

小リーク・ナトリウム・水反応試験研究

第5報

音響式検出器

1974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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

1974年8月

小リーク・ナトリウム・水反応試験研究
第5報

音響式検出器

報告者	根井弘道**	氏原幸三郎*
	大内義弘*	橋口 功*
	大島 敵**	井上 設生*
	堀 雅夫*	

期 間 1973年8月1日～1974年5月31日

目 的 音響式水リーク検出器を開発すること。

要 旨

本報告書は今期間中に行なった35回の小リークNa-水反応試験のうち、音響式リーク検出器に関する結果を記述したものである。

Na-水反応によって発生する音の特性と音響式による水リーク検出の可能性について調べた。発生した音の出力(RMS値)の測定と周波数分析を行なった。SWAT-2装置ではRMSメータによって0.07g/secの水リークを検出できることがわかった。Na-水反応時の周波数スペクトルのピークは変換器を取りつけているステンレス棒あるいは管の固有振動によるものであること、水注入時の音の出力(RMS値)はリーク率の1/3乗に比例し、Na温度が高いほど大きいことがわかった。

* 大洗工学センター蒸気発生器部 高速炉安全性試験室

** 現、日本原子力事業(株)

1974年8月

小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第5報

音響式検出器

報告者	根井弘道**	氏原幸三郎*
	大内義弘*	橋口 功*
	大島 敏**	井上 設生*
	堀 雅夫*	

期 間 1973年8月1日～1974年5月31日

目 的 音響式水リーク検出器を開発すること。

要 旨

本報告書は今期間中に行なった35回の小リークNa-水反応試験のうち、音響式リーク検出器に関する結果を記述したものである。

Na-水反応によって発生する音の特性と音響式による水リーク検出の可能性について調べた。発生した音の出力(RMS値)の測定と周波数分析を行なった。SWAT-2装置ではRMSメータによって0.07g/secの水リークを検出できることがわかった。Na-水反応時の周波数スペクトルのピークは変換器を取りつけているステンレス棒あるいは管の固有振動によるものであること、水注入時の音の出力(RMS値)はリーク率の1/3乗に比例し、Na温度が高いほど大きいことがわかった。

* 大洗工学センター-蒸気発生器部 高速炉安全性試験室

** 現. 日本原子力事業(株).

目 次

1	ま え が き	1
2	試験装置及び検出器概要	2
3	試 験 結 果	5
3.1	出力 (RMS 値)	5
3.2	周波数分析	7
4	結果の検討	9
4.1	出力 (RMS 値)	9
4.2	周波数分析	10
5	音響式によるリーク検出の可能性	12
6	お わ り に	12
	参 考 文 献	13

図 リ ス ト

図 2 - 1	SWAT-2 のフロー概略	14
図 2 - 2	変換器の取り付け	15
図 2 - 3	KAMAN製圧力計の取り付け	16
図 2 - 4	計測システム	17
図 2 - 5	SWAT-2A の概略	18
図 3 - 1	信号出力の時間変化	19
図 3 - 2	信号出力とリーク率の関係	20
図 3 - 3	信号出力の周囲温度による影響	23
図 3 - 4	KAMAN製圧力計による信号	24
図 3 - 5	ガス噴出時の信号出力	25
図 3 - 6	信号出力と体積流量の関係	27
図 3 - 7	水中へのガス噴出時の信号出力	30
図 3 - 8	信号出力に対する液面の影響	31
図 3 - 9	大気中へのガス噴出時の信号出力	32
図 3 - 10	Na-水反応時の周波数スペクトル	33
図 3 - 11	Na-水反応時の周波数スペクトル	35
図 3 - 12	ガス噴出時の周波数スペクトル	36
図 3 - 13	ガス噴出時の周波数スペクトル(圧力)	38
図 3 - 14	ガス噴出時の周波数スペクトル(温度)	41
図 3 - 15	IMWSGバックグラウンドの周波数スペクトル	44
図 3 - 16	Na中マイクの周波数スペクトル	45

1 まえがき

Na中水素計やAr中水素計などの不純物モニター型のリーク検出器では輸送時間があるために、リーク検出に遅れが出ることは避けられない。したがって、伝熱管の2次破損を防止できない、ウェステージ率が高いリーク率の領域においては、応答時間の無視できる音響式検出器が有効であると考えられている。この観点からSWAT-2でも音響式リーク検出器の開発を行ってきた。第3報¹⁾では試験No. 49までの試験についてS/N比のよいデータの収録方法や変換器の取り付け方法、RMS値のリーク率依存性、バックグラウンドおよびNa-水反応音の周波数分析の結果などを報告した。それらによれば、加速度計と加速度計を取り付けるためのステンレス棒との間にセラミックの碍子をはさみ加速度計を電氣的に浮かせることによりS/N比を向上させることができること、Na-水反応時の出力(RMS値)はリーク率が高いほど大きいこと、バックグラウンドの周波数スペクトルは比較的フラットであるが、Na-水反応時に発生する音には顕著なピーク周波数が存在することなどがわかった。試験No. 50~No. 84のウェステージ、Na中水素計、Ar中水素計に関する結果はすでに第4報²⁾で報告したので、ここでは、試験No. 50~No. 84の音響式検出器の試験結果について報告する。

ひきつづき、Na-水反応時に発生する音の出力(RMS値)のリーク率の依存性を調べ、この他に、Naあるいは水中にガスを噴出させたときに発生する音の出力の種々のパラメータによる影響を調べた。これらの結果からNa-水反応時の音源を考察し、Na-水反応時に発生する音の周波数スペクトルのピークの周波数の解析を行なった。

2. 試験装置及び検出器概要

SWAT-2 装置と音響式検出器の概略を図 2-1 に示す。反応容器壁に径 16mm のステンレス棒を 3ヶ所溶接し、各先端に加速度計を取りつけ容器壁の振動を測定している。また、径 16mm のステンレス管を溶接し、その先端に圧力計を取りつけ Na 中の圧力変化を測定して¹⁾ さらに、圧力変換器を Na 中に浸漬し Na 中の圧力変化を測定している。その検出器の性能、取り付け位置、増幅器の設定等を表 2-1 に示す。検出器の反応容器断面における取り付け位置を図 2-2 に示す。

表 2-1 使用した変換器

Transducer	Model	Frequency Range	Gain	Full Scale	Wave Guide Rod Length mm	Allowable Temperature °C
Accelerometer Position No.1	Kistler 808A	DC~7 KHz	1V/g	10,000g	L=150 H=210	260
Accelerometer Position No.2	Kistler 808A	DC~7KHz	1V/g	10,000g	L=200 H=550	260
Accelerometer Position No.3	Kistler 815A5	DC~6KHz	1V/g	50g	L=200 or 400 H=550	121
Pressure transducer Position No.4	Toshiba HAD-MK4	005~10 KHz	3.18V/mbar	50 mbar	L=220 or 130 H=210	550
Pressure thansducer Position No.5	Kaman K1908-A50P	DC~35KHz	1V/50Psia		—	

Position No.5は、第 51 回水反応試験より新たに取り付けたもので Na 中の微少な圧力変化を高温 Na の容器内で直接測定可能な渦電流型の圧力変換器である。取り付け状態を図 2-3 に示す。反応容器に流入する Na を導く 2B ステンレス管に固定し、ダイアフラムは反応点方向(下向き)になっている。ダイアフラム前面に Na-水反応により発生した水素気泡が接しノイズ信号(図 3-4, a)が発生したため、ダイアフラム前面にかさを取り付けた。周波数レンジを大きくとる事と、感度をよくする事とが、ダイアフラムの厚さによって決まるため、相反する関係になっている。この変換器の仕様は、装置の真空引き、加圧等の操作時に安全であること、周波数レンジができるだけ広いこと等を考慮し表 2-1 のように選定した。

データ処理法は、第3報¹⁾までと同様であり、その概要を図2-4に示す。周波数分析器はティアック社製TEAC F-100 と取り扱いの容易なLion社製MODEL SA-21を併用した。

反応音の出力をRMS値での評価を行なう時バックグラウンドレベルとの分離を次式のように行なった。

$$V_{Re}^2 = V_A^2 - V_B^2 \dots\dots\dots (2-1)$$

V_{Re} : Na-水反応による出力

V_A : Na-水反応試験中に測定された出力
(含バックグラウンド)

V_B : バックグラウンドレベル

このような整理方法を採用した理由は次のように説明できる。

信号が正弦波の場合

$$e = E \sin (wt + \theta) \dots\dots\dots (2-2)$$

e : 信号 [V]

E : 信号の最大値

w : $2\pi/T$

θ : 位相 (ラジアン)

と表わされる。

実効値を E_{RMS} とすると

$$E_{RMS} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T e^2 dt} \text{ である。}$$

$$e^2 = \{ E \sin (wt + \theta) \}^2$$

$$= E^2 \frac{1}{2} \{ 1 - \cos (2wt + 2\theta) \} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$E_{RMS} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T E^2 \frac{1}{2} \{ (1 - \cos (2wt + 2\theta)) \} dt}$$

$$w = \frac{2\pi}{T} \text{ より}$$

$$E_{RMS} = \frac{1}{T} \sqrt{E^2 \frac{1}{2} T}$$

$$= \frac{E}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2-4)$$

又非正弦波の場合に、正弦波の合成により近似できるとし次式のように表わす。

$$e = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin((2n-1)\omega t + \theta_n) \dots\dots\dots(2-5)$$

$$(\omega = 2\pi/T)$$

実効値を求めるため e の 2 乗を考えると (2-5) 式の N 項 M 項の積は

$$\sin((2N-1)\omega t + \theta_N) \times \sin((2M-1)\omega t + \theta_M)$$

$$= \frac{1}{2} \{ \cos(2(N-M)\omega t + \theta_N - \theta_M)$$

$$- \cos(2(N+M-1)\omega t + \theta_N + \theta_M) \} \dots\dots\dots(2-6)$$

となり 0 から T までの積分値は (2-4) 式と同様に 0 になることがわかる。
よって

$$E_{RMS} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T e^2 dt}$$

$$= \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T \left(\sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin((2n-1)\omega t + \theta_n) \right)^2 dt}$$

(2-6) より

$$E_{RMS} = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^T (E_n \sin((2n-1)\omega t + \theta_n))^2 dt}$$

$$= \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{T} \int_0^T (E_n \sin((2n-1)\omega t + \theta_n))^2 dt \right)^2}$$

$$= \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (E_{nRMS})^2} \dots\dots\dots(2-7)$$

$$E_{RMS}^2 = E_{1RMS}^2 + E_{2RMS}^2 + E_{3RMS}^2 + \dots\dots\dots + E_{nRMS}^2$$

$$\therefore E_{1RMS}^2 = E_{RMS}^2 - \sum_{n=2}^{\infty} E_{nRMS}^2$$

このように (2-1) 式のようなデータ処理方法が説明できる。

水中へのガス噴出のデータは予備試験装置 (SWAT-2A) を使用した。SWAT-2A の概略を図 2-5 に示す。SWAT-2A はアクリル樹脂製の窓がありジェットの様態を観察できるようになっている。加速度計用の棒は、図 2-5 に示したように SWAT-2A 容器と同様の取付けを行なっている。

3. 試験結果

3.1 出力 (RMS 値)

3.1.1 Na-水反応

Na 中への水注入時の検出器の、第 49 回までの試験結果は第 3 報で報告した。以後ひきつづきデータの蓄積を行なった。図 3-1 には Na-水反応時に得られた信号の RMS 値の時間変化を示す。RMS 値は (2-1) 式から計算した V_{Re} である。ただし図中(a)は注水管の圧力変化である。定常水注入時の出力を図から読みとることにより、リーク率との関係を知ることができる。S/N 比の良い加速度計においては、バックグラウンドレベルの変動はデータにあまり影響を与えないが、Na に直接接触している変換器 (Position NO.4, No. 5) のような S/N 比の低い場合にはその影響が大である。

Na-水反応時に発生する出力 (RMS 値) とリーク率の関係を両対数グラフで図 3-2 に示す。図の丸印は Na 温度 480 ~ 530°C のデータで、三角印は Na 温度 280 ~ 430°C のデータである。温度が 480 ~ 530°C の丸印で示したデータを見るとリーク率に対し直線的で、その傾きは約 1/3 である。反応容器壁の振動を棒を通して測定した場合 (図 3-2, (a) および (b)) と、導波管を通して Na 中の圧力変動を測定した場合 (図 3-2(c)) リーク率に対してほぼ等しい関係が得られた。図 3-2 の (a), (b), (c) より加速度計の取り付け位置、棒の長さや加速度変換器の種類が異なっても、リーク率と出力の関係は同様である。

0.07 g/sec のリーク率で S/N 比は約 3 であった。

図 3-2 から、丸印で示した高温 Na 中での出力に比べ三角印で示した低温での出力が低い。図 3-2, (a) の感度のよい (表 2-1 参照) そして S/N 比の最も高い加速度計 Kistler 815A5 において特に顕著である。

温度による出力の影響を調べたのが図 3-3 である。垂直線はリーク率の違いによるデータのばらつきを示し、丸印はその平均値を示している。図より 480°C に比べ、280°C での出力は約 1/2 に減少している。

Position No.5 の、Na 中に完全に漬した変換器 (圧力計) は前述のように感度が低く出力レベルの精度はあまりよくない。信号出力の RMS 値の時間変化を図 3-4 に示す。図の (a) はダイヤフラム前面のかさ (図 2-3 参照) がいないため水素気泡をかぶったことによる出力の変化が見られる。

3.1.2 Na 中へのガス噴出

Na 中へ Ar ガスを噴出した時の変換器からの出力 (RMS 値) を図 3-5 に示す。横

軸にはガスの噴出圧力を，縦軸にはバックグラウンドレベルを差し引いたRMS値をとっている。この時の使用ノズル口径は0.7mmである。ノズルの噴出圧力で整理した場合，図のように周囲のNa温度が低くなるにしたがい出力の低下が見られる。

噴出量の温度による補正と，Na-水反応時の出力との比較を行なうために，その時のNa温度，圧力まで成長してきた時の体積流量での整理を行なった。その結果を図3-6に示す。図中にNa-水反応時のデータを丸印で示した。Arガス噴出量は臨界流を仮定して重量流量を求め，Z線図を使用してその時のNa温度，圧力における体積量を算出した。蒸気噴出に関しては，蒸気の温度，圧力の変化から求めたリーク率を，その時のNa温度，圧力における比容積を求め体積流量を算出した。図より同じ流量でほぼ同じ温度（約480°C）の出力は，Na-水反応とガス噴出の間に有意差の無い事がわかる。

3.1.3 水中へのガス噴出

取り扱いの容易な小さな容器（SWAT-2A）で水中へのガス噴出試験を行なった。噴出圧力と加速度計出力の関係を図3-7に示す。噴出圧力と出力の関係について1Kg/cm²の圧力の領域では圧力の上昇と共に出力は上昇し約2Kg/cm²の圧力のピークをすぎると下降し，その後約6~7Kg/cm²の圧力のピークをすぎた後，10Kg/cm²の噴出圧力（200Kg/cm²フルスケールの歪形圧力計で測定したため，圧力の数値はあまり正確ではない）でピークが見られるが，その圧力はノズル出口圧力が臨界圧力になる値に等しい。Na中へのガス噴出試験における噴出圧力の領域（10~60Kg/cm²）と，水中へのガス噴出試験における噴出圧力の領域（10~60Kg/cm²）では，勾配がほぼ一致している。図3-7に示されているように，約2Kg/cm²の圧力付近でピークが観測されることは興味深い。

液面高さの影響つまり噴出孔の液面からの深さを調べた結果を図3-8に示す。図よりジェットが液面下に存在する時，出力は液面高さの影響はほとんどないが，ジェットが少しでも液面上に出ると出力の低下が見られる。

容器内に水がない状態でガスを噴出しても出力の上昇は見られなかった。

噴出するノズルの機械的振動がどのような傾向にあるかを調べた。測定は図3-9に示したように，Na中への水噴出用のノズルに加速度計を縦方向と，横方向に取り付け，ガスの噴出圧力を変化させて行なった。その時の加速度計からの出力は，ガス噴出によるノズルの振動とジェットの反力によって発生するノズルを取り付けているパイプの振動の和になると考えられる。図3-9は得られた結果である。傾向として水又はNa中にガスを噴出した時より勾配は大きい。しかし，前述のSWAT-2Aで行なった液面高さの影響を調べた結果より，ノズルが液面下でない時には容器壁に取り付けた加速度計出力は，バ

ックグラウンドレベルと同じであったことを考えると、このようなノズル振動は Na-水反応時の信号にはほとんどないと考えられる。

音響検出器において実際の蒸気発生器におけるバックグラウンドの出力及び、その周波数を知る事は重要である。そこで、IMW蒸気発生器の外壁にSWAT-2と同様に、3本の棒を溶接し、その先端に加速度計を取り付け測定を行なった。棒の長さは20 cmであり、高さ方向に3ヶ所取り付けてある。SGの運転状態はNa温度216°C、Na流量362 / minであり、水はSG内を流れているが沸騰せず单相流の状態である。測定器はSWAT-2のNa-水反応時と同様であるが、増幅器の設定は0.1G/VとSWAT-2より一けた高くした。(SWAT-2の場合は1G/V)その時得られた信号のRMS値を表3-1に示す。水が伝熱管内を流れているにもかかわらずIMW SGのバックグラウンドレベルはSWAT-2の約1/2程度であり、高さ方向に関しては蒸気発生器上部に取り付けた加速度計の方が出力が大きかった。その周波数分析結果については後述する。

3.2 周波数分析

3.2.1 加速度計

Na-水反応時に得られる信号の周波数スペクトルは、加速度計を取り付けている棒の長さの影響を強く受けているということを第3報で述べた。今回新たに追加した40 cmの長さの棒に加速度計を取り付けた(Position No.3)。その周波数スペクトルを図3-10, (C)に示す。従来の棒の長さである15 cm(Position No.1)(Position No.2)の場合の周波数スペクトルを図3-10, (a)および(b)に示す。変換器は、Kistler 815Aと808Aを使用した。Position No.3の位置で、棒の長さを40 cmから20 cmに変えたとき得られた周波数スペクトルはPosition No.2(棒の長さ20 cm)でのそれと同じであった。

図3-10の横軸をリニア・スケールにしたもので図3-11に示す。

水のリーク率を変えても周波数スペクトルは変化しなかった。

Na中にガスを噴出させたときに発生する音の周波数分析をした結果を図3-12に示す。図3-1と図3-11の比較から、水噴出とガス噴出とでは、棒の長さが同じであれば周波数スペクトルはほとんど違いのないことがわかる。

同じ位置(Position No.1)で、同じ変換器を用いて、Na中へのガス噴出圧力0, 10, 20, 40, 60 Kg/cm²と変化させたときの周波数スペクトルを図3-13に示す。噴出圧力が60 Kg/cm²でNa温度を変化させたときの周波数スペクトルを図3-14に示す。図から周波数スペクトルは、圧力、温度による影響がほとんどないことがわかる。

前述のIMW SGでバックグラウンド測定時に得た音の周波数分析結果を、SG壁に溶接

した棒の位置をパラメータとして、図3-15に示す。Na-水系，Na-ガス系で，棒の長さ20 cmで観測されたピークは，この場合観測されなかった。SWAT-2での試験においても，バックグラウンドの周波数スペクトルにはそのようなピークは見られなかった。水反応あるいはガス噴出によってピークが観察されるということは非常に興味深い。

3.2.2 圧力計

Position No4 の圧力計は反応容器壁にパイプを溶接し，その先端に取り付けている。そのパイプ（以下導波管と呼ぶ）の長さは，22 cmと13 cmの長さでの測定を行なった。導波管の長さによる周波数スペクトルの違いが図より知る事が出来る（図3-16）。これも加速度の場合と同様に，リーク率，温度，ガス噴出量による違いは見られなかった。

表3-1 IMWSGのバックグラウンドレベル

RMS [WV] Rod Position	Minimum	Average	Maximum
	Above	60	90
Middle	56	60	70
Below	40	50	80

4. 結果の検討

4.1 出力 (RMS値)

図3-2から分かるように、加速度計、圧力計に関係なく、RMS値はリーク率の約 $1/3$ 乗に比例している。2KHzでのRMS値はリーク率の $1/2$ 乗に比例することがAPDA³⁾で報告された。しかし、著者らのRMS値は全周波数領域での値であるから、著者らのRMS値とAPDAのRMS値を直接比較することは適当でない。このことと、さらにデータのばらつきが大きいことを考えると、どちらの値が正しいかをここで結論づけることはできない。

坂野⁴⁾やSalmon⁵⁾はNa-水反応時の初期圧力パルスはリーク率の $1/2$ 乗に比例することを解析的に示した。Na-水反応によって発生する音が連続的に発生する圧力パルスの統計的な量であると仮定すれば、Na-水反応時のRMS値のリーク率依存性は説明できる。

図3-3に示したように、Na-水反応時のRMS値は周囲のNa温度が高いほど大きい。体積流量もNa温度が高いほど大きくなる。これは、Na-水反応あるいはNa-ガス系における音の一部は、水素あるいはガスが膨張するときに発生することを暗示している。しかし、図3-6に示されているように、RMS値が体積流量と相関関係があるとしても、依然としてRMS値は温度の依存性があることがわかる。この温度効果は、反応容器壁にとりつけたステンレス棒の音響インピーダンス⁶⁾によって定性的に説明できる。ステンレス棒の音響インピーダンスは温度が高いほど小さくなる。

Na-水反応時に発生する音源を考えてみる。音源には次の3つが考えられる。

- (1) ノズルのジェット音
- (2) 気泡の成長
- (3) Na液面の振動

(1)のジェット音とは、ガスジェット自身において、および、水あるいはガスがノズルから噴出するときノズルを振動させることによって発生する音を意味する。この音はノズル周囲の液体には無関係であると思われる。図3-8によれば、ガスを水中に噴出させた場合と空气中に噴出させた場合とでは、前者の場合がRMSはかなり大きい。(1)の寄与は小さいことを示していると思われる。

(2)による音とは、Na-水反応によって発生した水素気泡あるいはNa中に噴出したArガス気泡が成長するとき周囲のNaに圧力を及ぼして発生する音のことをいう。既述したように(2)の効果が支配的であると思われる。しかし、Na液面の振動によって発生する音の効果も無視できないと思われる。今後この効果を定量的に調べる必要があると考える。

4.2 周波数分析

図3-11に示されているようにNa-水反応によって発生した音の、加速度計による周波数スペクトルにはいくつかのピーク周波数が観測された。ほとんどのピークは(4-1)式⁷⁾のステンレス棒の横方向の固有振動数と一致した。

$$f_n = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{QK^2}{\rho}} \cdot \beta_n \quad (4-1)$$

ここで f_n : 固有振動数 [Hz]
 L : 棒の長さ [cm]
 Q : 棒のヤング率 [dyne/cm²]
 ρ : 棒の密度 [g/cm³]
 K : 棒の断面の回転半径 [cm]
 β_n : n に依存する定数, $n = 1, 2,$

図3-10および図3-11の矢印は(4-1)式による固有振動数である。長さが40 cmの場合(図3-11(c))には実測値と計算値は良く一致した。さらに、図3-11(a), (b)のように、棒の長さを15 cmから20 cmに変えた場合ピーク周波数は5.9~6.4 KHzから3.4 KHzにシフトする。シフト量は(4-1)式から計算される値と一致した。

ステンレス棒の横方向の振動の他に、棒の縦方向の振動モードや反応容器の縦方向の振動モードも考慮する必要がある。

ステンレス棒の縦方向の固有振動数は

$$f_r = \frac{C}{4L} \quad (4-2)$$

で表わされる。³⁾

ここで f_r : 固有振動数 [Hz]
 C : 棒のなかでの音速 [cm/sec]
 L : 棒の長さ [cm]

(4-2)式から、固有振動数は、棒の長さが15, 20, 40 cmのとき、それぞれ8, 6, 3 kHzと計算される。このモードのピーク高さは横方向の振動モードに比較して小さい。

反応容器の縦方向の固有振動数は(4-3)式によって表わされる。³⁾

$$f_u = \frac{C}{\pi D} \quad (4-3)$$

ここで f_u : 固有振動数 [Hz]

D : 反応容器の直径 [cm]

C : 音速 [cm/sec]

したがって、 $f_0 = 4$ kHz と計算される。図3-11, (a)~(c) からわかるように、4 kHz 近傍にはピークは見られなかった。

圧力計による周波数スペクトルは、図3-16 に示されているように、管の長さが22 cm とき1.2 と2.5 kHz, 13 cm のとき2.6, 3.8, 4.5 kHz にピークが観測された。直径1.6 cm の管の固有振動は、長さが22 cm のとき2.6 kHz, 13 cm のとき4.6 kHz と計算される。したがって、図3-16 より高周波数側のピークは管の固有振動と考えられるが、低周波数側のピークは何によるものか分からない。

上に述べたように、Na-水反応に固有な周波数は見出されなかった。ピーク周波数の大部分は、ステンレス棒あるいは管の固有振動数であることがわかった。

5. 音響式によるリーク検出の可能性

本試験の結果から、SWAT-2という特殊な装置では、加速度計の出力(RMS値)によって0.07 g/secのリークを検出できることがわかった。0.07 g/secのリーク率で、S/N比は、加速度計815 A5では、約3であった。実際のSGにおいては水の沸騰音、ポンプのノイズ、流体の流れによるノイズなどのバックグラウンド・ノイズがある。これらは、検出可能な最小リーク率を押し上げる要因になる。この観点から音響式によるリーク検出を実現させるためには実際のSGのバックグラウンド・ノイズのレベルを測定することが必須である。本試験では7 kHzまでの範囲ではNa-水反応に固有な周波数を見出すことはできなかった。Na-水反応固有の音を他のノイズと区別してS/N比を向上させるという測定方法を実際には使用することができないことを示している。

6. おわりに

本試験から次の結論を得た。

- (1) Na-水反応時に発生する音の出力(RMS値)は水リーク率の1/3乗に比例し、Na温度が高いほど大きくなる。Na中にガスを噴出したときも同様の関係がある。
- (2) SWAT-2装置では、0.07 g/secの水リークを検出できる。このリーク率で、加速度計のS/N比は約3であった。
- (3) Na-水反応によって発生する音の周波数スペクトルはリーク率には影響されなかった。Na中にガスを噴出したときの周波数スペクトルはNa-水反応時の周波数スペクトルと同じであった。周波数スペクトルの主なピークはステンレス棒あるいは管の固有振動で説明できる。

参 考 文 献

- 1) 根井弘道, 氏原幸三郎, 大内義弘, 大島巖, 井上設生, 堀雅夫, "小リークナトリウム水
反応試験研究, 第3報" SN943 73-02 (1973)
- 2) 根井弘道, 氏原幸三郎, 大内義弘, 橋口功, 大島巖, 井上設生, 堀雅夫, "小リークナト
リウム水反応試験研究, 第4報" 印刷中
- 3) S.Barkhoudarian, C.G.Scott, APDA-256 (1970)
- 4) Y.Tanaka, K.Sakano, SJ-213, 71-01 (1971)
- 5) A.Salmon, NAA-SR-8140 (1963)
- 6) L.L.Beranek, "Acoustics", McGraw-Hill Book Co, P.11 (1954)
- 7) P.M.Morse, "Vibration and Sound" Second Edition, McGraw-Hill
Book Co., P.158 (1948)

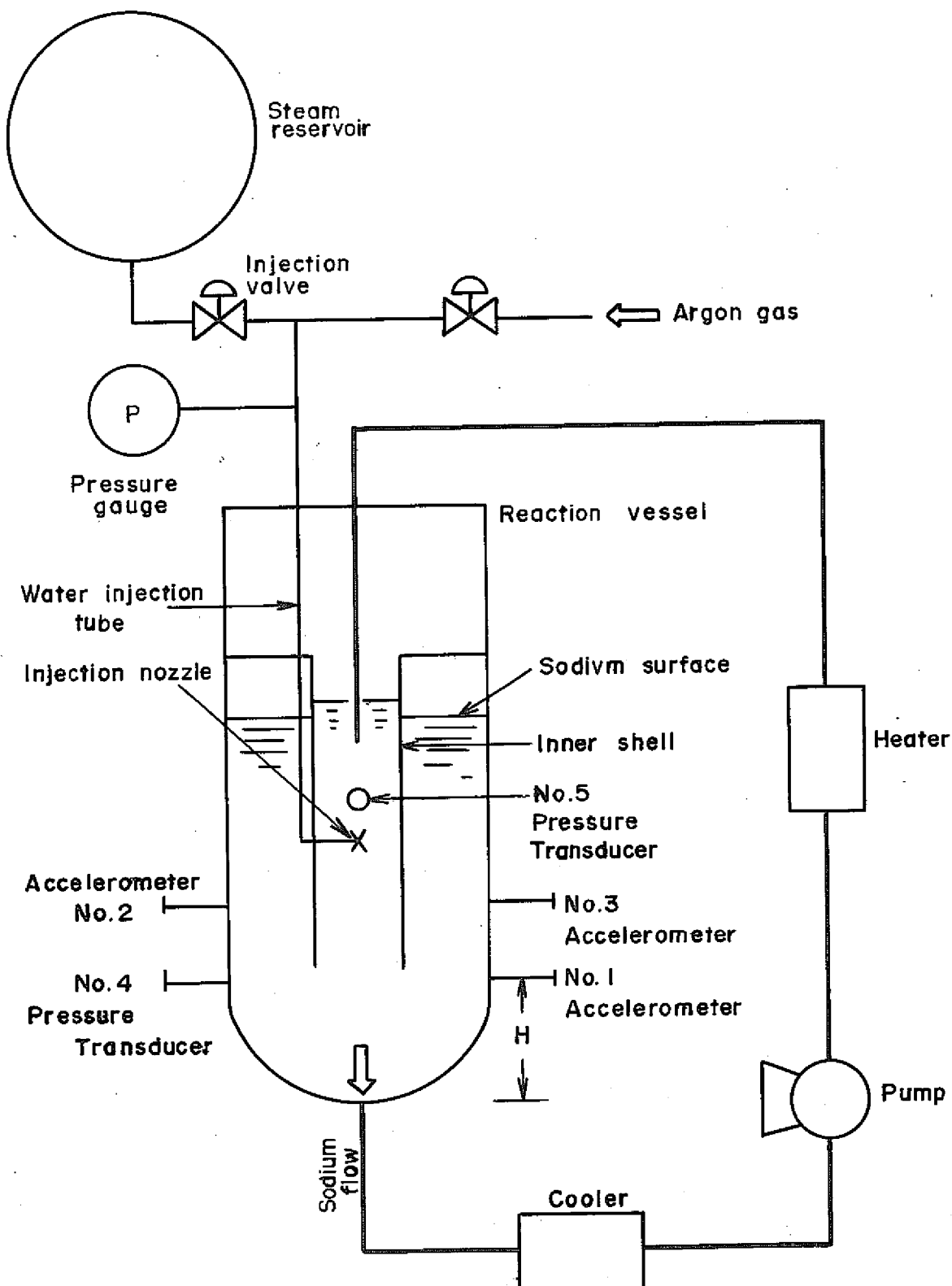


図 2-1 SWAT-2 のフロー概略

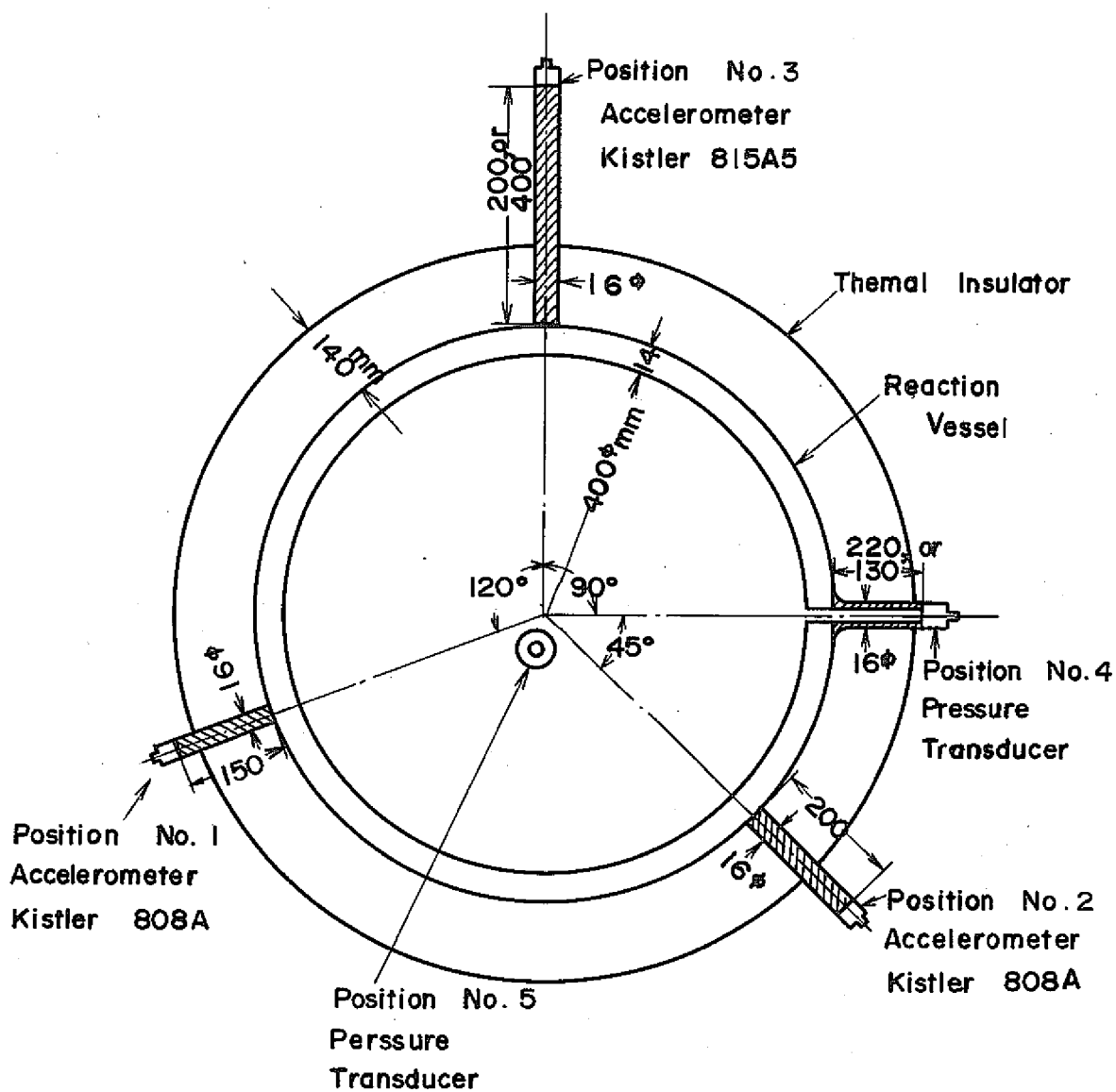
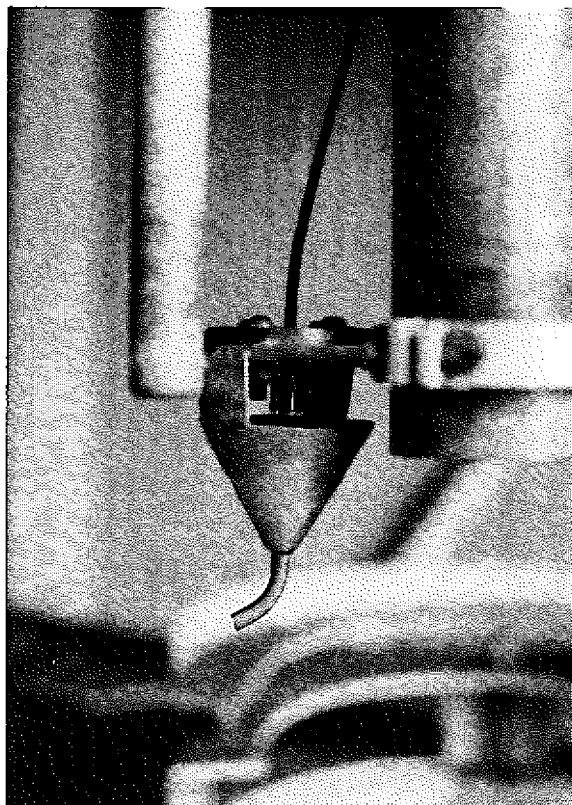


図 2 - 2 変換器の取り付け



0-COLOR '74 D

図 2 - 3 KAMAN製圧力計の取り付け

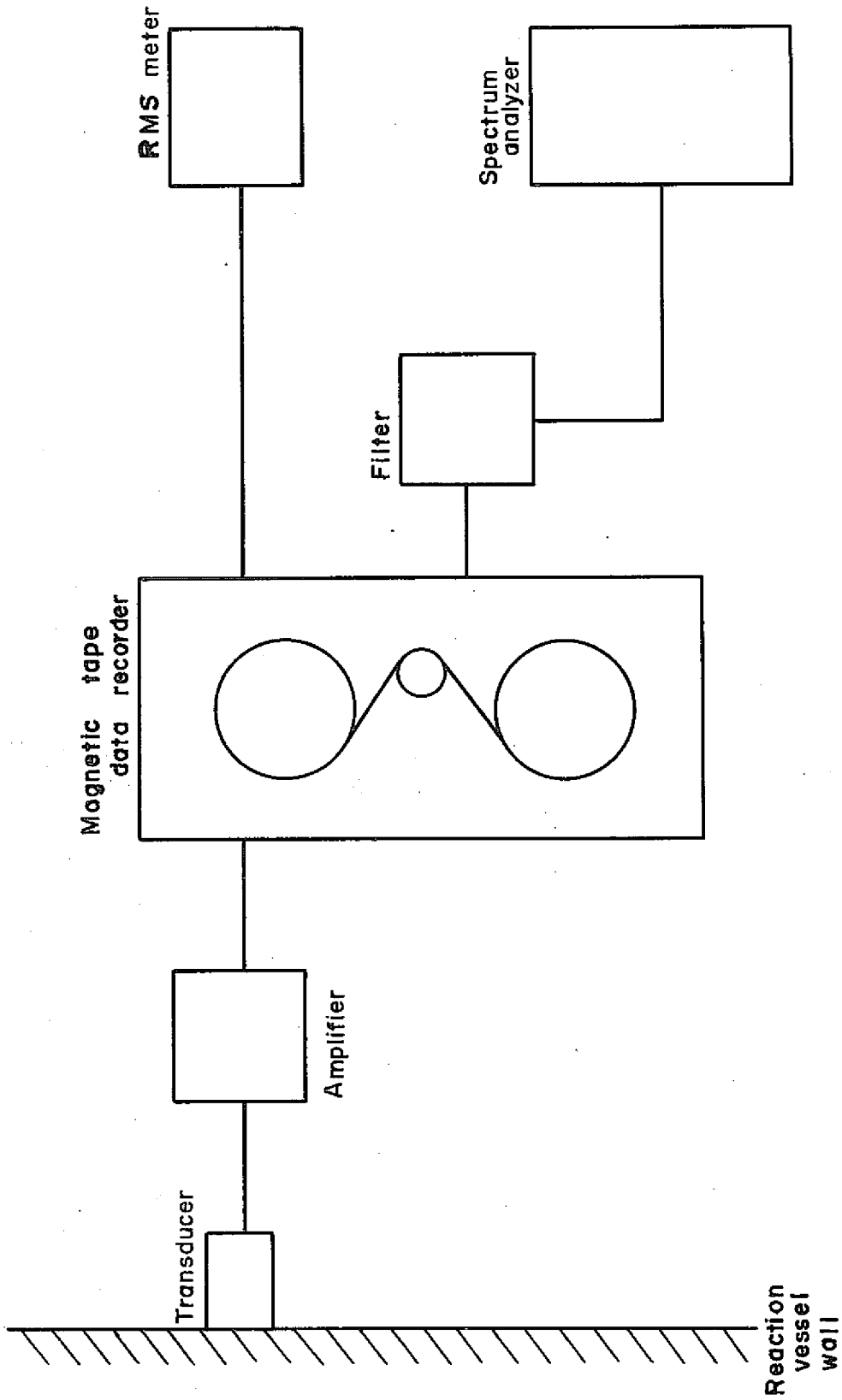


図 2-4 計測システム

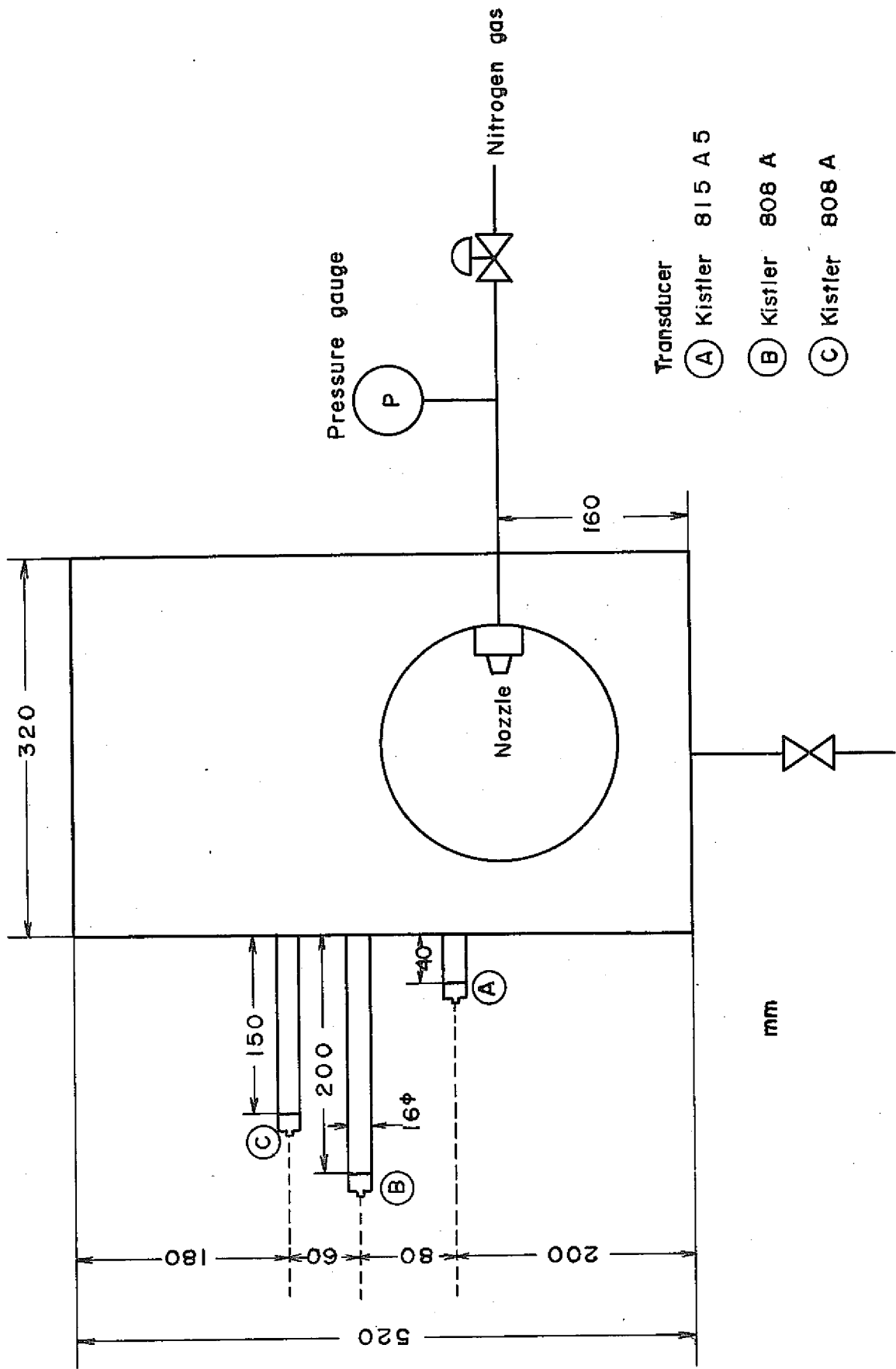


図 2 - 5 SWAT-2A の概略

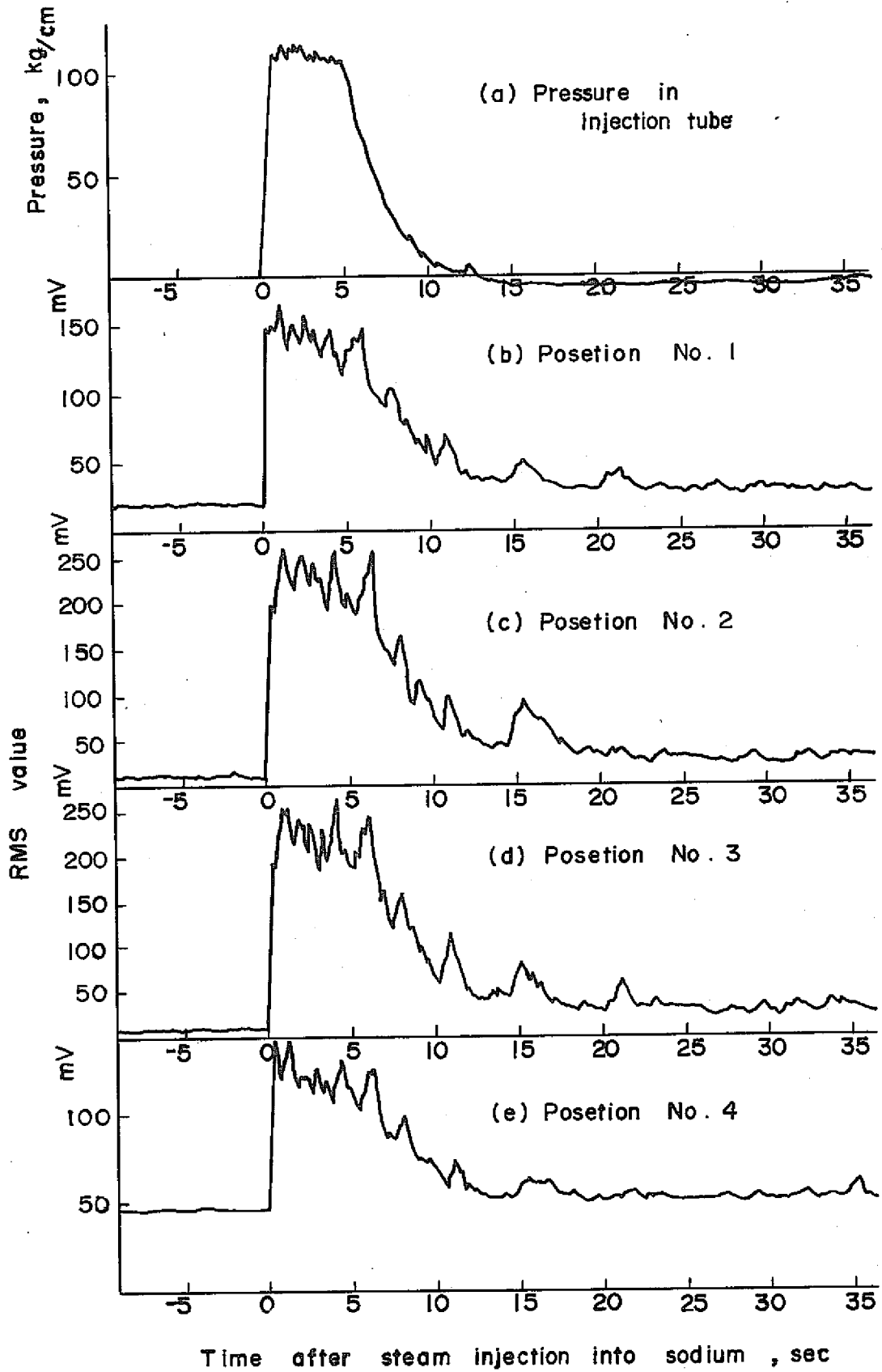


図3-1 信号出力の時間変化

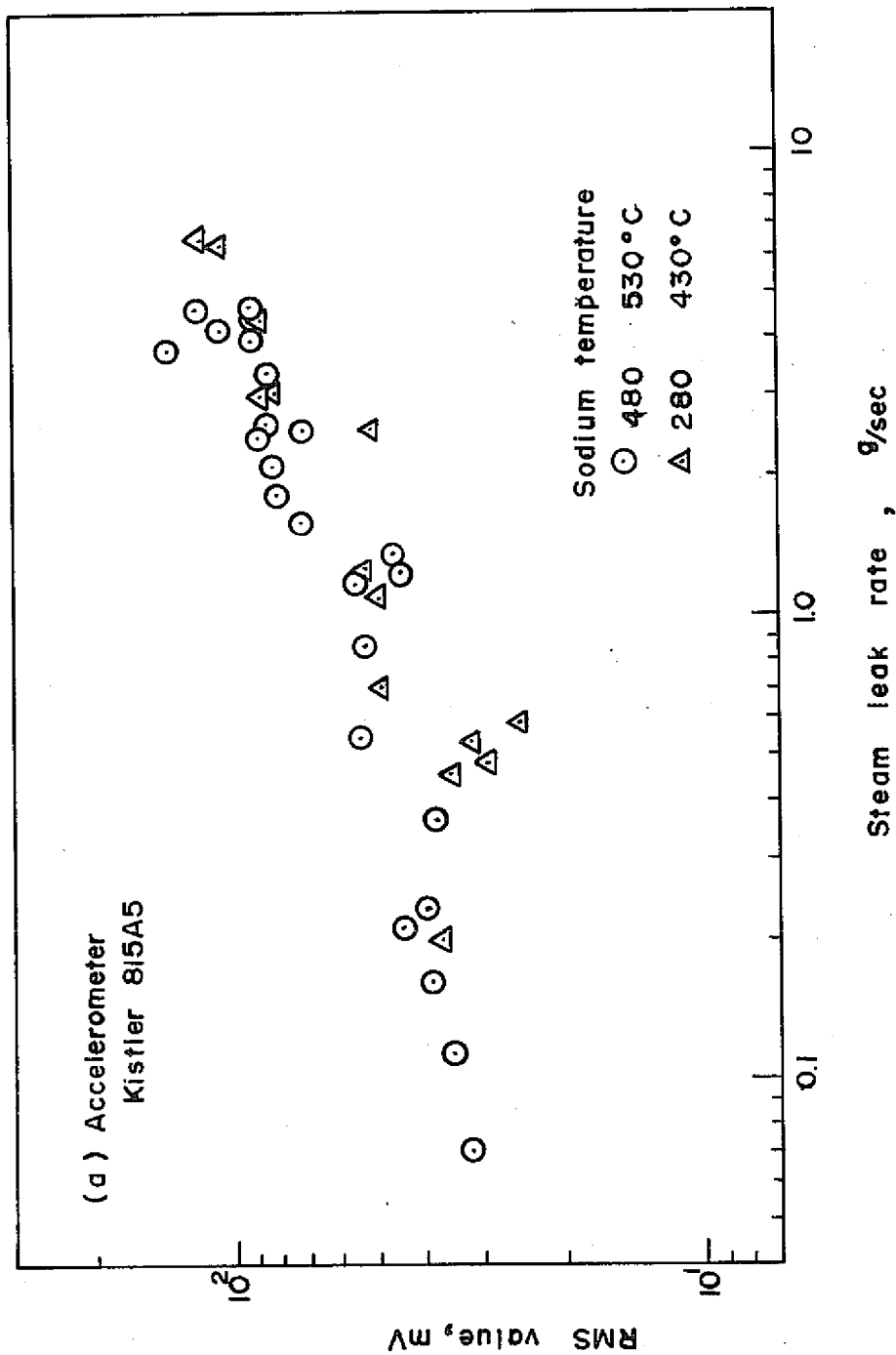


図 3 - 2 (1) 信号出力とリーク率の関係

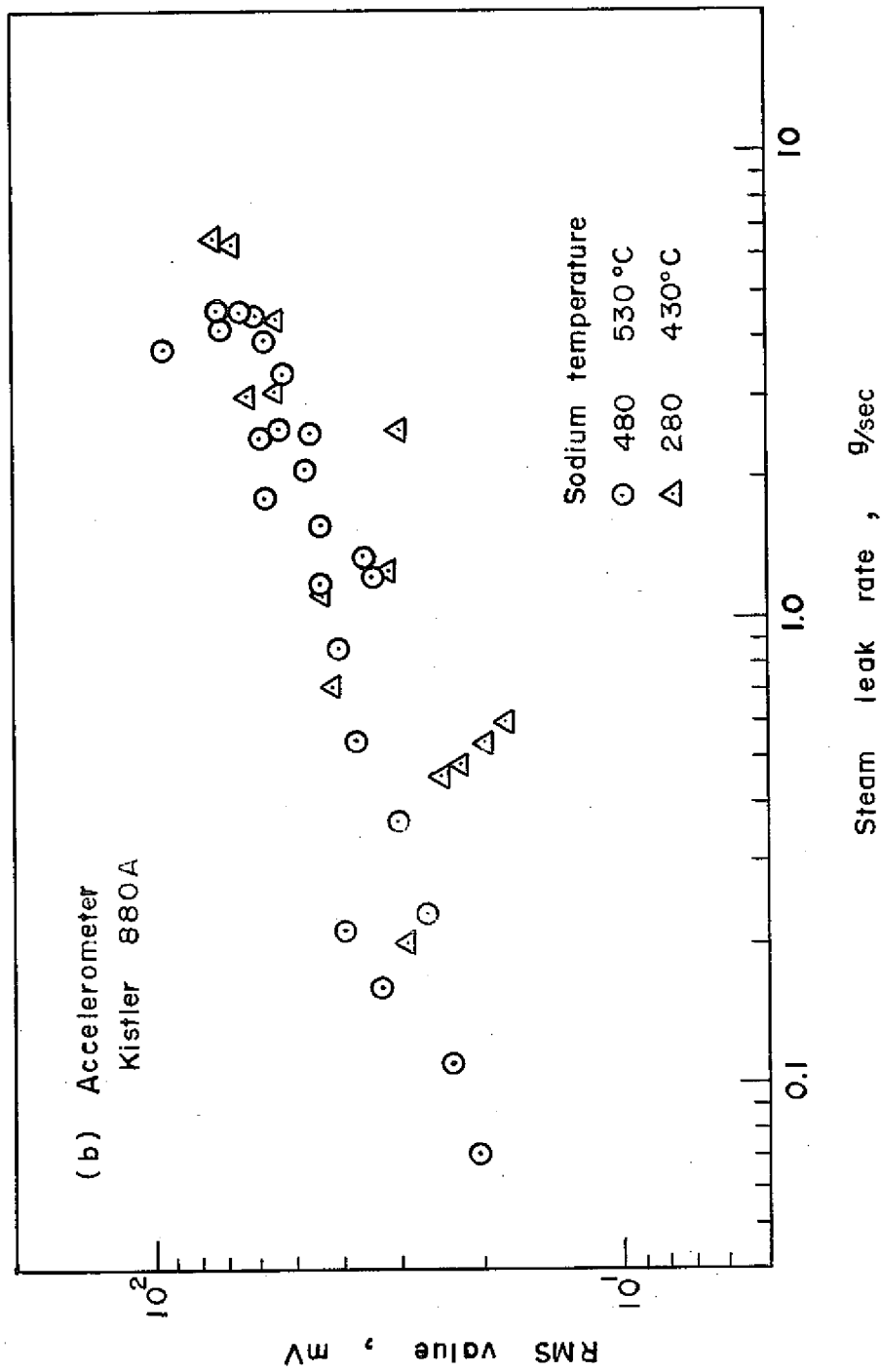


図3-2(2) 信号出力とリーク率の関係

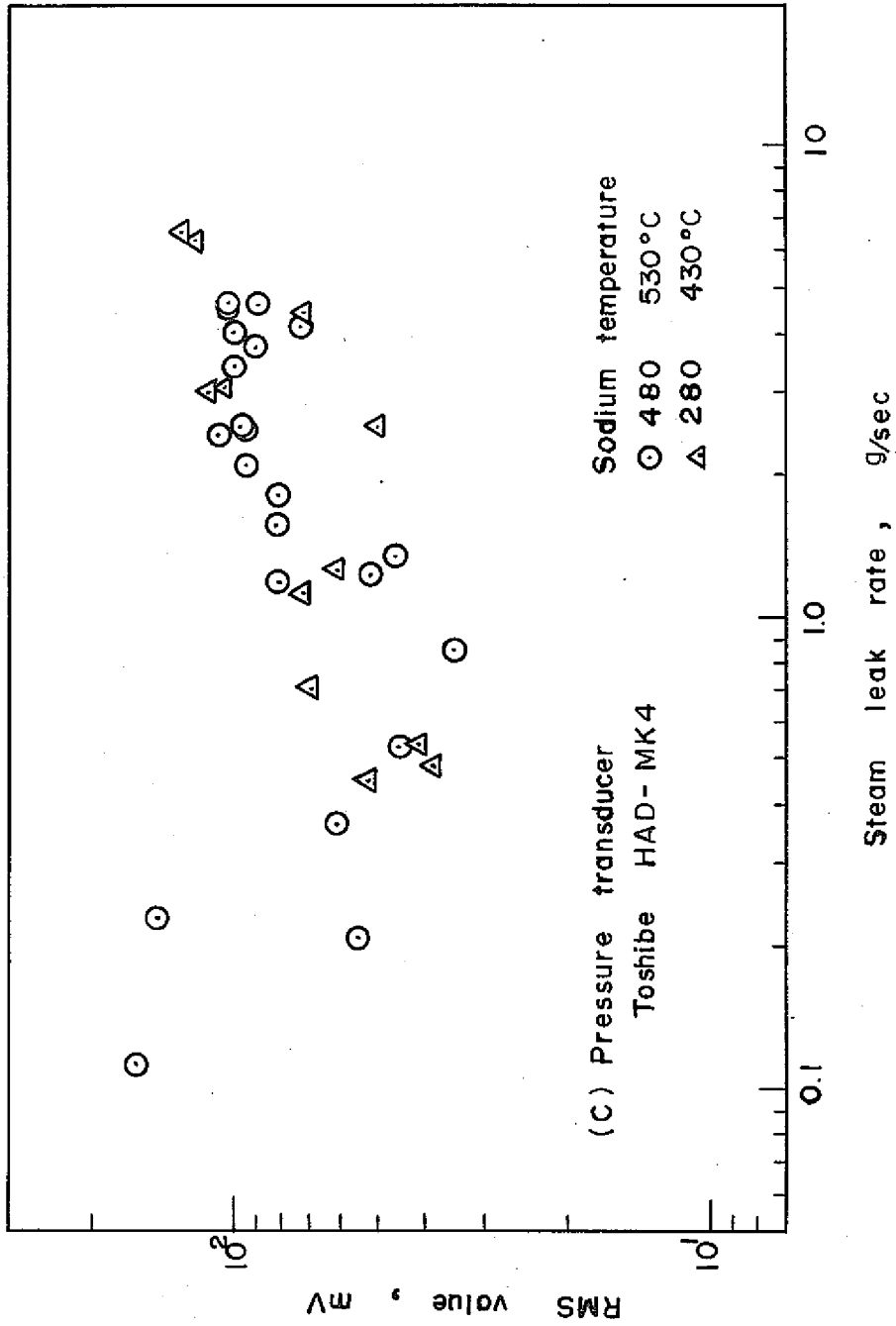


図 3 - 2 (8) 信号出力とリーク率の関係

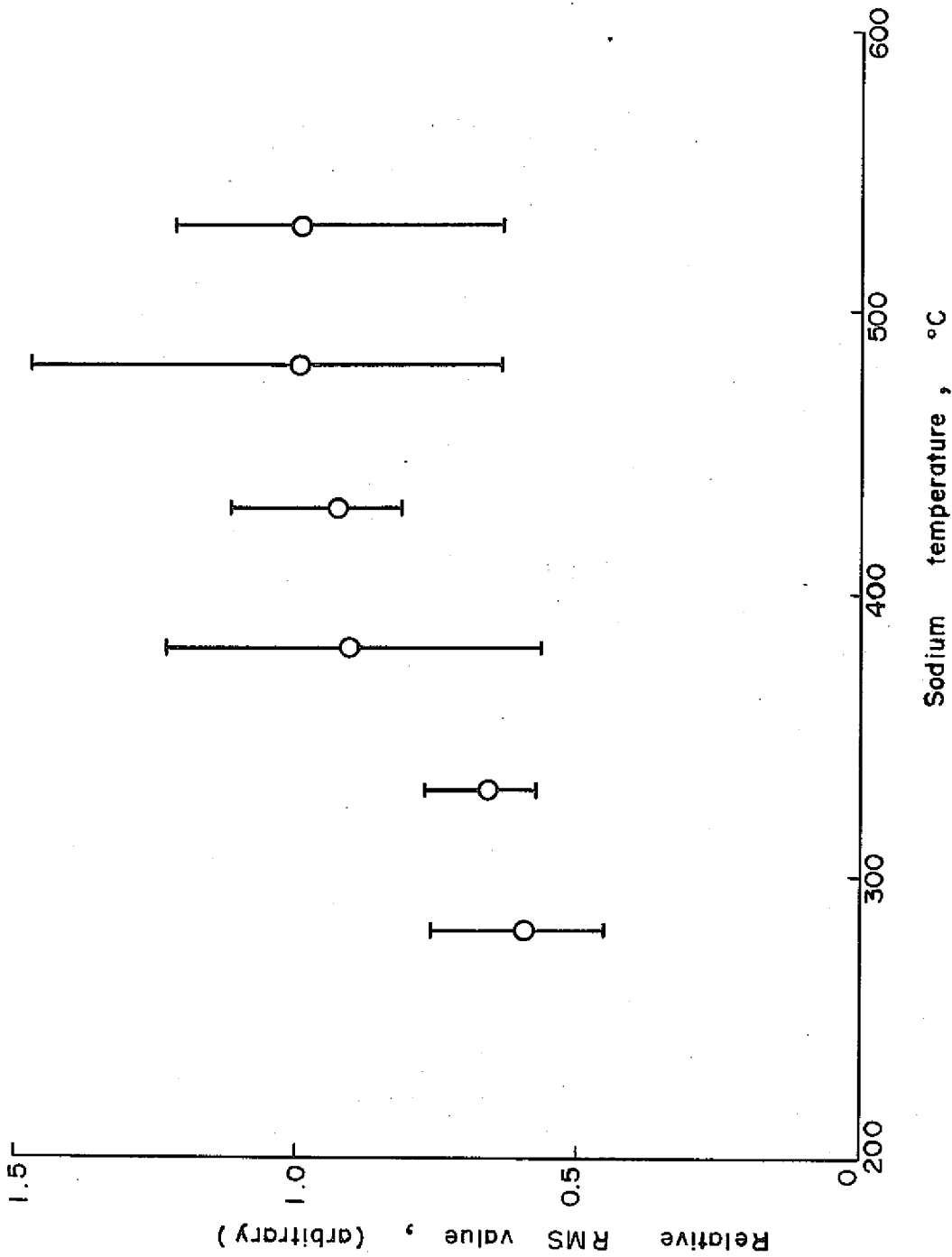


図 3-3 信号出力の周囲温度による影響

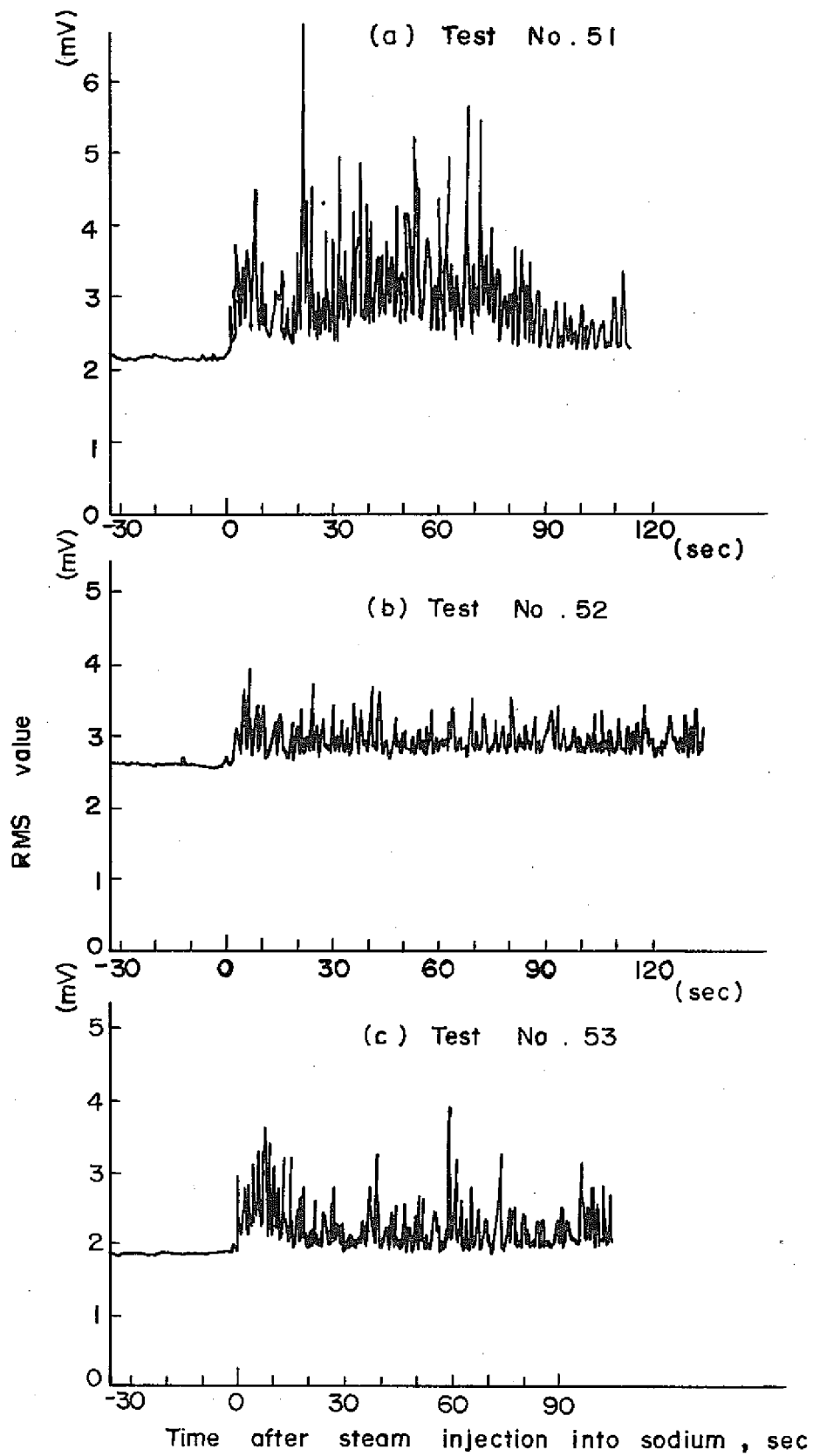


図 3-4 KAMAN製圧力計による信号

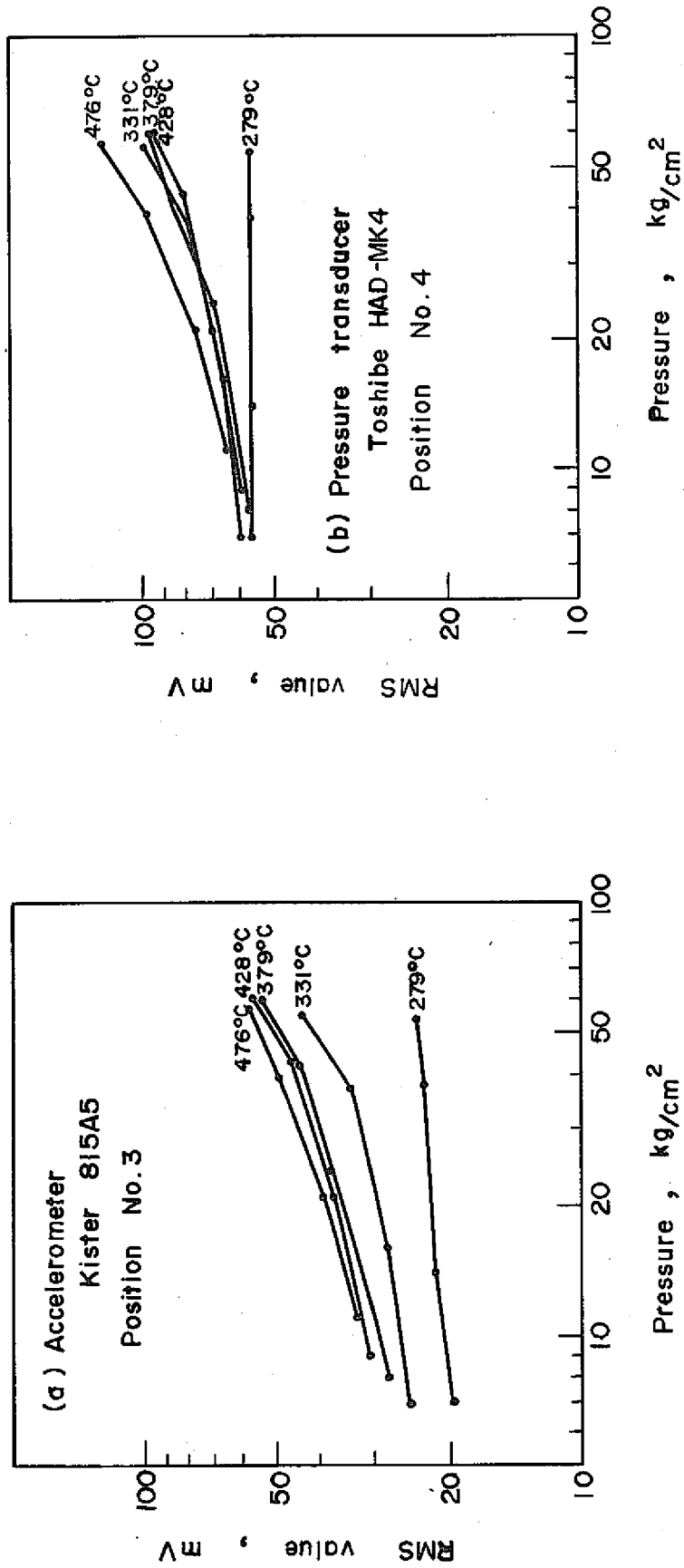


図 3 - 5 (1) ガス噴出時の信号出力

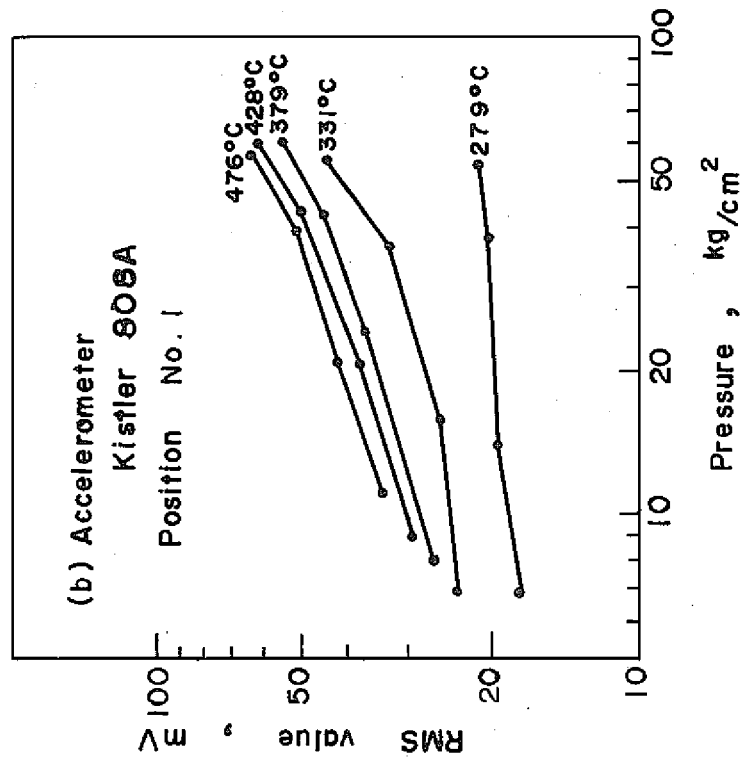
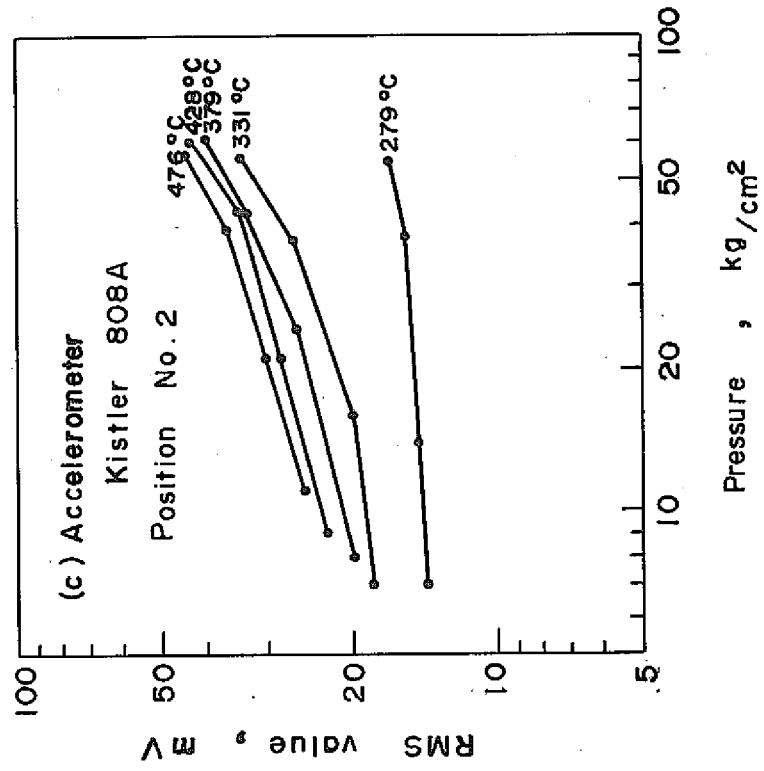


図 3 - 5 (2) ガス噴出時の信号出力

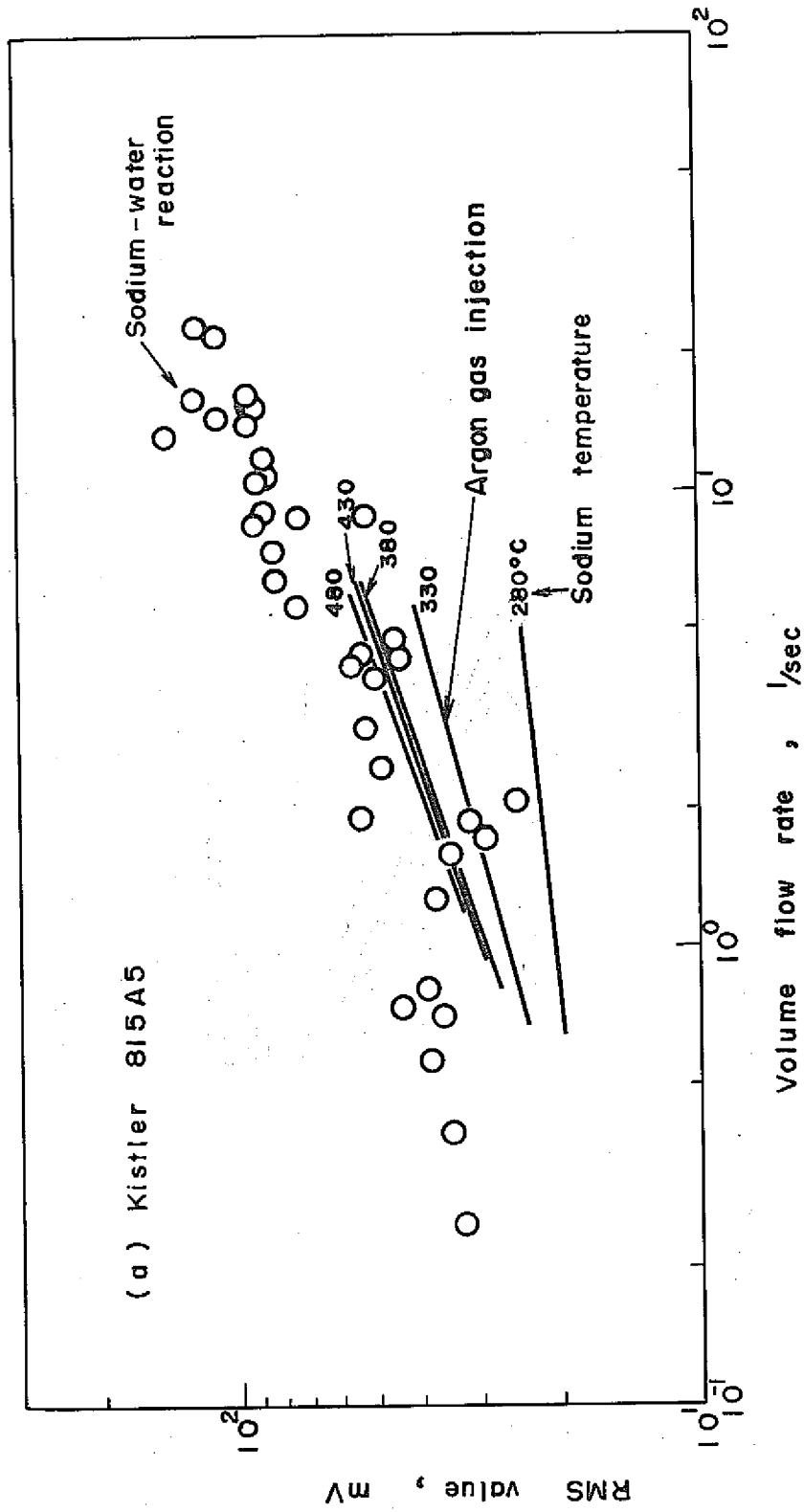


図 3 - 6 (1) 信号出力と体積流量の関係

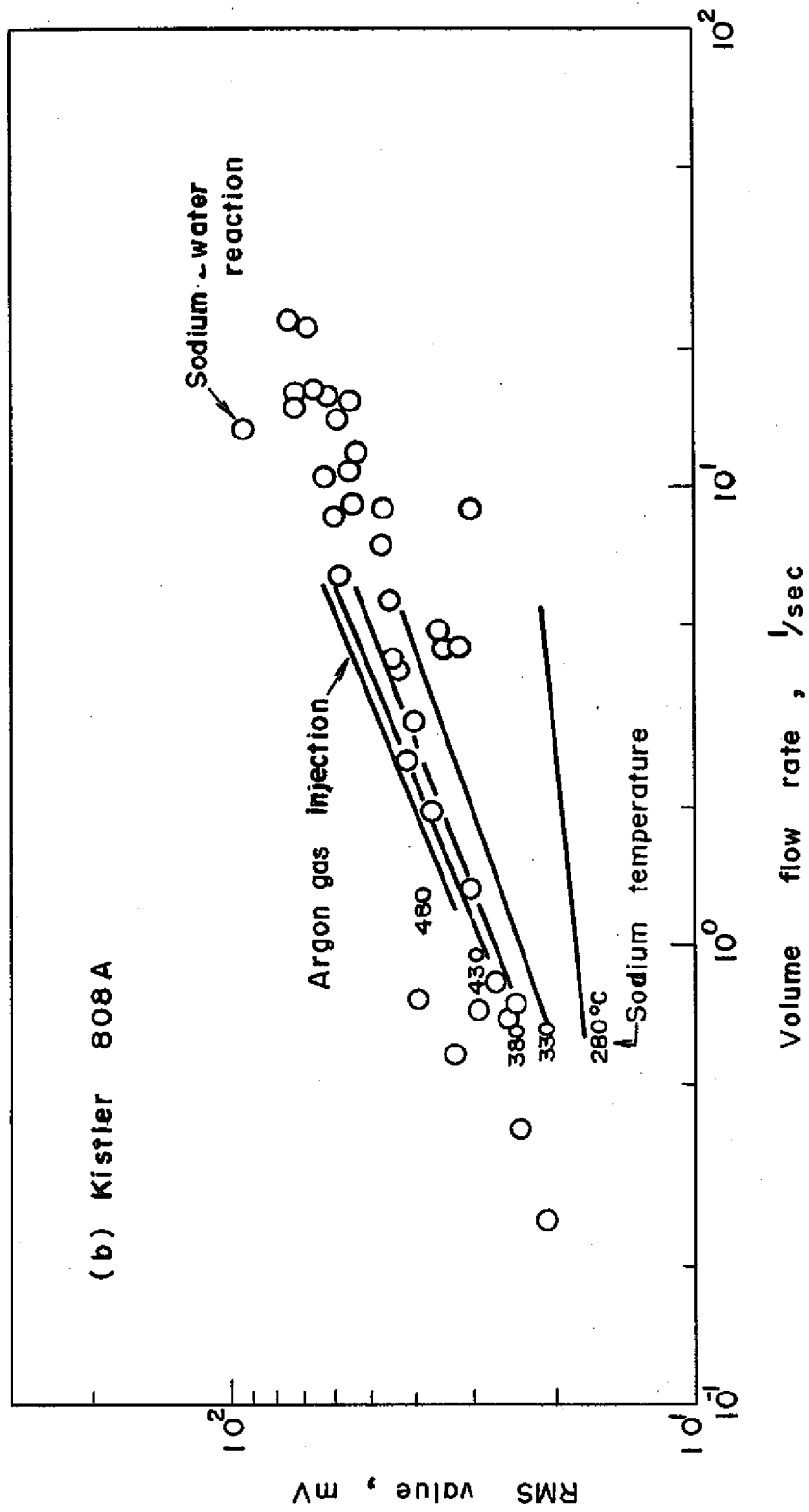


図3-6(2) 信号出力と体積流量の関係

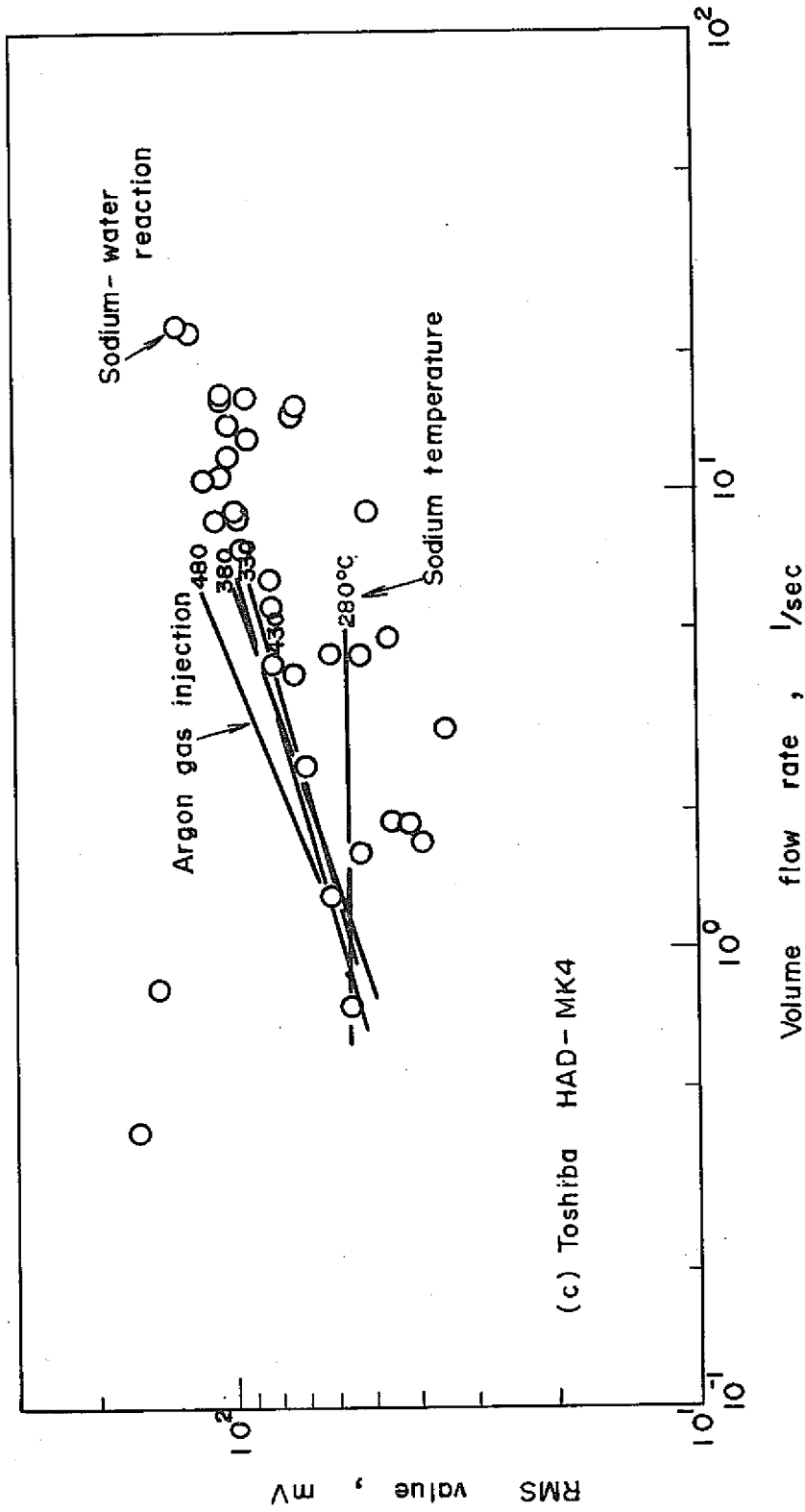


図 3 - 6 (3) 信号出力と体積流量の関係

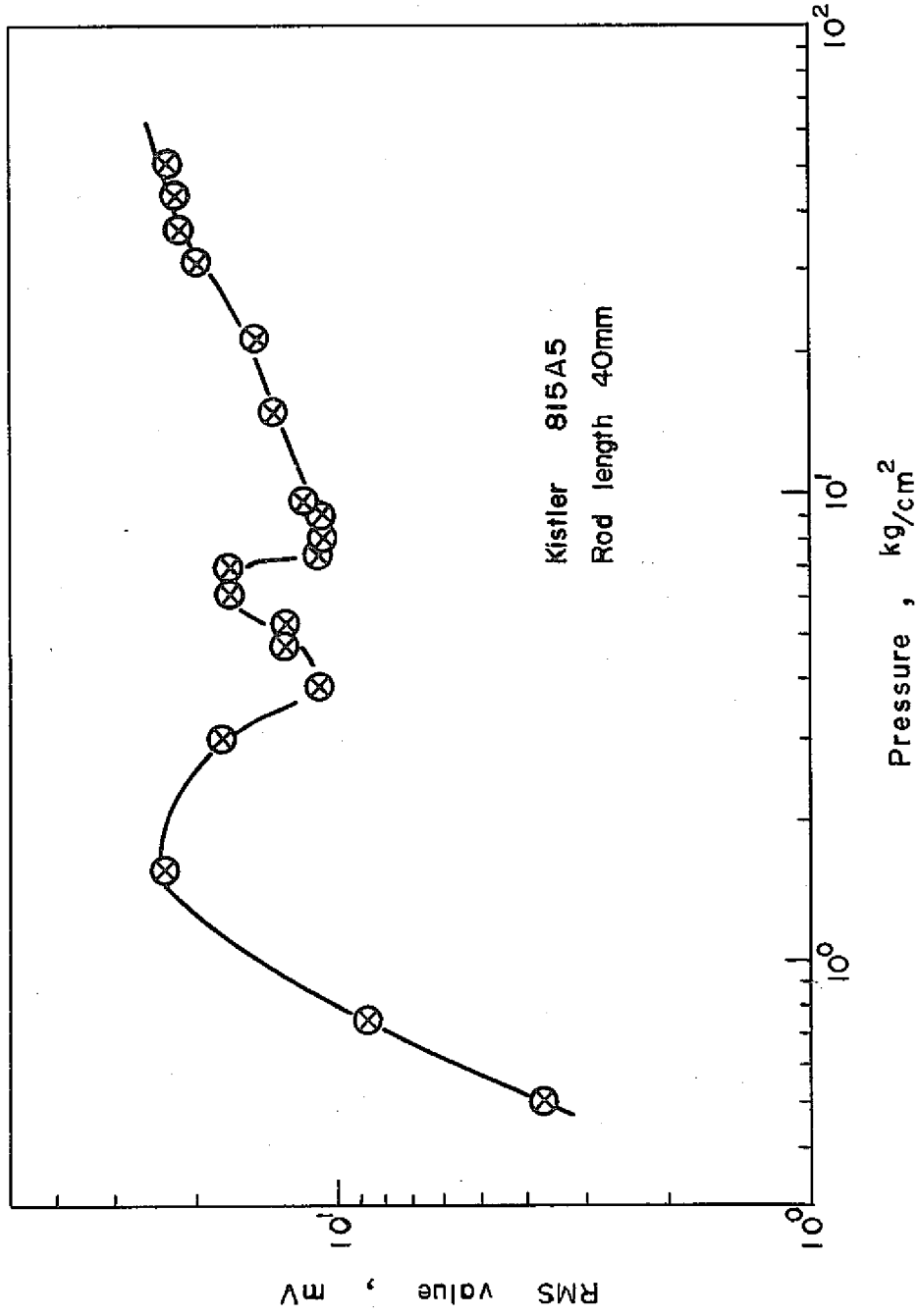


図3-7 水中へのガス噴出時の信号出力

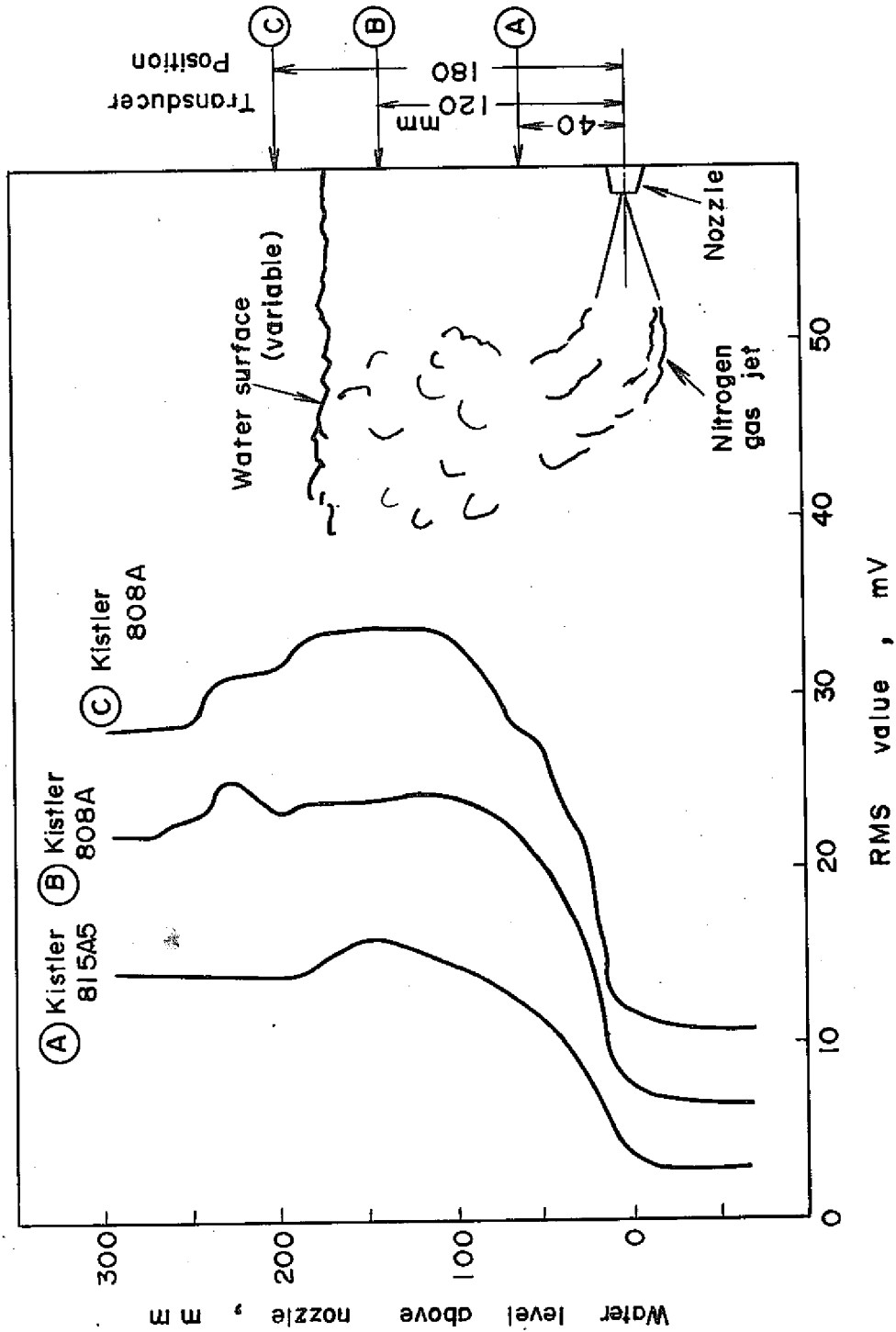


図 3-8 信号出力に対する液面の影響

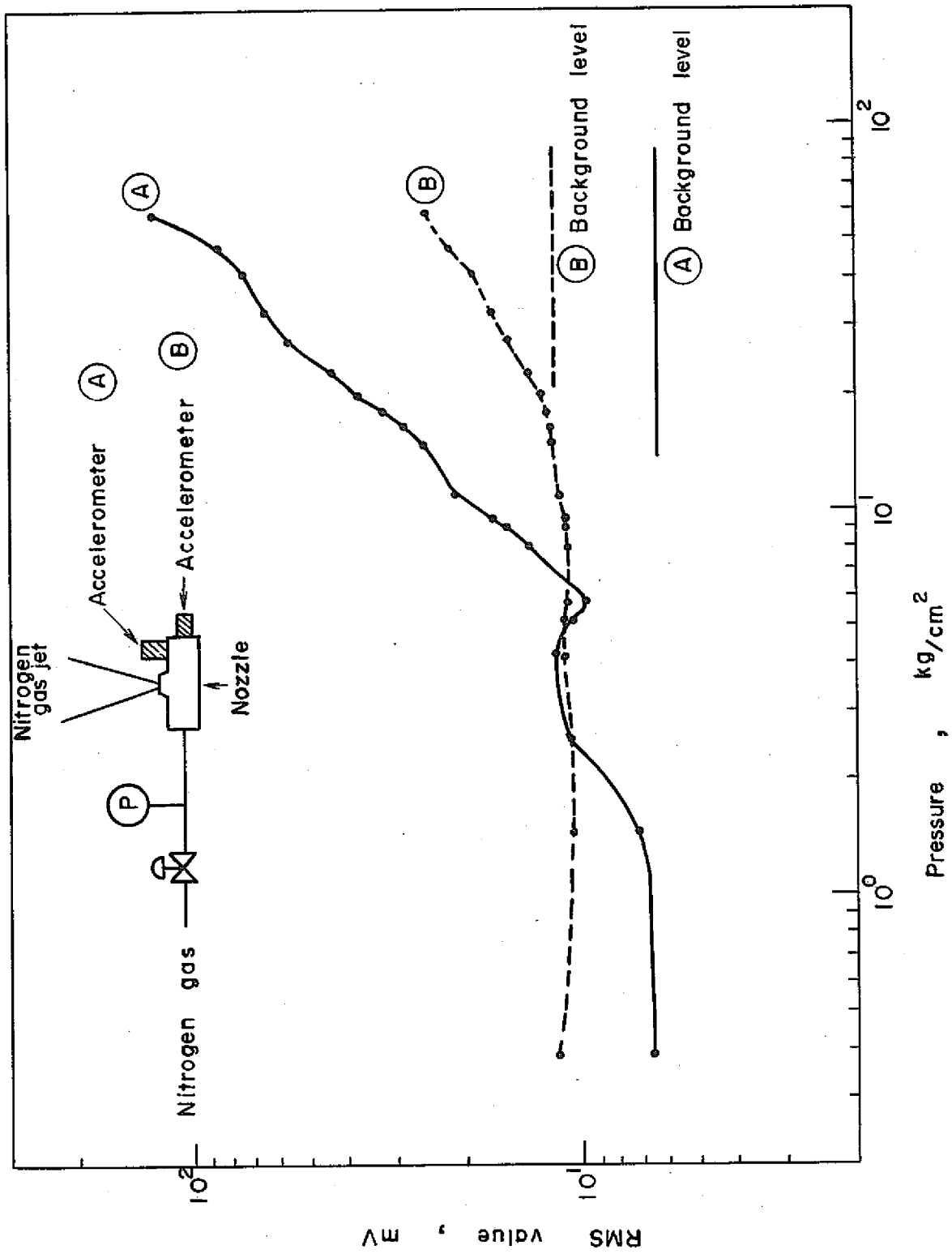


図 3-9 大気中へのガス噴出時の信号出力

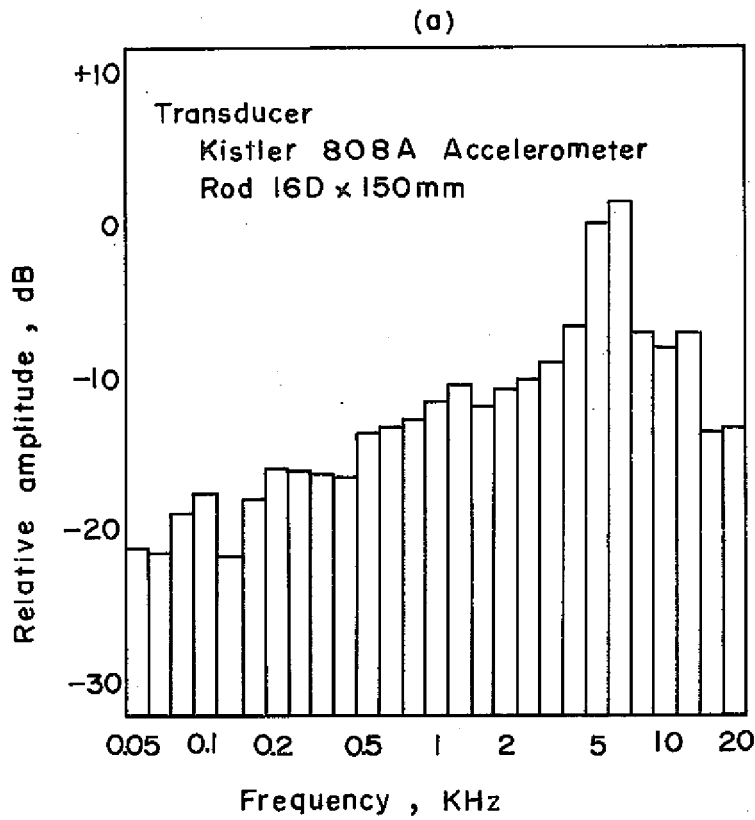


図 3 - 10 (1) Na - 水反応時の周波数スペクトル

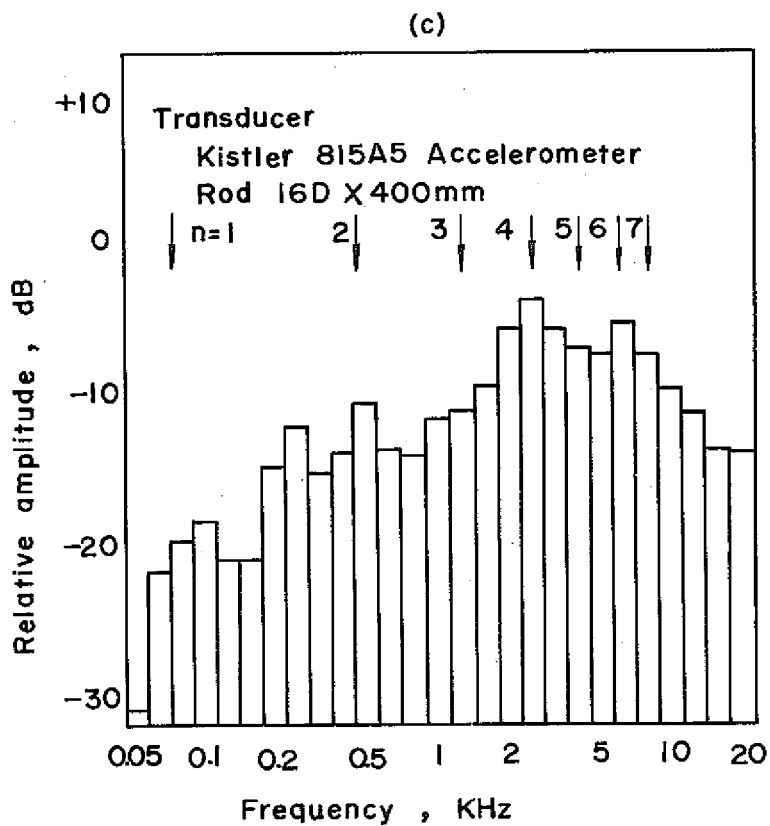
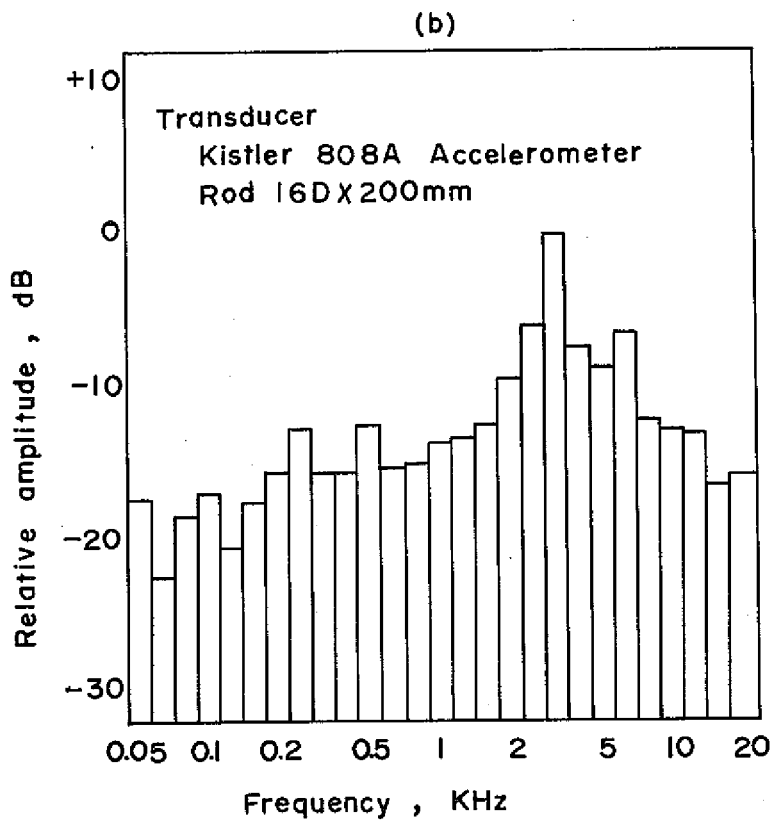


図 3 - 10 (2) Na - 水反応時の周波数スペクトル

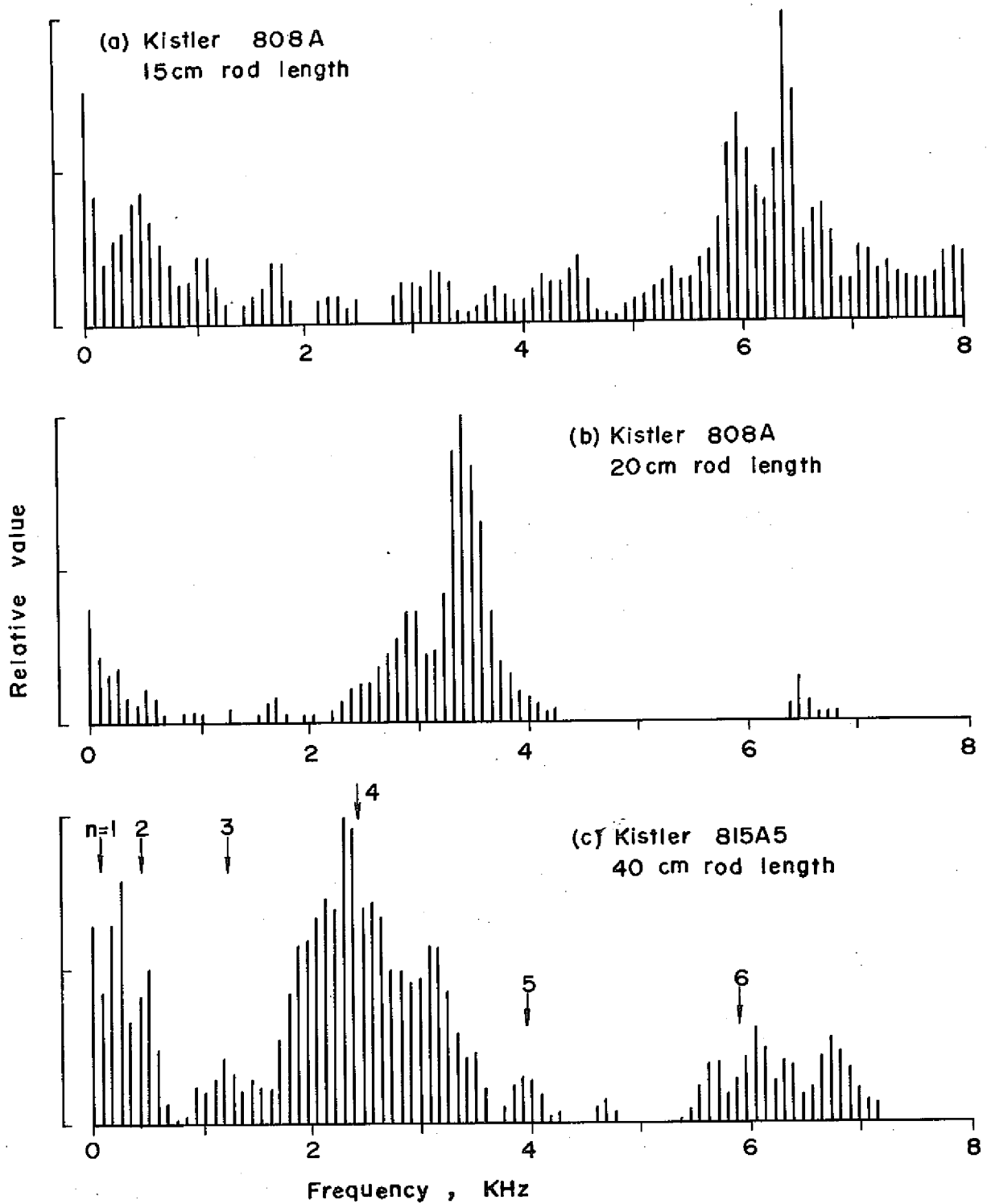


図3-11 Na-水反応時の周波数スペクトル

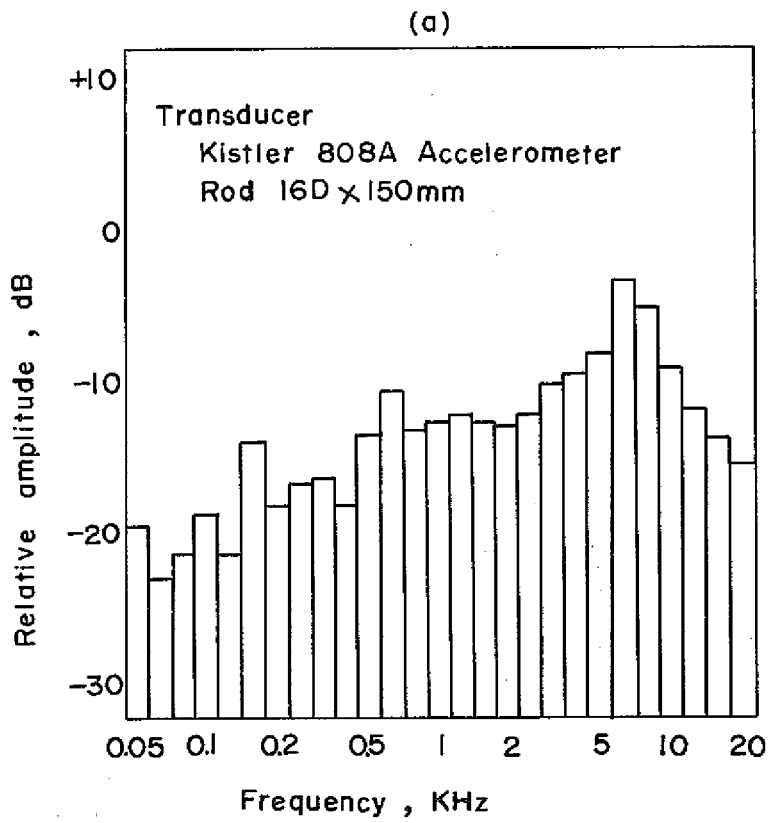


図 3 - 12 (1) ガス噴出時の周波数スペクトル

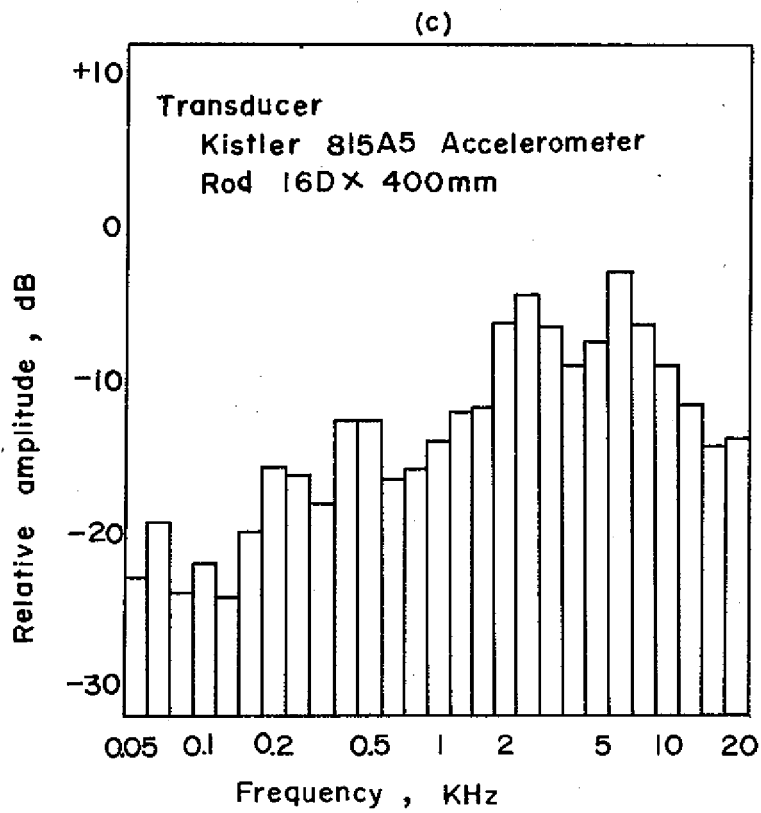
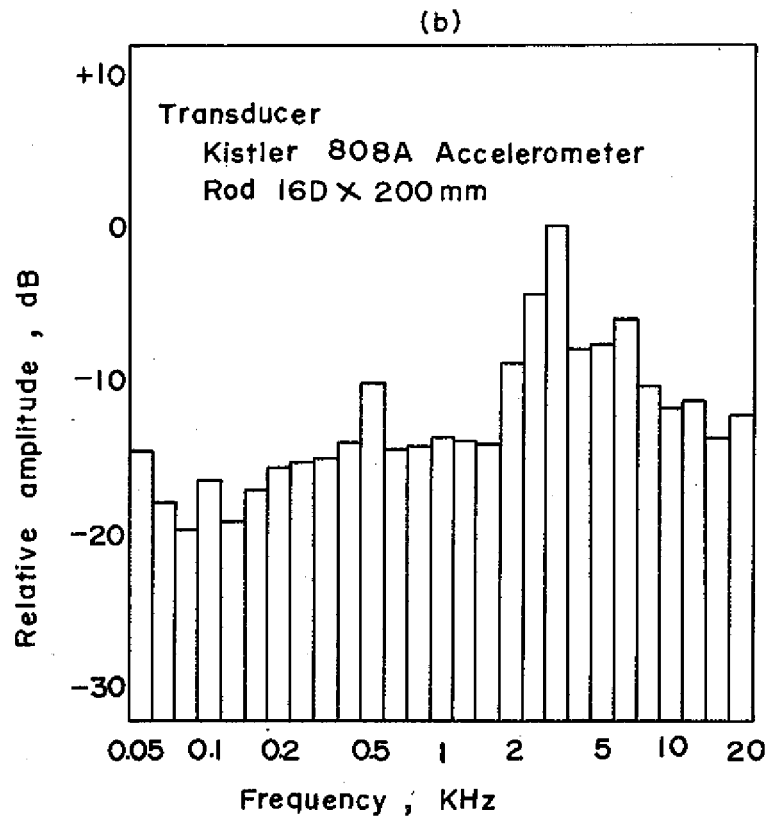


図 3 - 12 (2) ガス噴出時の周波数スペクトル

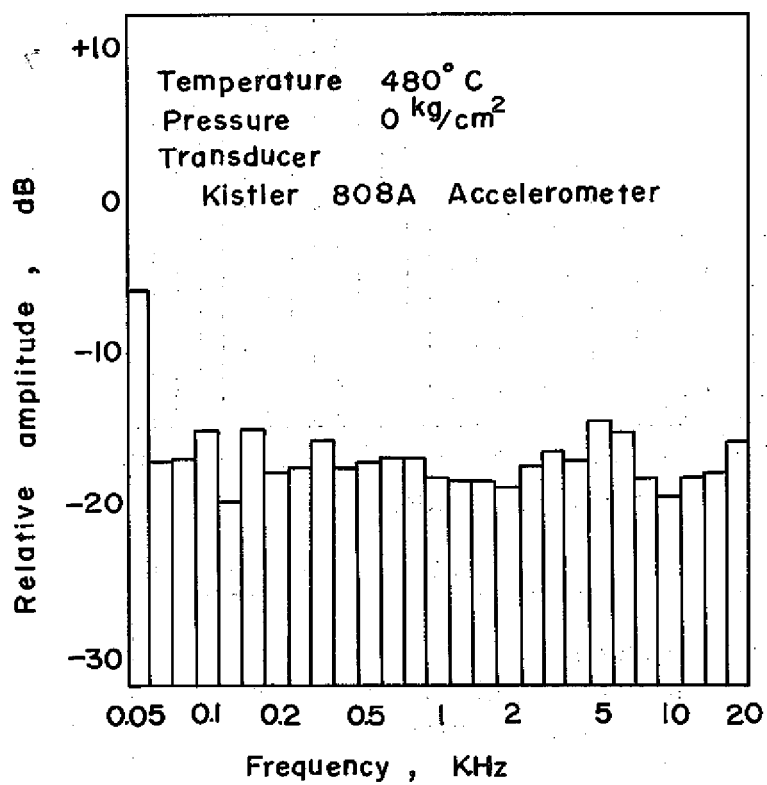


図 3 - 13 (1) ガス噴出時の周波数スペクトル (圧力)

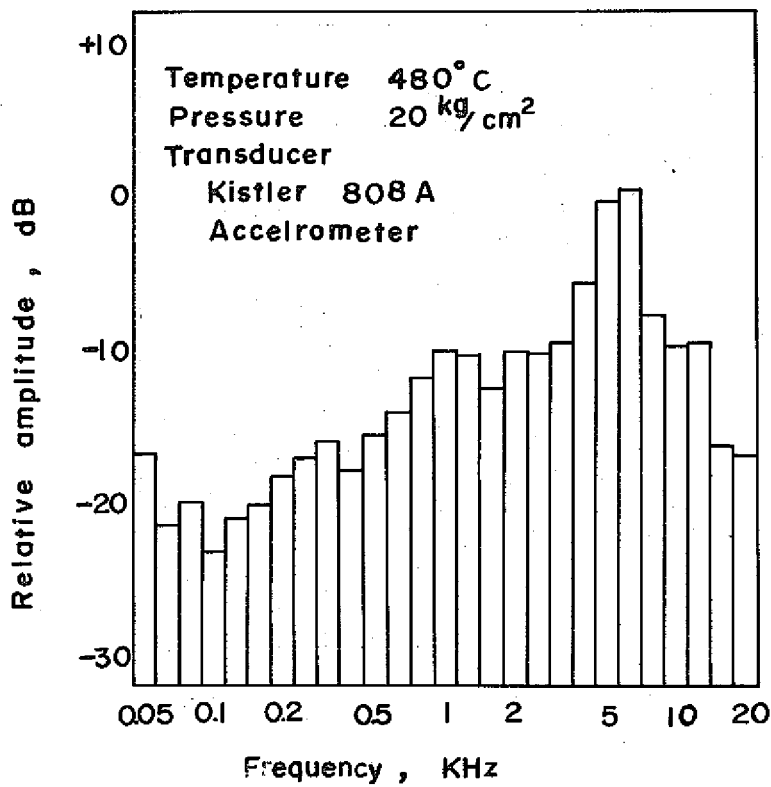
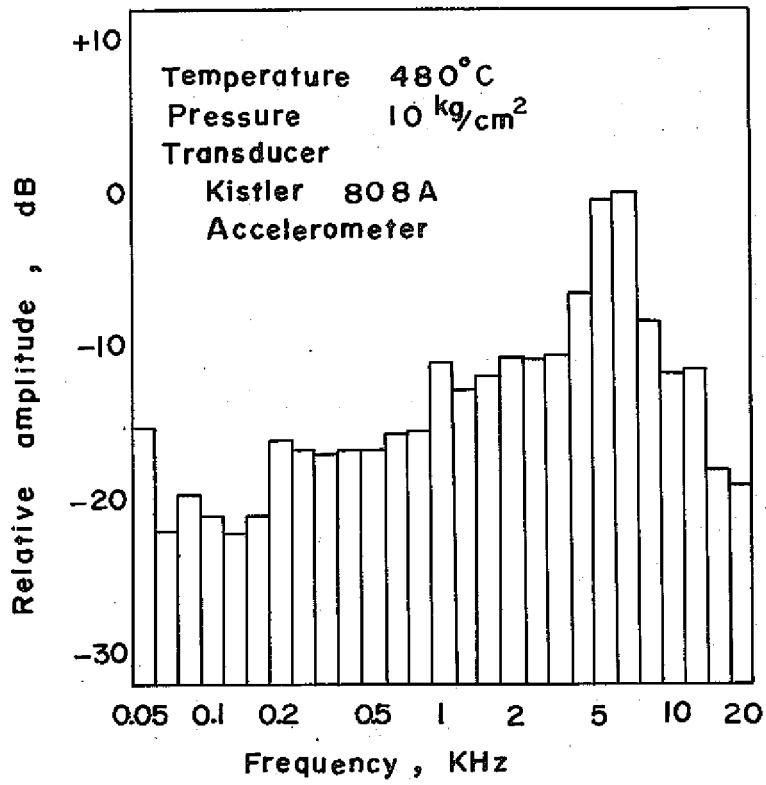


図 3 - 13 (2) ガス噴出時の周波数スペクトル (圧力)

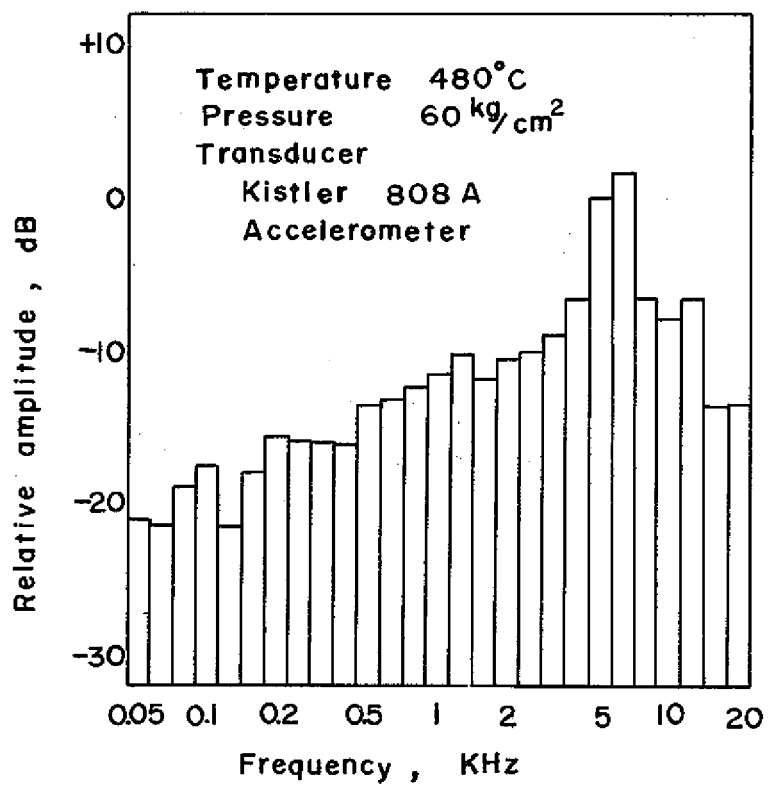
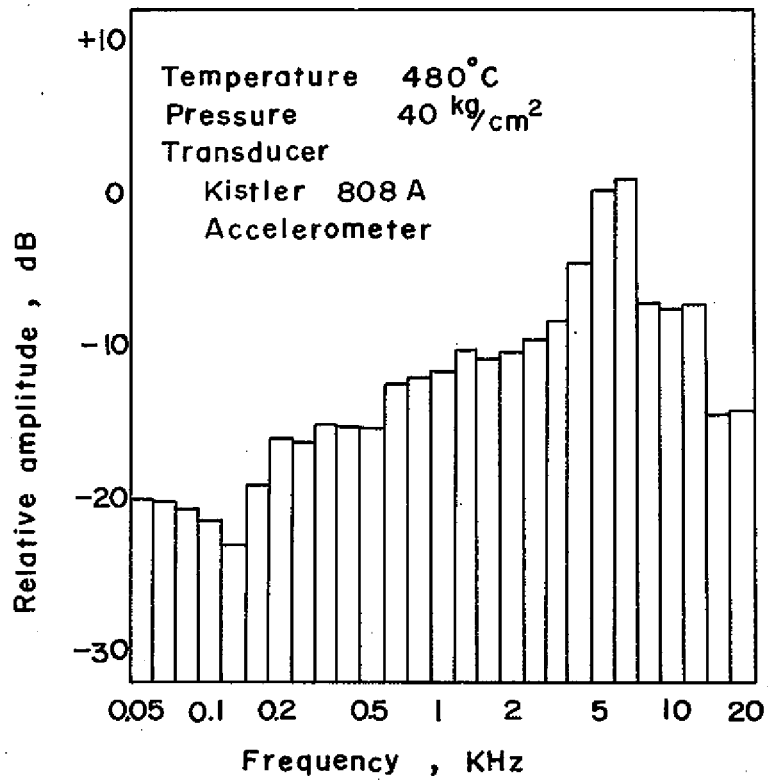


図 3 - 13 (3) ガス噴出時の周波数スペクトル (圧力)

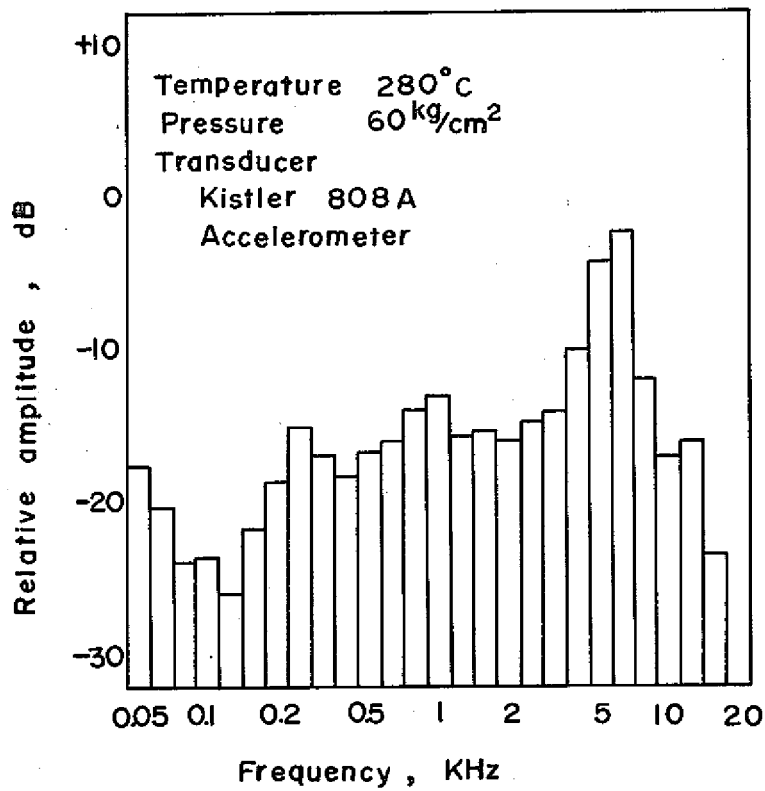


図3-14(1) ガス噴出時の周波数スペクトル(温度)

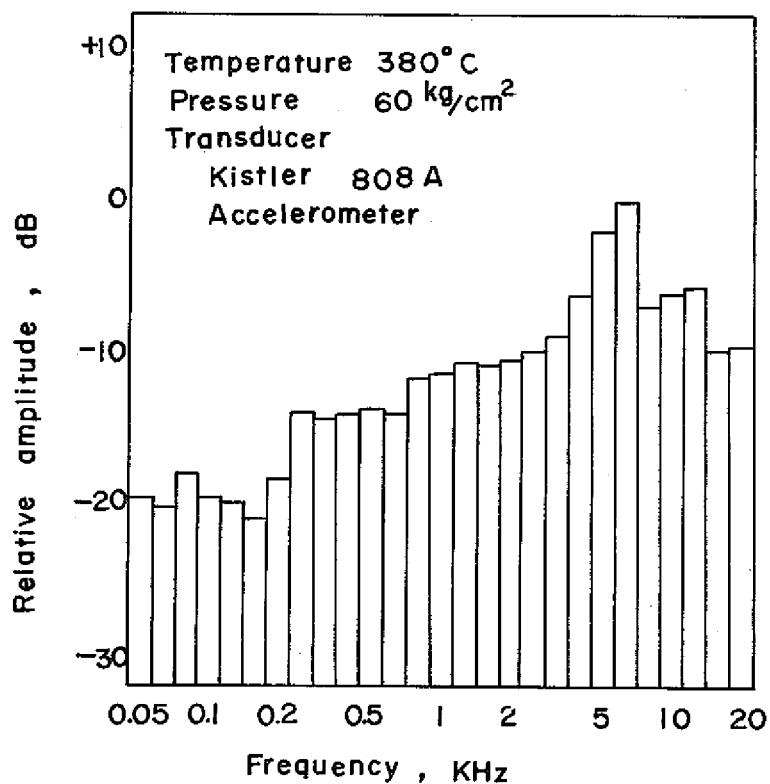
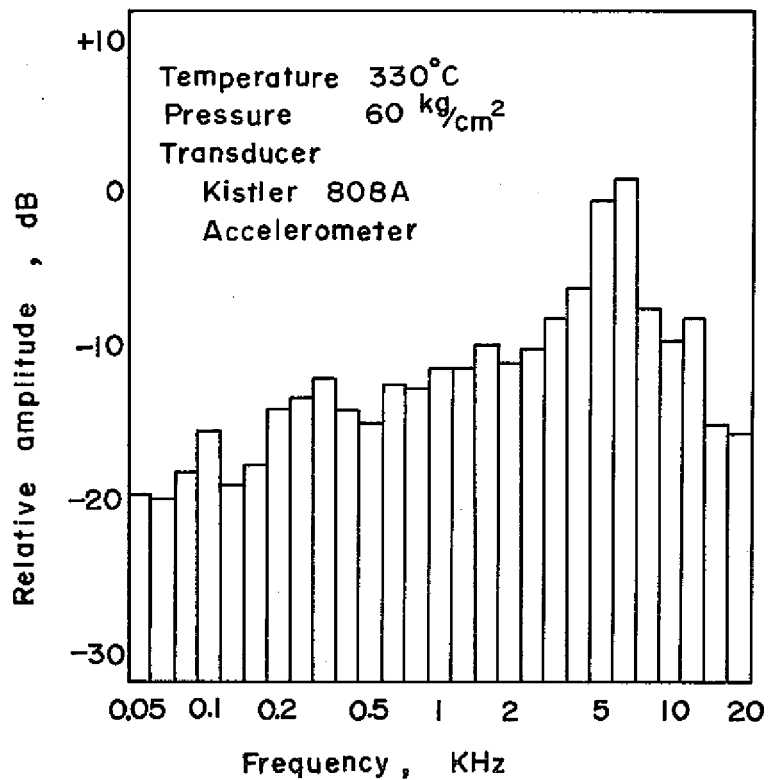


図 3 - 14 (2) ガス噴出時の周波数スペクトル (温度)

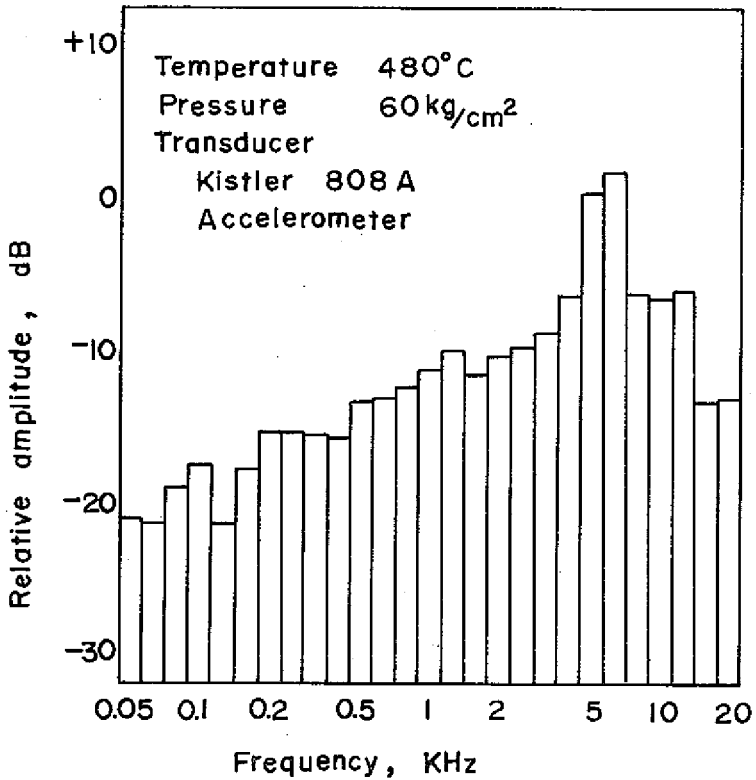
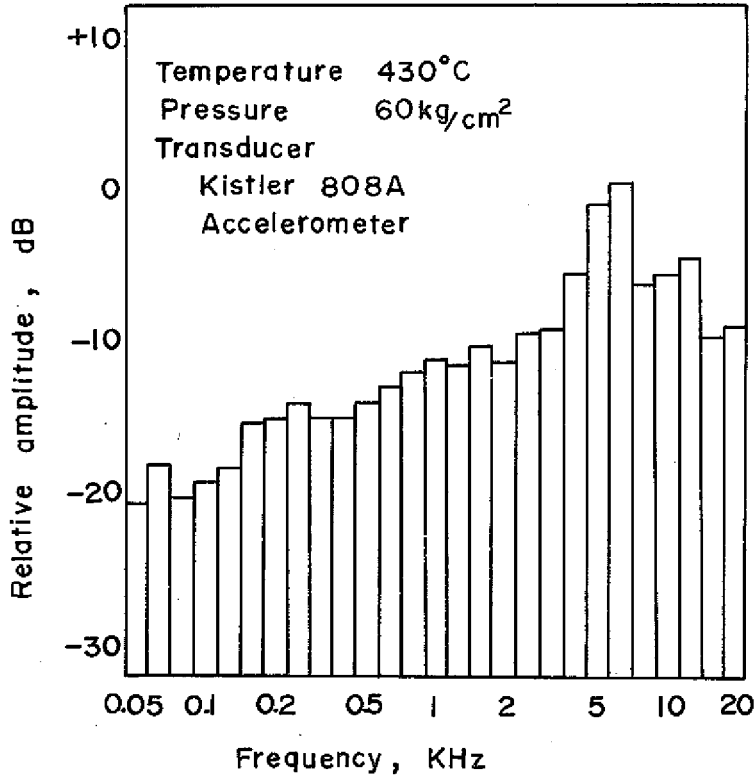


図3-14(3) ガス噴出時の周波数スペクトル(温度)

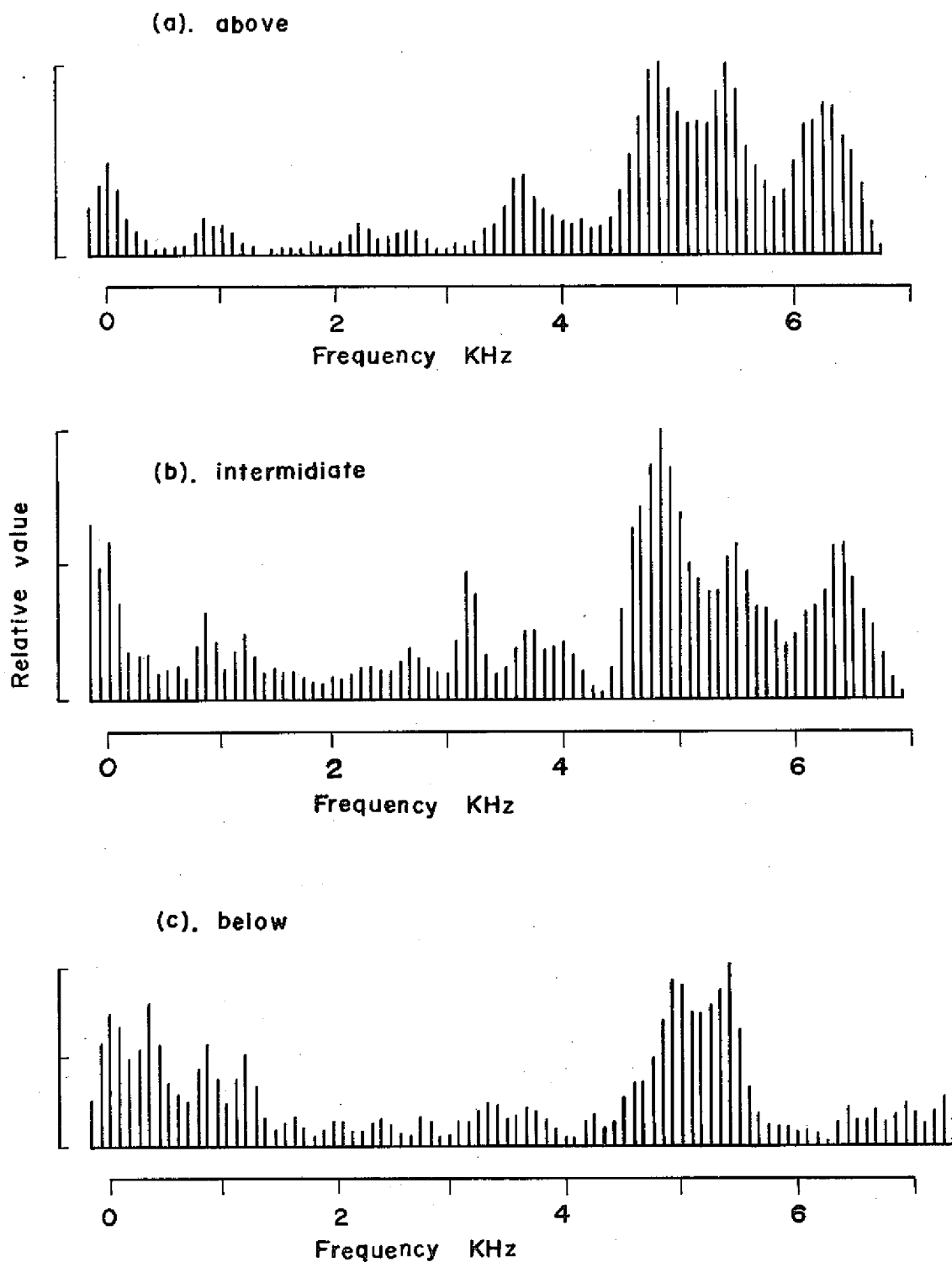


図3-15 IMWSGバックグラウンドの周波数スペクトル

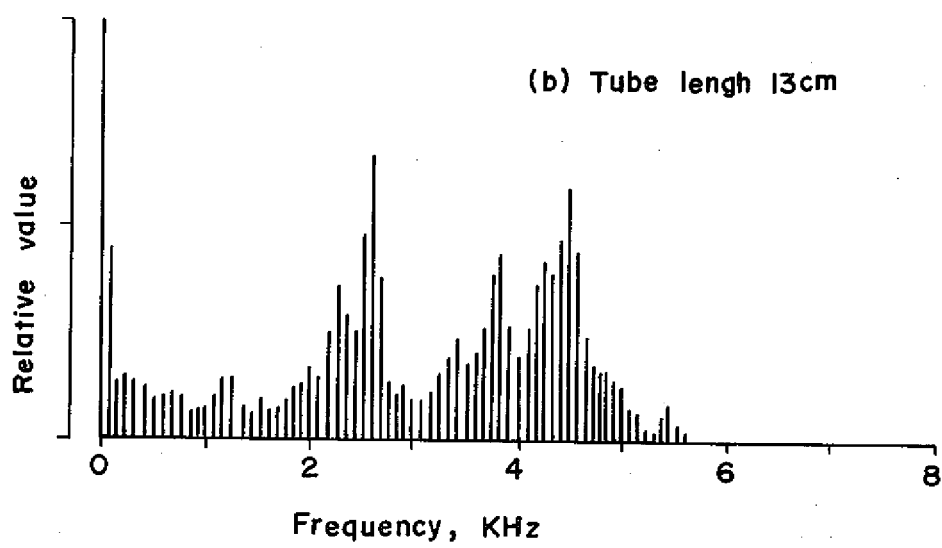
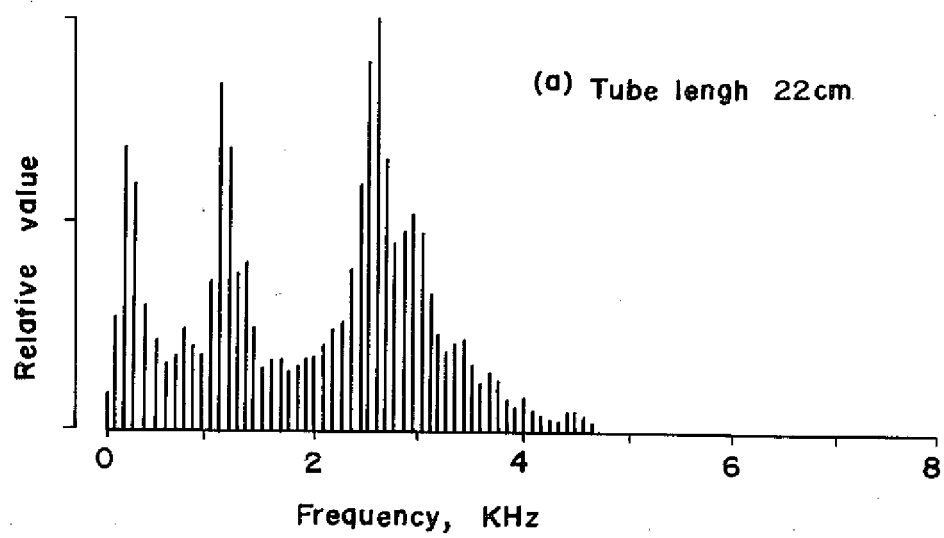


図 3-16 Na 中マイクの周波数スペクトル