自動分析装置用圧電バイモルフ攪拌子の開発

学生員 大 屋 英 郎 (東京農工大学, (株)東芝)
 非会員 六 川 玖 治 ((株)東芝, 現(株)ジーンケア研究所)
 非会員 井 上 守 人 ((株)東芝)
 非会員 坂 口 総一郎 ((株)東芝)
 正 員 山 田 晃 (東京農工大学)

Development of Piezoelectric-Bimorph-Stirrer for the Automatic Analyzer

Hideo Oya, Student Member (Tokyo University of Agriculture and Technology, Toshiba Corp.), Kyuji Rokugawa, Non-member (Toshiba Corp., GeneCare Corp. (Incumbent)), Morito Inoue, Non-member, Soichiro Sakaguchi, Non-member (Toshiba Corp.), Akira Yamada, Member (Tokyo University of Agriculture and Technology)

We developed a piezoelectric bimorph stirrer for the use of the automatic analyzer where the blood serum filled in a small cuvette could be mixed with reagent in a few second of time. The special feature innovated in the present method is that the stirring blade was vibrated with a mode at semi-2nd resonant frequency, which came into existence by attaching a weight in the middle of stirring bar. The node point of the semi-2nd vibration mode was adjusted at optimum location by changing the amount of weight to get a maximum stirring capability. Use of semi-2nd vibration mode has a advantage that it generates liquid flows in a cuvette toward up and down direction. As a result, unwanted generation of air bubble was avoided, since the solution was mixed with smaller force than before. At the end of this paper, the successful results of the operational suitability test were shown.

キーワード：圧電バイモルフ, 圧電攪拌子, 医用機器, 自動分析装置, 攪拌, 混合

Keywords: Piezoelectric bimorph, Piezoelectric stirrer, Medical equipment, Medical automatic analyzer, Stirring, Mixing

1. はじめに

自動分析装置は、多サンプル、多項目の血清成分を自動的に定量測定するための装置であり、今日臨床検査において一般的に広く用いられている。それは、血清検体サンプルに試薬を注入、攪拌した後、反応溶液を光学的に比色測定することによって行われる^{(1)~(3)}。その際、できるだけ短い時間内に溶液を均一に攪拌する必要がある、そのための有効な攪拌手段の確立が装置の性能を左右する。分析装置に用いられる反応容器は数百 μl の小さな長方形容器であり、この微小容器内で溶液を効率よく攪拌するための方式が種々検討されてきた。攪拌棒をモータで回転させる攪拌法が最も一般的である。あるいは、容器内にマグネットを挿入し外部から与えた回転磁界によって回転させる方法も考えられる。しかし、これらの回転式の攪拌法では、回転数を上げて攪拌力を増強しても、①泡が発生して溶液が逆に混ざりにくくなってしまい、②容器底部で水平方向に層

流を形成してしまい、攪拌子の長さ方向、つまり反応容器の上下方向に攪拌されにくくなる、などの問題を引き起こす。このため、比較的弱い駆動力で長時間攪拌せざるを得ない状況にあった。ところで、流体搬送を目的とした圧電アクチュエータの応用は、近年圧電ポンプや圧電ファンなどの用途^{(4)~(6)}に拡がりをみせている。こうした研究の流れに沿って、圧電バイモルフを用いた攪拌法が本研究より以前に提案されていた⁽⁷⁾。この方式は、容器の形状に合せたブレードを圧電駆動により基本モードで屈曲振動させて溶液を攪拌する。この場合、モータ回転方式に比べて縦長の微小容器内の溶液を上下方向（ブレードの長さ方向）に効率よく攪拌できる利点があるため、上記①、②の問題がかなり解消できることが期待される。その一方で、攪拌時間を少しでも短縮するために大振幅で振動させる必要があるが、その場合反応容器にブレードが衝突してしまう、長期にわたって使用すると圧電板とブレード接合部が損傷する、という圧電バイモルフ攪拌子固有の問題が発生する。

図 1 自動分析装置の概観

Fig. 1. Schematic view of a medical automatic analyzer.

また、大振幅で振動すると、泡の発生も無視できなくなる。結局、これらの制約が災いして、いま一步のところでも実用要求を満足することができない状況にあり、小さな振動振幅でより効率よく攪拌できる方法の開発が待たれていた。

そこで、我々はこうした問題に対処するために、通常の 1 次モードに代わって、2 次モードに近い高次モードで駆動する方式を考案した⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。高次モードの利用は、1 次モードに比べてブレードの長さ方向（容器の上下方向）の振動変位が大きく、容器の上下方向に溶液がよく攪拌されるようになる。さらに、ブレードの付け根におもりを付加して、最良な攪拌性能が実現されるよう振動姿態を調整するようにした。これらの工夫により、従来に比べて小さな振動振幅で効率よく溶液を攪拌することが可能になり、従来の圧電バイモルフ攪拌子の性能限界を打破することを可能にした。本攪拌子は、1993 年より自動分析装置の一部に搭載され現在に至っている⁽¹¹⁾。本論文は、こうした背景を踏まえて、自動分析装置用の圧電バイモルフ攪拌子の構成法の提案とその特性解析、性能向上に向けた評価試験の結果について報告する。

2. 圧電バイモルフ攪拌子の提案

〈2・1〉 要求仕様 自動分析装置は図 1 に示すような概観の装置であり、検体および試薬の分注、攪拌子による攪拌、血清成分の比色測定、濃度演算、攪拌子および容器の洗浄、の手順を繰り返すことによって、多サンプル、多項目の血清成分を自動測定する。時間あたりに処理できるサンプル数は、血清と試薬が均一に混ざるまでの攪拌時間によって左右されるため、攪拌子の性能向上は、自動分析装置における重要な技術的検討課題である。

分析装置に用いる、反応容器は図 2 に示すように、縦長のガラス製容器（内径 5 x 6 x 39mm）である。血清サンプルと試薬の混合液（400~600 mmℓ）を反応容器内に注入した後、なるべく短時間のうちに溶液が均一になるように攪拌する。攪拌が不十分であると、光吸収強度の測定値のバラツキが大きくなり、測定精度が悪くなってしまふ。こ

図 2 反応容器（上：平面図，下：正面図）

Fig. 2. Reactor cuvette (upper: top view, lower: front view).

の点を考慮して、許容の測定精度を満足する均一さに到達するまで十分な時間をかけて攪拌する。まえがきに述べたように、攪拌棒をモータで回転させるなどする従来の攪拌方式では、反応容器が縦長であることが災いして、液の移動が反応容器壁面に沿って水平方向だけに留まってしまう、上下方向によく攪拌できない問題に直面する。このため、短い時間内で溶液を均一に混ぜるには、泡が立たない程度に小さな振幅で、なおかつ上下方向に液が移動する効率の良い攪拌の仕方を工夫する必要がある。

〈2・2〉 圧電攪拌子の構成 この問題に対処するために、本研究では図 3 に示す圧電バイモルフを用いた攪拌子を提案する。この攪拌子本体は、ブレード部を含めて継ぎ目のない 1 枚の鋼弾性基板によって形づくられている。圧電バイモルフによる駆動部分は、鋼材基板の両面に 2 枚の圧電セラミックス板をサンドイッチ状に貼りつけることにより構成している。バイモルフ電極に、攪拌子の固有振動周波数に合せた、周波数 F の正弦波交流電圧を印加する。これによりバイモルフ部に励起された屈曲振動は、反応容器の形に合せた細長いブレードに伝えられて溶液を攪拌する。これらの攪拌装置全体の構成を図 4 に示す。このとき、ブレードは駆動部に比べて断面積が小さいため、駆動部で小振幅で駆動しても、ブレード部でかなり大きな振幅で振動するようになる。また、本攪拌子はブレードと一体化した 1 枚の金属薄板の上に圧電バイモルフを装着しており、つなぎ目をなくして破損しにくい構造にしている。さらに、本研究独自の工夫として、ブレード部と駆動部の境界部分に錘を付けている。これにより、錘の重さを変えて最適な振動モードを設定できるようにする（次節で詳細を説明する）。以上のようにして、縦長の微小容器内の溶液を短時間で効率よく攪拌できる自動分析装置用の攪拌子を実現する。

3. 攪拌子の振動モード解析

〈3・1〉 解析方法 本攪拌子を図 5 に示す片持梁の 1 次元の振動解析モデルに基づいて解析する。まず、座標系を図のように選んで、駆動部、錘部、ブレード部に対応した

図 3 圧電バイモルフ攪拌子の詳細 (左:正面図, 右:側面図)

Fig. 3. The piezoelectric bimorph stirrer (left:front view, right:side view).

図 4 攪拌装置の構成

Fig. 4. Configuration of stirring unit.

図 5 解析モデル

Fig. 5. Analysis model.

各々の区間に $i = 1, 2, 3$ の番号を付ける。そして、区間 i における屈曲に伴う攪拌子の梁に垂直な方向の変位を $w_i(x)$ とする。この屈曲振動変位 w_i に対する運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 w_i}{\partial x^4} - a_i^4 w_i = 0 \quad (1)$$

ここで、係数 a_i は

$$a_i = \sqrt{\frac{2\pi f}{V_i R_i}} \quad (2)$$

さらに、 f は振動周波数、 V_i は板の縦波速度で $V_i = \sqrt{E_i/\rho_i}$ である。ただし、 ρ_i は密度、 E_i はヤング率である。また、 R_i は断面の回転半径で、図 5(b) のような高さ $2h$ 、幅 b の直方体断面の場合、 $R_i = h_i/\sqrt{3}$ である。式 (1) の微分

図 6 錘がない攪拌子の振動モード

Fig. 6. Vibration mode of stirring bar without weight.

程式の一般解は次式で与えられる。

$$w_i(x) = A_i \cos a_i x + B_i \sin a_i x + C_i \cosh a_i x + D_i \sinh a_i x \quad (3)$$

ここで、 A_i, B_i, C_i, D_i は区間 i における各々の基本解の係数である。以上の結果に、各区間における境界条件を課す。すなわち、駆動部左端の $x = 0$ においては、固定端の境界条件を適用して、

$$w_1(0) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dw_1(0)}{dx} = 0 \quad (5)$$

反対に、ブレード先端部の $x = L_3$ では、自由端の境界条件を適用して

$$\frac{d^2 w_3(L_3)}{dx^2} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d^3 w_3(L_3)}{dx^3} = 0 \quad (7)$$

さらに、区間 i と区間 $i+1$ の境界 $x = L_i$ において、変位、変位の傾き、モーメント、せん断力、の各々が連続であるための次式の条件を課す。

$$w_i(L_i) = w_{i+1}(L_{i+1}) \quad (8)$$

$$\frac{dw_i(L_i)}{dx} = \frac{dw_{i+1}(L_{i+1})}{dx} \quad (9)$$

$$K_i \frac{d^2 w_i(L_i)}{dx^2} = K_{i+1} \frac{d^2 w_{i+1}(L_{i+1})}{dx^2} \quad (10)$$

$$K_i \frac{d^3 w_i(L_i)}{dx^3} = K_{i+1} \frac{d^3 w_{i+1}(L_{i+1})}{dx^3} \quad (11)$$

ここで、 K_i は、区間 i における板の断面積 $S_i (= 2h \times b)$ 、断面の回転半径 R_i 、ヤング率 E_i に対して

$$K_i = E_i R_i^2 S_i \quad (12)$$

とおいた。以上の境界条件から、係数 A_i, B_i, C_i, D_i (固有ベクトル) ならびに周波数 f (固有値) に関する固有値方程式が導かれる。この固有値方程式を解くことにより得られる固有値ならびに固有ベクトルの解から、攪拌子の共振周波数とその振動姿態を計算することができる。

図 7 錘を付けた攪拌子の振動モード
Fig. 7. Vibration mode of stirring bar with weight.

表 1 計算に用いたパラメータ

Table 1. Parameters used in simulation		
Dimension (mm)		
$l_1=29$	$b_1=20$	$2h_1=10$
$l_2=8$	$b_2=15$	$2h_2=0.25$
$l_3=45$	$b_3=2$	$2h_3=0.25$
Density $\times 10^3$ (kg/m ³)		
$\rho_1=7.5$	$\rho_2=3000$ (Typ.)	$\rho_3=7.9$
Young's modulus $\times 10^{10}$ (N/m ²)		
$E_1=6.5$	$E_2=10$	$E_3=10$

〈3・2〉 振動モードの計算例 図 3 の攪拌子に合せた表 1 に示す条件のもとで、攪拌子振動モードのシミュレーション計算を行った。ただし、本論文の 1 次元の屈曲振動解析モデルでは、攪拌子の 3 次元的な構造や振動分布を無視している。特に、錘区間における錘の質量負荷効果は解析モデルに精密な形で取り込むことができない。このため、表 1 では錘区間の厚さ h を、鋼材基板と同じ薄寸法に設定した状態で、錘区間の密度 ρ_2 を極端に大きい値に選んでいる。また、各区間は単一材料で構成されていないため、ヤング率等の材料定数はおおそその値を設定している。はじめに、 $\rho_2 = \rho_3$ に選んで、錘が無い状態の通常の構成の攪拌子の振動姿態の計算結果を図 6(a),(b) に示す。ここで、同図 (a) は 1 次モード ($f_1=67\text{Hz}$)、(b) は 2 次モード ($f_2=407\text{Hz}$) の振動姿態を示す。(a) の 1 次モードはブレード全体が一様な方向に屈曲振動するのに対して、(b) の 2 次モードは途中で振動の節（零点）が一つある S 字状の振動姿態を示す。この攪拌子に錘を負荷すると、上記の 1 次モードと 2 次モードの中間の共振周波数をもつ新たな振動モードが発生する（これを準 2 次モードと呼ぶ）。図 7 に錘の重さを数段階変えた場合に対する準 2 次モードの振動姿態の計算結果を示す。まず、同図 (a) に示すように、錘を重くした場合は、錘部分が固定端となりブレード 1 区間で構成される屈曲振動子の 1 次モードの振動姿態に近づく。反対に、図 7(d) に見られるように錘を軽くした場合は、錘がない屈曲振動子の 2 次モードの振動姿態に近づく。これ

図 8 ブレードの振動モードと液流の様子
Fig. 8. Depiction of vibration mode of blade and fluid flow.

らの中間の重さの図 7(b),(c) では、1 次モードと 2 次モードの中間の共振周波数ならびに振動姿態で振動する。特に、錘の重さによって準 2 次モードの節の位置がブレードの付け根部分から先端付近に移動していく様子が示されている。

〈3・3〉 振動モードと液流の関係 図 8 に、1 次モードと準 2 次モードの各々に対するブレード部の振動姿態と予想される反応容器内の液流の様子を模式的に示す。ただし、自動分析装置の要求に合せて、ブレードの全長 45mm に対して、溶液の液面の高さが十数 mm となる測定状況を想定する。まず、(a) の 1 次モードを用いた場合は、ブレード全体が一方向のみに屈曲振動するため、液面からブレード先端までの振動変位は場所によらず一様である。このため、容器内には殆ど水平面内の方向にしか液流が発生しない。これに対して、(b) の 2 次モードでは次のようなことが考えられる。液面がブレードの振動の節の真下付近になるように設定されていれば、液面からブレード先端にかけて振動変位が急である。このように上下方向に駆動力の勾配があることにより、水平方向だけでなく上向き方向にも液流が発生するようになる。これに加えて、泡が発生しやすい液面近くで振動振幅が小さいため、泡の発生を抑えることができるメリットが期待される。ところで、純粋な 2 次モードの場合、振動の節の位置は固定されており、その位置は図 8(b) と異なり水面よりかなり下方にきてしまい都合が悪い。そこで、本研究では錘を付加すると共に、錘の重さを変えて準 2 次モードの振動の節の位置が液面に対して適度な場所にくるように調整する。これにより最適な振動姿態を実現し攪拌性能の向上を図る。

4. 評価試験

〈4・1〉 振動モードの気中観測 図 3 に示した攪拌子を自動分析装置に実装する前の基礎評価試験として、はじめに攪拌子ブレード部の振動を大気中で観測する。錘の重さを $M=0.75\text{g}$ に選んだ状態で、攪拌子の駆動周波数を変えながら観測したところ、 $f_1 = 70\text{Hz}$ と $f_2 = 130\text{Hz}$ の二

(a) 1st mode (b) Semi 2nd mode

図 9 ブレードの振動の様子

Fig. 9. Observation of blade vibration.

つの周波数で振動振幅が大きくなり共振の様子が確認された。二つの共振周波数におけるブレードの振動の様子を写真撮影した結果を図 9 に示す。前節の理論的予測に近い、1 次モードと準 2 次モードの共振周波数ならびに振動状態で振動している様子が確認できる。特に、準 2 次モードの振動状態と共振周波数は図 7(b) の計算結果に近い結果が得られており、理論特性と大まかな傾向が一致する。ここで、気中観測のため、この後に示す液中攪拌試験の結果よりも共振周波数がやや高くなっている。また、1 次モードの駆動電圧は 5V、準 2 次モードの駆動電圧は 20V にした結果であり、液中の場合よりもやや低い駆動電圧にしている。その際、1 次モードに比べて、準 2 次モードのほうが同じ駆動電圧に対して振動振幅が小さくなるが、20V 程度以上の高い電圧で駆動すれば反応容器の内壁寸法に対して十分な振幅でブレードを振動させることができることが確認できる。

〈4・2〉 振動モードの違いによる攪拌性能の比較 期待した振動モードで振動する様子が確認できたので、振動モードの違いによる攪拌性能の違いを調べる。そのために、血清と試薬の混合液を模擬した溶液として、生理食塩水 (0.8 % NaCl 水溶液) に 1.5 % ポリビニルアルコール (PVA) を添加した溶液 (以下 PVA 添加液と呼ぶ) を用意した。ここで、ポリビニルアルコールは溶液に発泡性を持たせるために加えている。一般の生化学項目では発泡性のある試薬が多い。特に、濡れ性をよくするために界面活性剤を用いることが多いため、殆どの検査試料は発泡性があると考えたほうがよい。泡の発生は溶液を攪拌し難くするので、試料に発泡性があることを前提に性能評価試験を行う。図 2 の反応セル内の模擬検査溶液 400 μ l に、攪拌状態を光学的にモニターするために、0.01%エバンスブルー着色液 100 μ l を加えた。このとき、反応セルの液面の高さは約 17mm であり、攪拌子を容器底面から 1mm 離れた高さに設置して

図 10 駆動周波数に対する攪拌時間の変化

Fig. 10. Variation of stirring time as a function of vibration frequency.

おり、ブレード先端部の長さ約 16mm の区間が液に浸った状態になっている。以上の状態で、駆動電圧 25V で攪拌子を駆動して模擬溶液を攪拌する。ここでは、攪拌時間 T を着色剤が溶液に均一に攪拌されて吸光度が一定になるまでの時間で評価してみる。その駆動周波数と攪拌時間 T の関係の測定結果を図 10 に示す。1 次モードと準 2 次モードの各々に対応した $f_1 = 60\text{Hz}$ と $f_2 = 120\text{Hz}$ の共振周波数に一致して、攪拌時間が局所的に短くなっている。両者を比較すると、準 2 次モードのほうが 1 次モードに比べてかなり短い時間で攪拌できる様子が確認できる。この違いは、前節に述べた理論的予測を裏付けるものであり、これにより準 2 次モードを用いる本提案の攪拌子の有効性が確認できる。

〈4・3〉 実証試験の方法 今までの評価試験で基本的な有効性が確認できたので、以下では臨床検査用自動分析装置 (東芝:TBA-30R) に、攪拌子を実際に搭載した状態で試験を行った。血清と試薬の混合液を模擬した溶液として、上記の基礎試験に用いた①発泡性のある PVA 添加液に加えて、②粘性のある試薬を想定して、生理食塩水に 20% のグリセリンを添加した溶液 (以下グリセリン添加液と呼ぶ)、③比較対照用に、無添加の生理食塩水 (無添加液と呼ぶ) を用意した。これらの模擬検査溶液 400 μ l に、攪拌状態のモニタ用の 0.01%エバンスブルー着色液 40 μ l を加えた (基礎試験よりやや少ない液量で試験を行った)。以上の条件の下で一定時間攪拌した後に、分光光度計によって液体の吸光度を測定する。攪拌が十分でない状態では、溶液の着色が不均一なため吸光度の測定値にバラツキを生じる。ここでは、吸光度 X の測定を多数回行い (以下の評価試験で 30 回行った結果を示す)、その平均値: a_X 、ならびに標準偏差: σ_X を用いて、

$$CV = \sigma_X / a_X \dots\dots\dots (13)$$

で定義される CV 値を求める。CV 値が小さいほど溶液が均一であることを表しており、以下では CV 値の測定結果から溶液の攪拌状態を定量評価する。

〈4・4〉 最適な振動モードの探索 基本的有効性が確認できた準 2 次モードの使用を前提にして、3 節の説明に従って、錘の重さ M を調整することにより、攪拌性能が最も

図 11 錘の重さによる攪拌性能の変化

Fig. 11. Variation of stirring performance as a function of mass of the weight.

図 12 駆動周波数に対する攪拌性能の変化

Fig. 12. Variation of stirring performance as a function of driving frequency.

よくなる振動姿態を探索してみる。このとき、 M を変える度に準 2 次モードの共振周波数が変わるので、駆動周波数 F もそれに合せて調整する必要がある。ここでは、① F を固定した状態で M を変える、② M を固定した状態で F を変える、の 2 種類の測定を何回か繰り返す。こうして求めた最適値 $M = 0.75\text{g}$ と $F = 120\text{Hz}$ の近傍における、①と②の各々に対する CV 値の測定結果を図 11,12 に示す。これらの結果から、発泡性のない溶液では攪拌性能にほとんど差がないが、発泡性がある PVA 添加液では振動モードによる (M を変えたことによる) 攪拌性能の違いが大きく、 $M = 0.75\text{g}$ 、 $F = 120\text{Hz}$ において最も攪拌性能の良い結果が得られていることが確認できる。

〈4・5〉攪拌時間の性能評価 以上の検討により、準 2 次モードでの最適な実験条件 (駆動周波数: $F=120\text{Hz}$, 錘の重さ: $M=0.75\text{g}$, 駆動電圧 $E = 25\text{V}$) が示された。最後に、この最適条件の下で実際の自動分析装置において、どれぐらいの攪拌時間が必要になるかについて検討した。図 13 に 3 種類の検体模擬溶液を用いた場合に対して、攪拌時間の経過と共に CV 値が減少していく様子を示した。ここで、ある一定以上長い時間攪拌し続けても、吸光度のバラツキが雑音レベルになるとそれ以上 CV 値が減少しない

図 13 攪拌時間に対する攪拌性能の変化

Fig. 13. Variation of stirring performance as a function of agitation time.

(図では 0.2% 以下には減少しない)。ここでは、その最低値に到達するまでの時間を、溶液が均一になる攪拌時間とみなす。図 13 の結果をみると、今までと同様に、溶液に発泡性がなければ短時間で攪拌が終了し問題がないが、発泡性があると格段に長い時間を要するようになる。発泡性があり条件が最も悪い場合において、2s 以内の時間に攪拌が終了する結果が示されている。以上の結果は、別途行った従来のプロペラ回転式による攪拌時間が 4s であったのに比べて攪拌時間がかなり短縮できる結果が得られている。

5. おわりに

圧電素子を応用し、攪拌子の構造、駆動条件を検討する事で、微小な反応容器内で液体を混合するのに最適化した、自動分析装置用の攪拌子が開発できた。すなわち、準 2 次モード駆動による圧電バイモルフ攪拌子を考案し、これにより容器内の溶液を泡の発生を招くことなく上下方向に効率よく攪拌でき、従来に比べて短い時間内に均一な混合状態を作り出すことを可能にした。本攪拌子は長期使用による損傷の問題もなく、十分な耐久性能を満足することが別途行った評価試験により確認することができた。これらの結果から、本攪拌子は 800 テスト/時間の分析動作速度を有する高速型ランダムアクセス型自動分析装置の実現に要求されていた攪拌時間及び攪拌性能を満足する事ができた。以上のように、実用面からは十分な結果が得られたが、溶液の流体力学的挙動に関する考察に基づいた攪拌条件の最適化、準 2 次モードよりもさらに高次の振動モード利用の可能性、など細部についてまだ十分な検討をつくしていない面もある。これらの点については、今後さらに詳細な検討を加えていく必要があると考えている。

最後に本開発評価にあたり、基礎的研究に基づく適切な御助言を賜りました、九州大学教授、速水洋先生、元東芝セラミックス (株) 青木登氏、及び東芝電子エンジニアリング (株) 齊藤雅人氏に心より感謝致します。

(平成 13 年 12 月 17 日受付, 同 14 年 04 月 03 日再受付)

文 献

- (1) 宇都宮 編,「新医療機器辞典」,産業調査会辞典出版センター,pp.157,1997
- (2) 佐藤猛英,「生化学自動分析」,精密工学会誌,Vol.53,No.4,pp.534-537,1987
- (3) 栢森裕三,片山善章,「サンプリングと精度保証」,臨床病理,Vol.46,p.1190~1196,1998
- (4) M.Yorinaga, D.Makino,K.Kawaguchi, M.Naito,"A piezoelectric fan using PZT ceramics", Jpn.J.Appl.Phys., Vol.24,No.24-3, pp.203-205, 1985.
- (5) 奥山英恵,「バイモルポンプとバイモルファンのメカニズムとその活用方法」,省力と自動化, Vol.18, No.10, pp.57-63, 1987.
- (6) 神原正治,渡辺秀夫,「圧電モータ・アクチュエータ圧電バイモルフ型アクチュエータと圧電ファン」,エレクトロニク・セラミクス, Vol.18, No.86, pp.49-53, 1987.
- (7) D.K. Dawes, "Method and apparatus for mixing serum and reagents for chemical analysis", USA Patent No.4612291, 1986.
- (8) 青木登, 斉藤雅人,「攪拌装置」,日本国特許出願公開番号:特開平3-232524,1991
- (9) 六川玖治, 井上守人, 坂口総一郎, 大屋英郎, 青木登, 斉藤雅人,「攪拌子」,日本国特許第3135605号,2000
- (10) K.Rokugawa,S.Sakaguchi,H.Ooya,Aoki, Saito, "Stirring Device", USA Patent No.5449493,1995
- (11) 六川玖治, 大屋英郎, 井上守人, 坂口総一郎, 青木登, 速水洋:「ビエゾ素子を応用した攪はん子の開発その原理と攪はん特性」,臨床検査自動化学会第24回大会,同学会誌, Vol.17,No.4,pp357,1992.

大 屋 英 郎 (学生員) 1985年東北大学農学部食糧化学科卒業。1986年(株)東芝入社。在職のまま、2001年日本大学大学院総合社会情報研究科修士課程修了。同年東京農工大学生物システム応用科学研究科博士課程在籍。現在、医用機器自動分析装置の品質評価業務に従事。電気学会,化学工学会,日本生化学会各会員。

六 川 玖 治 (非会員) 1971年東北大学農学研究科修士課程修了。同年ヤマサ醤油(株)研究所入社。インターフェロン誘導物質の開発に従事。1981年(株)東芝入社。主に検体検査装置の要素技術開発に従事。2001年より(株)ジーンケア研究所勤務。農博。日本臨床検査自動化学会,日本臨床化学会,AACC各会員。

井 上 守 人 (非会員) 1975年大阪電気通信大学工学部電子物性工学科卒業。東芝ベックマン(株)を経て、1977年(株)東芝入社。現在、医用機器の購買管理業務に従事。

坂 口 総一郎 (非会員) 1989年関西大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在、医用機器自動分析装置の設計開発業務に従事。

山 田 晃 (正員) 1976年東北大学工学部・通信卒。1982年同大学院博士課程修了。同年豊橋技術科学大学・工・助手。1989年東京農工大・工・助教授,1995年同大学院生物システム応用科学研究科・助教授,現在に至る。音波計測,音響逆散乱問題,音波による可視化ならびにCT計測に関する研究に従事。工博。日本音響学会,電子情報通信学会,電気学会,IEEE各会員。