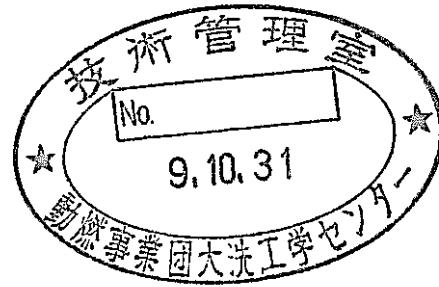


炉内音響検出試験実施のための音響伝播解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年3月



株式会社 東芝

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)

PNC-TJ9164 97-014

1997年 3月

炉内音響検出試験実施のための音響伝播解析

鈴木 健彦^{*1}、塩山 勉^{*1}

唐沢 博一^{*2}、小舞正文^{*2}

要 旨

高速増殖炉原子炉内ナトリウム中において沸騰音を検出するための炉内音響検出計の成立性を評価するために、音源重畠法を用いた解析コード(SOSUM)を用いて解析を実施した。

解析のモデルとして、燃料集合体・炉内構造物等のモデル化を行い、炉心中心からの沸騰音等の異常音の炉内伝播状態について、燃料集合体内中の音響伝播と燃料集合体からプレナム部音響計までの音響伝播の2段階に分けて解析を実施した。

解析の手順としては、まず音源をパルス波とした場合の評価検討を行い、解析の妥当性を確認した後、実際の異常音に近いと思われる白色雑音を音源とした場合の音響伝播について解析を行い、音響検出計の成立性について評価・検討を行った。

本解析結果により音波の減衰が 1/25000 であるものの、伝播により波形成分が保持されることから炉内音響計の実現が期待できることが分かった。

本報告書は、株式会社東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号 : 08C4702

事業団担当部課室および担当者 : 大洗工学センター 実験炉部技術課 鈴木 俊宏

*¹ : 株式会社 東芝 研究開発センター 機械・エネルギー研究所

*² : 株式会社 東芝 原子力事業部 動力炉開発部

PNC-TJ9164 97-014
MARCH 1997

Sound propagation analysis for in-vessel acoustic detection test

Takehiko Suzuki (*1), Tutomu Shioyama (*1)
Hirokazu Karasawa (*2), Masafumi Komai (*2)

Abstract

Feasibility of a in-vessel acoustic detection system which is used to detect boiling noise of sodium in a reactor vessel of FBR, was evaluated by means of SOSUM(Sound Source Super-imposed method) code.

The whole simulation model is consist of two steps. First one is the analysis of the sound propagation within the fuel assemblies. The second one is the analysis of the sound propagation from the fuel assemblies outlet to the acoustic detector installed in the upper plenum in Reactor.

First a pulse wave was used in the simulation of the sound propagation in order to confirm the adequacy of the simulation. The propagation of white noise, which is considered to be resemble to an actual boiling noise, was used as a sound source to evaluate and to extract subjects, the feasibility of the in-vessel acoustic detection system.

Based on a result of the analysis, pressure deceleration of the sound source is about 1/25000, and wave shape can be preserved after propagation. So it is expected that the in-vessel acoustic detection system will be feasible.

Work performed Toshiba Corporation under a contract with PNC (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation).

Contract No. :08C4702

PNC Liaison :Toshihiro Suzuki, Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division.

(*1) Research and Development Center, Toshiba Corporation.

(*2) Advanced Reactor Engineering Department, Toshiba Corporation.

目 次

1. まえがき	1
2. 検討目的及び条件	2
2.1 検討目的	2
2.2 検討条件	2
3. 音響伝播解析	12
3.1 音響伝播解析の説明	12
3.2 燃料集合体中の音響伝播シミュレーション	15
3.3 燃料集合体からプレナム部への音響伝播シミュレーション	31
3.4 音響伝播シミュレーション結果及び今後の方針	49
4. まとめ	50

謝 辞

1. まえがき

高速炉の原子炉容器内ナトリウム中において、燃料集合体で発生した沸騰音を検出し、原子炉の早期異常診断を行うことを目的とした炉内音響検出系を評価する手法として、音響伝播シミュレーションを用いて、「常陽」の原子炉内の音響伝播特性を解析的に検討した。その検討結果を踏まえて、異常音検知の可能性、システムの構築方法、検出方法、センサーの配置等の検討材料とする。

今回の検討では、燃料集合体内部に発生した音が、炉心上部に到達するまでの伝播経路の特性をわかりやすく評価するために、まず、燃料集合体内部にパルス音源があるものとして音響伝播の評価検討を行った。パルス音の伝播は、視覚的に評価しやすいことから、伝播経路の評価を等高線分布を用いたグラフで評価し、燃料ピンの有・無による音響伝播特性の差、減衰量等の確認を行った。

次に、実際の沸騰音に近いと思われる、ホワイトノイズ（最高周波数50KHz）を音源として用い、観測点位置で検出される音について伝達関数による評価を行い、沸騰音の検出の可能性について検討した。

以上の結果をもとに、炉内音響検出系の成立性の検討を行うとともに、課題の摘要を行った。

2. 検討目的及び条件

2.1 検討目的

燃料集合体の内部で発生した沸騰音を炉心上部のプレナム部に設置した音響検出器で計測出来るかどうかを音響伝播シミュレーションを用いて検討し、炉内音響検出系の成立性を検討することを目的とする。

2.2 検討条件

燃料集合体内部で発生した沸騰音が燃料集合体内部を伝播し、燃料集合体から炉心上部に放射され、熱遮蔽板で散乱されてから炉心上部プレナム部に到達することを考える。炉心上部のプレナム部での沸騰音を計測する場合の着眼点を以下に示す。

1) 伝播時の音の減衰

集合体内部から、受信点までの音の減衰を評価することが重要である。受信点での信号減衰があまりに大きいと、バックグラウンドノイズに埋もれて計測が困難となる。

2) 統計処理の適用性

音源信号の特徴の把握は、計測性能の向上を図る上で重要である。バックグラウンドノイズの特性評価についても検討する必要がある。

3) 炉内伝播のフィルタ特性

異常音に何等かの特徴があっても、伝播してくる過程で情報が失われる可能性があるため、異常音が集合体内部から観測点まで伝播におけるフィルター特性を把握することが重要である。

2) 項の問題に関しては、実機の炉内模擬試験により音源やバックグラウンドノイズを計測する必要があり、現時点では評価することは困難である。しかしながら、1) 項と3) 項の基本的特性を評価することが出来れば、その結果を用いて音響検出系の成立性の検討が可能となる。

ただし、成立性を評価するためには、音響伝播シミュレーションと同時に「常陽」炉内におけるバックグラウンドノイズの計測と音源の調査も重要である。

本報告では、1) 項と3) 項に着眼し、音響伝播シミュレーションを用いて以下の検討を実施した。

音響伝播シミュレーションは、次の二つのモデルに分かれる。最初のモデルは、①燃料集合体中の伝播で、二番目のモデルは、②燃料集合体からプレナム部への伝播の解析モデルである。この二つのモデルを音響シミュレーションコード(SOSUM:Sound Source Super-imposed Method)を用いて解析を行った。

図2-1に解析体系のモデルを示す。

燃料集合体内部の音響伝播シミュレーションは次のようなモデルとした。

①燃料集合体中の伝播モデル

- ・音源位置は燃料集合体の炉心中心レベルとした。また、音源位置が燃料最下端レベルの場合についても推定を行うものとした。
 - ・燃料ピンを考慮する場合と考慮しない場合の2ケースを実施し、比較を行う。燃料ピンを考慮する場合は、燃料ピンによる音響散乱を双極子によりモデル化した。燃料ピンを考慮した燃料集合体のモデルを図2-2に示す。

二番目の音響伝播シミュレーションは次のようなモデルである。

②燃料集合体出口部からプレナム部への伝播モデル

沸騰音源がある集合体の上部出口面から、炉心径方向に伝播する沸騰音音圧を計算した。モデルは、プレナム部の炉心上部構造として、上面に熱遮蔽板をあたえ、底面に多数の並んだ集合体の上部表面のエッジの反射面を考慮した二つの面に挟まれた領域を伝播する音圧を計算して、集合体出口から音響検出器までの音響伝播を解析を行った。エッジ部分は音波の反射に寄与する範囲だけモデル化した。

表2-1と表2-2に、シミュレーションの条件を示す。ここで音源の振幅は、(1)式に従い、音源を与えた位置での音圧値が1000Paとなるように音源面の加速度を定めた。

自由空間中に面から放射される加振面上の音圧は、面の一様な加速度を α としたとき、次の(1)式で加振面の音圧を与えた時の加振面の加速度を定めた。

ρ : 媒質密度 832kg/m^3

R : 音源面平均半径 5.73×10^{-4} m

P : 音压 1000Pa

$$\alpha : \text{音源面加速度} \quad \alpha = \frac{P}{\rho R}$$

以下に計算に用いた幾何学的体系を示す。

- ・炉心上部構造物のモデル：図2-3を参照。
 - ・熱遮蔽板のメッシュ図：図2-4(a),(b)を参照。
 - ・多数並んだ燃料集合体の上部エッジ部を模擬したメッシュ図：図2-5(a),(b)を参照。
 - ・燃料集合体のモデル図：図2-6を参照。
 - ・燃料集合体のメッシュ図：図2-7を参照。
 - ・燃料集合体内部の音源位置のモデル図：図2-8を参照。
 - ・燃料集合体内部にある燃料ピンのモデル図：図2-9を参照。

以上の条件の下でのシミュレーション結果を次の節で示す。

表2-1 パルス波を音源としたシミュレーション

項目	値
媒質	Na
媒質密度	8 3 2 [kg/m ³]
音速	2 3 1 5 [m/s]
サンプリング周波数	2 0 0 [KHz]
音源の波形	パルス波（1パルス）
音源の周波数	2 5 [KHz]
音源の振幅	1 0 1 5 . 1 5 [m/s ²]
燃料ピンモデル	有 無

表2-2 連続波を音源としたシミュレーション

項目	値
媒質	Na
媒質密度	8 3 2 [kg/m ³]
音速	2 3 1 5 [m/s]
サンプリング周波数	2 0 0 [KHz]
音源の波形	連続波（ホワイトノイズ）
音源の周波数	最高50[KHz]
音源の振幅	1 0 1 5 . 1 5 [m/s ²]
燃料ピンモデル	有 無

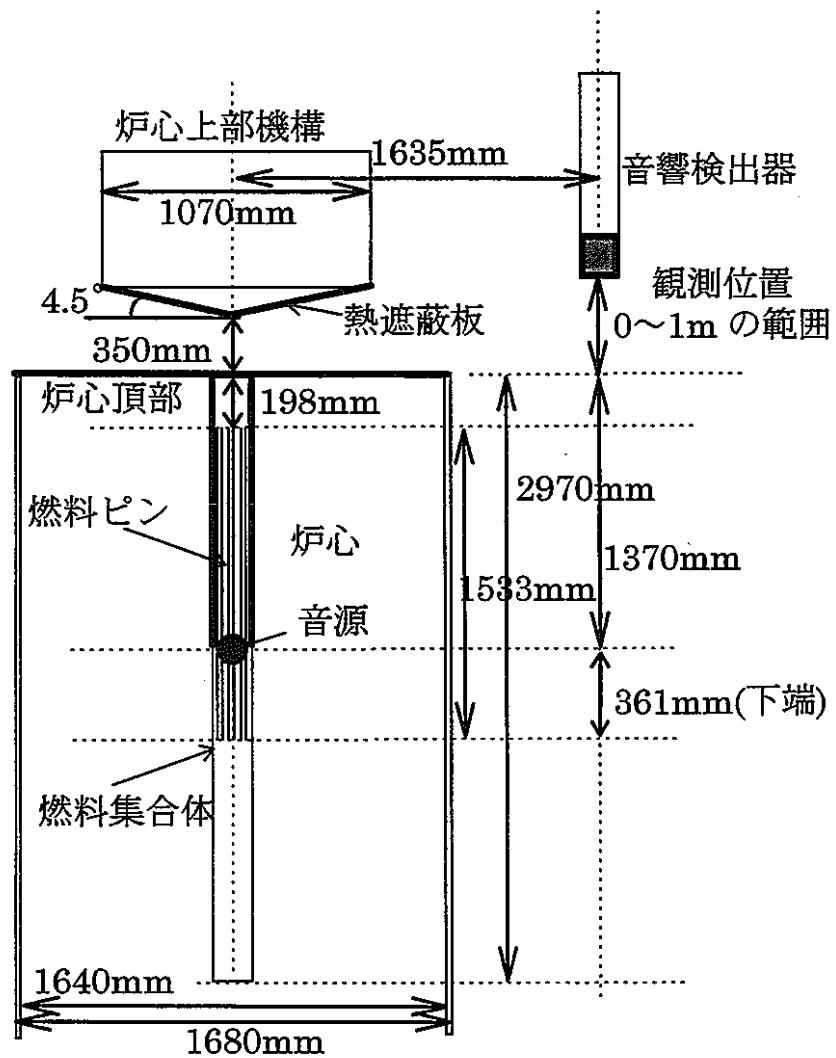


図 2-1 解析体系

解析モデルの範囲：図中の太線  で示された、燃料集合体と炉心頂部、熱遮蔽板、及び音響センサの部分を解析モデルの範囲とする。

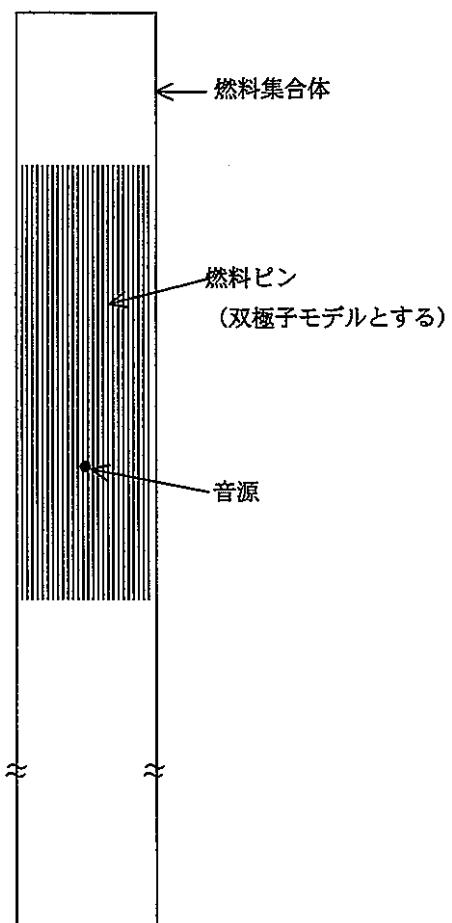


図 2-2 燃料集合体内の解析モデル

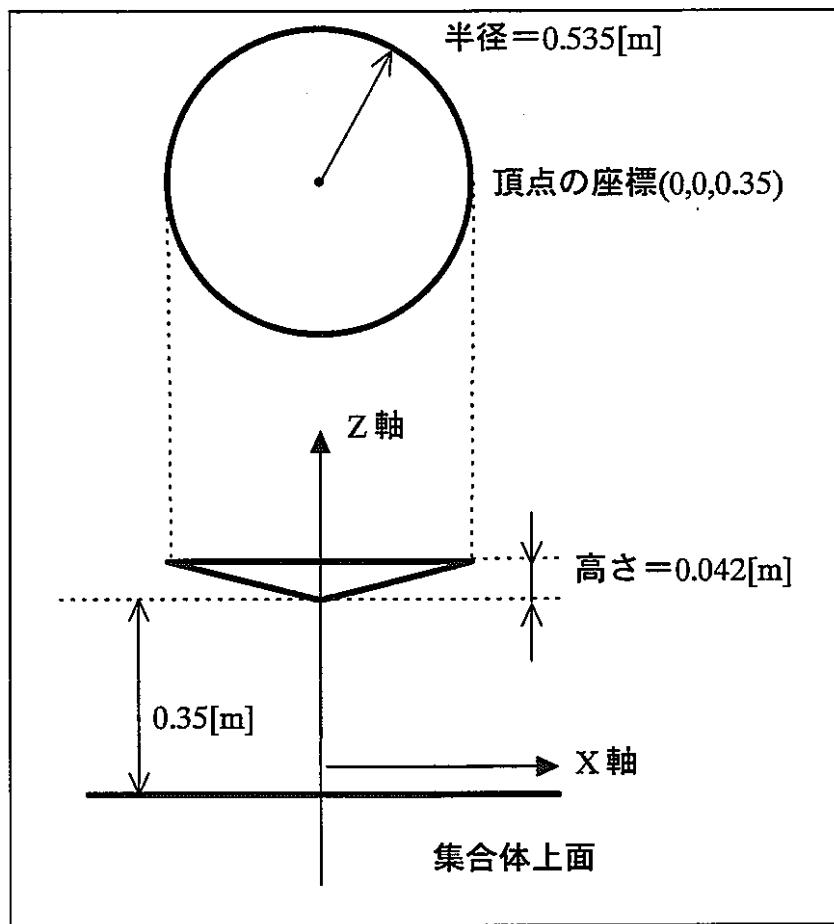
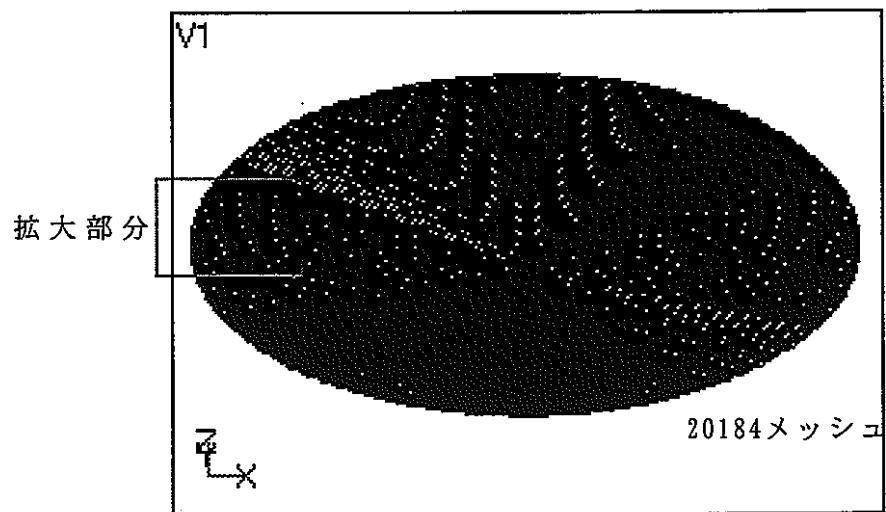
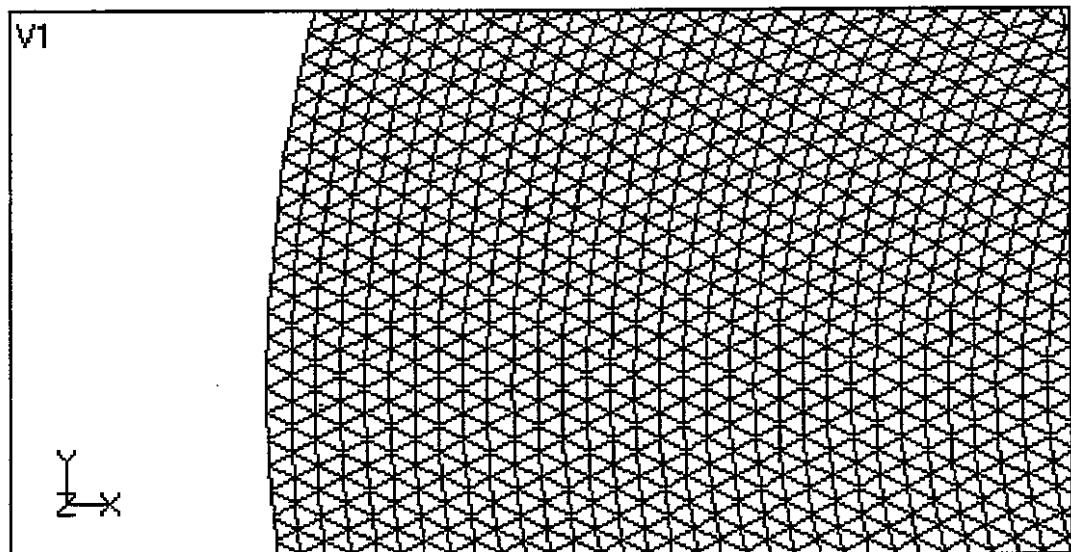


図2-3 热遮蔽板のモデル

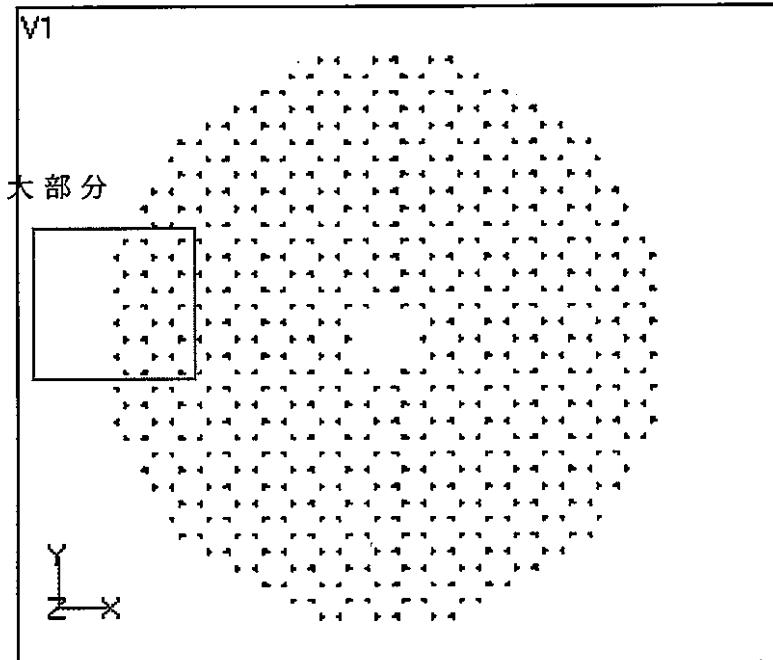


(a) 热遮蔽板のメッシュ

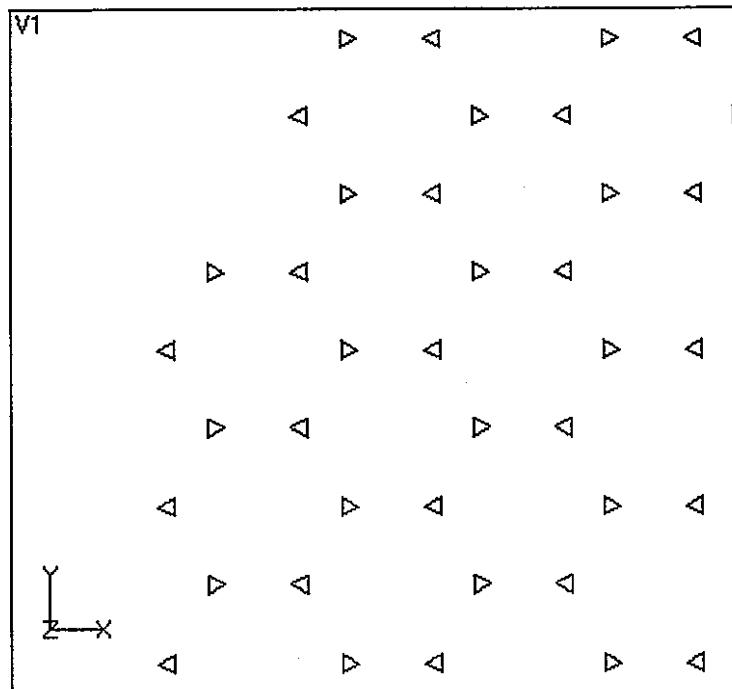


(b) 热遮蔽板のメッシュ拡大図

図2-4 热遮蔽板のメッシュ図
(1メッシュは一辺が46.3mmの三角形)



(a) 集合体上部のメッシュ (558メッシュ)



(b) 集合体上部のメッシュ拡大図

図2-5 集合体上部のメッシュ図

(1 メッシュは 1 辺が 46.3mm の三角形)

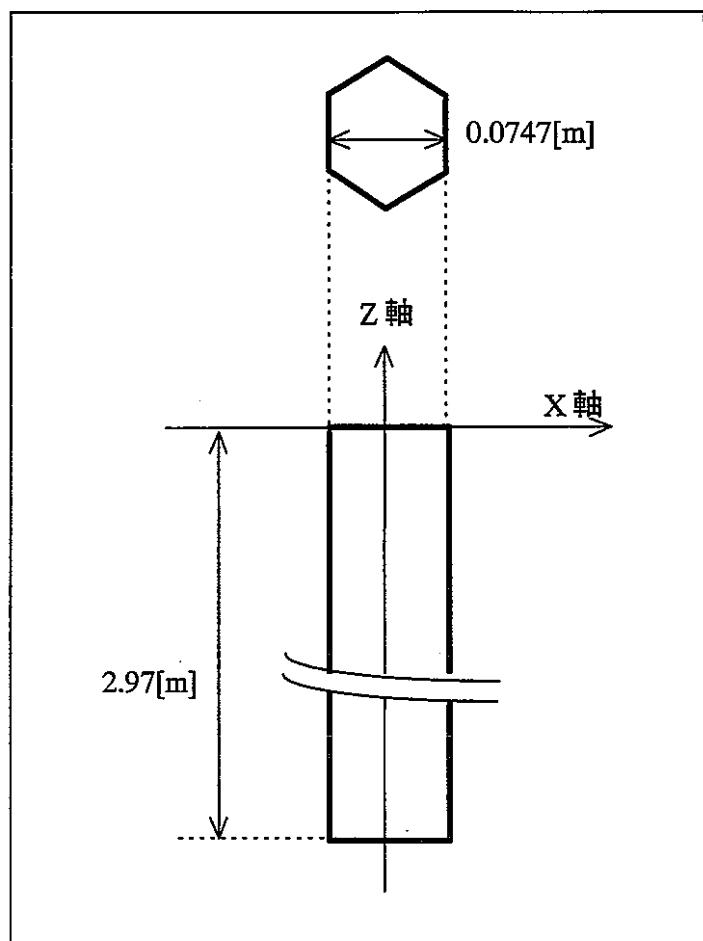


図2-6 燃料集合体のモデル

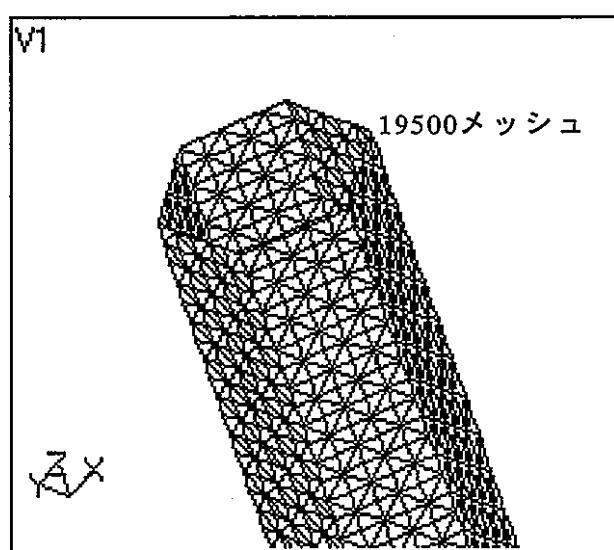


図2-7 燃料集合体上部のメッシュ
(1メッシュは1辺が46.3mmの三角形)

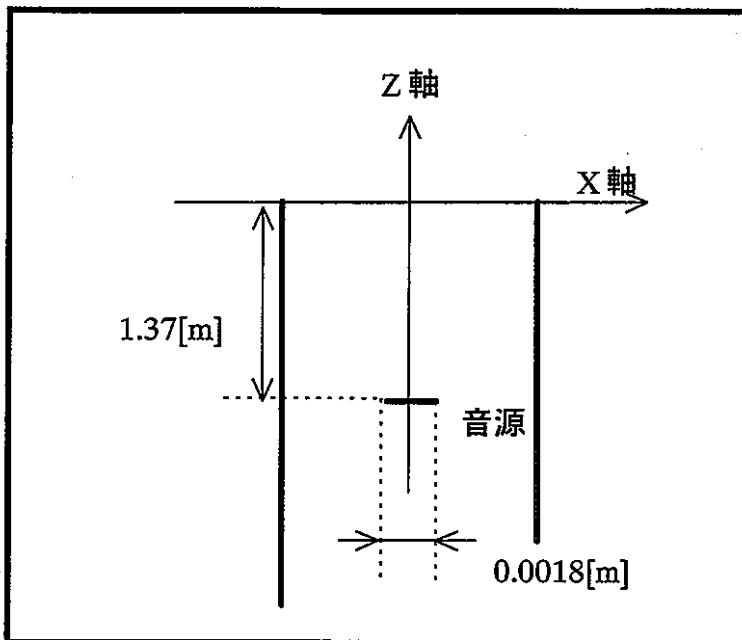


図2-8 音源の形状モデル
(音源のサイズは1辺が約1mmの正方形とした)

3. 音響伝播解析

3.1 音響伝播解析の説明

音響伝播シミュレーションには、音源重畠法を用いた解析コード（SOSUM）を用いて解析を行った。重畠法音源重畠法の原理を以下に示す。

一般的に知られている様に、音波は減衰の無い均一の媒質場では、その波形をくずさず、一定速度で伝わる。点音源からの放射の場合その波形は

$$P(\vec{r}, t) = \frac{f(\vec{r} - ct)}{|\vec{r}|}$$

と表せる。また、一般的に面からの放射音源を考えると下記の様になる。

$$P(\vec{r}, t) = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \int d\vec{s}' \frac{V_n(|\vec{r} - \vec{r}'| - c(t - t'))}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

ここで V_n を面の垂直方向速度として他に音源が何もないとき、この式は正確な平面からの音の放射特性を示している。そこで実際の問題にこの式を当てはめる事を考える。現実の問題に於いては、多数の音源及び境界条件から定まる反射面に依ってモデルが構成されている。そこで音源を含むすべての境界面を図3.1-1に示すように微小分割する。微小分割する面の大きさを、伝播してそこに到着する音波の波長より充分小さくすることにより、微小分割された境界面に到着する音波の音圧はほとんど一様と見なせる。音響伝播シミュレーションでは、すべての微小分割された境界面要素各々が、次のような音波を放射していると仮定する。

$$P(\vec{r}, t) = \sum_n P_n(\vec{r}, t)$$

$$P_n(\vec{r}, t) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_n d\vec{s}_n \frac{f_n(|\vec{r} - \vec{r}'| - c(t - t'))}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

ここで、 f は境界条件から定まる強度を持つ単位体積あたりの力を示している。また r は、音波の届いた位置を示し、 r' は音源を与えた微小境界面内の位置を示している。

次に境界条件から、 f を次のように定める。

a. 速度境界条件

実際に計測する事が出来る速度 U が与えられた境界面 $r' j$ を考える。

この面から放射される、音圧を $P_{r' j}$ とする。さらに、他のすべての微小境界要素からその面に入射してくる、音波の音圧を $P_{i' j}$ とする。 $P_{i' j}$ は、 $r' i$ の要素面以外のすべての要素面から放射されて $r' i$ の要素面に到達する音圧の和として表せる。

$$\left. \frac{\partial U}{\partial t} \right|_{\vec{r} = \vec{r}_j} = -\frac{1}{\rho_0 \partial Z} P_r(\vec{r}, t) - \frac{1}{\rho_0 \partial Z} P_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} = \vec{r}_j}$$

この入射音圧と、その面から放射する音圧の和の速度成分が、その境界面の実際に計測される、速度と一致しなければならないから

$$\frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} = - \frac{\partial V_j(\vec{r}-\vec{r}_j) - c(t-t')}{\rho_0 \partial Z} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} - \sum_n \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_i(\vec{r}, t)}{\partial Z} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j}$$

という、境界値方程式を得る。特に剛体壁（完全反射）の時は $U=0$ である。

b. 音圧境界条件

水中を伝播する音波が、気体と接触するような境界条件を考えると、a項と同じように P_i' をある微小境界面に入射してくる音圧とし、 P_r' をその面から放射する音圧とすると、その微小境界面での境界条件は気体の圧力を P とすると以下のように表すことができる。

$$P \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} = P(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j} + P_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j}$$

$$P_r(\vec{r}, t) = \int d\vec{s}'_j \int \frac{f_j(\vec{r}-\vec{r}_j) - c(t-t')}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \cdot \frac{\partial}{\partial Z} \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_j}$$

$$= f_j(t-t')$$

c. 任意インピーダンス Z を与えた境界条件

一般的な境界条件として、任意の音響インピーダンスを与えた境界を考えた場合、この境界では、その境界面上で平面波入射に対する、全音圧と、全速度との比が与えら得れる。それを実際の任意入射波について解き直すと下記のようになる。

$$f(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int d\omega \int d\vec{k}_s \frac{e^{i\vec{k}_s \cdot \vec{s} - i\omega t} P_i(\vec{k}_s, \omega) \left(1 - i \frac{k_z}{\rho_0} Z(\vec{k}_s, \omega) \right)}{\left(1 + i \omega \frac{k_z}{\rho_0} Z(\vec{k}_s, \omega) \right)}$$

以上のように、すべての微小境界要素一つ一つに、その各々の境界条件を与えて、単位体積あたりの力の強さ f をその境界値方程式から定めれば、任意位置の音圧は次の式から求める事ができる。

$$P(\vec{r}, t) = \sum_n P_n(\vec{r}, t)$$

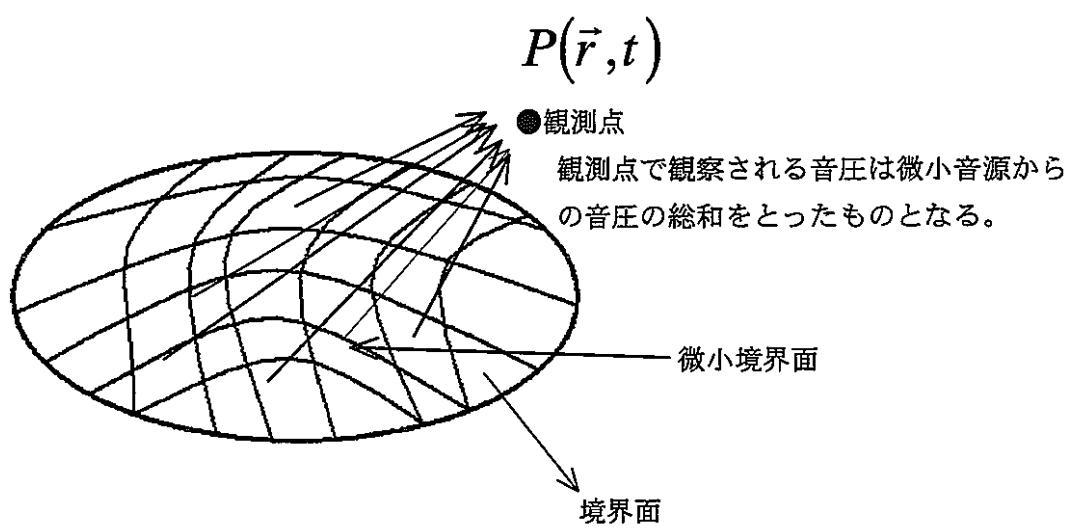


図3.1-1 微小境界面の概念

3.2 燃料集合体中の音響伝播シミュレーション

(1) 音源がパルス波・燃料ピン無しの時の音響伝播シミュレーション

最初に音源としてパルス波を与えたときの音響伝播シミュレーション結果を示す。図3.2-1に音源位置に与えたパルス波の加速度値を示す。図3.2-2に燃料集合体中の音源位置に与えたパルス波が球面状に広がって、燃料集合体壁面で散乱される様子を示す。図3.2-3は、音源位置から343mm上で音源に比較的近い燃料集合体中心軸上の音圧値を示している。波形を見ると最初にパルスの先端が到達し、続いて幾つかの小さなピーク波形が連続していることがわかる。この連続した小さなピーク波形は音源から放射されたパルスが燃料集合体壁面で多重散乱されて中心部に戻されている様子を示している。

図3.2-4にパルス波が燃料集合体出口付近まで伝播してきた様子を等高線分布で示す。燃料集合体の内壁面による多重散乱の結果、波面は平面波となつて伝播していることがわかる。波形は平面波に対応したパルス波となって、平面波以外の成分は伝播していないことがわかる。図3.2-5は、燃料集合体出口部中心軸上の音圧値を示している。図3.2-3の音源近傍の音圧と図3.2-5の集合体出口部の音圧振幅を比較すると、音源近くの音圧値に比べて、出口の音圧値の振幅は半分程度に減衰している。

また、単純に点音源とした音源表面の音圧値と、平面波で到達した燃料集合体出口での音圧値とを比較すると、 $1/250$ に小さくなっている。

(2) 音源がパルス波・燃料ピンありの時の音響伝播シミュレーション

次に燃料集合体内部に燃料ピンが入った場合の音の伝播を示す。図3.2-6に図3.2-1で示した音源を燃料ピンの入った燃料集合体に与えたとき、燃料集合体壁面で音波が散乱される様子を示す。図3.2-7には、音源位置に比較的近い音源から343mm上の音圧値を表示している。図3.2-8には、パルス波が燃料集合体出口に到達した音圧分布を示している。図3.2-9は、燃料集合体出口の中心部での音圧値を示している。

以上の結果から、燃料ピン有り無しの比較を行う。図3.2-2と図3.2-6、及び図3.2-4と図3.2-8の等高線分布で見るかぎり、圧力の伝播方向がピンに沿っていることもあるって、ピンの有り無しに大きな違いはない。ピンの影響は細かいところに現れている。例えば、図3.2-3と図3.2-7を比較すると、ピンが入っている方が少し振幅は小さくなり、パルス幅が広がる。また球面上に広がった音波が壁面で散乱して生じる音圧の高調波成分 [パルス波の上に乗った多数のピーク] が減少している。パルスの振幅が小さくなつて、パルス幅が広がる理由は、ピンで散乱された波が少し遅れるからである。また壁面の散乱の影響が減るのは、音源から燃料集合体壁面に向かって進む波は、ピンを横切らねばならず、その結果反射波が緩和されるからである。図3.2-5と図3.2-9では出口部の音圧の比較となっている。ここで見ても燃料ピンの影響は、音源から出口に向かってくる波に対して、振幅を少し低くし、パルス幅を広く

する効果となっている。しかし全体的に見てピンの有り無しの影響は少ないといえる。

(3) 音源が白色雑音の時の音響伝播シミュレーション

図3.2-10に音源部に与えた白色雑音を示す。図3.2-11は燃料集合体出口に到達した白色雑音を音源とした音圧値である。音源部に与えた白色雑音音圧値のうち空間的に平面波成分だけが出口部に到達したことを示している。

図3.2-12に燃料集合体出口部の中心に到達した音圧値を示す。図3.2-10の音源波形と比較すると、パルスと同じように振幅は1/250になっている。

図3.2-2に示す音源近傍の領域では、点音源から放射された音が、燃料集合体の内壁面に到達するまで、波面が球面で広がり音圧振幅値が急速に減衰する。ここでの振幅の減衰は、音源となる面の大きさに大きく依存しており、点音源に近ければ近いほど減衰は大きくなる。現在のモデルでは音源の大きさを約 1mm^2 としており、この領域で振幅値は1/100になっている。

次の領域では、燃料集合体の内壁面に到達した波が、壁面で反射されて、平面波となり、音源位置から、燃料集合体出口部へ伝播していく領域である。解析結果により、この領域では音の減衰はほとんどない(1/2程度)ことが分かった。

以上の結果をまとめると以下のようになる。

燃料集合体内部にあるピンの存在は、音波の波面が音源から出口に向かってピンに沿って伝播して行くときは何の影響も無い。影響が出るのは音源から出た波面が、燃料ピンを横切って燃料集合体壁面に向かう過程で起こる。波面が燃料ピンに散乱される結果、振幅は小さくなり、パルス幅が広がって残響となる。しかし、波長に比較してピンが細いことからその影響は数%程度で、むしろ影響が無いといった方が正しいであろう。

その結果、燃料ピンの存在の有無に関わらず、音源から燃料集合体出口に到達するまでに、音圧の振幅値は1/250に減衰する。

図3.2-13に音源から燃料集合体出口部まで伝播する白色雑音の伝達関数を示す。音源が点音源であるため、音が球面状に広がり燃料集合体壁面で散乱され平面波に変換される。そのため、音源から出口部までの伝達関数はローパスフィルターとなつている。

(4) 壁面からの沸騰音の透過量評価

次に燃料集合体中を音波が伝播してくるとき、燃料集合体壁面から音波がどの程度漏れ出すかを見積もる。燃料集合体内部を音波が平面波が伝播するとき、燃料集合体壁面から外部に音が透過するためには、燃料集合体壁面が内部の音圧値に応じて膨らんだり、縮んだりする必要がある。しかし配管形状の燃料集合体は膨張収縮には非常に強い。その為音は外部に漏れにくい。実際その値を見積もると、透過率を TL とすると

$$TL = \frac{2}{1 + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1}} = 0.096 \quad (2)$$

ここで	ρ_1	：ナトリウム密度	832kg/m ³
	C_1	：ナトリウム音速	2315m/s
	ρ_2	SUS密度	8000kg/m ³
	C_2	SUS音速	5000m/s

となる。即ち、透過量は5%程度であり、このため集合体の径方向へは沸騰音が伝播する量は極めて少なく無視して良いことがわかる。

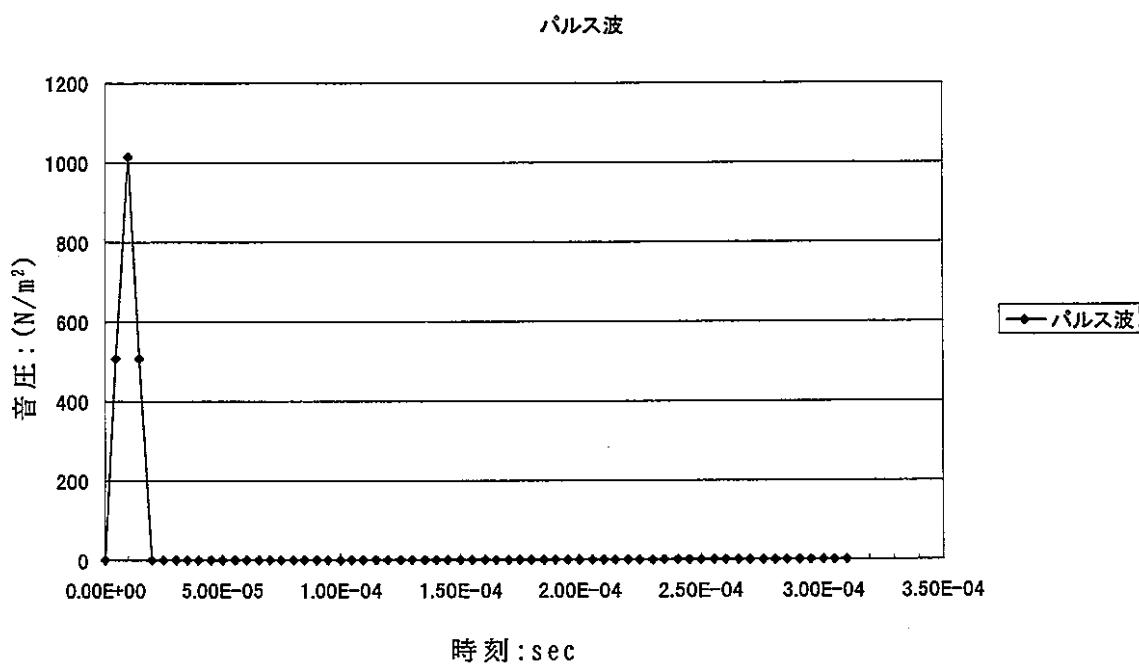


図 3.2-1 音源面の音圧値が1000Paになるように音源面に与えた加速度波形

幅 0.0747

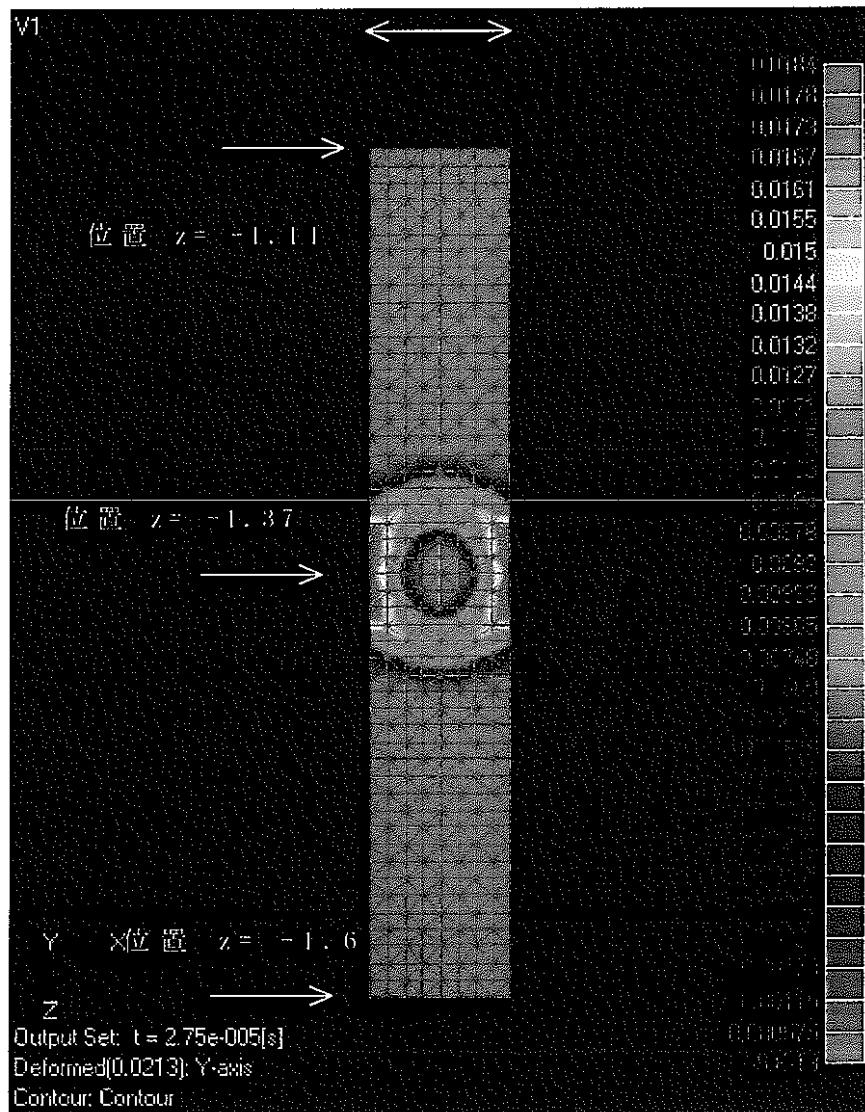


図3.2-2 燃料集合体中の音響伝播

パルス波発生から0.0275msec後

注:位置 z は燃料集合体頂部を0mmとする。

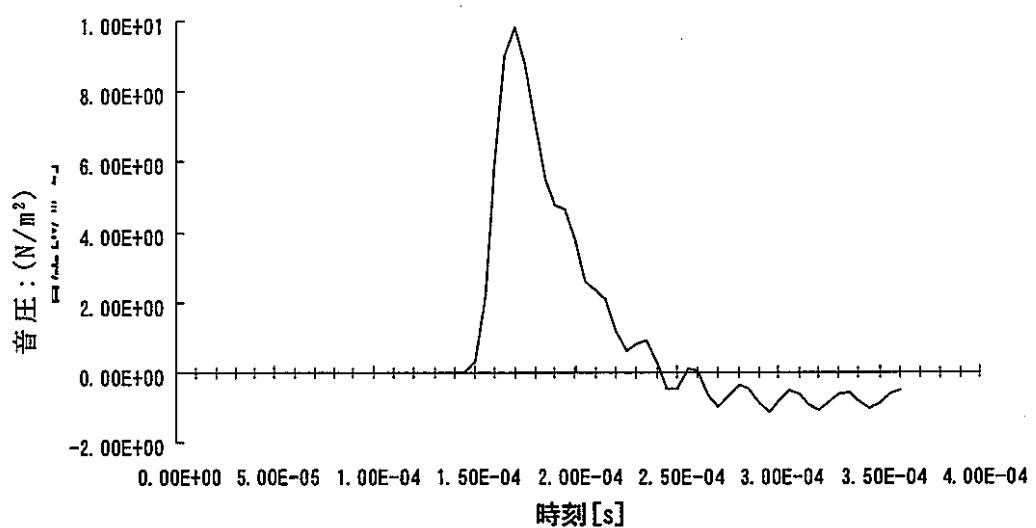
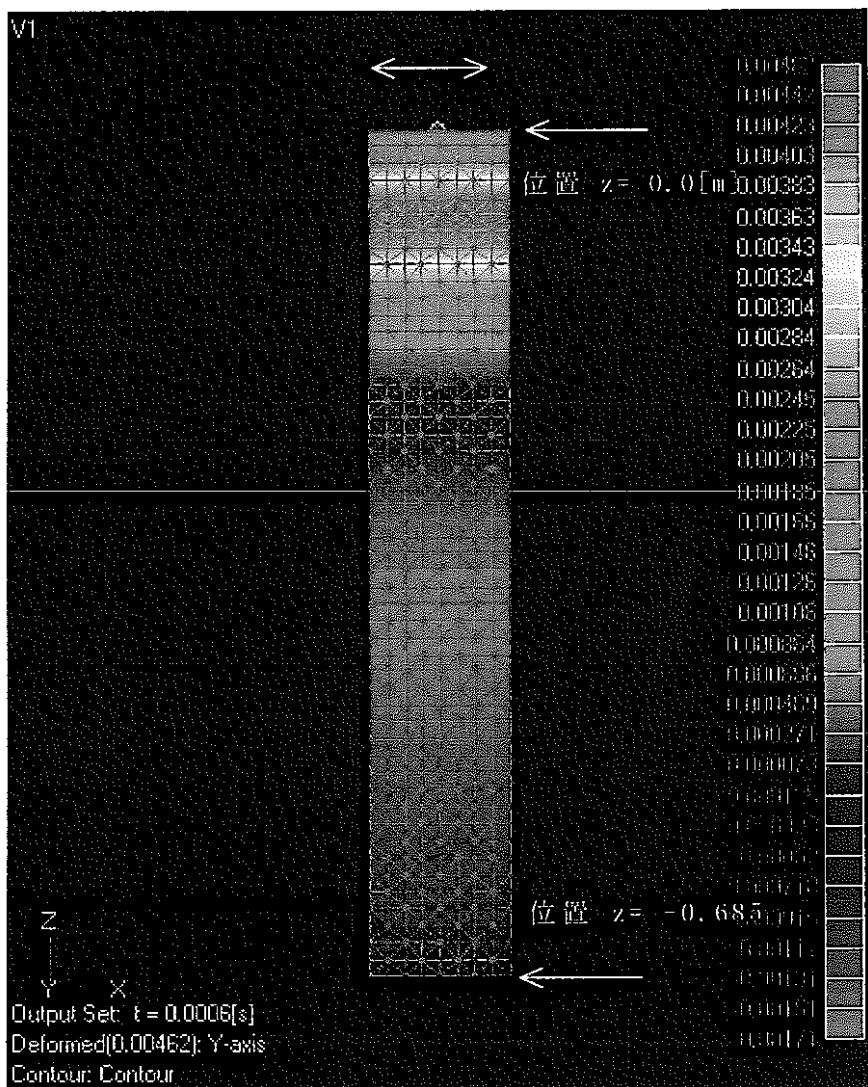


図3.2-3 燃料集合体内部の中心軸上音圧波形
(音源位置から343mm上部、燃料ピン無し)

幅 0.0747



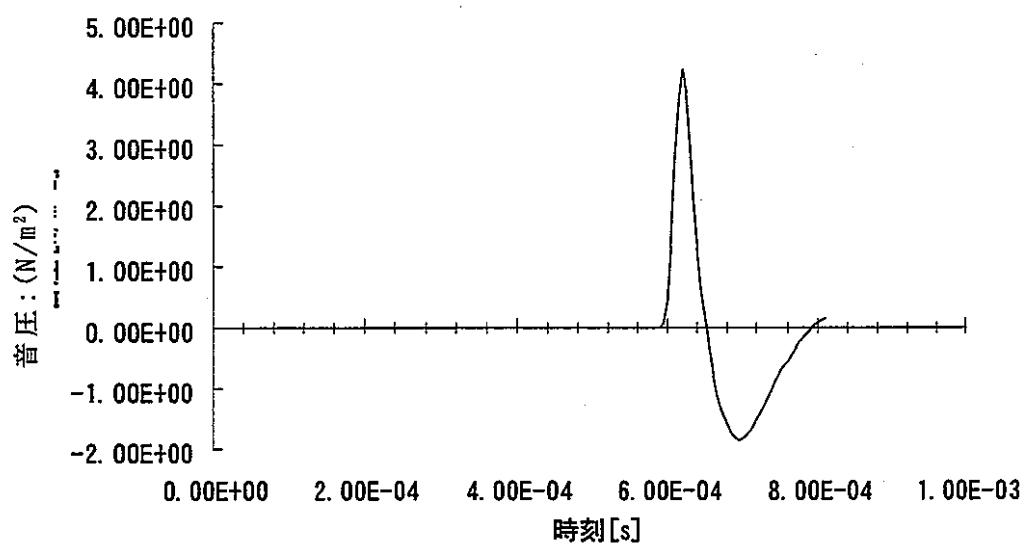


図3.2-5 燃料集合体出口部付近での中心軸上の音圧波形
(燃料集合体出口、燃料ピン無し)

幅 0.0747 [m]

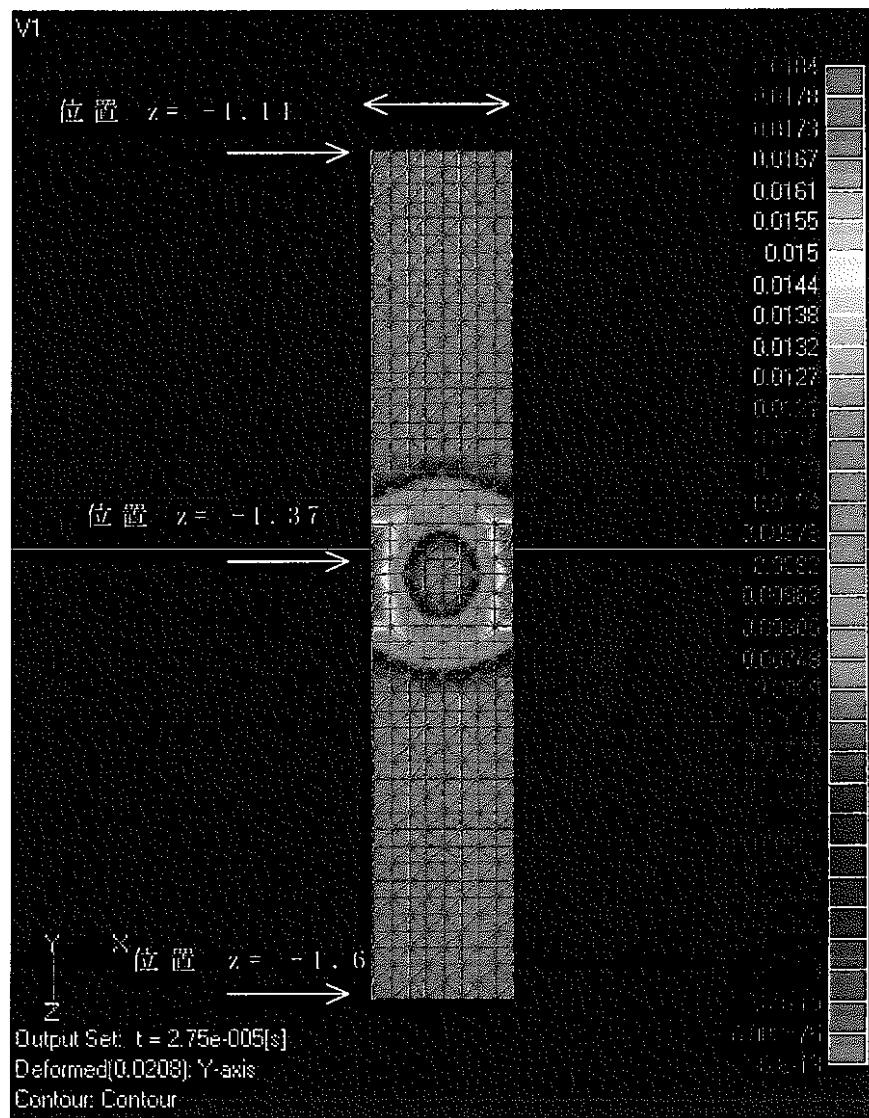


図 3.2-6 燃料集合体中の音響伝播

パルス波発生から 0.0275 msec 後

注: 位置 z は燃料集合体頂部を 0mm とする。

燃料集合体内部には燃料ピンが入っている。

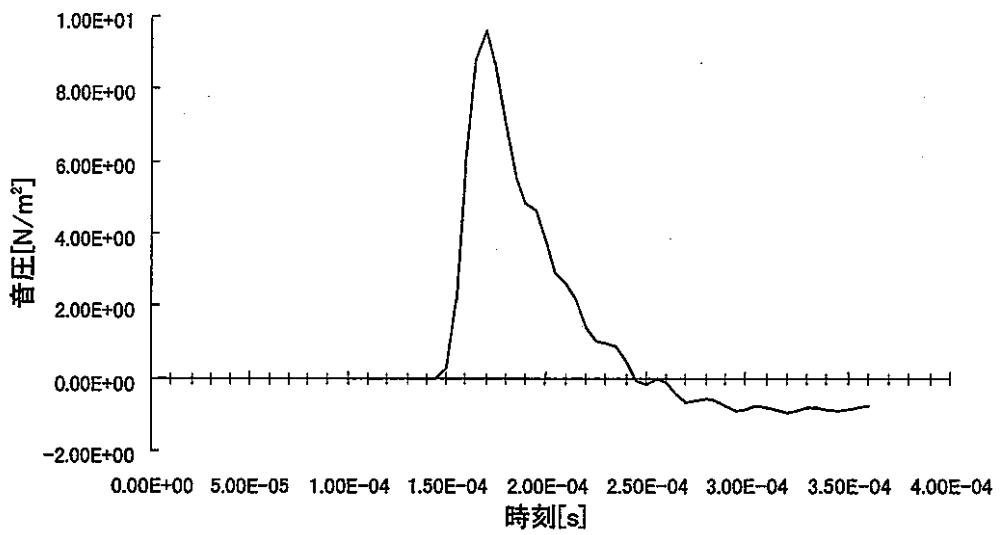


図3.2-7 燃料集合体内部の中心軸上音圧波形
(音源位置から343mm上部、燃料ピン有り)

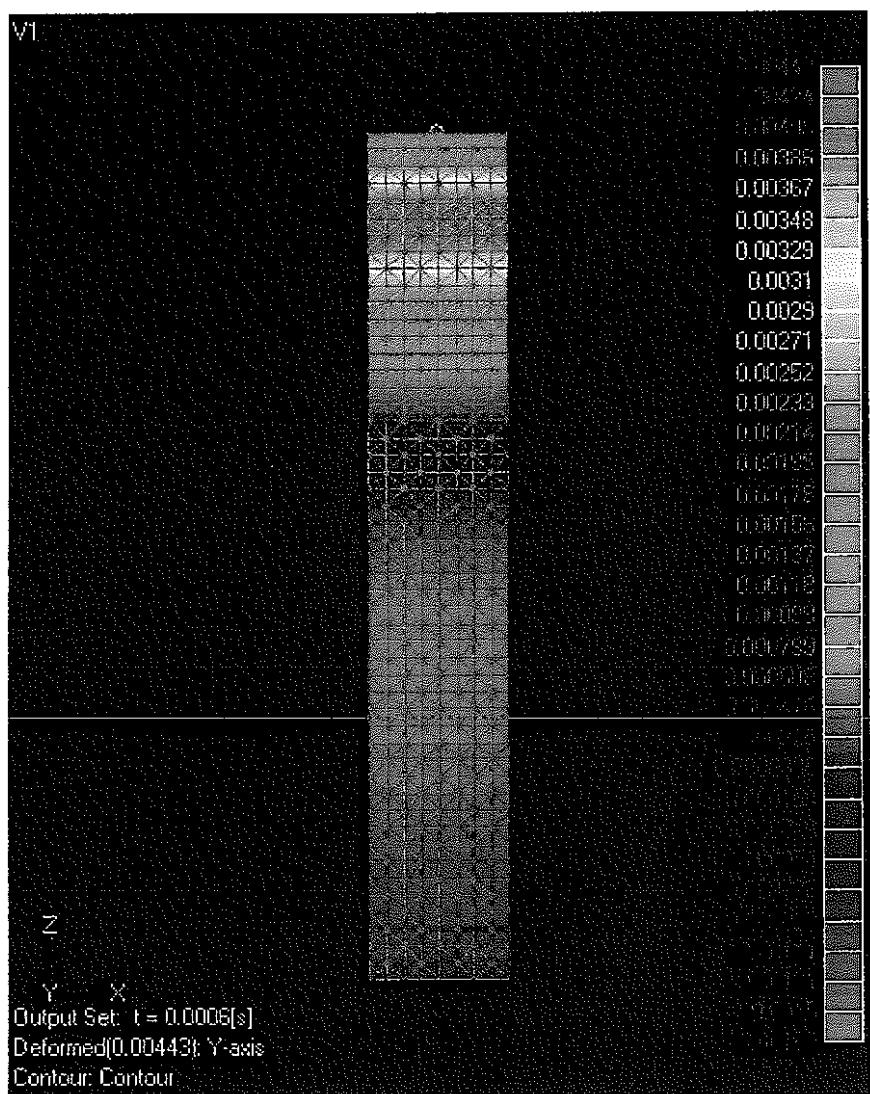


図3.2-8 燃料集合体中の音響伝播

パルス波発生から0.06msec後

注:位置 z は燃料集合体頂部を0mmとする。

燃料集合体内部に燃料ピンが入っている。

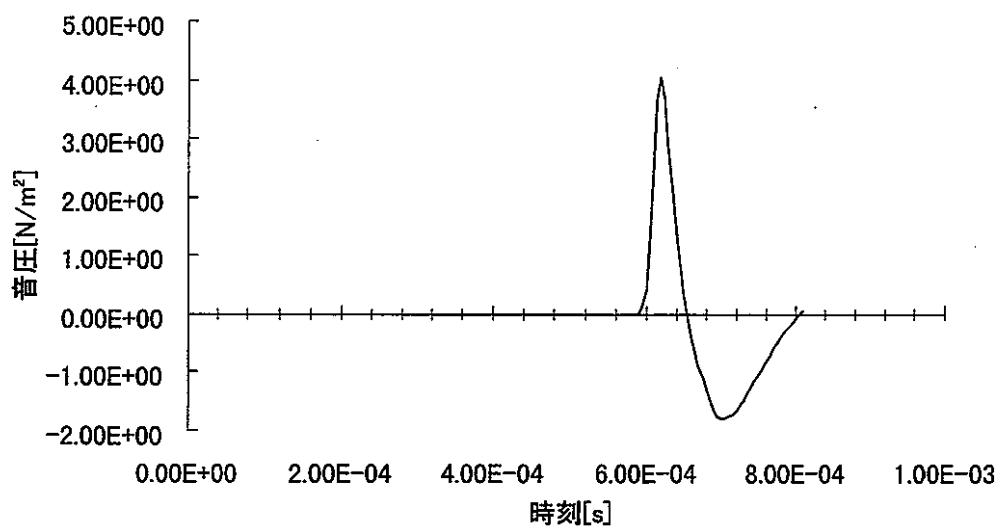


図 3.2-9 燃料集合体出口部付近での中心軸上の音圧波形
(燃料集合体出口、燃料ピン有り)

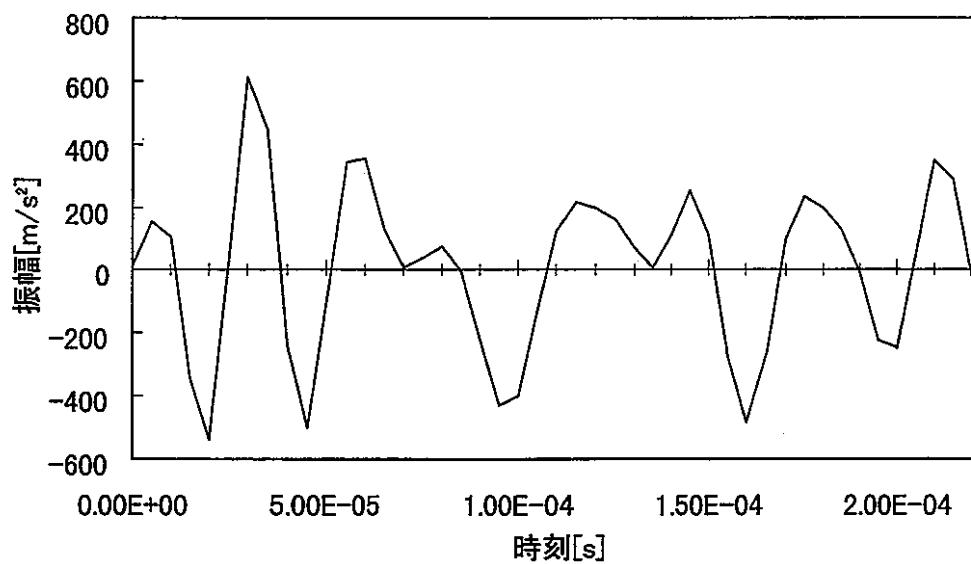


図 3.2-10 白色雑音の音源波形

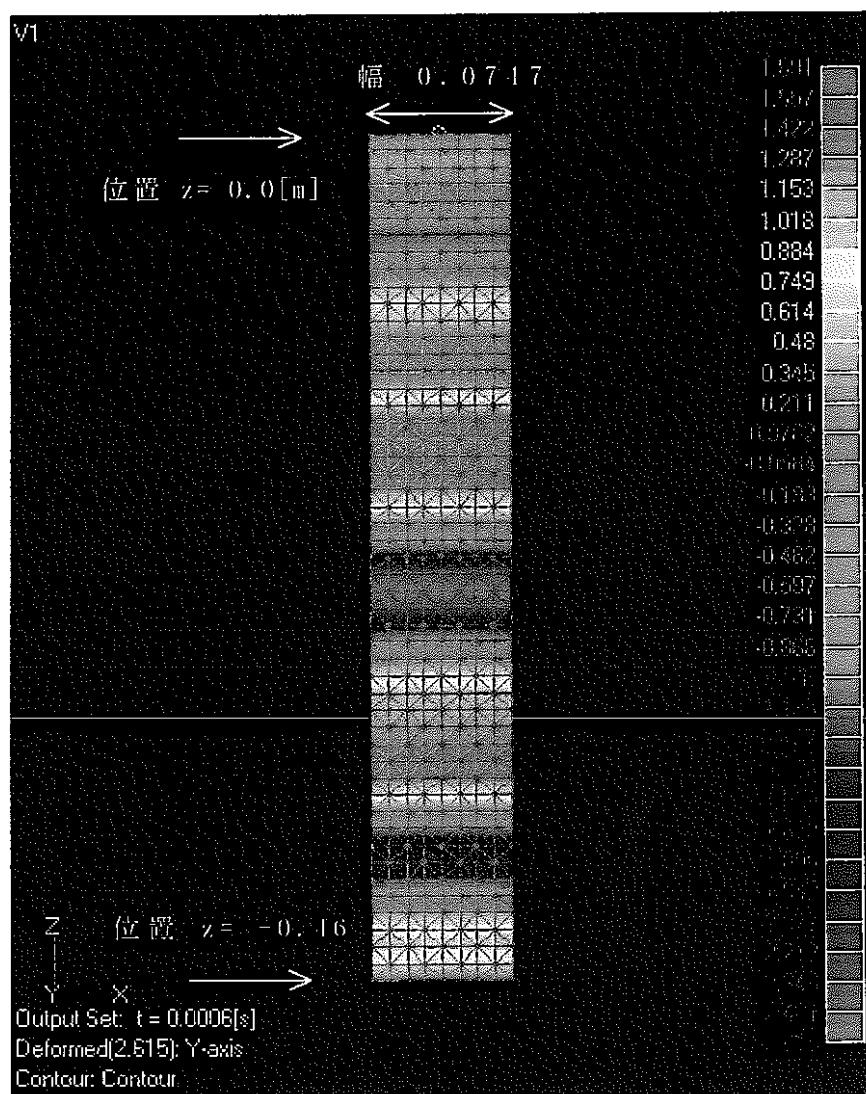


図3.2.-11 白色雑音音圧による連続波の伝播波形

パルス波発生から0.06msec後

注:位置zは燃料集合体頂部を0mmとする。

燃料集合体内部に燃料ピンが入っている。

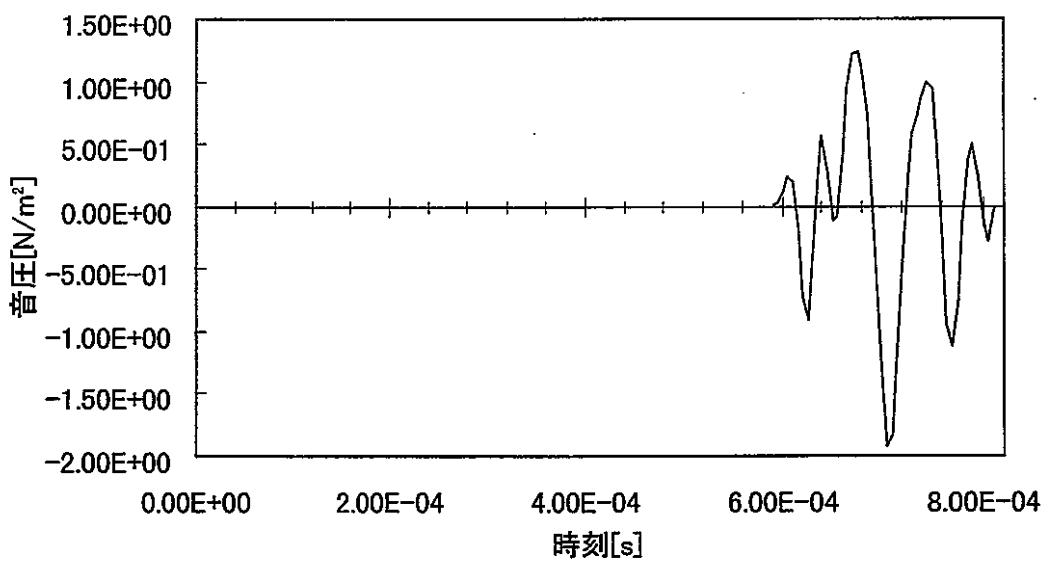
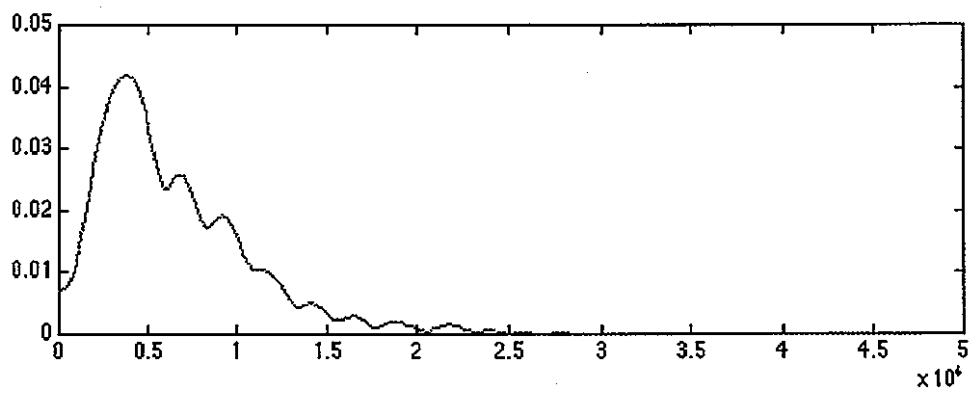
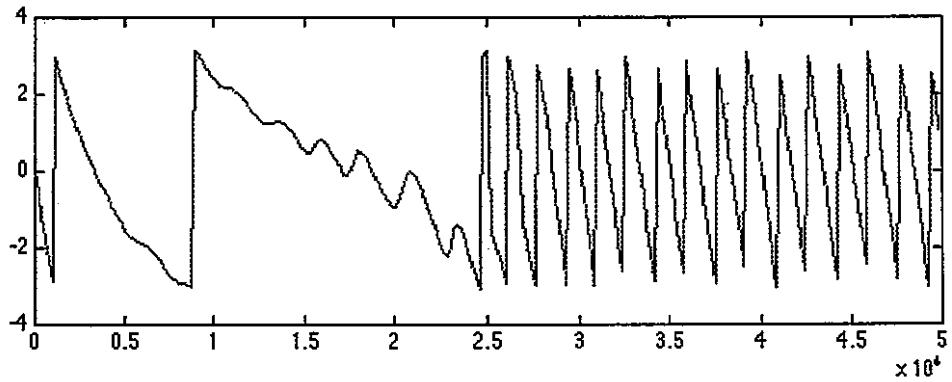


図 3.2-12 燃料集合体出口部付近での中心軸上の音圧波形
(燃料集合体出口、燃料ピン有り)

伝達関数



周波数 [Hz]



周波数 [Hz]

図 3.2-13 燃料集合体上部での音源からの伝達関数（高さ 0m）

上図が振幅、下図が位相

3.3 燃料集合体からプレナム部への音響伝播シミュレーション

燃料集合体の上部に到達した平面パルス波は、そこから炉心上部機構下部の熱遮蔽板と、多数並んだ燃料集合体の頂部に挟まれた領域に放射される。熱遮蔽板は反射面を構築しているが、燃料集合体の頂部からなる炉心の頂部の平面は、穴だらけの反射面となっている。

図3.3-1に燃料集合体から出た音が、熱遮蔽板に達するまでの球面上に広がっている様子を示している。図3.3-2は、更に波面が広がった状態を示しており、伝播波形に熱遮蔽板からの反射波が見え始める。図3.3-3では伝播波と反射波の干渉を確認することができる。図3.3-4は、伝播波形が上部プレナム部の観測位置に到達したときの波面の伝播を示している。

図3.3-6～図3.3-11に各観測点における到達したパルス波形を示す。これらの波形と図3.2-5と比較すると、燃料集合体から伝播してきた波は、燃料集合体から球面上に広がった結果、プレナム部で1/100程度減衰しているのが分かる。また波形に関しては、集合体内部を伝播していることにより、高周波成分の減衰が大きく、低い周波数成分の方が伝わり易いようである。

図3.3-12に縦軸を観測位置、横軸をその位置に到達したパルス波の強度分布を示す。強度分布は上端位置が強く、下端位置に行くにつれて弱くなっている。また中央位置から下端に向かっては変化が少ない。その理由は、燃料集合体から出た音が、熱遮蔽板や下部の燃料集合体出口のエッジ部にあたり反射すると位相干渉が起り、音を強めるところと弱めるところがでてくるためである。

次に、図3.3-13から図3.3-18に音源から各観測点で観測される音波の伝達関数を示している。各図の上図が伝達関数の振幅で、下図が位相を示している。振幅を見ると、音源から観測点まで4桁落ちていることがわかる。また位相は、音波が比較的きれいな進行波で伝わってきていていることを示している。各観測位置で細かく伝達関数を見ると、燃料集合体上部面より1m高い位置では比較的伝播がきれいな特性を示しているが、燃料集合体上部面では低周波成分が少なくなってくる。この原因是、この位置で観測される波形に熱遮蔽板による音波の反射が大きく寄与しているからであろう。

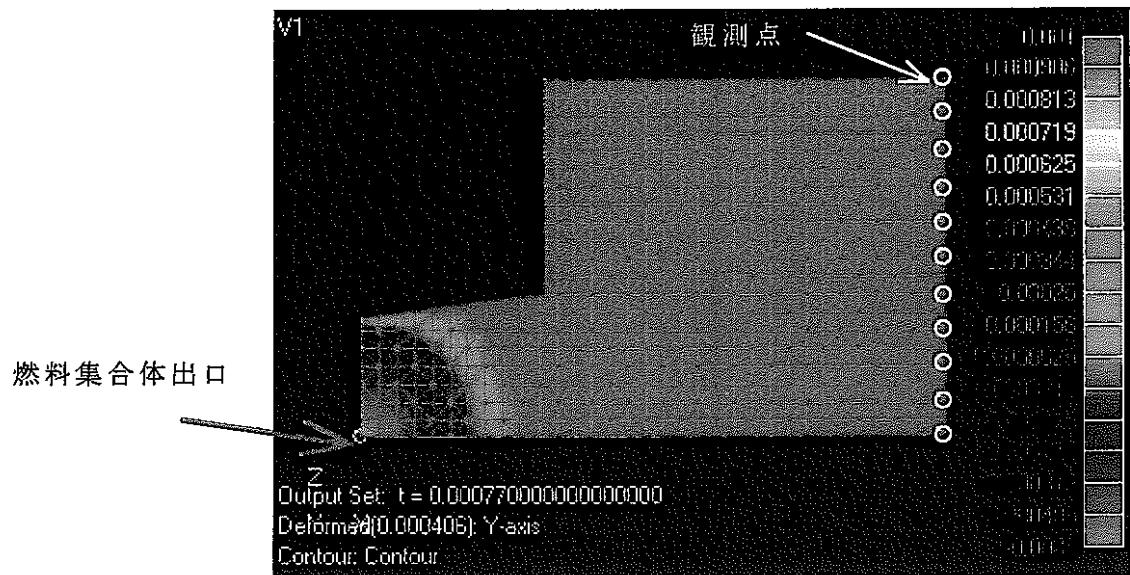
実際に測定される波形は連続波であるが、連続波の波形を何等かの信号処理をして情報を引き出すことにより受信感度の向上が図れる可能性がある。

計測中の音が集合体内部の沸騰音であるという判定をするためには、最終的に沸騰音の特徴を把握することが必要になると考えられる。

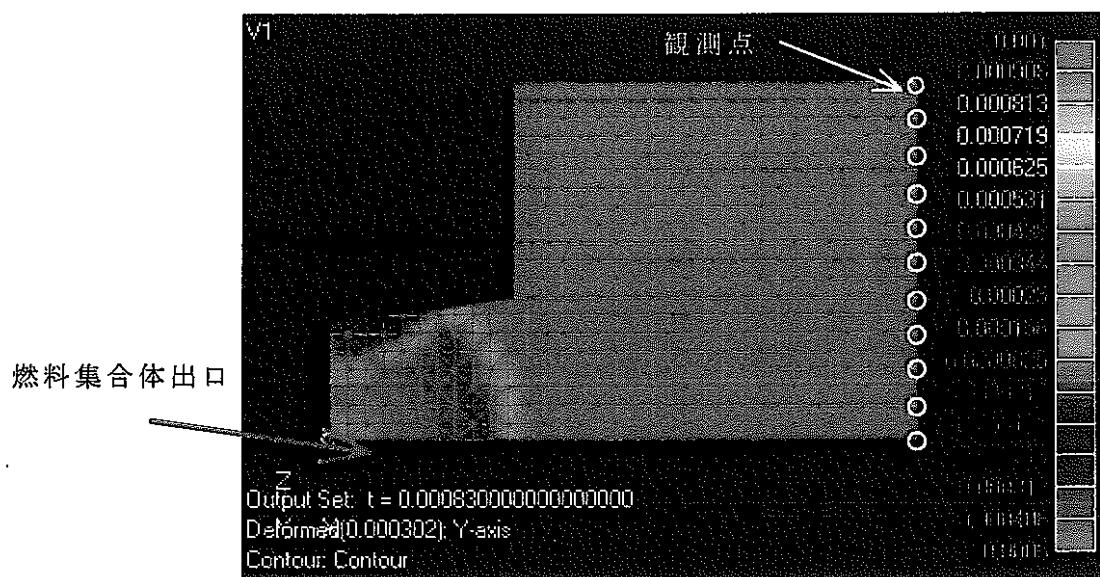
燃料集合体出口から炉心上部へ伝播してくる波面は、球面状に伝播してくる。その結果音波の減衰は大きい。その伝播経路は熱遮蔽板の散乱が大きく、下部の集合体からの反射は等高線分布から見て影響が小さいことが分かった。

以上の結果を踏まえて、白色雑音を音源とした音の各部で音圧値を図3.3-19から図3.3-24までに、一連の流れとして提示しておく。図3.3-19には、一連の音圧の変化が見やすいように音源波形を再度表示してある。図3.3-20には音源に比較的近く

の、音源位置から343mm上での音圧値を示している。この領域での音圧の変化は、先に示したように音源から球面状に広がった波面が燃料集合体壁面で散乱されて平面波に変換されていく過程であり、フィルター特性としてはロウパスとなっている。それ以後平面波となった波面が燃料集合体内部を伝播して集合体上部の出口部に達し、そこから球面状に広がつて観測点に到達するまでの間、音圧波形に変化が無いことが図3.3-20から図3.3-24までの波形を比較することで分かる。



**図3.3-1 上部プレナム部での音響伝播シミュレーション結果
(0.77msec後 音源の波形：パルス波)**



**図3.3-2 上部プレナム部での音響伝播シミュレーション結果
(0.83msec後 音源の波形：パルス波)**

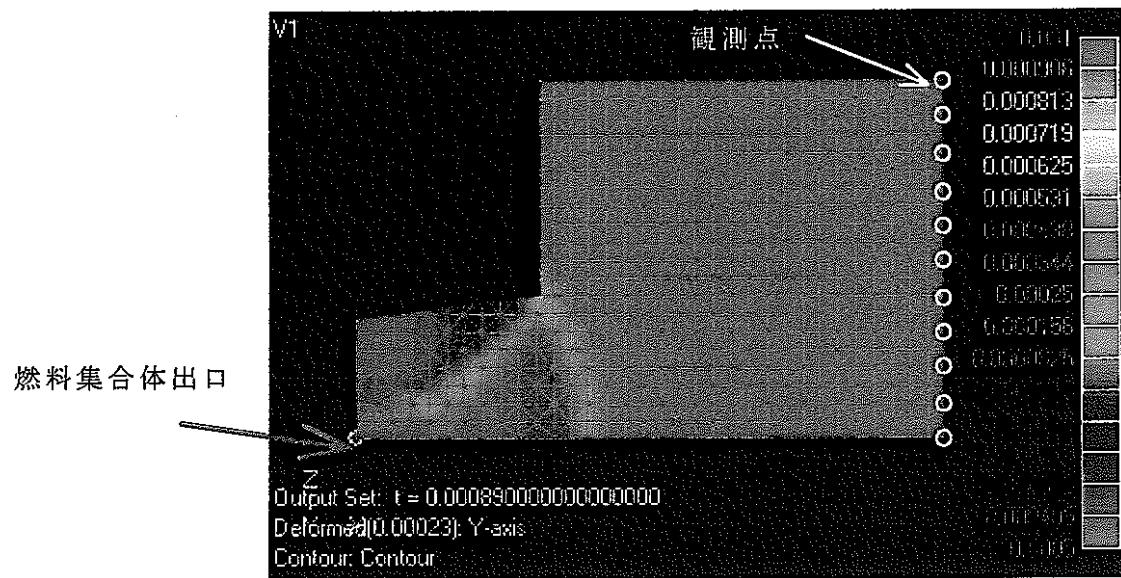


図3.3-3 上部プレナム部での音響伝播シミュレーション結果
(0.89msec後 音源の波形：パルス波)

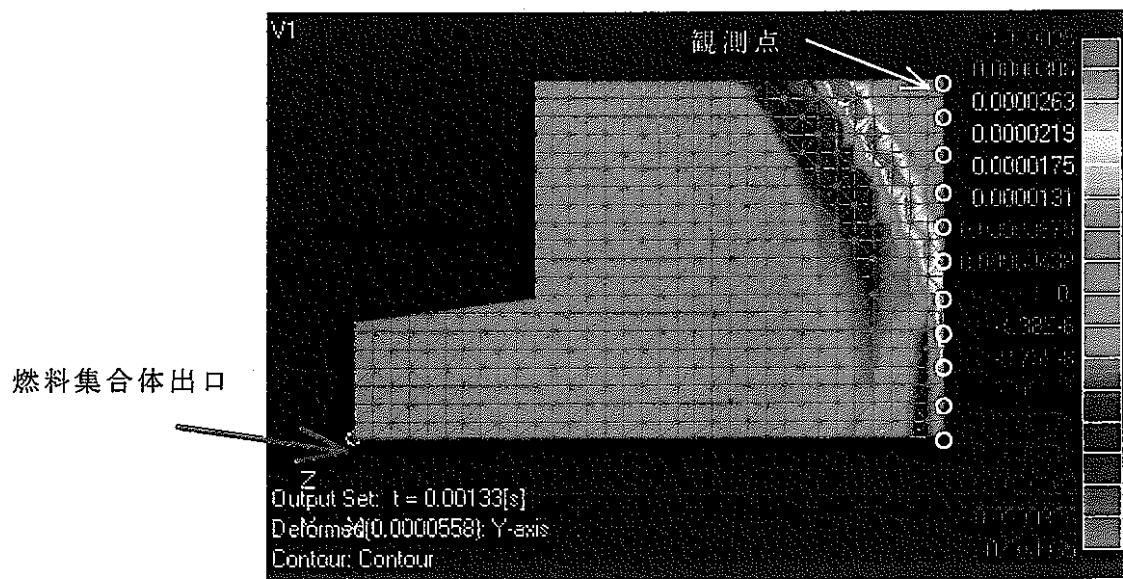
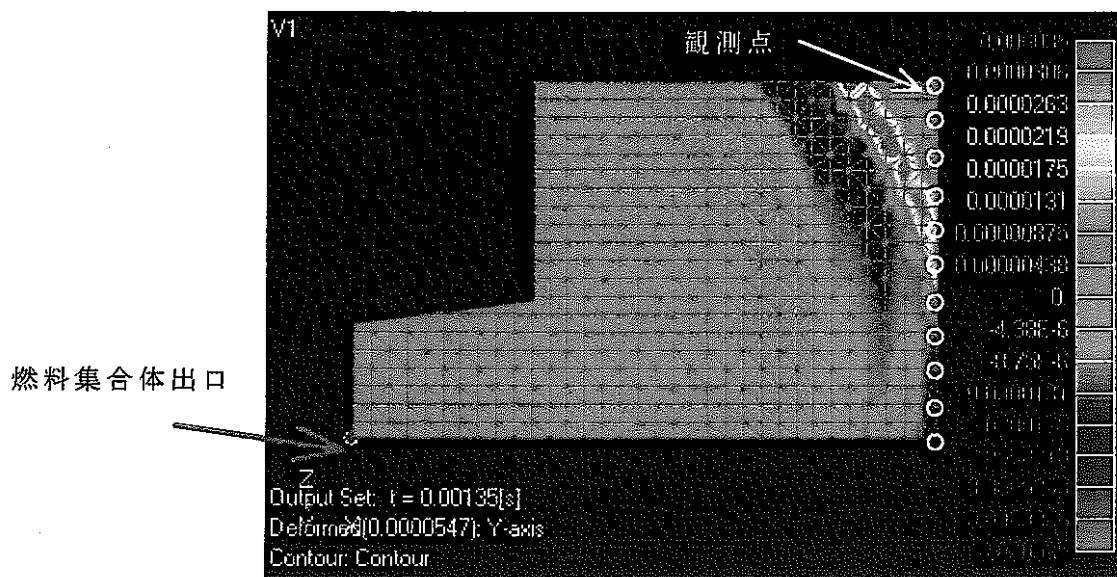


図3.3-4 上部プレナム部での音響伝播シミュレーション結果
(1.33msec後 音源の波形：パルス波)



**図3.3-5 上部プレナム部での音響伝播シミュレーション結果
(1.35msec後 音源の波形：パルス波)**

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

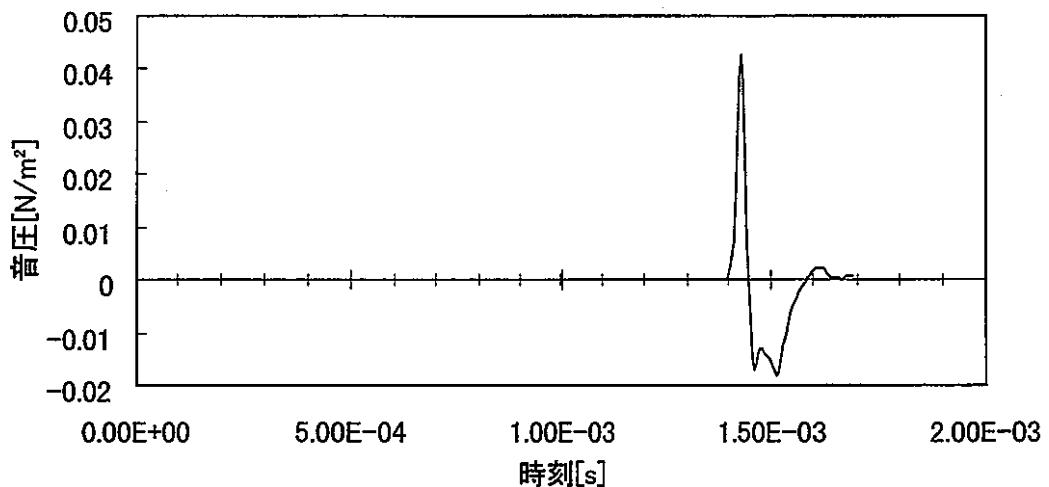


図3.3-6 観測点での音圧波形（高さ1m）

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

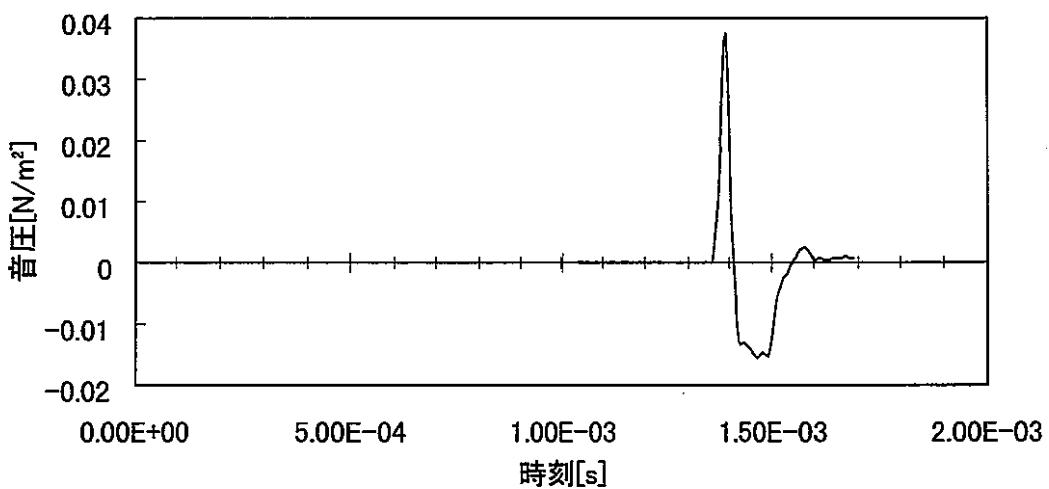


図3.3-7 観測点での音圧波形（高さ0.8m）

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

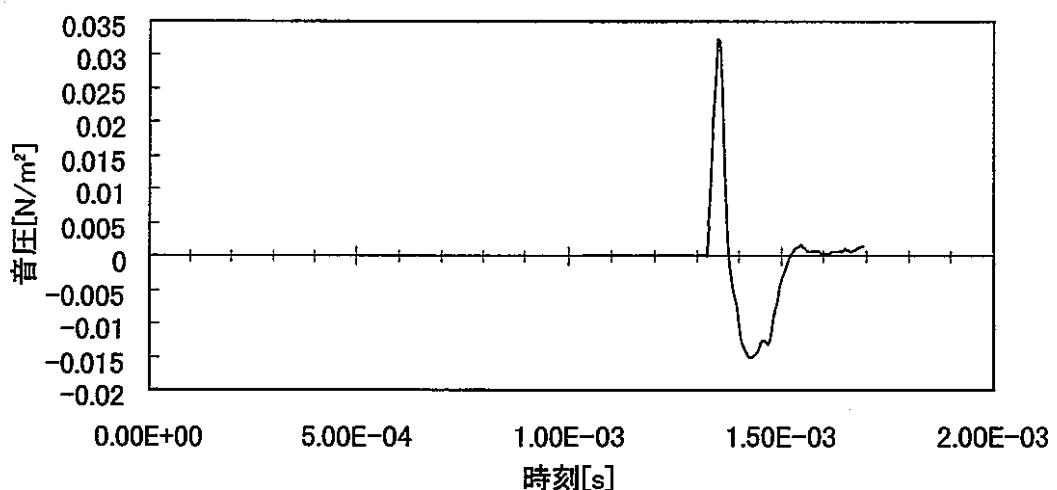


図3.3-8 観測点での音圧（高さ0.6m）

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

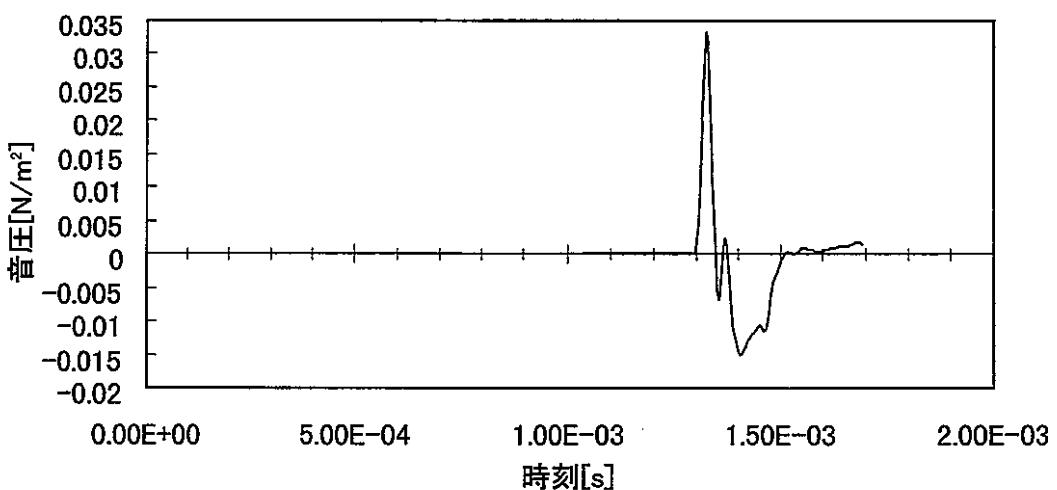


図3.3-9 観測点での音圧（高さ0.4m）

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

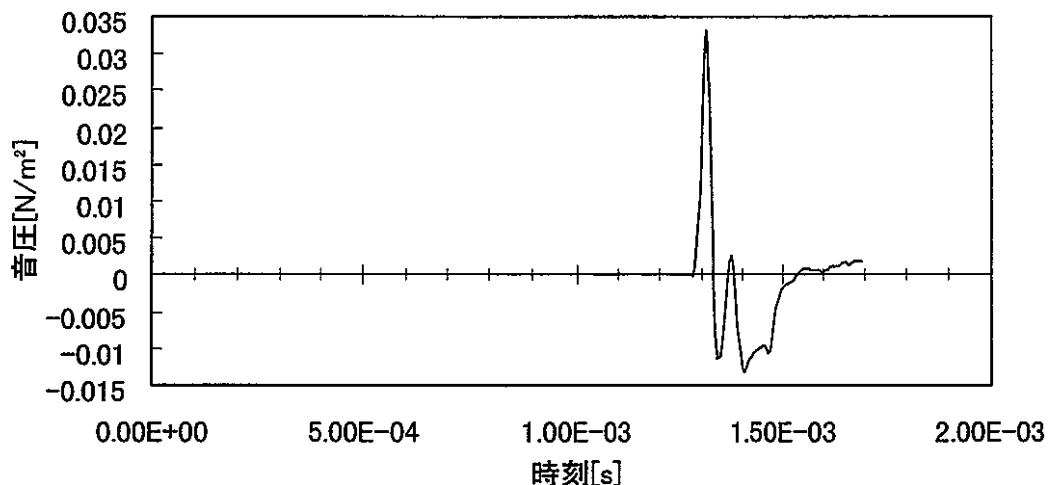


図3.3-10 観測点での音圧波形（高さ0.2m）

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

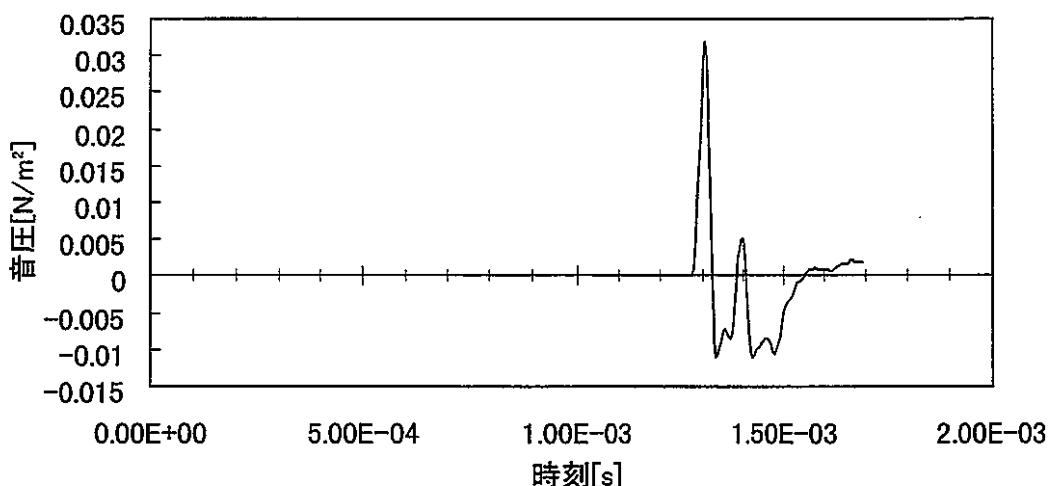


図3.3-11 観測点での音圧波形（高さ0m）

(パルス、燃料ピンあり)

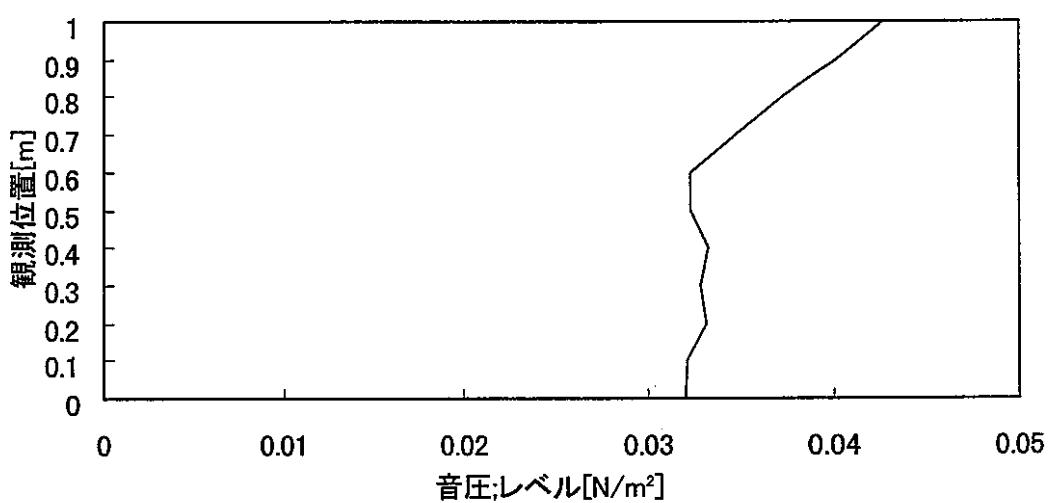


図 3.3-12 観測場所における音圧レベル分布
(音圧値の RMS 値の分布)

伝達関数

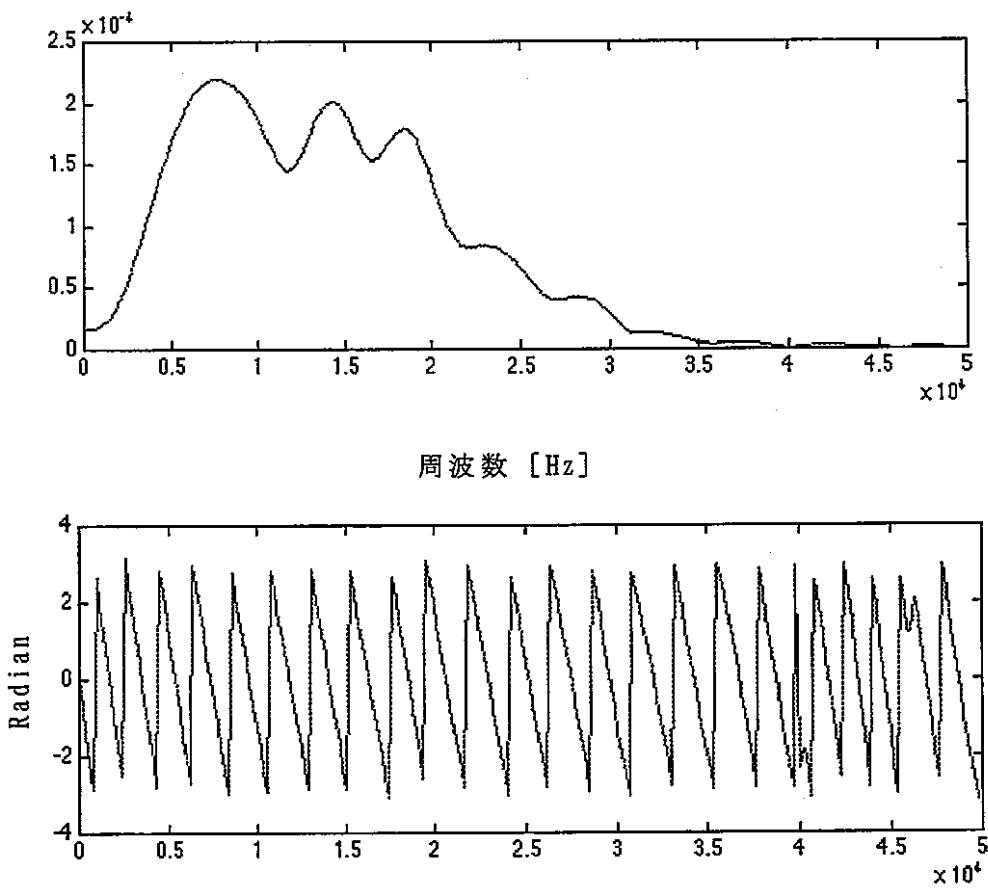
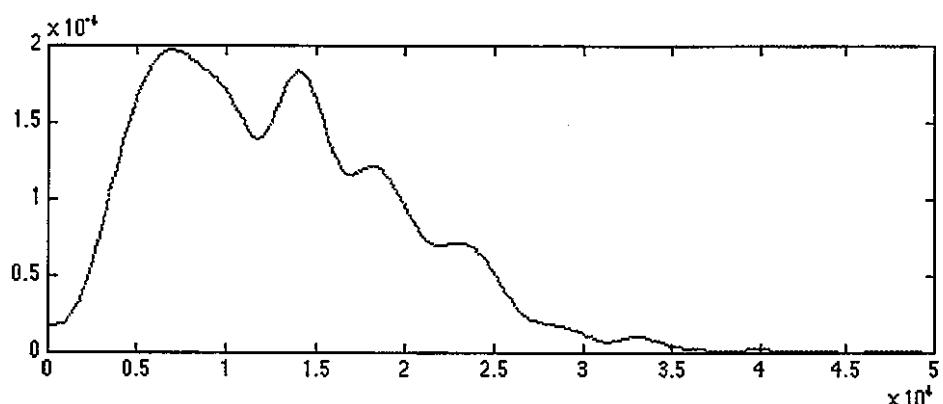


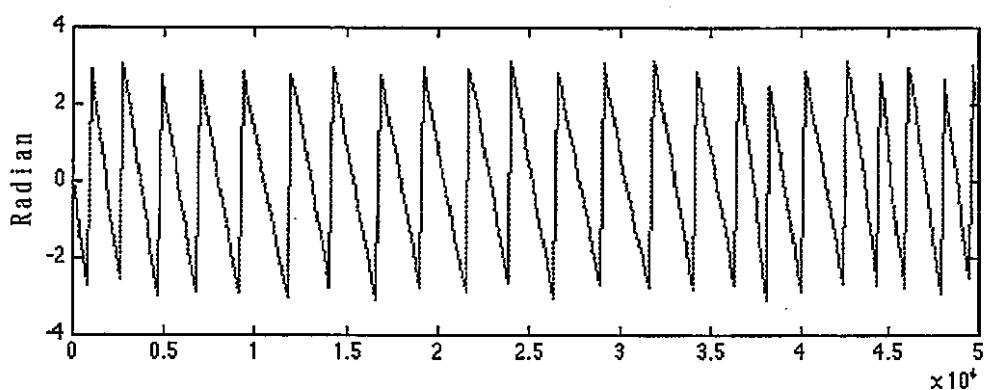
図3.3-13 観測点での音源からの伝達関数（高さ1m）

上図が振幅、下図が位相

伝達関数



周波数 [Hz]

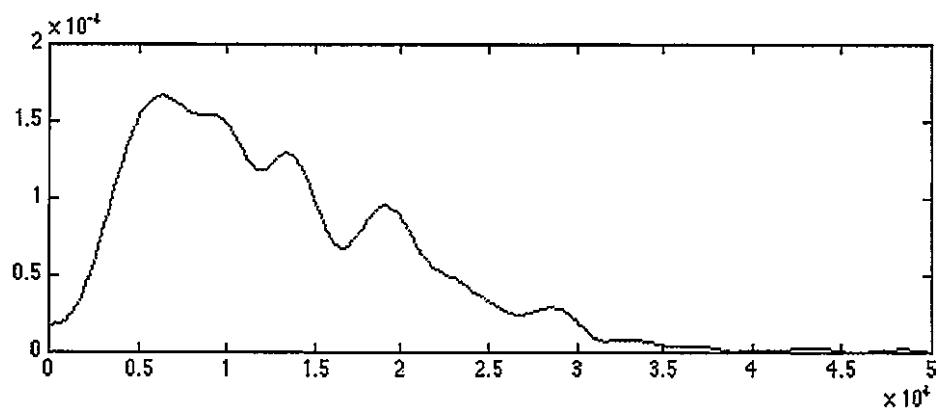


周波数 [Hz]

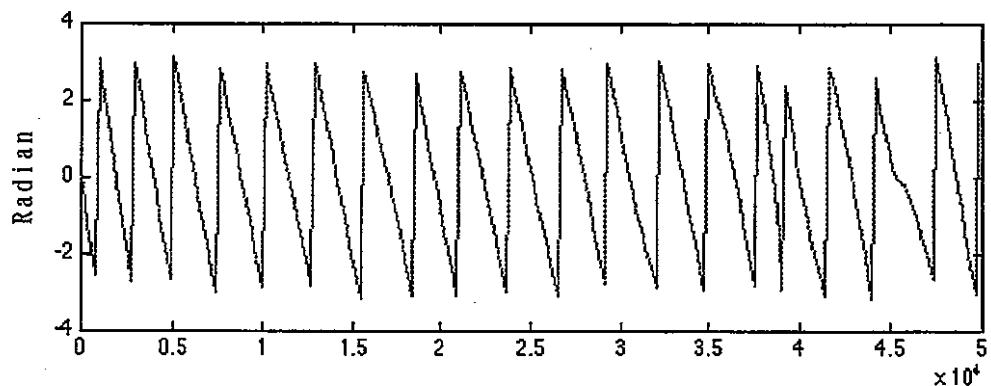
図 3.3-14 観測点での音源からの伝達関数（高さ 0.8m）

上図が振幅、下図が位相

伝達関数



周波数 [Hz]

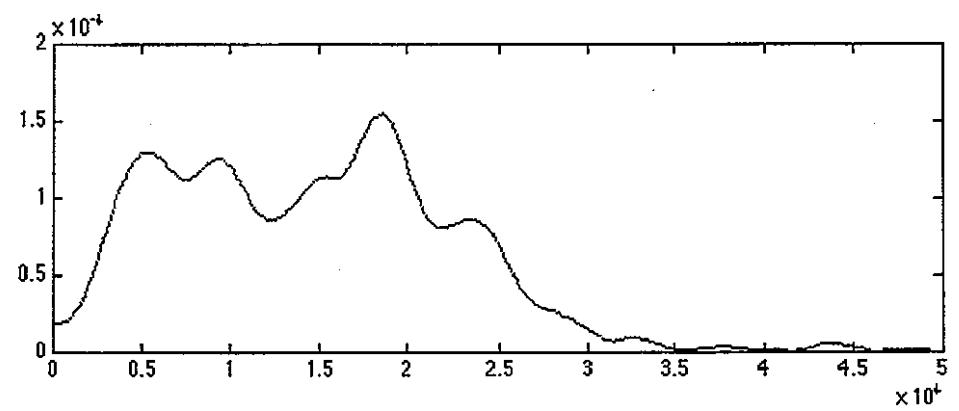


周波数 [Hz]

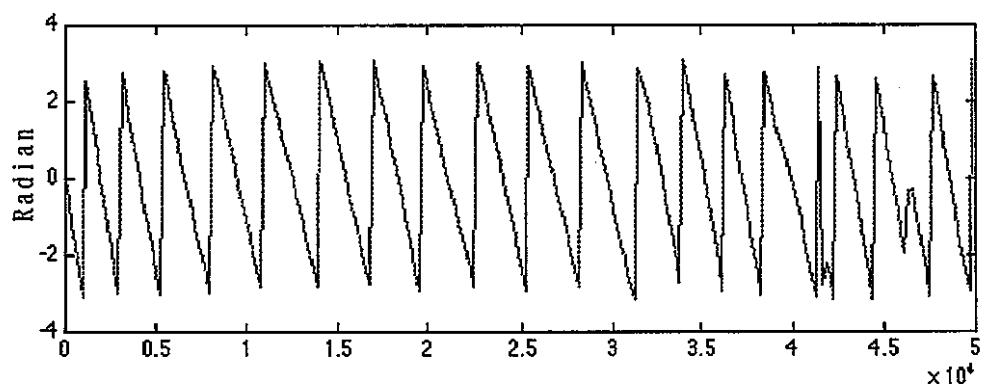
図3.3-15 観測点での音源からの伝達関数（高さ0.6m）

上図が振幅、下図が位相

伝達関数



周波数 [Hz]

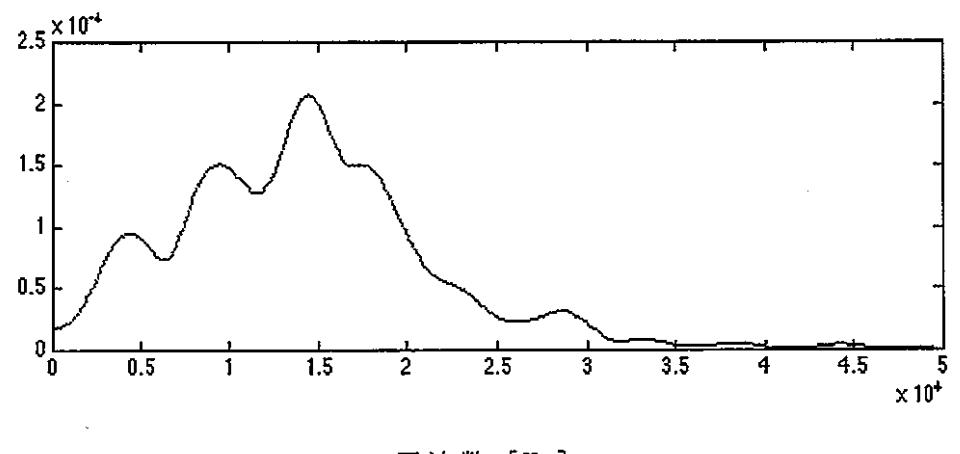


周波数 [Hz]

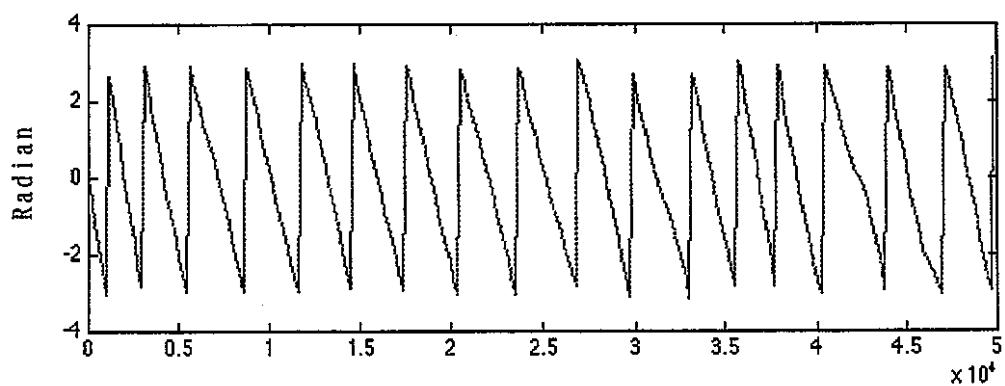
図3.3-16 観測点での音源からの伝達関数（高さ 0.4m）

上図が振幅、下図が位相

伝達関数



周波数 [Hz]

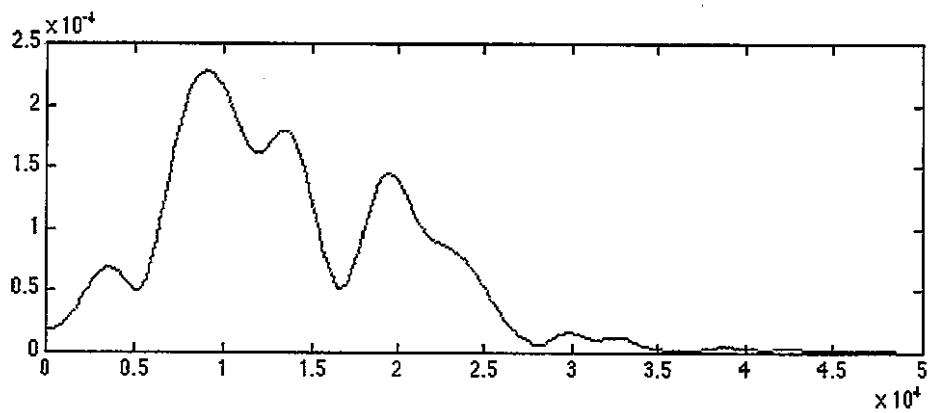


周波数 [Hz]

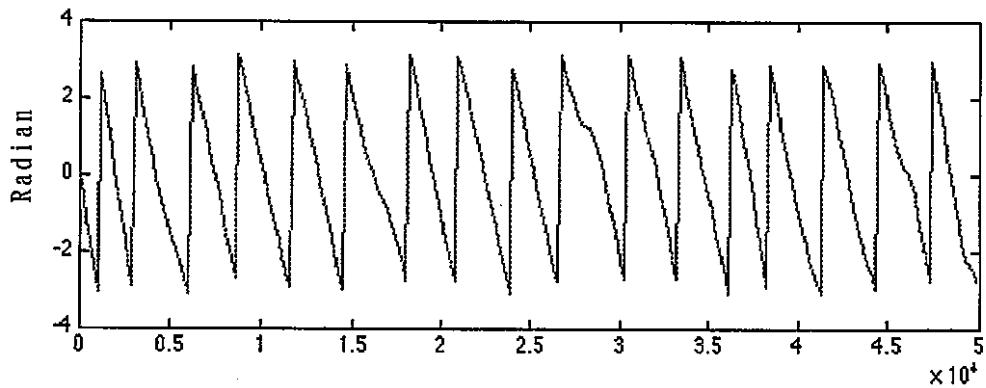
図3.3-17 観測点での音源からの伝達関数（高さ 0.2m）

上図が振幅、下図が位相

伝達関数



周波数 [Hz]



周波数 [Hz]

図3.3-18 観測点での音源からの伝達関数（高さ0m）

上図が振幅、下図が位相

燃料ピンがある時

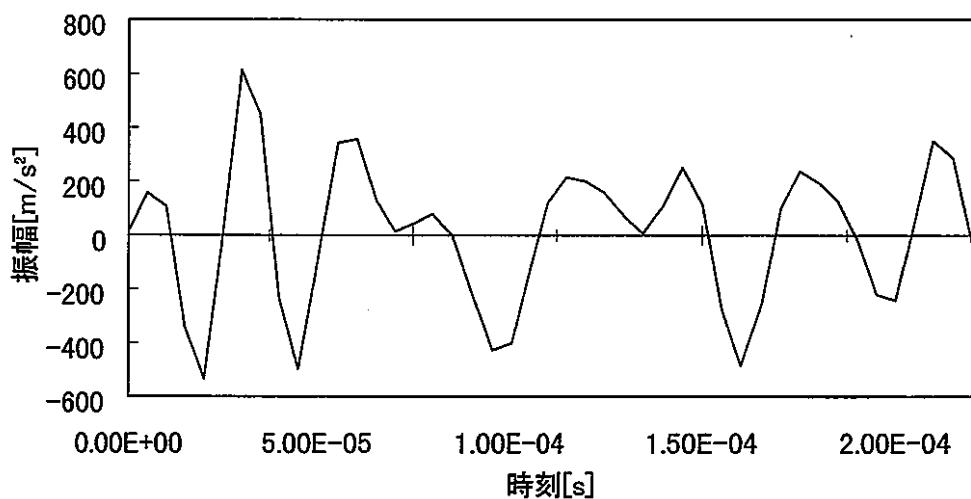


図3.3-19 白色雑音の音源波形

燃料ピンがある時の音圧値

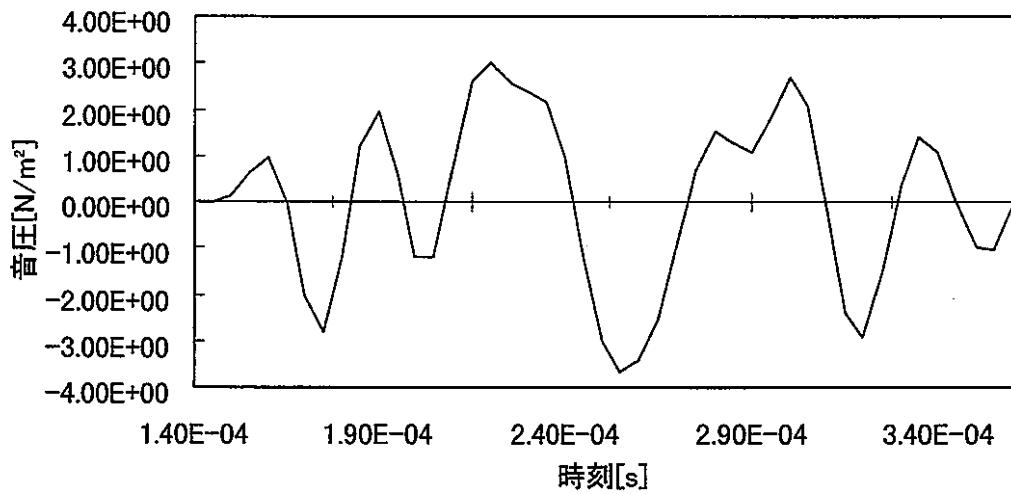


図3.3-20 燃料集合体内部、上部から深さ $z = -1.027$ の位置での音圧

燃料ピンがある時の音圧値

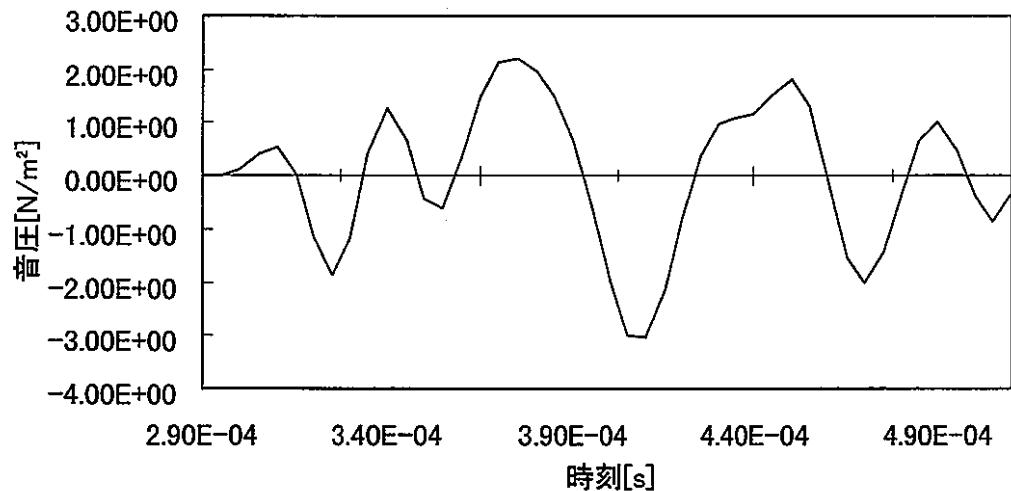


図 3.3-21 燃料集合体内部、上部から深さ $z=-0.685$ の位置での音圧

燃料ピンがある時の音圧値

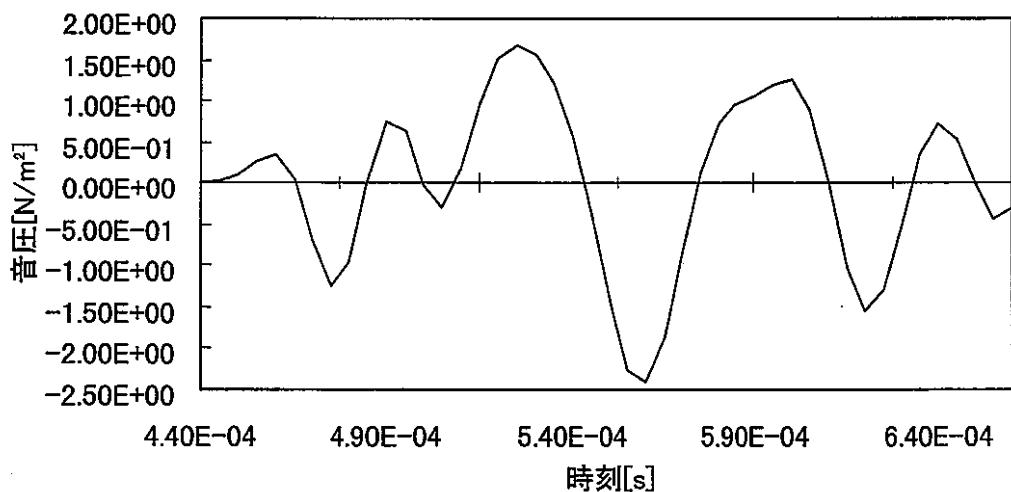


図 3.3-22 燃料集合体内部、上部から深さ $z=-0.342$ の位置での音圧

燃料ピンがある時の音圧値

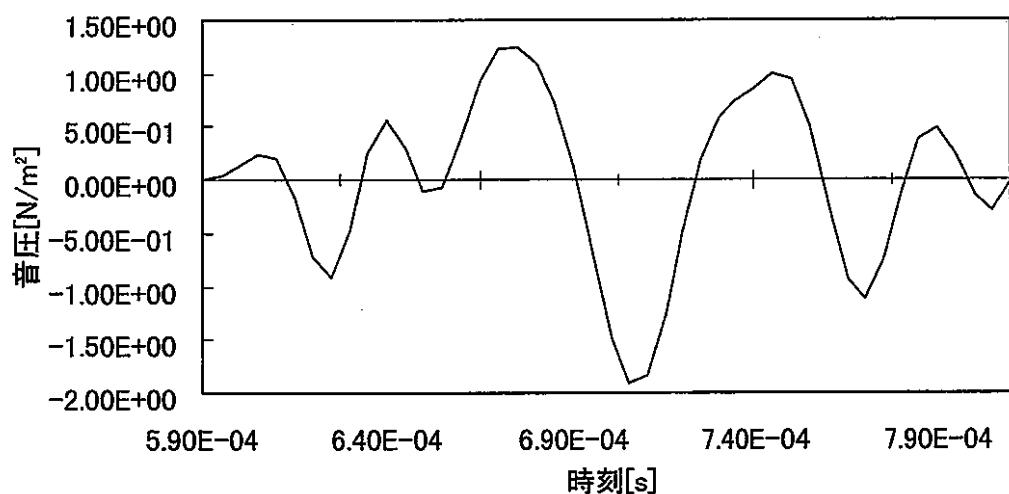


図3.3-23 燃料集合体内部、上部の位置での音圧(z=0)

観測位置での音圧(パルス、燃料ピンあり)

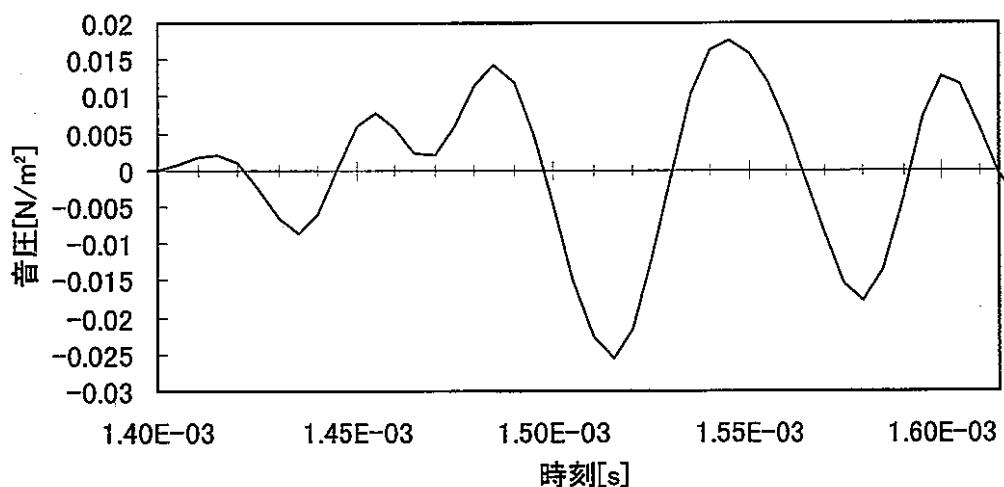


図3.3-24 観測位置1[m高さ]での音圧値

3.4 音響伝播シミュレーション結果及び今後の課題

今回のシミュレーション結果から、受信点で計測される音は、点音源位置の音圧値と比較すると約1/25000になることが予想される。しかし点音源での音源値の強さは、音源の大きさに依存するためあまり正確ではない。むしろ音源付近の音圧図3.2-3と観測点での音圧と比較した方がよさそうである。今回は音源値として1000Paを与えているが、その値が本当の点音源として発生する音圧値なのか、音源近傍で観測される音圧値なのかが重要である。もし音源近傍の音圧値を基準とするならば観測点での減衰は1/100程度になると予想される。また伝播してくる波形は、元波形と比較すると少し鈍って、低周波数側に寄るようであるが、ほとんど最初の形状を保持しているようである。

炉心上部で観測される、バックグラウンド・ノイズの大きさと性質、また音源信号の性質に依って、計測の方法信号処理の仕方が変わる。例えば一番簡単な場合、沸騰音がバックグラウンド・ノイズに比べて充分大きいとき、音のレベルを計測するだけで沸騰音の存在の判定が出来る。また沸騰音がノイズに埋もれているとしても、例えば沸騰音が断続的に起こるとすると、測定音間の相関を取り、相関波形の性質を評価することにより沸騰音を識別できる可能性がある。

このため、今後はバックグラウンド・ノイズを測定し、沸騰音を音源としバックグラウンド・ノイズを測定点で付加した音を用いた音源伝播シミュレーションを行うことにより検出のしやすさを評価し、S/Nが低い場合は、いくつかの信号処理手法の効果を評価して、沸騰音検出が可能かについて検討する必要がある。

4. まとめ

燃料集合体内部に発生した沸騰音を、最高周波数50KHzのホワイトノイズとして炉内での音響伝播シミュレーションを行った。その結果、発生音は音源に対して1/25000程度減衰（音源近傍を基準とすると約1/100）するものの、比較的原波形の性質を保ったまま伝播することが分かった。この事は、受信信号の統計処理が出来る可能性を示唆しており、S/N改善のための統計処理が有効であることが期待できる。統計処理が可能となると、測定された信号がバックグラウンドノイズに埋もれた状態であっても計測できる可能性が期待できることが分かった。また、燃料ピンによる燃料集合体内部での沸騰音の伝播に対する影響がほとんど無いことが確認できた。

今後は燃料ピンのワイヤの影響評価やバックグラウンドの実測による検証評価を行うことにより、炉内沸騰音計測システムの実現性を検討することが必要と考えられる。

謝 辞

本検討にあたり、適切なご指導をいただいた実験炉部 技術課 鈴木 俊宏氏に感謝の意を表します。

以 上