



音響法による炉内早期異常検知法の開発

—ナトリウム中用音響マイクロフォンの水中特性試験及び検出性能向上の検討—

(研究報告書)



2001年7月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

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

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

音響法による炉内早期異常検知法の開発

—ナトリウム中用音響マイクロフォンの水中特性試験及び検出性能向上の検討—
(研究報告書)

小舞 正文*

要 旨

高速炉において、炉内の異常を早期に検知する手法の一つとして、炉内の音響の変化を監視し、その変化によって異常を検知する音響法がある。この音響法の特長としては、音響信号が炉内の冷却材ナトリウム中を高速に伝播することから事象を即座に検知できること、音響検出器を炉心から離して置くことができること、同時に採取した複数の音響検出器の信号を用いて、相関処理等によって音源位置の絞り込みが可能なこと等が挙げられる。例えば、炉内流路閉塞による局所沸騰が発生した場合、ナトリウム中音響マイクロフォンを炉内に設置して音響信号を監視し、発生した沸騰音による音響信号の変化を検知することで炉内の異常を検知できると考えられる。

本報告書は、音響法による異常検知を実現する上で重要なナトリウム中用音響マイクロフォンの基本的な音響特性を把握するための水中特性試験の結果、及び検出精度向上の方策の検討結果をまとめたものである。音響マイクロフォンの水中特性試験においては、正弦波等の基本波形の周波数特性、ナトリウム中での沸騰音を模擬したインパルス波応答、ホワイトノイズ波応答等の基本特性を取得し、音響マイクロフォンの水中での良好な特性を確認した。また検出精度向上の観点から、複数の音響信号の相関処理等の信号処理技術により S/N を向上させることが有効であることを明らかにした。

*核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター
照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課

**Development of early core anomaly detection system by using
in-sodium microphone in JOYO**
**- Fundamental characteristics test of in-sodium microphone in water
and examination of improvement of detection accuracy -**

Masafumi KOMAI*

ABSTRACT

Fast reactor core anomalies can be detected in near real-time with acoustic sensors. An acoustic detection system senses an in-core anomaly immediately from the fast acoustic signals that propagate through the sodium coolant. One example of a detectable anomaly is sodium boiling due to local blockage in a sub-assembly; the slight change in background acoustic signals can be detected. A key advantage of the acoustic detector is that it can be located outside the core. The location of the anomaly in the core can be determined by correlating multiple acoustic signals.

This report describes the testing and fundamental characteristics of a microphone suitable for use in the sodium coolant and examines methods to improve the system's S/N ratio. Testing in water confirmed that the in-sodium microphone has good impulse and wide band frequency responses. These tests used impulse and white noise signals that imitate acoustic signals from boiling sodium. Correlation processing of multiple microphone signals to improve S/N ratio is also described.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
Oarai Engineering Center, JNC

目 次

1. はじめに	1
2. 開発の経緯及び開発ステップ	2
3. ナトリウム中用音響マイクロフォンの水中特性試験	4
3.1 試験目的	4
3.2 音響マイクロフォンの仕様	4
3.3 試験方法	6
3.4 試験結果	15
4. 検出性能向上の検討	40
5. おわりに	45
参考文献	46

表リスト

表 3.2-1	ナトリウム中音響マイクロフォンの主要目	8
表 3.3-1	試験に使用したマイクロフォンの仕様	9
表 4-1	フーリエ解析とウェーブレット解析の特徴の比較	44
表 4-2	ナトリウム/水中における音響特性の違い	44

図リスト

図 3.2-1	ナトリウム中用音響マイクロフォンの構造図	10
図 3.2-2	ナトリウム中用音響マイクロフォンの外観	10
図 3.3-1	音源及び音響計の位置(上方から見た図)	11
図 3.3-2	音源及び音響計の位置(横から見た図)	11
図 3.3-3	測定計信号ブロック図	12
図 3.3-4	水中試験装置の外観	12
図 3.3-5	CFNa ループ炉外実験結果例	13
図 3.3-6	SIENA ループ炉外試験結果例 (周波数特性)	13
図 3.3-7	KNS 炉外試験結果例 (時系列信号)	14
図 3.3-8	KNS 炉外試験結果例 (周波数特性)	14
図 3.4-1(a)	出力波形(sin 波 100Hz)	17
図 3.4-1(b)	出力波形(sin 波 316.2Hz)	18
図 3.4-1(c)	出力波形(sin 波 1kHz)	19
図 3.4-1(d)	出力波形(sin 波 3.162kHz)	20
図 3.4-1(e)	出力波形(sin 波 10kHz)	21
図 3.4-1(f)	出力波形(sin 波 31.62kHz)	22
図 3.4-1(g)	出力波形(sin 波 100kHz)	23
図 3.4-1(h)	出力波形(sin 波 177.8kHz)	24
図 3.4-2(a)	周波数特性(sin 波 100Hz)	25
図 3.4-2(b)	周波数特性(sin 波 316.2Hz)	26
図 3.4-2(c)	周波数特性(sin 波 1kHz)	27
図 3.4-2(d)	周波数特性(sin 波 3.162kHz)	28
図 3.4-2(e)	周波数特性(sin 波 10kHz)	29
図 3.4-2(f)	周波数特性(sin 波 31.62kHz)	30
図 3.4-2(g)	周波数特性(sin 波 100kHz)	31
図 3.4-2(h)	周波数特性(sin 波 177.8kHz)	32
図 3.4-3	周波数特性 Vibrometer と InterAtom の比較	33
図 3.4-4(a)	インパルス入力波形 (発信器への入力波)	34
図 3.4-4(b)	インパルス入力波形 (51.2kHz、1 波拡大波形)	34

図リスト

図 3.4-5(a)	出力波形 (25.6kHz、5 波)	35
図 3.4-5(b)	出力波形 (51.2kHz、5 波)	36
図 3.4-6(a)	波形と周波数特性 (ホワイトノイズ: B & K)	37
図 3.4-6(b)	波形と周波数特性 (ホワイトノイズ: VibroMeter)	38
図 3.4-6(c)	波形と周波数特性 (ホワイトノイズ: InterAtom)	39

1. はじめに

音響信号を異常診断に用いる方法は広く産業界で使われており、一般に検出系が簡便であること、通常時の音響信号を計測した結果をバックグラウンド特性として定量化しておけば、正常時との微小な差が生じた場合にも計測・検知可能であること等を特長としている。そこで、音響法を高速炉の炉内早期異常診断技術に適用する際には、炉内の冷却材の流動による流動音ノイズ、及び電源設備等から生じるノイズによる計測系への影響等のバックグラウンド特性を把握することが重要となる。

ナトリウム冷却型高速炉においては、音響法により例えば冷却材の沸騰を検知するという事が考えられる。これは、燃料集合体の局所閉塞により冷却材が沸騰した場合、発生した泡が消滅時に発生する音を捉えることにより、早期に異常を検知するものである。この際の音響法の特長としては、音響信号が炉内の冷却材ナトリウム中を高速に伝播することから事象を即座に検知できること、音響信号はナトリウム中を良好に伝播するので音響検出器を炉心から離して設置できること、複数の音響検出器間の信号の相関処理により沸騰音発生位置を絞り込み可能なことといった点が挙げられる。

本報告書は、炉内ナトリウム中で使用可能な音響マイクロフォン及びマイクロフォンに特性の合ったアンプを用いて、ナトリウム中と音響伝播特性上類似した水中での試験によりその基本音響特性データを取得・評価するとともに、信号処理による検出性能向上 (S/N 向上) の検討結果をまとめたものである。

2. 開発の経緯及び開発ステップ

(1) 開発の経緯

「常陽」では、第8回定期検査期間中(平成2年6月)において、炉内音響検出予備試験を実施した。¹⁾ この試験では、ナトリウム中用音響マイクロフォンを使用し、「常陽」における音響法の適用性の基礎データを得ることを目的として、炉内における音響バックグラウンド特性及び電熱ヒーターによるナトリウム沸騰音を測定した。試験は、原子炉停止中であるものの、定格運転状態における炉内音響バックグラウンドの主要因の一つを炉内ナトリウム流動と考え、1次冷却材流量を定格流量として試験を行った。試験の結果、音響マイクロフォンによる沸騰音の明確な分離・同定には至らなかったものの、沸騰音の主要な周波数帯域と考えられる10kHz~100kHzにおいて、炉内ナトリウム流動、格納容器内の電源ノイズ、1次主循環ポンプの制御系ノイズ等によると考えられる成分が強いバックグラウンドノイズがあることが分かった。

この炉内音響検出予備試験結果から、音響法による炉内異常検知技術を「常陽」に適用するためには、沸騰音と炉内音響バックグラウンドノイズとのS/Nの向上、及び格納容器内の電気ノイズ対策が重要であることが分かった。第4章で検出性能の向上の検討については詳述するが、後者の電気ノイズに関しては、時間軸上の遅れがなく信号装置に入ること、また、マイクロフォンは炉内ナトリウム中にあるため電磁シールドされた状態とみなされ、電気ノイズの混入経路が信号ケーブル・プリアンプ等に限定されることから対策は容易である。一方、前者の炉内のナトリウム流動に関する炉内音響バックグラウンドノイズ自体は、沸騰音と周波数帯域が重なるため、単一の音響検出器からは弁別が困難である。そこで、沸騰音を弁別するために、複数の音響マイクロフォンからの音響信号の相互相関関数を用いて、時間軸上の遅れ成分の相関性に着目した沸騰音の弁別手法が非常に有効である。

(2) 開発のステップ

「常陽」への音響法の適用には、上記結果からS/N向上が不可欠であり、具体的な方策としては複数の音響検出器を用いた相互相関処理を行うことが有効である。そこで、この相関処理法を前提とした音響法による異常検知技術の今後の開発ステップを以下に示す。

- ① 炉内ナトリウム中で使用可能な音響マイクロフォンの基本特性の確認
- ② 検出精度の向上を目的とした相関処理によるS/N向上方策の検証を行う「常陽」実機体系の模擬炉外水中試験、耐放射線の優れたナトリウム中用音響マイクロフォンの開発
- ③ 高温ナトリウム中での音響マイクロフォンの基本特性取得、及び相関処理によるS/N向上の方策の確認を行う炉外ナトリウム中試験、

- ④ 炉内の音響バックグラウンド特性の取得及び温度・中性子 γ 線照射によるマイクロフォンの特性変化確認、S/Nの更なる向上を目指した音響マイクロフォン開発へのフィードバックを目的とした「常陽」炉内単体照射試験
- ⑤ 「常陽」炉心内で試験装置により模擬的に沸騰状態を作りだし、格納容器内の電気ノイズ対策等も含めたシステムとしての性能検証を行う「常陽」炉内実証試験

次章では、上記ステップの①にあたる高温ナトリウム中で使用可能な音響マイクロフォンの基本特性の確認結果を述べる。また4章では相関処理法等によるS/N向上の方策の検討結果について報告する。

3. ナトリウム中用音響マイクロフォンの水中特性試験

炉内ナトリウム中で使用可能な音響マイクロフォンは、炉内の音響を直接的に捉えることから、S/Nの観点で導波棒方式と比べて優れているが、現在では高温ナトリウム中で使用できる音響マイクロフォンの需要が少ないことから供給可能なメーカーは限られている。ナトリウム中用の音響マイクロフォンの製作上のポイントとしては、使用温度が高いことによる圧電素子と音圧感知面との高温用接合ろう材による接合技術、音圧感知面と音響伝播媒質であるナトリウムとの境界面における濡れ性改善処理等がある。使用温度に関しては、ニオブ酸リチウム等の圧電素子は、高温・酸素欠乏雰囲気中では、脱酸素現象により電気伝導度が低下し素子の性能が多少劣化することが知られているが、酸素分圧のコントロールによりその影響の緩和は可能であり⁷⁾、圧電素子のキュリー点は一般に高い(例 LiNbO₃:約 1200℃)。このため、「常陽」炉内で使用する上では温度的には問題はない。

平成 2 年に行った「常陽」炉内音響検出予備試験で用いた音響マイクロフォンはインターアトム社 (Interatom) 製であるが、現在製作が中止されているため、今回の試験ではパイプロメータ社の音響マイクロフォン (CP103) を用いた。

3.1 試験目的

ナトリウム中で使用可能な音響マイクロフォンのプリアンプを含めた音響特性を把握するため、これらを組み合わせた水中における音響特性基本データの採取を目的とする。

3.2 音響マイクロフォンの仕様

ナトリウム中用の音響マイクロフォンとして、ナトリウム中で使用実績のあるパイプロメータ社の Model CP 103 を選定し、その基本特性を確認する水中特性試験を行うこととした。以下にマイクロフォンの使用条件・仕様について整理した結果を示す。マイクロフォンの仕様を表 3.2-1 に、構造図を図 3.2-1、プリアンプ・MI ケーブルを含めた外観を図 3.2-2 に示す。なお、炉内音響検出予備試験時の予備品のインターアトム製の音響マイクロフォンを比較対象の参考として、同時に水中試験で特性の確認を行った。

(1) マイクロフォンの使用条件の検討

1) マイクロフォンの耐熱性

本マイクロフォン (CP103) の使用温度は常温～650℃であり、「常陽」での使用条件を満足している。

2) ナトリウム中での使用

本マイクロフォン (CP103) はアメリカの高速実験炉 FFTF への導入を視野に入れて

開発されたものであり、ナトリウム中試験も実施されている。今回使用するモデルは、その後の設計改良によってケーブル部の改良がなされたものである。

3) マイクロフォンの耐放射線性の検討

①中性子線

CP103 の中性子照射については、マイクロフォンのスペックとして $1 \times 10^{18} \text{n/cm}^2$ まで問題ないとされている。「常陽」で設置する場所は、炉内検査予備孔が考えられ、設置場所の中性子束は $2 \times 10^{11} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度 (MK-III) であるため、炉内で使用できる時間 t (s) は

$$\begin{aligned} t &= 1 \times 10^{18} \text{n/cm}^2 / 2 \times 10^{11} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s} \\ &= 5 \times 10^6 \text{ (s)} \quad (\text{約 } 57 \text{ 日}) \end{aligned}$$

となる。「常陽」MK-III では、1 運転サイクル日数が約 60 日であるため、1 運転サイクルを通じた音響マイクロフォンの中性子による影響は、炉内単体照射試験により確認する必要がある。また、複数の音響マイクロフォンを設置する場合には、「常陽」では制御棒予備孔が考えられるが、上記よりもより厳しい条件となるため、中性子束等の放射線には影響されない導波棒方式の併用が考えられる。

② γ 線

CP103 の γ 線照射については、マイクロフォンのスペックとして $1 \times 10^{11} \text{erg/g}$ (10^4J/g) まで問題ないとされている。一般に圧電素子はセラミック系の結晶構造を有しているため、 γ 線自体による素子の性能劣化は考えられない。ただし、 γ 線発熱による温度の上昇は、圧電素子の結晶構造中の脱酸素現象による性能劣化、音圧感知面との高温用ろう材による接合等へ影響を与えると考えられるため、耐 γ 線性の影響の見積もりとして、マイクロフォンの γ 線発熱量を見積もることにより耐 γ 線性を評価するものとする。

CP103 は外側のケースは Nimonic90 と呼ばれるニッケル合金を主材料としているため、 γ 線による発熱熱量がマイクロフォンから放散しないと考えた場合における、 γ 線発熱の放散に必要な時間をおおよそ以下の式で見積もる。

$$\begin{aligned} \text{熱量の放散に必要な時間} &= (\gamma \text{ 線の上限值}) / (\gamma \text{ 線の Ni 発熱密度} \times \text{Ni 密度}) \\ &= 1 \times 10^4 \text{ (J/g)} / (0.0077 \text{ (W/g)} \times 9 \text{ (g/cm}^3)) \\ &= 1300000 \text{ (s)} \end{aligned}$$

上記によって計算された結果を見ると、 γ 線発熱による発熱量を放散されるまでに必要とされる時間は非常に長いため、 γ 線による発熱は、充分周囲の冷却材ナトリウムにより放散されると考えて良い。よって、 γ 線による影響はマイクロフォンの使用条件的には問題ないことが分かる。

ここで、中性子・ γ 線束は、MK-III 初期炉心の結果を用い、①と同じ場所での γ 線による Ni の発熱量は、 $7.7 \times 10^{-3} \text{ (W/g)}$ 、Ni の密度：約 9 g/cm^3 とした。

3.3 試験方法

試験では、特性が既知な市販の水中マイクロフォンを基準に用いて特性比較を行うこととした。発生音響の周波数帯域は、ナトリウム中用音響マイクロフォンの音響的な基本特性を確認するために、水中スピーカーを用いて100kHz以下の周波数の正弦波を発信し、ナトリウム中用音響マイクロフォンと市販の水中マイクロフォンで同時に受信しその結果を比較する。試験装置の音源と検出器の位置関係を図 3.3-1 及び、図 3.3-2 に示す。水中スピーカーから各ナトリウム中用音響マイクロフォンまでの距離は同一とした。試験装置の測定信号ブロック図を図 3.3-3、水中試験装置の外観を図 3.3-4、本試験で使用した音響マイクロフォン及び水中スピーカーの仕様を表 3.3-1 に示す。また、試験条件を以下に示す。

(1) 試験条件

① 水中スピーカー

- ・ FOSTEX製US300
- ・ FOSTEX製Ultran50, Ultran125, Ultran250

② 市販水中マイクロフォン

- ・ BK Type 8103 (0.1~100kHz)

③ 高温ナトリウム用音響マイクロフォン

- ・ バイプロメーター社製：CP103
- ・ インターアトム社製ナトリウム中音響マイクロフォン

④ 試験条件

- ・ 水中スピーカーとの距離 : 170mm
- ・ 発信波形
 - 単一正弦波発信 : ~100kHz
 - パルス波
 - ホワイトノイズ波

(2) 模擬沸騰音の選定

沸騰音を模擬した音響信号を水中スピーカーから発信し、ナトリウム中用音響マイクロフォン及び水中マイクロフォンにて同時に受信し、両者のデータ及び音源周波数帯域の評価結果に基づき、比較検討を行う。その模擬沸騰音の選定は以下に示すように海外での諸研究の試験結果例を参考にした。

図 3.3-5 にフランスのCFNaループを用いた沸騰音検出試験結果例を示す。この試験は、導波棒を用いて試験装置外に導いた音響信号を圧電素子で音響信号を計測した結果であり、電気ヒータの熱量を変えず流量を絞ることによって沸騰させたものである。沸騰時には10k~100kHzの帯域の強度が強くなっていることから、ナトリウムの沸騰音はこの帯域にあるといえる。²⁾

図 3.3-6 に SIENA ループでの炉外試験結果例を示す。この試験においてもナトリウム試験ループで電気ヒータを用いてナトリウムを沸騰させたときの音響信号の変化を、導波棒にとりつけた超音波センサーで信号採取したものであり、沸騰時には $\sim 20\text{kHz}$ の帯域までにおいて周波数スペクトルの強度が増加しているのが分かり、上記試験結果とも同じ傾向を示している。³⁾

図 3.3-7、図 3.3-8 に KNS で行ったナトリウム中の音響時系列信号及び試験結果例を示す。この試験においても電気ヒータにより加熱した時の沸騰音信号を採取したものであり、図 3.3-7 からは、温度を上げていくと沸騰音を考えられるパルス上の音響信号が増えていくことが分かる。また図 3.3-8 からは、 $10\text{k}\sim 100\text{kHz}$ の帯域の周波数スペクトルが増加していく様子が分かる。⁴⁾

これらの調査結果からナトリウム中における沸騰音は間欠的に発生するため、インパルス状の信号波形となるが、そのインパルス状波形の中に高周波 ($\sim 100\text{kHz}$) の周波数成分を広く含んでおり、その高周波の周波数帯域特性上はホワイトノイズ波によってその特性を模擬できると考えられる。これらのことから、水中試験における模擬沸騰音としては、沸騰音を模擬したインパルス波形及び音響マイクロフォンの周波数帯域幅等の特性の把握としても適している 100kHz 以下の帯域のホワイトノイズを模擬信号としての入力信号として選定した。

表 3.2-1 ナトリウム中音響マイクロフォンの主要目

部品名	項目	仕様
マイクロフォン本体	型 式	CP103
	使用温度	常温 ~ 650℃
	使用環境	水中、ナトリウム中
	放射線条件	○ γ 線 : 10^{11} erg/g ○ 中性子線 : 10^{18} n/cm ²
	周波数範囲	2~10kHz (100kHz で-6dB)
	感 度	230 pC/bar (2Hz)
MIケーブル	使用温度	常温 ~ 650℃
	ケーブル長(外径)	10m (ϕ 3.2mm)
	コネクタ	Lemo connector
チャージアンプ	型 式	CA/04/DH (プリアンプ 1台) PC/04/2/PS (DC安定化電源 1台)
	外形寸法	約150mm×約100mm×約300mm
	入力電源	100VAC 50/60Hz
	最大出力電圧	12V
	入力レンジ	10~1000pc/bar
	ノイズレベル	1pc/bar

*注意：pc/bar (ピコクーロン/バール：1 bar あたりのマイクロフォンの帯電電荷量を現す単位)

表 3.3-1 試験に使用したマイクロフォンの仕様

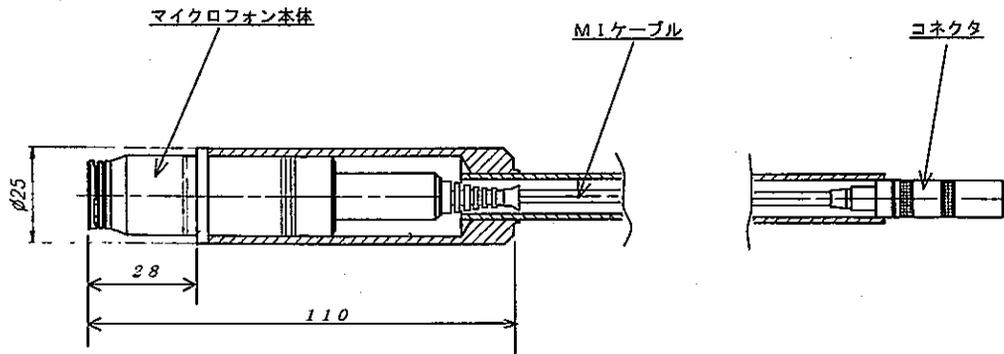
水中・ナトリウム中用マイクロフォンの仕様比較 (受信側)

マイクロフォン	感度	周波数帯域	プリアンプの型式	プリアンプを含めた周波数特性	
水中用マイクロフォン	1200pC/bar (0.12pC/Pa)	0.1 ~ 100kHz	昭和測器 4053 タイプ	0.5k~100kHz	-3~1dB
				1k~50kHz	-1~1dB
				5k~20kHz	-0.5~0.5dB
ナトリウム中用マイクロフォン (InterAtom)	200pC/bar (0.02pC/Pa)	10 ~ 200kHz	専用 プリアンプ	2~300kHz	60dB
ナトリウム中用マイクロフォン (Vibrometer)	230pC/bar (0.14pC/Pa)	2 ~ 10kHz	専用 プリアンプ (D. J. CA/04/DH)	1k~20kHz	100~ 1100pC/g
				1k~50kHz	10~110pC/g

注) pC:ピコクーロン

水中マイクロフォン (発信側)

マイクロフォン	発信周波数
水中用マイクロフォン (US300)	70~30kHz
水中用マイクロフォン (Ultran0.05)	50kHz
水中用マイクロフォン (Ultran0.1)	125kHz
水中用マイクロフォン (Ultran0.2)	250kHz



単位：mm

図 3.2-1 ナトリウム中用音響マイクロフォンの構造図

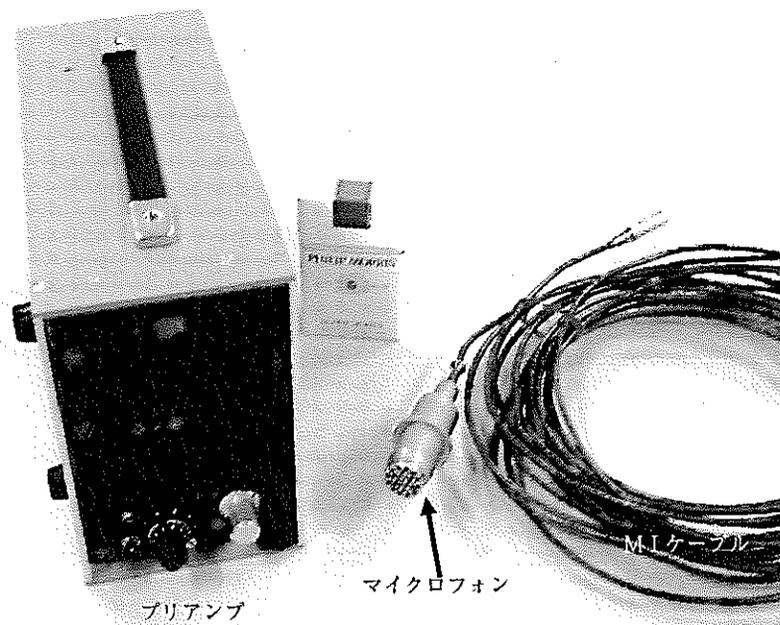


図 3.2-2 ナトリウム中用音響マイクロフォン等の外観

- ① 水中スピーカー (US300)
- ② 水中スピーカー (Uliran50, Uliran125, Uliran250)
- ③ 高温 Na 用音響マイクロフォン (パイプロメーター)
- ④ 水中マイクロフォン (B&K)
- ⑤ 高温 Na 用音響マイクロフォン (インターアトム)

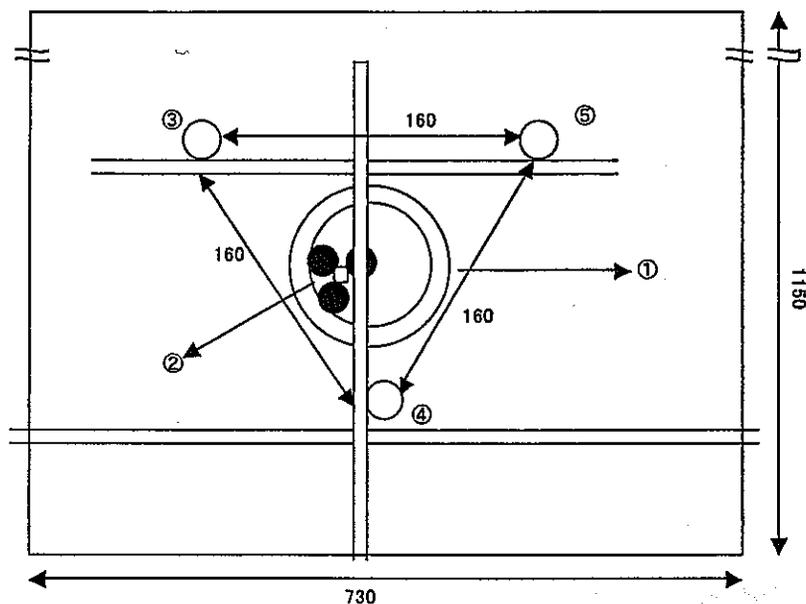


図 3.3-1 音源及び音響マイクロフォンの位置(上から見た図)

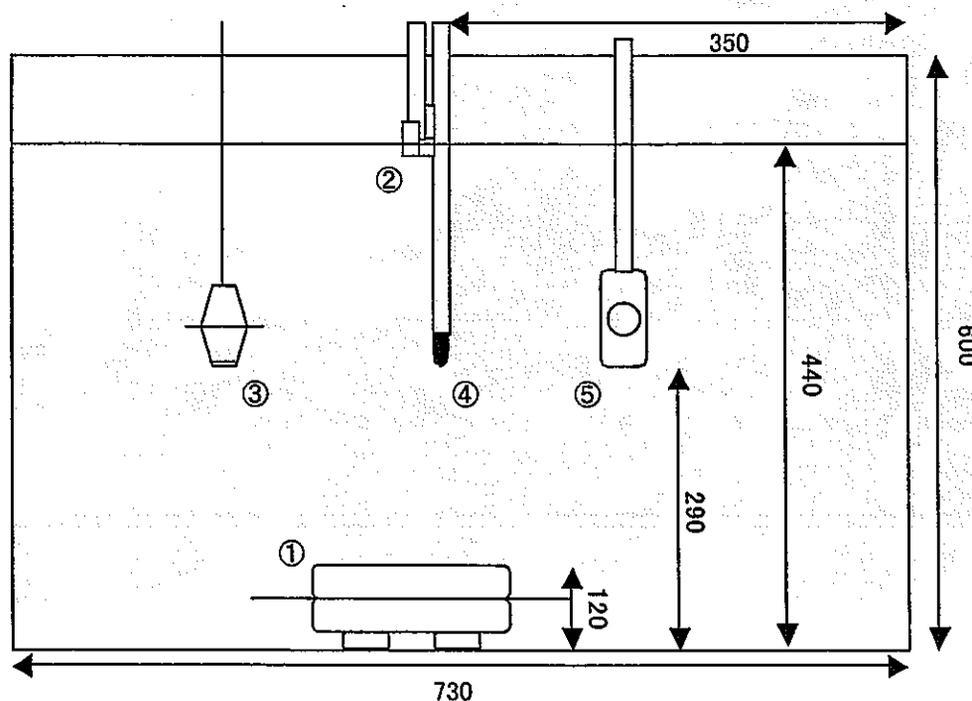


図 3.3-2 音源及び音響マイクロフォンの位置(横から見た図)

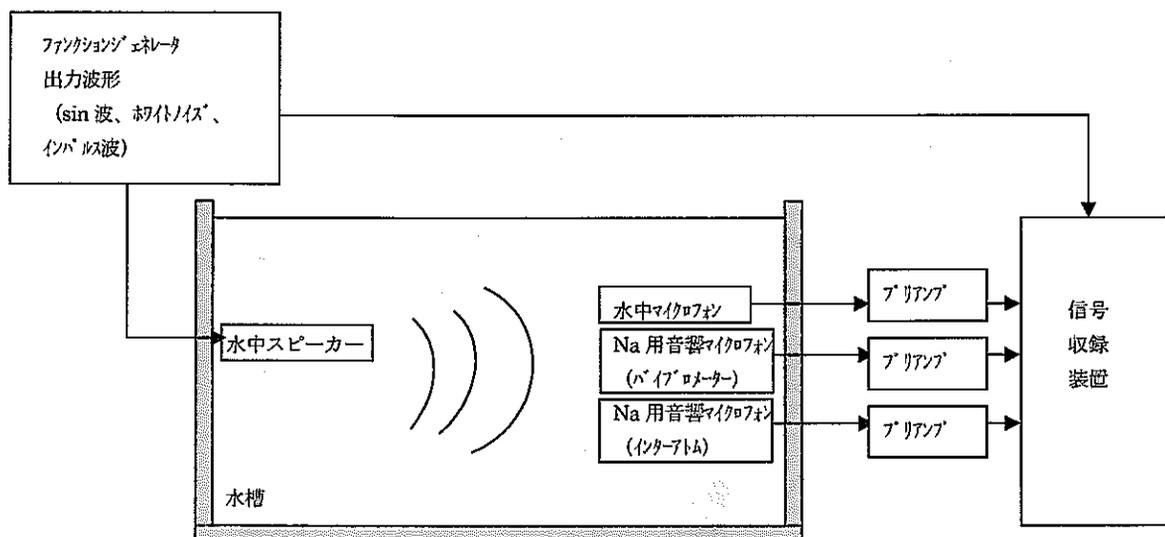


図 3.3-3 測定信号のブロック図

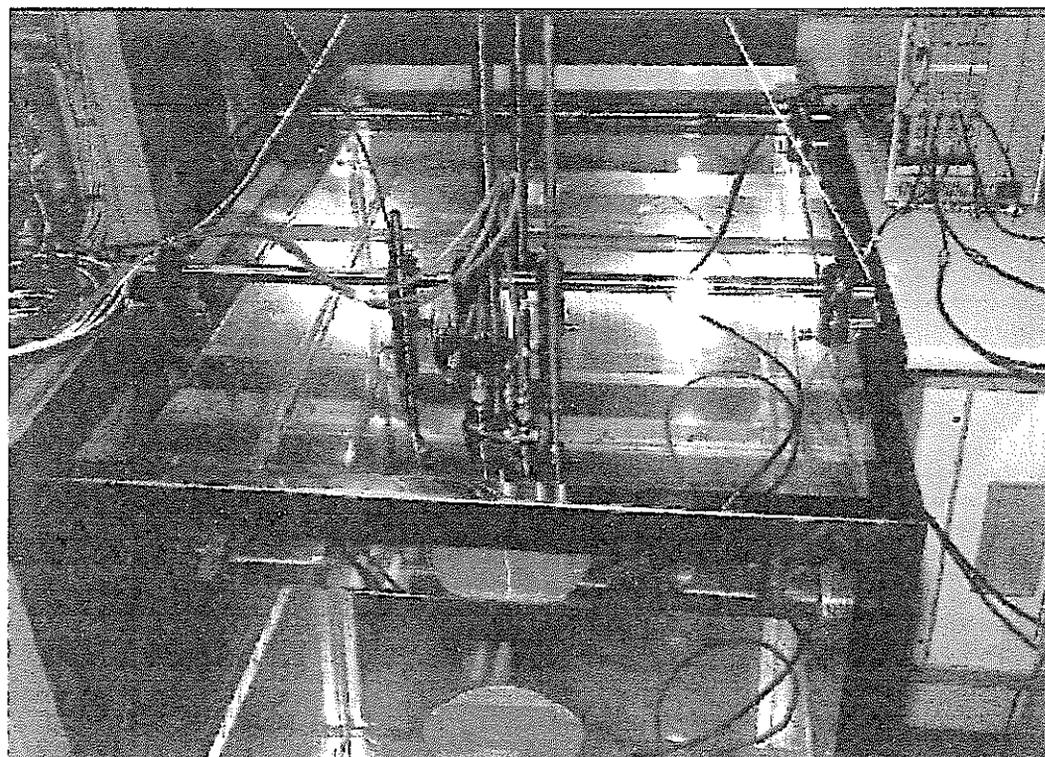


図 3.3-4 水中試験装置の外観

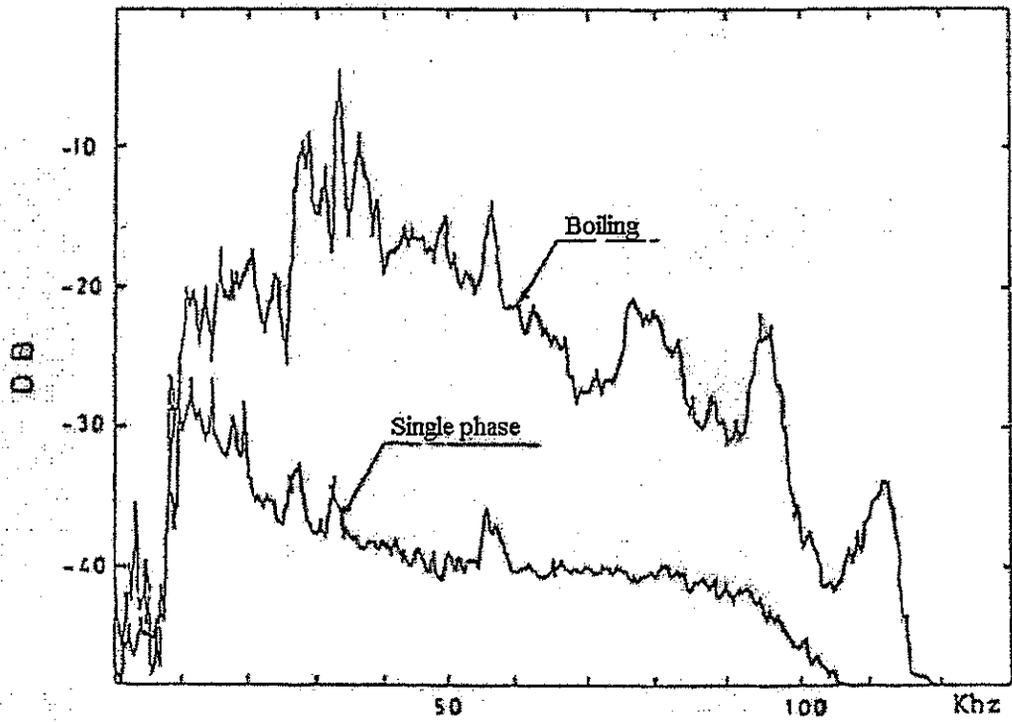


図 3.3-5 CFNa ループ炉外実験結果例

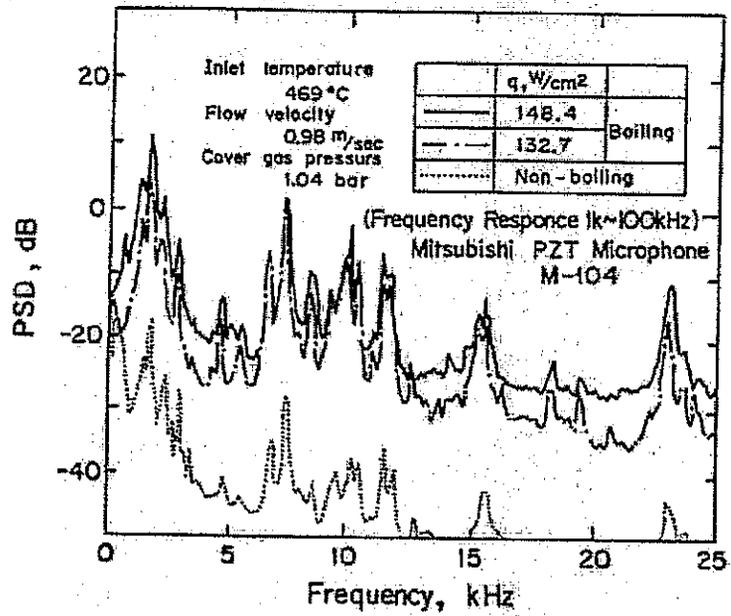


図 3.3-6 SIENA ループ炉外試験結果例 (周波数特性)
 (ヒーターによる沸騰と導波棒に設置した音響計の信号の周波数特性の変化)

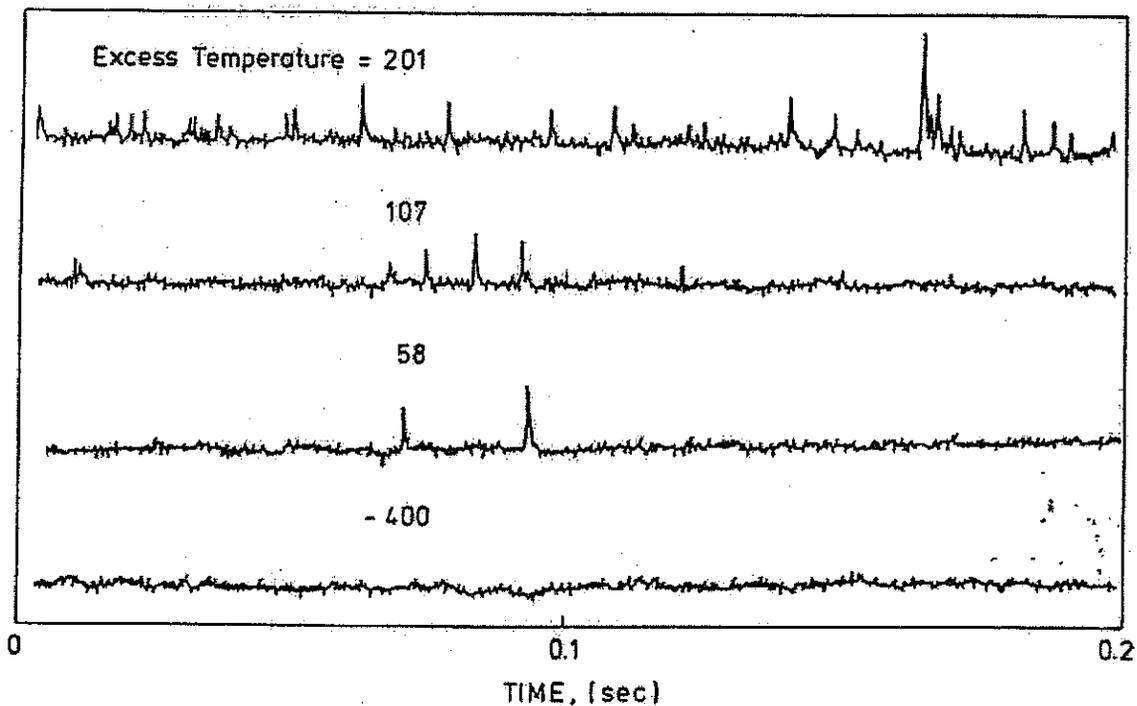


図 3.3-7 KNS 炉外試験結果例 (時系列信号)
(ヒータによる加熱とパルス状の沸騰音の増加)

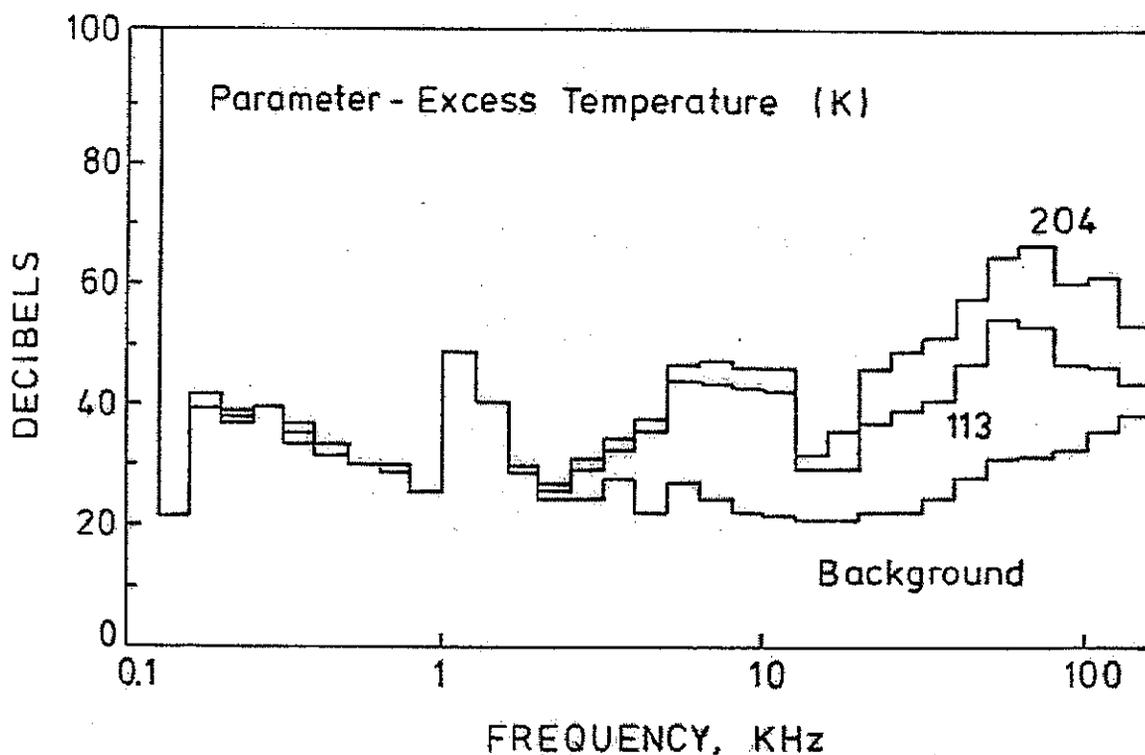


図 3.3-8 KNS 炉外試験結果例 (周波数特性)
(ヒータによる加熱と音響周波数特性の変化)

3.4 試験結果

(1) 正弦波試験(sin波試験)

前節で示した装置を用いてB & Kの水中マイクロフォンを基準マイクロフォンとして、パイプロメーターとインターアトムマイクロフォンの基本性能評価を行った。試験結果の図を図3.4-1(a)～(h)に示す。なお、この3種のマイクロフォンの表3.3-1に示す特性表から、基本音響特性としては、B & Kの水中マイクロフォンが100Hz～177.8kHzまで安定した測定ができ、パイプロメーターが100Hz～10kHz、インターアトムでは10kHz以上の高い周波数まで測定できると考えられる。各測定結果は、(a)が100Hzの信号をスピーカーに入力し、各3種類のマイクロフォンで計測した応答波形である。同様に、それぞれ(b):316Hz、(c):1kHz、(d):3.16kHz、(e):10kHz、(f):31.6kHz、(g):100kHz、(h):177.8kHzの入力信号に対する3種のマイクロフォンの応答波形である。また、各図の一番上の波形が基準測定マイクロフォンとして使用したB & Kの水中マイクロフォン、中段の図がパイプロメーター、下段の図がインターアトムのマイクロフォンの測定結果である。

試験結果の図3.4-1(a)～(h)から、時系列信号を低い周波数から高い周波数への応答結果を見ると、パイプロメーターのマイクロフォンはノイズ信号がのっているが、低い周波数から10kHz以上の高い周波数に対して良好な応答が得られている。それに対してインターアトムのマイクロフォンは低い周波数の信号はノイズに埋もれていて計測するのが困難であるが、10kHz以上の高い周波数に対しては良好な応答が見られることが分かる。

図3.4-2(a)～(h)に図3.4-1(a)～(h)で示した各周波数での測定結果の応答値の周波数分析結果を示す。図3.4-1(a)～(h)の図と同様に上段が基準測定マイクロフォンとして使用したB & Kの水中マイクロフォン、中段の図がパイプロメーター、下段の図がインターアトムのマイクロフォンの測定結果である。これらの結果からS/N値は、100Hz～10kHzまではパイプロメーターのマイクロフォンが40dB、インターアトムのマイクロフォンが20dBであることが分かる。また、それ以上の高い周波数ではインターアトムの方が良いS/N値を示している。周波数特性のノイズレベルが右肩上がりになっている理由として、プリアンプ固有の特性が現れていることが考えられる。ノイズの原因については、試験装置の周囲からの電磁ノイズ等、種々の要因が考えられるため、S/N値の改善余地があると考えられる。

マイクロフォンの感度特性の評価として、入力信号に対する周波数応答特性を調べるため、測定結果を周波数分析して、B & Kのマイクロフォンで測定した結果を基準値としてパイプロメーターとインターアトムのマイクロフォンの特性を比較した結果を図3.4-3に示す。この結果から、パイプロメーターのマイクロフォンは100Hz～100kHzまで基準水中マイクロフォンと比較的よく一致した結果を得ている。それ

に対してインターアトムの結果は 10kHz~177.8kHz では基準水中マイクロフォンとおよそ一致しているものの 100Hz~10kHz までの感度は悪いことが分かった。

(2) 模擬沸騰音による試験

インパルス波形の試験では図 3.4-4(a)に示すようなインパルス状の波形を 20msec 間隔で発信した。また、その 1つの波形の拡大図は図 3.4-4(b)に示すように約 20 μ s (51.2kHz) を周期とした。また周波数が 25.6kHz の場合についても試験を行った。試験結果を図 3.4-5(a)、(b)に示す。図は上から B & K、パイプロメータ、インターアトムの順であり、同時にデータを取得した結果である。

この試験結果の図から分かるように、25.6kHz の場合はインターアトムのマイクロフォンに比べてパイプロメータの方が S/N 値が良く、51.2kHz ではインターアトムの方が S/N 値が良いことが分かった。

ホワイトノイズによる試験結果を図 3.4-6(a)~(c)に示す。基準マイクロフォンの B & K (a)が~150kHz まで広範囲に音を捉えているのに対し、パイプロメータのマイクロフォンは 70kHz 以上の帯域が捉えにくく、インターアトムの方は、30kHz 以下をほとんど捉えられない傾向があることが分かった。

以上の結果をまとめると、ややノイズがのっているもののインパルス状の波形を良好に同時性を持ってとらえられていることが分かった。また 10kHz 以下に固有の周波数ピークがあるものの広帯域にわたって比較的フラットな音響特性を持っていることから、パイプロメータのマイクロフォンは模擬沸騰音に対して良好な音響特性を有していることが分かった。なお、今回の水中試験での結果は、複数の音響マイクロフォンを用いた相関処理による S/N 改善方法の検証のための炉外水中試験時においても参考基準となるデータであり、水中試験時の音響信号評価において活用する予定である。

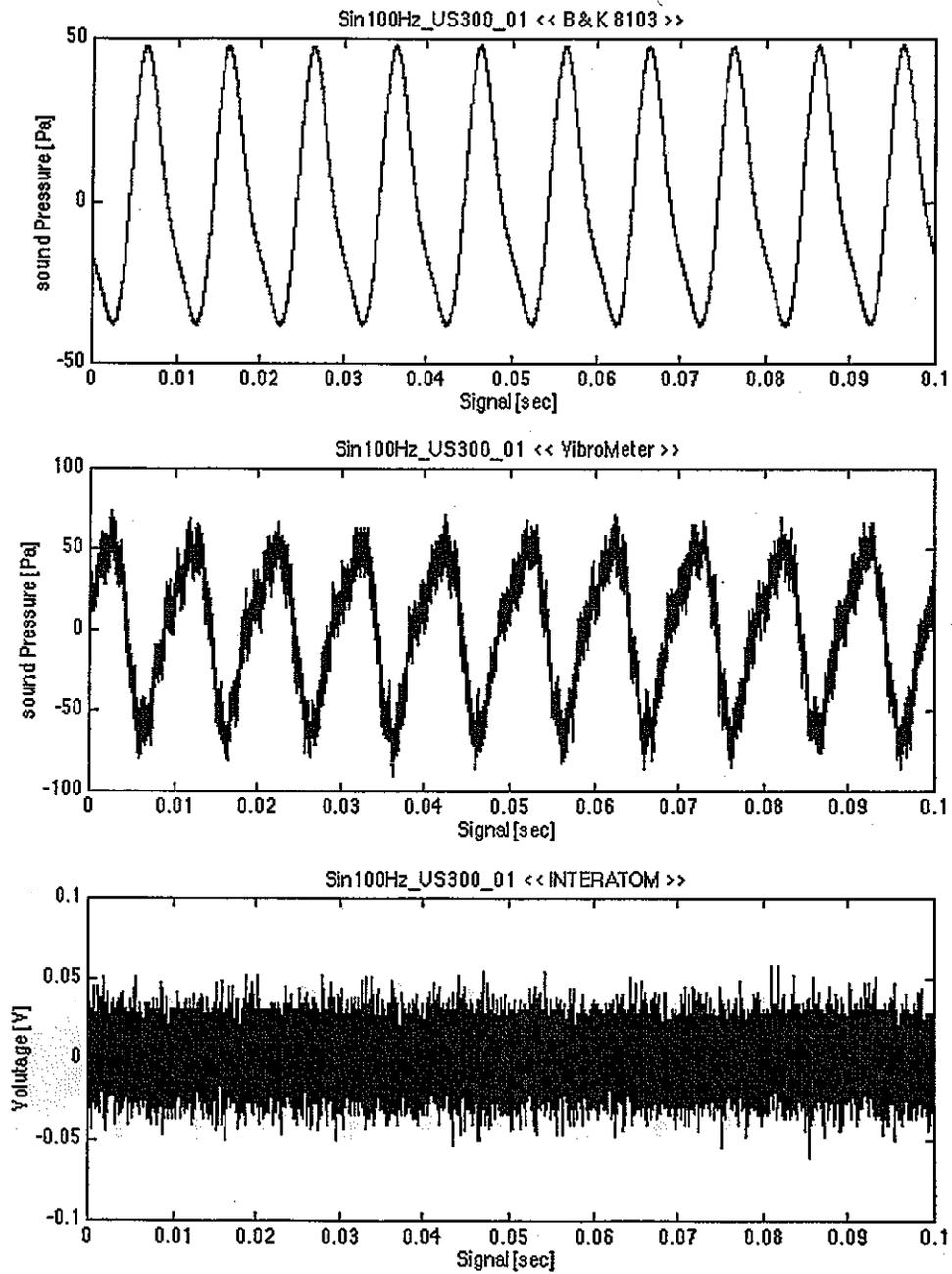


図 3.4-1(a) 応答波形 (入力: sin 波 100Hz)

(横軸: 時間 (秒)、縦軸: 音圧強度)

上段: 水中マイクホン B&K、中段: バイブロメータ、下段: インターアトム

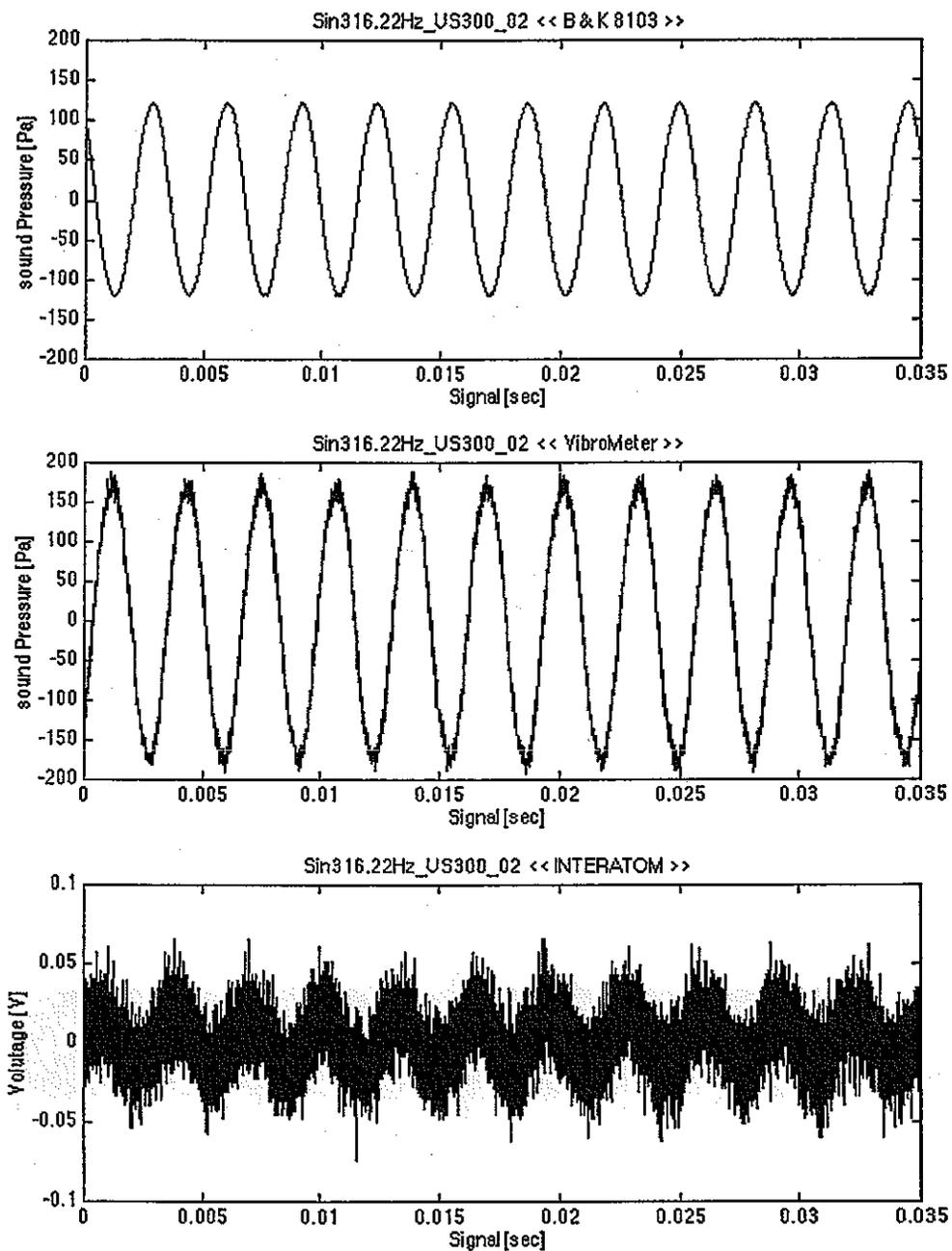


図 3.4-1 (b) 応答波形 (入力: sin 波 316.2Hz)
(横軸: 時間 (秒)、縦軸: 音圧強度)
上段: 水中マイク B&K、中段: バイロメータ、下段: インターアトム

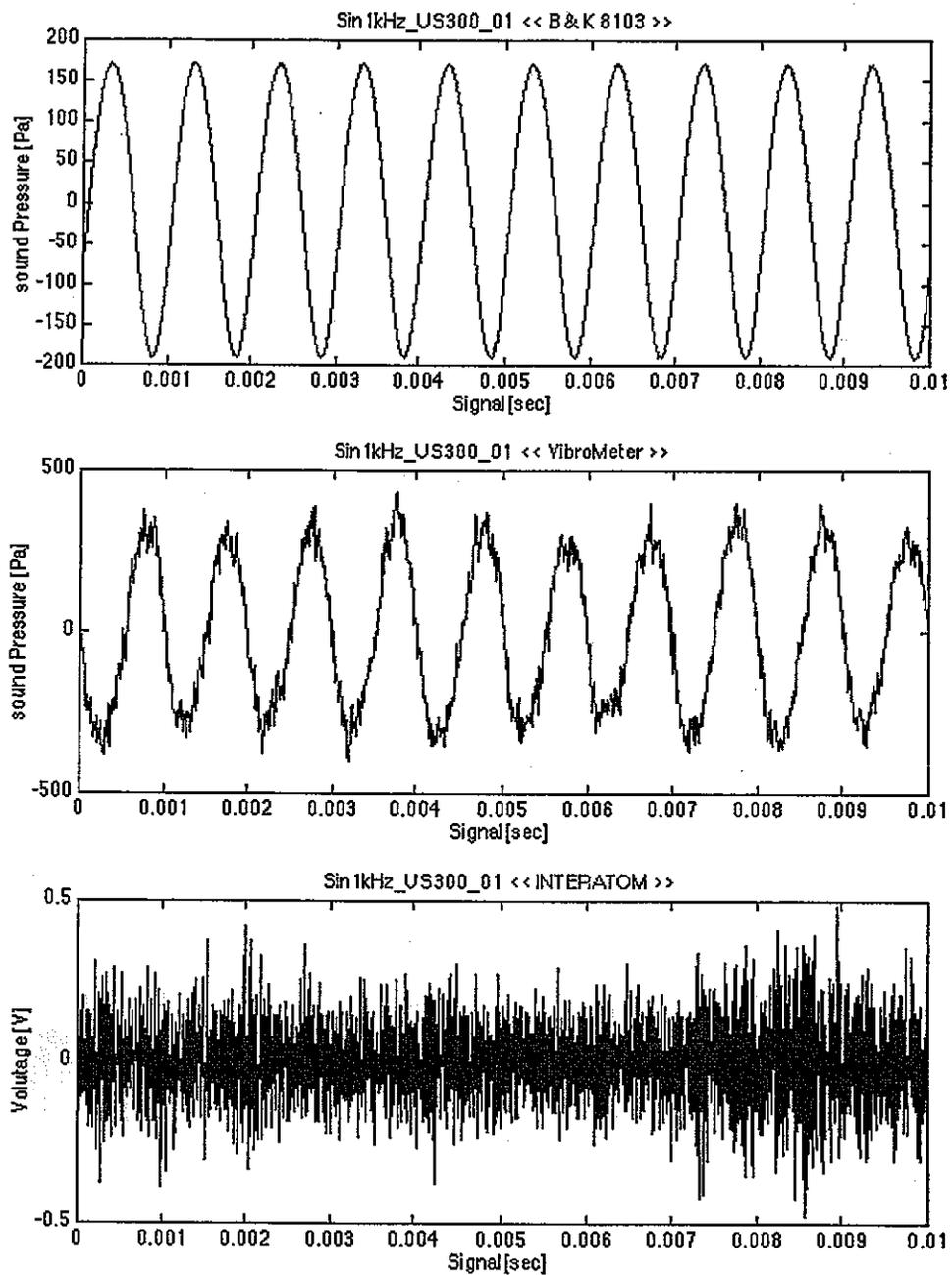


図 3.4-1(c) 応答波形 (入力: sin 波 1kHz)

(横軸: 時間 (秒)、縦軸: 音圧強度)

上段: 水中マイクホン B&K、中段: バイロメーター、下段: インターアトム

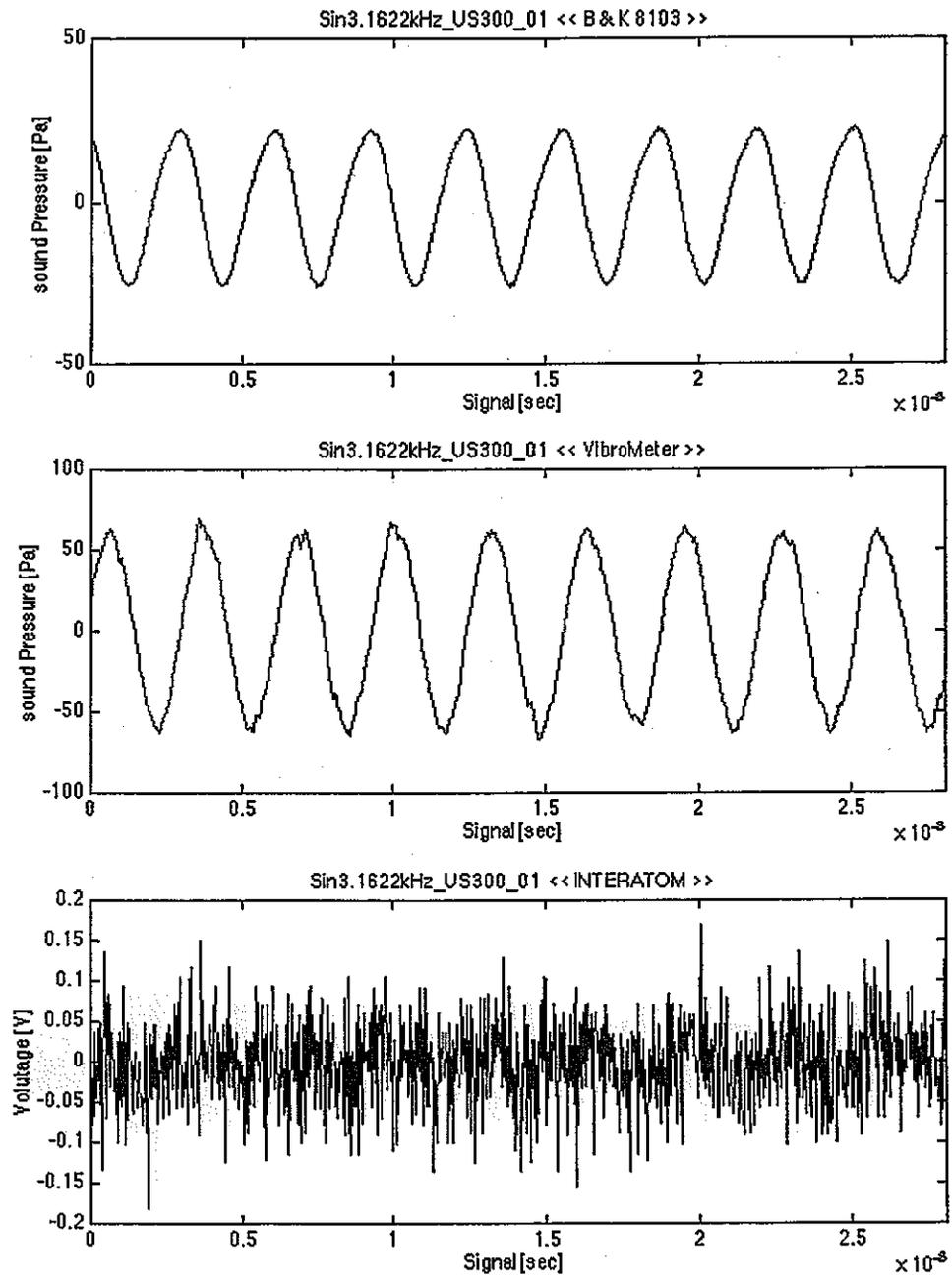


図 3.4-1(d) 応答波形 (入力: sin 波 3.162kHz)
(横軸: 時間 (秒)、縦軸: 音圧強度)
上段: 水中マイクホン B&K、中段: バイロメータ、下段: インターアトム

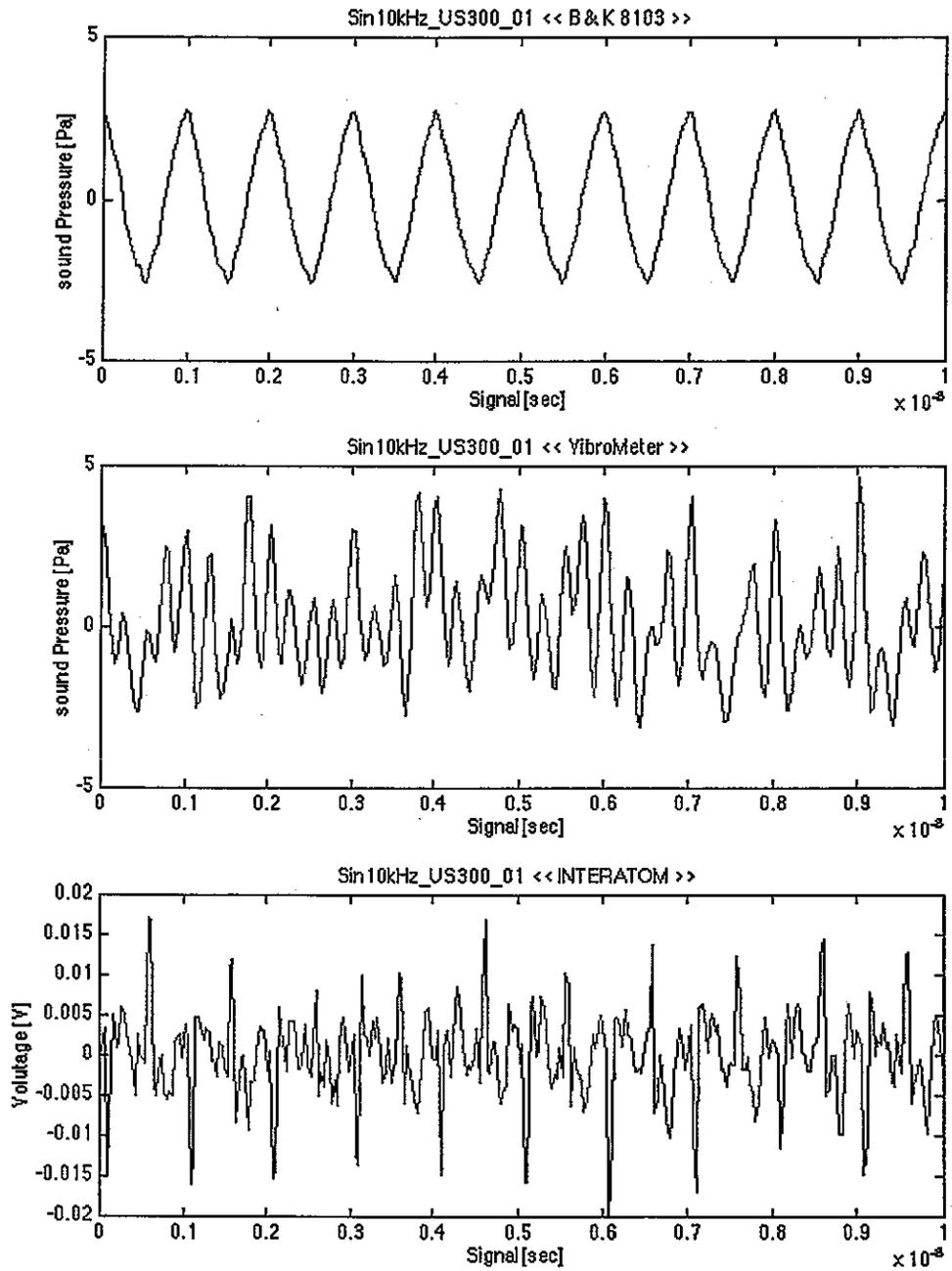


図 3.4-1(e) 応答波形 (入力: sin 波 10kHz)

(横軸: 時間 (秒)、縦軸: 音圧強度)

上段: 水中マイクホン B&K、中段: バイブロメータ、下段: インターアトム

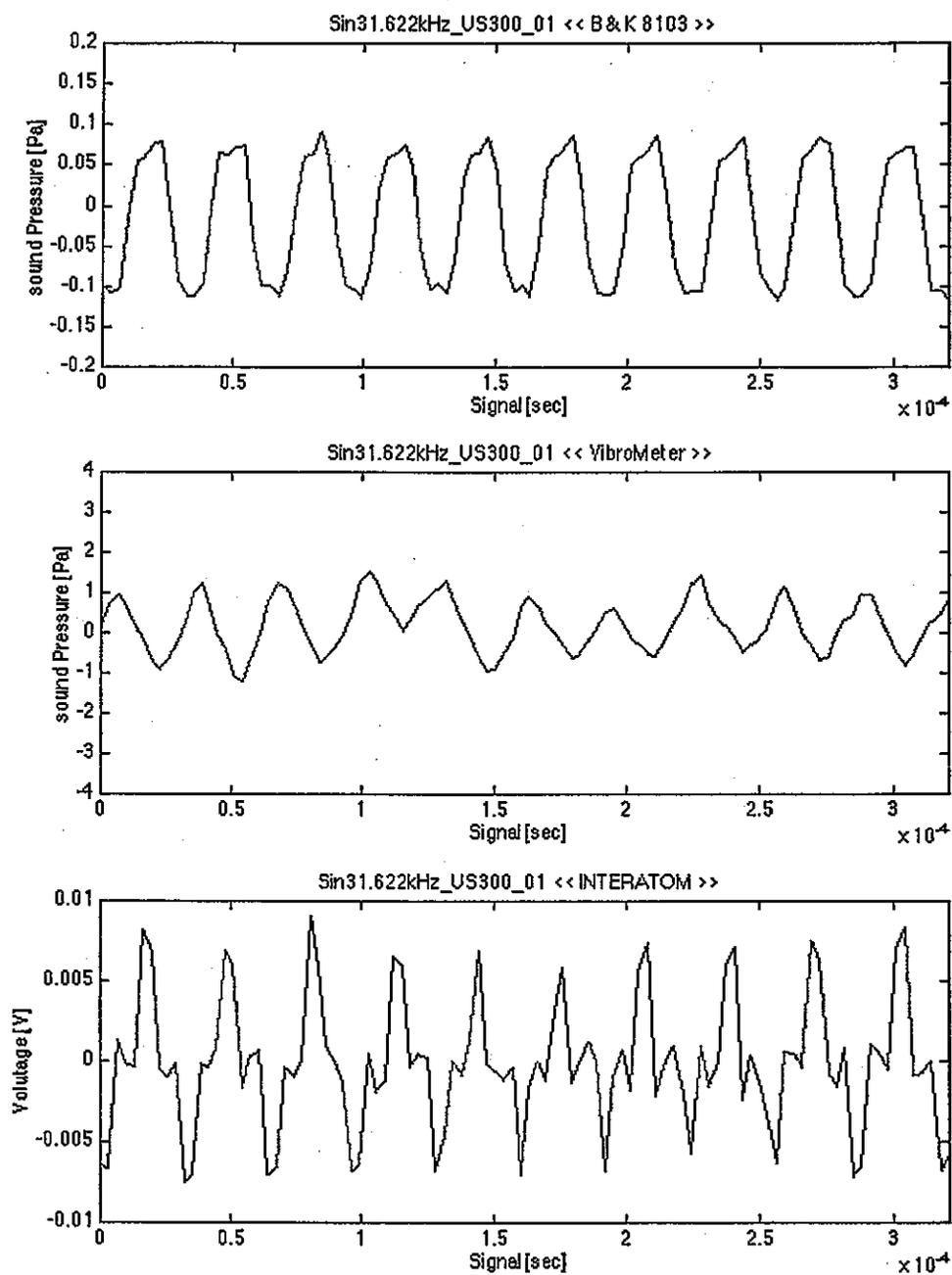


図 3.4-1(f) 応答波形 (入力:sin 波 31.62kHz)

(横軸:時間(秒)、縦軸:音圧強度)

上段:水中マイクホンB&K、中段:バ イ romeター、下段:イカ-アム)

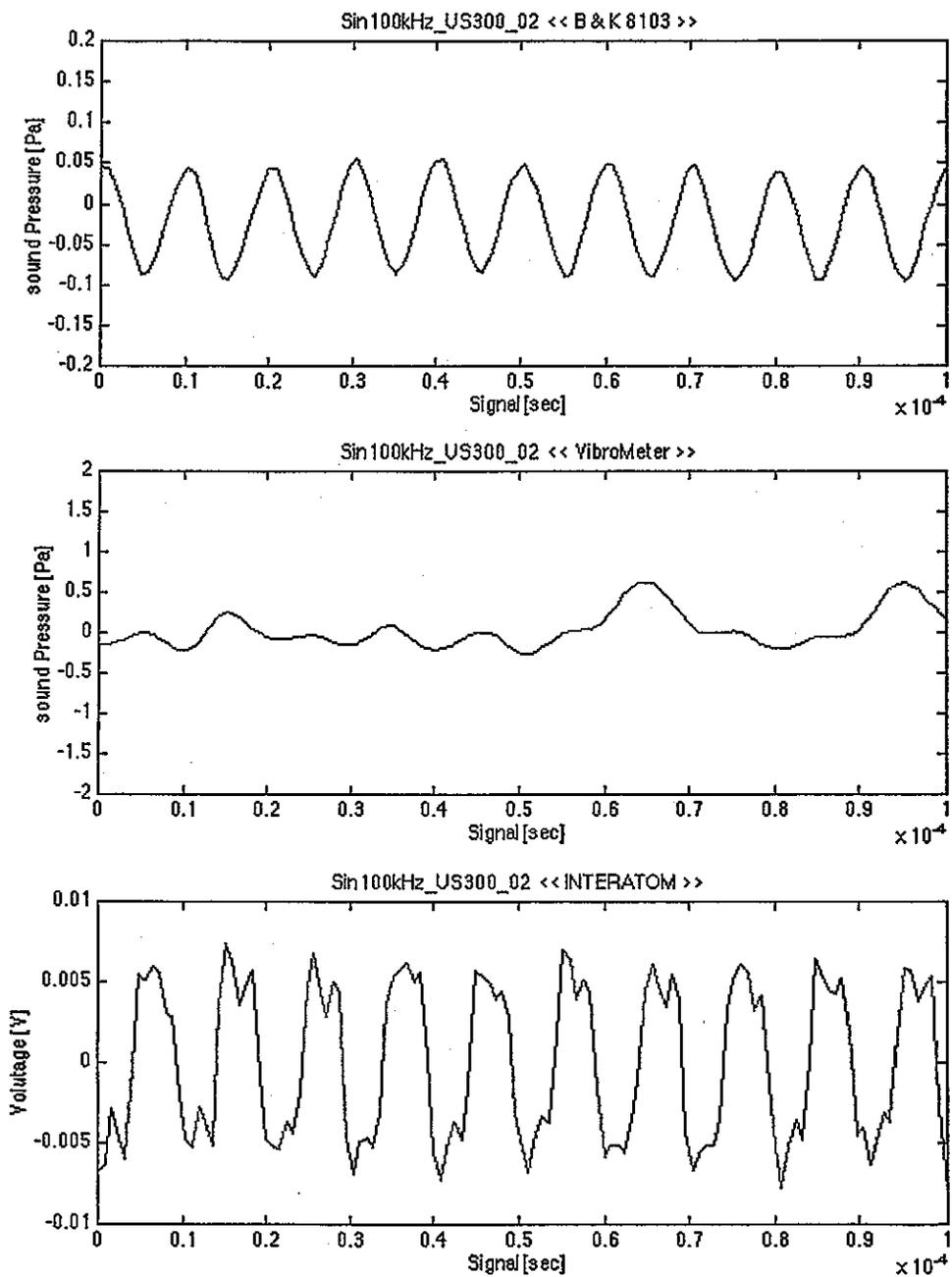


図 3.4-1(g) 応答波形 (入力:sin 波 100kHz)

(横軸:時間(秒)、縦軸:音圧強度)

上段:水中マイク B&K、中段:バインメーター、下段:インタトム

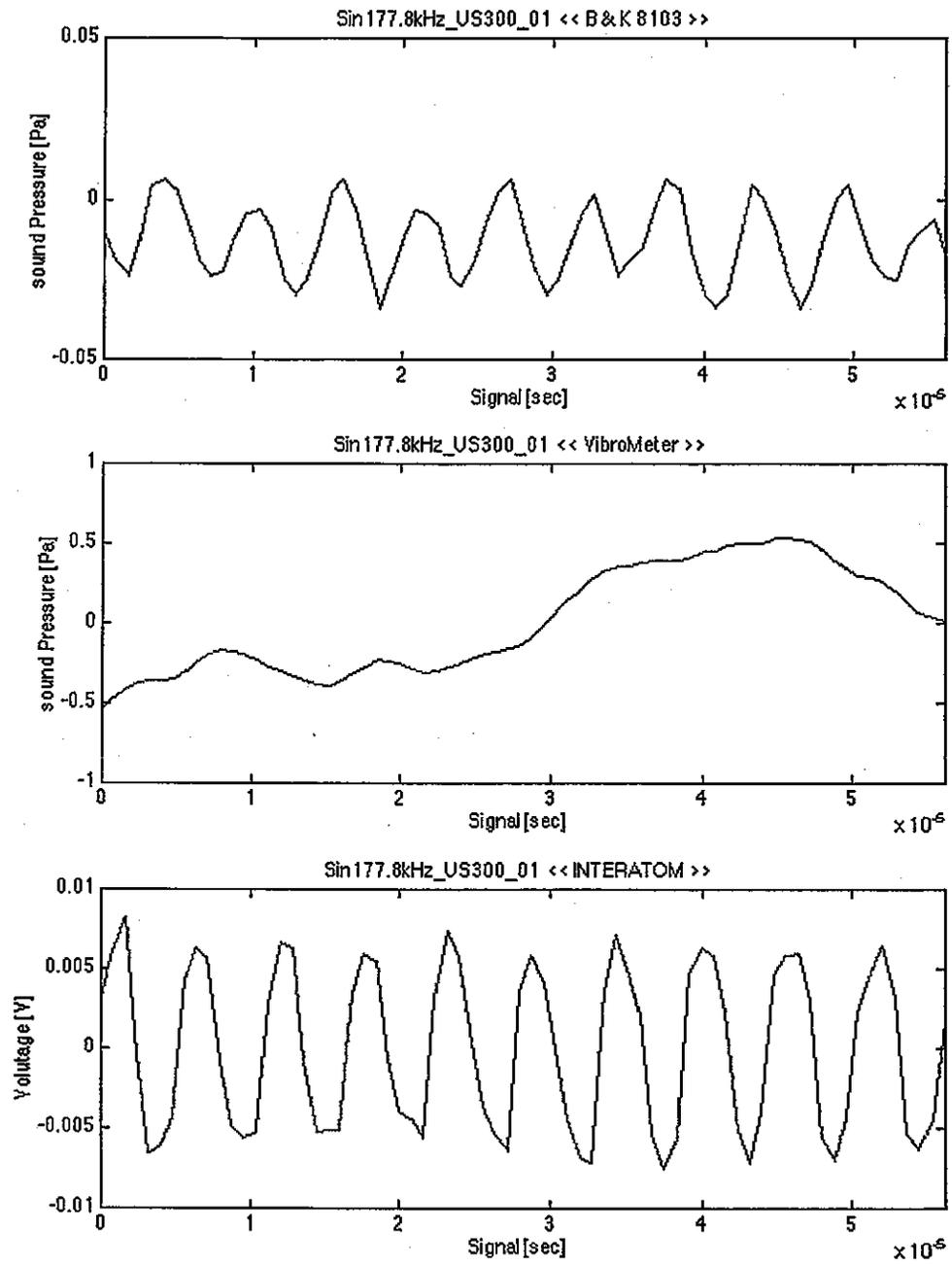


図 3.4-1 (h) 応答波形 (入力: sin 波 177.8kHz)
(横軸: 時間 (秒)、縦軸: 音圧強度)
上段: 水中マイクロホン B&K、中段: バイロメータ、下段: インターアトム

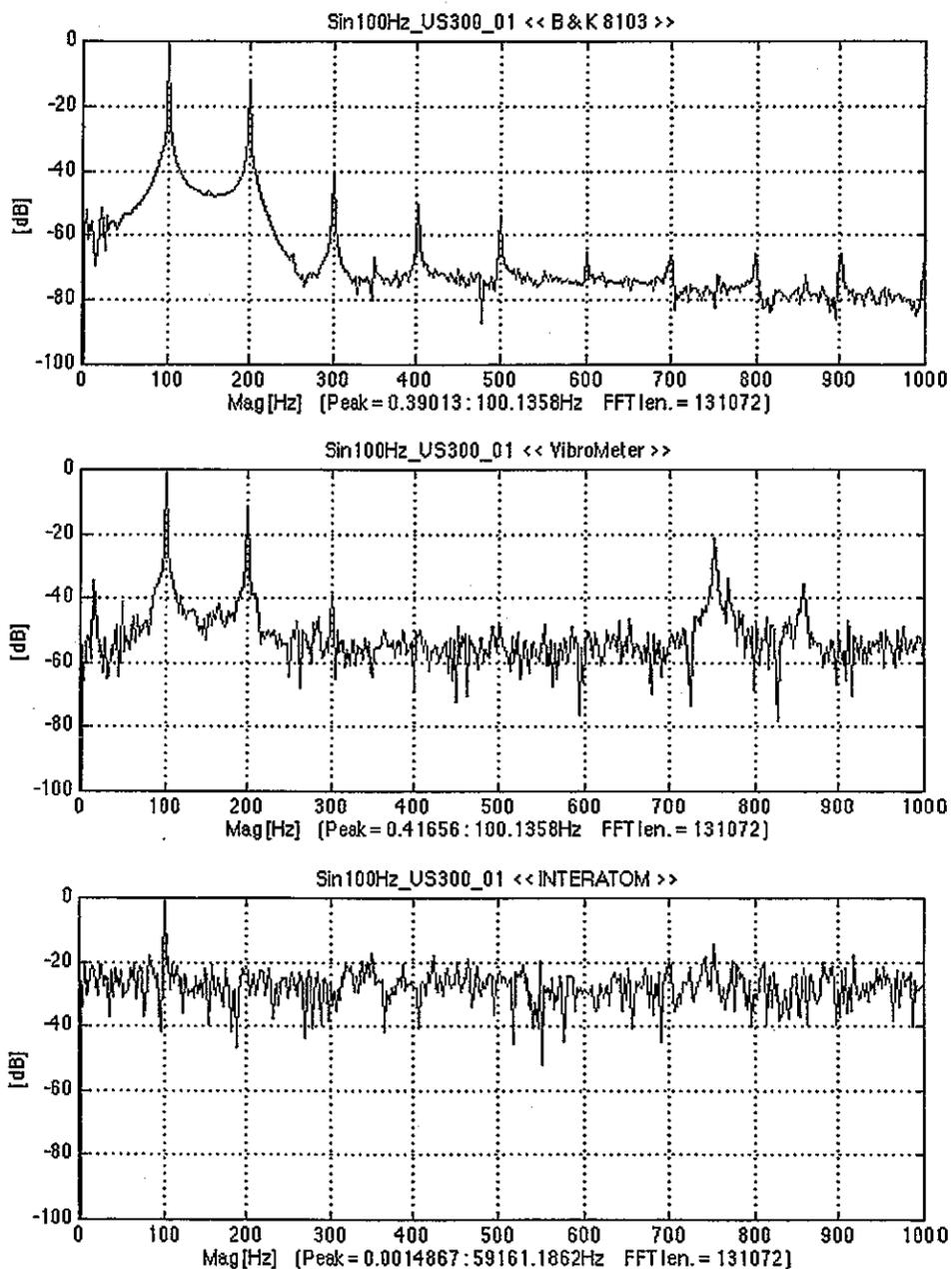


図 3.4-2(a) 周波数特性 (sin 波 100Hz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイク B&K、中段:パイロメーター、下段:インターアトム

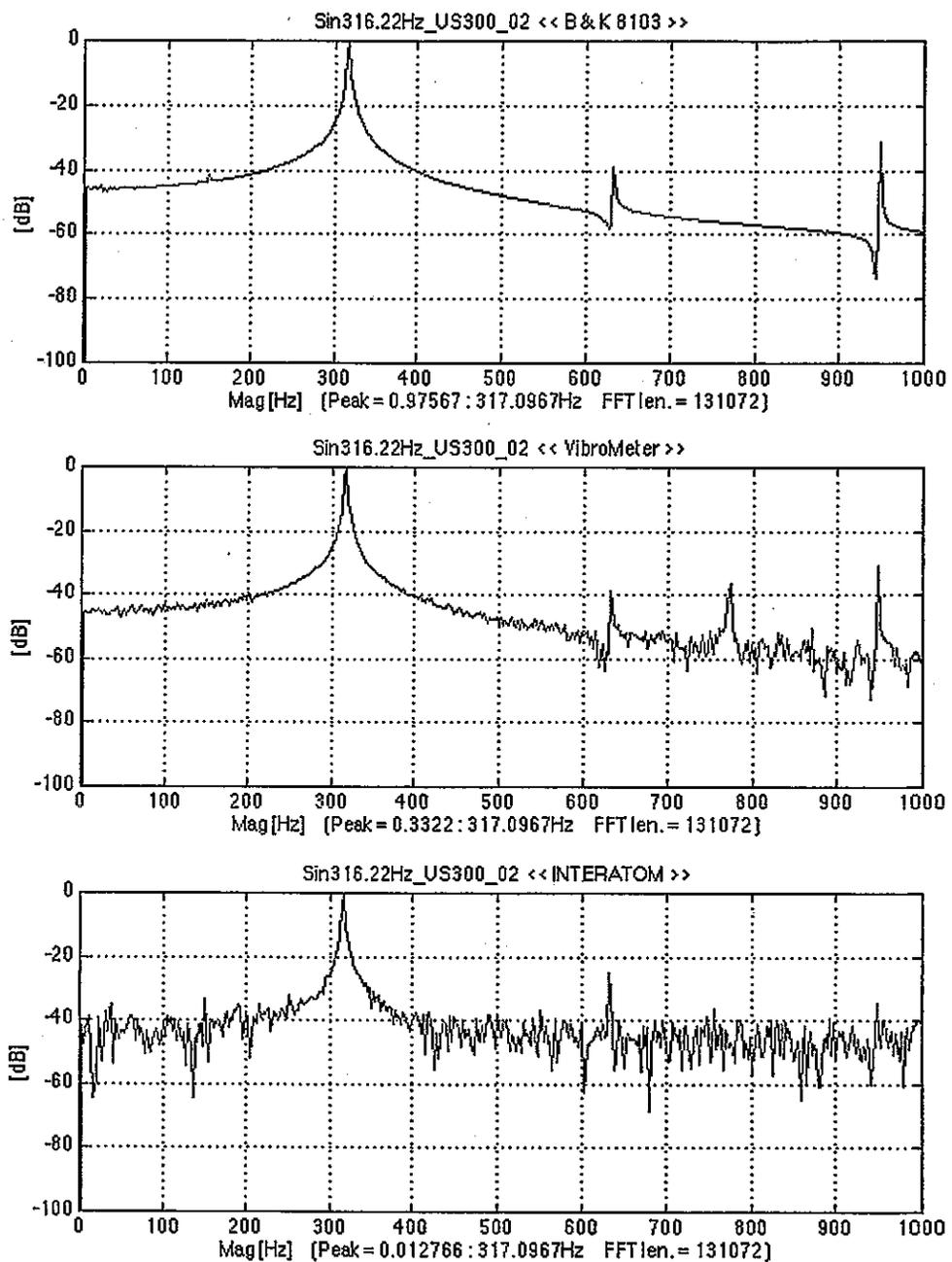


図 3.4-2(b) 周波数特性 (sin 波 316.2Hz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイクホンB&K、中段:バイブロメーター、下段:インターアトム)

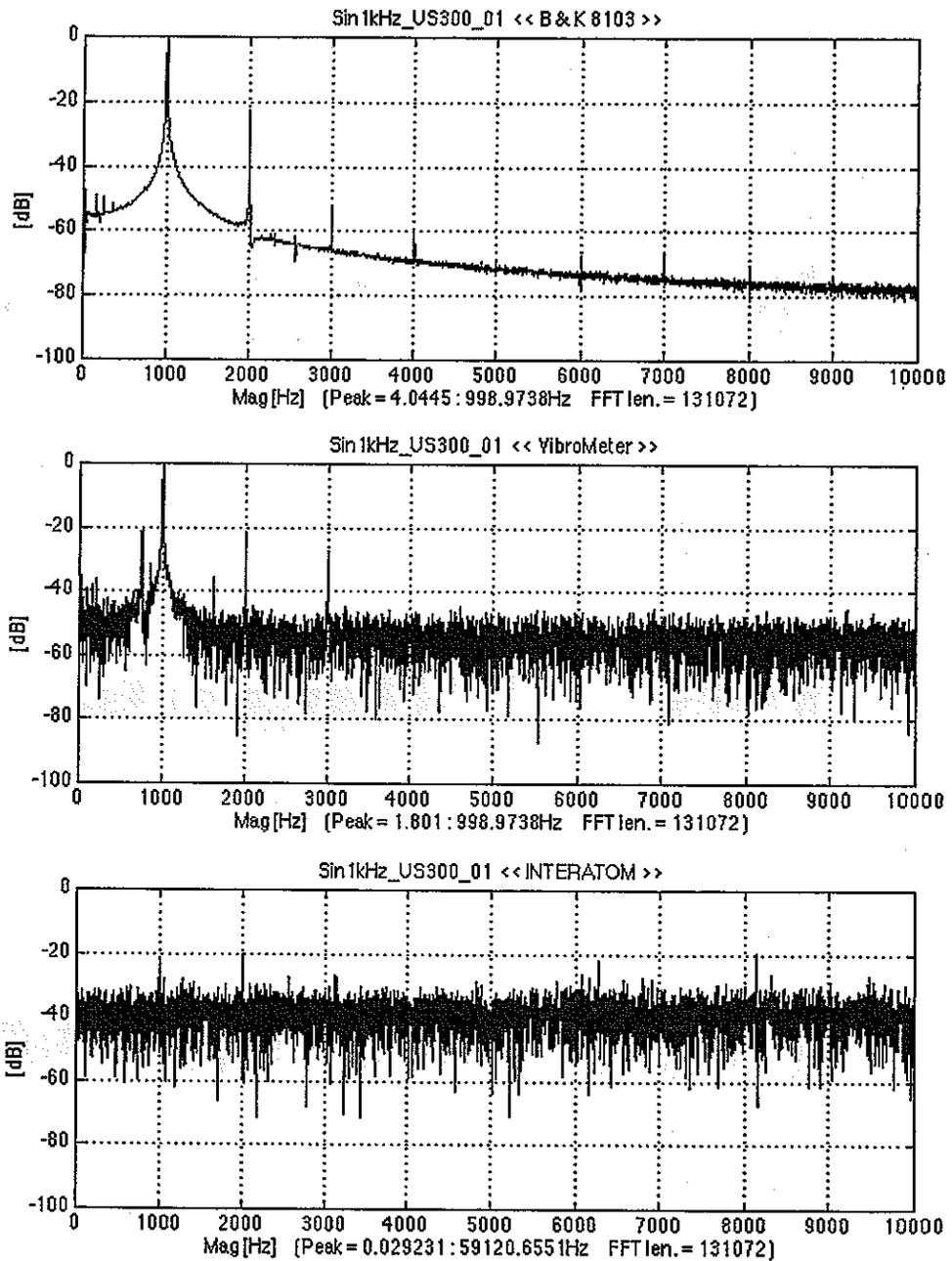


図 3.4-2(c) 周波数特性 (sin 波 1kHz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイク B&K、中段:パイロメーター、下段:インターアトム

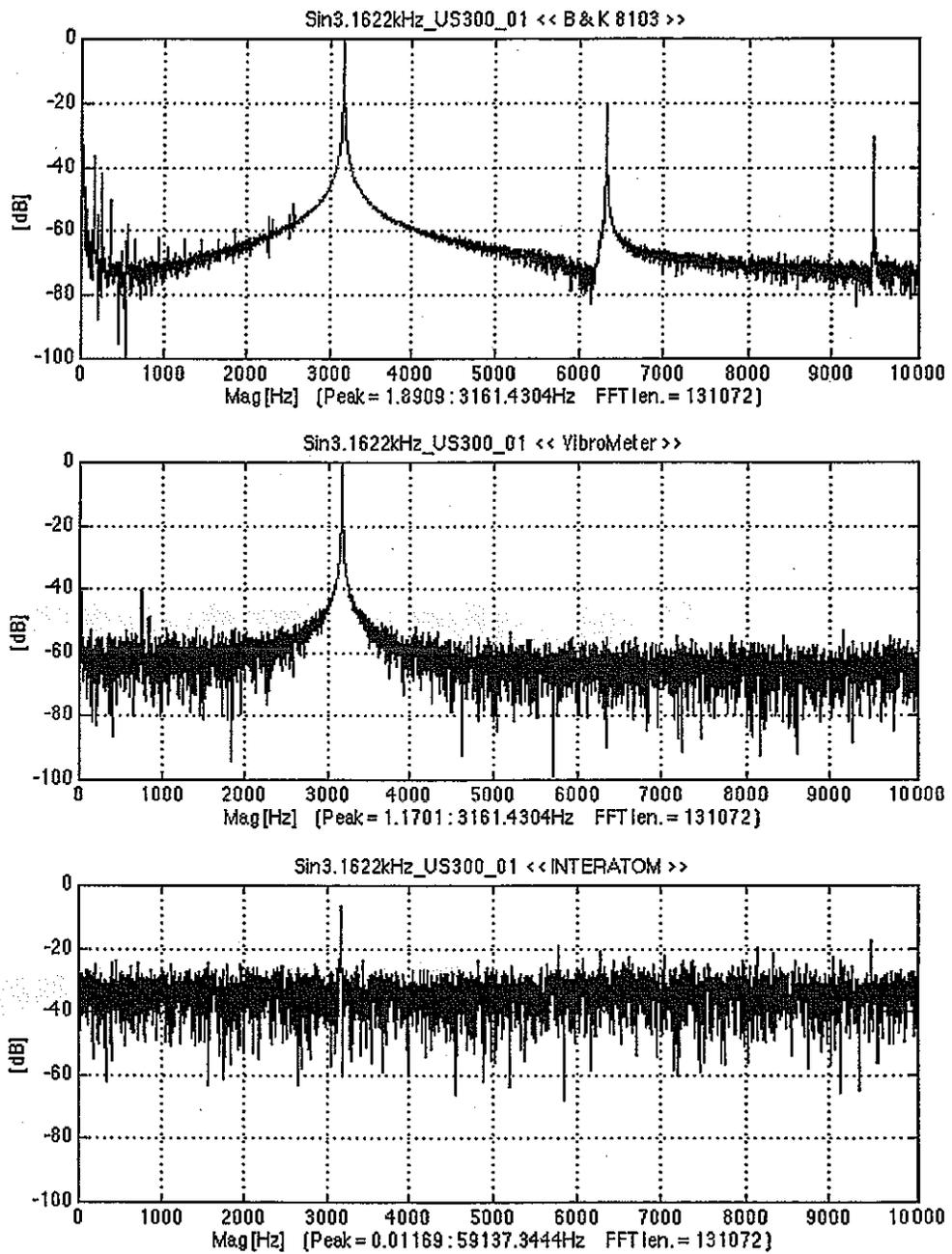


図 3.4-2(d) 周波数特性 (sin 波 3.162kHz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイクホンB&K、中段:パイロメーター、下段:インタ-アム)

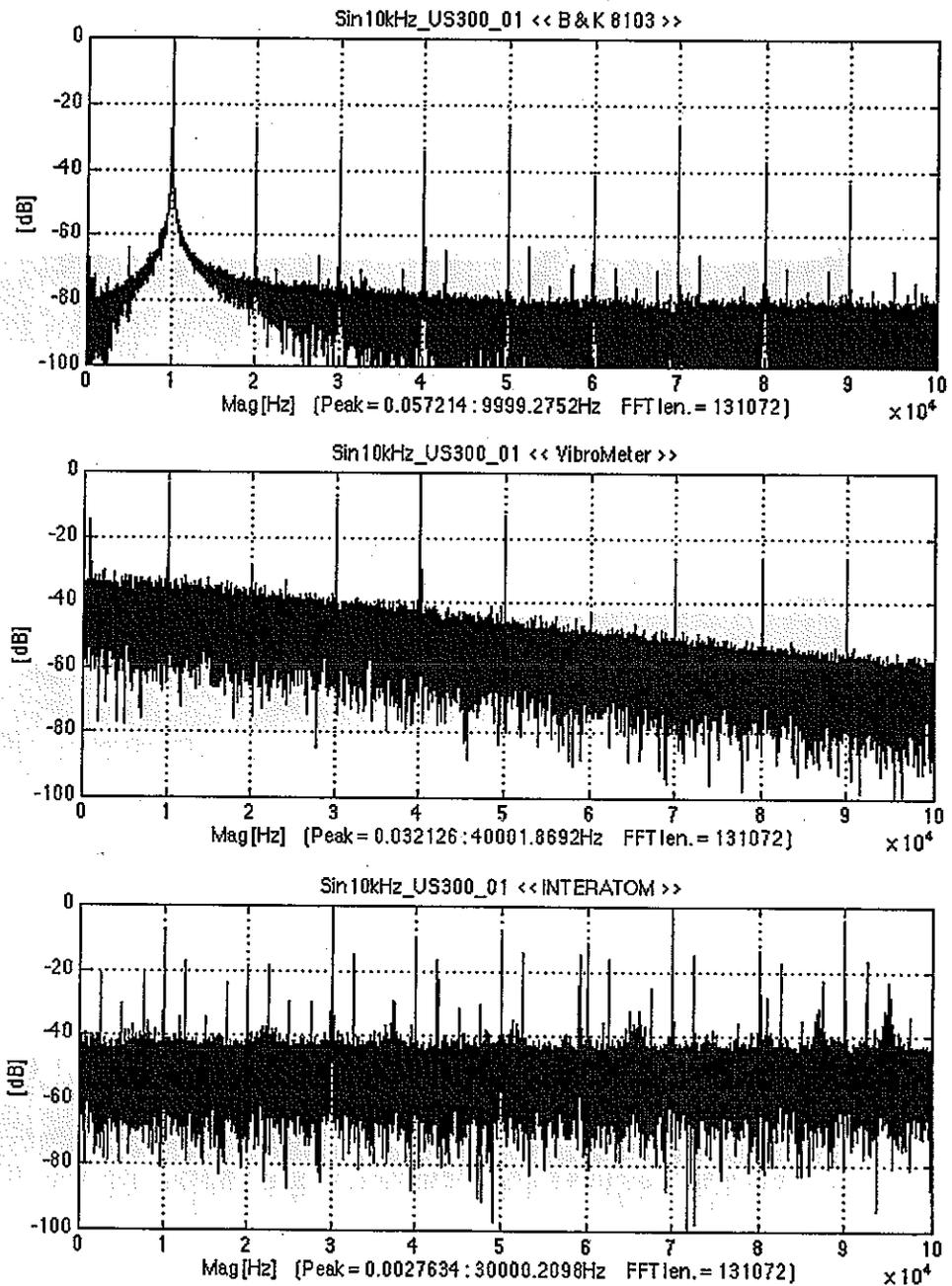


図 3.4-2(e) 周波数特性 (sin 波 10kHz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイクホン B&K、中段:バイブrometer、下段:インターアトム)

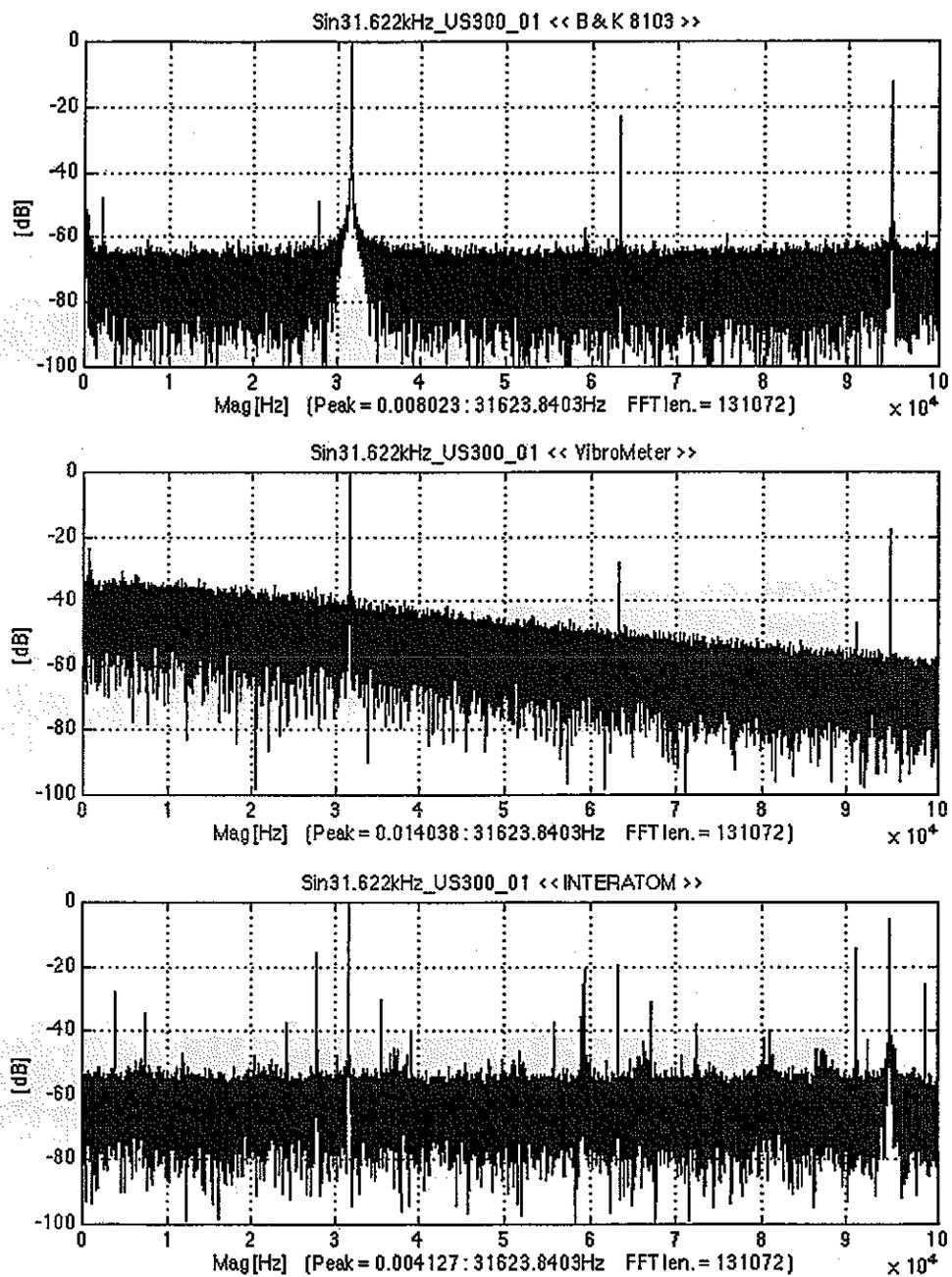


図 3.4-2(f) 周波数特性 (sin 波 31.62kHz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイクホン B&K、中段:バイブrometer、下段:インタトム)

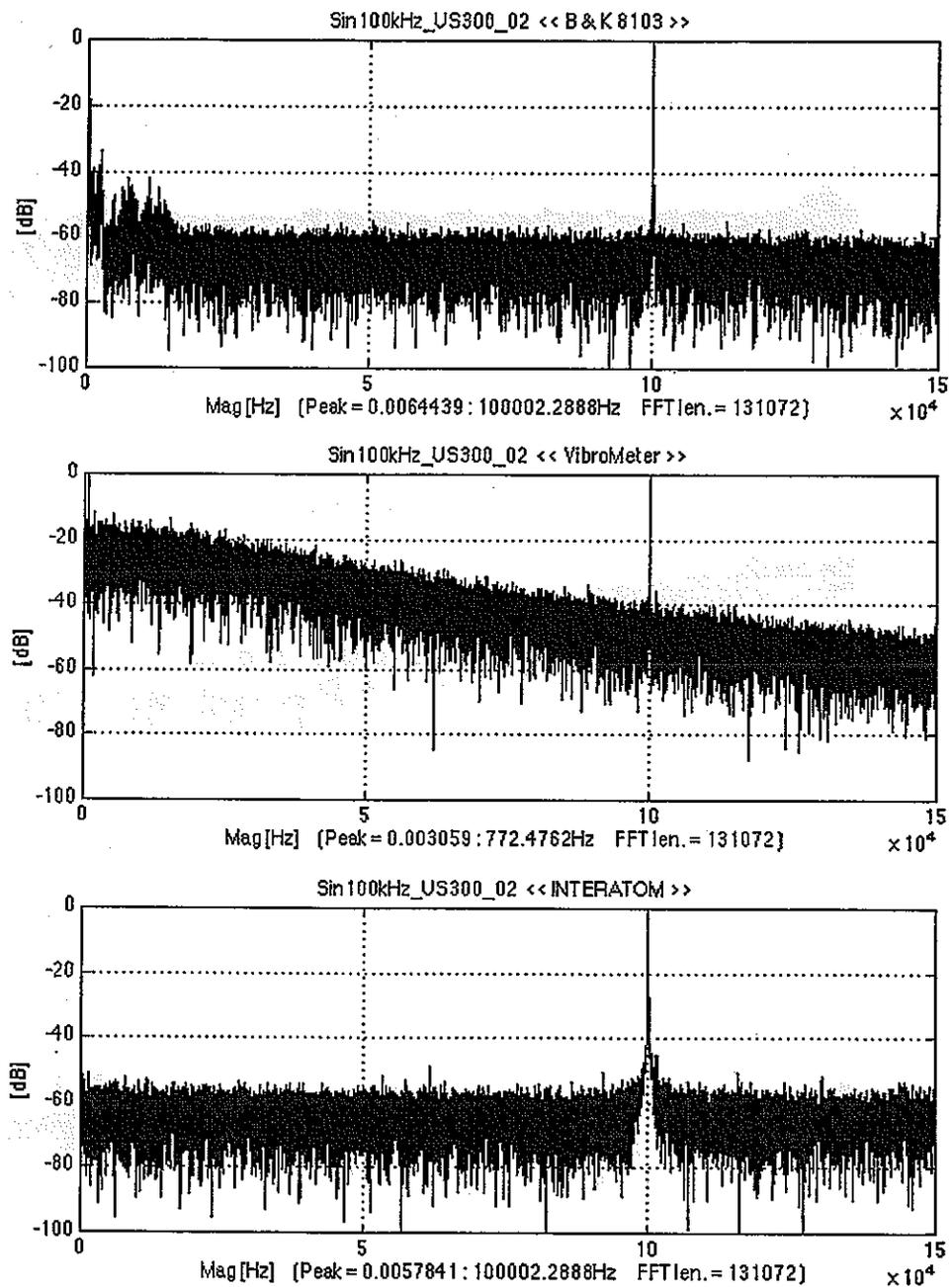


図 3.4-2(g) 周波数特性 (sin 波 100kHz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイクホン B&K、中段:パイロメーター、下段:インタトム

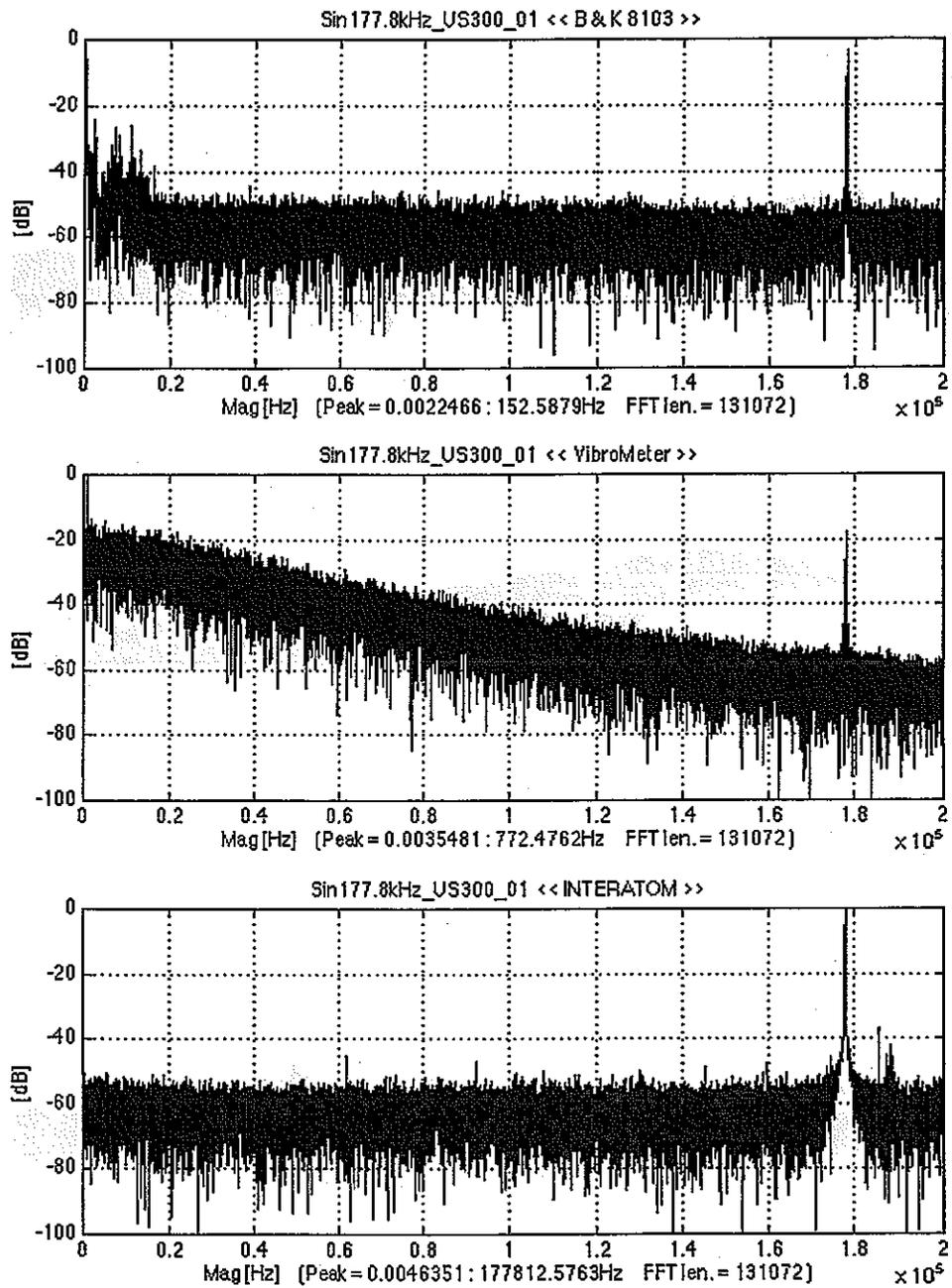


図 3.4-2 (h) 周波数特性 (sin 波 177.8kHz)

(横軸:周波数 Hz、縦軸:ゲイン dB)

上段:水中マイク B&K、中段:パイロメーター、下段:インタートム)

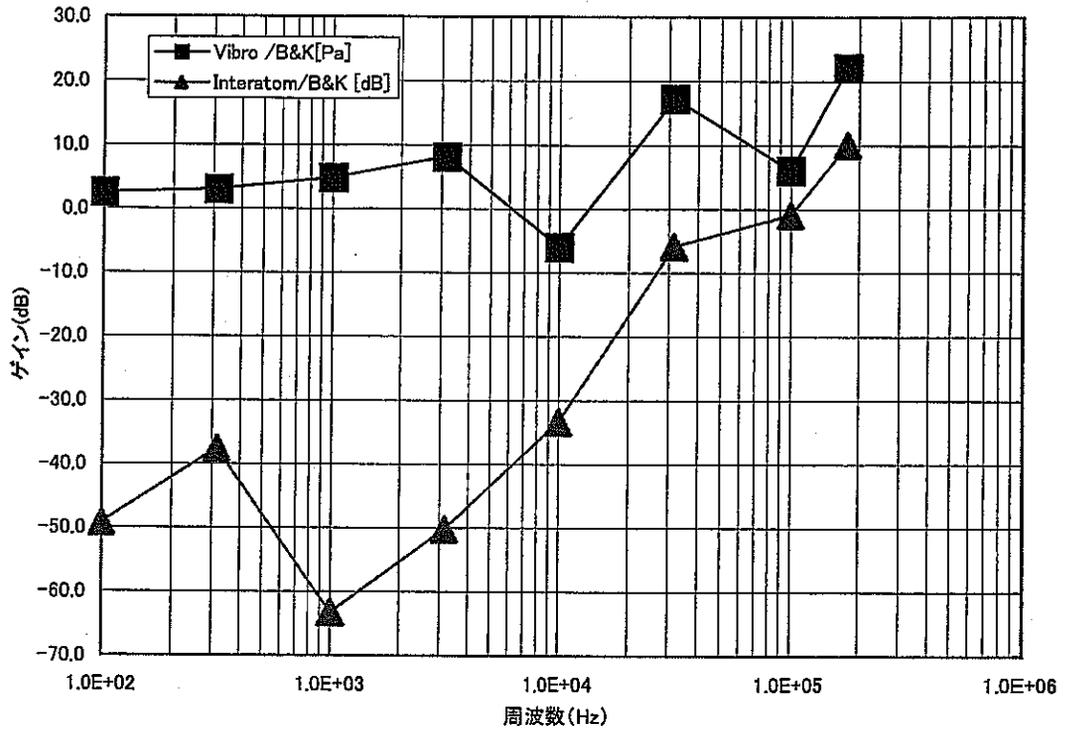


図 3.4-3 バイプロメーターとインターアトムの音響特性の比較
(水中マイクロフォン B&K を基準とした音響特性の比較)

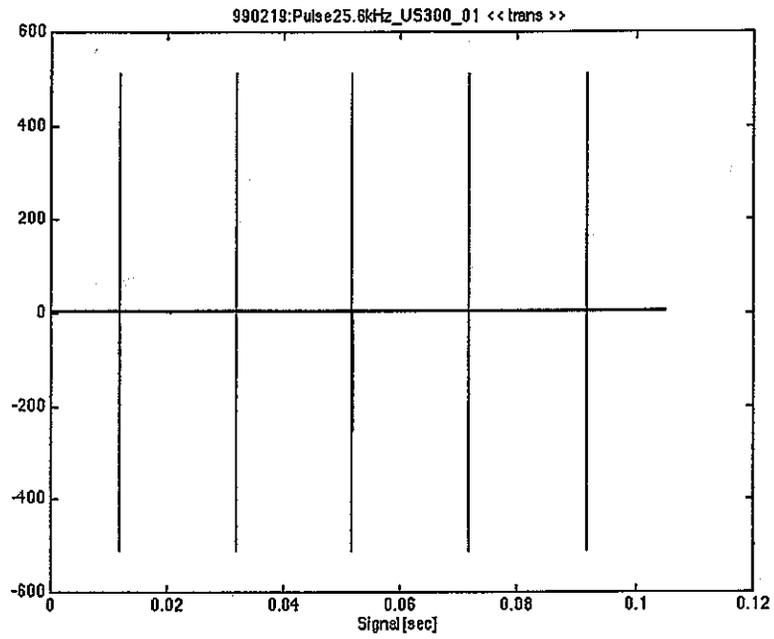


図 3.4-4(a) インパルス入力波形 (発信器への入力波)

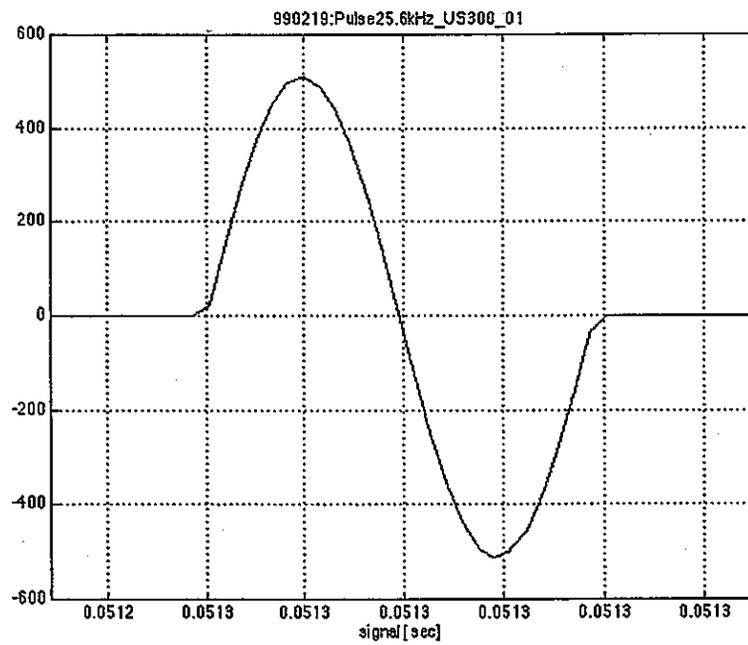


図 3.4-4(b) インパルス入力波形 (51.2kHz、1 波拡大波形)

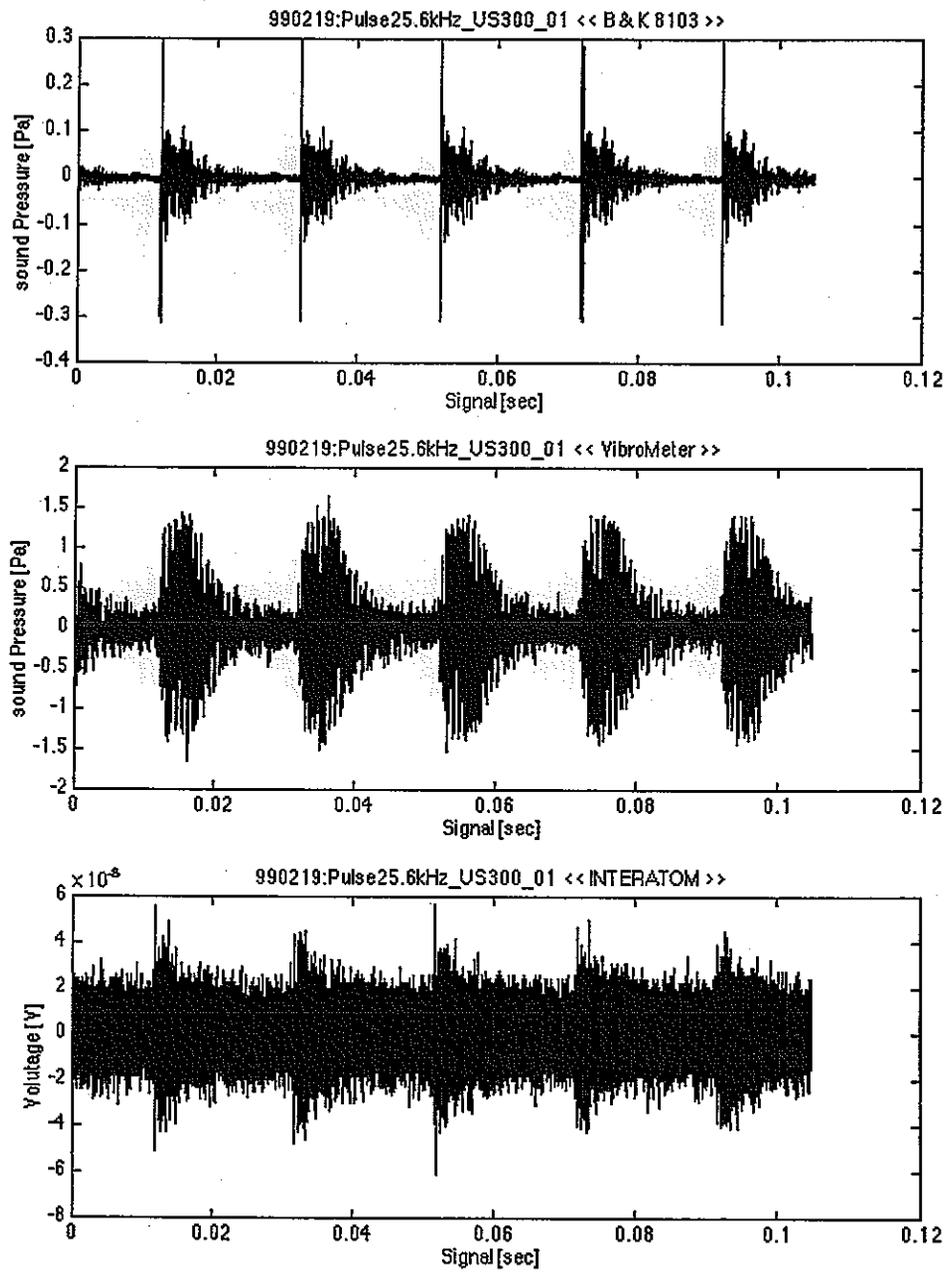


図 3.4-5(a) 出力波形 (25.6kHz、5 波)

(横軸:時間(秒)、縦軸:音圧強度)

上段:水中マイク B&K、中段:バブロメータ、下段:インタコム

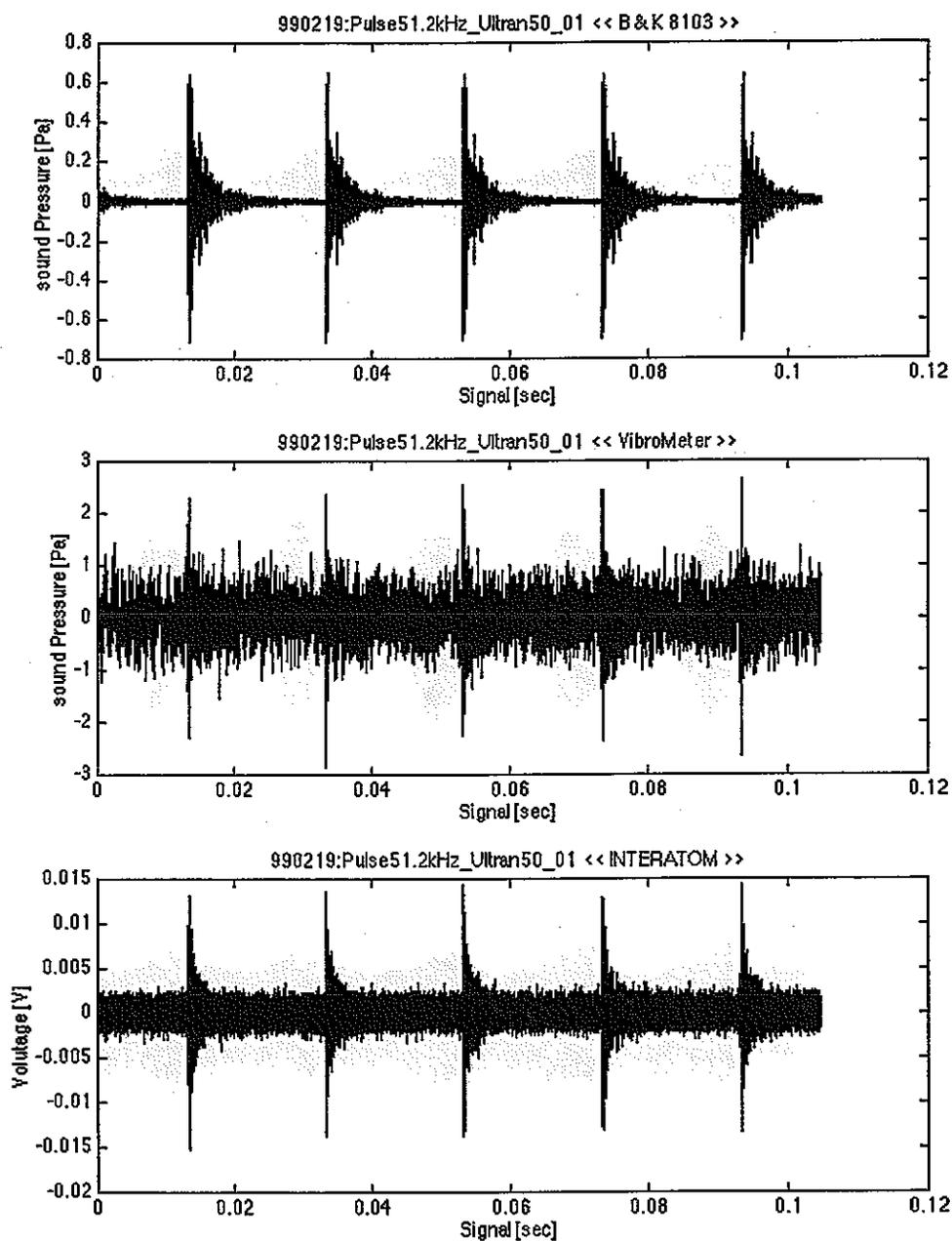


図 3.4-5 (b) 出力波形 (51.2kHz、5 波)

(横軸:時間(秒)、縦軸:音圧強度)

上段:水中マイクホンB&K、中段:ハイブローター、下段:インターアトム

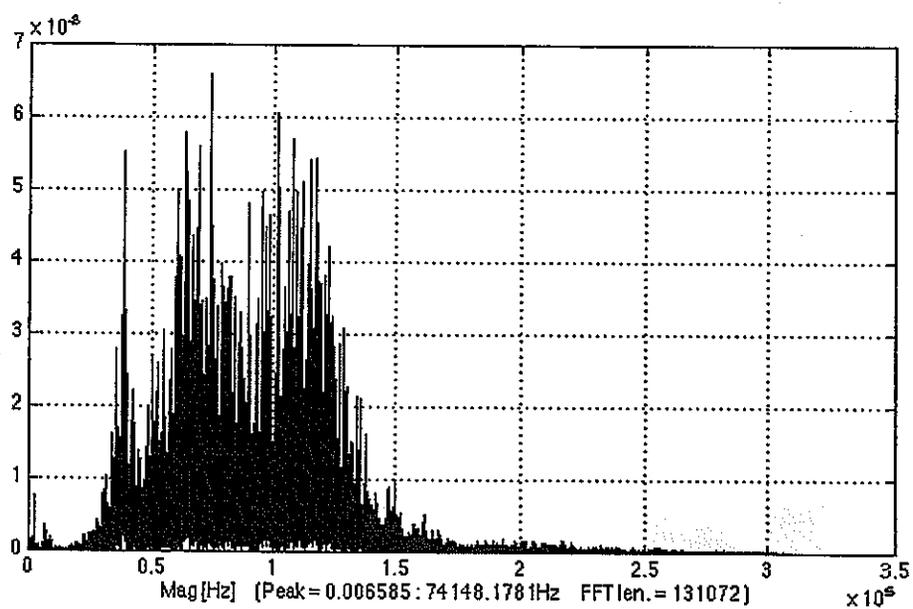
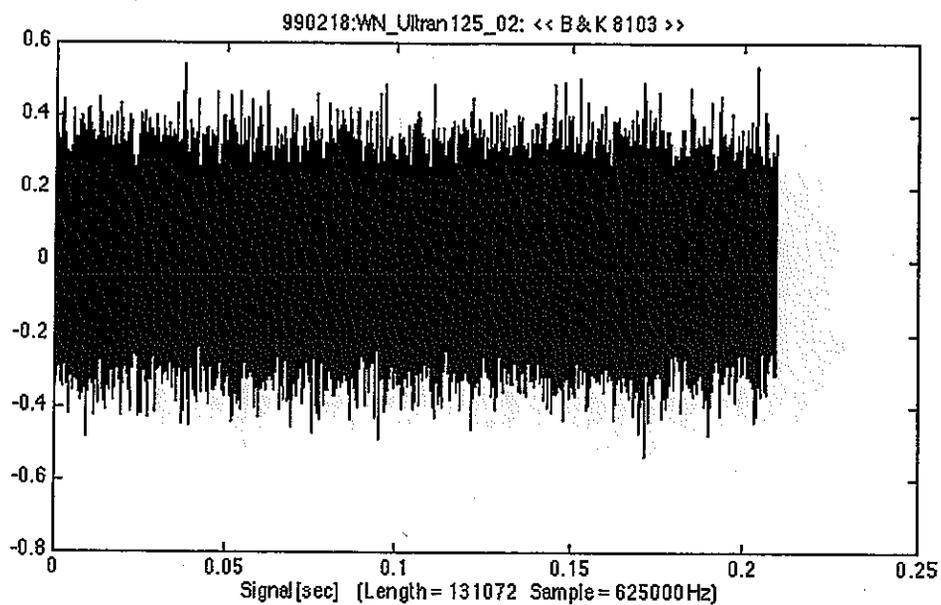


図 3.4-6(a) 波形と周波数特性 (ホワイトノイズ: B&K)

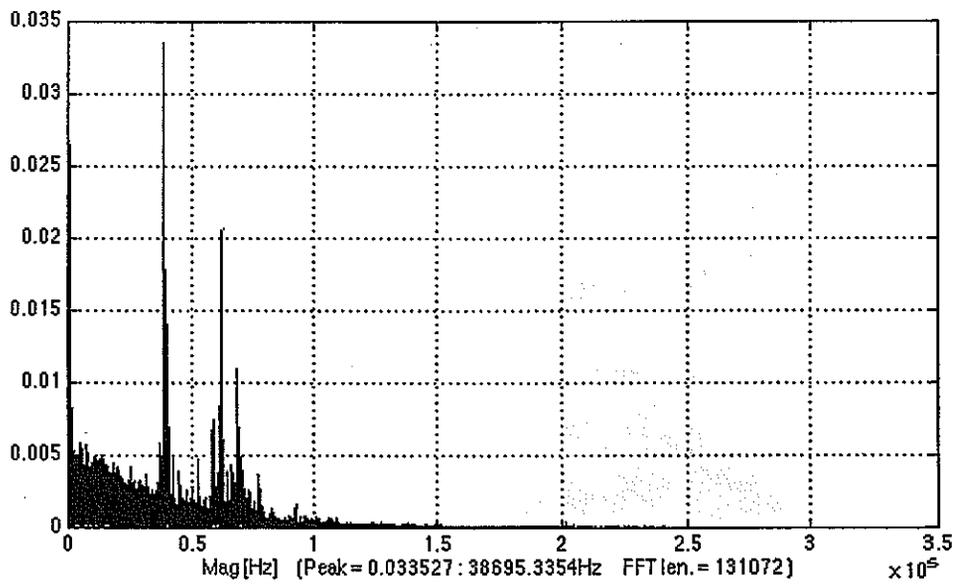
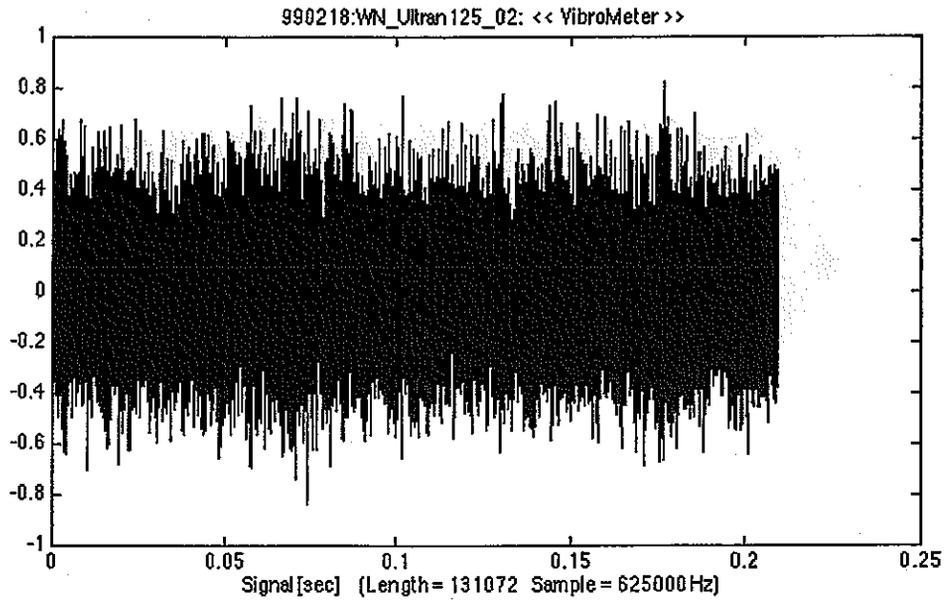


図 3.4-6(b) 波形と周波数特性 (ホワイトノイズ: VibroMeter)

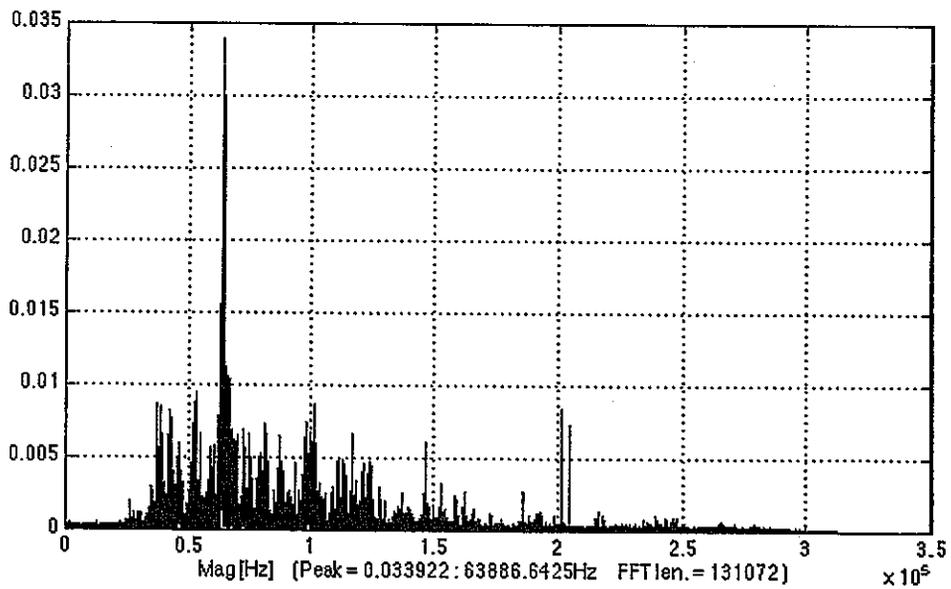
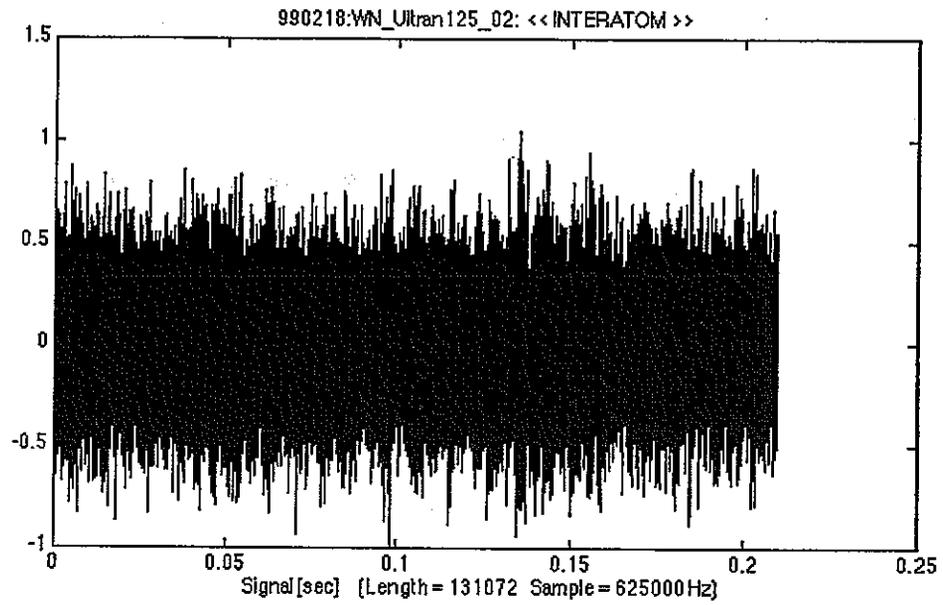


図 3.4-6(c) 波形と周波数特性 (ホワイトノイズ : InterAtom)

4. 検出性能向上の検討

音響法による炉内異常監視技術の開発を進めるにあたっては、2章でも述べたように S/N 向上等の検出性能の向上が重要となる。炉内音響バックグラウンドレベル自体を下げることは不可能であるため、複数の音響マイクロフォンを用いた相関処理等の信号処理による S/N の向上、及び S/N が良く耐熱・耐放射線性のあるナトリウム中用音響マイクロフォンの開発が必要である。

本章では、信号処理技術等による S/N の向上方策の検討、その方策の有効性確認のために必要な試験についてまとめる。

(1) 信号処理技術による S/N の向上

(a) 相関処理による検出精度の向上

ノイズレベルが強い状態における検出精度の向上には、複数の検出器信号間の相関処理を行う相関処理法が有効である。「常陽」では、10kHz～100kHz の周波数帯域にプラント固有のノイズ成分が大きく、沸騰音もこの帯域にあるため、この同じ周波数帯域における信号の弁別に相関処理法は非常に有効である。相関処理法の原理を以下に示す。

$f_1(t)$, $f_2(t)$ を 2 つの音響検出器で受信した信号、 $P(\tau)$ を下式で示す相互相関関数として定義する。

$$P(\tau) = \int_{t=-\infty}^{t=0} f_1(t) f_2(t-\tau) dt$$

ここで、 $f_1(t)$, $f_2(t)$ は、炉内の音響ノイズ信号 $S_1(t)$, $S_2(t)$ 及び沸騰音 $B(t)$ の両方の信号を受信するため、以下のような式で表すことができる。ここで仮に、炉内の音響ノイズ信号は、ノイズと沸騰音の相関処理上不利な、全く同じ時系列信号であるとして $S_1(t) = S_2(t) = S(t)$ とする。

$$f_1(t) = S(t) + B(t - \tau_1)$$

$$f_2(t) = S(t) + B(t - \tau_2)$$

$$P(\tau) = \int_{t=-\infty}^{t=0} S(t) S(t-\tau) dt + \int_{t=-\infty}^{t=0} (S(t-\tau) B(t-\tau-\tau_1) + S(t) B(t-\tau-\tau_2)) dt \\ + \int_{t=-\infty}^{t=0} B(t-\tau_1) B(t-\tau-\tau_2) dt$$

ここで、 τ_1 , τ_2 は沸騰音発生位置から音響検出器までの遅れ時間とする。沸騰音がない場合は、第 2 項、3 項が消えるため、第 1 項のみの式となり、これはノイズ信号の自己相関関数そのものであり $\tau=0$ においてのみ最大値をとる。一方、沸騰音がある場合は、沸騰音はパルス波形状で間欠的なものであり、かつ炉内音響ノイズとは無相

関であるため第2項はゼロとみなせる。よって、第1項と第3項のみを考えれば良く、相互相関関数 $P(\tau)$ は $\tau=0, \tau_1-\tau_2$ において最大値をとる。よって、この相互相関関数の最大値のピーク特性をモニターすることにより沸騰音の発生の有無が分かるため、検出性能の向上を図ることができる。ただし、炉内では冷却材流動による何らかの音響信号等が常に存在していると考えられる為、この相互相関関数の特性を相互相関関数バックグラウンド特性としてデータベース化しておくことが必要である。また、2つの音響検出器での炉内音響ノイズ信号 $S_1(t), S_2(t)$ は、2つの音響検出器を離して設置した場合は、相互の相関性が低くなると考えられるため、より相互相関関数のピークは明瞭に現れることが期待できる。具体的には、仮に $S_1(t), S_2(t)$ の相関性が全くない場合は、相互相関関数 $P(\tau)$ は第1項もゼロとなるため、沸騰音がない場合は、完全にゼロとなり、沸騰音がある時のみ $\tau=\tau_1-\tau_2$ において最大値をとり、ピークを持つことができる。実際には、2つの音響検出器位置における炉内音響ノイズの相互相関性が全く無い状態であることは想定しにくい、音響検出器はできるだけ離して設置した方が、2つの音響検出器で受信する炉内音響ノイズの相関性を低くすることができると考えられるため沸騰音の検出に有利である。

この相関処理法の特長として、遅れ時間及びナトリウム中の音速から逆算して音源の位置の絞り込みが可能のため、異常が発生した後の事後処置を行う際にも有用となる。また、相関処理を用いる際には信号ソースができるだけ多い事が望ましいため、導波棒方式を併用した相関処理法を行うことも有効であると考えられる。ただし、一般的に導波棒を伝播する音響信号は、導波棒内での固有周波数特性により信号劣化を起こすため、その影響を予め十分把握しておく必要がある。

また、沸騰音は前述したように $\sim 100\text{kHz}$ という高周波帯域であり、かつ相関処理は大量の積和演算を行うため、炉内異常の連続的監視の観点から、高速な信号処理装置が必要となる。また、格納容器内の様々な電源系のノイズに関しては、音響マイクロフォンの信号を採取するのと時間的に同時に、ノイズ検知器を炉外に設置し、高速な信号処理とともに、電源系のノイズを同定・キャンセルすることも重要となる。

(b) ウェーブレット解析による時間周波数解析による検出精度の向上

周波数解析としては、フーリエ解析による周波数解析とここ10年位の間に注目をあつめているウェーブレット解析がある。表4-1にこの両者の解析方法の特徴の比較を示す。フーリエ解析は、測定に対して時間軸上の単一のウィンドウ関数を用いて解析を行うため定常的な周波数スペクトルを持つ信号に対する解析手法としては有効であるが、非定常・不連続的な信号に対する解析としては限界がある。これは、フーリエ解析の基底関数が、時間軸上で無限に連続し、互いに直行関数基底である正弦波・余弦波で分解可能であることを前提に、それぞれの周波数成分を算出するためである。

一方、ウェーブレット解析は、時間領域・周波数領域の両方で局在化されたマザーウェーブレットと呼ばれる基底関数を用いて信号の解析を行う為、周波数に応じて時間分解能を変化させることができ、時間軸上に局在化された間欠的な音の信号に対して詳細な周波数構造を把握することができる。このウェーブレット解析手法を用いることは、沸騰音のようにインパルス状の時間軸上で不連続な信号に対する解析手法として適している。炉内を伝播してくる沸騰音の信号をこのウェーブレット解析で時間・周波数構造を詳細に定量化することにより検出精度の向上が期待できる。¹¹⁾¹²⁾

(c) 信号処理技術による S/N 向上の検証確認のための炉外水中試験

冷却材ナトリウム中を伝播する音響信号の伝播特性は、燃料集合体等の炉内構造物等による反射・減衰等により影響を受ける。そのため、信号処理技術による S/N 向上方策の有効性を確認するためには、実機体系を模擬した炉外水中試験の実施が必要である。ただし、水中試験にあたっては、ナトリウムと水との媒質の違いに対する影響の考察が必要となる。表 4-2 に水とナトリウムの音響インピーダンス等の特性の違いを示す。水とナトリウムとで音速の違い(水中の音速/Na 中の音速の比:約 0.6)はあるが、周波数は媒質によって変わらないので、水中とナトリウム中の周波数特性は同じ傾向を示す。しかし、水とナトリウムとでは音速が大きく違うため音響インピーダンスが異なり、沸騰音が音響伝播経路中の反射・減衰量は異なってくる。この結果、得られた音圧が同じにはならないため、その影響を考慮に入れた試験実施が重要となる。

また、相関処理による S/N 向上では、複数の音響伝播経路を伝わる信号の同時性が重要なポイントとなるため、炉外水中試験を実施する際には、音速の違いによる伝播時間の違い等を考慮に入れた炉外水中試験装置の大きさ等の音響試験体系を考慮する必要がある。また、水中では音速は温度によって大きく影響を受けるため(温度変化に対する音速の変化がナトリウム中に対して大きい:ナトリウムに対して約 8 倍)、試験装置の水温管理及び水温をパラメータとした特性評価が重要となる。

(d) 炉雑音法との組み合わせによる検出精度の向上

炉内の異常検知法としては、音響法以外にも、集合体出口温度のゆらぎ状態の監視、ボイド発生による原子炉出力の微小変化を核計装で監視する炉雑音法があり、それらと音響法を組み合わせることは有効な方法であると考えられる。特に後者の方法については、核計装は時間変化応答性が極めて良く、ボイドの発生による原子炉出力の変化を直接的に表すことから、(a)で述べた高速な相関処理の信号処理方式と組み合わせ、沸騰音が発生した時刻と中性子束が変化した時刻との同時性をモニターすることにより、異なる測定手段による異常検出精度の向上を図ることができる。²⁾⁹⁾¹³⁾ また、この手法の際にも(a)で述べたような 100kHz 程度の高速なデータサンプリング及びその取

得データの高速な信号処理計算が可能な信号処理装置が必要となる。ただし、100kHz程度の非常に高周波帯域における核計装信号の時間応答性の検討が別途必要である。

(2) 照射による特性変化確認及び耐熱・耐放射線性ナトリウム中マイクロフォンの開発

音響マイクロフォンの温度・中性子 γ 線照射によるマイクロフォンの特性変化確認の観点から「常陽」単体炉内照射試験を実施する。この試験では、運転中を通した炉内音響特性データの採取を行い、運転状態によって炉内音響バックグラウンド信号のレベルは変わらないものとして、バックグラウンド信号を基準とした音響特性の変化を確認する。また、照射による影響を確認し、更なる耐熱・耐放射線性の優れた音響マイクロフォンの開発へのフィードバックを行う。

3章で示したように音響マイクロフォン(CP103)は、中性子照射に対しては約57日とMK-IIIにおける1運転サイクルの間しか持たず、運転サイクル毎に交換する必要があるため、寿命の長い耐熱・耐放射線性のある音響マイクロフォンの開発が必要である。また、高温・耐放射線性のあるNa中で使用可能なマイクロフォンとしては、従来の圧電型の素子を用いた音響マイクロフォンとは動作原理の異なり、本質的に耐熱・耐放射線性があり、音圧感知面とナトリウムとの濡れ性、音圧感知面と素子との高温接合等の課題が原理的に存在しない導電性流体の電磁効果を利用した液状電磁マイクロフォンも炉内で連続使用可能な音響マイクロフォンとして有望であると考えられる。¹⁴⁾¹⁵⁾

表 4-1 フーリエ解析とウェーブレット解析の特徴の比較

	フーリエ解析	ウェーブレット解析	備考
窓関数処理	Hamming ウィンドウ等による時間軸上での窓関数処理を行う	基底関数自体に窓関数処理の役割がある。	
基底関数	Sin, Cos 波	マザーウェーブレット関数 (Harr 関数等多数提案されている)	マザーウェーブレット関数には様々な種類の関数が提案されており、信号対象によってどの関数を選択するかを考慮する必要がある。
時間軸上の周波数分解能	基底関数が無限に連続する Sin, Cos 波であるため固定された窓関数のみに依存する	マザーウェーブレット関数が時間軸上で局在化されたものであり、窓関数自体が周波数に対して可変	時間周波数不確定性原理の範囲内で適用される。
工学上の適用例	連続的な信号に対する周波数解析全般であり広く使われている。(回転体異常診断等)	時間的に不連続な信号を含む周波数解析に応用されている。(石油探索における人工地震波解析、音声信号解析、画像処理等)	

表 4-2 ナトリウム/水中における音響特性の違い

	水	ナトリウム	備考
音速 (m/s)	約 1500 (10℃)	約 2490 (200℃)	比: 約 0.6 (水/ナトリウム)
音速の変化率 (m/s/℃)	約 4.6	約 -0.52	比: 約 8.8 (水/ナトリウム)
密度 (g/cm ³)	1	約 0.90 (200℃)	—
音響インピーダンス (g/cm/s ²) (=密度×音速)	約 1.5×10 ⁵ (10℃)	約 2.5×10 ⁵ (200℃)	比: 0.6 (水/ナトリウム)

5. おわりに

ナトリウム中での使用実績のあるパイプロメーター社製のマイクロフォンの音響特性を把握するため水中試験を行った。また、音響法の「常陽」への適用で重要となる検出性能の向上（S/Nの向上）について検討を行い以下のことが分かった。

(1)パイプロメーター社製の音響マイクロフォン(CP103)は、水中基本特性試験の結果30kHz程度まで基準となる水中用音響マイクロフォンと同等な応答波形が得られ、また、模擬沸騰音に対しても良好な音響特性を有していることが分かった。

(2)「常陽」炉内音響予備試験の知見から、電源設備、炉内ナトリウム流動等によると考えられるバックグラウンドノイズが高いため、炉内に設置した複数の音響マイクロフォンを用いた相関処理、Wavelet解析等による時間周波数解析技術、炉雑音法との組み合わせ等の信号処理技術によるS/N向上が有効である。また、これらの信号処理技術の有効性を検証するために「常陽」実機体系を模擬した炉外水中試験を行う必要がある。

(3)マイクロフォンの長期使用、及び温度・照射による音響マイクロフォンの特性劣化、炉内音響バックグラウンド特性の把握、及びより高性能な音響マイクロフォンの開発へのフィードバックを目的とした「常陽」炉内単体照射試験を行う必要がある。

なお、本研究は株式会社東芝に音響マイクロフォンの水中基本特性試験の実施等を委託した内容を含めて成果をまとめたものであり、唐澤博一氏、福家賢氏、鈴木健彦氏他の方々のご尽力に謝意を表します。

参考文献

- 1) 島田裕一他, 炉内音響検出予備試験, PNC TN9410 91-175, 1991年
- 2) G. Le Guillou, R. Berger, et. al., "BOILING DETECTION IN FAST REACTORS BY NOISE ANALYSIS STUDIES PERFORMED IN FRANCE", Progress in Nuclear Energy. 1977, Vol.1, pp. 409-426
- 3) G. Dentico, V. Pacilio, et. al., "ACOUSTIC EMISSION NOISE FROM SODIUM VAPOUR BUBBLE COLLAPSING BOILING DETECTION IN FAST REACTORS BY NOISE ANALYSIS STUDIES PERFORMED IN FRANCE", Progress in Nuclear Energy. 1982, Vol.9, pp. 255-266
- 4) H. INUJIMA, T. OGINO, K. HAGA, Y. KIKUCHI, "DETECTION OF LOCAL SODIUM BOILING IN A SIMULATED LMFBR SUBASSEMBLY", Progress in Nuclear Energy. 1982, Vol.9, pp. 107-121
- 5) E. J. Burton, D. Firth, et. al., "ADVANCED IN SIGNAL PROCESSING FOR LMFBR DIAGNOSTIC TECHNIQUES", Progress in Nuclear Energy. 1982, Vol.9, pp. 375-388
- 6) I. D. Macleod, E. Catling, C. G. Taylor, "ACOUSTIC DETECTION OF BOILING IN LMFBRs: AN SENSITIVITY DERIVED FROM EXPERIMENTS DURING THE COMMISSIONING OF PFR", Progress in Nuclear Energy. 1977, Vol.1, pp. 469-485
- 7) V. M. Carey, A. P. Gavin, et. al., "THE DETECTION OF SODIUM VAPOUR BUBBLE COLLAPSE IN A LIQUID METAL FAST BREEDER REACTOR", Progress in Nuclear Energy. 1977, Vol.1, pp. 437-468
- 8) 佐野健一他, 高速実験炉「常陽」性能試験報告書音響法異常監視 (MT - 31) 炉内音響監視 (1), PNC TN941 79-227, 1979年
- 9) 佐野健一他, 高速実験炉「常陽」75MW性能試験報告書音響法異常監視 (MT - 31) 炉内音響監視, PNC TN941 80-146, 1980年
- 10) Biserna T., Cavallini F., et. al., "RESULT OF ACOUSTIC AND TEMPERATURE NOISE MEASUREMENTS ON SODIUM COOLED ELECTRICALLY HEATED 7 ROD BUNDLE", Progress in Nuclear Energy. 1977, Vol.1, pp. 517-526
- 11) 熊谷紀子他, 間欠音を発する機器の一診断法, 日本音響学会誌, Vol.50, No.11, 1994年, pp. 861-868
- 12) 佐藤雅昭他, -新しい信号処理の理論とその応用: ウェーブレット解析とその周辺-, 日本音響学会誌, Vol.47, No.6, 1991年, pp. 405-436
- 13) 小舞正文, 大山幸男, 核計装を用いた早期炉内異常検知システムの検討-「常陽」核計装ゆらぎのバックグラウンド特性に基づく検討-, JNC TN9400 2001-057, 2001年
- 14) 鰐坂秀美他, 液状電磁トランスデューサの受波特性, 日本音響学会誌, Vol.45, No.4, 1989年, pp. 282-289
- 15) 鰐坂秀美他, 液状電磁トランスデューサの送波特性, 日本音響学会誌, Vol.46, No.7, 1990年, pp. 553-558