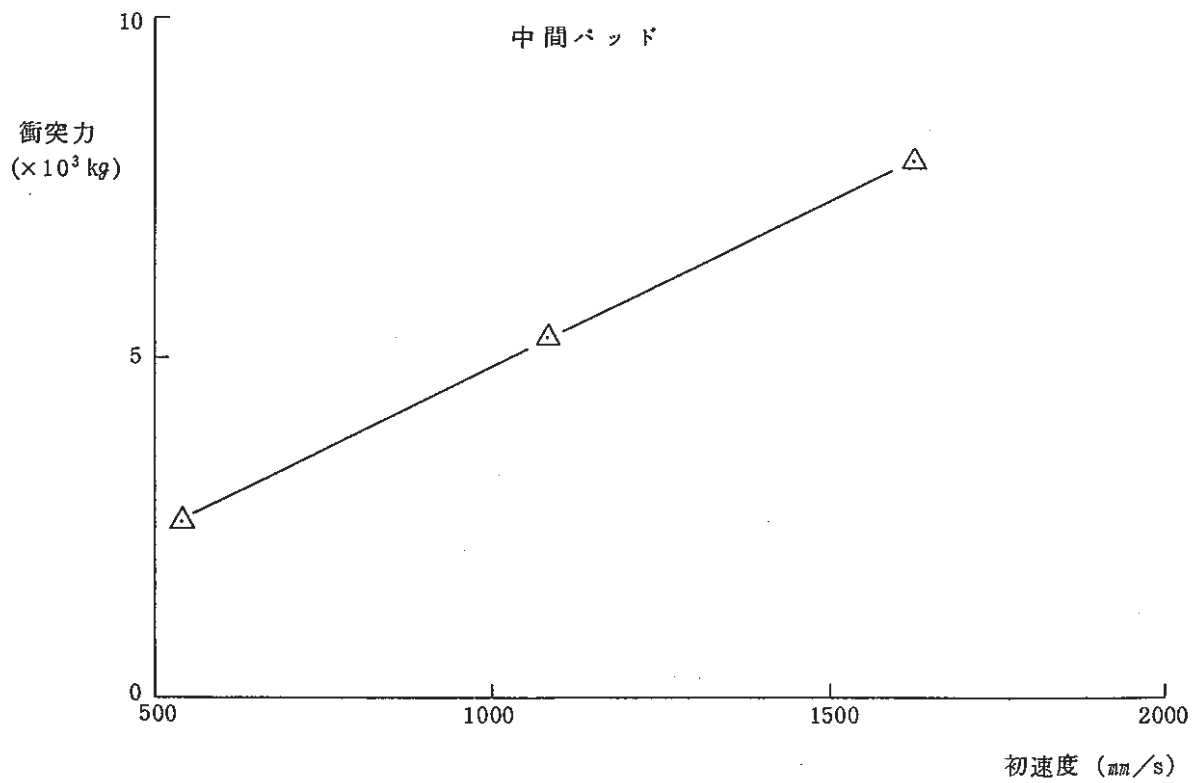
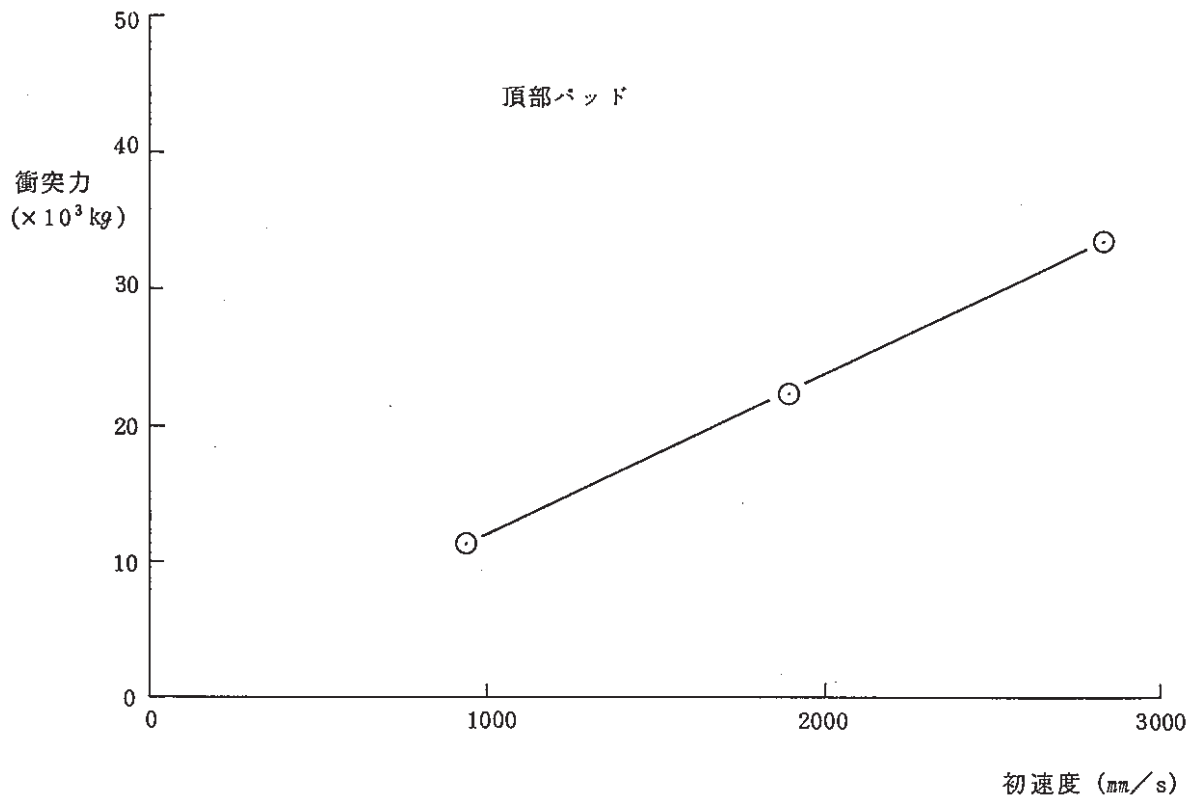


図 2 - 15 燃料集合体における衝突速度と衝突力の変化

3. 群振動解析（正弦掃引波）

大型炉炉心体系の基本的な群振動特性とその入力依存性を把握し、さらに、集合体の1次の減衰定数、衝突部の剛性、パッド間ギャップ、ラップ管板厚及び中間パッド位置をパラメタとして、これらのパラメタが群振動特性と及ぼす影響を評価することを目的として、正弦掃引波入力による群振動解析を行った。

3.1 解析条件

(1) 解析対象

大型炉の炉心体系は図3-1⁽¹²⁾に示すように、全1183体の炉心構成要素から構成される。各要素の諸元は表2-1～2-4に示すとおりである。VIOLLONによる群振動解析は、図3-1中に枠で囲んで示す1列をとり出し、これが列方向の加振を受ける場合について行った。列中の炉心構成要素の種類は、内側炉心が15体、外側炉心が4体、制御棒が2体、中性子しゃへい体はSUSが2体、B₄Cが8体、IVSが2体となっている。

(2) 解析条件

a) 入力

入力は振動数が2Hz～20Hzの間で滑らかに変化する正弦掃引波（sine sweep波）とした。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X}_g(t) &= \ddot{X}_{g0} \sin(2\pi f(t) \cdot t) \\ f(t) &= 2 \exp(t/10) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ただし

$$\begin{aligned} \ddot{X}_g(t) &: \text{入力加速度 (gal)} \\ \ddot{X}_{g0} &: \text{入力加速度振幅 (gal)} \\ t &: \text{時間 (sec)} \end{aligned}$$

掃引波の継続時間は、22.635 secである。図3-2に正弦掃引波の時刻Tを示す。（VIOLLONの入力としては5 msec毎、全4528ステップのデータを用いた。）入力レベル（加速度振幅）は、後述するS1地震波の最大速度振幅と同程度の500 galをリファレンスとし、入力依存性を調べるために、250 gal、750 galのケースについても解析した。

b) 解析パラメタ

基本ケースでは入力を500 galとし各間のギャップは中間パッド部で1.0 mm頂部パッド部で0.7 mmとした。

頂部パッドの衝突バネ定数は140ton/mm、中間パッドの衝突バネ定数は1.76 ton/mm (制御棒は7.36 ton/mm)、ラッパ管の板厚は4 mm、減衰定数は1次3%、2次15%、中間パッドの位置は球面座より2500mm、ヤング率は、 1.66×10^4 kg/mm²とした。

上記の基本ケースに加え、各パラメタの影響を見るために以下の場合について解析を行った。

・集合体の1次の減衰定数	……	5%、10%
・パッド部剛性	……	基本ケースの1/2、2倍
・パッド間ギャップ	……	0.5 mm～1.5 mm
・ラッパ管板厚	……	3 mm、5 mm
・中間パッド位置	……	1500mm (下端より)

表3-1に解析ケースとパラメタの対応を示す。

3.2 解析結果

(1) 基本振動特性の入力依存性

図3-3(a)は、sine sweep波(500 gal)による集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。以下に示すVIOLLONの計算結果において衝突力の時刻歴結果(プロット図)のみ集合体単体の衝突解析より算出した衝突部有効質量による補正は行なわれておらず、他の表、グラフ及び本文に記載されている衝突力は補正後の値である。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約9.8秒後に30.5 tonの衝突力が生じる。図3-3(b)は、sine sweep波による集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は、外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.7 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。

図3-3は、sine sweep波による集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-4は、sine sweep波による集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が5.0 Hz付近で衝突力が

大きくなっていく事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。図3-4(b)は、sine sweep波による集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし応答が若干大きくなっている。5.7 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-4(c)は、sine sweep波による集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立ち上がっているのは衝突によって生じる加速である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

炉心構成要素群の基本振動特性の入力依存性を評価する為に、基本ケースにおける最大入力加速度500 gal に対し250, 750 gal の2ケースを行い基本振動特性の変化を見る。

図3-5(a)は、最大入力加速度250 gal における集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約7.5秒後に20.2 tonの衝突力が生じる。図3-5(b)は、最大入力加速度250 gal における集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。4.9 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-5(c)は、最大入力加速度250 gal における集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。図3-6(a)は、最大入力加速度250 gal における集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が4～4.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。

図3-7(b)は、最大入力加速度250 gal における集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。4.9 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-7(c)は、最大入力加速度250 gal における集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立ち上がっている

のは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-8(a)は、最大入力加速度750 galにおける集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約10.7秒後に43.1 tonの衝突力が生じる。図3-8(b)は、最大入力加速度750 galにおける集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が6.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.5 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことがわかる。図3-8(c)は、最大入力加速度750 galにおける集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。図3-9(a)は、最大入力加速度750 galにおける集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体を示している。中性子遮蔽体が5~5.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心パレルが隣にある為である。図3-9(b)は、最大入力加速度750 galにおける集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.5 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-9(c)は、最大入力加速度750 galにおける集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.5~6.0 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-9は、中性子遮蔽体中間パッド部の衝突力を正弦波の周波数毎にまとめたものである。基本ケース(500 gal)では5.0 Hzに衝突力のピークが生じている。中性子遮蔽体単体の1次の固有値は3.7 Hzであるが、衝突の影響により1.3 Hz大きい5.0 Hzに衝突力のピークが生じる。最大入力加速度を基本ケースの1.5倍の750 galでは5.0~5.5 Hzに衝突力のピークが生じている。最大入力加速度が大きくなるに従って炉心構成要素群に含まれる構成要素単体の固有値も若干上昇する。これは、構成要素同士が衝突を生じる事によって生じる非線形効果である。

基本振動特性の入力存在性に関しては、最大入力加速度に比例して炉心構成要素群の共振周波数も増減するが、変化量はあまり大きくない。

(2) 解析パラメータの影響評価

図3-10(a)は、1次の減衰定数を5%とした場合の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約9.6秒後に30.0 tonの衝突力が生じる。図3-10(b)は、1次の減衰対数5%における集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0~5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.6 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-10(c)は、1次の減衰定数5%における集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-11(a)は、1次の減衰定数5%における集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体5.0 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるは炉心バレルが隣にある為である。図3-11(b)は、1次の減衰定数5%における集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0~5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.6 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-11(c)は、1次の減衰定数5%における集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0~5.5 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-12(a)は、1次の減衰定数を10%とした場合の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約9.0秒後に27.2 tonの衝突力が生じる。図3-12

(b) は、1 次の減衰定数10%における集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.6 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-12(c)は、1 次の減衰定数10%における集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-13(a)は、1 次の減衰定数10%における集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が5.0 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。図3-13(b)は、1 次の減衰定数10%における集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.6 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-13(c)は、1 次の減衰定数10%における集合体中間部の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-14(a)は、衝突部のバネ定数をノミナルケースの1/2とした時の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約9.0秒後に26.9 tonの衝突力が生じる。図3-14(b)は、衝突部のバネ定数をノミナルケースの1/2とした時の集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が小さくなっていくことが分かる。図3-14(c)される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-15(a)は、衝突部のバネ定数を1/2とした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外

側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が4.5～5.0 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。図3-15(b)は、衝突部のバネ定数を1/2とした時の集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.3 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.7 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-15(c)は、衝突部のバネ定数を1/2とした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体を除く集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-16(a)は、衝突部のバネ定数をノミナルケースの2倍とした時の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約5.9秒後に36.1 tonの衝突力が生じる。図3-16(b)は、衝突部のバネ定数を2倍とした時の集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.0 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-16(c)は、衝突部のバネ定数を2倍とした時の集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-17(a)は、衝突部のバネ定数を2倍とした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が4.5～5.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。図3-17(b)は、衝突部のバネ定数を2倍とした時の集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.7 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-17(c)は、衝突部のバネ定数を2倍とした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速である。

中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-18(a)は、パッド間ギャップを小さくした時(頂部、中間部とも0.5 mm)の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約10.1秒後に29.3 tonの衝突力が生じる。図3-18(b)は、パッド間ギャップを小さくした時の集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.5～6.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.1 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことがわかる。図3-18(c)は、パッド間ギャップを小さくした時の集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-19(a)は、パッド間ギャップを小さくした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体、9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が5.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。ギャップが小さくなる為、中性子遮蔽体以外の中間パッドにも衝突力生じている。図3-19(b)は、パッド間ギャップを小さくした時の集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.5～6.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.3 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-19(c)は、パッド間ギャップを小さくした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。

図3-20(a)はパッド間ギャップを大きくした時(頂部1.0 mm、中間部1.5 mm)の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約5.4秒後に32.9 tonの衝突力が生じる。図3-20(b)は、パッド間ギャップを大きくした時の集合体頂部

の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体 (B_4C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5～5.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.2 Hz以上の周波数では共振を5.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.2 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-20(c)は、パッド間ギャップを大きくした時の集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-21(a)は、パッド間ギャップを大きくした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体 (B_4C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5～5.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなってきている。5.2 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-21(c)は、パッド間ギャップを大きくした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が4.5～5.0 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-22(a)は、ラップ管の板厚を3 mmとした時の集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体 (B_4C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.5 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-22(c)は、ラップ管の板厚を3 mmとした時の集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-23(a)は、ラップ管の板厚を3 mmとした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体 (B_4C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が4.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心パレルが隣にある為である。図3-23(b)は、ラップ管の板厚を3 mmとした時の集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合

体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。5.5 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-23(c)は、ラッパ管の板厚を3 mmとした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0 Hz付近で共振を起こしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

図3-24(a)は、ラッパ管の板厚を5 mmとした時の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約10.2秒後に29.8 tonの衝突力が生じる。図3-24(b)は、ラッパ管の板厚を5 mmとした時の集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～6.0 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.0 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-24(c)は、ラッパ管の板厚を5 mmとした時の集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-25(a)は、ラッパ管の板厚を5 mmとした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が5.0～5.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。図3-25(b)は、ラッパ管の板厚を5 mmとした時の集合体中間部の変位の時刻歴を示している。頂部と同様に中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.0～5.5 Hz付近で共振を起こし変位の応答が若干大きくなっている。6.0 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていく事がわかる。図3-25(c)は、ラッパ管の板厚を5 mmとした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中性子遮蔽体を除く他の集合体が5.5～6.0 Hz付近で共振をおこしているのが中間部の加速度の時刻歴で示されている。

中間パッド部の位置をかえた場合VIOLLONコードでは単体の固有値が変化するので質量

補正係数を変えて多質点の固有値に合わせる。図3-26(a)は、中間パッド位置を1500mmとした時の集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、195は外側炉心燃料集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約9.8秒後に22.5tonの衝動力が生じる。図3-26(b)は、中間パッド位置を1500mmとした時の集合体頂部の変位の時刻歴を示している。質点番号2は中性子遮蔽体(B₄C)、14はブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。6.7 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなっていくことが分かる。図3-26(c)は、中間パッド位置を1500mmとした時の集合体頂部の加速度の時刻歴を示している。ここで示される加速度の値は衝突によって生じる加速度である。

図3-27(a)は、中間パッド位置を1500mmとした時の集合体中間部の衝突力の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を示している。中性子遮蔽体が5.5 Hz付近で衝突力が大きくなっている事がわかる。中性子遮蔽体のみ衝突力が大きくなるのは炉心バレルが隣にある為である。図3-27(b)は、中間パッド位置を1500mmとした時の集合体中間部の変位の時刻歴を示している。6.7 Hz以上の周波数では共振を起こさず徐々に応答が小さくなり12~15 Hz付近で再び共振を起こしている。図3-27(c)は、中間パッド位置を1500mmとした時の集合体中間部の加速度の時刻歴を示している。中性子遮蔽体の加速度で鋭く立上がっているのは衝突によって生じる加速度である。中間部の応答が12~15 Hz付近で再び上昇するのは、中間パッド位置を下げる事によって、集合体単体の2次の固有値が11 Hz付近になる為である。

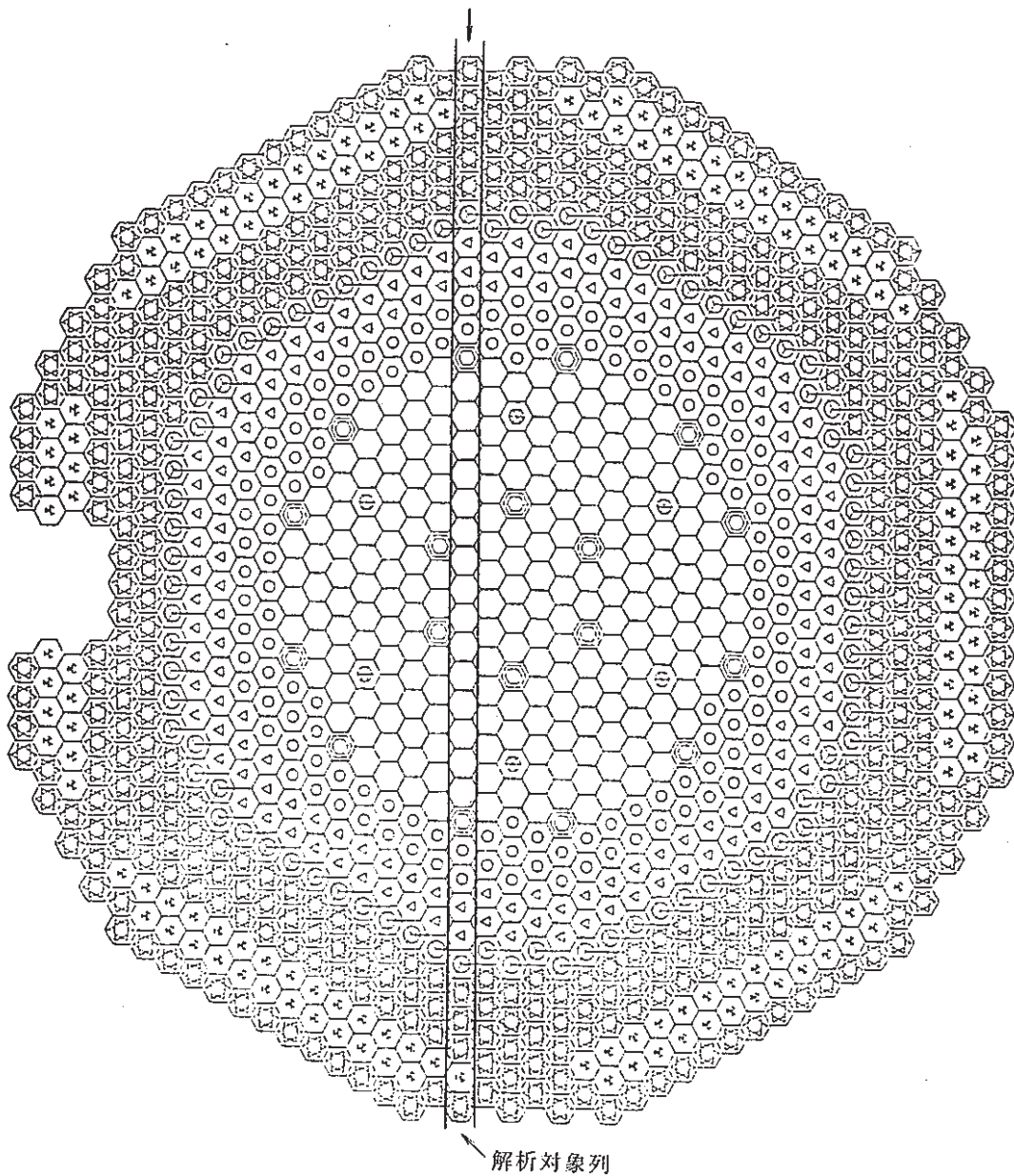
図3-28(a)は、内側炉心燃料集合体中間パッドの応答結果を各解析パラメータについてまとめたものである。基本ケースは、sine sweep波における最大入力加速度500 galの計算結果である。入力波の最大値を1/2とすると基本ケースより約0.5 Hz小さくなり、入力波の最大値を2倍とすると約0.5 Hz共振周波数が大きくなる。集合体1次の減衰定数を5%、10%に変化させてみても基本ケースほぼ同じ値になる。衝突部のバネ定数を1/2、2倍にしても減衰定数と同様に基本ケースの応答周波数と大きく異なる。パッド間ギャップを小さくすると、基本ケースより約0.5 Hz共振周波数が大きくなり、パッド間ギャップを大きくすると約0.5 Hz小さくなる。ラップ管の板厚を3mmとしても基本ケースとほとんど変化は無いがラップ管の板厚を5mmにすると基本ケースより約0.5

H z 共振周波数が大きくなる。中間パッド位置を1000mm下げると基本ケースより大きく変化して3.5 から4.0 H z となる。

解析パラメータに関しては最大入力加速度、パッド間ギャップ、ラップ管板厚等を変化させると正弦掃引波入力周波数に対する共振周波数が変化するが、その変化量はわずかである。中間パッド位置を1000mm下げる場合では集合体単体における質量補正係数が基本ケースと異なる事によって共振周波数帯が変化している可能性もあるので、多しつてん解析による比較を実施することが望ましい。図3-29は、最大衝突力について同様の整理を行ったものである。

Table 3-1 Parameters for Sine Sweep Analysis

Case Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
INPUT LEVEL (gal)	500	250	750	500	←	←	←	←	←	←	←	←
DAMPING RATIO (1st mode) (%)	3	←	←	5	10	3	←	←	←	←	←	←
PAD STIFFNESS	1	←	←	←	←	1/2	2	1	←	←	←	←
(UPPER) GAP	0.7	←	←	←	←	←	←	0.5	1.0	0.7	←	←
(MIDDLE)	1.0	←	←	←	←	←	←	0.5	1.5	1.0	←	←
WRAPPER TUBU THICKNESS (mm)	4	←	←	←	←	←	←	←	←	3	5	4
MIDDLE PAD POSITION (mm)	2500	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	1500



⬡	- 内側炉心	(223)	} - 355体 に変更
⊙	- 外側炉心	(144)	
▷	- 半径方向ブラケット	(158)	
⊗	- 主炉停止系制御棒	(18)	
⊕	- 後備炉停止系制御棒	(8)	
⊖	- 中性子遮蔽体 (ステンレス)	(34)	
⊗	- 中性子遮蔽体 (炭化ホウ素)	(405)	
⊙	- I V S	(149)	
⊕	- 中性子検出器付集合体	(4)	

合計 1,183

図3-1 大型炉炉心の炉心配置図

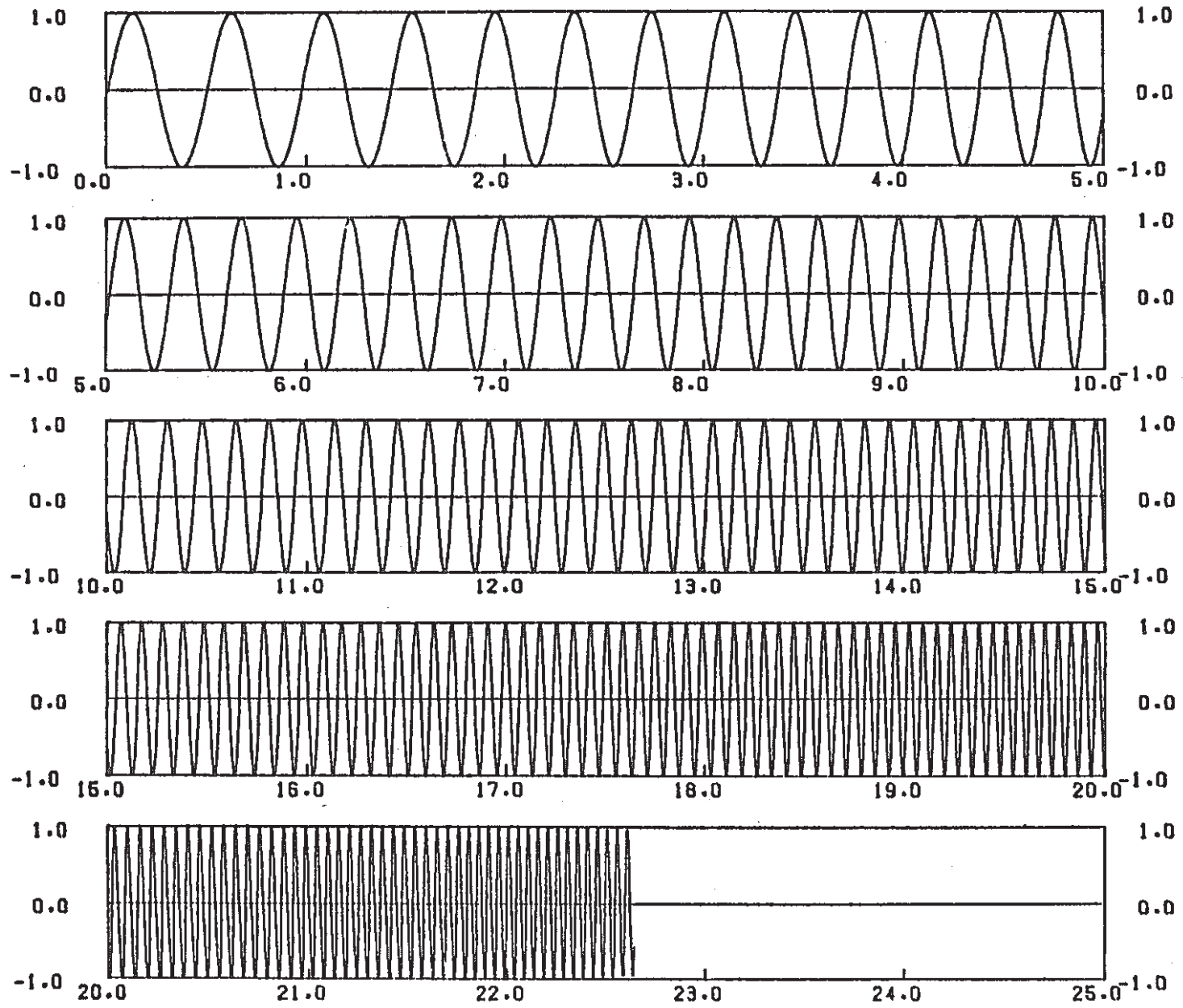
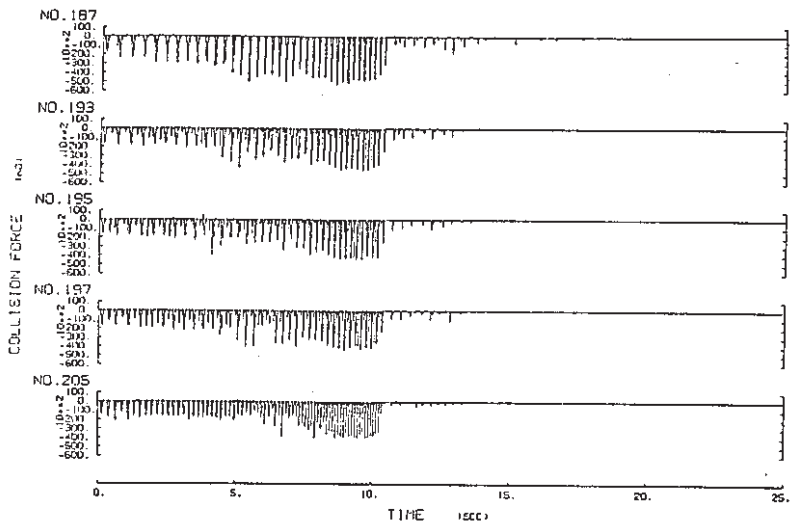
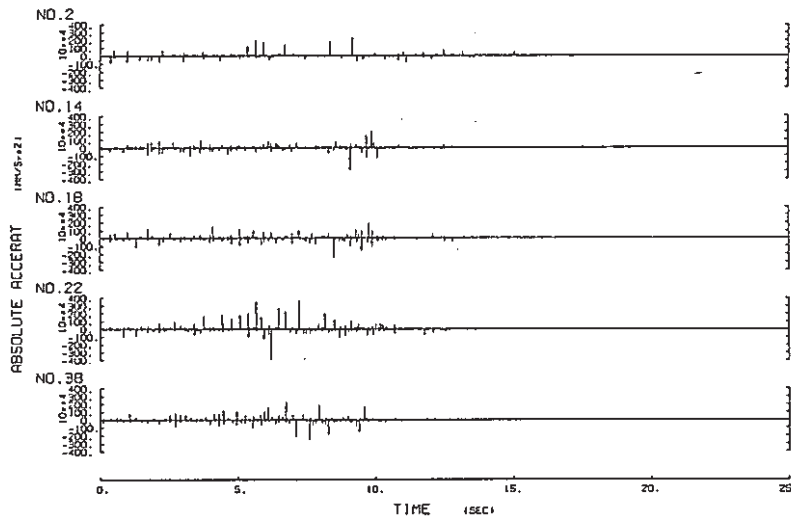


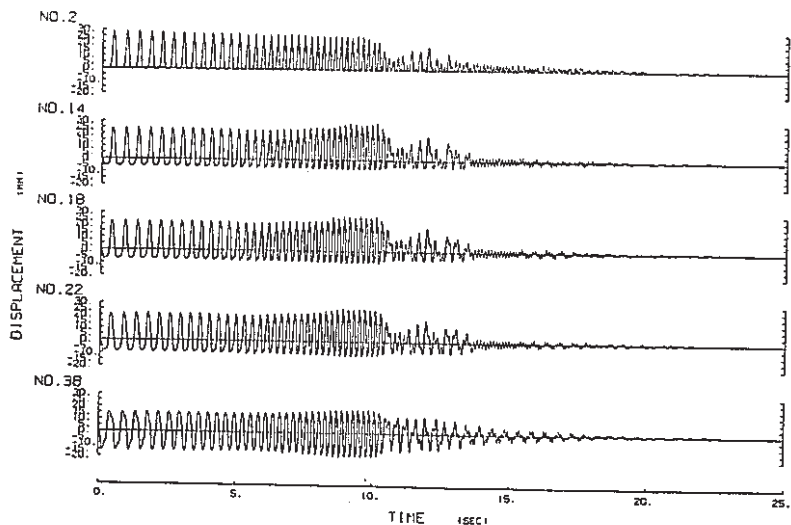
図3-2 sine sweep波の時刻歴



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴

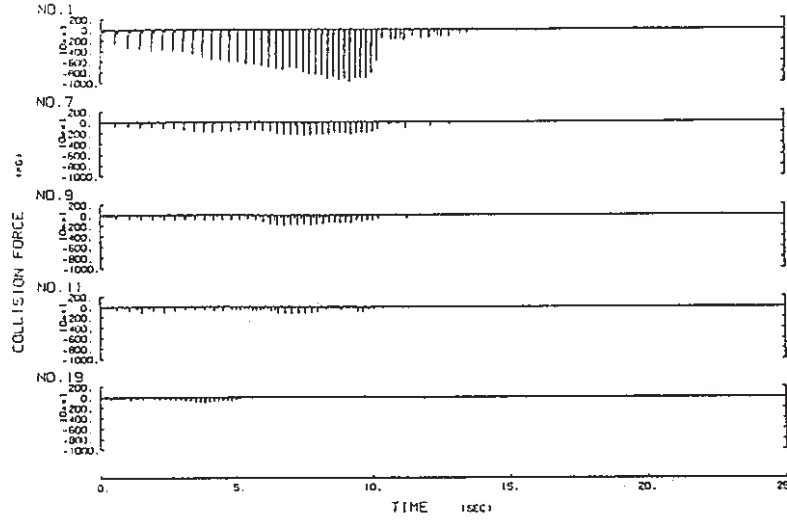


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴

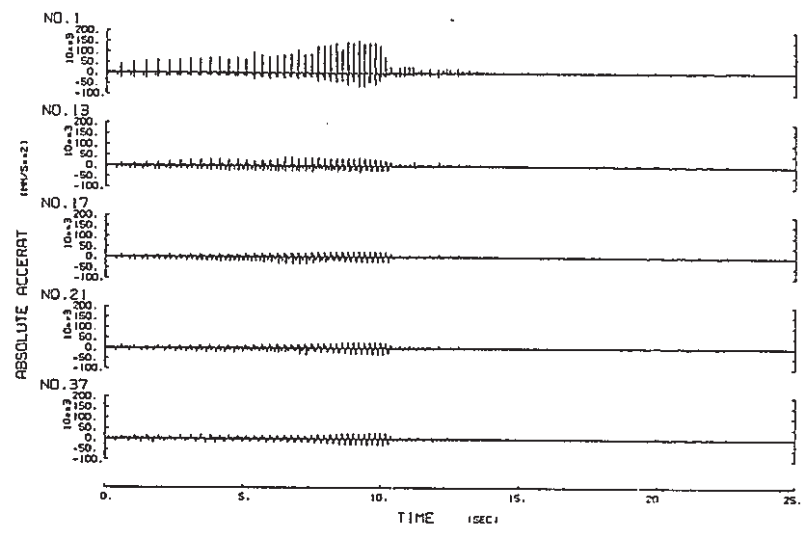


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴

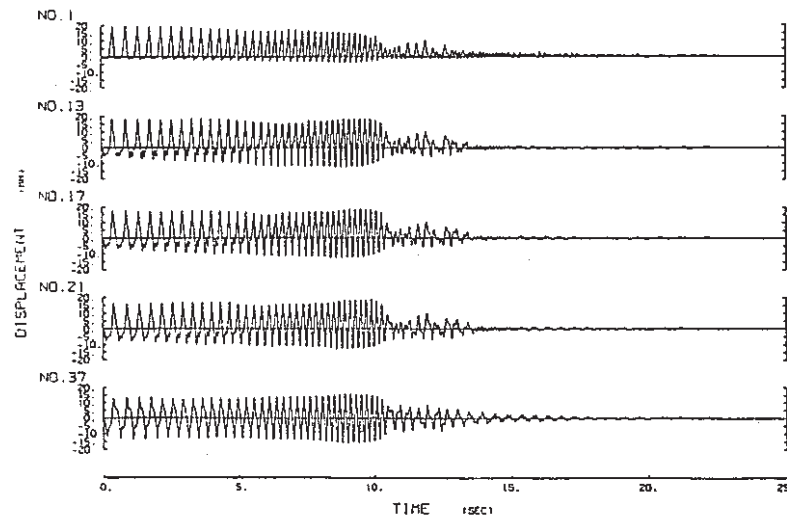
図 3 - 3 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (基本ケース)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴

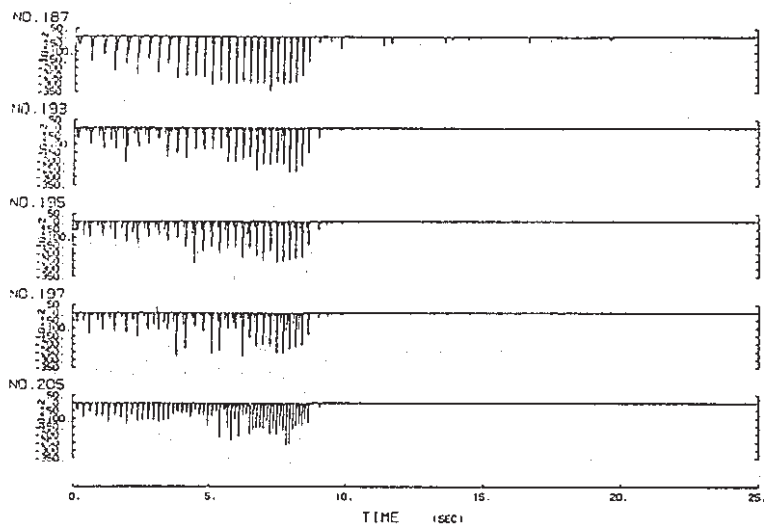


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴

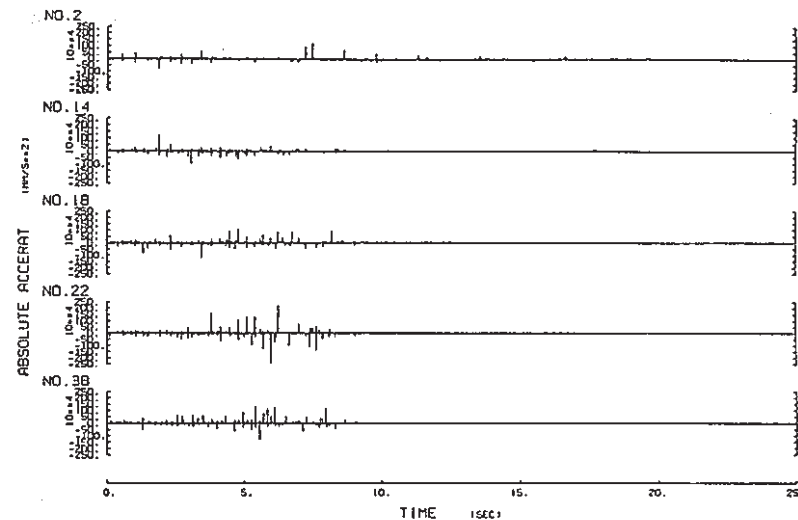


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴

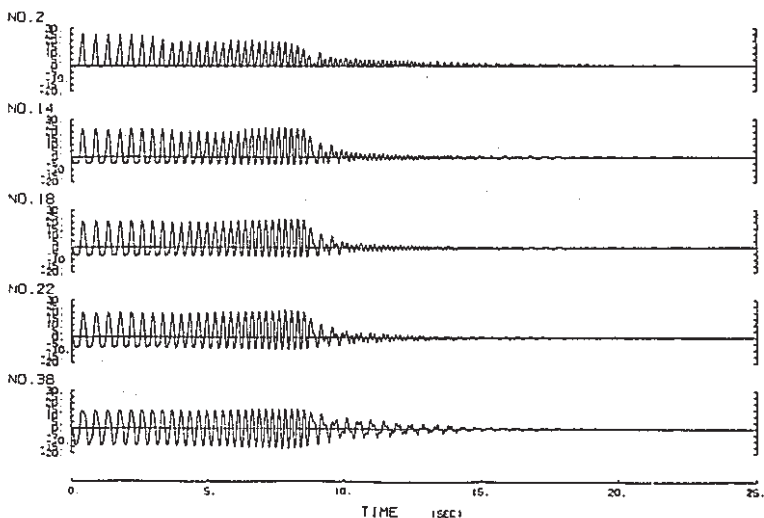
図 3 - 4 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (基本ケース)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (最大入力加速度250 GAL)

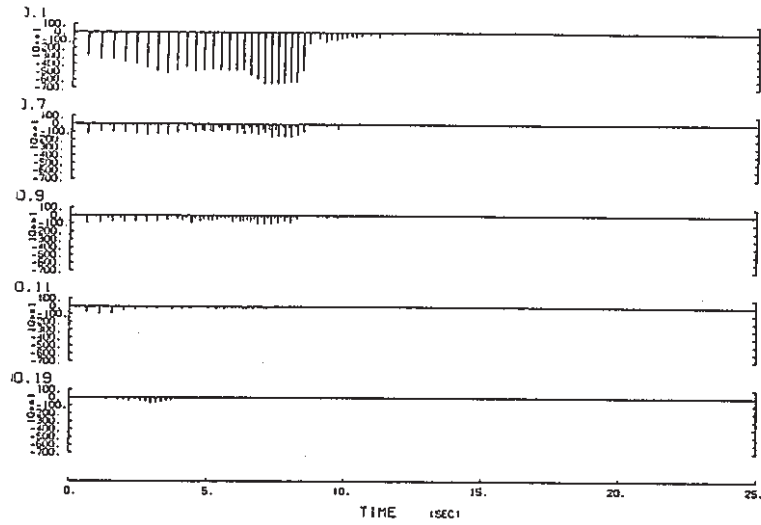


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (最大入力加速度250 GAL)

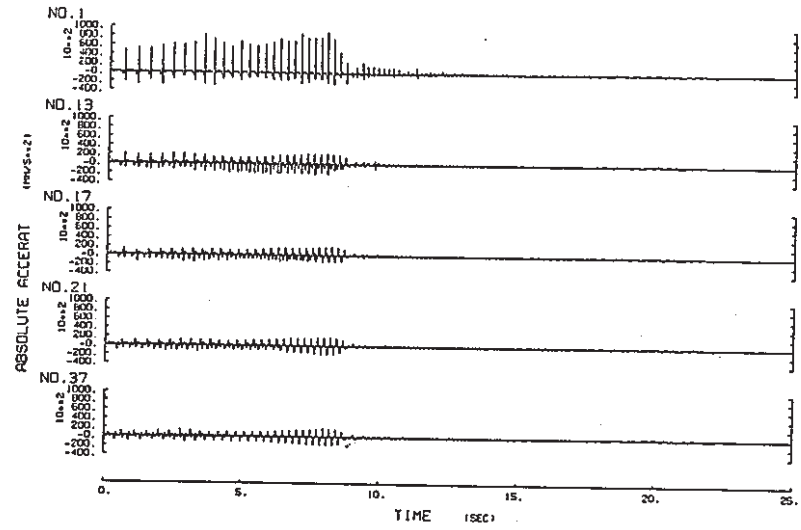


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (最大入力加速度250 GAL)

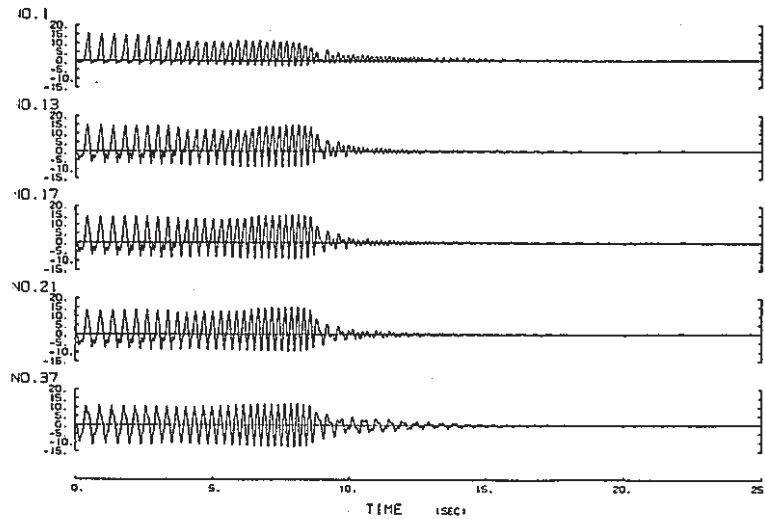
図3-5 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (入力250 gal)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (最大入力加速度250 GAL)

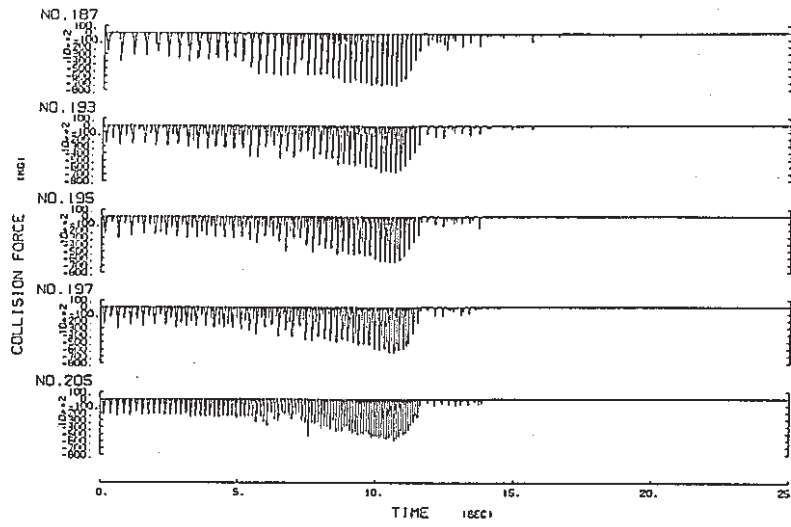


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (最大入力加速度250 GAL)

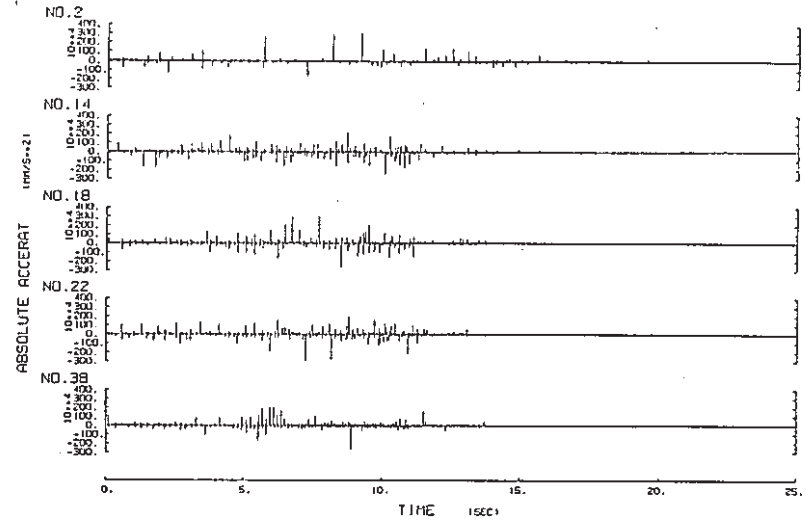


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (最大入力加速度250 GAL)

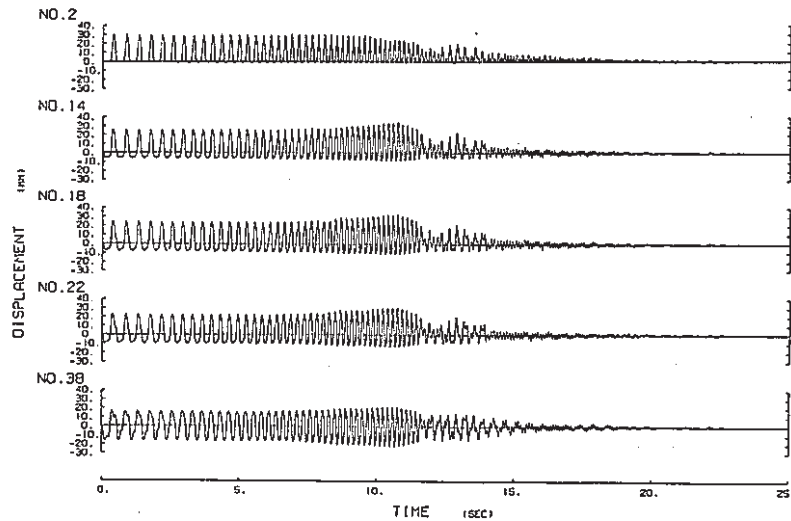
図3-6 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (250 gal 入力)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (最大入力加速度750 GAL)

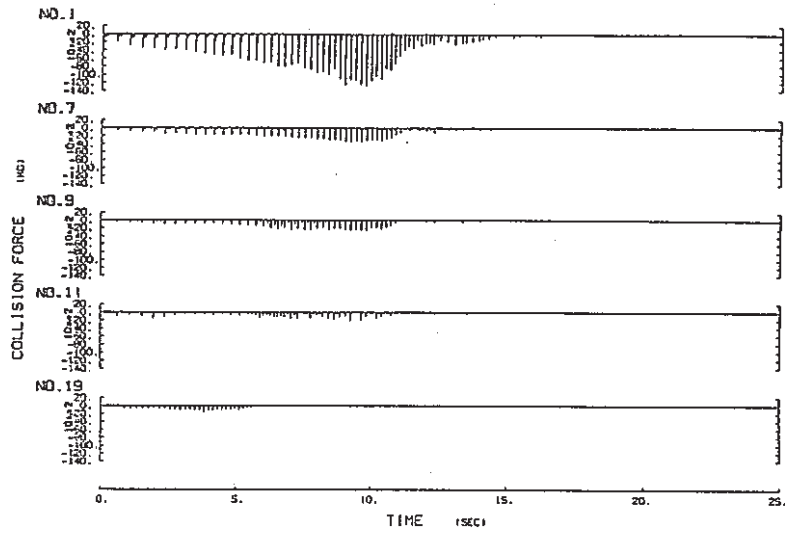


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (最大入力加速度750 GAL)

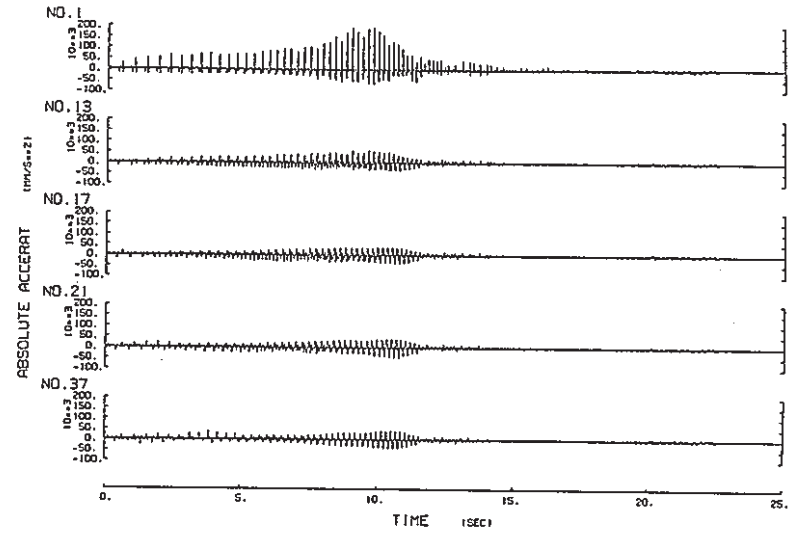


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (最大入力加速度750 GAL)

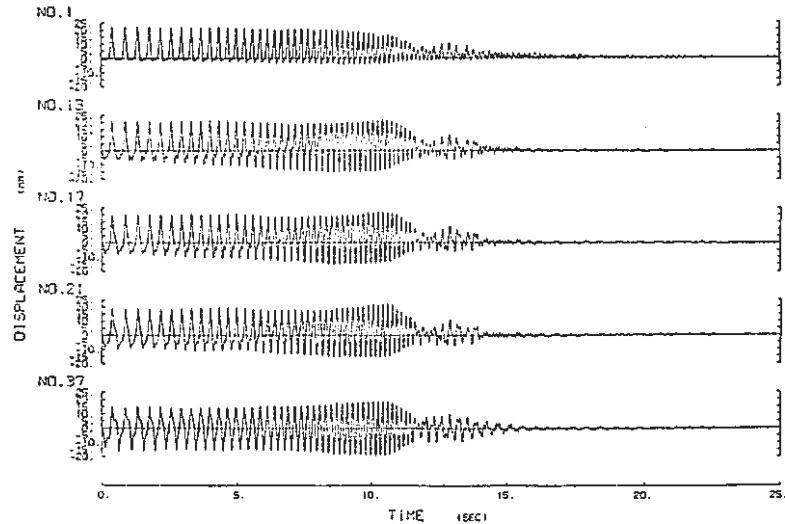
図3-7 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (入力750 gal)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (最大入力加速度750 GAL)



(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (最大入力加速度750 GAL)



(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (最大入力加速度750 GAL)

図3-8 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (入力750 gal)

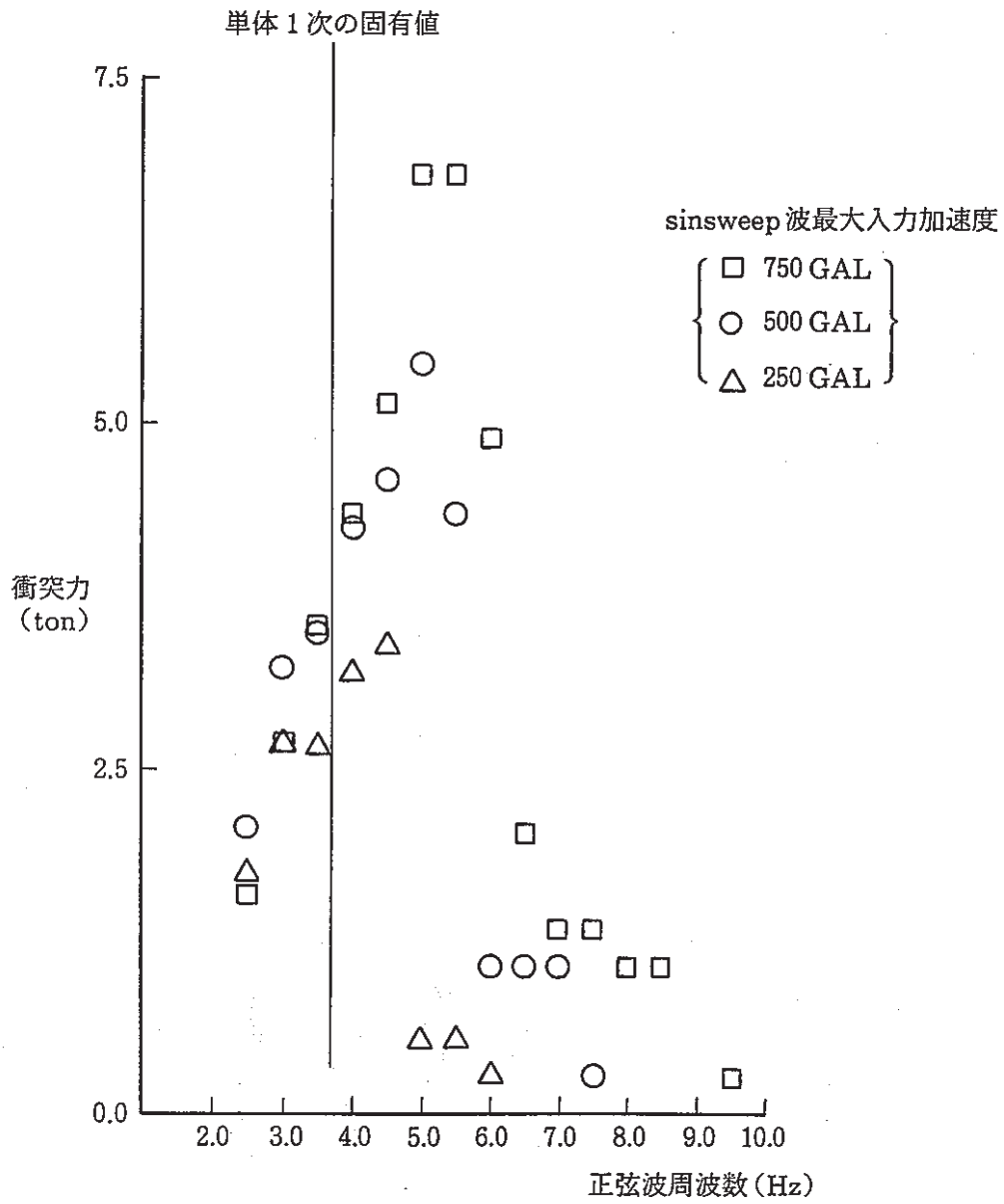
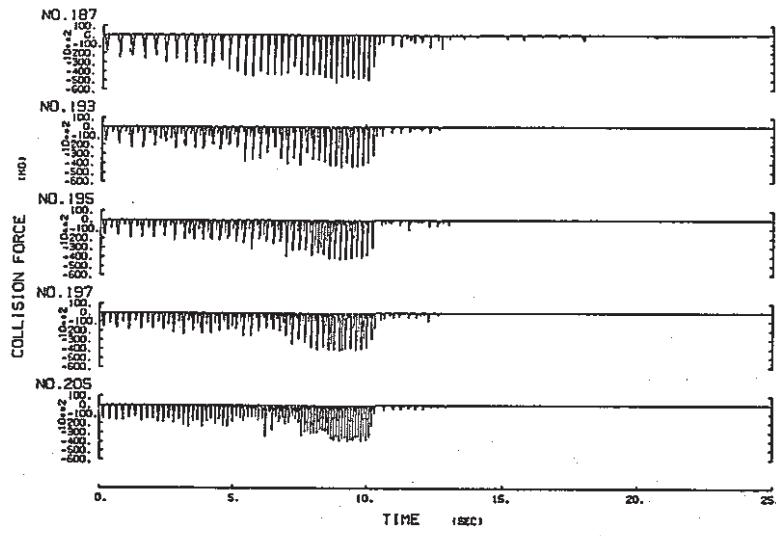
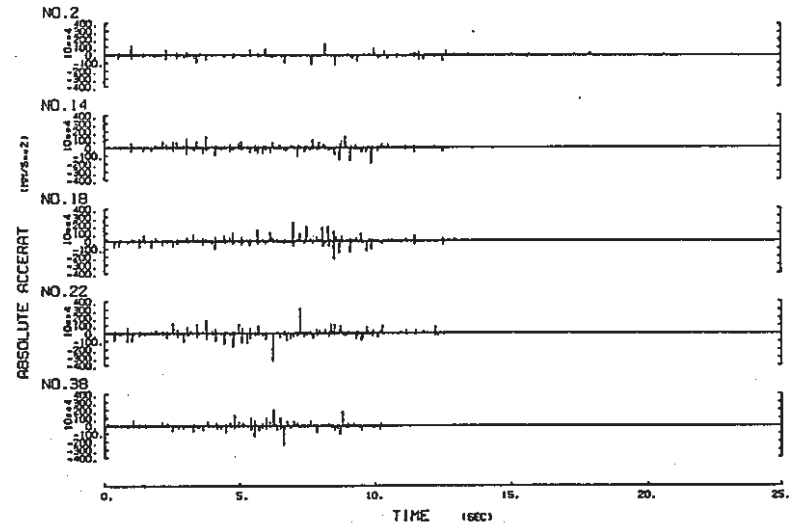


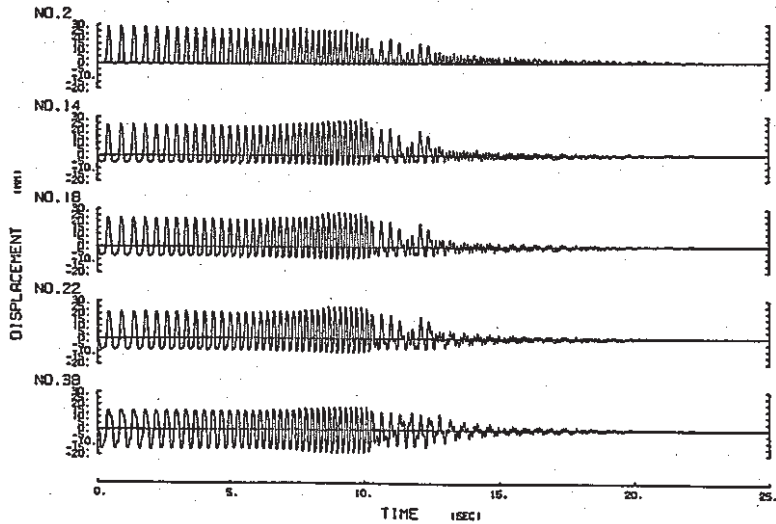
図3-9 中性子遮蔽体中間パッド部の衝突力の入力依存性



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (1次の減衰定数0.05)

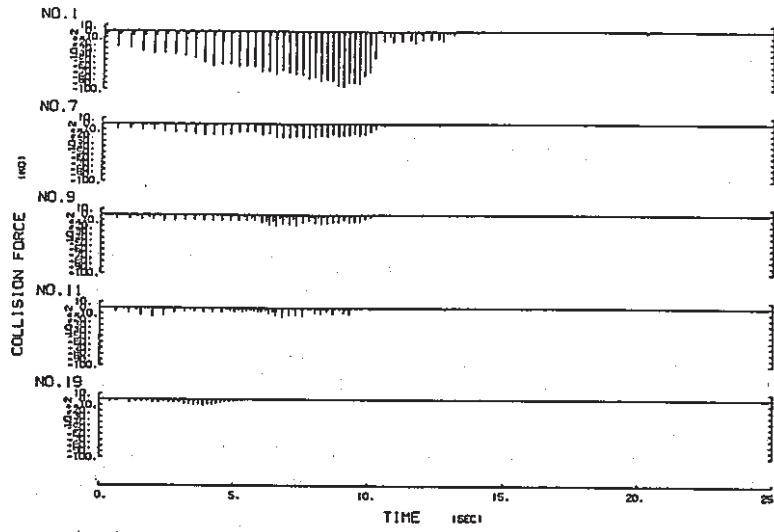


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (1次の減衰定数0.05)

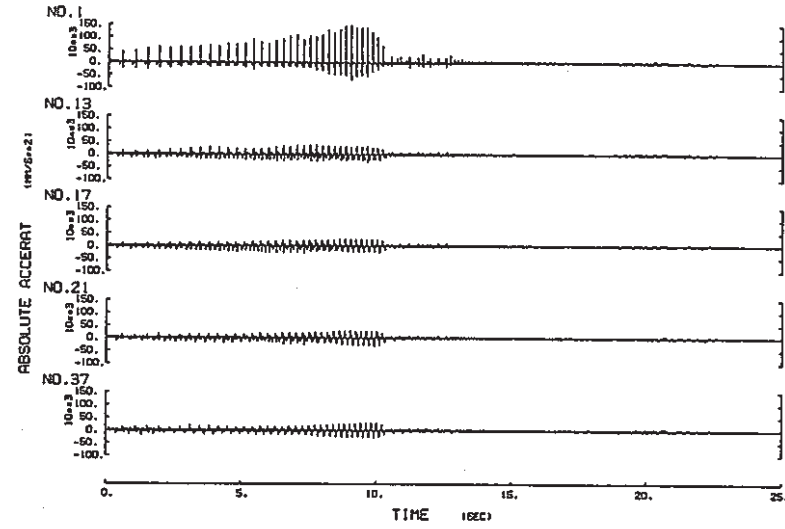


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (1次の減衰定数0.05)

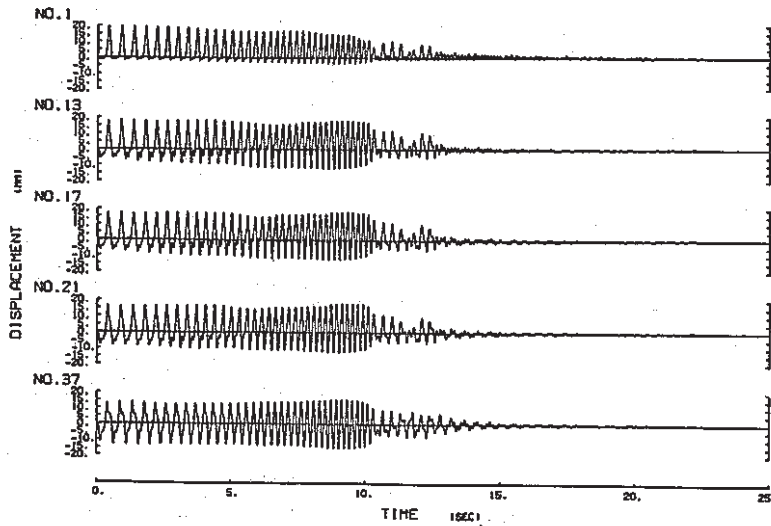
図3-10 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (1次の減衰5%)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (1次の減衰定数0.05)

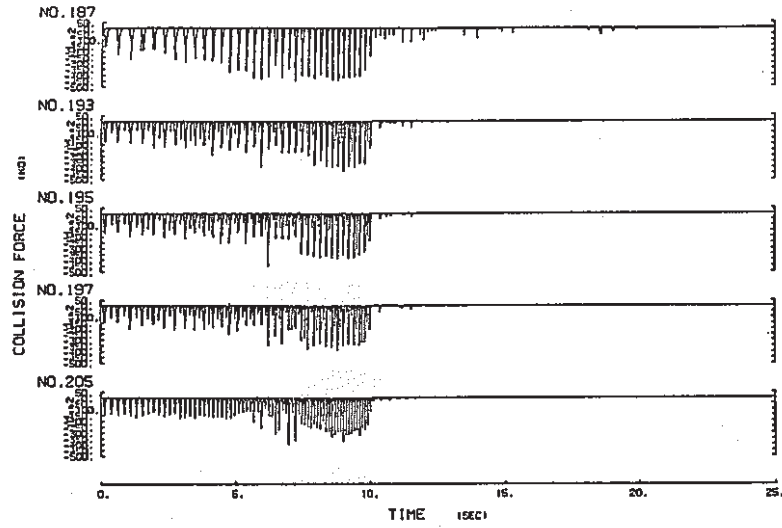


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (1次の減衰定数0.05)

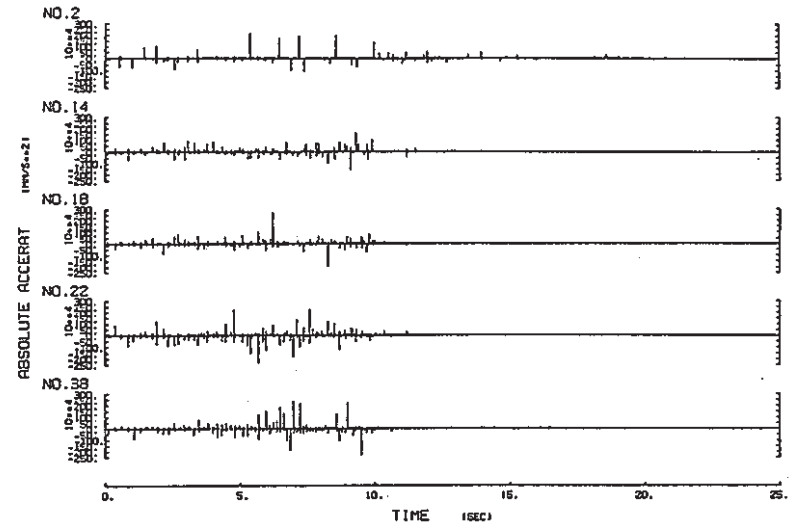


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (1次の減衰定数0.05)

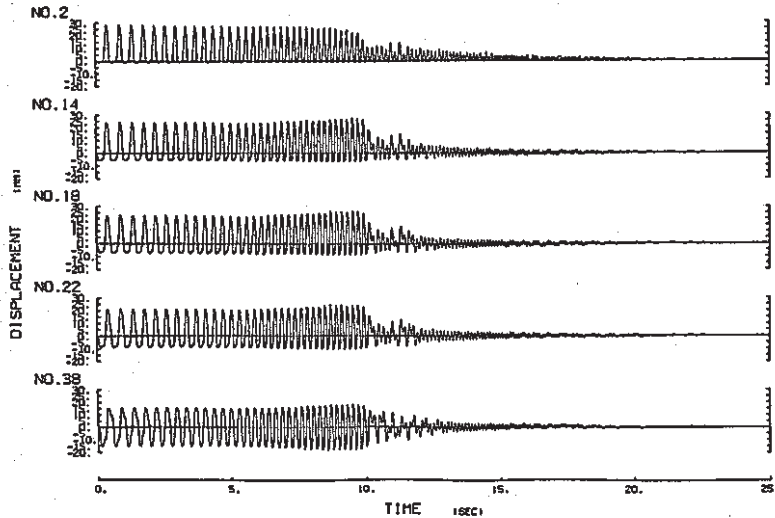
図3-11 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (1次の減衰5%)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (1 次 の 減 衰 定 数 0.10)

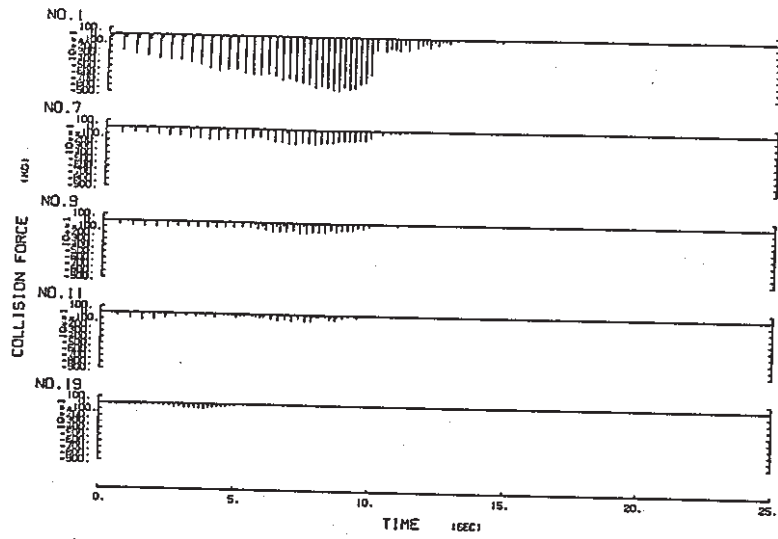


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (1 次 の 減 衰 定 数 0.10)

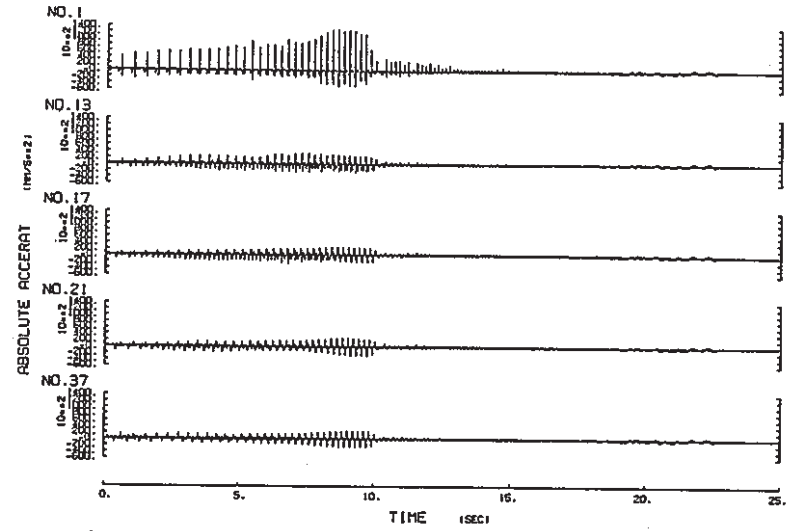


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (1 次 の 減 衰 定 数 0.10)

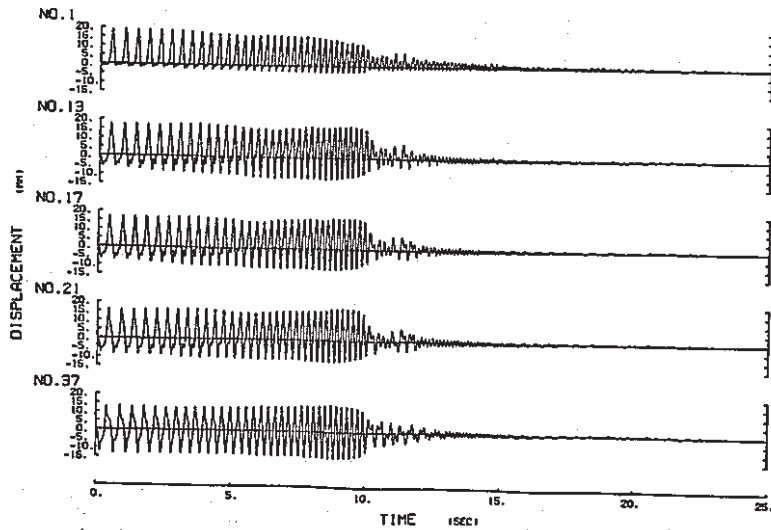
図 3 - 12 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (1 次 の 減 衰 10 %)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (1次の減衰定数0.10)

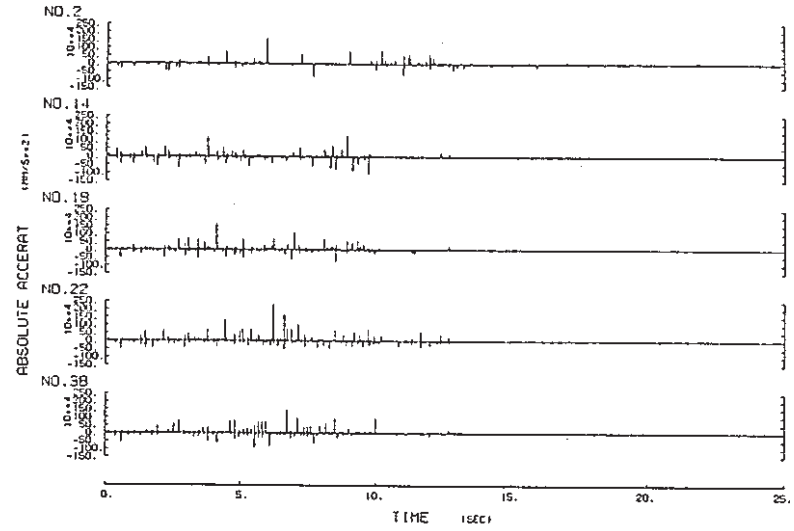
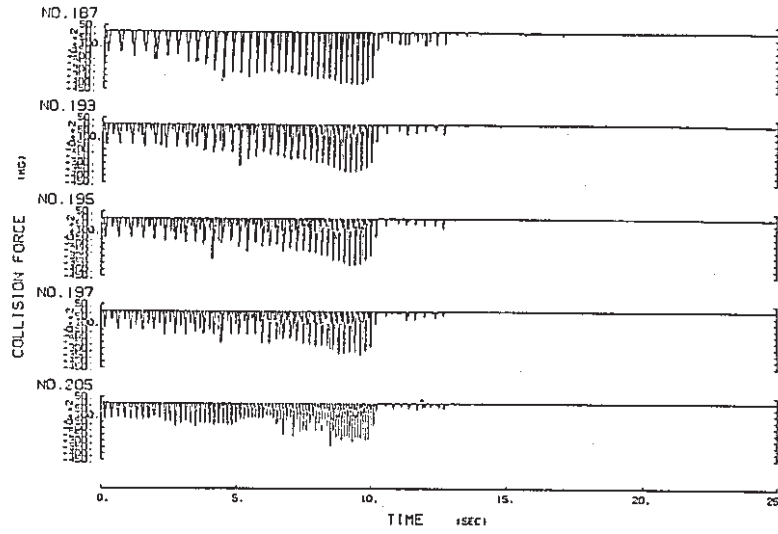


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (1次の減衰定数0.10)

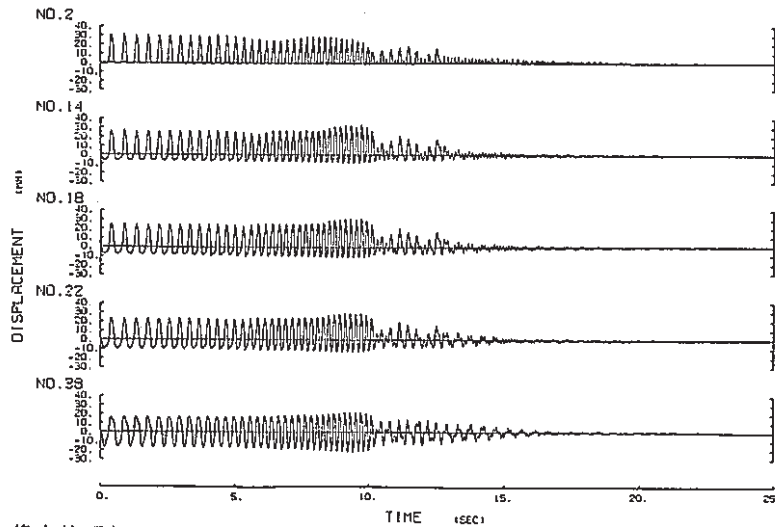


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (1次の減衰定数0.10)

図3-13 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (1次の減衰10%)

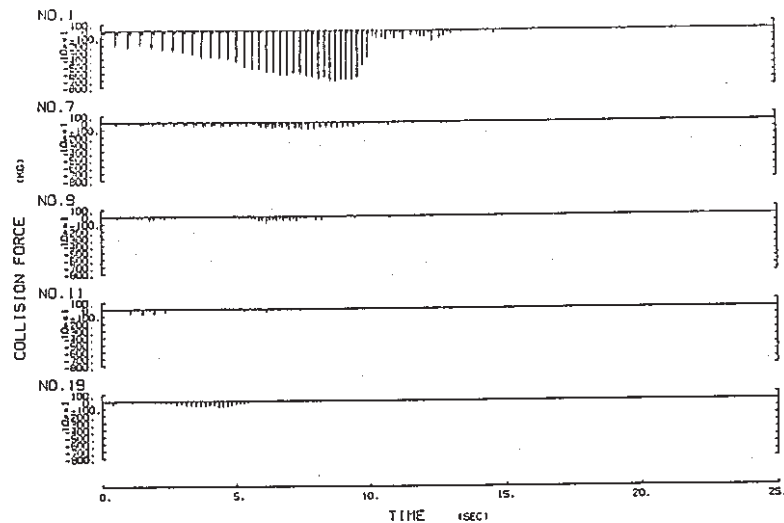


(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (断突部のバネ定数0.88ton/mm、頂部70ton/mm) (c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (断突部のバネ定数0.88ton/mm、頂部70ton/mm)

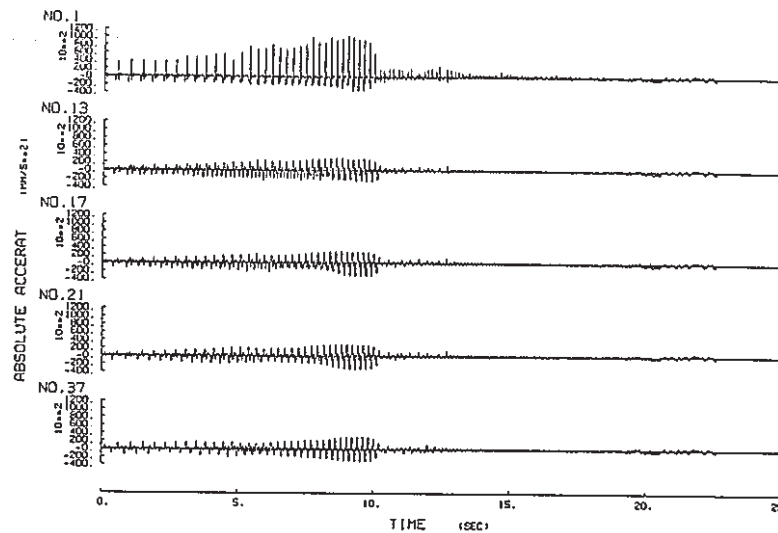


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (断突部のバネ定数0.88ton/mm、頂部70ton/mm)

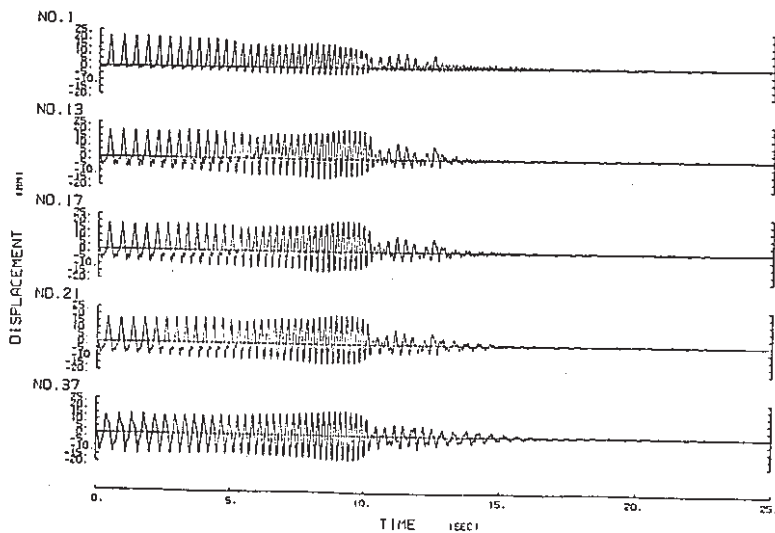
図 3 - 14 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (衝突部のバネ定数中間 0.88 ton/mm、頂部70 ton/mm)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (断突部のバネ定数0.88ton/mm、頂部70ton/mm)

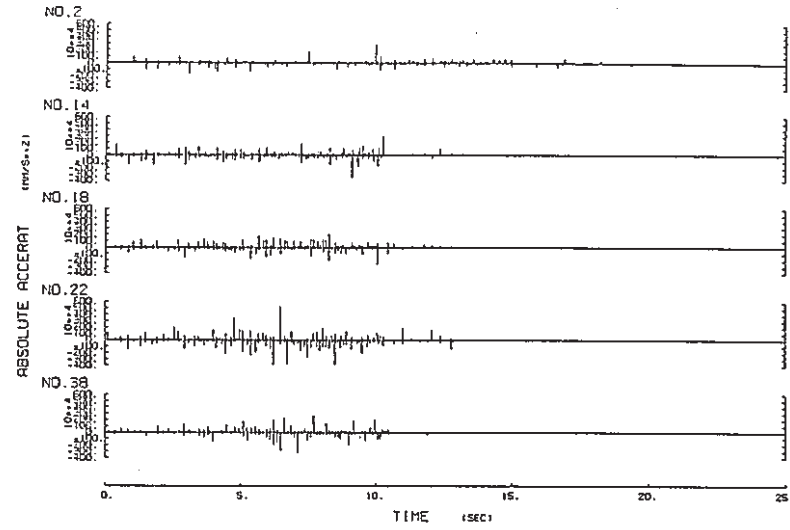
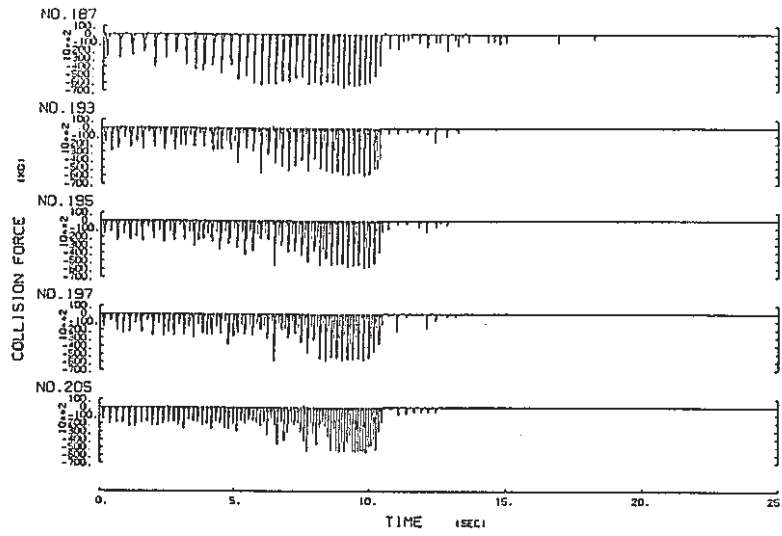


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (断突部のバネ定数0.88ton/mm、頂部70ton/mm)

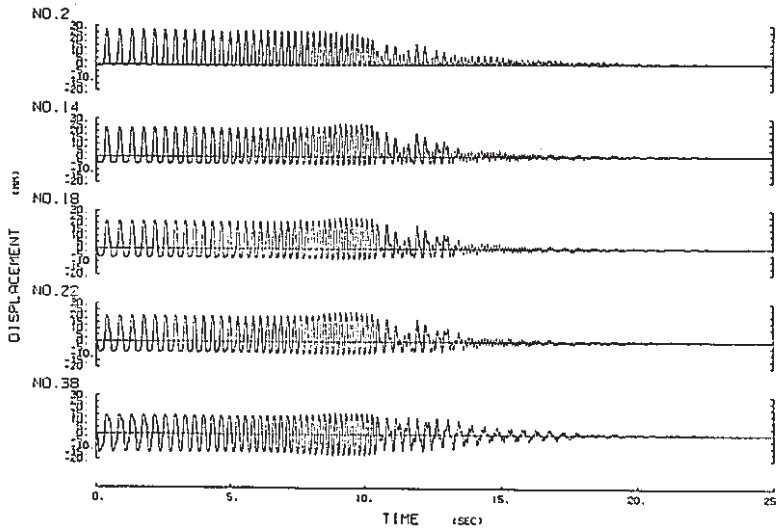


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (断突部のバネ定数0.88ton/mm、頂部70ton/mm)

図3-15 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (衝突部のバネ定数中間 0.88 ton/mm、頂部70 ton/mm)

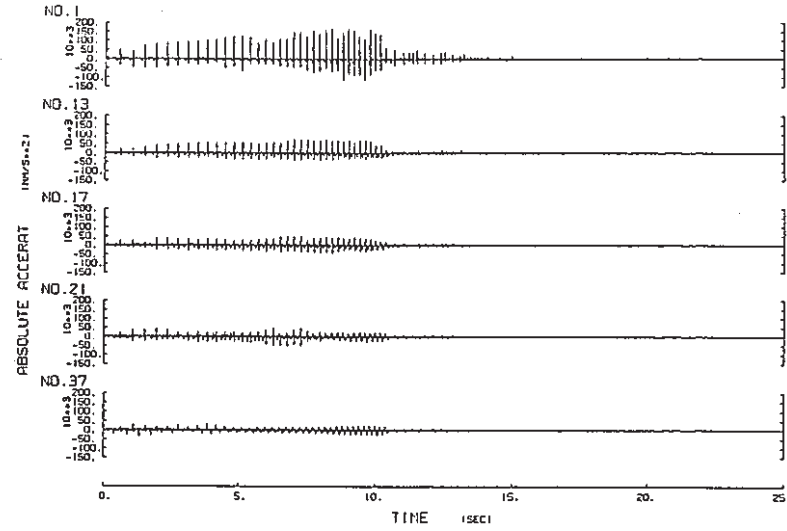
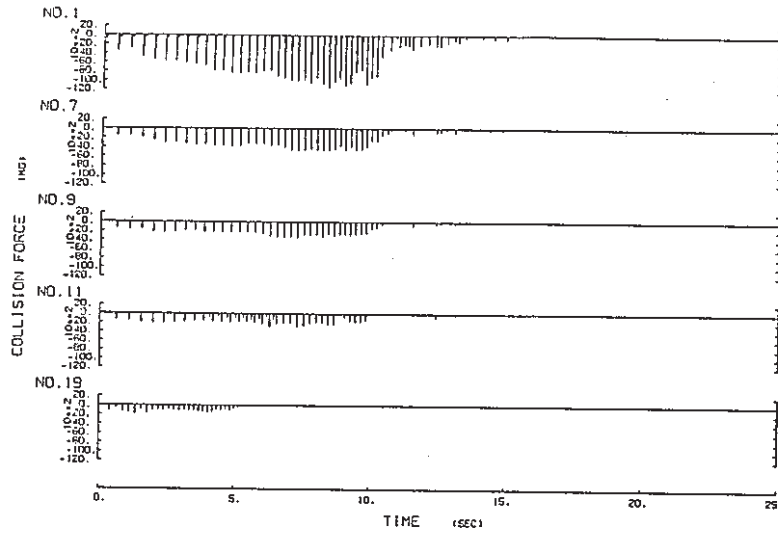


(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (衝突部のバネ定数3.52ton/mm、頂部280ton/mm) (c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (衝突部のバネ定数3.52ton/mm、頂部280ton/mm)

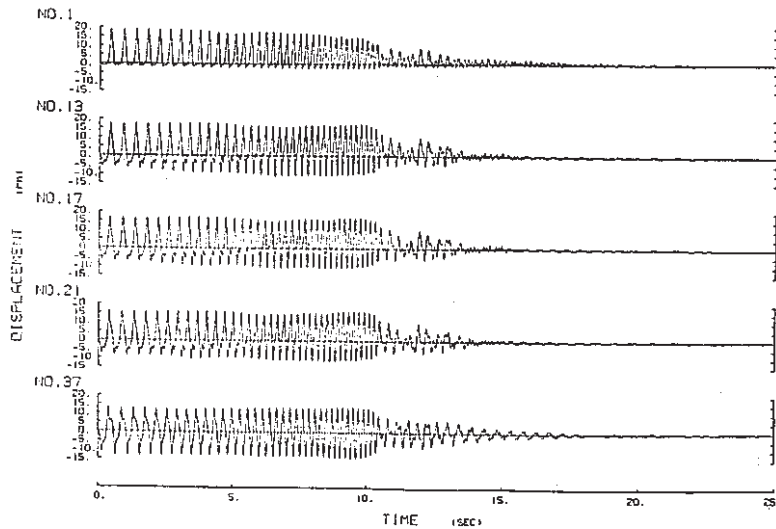


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (衝突部のバネ定数3.52ton/mm、頂部280ton/mm)

図 3 - 16 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (衝突部のバネ定数中間 3.52 ton/mm、頂部280ton/mm)

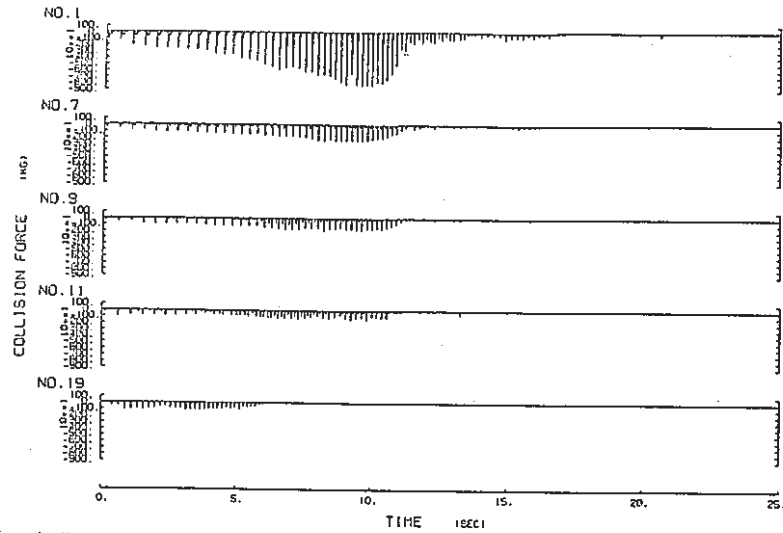


(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (断突部のバネ定数3.52ton/mm、頂部280ton/mm) (c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (断突部のバネ定数3.52ton/mm、頂部280ton/mm)

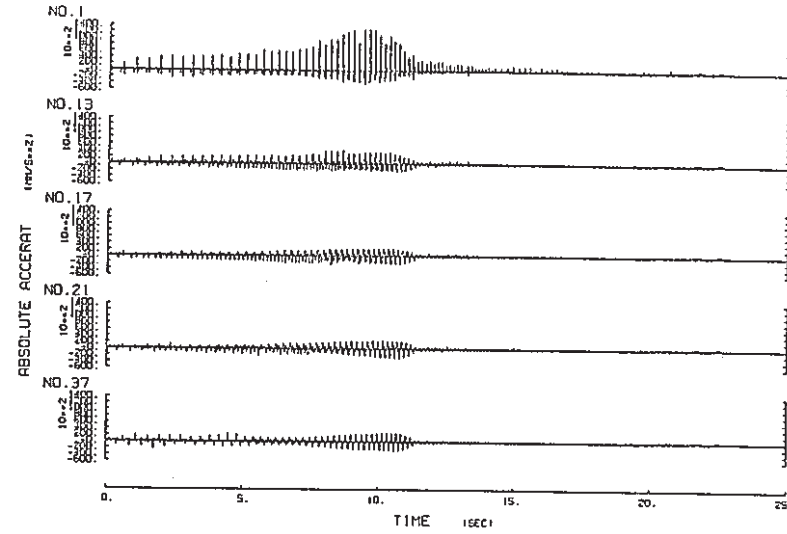


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (断突部のバネ定数3.52ton/mm、頂部280ton/mm)

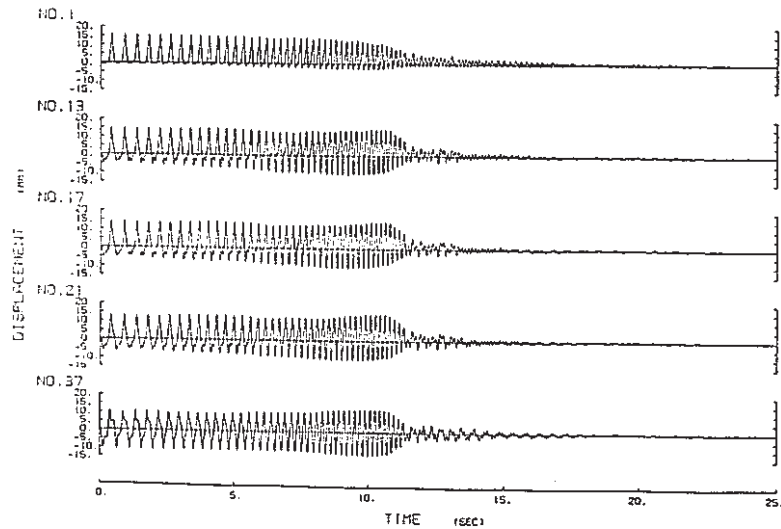
図3-17 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (衝突部のバネ定数中間 3.52 ton/mm、頂部280ton/mm)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)

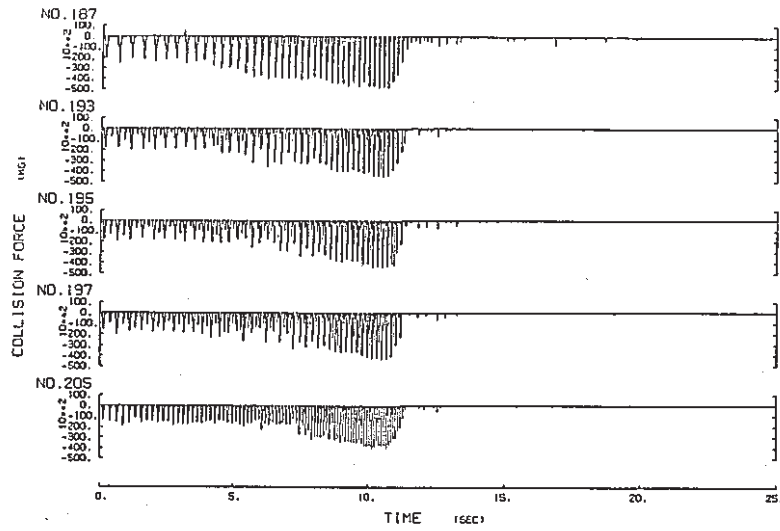


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)

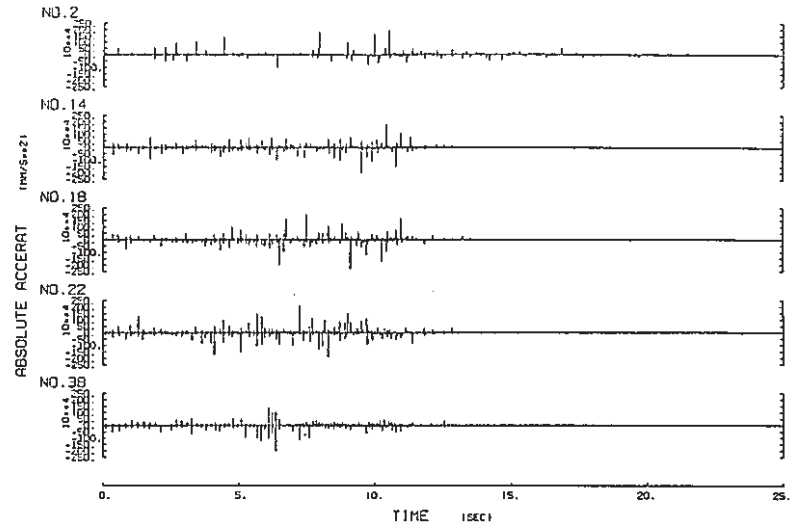


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)

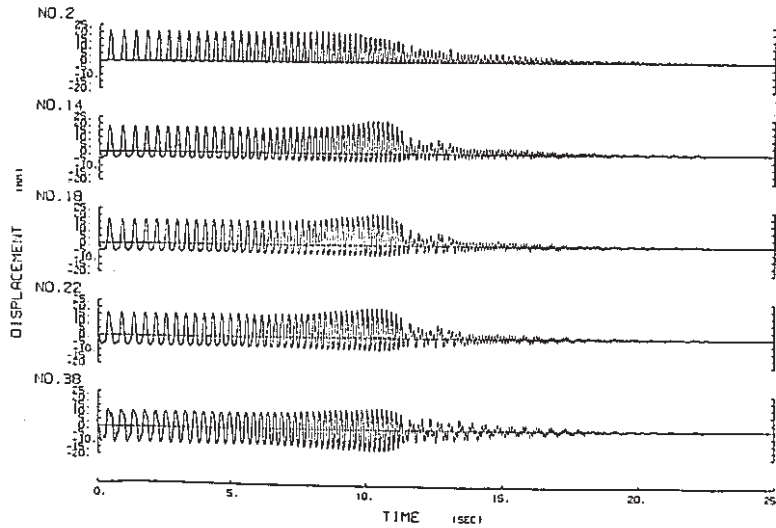
図3-18 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)

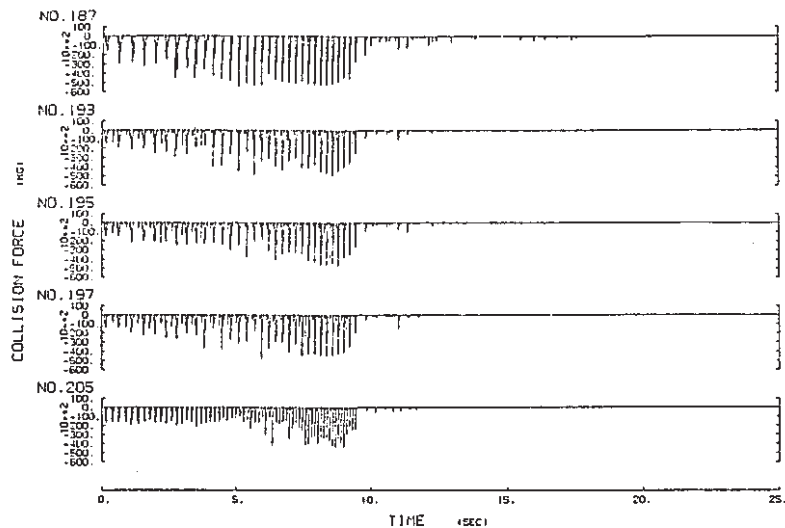


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)

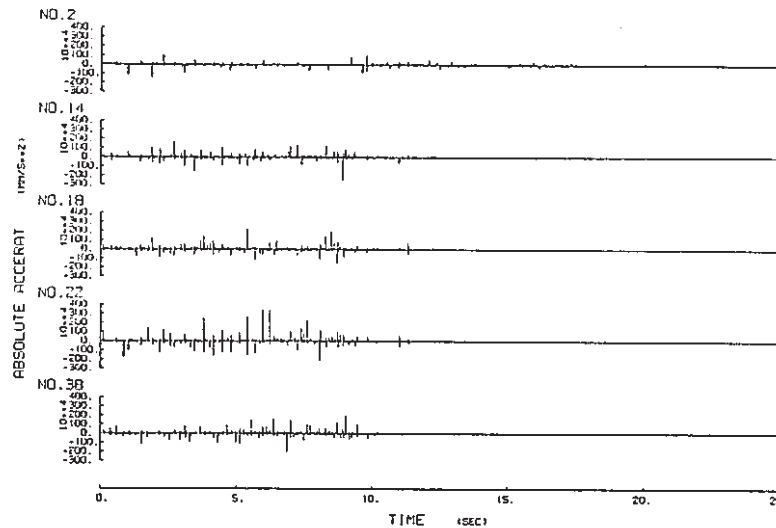


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (パッド間ギャップ中間0.5mm、頂部0.5mm)

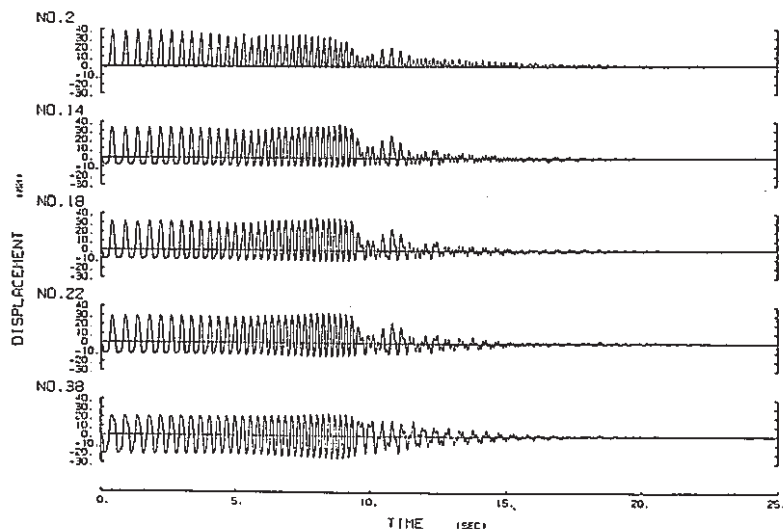
図3-19 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (パッド間ギャップ中間 0.5mm、頂部 0.5mm)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (パッド間ギャップ中間1.5mm、頂部1.0mm)

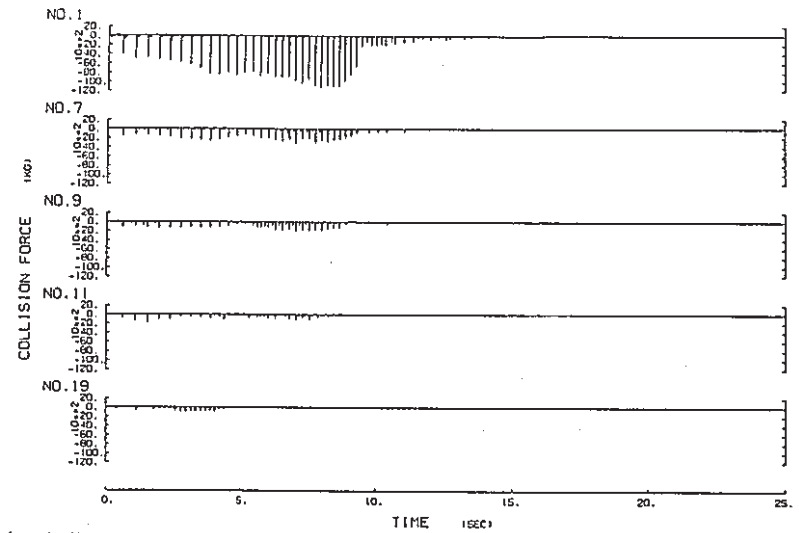


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (パッド間ギャップ中間1.5mm、頂部1.0mm)

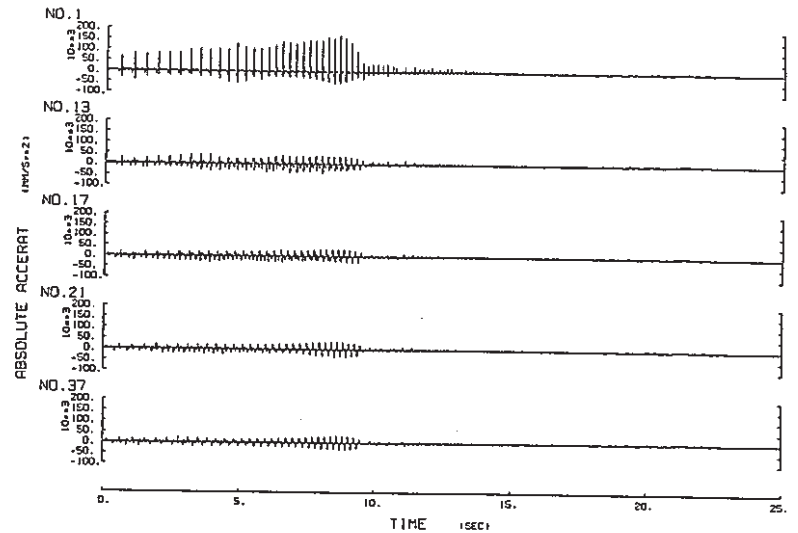


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (パッド間ギャップ中間1.5mm、頂部1.0mm)

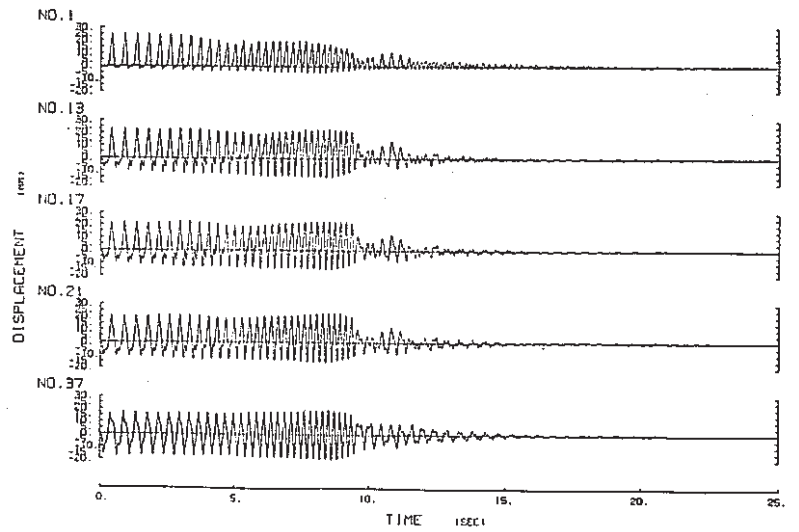
図3-20 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (パッド間ギャップ中間 1.5mm、頂部 1.0mm)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (パッド間ギャップ中間1.5mm、頂部1.0mm)

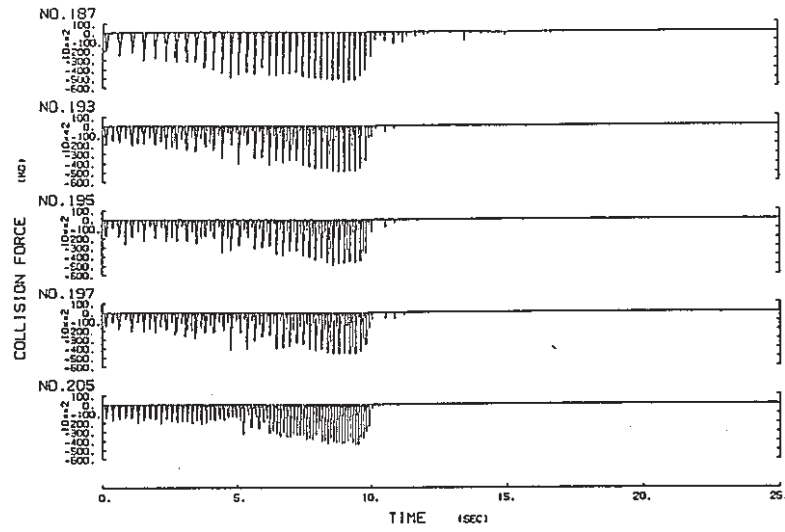


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (パッド間ギャップ中間1.5mm、頂部1.0mm)

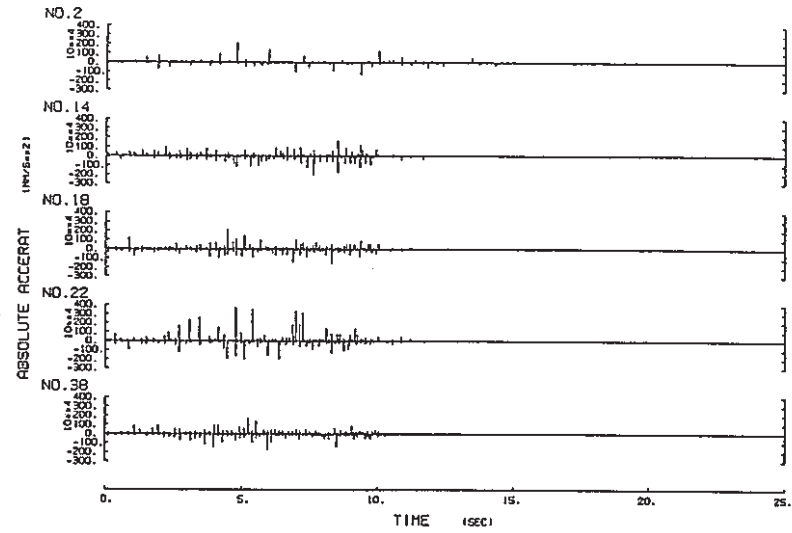


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (パッド間ギャップ中間1.5mm、頂部1.0mm)

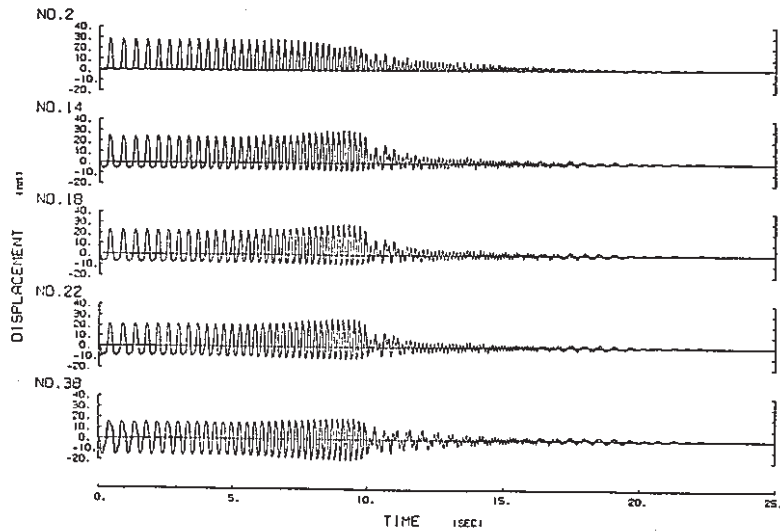
図3-21 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (パッド間ギャップ中間 1.5mm、頂部 1.0mm)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (ラッパ管板厚 3 mm)

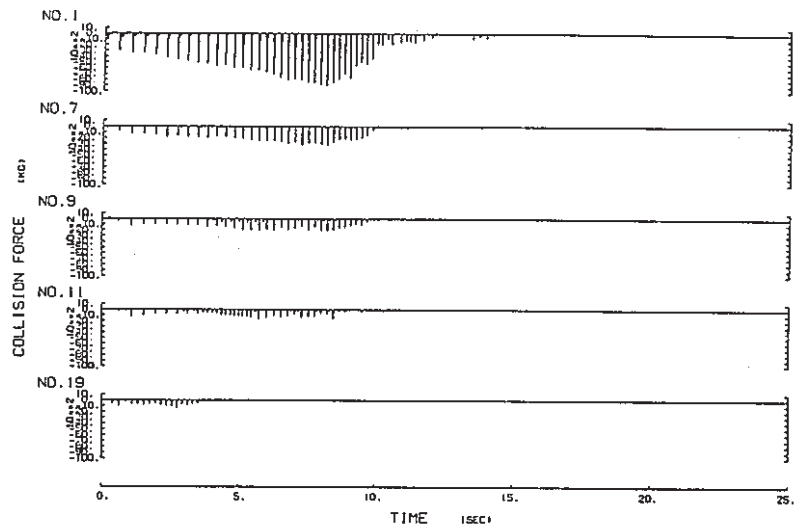


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (ラッパ管板厚 3 mm)

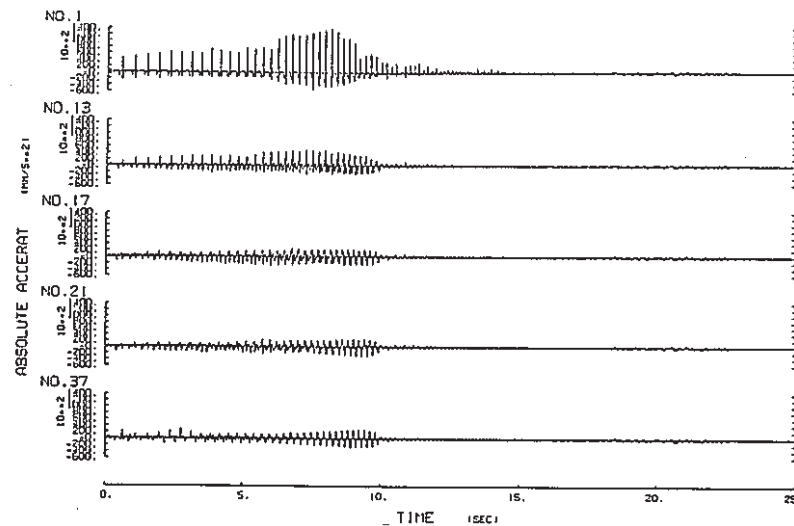


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (ラッパ管板厚 3 mm)

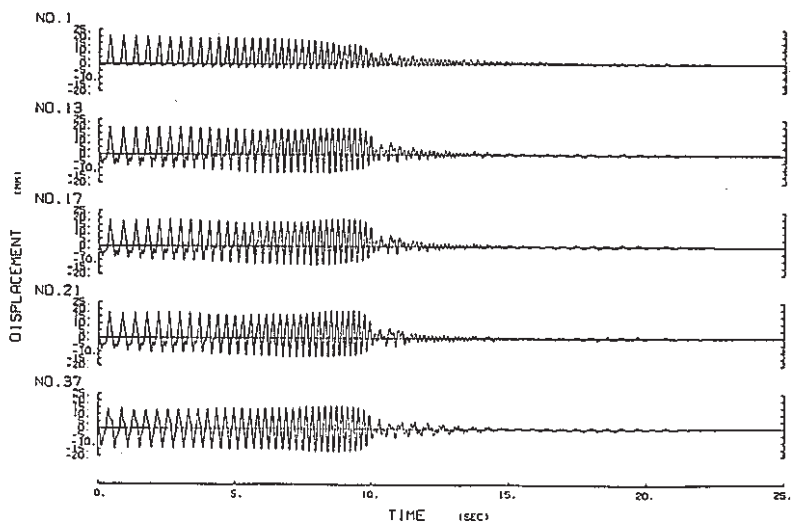
図 3-22 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (ラッパ管板厚 3 mm)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (ラップ管板厚 3 mm)

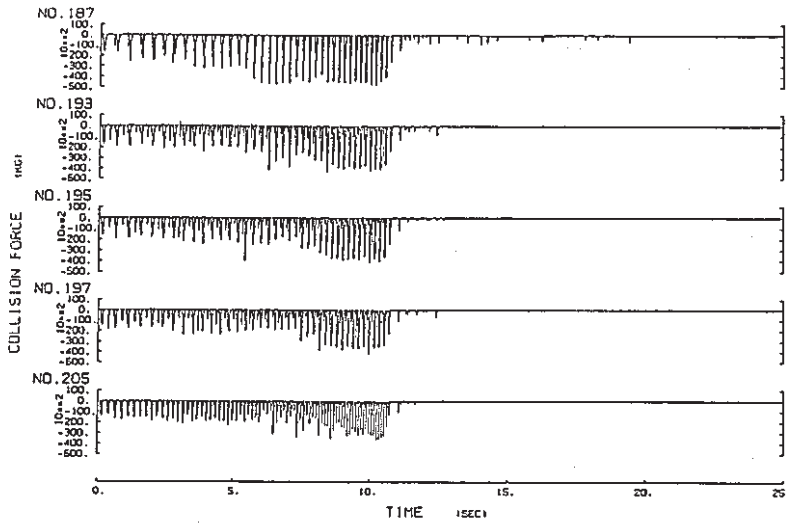


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (ラップ管板厚 3 mm)

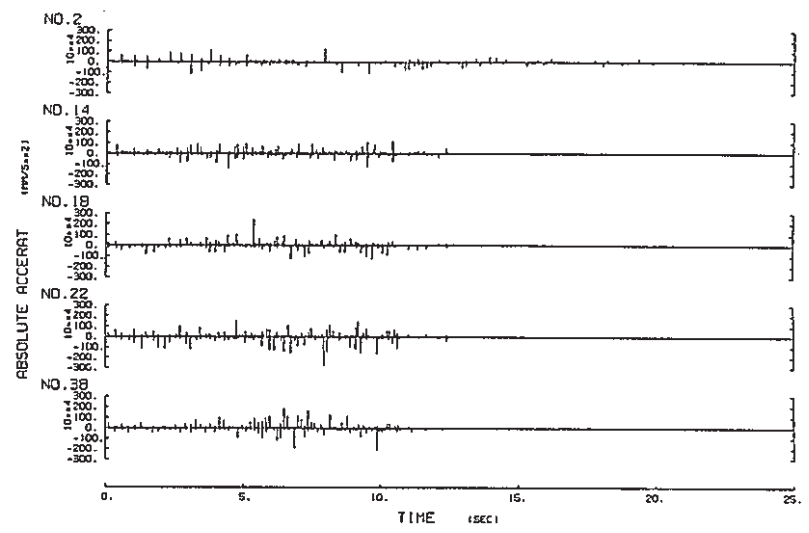


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (ラップ管板厚 3 mm)

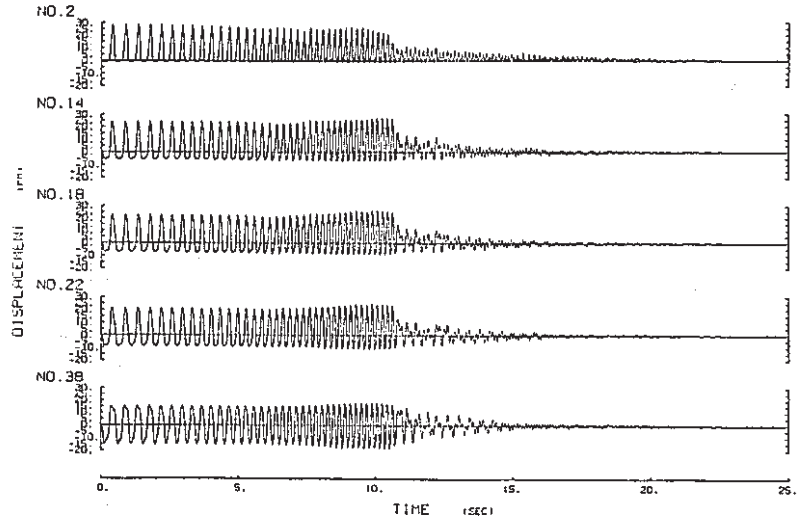
図 3-23 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (ラップ管板厚 3 mm)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (ラッパ管板厚 5 mm)

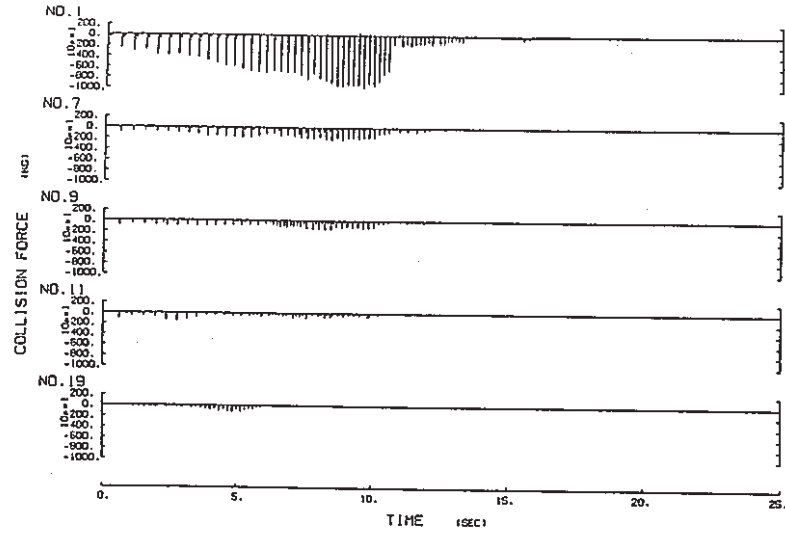


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (ラッパ管板厚 5 mm)

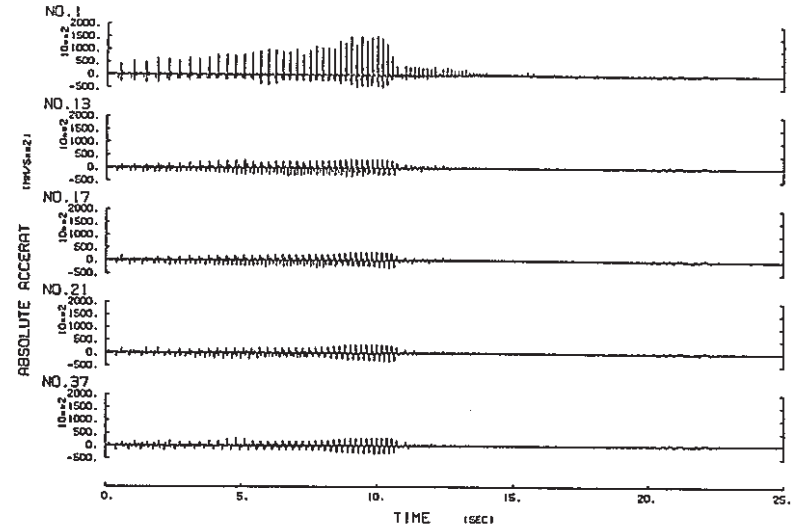


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (ラッパ管板厚 5 mm)

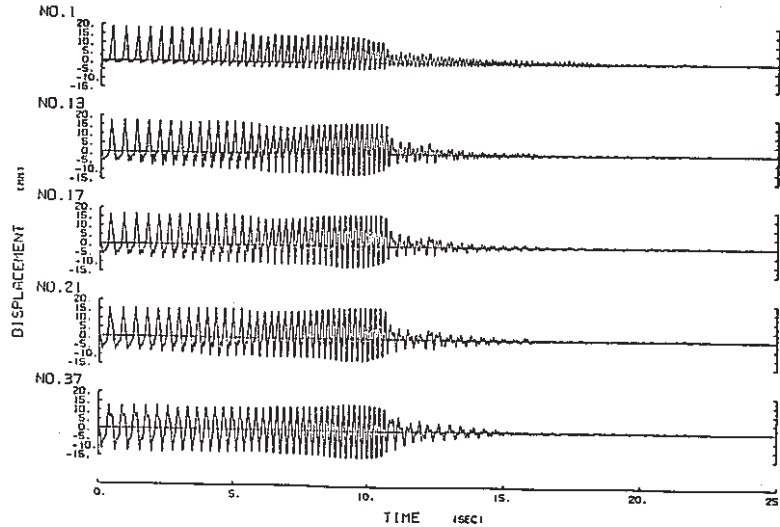
図 3 - 24 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (ラッパ管板厚 5 mm)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (ラッパ管板厚 5 mm)

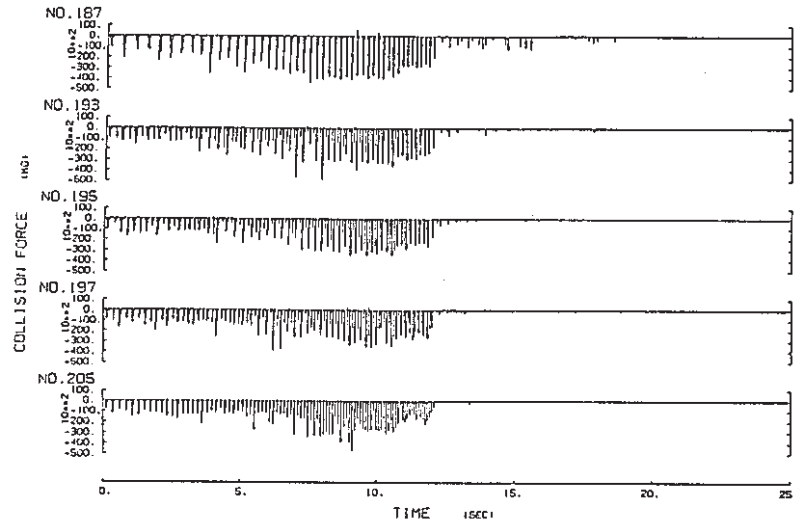


(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (ラッパ管板厚 5 mm)

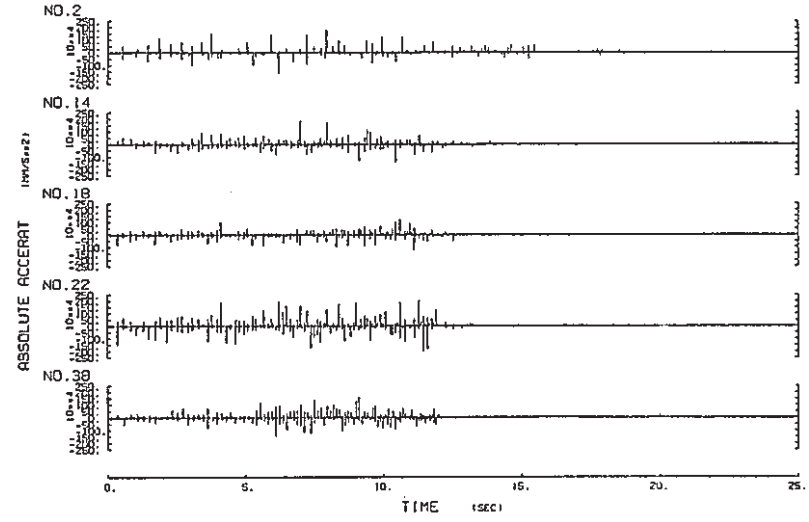


(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (ラッパ管板厚 5 mm)

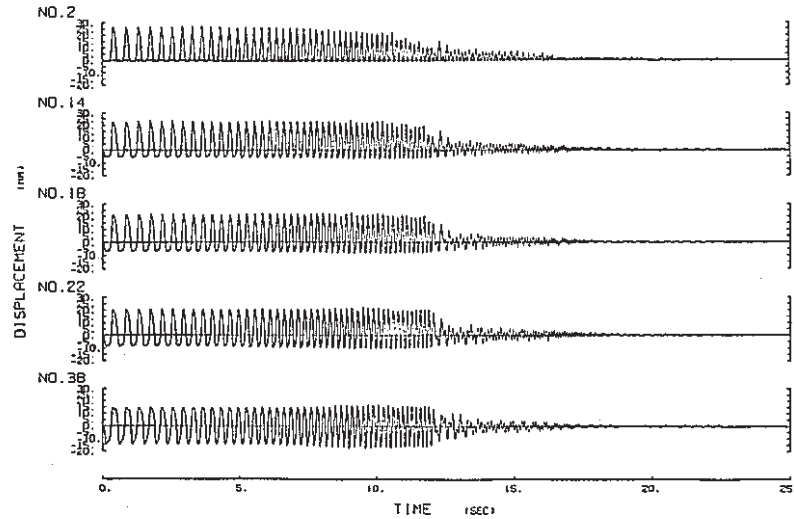
図 3-25 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (ラッパ管板厚 5 mm)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (中間パッド位置1500mm)

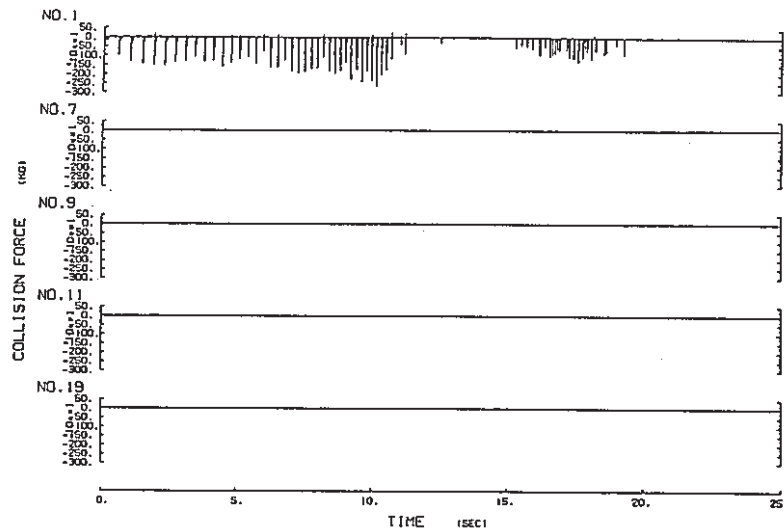


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (中間パッド位置1500mm)

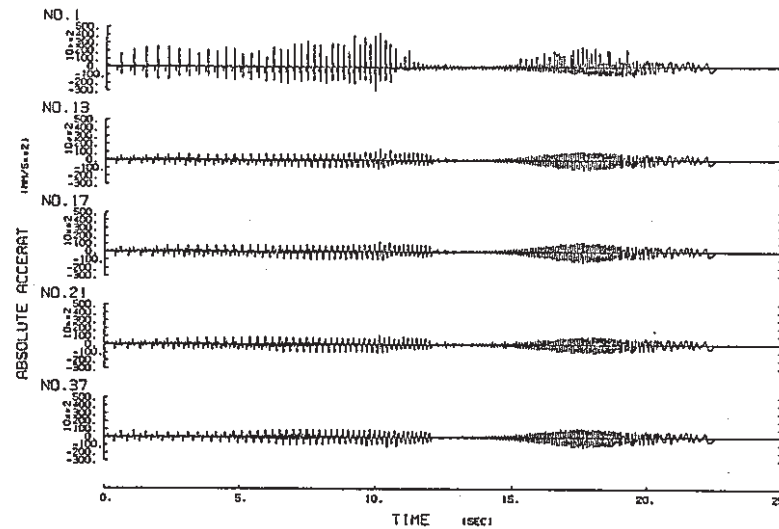


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (中間パッド位置1500mm)

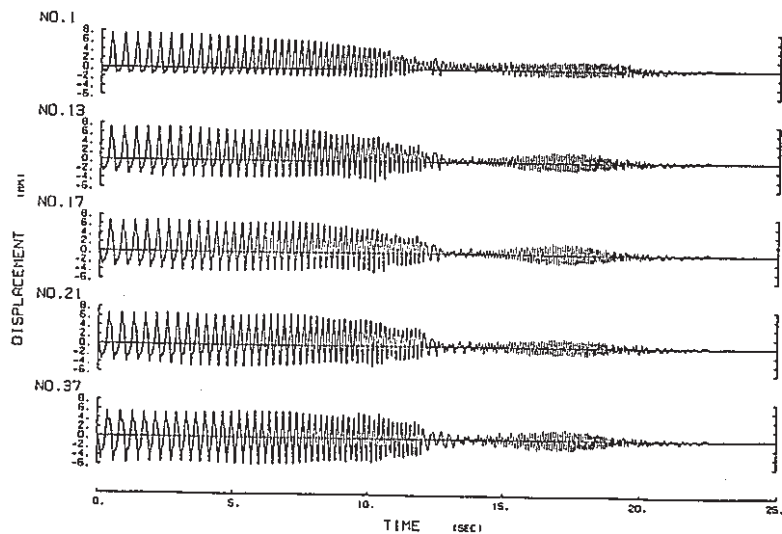
図 3 - 26 正弦掃引波による集合体頂部の応答 (中間パッド位置 1500mm)



(a) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (中間パッド位置1500mm)



(c) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (中間パッド位置1500mm)



(b) 集合体中間部の変位の時刻歴 (中間パッド位置1500mm)

図3-27 正弦掃引波による集合体中間部の応答 (中間パッド位置 1500mm)

計 算 ケ ー ス	正 弦 波 入 力 周 波 数 H z									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
sinsweep 500 GAL				○—○						
” 250 ”			○							
” 750 ”					○—○					
1次減衰定数 5 %				○—○						
” 10%				○—○						
衝突部バネ定数 1 / 2				○—○						
” 2 倍				○—○						
パッド間ギャップ 中間0.5 mm、頂部0.5 mm					○—○					
” 中間1.5 mm、頂部1.0 mm				○—○						
ラッパ管板厚 3 mm				○—○						
” 5 mm					○—○					
中間パッド位置 1500mm			○—○							

(共振周波数を加速度で評価)
卓越振動数を○印で示す。

図 3 - 28 内側炉心燃料集合体中間パッドの応答

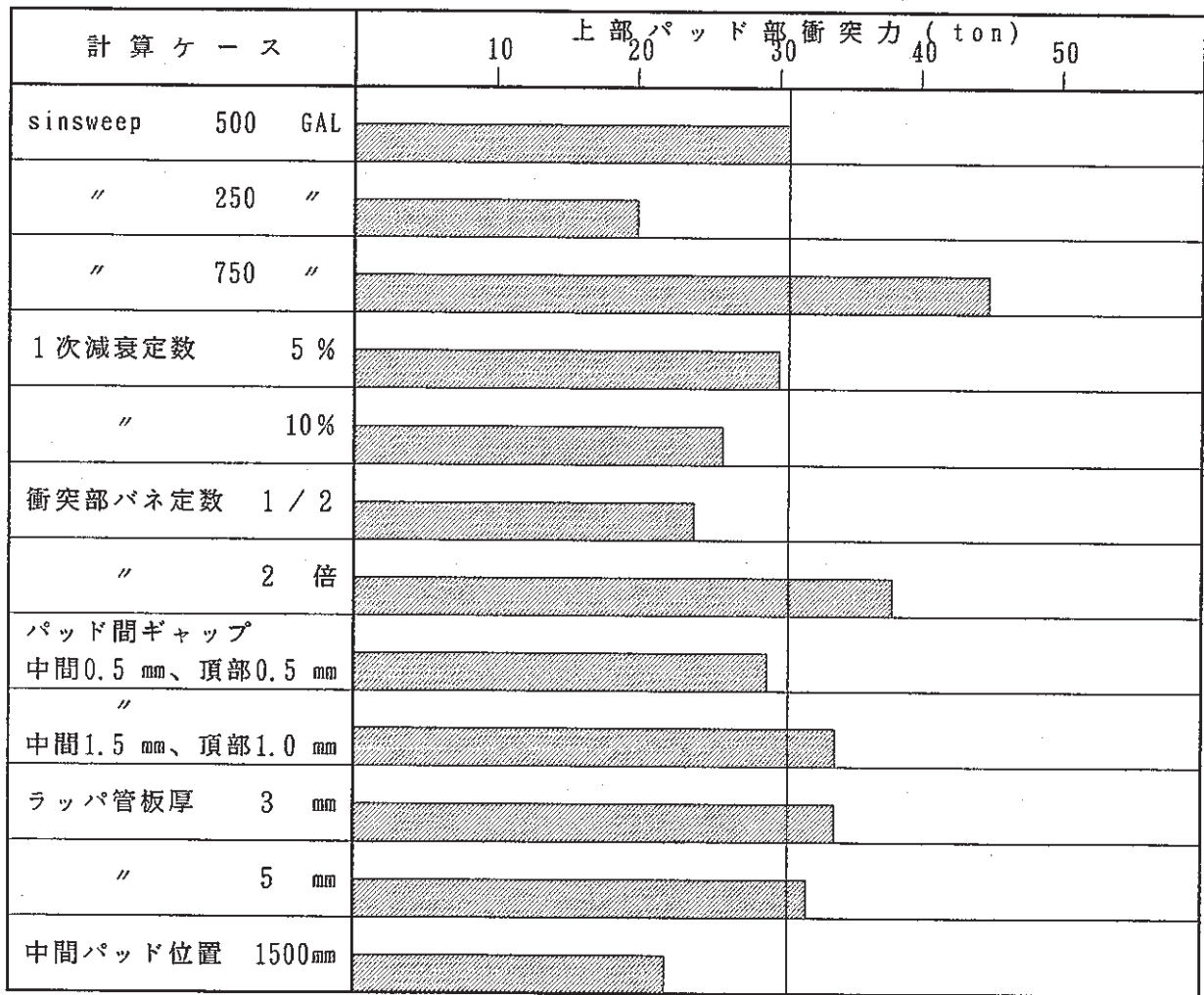


図3-29 上部パッド部の衝突力

4. 群振動解析（地震波）

前章に述べた正弦掃引波入力⁽¹⁰⁾の群振動解析によって、大型炉炉心の基本的群振動特性と、各種パラメタの影響の程度が概略把握できた。本章では、暫定的に作成された炉心支持板での地震波入力をを用いて群振動解析を実施して大型炉炉心の地震応力評価のための資料を得るとともに、上記パラメタのうち、効果の大きいものについて耐震成立を検討する。

4.1 解析条件

(1) 解析対象

前章と同じく、大型炉炉心体系のうち最長列37体を取り出し、これが列方向に地震波加振される場合について解析する。詳細は3.1(1)を参照されたい。

基本ケースの他、ラップ管板厚が3mmの場合（基本ケースでは4mm）、及び中間パッド位置が1500mm（基本ケースでは2500mm）の2ケースについても解析を行う。

(2) 解析条件

a) 入力

群振動解析の地震波入力は炉心支持板の加速度応答時刻歴で定義される。昭和60年度の大炉設計研究において、リファレンスとなる原子炉建物、及び原子炉構造の地震応答解析は実施されていないので、本検討では、別途実施されている制御棒挿入性の検討において作成された地震波⁽¹⁰⁾を入力として用いた。

炉心支持板の加速度応答時刻歴の作成手順は概ね以下のとおりである。

①基本地震動：軽水炉改良標準化⁽¹³⁾（昭和55年）で作成された高地地震帯用地震波S1N（ $\alpha_{max} = 267.4 \text{ gal}$ ）を用いる。

②地盤条件：Vs = 1500 m/sとする。

③解析モデル：地盤-建物相互作用はSway-Rockingモデルにより表し、地盤ばねの算定は第3次軽水炉改良標準化⁽¹⁴⁾による。また、埋込み効果は基準地震度の引きもどし（deconvolution）によって表現し、側方ばねは考慮しない。地盤-建物-原子炉構造の連成モデルとする。

図4-1に解析モデルを、図4-2、4-3に炉心支持板の加速度応答時刻歴及び応答スペクトル（減衰定数3%）をそれぞれ示す。

最大速度は約500 gal、継続時間は25秒である。また、スペクトルのピークは2~3 Hz及び10~12 Hz付近に発生する。

なお、上記はS1地震に対応するものであり、基本ケースについて行ったS2地震の解析は上記を1.5倍にしたものを入力として用いた。

b) 解析パラメタ

基本ケースでは入力を500 gal とし各パッド間のギャップは、中間パッド部で1.0 mm 頂部パッド部で0.7 mmとした。頂部パッドの衝突バネ定数は140 ton/mm、中間パッドの衝突バネ定数は1.76 ton/mm (制御棒は7.36 ton/mm)、ラッパ管の板厚は4 mm、減衰定数は1次3%：2次15%、中間パッドの位置は球面座より2500mm、ヤング率は 1.66×10^4 kg/mm²とした。

上記の基本ケースに加え、ラッパ管の必要最小板厚を検討するための板厚3 mmのケースと、衝突力低減の可能性のある中間パッド位置1500mmのケースについても解析を行った。

4.2 解析結果

(1) 基本ケース

S1地震波に対する炉心構成要素の群振動応答の時刻歴の代表例を図4-4(a)～(f)に示す。

図4-4(a)は、S1波による集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。衝突部番号187は中性子遮蔽体(B₄C)、193はブランケット集合体、197は制御棒、205は内側炉心燃料集合体を示している。最大衝突力を発生するのは中性子遮蔽体で約2.5秒に18.2 tonの衝突力となる。ブランケット集合体に生じる最大衝突力は約2.3秒の15.6 tonである。制御棒に生じる最大衝突力は約2.4秒の10.2 tonである。燃料集合体に生じる衝突力は約2.3秒の13.7 tonである。図4-4(b)は、ブランケット集合体、18は外側炉心燃料集合体、22は制御棒、38は内側炉心燃料集合体を示している。最大変位は中性子遮蔽体に発生し、その値は約2.4秒で24.8 mmとなる。これは、パッド間ギャップから決まる幾何学的な変位の上限(26.6 mm)にほぼ対応する値である。ブランケットの最大変位は2.4秒の23.6 mm、制御棒の最大変位は約2.3秒の20.7 mm、燃料集合体の最大変位は約2.3秒の22.2 mmである。

図4-4(c)は、頂部パッド位置の加速度の時刻歴を示している。ここに示される加速度は、衝突によって発生したものである。図4-4(d)は、S1波による集合体の中間パッドに発生する衝突力を示している。衝突部番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、7はブランケット集合体、9は外側炉心燃料集合体、11は制御棒、19は内側炉心燃料集合体を

中性子遮蔽体を除く他の集合体に発生する衝突力は0.6 ton 以内である。図4-4(e)は、S1波による集合体中間パッド位置の変位の時刻歴を示している。質点番号1は中性子遮蔽体(B₄C)、13はブランケット集合体、17は外側炉心燃料集合体21は制御棒、37は内側炉心燃料集合体を示している。最大変位を生ずる集合体は中性子遮蔽体で約2.4秒の13.7mmである。図4-4(f)は、S1波による集合体中間パッド位置における加速度の時刻歴を示している。鋭く立ち上がっている加速度は衝突によって生じているものである。

S2地震波(1.5×S1)に対する群振動応答の時刻歴の代表例を図4-5(a)～(f)に示す。

図4-5(a)は集合体頂部の衝突力の時刻歴である。最大衝突力が発生するのは最外周の中性子遮蔽体で、その発生時刻と衝突力はそれぞれ約2.4 sec、27.7 tonである。ブランケット集合体、制御棒、及び燃料集合体の最大衝突力もほぼ同時刻に生じており、その値はそれぞれ19.6 ton、15.1 ton、17.7 tonとなっている。各要素の最大衝突力はS1地震時の1.3倍～1.5倍となっている。図4-5(b)は集合体頂部の変位の時刻歴を示している。最大変位は中性子遮蔽体に発生し、その値は約2.3秒で27.9mmとなる。ブランケット集合体の最大変位は2.3秒の25.2mm、制御棒の最大変位は約2.5秒の22.7mm、燃料集合体の最大変位は約2.3秒の23.7mmである。図4-5(c)は、S1波による頂部パッド位置の加速度の時刻歴を示している。最外周の中性子遮蔽体の最大変位は幾何学的上限値26.6mmより若干大きめの値であるが、この差は衝突によって生じるパッドの累積圧縮変形量に対応している。図4-5(d)は、S2波による集合体の中間パッドに発生する衝突力を示している。最大の衝突力が発生するのは中性子遮蔽体で約2.4秒の2.3 tonである。中性子遮蔽体を除く他の集合体に発生する衝突力は1.0 ton 以内である。図4-5(e)は、S1波による集合体中間パッド位置の変位の時刻歴を示している。最大変位を生ずる集合体は中性子遮蔽体で約2.3秒の17.2mmである。図4-5(f)は、集合体中間パッド位置における加速度の時刻歴を示している。

図4-6は、S1及びS2地震時に中間パッドに生じる最大衝突力の径方向(列方向)分布を示している。両端の中性子遮蔽体は炉心槽と衝突し、変位振巾も最大であるため、他の集合体よりも中間部の衝突力は大きくなる。集合体の種類が変わるところで若干の不連続はあるが、列の中心に向かって徐々に衝突力は小さくなり、内側炉心では有意な衝突力は殆ど生じていない。図4-7は頂部パッドに生じる最大衝突力の径方向分布である。最外周の中性子遮蔽体に最大の衝突力が発生する点は中間パッドの場合と同様であるが、内

側炉心に生ずる衝突力は頂部の場合はそれほど小さくならず、外側炉心、制御棒より大きめの値となっている。

図4-8及び4-9はそれぞれ中間パッド、頂部パッドの最大変位の径方向分布を示している。図中の実線はギャップ巾から決まる幾何学的変位の上限を示しているが、中間パッドでは外側の7~8体の集合体の変位がこの幾何学的上限値を超えている。超過分は衝突によるパッドの圧縮形に対応する量であるが、図4-6で衝突力が大きい集合体と良く一致している。頂部パッドの最大変位は、ほぼ全集合体にわたって幾何学的上限を若干上回る値となっている。

(2) 追加ケース

a) ラップ管板厚が3mmの場合

ラップ管板厚が3mmの場合のS1地震波に対する群振動応答の時刻歴を図4-10(a)~(f)に示す。図中、衝突部及び質点番号と集合体の対応は基本ケースと同一である。また、基本ケースの解析で衝突力及び変位の最大値はいずれも地震波の前半に生じているので、解析は地震波の前半10secについて行った。図4-10(a)は集合体頂部の衝突力の時刻歴を示している。最大衝突力が発生するのは見本ケースと同様に最外周の中性子遮蔽体で、約2.4秒に18.6tonの衝突力が発生している。ブランケット集合体、制御棒、及び燃料集合体の最大衝突力もほぼ同時刻に発生し、その値はそれぞれ16.4ton、10.4ton、16.3tonとなっている。基本ケースのS1地震波の結果と比較して、ラップ管板厚を3mmとした場合も頂部の衝突力はほとんど変化しない。図4-10(b)は集合体頂部の変位の時刻歴である。最大変位は衝突力と同様、最外周の中性子遮蔽体に生じており24.9mmである。衝突力と同様、変位応答に対する板厚の影響も見られない。図4-10(c)は衝突によって生じる頂部の加速度時刻歴である。図4-10(d)~(f)はそれぞれ中間部の衝突力、変位、及び加速度の時刻歴である。

図4-11~4-14に、中間パッド部、頂部の衝突力と変位の最大値の径方向分布を示すが、これらも基本ケースとほぼ同様である。

これらの解析結果から、ラップ管板厚を3mmとした場合でも大型炉心の群振動挙動に有意な変化は生じないと判断される。従って、地震時のラップ管応力(曲げによる応力及び衝突力による応力)が許容限界以内に収まれば、耐震設計の観点からラップ管板厚の削減が可能ということになるが、この点については次章に述べる。

b) 中間パッド位置1500mmの場合

通常の燃料設計において、中間パッドは燃料集合体の炉心領域（燃料ペレット）をはずした所に設定される。基本ケースでは、中間パッドは炉心領域の上端に設定されており、下部支持端から距離は約2500mmである。（図2-1参照）。もう一つの可能性としては、中間パッドを炉心領域の下端に設定することが考えられ、この場合中間パッドの下部支持端からの距離は約1500mmとなる。

図4-15(a)～(f) 中間パッド位置が1500mmの場合のS1地震波に対応する群振動応答を示す。板厚3mmの場合と同様、地震波の最初の10秒について解析している。図4-15(a)は集合体頂部の衝突力の時刻歴である。最外周の中性子遮蔽体に生じる衝突力は他のケースと比較して若干低めで、14.6 tonである。ブランケット集合体、制御棒、及び燃料集合体の最大衝突力も全般的にやや低めの値となっており、それぞれ10.7 ton、8.5 ton、及び14.1 tonである。図4-15(a)は集合体頂部変位の時刻歴を示し、図4-15(c)は加速度の時刻歴を示す。図4-15(d)は集合体中間部の衝突力の時刻歴を示すが、最外周の要素（中性子遮蔽体）を除いて衝突は生じておらず、最外周での値も約0.3 ton と他のケースと比較して非常に低い値となっていることが特徴的である。これは、群振動時においても各要素が総体的に1次モードが卓越した振動挙動を示しているためと考えられる。（このことは、中間パッド要素の上端又は下端に設定する、両極端のケースを想定してみれば理解出来る。）従って、中間パッドの衝突力による応力が設計上厳しくなる場合には中間パッド位置を下げることで、その解決策として考えられる。図4-15(e)、(f)は集合体中間部の変位及び加速度応答の時刻歴である。

図4-16及び4-17に中間パッド及び頂部パッドの最大衝突力の径方向分布を示す。他のケースは頂部の衝突力は最外周の中性子遮蔽体で最大となっていたが、本ケースでは外側から4体めの遮蔽体に最大値が生じており、分布の程度も小さい。図4-18及び図4-19は集合体中間部及び頂部の最大変位の径方向分布を示す。各集合体は片持ちはりで見なせるので当然のことではあるが、中間部の変位は他のケースと比べて小さくなっており、その比は、単体の1次モードにおける中間パッド位置（下端から2500mmと1500mm）における振巾比にほぼ等しい。

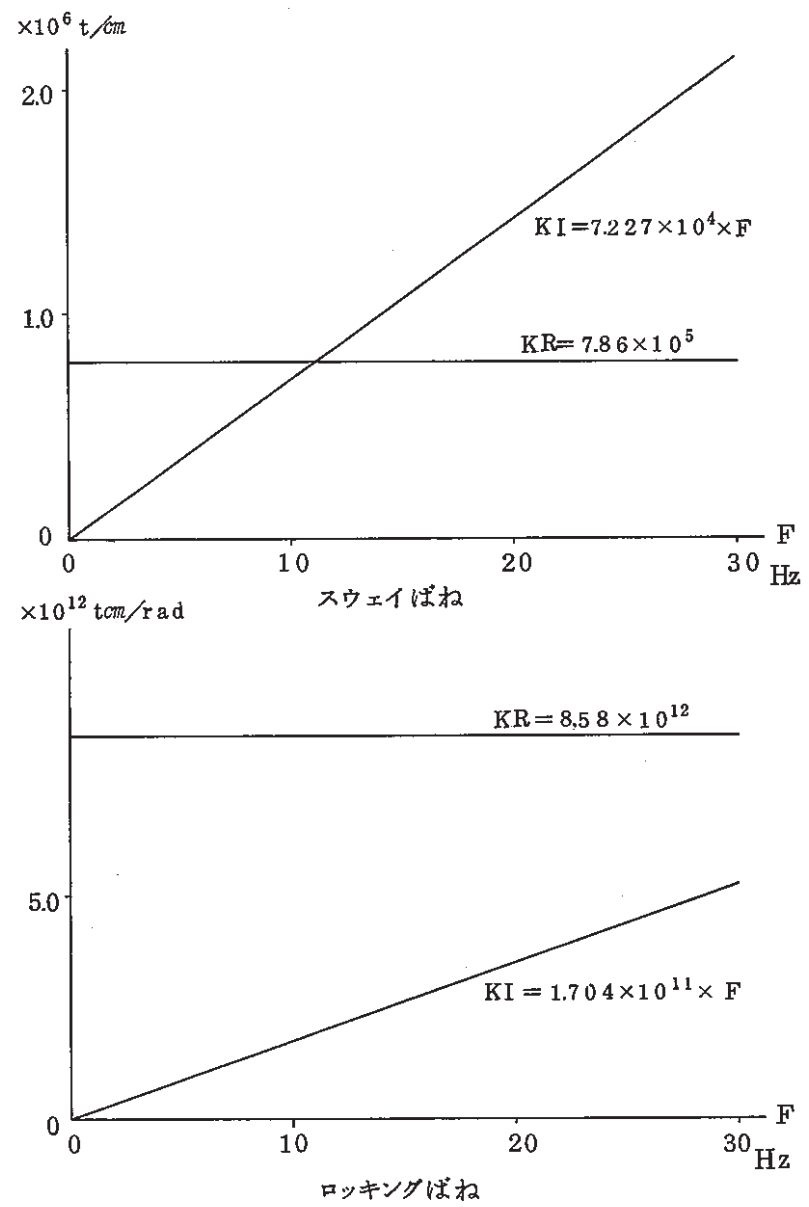
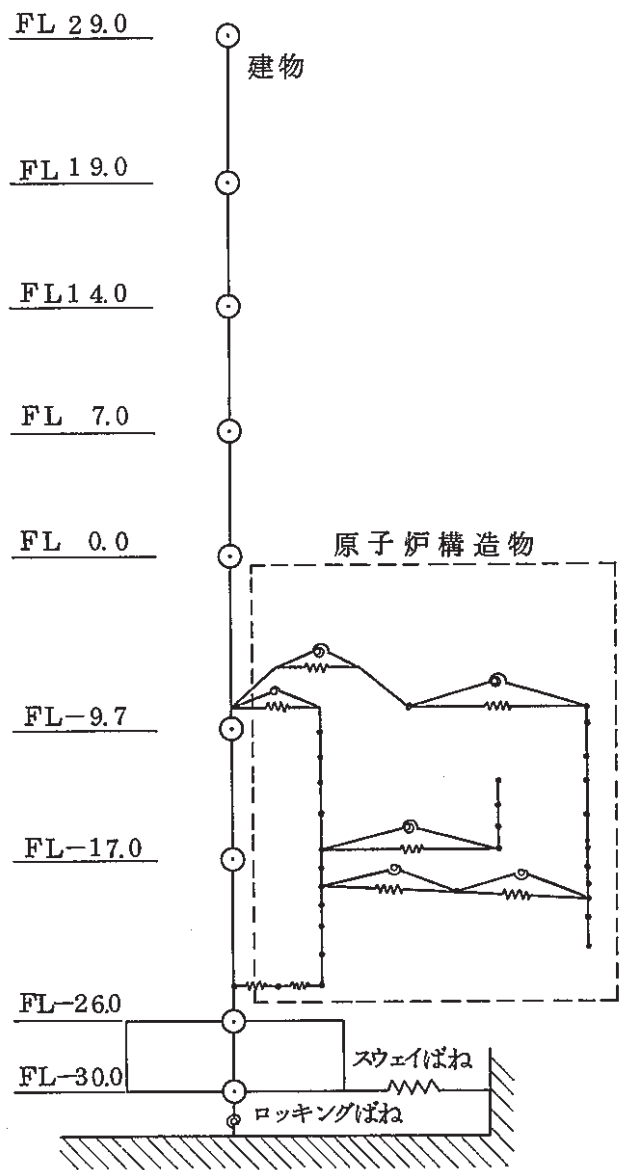


図 4 - 1 地盤 - 建物 - 原子炉構造連成モデル

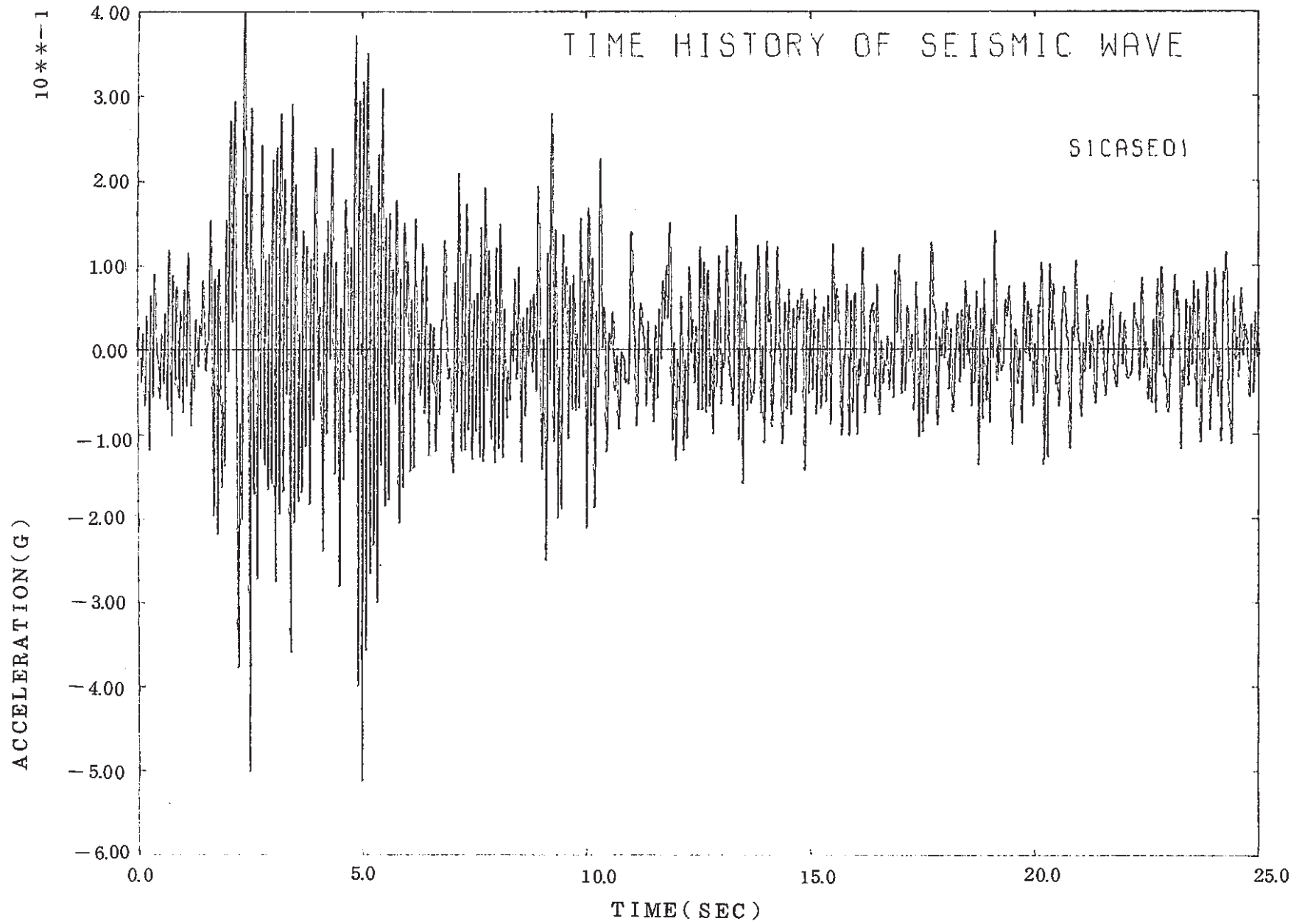


図4-2 炉心支持板の加速度応答時刻歴 (S1)

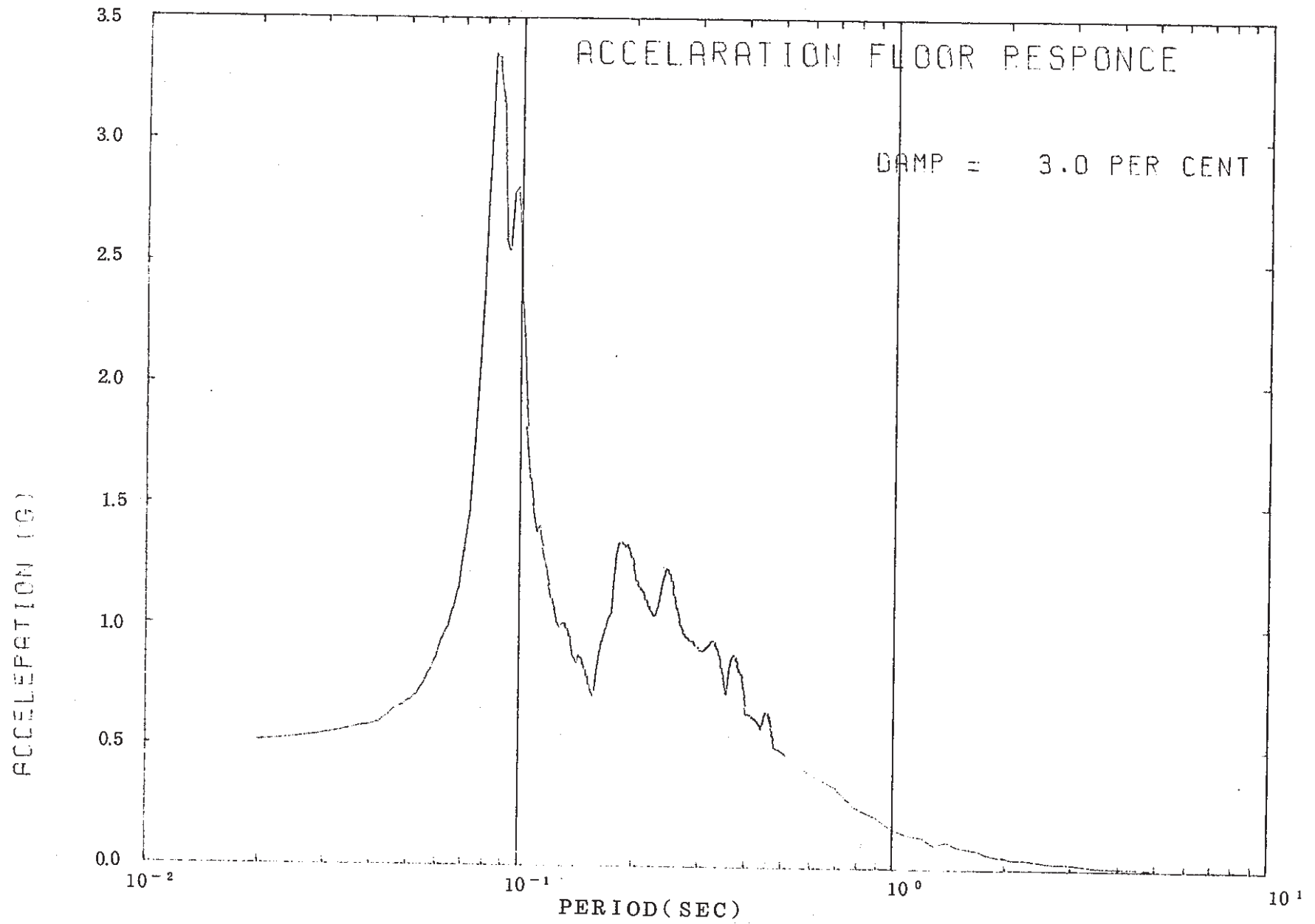
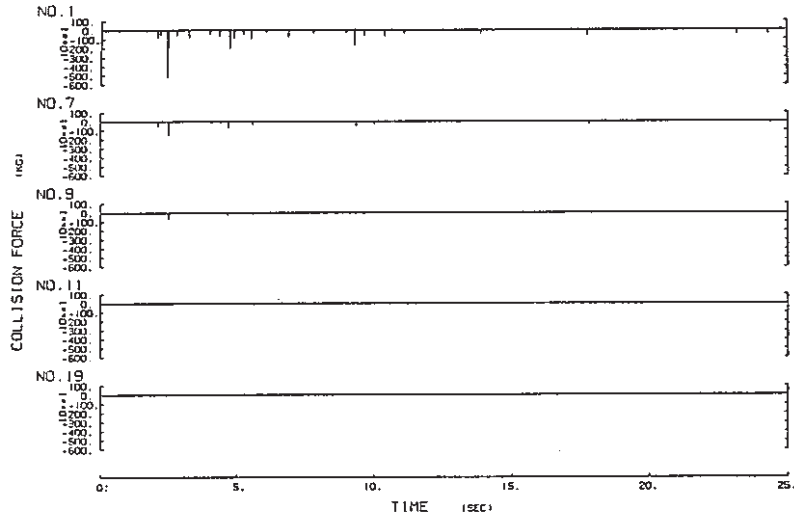
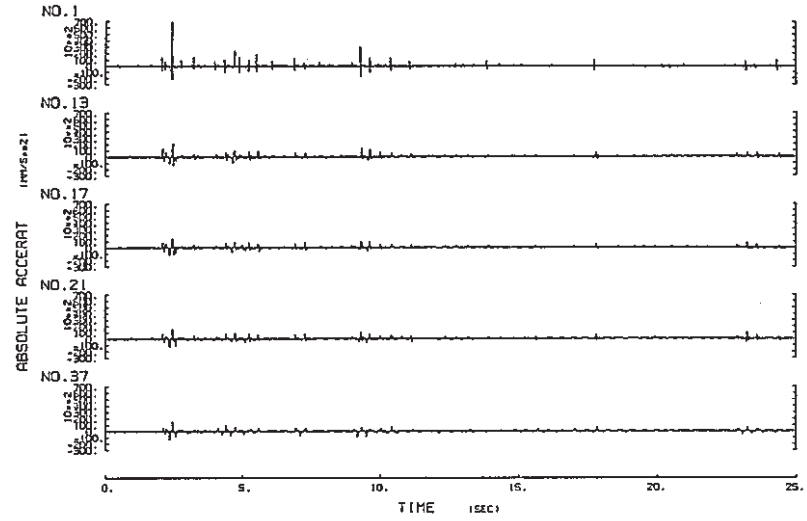


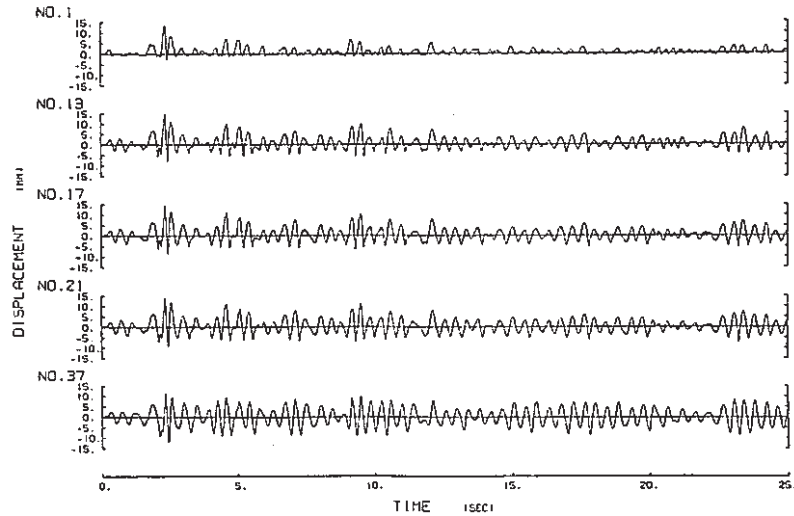
図 4 - 3 炉心支持板の応答スペクトル



(d) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (S1波)

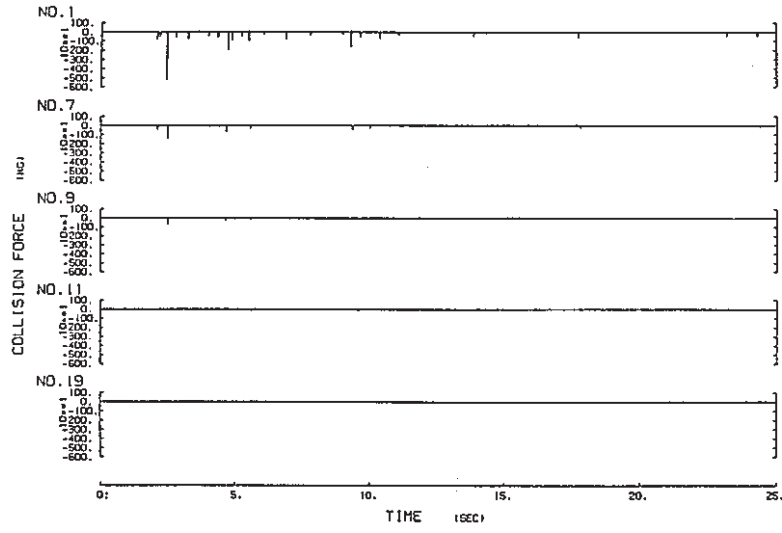


(f) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (S1波)

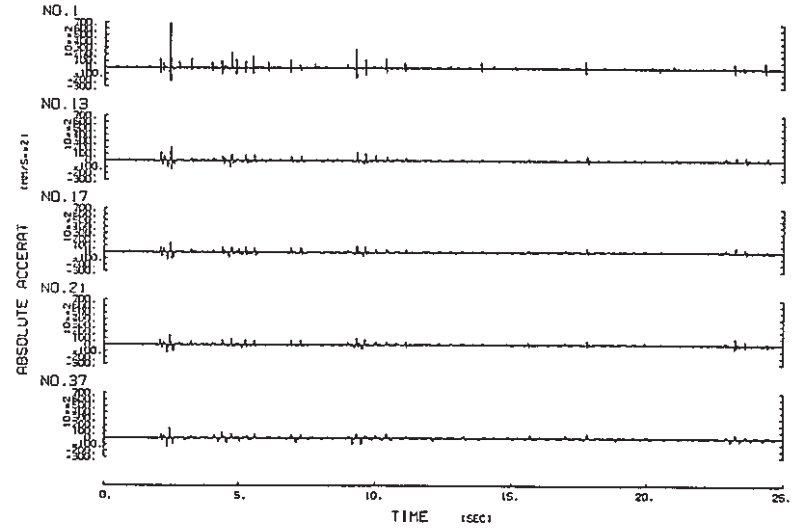


(e) 集合体中間部の変位の時刻歴 (S1波)

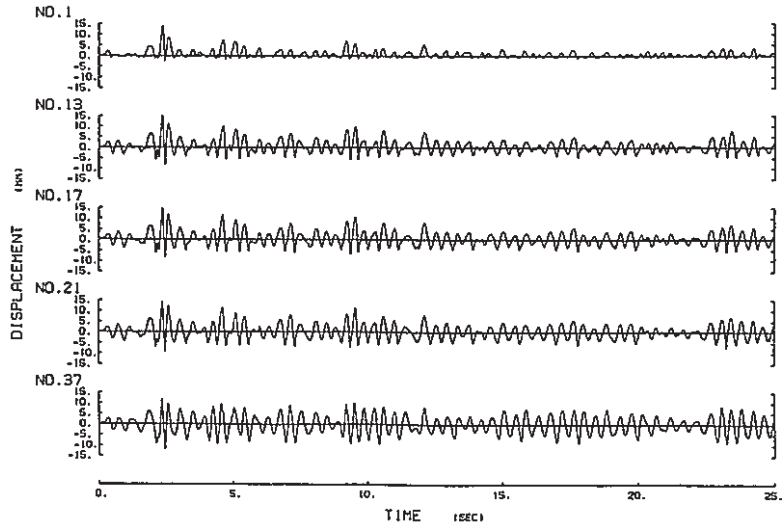
図4-4 地震応答 (S1、基本ケース)



(d) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (S1波)

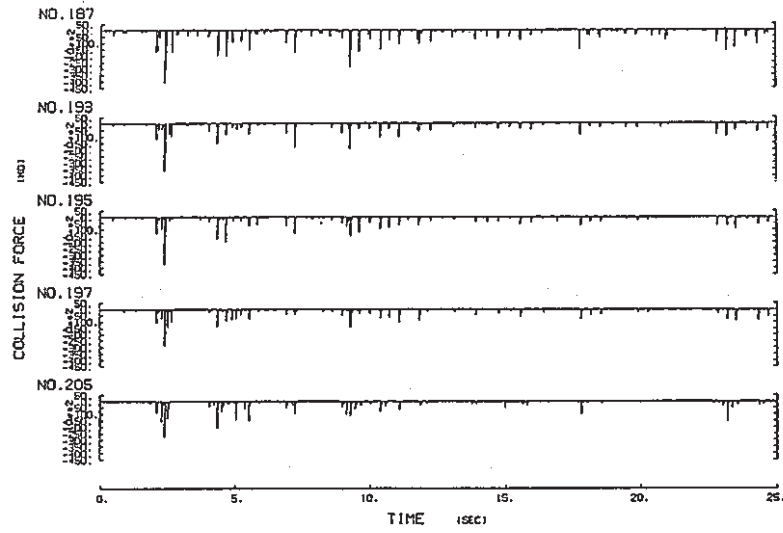


(f) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (S1波)

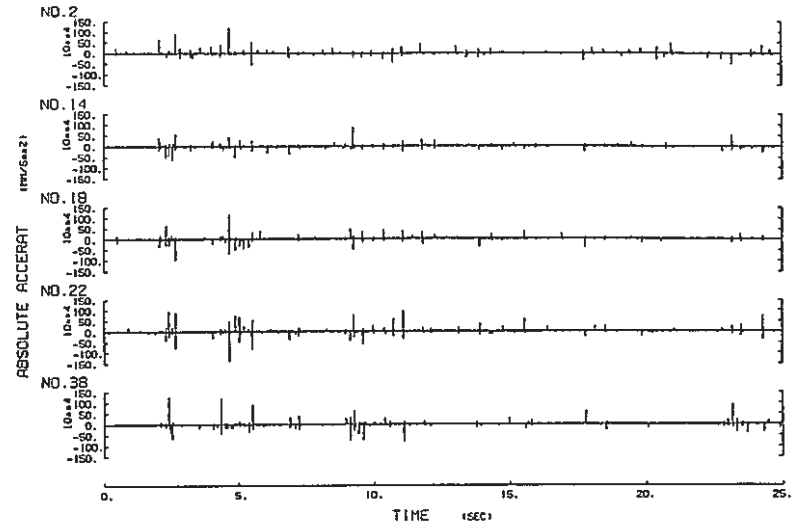


(e) 集合体中間部の変位の時刻歴 (S1波)

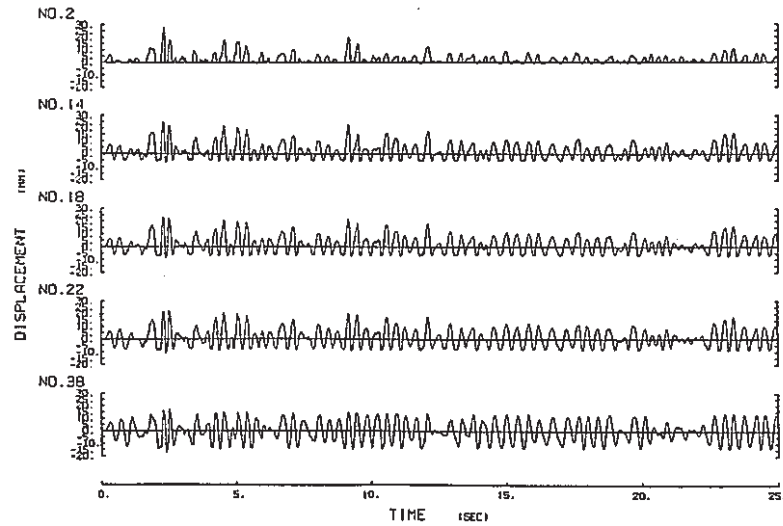
図4-4 (続) 地震応答 (S1、基本ケース)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (S 2 波)

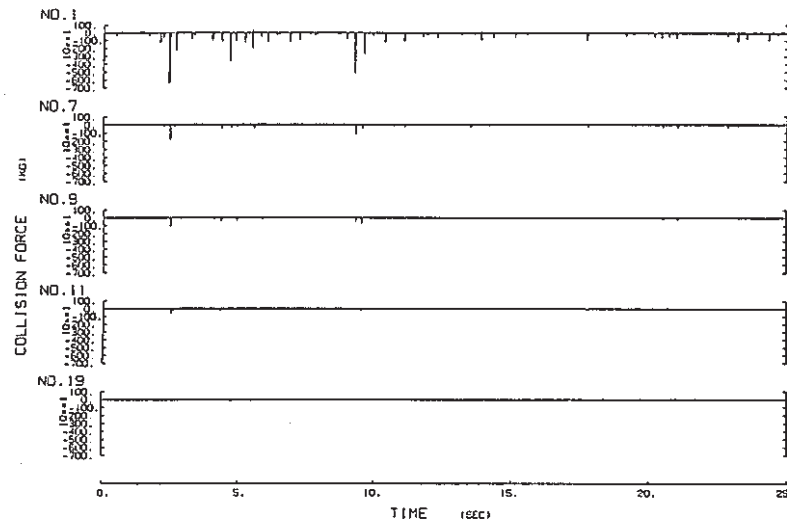


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (S 2 波)

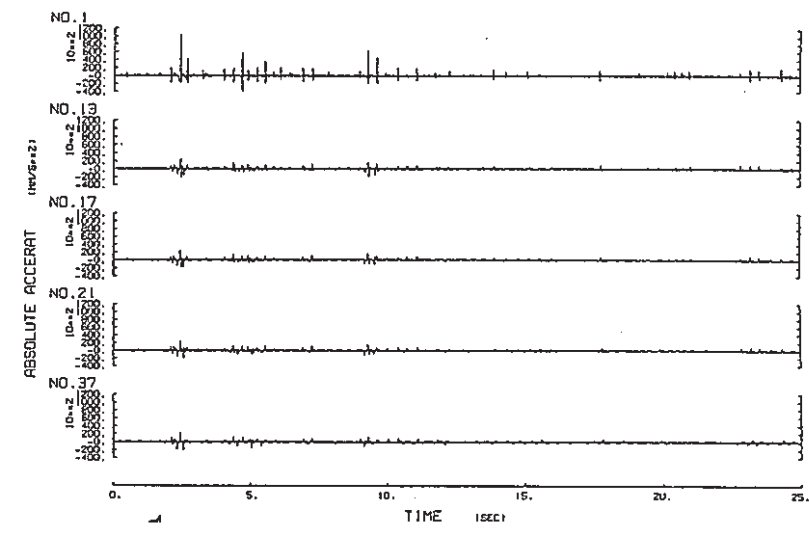


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (S 2 波)

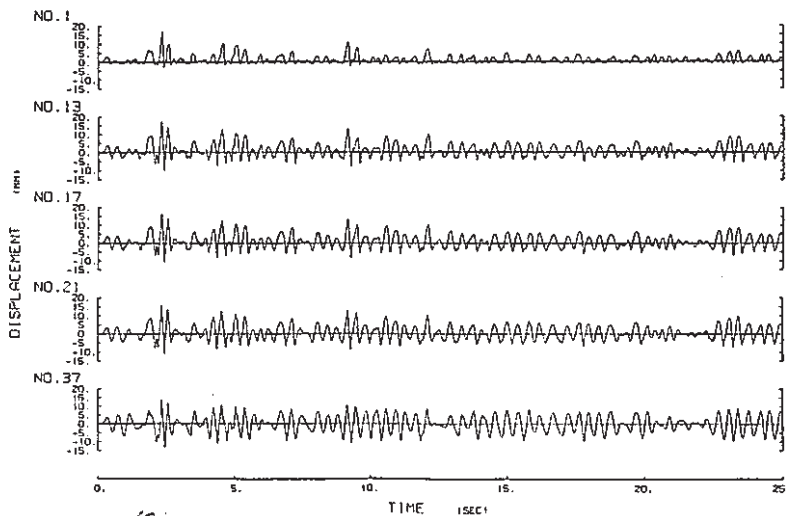
図 4 - 5 地震応答 (S 2 、基本ケース)



(d) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (S 2 波)



(f) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (S 2 波)



(e) 集合体中間部の変位の時刻歴 (S 2 波)

図 4 - 5 (続) 地震応答 (S 2、基本ケース)

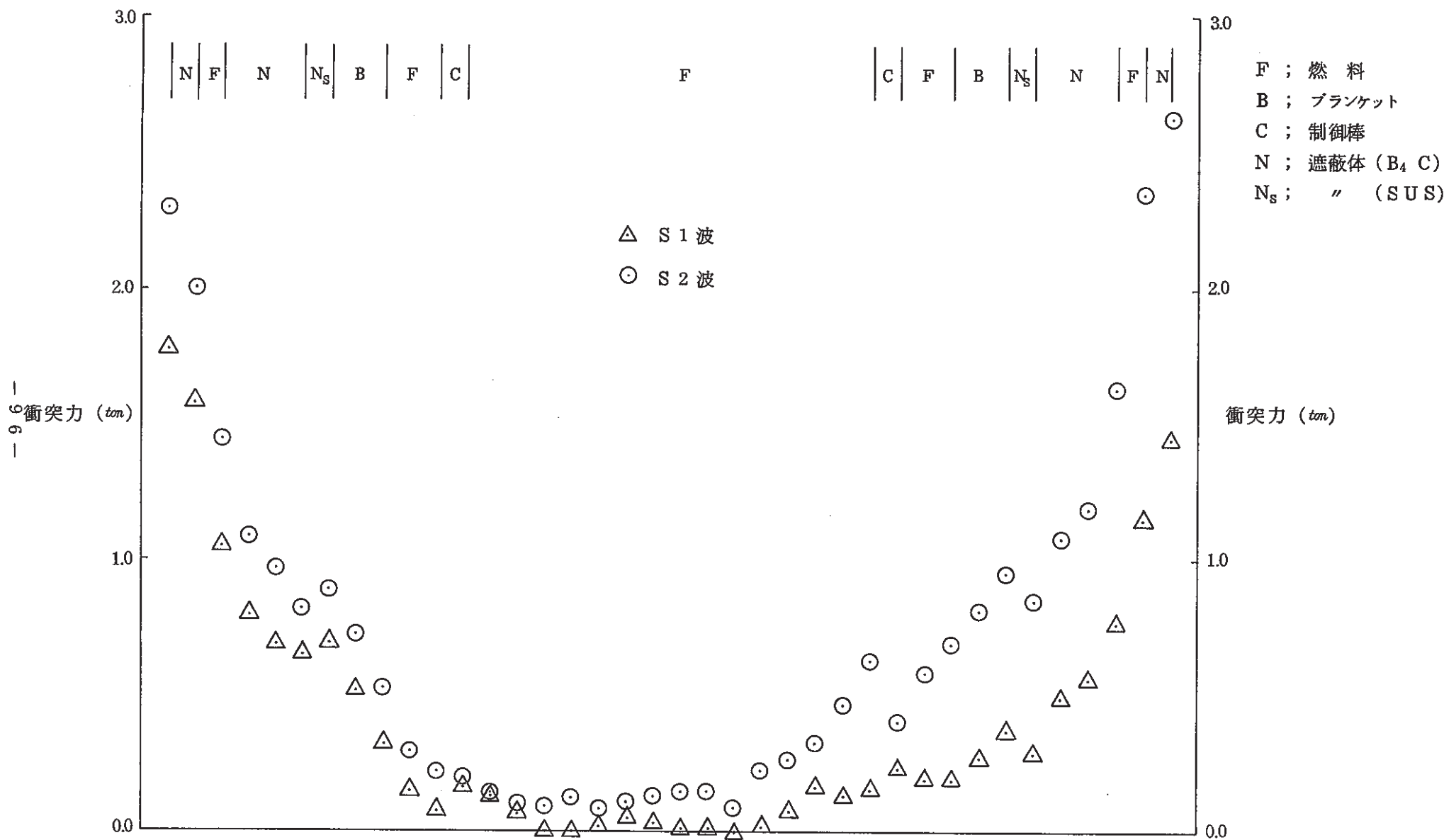


図4-6 中間パッドの最大衝突力の径方向分布 (基本ケース)

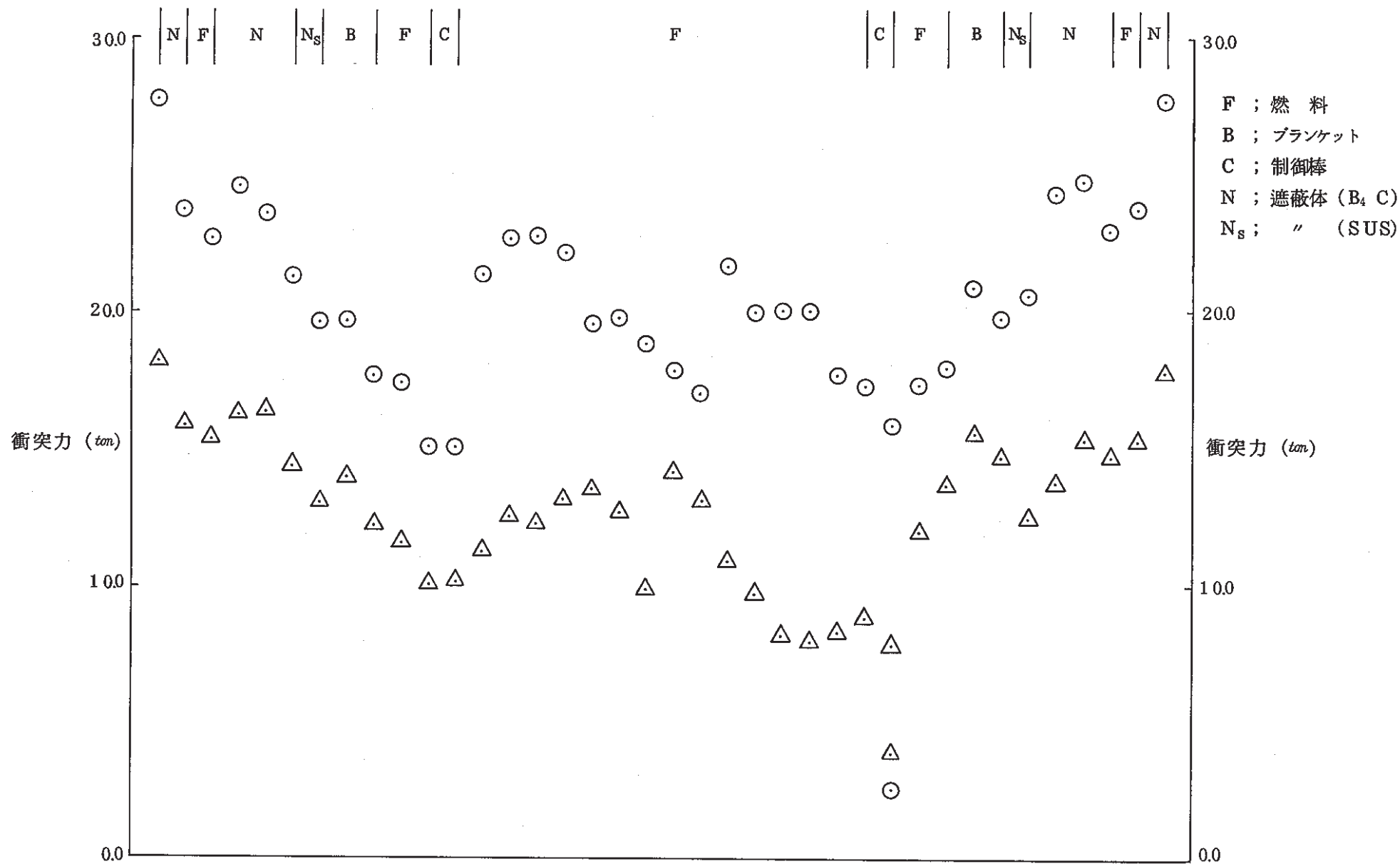


図 4-7 頂部パッドの最大冲击力の径方向分布 (基本ケース)

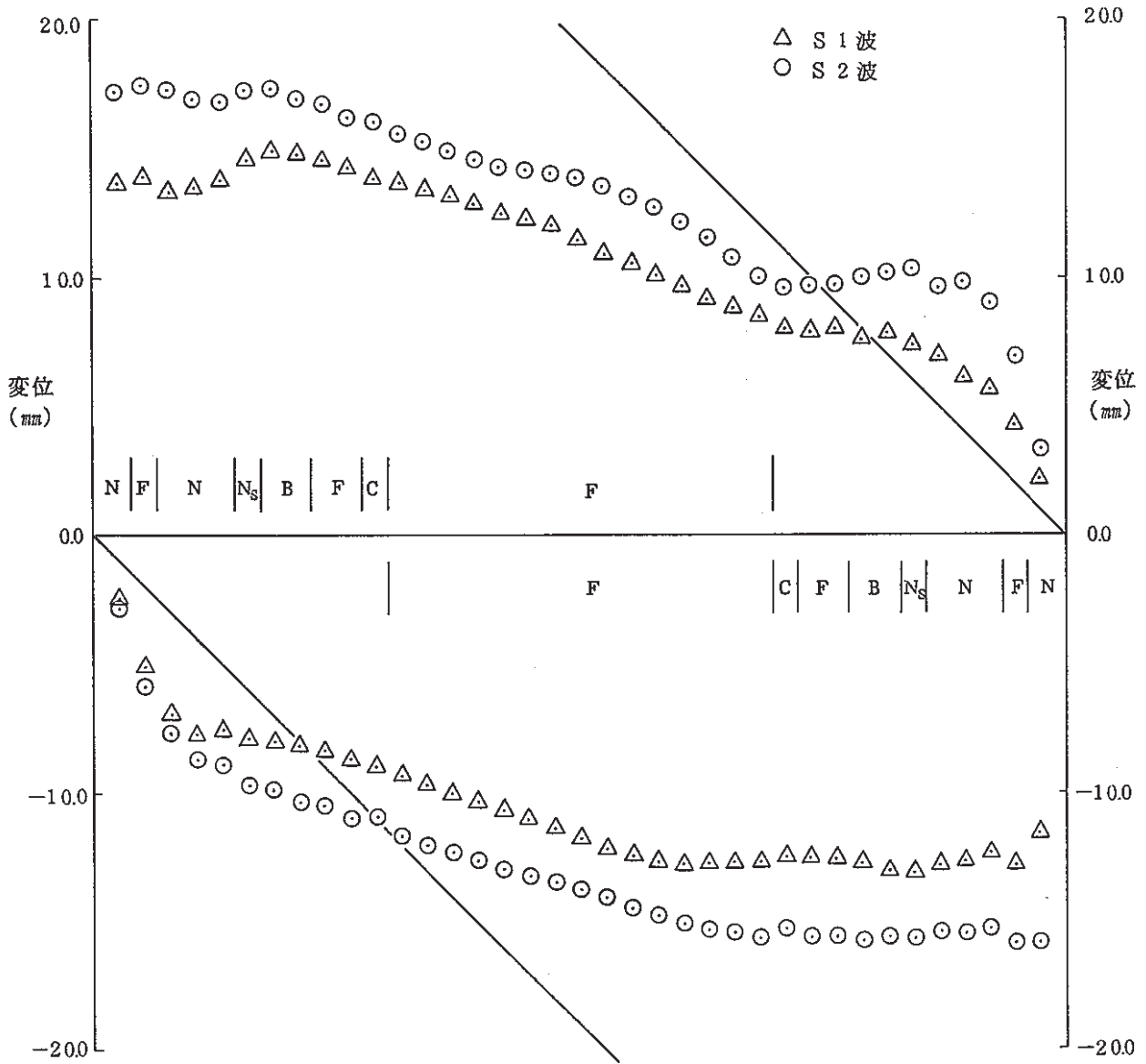


図 4 - 8 中間パッドの最大変位の径方向分布 (基本ケース)

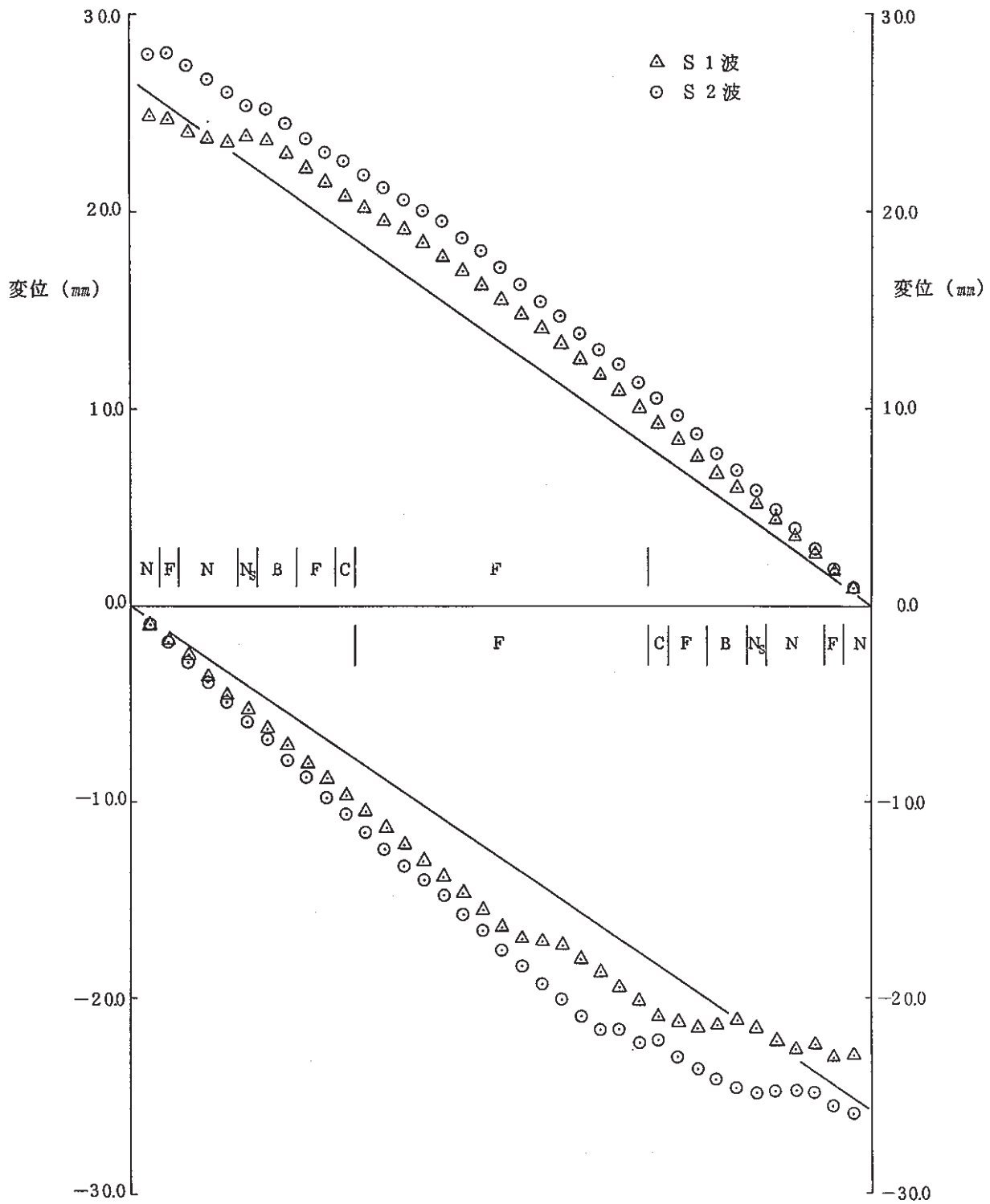
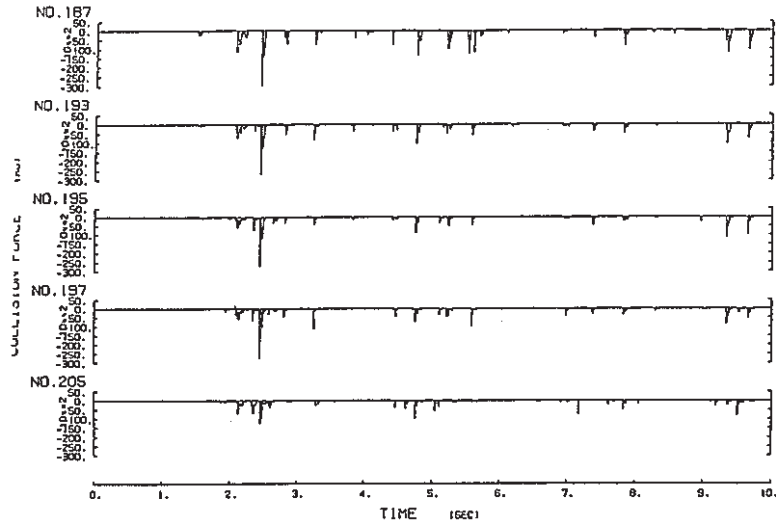
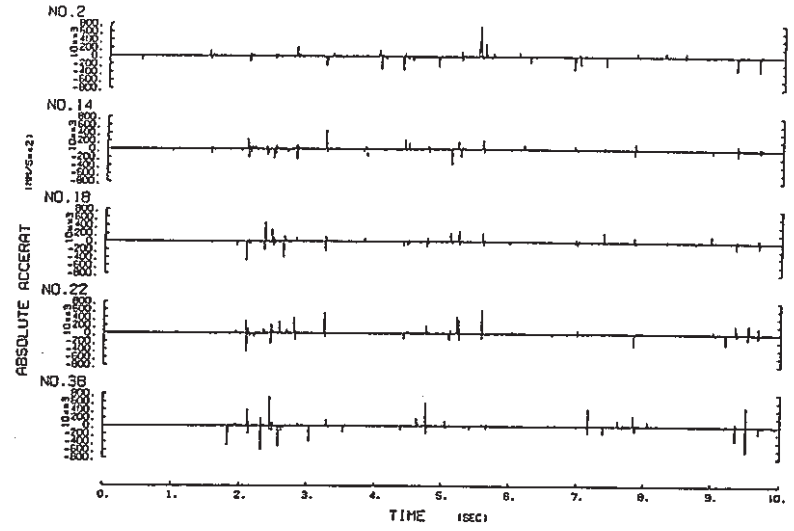


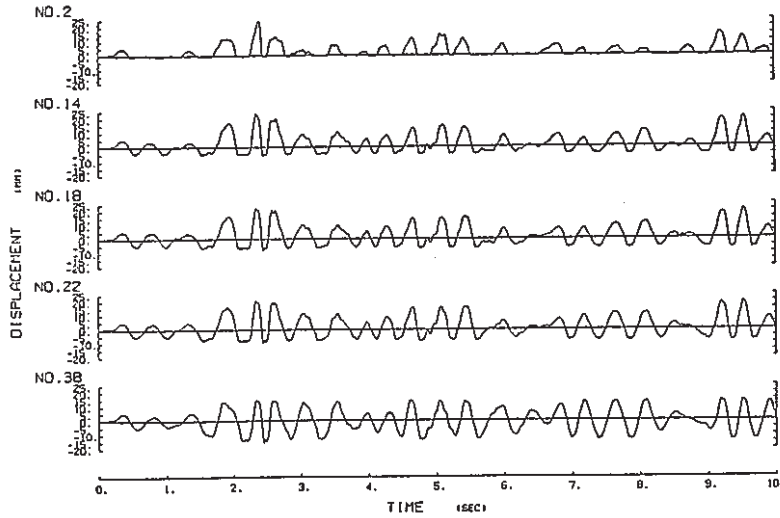
図 4 - 9 頂部パッドの最大変位の径方向分布 (基本ケース)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (S 1 波)

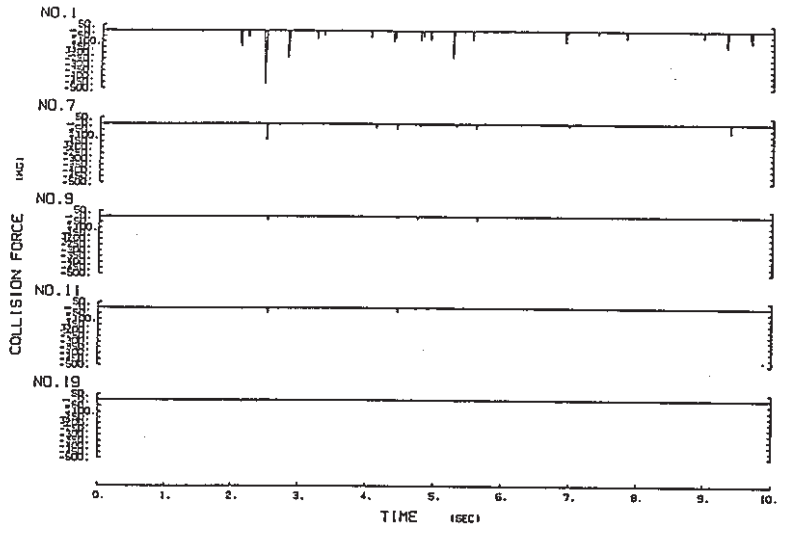


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (S 1 波)

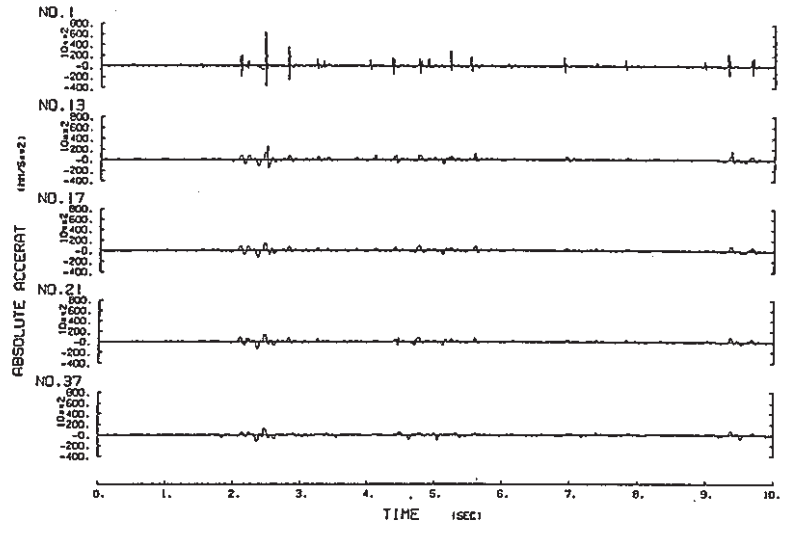


(b) 集合体頂部の変位の時刻歴 (S 1 波)

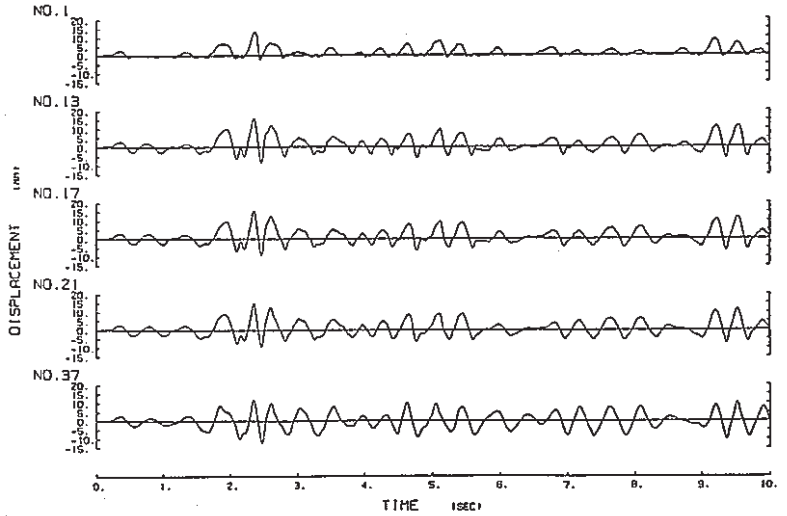
図 4 - 10 地震応答 (S 1 、 t = 3 mm)



(d) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (S1波)



(f) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (S1波)



(e) 集合体中間部の変位の時刻歴 (S1波)

図4-10(続) 地震応答 (S1、t = 3mm)

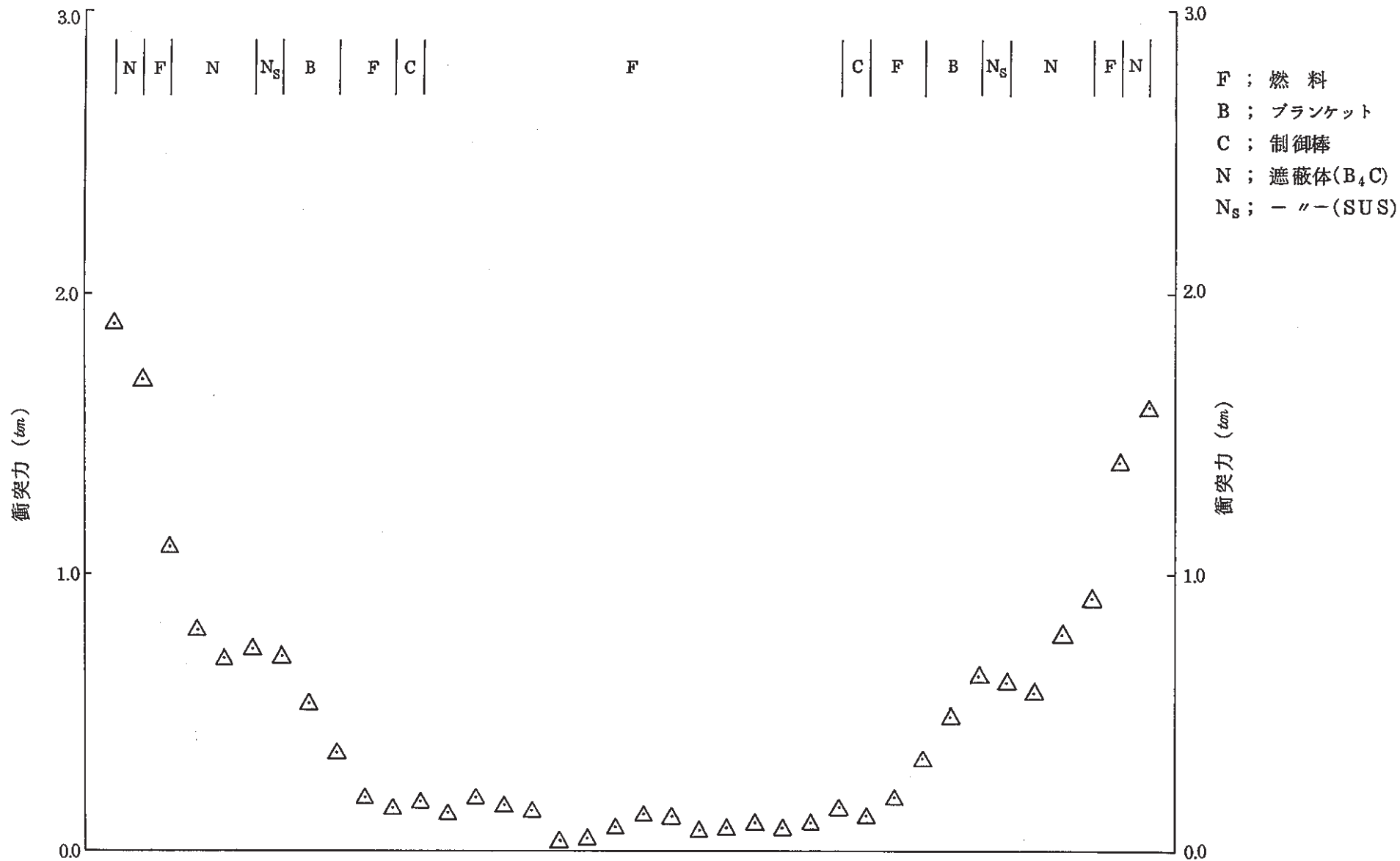


図4-11 中間パッドの最大衝突力の径方向分布
(t = 3.0 mm、S 1 波 0 ~ 10sec)

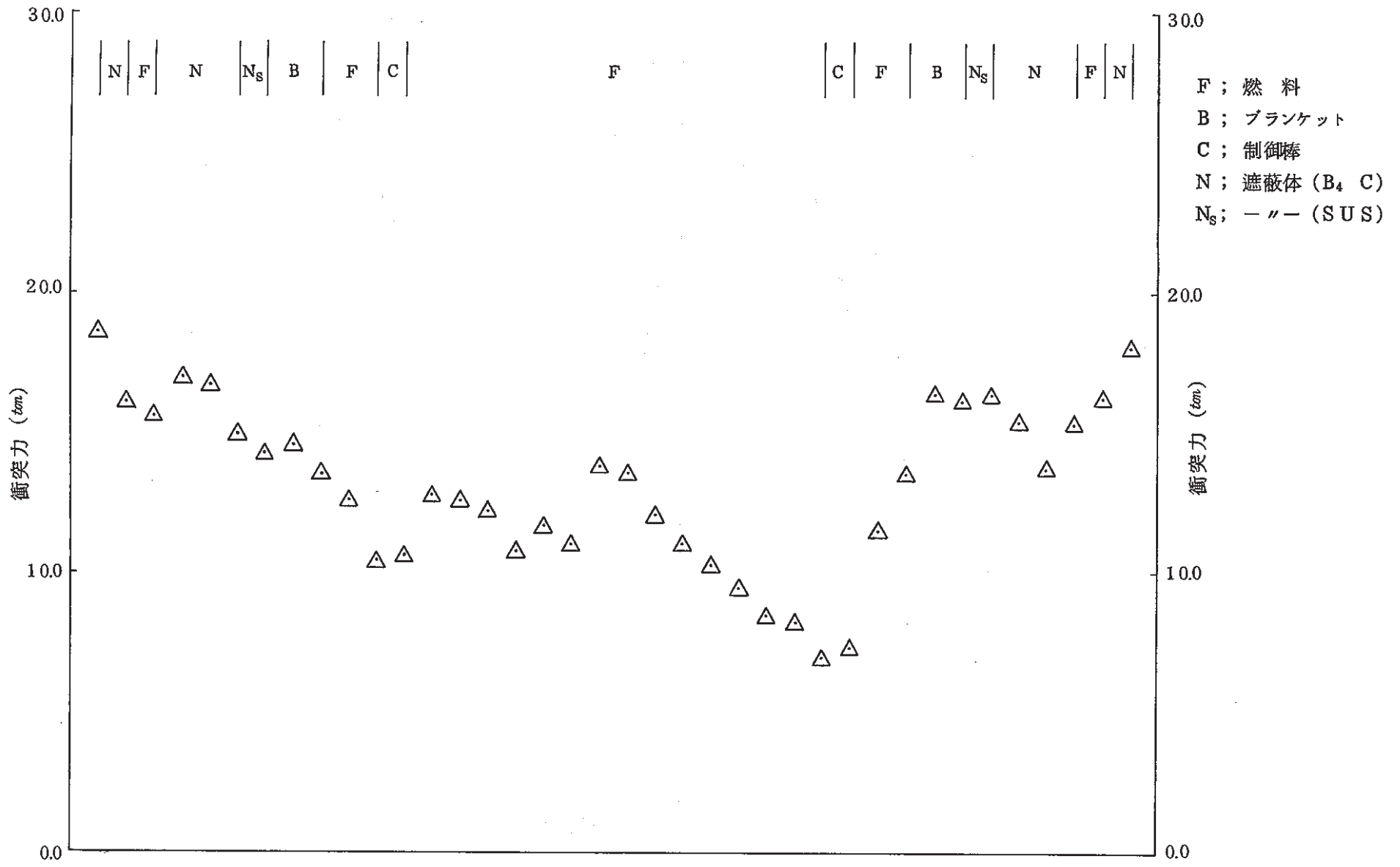


図 4 - 12 中間パッドの最大衝突力の径方向分布
 (t = 3.0 mm、S 1 波 0 ~ 10sec)

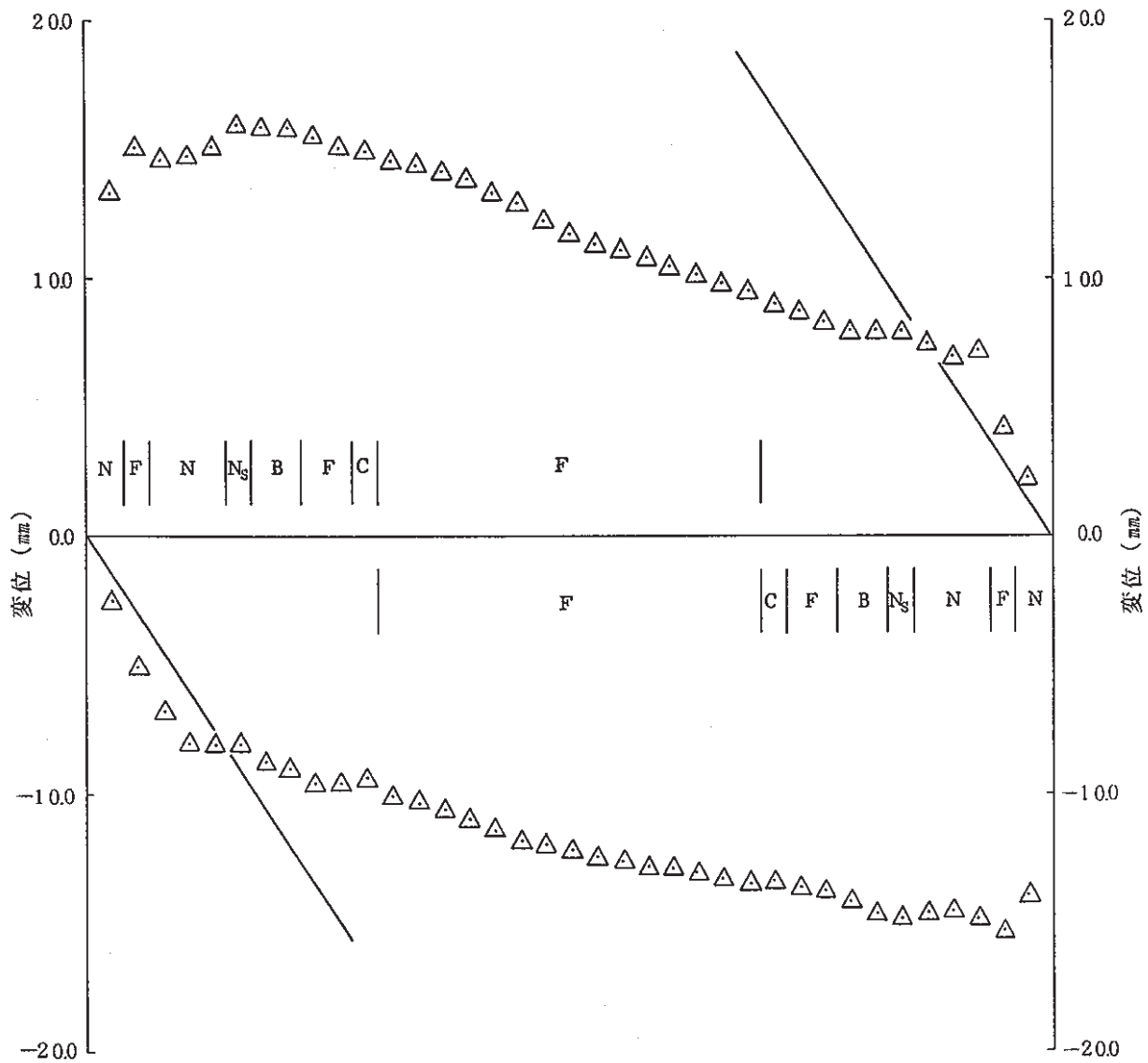


図 4 - 13 中間パッドの最大変位の径方向分布
 ($t = 3.0 \text{ mm}$ 、S 1 波、0 ~ 10 sec)

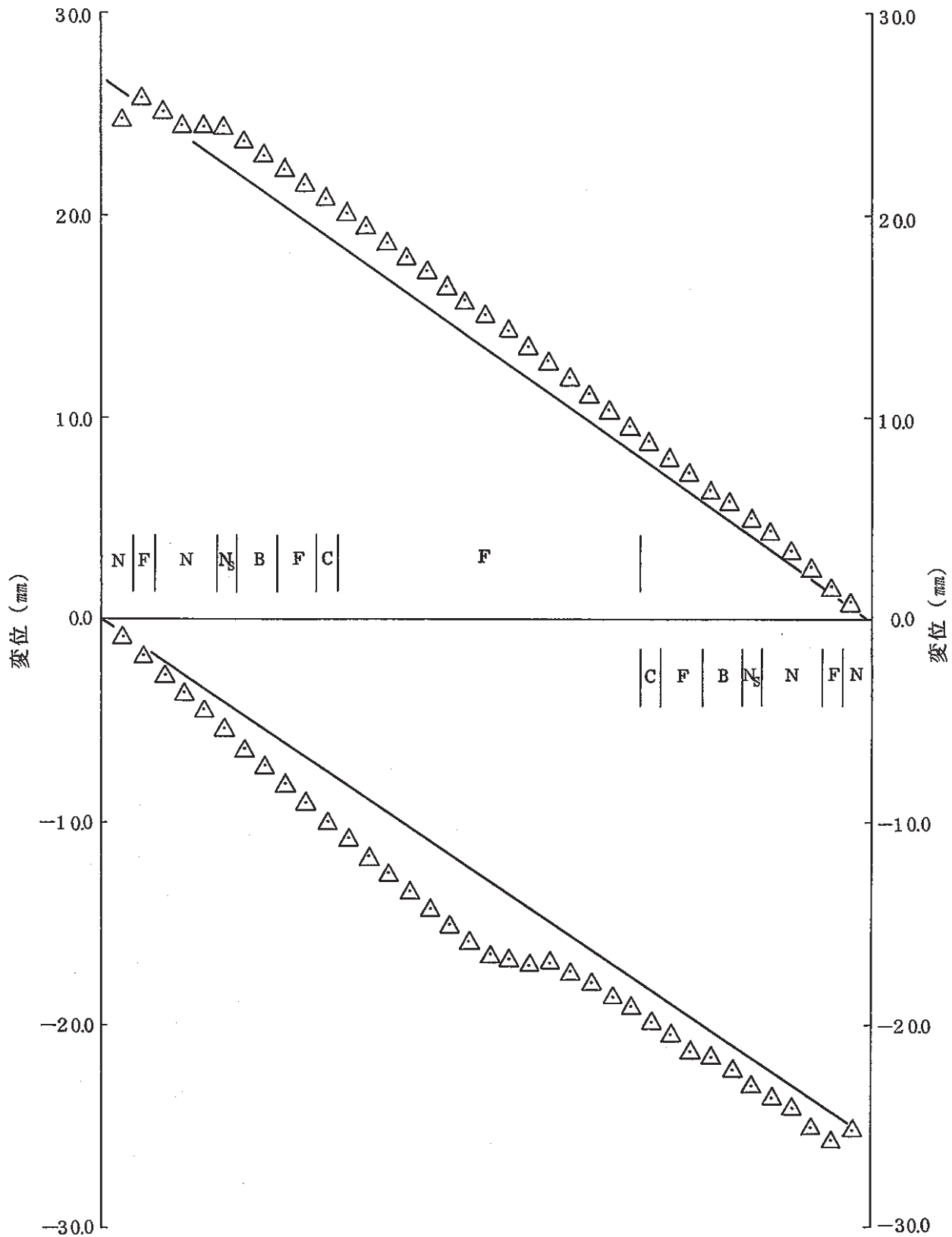
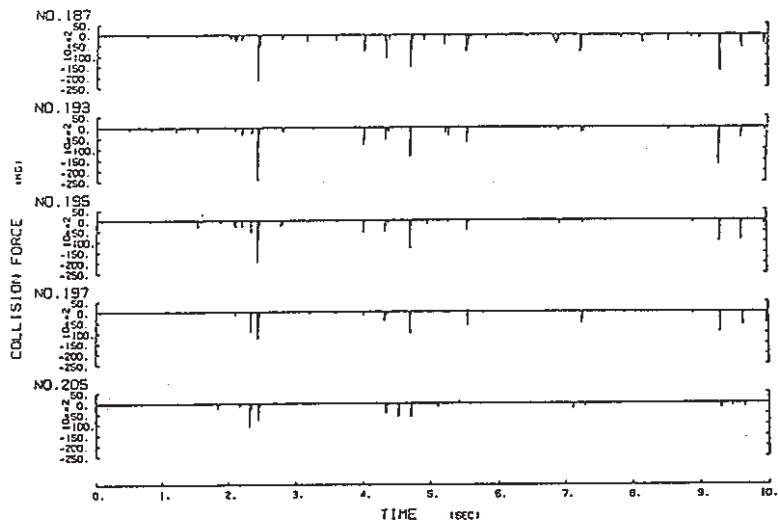
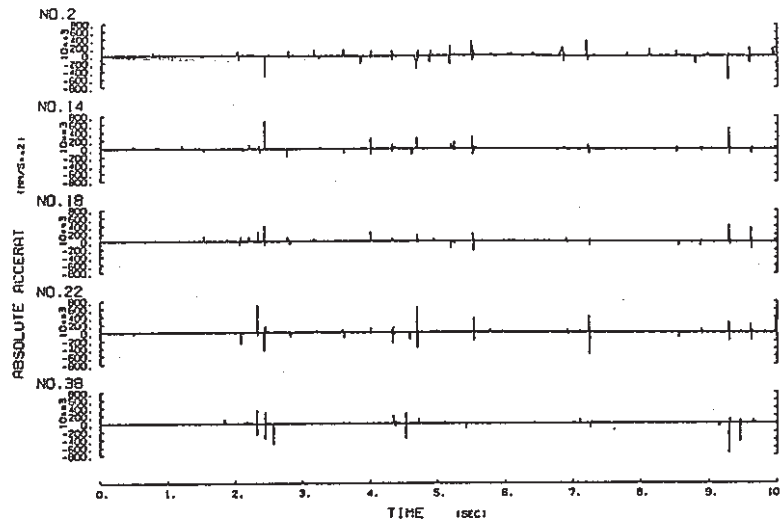


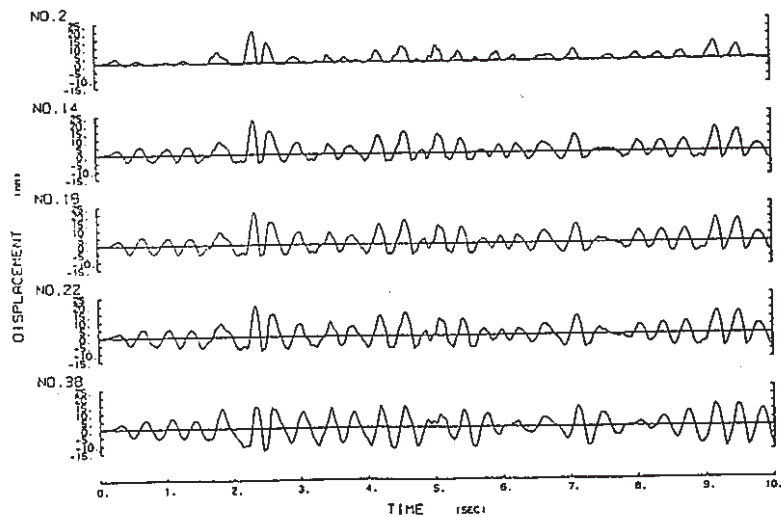
図4-14 頂部パッドの最大変位の径方向分布
($t = 3.0$ mm、S 1 波、0 ~ 10 sec)



(a) 集合体頂部の衝突力の時刻歴 (S 1 波)

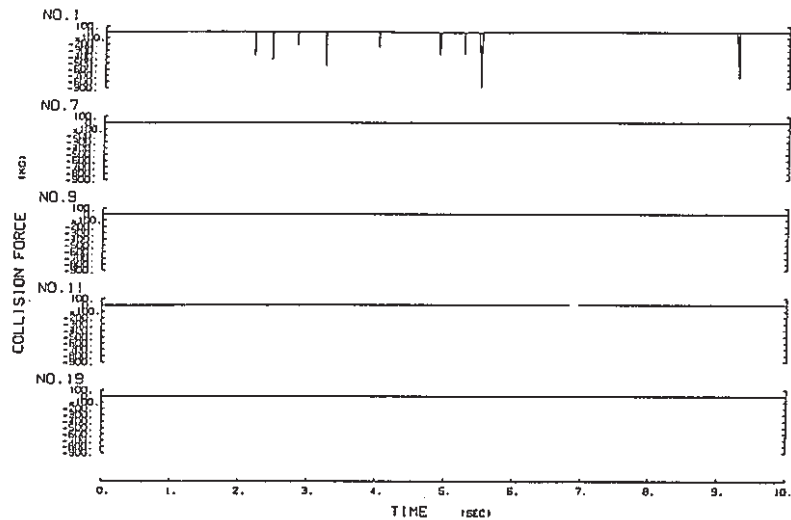


(c) 集合体頂部の加速度の時刻歴 (S 1 波)

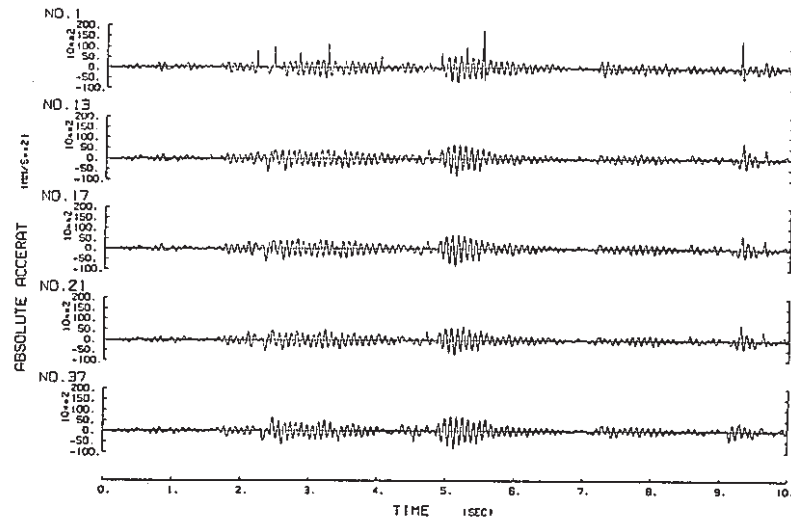


(b) 集合体頂部の変位の時間歴 (S 1 波)

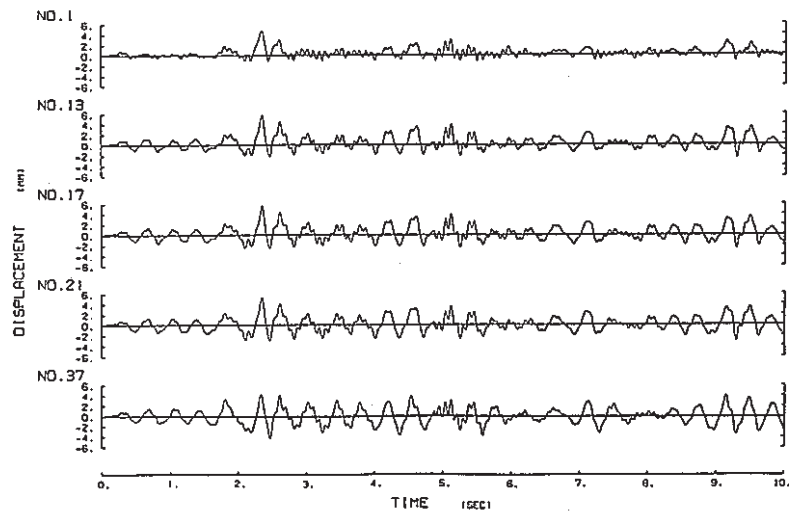
図 4 - 15 地震応答 (S 1、中間パッド位置1500mm)



(d) 集合体中間部の衝突力の時刻歴 (S1波)



(f) 集合体中間部の加速度の時刻歴 (S1波)



(e) 集合体中間部の変位の時刻歴 (S1波)

図4-15(続) 地震応答 (S1、中間パッド位置1500mm)

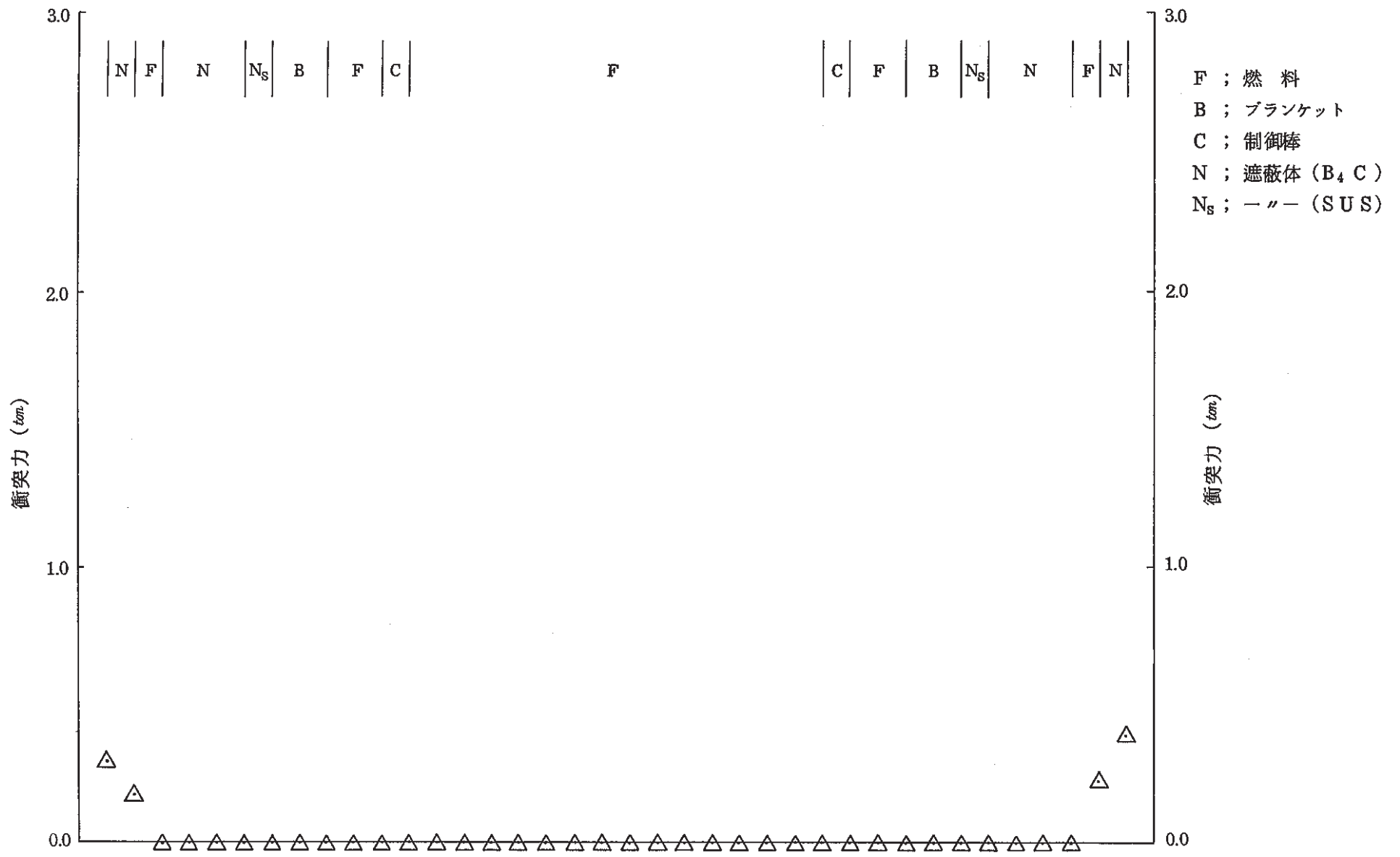


図 4-16 中間パッドの最大衝突力の径方向分布
(中間パッド位置1500mm、S1波0～10sec)

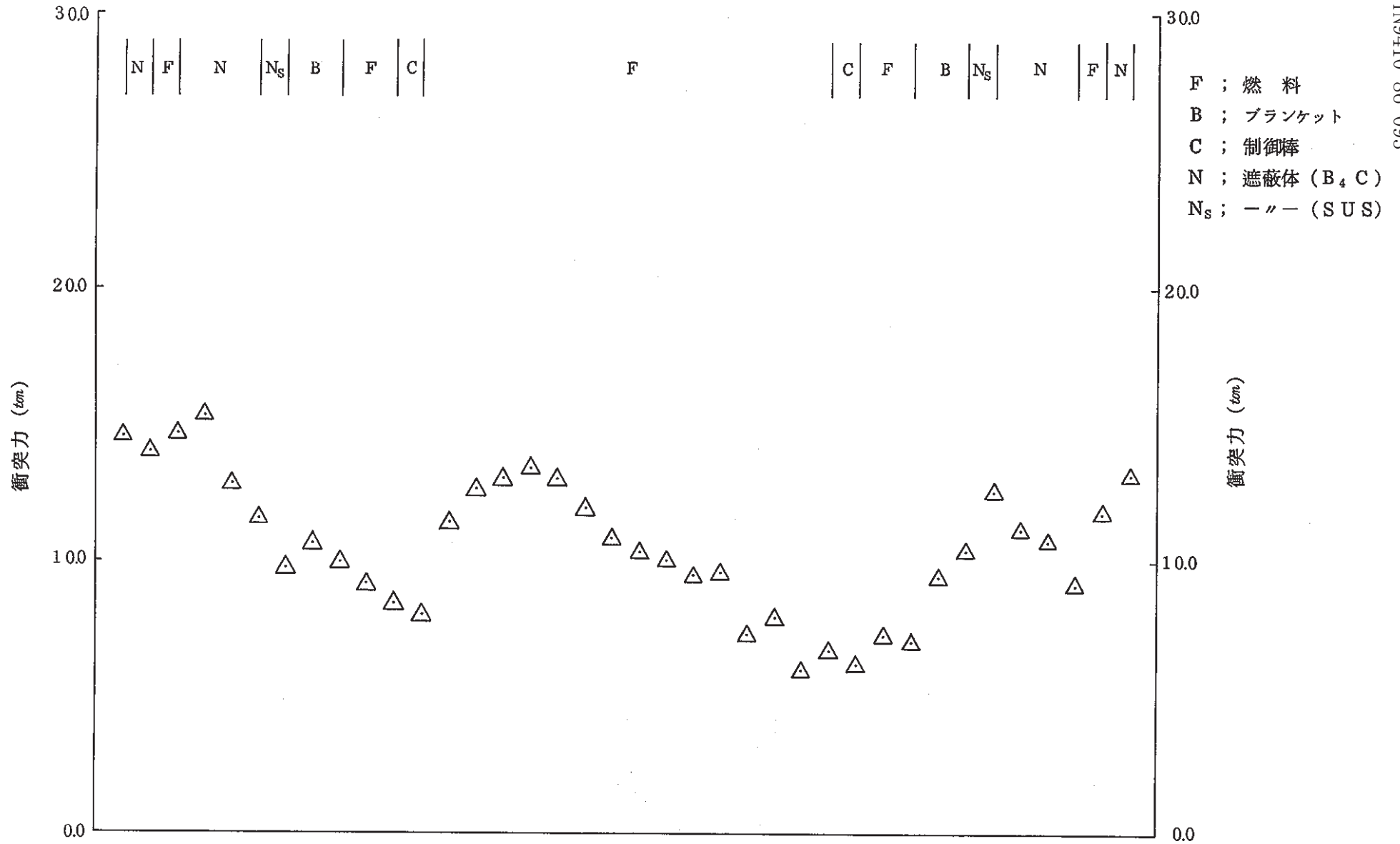


図4-17 頂部パッドの最大衝突力の径方向分布
 (中間パッド位置1500mm、S1波0~10sec)

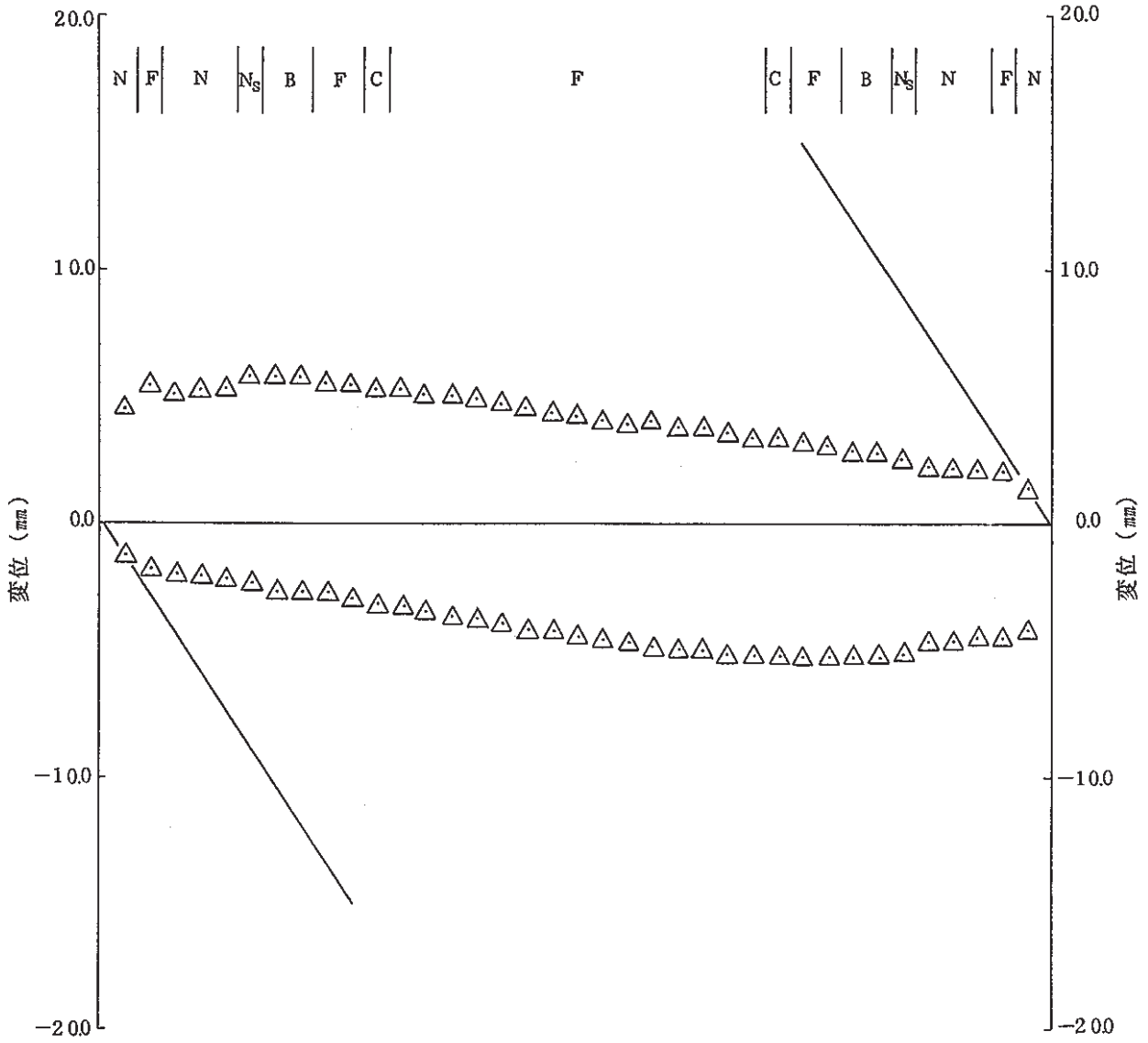


図4-18 中間パッドの最大変位の径方向分布
 (中間パッド位置1500mm、S 1波、0~10 sec)

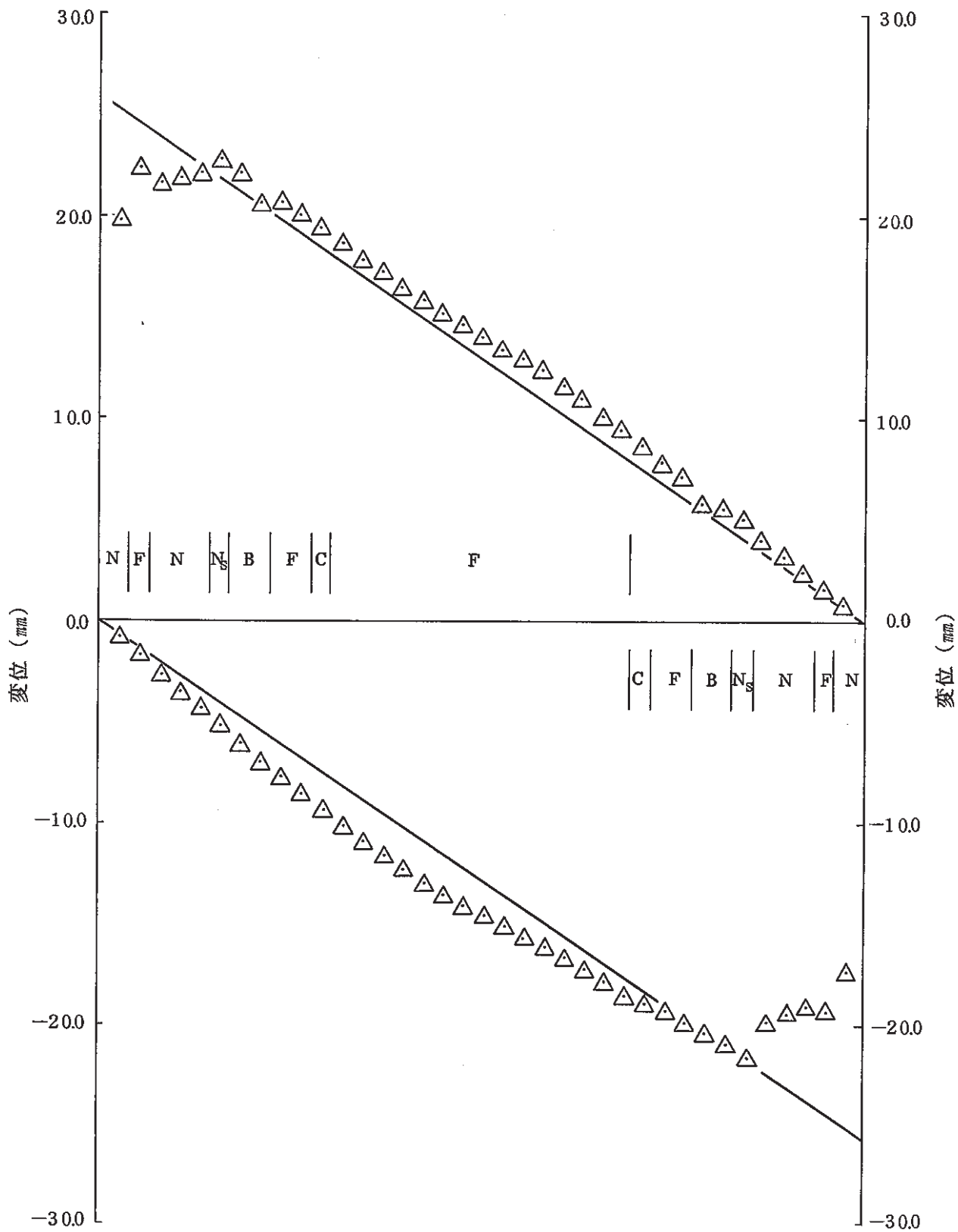


図4-19 頂部パッドの最大変位の径方向分布
 (中間パッド位置1500mm、S 1波、0~10 sec)

5. 炉心構成要素の耐震性評価

前章の群振動解析によって得られた各炉心構成要素のS1及びS2地震時の変位応答と衝突力に基づいて代表的要素に生じる地震応力を算定し、構造健全性の観点から大型炉炉心の耐震性を検討した。ただし、地震以外の荷重との組み合わせはここで考慮してしない。また、本検討では応力評価のみを行っており、最終的な耐震性の評価は、要素技術設計研究(Ⅱ)で別途実施されている制御棒挿入性の検討、地震時の反応度変化の検討結果と合わせ、総合的な見地から行われるべきものである。

5.1 評価方法

(1) 炉心構成要素の耐震重要度分類

もんじゅの耐震設計基準⁽¹⁵⁾において、制御棒及び制御棒案内管が「原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための設備及び原子炉の停止状態を維持する設備」としてAsクラスに分類されている。また、もんじゅ燃料集合体の構造設計方針(案)⁽¹⁶⁾においては燃料集合体及びブランケット集合体集合体のラップ管が、「S2地震時に制御棒の挿入が阻害されないことの確認を行うものとする」としてAsクラスに分類されている。

大型炉においてもこのような考え方が大巾に変わることは想定しにくいので、本検討においても燃料集合体、ブランケット集合体、及び制御棒は耐震Asクラスに分類されるものとした。また、前述のもんじゅの基準類では中性子遮蔽体等の耐震重要度分類について明記されていないが、ここでは簡単のためにAsクラスとし取扱うこととした。

(2) 許容応力

もんじゅの燃料集合体設計方針(案)^{(16) (17)}に準拠して、地震時の群振動によって生じる曲げモーメントと衝突力による応力を1次応力として評価した。表5-1にラップ管の地震時許容限界を、図5-1～5-4にラップ管の構造材料として用いられるSUS 316 ST(一般部)及びSUS 316 CW(パッド部)の設計応力強さ S_m と設計引張強さ S_u ⁽¹⁷⁾を示す。評価部位は頂部パッド、中間パッド、及びラップ管下端の付根部とした。評価温度については検討の時点で設計解析データが揃っていなかったため、暫定的に付根部に対して400℃を、中間部及び頂部パッドに対して600℃の値を用いることとした。その結果1次膜+曲げ応力に対する許容応力は以下の値となった。

S1地震に対して、

- ・ 下端部 : 28.1 kg/mm² (SUS 316 ST, 400℃)
- ・ パッド部 : 37.5 kg/mm² (SUS 316 CW, 600℃)

S 2 地震に対して、

- ・ 下端部 : 49.4 kg/mm² (SUS 316 ST, 400 ℃)
- ・ パッド部 : 49.7 kg/mm² (SUS 316 CW, 600 ℃)

5.2 評価結果

(1) 基本ケース

S 1 地震時に各要素の評価部位（ラップ管下端部、中間パッド部、頂部パッド部）に発生する曲げモーメントと衝突力による応力と対応する許容値を表 5 - 2 に示す。いずれの場合も許容値に対して発生応力は十分低い値に押さえられており、地震時に炉心構成要素の健全性が損なわれることはないものと判断される。これは、半地下式建物の採用による地震力の低減効果が大きく寄与している。なお、前章に示したように衝突力は径方向に分布するので、中性子遮蔽体については最大周要素の値を、その他の要素については最も外側の燃料集合体（1 V S）の値を用いて応力評価を行っている。また、実際の設計では静的地震力 3.6 C₁ による応力評価も行われることになるが、通常はここで示した動的評価が静的評価を包絡するケースが多く、本検討では省略した。表 5 - 3 は S 2 地震時の衝突力による応力評価を示す。S 2 地震時の発生応力は S 1 地震時の 1.3 ~ 1.7 倍程度となっているが、最も厳しい最外周中性子遮蔽体においても発生応力は許容値の約 55% 程度であり、S 2 地震時においても炉心構成要素の健全性が損なわれることはない。なお、S 2 地震時の曲げモーメントによる応力評価は行っていないが、S 1 地震時に既に各要素に総片寄りモード（各要素が幾何学的に許容される上限まで変形する）となっており、従って S 2 地震時の応力は S 1 地震時とそれほど変わらないものと判断される。

(2) 追加ケース

群振動解析の結果から、ラップ管板厚を 3 mm とした場合でも、各要素の衝突力と変位応答は基本ケースとそれほど変わらないことが明らかとなっている。従って、パッド部の板厚は変えないことを仮定すると、衝突力による応力は基本ケースとほぼ等々になると考えて差しつかえないであろう。曲げモーメントによる応力は、各要素の変位応答が基本ケースと変わらないことを仮定すると断面係数の比、すなわち板厚の比だけ増加することになる。この場合、各要素の下端部の応力は基本ケースのほぼ 1.3 倍程度を見積もっておけばよいであろう。表 5 - 2 から、このような想定の下で、ラップ管板厚を 3 mm としても炉心構成要素の耐震健全性は十分満足されるものと予想される。

中間パッド位置を下端から 1500 mm とした場合は、群振動解析結果から変位応答、衝突力ともに基本ケースと比較して低減しているため、耐震成立性は明らかである。

表 5 - 1 燃料集合体外筒部の許容限界

荷重の組合せ	許 容 限 界	
	一 次 一 般 膜 応 力	一 次 膜 応 力 + 一 次 曲 げ 応 力
1. $I_L + S_1$	(注 1) $1.5 S_m$	左の1.5倍
2. $II_L + S_1$		
3. $III_L + S_1$		
1. $I_L + S_2$	$\min \left\{ 2.4 S_m, \frac{2}{3} S_u \right\}$	左の1.5倍
2. $II_L + S_2$		
3. $II_L + S_2$		

(注 1) 冷間加工材については、 $1.33 S_m$ とする。

記号の説明

- I_L : 運転状態 I において考慮する荷重
- II_L : 運転状態 II において考慮する事象のうち、地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重
- III_L : 運転状態 III において考慮する事象のうち、地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重
- S_1 : 基準地震動 S_1 による地震力
- S_2 : 基準地震動 S_2 による地震力
- S_m : 設計応力強さ
- S_u : 設計引張強さ

表 5 - 2 S 1 地震時の発生応力（膜 + 曲げ）と許容値

要素	荷重 評価 部位	曲げモーメント		衝突部	
		ラッパ管下端部	中間パッド部	中間パッド部	上部パッド部
燃料集合体		11.5 (28.1) *1	8.1 (37.5) *2	10.1 (37.5)	7.5 (37.5)
ブランケット集合体		11.5 (28.1)	9.4 (37.5)	10.1 (37.5)	7.5 (37.5)
制御棒		11.0 (28.1)	7.9 (37.5)	10.1 (37.5)	7.5 (37.5)
中性子遮蔽体		10.2 (28.1)	10.9 (37.5)	10.1 (37.5)	9.0 (37.5)

上段：発生応力

単位：kg / mm²

下段：許容値

- * 1 SUS 316 ST 400 ℃
- * 2 SUS 316 CW 600 ℃

表 5 - 3 S 2 地震時の発生応力（膜+曲げ）と許容値

要素	荷重 評価 部位	衝突部	
		中間パッド部	上部パッド部
燃料集合体		17.3 (49.7) *1	10.5 (49.7)
ブランケット集合体		17.3 (49.7)	10.5 (49.7)
制御棒		17.3 (49.7)	10.5 (49.7)
中性子遮蔽体		26.3 (49.7)	13.5 (49.7)

上段：発生応力 下段：許容値 単位：kg/mm²

* 1 SUS 316 CW 600 ℃

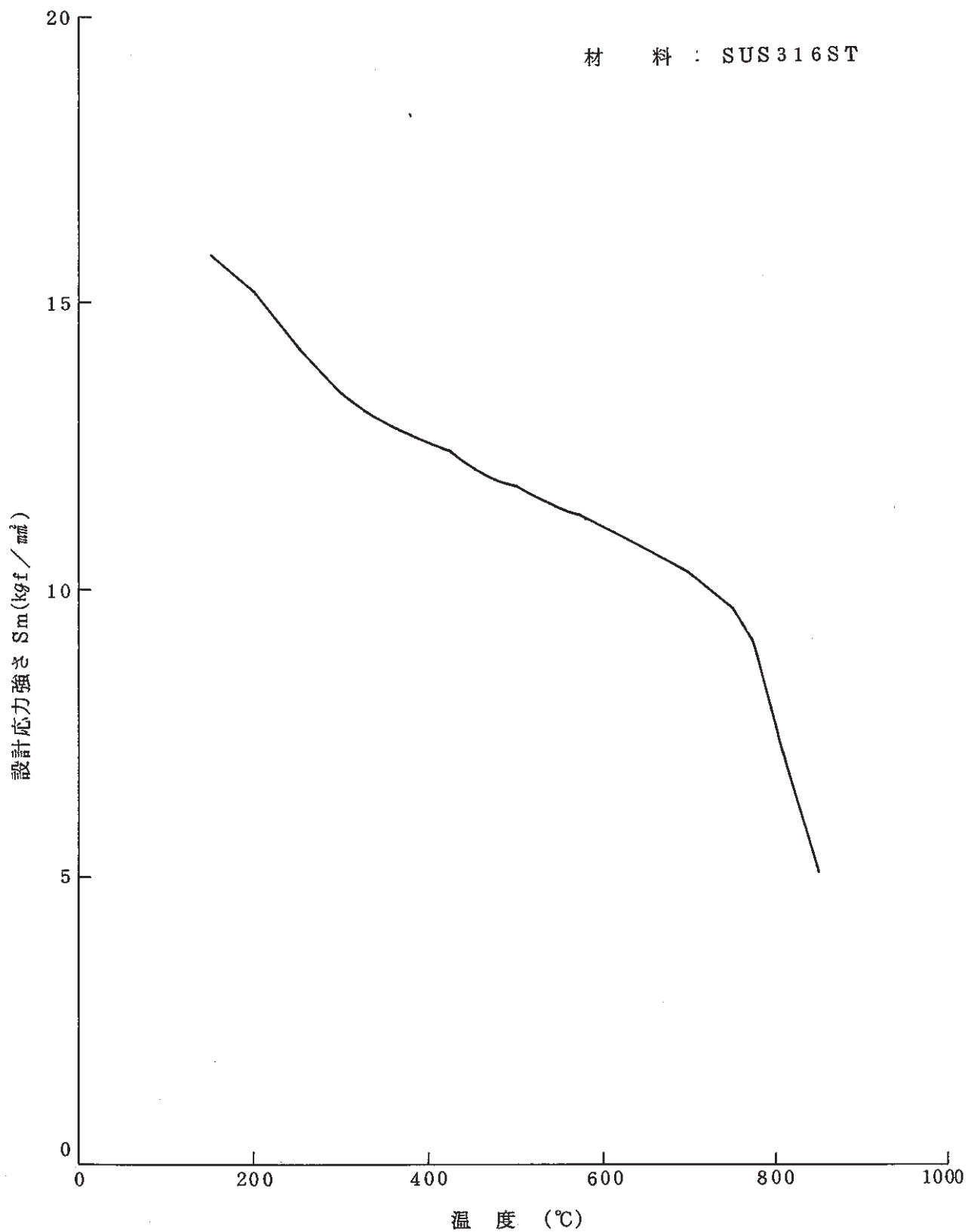


図5-1 SUS 316 STの設計応力強さ S_m

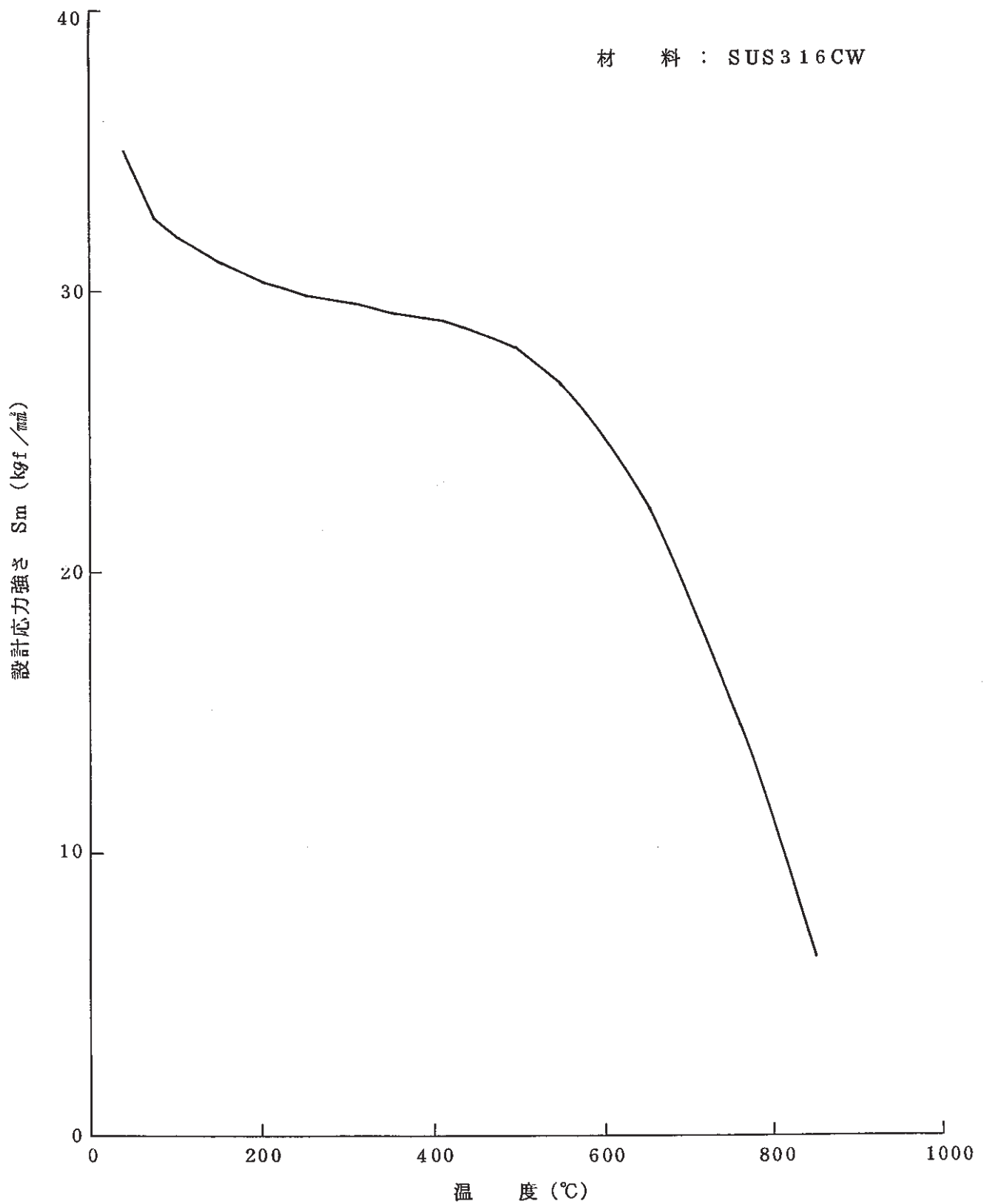


図 5 - 2 SUS 316 CWの設計応力強さ S_m

材 料 : SUS316ST

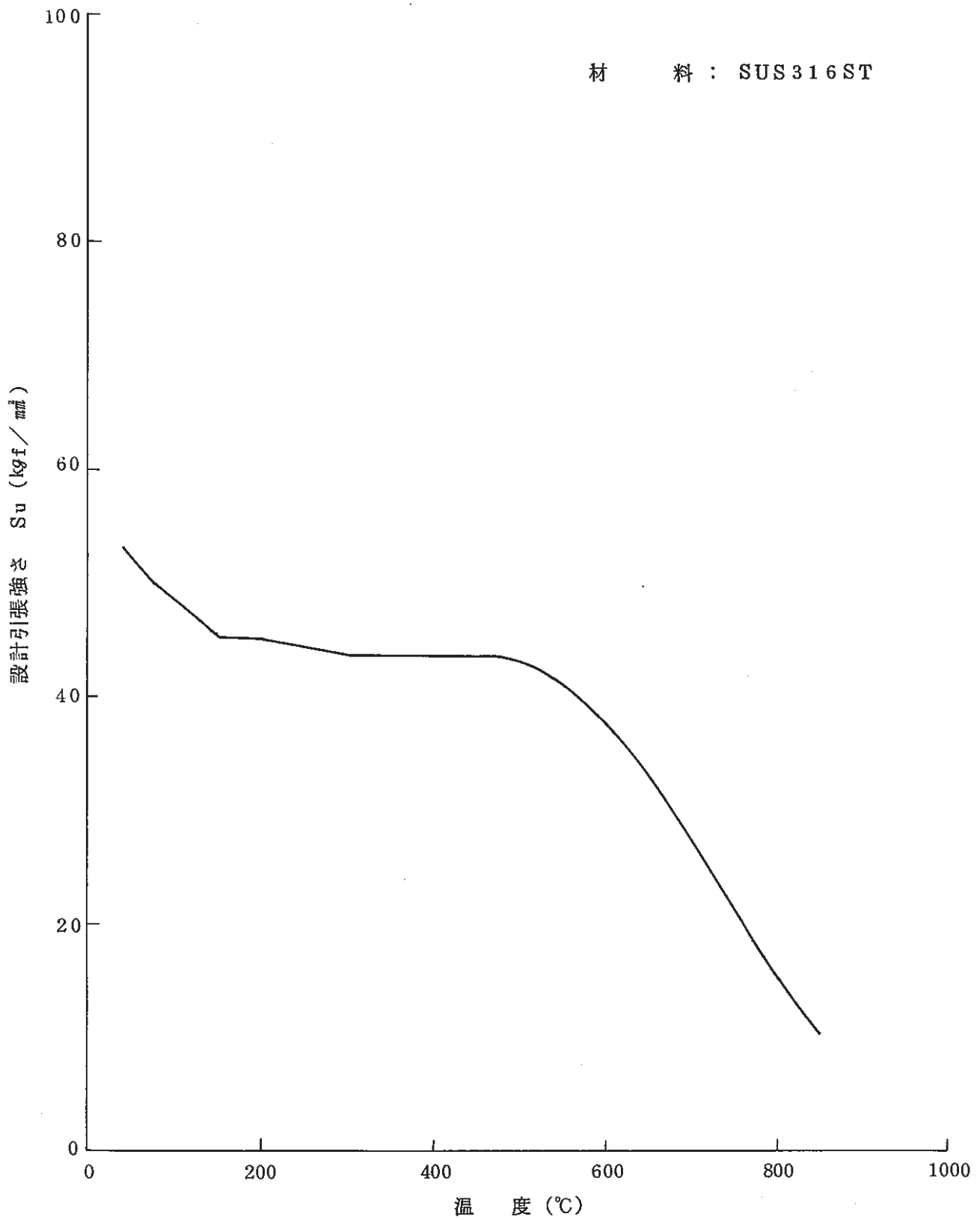


図 5 - 3 SUS 316 ST の設計引張強さ S_m

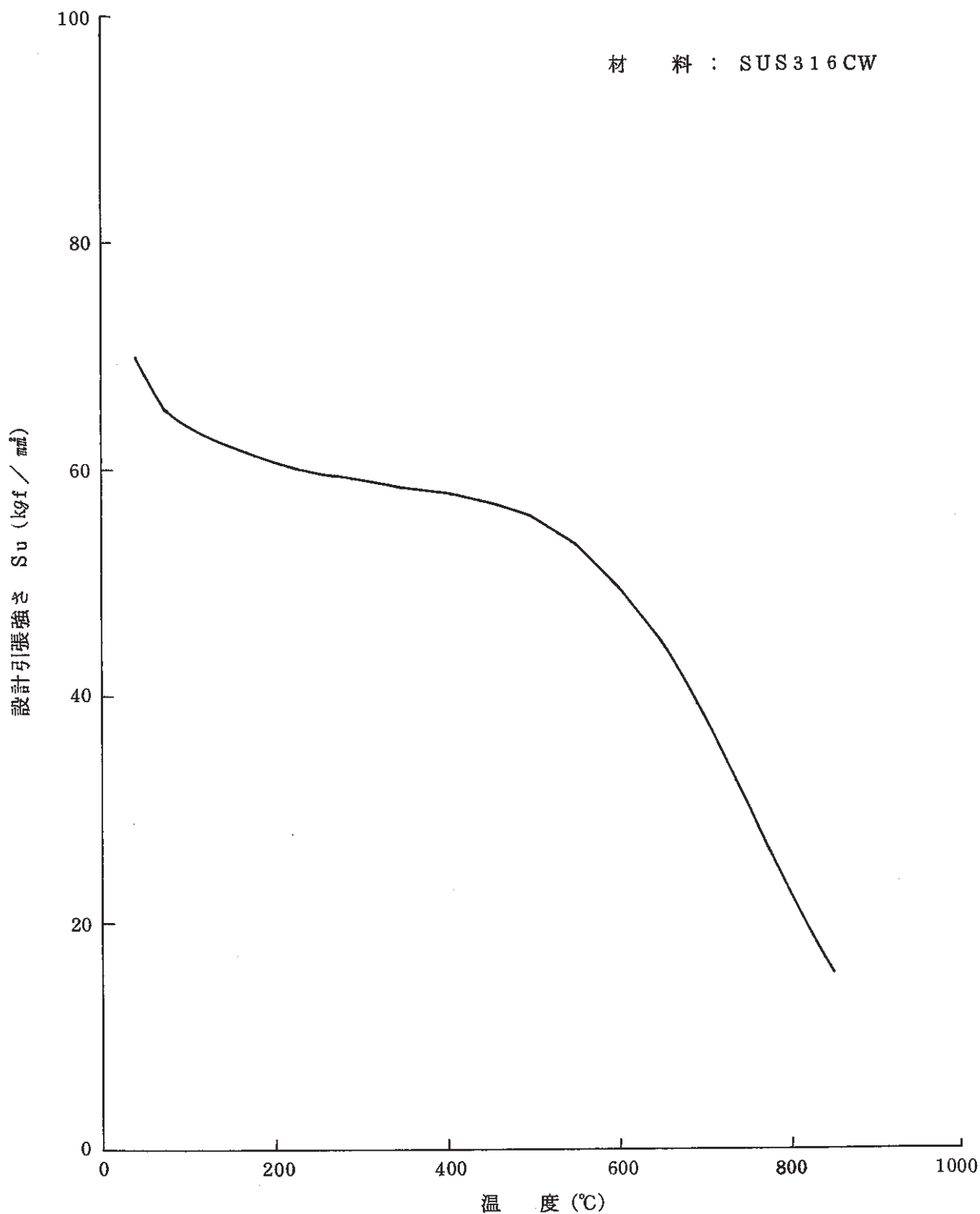


図 5 - 4 SUS 316 CW の設計引張強さ S_m

6. 結 言

大型炉の炉心構成要素についてVIOLLON コードを用いた群振動解析を行い、その結果に基づいて地震荷重に対する炉心構成要素の概略の耐震健全性評価を行った。検討の手順と結果の概略は以下のとおりである。

(1) 要素単体の詳細解析

VIOLLON の入力データに関する情報を得るため、各炉心構成要素単体の詳細な固有値解析と実施した。燃料集合体、ブランケット集合体、及び中性子遮蔽体の1次固有振動数は約3.5 Hz 前後、制御棒は約5.6 Hz 程度である。

(2) 基本群振動特性解析

正弦掃引波入力(2~20 Hz)を用いて炉心の最長列37体の群振動解析を行った。大型炉炉心の群振動特性は約5 Hz 前後に1次の卓越振動数があり、これは要素単体の1次固有振動数より2 Hz 程度高い。また、減衰定数やラップ管板厚等は群振動挙動にそれほど顕著な効果は有しないが、中間パッド位置の効果は大きい。

(3) 地震応答解析

暫定的に定められたS1及びS2地震波(炉心支持板の応答)を用いて群振動解析を行った。衝突力、変位応答ともに最外集の中性子遮蔽体が最大となり、S1地震時の衝突力は頂部で約16 ton、中間部で約2 ton となる。また、要素の変位応答はいわゆる総片寄りモードとなる。

(4) 耐震性評価

地震波による群振動解析で得られた衝突力及び曲げモーメントを基に、各炉心構成要素の地震応力評価を行った。最も厳しい条件となる最外周の中性子遮蔽体についてみると、曲げモーメントによる応力はラップ管下端部で約10kg/mm²、衝突力による応力は中間パッド部で約20kg/mm² となっている。これらの値はもんじゅの燃料集合体の構造設計方針に与えられる許容値と比較して十分低い値であり、大型炉炉心の耐震成立は十分の見通しがあるものと判断される。

なお、本検討は暫定の地震条件に基づいた概略の構造健全性評価というべきものであり、大型炉炉心の総合的な耐震性評価にあたっては、地震条件の設定、制御棒挿入性及び反応度変化も含め、より詳細な検討を行うべきである。

謝 辞

本検討を行うにあたり、要素単体の解析及びVIOLLONによる群振動解析の作業の多くの部分は小林幸嗣（銻東芝）、田代正夫（日本原子力事業㈱）の両氏に実施して頂いた。心より感謝する次第である。

また、大型炉炉心の設計条件及び設計仕様等、本検討に必要な諸資料を御提供頂いたプラント工学室の各位に感謝します。

参考文献

- (1) PNC SJ 201 79-35、「高速炉炉心振動解析コードの開発（Ⅰ）」、1979年4月
- (2) PNC SJ 201 80-20、「同上、（Ⅱ）」、1980年2月
- (3) PNC SJ 201 81-26、「同上、（Ⅲ）」、1981年3月
- (4) PNC SJ 201 82-06、「同上、（Ⅳ）」、1982年2月
- (5) PNC SJ 201 83-11、「炉内構造物の耐震総合検討」、1983年4月
- (6) PNC SJ 201 79-35、「もんじゅ燃料集合体の耐震実験（Ⅱ）-単体耐震実験-」、1979年5月
- (7) PNC SJ 201 80-43、「炉内構造物振動試験（Ⅰ）」、1980年9月
- (8) PNC SJ 201 81-27、「同上、（Ⅱ）」、1981年3月
- (9) PNC SJ 201 82-05、「同上、（Ⅲ）」、1982年2月
- (10) 「要素技術設計研究（Ⅱ）制御棒挿入性の検討」、1986年3月、東芝
- (11) PNC SJ 201 84-01、「パッド部地震時衝撃荷重試験」1984年2月
- (12) PNC SJ2216 86-001(1)「要素技術設計研究（Ⅱ）大型化に関する設計研究に伴う設備設計任務（1）-原子炉構造及び1次熱輸送系設備等-」、1986年3月
- (13) 「耐震設計の標準化に関する調査報告書（総論）」昭和56年6月、軽水炉改良標準化耐震設計小委員会
- (14) 「耐震設計の標準化に関する調査報告書（建屋系）」昭和59年3月、（財）原子力工学試験センター
- (15) M280 85-01(3)「ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設の耐震設計基準」1984年11月、科学技術庁 原子力安全局
- (16) PNC SN241 85-21(1)「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針（案）解説書」1985年12月
- (17) PNC SN241 85-21(2)「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針（案）材料強度基準」1985年12月

A p p e n d i c e s

- A . 「VIOLLON」コードの拡張整備
- B . 単体固有値解析モデルの詳細データ
- C . 衝突解析結果

Appendix A

「VIOLLON」コードの拡張整備

大洗工学センターの計算機にインストールされている、炉心構成要素群振動解析コード「VIOLLON」及びプロッター・プログラムの整備を行った。現在、インストールされているプログラムの計算可能な質点数は60質点（集合体30体）迄の為、これを100質点（集合体50体）迄計算が可能になる様にプログラムを拡張しそれに伴う衝突部個数等の修正を行った。

試算は「もんじゅ」で使用されたS2XHの地震波（継続時間35秒）の内最大加速度を包括する20秒から25秒間の地震波を使用した。CYBER とFACOM の結果を比べると中間パッド位置の変位で最大33.4%、頂部変位で最大4.9%、中間パッドの衝突力で最大88.5%、頂部パッドの衝突力で最大25.7%の相違が見られる為、FACOM とCYBER の有効桁数による計算結果の相違を評価した。その結果、FACOM とおいて「VIOLLON」コードを使用する際に倍精度で計算を行えば十分である事が判明した。

FACOM での計算は「もんじゅ」耐震設計に使用したS2は（35秒）の内、20秒から25秒までの5秒間を使用した場合、M200のCPUで約20分（65634ステップ）となった。

計算結果のプロット処理は大洗センターに設置されている、静電プロッター及びCALOMPのプロッターを使用する様になっていたが、NLP（日本語ライン・プリンター）で処理出来る様にプログラムを一部修正した。

2.1 修正内容

2.1.1 「VIOLLON」コードの拡張

「VIOLLON」コードで取扱える質点の最大数は60質点（集合体30点）である為、これを100質点（集合体50体）に変更し大型炉の炉心配置に対応出来る様にDIMENSION を60から100 に修正した。これに伴い衝突部関係のDIMENSIONも500 から900 に修正した。

さらに地震波の入力ステップを3000から4000ステップに修正した。これは「もんじゅ」で使用した入力地震波の継続時間が35秒（3591ステップ）の為、今迄のDIMENSION では収納出来ない為である。図2-1は「VIOLLON」コードの拡張に関する修正後のリストを示している。

修正箇所は、DIMENSION及びCOMMONの修正を行った箇所は、MAIN、CLAR2、INPT、INTL、INFL、DZDT、POUTである。従って今後多数列等の計算を行う際には、質点や衝突部個数の修正は上記のSUBROUTINEを修正すれば良い。

2.1.2 「VIOLLON」コードの修正

「VIOLLON」コードの衝突部に生じる衝突力が実験に較べて大きくなっている為に「もんじゅ」の設計では、衝突部の有効質量を実験結果より算出し、衝突力の補正係数として使用している。この補正係数の入力は、最後の入力データのPERMを指定した後に各衝突部毎に指定する様にしている。但し、この補正係数が使用されるのは、最大衝突力のプリント出力を行う時のみで実際の計算には使用されないので注意してほしい。従って、最大衝突力の表示も従来とは異なり、衝突力の最小値及び最大値に示される値は衝突力の補正係数が掛かった値で、補正前の値はPER.の位置に表示される。衝突力の補正を行える用にプログラムを修正した箇所はMAIN、CLAR2、INPT、INFL、POUTである。

2.1.3 「VIOLLON」コードのプリント出力の追加

「VIOLLON」コードの計算結果のプリント出力は、最大変位、最大加速度及び最大衝突力の3種類であるが、これに最大速度もプリント出来る様にした。さらに「VIOLLON」では、計算結果のプリントを行う際にバリアブル・フォーマットを使用している為、コンパイル時にワーニングが大量にプリントされる。従ってフォーマットを収納している変数名をCHARACTER 文で文字変数の宣言を行った。さらに、入力データの選別使用される変数名も同様に文字変数の宣言を行った。

2.1.4 プロッター・コードの修正

プロッター・コードのDIMENSION も「VIOLLON」本体と同様に取扱える質点の最大数を60質点（集合体30体）から100質点（集合体50体）に変更すると共に、衝突部関係のDIMENSION

も500から900に修正した。さらに地震波の入力ステップを3000から4000ステップに修正した。図A-2はプロッター・コードの拡張に関する修正後のリストを示している。

修正箇所は、DIMENSION文、COMMON文、及びプログラム先頭の領域指定の変数である。

DIMENSION及びCOMMONの修正は、MAINルーチンのみ行えば良い。

プロッター・コードは「VIOLLON」コードの変位、加速度及びパッド部の衝突力を時刻歴で表示する機能がある。作図の大きさは、A4及びA3版であるがNLP（日本語ライン・プリンター）に出力が可能なサイズはA4のみなので注意されたい。NKPでプロット処理を行う為に改ページを行うJ ¥PAGEルーチンを使用している為、静電プロッターやCALROMPではエラーとなるので注意してほしい。又、NLPを使用すると出力のライン数（1ページ約2000行）が非常に大きくなるのでATTRパラメータの指定に注意されたい。

図A-3は、相対変位のNLP出力例である。図A-4は、加速度NLP出力例である。プロットを行う際には、変位置（Y軸）を指定するオプションと自動的に計算結果の最大及び最小値からY軸のスケールを決定する事が出来る。使用者がY軸の指定を行った場合、計算結果が指定されたスケールを越える場合にはその値は、使用者が指定した最小値又は最大値に置換えられてプロットされるので注意してほしい。計算結果をプロットする場合、頂部と中間部を同時に行うと加速度や衝突力等では、中間部の値が頂部に較べて小さい為、十分に表示されない場合がある。従って「VIOLLON」のプロットを行う場合には、頂部と中間部を分けて処理する事が望ましい。

2.2 整備後の計算結果の確認

非線形解析の場合には計算機の有効桁数の影響が大きいことが判明したため、CYBER（有効桁数の14桁）とFACOM（単精度有効桁数8桁）及びFACOM（倍精度有効桁数16桁）の比較を行った。

CYBERの場合、20.0～25.0秒の計算に要するステップは66175ステップ、最小計算時間幅は2.4414E-09秒である。FACOM倍精度の場合、20.5～25.0秒の計算に要するステップは65634、ステップ最小計算時間幅は1.2207E-09秒である。FACOM単精度の場合、20.0～24.867秒のけいさに要するステップは200000ステップ、最小計算時間幅は2.4414E-09秒である。

CYBERとFACOM倍精度の計算ステップは比較的良く一致するが、FACOM単精度の計算ステップ数は大きくことなる。これは、クッタ・マーソン法の計算時間幅を決定する際に有効桁数以下の誤差が悪影響を与えて計算時間幅が小さいまま計算が行われた為と思われる。

図A-5は、頂部パッド位置の最小変位を示している。変位置が小さい質点番号2～22では、CYBERとFACOMの計算結果は良く一致するが、変位置の大きい質点番号56付近では単精度のみが

他の計算結果と異なっている。図 A - 6 は、頂部パッド位置の最大変位を示している。最小変位量の大きい質点番号 2 付近で単精度のみが他の計算結果と異なっている。

図 A - 7 は、中間パッド位置の最小変位を示している。頂部パッドとは若干挙動が異なるが CYBER の計算結果は FACOM の単精度と倍精度の計算結果の間にほぼ入っている。図 A - 8 は、中間パッド位置の最大変位を示している。頂部パッドとは若干挙動が異なるが CYBER の計算結果は FACOM の単精度と倍精度の計算結果の間にほぼ入っている。図 A - 9 は、頂部パッド位置の衝突力を示している。CYBER の計算結果は FACOM の単精度と倍精度の計算結果の間で且倍精度寄りの値となる。

図 A - 10 は、中間パッド位置の衝突力を示している。CYBER の計算結果は FACOM の単精度と倍精度の計算結果の間にほぼ入っている。

2.3 作成したデータセットの内容

図 A - 11 は、新規作成データ・セット名を示している。「VIOLLON」及びプロッター・プログラムは、区分データ・セット名“VIOLLON.FORT”に収納されている。“P84”は、オリジナルのプロッター・プログラムを、“P85”は、拡張整備後のプロッター・プログラムである。“V84”は、オリジナルの「VIOLLON」プログラムを、“V85”は、拡張整備後の「VIOLLON」プログラムを、“V86”は、“V85”の文字変数に対し CHARACTER 宣言を行って、コンパイル時のワーニングを削除したプログラムである。

計算の入力データは、区分データ・セット名“VIOLLON.DATA”に収納されている。

“C01”は「VIOLLON」の 0.0 秒から 0.1 秒迄の入力データで、“C5X”は 20.0 秒から 20.1 秒迄の入力データで、“P01”は 0.0 秒から 0.1 秒迄の入力データで、“P5X”は 20.0 秒から 20.1 秒迄の入力データで、“P5”は 20.0 秒から 25.0 秒迄の入力データである。S 2 X H は、「もんじゅ」の設計で使用した S 2 波のデータである。(3501ステップ、時間幅 0.01 秒)

JCL は、区分データ・セット名“VIOLLON.CNTL”に収納されている。図 A - 12 は、「VIOLLON」及びプロッターを実行する際の JCL を示している。「VIOLLON」の時刻歴の計算結果は情報量が膨大(3000ステップで 20M バイト)となる為、長時間計算を行う場合には磁気テープの使用が望ましい。図 A - 13 は、「VIOLLON」のテスト計算用の JCL を示している。計算時間は 0.1 秒程度のデータの使用が可能である。

```

00100 CUIOLLON          **** VIOLLON ****
00200 C
00300 CHARACTER*4 FN,FI,FE
00400 COMMON/ LL / FN(10),FI(10),FE(10),LP
00500 COMMON/ LOC1 / LOC1(100)
00600 COMMON/ DD /
00700 1 DISI,VELI,ACCI,ACCE,NUMB,P, F, B, S,
00800 2 GAP, DMP2,SPG2,PF, DMP, SPG,
00900 5 NH2, NA2, MBAN,NBAN,DELT,U, IOPT
01000 COMMON/ EE / AA,BB,IEAT
01100 COMMON/ ERR / UTDEL,IEROR
01200 COMMON/ ALTO / QUCC(900)
01300 DIMENSION A(100,2),S(100,100),UMAS(100,2)
01400 DIMENSION B(100),P(100)
01500 DIMENSION DMP(2,100),SPG(2,100),ISV(3,10),TMAX(4,900),
01600 1 TMIN(4,900)
01700 DIMENSION IOPT(20),TL(20)
01800 DIMENSION DMP2(100,20,2),GAP(100,20,2),
01900 1 PF(100,20,2),SPG2(100,20,2)
02000 DIMENSION ABAC(100),ABAI(100),ABAX(100),ACCE(4000),ACCI(100),
02100 1 COLI(900),COLL(900),COLX(900),DISI(100),DISX(100),
02200 1 DMP1(100),DSII(100),EMAS(100),UMAX(100),UMIN(100),
02300 3 F(100),F0(200),F1(200),F2(200),GSYM(10),
02400 4 NUMB(20),SLH(100),SPG1(100),VELI(100),
02500 5 X(100),X0(200),Y(100),Y0(200),
02600 6 Z0(200),Z1(200),Z2(200)
02700 DIMENSION DMPG(900),SPRG(900),GAPU(900)
02800 DIMENSION WACC(100),WDIS(100),WVEL(100)
02900 DIMENSION SSPG(50),DDMP(50)
03000 C
03100 C***** SIZE FOR ADJUSTABLE DIMENSION
03200 C
03300 N = 100
03400 M = 900
03500 N1 = 100
03600 N2 = 20
03700 IS = 10
03800 MB = 2
03900 NP = 4000
04000 N0 = 200
04100 NN = 200
04200 C*****
04300 IC = 5
04400 IP = 6
04500 LC = 1
04600 HT = 10
04700 CALL CIMAGE(IC,LC,IP,'*EOF')
04800 CALL PROCTH(TM)
04900 10 CONTINUE
05000 CALL CLAR1
05100 1 (OUT, BETA,DELT,EPS, ISTEP,ISVM,JSVM,NITR,PACC,PUEL,PCOL,PDSP,TDEL,
05200 2 V)
05300 CALL CLAR2

```

図 A - 1 「VIOLLON」コードの拡張修正箇所。

```

00100 CUIOLLON          **** VIOLLON II - PLOTTER ****
00200 C
00300 CHARACTER*4 XLAB,XDM,YLAB,YDM, FN,FE,FI,YLABEL,YTNI
00400 COMMON/ LL / LC,LP, FN(10),FE(10),FI(10)
00500 DIMENSION
00600 1 LCEN(3), NDP(3), NG(3), NGF(3), NGRF(3), NO(3,700),
00700 2 NOTBL(5), NYD(3), NYL(3),
00800 3 XDATA(10000), YDATA(10000,5),
00900 4 YAXS(3), YAXSG(5), YG(5), YMAX(3), YMIN(3)
01000 DIMENSION ACCE(4000),DMP(2,100),SPG(2,100),
01100 1 DMP2(100,20,2),SPG2(100,20,2),GAP(100,20,2),
01200 2 X(100),Y(100),NUMB(20),P(100),A(100,2)
01300 DIMENSION DISI(10),ABAC(100),COLL(900)
01400 DIMENSION XLAB(5),YLAB(5,3),YLABEL(5)
01500 DIMENSION XDM(5),YDM(5,3),YTNI(5)
01600 DIMENSION UX0(200),UY0(200),EMAS(100),UMAS(100,100),
01700 1 DMP1(100),SPG1(100),SLH(100),VELI(100)
01800 C
01900 C***** SIZE FOR ADJUSTABLE DIMENSION
02000 N = 100
02100 M = 900
02200 N1 = 100
02300 N2 = 20
02400 IS = 10
02500 MB = 2
02600 NP = 4000
02700 NT = 10000
02800 N0 = 200
02900 C*****
03000 IC = 5
03100 IP = 6
03200 MT = 10
03300 NQ = 10000
03400 X0 = 0.0
03500 Y0 = 0.0
03600 IDBG= 0
03700 CALL PLOTS(0.,0.,20)
03800 C***** CARD DATA
03900 CALL PCDIN
04000 1 (OUT, IO, IO2, IO3, IA, IB, NDP, NG, LCEN,
04100 2 YLAB,YDM, NYL, NYD, NPOINT, DT, NDT, TSTR,TEND,
04200 3 NGF, NO, YMAX,YMIN,YAXS,IC,NLOW)
04300 IF( IDBG.EQ.1 ) CALL UCDIN
04400 1 (OUT, IO, IO2, IO3, IA, IB, NDP, NG, LCEN,
04500 2 YLAB,YDM, NYL, NYD, NPOINT, DT, NDT, TSTR,TEND,
04600 3 NGF, NO, YMAX,YMIN,YAXS,IC,NLOW)
04700 C***** INITIALIZATION
04800 C***** IF(NLOW.EQ.0) CALL FACTOR(0.9)

```

図 A - 2 プロッター・コードの拡張修正箇所。

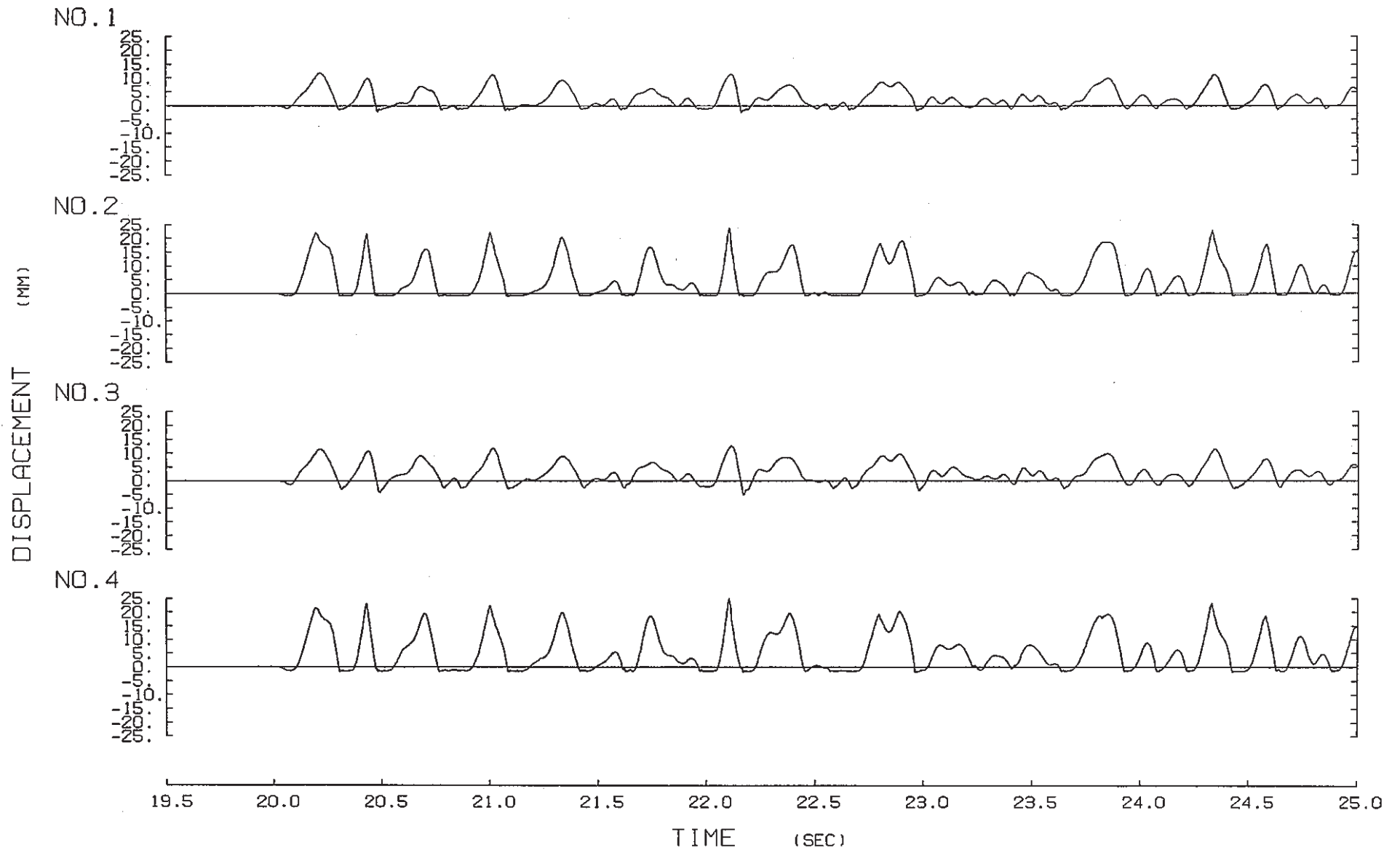


図 A - 3 相対変位の N L P 出力例。

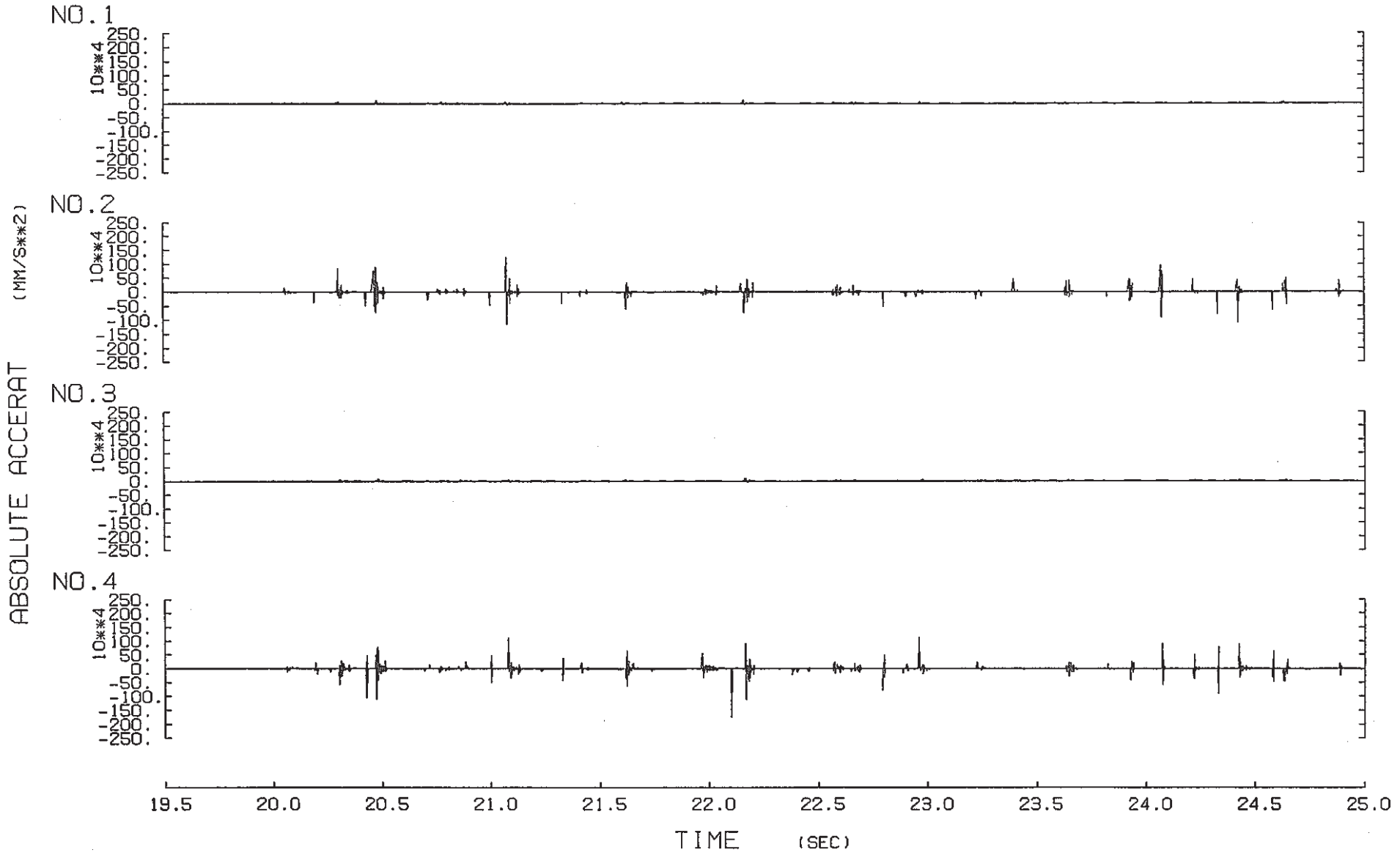
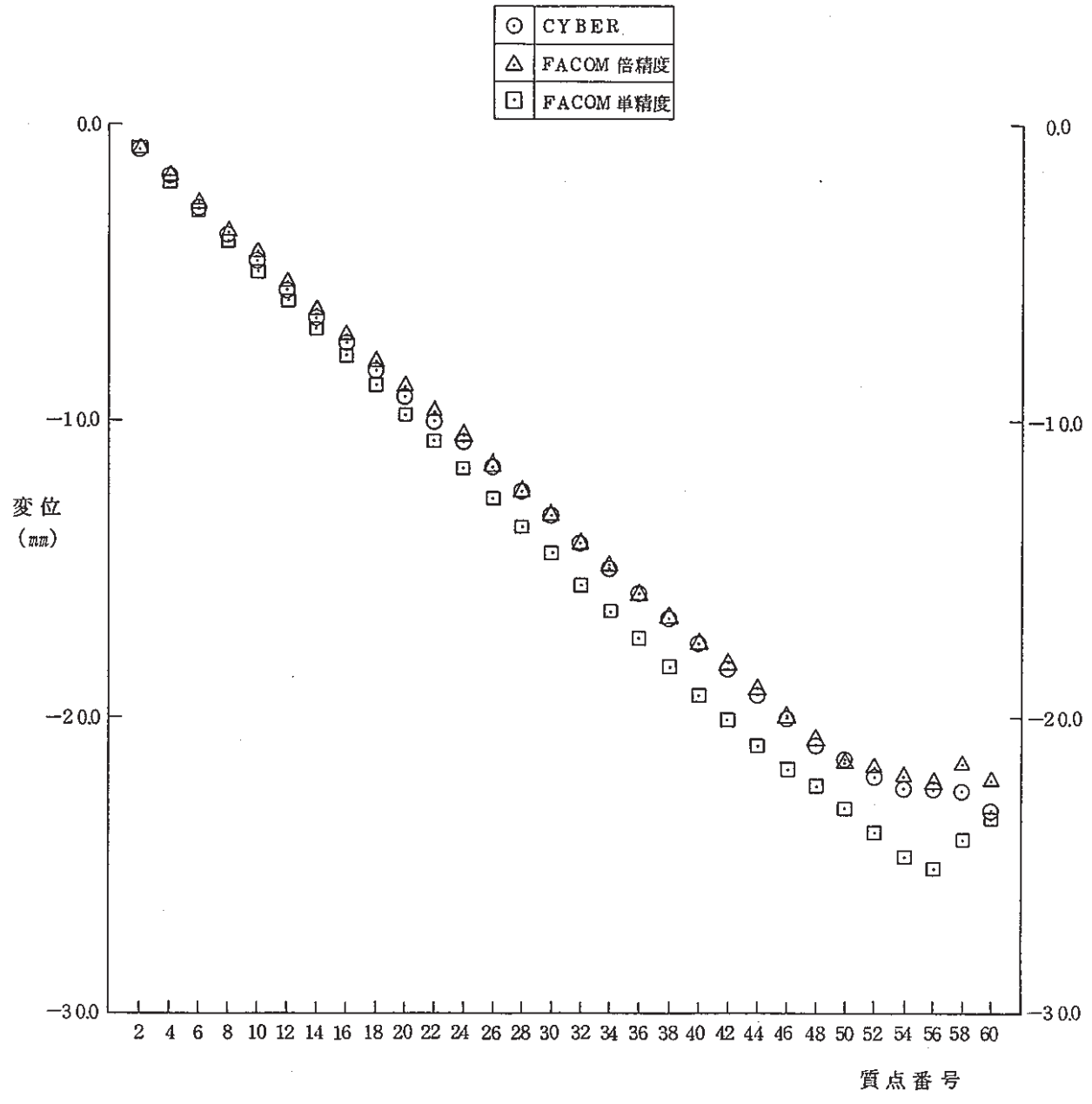


図 A - 4 加速度の N L P 出力例。



図A-5 頂部パッド位置の最小変位

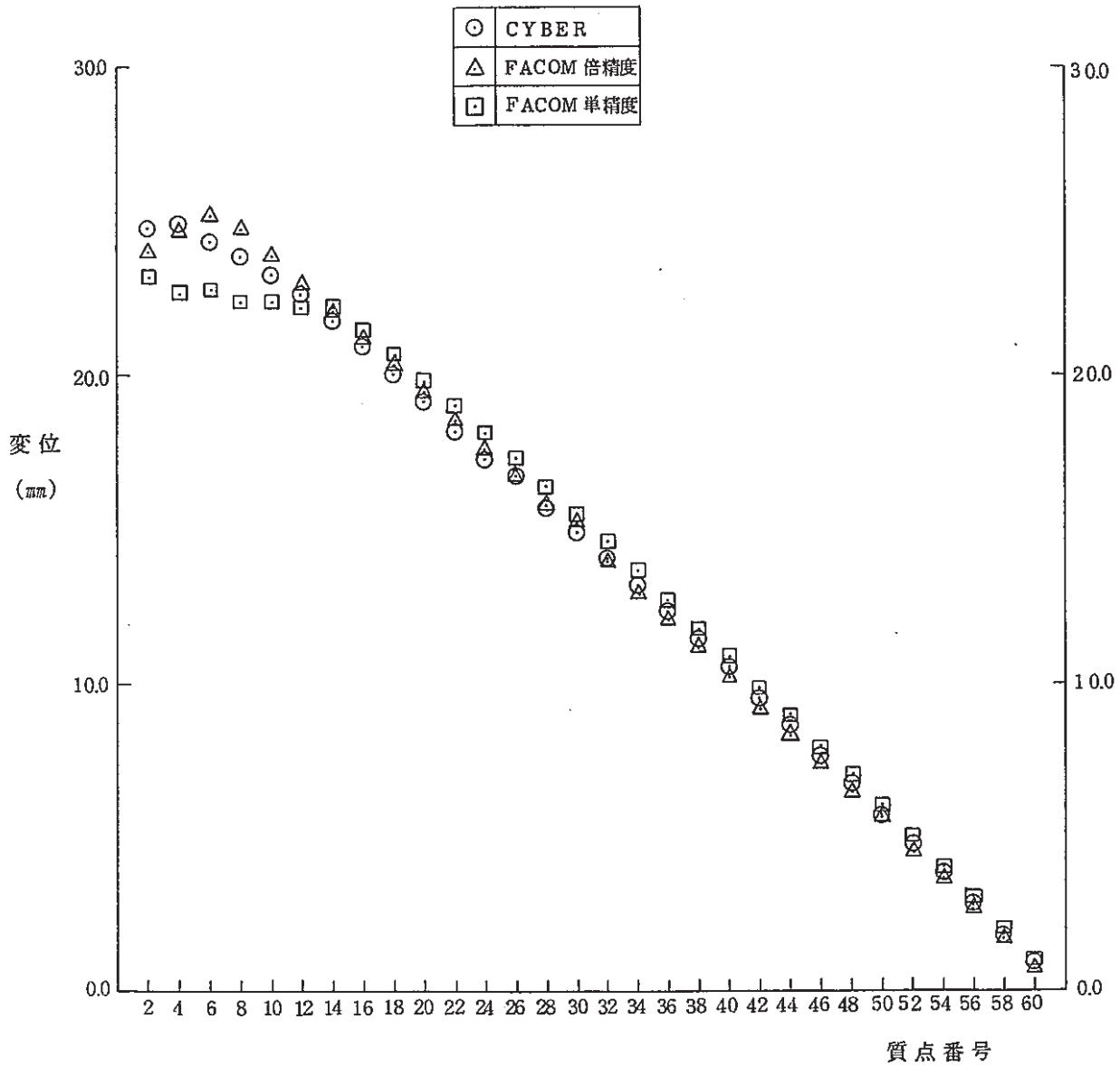


図 A - 6 頂部パッド位置の最大変位

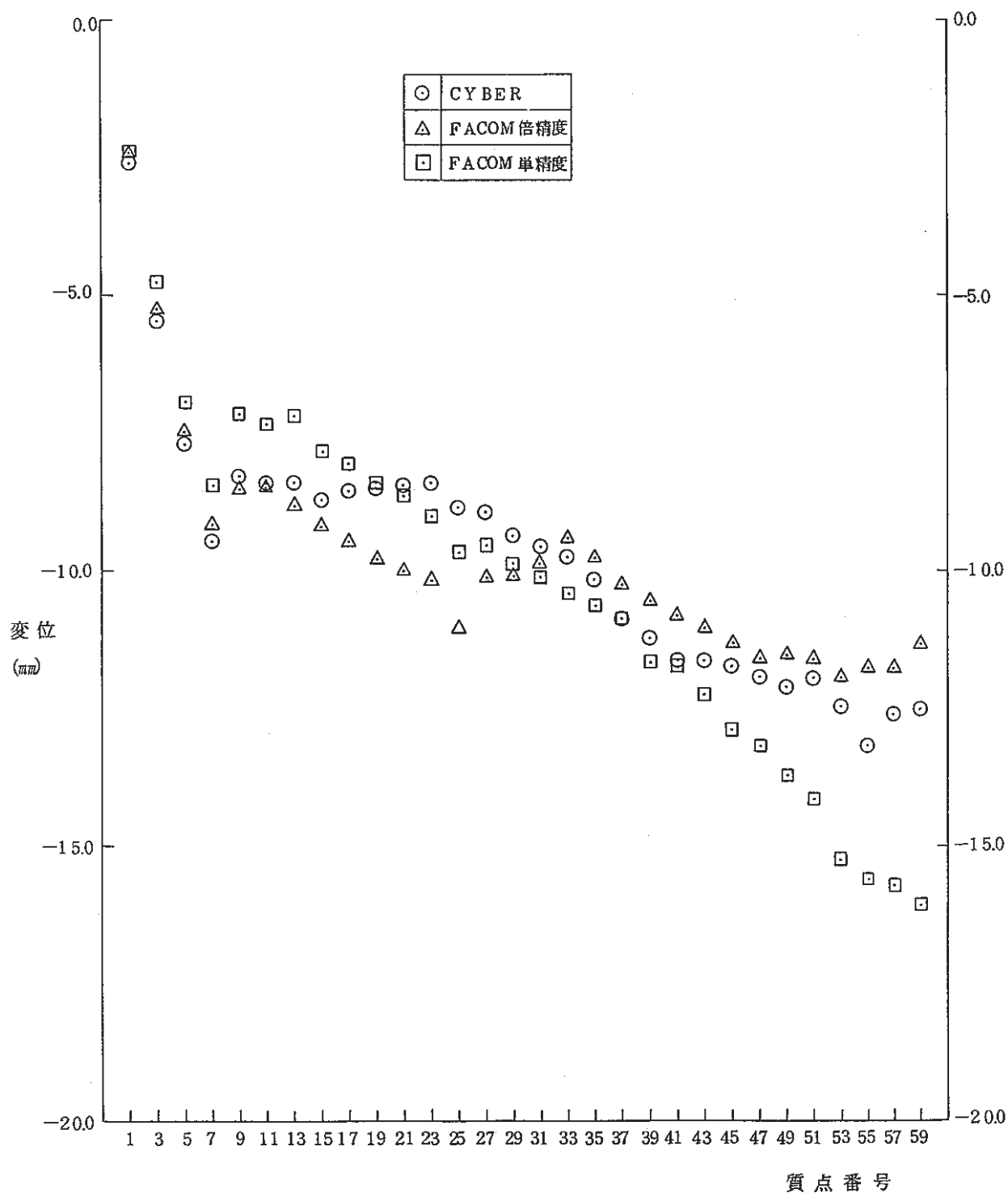


図 A - 7 中間パッド位置の最小変位

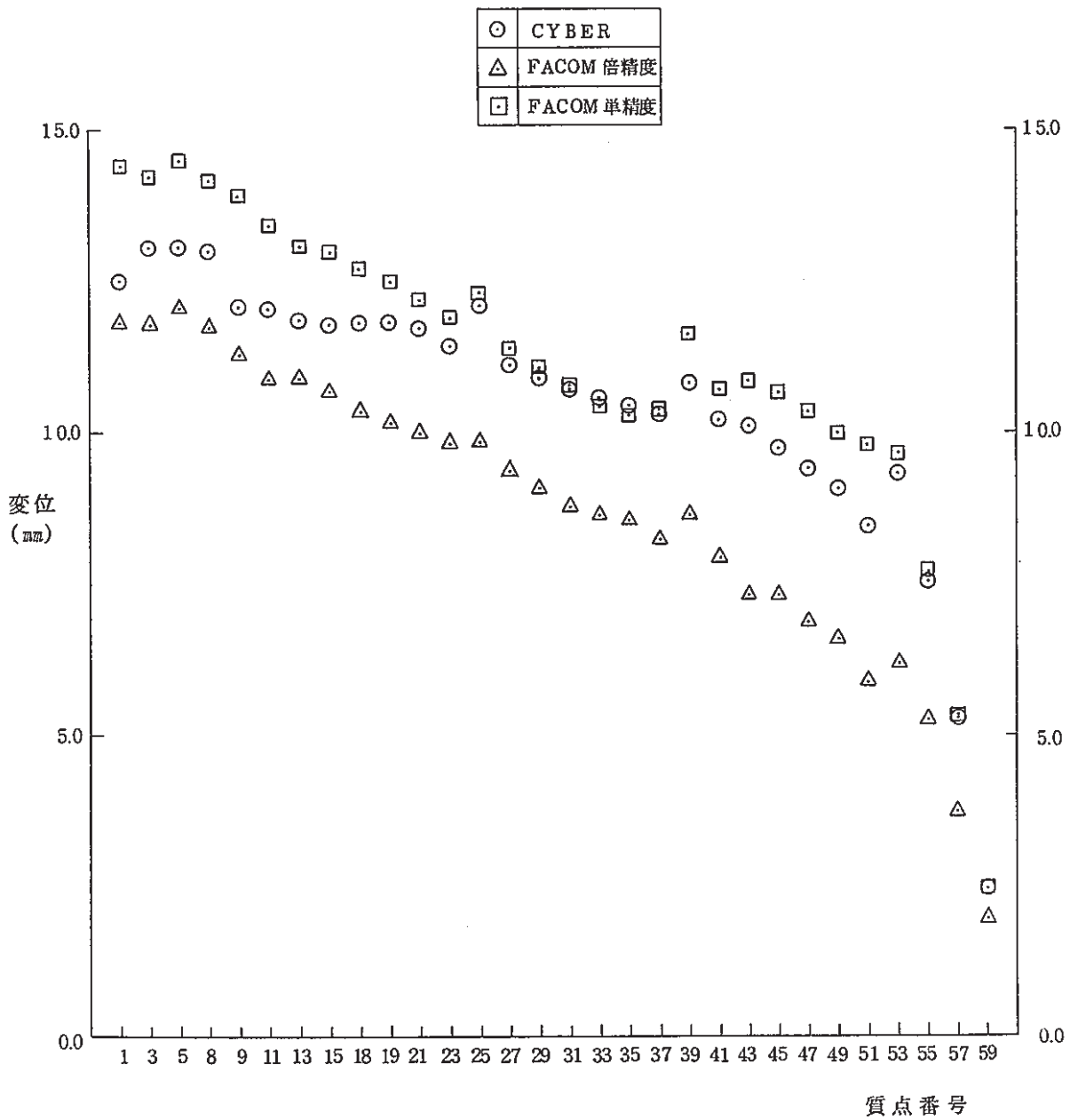


図 A - 8 中間パッド位置の最大変位

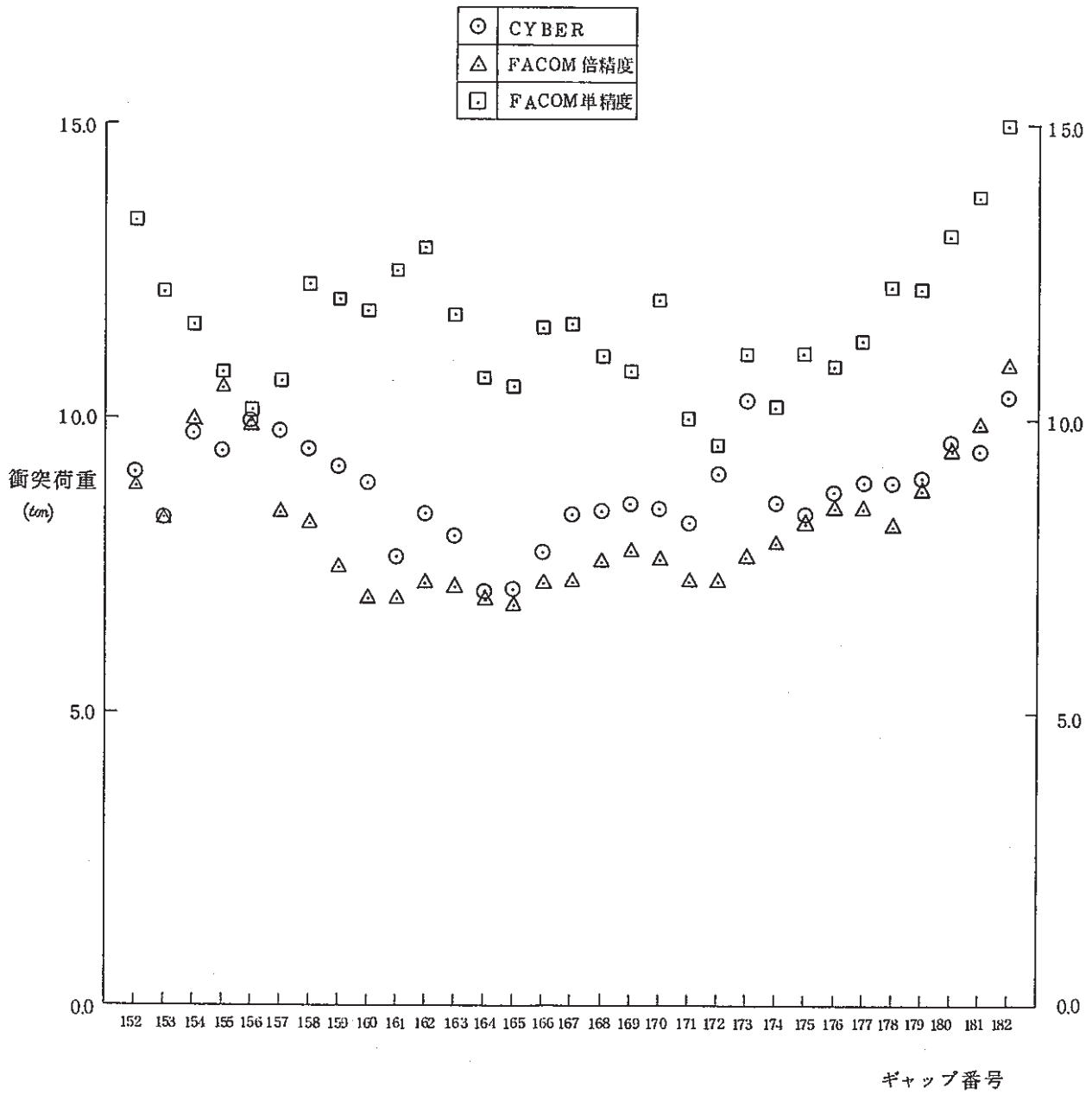


図 A - 9 頂部パッド位置の衝突力

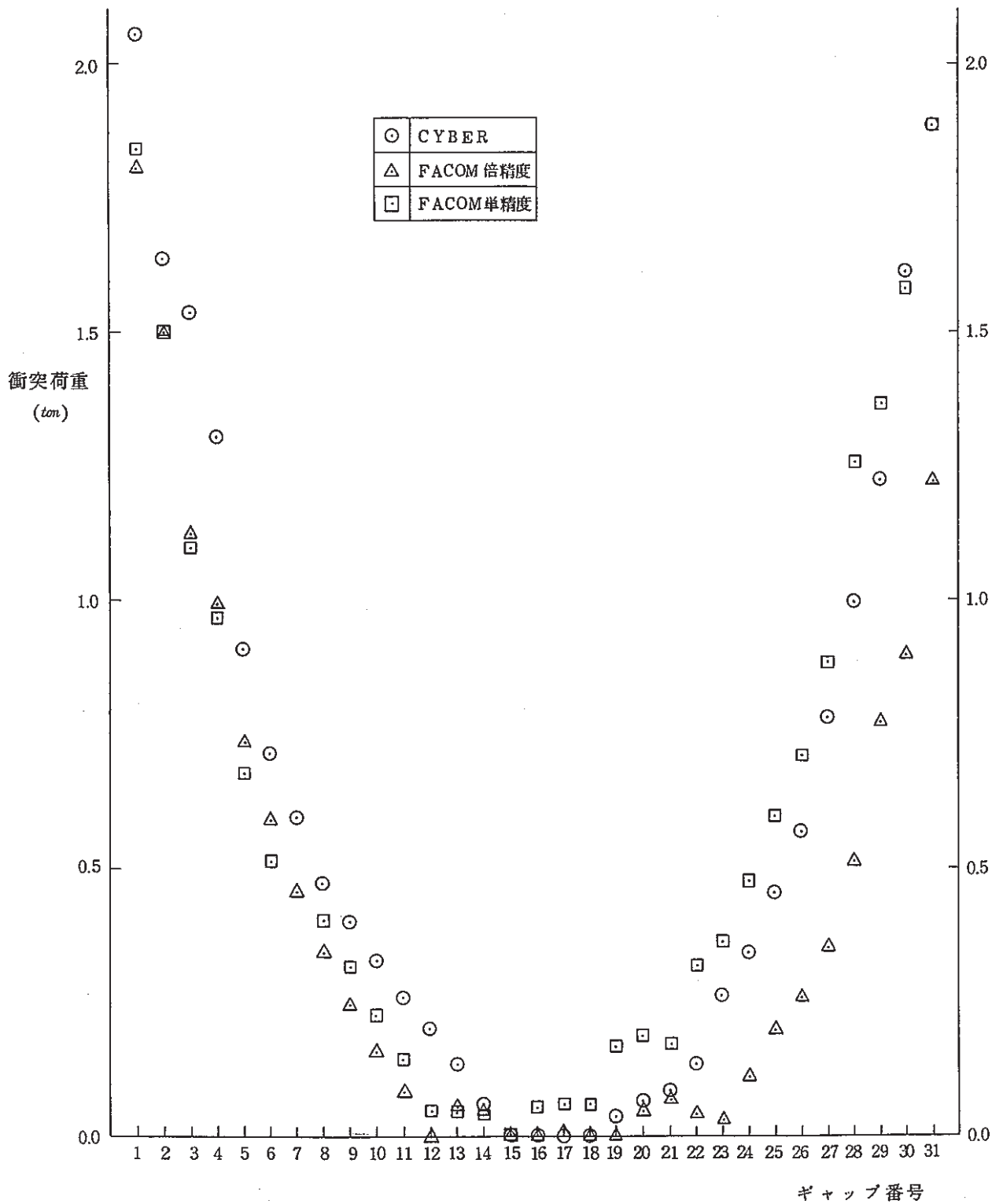


図 A - 10 中間パッド位置の衝突力

```

C0052.VIOLLON.FORT
--RECFM--LRECL--BLKSIZE--DSORG
FB      80      3120      PO
--VOLUMES--
PNC029
--MEMBERS--
P84
P85
U84
U85
U86
READY
LISTD VIOLLON.CNTL M
C0052.VIOLLON.CNTL
--RECFM--LRECL--BLKSIZE--DSORG
FB      80      800      PO
--VOLUMES--
PNC029
--MEMBERS--
NEW
NLP
OLD
SNG
SSS
TST
UET
UPR
READY
LISTD VIOLLON.DATA M
C0052.VIOLLON.DATA
--RECFM--LRECL--BLKSIZE--DSORG
FB      80      3120      PO
--VOLUMES--
PNC015
--MEMBERS--
C01
C5
C5X
P01
P5
P5X
S2XH

```

図 A - 11 新規作成データ・セット名及びメンバー名

E VIOLLON.CNTL(UFR)

```

E
L
00100 //C0052UFR JOB (GALANT),TASHIRO,MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(1,1),
00200 // ATTR=(T0,C4,U4)
00300 //ROUTE PRINT HONSYAM
00400 // EXEC FORT7CLG,PARM='AUTODBL(DBLPAD),NOSOURCE'
00500 //FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=A
00600 //FORT.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.FORT(UB5),DISP=SHR
00700 //LKED.SYSPRINT DD SYSOUT=A
00800 //GO.FT05F001 DD DSN=C0052.VIOLLON.DATA(C5),DISP=SHR
00900 //GO.FT01F001 DD DSN=&LURK1,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01000 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01100 //GO.FT02F001 DD SYSOUT=A
01200 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=A
01300 //GO.FT10F001 DD DSN=C0052.@PLOTB.DATA,UNIT=DASD,
01400 // DISP=(NEU,CATLG),SPACE=(CYL,(5,5)),
01500 // DCB=(RECFM=VS,LRECL=3516,BLKSIZE=3520)
01600 //GO.FT12F001 DD DSN=&LURK2,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01700 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01800 //GO.FT20F001 DD DSN=&LURK3,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01900 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01940 //FORT EXEC NFORTCLG,PARM.FORT='AUTODBL(DBLPAD),NOSOURCE'
01950 //FORT.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.FORT(PB5),DISP=SHR
01960 //GO.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.DATA(PS),DISP=SHR
01970 //GO.FT10F001 DD DSN=C0052.@PLOTB.DATA,DISP=SHR
02000 //

```

E VIOLLON.CNTL(NLP)

```

E
L
00100 //C0052NLP JOB (GALANT),TASHIRO,MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(1,1),
00200 // ATTR=(T0,C4,U4)
00300 //ROUTE PRINT HONSYAM
00300 //FORT EXEC NFORTCLG,PARM.FORT='AUTODBL(DBLPAD),SOURCE'
02400 //FORT.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.FORT(PB5),DISP=SHR
02500 //GO.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.DATA(PSX),DISP=SHR
02600 //GO.FT10F001 DD DSN=C0052.@PLOTB.DATA,DISP=SHR
02800 //

```

図A-12 「VIOLLON」及びプロッター実行JCL

```

E VIOLLON.CNTL(TST)
E
L
00100 //C0052TST JOB (GALANT),TASHIRO,MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(1,1),
00200 // ATTR=(TO,C4,U2)
00300 //ROUTE PRINT HONSYAM
00400 // EXEC FORT7CLG,PARM='AUTODBL(DBLPAD)
00500 //FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=A
00600 //FORT.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.FORT(UBG),DISP=SHR
00700 //LKED.SYSPRINT DD SYSOUT=A
00800 //GO.FT05F001 DD DSN=C0052.VIOLLON.DATA(C5X),DISP=SHR
00900 //GO.FT01F001 DD DSN=&&URK1,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01000 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01100 //GO.FT02F001 DD SYSOUT=A
01200 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=A
01300 //GO.FT10F001 DD DSN=C0052.@PLOTS.DATA,UNIT=DASD,
01400 // DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(CYL,(5,5)),
01500 // DCB=(RECFM=US,LRECL=3516,BLKSIZE=3520)
01600 //GO.FT12F001 DD DSN=&&URK2,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01700 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01800 //GO.FT20F001 DD DSN=&&URK3,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01900 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
02000 //

```

```

E VIOLLON.CNTL(SSS)
E
L
00100 //C0052SSS JOB (GALANT),TASHIRO,MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(1,1),
00200 // ATTR=(TO,C4,U3)
00300 //ROUTE PRINT HONSYAM
00400 // EXEC FORT7CLG,PARM='AUTODBL(DBLPAD),NOSOURCE'
00500 //FORT.SYSPRINT DD SYSOUT=A
00600 //FORT.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.FORT(UBS),DISP=SHR
00700 //LKED.SYSPRINT DD SYSOUT=A
00800 //GO.FT05F001 DD DSN=C0052.VIOLLON.DATA(C5X),DISP=SHR
00900 //GO.FT01F001 DD DSN=&&URK1,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01000 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01100 //GO.FT02F001 DD SYSOUT=A
01200 //GO.FT06F001 DD SYSOUT=A
01300 //GO.FT10F001 DD DSN=C0052.@PLOTS.DATA,UNIT=DASD,
01400 // DISP=(NEW,CATLG),SPACE=(CYL,(5,5)),
01500 // DCB=(RECFM=US,LRECL=3516,BLKSIZE=3520)
01600 //GO.FT12F001 DD DSN=&&URK2,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01700 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01800 //GO.FT20F001 DD DSN=&&URK3,UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),
01900 // DCB=(RECFM=VBS,LRECL=200,BLKSIZE=800)
01940 //FORT EXEC NFORTCLG,PARM.FORT='AUTODBL(DBLPAD),NOSOURCE'
01950 //FORT.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.FORT(P85),DISP=SHR
01960 //GO.SYSIN DD DSN=C0052.VIOLLON.DATA(P5X),DISP=SHR
01970 //GO.FT10F001 DD DSN=C0052.@PLOTS.DATA,DISP=SHR
02000 //

```

図 A - 13 テスト計算用 JCL

Appendix B 単体固有値解析モデルの詳細データ

表 B - 1 燃料集合体の計算条件

(VIOLLON)

CASE	質量 matrix (kgsec ² /mm)		剛性 matrix (kgmm ²)	
1	2.06 - 2	0.0	2.06 + 2	1.38 + 2
	0.0	8.93 - 3	1.38 + 2	8.03 + 1
2	2.06 - 2	0.0	2.06 + 2	1.38 + 2
	0.0	8.93 - 3	1.38 + 2	8.03 + 1

(SALCON)

要素番号	断面積 (mm ²)	せん断断面積 (mm ²)	断面 2 次モーメント (mm ⁴)	分布質量 (kgsec ² /mm ²)	長さ (mm)				
15	6.45 + 3	3.22 + 3	1.83 + 7	8.11 - 6	200.0				
14	2.15 + 3	1.07 + 3	7.14 + 6	5.11 - 6	280.0				
13						8.08 + 3	3.57 + 7	1.37 - 5	355.0
12								5.95 - 6	240.0
11								1.42 - 5	250.0
10								1.40 - 5	280.0
9									
8									
7									
6								1.41 - 5	280.0
5								1.26 - 5	
4			5.11 - 6	290.0					
3									
2	1.68 + 4	8.39 + 3	3.16 + 7	1.22 - 5	250.0				
1	2.31 + 3	1.16 + 3	2.99 + 6	2.52 - 6	400.0				

表B-2 ブランケット集合体の計算条件

(VIOLLON)

CASE	質量 matrix (kgsec ² /mm)		剛性 matrix (kgmm ²)	
1	2.24-2	0.0	2.06+2	1.38+2
	0.0	9.23-3	1.38+2	8.03+1
2	3.71-2	0.0	2.06+2	1.38+2
	0.0	9.23-3	1.38+2	8.03+1

(SALCON)

要素番号	断面積 (mm ²)	せん断断面積 (mm ²)	断面2次モーメント (mm ⁴)	分布質量 (kgsec ² /mm ²)	長さ (mm)					
15	6.45+3	3.22+3	1.83+7	8.11-6	200.0					
14	2.15+3	1.07+3	7.14+6	1.66-5	280.0					
13						1.62+4	8.08+3	3.57+7	1.37-5	355.0
12									5.61-6	240.0
11									1.67-5	250.0
10										
9										
8										
7									1.67-5	
6									1.46-5	
5										
4				4.43-6						
3					290.0					
2	1.68+4	8.39+3	3.16+7	1.22-5	250.0					
1	1.97+3	9.84+2	2.88+6	2.35-6	400.0					

表 B - 3 中性子遮蔽体 (B₄C) の計算条件

(VIOLLON)

CASE	質量 matrix (kgsec ² /mm)		剛性 matrix (kgmm ²)	
1	1.33-2	0.0	2.06+2	1.38+2
	0.0	7.65-3	1.38+2	8.03+1
2	2.05-2	0.0	2.06+2	1.38+2
	0.0	7.65-3	1.38+2	8.03+1

(SALCON)

要素番号	断面積 (mm ²)	せん断断面積 (mm ²)	断面2次モーメント (mm ⁴)	分布質量 (kgsec ² /mm ²)	長さ (mm)					
15	6.45+3	3.22+3	1.83+7	8.11-6	200.0					
14	2.15+3	1.07+3	7.14+6	6.09-6	280.0					
13						1.62+4	8.08+3	3.57+7	1.37-5	355.0
12									3.53-6	240.0
11										250.0
10										
9										
8										
7										
6									5.63-6	
5										
4				3.54-6						
3					290.0					
2	1.68+4	8.39+3	3.16+7	1.22-5	250.0					
1	2.31+3	1.16+3	2.99+6	2.52-6	400.0					

表 B - 4 制御棒の計算条件

(VIOLLON)

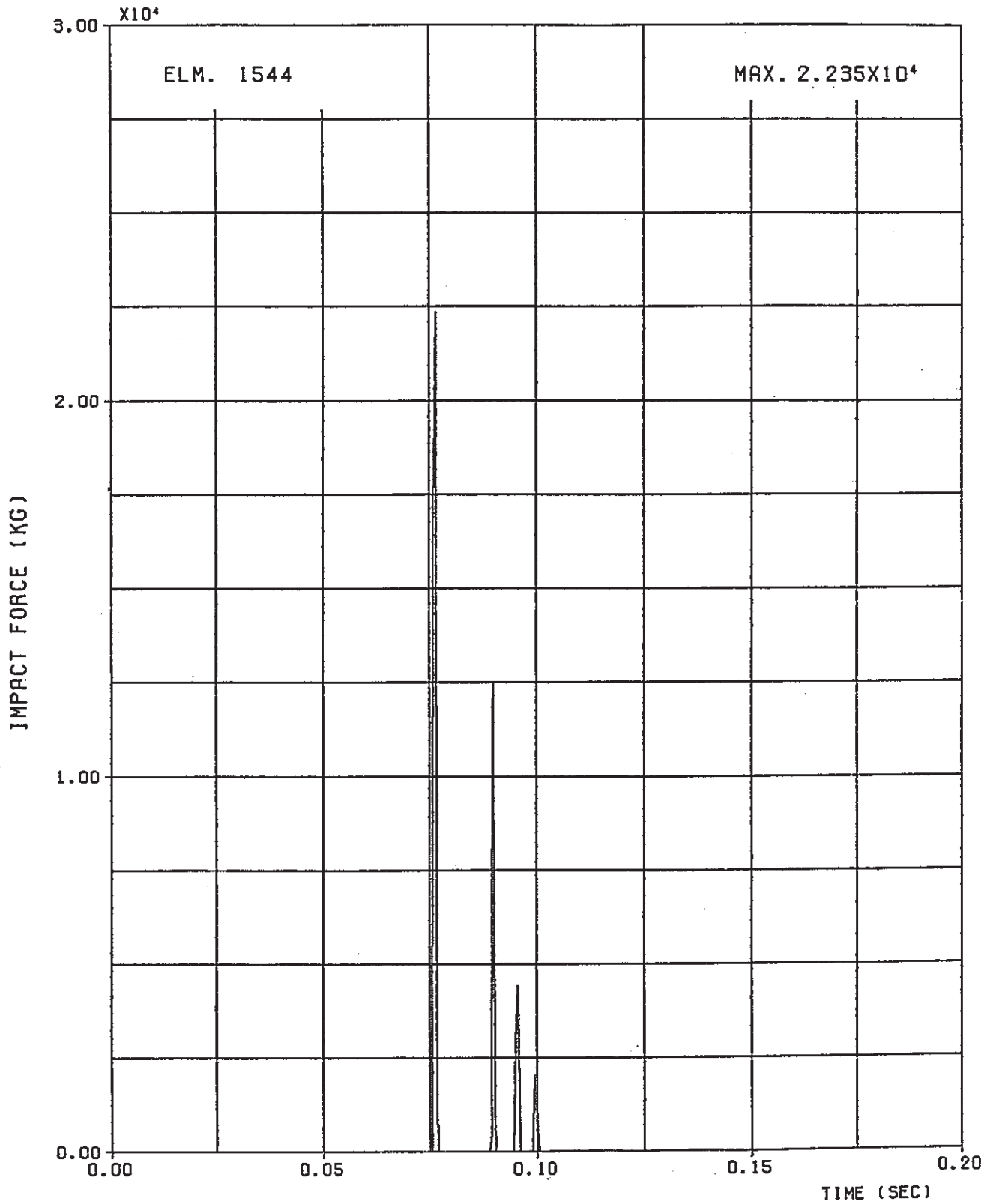
CASE	質量 matrix (kgsec ² /mm)		剛性 matrix (kgmm ²)	
1	1.47 - 2	0.0	2.07 + 2	1.11 + 2
	0.0	4.44 - 3	1.11 + 2	6.50 + 1
2	2.66 - 2	0.0	2.07 + 2	1.11 + 2
	0.0	4.44 - 3	1.11 + 2	6.50 + 1

(SALCON)

要素番号	断面積 (mm ²)	せん断断面積 (mm ²)	断面 2 次モーメント (mm ⁴)	分布質量 (kgsec ² /mm ²)	長さ (mm)
15	5.61 + 3	2.80 + 3	1.72 + 7	8.55 - 6	200.0
14					140.0
13	1.95 + 3	9.74 + 2	5.85 + 6	3.85 - 6	300.0
12					400.0
11					360.0
10					350.0
9					
8					
7					
6					9.21 - 6	227.5
5	1.80 + 4	9.02 + 3	3.71 + 7	1.27 - 5	245.0
4					
3					250.0
2					
1	2.31 + 3	1.16 + 3	2.99 + 6	2.52 - 6	400.0

Appendix C 衝突解析結果

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS



図C-1 頂部パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS

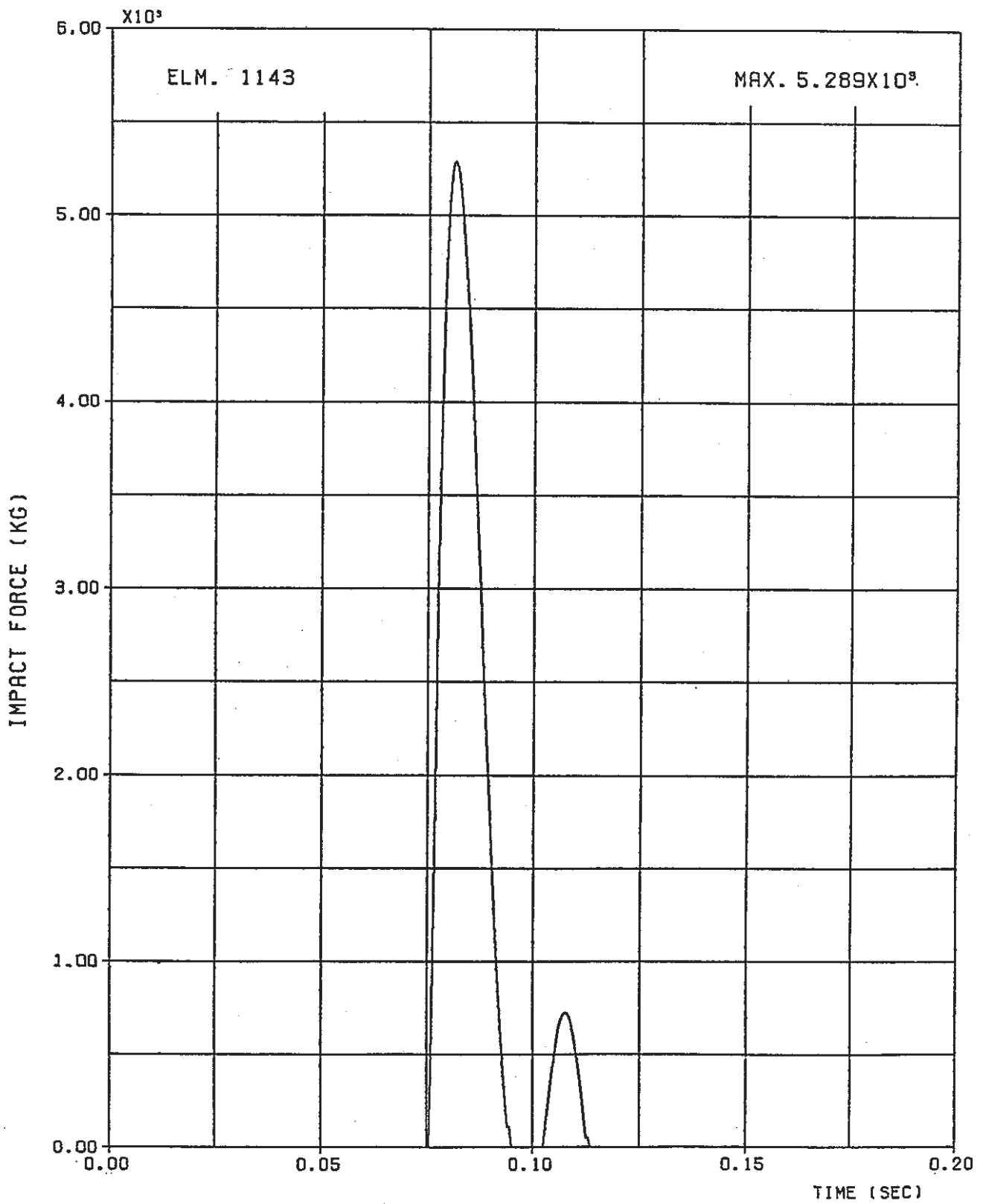


図 C - 2 中間パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位 100.0 mm)

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS

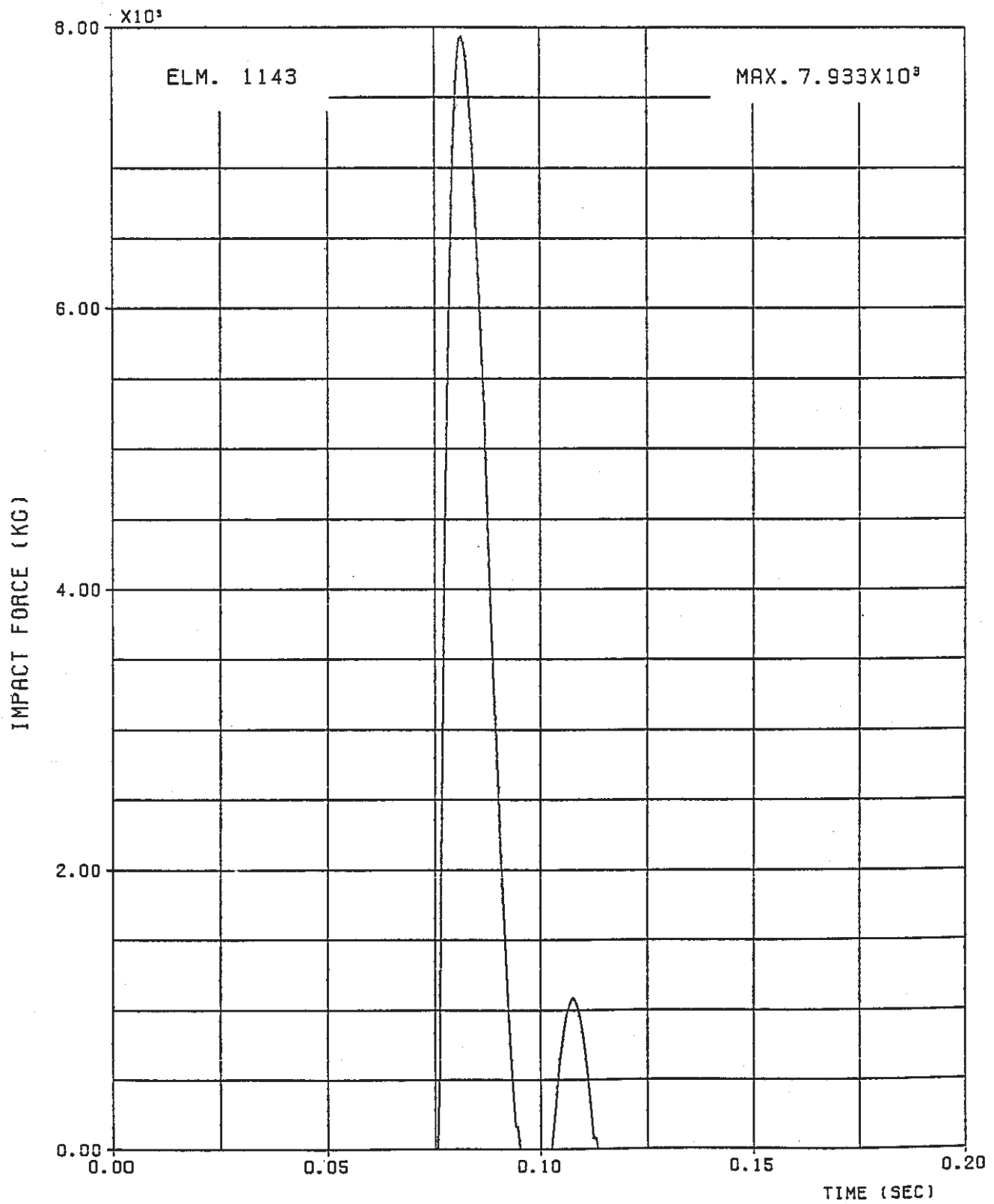


図 C - 3 中間パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位150.0 mm)

CORE FUEL IMPACT ANALYSIS

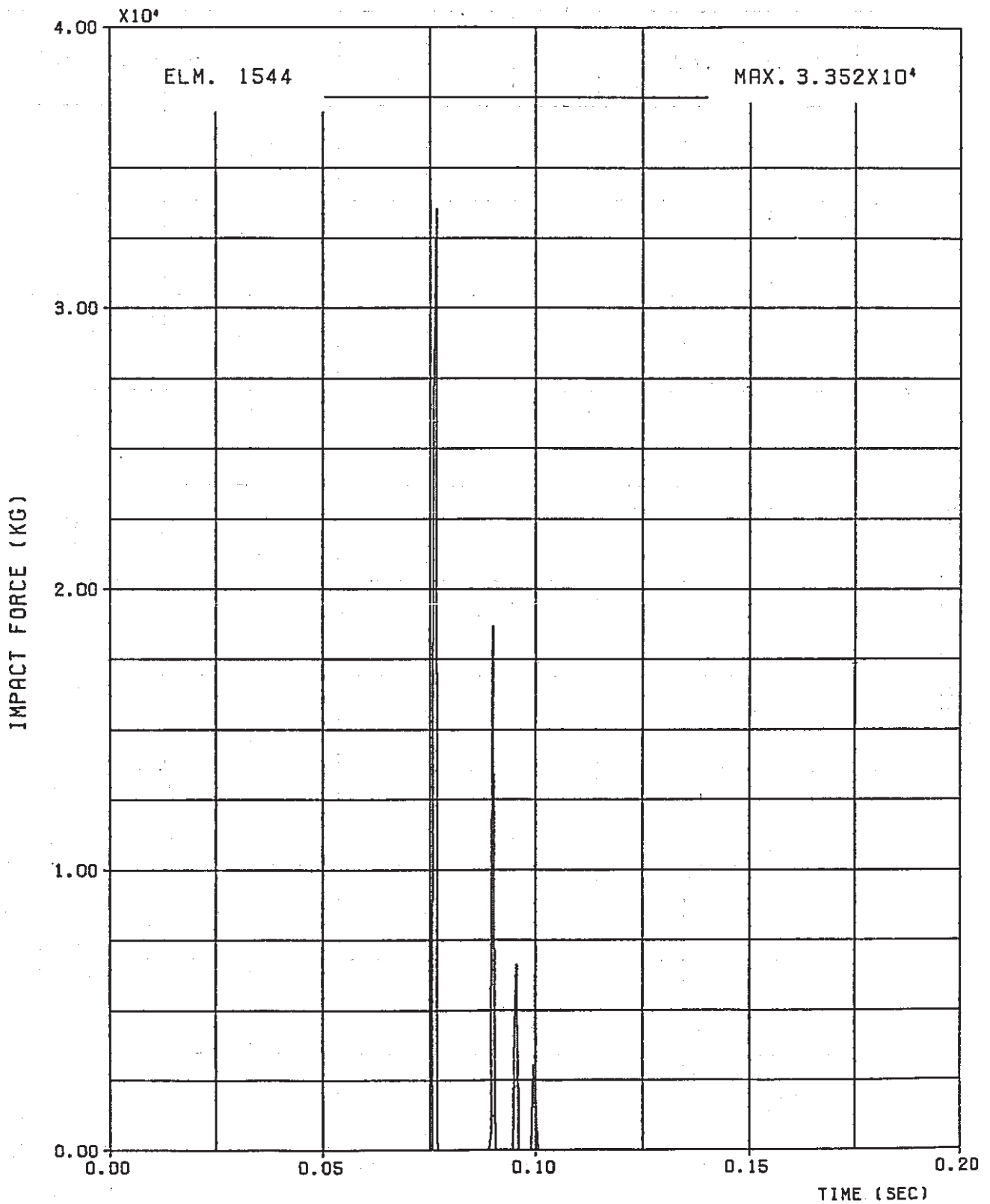


図 C - 4 頂部パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位 150.0 mm)

BLANKET IMPACT ANALYSIS

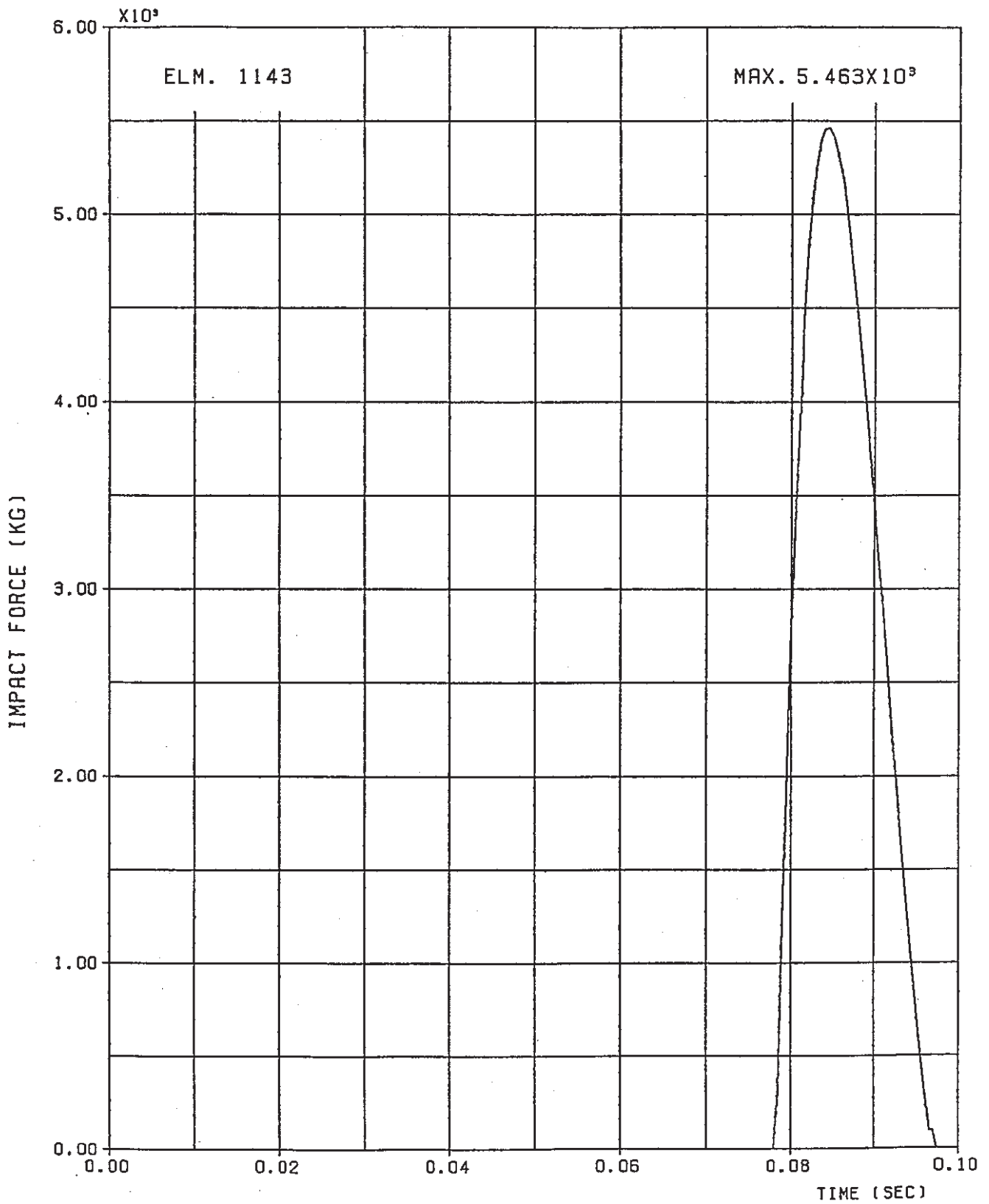


図 C - 5 ブランケット集合体の中間パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)

BLANKET IMPACT ANALYSIS

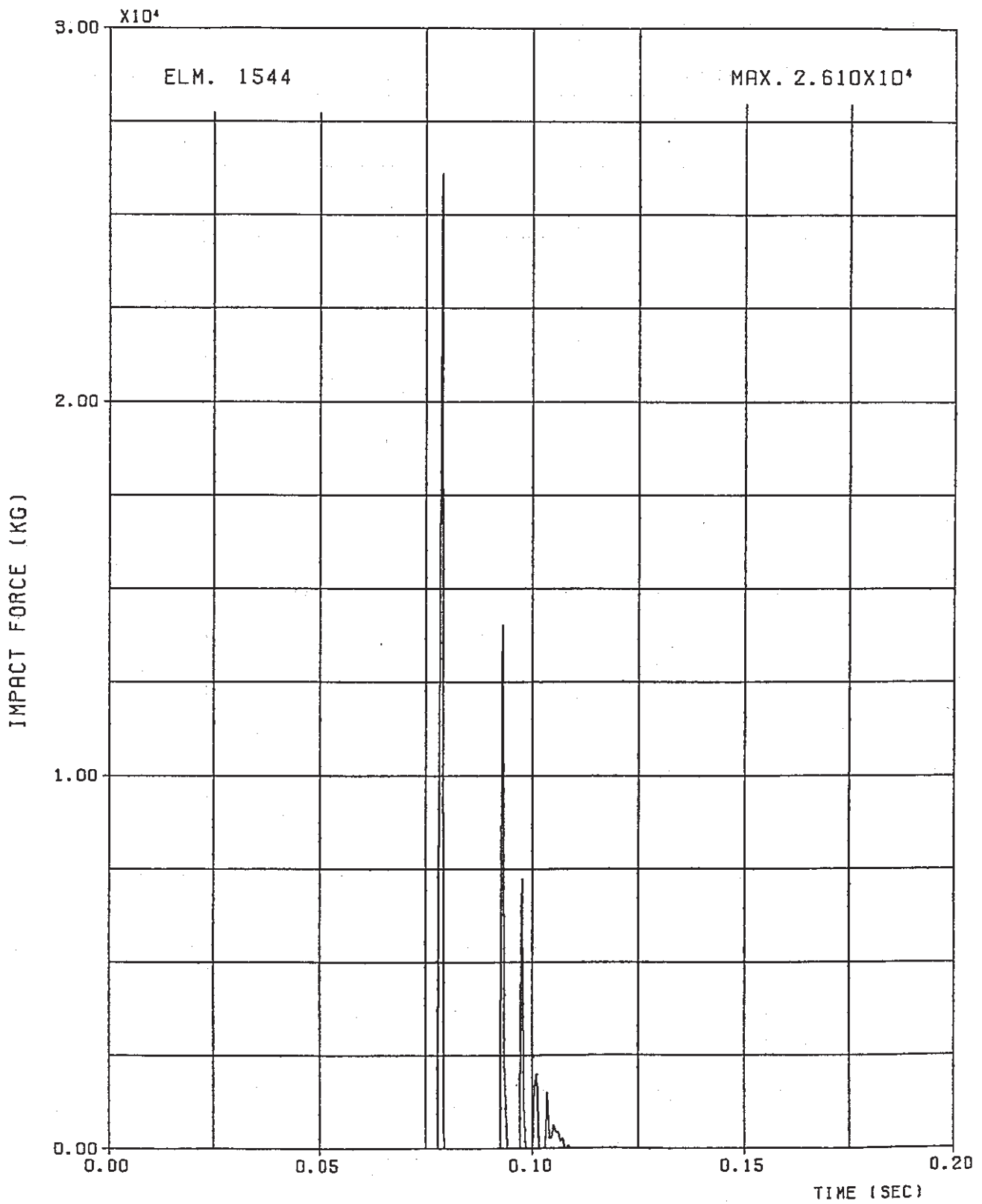


図 C - 6 ブランケット集合体の頂部パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)

N/S IMPACT ANALYSIS

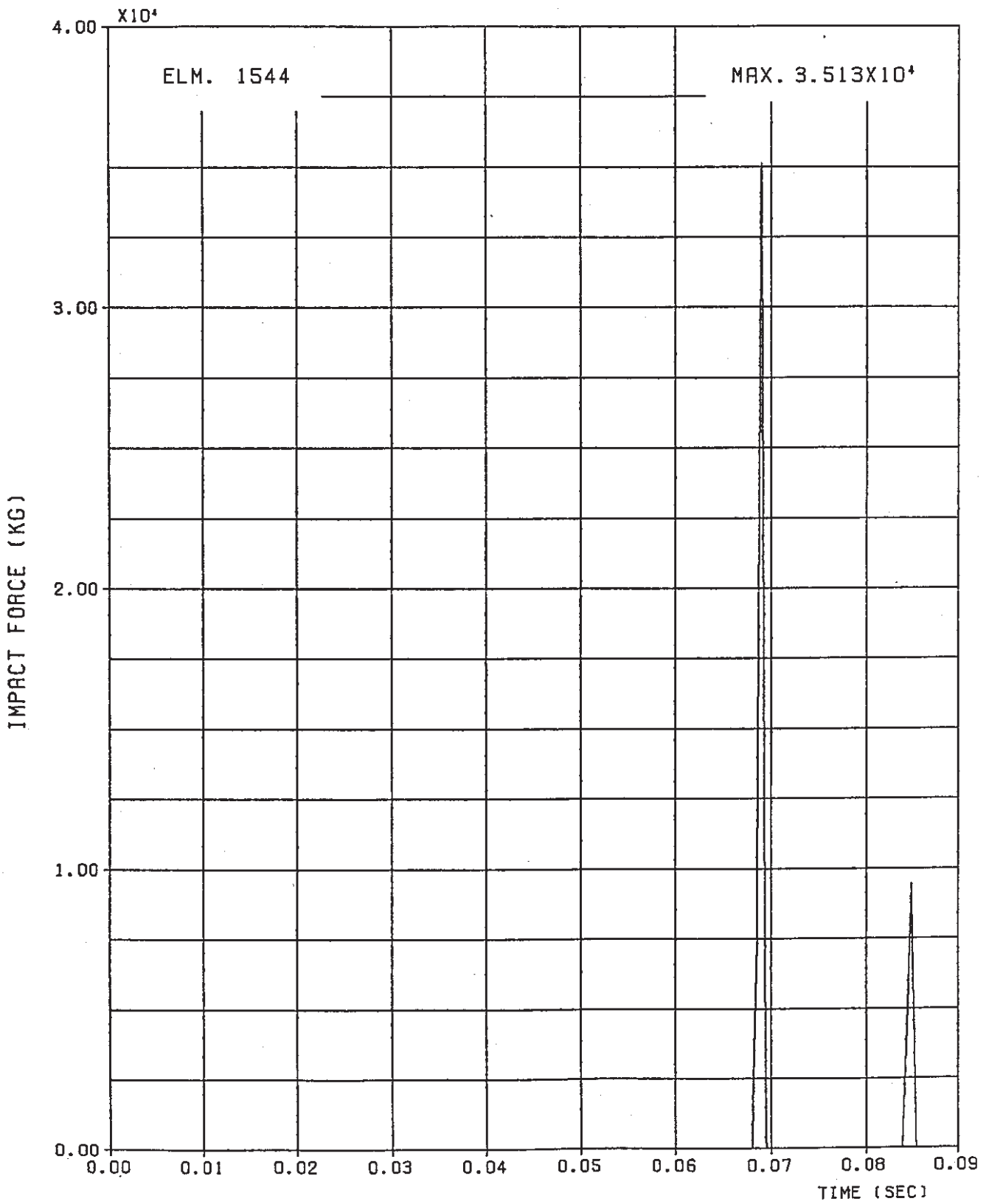
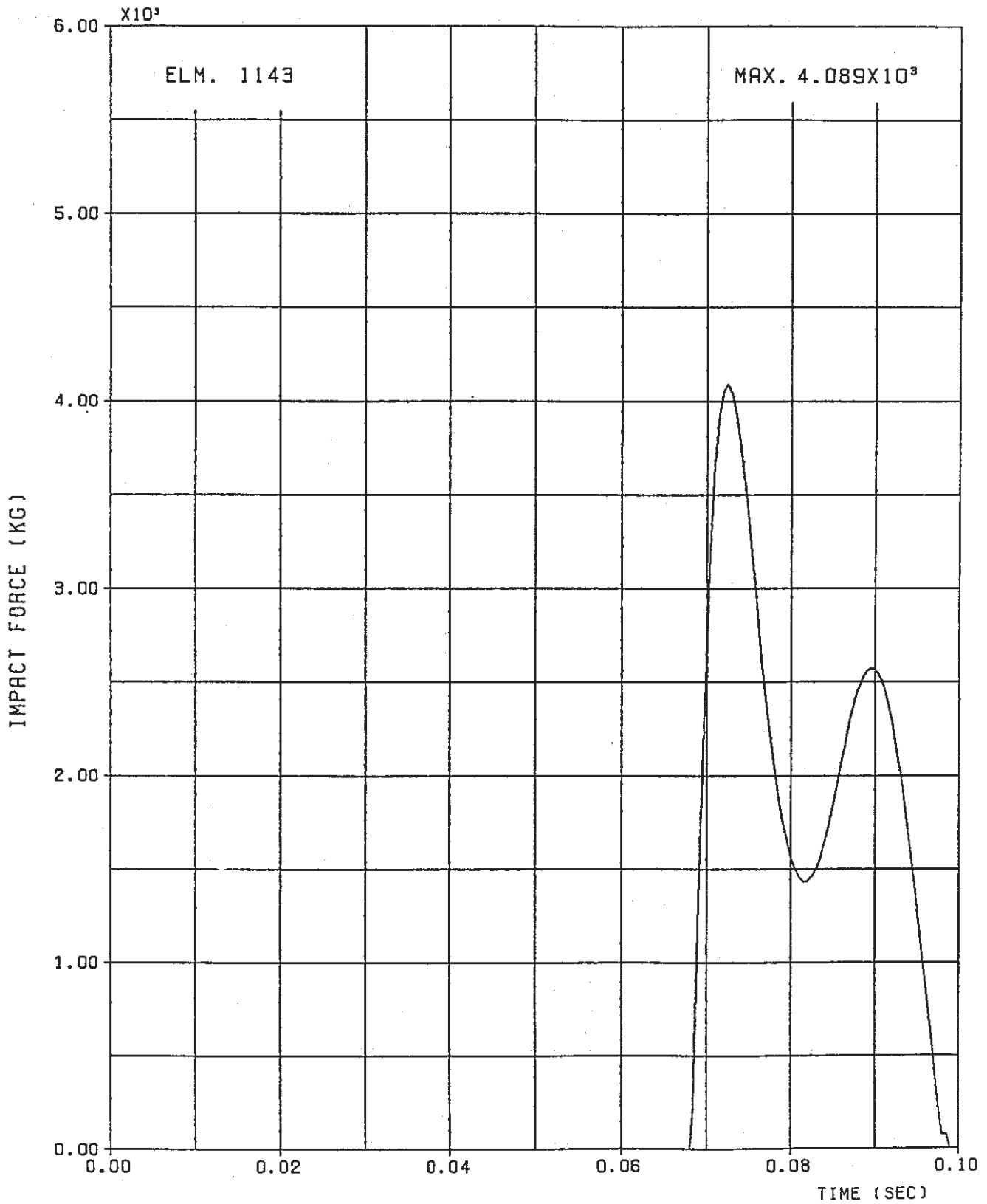


図 C - 7 中性子遮蔽体の頂部パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)

N/S IMPACT ANALYSIS



図C-8 中性子遮蔽体の中間パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)

C/R IMPACT ANALYSIS

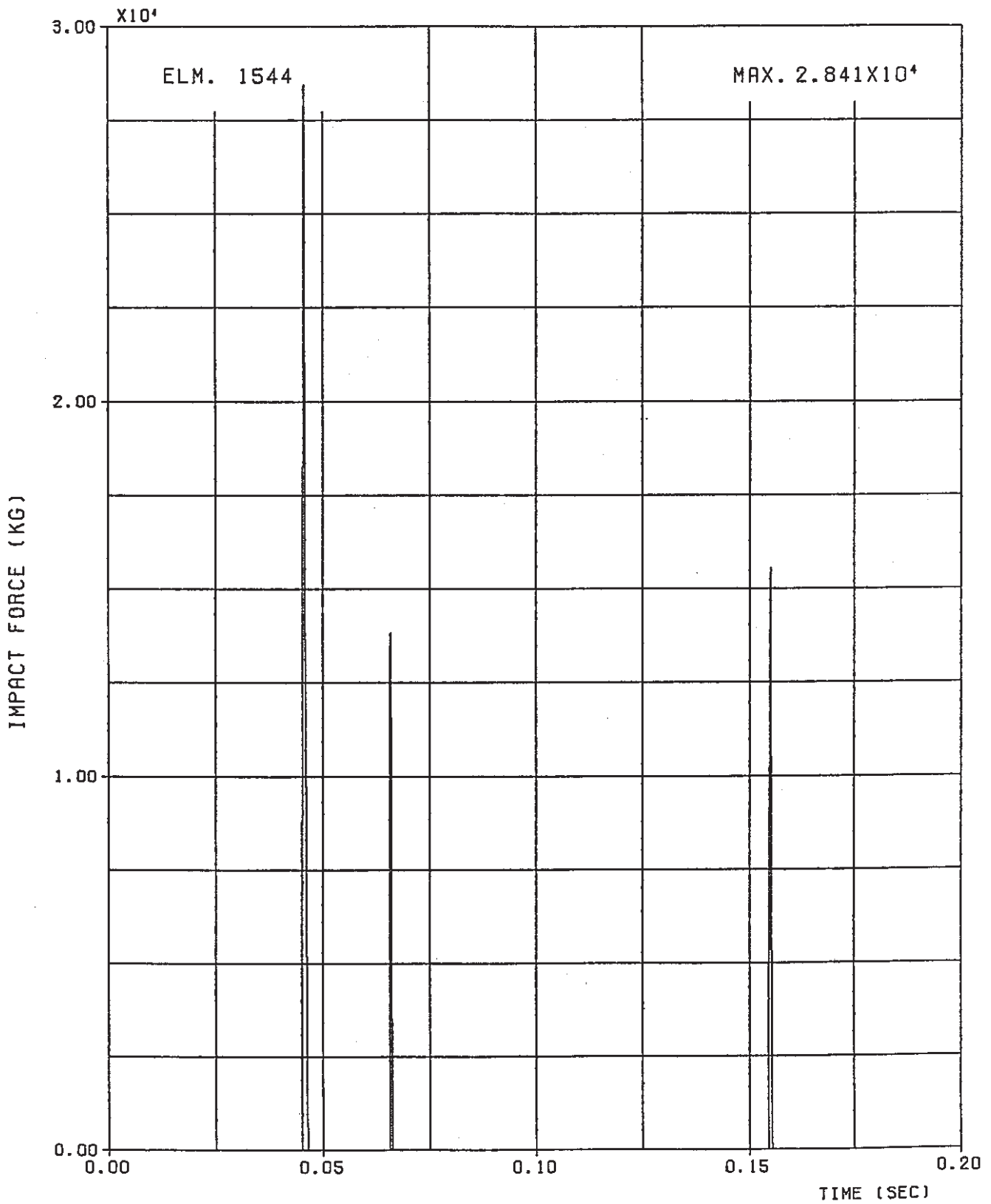


図 C - 9 制御棒頂部パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)

C/R IMPACT ANALYSIS

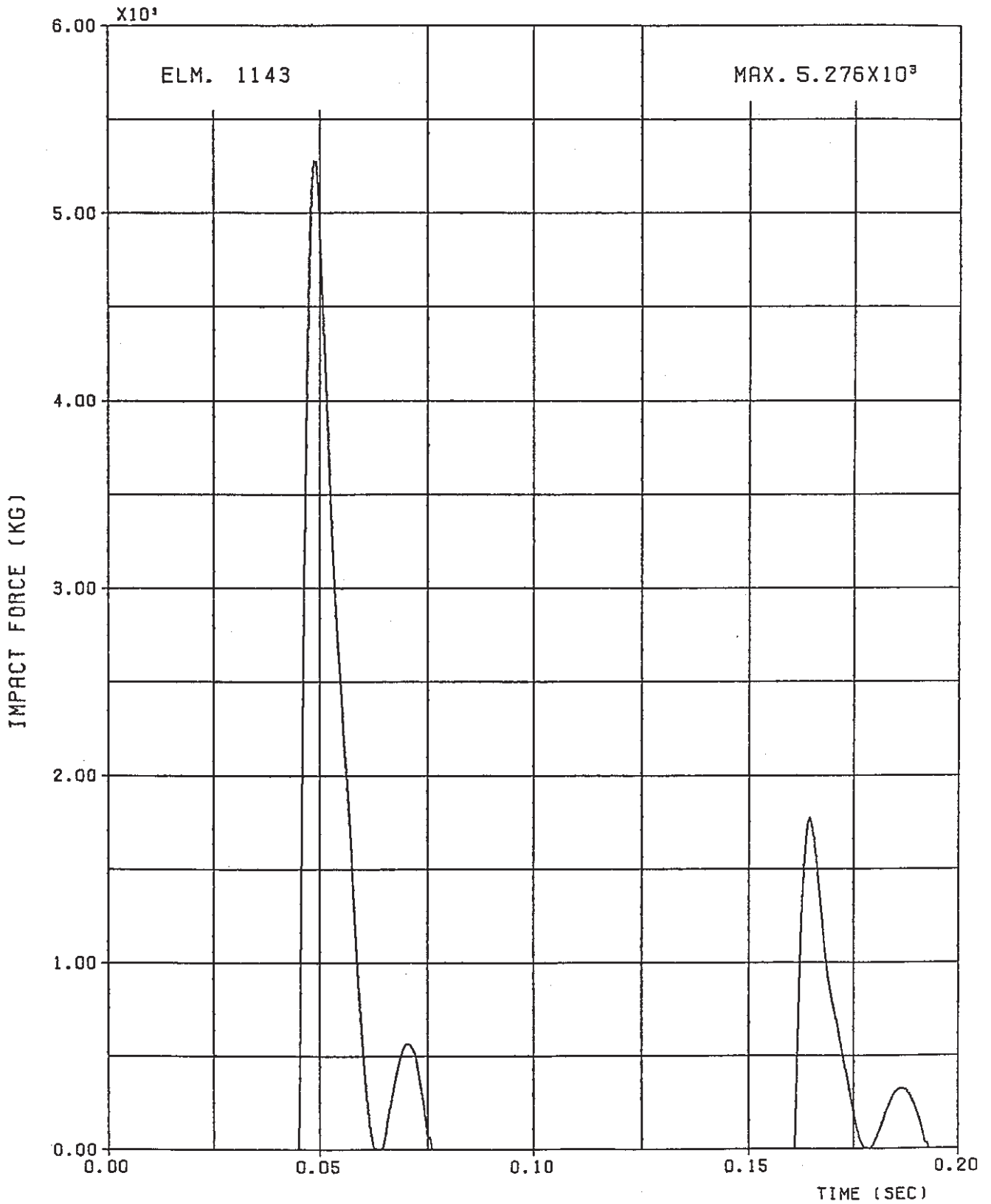


図 C - 10 制御棒中間パッドに生じる衝突力の時刻歴 (頂部変位100.0 mm)