JAERI-Tech
2000-067

JP0050872

NSRR実験用水塊速度計
ー特性及びデータ処理方法ー

2000年11月

杉山　智之・更田　豊志

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319－1195 茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319－1195　茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319－1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行　日本原子力研究所

JAERI-Tech 2000-067

NSRR実験用水塊速度計
— 特性及びデータ処理方法 —

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部
杉山 智之 ・ 更田 豊志

(2000年9月12日受理)

NSRRでは、反応度事故条件下における燃料挙動を明らかにするため、燃料のパルス照射試験を実施している。燃料が破損した場合に懸念される事象のひとつとして、原子炉容器内での機械的エネルギ発生が挙げられる。ここで、機械的エネルギとは、燃料破損に伴い発生し得る水撃力及び衝撃圧力が持つエネルギを意味しており、原子炉構造物の破損を引き起こし得るものである。よって、原子炉の安全性を評価する上で、機械的エネルギ発生量は必要不可欠な情報である。NSRR実験では、水撃力による機械的エネルギ発生量を、燃料破損時に飛び上がる水塊の運動エネルギとして評価している。その際、水塊の上昇速度を計測するために、浮き子式の水塊速度計を用いている。本報告書は、この水塊速度計の特性及びNSRR実験におけるデータ処理方法をまとめたものである。

東海研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

Water Column Velocimeter for NSRR Experiment
- Characteristics and Data Processing Procedure -

Tomoyuki SUGIYAMA and Toyoshi FUKETA

Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 12, 2000)

In order to clarify fuel behavior under reactivity initiated accident (RIA) conditions, pulse irradiation experiments on fuel rods are carried out in the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR). One of concerns at fuel failure is mechanical energy generation in the reactor vessel. The mechanical energy is generated by a water hammer or a pressure impact occurred at fuel failure, and has possibility to damage reactor structures. Thus, the amount of generated mechanical energy is critical information for the safety evaluation of power reactor. In the NSRR experiments, the mechanical energy due to the water hammer is evaluated as the kinetic energy of the jumping water column at fuel failure, and the velocity of the water column is measured by the float type water column velocimeter. This report presents characteristics of the water column velocimeter and the procedure of data processing in the NSRR experiments.

Keywords: RIA, NSRR, Fuel Failure, Water Hammer, Mechanical Energy, Velocimeter

目　　次

1. 緒論 …… 1
2. 基本設計 …… 2
3. 水塊速度計の特性 …… 2
　3.1 解析モデル …… 2
　3.2 解析結果 …… 4
　3.3 特性試験 …… 5
4. データ処理 …… 6
5. まとめ …… 8
謝辞 …… 9
参考文献 …… 9

Contents

1. Introduction …… 1
2. Basic Design …… 2
3. Characteristics of Water Column Velocimeter …… 2
　3.1 Analytical Model …… 2
　3.2 Results of Numerical Analysis …… 4
　3.3 Characteristic Tests …… 5
4. Data Processing …… 6
5. Summary …… 8
Acknowledgement …… 9
References …… 9

This is a blank page.

1. 緒論

本報告書は、NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)パルス照射実験において使用している水塊速度計に関して、その特性及びデータ処理方法をまとめたものである。

NSRR計画は、反応度事故条件下における軽水炉燃料の挙動を明らかにし、我が国の安全評価指針を策定する上で必要なデータを取得することを目的として1975年に開始された[1]。これまでに、千回を超える未照射燃料実験から、被覆管表面でDNBが発生する条件、燃料破損に至る条件、さらには燃料破損後に機械的エネルギが発生する条件が明らかにされた。ここで機械的エネルギとは、燃料破損に伴い発生し得る水撃力及び衝撃圧力が持つエネルギを意味し、原子炉構造物の破損を引き起こし得るものである。NSRR実験では、高発熱量条件における溶融破損及び浸水燃料における低温バースト破損の際に大きな機械的エネルギの発生を計測した。これらの結果は、昭和59年に策定された反応度投入事象に対する安全評価指針に反映されている[2]。平成元年度以降、NSRR実験の中心は動力炉あるいは材料試験炉で照射された燃料を用いた実験に移行し、高燃焼度燃料の安全評価指針[2]の根拠となったデータを数多く提供してきた。高燃焼度燃料では未照射燃料とは異なる形態で燃料が破損し、異なる機構で機械的エネルギが発生することを明らかにしてきたが[3]、主としてコストの問題から実験回数が限られているため、十分なデータが得られたわけではない。限られた実験の中で信頼性の高いデータを得るため、計測技術は今まで以上に重要な役割を担っていると言える。

水撃力による機械的エネルギの計測は、浮き子式の水塊速度計を用いて行う。原子炉内の水撃力は、Fig.1に示すように、燃料破損により飛び上がった冷却水塊が圧力容器天井に衝突することにより生ずると想定されている。ただしNSRR実験では、水塊の上昇速度を計測し、その最大速度を用いて水塊運動エネルギを評価することにより、水撃力による機械的エネルギを見積もっている(Fig.2)。実際に天井に衝突する場合には、水塊がさらに上昇するときの位置エネルギ、及び水塊上方のプレナムガスを圧縮するための仕事として、上昇過程で水塊が持っていた運動エネルギは消費される。従って、最大速度時の運動エネルギによる評価は、水撃力で発生し得る最大のエネルギを与える、すなわち保守的な評価であると言える。なお、現在の評価手法では、水塊として上昇する部分は試験燃料棒内のペレットスタック中心高さより上の冷却水と仮定している。

本報告書では、水塊速度計の基本原理及び出力特性を示した後、出力信号から水塊移動速度を得るまでの手順について述べる。

2. 基本設計

水塊速度計は浮き子とシャフトにより構成され、NSRR実験カプセル内の実験燃料棒上方に設置される(Fig.3)。浮き子の比重は約0.8であり、水塊上面の高さに追従し、カプセル内に固定されたシャフトに沿って上下方向に移動する。なお、水塊上昇に対する浮き子の追従性に関しては、透明カプセルを用いた可視実験により確認がなされている[4]。浮き子にはリング型マグネットが取り付けられ、またシャフトには一定間隔ごとに巻方向を反転させたコイルが内蔵されている。よって、浮き子の移動により、コイル内には電磁誘導による交流起電力が発生する。原理がシンプルで半導体を用いていないため、ノイズに強く、原子炉内での使用が可能となっている。Figure 3に出力信号の概念図を示すが、コイル反転の間隔は既知であるため、この交流信号の周期から水塊の移動速度が得られる。信号処理の詳細については第4章で述べる。

照射済燃料実験用に設計された水塊速度計の組立図面をFig.4に示す。この設計以前に未照射燃料実験用の水塊速度計が設計・製作されたが、基本原理は同じである。未照射燃料実験用の設計からの変更点は、狭い空間に設置するために浮き子の直径及びシャフトの長さを小さくした点、及びコイル巻方向が反転する間隔を従来設計の半分である3mm(すなわち周期6mm)とし空間分解能を向上させた点である。以下、本報告書では、照射済燃料実験用の水塊速度計について論ずる。

3. 水塊速度計の特性

3.1 解析モデル

水塊速度計の特性を論ずるため、浮き子に取り付けられたリング型マグネット、及びシャフトに内蔵されたコイルをモデル化し、浮き子すなわちマグネットの移動速度に対

するコイル起電力を定式化する。

まず、リング型マグネットとコイルの位置関係を Fig.5(a)に示す。ここで、マグネット移動時の起電力に寄与する磁束は、リング型マグネット内側の磁束のうち、コイル素線接線方向及びマグネット進行方向の両者に垂直な成分、すなわち r 方向成分である。この成分を記述するため、リング型マグネットを、外部に同じ磁束をつくる等価なループ群に置き換える(Fig.5(b))。コイル素線が位置する半径(図中の四角く囲んだ部分)における磁束密度の r 方向成分を Biot-Savart の法則に基づいて求めると、Fig.5(c)のようになる[5]。この分布で符号が反転する点はリング型マグネットの中心を意味しており、以後、この点によりマグネットの位置を定義する。

コイルに関するモデルを Fig.6に示す。図の縦軸は、単位長さ当たりのコイル巻数を意味しており、符号は巻方向を表す。ここで用いるコイルは、巻数が常に一定で、軸方向の長さ p ごとに巻方向が反転しているため、周期$2p$ の矩形波となる。以後、p のことをコイル反転の半周期と呼ぶ。

いま、速度 v で移動しているコイルの微小要素 ds が、磁束密度 B を横切るとすれば(Fig.7)、微小要素内に生ずる起電力 $dEMF$ は、v 及び B の積に比例する。なお、コイル微小要素を固定し、磁束が移動していると考えても、この関係は成立する。

$$dEMF \quad \propto \quad vB \tag{1}$$

ここで、Figs.5(a),(b)及び(c)で示したコイルの体系において、軸上の位置 z におけるコイル素線全てを考えた場合、起電力は、巻数 n 及び一巻当たりの素線長さ L にも比例することになる。いま L を比例定数として省略した場合、下記の様に表すことができる。

$$\int_z dEMF \quad \propto \quad nvB \tag{2}$$

ここで、Bは常にr方向成分を示すものとする。

次にコイル全体の起電力について考える。いま、Fig.5(a)のマグネットが、位置 z を速度 v で移動している場合、全体の起電力 EMF は以下の式で表される。

$$EMF(t) \quad = \quad C\,v(t) \int_{-\infty}^{\infty} n(z(t)+z')\,B(z(t)+z')\,dz' \quad = \quad C\,v(t)\,S(z(t)) \tag{3}$$

ここで、t は時刻を表し、C は透磁率や一巻当たりのコイル素線長さ等、全ての比例定数をまとめたものである。この式は、マグネットの移動速度に依存する因子と、マグネットとコイルの特性により決定される因子とが分離可能であることを示している。

なお、ここまでの議論では微小時間Δtの経過に対するvの変化、及び$v\Delta t$の移動量に対する B の変化については特に触れなかった。これらの微少量は式(3)の導出過程

において、微少量の2次あるいは3次の項となるため、無視することができる。従って、vの時間依存及びBの空間依存があっても式(3)は成立する。

3.2 解析結果

式(3)による計算例をFig.8に示す。この例では速度vを一定とした。図の横軸はマグネットの位置を意味しているが、v が一定なので、時刻と見なすこともできる。Figure 9(a)に示すように、マグネットがコイルの腹(巻方向一定区間の中央)に位置した時、式(3)の積分記号内部は奇関数となるため、$S(z)$は0となる。一方、マグネットがコイルの節(巻方向が反転する場所)に位置した時には、起電力は極大値または極小値をとる(Fig.9(b)及び(c))。コイルの巻方向が＋から－に変わる場合と、その逆の場合とで$S(z)$の符号が変わるが、絶対値は一定であるため、極大値及び極小値は、マグネットの移動速度に定数を乗じた値となる。すなわち、起電力履歴の包絡線(厳密には極大点及び極小点を結んだ線)がマグネット移動速度(の絶対値)の履歴を表す。ただし、コイルの両端付近に関しては、式(3)の積分における対称性が成立しないため、コイルの腹においても起電力は0にならない。また同様の理由で、マグネットがコイルの節に位置した場合でも $S(z)$の絶対値が変わってしまい、速度との関係が保存されない(Fig.9(d)及び(e))。このような両端の影響を受ける範囲の広さは、Fig.5(c)に示した磁束密度分布のz方向の広がりに依存する。

以上の結果をまとめると、水塊速度計の出力は以下の性質を持っている。

(i) マグネットの移動速度が0の場合、起電力も0である。

(ii) マグネットがコイルの腹に位置するとき、起電力は移動速度に関係なく0となる。よって、起電力が0から再び0になるまでの時間は、マグネットがコイル反転の半周期分移動するために要した時間を意味する。従って、半周期の長さが既知であれば、その区間における平均速度を得ることができる。

(iii) マグネットがコイルの節に位置するとき、起電力は極大値あるいは極小値をとる。また、その絶対値はマグネット移動速度のみに比例するため、起電力履歴の包絡線は移動速度(の絶対値)の履歴を表す。

(iv) コイルの両端付近では、(ii)及び(iii)が成立しない。よって、計測においては両端付近の使用を避けるべきである。

3.3 特性試験

浮き子移動速度とコイル起電力の関係を調べるため、特性試験を実施した。試験の概要をFig.10に示す。NSRR照射済燃料用に製作した水塊速度計(コイル反転の半周期 3mm)に延長シャフトを取付け、浮き子を鉛直方向に落下させた時の起電力をオシロスコープにより計測した。浮き子の初期高さは延長シャフト下端から0, 10, 20, 40, 60, 90cmとし、それぞれNo.1及びNo.2と名付けた2体の速度計に関して行った。それらの計測結果を、それぞれFig.11(a)～(g)及びFig.12(a)～(g)に示す。

浮き子落下試験においては、コイル部分を通過する間も重力により加速される。加速量は通過に要する時間に比例するため、コイル部分に達した時点での速度が大きいほど、重力加速の影響が現れにくいはずである。高さ90cmから浮き子を落下させた試験では、Fig.11(g)及びFig.12(g)から分かるように、重力加速の影響が少ない。すなわち、速度一定条件に近い。これらの履歴が、Fig.8に示した速度一定条件での解析結果と定性的に一致していることから、解析モデルの妥当性が示されたと言える。

逆に、コイル部分に達した時点での速度が小さい場合には、重力加速の影響が顕著に現れる。高さ0で試験を行ったFig.11(a), (b)及びFig.12(a), (b)では、時間と共に正弦波状信号の周期が短くなり、振幅が増大している。これらは前節で述べた水塊速度計の性質(ii)及び(iii)に起因している。また、信号の包絡線がほぼ直線であるという結果は、重力による加速度が一定であることに対応している。計測結果から算出した加速度は9.8m/s^{2}を下回っていたが、これは浮き子の中心孔とシャフトとの接触により減速したためと考えられる。ただし、実験結果のうち、平均加速度が9.8m/s^{2}を上回った場合が3件(Fig.11(b),(f)及びFig.12(f))があった。これらの結果は参考値として扱い、この後で速度計固有の定数を算出する際には用いないことにする。

Figure 13及び14に、水塊速度計の性質(ii)に基づいて算出した浮き子の速度履歴を示す。これらの図は、それぞれ、速度計 No.1及び2に対応する。この速度履歴の算出方法については第4章で説明するが、ここでは、起電力が0から再び0になる間の平均速度を、それらの中心時刻における速度としてプロットしてある。今回のデータ処理では読みとりの精度が低かったため、特に速度が大きな領域において周期的な誤差が生じている。次に、起電力の極大値／極小値の絶対値の履歴を、Fig.15及び16に示す。ここで、起電力が極大／極小となる時刻は、起電力が0から0になるまでの中心時刻とほぼ一致するため、同一時刻における速度と起電力の比を得ることが可能である。すなわち、マグネットがコイルの節に位置するときの、式(3)の $CS(z)$が得られる。性

質(iii)で述べたように、この値の絶対値は一定となるはずである。そこで、起電力の絶対値を速度で除した値、すなわち $CS(z)$の絶対値を Fig.17及び18にプロットする。その結果は、性質(iii)を反映してほぼ一定の値をとっている。ここで、同じhに対するデータの中で、速度が大きな領域において右下がりの傾向が見られるのは、Fig.13及び14に現れた周期的な誤差による影響だと解釈できる。すなわち、本来一定値となるべきところが、速度で除しているために、速度が過小評価された場合は大きい側に、過大評価された場合は小さい側に値が散らばると考えられる。なお、ここで示した単位速度当たりの起電力を、以後、水塊速度計の感度と呼ぶことにする。今回試験に用いた2体の速度計に関する平均値は約21.9mV/(m/s)であったが、これらと同一ロットで製作した速度計については、この感度を適用して、起電力の振幅から水塊速度を直接算出することが可能だと考えられる。

なお、今回の特性試験では、マグネットとシャフトの間に空気が存在していたのに対し、NSRR 実験では、そこに冷却水が入り込むと予想される。つまり、透磁率の条件が変わり、上で得た感度も変わる可能性がある。しかし、空気及び水の透磁率の違いは十分小さいため(温度20℃での比透磁率、空気:1.000303、水:0.999991)[6]、計測誤差以上の影響を及ぼすとは考えられない。

4. データ処理

既に前章でも述べたように、水塊速度計の出力信号から速度履歴を得るための基本原理は、速度計の性質(ii)及び(iii)に基づいている。すなわち、以下に示す2通りの手法が可能である。

① 振動数に基づく手法

$v = p / \tau$

p: コイル反転の半周期(Fig.6参照)。

τ: 起電力が0から再び0になるまでの時間。

v: 移動速度。時間幅τにおける平均速度。

② 振幅に基づく手法

出力信号の値を水塊速度計の感度で除した値の絶対値をとり、極大値をつ

ないだ曲線を描く。

これまでの NSRR 実験では、実験前の較正試験が不要で、且つデータ収録時のアンプゲインに依存しない①の手法が採られてきた。以下に、①の手法による NSRR 実験データ処理手順を示す。(Fig.19)

1) NSRR 実験過渡データのうち、水塊速度計出力履歴を準備。このとき、サンプル速度(データの時間解像度)は十分高いものとする。
2) 水塊静止時の起電力を基準として、0レベルを較正。
3) 起電力が0となる時刻を検出。$t_1, t_2, \cdots$
   ただし、データは離散化されているため、起電力がちょうど0になるデータ点はほとんど存在しない。そこで、Fig.20に示す線形内挿により、起電力が0になる時刻を近似的に得る。
4) 各時刻の間隔を計算。$\tau_n = t_{n+1} - t_n$ ただし、$n > 0$
5) 各時刻の中点を計算。$t'_n = (t_n + t_{n+1}) / 2$ ただし、$n > 0$
6) 各時刻間の平均速度 v を、各時刻の中点の速度として計算。$v(t'_n) = p / \tau_n$
   ここで、p はコイル反転の半周期である。
7) 水塊の上昇距離 z を計算。$z(t'_n) = z(t'_{n-1}) + p$ ただし、$n > 1$
   ここで、水塊上昇開始時刻におけるコイルとマグネットの相対位置を正確に得ることが困難であるため、便宜的に $z(t'_1) = p$ とする。よって、上式で得られる上昇距離には $\pm p/2$ 程度の誤差が含まれる。

振動数に基づく手法①が水塊速度及び水塊上昇距離を精密に調べるために有効であるのに対し、速度履歴を直感的に把握するためには振幅に基づく手法②が適している。Figure 21に、手法①及び②で求めた速度履歴を重ねて示す。0.3から0.33秒までは、起電力の振幅がデータ収録装置の入力レンジを超えたためにカットされているが、それ以後は手法①の結果と良く一致した速度履歴が得られている。この履歴を得るための演算は単なる除算であり、計測時にリアルタイムで数値化することが可能である。ただしその場合、データ収録装置の入力レンジを超えないようにアンプゲインを調整する必要がある。

①及び②の手法は、いずれも、水塊移動の方向を特定することができないという欠点を持つ。しかし、水塊が最初から下向きに移動することは考えにくいこと、運動の方

向が変わる場合には必ず速度0すなわち起電力0を経由すること、また、最終的に水塊が静止する時点では上昇距離が0に戻ること、などを考慮することにより、水塊速度の向きを推定することが可能である。

5. まとめ

NSRR 実験において燃料破損時の機械的エネルギ発生量計測のために用いている水塊速度計に関して、

(i) マグネットの移動速度が0の場合、起電力も0である。

という自明な性質に加え、以下の性質を、解析及び特性試験を通して明らかにした。

(ii) マグネットがコイルの腹に位置するとき、起電力は移動速度に関係なく0となる。よって、起電力が0から再び0になるまでの時間は、マグネットがコイル反転の半周期分移動するために要した時間を意味する。従って、半周期の長さが既知であれば、その区間における平均速度を得ることができる。

(iii) マグネットがコイルの節に位置するとき、起電力は極大値あるいは極小値をとる。また、その絶対値はマグネット移動速度のみに比例するため、起電力履歴の包絡線は移動速度(の絶対値)の履歴を表す。

(iv) コイルの両端付近では、(ii)及び(iii)が成立しない。よって、計測においては両端付近の使用を避けるべきである。

上記のうち、性質(iii)及び(iv)に関してはこれまで重要視されていなかったが、今回の解析結果より、特に性質(iv)については十分注意を払う必要があることを示した。さらに、性質(iii)に関連して、照射済燃料実験用に設計・製作された水塊速度計の感度を実験的に評価した。これにより、起電力履歴から速度履歴を直接求めることが可能となった。

謝辞

NSRR実験における計装開発、実験準備、実施及びデータ収録は、NSRR管理室により行われています。本報告にあたり、深い感謝の意を示します。また、水塊速度計特性試験に関しては助川電気工業(株)のご協力を得たことを記し、感謝いたします。最後に、速度計解析のヒントを与えて下さった原子燃料工業(株) 土内義浩氏、及びNSRR実験の計装開発に従事し続け平成10年9月で原研を退職された山崎利氏に感謝の意を示します。

参考文献

(1) Ishikawa, M. and Shiozawa, S., "A Study of Fuel Behavior Under Reactivity Initiated Accident Conditions Review", J. Nuclear Materials, Vol.95, Nos.1&2, pp.130, 1980

(2) 原子力安全委員会安全審査指針集, 大成出版, 1999

(3) Sugiyama, T. and Fuketa, T., "Mechanical Energy Generation during High Burnup Fuel Failure under Reactivity Initiated Accident Conditions", J. Nuclear Science and Technology, Vol.37, No.10, 2000

(4) 床井博見, 岩田耕司, 星蔦雄, "反応度事故に伴う破壊エネルギー発生機構の研究 ー炉外可視実験報告ー", JAERI-M 9840, 1981

(5) 小口武彦編, 物理B(電磁気学), 槇書店, 1984

(6) 理科年表 2000年版, 国立天文台編, 2000

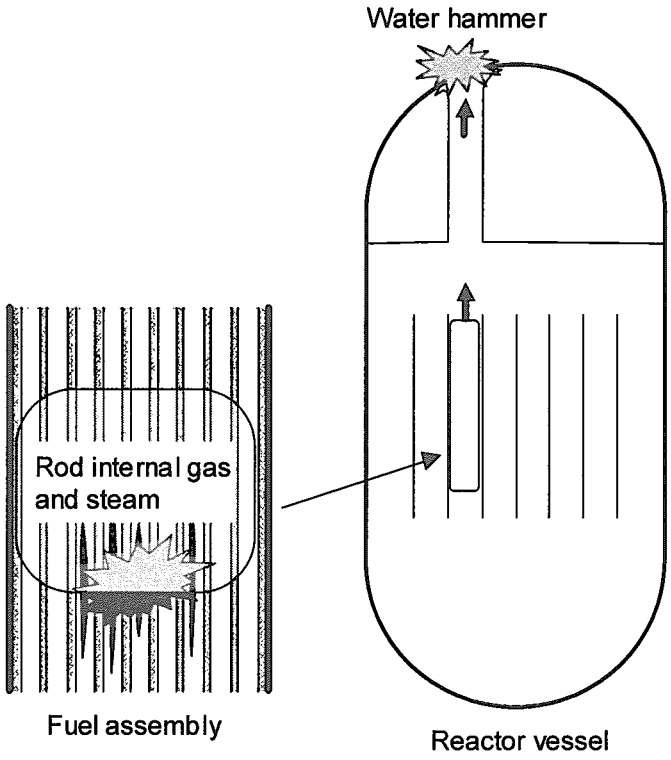


Figure 1 Mechanical energy generation in reactor vessel

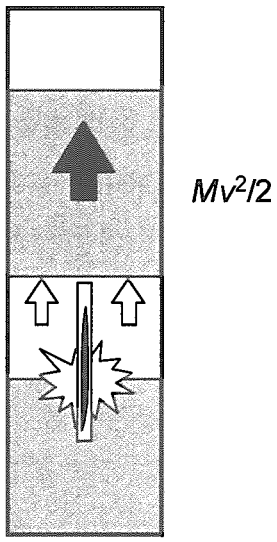


Figure 2 Measurement of mechanical energy in NSRR experiments

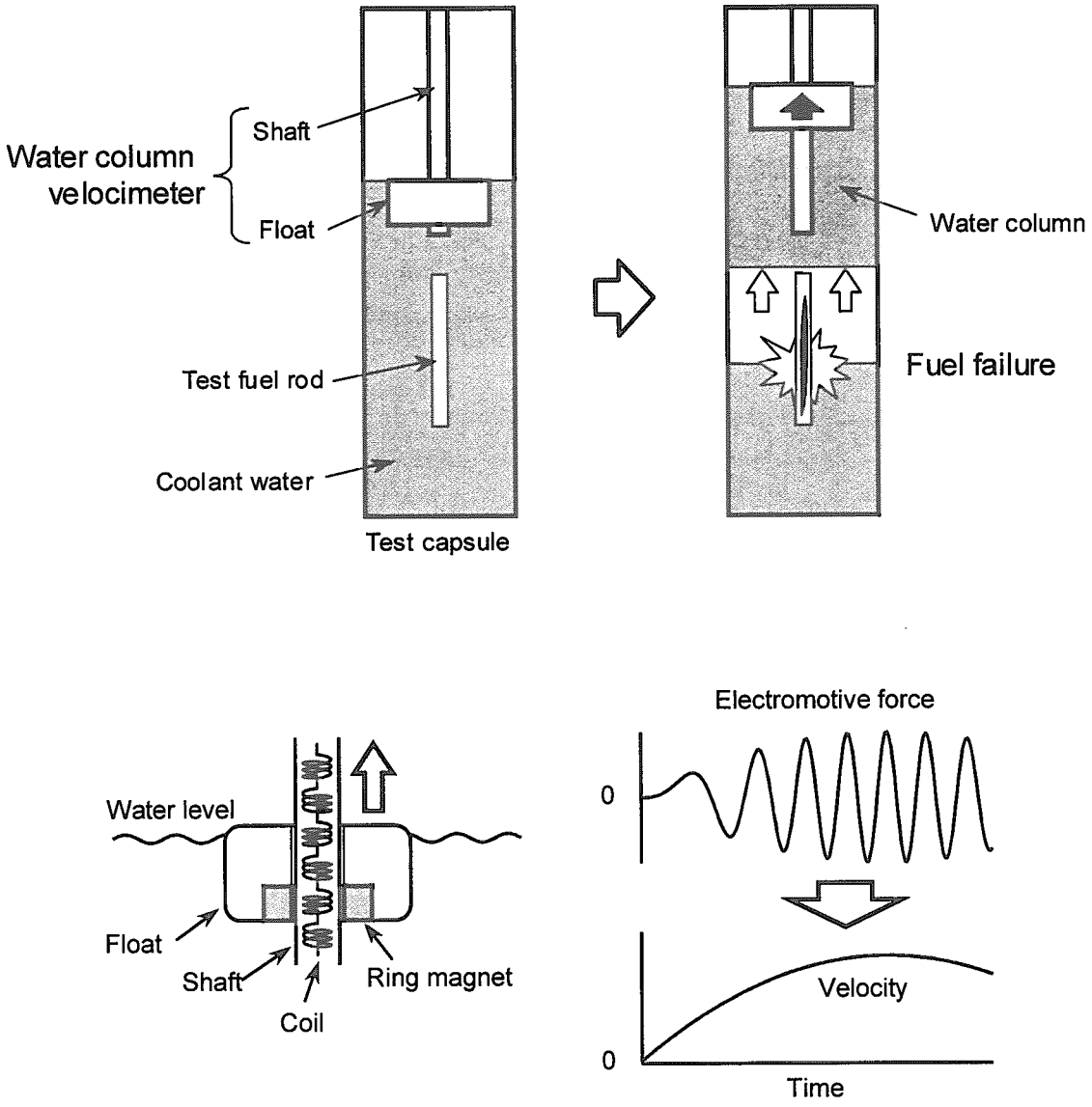
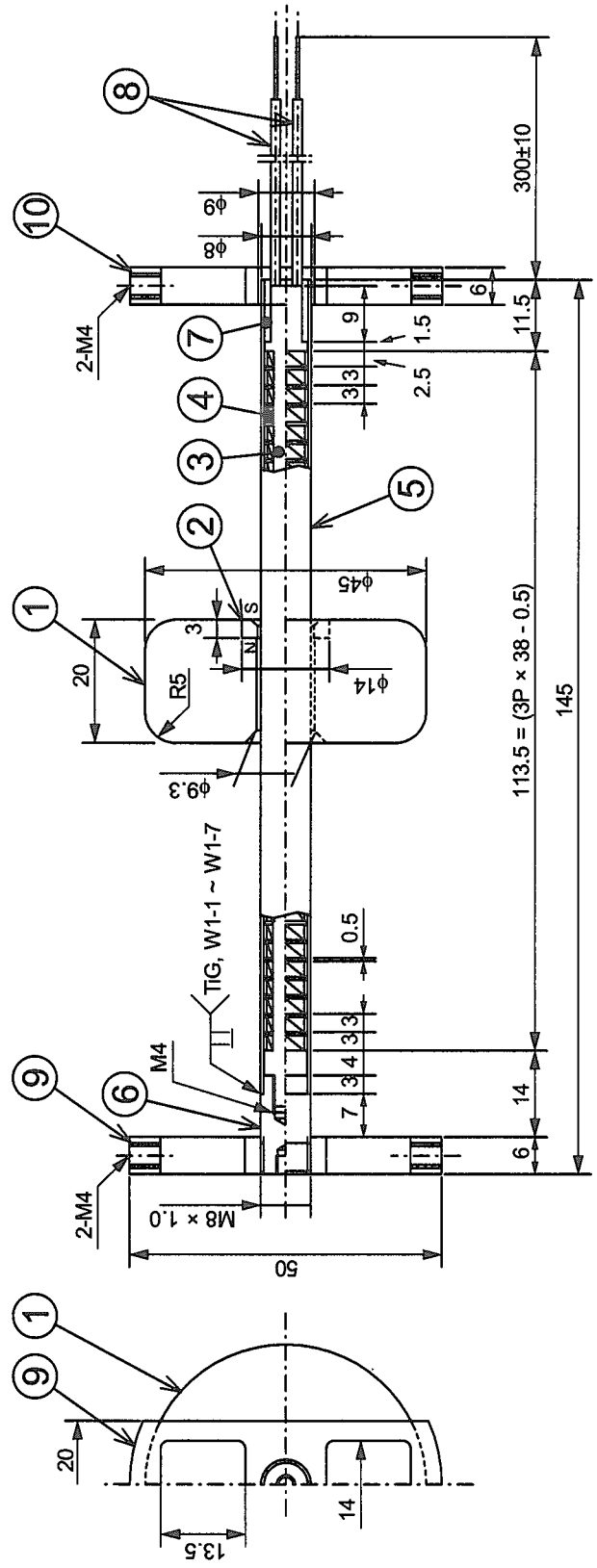
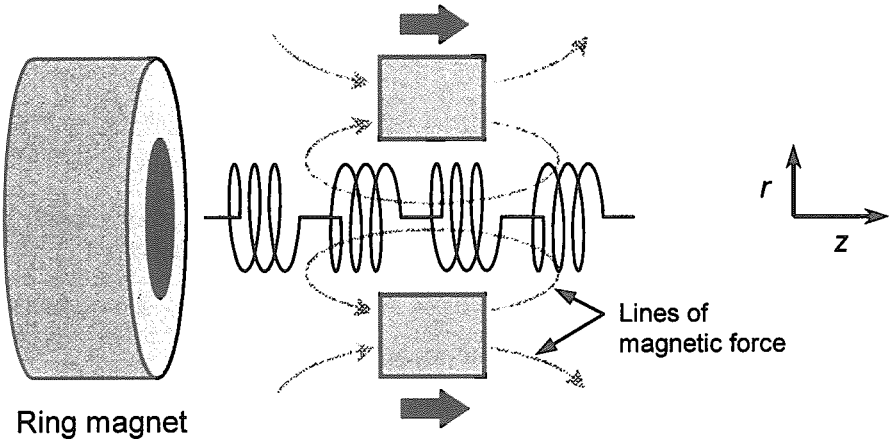


Figure 3 Concept of water column velocity measurement

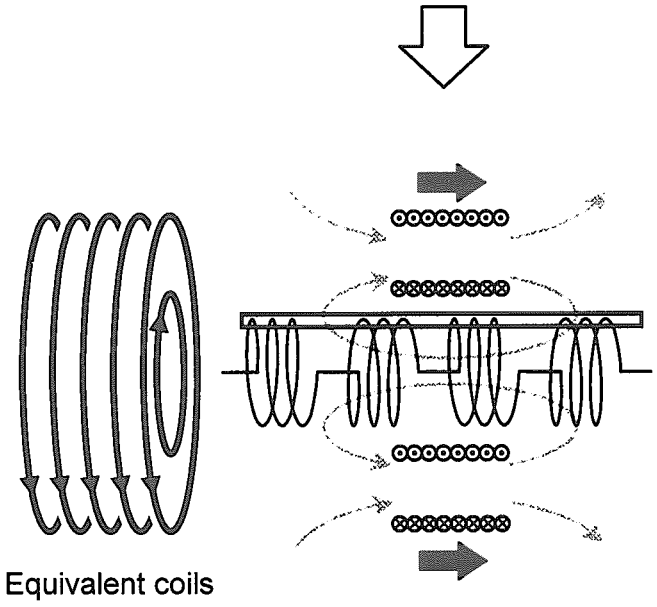


No.	Name	Material
10	Upper support	SUS304
9	Lower support	SUS304
8	Lead wire	Copper
7	Filler	Epoxy resin
6	End plug	SUS304
5	Sheath	SUS304TP-S
4	Coil wire	Copper
3	Coil reel	Polyacetal
2	Ring magnet	Ferrite
1	Float	Synthetic resin

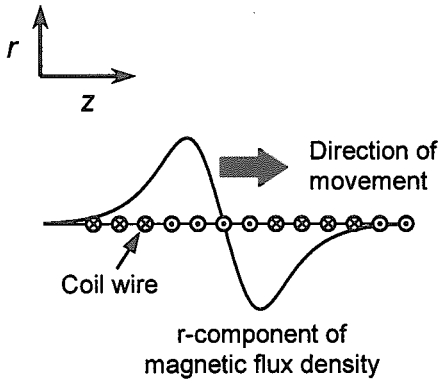
Figure 4 Design of water column velocimeter for burnup fuel experiment



(a) Magnetic flux generated by ring magnet



(b) Magnetic flux generated by equivalent coils



(c) Model for ring magnet

Figure 5 Modeling of water column velocimeter - Ring magnet -

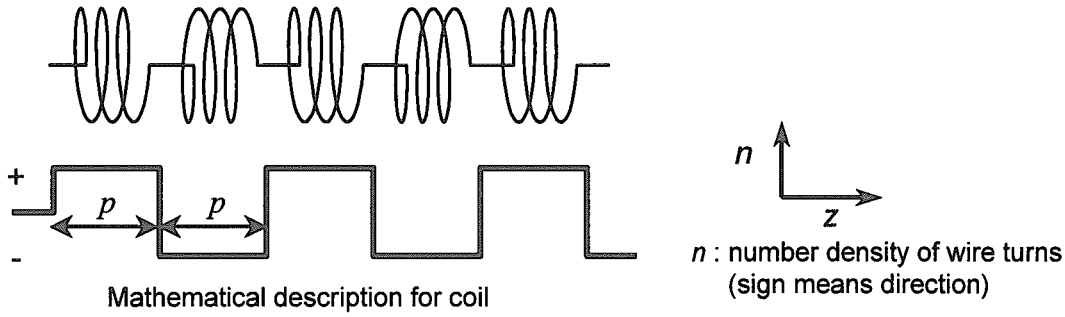


Figure 6 Modeling of water column velocimeter - Center coil -

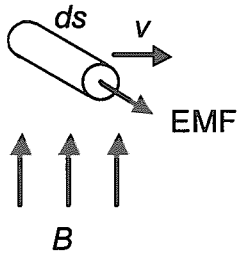


Figure 7
Electromotive force in coil element *ds*

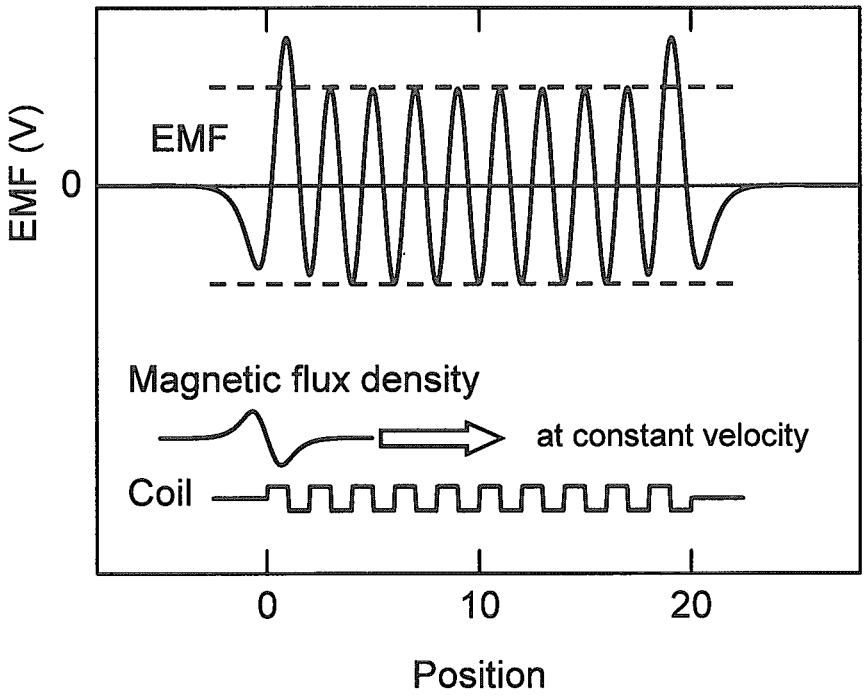
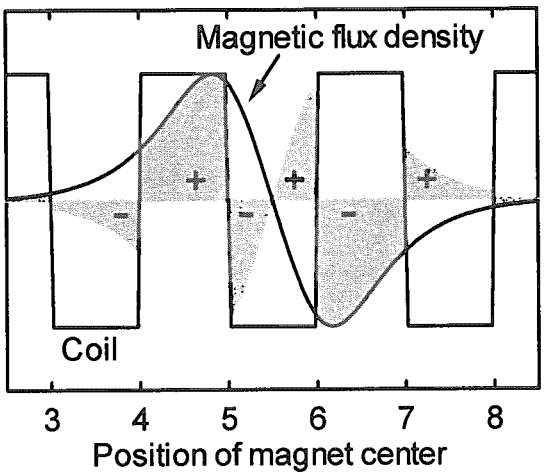
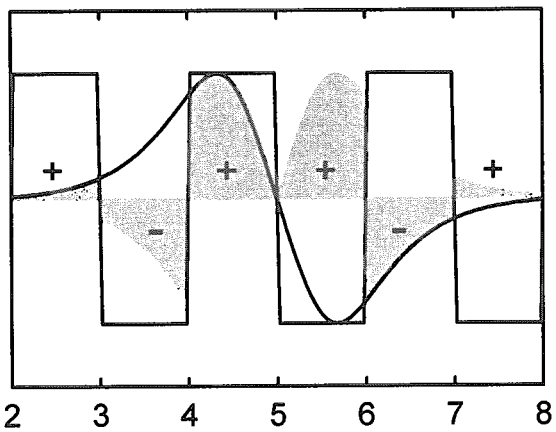


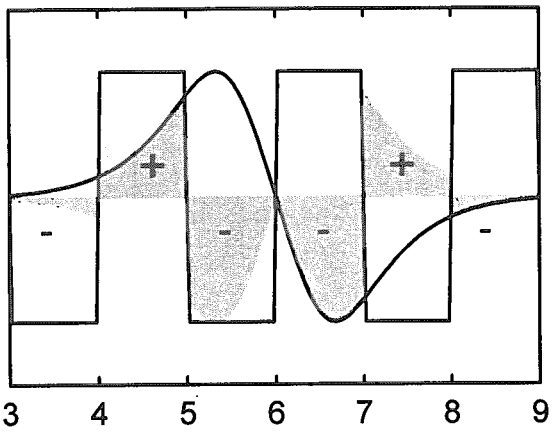
Figure 8 Electromotive force due to moving magnet at constant velocity



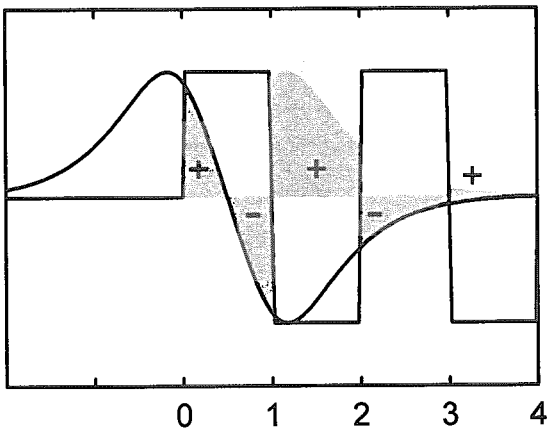
(a) EMF is canceled



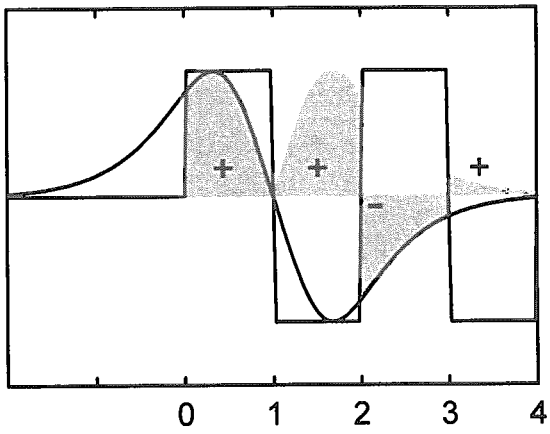
(b) EMF has a local maximum



(c) EMF has a local minimum



(d) Not canceled



(e) Greater than case (b)

Figure 9 Relation between magnet position and electromotive force

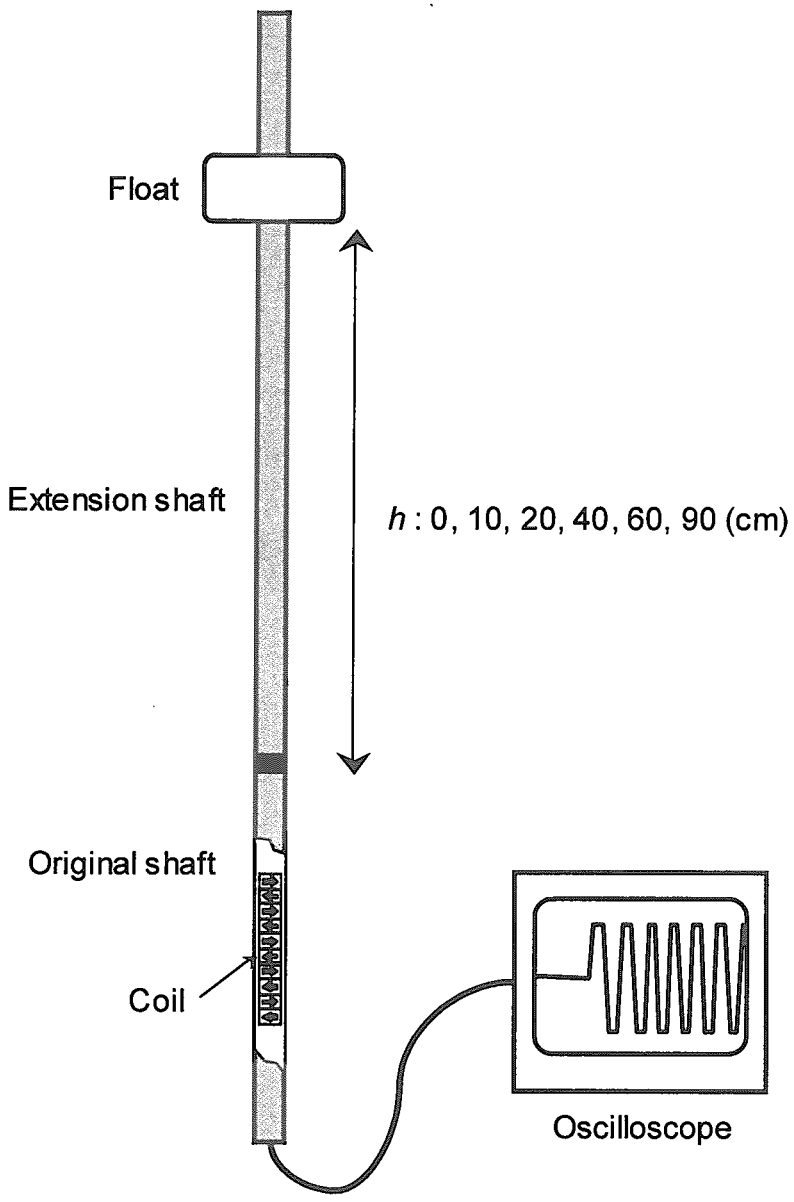


Figure 10 Schematic of characteristic test

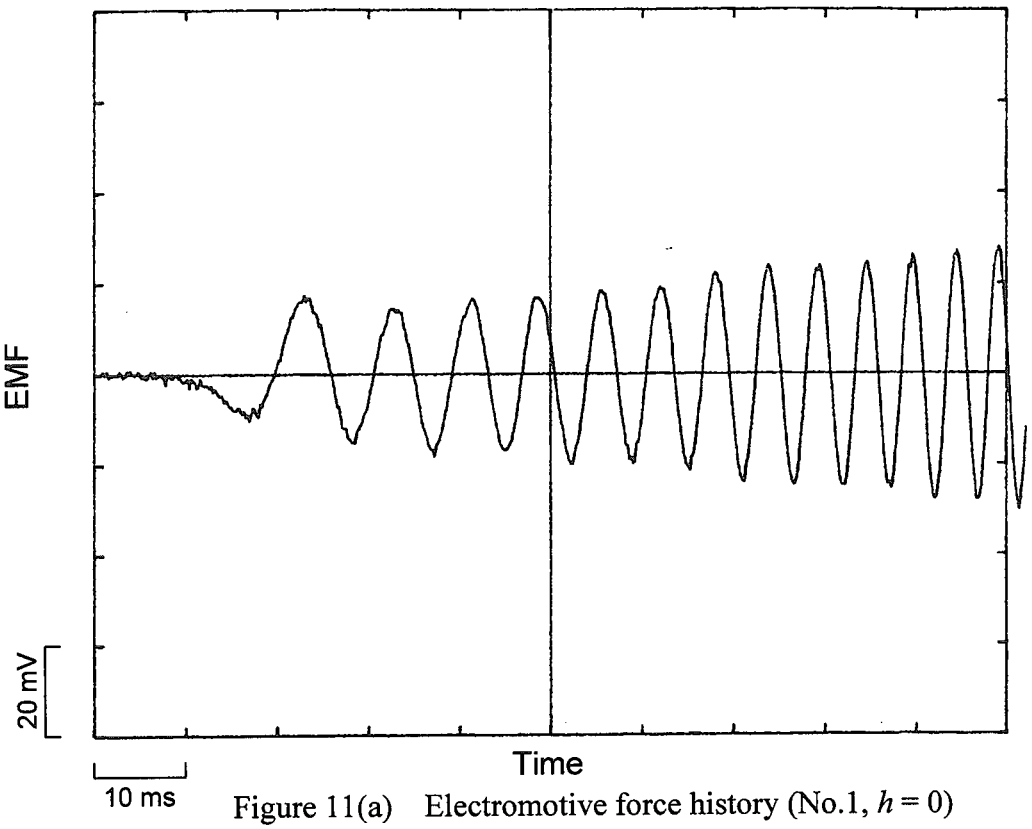


Figure 11(a) Electromotive force history (No.1, $h = 0$)

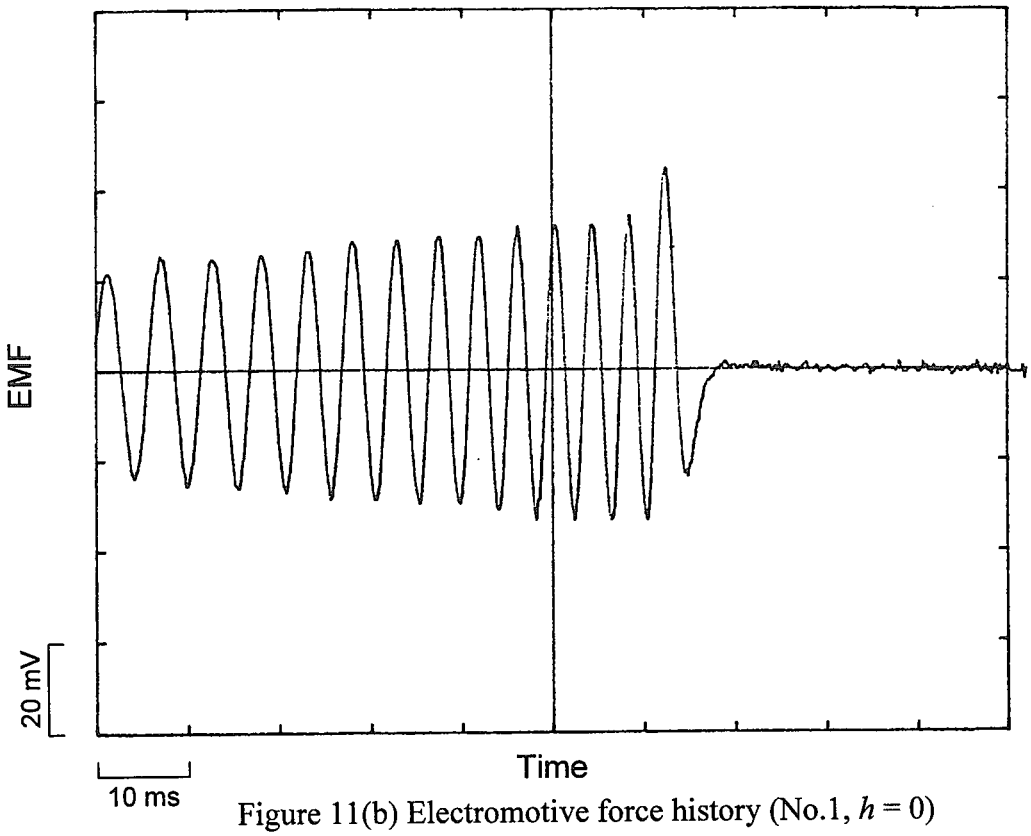


Figure 11(b) Electromotive force history (No.1, $h = 0$)

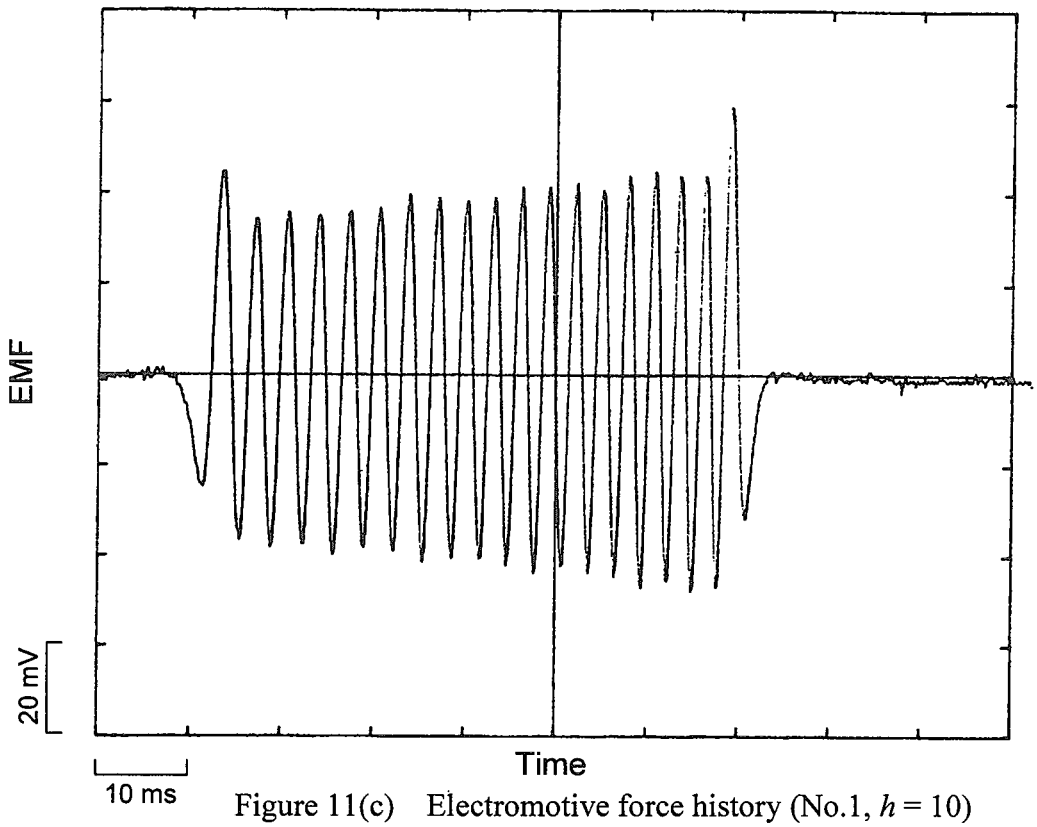


Figure 11(c) Electromotive force history (No.1, $h = 10$)

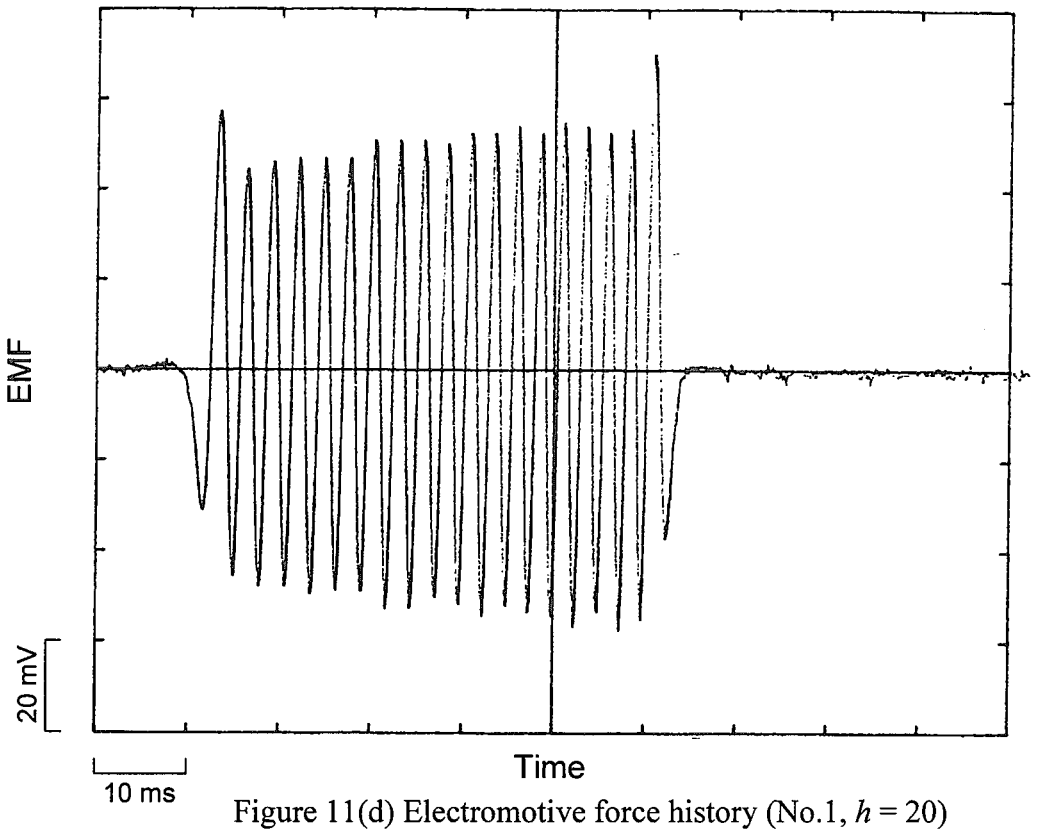


Figure 11(d) Electromotive force history (No.1, $h = 20$)

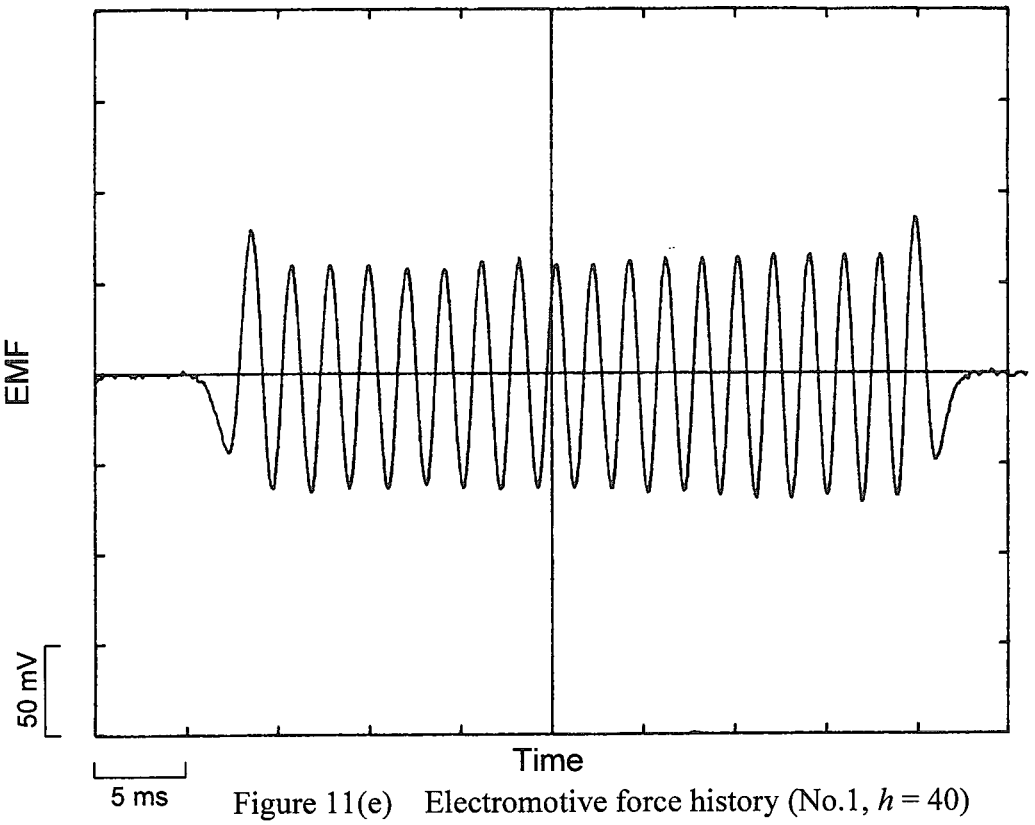


Figure 11(e) Electromotive force history (No.1, $h = 40$)

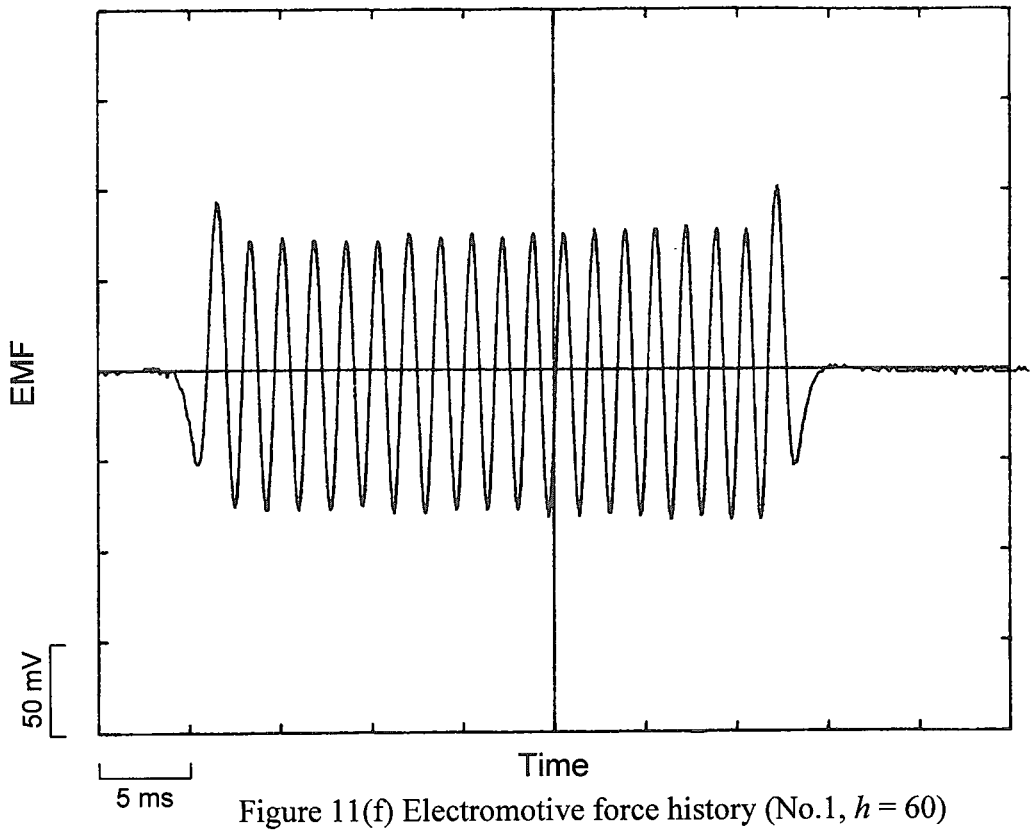


Figure 11(f) Electromotive force history (No.1, $h = 60$)

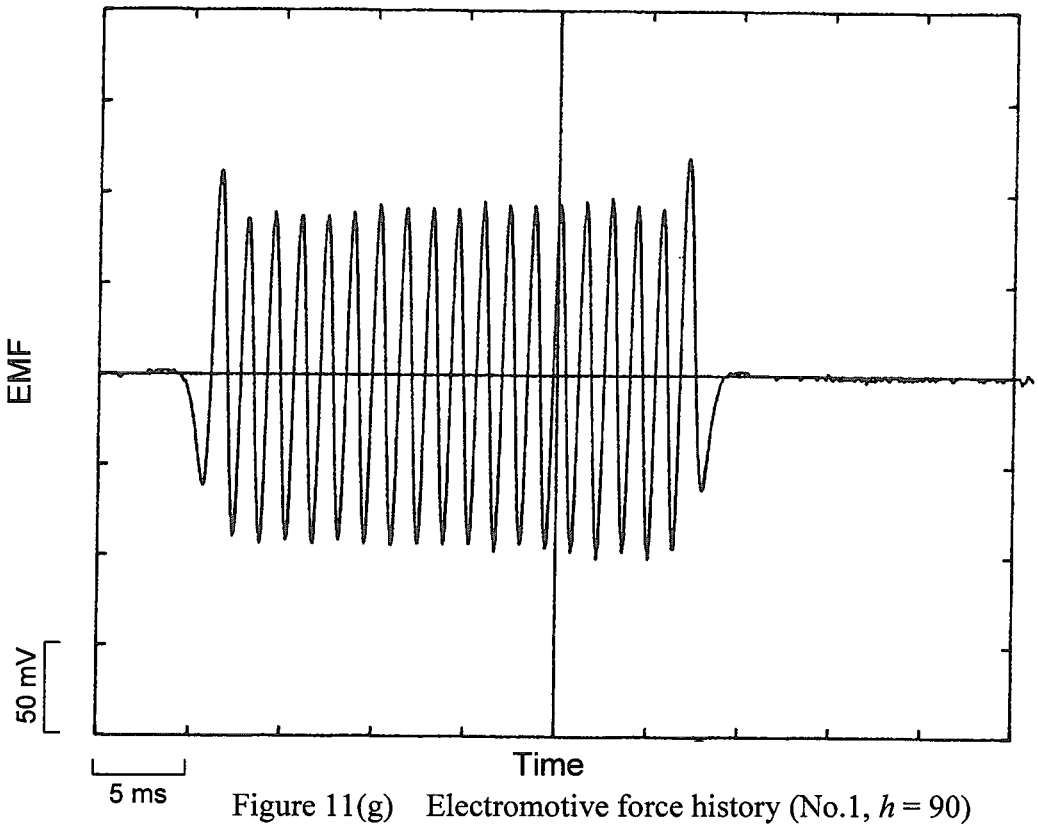


Figure 11(g) Electromotive force history (No.1, $h = 90$)

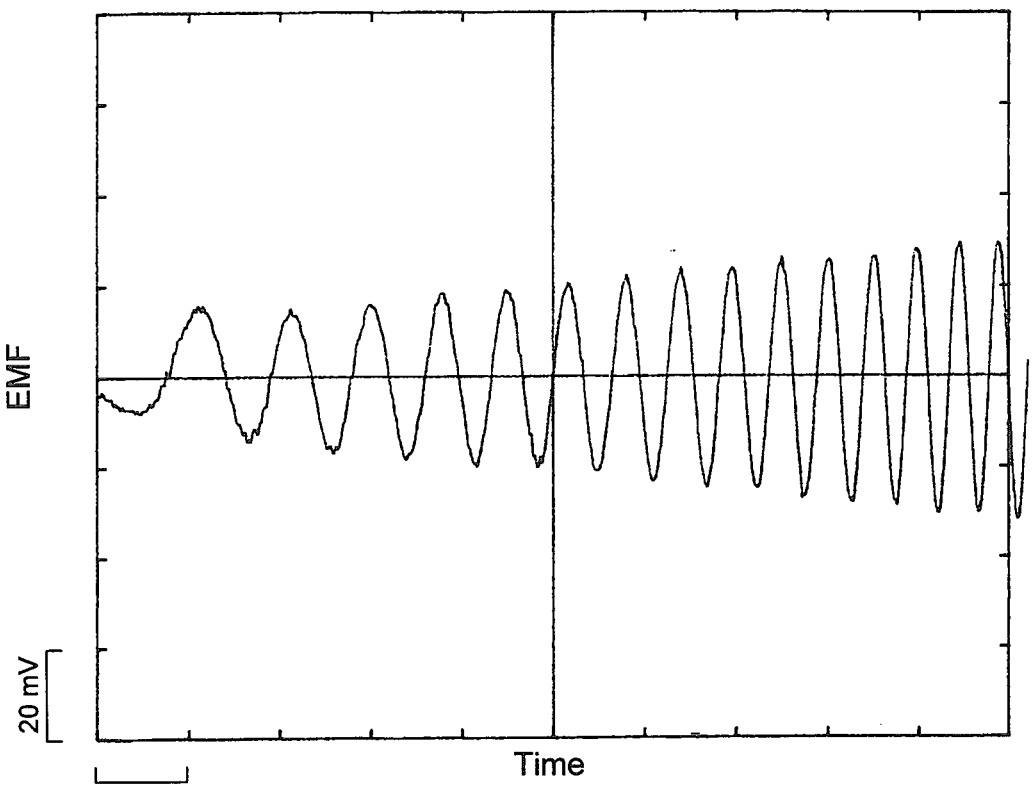


Figure 12(a) Electromotive force history (No.2, $h = 0$)

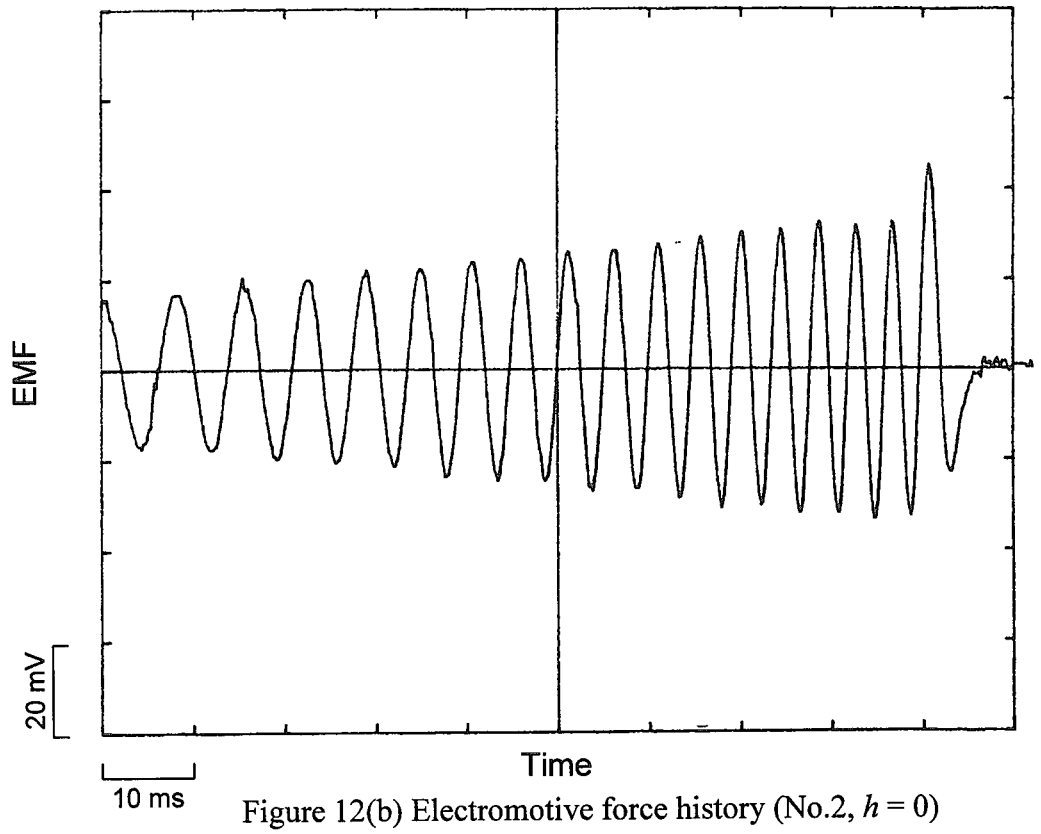


Figure 12(b) Electromotive force history (No.2, $h = 0$)

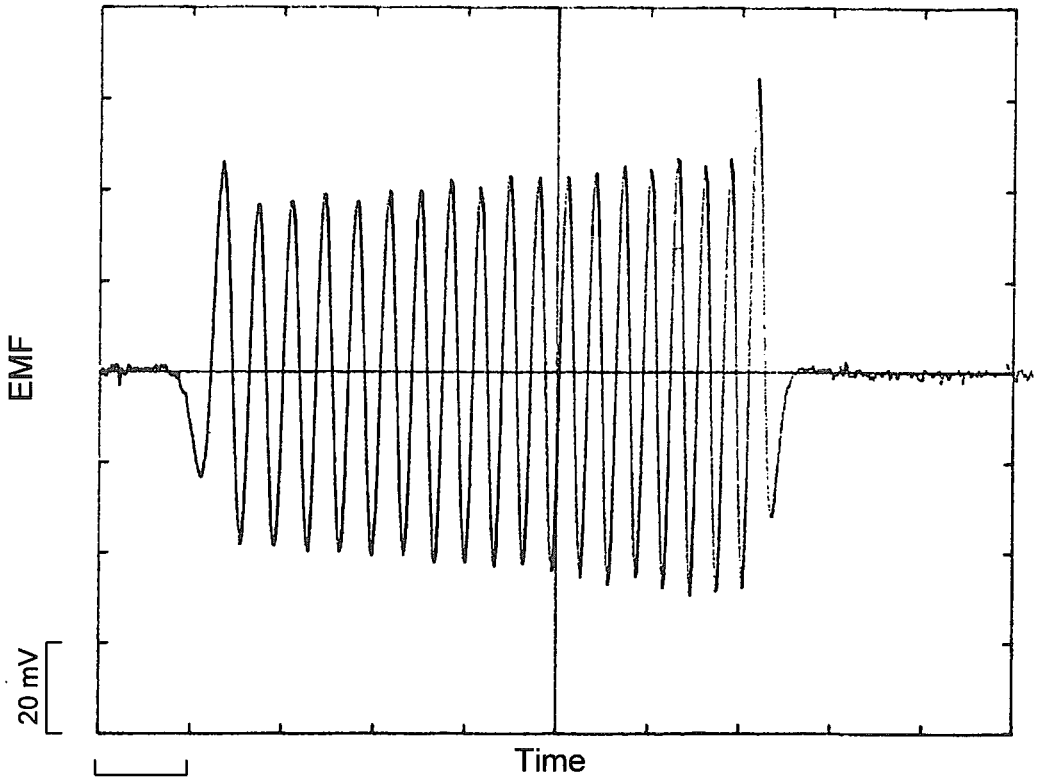


Figure 12(c) Electromotive force history (No.2, $h = 10$)

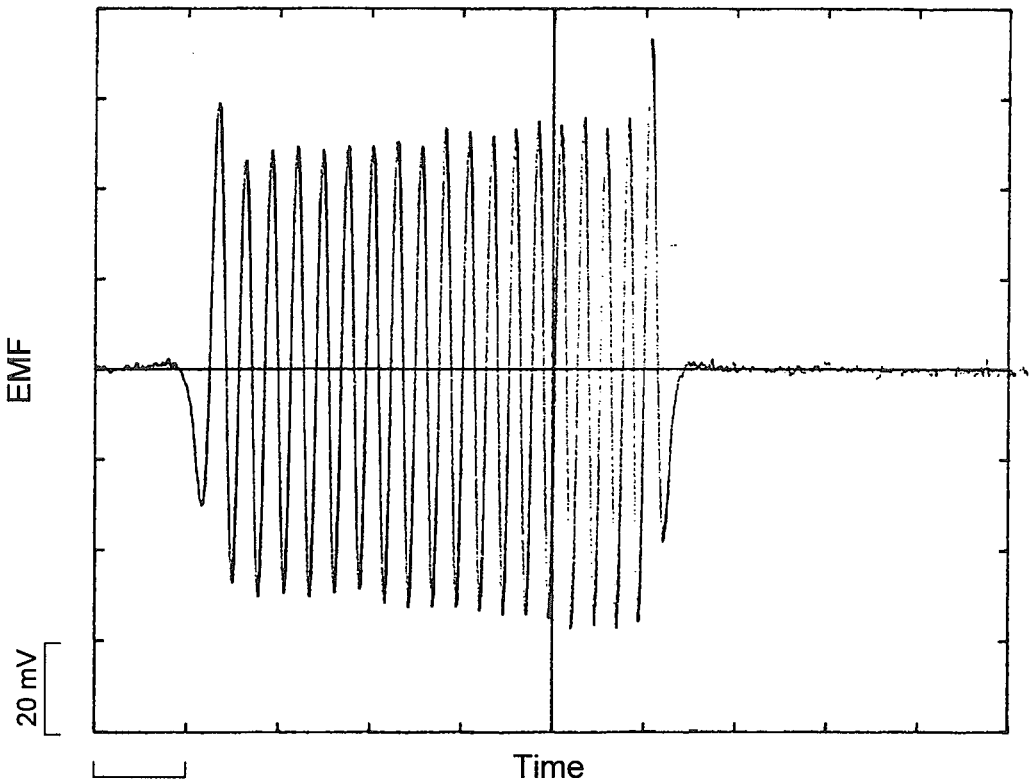


Figure 12(d) Electromotive force history (No.2, $h = 20$)

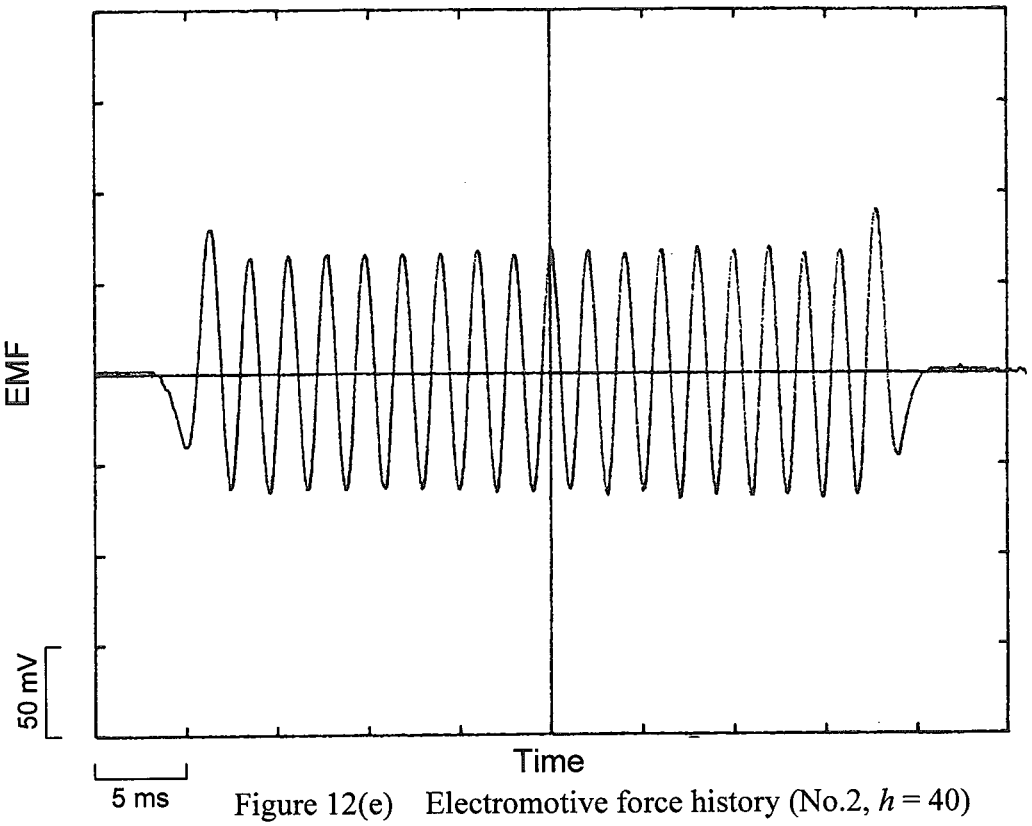


Figure 12(e) Electromotive force history (No.2, $h = 40$)

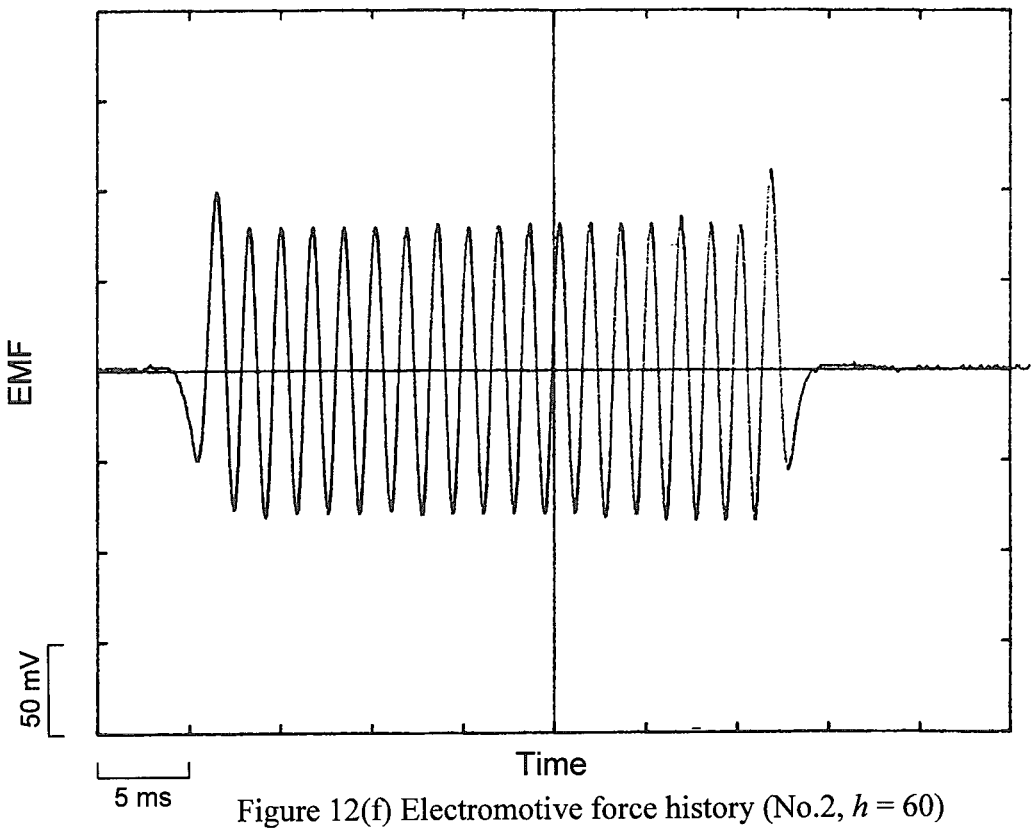


Figure 12(f) Electromotive force history (No.2, $h = 60$)

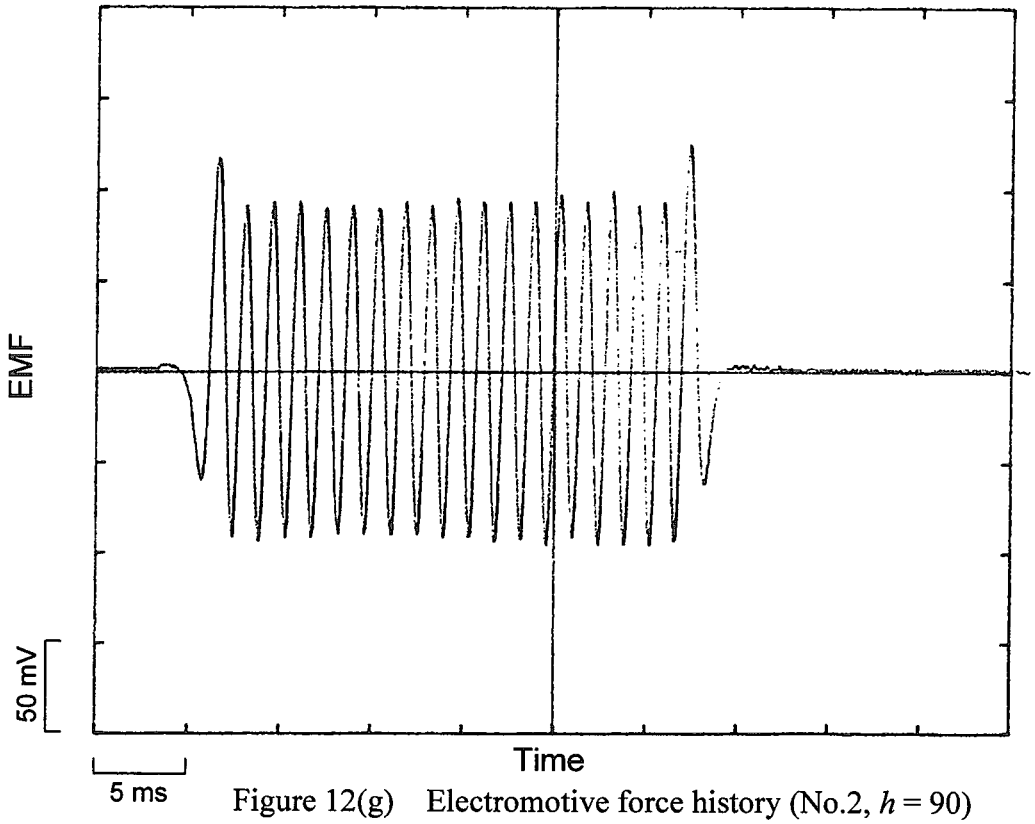


Figure 12(g) Electromotive force history (No.2, $h = 90$)

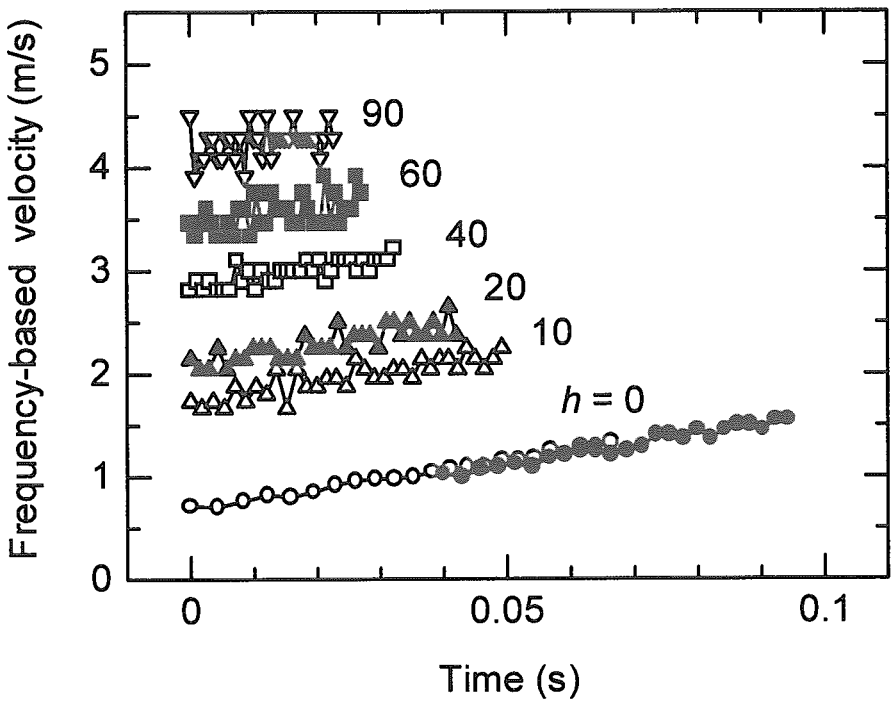


Figure 13 Frequency-based velocity (velocimeter No.1)

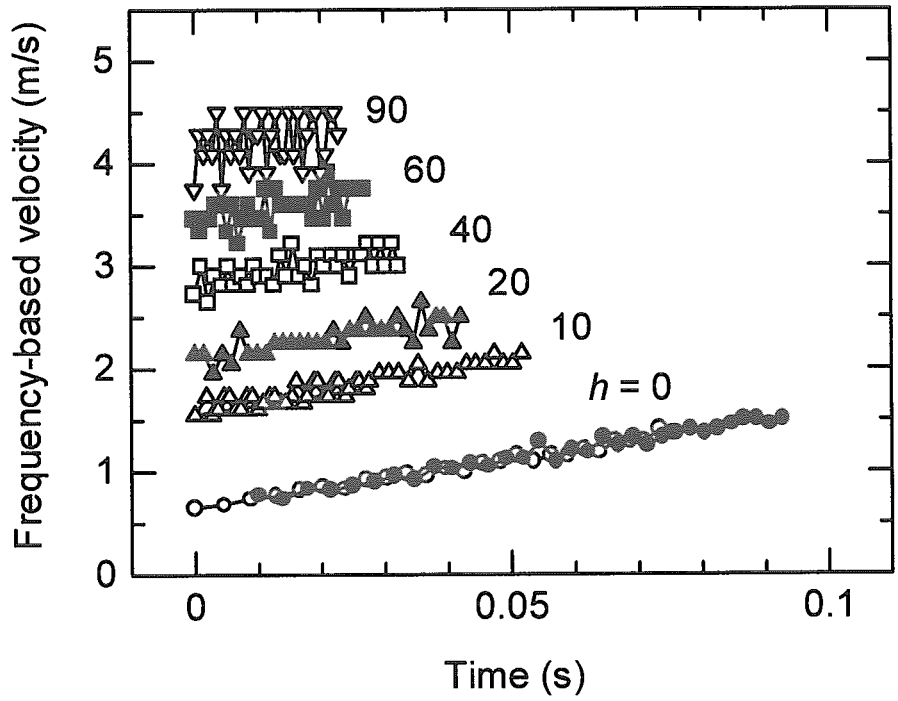


Figure 14 Frequency-based velocity (velocimeter No.2)

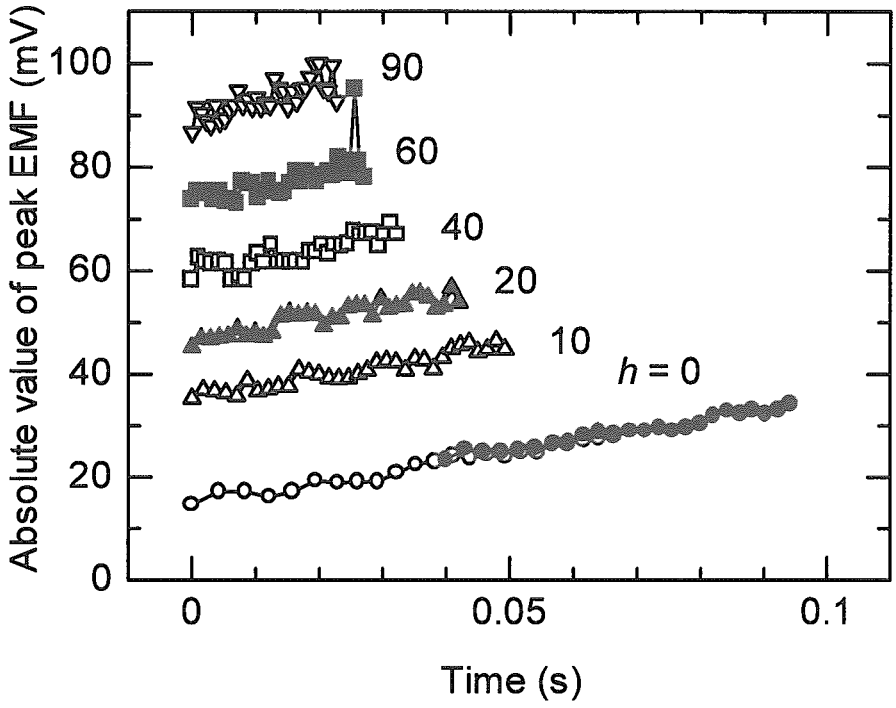


Figure 15 Amplitude of electromotive force (velocimeter No.1)

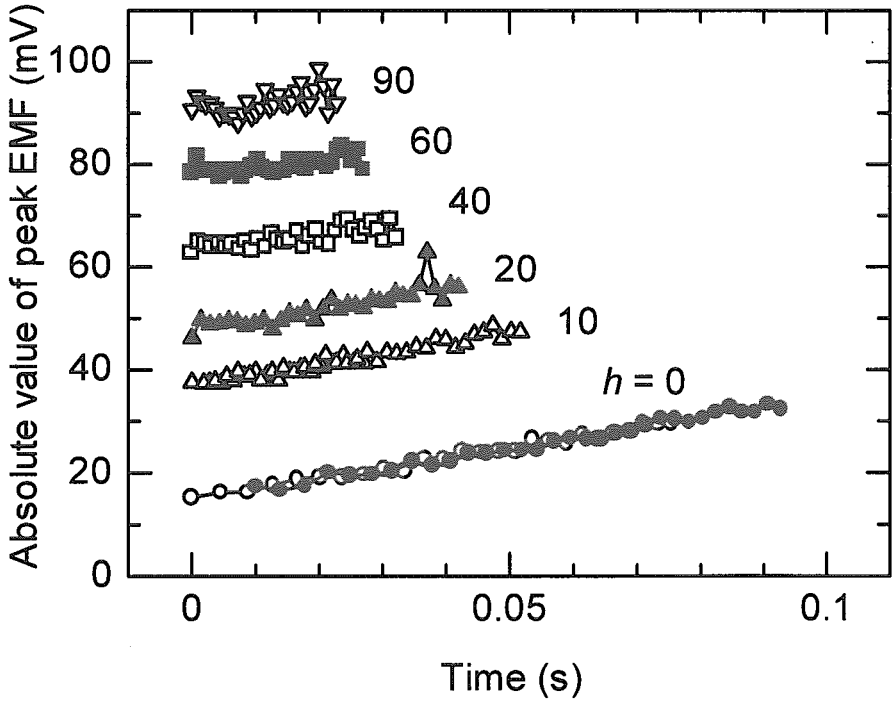


Figure 16 Amplitude of electromotive force (velocimeter No.2)

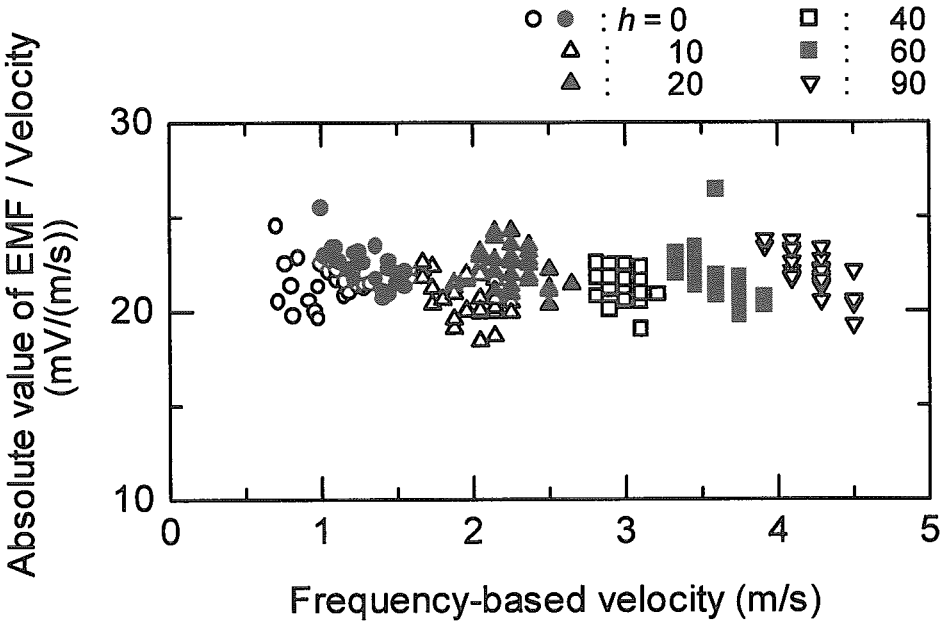


Figure 17 Sensitivity of velocimeter No.1

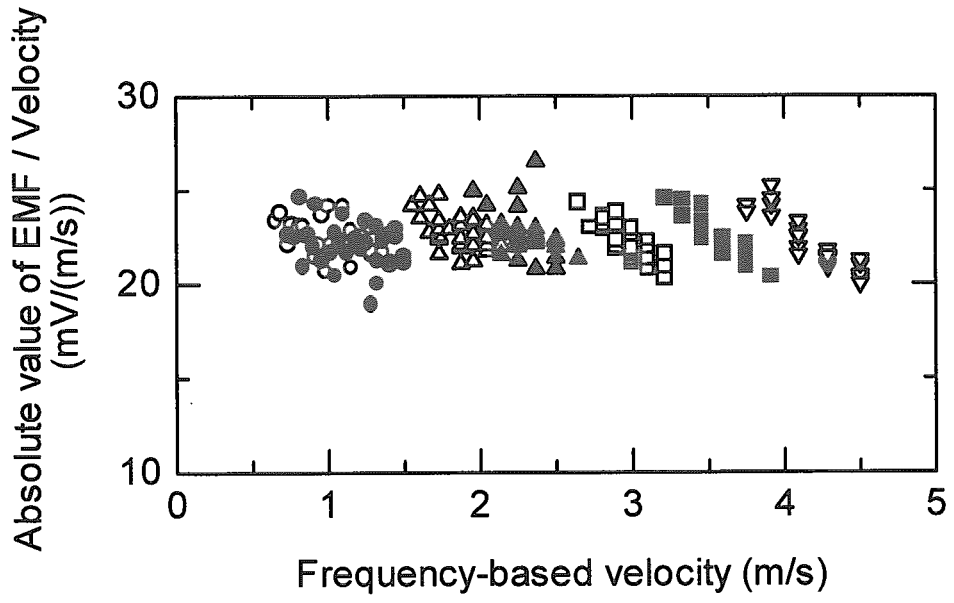


Figure 18 Sensitivity of velocimeter No.2

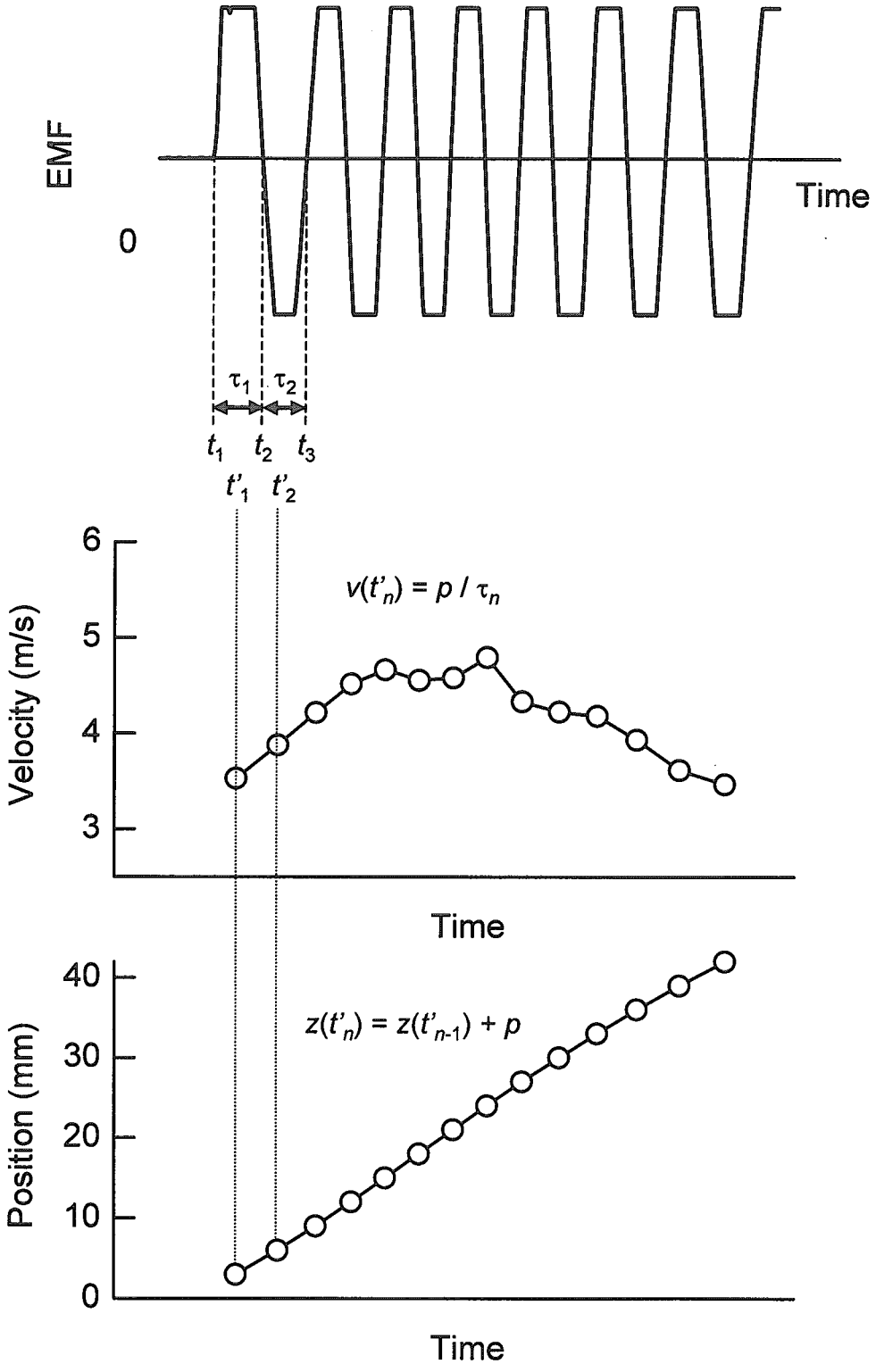


Figure 19 Procedure of frequency-based method

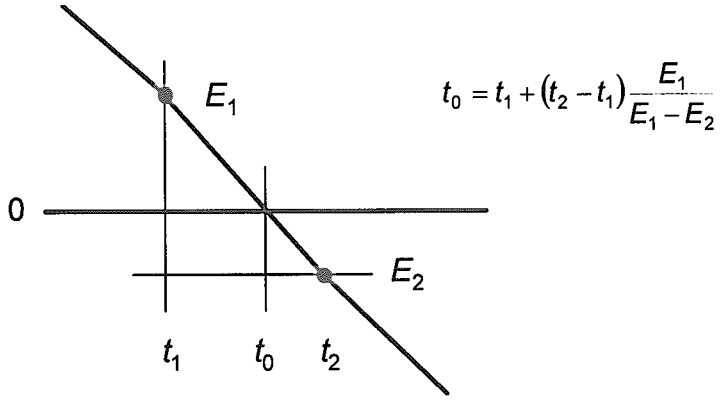


Figure 20 Determination of zero-crossing time

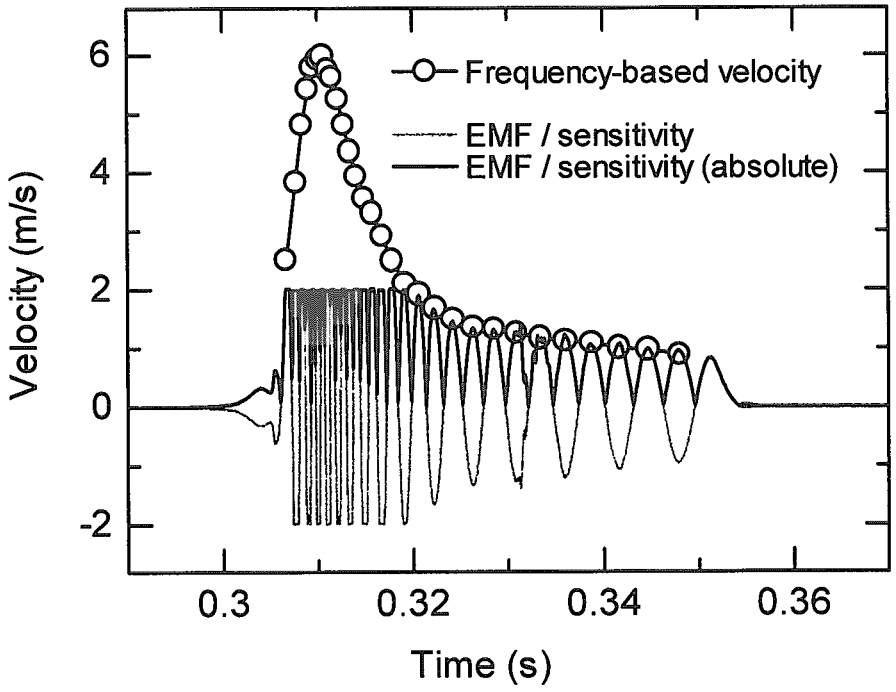


Figure 21 Comparison between frequency-based and amplitude-based results

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1　SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2　SIと併用される単位

名称	記号
分，時，日	min，h，d
度，分，秒	°，′，″
リットル	l，L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10^{-19} J

1 u=1.66054×10^{-27} kg

表3　固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	m·kg/s^2
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N·m
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	A·s
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4　SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1 nm=10^{-10} m

1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2

1 bar=0.1 MPa=10^5 Pa

1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2

1 Ci=3.7×10^{10} Bq

1 R=2.58×10^{-4} C/kg

1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy

1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv

表5　SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

（注）

1. 表1－5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局 1985年刊行による。ただし，1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
2. 表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
3. barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
4. EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10^5 dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度　1 Pa·s(N·s/m^2)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　1 m^2/s=10^4 St(ストークス)(cm^2/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10^7 erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal=4.18605 J(計量法)

=4.184 J　(熱化学)

=4.1855 J　(15 °C)

=4.1868 J(国際蒸気表)

仕事率　1 PS(仏馬力)

=75 kgf·m/s

=735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

NSRR実験用水塊速度計－特性及びデータ処理方法－