



水晶振動子を用いたロボット用把持力センサに関する基礎的研究

村岡, 茂信

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-04-27

(Date of Publication)

2009-12-14

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2546

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002546>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

水晶振動子を用いたロボット用把持力センサ
に関する基礎的研究

平成 13 年 2 月

村 岡 茂 信

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 本論文で使用する ”把持力” と ”把持力センサ” の意味	3
1.3 水晶振動子を用いたセンサに関するこれまでの研究概要	4
1.4 本研究の目的と本論文の構成	5
参考文献	7

第2章 力センサとしての水晶振動子の基礎特性 論文 No.1, No.3

2.1 はじめに	9
2.2 使用した水晶振動子	13
2.3 実験方法	14
2.4 応力感度	17
2.5 応力感度の温度特性	21
2.6 応力感度およびその温度係数と外力の方向の関係	23
2.7 力センサとしての水晶振動子の再現性と精度	27
2.8 水晶振動子の機械的強度	29
2.8.1 水晶振動子の破断強さ	29
2.8.2 ロボットの指に装着された水晶振動子の静荷重に対する強度	30
2.8.3 ロボットの指に装着された水晶振動子の衝撃荷重に対する強度	31
2.9 まとめ	34
参考文献	35

第3章 水晶振動子の力センサへの応用 論文No.2, No.3

3.1	はじめに	37
3.2	水晶振動子式力センサに適用する差動法の原理	39
3.3	差動法を適用した水晶振動子式力センサの静特性	43
3.3.1	実験に使用した水晶振動子対	43
3.3.2	実験方法	43
3.3.3	応力感度	46
3.3.4	応力感度の温度特性	46
3.4	水晶振動子式力センサの動特性	49
3.5	まとめ	54
	参考文献	56
第4章	水晶振動子式力センサの把持力センサへの応用	論文No.3, No.4
4.1	はじめに	57
4.2	把持力センサの構造	58
4.3	把持力と把持位置の検出原理	59
4.3.1	把持力により水晶振動子に生じる応力	59
4.3.2	把持力による水晶振動子の周波数変化量	60
4.3.3	把持力による水晶振動子対の差周波数の変化量	60
4.3.4	4組の水晶振動子対からなる把持力センサ	61
4.3.5	3組の水晶振動子対からなる把持力センサ	63
4.3.6	2組の水晶振動子対からなる把持力センサ	64
4.4	把持力センサの試作とその基礎特性	65
4.5	把持力センサの外界センシングへの応用	71
4.6	まとめ	75
	参考文献	76

第5章 水晶振動子式力センサの把持滑りセンサへの応用	論文No.5
5.1 はじめに	77
5.2 ”滑り” と ”ずれ” の定義	78
5.3 把持滑りセンサの構造	79
5.4 把持滑りに伴う摩擦力とその方向の検出原理	81
5.5 1次元把持滑りの検出	83
5.6 2次元把持滑りの検出	90
5.7 まとめ	94
参考文献	96
第6章 結論	97
謝辞	100
本論文に関係する論文および講演	
1. 学会論文集掲載論文	101
2. 国際会議発表論文	101
3. 国内学会口頭発表論文	102

第1章 序 論

1.1 研究の背景

ヒトは、紀元前の昔から自分たちに代わって過酷な仕事をする、いわゆる『ロボット』の出現を切望し、その作製に多くの時間を費やしてきた。ロボットの概念は紀元前8世紀頃のホメロスの叙事詩『イーリアス』に現れ、技術的には紀元前後1世紀頃のヘロンによる神殿の自動扉や自動聖水装置に始まるといわれている。ロボットという語は、農奴の強制労働を意味するチェコ語の"robota"が語源といわれていて、1920年にチェコスロバキアの劇作家カレル・チャペックによって人造人間の意味で戯曲"ロッサムズ ユニバーサル ロボット"のなかで初めて使用された。その後産業ロボットが登場するに及んで、この語は技術的意味合いを濃くし、"人間の代わりに目的の操作を自動的に行う機械"という理解が一般的となった。現在、ロボットといえばマニピュレータや移動機構からなる機構部、センサ部、制御部および情報処理部などから構成されるものを指すことが多い。これらのうちマニピュレータはアームやエンドエフェクタからなり、制御部はロボットの運動を直接制御する部分、情報処理部はセンシング結果などに基づいて動作などを決定する部分である。ロボットは、自身の状況および対象とのかかわりや環境を把握しながら作業を行う。このため、一般のロボットには自身の状況を認識するための内界センサと対象へのかかわり状況や外部環境を認識するための外界センサが装備されている。内界センサには位置、姿勢、速度および加速度などのセンサがあり、外界センサには視覚、触覚、聴覚、味覚、嗅覚などいわゆる五感に相当するセンサがある。

ヒトは幾つかの感覚受容器が存在する皮膚を有し、これにより多様な刺激を感知することができる。ヒトが柔らかいものや壊れやすいものを扱うとき、触覚情報により対象の状態を認識しながら慎重に腕や手を動かしている。ロボットがこのような動作を行う場合にも、ヒトの皮膚感覚に相当するセンシング機能を有する触覚センサが必要となる。触覚は、"ロボットと物体との接触に関する感覚" [1] である。触覚センサは、生体より類推される皮膚感覚と力覚に対してその機能あるいはその一部を工学的に実現したものの総称で、接触覚

センサ, 圧覚センサ, 滑り覚センサ, 力覚センサ, 近接覚センサなどからなる [2]. 接触覚は, "ロボットと物体との接触の有無に関する感覚" [1] である. 接触覚センサはロボットと対象との接触の有無を検知するセンサで, ばね要素と接点とからなる "push on" 形や "push off" 形などがあり, 対象の探索, 衝突の検知などに用いられている. 圧覚は, "ロボットと物体との接触で, ロボットがその面の法線方向に感じる力に関する感覚" [1] である. 圧覚センサは, 対象がセンサ面に及ぼす力を検知するセンサで, 弾性体とその変形を検知するセンサから構成されているものや感圧抵抗体を用いたものがある. 前者の例として, ばねとポテンシオメータを組み合わせたものがあり, これはばねの剛性と変位計出力から力情報を得るものである. 後者の例として, 柔軟構造部とそれに貼付されたひずみゲージからなるセンサ, 感圧導電性ゴムやピエゾ抵抗素子, 圧電ポリマーなどを用いたセンサがある. これらの圧覚センサはアナログ出力のためノイズの影響を受けやすい欠点がある. 滑り覚は, "ロボットと物体との接触面内での相対的な動きを検知する感覚" [1] である. 滑り覚センサは, 対象とセンサの間の相対運動の有無を検出するもので, ローラあるいはボールを用いるもの, 滑り時の振動を検出するものなどがある. 前者は, センサ表面に装着されたローラあるいはボール上を対象が滑るとローラあるいはボールが回転し, この回転を磁気ヘッドや光学センサで検知するものである. 後者は, センサ表面の触針上を対象が滑ると触針が振動し, これを圧電センサや磁気コイルなどを用いた微小変位計で検知するものである. ローラやボール式はその慣性にうち勝つだけの摩擦力が必要で, 滑りに伴う摩擦力が小さいときに不感帯を生じる問題がある. 指針式はアナログ出力のためノイズの影響を受けやすいという問題がある. 力覚は, "ロボットの動作に関する力の感覚" [1] である. 力覚センサは, ロボットのアームやハンドが受ける力あるいはトルクを測定するもので, 歪みゲージを用いるものが最も一般的で, 1軸力センサ, 1軸トルクセンサ, 6軸力覚センサなどがある. これらの力覚センサはアナログ出力のためノイズの影響を受けやすい欠点がある. 近接覚は, "ロボットおよび物体が有る範囲内に接近した状態で, 両者の相対関係を検知する感覚" [1] である. 近接覚センサは, 比較的近い位置から効果器と対象物との相対的關係など空間的情報を取得するためのセンサである.

ロボットのハンドリング動作においては, 把持力, 把持位置, 滑りのような触覚情報を基に, 対象に過大な力を与えることなく安定に把持するための把持制御が行われていて, 把

持力, 滑り, 把持位置などのセンサが重要な役割を果たしている. 群ロボットの協調搬送は対象と各ロボットの接触点情報を基にしており, ここでは接触位置, 接触力, 滑りなどのセンサが重要となる. また, 触覚による外界センシングでは, センサが直接外界に接触するので, 接触力, 接触位置, 滑りなどのセンサ出力を基に, 外界を損傷から保護しながらセンシングする必要がある.

ロボットの把持制御, 協調搬送, 外界センシングなどの進歩とともに, これらの分野で使用される把持力, 把持位置, 滑り, 接触力, 接触位置などのセンサも進化し, 各種方式のセンサが提案されている [3]~[8]. これらのロボットセンサは, アクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存するため, 耐ノイズ性が要求される. 従来これらの分野で使用されてきたセンサは, 歪みゲージ式, 導電性ゴム式, ピエゾ抵抗式, 圧電式などアナログ出力のものがほとんどで, ノイズの影響を受けやすく信号レベルも低いものが多かった. このため, これらのセンサはフィルタ, アンプ, A-D変換器などを必要とし, 信号処理が容易でなかった. また, フィルタの使用により帯域が制限されてセンサ出力が対象の速い変化に応答できない問題もあった. これらのことから, ノイズに強く信号処理が容易で高速応答の把持力センサの出現が切望されてきた.

1.2 本論文で使用する ”把持力” と ”把持力センサ” の意味

図1-1 は平行2指ハンドにより重量 mg (m :対象物の質量, g :重力加速度) の対象物を把持しているところである. 指は対象物から接触面の法線方向 (Y 方向) の力 N と重力による接線方向 ($-Z$ 方向) の力 $-mg/2$ を受け, 重力 $-mg/2$ は摩擦力 μN (μ は摩擦係数) とつりあっている. これらの力のうち法線方向の力 N は Z 軸まわりの曲げ応力を, 接線方向の力 $-mg/2$ は Y 軸まわりの曲げ応力を指に生じさせる. 本論文では, これら法線方向と接線方向の両方向の力をあわせて ”把持力” と呼ぶことにする. 接線方向の力が最大静摩擦力を越えたとき滑りが生じる. 滑りは摩擦力変化により生じる曲げ応力の変化を測定することにより検出でき, 把持位置は指の軸線に沿った2カ所に生じる曲げ応力を測定することにより検出できる. このように, 把持力, 滑り, 把持位置は, いずれも指に生じる曲げ応力を測定して得られる量であり, これらの曲げ応力を測定して法線方向の力や接線方向の力を測定するセンサを ”把持力センサ” と呼ぶことにする. 協調搬送

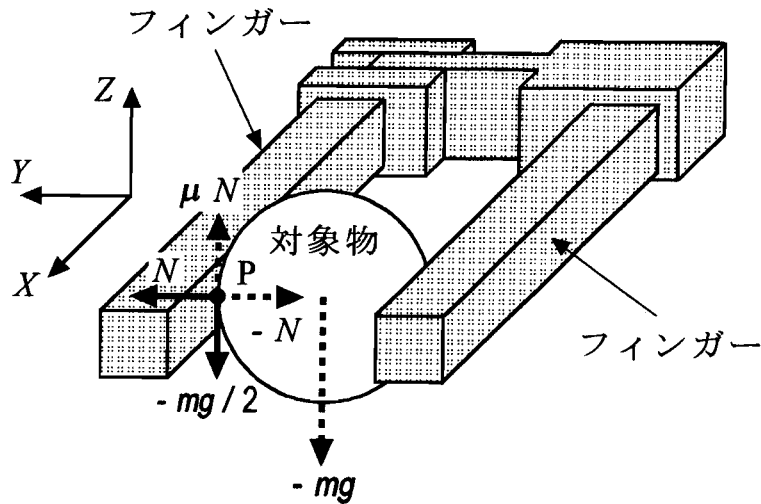


図 1-1 平行 2 指ハンドによる対象物の把持

や外界センシングにおける接触力や接触位置も力学的には把持力や把持位置と同一と考えられるため、これらの量を測定するセンサも”把持力センサ”に含めることにする。本論文の題名にある”把持力センサ”もこの意味で使用した。

1.3 水晶振動子を用いたセンサに関するこれまでの研究概要

水晶振動子を”把持力センサ”に応用する観点から、力センサとしての水晶振動子に関するこれまでの研究を振り返っておく。水晶振動子は、共振周波数が最も安定した素子であるため、時間や周波数を精密に管理する機能部品（クロック用水晶発振器、基準周波数源）の心臓部として保持器に固定されて使用されている。この保持器に加速度が生じると慣性力により水晶振動子の共振周波数が変化し、機能部品としての性能が劣化する。このため、保持器の加速度が水晶振動子の共振周波数に与える影響を最小にするための保持方法の研究が始まった。1960年代に、A. D. Ballato と R. Bechmann [9], E. Gerber と M. Miles [10][11], C. R. Mingins ら [12] が、円板状 AT カット水晶振動子の外周に主面に平行な圧縮力を加え、圧縮力と周波数変化量の間に関係のあること、周波数変化量が外力

の方向の関数であることを示した。1970年代には、C. R. Dauwalter が、ATカット水晶振動子の力センサとしての感度の温度特性を報告している [13]。これらの研究は、外力の影響の少ない発振周波数の安定した発振器を得ることを目的としたものであった。

これらの研究とは逆に、外力により周波数が変化することを積極的に利用して水晶振動子を圧力センサに応用する試みがなされた。1969年には D. L. Hammond, A. Benjaminson ら [14] と H. E. Karrer, J. Leach ら [15] は水晶振動子を圧力変換器に応用した。1977年には E. Karrer と R. Ward がさらに感度の高い圧力変換器に水晶振動子を応用した [16]。1980～1990年代には、加速度センサ [17] [18]、マイクロマシニング技術を駆使した圧力センサ [19] などに水晶振動子が応用された。

1980年代には、水晶振動子表面に物質が吸着されたり付着するとその周波数が変化する性質を利用したセンサが出現した。水晶振動子表面の塗布膜にガスが吸着されて周波数が変化するガスセンサ [20]、水晶振動子表面の蒸着膜の厚さにより共振周波数が変化することを利用した蒸着膜厚センサ [21] などである。1990年代には、化学センサ [22][23]、H₂センサアレイ [24]、粘度センサ [25][26]、DNA センサ [27]、香りセンサ [28] などに水晶振動子が応用された。このほか、温度変化に対して共振周波数が大きく変化する切り出し角の水晶振動子を用いた温度センサ [29] [30] [31] も出現した。

以上のように、水晶振動子を用いたセンサの研究には、外力により共振周波数が変化することを利用した力または圧力のセンサに関するもの、水晶振動子表面の吸着や付着物質により共振周波数が変化することを利用したセンサに関するもの、温度変化により共振周波数が変化することを利用した温度センサに関するものなどがある。

1.4 本研究の目的と本論文の構成

本論文は、水晶振動子を力センサとして使用し、この水晶振動子式力センサを用いてノイズに強く信号処理が容易で高感度、高分解能、広帯域である把持力センサを実現するための基礎的研究に関するものである。

水晶振動子は、外力の大きさに比例してその共振周波数が変化するので力センサとして使用することができる。この力センサは、出力が周波数であるためノイズに強く、その出力が周波数カウンタにより容易にデジタル化でき、デジタル機器との接続など信号処

理が容易で、高感度、高分解能といった特長も有し、コードレス化にも都合がよい。さらに、水晶振動子の共振周波数が一般の環境ノイズよりはるかに高く（本研究で使用した水晶振動子は 10 MHz と 15 MHz）、仮にフィルタを併用しても高いカットオフ周波数を設定できるので広帯域が確保できる。したがって、水晶振動子を用いた力センサは、ロボット搭載用センサのようにノイズを発生しやすい機器との共存や高速応答を必要とするところで威力を発揮すると考えられ、これを把持力センサに応用できれば、従来のロボット搭載用アナログセンサの欠点を克服するセンサとして有望である。

本研究では、力センサとしての水晶振動子の基礎特性を明らかにし、水晶振動子をロボット搭載用把持力センサに応用するための基礎的研究を行った。本論文は 6 章から構成されていて、1 章は序論で、研究の背景、これまでの水晶振動子を用いたセンサに関する研究概要、研究の目的と本論文の構成が示されている。2 章では、力センサとしての水晶振動子の基礎特性として、このセンサの応力感度とその温度特性、これらと外力の方向の関係、力センサとしての水晶振動子の再現性と精度、水晶振動子の機械的強度について述べてある。3 章では、水晶振動子の力センサへの応用として、水晶振動子を用いた力センサに適用する差動法の原理、差動法を適用した力センサの静特性および動特性について述べてある。4 章では、把持制御、外界センシング、協調搬送などで必要となるロボット搭載用把持力センサへの水晶振動子の応用について述べてある。4 対の水晶振動子をロボットフィンガに相当する片持ちはりに装着することにより把持力センサを構成し、このセンサの諸特性についての実験結果を示してある。また、外界センシングへの応用として、このセンサにより外界を一定接触力でなぞって、センサと外界の接触点情報から外界の 2 次元形状を再構成した結果が示してある。これらから水晶振動子が把持力センサとして有用であることが示してある。5 章では、まず、水晶振動子による把持滑りセンサ（本論文では把持力センサに含まれる）の構造を示し、滑りとその方向の検出原理が示してある。つぎに、1 対の水晶振動子による 1 次元把持滑り検出装置を作製し、これによる滑り特有の摩擦力変化の時間波形の検出結果が示してある。さらに、2 対の水晶振動子による 2 次元把持滑り検出装置を作製し、これにより検出した摩擦力の 2 方向成分から求めた滑り方向が示してある。これらにより水晶振動子が把持滑りセンサとしても有用であることが示してある。6 章は結論で、各章で明らかにした結果を列記し、水晶振動子を用いた力センサ

が従来のアナログ出力の力センサの欠点を克服するロボット搭載用把持力センサとして有望であることが示してある。

参考文献

- [1] (財)日本規格協会:産業用マニピュレーティングロボットー用語, JIS B0134-5810 (1998)
- [2] (財)情報調査会:センサ用語辞典, 241/242 (1986)
- [3] 山田陽滋: 把持までのセンシング戦略 その2: 滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得, 日本ロボット学会誌, 11-7, 27/33 (1993)
- [4] 富田豊他: ゴムのスリップを用いた滑りセンサの開発, 計測自動制御学会論文集, 27-1, 1/4 (1991)
- [5] 山田陽滋他: 3軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用, 日本ロボット学会誌, 13-4, 539/544 (1995)
- [6] 金子, 上野: 能動触角 (Active antenna) に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 13-1, 149/156 (1995)
- [7] 上野, 金子: 自己加振型動的能動触覚, 計測自動制御学会論文集, 33-11, 1053/1058 (1997)
- [8] 佐々木, 新井, 太田: 協調搬送時の力覚計測を用いた接触点の推定法, 日本ロボット学会誌, 18-3, 395/400 (2000)
- [9] A.D.Ballato and R. Bechmann: Effect of initial stress in vibrating quartz plates, Proc. IRE, 48, Feb., 261/262 (1960)
- [10] E. Gerber and M. Miles: Reduction of the frequency-temperature shift of piezoelectric resonators by mechanical stress, Proc. IRE 49, 1650/1654 (1961)
- [11] E.A.Gerber: Reduction of frequency-temperature shift of piezoelectric crystals by application of temperature dependent pressure, Proc. IRE, 48, 244/245 (1969)
- [12] C.R.Mingins, et al: Effect of external force on the frequency of vibrating crystal plates, Proc. 16th Annu. Freq. Control Symp., 46/77 (1962)
- [13] C. Dauwalter: The temperature dependence of the force sensitivity of AT-cut quartz crystals, Proc. 26th Annu. Freq. Control Symp., 108/112 (1972)
- [14] D.L.Hammond and A.Benjaminson: The crystal resonator - a digital transducer, IEEE Spectrum 6 - 4, 53/58 (1969)
- [15] H.E.Karrer and J.Leach: A quartz resonator pressure transducer: IEEE Trans. On Industrial Electronics and Control, IECI-16 - 1, 44/50 (1969)

- [16] E.Karrer and R.Ward:A low-range quartz resonator pressure transducer:ISA Trans.16, 90/98 (1977)
- [17] W.J.Kass and G.S.Snow : Double-ended tuning fork quartz accelerometer, Proc. 40th Annu. Freq. Control Symp., 230/236 (1986)
- [18] W.C.Albert : Monolithic quartz structure vibrating beam accelerometer, Proc. of the 1994 IEEE Int. Freq. Control Symp., 415/420 (1994)
- [19] J.S.Danel, et al : Application of quartz micromachining to the realization of a pressure sensor, Proc. 1993 IEEE Int. Freq. Control Symp., 587/596 (1993)
- [20] R.W.Ward and E.P.EerNisse : A filled thermal system utilizing a gas density sensing quartz crystal tuning fork, Proc. 39th Annu. Freq. Control Symp., 575/580 (1985)
- [21] 金原 粲: 薄膜の基本技術, 85/90 東京大学出版会 (1987)
- [22] M.Nakazawa, et al : A theoretical study of quartz resonators for chemical sensors, vibrating in C mode, Proc. 1992 IEEE Int. Freq. Control Symp., 610/613 (1992)
- [23] R.Zhou, et al : A chemical sensor with improved selectivity using a modified-electrode QCR, Proc. 1997 IEEE Int. Freq. Control Symp., 56/63 (1997)
- [24] G.Liu, et al: A smart H₂ sensor array of QCMs coated with PdNi alloy of various thicknesses, Proc. 1995 IEEE Int. Freq. Control Symp., 876/878 (1995)
- [25] J.M.Hammond, et al : An acoustic automotive engine oil quality sensor, Proc. 1997 IEEE Int. Freq. Control Symp., 72/80 (1997)
- [26] R.Thalhammer, et al:Viscosity sensor based upon an angular momentum compensated piezoelectric thickness shear sandwich resonator, Proc. 1997 IEEE Int. Freq. Control Symp., 105/113 (1997)
- [27] 岡畑恵雄 : 水晶振動子をマイクロバランスとして利用したDNA センサ, 電気学会論文誌センサ・マイクロマシン部門誌, 116-E-4, 123/126 (1996)
- [28] H.Nanto,T.Kawai,H.Sokooshi: Discrimination of aromas using quartz-resonator gas sensor, Technical Digest of the Sensor Symposium, 225/228 (1992)
- [29] E.P.EerNisse and R.B.Wiggins : A resonator temperature transducer with no activity dips , Proc. 40th Annu. Freq. Control Symp., 216/223 (1986)
- [30] T.Ueda , et al : Temperature sensor using quartz tuning fork resonator, Proc. 40th Annu. Freq. Control Symp., 224/229 (1986)
- [31] 植田, 幸坂, 飯野, 山崎: 音叉振動子を用いた水晶温度センサ, 計測自動制御学会論文集, 23-11, 1117/1122 (1987)

第2章 カセンサとしての水晶振動子の基礎特性

2.1 はじめに

水晶は、振動子として物理的、化学的にきわめて安定な単結晶工業材料で、機械的な振動損失が小さく、周波数の安定度は群を抜いている。1881年にキュリー兄弟により圧電気現象が発見されて以来、水晶はエレクトロニクス分野で広く使用されるようになった。圧電気現象は圧電気直接効果と圧電気逆効果からなり、前者は『誘電体結晶にひずみまたは応力を加えると応力に比例して電気分極を生ずる効果』で、後者は『電界を加えるとひずみまたは応力を生ずる効果』である。また、水晶は主軸（光軸）のまわりで 120° ごとに同じ結晶面が現れる3回対称、副軸（電気軸）のまわりで 180° の2回対称を示す三方晶で、キュリー温度 573°C 以下で α -水晶（安定低温形石英）、これ以上の温度で β -水晶（安定高温形石英）となる。さらに、水晶には旋光性があり、右旋光を示す水晶を右水晶、左旋光を示す水晶を左水晶と呼んでいて、両者は形態や物理的性質が鏡像の関係にある。右水晶や左水晶の完全な形態を示す結晶はまれであるが、その形を 図2-1 に示す。

天然水晶は、不純物の種類や量によって独特の色や光沢があるため、古くから装飾用や宝石として珍重されてきた。しかし、双晶、異物、クラックなどを含むうえ、形状や大きさがまちまちで結晶としての外形も完全なものはまれである。このため、水晶振動子を天然水晶から製作しようとするると、歩留まりが悪くその加工には手数と熟練を要するうえ、含まれている双晶、異物、割れ、気泡などが水晶振動子の電気的特性に悪影響を与える。これらの理由から、工業用には純度が高く形状寸法の揃った人工水晶が使用されるようになった。人工水晶は、19世紀半ばにその研究が始まり、1960年代になって工業用として本格的に使用されるようになった。現在では、人工水晶はオートクレーブと呼ばれる高温（ $350^\circ \sim 400^\circ$ ）高圧（100～2000気圧）容器を用いて、水熱温度差法と呼ばれる再結晶法により育成されている。

水晶振動子は、Q値が高く、切断方位の選択により常温付近で零温度係数が得られ、経年変化が少なく周波数安定性がよいなどの特長をもっている。また、圧電気現象により電

氣的に励振できる電子部品で、この共振周波数は水晶片の切断方位や寸法によって決まる。この水晶振動子は時間や周波数を精密に管理するための機能部品（クロック用水晶発振器、基準周波数源）として、携帯電話、TV、VTR、時計、各種OA機器、精密計測機器など各種の分野で使用されている。

水晶を振動子として使用するための切断の仕方をカットと呼ぶ。カットは、Y軸（機械軸）をその主面に含むXカットグループと、X軸（電気軸）をその主面に含むYカットグループに大別され、それぞれに固有の名称がつけられている。水晶は異方性結晶構造を有するため、弾性スティフネス定数の温度特性が切り出し角によって変化する。1930年代に古賀や Bechmann などにより発見されたATカットは、常温付近での周波数温度特性が比較的フラットである。ATカット水晶振動子の切断方位を 図 2-2 に示す。水晶の振動は厚み振動と輪郭振動に分けられ、厚み振動の周波数は水晶板の厚さのみで定まり外形寸法にはほとんど無関係である。輪郭振動の周波数は水晶板の厚さにほとんど無関係で外形寸法のみによって定まる。水晶振動子を力センサとして用いる場合は、水晶振動子に外力を加えるため周辺部を固定する必要がある。輪郭振動は水晶振動子周辺部が振動しているため

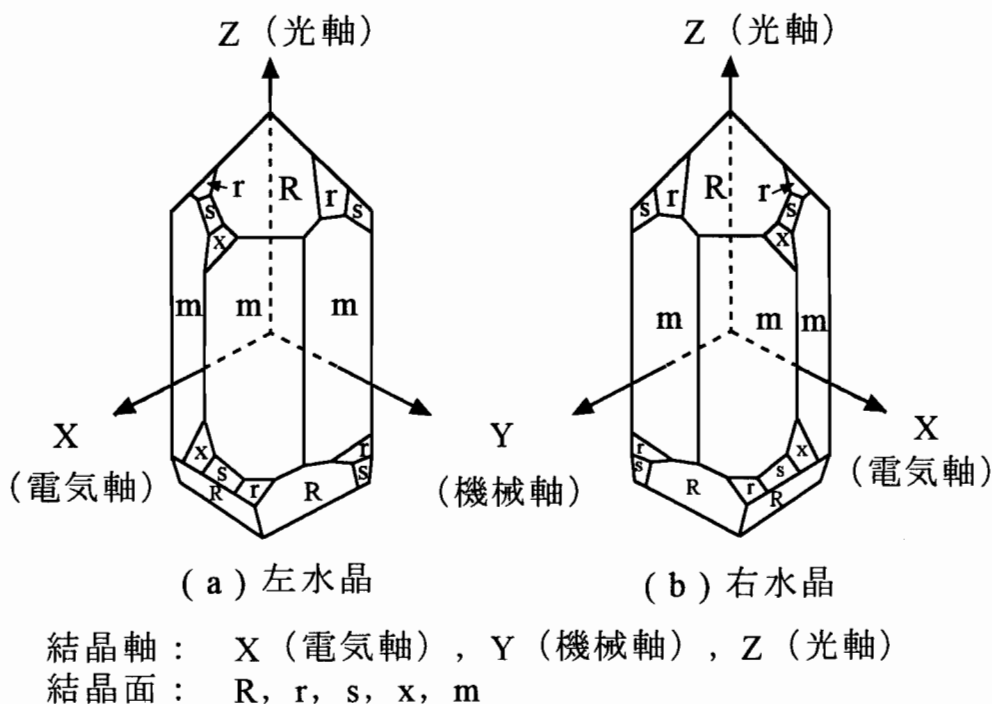


図 2-1 天然水晶の外観と結晶面および結晶軸 [1]

周辺部を固定すると振動が停止するが、厚み振動は振動子主面の中央部分の表裏に蒸着されている電極部に振動エネルギーが集中しているため周辺部を固定しても振動は持続する。振動の種類、振動モード、カットの種類、周波数範囲の関係を表2-1に示す。

力センサとしての水晶振動子には製作が容易で外力の加えやすい形状やフラットな周波数温度特性が要求される。製作の容易な形状として円板と矩形板がある。円板の場合は、その保持や引張力を加えることが難しく、また、圧縮外力を加えるとしても円周上の数点に水晶振動子主面に平行な方向の集中荷重として加わえざるをえないため水晶振動子にクラックが生じやすい。矩形板の場合は適当なホルダに貼付することにより、引張と圧縮両方の外力を比較的容易に加えることができ、また外力を対辺に等分布荷重に近い状態で加えることができるためクラックが生じにくい。ATカット水晶振動子は、周波数の温度特性が常温付近で比較的フラットであるため広く使用されていて入手が容易である。これらのことから、本研究ではATカットで厚み振動の矩形水晶振動子を力センサとして用いることにした。

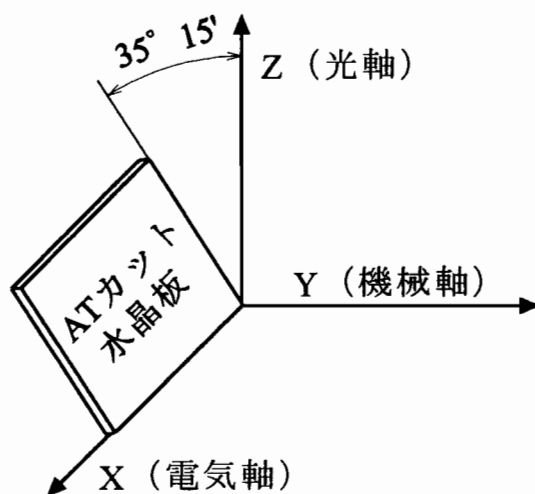
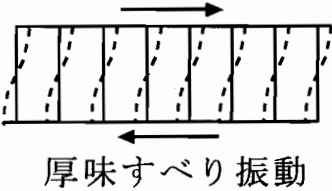
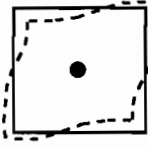

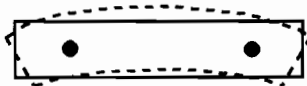


図2-2 ATカット水晶振動子と結晶軸の関係

表 2-1 水晶振動子の振動の種類, 振動モード, カットの種類, 周波数範囲の関係 [2]

振動の種類	振動モード	カットの種類	周波数範囲 MHz	群
厚味振動 (厚さのみ が関係)	 厚味すべり振動	AT カット BT カット Y カット	1 ~ 200 1 ~ 70 0.5 ~ 20	Y カット グループ
輪郭振動 (外形寸法 のみが関係)	 面すべり振動	CTカット DTカット	0.25 ~ 0.7 0.085 ~ 0.3	X カット グループ
	 縦振動	X (-18.5°) カット MT カット X カット	0.06 ~ 0.3 0.05 ~ 0.5 0.04 ~ 0.18	
	 屈曲振動	NTカット X (+5°) カット	0.004 ~ 0.1 0.001 ~ 0.021	

外力が水晶振動子の発振周波数に与える影響に関する研究は多いが, 力センサとしての矩形ATカット水晶振動子に関する基礎特性が十分明らかになっているとはいえない。本章では, 矩形ATカット水晶振動子について, 応力感度, 応力感度の温度特性, 応力感度およびその温度係数と外力の方向の関係, 力センサとしての再現性と精度, 水晶振動子の機械的強度など力センサとしての基礎特性を実験的に明らかにする。

2.2 使用した水晶振動子

力センサとしての水晶振動子の基礎特性を調べるため、周波数温度特性が室温付近ではほぼフラットで外力を加えやすい図 2-3 に示すような AT カット水晶振動子 45 個を用いた。長さ L が 10 mm、幅 W が 8 mm、厚さ D が 0.167 mm と 0.333 mm で、水晶振動子の表裏両面に蒸着された電極は水晶振動子の長手方向の中心線に対して線対称に蒸着されていて、直径 2 mm の円形部分だけが重なっている。水晶振動子の長手方向が X 軸（電気軸）となす角を ψ とし、外力 F が水晶振動子の長手方向に加えられる場合は ψ が外力の方向を意味する。本研究では、外力を水晶振動子の長手方向に加えたので ψ を外力の方向と呼ぶことにする。表 2-2 は、これらの水晶振動子の切り出し角、振動モード、寸法、長手方向（外力の方向） ψ 、試料数を示したものである。これらは基本振動 10 MHz と 3 次オーバートーン 15 MHz で発振する 2 つのグループからなっている。10 MHz で発振する水晶振動子は、長手方向 ψ が 0° 、 32° 、 35° 、 37° のもの各 5 個の計 20 個からなり、15 MHz で発振するものは、 0° 、 32° 、 35° 、 38° 、 55° のもの各 5 個の計 25 個からなっている。

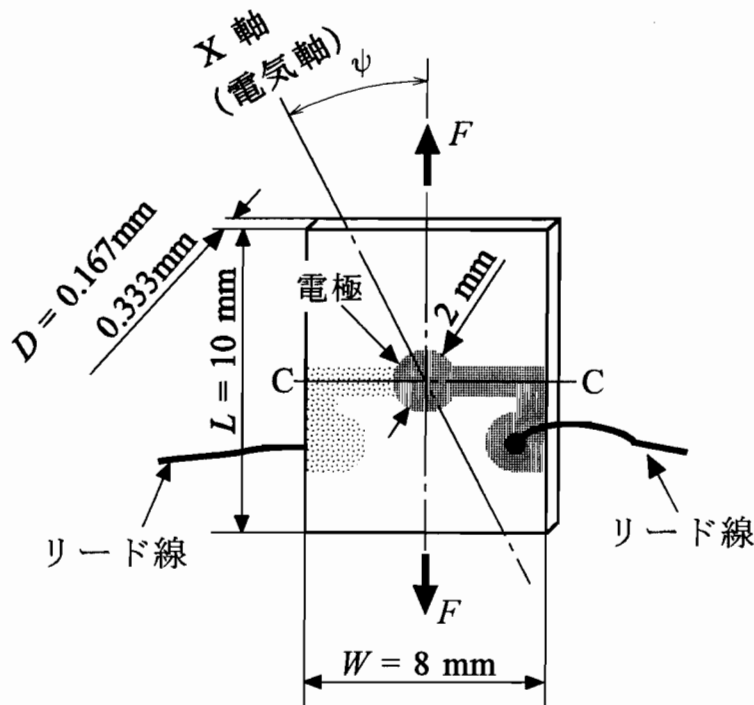


図 2-3 使用した矩形 AT カット水晶振動子

表 2-2 使用した水晶振動子の諸元

共振周波数 f [MHz]	10 (基本振動)				15 (3次オーバートーン)				
切り出し角	- 34° 05' 30" ~ - 34° 12' 30"								
振動モード	厚みすべり振動								
厚さ D [mm]	0.17				0.33				
幅 W [mm]	8								
長さ L [mm]	10								
長辺の方向 (外力の方向) ψ [°]	0	32	35	37	0	32	35	38	55
試料数 [個]	5	5	5	5	5	5	5	5	5

2.3 実験方法

図 2-4 のように、ホルダに放電加工した幅 0.2mm、深さ 1mm の溝に水晶振動子の上下端をはめ込みシアノアクリレート系接着剤で接着した。これを 図 2-5 のように実験槽(恒温恒湿槽)に吊り下げ、板ばねとワイヤを介して分銅加除装置により水晶振動子の長手方向に引張外力を加えた。なお、この図は説明図であり、実際の装置と寸法的な相似関係はない。実験槽の湿度を $45 \pm 5\%$ に保ち、温度を $5 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲で 5°C 間隔で変化させた。それぞれの温度で、分銅加除装置内蔵の 1 個 5 N に相当する分銅 6 個を用いて、引張外力を $0 \sim 30\text{ N}$ の範囲で 5 N ずつ増加させ、その後 0 N まで 5 N ずつ減少させた。各外力での周波数を周波数カウンタにより 1 Hz のオーダまで測定した。この外力を応力 σ に換算すると、基本振動 10 MHz の水晶振動子では厚さが 0.167 mm で幅が 8 mm であるから $0 \sim 22.50\text{ MPa}$ 、3 次オーバートーン 15 MHz の振動子では厚さが 0.333 mm で幅が 8 mm であるから $0 \sim 11.25\text{ MPa}$ となる。なお、図 2-5 には水晶振動子が 1 個だけ描いてあるが、実際には表 2-2 の ψ が同じ各 5 個の水晶振動子を直列に吊り下げて同一雰囲気中で同時に実験した。このため各水晶振動子の初期応力は約 $0.5 \sim 3\text{ MPa}$ となった。

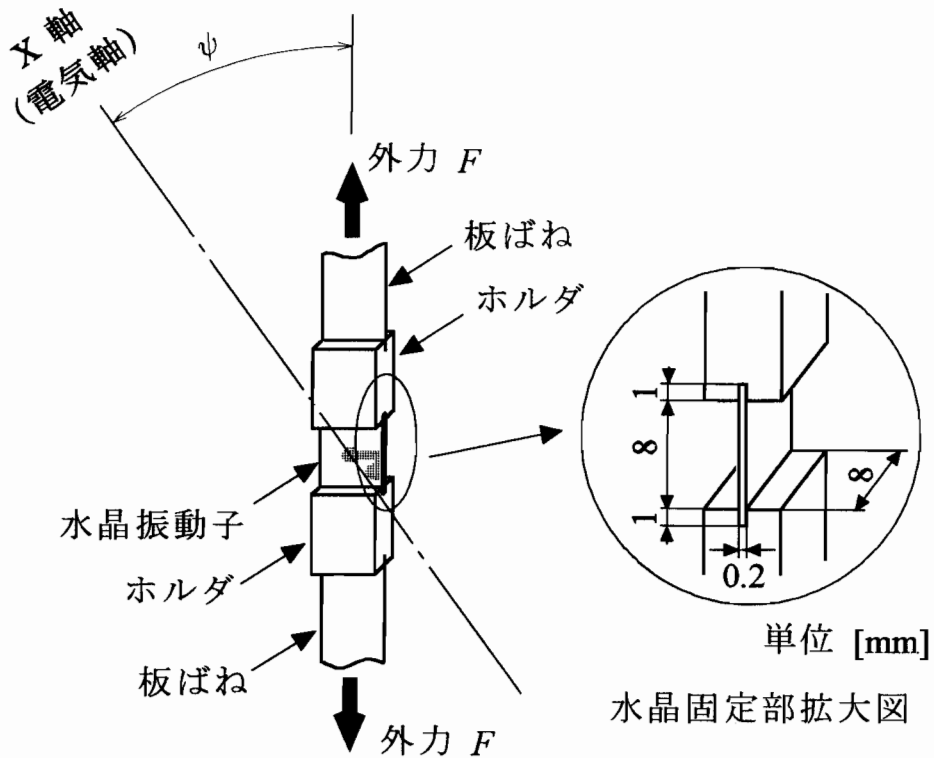


図 2-4 外力を加えるためのホルダに接着された水晶振動子

これらの実験を 3 回繰り返した。図 2-6 に各水晶振動子に関する測定系のブロック図を示す。

実験精度

図 2-5 に示した分銅加除装置内蔵分銅の質量は 0.0001 kg のオーダーまで精密に製作されている。また、実験室の重力加速度として、建設省国土地理院により測定された研究室近くの測定点の値 [3] に実験室の高度補正を行った値 9.7972 ms^{-2} を使用した。水晶振動子にかかる外力は分銅の質量と実験室での重力加速度の積で与えられ、1 個 5 N に相当する分銅による外力の誤差は $\pm 0.001 \text{ N}$ 以下である。外力の方向 ψ の誤差は、水晶振動子の長手方向が結晶軸に対して $\pm 1'$ のオーダーまで精密に製作されているので、大部分が水晶振動子のホルダへのマウント誤差と考えられ、この誤差を $\pm 2^\circ$ 程度以下と推定し

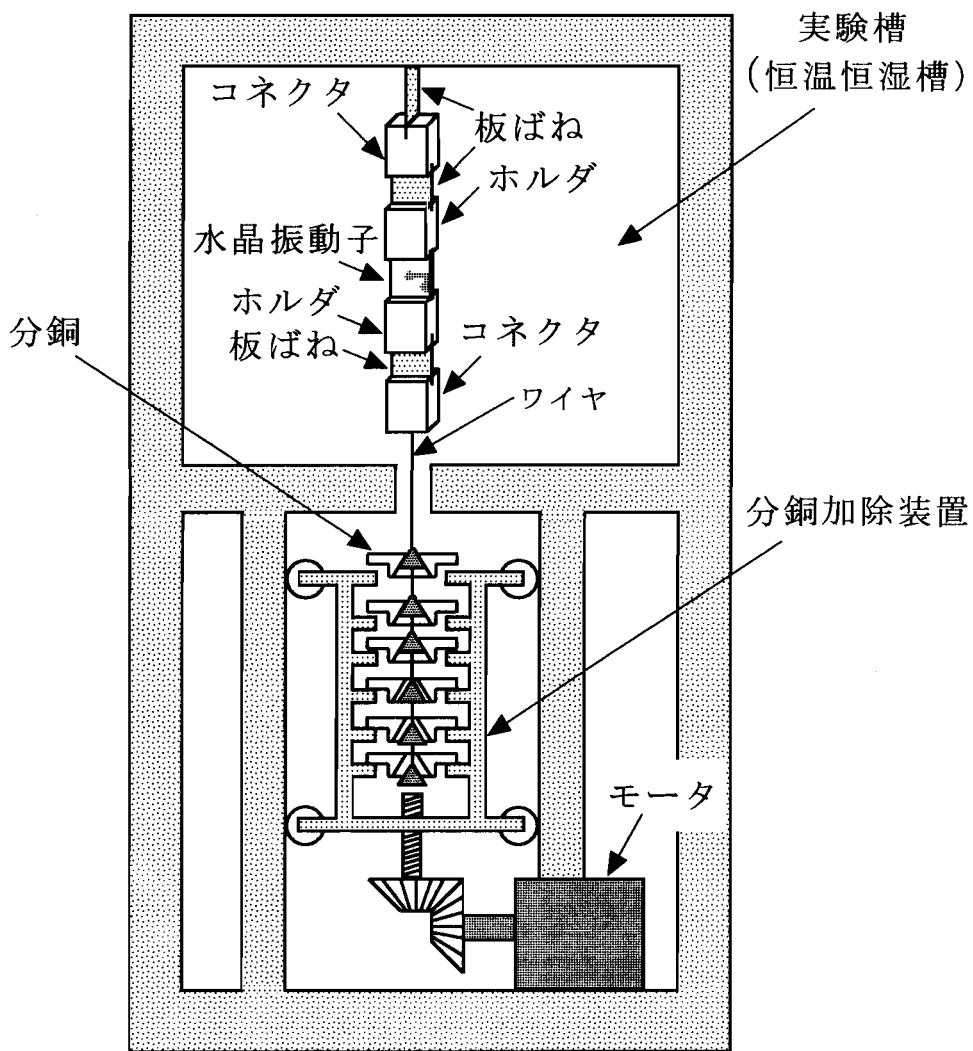


図2-5 実験槽に設置された水晶振動子に外力を加える実験

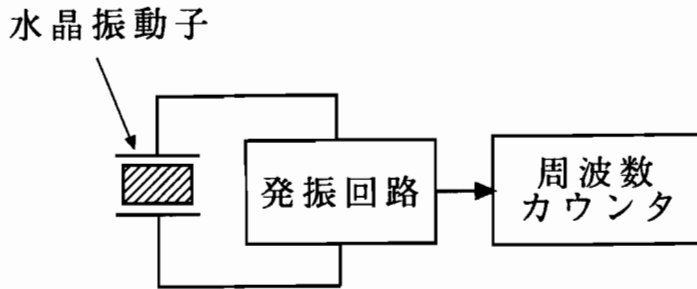


図 2-6 発振周波数の測定系のブロック図

ている。雰囲気温度は、水晶振動子近傍 30 mm 程度の位置に取り付けた 5 個の K 熱電対により測定した。湿度は実験槽の温湿度制御空気の吹き出し口と吸い込み口に取り付けられた熱電対による乾湿球を用いて測定した。水晶振動子の周波数は温度湿度が十分安定してから（温度湿度の設定後 1 時間程度経過後）測定したので、温度湿度の測定誤差はそれぞれ $\pm 1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 5\%$ 程度と推定している。

2.4 応力感度

水晶振動子の厚みすべり振動の周波数 f [Hz] は

$$f = \frac{n}{2D} \sqrt{\frac{c}{\rho}} \dots\dots\dots (1)$$

で表される [1]。ここで、 D は水晶振動子の厚さ [m]、 c は弾性定数 [N m^{-2}]、 ρ は密度 ($2640 \text{ [kg m}^{-3}\text{)]}$ 、 n はオーバートーン次数である。AT カット水晶振動子の場合は $c = 2.93 \times 10^{10} \text{ [N m}^{-2}\text{]}$ であるから

$$f = \frac{1670 n}{D} \text{ [Hz]} \dots\dots\dots (2)$$

となる。このように AT カット水晶振動子の周波数は厚さに反比例しオーバートーン次数に比例する。水晶振動子に外力が加わると、弾性定数、密度、厚さが変化して共振周波数が変化する。外力による周波数変化量は、外力の方向に垂直な断面（図 2-3 の C-C 断面）での垂直応力および共振周波数と近似的に直線関係にある [4][5] ことがわかっている。

感度という用語は、JIS によれば『ある計測器が測定量の変化に感じる度合い。すなわち、ある測定量において、指示量の変化の測定量に対する比。（備考）感度の値を表すのに感度係数、振れ係数の用語が使われることもある。』とある [6]。本論文では、『単位外力あたりの周波数変化量』を力感度 [HzN^{-1}]，『単位応力あたりの周波数変化率』を応力感度 [Pa^{-1}] と定義する。応力感度をこのように定義するのは、厚さやオーバートーン次数の異なる AT カット水晶振動子を統一的に扱うのに都合がよいためである。また、力感度をこのように定義するのは、水晶振動子を力センサとしてロボットフィンガなどに組み込んだ段階では厚さやオーバートーン次数が変化しないことと、外力が入力で周波数変化量が出力であることから、実用上は力感度が応力感度より便利なためである。使用した水晶振動子は、厚さ 0.333 mm で 3 次オーバートーン 15 MHz と、厚さ 0.167 mm で基本振動 10 MHz の 2 種類である。それぞれの厚さとオーバートーン次数を (2) 式に代入しても前者の共振周波数が後者の 1.5 倍となることがわかる。また、AT カット水晶振動子の周波数変化量が垂直応力と共振周波数に比例すること、前者の水晶振動子の厚さが後者の 2 倍であるため同じ大きさの外力に対して前者の応力は後者の 0.5 倍になること、前者の周波数が後者の 1.5 倍であることから、同じ大きさの外力に対して、前者の周波数変化量は後者の 0.75 倍となる。このことから力感度は水晶振動子の断面形状やオーバートーン次数により異なることがわかる。一方、同じ大きさの外力に対して、前者の周波数と周波数変化量がそれぞれ後者の 1.5 倍と 0.75 倍であるから前者の周波数変化率は後者の 0.5 倍となり、前者の同一外力に対する応力は後者の 0.5 倍であるから、応力感度は前者と後者と等しくなる。このように、力感度は断面形状やオーバートーン次数により異なるが、応力感度はそれらによらないので、水晶振動子を統一的に扱うには応力感度を使用する方が便利である。本章ではこの応力感度について検討を加える。

ここでは 図 2-3 に示す矩形 AT カット水晶振動子に引張外力 F を加えた場合について、外力の方向に垂直な C-C 断面での単位応力あたりの周波数変化率すなわち応力感度について検討する。外力 F による平均垂直応力 σ （引張で正、圧縮で負とする）は

$$\sigma = \frac{F}{WD} \dots\dots\dots (3)$$

となる。AT カット水晶振動子の周波数 f は外力の方向 ψ に垂直な水晶振動子断面での垂直応力とほぼ直線関係にあるから、 f を応力 σ に関して次式のように近似する。

$$f = f_0 - B \sigma \dots\dots\dots (4)$$

f_0 は外力を加えないときの周波数, B は単位応力あたりの周波数変化量である. ここで

$$\delta = \frac{f - f_0}{f_0} \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = \frac{B}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0 \sigma} \dots\dots\dots (6)$$

とにおいて(4)式を書き換えると

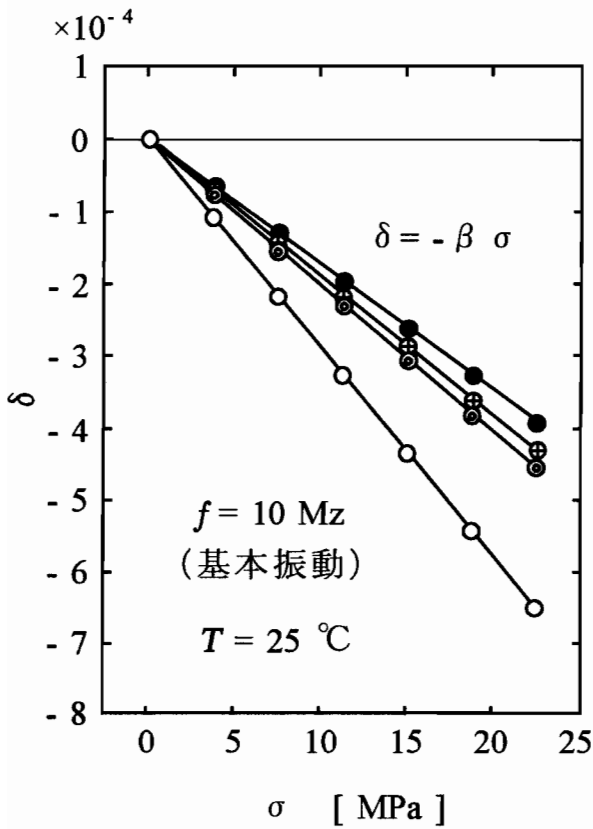
$$\delta = -\beta \sigma \dots\dots\dots (7)$$

となる. δ は外力 F による周波数変化率で, β は応力感度である. β が既知であれば, f_0 と f の測定値から(5)式により δ を求め, この δ を(7)式に代入して応力 σ を求めることができる. また, この σ を(3)式に代入すれば, 水晶振動子の寸法 W と D が既知であるから, 外力 F を求めることができる.

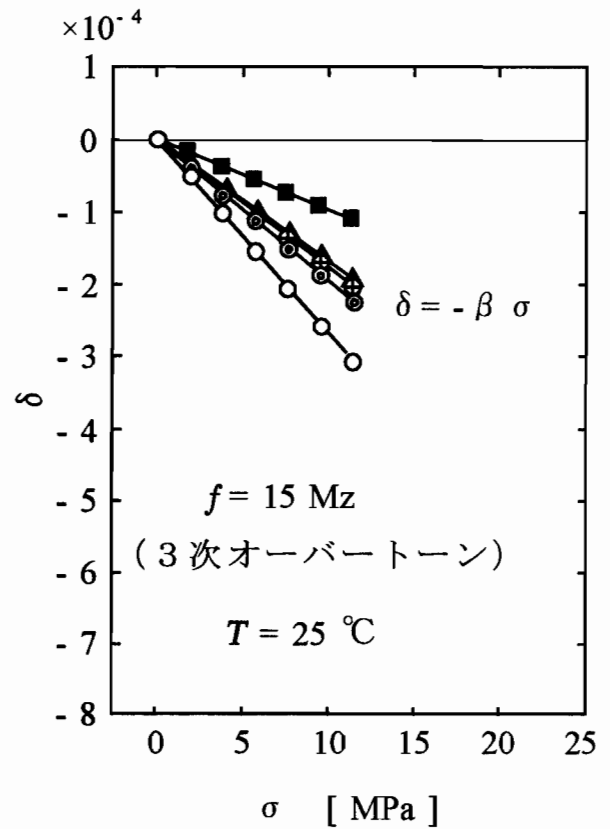
ここでは, (7)式を用いて δ を σ で回帰して応力感度 β を実験的に求めた. まず, 各外力 F を(3)式により垂直応力 σ に換算した. つぎに, 各温度, 各実験回ごとに, f_0 と各外力での周波数 f から(5)式により周波数変化率 δ を求めた. これらの δ と上で換算した σ を(7)式により回帰して, 応力感度 β と精密度を評価する残差の標準偏差 S_δ を求めた. 図 2-7 は, 表 2-2 の全ての水晶振動子に関する実験結果のうち, 各 ψ の水晶振動子から 1 個ずつ抽出し, これらの水晶振動子の 25 °C での(7)式の関係を描いたものである. (A) は基本振動 10 MHz の水晶振動子, (B) は 3 次オーバートーン 15 MHz の水晶振動子に関する結果である. (A), (B)とも 図 2-5 に示した 30 N までの分銅加除装置を使用したもので, (A)では水晶振動子の厚さが 0.167 mm であるから, 初期応力を無視して, 22.50 MPa までの応力に対して, (B)では 0.333 mm であるから 11.25 MPa までの応力に対して実験値が得られた. ○, ◎, ⊕, ●, ▲, ■ の各印はそれぞれ ψ が 0°, 32°, 35°, 37°, 38°, 55° に対する実験値, 実線は回帰線で, 回帰線の傾きが応力感度に相当している. 周波数変化率 δ と応力 σ は, 回帰による残差の標準偏差 S_δ が 1×10^{-6} 程度以下の精密度で直線関係にあることがわかる. 各水晶振動子の記号と外力の方向 ψ の関係および各 ψ に対する β と S_δ の値が各図の上部に示してある. これらの 9 個の水晶振動子については, 他の 9 点の温度でも, 回帰による残差の標準偏差 S_δ が 1×10^{-6} 程度以下となり, 他の実験

記号	$\psi [^\circ]$	$\beta \times 10^{11}$ [Pa ⁻¹]	$S_\delta \times 10^7$
○	0	2.89	0.85
⊙	32	2.02	3.62
⊕	35	1.92	1.57
●	37	1.74	1.27

記号	$\psi [^\circ]$	$\beta \times 10^{11}$ [Pa ⁻¹]	$S_\delta \times 10^7$
○	0	2.76	1.31
⊙	32	2.00	3.69
⊕	35	1.82	0.46
▲	38	1.72	1.83
■	55	1.02	1.88



(A)



(B)

図2-7 25°Cでの周波数変化率 δ と応力 σ の関係

(A) 基本振動 10MHz で振動している水晶振動子に関する実験結果

(B) 3次オーバートーン 15MHz で振動している水晶振動子に関する実験結果

回の結果もほぼ同様となった。また、他の 36 個の水晶振動子についてもこれらとほぼ同様の結果が得られた。

2.5 応力感度の温度特性

(6)式で定義した応力感度 β は、(7)式に示すように周波数変化率 δ と応力 σ を関係づける量である。円板状ATカット水晶振動子の外周に直径方向の圧縮力を加えたとき、その応力感度 β に相当する量が近似的に温度 T と直線関係にあることが報告されている [7] [8]。ここでは、矩形ATカット水晶振動子に引張応力を加えた場合にもこの関係が成立すると仮定して、応力感度 β と温度 T の関係を次式のように表す。

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 T \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 β_0 は $T = 0^\circ\text{C}$ での応力感度、 β_1 は応力感度の温度係数である。

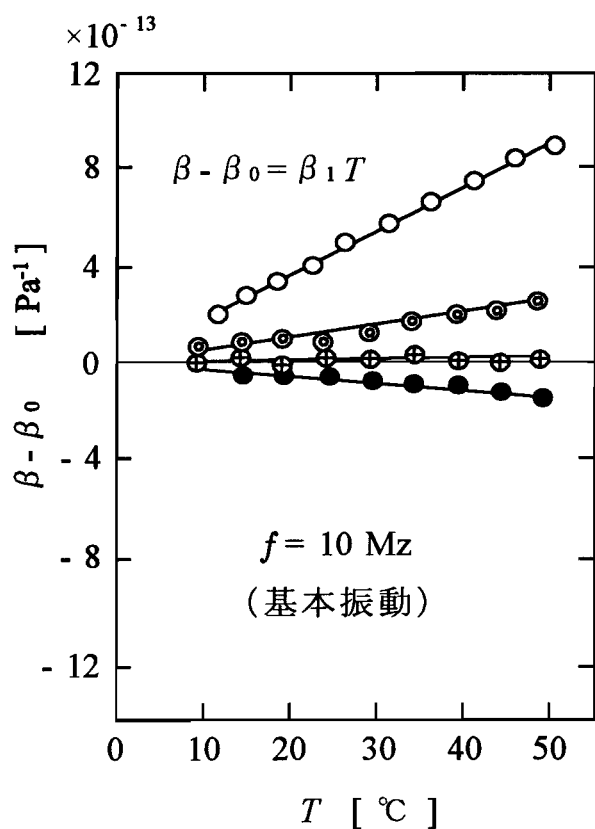
この β_0 、 β_1 を求める。前節で、表 2-2 の 45 個の水晶振動子について、 $5\sim 50^\circ\text{C}$ の範囲での 10 点の温度における応力感度 β を 3 個（各実験を 3 回実施し、各実験回で 1 個の値が求まる）ずつ合計 1350 個求めた。これらの β を各水晶振動子の各実験回ごとに、(8)式により温度 T で回帰し、 β_0 、 β_1 および精密度を評価する残差の標準偏差 S_β をそれぞれ 135 個求めた。図 2-8 は、図 2-7 と同一の水晶振動子について、温度変化による応力感度の変化量 $\beta - \beta_0$ を示したもので、(A) は基本振動 10 MHz の水晶振動子、(B) は 3 次オーバートーン 15 MHz の水晶振動子に関するものである。○、◎、⊕、●、▲、■ の各印は、図 2-7 と同じく ψ がそれぞれ 0° 、 32° 、 35° 、 37° 、 38° 、 55° に対する実験値である。実線は(8)式を変形した

$$\beta - \beta_0 = \beta_1 T \quad \dots\dots\dots (9)$$

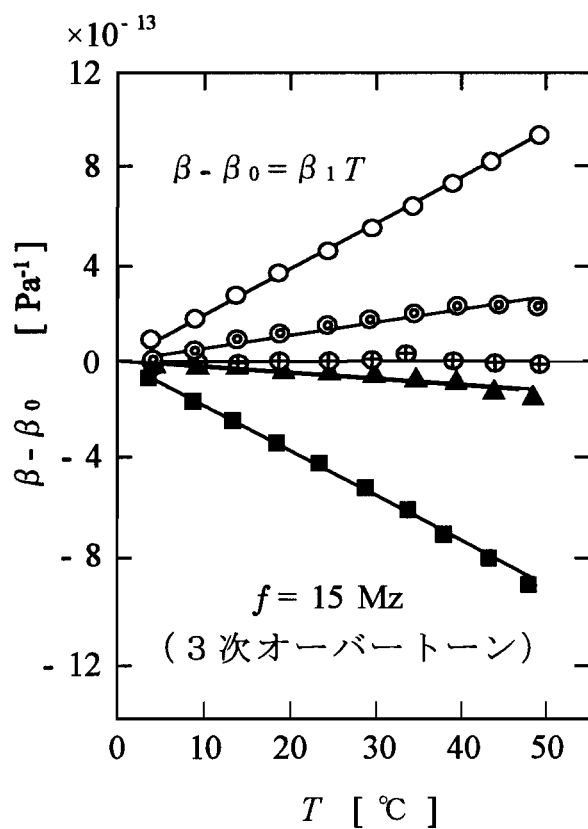
の回帰線で、回帰線の傾きが応力感度の温度係数 β_1 に相当している。また、残差の標準偏差 S_β は応力感度 β_0 の $1/600\sim 1/4000$ 程度となっている。これらの水晶振動子の他の実験回の結果および他の 36 個の水晶振動子についてもほぼ同様の結果となった。以上の結果により、矩形ATカット水晶振動子に関しても、引張応力に対して(8)式の関係が妥当であることが明らかになった。

記号	$\psi [^\circ]$	$\beta_0 \times 10^{11}$ [Pa ⁻¹]	$\beta_1 \times 10^{14}$ [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	$S_\beta \times 10^{14}$ [Pa ⁻¹]
○	0	2.85	1.73	1.10
⊙	32	2.01	0.46	1.45
⊕	35	1.92	0.01	1.20
●	37	1.75	-0.28	1.88

記号	$\psi [^\circ]$	$\beta_0 \times 10^{11}$ [Pa ⁻¹]	$\beta_1 \times 10^{14}$ [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	$S_\beta \times 10^{14}$ [Pa ⁻¹]
○	0	2.71	1.87	0.64
⊙	32	1.99	0.54	1.78
⊕	35	1.82	0.02	1.18
▲	38	1.73	-0.23	1.14
■	55	1.06	-1.82	1.65



(A)



(B)

図2-8 応力感度 β の温度特性

(A) 基本振動 10MHz で振動している水晶振動子に関する実験結果

(B) 3次オーバートーンで 15MHz で振動している水晶振動子に関する実験結果

2.6 応力感度およびその温度係数と外力の方向の関係

円板状ATカット水晶振動子の直径方向に圧縮力を加えた場合、前節(8)式の $T = 0^\circ\text{C}$ での応力感度 β_0 とその温度係数 β_1 は外力の方向 ψ に関して

$$\beta_0 = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_1 = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi \quad \dots\dots\dots (11)$$

のように表せることが報告されている [8]。ここでは、矩形ATカット水晶振動子に引張外力を加えた場合にもこの関係が成立すると仮定する。これらの関係が成り立てば(11)式より外力の方向 ψ が

$$\cos 2\psi = -\frac{\nu_0}{\nu_1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

の関係を満たすとき、応力感度の温度係数 β_1 は0となり、(8)、(10)式より応力感度 β は β_0 と等しく

$$\beta = \beta_0 = \mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。このように、矩形ATカット水晶振動子に引張外力を加えた場合にも(10)、(11)式の関係が成立すると仮定すると、矩形ATカット水晶振動子による力センサの応力感度やその温度係数は、(10)、(11)式の係数 μ_0 、 μ_1 、 ν_0 、 ν_1 の値があらかじめわかっているならば、(8)、(10)、(11)式を用いて外力の方向 ψ と温度 T から計算できることになる。ここでは、これらの係数の値を前節の結果から求める。

前節で求めたそれぞれ 135 個の β_0 と β_1 の値を、(10)、(11)式により外力の方向 ψ で回帰し、 μ_0 、 μ_1 、精密度を評価する残差の標準偏差 S_{β_0} 、および、 ν_0 、 ν_1 、残差の標準偏差 S_{β_1} を求めた。これらを表 2-3 に示す。(A) は基本振動 10 MHz の水晶振動子 20 個の 3 回の実験による各 60 個の β_0 と β_1 から求めたもの、(B) は 3 次オーバートーン 15 MHz の水晶振動子 25 個の 3 回の実験による各 75 個の β_0 と β_1 から求めたもの、(C) は両方合わせた各 135 個の β_0 と β_1 から求めたものである。図 2-9 と 図 2-10 はこれらの関係を示したもので、●印は前項で求めた β_0 と β_1 の値、実線は(10)、(11)式による回帰線である。各図の上側が β_0 で左側の縦軸にこの値が目盛ってある。下側は β_1 で右側の縦軸

表2-3 回帰により求めた(10)式と(11)式の各係数の値と残差の標準偏差

(A) 基本振動 10 MHz で振動している水晶振動子 20 個から求めた値

$\beta_0 = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi \dots\dots (10)$		$\beta_1 = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi \dots\dots (11)$	
μ_0 [Pa ⁻¹]	13.7×10^{-12}	ν_0 [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	-9.7×10^{-15}
μ_1 [Pa ⁻¹]	14.2×10^{-12}	ν_1 [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	29.1×10^{-15}
S_{β_0} [Pa ⁻¹]	0.5×10^{-12}	S_{β_1} [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	1.5×10^{-15}

(B) 3次オーバートーン 15 MHz で振動している水晶振動子 25 個から求めた値

$\beta_0 = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi \dots\dots (10)$		$\beta_1 = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi \dots\dots (11)$	
μ_0 [Pa ⁻¹]	14.2×10^{-12}	ν_0 [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	-10.2×10^{-15}
μ_1 [Pa ⁻¹]	12.6×10^{-12}	ν_1 [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	27.6×10^{-15}
S_{β_0} [Pa ⁻¹]	0.5×10^{-12}	S_{β_1} [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	3.3×10^{-15}

(C) 基本振動 10 MHz で振動している水晶振動子 20 個と 3次オーバートーン 15 MHz で振動している水晶振動子 25 個の合計 45 個から求めた値

$\beta_0 = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi \dots\dots (10)$		$\beta_1 = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi \dots\dots (11)$	
μ_0 [Pa ⁻¹]	14.1×10^{-12}	ν_0 [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	-9.9×10^{-15}
μ_1 [Pa ⁻¹]	13.1×10^{-12}	ν_1 [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	28.4×10^{-15}
S_{β_0} [Pa ⁻¹]	0.6×10^{-12}	S_{β_1} [Pa ⁻¹ K ⁻¹]	2.8×10^{-15}

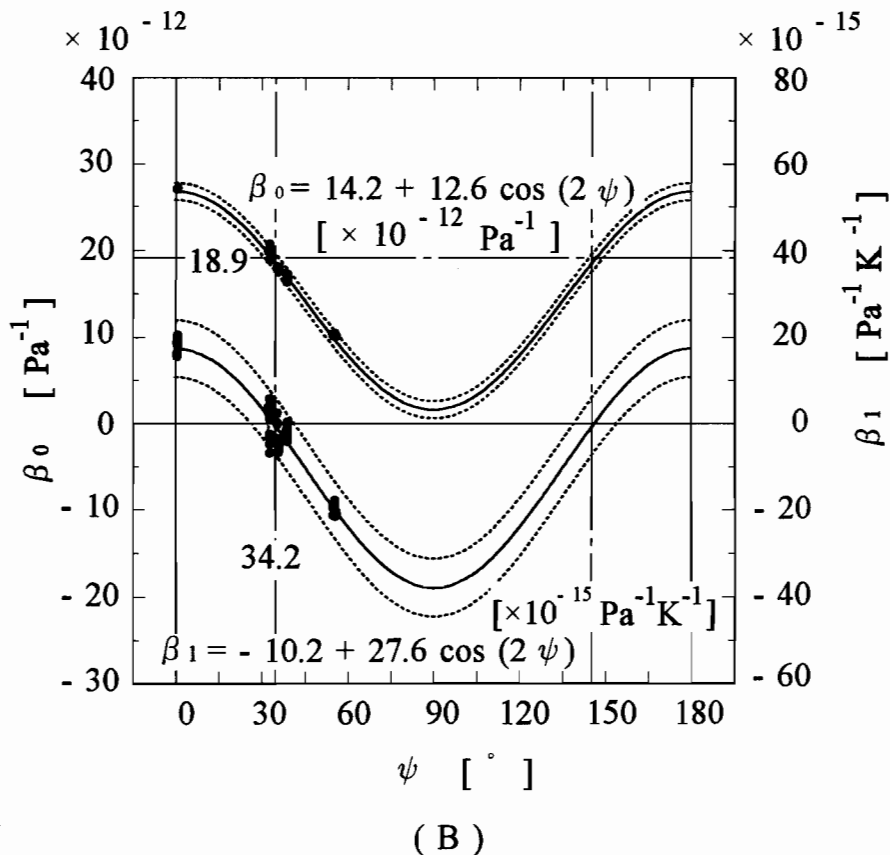
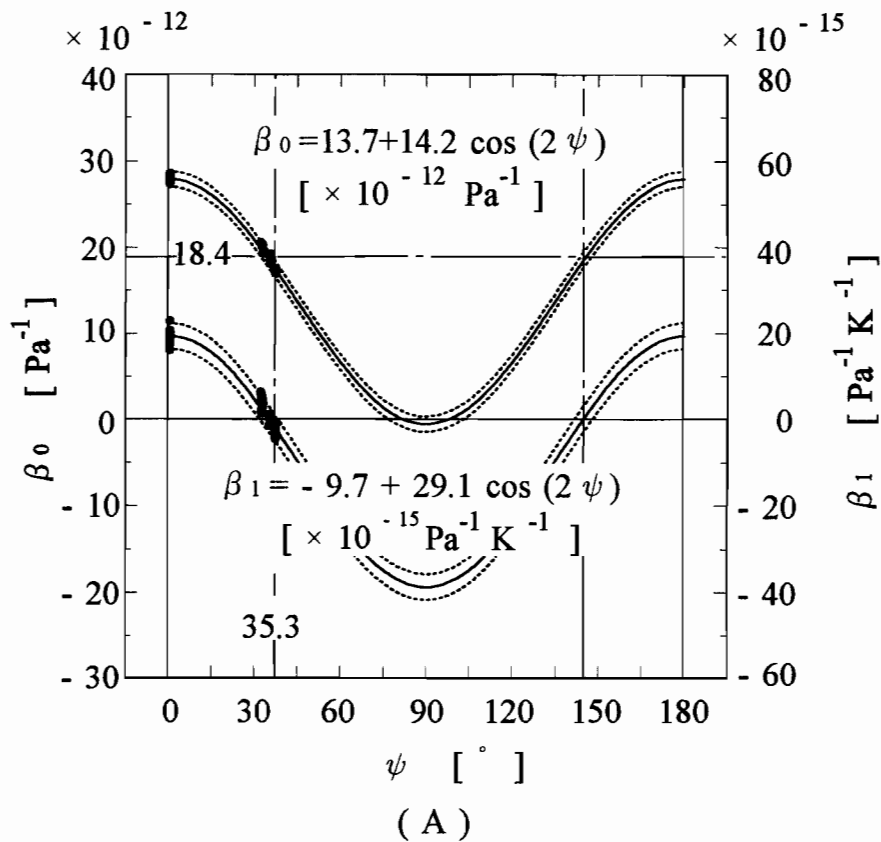


図2-9 応力感度 β_0 およびその温度係数 β_1 と外力の方向 ψ の関係
 (A) 基本振動 10MHz で振動している水晶振動子に関する結果
 (B) 3次オーバートーン 15MHz で発振している水晶振動子に関する結果

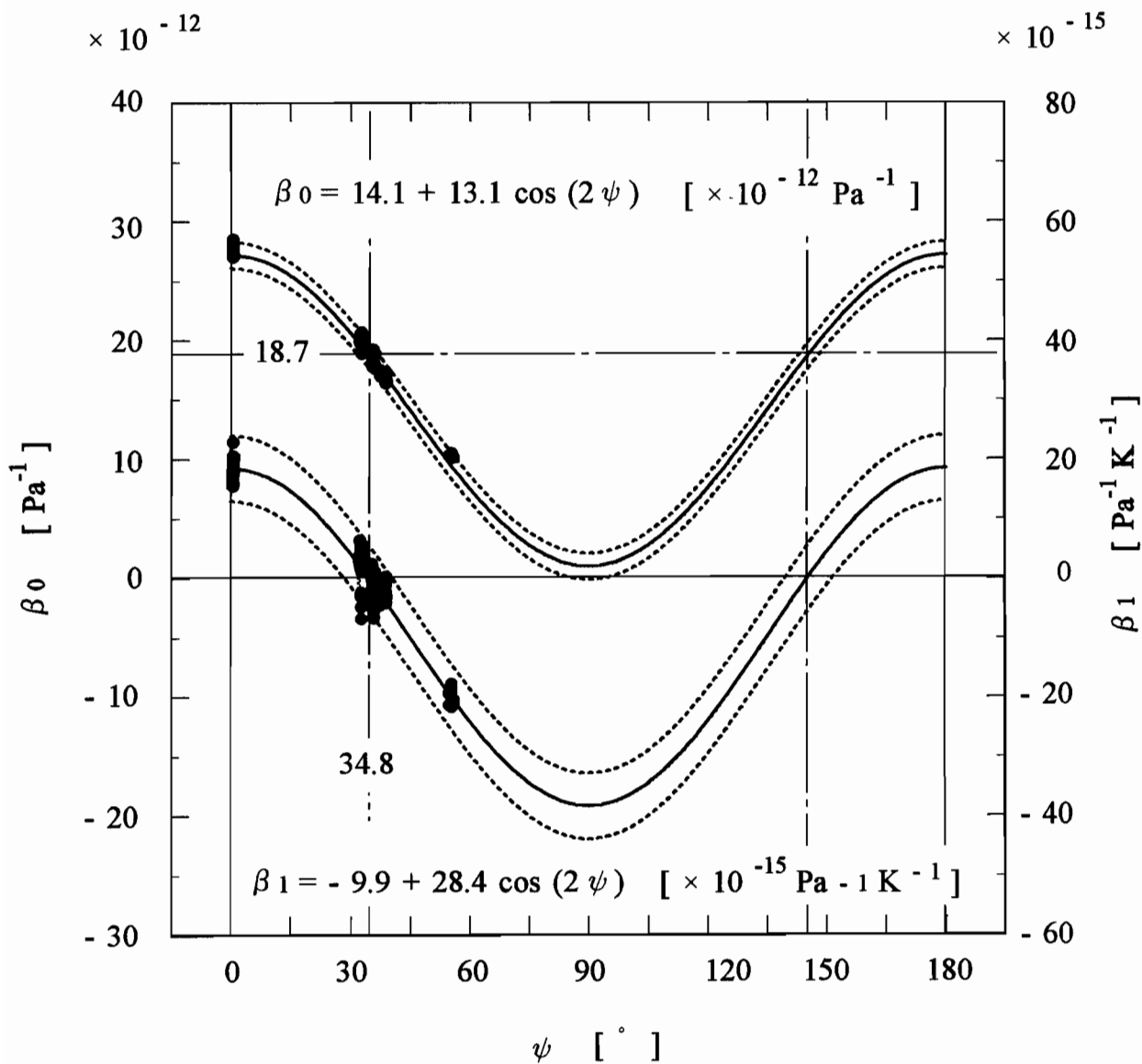


図2-10 応力感度 β_0 およびその温度係数 β_1 と外力の方向 ψ の関係
 (基本振動 10MHz で振動している水晶振動子20個と3次オーバートーン
 15MHz で振動している水晶振動子25個の合計45個に関する実験結果)

にこの値が目盛ってある。図 2-9 (A) は基本振動 10 MHz の水晶振動子 20 個による 3 回の実験から得たそれぞれ 60 個の β_0 と β_1 を回帰した結果である。(B) は 3 次オーバートーン 15 MHz の水晶振動子 25 個による 3 回の実験から得たそれぞれ 75 個の β_0 と β_1 を回帰した結果である。図 2-10 は両方合わせたそれぞれ 135 個の β_0 と β_1 を回帰した結果である。これらの図より、応力感度の温度係数 β_1 が 0 となる ψ は約 35° であることがわかる。また、これらの図と (13) 式から、このときの応力感度 β は β_0 に等しく、約 $19 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ となることがわかる。なお、これらの図の破線は β_0 と β_1 の 95% 信頼区間である $\pm 2 S_{\beta_0}$ と $\pm 2 S_{\beta_1}$ の範囲である。これより矩形 AT カット水晶振動子の場合にも (10), (11) 式の関係が妥当であると考えられる。これらの図は C. R. Dauwalter の結果 [8] や実用性を考慮して、 ψ の実験範囲 $0 \sim 55^\circ$ を越えて $0 \sim 180^\circ$ の範囲に渡って示してある。

2.7 カセンサとしての水晶振動子の再現性と精度

2.3 節で、基本振動 10 MHz で振動している水晶振動子 20 個と 3 次オーバートーン 15 MHz で振動している水晶振動子 25 個の合計 45 個の水晶振動子について、10 点の温度で外力を加除し、各状態での周波数を測定した。以上の実験を 3 回行った。2.4 節では、これらの測定結果を用いて、(7) 式により、周波数変化率 δ を応力 σ で回帰して、応力感度 β と残差の標準偏差 S_δ を 1350 個ずつ求めた。

再現性

再現性は、JIS によれば『同一の方法で同一の測定対象を、測定者、装置、測定場所、測定時期のすべて、又はいずれかが異なった条件で測定した場合、個々の測定値が一致する性質又は度合い。』と定義されている [9]。ここでは各水晶振動子について、同一温度での測定時期の異なる 3 回の実験から得た 3 個の応力感度 β の最大値と最小値の差 $\Delta\beta$ を求め、これと 3 個の応力感度の平均値 β_{mean} の比

$$R = \frac{\Delta\beta}{\beta_{mean}} \quad \left(= \frac{\Delta\beta \sigma}{\beta_{mean} \sigma} = \frac{\Delta\delta}{\delta_{mean}} \right) \dots\dots\dots (14)$$

により再現性を評価した。45 個の水晶振動子について 10 点の温度で合計 450 個の R を求めた結果、それらの平均値が 1.8×10^{-3} 、標準偏差が 1.6×10^{-3} となった。

精度

JISによれば、精度は『計測器が表す値又は測定結果の正確さと精密さを含めた総合的な良さ。』、正確さは『かたよりの小さい程度。（備考）推定したかたよりの限界の値で表した値を正確度、その真の値に対する比を正確率という。』、精密さは『ばらつきの小さい程度。（備考）ばらつきを標準偏差又はその指定した倍数で表した値を精密度、その母平均又はその推定値に対する比を精密率という。』と定義されているが、その解説で『精度は実際の計測器で相対精度又は相対誤差でいい表す場合が多く、それが一体読み値に対していうのか、フルスケールに対していうのかが問題になる。また、ばらつきの限界も何 σ にとるかが問題になる。このような実際面との接点また（ σ を幾つに取るかの）具体的表現法は、測定対象、測定方法の性質から考え個別に定めるべきである。』とある [10]。この解説にしたがって、ここでは、精度を『対象としている力センサについて、そのセンサで測定できる最小の量をそのセンサで安全に測定できる最大の量で割った値』、測定できる最小の量を『(7)式により、周波数変化率 δ を応力 σ で回帰したときの、残差の標準偏差 S_δ の2倍を応力感度 β_{mean} で割った値』、安全に測定できる最大の量を『水晶振動子の破断強さ（次節参照）の15%にあたる応力（22.5 MPa） σ_m 』と定義する。応力感度の温度依存性は2.6節の方法や次章で述べる差動法により改善できるものとし、ここでの精度には含めていない。

同一水晶振動子に対する同一温度での各実験回ごとに求めた3個の残差の標準偏差 S_δ の最大値を $S_{\delta m}$ として、

$$P = \frac{2 S_{\delta m}}{\beta_{mean} \sigma_m} \dots\dots\dots (15)$$

とおき、この P によりフルスケールに対する精度を評価した。45個の水晶振動子について、450個の P を求めた結果、平均値が 2.6×10^{-3} 、標準偏差が 2.7×10^{-3} となった。

(14)式の R と(15)式の P を併せたものを新たに総合精度 RP とするならば、誤差伝搬の法則を考慮して

$$RP = \sqrt{R^2 + P^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{\beta_{mean}}\right)^2 + \left(\frac{2 S_{\delta m}}{\beta_{mean} \sigma_m}\right)^2} \dots\dots\dots (16)$$

となる。この RP を45個の水晶振動子について10点の温度で合計450個求めた結果、これらの平均値が 3.0×10^{-3} で、標準偏差が 3.5×10^{-3} となった。

2.8 水晶振動子の機械的強度

図2-3 に示した寸法で、ATカット、発振周波数が 10 ± 0.05 MHz の基本振動、長辺と電気軸のなす角（外力の方向） ψ が力感度の温度特性のフラットな $35^\circ \pm 1^\circ$ の水晶振動子について、機械的強度を調べた。

2.8.1 水晶振動子の破断強さ

図2-11 は、図2-4 のようにホルダに固定された水晶振動子に外力を加える方法を示したもので、水晶振動子が破断するまで載荷台上に 1 kg の分銅を 1 個ずつ増加させていった。3 個の水晶振動子について実験した結果、3 個とも 1 kg の分銅 21 個を搭載したとき破断した。したがって、破断強さは 1 kg の分銅 20 個搭載時の応力と 21 個搭載時の応力との間の応力値と考えられ、この値は、載荷台の重量 3 N を考慮すると、149~157 MPa となる。一方、E. P. Eernisse らは、ATカット水晶振動子の Y 軸方向の破断強さが実験的に 140 ~ 170 MPa であることを報告しているが [11]、今回の結果はこれと同程度の値となった。

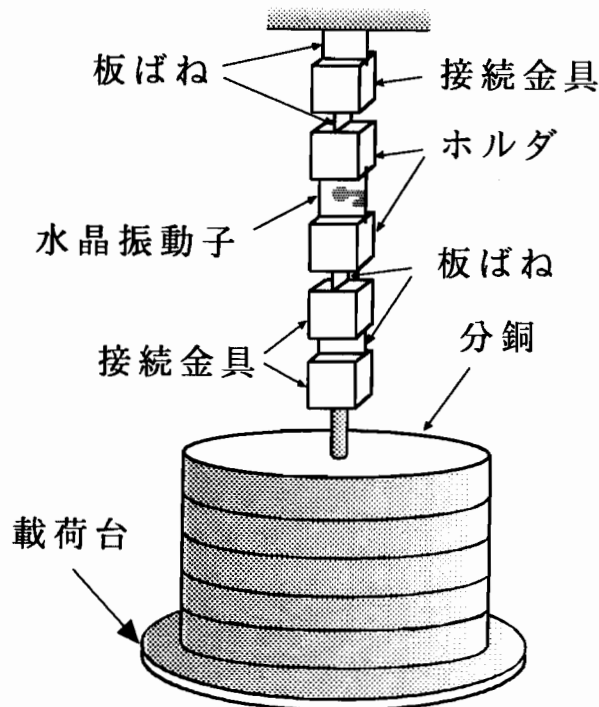


図2-11 破断強さを調べる実験

2.8.2 ロボットの指に装着された水晶振動子の静荷重に対する強度

指は力学的に片持はりと考えられる。水晶振動子をロボットの指に相当する片持はりに装着して、この水晶振動子の静荷重に対する機械的強度を調べた。以後この片持梁を指と称することにする。図2-12のように、指の中立面から5.5 mmの対称な位置4カ所に幅0.2 mm、深さ1 mmの溝を放電加工し、これらの溝に2個の水晶振動子の両端をはめ

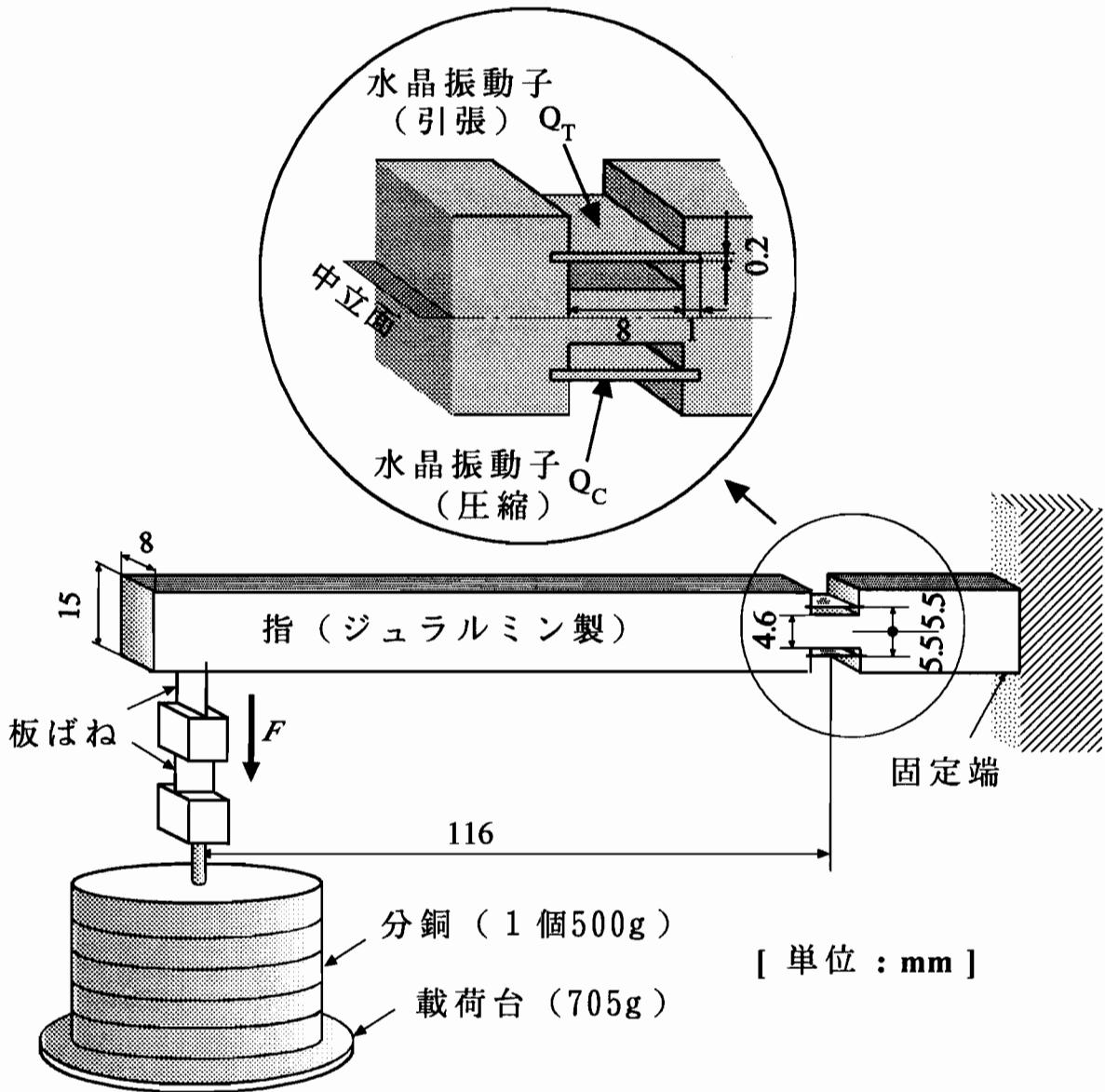
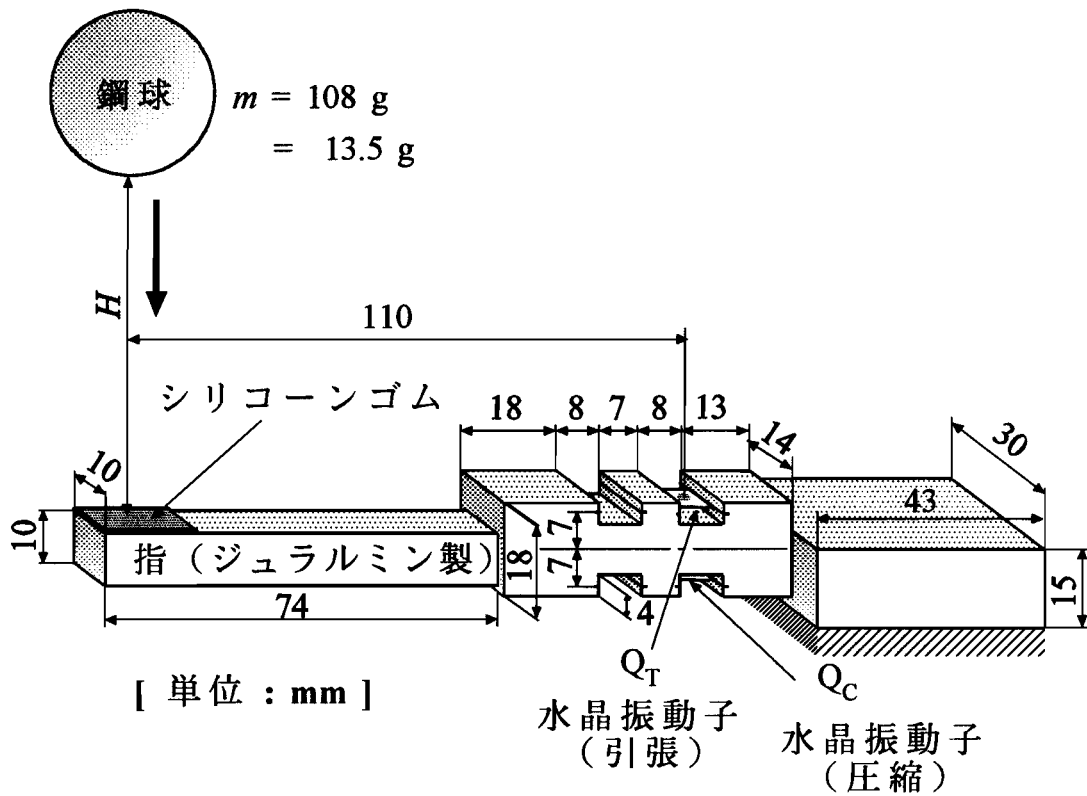


図2-12 指に装着された水晶振動子の静荷重に対する強度を調べる実験

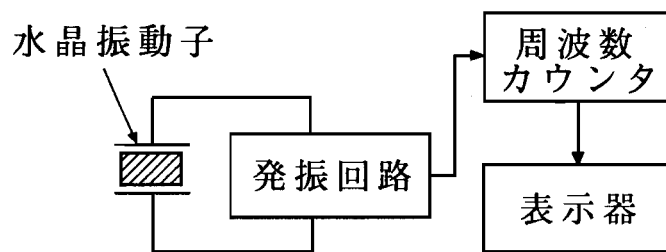
込みシアノアクリレート系接着材で接着した。水晶振動子中央部から指の軸線方向に 116 mm 離れた位置に 705 g の載荷台を装着し、水晶振動子が破損するまで 500 g の分銅を 1 個ずつ載荷していき、水晶振動子 Q_T に引張、 Q_C に圧縮の静荷重を加えた。引張と圧縮それぞれ 2 個の水晶振動子について実験した結果、引張側では 2 個とも分銅 3 個を載荷したとき、圧縮側では 6 個と 7 個の分銅を載荷したとき破損した。これらを 4 章で述べる方法を用いて水晶振動子の応力に換算すると、引張応力が 73~95 MPa、圧縮応力が 138~181 MPa となる。引張側での値が前項で求めた破断強さ 149~157 MPa より小さいのは、指に装着された場合は曲げの影響を受けるためと推測している。以上より水晶振動子は上記程度の大きな静荷重にまで耐えることができ、静荷重に対する強度の面でロボットセンサとして使用可能であると考えられる。

2.8.3 ロボットの指に装着された水晶振動子の衝撃荷重に対する強度

ここでは指（片持梁）に装着された水晶振動子の衝撃荷重に対する強度を調べた。図 2-1 3 (A) は本来 2 対の水晶振動子を装着して使用するジュラルミン製の指であるが、ここでは指の固定端側の装着部に 1 対のみの水晶振動子を装着し、水晶振動子中心部から指の軸線方向に 110 mm 程度離れた指の先端部に厚さ 1mm のシリコンゴムシートを貼付し、この部位に質量 m が 108 g の鋼球を高さ H (10mm ずつ増加させる) から自然落下により衝突させ、水晶振動子 Q_T に引張、 Q_C に圧縮の衝撃荷重を加えた。引張、圧縮とも各 2 個の水晶振動子について実験した結果、引張側では H が 0.295 m (衝突エネルギーに換算すると 0.31 Nm) と 0.325 m (0.34 Nm) のとき破損し、圧縮側では 0.425 m (0.45 Nm) と 0.455 m (0.48 Nm) のとき破損した。つぎに引張、圧縮とも各 2 個の水晶振動子について、シリコンゴムシートを剥がして 108 g の鋼球を直接衝突させた結果、圧縮では H が 0.285 m (0.30 Nm) と 0.295 m (0.31 Nm) のとき破損し、引張では 0.195 m (0.21 Nm) と 0.205 m (0.22 Nm) のとき破損した。図 2-1 3 (B) は測定系のブロック図で、これを 2 組使用した。図 2-1 4 は衝撃荷重に対する水晶振動子の周波数変動の時間波形で、衝突エネルギー $m g H$ (g は重力加速度) と水晶振動子の最大周波数変化量 Δf_{\max} の値も記してある。(A) ~ (C) は片持梁の衝突部位をシリコンゴムシートで覆った場合で、(A) は引張で $H = 0.295$ m、(B) は圧縮で $H = 0.245$ m の場合である。(A) と

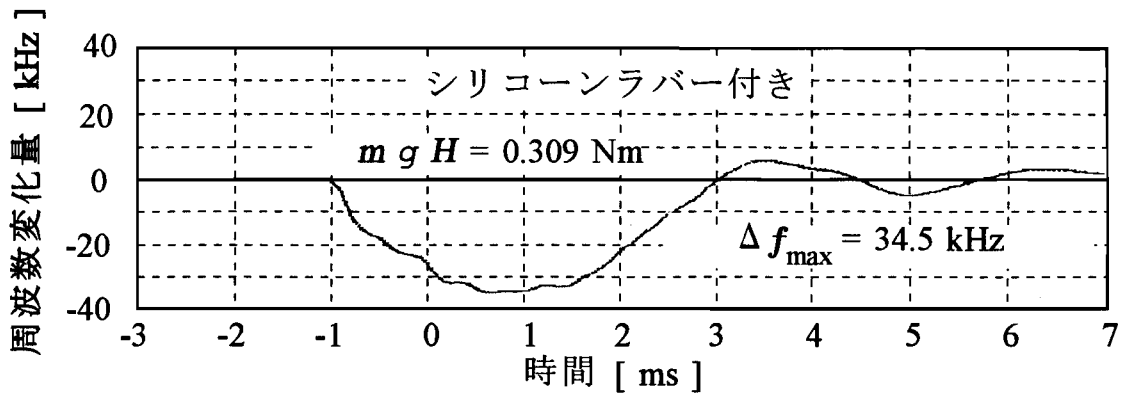


(A)

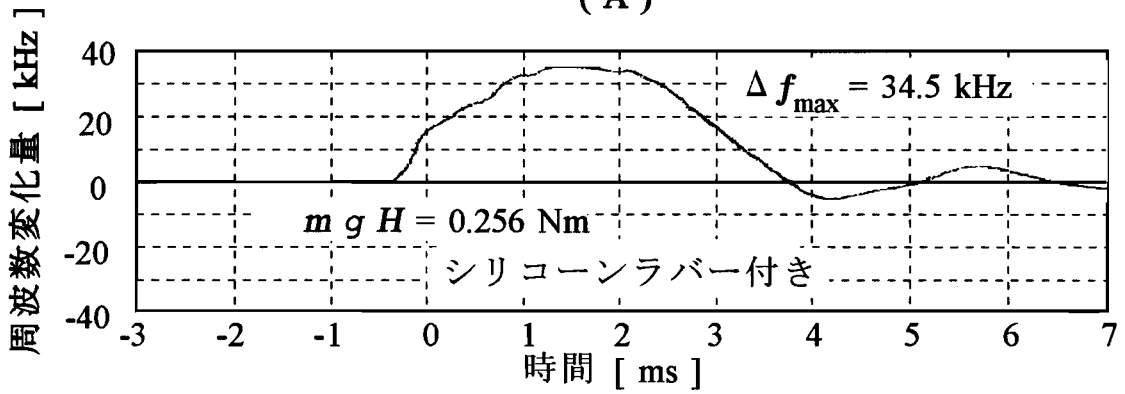


(B)

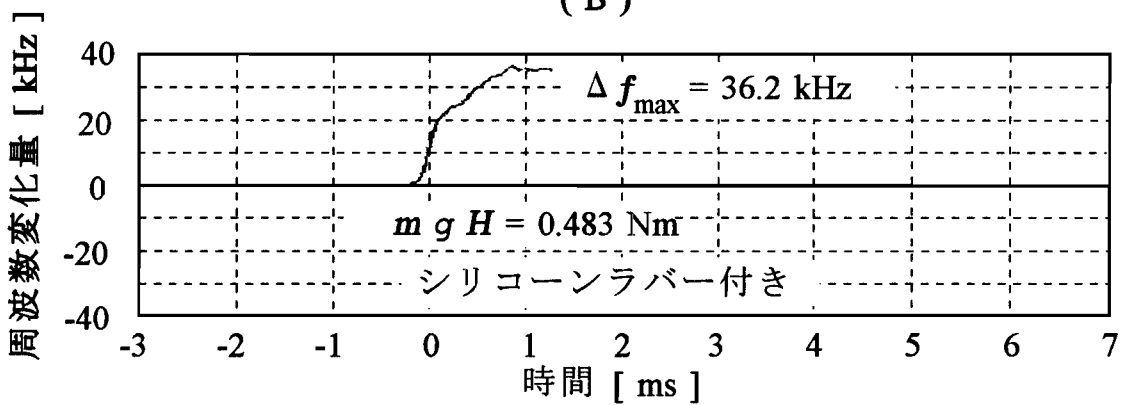
図2-13 (A) 指に装着された水晶振動子の衝撃荷重に対する強度実験
(B) 測定系のブロック図



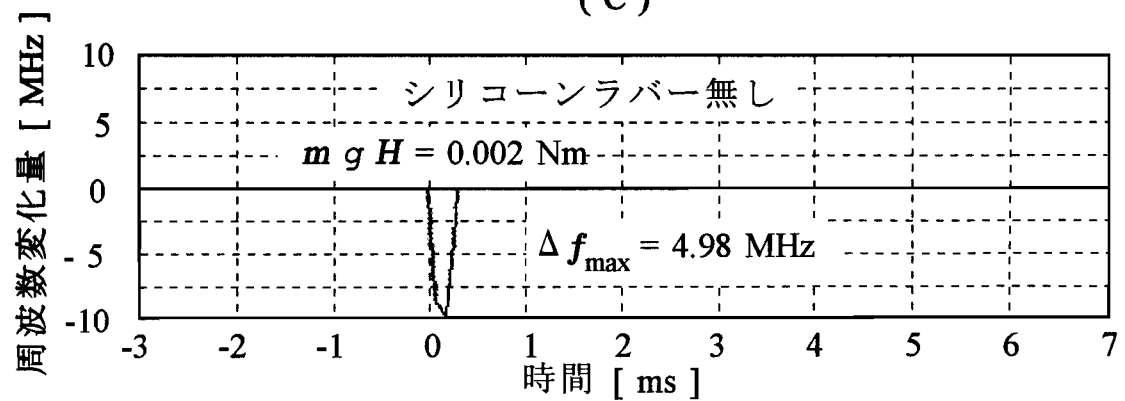
(A)



(B)



(C)



(D)

図2-14 指に装着された水晶振動子の衝撃荷重に対する周波数変動の時間波形

(B) より周波数の増減が引張と圧縮で逆になっていることが確認できる。(C) は $H = 0.455$ m で圧縮の衝撃荷重により破損したときの周波数変動の時間波形である。シリコーンゴムシートを剥がした場合は、108 g の鋼球を直接片持梁に衝突させると周波数変化量が大きすぎて測定にかからなかったため、13.5 g の鋼球を $H = 0.015$ m で衝突させた。このときの周波数変動の時間波形を (D) に示す。これを (A)、(B) と比較すると、衝突エネルギー $m g H$ は $1/130 \sim 1/150$ であるのに Δf_{\max} は逆に 150 倍程度と極端に大きくなり、また周波数変化も速くなっている。これらより、衝撃荷重の高周波成分はシリコーンゴムシートにより除去されていると推測できる。また、水晶振動子が上述のような大きな衝撃荷重に耐えられるのは、衝撃荷重を水晶振動子に伝達する指の部分が吸振器として機能しているためと推測できる。以上から、本実験で使用したような硬い指に衝撃荷重が加わった場合でも装着された水晶振動子は破損しにくく、また、介護ロボットなどでフレキシブルフィンガーが注目されている現状を考えると、水晶振動子はロボットセンサとして十分使用できると考えられ、水晶振動子による力センサの用途は増大すると思われる。

2.9 まとめ

水晶振動子の共振周波数は外力の大きさに比例して変化する。この性質を利用した力センサは、出力が周波数であるためノイズに強く、その出力が周波数カウンタにより容易にデジタル化でき、デジタル機器との接続など信号処理が容易で、高感度、高分解能、広帯域といった特長を有する。したがって、この力センサは、ロボット搭載用センサのようにノイズを発生しやすい機器との共存や高速応答を必要とするところで威力を発揮すると考えられ、これを把持力センサに応用できれば、従来のロボット搭載用アナログ把持力センサの欠点を克服する有望なセンサになると考えられる。本章では、この水晶振動子を力センサに応用するため、矩形 AT カット水晶振動子について以下の諸点を実験的に明らかにした。

- (1) 厚さやオーバートーン次数の異なった AT カット水晶振動子を統一的に扱うため応力感度 (単位応力あたりの周波数変化率) を定義し、発振周波数が基本振動で 10 MHz の AT カット水晶振動子 20 個と 3 次オーバートーンで 15 MHz の AT カット水晶振動子 25 個を用いて、応力感度とその温度特性、これらと外力の方向の関係を明らかにした。

その結果、 X 軸から 35° の方向に外力を加えると応力感度の温度特性がフラットになること、このときの応力感度が $18.7 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ となることを明らかにした。

- (2) カセンサとしての水晶振動子の再現性と精度が数100分の1程度であることを明らかにした。
- (3) ATカット水晶振動子の静荷重に対する機械的強度を実験的に調べた。その結果、主面に平行で X 軸（電気軸）と 35° の方向の外力に対する破断強さは $149\sim 157 \text{ MPa}$ 程度であることを明らかにした。この水晶振動子を指に装着した場合は、引張外力に対して $73\sim 95 \text{ MPa}$ 、圧縮外力に対して $138\sim 181 \text{ MPa}$ 程度の破断強さとなった。また、ATカット水晶振動子を装着したジュラルミン製の指の先端部に鋼球を衝突させ、水晶振動子の衝撃荷重に対する強度を調べた結果、水晶振動子はロボットフィンガーに通常加わる程度の衝撃荷重に耐えられ、ロボットに搭載する力センサとしての機械的強度を十分有することが明らかになった。

参考文献

- [1] 滝貞男：人工水晶とその電氣的応用，日刊工業新聞社，2，(1974)
- [2] 福島東洋通信機（株）：人工水晶・水晶素板・水晶振動子 CRYSTAL GUIDE 1，(1976.2.4)
- [3] 建設省国土地理院：三角点成果表重力点成果（水準点），(1985)
- [4] C.R.Mingins, et al: Effect of external force on the frequency of vibrating crystal plates, Proc. of the 16th Freq. Control Symp., 46/77 (1962)
- [5] C. R. Mingins, R. W. Perry and L. C. Barcus: Transient reactions to stress changes in vibrating crystal plates, Proc. of the 20th Freq. Control Symp., 50/69 (1966)
- [6] （財）日本規格協会：計測用語，JIS Z8103-4301 (1990)
- [7] E. Gerber and M. Miles: Reduction of the frequency-temperature shift of piezoelectric resonators by mechanical stress, Proc. IRE 49, 1650/1654 (1961)
- [8] C. R. Dauwalter: The temperature dependence of the force sensitivity of AT-cut quartz crystals, Proc. of the 26th Freq. Control Symp., 108/112 (1972)

- [9] (財) 日本規格協会 : 計測用語, JIS Z8103-2617 (1990)
- [10] (財) 日本規格協会 : 計測用語, JIS Z8103-2614, 2615, 2616, 解11 (1990)
- [11] E. P. Eernisse and R. W. Ward: Quartz resonator sensors in extreme environments:
Proc. of the 45th Freq. Control Symp., 254/260 (1991)

第3章 水晶振動子の力センサへの応用

3.1 はじめに

センサは、対象の情報取得のための信号変換系の最初の要素で、入力量を扱いやすい電気量（電圧、電流、周波数など）または力学量（圧力など）に変換するものである。図3-1にセンサ構成法の分類を示す[1]。(a)はセンサ素子のみからなるもの、(b)はセンサ素子をパワー源により励振しておいて、入力信号に対する出力信号を得るもの、(c)は入力信号に対してインピーダンスが変化するセンサ素子を変換回路に組み込み、これにパワーを供給することによって出力信号を得るもの、(d)は特性の揃った2個のセンサ素子を用い、一方を入力信号を受けるアクティブ素子に、他をダミー素子とし、それらの差をとることにより環境変動の影響をうち消すように構成したもの、(e)は差動法と呼ばれるもので、特性の揃った2個のセンサ素子に入力信号が加えられたとき、入力変化に対するセンサパラメータの変化が各々の素子で逆方向に、環境変化に対しては同方向になるよう構成され、それらの差をとることにより環境変動の影響がうち消されるようにされた構成法である。(f)は入力量に応答する素子とは別に環境量に応答する素子を用い、環境量に関する情報により出力を補償する構成法である。

水晶振動子は交番電界で励振することにより発振し、これに外力が作用するとその発振周波数が変化する。したがって、この周波数変化量から外力の大きさを測定する力センサは上記の(b)に分類される。しかし、この力センサを実用する場合は、温度変化やノイズなどのいわゆる環境変動の影響を除去する必要がある。そこで、ATカット水晶振動子の発振周波数の増減が引張と圧縮に対して逆特性である[2][3]ことを利用して、外力（入力信号）が作用すると一方が引張、他方が圧縮となるよう構成された1対の水晶振動子の差周波数を出力信号とすれば、上記(e)に分類される差動法となる。この方法によれば、必要変数すなわち測定変数（外力）は反対称に、不要変数すなわち影響量（温度変化など水晶振動子の周波数を変化させる環境要因）は対称に作用するため、2量の差をとることにより必要変数のみを選択できる。すなわち、感度は2素子の和となり、同相ノイズは除去され

る。さらに、水晶振動子の発振周波数から外力による周波数変化量を引いた周波数をバイアス周波数と呼ぶことにすると、外力による周波数変化量はたかだか発振周波数の千分の1程度にすぎないので、差をとることによりバイアス周波数の大半が相殺されて出力周波数が3桁程度小さくなり分解能が向上する。この差動法によれば後述するように力感度の温度特性の改善も容易で、水晶振動子による力センサを構成する場合に有用となる。水晶振動子の発振周波数が外力により変化することを利用した力センサを水晶振動子式力センサと呼ぶことにする。本章では、この水晶振動子式力センサに適用する差動法の原理を示し、差動法を適用した水晶振動子式力センサの応力感度とその温度依存性、振動外力に対する応答などに関する実験結果を示す。

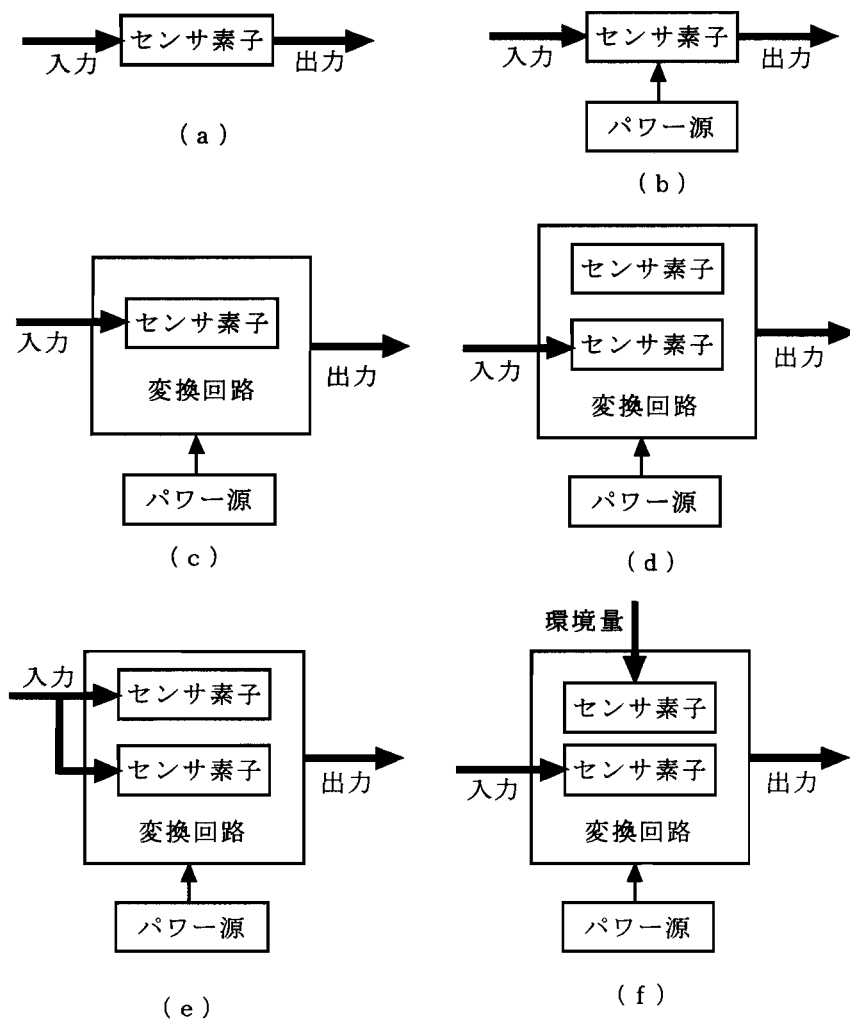


図3-1 センサの構成法 [1]

3.2 水晶振動子式力センサに適用する差動法の原理

水晶振動子を把持力センサとして指などに装着した場合、水晶振動子と指の線膨張係数の差により、温度が変化すると水晶振動子の応力状態が変化して周波数が変化する。差動法はこの温度変化による影響を除去することができる。図3-2は水晶振動子式力センサに適用する差動法の原理図で、外力 F が加わると一方の水晶振動子 Q_T が引張られ、他方の水晶振動子 Q_C が圧縮される。水晶振動子の周波数を f 、外力 F が加わっていないときの周波数を f_0 、てこ比を r 、 Q_T と Q_C の寸法を同一とする。 Q_T 、 Q_C に関する諸量にそれぞれ添え字 T と C を付すことにし、各々の周波数を f_C 、 f_T 、外力が加わらないときの周波数を f_{0C} 、 f_{0T} と表す。各々の水晶振動子の外力による周波数変化量 $f_C - f_{0C}$ 、 $f_T - f_{0T}$ は、

$$\sigma_C = -r \sigma_T \dots\dots\dots (17)$$

であるから、前章の(4)、(6)式より

$$f_C - f_{0C} = -B_C \sigma_C = r f_{0C} \beta_C \sigma_T \dots\dots\dots (18)$$

$$f_T - f_{0T} = -B_T \sigma_T = -f_{0T} \beta_T \sigma_T \dots\dots\dots (19)$$

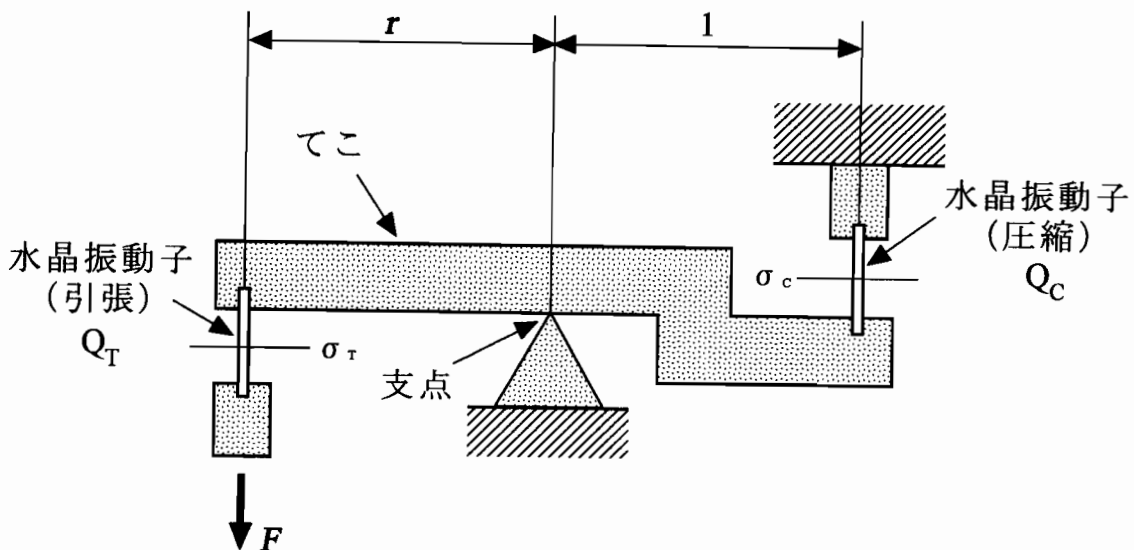


図3-2 水晶振動子式力センサに適用する差動法の原理

となる。ここで、 B は単位応力あたりの周波数変化量、 β は応力感度、 σ は応力である。これらの式から、外力 F による水晶振動子 Q_T と Q_C の差周波数の変化量は

$$(f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T}) = (r f_{0C} \beta_C + f_{0T} \beta_T) \sigma_T \dots\dots\dots (20)$$

となる。各々の水晶振動子の外力による周波数変化率 δ_C と δ_T は、(18), (19) 式と前章の(5) 式より、それぞれ

$$\delta_C = \frac{f_C - f_{0C}}{f_{0C}} = r \beta_C \sigma_T \dots\dots\dots (21)$$

$$\delta_T = \frac{f_T - f_{0T}}{f_{0T}} = -\beta_T \sigma_T \dots\dots\dots (22)$$

となる。水晶振動子 Q_T と Q_C の周波数が

$$f_{0C} \approx f_{0T} \approx f_0 \dots\dots\dots (23)$$

のようにほぼ等しいとし、

$$\beta_{CT} = r\beta_C + \beta_T \dots\dots\dots (24)$$

とおくと(20) 式は

$$(f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T}) \approx f_0 \beta_{CT} \sigma_T \dots\dots\dots (25)$$

となる。外力 F による水晶振動子対の差周波数の変化率 δ_{CT} を

$$\delta_{CT} = \frac{(f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T})}{f_0} \approx \beta_{CT} \sigma_T \approx \delta_C - \delta_T \dots\dots\dots (26)$$

と定義し、この β_{CT} を ”差動法の応力感度” と呼ぶことにする。このように(23) 式が成立するとき、すなわち、同程度の共振周波数の水晶振動子を対で用いると、外力による差周波数の変化率は各々の水晶振動子の周波数変化率の差に等しくなる。てこ比 r 、各々の水晶振動子の応力感度 β_C 、 β_T があらかじめ分かっておれば、(24) 式により差動法の応力感度 β_{CT} が決まる。さらに、外力を加える前の周波数 f_0 をあらかじめ測定しておけば、周波数の差の変化量 $(f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T})$ を測定して(25) 式により応力 σ_T が決まる。この σ_T を前章の(3) 式に代入すると外力 F を決定できる。

単一的水晶振動子の応力感度 β_C 、 β_T は温度 T に対して、前章の(8) 式より

$$\beta_C = \beta_{0C} + \beta_{1C} T \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\beta_T = \beta_{0T} + \beta_{1T} T \quad \dots\dots\dots (28)$$

の関係がある。ここで

$$\beta_{0CT} = r \beta_{0C} + \beta_{0T} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\beta_{1CT} = r \beta_{1C} + \beta_{1T} \quad \dots\dots\dots (30)$$

とおき、(27)~(30)式を(24)式に代入すると

$$\beta_{CT} = \beta_{0CT} + \beta_{1CT} T \quad \dots\dots\dots (31)$$

となる。この β_{0CT} を " $T = 0^\circ\text{C}$ での差動法の応力感度 ", β_{1CT} を " 差動法の応力感度の温度係数 " と呼ぶことにする。

応力感度およびその温度係数は前章の(10), (11)式より外力の方向 ψ に対して

$$\beta_{0C} = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi_C \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$\beta_{0T} = \mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi_T \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$\beta_{1C} = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi_C \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$\beta_{1T} = \nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi_T \quad \dots\dots\dots (35)$$

であるから、(29), (30)式は

$$\beta_{0CT} = (r + 1) \mu_0 + \mu_1 (r \cos 2\psi_C + \cos 2\psi_T) \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$\beta_{1CT} = (r + 1) \nu_0 + \nu_1 (r \cos 2\psi_C + \cos 2\psi_T) \quad \dots\dots\dots (37)$$

となる。したがって、(37)式と前章の表 2-3 (C) の値から

$$r \cos 2\psi_C + \cos 2\psi_T = - (r + 1) \frac{\nu_0}{\nu_1} \approx 0.349 (r + 1) \quad \dots\dots\dots (38)$$

のとき、差動法の応力感度の温度係数 β_{1CT} は 0、応力感度 β_{CT} は(31), (36)式より

$$\beta_{CT} = \beta_{0CT} = (r+1) \left(\mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \right) \approx 18.7 \times 10^{-12} (r+1) \text{ [Pa}^{-1}] \quad (39)$$

となり、 $r = 1$ のときの差動法の応力感度 β_{CT} は $37.3 \times 10^{-12} \text{ [Pa}^{-1}]$ となる。前章の (12) 式は単一水晶振動子の応力感度の温度係数を 0 にする条件、(13) 式はそのときの単一水晶振動子の応力感度である。これらの式に表 2-3 (C) の値を代入すると

$$\cos 2\psi = -\frac{\nu_0}{\nu_1} \approx 0.349 \quad \dots\dots\dots (40)$$

$$\beta = \beta_0 = \mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \approx 18.7 \times 10^{-12} \text{ [Pa}^{-1}] \quad \dots\dots\dots (41)$$

となる。(38) 式と (40) 式を比較すると、応力感度の温度特性をフラットにするには、単一水晶振動子では外力の方向 ψ を約 35° または約 145° としなければならないのに対して、

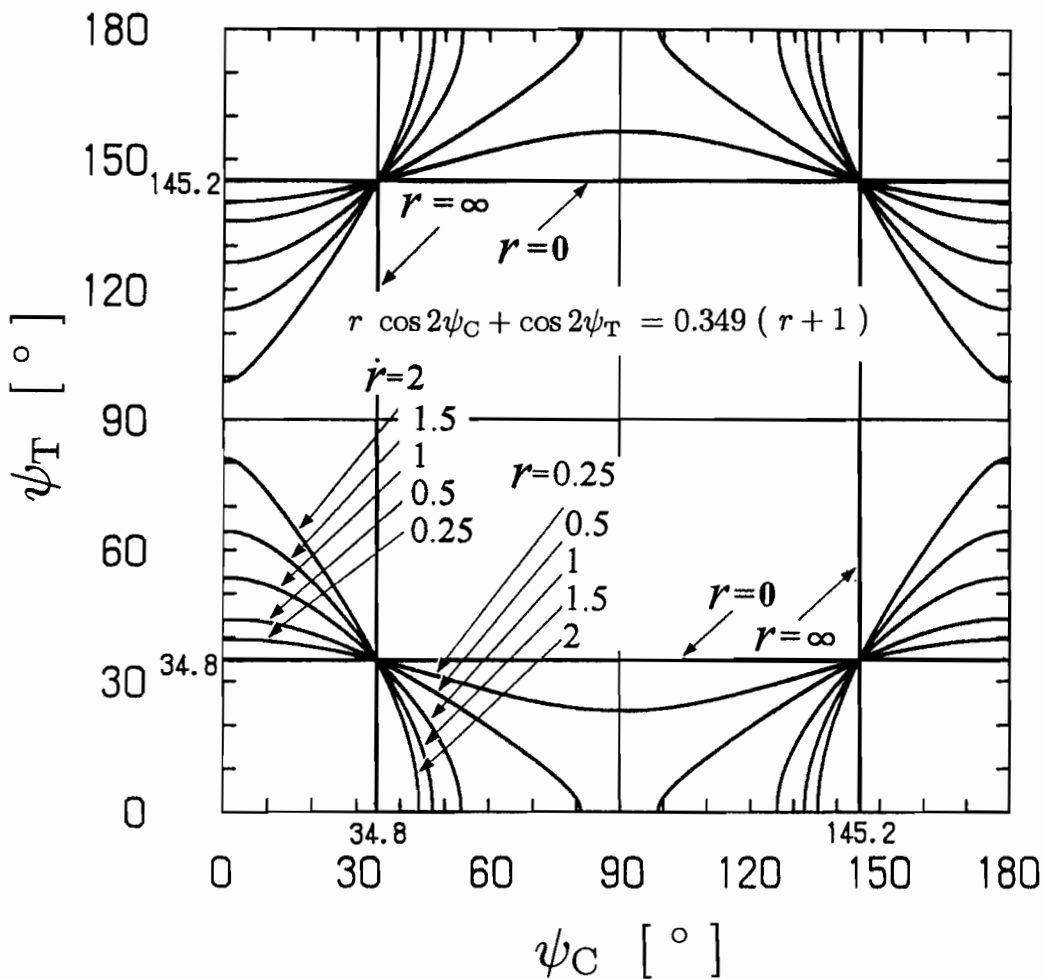


図 3-3 差動法の応力感度の温度係数 β_{1CT} が 0 となる外力の方向 ψ_C と ψ_T の関係

差動法では外力の方向 ψ_C と ψ_T だけでなく、てこ比によっても調節できることがわかる。このように差動法では、応力感度の温度特性をフラットにする方法の自由度が増える。(39)式と(41)式を比較すると、差動法での応力感度は単一水晶振動子の場合の $r + 1$ 倍になっている。図3-3は(38)式を満たす ψ_C と ψ_T の関係をとこ比 r をパラメータにとって描いたものである。

3.3 差動法を適用した水晶振動子式力センサの静特性

3.3.1 実験に使用した水晶振動子対

表3-1 実験に使用した3組の水晶振動子対の
外力の方向 ψ_C と ψ_T の組み合わせ

試料対	ψ_C [°]	ψ_T [°]
A	54	0
B	38	32
C	35	35

実験に使用したATカット水晶振動子は、厚さが0.17 mm、幅が8 mm、長さが10 mmで、基本振動10 MHzで発振しているものである。表3-1は実験に使用した3組の水晶振動子対の長辺の方向（外力の方向）とX軸（電気軸）のなす角 ψ_C と ψ_T の組み合わせを示したものである。実験ではてこ比 r を1としたので、これら3組は近似的に(38)式の条件を満足している。

3.3.2 実験方法

厚さ8 mmのステンレス板を図3-4の形状に加工し、てこ部（てこ比 r は1）に表3-1に示す各水晶振動子対を接着して差動法を適用した力センサを構成した。この力センサでは、外力 F が各水晶振動子の主面に平行に加わり、一方の水晶振動子 Q_T が引張、他方の

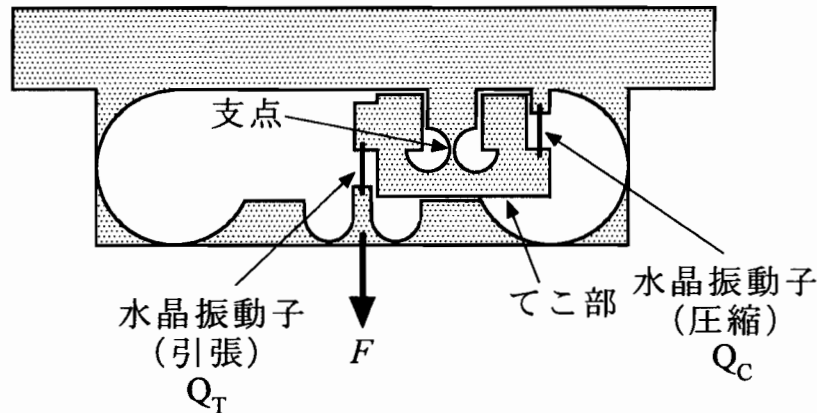


図3-4 差動法を適用した水晶振動子式力センサ

Q_C が圧縮となる。差動法は Q_T と Q_C の水晶振動子対の差周波数の変化量を出力信号とするものである。図3-4 の力センサを図3-5 のように実験槽（恒温恒湿槽）に設置し、槽内の湿度を $45 \pm 5\%$ に保ち、温度を $5 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲で 5°C ずつ変化させた。各温度ごとに水晶振動子に加える外力を、1個 5 N に相当する分銅6個を内蔵する分銅加除装置により、 $0 \sim 30\text{ N}$ の範囲で 5 N ずつ変化させた。ここでは各々の水晶振動子の周波数変化量と差周波数の変化量との関係を検証するため、図2-6 の測定系を2個使用して各々の水晶振動子の周波数を測定した。 f_C , f_T , f_{0C} , f_{0T} の測定値から差周波数の変化量 $(f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T})$ を求め、既知の f_0 と β_{CT} の値を(25)式に代入すると応力 σ_T が得られる。この σ_T を前章の(3)式に代入すると外力 F が得られる。ここでは、各々の水晶振動子の周波数変化量より(21), (22)式を用いて周波数変化率 δ_C , δ_T とこれらの差 $\delta_C - \delta_T$ を求め、前章の(7)式と本章の(26)式の関係および(27), (28), (31)式で示される応力感度の温度特性を検証した。

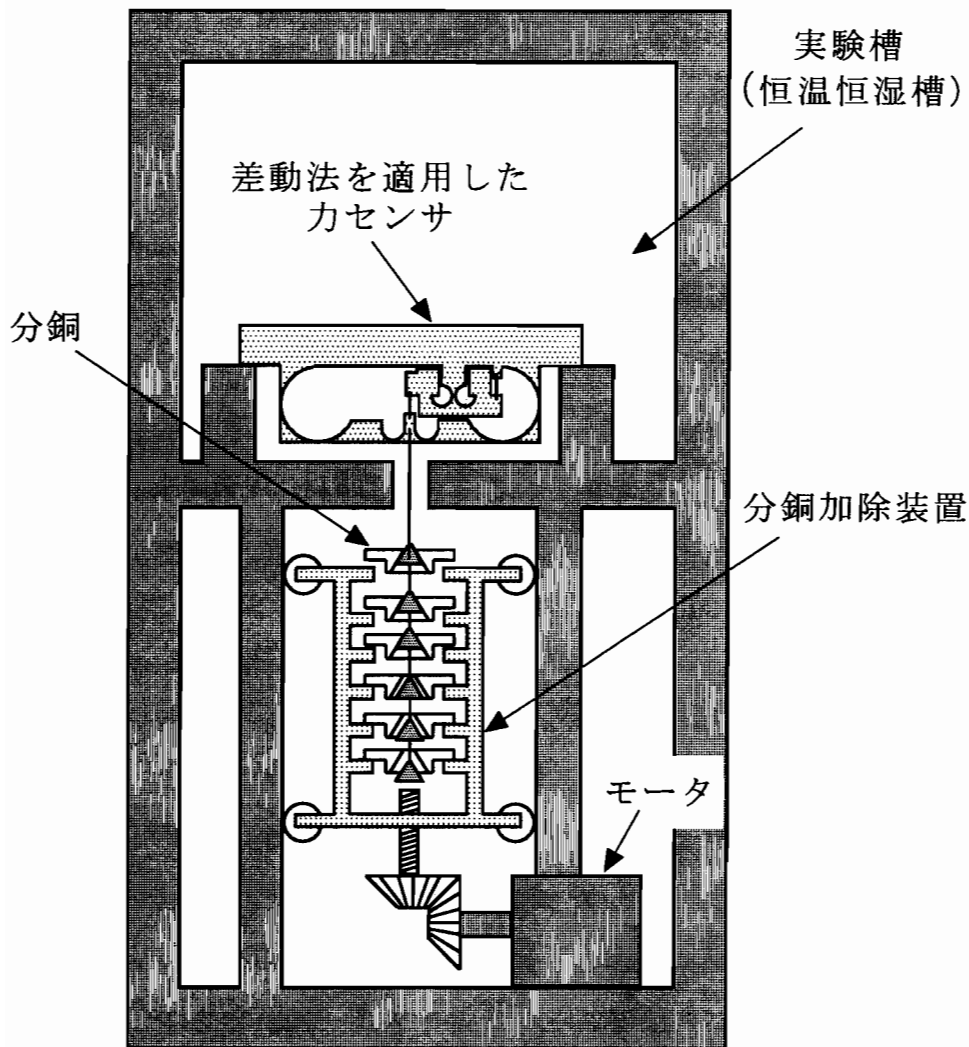


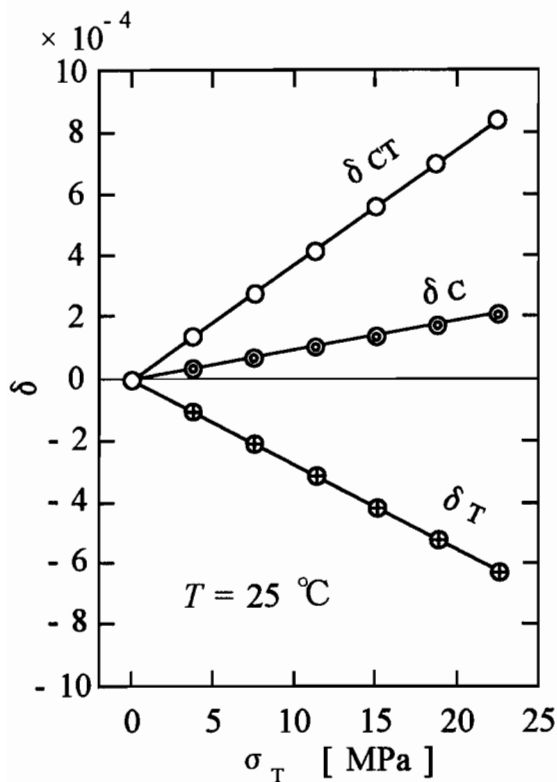
図3-5 差動法を適用した力センサの諸特性を検証するための実験

3.3.3 応力感度

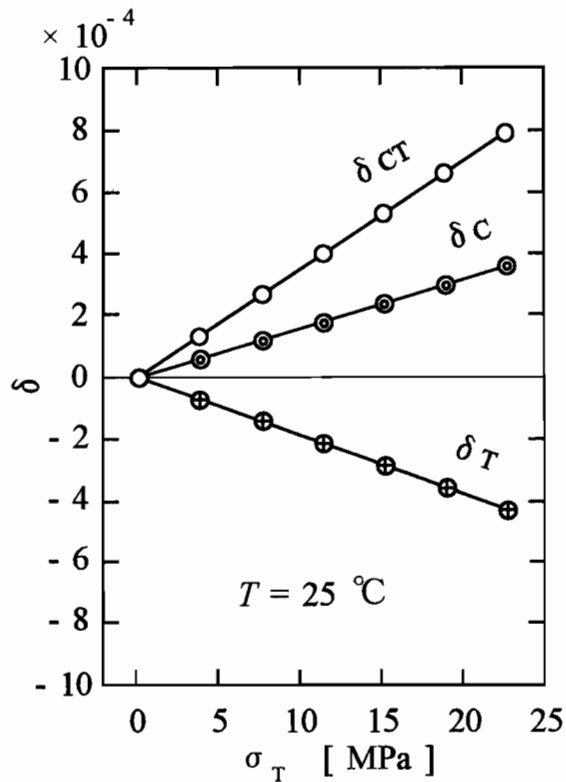
外力 F を前章の(3)式により応力 σ に換算し, (21), (22)式により外力を加える前後の測定周波数 f_{0C} , f_{0T} , f_C , f_T から周波数変化率 δ_C , δ_T を求め, これらを各温度ごとに(21), (22)式により σ_T で回帰して応力感度 β_C と β_T , およびこれらの精密度を表す残差の標準偏差 S_{δ_C} , S_{δ_T} を求めた. つぎに, δ_C と δ_T の差 δ_{CT} を(26)式により σ_T で回帰して差動法の応力感度 β_{CT} および精密度を表す残差の標準偏差 $S_{\delta_{CT}}$ を求めた. 図3-6(A), (B), (C) は, 表3-1の各水晶振動子対について, $T = 25^\circ\text{C}$ での単一的水晶振動子の周波数変化率 δ_C , δ_T およびこれらの差 δ_{CT} を応力 σ_T に対して描いたものである. 実線はそれぞれ(21), (22), (26)式による回帰直線で, \odot , \oplus , \circ 印は δ_C , δ_T , δ_{CT} の実験値を示す. なお, 図の右下部に外力の方向 ψ , 応力感度 β およびそれらの精密度に相当する S_β の値をまとめて示した. 回帰直線の傾きが応力感度に相当しているから, 差動法での応力感度 (δ_{CT} を表す直線の傾き) が各々の水晶振動子の応力感度 (δ_C と δ_T を表す直線の傾き) の差になっていることが分かる. このように, それぞれの水晶振動子の応力感度の差が差動法の応力感度となるため, 差動法の応力感度の絶対値が大きくなっている. 他の温度での実験結果でも同様の結果を得た.

3.3.4 応力感度の温度特性

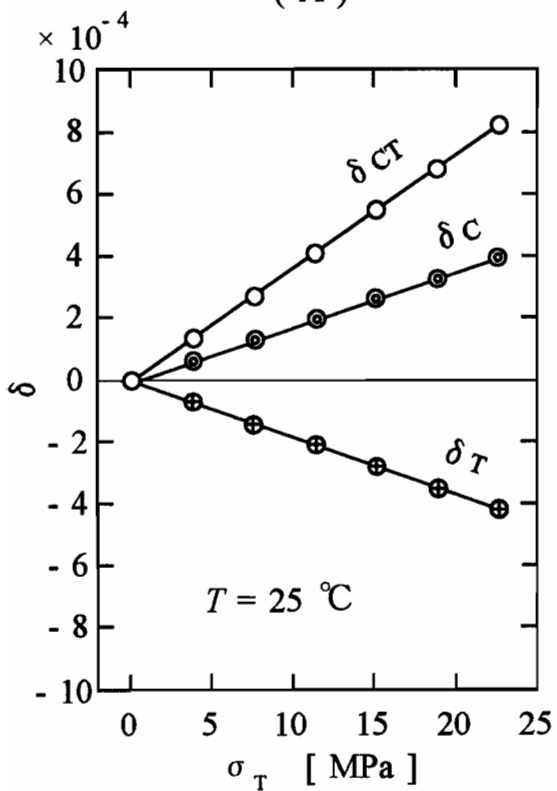
前項で求めた応力感度 β_C , β_T , β_{CT} をそれぞれ(27), (28), (31)式により温度 T で回帰し, β_{0C} , β_{0T} , β_{0CT} , β_{1C} , β_{1T} , β_{1CT} および精密度に相当する回帰による残差の標準偏差 S_{β_C} , S_{β_T} , $S_{\beta_{CT}}$ を求めた. 図3-7は図3-6と同じ3組の水晶振動子対について, 単一的水晶振動子および差動法の応力感度を $T = 0^\circ\text{C}$ での応力感度を基準にして描いたものである. 回帰線を実線で, 前項で求めた β_C , β_T , β_{CT} の値をそれぞれ \odot , \oplus , \circ 印で示した. なお, 図の右下部に β_0 , β_1 および S_β の値をまとめて示した. 回帰線の傾きは応力感度の温度係数に相当している. 図3-7(A)では, 引張側の水晶振動子の応力感度の温度係数 β_{1T} が正で, 圧縮側の温度係数 β_{1C} が負となっているから, それらの和である差動法の応力感度の温度係数 β_{1CT} の絶対値が小さくなり, 応力感度の温度特性がフラットに近づいている. (B)では, β_{1CT} は β_{1T} と β_{1C} の和にはなっているが, 差動法の応力感度の温度係数 β_{1CT} は ψ_T が 32° の引張側の水晶振動子の応力感度の温度係数 β_{1T} より絶対値



(A)



(B)



(C)

記号	$\psi [^\circ]$	$\beta \times 10^{11}$ [Pa ⁻¹]	$S_\delta \times 10^7$
----	-----------------	---	------------------------

(A)

圧縮 ●	54	0.92	1.34
引張 ⊕	0	-2.80	1.05
差動法 ○	—	3.72	2.35

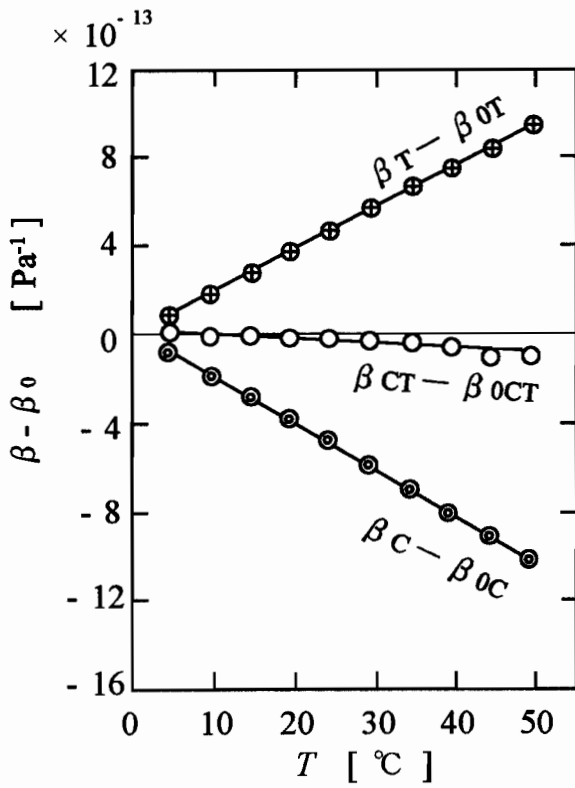
(B)

圧縮 ●	38	1.59	0.79
引張 ⊕	32	-1.93	0.94
差動法 ○	—	3.52	0.73

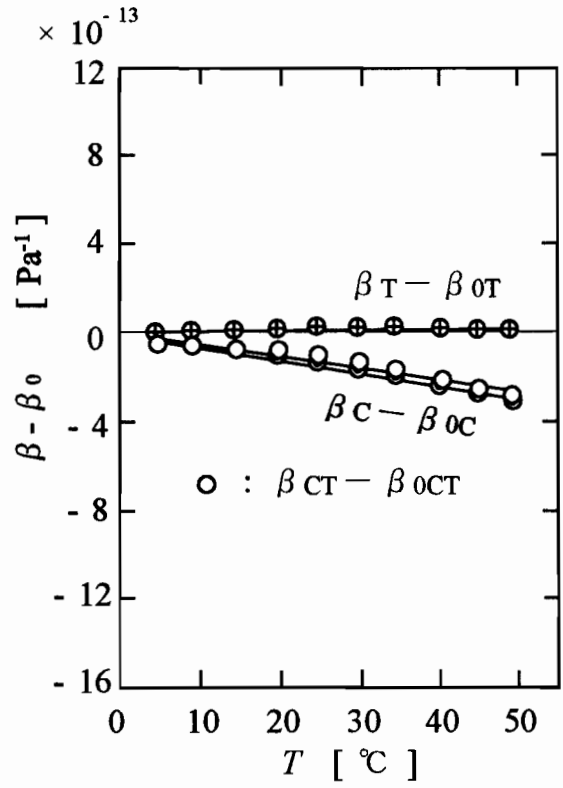
(C)

圧縮 ●	35	1.75	0.51
引張 ⊕	35	-1.88	2.10
差動法 ○	—	3.63	2.20

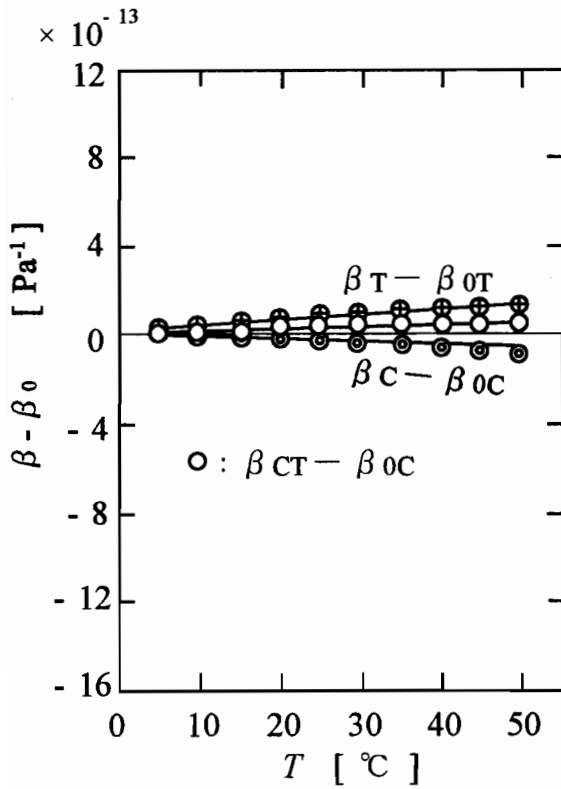
図3-6 表3-1 に示す各水晶振動子対に関する $T = 25^\circ\text{C}$ における周波数変化率と応力の関係



(A)



(B)



(C)

記号	ψ [$^\circ$]	$\beta_0 \times 10^{11}$ [Pa^{-1}]	$\beta_1 \times 10^{14}$ [$\text{Pa}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$S_\beta \times 10^{14}$ [Pa^{-1}]
圧縮 ⊙	54	0.97	- 2.09	0.70
引張 ⊕	0	2.76	1.92	0.35
差動法 ○	—	3.73	- 0.17	0.85
圧縮 ⊙	38	1.60	- 0.58	1.18
引張 ⊕	32	1.93	0.07	0.81
差動法 ○	—	3.53	- 0.52	1.94
圧縮 ⊙	35	1.76	- 0.16	0.43
引張 ⊕	35	1.88	0.26	0.33
差動法 ○	—	3.63	0.10	1.51

図3-7 表3-1 に示す各水晶振動子対に関する応力感度の温度特性

が大きくなっている。この原因は、水晶振動子の取り付け誤差に起因する外力の方向 ψ の誤差によるものと推測している。(C) は、各々の水晶振動子の外力の方向を、単一水晶振動子でも応力感度の温度特性がフラットになる方向である 35° とした場合である。以上より、外力の方向が(38)式の関係を満たすように組み合わせると、差動法を用いることにより応力感度の温度特性を改善できることが確認できた。

3.4 水晶振動子式力センサの動特性

差動法は、感度や分解能の向上、温度特性の改善、環境ノイズのような同相ノイズの除去などを目的としたもので、水晶振動子を力センサとして実用する場合に重要となる。ここでは、差動法を適用した水晶振動子式力センサの動特性に関する実験結果を示す。

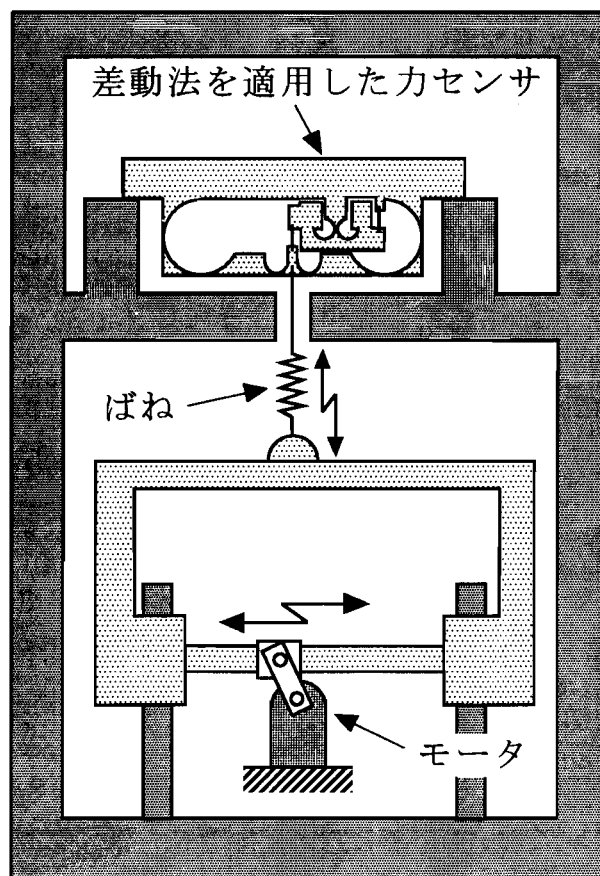


図 3-8 水晶振動子式力センサに振動外力を加えてゲインを調べる実験

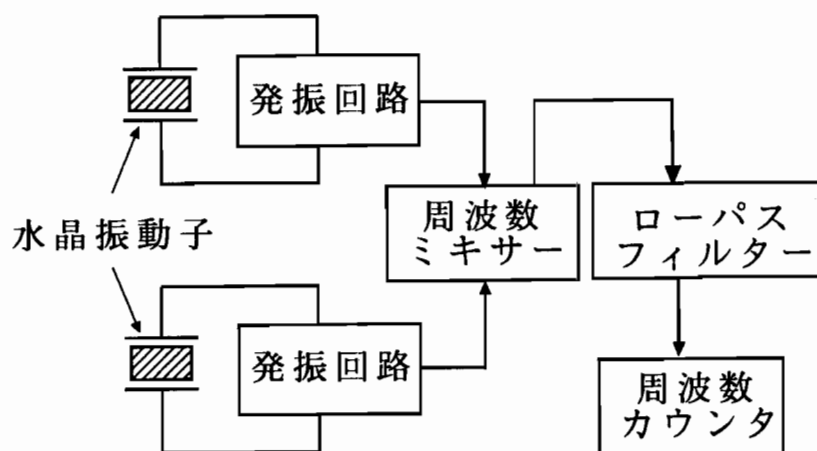


図3-9 差動法を適用した力センサの測定系のブロック図

図3-8 は、ばねを伸縮させて図3-4 に示した水晶振動子式力センサに振動外力を加えているところである。図3-9 に測定系のブロック図を示す。図3-10 は3 Hz の振動外力を加えたときの1秒間にわたる水晶振動子対の差周波数の時間波形である。この装置で発生できる外力の振動数は40 Hz 程度が限界で、振動数が高くなるとばねの質量により外力の振幅が変化する可能性がある。

図3-11 は、1対の水晶振動子と共に板ばねをホルダ（片持ちはり）に固定したもので、板ばねが振動することにより水晶振動子対に振動外力が加わるようになっている。これによれば、板ばねの長さや厚さを調節することにより2 kHz 程度までの振動外力を水晶振動子対に加えることができる。ここでは10 Hz から2.29 Hz までの振動外力を水晶振動子対に加え、各々の振動外力に対する水晶振動子式力センサの動特性を調べた。まず、板ばねの先端に錘を糸で吊して水晶振動子対に静荷重を加え、水晶振動子対の差周波数の変化量を測定した。この静荷重に対する差周波数の変化量を Out_s とすると、 Out_s が水晶振動子式力センサの静荷重に対する応答になる。つぎに、静かに糸を切断すると板ばねは減衰振動を行い減衰振動外力が水晶振動子対に加わる。測定は図3-8 の装置による実験と同様に図3-9 の測定系により行った。図3-12 は、糸を切断する前後における水晶振

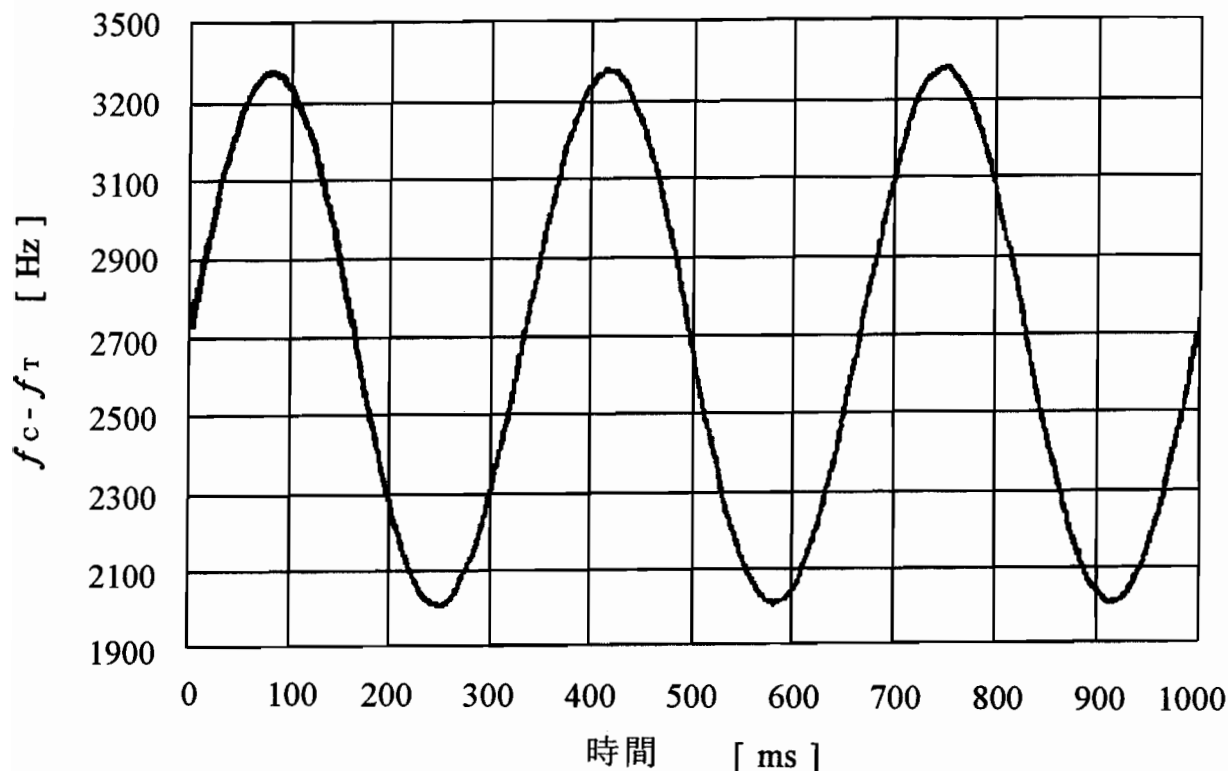


図3-10 カセンサに3 Hzの振動外力を加えたときの差周波数の時間波形

動子対の差周波数 $f_C - f_T$ の時間波形からこのセンサのゲインを求める説明図で、縦軸が水晶振動子対の差周波数で横軸が時間である。この場合は外力が入力で差周波数の変化量が出力である。糸を切断すると水晶振動子対に加わる外力は静荷重から振動外力に連続的に変化するので、糸を切断した瞬間の外力は静荷重とも振動外力とも考えられる。外力が板ばねから水晶振動子に伝達される過程で損失がないと仮定すると、ゲインが1の場合、振動外力に対する応答波形の包絡線は糸を切断した時点で静荷重に対する応答と一致する。これを実線で示した。ゲインが1より小さい場合は、この包絡線の糸を切断した時点での値は静荷重に対する応答より小さくなる。これを破線で示した。これらのことから、糸を切断した時点での振動外力に対する応答振幅 Out_0 と静荷重に対する差周波数変化量 Out_s の比がこのセンサのゲインになる。

応答波形の減衰固有角振動数を ω_d 、糸を切断後3番目に差周波数が極大となる時刻を $t=0$ とすると、糸を切断した瞬間の時刻は $t = -6\pi/\omega_d$ となり、 $t < -6\pi/\omega_d$ のフラットな部分が静荷重に対する応答、 $t > -6\pi/\omega_d$ の振動波形が振動外力に対する差周波数の応

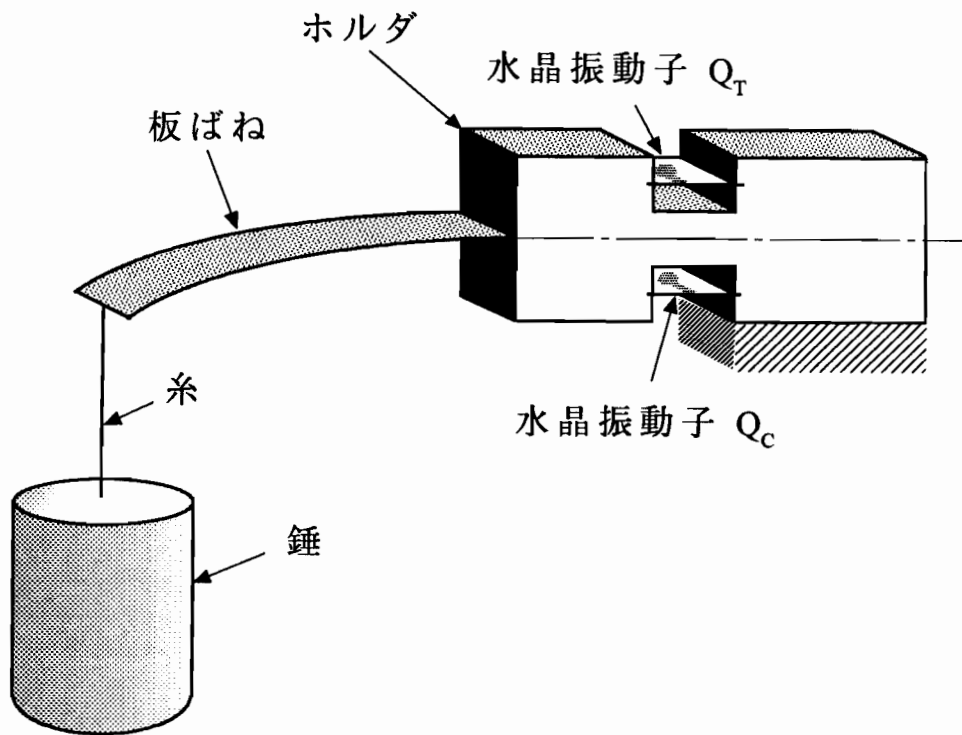


図3-11 水晶振動子に静荷重と振動外力を加えて水晶振動子対のゲインを調べる実験

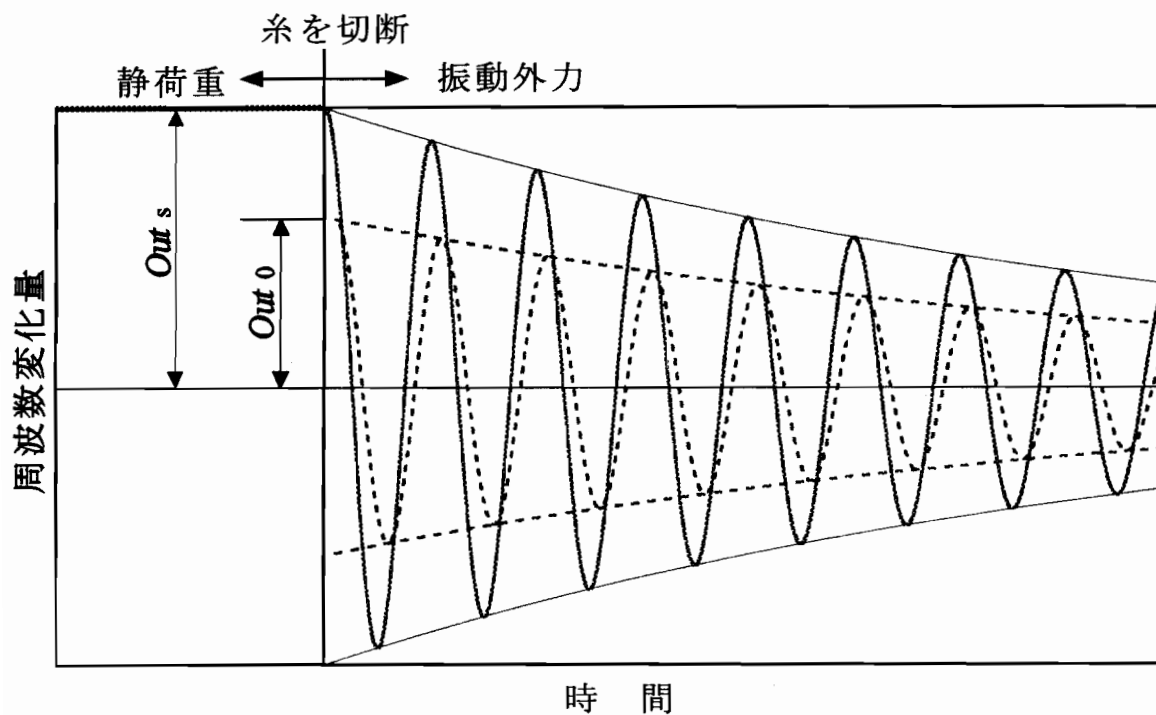


図3-12 ゲインの測定原理

答となる。

差周波数の応答波形の減衰比を ζ , $t = 0$ での差周波数の変化量を Out_3 とすると, 差周波数の変化量 Out の時間波形は次式で近似できる。

$$\begin{aligned}
 Out &= (f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T}) \\
 &= Out_3 \exp\left\{-\frac{\zeta \omega_d t}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right\} \cos(\omega_d t) \dots\dots\dots (42)
 \end{aligned}$$

糸を切断して m 番目の差周波数の極大値を $(f_C - f_T)_m$ とすると, このときの差周波数変化量 Out_m はつぎのようになる。

$$\begin{aligned}
 Out_m &= (f_C - f_T)_m - (f_{0C} - f_{0T}) \\
 &= Out_3 \exp\left\{\frac{-2(m-3)\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right\} \cos\{2(m-3)\pi\} \dots\dots\dots (43)
 \end{aligned}$$

$(m + M)$ 番目の周波数変化量の極大値を Out_{m+M} とすると, 対数減衰率 δ は

$$\delta = \frac{1}{M} \ln\left\{\frac{Out_m}{Out_{m+M}}\right\} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \dots\dots\dots (44)$$

となる。ここでは減衰比 ζ を $m = 3, N = 4$ として, (44) 式を用いて Out_3 と Out_7 から求めた。図 3-1 3 は, 測定結果の 1 例で, 静荷重と 1.24 kHz の振動外力に対する水晶振動子対の差周波数の時間波形である。 $(f_C - f_T)_3$ は 35,654 Hz, 外力を加えないときの差周波数 $f_{0C} - f_{0T}$ は 35,532 Hz, したがって, Out_3 は 122 Hz となった。同様に Out_7 は 77 Hz となった。これらを(44)式に代入すると $\zeta = 0.0183$ が得られる。この ζ と Out_3 の値を(43)式に代入し, $m = 0 (t = -6\pi/\omega_d)$ とおくと, 糸を切断した直後の振動外力に対する差周波数の変化量 Out_0 が 172 Hz と得られる。一方, 糸を切断する直前の静加重に対する周波数変化量 Out_s は図 3-1 3 より 171 Hz であるから, Out_0 と Out_s がほぼ一致している。したがって, この場合の振動外力に対する差周波数の変化量(力感度に相当)は減衰していないことになる。10 Hz ~ 2.29 kHz の範囲で他の振動外力に対しても同様の実験を行った。図 3-1 4 は Out_0 と Out_s の比を外力の振動数 f_F に対してプロットしたもので, これは力感度の周波数特性に相当している。この図のように少なくとも 2 kHz 程度までの振動外力に対して力感度の減衰は認められなかった。いずれの場合も Out_s と Out_0 がほぼ等しいことから, ゲインを求める過程で行った”外力が板ばねから水晶振動子に伝

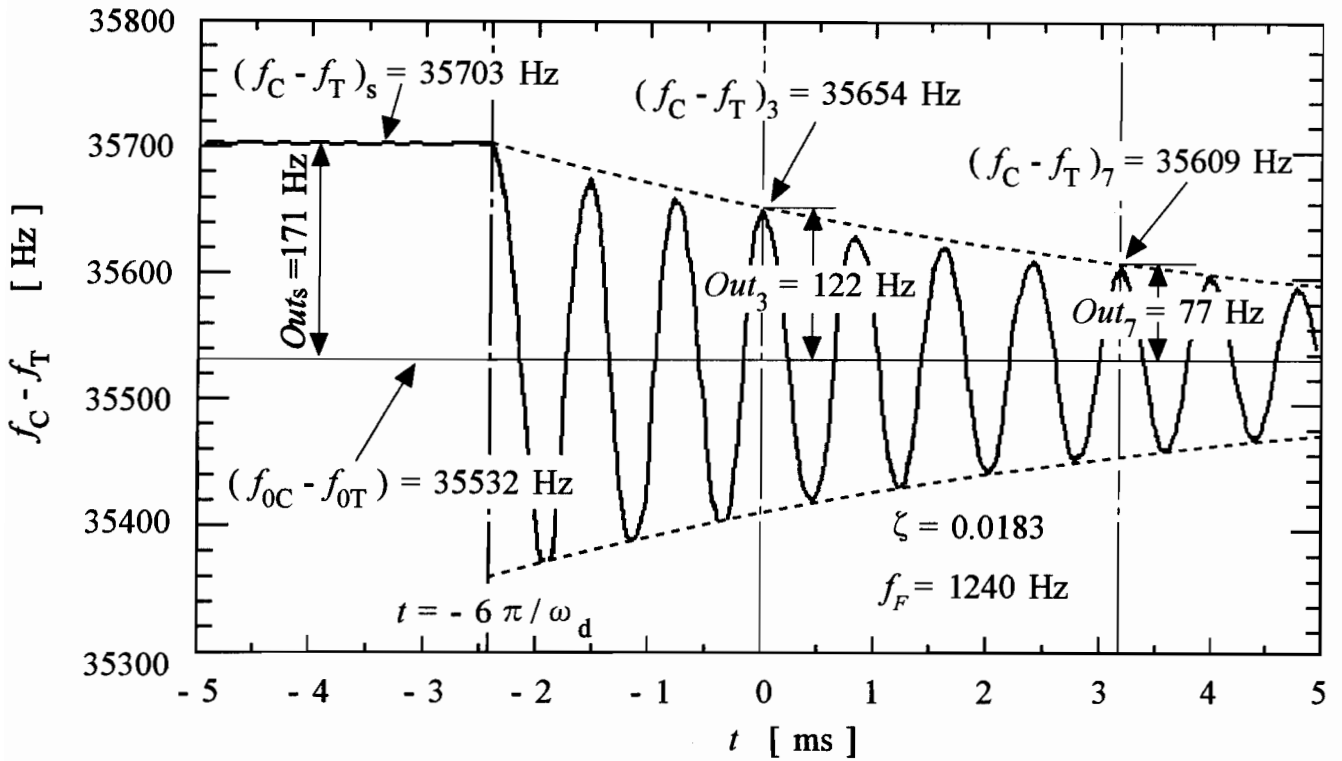


図3-13 静荷重と1.24 kHzの振動外力に対する水晶振動子対の差周波数の時間波形

達される過程での損失は無視できる”という仮定が正しかったこともわかる。以上より、応答面でも水晶振動子はロボット搭載用把持力センサとして使用できる [4] [5] ことが明らかとなった。また、差動法が振動外力に対して機能していることも確認できた。

3.5 まとめ

本章ではつぎの諸点を明らかにした。

- (1) センサ構成法を分類し、水晶振動子式力センサの位置づけを行った。
- (2) 水晶振動子式力センサに適用する差動法の原理を示し、力感度の温度特性がフラットになる外力の方向の組み合わせ条件を求めた。水晶振動子対がこの条件を満足するとき、力感度は $18.7 \times 10^{-12} \times (r + 1)$ [Pa⁻¹] となり、てこ比が1であれば 37.3×10^{-12} [Pa⁻¹] となることを示した。この差動法は力感度や力分解能の向上、力感度の温度特性

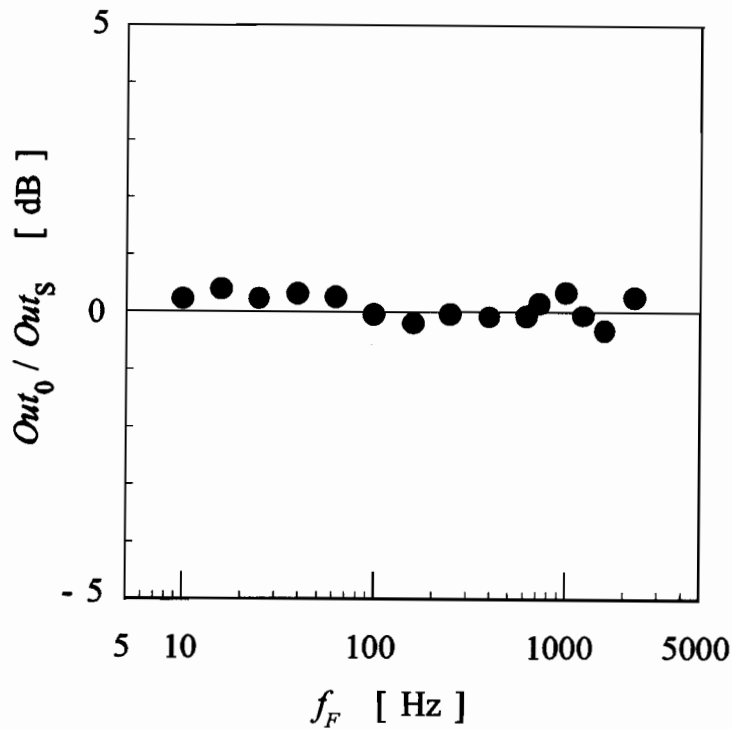


図 3-14 振動外力と静荷重に対する差周波数変化量 Out_0 と Out_s の比（力感度のゲインに相当）の周波数特性

の改善，環境ノイズなど同相ノイズの除去などの機能をもつものである。

- (3) 応力感度の温度特性をフラットにする条件を満足する異なる 3 組の水晶振動子対を選定し，これらを装着した 3 種類の差動法による水晶振動子式力センサを作製した．各センサに，5 ～ 50℃ の範囲の 5℃ おきの各温度において，0～30 N の範囲で 5 N おきの各外力を加え，応力感度とその温度特性を実験的に調べた．その結果，応力感度は $35 \sim 37 \times 10^{-12}$ [Pa⁻¹] 程度となり，ほぼ差動法の原理のところで検討した値になった．また，このセンサの感度が単一の水晶振動子を力センサとして用いた場合の感度の和になっていること，温度特性が改善されてることを実験的に検証した．
- (4) 板ばねの減衰固有振動を利用して，差動法を適用した水晶振動子式力センサに 2.3 kHz までの振動外力を加え，水晶振動子式力センサの動特性を調べた結果，水晶振動子式力センサは少なくともこの程度の振動外力に対して減衰することなく応答できることが明

らかになった。

以上により、差動法を水晶振動子式力センサに適用することが実用上有用であることを明らかにした。

参考文献

- [1] 森村正直, 山崎弘郎 : センサ工学, 21, 朝倉書店 (1982)
- [2] C. R. Mingins, L. C. Barcus and R. W. Perry : Transient Reactions to Stress Changes in Vibrating Crystal Plates, Proc. of the 16th F.C. S., 46/76 (1962)
- [3] C. R. Mingins, R. W. Perry and L. C. Barcus: Effects of External Forces on the Frequency of Vibrating Crystal Plates, Proc. of the 20th F.C. S., 50/69 (1966)
- [4] 中坊, 石井, 石川 : 超並列超高速ビジョンを用いた1msターゲットトラッキングシステム, 日本ロボット学会誌, 15-3, 417/421 (1997)
- [5] ロボット学会編 : ロボット工学ハンドブック, 532 / 534, コロナ社 (1990)

第4章 水晶振動子式力センサの把持力センサへの応用

4.1 はじめに

人間は手で対象に触れてその特性を理解したり、対象を器用に操作したりする。この器用な手を実現する重要な要素として触覚を中心とした感覚系がある。ロボットによる把持、外界センシング、協調搬送などの器用な動作には1章で定義した把持力センサが重要な役割を担うことになる [1]~ [7]。

従来から使用されている把持力センサは、歪みゲージ式、導電性ゴム式、ピエゾ抵抗式、圧電式などアナログ出力のものがほとんどで、これらのセンサは環境ノイズの影響を受けやすく、また信号レベルも低いことが多いため、フィルタ、アンプ、A-D変換器などを必要とすることが多い。フィルタを使用する場合は、力センサの帯域が制限され対象の速い変化に応答できなくなることもある。ロボットセンサのようにアクチュエータなどノイズを発生する機器と共存するセンサは、耐ノイズ性や信号処理の容易なことが要求される。

水晶振動子式力センサはノイズに強く信号処理が容易で高感度、高分解能、広帯域といった特長を有する。このセンサを1章で定義した把持力センサに応用すれば、ノイズに強く信号処理が容易で高感度、高分解能、広帯域のセンサが実現でき、アナログセンサの欠点を克服するセンサとなることが期待できる。

2章では力センサとしての矩形ATカット水晶振動子の基礎特性を調べ、3章では水晶振動子式力センサに適用する差動法について検討した。本章では、2~4対の水晶振動子を指に装着した把持力センサを提案し、指に加わる外力の大きさやその作用点の検出原理を示し、これらと周波数変化量との関係を明らかにする。また、4組の水晶振動子対を指に装着した把持力センサの外界センシングへの応用として、外界の2次元形状センシングを行った。以下これらについて述べる。

4.2 把持力センサの構造

本章では、2～4対の水晶振動子をロボットの指に装着した把持力センサについて検討する。図4-1は、4対の水晶振動子を片持梁（これはロボットの指に相当するので以後これを指と呼ぶ）に装着した把持力センサの構造を示したもので、試験台上に固定したこの指に外力 F を加える方法を示している。2対と3対の水晶振動子を指に装着した把持力センサは、図4-1の把持力センサから2対または1対の水晶振動子を取り除いた構造をしている。各水晶振動子対は、指の中立面から7 mmの対称な位置に放電加工された幅0.2

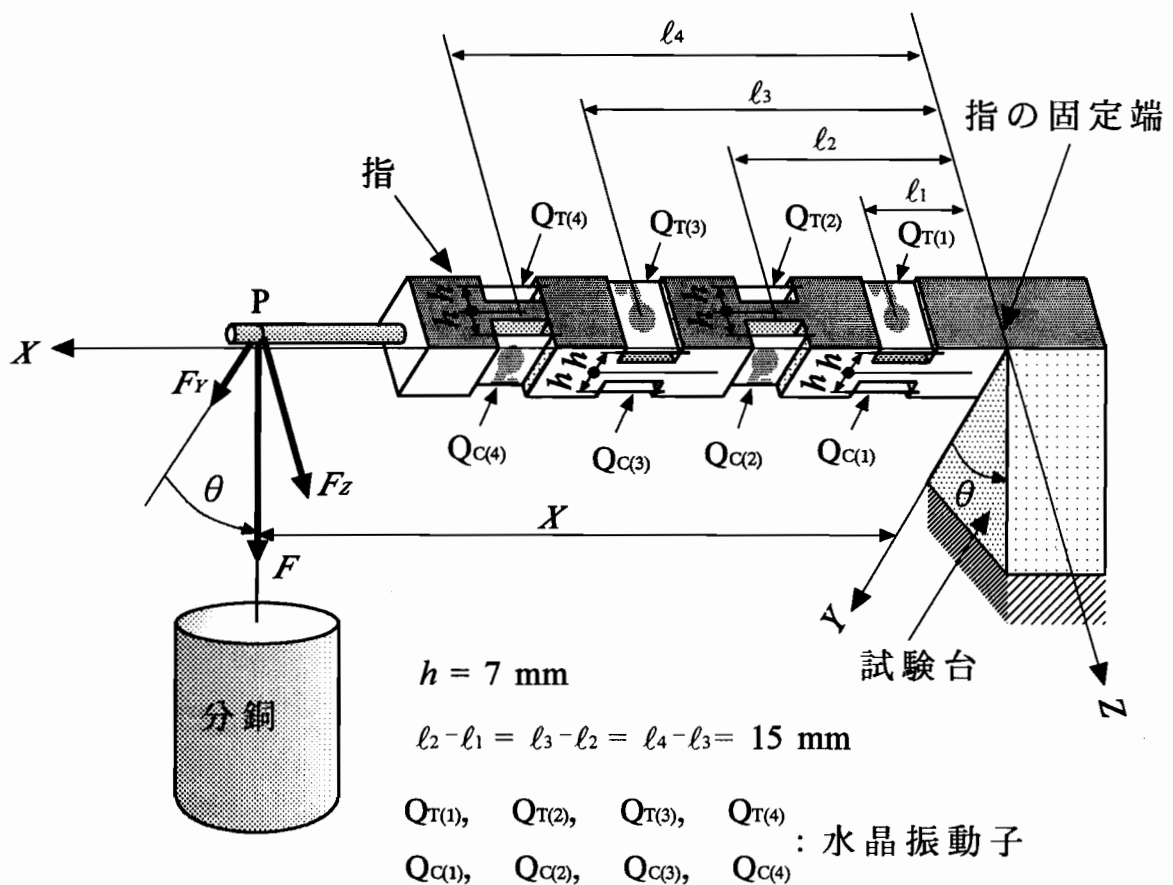


図4-1 4対の水晶振動子を指（片持ちはり）に装着した把持力センサ（試験台上に固定して外力 F を加えているところ）

mm 深さ 1 mm の溝にはめ込まれ、シアノアクリレート系接着材で接着されている。各水晶振動子は長手方向が電気軸から 35° のもので、この方向に外力が加わるように装着されている。固定部の詳細は 2 章の 図 2-12 と同じである。また、把持力以外の周波数を変化させる要因の影響を相殺するため、3 章で述べた差動法が適用されている。

4.3 把持力と把持位置の検出原理

4.3.1 把持力により水晶振動子に生じる応力

図 4.1 において、指の軸線方向を X 方向、指の固定端から 1 番目と 3 番目の水晶振動子対の主面に垂直な方向を Y 方向、2 番目と 4 番目の主面に垂直な方向を Z 方向とする。奇数番目と偶数番目の水晶振動子対の主面は直交していて、 X, Y, Z は直角座標系を構成している。指の固定端を X 座標の原点とし、位置 X の P 点（以後把持位置と呼ぶ）に加わる外力（以後把持力と呼ぶ）の Y - Z 面内成分を F 、その Y, Z 成分をそれぞれ F_Y, F_Z とし、 F が Y 方向となす角を θ とする。水晶振動子を Q で表し、対をなす各々の水晶振動子を区別するために一方に添え字 T を他方に C を付し、さらに指の固定端側の水晶振動子対から順に添え字 $(1) \sim (4)$ を付す。4 対の水晶振動子 ($Q_{T(1)}$ と $Q_{C(1)}$) \sim ($Q_{T(4)}$ と $Q_{C(4)}$) の外力 F による差周波数の変化量をそれぞれ $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ とし、各水晶振動子に対応する諸量に添え字 ($T(1)$ と $C(1)$) \sim ($T(4)$ と $C(4)$) を付す。指の固定端から各水晶振動子対までの距離を $l_1 \sim l_4$ 、水晶振動子と指の中立面の距離を h 、水晶振動子装着部の断面 2 次モーメントを I とすると、各水晶振動子の平均垂直応力 ($\sigma_{T(1)}, \sigma_{C(1)}$) \sim ($\sigma_{T(4)}, \sigma_{C(4)}$) は

$$\sigma_{T(1)} = -\sigma_{C(1)} = \frac{(X - l_1) F_Y h}{I} = \frac{(X - l_1) F h \cos \theta}{I} \dots\dots\dots (45)$$

$$\sigma_{T(2)} = -\sigma_{C(2)} = \frac{(X - l_2) F_Z h}{I} = \frac{(X - l_2) F h \sin \theta}{I} \dots\dots\dots (46)$$

$$\sigma_{T(3)} = -\sigma_{C(3)} = \frac{(X - l_3) F_Y h}{I} = \frac{(X - l_3) F h \cos \theta}{I} \dots\dots\dots (47)$$

$$\sigma_{T(4)} = -\sigma_{C(4)} = \frac{(X - l_4) F_Z h}{I} = \frac{(X - l_4) F h \sin \theta}{I} \dots\dots\dots (48)$$

となる。

4.3.2 把持力による水晶振動子の周波数変化量

f を水晶振動子の周波数, f_0 を把持力 F が 0 のときの周波数, T を摂氏温度とすると, 把持力 F による周波数変化量 $f - f_0$ と 図 2-3 の C-C 断面での平均垂直応力 σ との関係は, 2章の(5), (7), (8), (10), (11)式より

$$f - f_0 = -f_0 \{(\mu_0 + \mu_1 \cos 2\psi) + (\nu_0 + \nu_1 \cos 2\psi) T\} \sigma \quad \dots\dots\dots (49)$$

となる. ここで $\mu_0, \mu_1, \nu_0, \nu_1$ は表 2-3 に示す値で, ψ は外力の方向 (矩形ATカット水晶振動子の長手方向) が水晶振動子の電気軸となす角である. したがって,

$$\cos 2\psi = -\frac{\nu_0}{\nu_1} \approx 0.349 \quad \dots\dots\dots (50)$$

となるよう ψ ($\approx 35^\circ$) を選べば

$$f - f_0 = -f_0 \left(\mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \right) \sigma \approx -18.7 \times 10^{-12} f_0 \sigma \quad \dots\dots\dots (51)$$

のように周波数変化量は温度と無関係になる. ここで, 周波数の単位は [Hz], 応力の単位は [Pa] である.

4.3.3 把持力による水晶振動子対の差周波数の変化量

図 3-2 で, 水晶振動子 Q_T は引張られて周波数が減少し Q_C は圧縮されて増加する. 外力 F による差周波数の変化量を Out と記し, 水晶振動子 Q_T と Q_C に対応する諸量にそれぞれ添字 T と C を付す. Q_T の引張応力 σ_T と Q_C の圧縮応力 σ_C は, $r = 1$ とすると, $\sigma_T = -\sigma_C$ であるから, (49)式より

$$\begin{aligned} Out &= (f_C - f_T) - (f_{0C} - f_{0T}) \\ &= [(f_{0C} + f_{0T}) \mu_0 + (f_{0C} \cos 2\psi_C + f_{0T} \cos 2\psi_T) \mu_1 \\ &\quad + \{ (f_{0C} + f_{0T}) \nu_0 + (f_{0C} \cos 2\psi_C + f_{0T} \cos 2\psi_T) \nu_1 \} T] \sigma_T \quad \dots\dots\dots (52) \end{aligned}$$

となる. したがって

$$f_{0C} \cos 2\psi_C + f_{0T} \cos 2\psi_T = -(f_{0C} + f_{0T}) \frac{\nu_0}{\nu_1} \approx 0.349 (f_{0C} + f_{0T}) \quad \dots\dots\dots (53)$$

となるように外力の方向 ψ_C と ψ_T を選べば(52)式は

$$Out = (f_{0C} + f_{0T}) \left\{ \mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \right\} \sigma_T \approx 18.7 \times 10^{-12} (f_{0C} + f_{0T}) \sigma_T \quad \dots\dots\dots (54)$$

となり、差動法での差周波数の変化量 Out は温度に無関係となる。(54) 式を(51) 式と比較すると、差動法での差周波数の変化量の絶対値 $|Out|$ は各々の水晶振動子の周波数変化量の絶対値 $|f_C - f_{0C}|$ と $|f_T - f_{0T}|$ の和になっていることが分かる。したがって、差動法の力感度（単位外力あたりの周波数変化量）の絶対値も個々の水晶振動子の力感度の絶対値の和になる。

4.3.4 4組の水晶振動子対からなる把持力センサ

図4-1 に示した把持力センサにおいて、指の固定端から i 番目の水晶振動子対の差周波数の変化量を $Out_{(i)}$ ($i = 1 \sim 4$) とすると、(52) 式より

$$\begin{aligned} Out_{(i)} &= (f_{C(i)} - f_{T(i)}) - (f_{0C(i)} - f_{0T(i)}) \\ &= [(f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \mu_0 + (f_{0C(i)} \cos 2\psi_{C(i)} + f_{0T(i)} \cos 2\psi_{T(i)}) \mu_1 \\ &\quad + \{ (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \nu_0 + (f_{0C(i)} \cos 2\psi_{C(i)} + f_{0T(i)} \cos 2\psi_{T(i)}) \nu_1 \} T] \sigma_{T(i)} \quad (55) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $f_{C(i)}$ 、 $f_{T(i)}$ は水晶振動子の周波数、 $f_{0C(i)}$ 、 $f_{0T(i)}$ は把持力 F が 0 のときの周波数、 $\psi_{C(i)}$ 、 $\psi_{T(i)}$ は水晶振動子の電気軸と外力の方向のなす角で、それぞれ指の固定端から i 番目の水晶振動子対に関する量である。(55) 式は

$$f_{0C(i)} \cos 2\psi_{C(i)} + f_{0T(i)} \cos 2\psi_{T(i)} = -(f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \frac{\nu_0}{\nu_1} = 0.349 (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \quad (56)$$

のとき

$$Out_{(i)} = (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \left\{ \mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \right\} \sigma_{T(i)} \approx 18.7 \times 10^{-12} (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \sigma_{T(i)} \quad (57)$$

となり、 $Out_{(i)}$ が温度に無関係となる。以下の議論ではこの(56) 式の関係が成立しているものとする。実験では、 $f_{0T(i)} \approx f_{0C(i)}$ ($\approx 10 \pm 0.05$ MHz) である水晶振動子対を使用し、 $\psi_{C(i)}$ と $\psi_{T(i)}$ が約 35° の水晶振動子を指に装着しているので(56) 式が満足されている。

(45) ~ (48) 式を(57) 式に代入すると

$$Out_{(1)} = A_1 \gamma (X - \ell_1) F_Y = A_1 \gamma (X - \ell_1) F \cos \theta \quad \dots\dots\dots (58)$$

$$Out_{(2)} = A_2 \gamma (X - \ell_2) F_Z = A_2 \gamma (X - \ell_2) F \sin \theta \quad \dots\dots\dots (59)$$

$$Out_{(3)} = A_3 \gamma (X - l_3) F_Y = A_3 \gamma (X - l_3) F \cos \theta \quad \dots\dots\dots (60)$$

$$Out_{(4)} = A_4 \gamma (X - l_4) F_Z = A_4 \gamma (X - l_4) F \sin \theta \quad \dots\dots\dots (61)$$

となる. ここで

$$\left. \begin{aligned} A_{(i)} &= f_{0C(i)} + f_{0T(i)} \quad [\text{Hz}] \quad (i = 1 \sim 4) \\ \gamma &= \{\mu_0 - \mu_1 (\nu_0/\nu_1)\} h / I \approx 18.7 \times 10^{-12} h / I \quad [\text{Pa}^{-1}\text{m}^{-3}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (62)$$

とおいた. このように水晶振動子対 $Q_{(1)}$ と $Q_{(3)}$ は Z 方向 ($\theta = 90^\circ$) の外力に, $Q_{(2)}$ と $Q_{(4)}$ は Y 方向 ($\theta = 0^\circ$) の外力に対して感度をもたない. 把持力の2方向成分 F_Y , F_Z と把持位置 X は, (58) ~ (61) 式からつぎのように導かれる.

$$F_Y = \frac{A_3 Out_{(1)} - A_1 Out_{(3)}}{A_1 A_3 \gamma (l_3 - l_1)} \quad \dots\dots\dots (63)$$

$$= \frac{Out_{(3)} (A_4 Out_{(2)} - A_2 Out_{(4)})}{A_3 \gamma \{A_4 (l_4 - l_3) Out_{(2)} + A_2 (l_3 - l_2) Out_{(4)}\}} \quad \dots\dots\dots (64)$$

$$= \frac{Out_{(1)} (A_2 Out_{(4)} - A_4 Out_{(2)})}{A_1 \gamma \{A_2 (l_2 - l_1) Out_{(4)} + A_4 (l_1 - l_4) Out_{(2)}\}} \quad \dots\dots\dots (65)$$

$$F_Z = \frac{A_4 Out_{(2)} - A_2 Out_{(4)}}{A_2 A_4 \gamma (l_4 - l_2)} \quad \dots\dots\dots (66)$$

$$= \frac{Out_{(2)} (A_3 Out_{(1)} - A_1 Out_{(3)})}{A_2 \gamma \{A_3 (l_3 - l_2) Out_{(1)} + A_1 (l_2 - l_1) Out_{(3)}\}} \quad \dots\dots\dots (67)$$

$$= \frac{Out_{(4)} (A_3 Out_{(1)} - A_1 Out_{(3)})}{A_4 \gamma \{A_3 (l_3 - l_4) Out_{(1)} + A_1 (l_4 - l_1) Out_{(3)}\}} \quad \dots\dots\dots (68)$$

$$X = \frac{A_3 l_3 Out_{(1)} - A_1 l_1 Out_{(3)}}{A_3 Out_{(1)} - A_1 Out_{(3)}} \quad \dots\dots\dots (69)$$

$$= \frac{A_4 l_4 Out_{(2)} - A_2 l_2 Out_{(4)}}{A_4 Out_{(2)} - A_2 Out_{(4)}} \quad \dots\dots\dots (70)$$

また, 把持力 F と その方向 θ は

$$F = \sqrt{F_Y^2 + F_Z^2} \quad \dots\dots\dots (71)$$

$$\theta = \arctan (F_Z / F_Y) \quad \dots\dots\dots (72)$$

表 4-1 4組の水晶振動子対の差周波数変化量 $Out_{(i)}$ から把持力の2方向成分 F_Y と F_Z および把持位置 X を求めるのに使用する式

	F_Y を求める式	F_Z を求める式	X を求める式
$\theta \neq 0$ かつ $\theta \neq 90^\circ$ のとき	(63) (64) (65)	(66) (67) (68)	(69) (70)
$\theta = 0^\circ$ のとき	(63)	(66) (67) (68)	(69)
$\theta = 90^\circ$ のとき	(63) (64) (65)	(66)	(70)

のように、把持力の2方向成分により決まる。(58)～(61)式において、把持力の方向 θ が 0° すなわち Y 方向のとき $Out_{(2)}$ と $Out_{(4)}$ が 0 となり、(64), (65), (70) 式の分母が 0 となってこれらの式が使えない。また、 θ が 90° すなわち Z 方向のとき $Out_{(1)}$ と $Out_{(3)}$ が 0 となり、(67), (68), (69) 式の分母が 0 となってこれらの式が使えない。したがって、 $\theta = 0^\circ$ のとき、1つの F_Y 、3つの F_Z 、1つの X が求まり、 $\theta = 90^\circ$ のとき、3つの F_Y 、1つの F_Z 、1つの X が求まる。これらを表 4-1 にまとめて示す。 $\theta \neq 0$ かつ $\theta \neq 90^\circ$ のとき、異なる3組の水晶振動子対出力から各3個の F_Y と F_Z および2個の X が同時に決まるので、水晶振動子対相互の異常監視が可能となり、さらに1対の水晶振動子に不具合が生じても残り3対で急場を凌ぐことが可能である。把持力の感度は、(62)～(68)式より、水晶振動子の周波数 f 、水晶振動子取付部の断面2次モーメント I 、水晶振動子の取り付け位置 h, l により調節でき、把持位置の感度は、(62), (69), (70)式より、 f, l により調節できることがわかる。

4.3.5 3組の水晶振動子対からなる把持力センサ

前項の結果からわかるように、分母を 0 にする把持力の方向 θ を除けば、 F_Y, F_Z, X は任意の3組の水晶振動子対の出力 $Out_{(i)}$ だけからでも決定できるので、把持力センサを3組のみの水晶振動子対で構成することもできる。表 4-2 に使用する3組の水晶振動子対、その場合の F_Y, F_Z, X を求める式、 $\theta = 90^\circ$ および $\theta = 0^\circ$ のとき求まらない量をま

表 4-2 3組の水晶振動子対の差周波数変化量 $Out_{(i)}$ から把持力の2方向成分 F_Y と F_Z および把持位置 X を求めるのに使用する式と $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 90^\circ$ のときに求まらない量

使用する 水晶振動子対 の組み合わせ	F_Y を求 める式	F_Z を求 める式	X を求 める式	$\theta = 90^\circ$ のとき求ま らない量	$\theta = 0^\circ$ のとき求ま らない量
$Q_{(1)} \quad Q_{(2)} \quad Q_{(3)}$	(63)	(67)	(69)	$F_Z \quad X$	
$Q_{(2)} \quad Q_{(3)} \quad Q_{(4)}$	(64)	(66)	(70)		$F_Y \quad X$
$Q_{(3)} \quad Q_{(4)} \quad Q_{(1)}$	(63)	(68)	(69)	$F_Z \quad X$	
$Q_{(4)} \quad Q_{(1)} \quad Q_{(2)}$	(65)	(66)	(70)		$F_Y \quad X$

とめて示す。3組の水晶振動子対からなる把持力センサでは、外力の方向 θ が 0° または 90° のとき、把持力の2方向成分のうちの1つと把持位置が決まらないことに注意を要する。

4.3.6 2組の水晶振動子対からなる把持力センサ

把持力の Y 方向成分 F_Y と把持位置 X のみの測定には ($Q_{T(1)}$ と $Q_{C(1)}$), ($Q_{T(3)}$ と $Q_{C(3)}$) の2組の水晶振動子対だけでよく、これらの出力 $Out_{(1)}$ と $Out_{(3)}$ を用いて、 F_Y は(63)式により、 X は(69)式により決定できる。把持力の Z 方向成分 F_Z と把持位置 X のみの測定には ($Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$), ($Q_{T(4)}$ と $Q_{C(4)}$) の2組の水晶振動子対だけでよく、 F_Z は(66)式により、 X は(70)式により求められる。

4.4 把持力センサの試作とその基礎特性

図4-1のように、4対の水晶振動子を指に装着した把持力センサを試作した。これを角 θ を有する三角形の試験台に固定し、分銅を吊り下げてY方向から θ の角をなす方向（鉛直方向）に外力を加えた。0～90°の範囲で15°おきの θ を有する実験台を使用して、外力 F の大きさと分銅の吊り下げ位置 X を変化させて、各水晶振動子対の差周波数の変化量を測定した。図4-2に測定系のブロック図を示す。

0～90°の範囲で15°おきの θ について、

(I) X を0.194 mに固定し、 F を0～4.9 Nの範囲で0.98 Nおきに变化させたときの各水晶振動子対の差周波数の変化量 $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ を測定した。

(II) F を2.94 Nに固定して、分銅の吊り下げ位置（把持位置） X を0.164 m～0.224 mの範囲で0.010 mおきに变化させたときの $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ を測定した。

(I), (II)の実験を各3回繰り返した。(58)～(61)式を各水晶振動子対ごとに

$$\left. \begin{array}{l} Out_{(1)} = k_{F1} F \quad Out_{(2)} = k_{F2} F \\ Out_{(3)} = k_{F3} F \quad Out_{(4)} = k_{F4} F \end{array} \right\} \dots\dots\dots (73)$$

$$\left. \begin{array}{l} Out_{(1)} = k_{X1} X - l_{X1} \quad Out_{(2)} = k_{X2} X - l_{X2} \\ Out_{(3)} = k_{X3} X - l_{X3} \quad Out_{(4)} = k_{X4} X - l_{X4} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (74)$$

$$\left. \begin{array}{l} Out_{(1)} = k_{\theta1} \cos \theta \quad Out_{(2)} = k_{\theta2} \sin \theta \\ Out_{(3)} = k_{\theta3} \cos \theta \quad Out_{(4)} = k_{\theta4} \sin \theta \end{array} \right\} \dots\dots\dots (75)$$

のように書きかえ、これらについて検証する。ここで

$$\left. \begin{array}{l} k_{F1} = A_1 \gamma (X - l_1) \cos \theta \quad k_{F2} = A_2 \gamma (X - l_2) \sin \theta \\ k_{F3} = A_3 \gamma (X - l_3) \cos \theta \quad k_{F4} = A_4 \gamma (X - l_4) \sin \theta \end{array} \right\} \dots\dots\dots (76)$$

$$\left. \begin{array}{l} k_{X1} = A_1 \gamma F \cos \theta \quad k_{X2} = A_2 \gamma F \sin \theta \\ k_{X3} = A_3 \gamma F \cos \theta \quad k_{X4} = A_4 \gamma F \sin \theta \\ l_1 = A_1 \gamma l_1 F \cos \theta \quad l_2 = A_2 \gamma l_2 F \sin \theta \\ l_3 = A_3 \gamma l_3 F \cos \theta \quad l_4 = A_4 \gamma l_4 F \sin \theta \end{array} \right\} \dots\dots\dots (77)$$

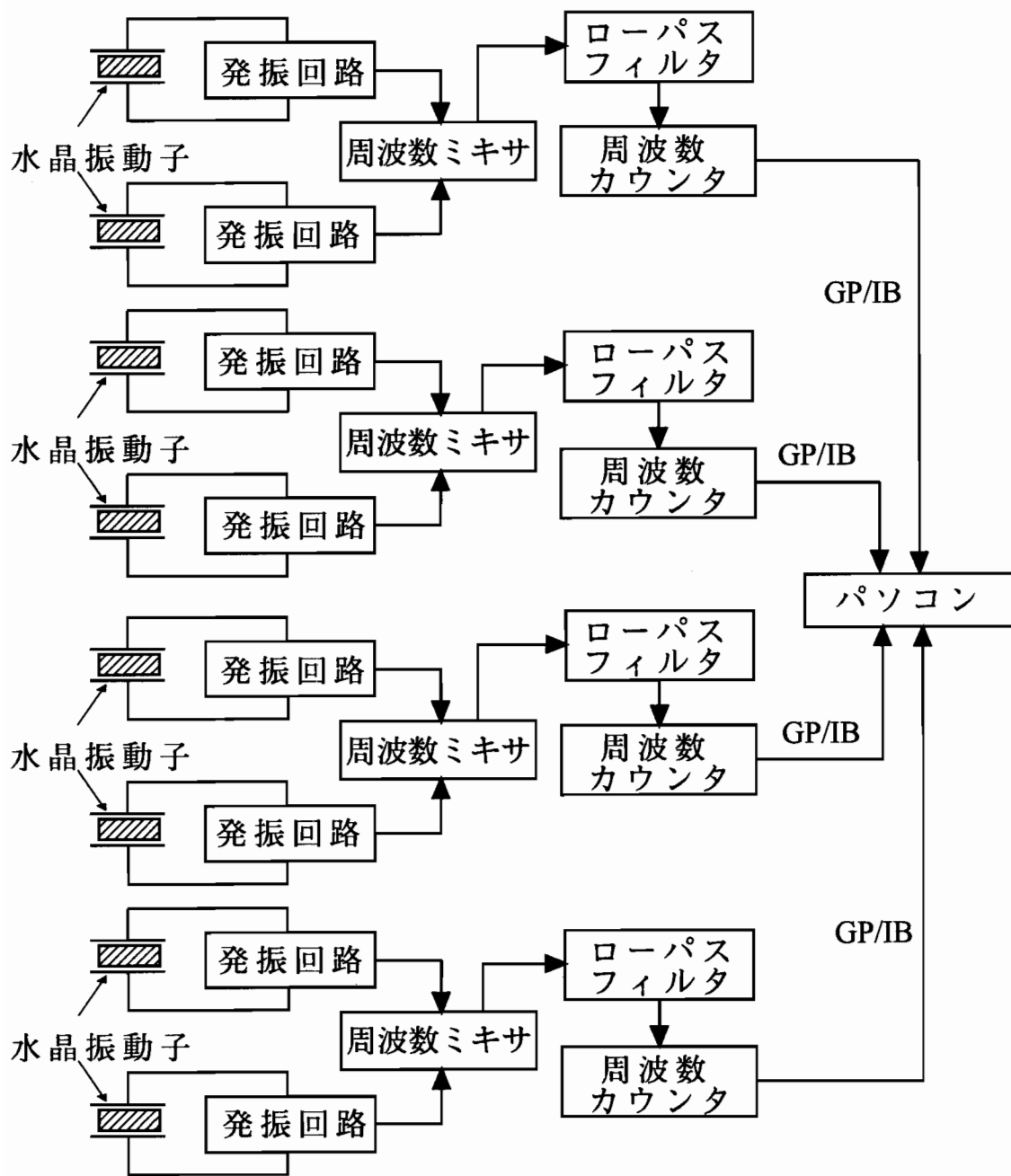


図 4-2 4 対の水晶振動子を装着した把持力センサの測定系のブロック図

$$\left. \begin{aligned} k_{\theta 1} &= A_1 \gamma (X - l_1) F & k_{\theta 2} &= A_2 \gamma (X - l_2) F \\ k_{\theta 3} &= A_3 \gamma (X - l_3) F & k_{\theta 4} &= A_4 \gamma (X - l_4) F \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (78)$$

とおいた。まず、(I)の実験での $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ の各3回の測定値を(73)式により F で回帰して係数 $k_{F1} \sim k_{F4}$ と残差の標準偏差 $s_{F1} \sim s_{F4}$ を求め、これらを表4-3 (A) に示した。つぎに(II)の実験結果を(74)式により X で回帰して係数 $k_{X1} \sim k_{X4}$ および $l_{X1} \sim l_{X4}$ と残差の標準偏差 $s_{X1} \sim s_{X4}$ を求め、これらを表4-3 (B) に示した。さらに(I)の実験結果を(75)式により θ で回帰して係数 $k_{\theta 1} \sim k_{\theta 4}$ と残差の標準偏差 $s_{\theta 1} \sim s_{\theta 4}$ を求め、これらを表4-3 (C) に示した。図4-3 は、表4-3 のうち影付部の $Out_{(i)}$ ($i = 1 \sim 4$) をグラフ化したもので、 $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ の測定値がそれぞれ ■, ●, ★, × 印で、回帰線が実線で示してある。(A)は $X = 0.194$ m, $F = 2.94$ N での $Out_{(i)}$ と θ の関係、(B)は $F = 2.94$ N, $\theta = 30^\circ$ での $Out_{(i)}$ と X の関係、(C)と(D)はそれぞれ $\theta = 0^\circ$, $X = 0.194$ m と $\theta = 90^\circ$, $X = 0.194$ m での $Out_{(i)}$ と F の関係で、これよりクロストークを無視できることがわかる。(E)と(F)は $\theta = 30^\circ$, $X = 0.194$ m と $\theta = 60^\circ$, $X = 0.194$ m での $Out_{(i)}$ と F の関係である。なお、固定端から奇数番目の水晶振動子対出力 $Out_{(1)}$ と $Out_{(3)}$ が、 $\theta = 90^\circ$ の場合を除いて同一の把持力や把持位置に対して異なるのは、それぞれの水晶振動子対の取り付け位置 l_1 と l_3 が異なるためである。偶数番目の $Out_{(2)}$ と $Out_{(4)}$ が、 $\theta = 0^\circ$ の場合を除いて異なるのも l_2 と l_4 が異なるためである。

つぎに、この実験で使用した全ての水晶振動子の周波数が 10 ± 0.05 MHz の範囲に入っていることと水晶振動子対が等間隔に装着されていることを考慮し、 $k_1 \sim k_{10}$ を係数とすると、(63)~(70)式は次のように変形できる。

$$F_Y \approx k_1 \{ Out_{(1)} - Out_{(3)} \} \dots\dots\dots (79)$$

$$\approx k_2 \left\{ \frac{Out_{(3)} (Out_{(2)} - Out_{(4)})}{Out_{(2)} + Out_{(4)}} \right\} \dots\dots\dots (80)$$

$$\approx k_3 \left\{ \frac{Out_{(1)} (Out_{(4)} - Out_{(2)})}{Out_{(4)} - 3 Out_{(2)}} \right\} \dots\dots\dots (81)$$

$$F_Z \approx k_4 \{ Out_{(2)} - Out_{(4)} \} \dots\dots\dots (82)$$

$$\approx k_5 \left\{ \frac{Out_{(2)} (Out_{(1)} - Out_{(3)})}{Out_{(1)} + Out_{(3)}} \right\} \dots\dots\dots (83)$$

表4-3 $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ と (A) 外力 F , (B) 把持位置 X , (C) 外力の方向 θ の関係

(A)

X [m]	θ [°]	$Out_1 = k_{F1}F$		$Out_2 = k_{F2}F$		$Out_3 = k_{F3}F$		$Out_4 = k_{F4}F$	
		k_{F1} [Hz/N]	s_{F1} [Hz]	k_{F2} [Hz/N]	s_{F2} [Hz]	k_{F3} [Hz/N]	s_{F3} [Hz]	k_{F4} [Hz/N]	s_{F4} [Hz]
0.194	0	447.9	1.3	0.4	0.6	380.8	0.9	8.2	1.0
	15	429.8	1.1	101.2	2.3	366.9	0.6	85.5	1.7
	30	383.2	2.5	190.8	1.3	327.9	1.0	154.0	1.2
	45	314.0	1.6	268.3	2.8	268.9	0.6	212.9	1.9
	60	220.9	1.9	328.0	0.8	190.5	1.2	257.7	2.9
	75	115.0	0.5	365.2	1.5	100.4	0.8	283.8	1.1
	90	0.9	0.3	377.5	2.0	2.2	2.0	291.6	1.3

(B)

F [N]	θ [°]	$Out_1 = k_{X1}X - l_{X1}$			$Out_2 = k_{X2}X - l_{X2}$			$Out_3 = k_{X3}X - l_{X3}$			$Out_4 = k_{X4}X - l_{X4}$		
		k_{X1} [Hz/m]	l_{X1} [Hz]	s_{X1} [Hz]	k_{X2} [Hz/m]	l_{X2} [Hz]	s_{X2} [Hz]	k_{X3} [Hz/m]	l_{X3} [Hz]	s_{X3} [Hz]	k_{X4} [Hz/m]	l_{X4} [Hz]	s_{X4} [Hz]
2.94	0	8620	-358	2	10	4	0	9158	-658	5	81	7	2
	15	8339	-351	3	2089	-112	3	8873	-640	4	2142	-166	5
	30	7517	-319	2	4118	-239	2	7952	-569	4	4079	-338	3
	45	6155	-268	5	5745	-328	6	6424	-440	4	5758	-490	5
	60	4286	-179	2	7054	-403	4	4499	-310	1	6988	-597	2
	75	2338	-96	4	8112	-467	3	2335	-149	4	7848	-676	5
	90	100	-9	0	8138	-467	4	0	-2	1	8020	-695	2

(C)

X [m]	F [N]	$Out_1 = k_{\theta 1} \cos \theta$		$Out_2 = k_{\theta 2} \sin \theta$		$Out_3 = k_{\theta 3} \cos \theta$		$Out_4 = k_{\theta 4} \cos \theta$	
		$k_{\theta 1}$ [Hz]	$s_{\theta 1}$ [Hz]	$k_{\theta 2}$ [Hz]	$s_{\theta 2}$ [Hz]	$k_{\theta 3}$ [Hz]	$s_{\theta 3}$ [Hz]	$k_{\theta 4}$ [Hz]	$s_{\theta 4}$ [Hz]
0.194	0.98	437	2	367	4	369	0	277	5
	1.96	873	3	742	3	745	3	581	11
	2.94	1308	9	1113	5	1117	5	872	11
	3.92	1745	7	1484	6	1491	5	1162	22
	4.90	2190	16	1843	10	1849	8	1389	17

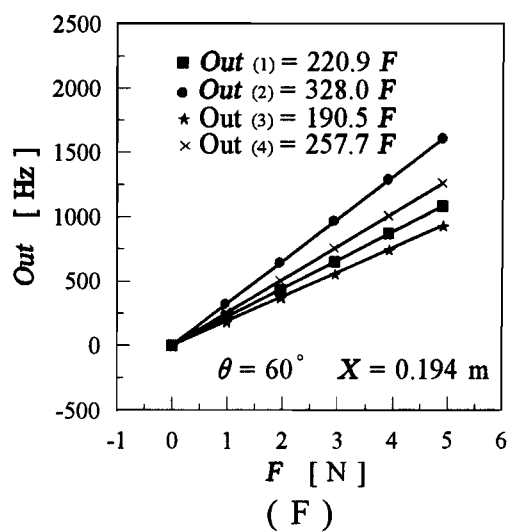
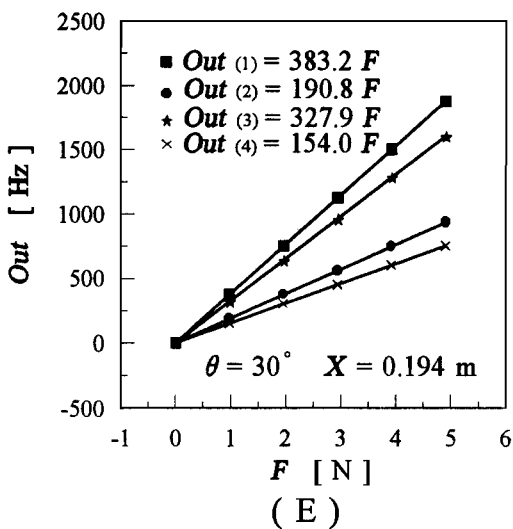
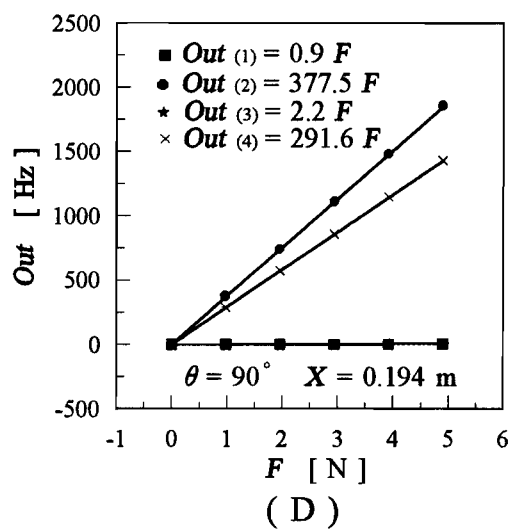
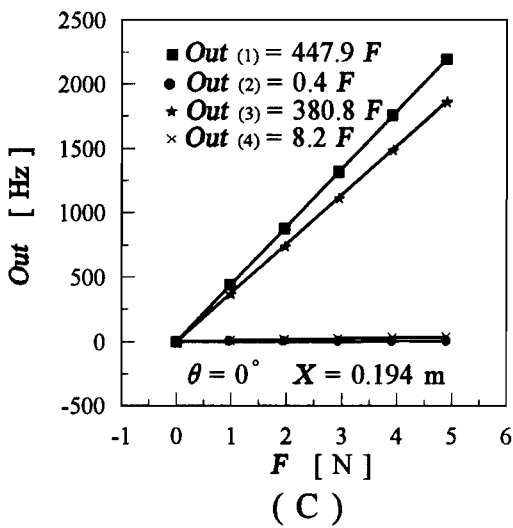
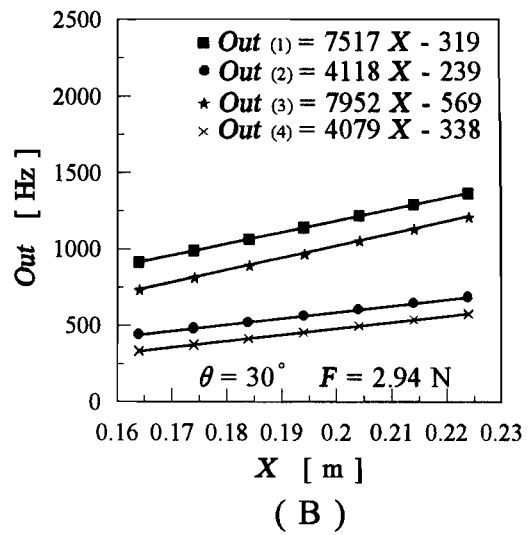
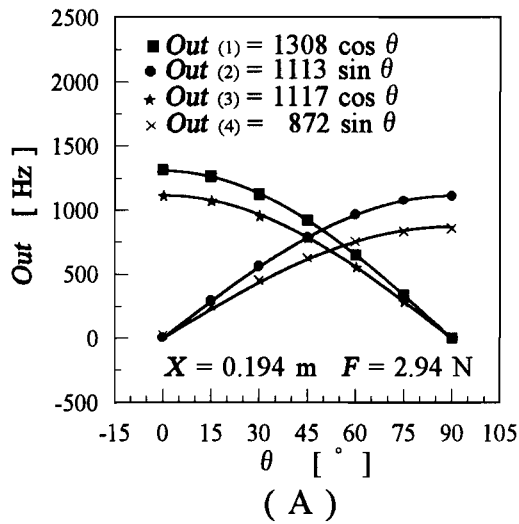


図4-3 $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ と、(A) 外力の方向 θ 、(B) 把持位置 X 、(C) $\theta = 0^\circ$ での把持力 F 、(D) $\theta = 90^\circ$ での F 、(E) $\theta = 30^\circ$ での F 、(F) $\theta = 60^\circ$ での F 、との関係

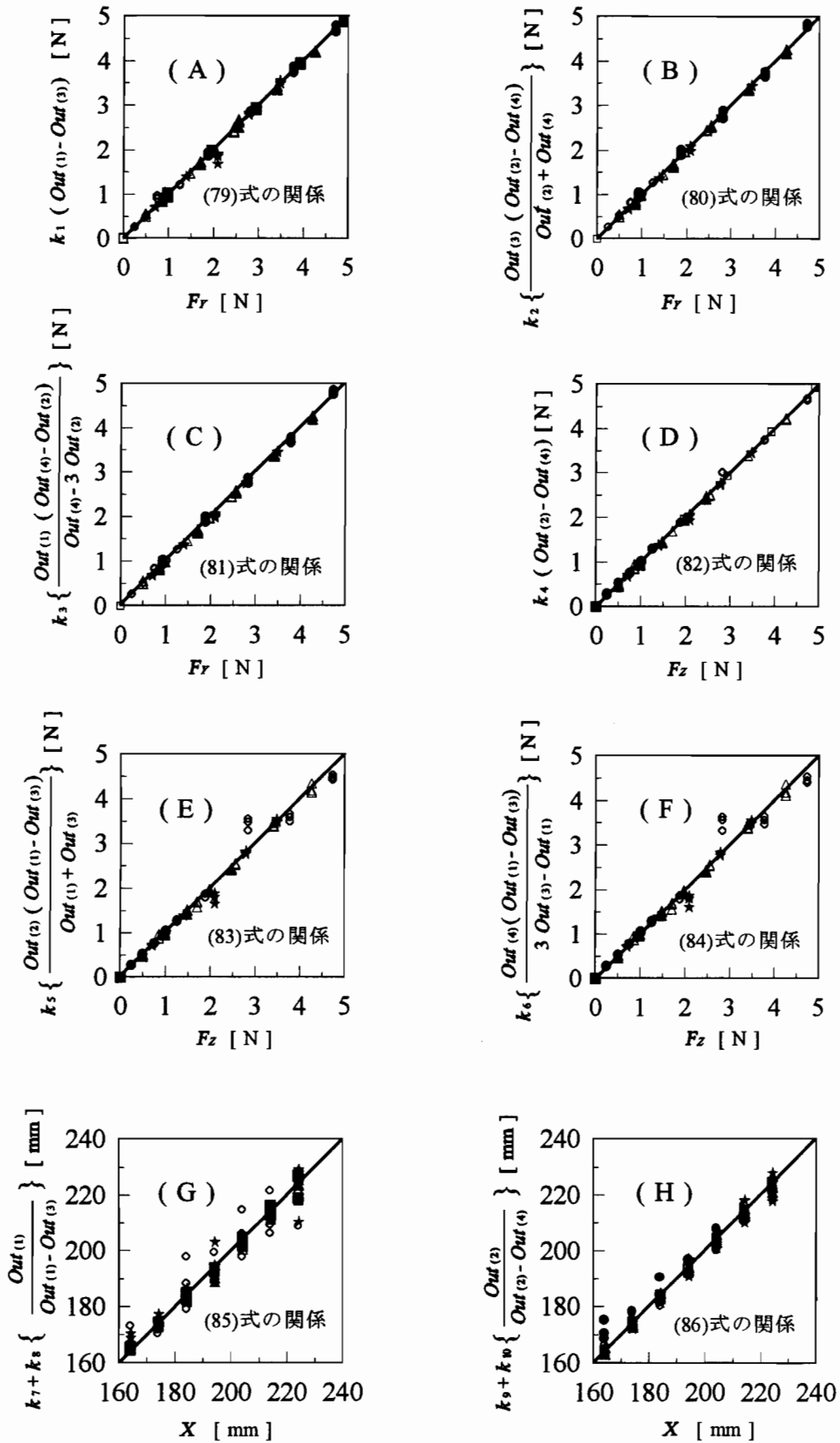


図4-4 F_Y , F_Z , X の測定値と設定値の関係 (■ : $\theta = 0^\circ$, ● : $\theta = 15^\circ$,
▲ : $\theta = 30^\circ$, ★ : $\theta = 45^\circ$, △ : $\theta = 60^\circ$, ○ : $\theta = 75^\circ$, □ : $\theta = 90^\circ$)

$$\approx k_6 \left\{ \frac{Out_{(4)} (Out_{(1)} - Out_{(3)})}{3 Out_{(3)} - Out_{(1)}} \right\} \dots\dots\dots (84)$$

$$X \approx k_7 + k_8 \left\{ \frac{Out_{(1)}}{Out_{(1)} - Out_{(3)}} \right\} \dots\dots\dots (85)$$

$$\approx k_9 + k_{10} \left\{ \frac{Out_{(2)}}{Out_{(2)} - Out_{(4)}} \right\} \dots\dots\dots (86)$$

(I) と (II) の実験値 $Out_{(i)}$ を (79)~(86) 式に代入し、これらの値を F_Y , F_Z , X の設定値で回帰して係数 $k_1 \sim k_{10}$ を求めた。図 4-4 は、これらの係数と実験値 $Out_{(i)}$ から求めた (79) ~ (86) 式の右辺の値を縦軸に、 F_Y , F_Z , X の設定値を横軸にとって描いたもので、実験値が傾き 45° の線上にあれば設定値と $Out_{(i)}$ からの計算値が一致していることになる。(A)~(H) がそれぞれ (79) ~ (86) 式の関係に対応している。(B), (C), (H) では $\theta = 0^\circ$ のとき $Out_{(2)}$, $Out_{(4)}$ が 0 のため分母が 0 となってそれぞれの値が定まらず、(E), (F), (G) では $\theta = 90^\circ$ のとき $Out_{(1)}$, $Out_{(3)}$ が 0 のため分母が 0 となってそれぞれの値が定まらないので、これらの場合の実験値は描かれていない。(E), (F), (G) では θ が 90° に近い 75° (○印) で分母の値が小さくなり誤差が大きくなる傾向にあり、(H) では θ が 0° に近い 15° (●印) で分母の値が小さくなり誤差が大きくなる傾向にあった。これらを除くと概ね $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ の測定値から計算した F_Y , F_Z , X の値とこれらの設定値とがほぼ一致していた。回帰により求めた係数 $k_1 \sim k_{10}$ を (79) ~ (86) 式に代入し、これらの式を用いて $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ の測定値から F_Y , F_Z , X を求めることは、センサを校正して使用することに相当している。以上により、この指が把持力の 2 方向成分 F_Y , F_Z と把持位置 X のセンサとして機能していることが確認できた。

4.5 把持力センサの外界センシングへの応用

ここでは図 4-1 で示した把持力センサである指の外界センシングへの応用として、図 4-5 に示すように、この指を水平面内で Y 方向（水平方向）に移動させて Z 方向（上下方向）に移動する対象（外界）を一定接触力でなぞり、指の位置情報から対象の 2 次元形状をセンシングした。測定値 $Out_{(1)} \sim Out_{(4)}$ を (79) 式と (82) 式に代入して接触力の 2 方向成分 F_Y , F_Z を求め、これらを (71) 式に代入して接触力 F を求めた。この F の値

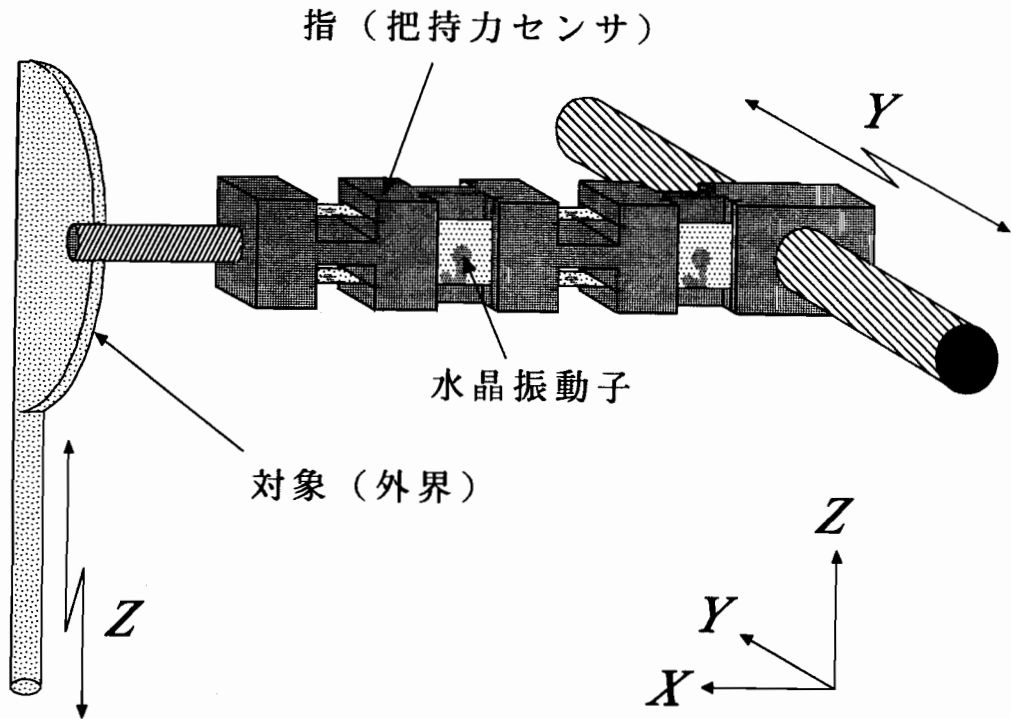


図4-5 4組の水晶振動子対を装着した把持力センサによる外界センシング

が $1\text{N} \pm 0.1\text{N}$ の範囲に入るように指を移動させるモータ (Y 方向) と対象を移動させるモータ (Z 方向) を制御しながらなぞり動作を行った. 図4-6 に把持力センサによる外界センシングの測定系のブロック図を示す. 図4-5 は半円板の外周 (半径15mm) をなぞる方法を示したもので, 図4-7 (A) にその結果を示す. 指を Y 方向に移動させるモータのエンコーダによる位置情報 Y_f と対象を Z 方向に移動させるモータのエンコーダによる位置情報 Z_f は指の中心軸の Y, Z 座標 (Y_f, Z_f) に相当している. 図4-7 (A) の (1) はこの (Y_f, Z_f) の軌跡で, この図の半径は対象の半径 (15mm) より指の半径 (3mm) 分大きく描かれている. 図4-7 (B) は半円状穴の内周 (半径15mm) をなぞった場合で, 図4-7 (B) の (1) は指の中心軸の軌跡に相当していて, この半径は対象の半径 (15mm) より指の半径 (3mm) 分小さく描かれている. 対象の形状は指と対象の接触位置の軌跡に対応しているので, 次式により指の軌跡を接触位置の軌跡に変換することにより対象の2次元形状が得られる.

$$Y_e = Y_f - R \cos \theta \quad \dots\dots\dots (87)$$

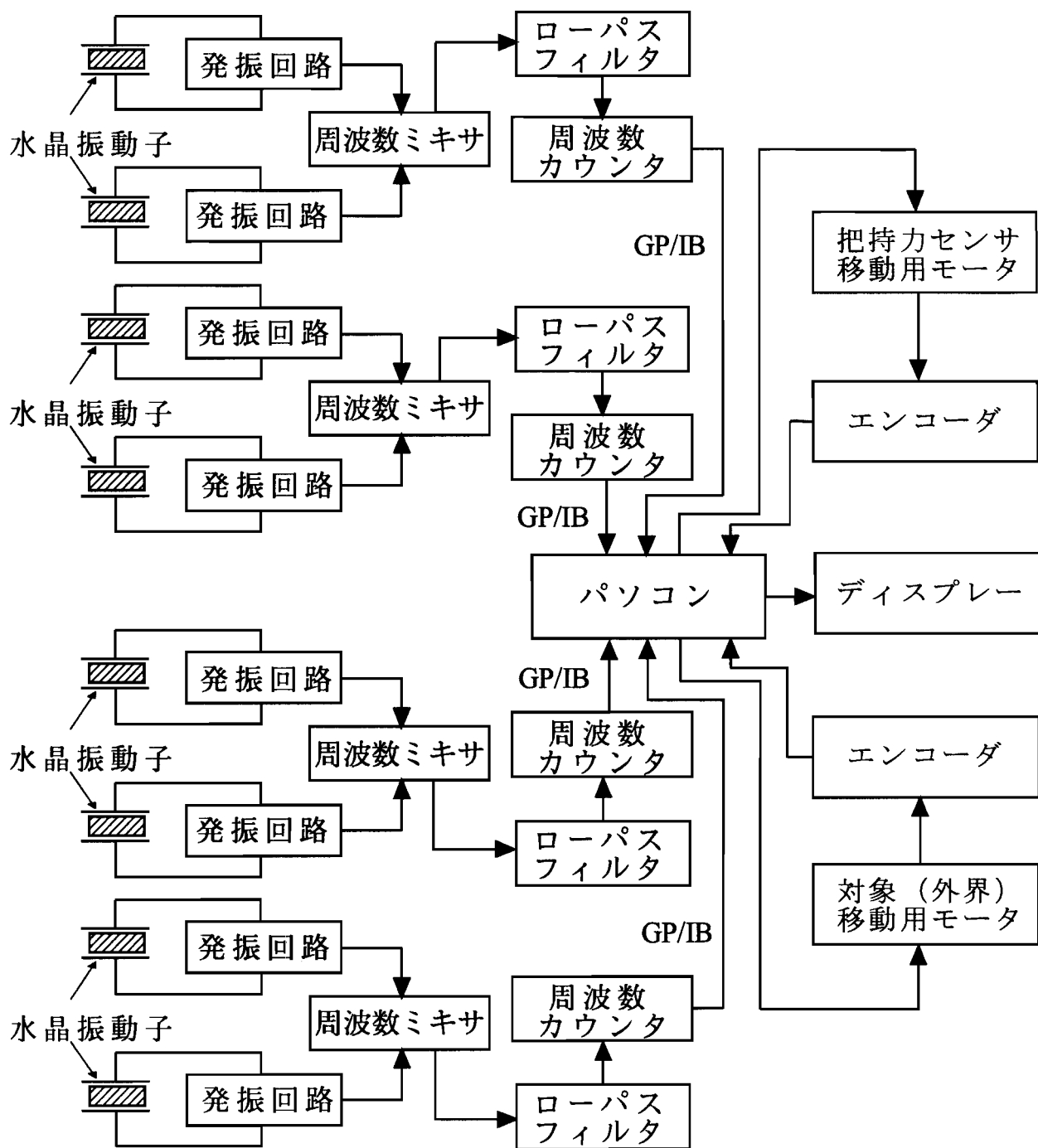
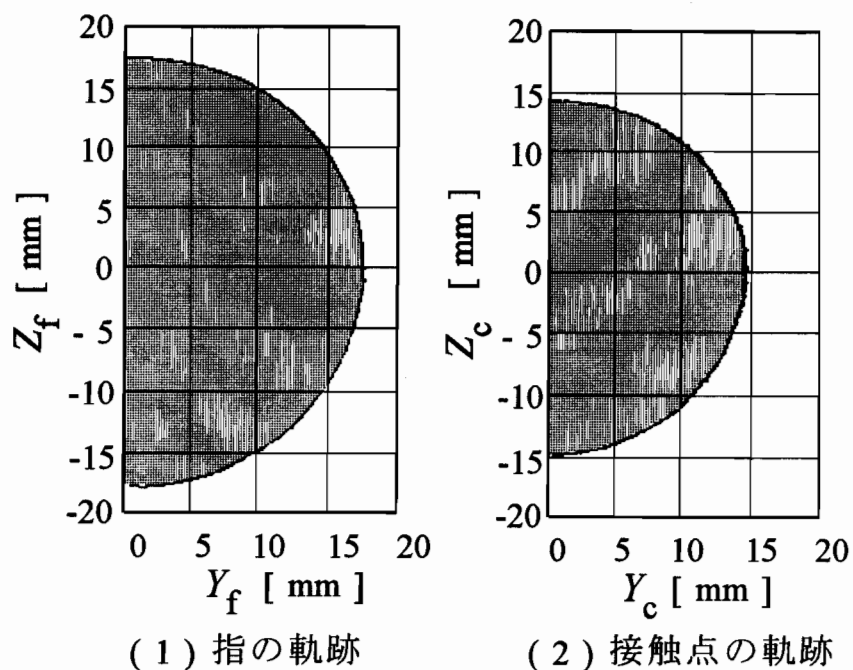
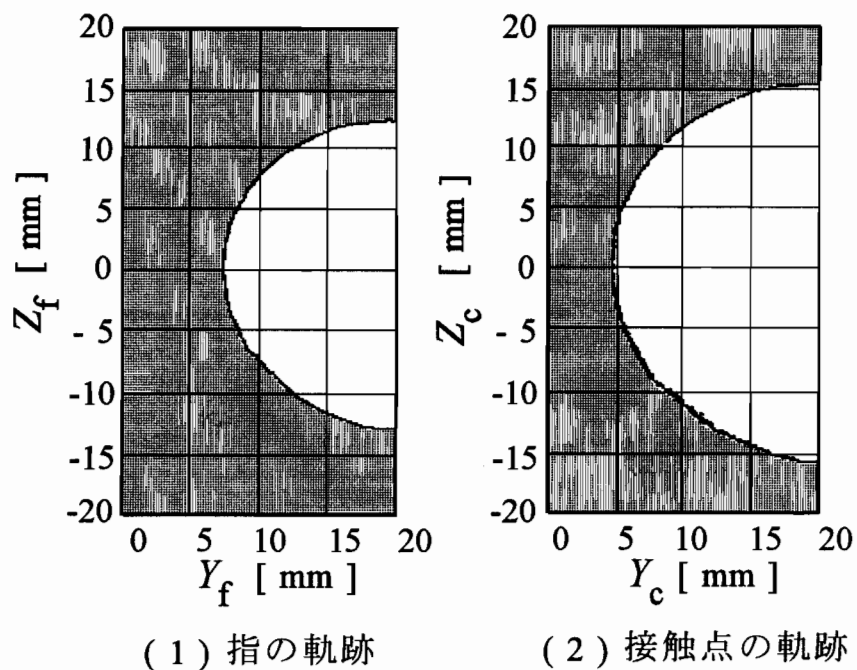


図4-6 把持力センサを用いた外界センシングに関する測定系のブロック図



(A) 半径15mmの半円板の外周



(B) 半径15mmの半円穴の内周

図4-7 (A)-(1) 半円板の外周をなぞったときの指の軌跡, (A)-(2) 指と対象の接点の軌跡 (半円板の2次元形状), (B)-(1) 半円穴の内周をなぞったときの指の軌跡 (B)-(2) 指と対象の接点の軌跡 (半円穴の2次元形状)

$$Z_e = Z_f - R \sin \theta \quad \dots\dots\dots (88)$$

ここで (Y_e, Z_e) は指と外界の接触位置の座標, R は指の半径である. 接触力の2成分 F_Y, F_Z を(72)式に代入して接触角 θ を求め, これを(87), (88)式に代入して Y_e, Z_e を求め, 外界の2次元形状を得た. 図4-7(A)の(2)と図4-7(B)の(2)は(87), (88)式により求めた対象の2次元形状である. 図4-7(A)の(2)はわずかに実際より小さく, 図4-7(B)の(2)はわずかに大きい. これは図4-5の指のわずかな柔構造に起因していると考えている. この点を除くと図4-7(A)の(2)と図4-7(B)の(2)は対象の2次元形状を忠実に再構成している. これらのことから, 水晶振動子を装着した指が把持力センサとして機能していると同時に外界センシングにも有用であることが明らかとなった.

4.6 まとめ

水晶振動子式力センサは, 出力が周波数のためノイズに強く信号処理が容易で高感度, 高分解能, 広帯域といった特長を有する.

- (1) 水晶振動子式力センサのロボットセンサへの応用として, 把持力 F と把持位置 X を検出するための把持力センサを提案した.
- (2) この指に加わる把持力 F および把持位置 X と水晶振動子対の差周波数の変化量 $Out_{(i)}$ ($i = 1 \sim 4$) の関係について検討し, つぎの3点を明らかにした.
 - (a) 2組の水晶振動子対からなる把持力センサは, 1方向の把持力とその作用点を検出できる.
 - (b) 3組の水晶振動子対からなる把持力センサは, 指の軸線に垂直な断面内での把持力の2方向成分 F_Y, F_Z , 把持位置 X が検出できる. ただし, 外力が Y 方向か Z 方向のいずれかるとき, F_Y, F_Z のうちどちらかと X の2つの量が定まらないことに注意を要する.
 - (c) 4組の水晶振動子対からなる把持力センサは, 指の軸線に垂直な断面内の全ての方向の把持力に対して, その2方向成分 F_Y, F_Z とその作用点(把持位置) X が検出できる. さらに, 任意の3組の水晶振動子対から求めた複数のこれらの値を相互比較

することにより、水晶振動子対相互の異常監視が可能となる。4組の水晶振動子対のうち1組のみに不具合が生じた場合は、残りの3組により急場を凌ぐことも可能である。

- (3) 4対の水晶振動子からなる把持力センサとしての指を試作し、これを用いて(2)の(a)～(c)の検討結果を実験的に検証した。
- (4) 4対の水晶振動子からなる把持力センサとしての指の外界センシングへの応用として、この指により一定の接触力で対象をなぞり、接触力の2方向成分 F_Y , F_Z から接触力の方向 θ を求め、この方向と指の軌跡から接触点の軌跡すなわち対象の2次元形状をセンシングした結果、対称の2次元形状が忠実に再構成できた。

以上、水晶振動子が把持制御や外界センシングなどでの把持力や把持位置のセンサとして有用であることを明かにした。

参考文献

- [1] 上野, 金子: 動的能動触角 (Dynamic Active Antenna) に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 12-8, 1214/1221 (1994)
- [2] 金子, 瀧下, 他: PSDを用いた指先触角センサの多点接触位置推定に関する研究, 日本ロボット学会誌, 13-2, 270/276 (1995)
- [3] 永田, 津村, 小俣: 指先力覚センサの開発と接触点検出誤差評価, 日本ロボット学会誌, 14-8, 1221/1228 (1996)
- [4] 上野, 金子: 複数振動モードを考慮した動的能動触覚, 日本ロボット学会誌, 15-1, 61/67 (1997)
- [5] 金子, 東森, 辻: Pulling Motion に準拠した凹形状触覚センシング, 計測自動制御学会論文集, 33-5, 322/330 (1997)
- [6] 向井, 石川: アクティブセンシングを用いた視触覚融合システム, 日本ロボット学会誌, 15-1, 75/81 (1997)
- [7] 佐々木, 新井, 太田: 協調搬送時の力覚計測を用いた接触点の推定法, 日本ロボット学会誌, 18-3, 395/400 (2000)

第5章 水晶振動子式力センサの把持滑りセンサへの応用

5.1 はじめに

ヒトは対象を滑り落ちないぎりぎりの力で効率的に把持するといわれている。ロボットが対象を傷つけずに優しくハンドリングする場合にも、対象が掌から滑り落ちないぎりぎりの力で把持することが重要となる。このような優しい把持をロボットで実現するには、滑り情報に基づく把持力調整が有効な手法とされ、各種の滑り検出法が提案されてきた [1][2][3][4]。ところで、ロボットセンサはアクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存するため、耐ノイズ性が要求される。これまでに提案されている滑りセンサのほとんどは、アナログ出力のためノイズの影響を受けやすく、フィルタ、アンプ、A/Dコンバータなどを要するものが多い。ローラやボールの回転を利用した出力がデジタルの滑りセンサもあるが、このセンサにはローラやボールの慣性に起因する不感帯の問題がある。

これらに対して、水晶振動子式力センサは、出力が周波数であるためノイズに強く信号処理が容易で高感度、高分解能、広帯域といった特長を有する。また、水晶振動子装着部の断面2次モーメントや水晶振動子対の装着位置などにより感度を調節することができる。この水晶振動子式力センサにより滑りに伴う摩擦力変化を測定できれば、ノイズに強く信号処理が容易で応答の速い滑りセンサを実現できることになる。滑り情報に基づく把持力調整では、把持力、把持位置、滑りの有無、滑り方向などに関する情報を必要とする。ここでハンドと把持物体との間に生じる滑りを”把持滑り”，これを測定するセンサを”把持滑りセンサ”と呼ぶことにする。

前章では、水晶振動子式力センサを用いて把持力と把持位置を検出する方法について述べた。本章では、水晶振動子式力センサを用いた把持滑りの検出原理を示し、この原理に基づく把持滑りセンサを試作し、これを用いて滑りに伴う摩擦力変化を検出することにより、把持制御などで必要な滑りとその方向のセンシングを行う。これらを通じて水晶振動子が把持滑りセンサとしても有用であることを示す。なお、本章での把持滑りセンサは、1章で定義した把持力センサに含まれている。

5.2 "滑り" と "ずれ" の定義

"滑り" という用語は広辞苑によれば『物の上をなめらかに移行する。物の間を滞りなく通る。』とある。ここでは、『2物体間の接触点が継続的に変化している状態』を滑りと定義し、『2物体が同じ点で接触を継続していて、接触面が接線方向に変形している状態』を"ずれ"と定義する。図5-1 (A) は、対象物 I と II の間の"滑り" と"ずれ"の説明図で、図5-1 (B) は対象物 I と II の間に"滑り" や"ずれ" が生じているときの摩擦力変化の説明図で、摩擦力の時間的変化は図5-1 (B) の3つのパターンに大別できるとされている [5]。 (1) は動摩擦力が最大静摩擦力より小さい場合で、物体 I と II の接触面に剪断方

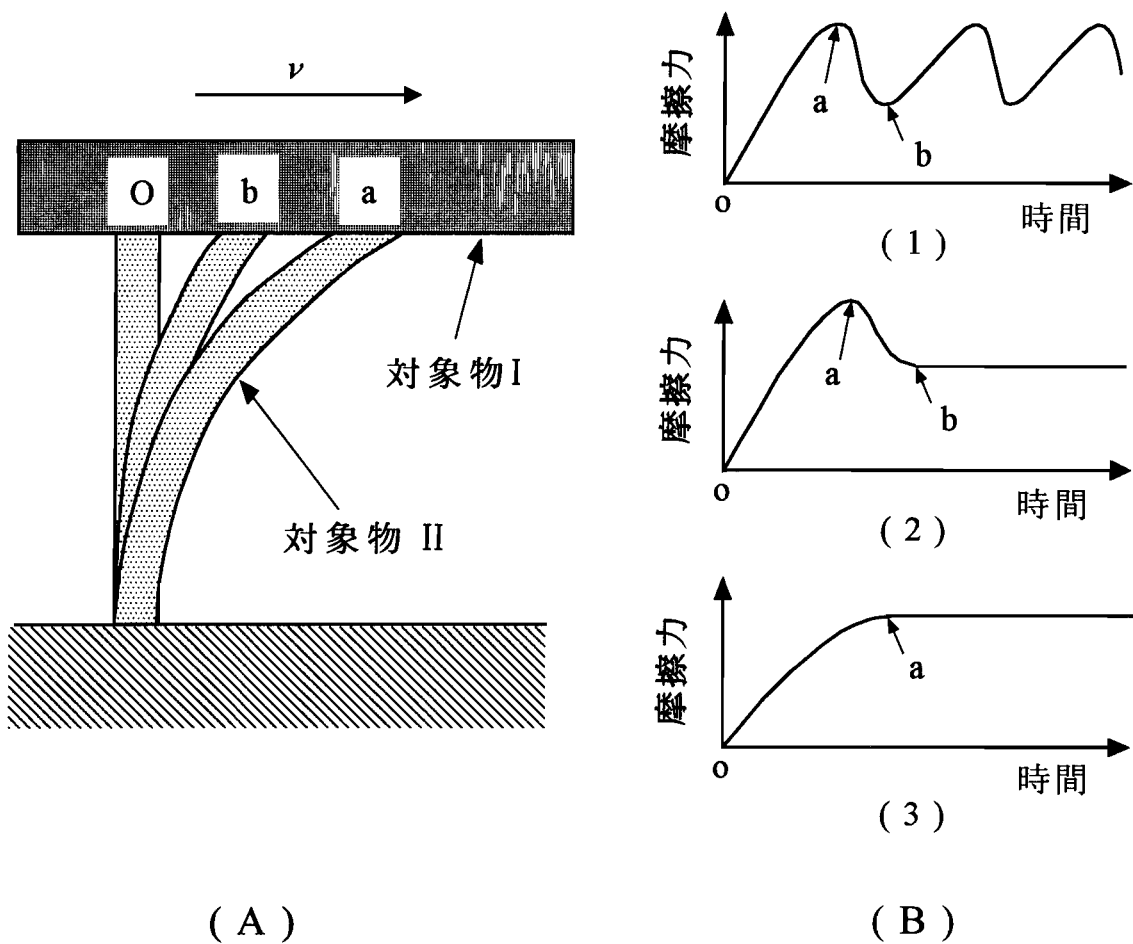


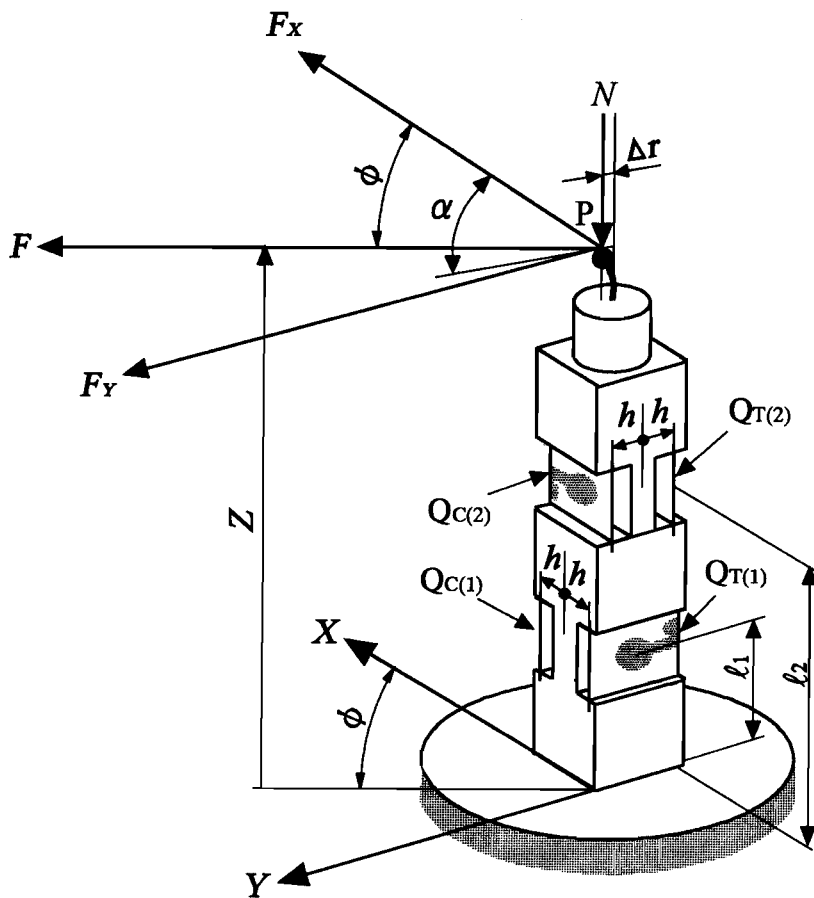
図5-1 滑りに伴う摩擦力変化の典型的な3パターン

向の力が加わると接触点 O は付着したまま接線方向に移動し、物体表面の復元力の増加とともに摩擦力も増加していく。この状態は2つの対象物が同じ点での接触を継続していて接触面が接線方向に変形しているので”ずれ”である。接触点が a 点まで移動すると復元力が最大静摩擦力より大きくなり滑りが発生する。接触点が b 点まで復元すると復元力は動摩擦力と釣り合い、2つの対象物は再び付着する。以後は a 点と b 点の間で付着と滑りを繰り返す。これはスティックスリップ現象として知られているものである。(2) は動摩擦力が最大静摩擦力より小さいが、 a 点で滑りが起きて b 点まで復元した後は一定の摩擦力の下で滑るとされている場合、(3) は最大静摩擦力と速度 v での動摩擦力の大きさが同じであるかのようなパターンで、 a 点で滑りが起きた後は摩擦力が一定のまま滑るとされている場合である。これらのうち、(1) の a 点と b 点の連続的出現から”滑り”の発生とその継続を、(2) の a 点から b 点にかけての右下がり部分から”滑り”の発生を知ることができる。(3) の摩擦力の時間波形は、接触している2つの対象物が接触面で接線方向に変形し、その後静止を継続している”ずれ”の場合と同じ波形であるから、このパターンから”滑り”または”ずれ”が発生していることはわかるが、”滑り”と”ずれ”を識別することは困難である。したがって、滑りセンサとしては”滑っている”ときに(1) または(2) のパターンを検出できることが必要となる。

5.3 把持滑りセンサの構造

ロボットの把持作業では、ハンドと把持物体の間に生じる滑り信号に基づく把持制御が有効とされている。ここでは、耐ノイズ性、信号処理の容易さ、高感度、高分解能、広帯域などの特長を備えた把持滑りセンサを実現するため、水晶振動子式力センサを用いて滑りに伴う摩擦力変化の時間波形の検出を試みた。図5-2 は、滑り特有の摩擦力変化を検出するための2組の水晶振動子対を装着した把持滑りセンサの主要部の概略である。2組の水晶振動子対 ($Q_{T(1)}$ と $Q_{C(1)}$) と ($Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$) を互いの主面が直交するように角柱(片持はり)に装着し、角柱の先端にピアノ線を介して球を取り付けた。片持はりの固定端側と自由端側の水晶振動子対の主面に垂直な方向をそれぞれ X , Y 方向、角柱の軸線方向を Z 方向とし、固定端から摩擦力 F と接触力 N が作用する P 点までの距離を Z 、各水晶振動子対までの距離を l_1 , l_2 、水晶振動子と角柱の中立面との距離を h 、水晶振動

子対装着部の断面2次モーメントを I とする。摩擦力の作用点 P はセンサの中心軸から Δr 偏っていると、 P 点とセンサの中心軸を結ぶ直線が X 方向と α の角をなしているとする。対象物は P 点でセンサと接触を継続しながら X - Y 面内で滑るとし、対象物が P 点で球と接触していないとき、ピアノ線と P 点はセンサの中心軸と上にあるとする。2組の水晶振動子対を装着したこのセンサは、 X - Y 面内のあらゆる方向の把持滑りに対応できるので、これを”2次元把持滑りセンサ”と呼ぶことにする。また、このセンサから1対の水晶振動子 $Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$ を取り除いたセンサは、 X - Y 面内の一方向の把持滑りに対処できるので、これを”1次元把持滑りセンサ”と呼ぶことにする。水晶振動子を対で用いているのは3章で述べた差動法を適用しているためである。



$Q_{T(1)}, Q_{C(1)}, Q_{T(2)}, Q_{C(2)}$: 水晶振動子

図5-2 2組の水晶振動子対を装着した2次元把持滑りセンサ

5.4 把持滑りに伴う摩擦力とその方向の検出原理

図5-2 に示したように、対象物が接触力 N で P 点に押し付けられながら $X-Y$ 面内で滑ると（図5-8 参照）、摩擦力 F と接触力 N が水晶振動子に伝搬され、水晶振動子の発振周波数が変化する。摩擦力 F の X, Y 成分をそれぞれ F_X, F_Y とし、 F が X 方向となす角を ϕ とする。水晶振動子を Q で表し、角柱の固定端側と自由端側の水晶振動子対にそれぞれ添え字 (1) と (2) を付す。さらに各対での水晶振動子を区別するため各々に添え字 T と C を付すことにする。水晶振動子対 ($Q_{T(1)}$ と $Q_{C(1)}$) および ($Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$) の摩擦力による差周波数の変化量をそれぞれ $Out_{(1)}, Out_{(2)}$ とし、各水晶振動子に関する諸量に添え字 $T(1)$ と $C(1)$ および $T(2)$ と $C(2)$ を付す。 Z 方向の圧縮力は対の各々の水晶振動子に同様に加わり差動法により相殺されるので、以下の議論ではこの圧縮力を考慮しない。接触力 N の偏心と摩擦力 F により各水晶振動子に加わる曲げ応力 $\sigma_{T(1)}, \sigma_{C(1)}, \sigma_{T(2)}, \sigma_{C(2)}$ は、近似的に

$$\sigma_{T(1)} = -\sigma_{C(1)} = F(Z - l_1) h \cos \phi / I + N \Delta r h \cos \alpha / I \quad \dots\dots\dots (89)$$

$$\sigma_{T(2)} = -\sigma_{C(2)} = F(Z - l_2) h \sin \phi / I + N \Delta r h \sin \alpha / I \quad \dots\dots\dots (90)$$

となる。各水晶振動子対の差周波数の変化量 Out_i ($i = 1, 2$) は、前章の(55)式と同様に

$$\begin{aligned} Out_{(i)} &= (f_{C(i)} - f_{T(i)}) - (f_{0C(i)} - f_{0T(i)}) \\ &= [(f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \mu_0 + (f_{0C(i)} \cos 2\psi_{C(i)} + f_{0T(i)} \cos 2\psi_{T(i)}) \mu_1 \\ &\quad + \{ (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \nu_0 + (f_{0C(i)} \cos 2\psi_{C(i)} + f_{0T(i)} \cos 2\psi_{T(i)}) \nu_1 \} T] \sigma_{T(i)} \end{aligned} \quad (91)$$

となる。ここで、 $\mu_0, \mu_1, \nu_0, \nu_1$ は2章の表2-3 に示した値で、 f は水晶振動子の周波数、 f_0 は摩擦力 F および接触力 N が0での周波数、 ψ は水晶振動子の電気軸と外力の方向のなす角、 T は温度である。(91)式は、前章の(56), (57)式と同様に

$$f_{0C(i)} \cos 2\psi_{C(i)} + f_{0T(i)} \cos 2\psi_{T(i)} = -(f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \frac{\nu_0}{\nu_1} \approx 0.349 (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \quad (92)$$

のとき

$$Out_{(i)} = (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \left\{ \mu_0 - \mu_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} \right\} \sigma_{T(i)} \approx 18.7 \times 10^{-12} (f_{0C(i)} + f_{0T(i)}) \sigma_{T(i)} \quad (93)$$

となり，出力 $Out_{(i)}$ が温度に無関係となる．以下の議論ではこの(92)式が成立しているものとする．実験でも ψ_C と ψ_T が約 35° となる水晶振動子を角柱に装着しているので(92)式がほぼ満足されている．(89)，(90)式を(93)式に代入すると

$$Out_{(1)} = A_1 \gamma \{ F (Z - l_1) \cos \phi + N \Delta r \cos \alpha \} \dots\dots\dots (94)$$

$$Out_{(2)} = A_2 \gamma \{ F (Z - l_2) \sin \phi + N \Delta r \sin \alpha \} \dots\dots\dots (95)$$

となる．ここで

$$\left. \begin{aligned} A_i &= f_{0C(i)} + f_{0T(i)} \quad (i = 1, 2) \\ \gamma &= \{ \mu_0 - \mu_1 (\nu_0 / \nu_1) \} h / I \approx 18.7 \times 10^{-12} h / I \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (96)$$

とおいた．ここで， γ ， h ， I の単位はそれぞれ $[N^{-1}m^{-1}]$ ， $[m]$ ， $[m^4]$ である．図5-2の2次元把持滑りセンサでは $\phi \approx \alpha$ と考えられ，接触点 P の偏心に起因して生じる(94)，(95)式右辺中括弧内の第2項は，後述の実験値を代入すると，摩擦力による第1項の数%程度以下となる．接触力 N ，P 点の偏心量 Δr および α が一定とすると，滑り時の各水晶振動子対の差周波数から滑り直前の差周波数を引くことにより，摩擦力 F による差周波数の変化量が得られる．これを $Out_{(i)}'$ とおくと

$$Out_{(1)}' = A_1 \gamma F (Z - l_1) \cos \phi \dots\dots\dots (97)$$

$$Out_{(2)}' = A_2 \gamma F (Z - l_2) \sin \phi \dots\dots\dots (98)$$

となり，摩擦力の2方向成分 F_X ， F_Y は

$$F_X = F \cos \phi = \frac{Out_{(1)}'}{A_1 \gamma (Z - l_1)} \dots\dots\dots (99)$$

$$F_Y = F \sin \phi = \frac{Out_{(2)}'}{A_2 \gamma (Z - l_2)} \dots\dots\dots (100)$$

となる．また，摩擦力 F とその方向 ϕ は

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \dots\dots\dots (101)$$

$$\phi = \arctan (F_Y / F_X) \dots\dots\dots (102)$$

により決まる。(94)～(100)式より、摩擦力に対する感度は水晶振動子取付部の断面2次モーメント I 、水晶振動子の取り付け位置 h 、 l_1 、 l_2 、水晶振動子の発振周波数 A_i ($i = 1, 2$) により調節できることがわかる。

5.5 1次元把持滑りの検出

ここでは、把持滑りに伴う摩擦力変化の時間波形の検出を目的として、1方向のみの滑り検出を1対の水晶振動子を装着した1次元把持滑りセンサで行った。図5-3は1次元把持滑りセンサによる滑り検出装置の概略である。ここで用いている1次元把持滑りセンサは図5-2の2次元把持滑りセンサから1組の水晶振動子対 ($Q_{T(2)}$ と $Q_{C(2)}$) を取り除いたもので、ここでは $\phi = 0^\circ$ の方向 (X 方向) に対象物を滑らせた。装着した水晶振動子は、基本周波数が 10 MHz の AT カットで、厚さ 0.167 mm、幅 8 mm、長さ 10 mm のものである。角柱の中立面から $h = 7$ mm の対称な位置に放電加工された幅 0.2 mm 深さ 1 mm の溝に水晶振動子対をはめ込み、シアノアクリレート系接着材で接着した (図2-1-2 および図5-2 参照)。ビニールテープで覆った直径 2 mm、長さ 10mm の円柱を厚さ

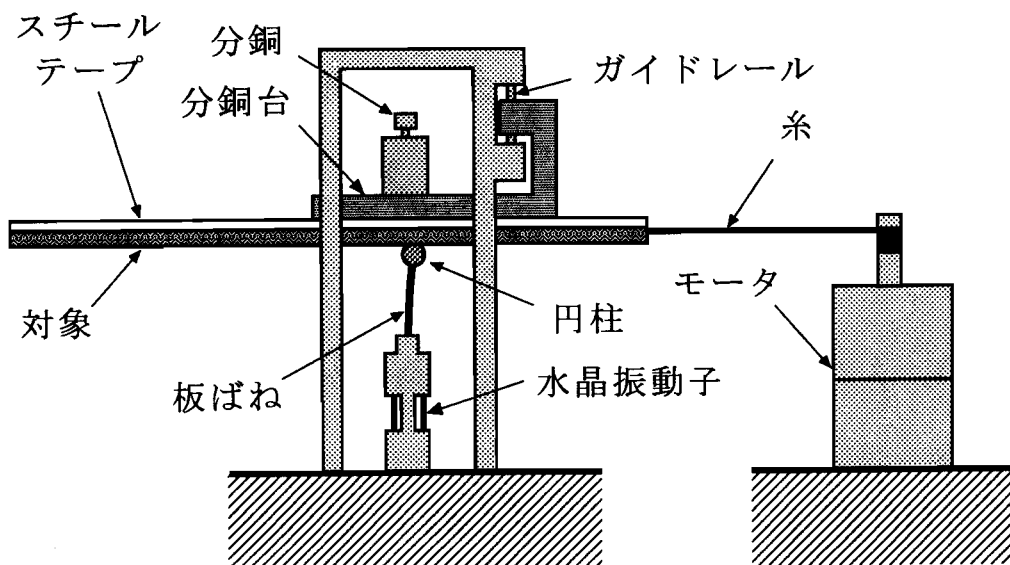


図5-3 1次元把持滑りセンサによる滑り検出

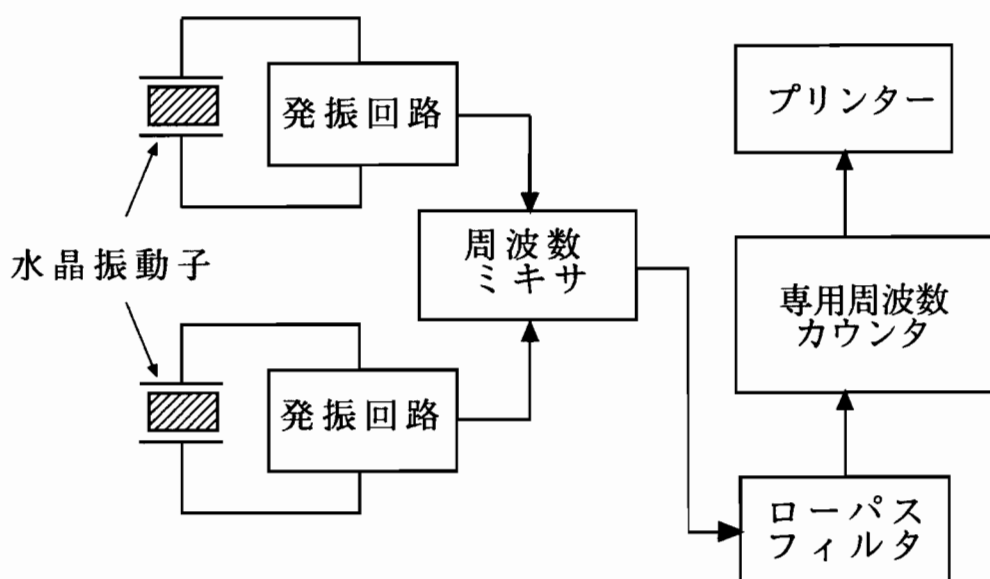


図5-4 1次元把持滑りセンサの測定系のブロック図

0.2 mm, 幅 10 mm の板ばね先端に取り付け, これをセンサ先端部に装着し, 円柱側面を対象との接触部とした. 厚さ 0.2 mm, 幅 10 mm のスチールテープに対象を貼付し, これを一定の接触力のもとでモータで引張って円柱側面上を滑らせた. 円柱をビニールテープで覆ったのは, スティックスリップ波形を検出しやすくするためである. センサ先端部の円柱と対象との間に生じる摩擦力が板ばねを介して水晶振動子に伝わり, 水晶振動子の発振周波数が摩擦力の変化とともに変化する. 対象としてアクリル樹脂, アルミニウム, 布, ケント紙, ビニールテープ, シリコーンゴムの6種類を選び, 接触力(垂直抗力) N が 0.25, 0.49, 0.98, 1.47, 1.96, 2.45 N, 滑り速度 v が 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm/s のもとで, 共振周波数 f_n が 140Hz と 220Hz の2種類の板ばねを使用して, 滑りに伴う摩擦力変化を5回ずつ測定した. 図5-4 は測定系のブロック図で, 専用ディスプレイ付の周波数カウンタを使用した. 図5-5 は図5-3 の1次元把持滑りセンサで測定した滑りに伴う摩擦力変化の時間波形の典型的な4つのパターンである. 左の縦軸に摩擦力 F による水晶振動子対の差周波数の変化量 $Out_{(1)}$, 右の縦軸に(99)式により換算した摩擦力が示してある. ここでは滑り波形の特徴を示すため, スケールをあえて統一していない. この図の(1), (2),

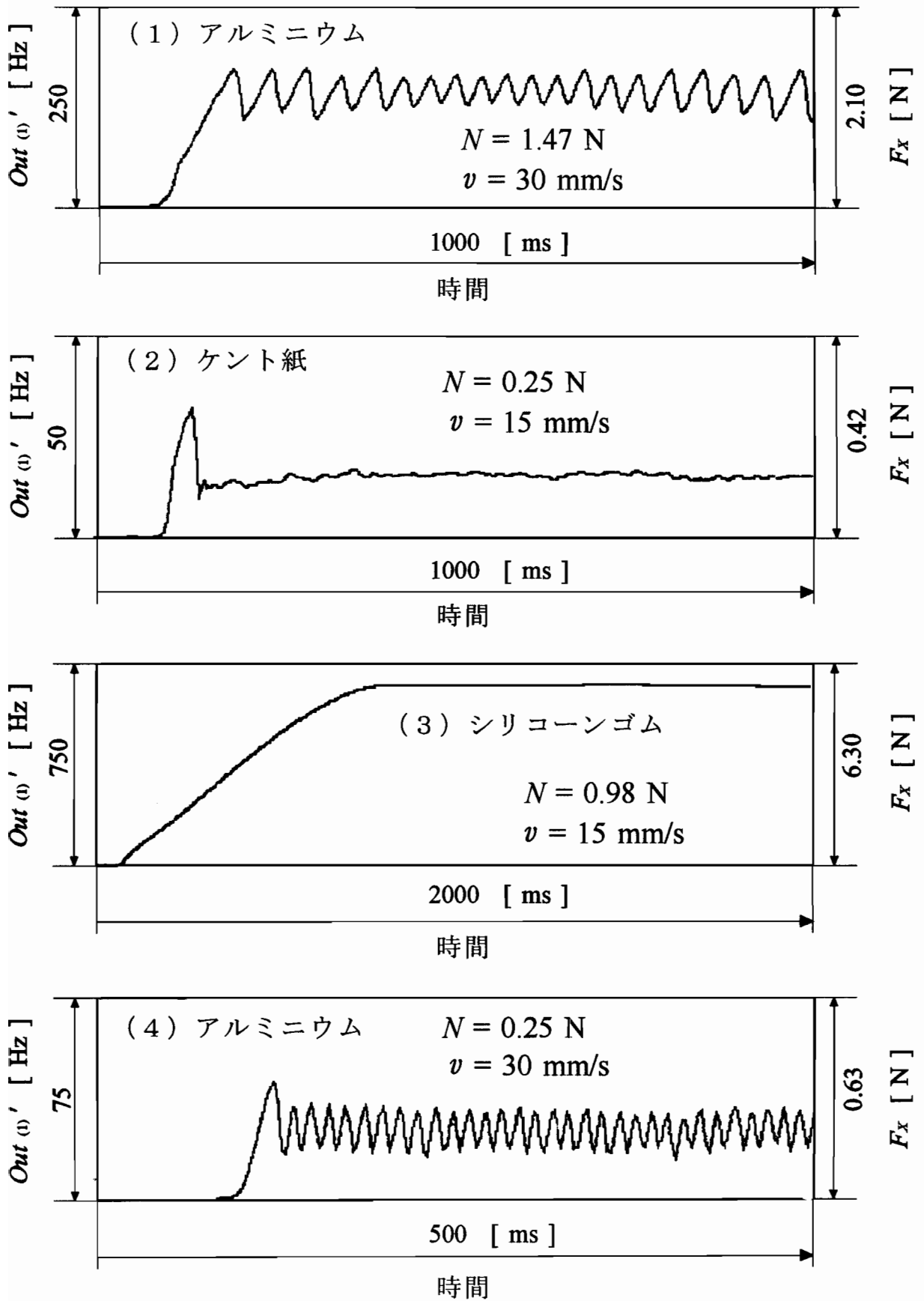


図5-5 1次元滑り検出装置により検出した摩擦力変動の4つのパターン

(3) はそれぞれ 図 5-1 (B) の (1), (2), (3) に対応している. (1) はスティックスリップで, これから "滑りの発生" および "その継続" を知ることができる. (2) は最初の右下がりの部分が "滑り" で, この部分から "滑りの発生" を知ることができる. それ以降の波形からは "ずれ" または "滑りの継続" を識別することが困難である. (3) は "ずれ", "滑り" いずれのときでも観測できる波形であるため, この波形からは "ずれ" または "滑り" を識別することが困難である. (4) は 図 5-1 (B) の (1) と (2) の特徴を併せもち, (1) と同様に "滑りの発生" と "その継続" を知ることができる. したがって, (1), (2), (4) いずれかの波形が観測できれば "滑り" を検出できたことになる.

表 5-1 は, 対象ごとに各接触力 N , 各滑り速度 v について, 5回の測定で 図 5-1 (B) の (1), (2), (3) のパターンが現れた回数を順に示したものである. 各欄の上段は板ばね部の固有振動数 f_n が 140Hz の場合, 下段は f_n が 220Hz の場合の結果である. なお, 図 5-5 (4) の波形は 図 5-1 (B) の (1) として分類した. f_n の違いによる滑り波形の現れ方に顕著な違いは認められなかった. また, 対象がシリコンゴムの場合は大半が 図 5-1 (B) の (3) のパターンとなった. 図 5-6 は, 6種類の対象について, 接触力が 1.47 N, 滑り速度 10, 20, 30 mm/s のもとで, f_n が 140 Hz の 1次元把持滑りセンサを使用した場合の測定結果である. 横軸に時間, 左縦軸に摩擦力変化に対応する水晶振動子対の差周波数の変化量 $Out_{(1)}$, 右縦軸に (99) 式により換算した摩擦力を示した. (5) と (6) のビニールテープとシリコンゴムは滑りに伴う摩擦力変化が大きくなっている. この理由は, 対象が柔らかいためセンサ先端の円柱部が対象に押し込まれて "ずれ" から "スリップ" に移るまでの板ばねの変形量が大きくなり, 大きな力が水晶振動子に加わり周波数変化量が大きくなるためと考えられる. 図 5-6 の (1) ~ (5) の最初の右上がりの部分で, センサ円柱部と対象は付着状態のまま "ずれ" が徐々に大きくなり, 最初の極大点に達したとき復元力が最大静摩擦力より大きくなって滑り始め, つぎの極小点に達して動摩擦力が復元力と釣り合い再び付着状態となる. 以後これを繰り返すと考えられる. いずれの図においても付着状態にある右上がり部分の傾きは滑り速度 v とともに大きくなっていることがわかる. (6) の滑り波形は "ずれ" でも "滑り" でも生じるので, この場合には "ずれ" と "滑り" の識別が困難である. 図 5-7 は, 図 5-6 と同じ 6種類の対象について, 滑り速度 20 mm/s, 接触力 0.25, 0.98, 2.45 N のもとの摩擦力変化の時間波形の測定結果で, 左

表5-1 1次元把持滑りセンサによる検出結果（図5-1の(1), (2), (3)の3つのパターンの生じた回数を順に示してある. 上段は板ばねの固有振動数が140Hzの場合, 下段は220Hzの場合)

(1) アクリル板

$N \backslash v$	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	500 410	131 500	410 500	500 500	500 500	500 500
10mm/s	500 410	113 320	500 500	500 500	500 500	500 500
15mm/s	500 410	122 500	320 500	500 500	500 500	500 500
20mm/s	500 410	122 320	230 500	500 500	500 500	500 500
25mm/s	500 320	140 320	320 500	500 320	500 500	500 500
30mm/s	500 230	140 230	500 230	410 320	500 500	500 500

(2) ジュラルミン板

$N \backslash v$	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	500 500	131 500	410 500	500 500	500 500	500 500
10mm/s	500 500	113 500	500 500	500 500	500 500	500 500
15mm/s	500 500	113 500	320 500	500 500	500 500	500 500
20mm/s	500 500	122 500	320 500	500 320	500 500	500 500
25mm/s	500 500	131 500	320 500	500 500	500 500	500 500
30mm/s	500 500	140 500	500 500	230 500	500 500	500 500

(3) 布

$N \backslash v$	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	500 230	410 140	410 050	410 050	320 050	050 050
10mm/s	410 140	410 050	320 140	500 140	320 050	230 050
15mm/s	500 140	410 140	410 140	410 140	500 140	320 140
20mm/s	500 410	500 230	500 140	500 140	500 140	500 140
25mm/s	500 500	500 410	500 230	500 320	500 230	500 140
30mm/s	500 500	500 500	500 500	500 410	500 230	500 320

(4) ケント紙

$N \backslash v$	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	230 320	320 500	500 500	500 500	500 500	500 500
10mm/s	050 320	140 500	500 500	500 500	500 500	500 500
15mm/s	050 230	140 410	500 500	500 500	500 500	500 500
20mm/s	050 140	050 410	410 500	500 500	500 500	500 500
25mm/s	050 050	050 410	320 500	500 500	500 500	500 500
30mm/s	041 050	050 500	500 500	500 500	500 500	500 500

(5) ビニールテープ

$N \backslash v$	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	140 500	500 500	500 500	500 500	500 500	122 500
10mm/s	140 320	500 500	500 500	500 500	500 500	050 500
15mm/s	140 410	500 500	500 500	500 500	500 500	140 500
20mm/s	140 410	500 500	500 500	500 500	500 500	131 500
25mm/s	140 410	500 500	500 500	500 410	410 500	113 500
30mm/s	410 410	500 500	500 230	500 410	500 500	140 410

(6) シリコーンゴム

$N \backslash v$	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	005 014	005 005	005 005	005 005	005 005	005 005
10mm/s	014 023	005 005	005 005	005 005	005 005	005 005
15mm/s	023 032	005 005	005 005	005 005	005 005	005 005
20mm/s	005 023	005 005	005 005	005 014	005 005	005 005
25mm/s	032 023	005 005	005 005	005 005	005 005	005 005
30mm/s	023 023	005 005	005 005	005 005	005 005	005 005

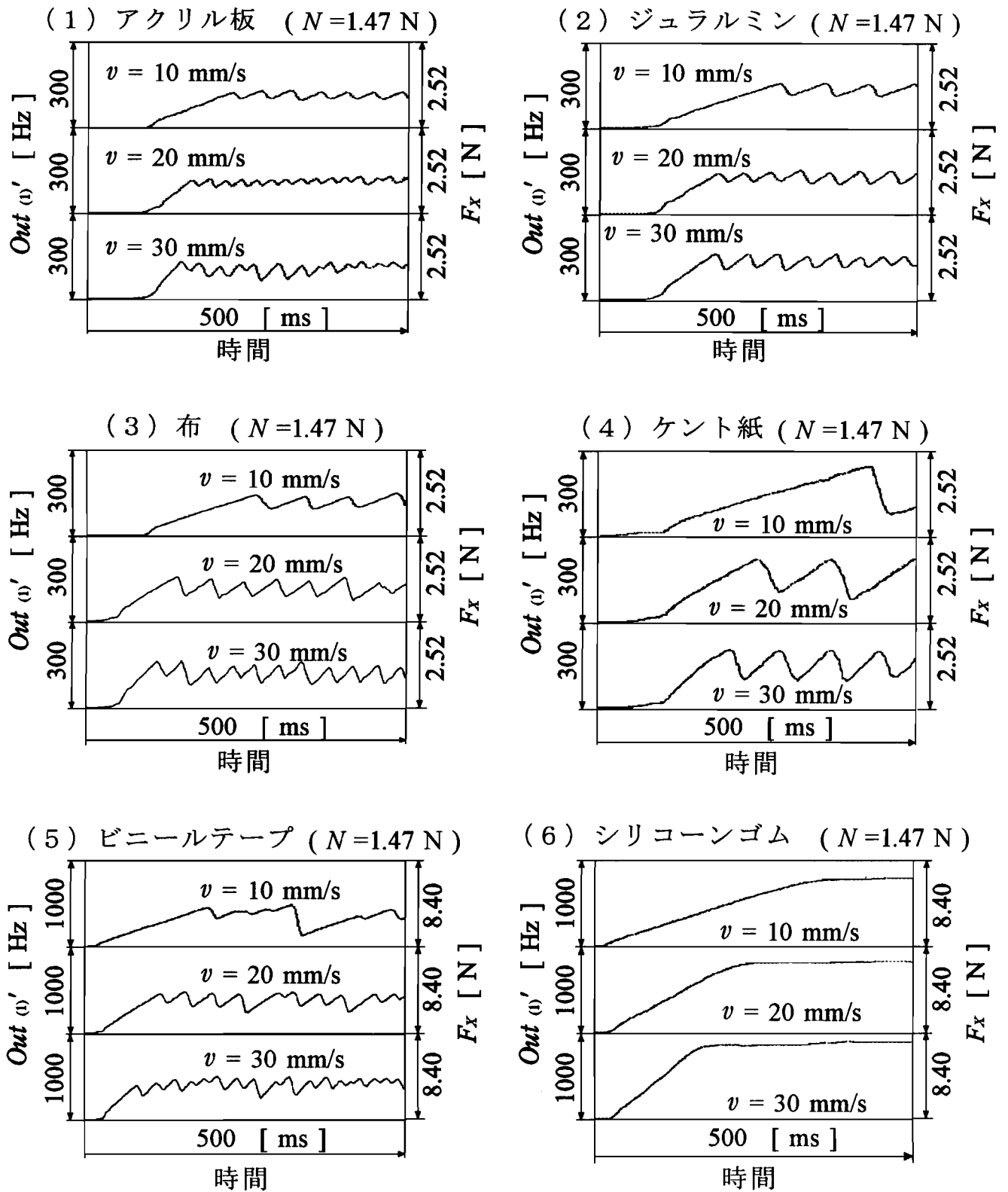


図5-6 接触力 $W = 1.47\text{ N}$ のもとでの摩擦力変化の時間波形

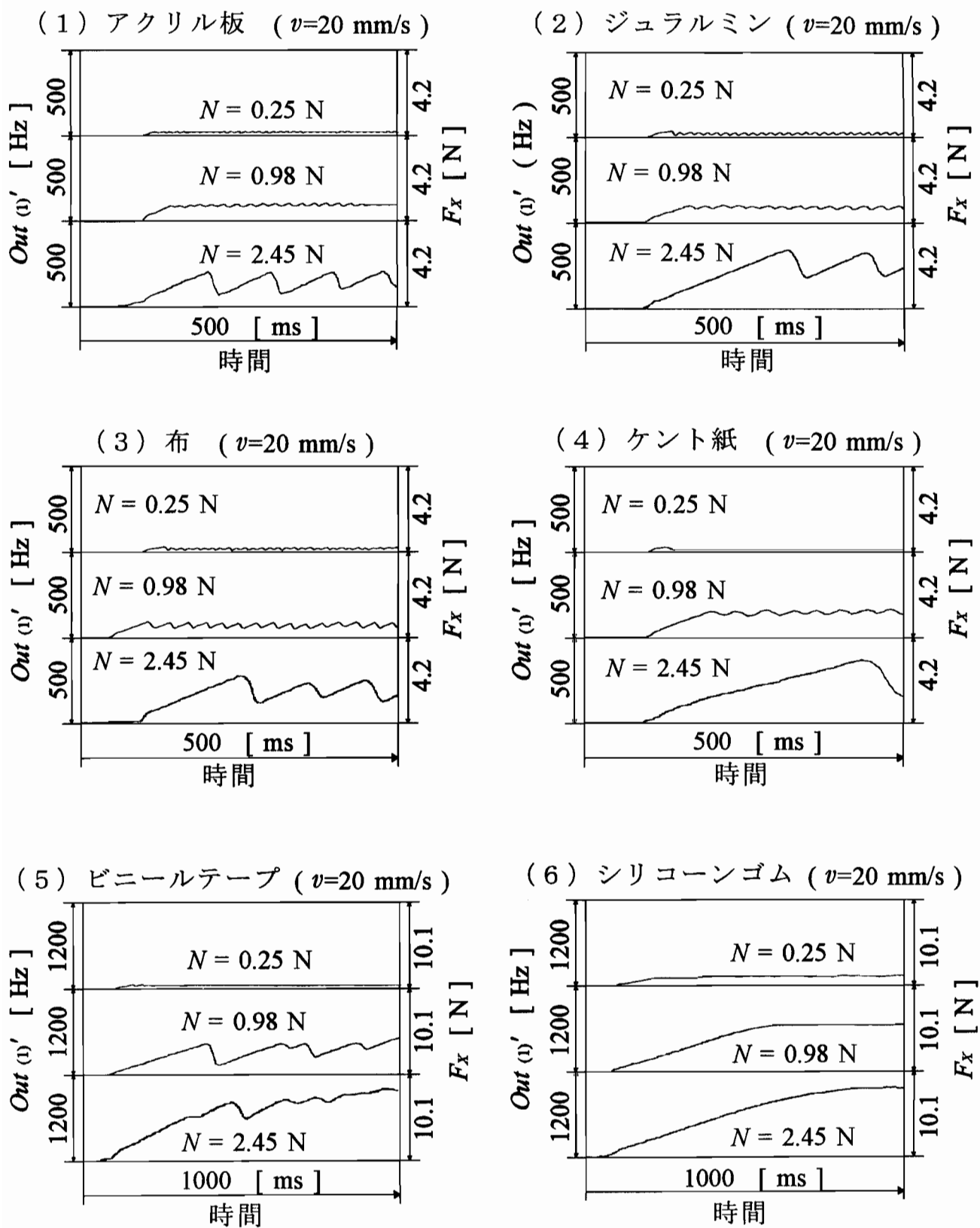


図5-7 滑り速度 $v = 20$ mm/s のもとでの摩擦力変化の時間波形

縦軸に摩擦力変化に対応する $Out_{(1)}$ ' , 右縦軸に(99)式により換算した摩擦力の値が示してある。いずれの場合も周波数変化量が接触力（垂直抗力）の増大とともに大きくなっているが、このことは摩擦力が接触力に比例することから容易に理解できる。また、(1)~(4)では滑り波形の周期が接触力の増大とともに大きくなっているが、これは接触力の増大とともに"ずれ"も大きくなるためと考えられる。また、滑り速度が一定であるにもかかわらず滑り波形の周期が変化していることは、この波形が対象表面の凹凸形状ではなくスティックスリップ波形であることを意味している。なお、対象表面の凹凸形状であろうとスティックスリップ波形であろうと、図5-6と図5-7の(1)~(5)の波形は滑りが生じていることを意味している。以上より水晶振動子は滑りセンサとして有用であることが分かる。

5.6 2次元把持滑りの検出

図5-8は図5-2に示した2次元把持滑りセンサを用いた"滑り"と"その方向"の

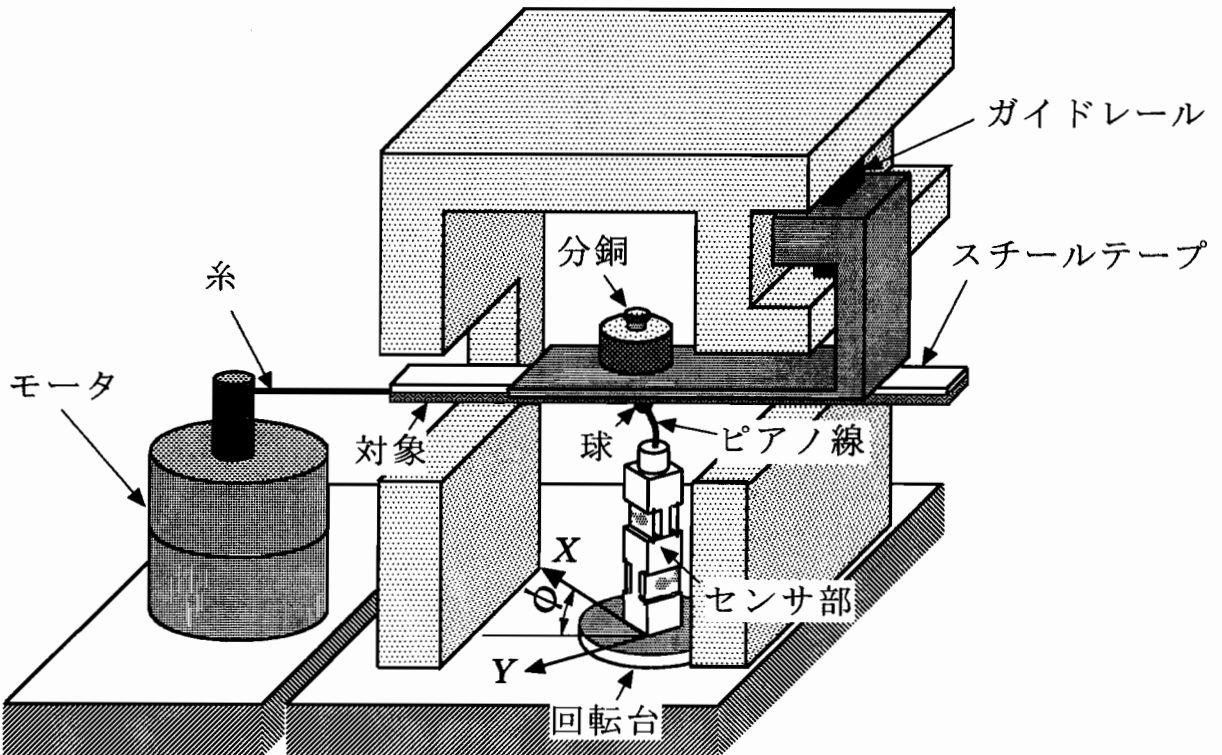


図5-8 2次元把持滑りセンサによる滑り検出

検出装置で、図 5-3 の 1 次元把持滑り検出装置との違いは、センサ部が回転台上に設置されていて水晶振動子対に対して対象を任意の方向に滑らせることができること、直交した 2 組の水晶振動子対が使用されていること、対象が板ばね先端の円柱側面上ではなく、ピアノ線先端に取り付けられた球上を滑ることである。

同時刻での 2 組の水晶振動子対の差周波数の変化量 $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ を (99) 式と (100) 式に代入して摩擦力の 2 方向成分 F_X , F_Y を求め、これらの値からその時刻での滑り方向 ϕ を求めた。図 5-9 の (A) と (B) は、接触力が 0.59 N、滑り速度が 25 mm/s で、 $\phi = 30^\circ$ の方向に対象を引張ったときの $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の時間波形で、 $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の値を左縦軸に、これらの値を (99) 式と (100) 式により換算した摩擦力の 2 方向成分 F_X と F_Y の値を右縦軸に示してある。対象を $\phi = 45^\circ$ の方向に引張ったときの $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の測定値を (99) 式と (100) 式に代入して求めた F_X と F_Y の値が

$$k \frac{F_Y}{F_X} = 1 \quad \dots\dots\dots (103)$$

の関係を満たすように k を定め、この k をもちいて (102) 式を

$$\phi = \arctan\left(k \frac{F_Y}{F_X}\right) \quad \dots\dots\dots (104)$$

のように補正し、この (104) 式を用いて ϕ を求めた。このことはセンサを校正して使用することに相当している。(C) は F_X と F_Y の実験値を (104) 式に代入して求めた ϕ の時間波形である。(C) の最初の数 100 ms の間は滑り方向が急激に変化している。これは、対象が最初 図 5-8 の 2 次元把持滑りセンサ上で適当な方向を向いて静止していて、引張られるとその方向を向こうとしてセンサ先端部の球上で回転運動を行うためと考えられる。対象が引張り方向を向いて滑っている間は、 $\pm 2^\circ$ 程度以内で一定の滑り方向を示している。図 5-10 は測定系のブロック図である。 ϕ を求めるのに同時刻での $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の演算が必要なため、2 台の周波数カウンタの出力を GPIB 経由でパソコンに取り込んだ。このため信号の処理や伝送に数 100 ms の時間を要し、処理結果の表示間隔がスティックスリップの周期より大きくなったため、図 5-9 の (A) と (B) にスティックスリップ波形が現れていない。このように、滑り方向はスティックスリップ波形が検出できなくても同時刻での $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ さえ分かれば (104) 式により求まる。図 5-11 は、参考までに、2 台の専用カウンタにより同時に測定した $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の時間波形を 2 秒間にわたって

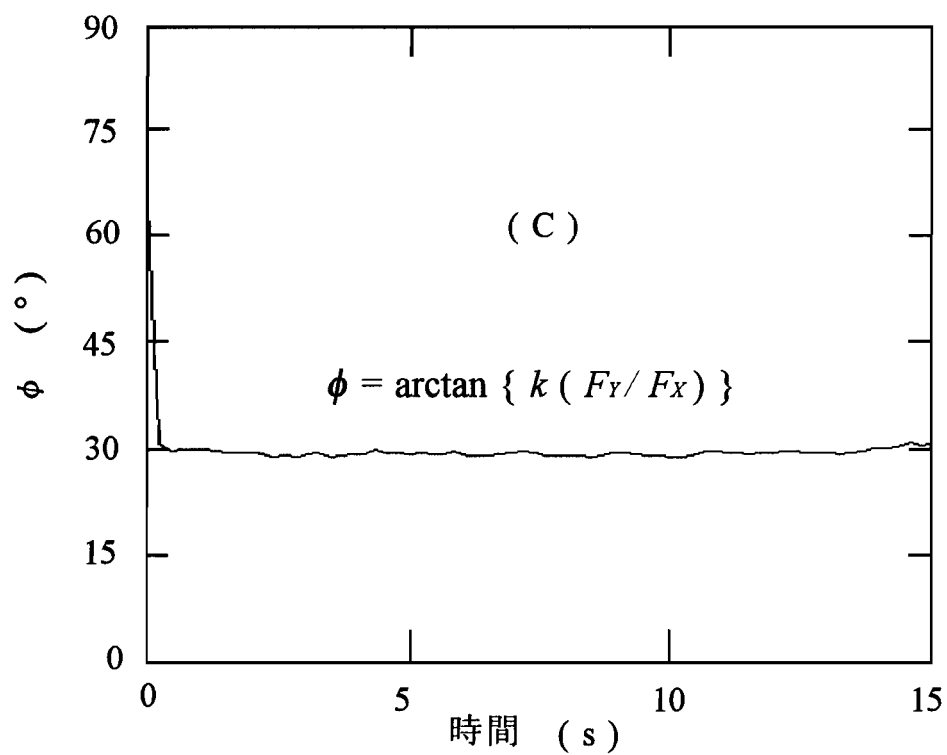
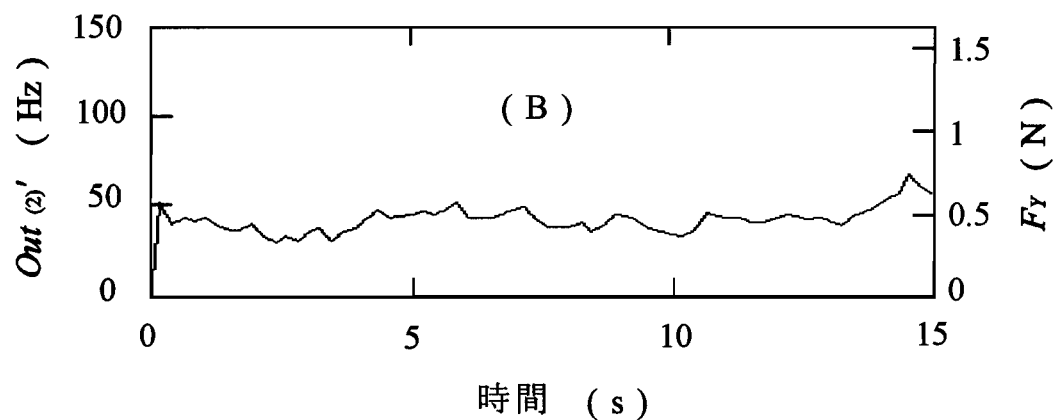
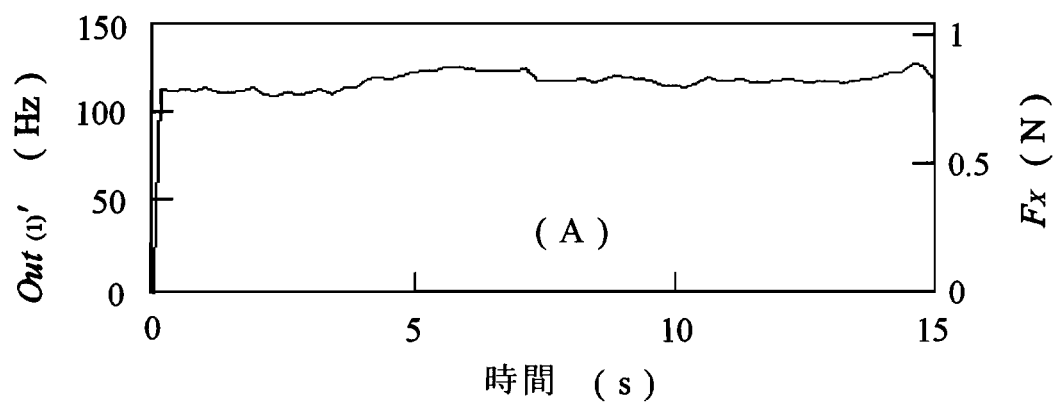


図5-9 (A) 検出された $Out_{(1)'}$ の時間波形, (B) 検出された $Out_{(2)'}$ の時間波形, (C) $Out_{(1)'}$ と $Out_{(2)'}$ から導かれた滑り方向 ϕ の時間波形

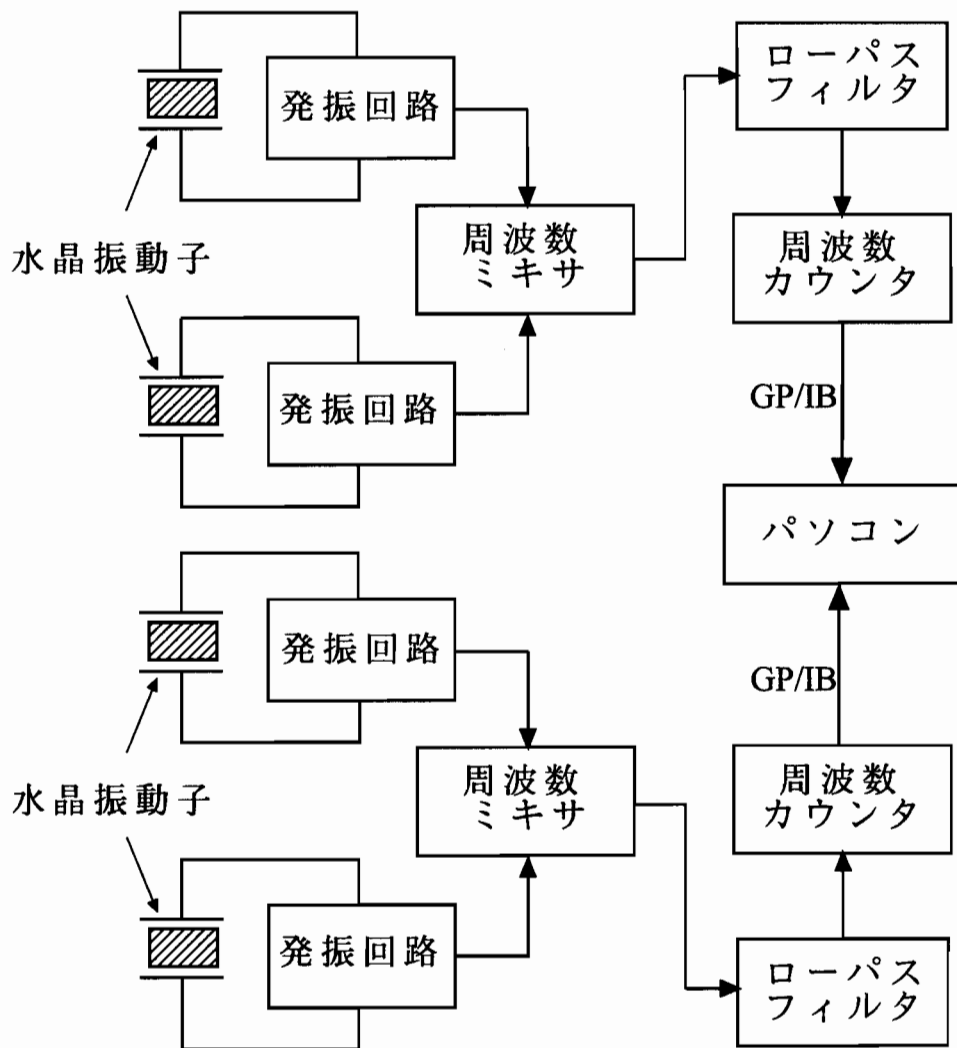


図5-10 2次元把持滑りセンサの測定系のブロック図

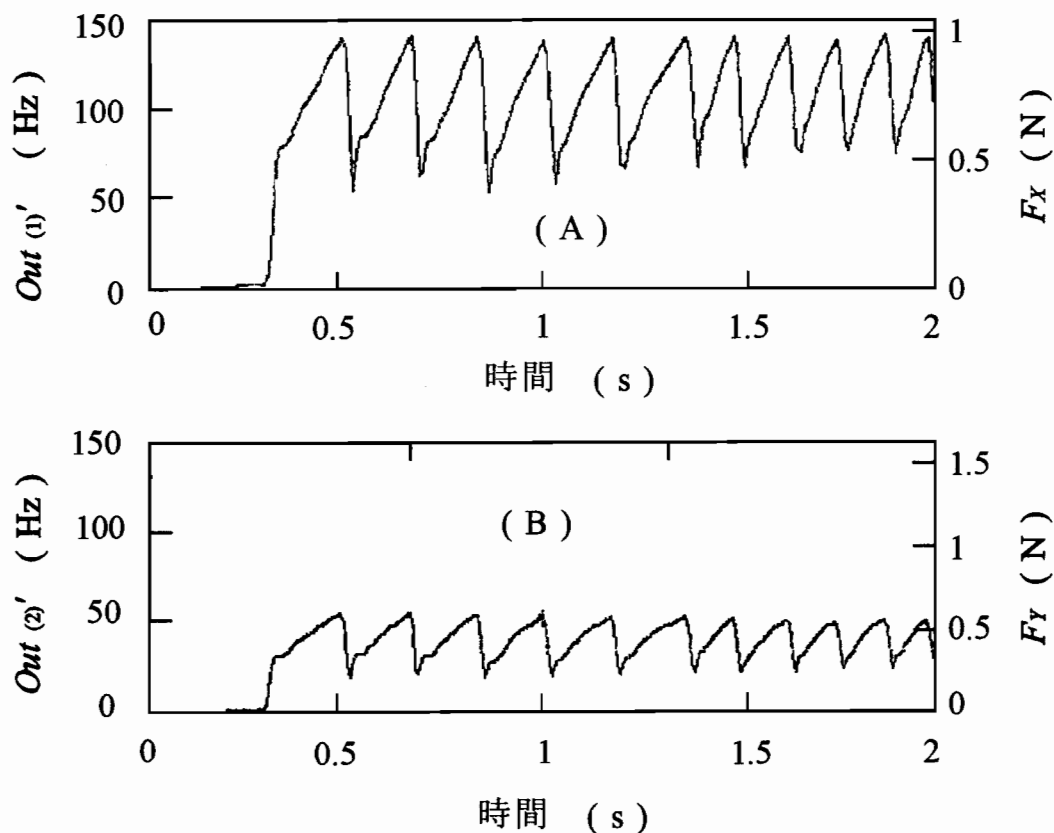


図5-1 1 2台の専用カウンタにより測定した $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の時間波形.

示したものである. この場合は, 同時刻での $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の演算が行えなかったため滑り方向の時間波形が得られていない. $-45^\circ \sim 135^\circ$ の範囲の ϕ について同様の実験を行いほぼ同様の結果を得た. 図5-1 2 は, $-45^\circ \sim 135^\circ$ の範囲の引張り方向について, (99), (100), (104)式を用いて $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ の実験値から滑り方向 ϕ を求め, この ϕ と対象を引張った方向の関係を ● 印で示したものである. ● 印が $\pm 2^\circ$ 程度以内で傾き 45° の直線にのっていることから, 水晶振動子式力センサにより滑り方向を検出できることが明らかになった.

5.7 まとめ

対象を傷つけずに優しくハンドリングするには, 対象が掌から滑り落ちないぎりぎりの力で把持することが重要となる. このような優しい把持をロボットに行わせるには, 滑り

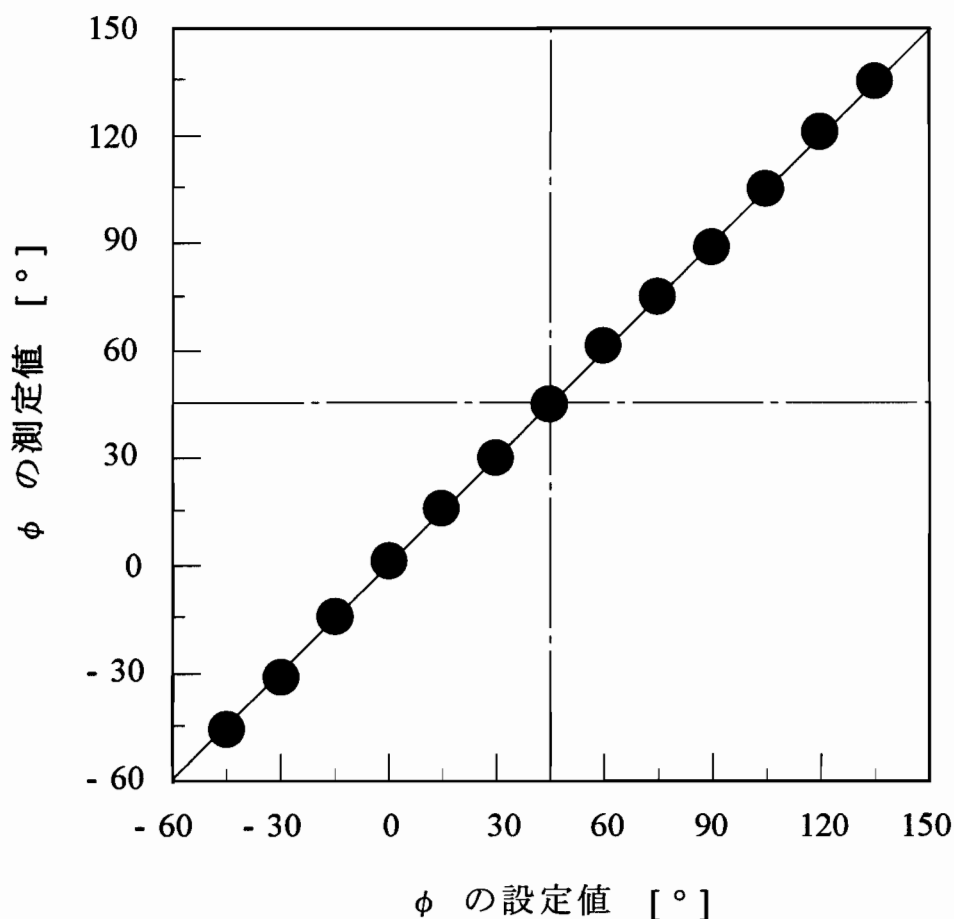


図5-12 $Out_{(1)'}'$ と $Out_{(2)'}'$ から(99), (100), (104)式により求めた滑り方向 (ϕ の測定値) と 図5-8 の回転台により設定した滑り方向 (ϕ の測定値) の関係

情報に基づく把持力調整が有効な手法とされ、各種の滑り検出法が提案されてきた。ロボットセンサはアクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存するため、耐ノイズ性が要求される。これまでに提案されている滑りセンサのほとんどはアナログ出力のためノイズの影響を受けやすく、フィルタ、アンプ、A/Dコンバータなどを要するものが多い。また、ローラ式やボール式で出力がデジタルである滑りセンサもあるが、ローラやボールの慣性に起因する不感帯の問題がある。これらに対して、水晶振動子式力センサは周波数出力のため、ノイズに強く、信号処理が容易で、高感度、高分解能、広帯域といった特長を有する。本章では、この水晶振動子式力センサを用いた把持滑りセンサの試作、これに

よる滑りとその方向の検出について、つぎの順で示した。

- (1) "滑り" と "ずれ" を定義し, "滑り" や "ずれ" に伴う摩擦力変化の3つの典型的パターンを示した.
- (2) 水晶振動子による把持滑りセンサの構造, 把持滑りとその方向の検出原理を示した.
- (3) 1対の水晶振動子による1次元把持滑りセンサを試作し, アクリル樹脂, アルミニウム, 布テープ, ケント紙, ビニールテープ, シリコンゴムの6種類の対象を, この1次元把持滑りセンサ上を滑らせて, 滑り特有の摩擦力変化の時間波形の検出を行った.
- (4) 2対の水晶振動子による2次元把持滑りセンサを試作し, これにより, 摩擦力の2方向成分 F_x と F_y を連続的に検出し, 同時刻でのこれらの値から滑り方向の時間波形を求めた結果, $\pm 2^\circ$ 程度以内の精度で滑り方向が求められることが明らかになった.

以上により, 水晶振動子式力センサがロボットの把持制御などに必要な把持滑りセンサとして有用であることを明らかにした.

参考文献

- [1] 山田陽滋: 把持までのセンシング戦略 その2: 滑りと静摩擦係数の検出~表面粗さ情報の取得, 日本ロボット学会誌, 11-7, 27/33 (1993)
- [2] 富田豊他: ゴムのスリップを用いた滑りセンサの開発, 計測自動制御学会論文集, 27-1, 1/4 (1991)
- [3] 山田陽滋他: 3軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用, 日本ロボット学会誌, 13-4, 539/544 (1995)
- [4] R. Andrew Russell: Robot tactile sensing, 135/138, Prentice Hall (1990)
- [5] 中久一郎: 摩擦のおはなし: 83/94, 日本規格協会 (1990)

第6章 結 論

ロボットの把持制御では把持力や滑りのセンサが，群ロボットによる協調動作では接触位置のセンサが，触覚による外界センシングでは接触力，接触位置，滑りなどのセンサが重要な役割を果たす．本論文ではこれらのセンサを総称して把持力センサと呼ぶことにした．ロボットセンサは，アクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存することが多いため，耐ノイズ性が要求される．これらの分野で使用されているセンサは，歪みゲージ式，導電性ゴム式，ピエゾ抵抗式，圧電式などアナログ出力のものがほとんどで，ノイズの影響を受けやすく信号レベルも低いため，フィルタ，アンプ，A/D変換器などを必要とする．また，ローパスフィルタの使用により帯域が制限されて対象の速い変化に応答できないこともある．これらのことからノイズに強く信号処理が容易で高速応答のロボットセンサの出現が待望されている．

外力により水晶振動子の周波数が変化することを利用した水晶振動子式力センサは，周波数出力であるためノイズに強く，この出力が周波数カウンタを通して容易にデジタル化できるなど信号処理が容易で，高感度・高分解能といった特長を有する．さらに水晶振動子の共振周波数が一般の環境ノイズよりはるかに高く（本研究で使用した水晶振動子は10 MHz と 15 MHz），仮にフィルタを併用しても高いカットオフ周波数のハイパスフィルタまたはバンドパスフィルタを使用できるので広い帯域が確保できる．把持力，滑り，接触力，接触位置などは水晶振動子式力センサにより検出可能な量であるため水晶振動子式力センサは把持力や滑り（摩擦力）のセンサとして，またアクチュエータなどノイズを発生しやすい機器と共存したり高速応答を必要とするセンサとして威力を発揮すると考えられ，アナログ出力のロボットセンサの欠点を補うセンサとして有望である．

1章では，研究の背景，本論文で使用する把持力センサの意味，水晶振動子を用いたセンサに関するこれまでの研究概要，本研究の目的と本論文の構成を示した．

2章では，矩形ATカット水晶振動子の力センサとしての基礎特性を実験的に調べ，以下の諸点を明らかにした．

(1) 異なった寸法の矩形ATカット水晶振動子を統一的に扱うため応力感度の概念を導入した．基本振動10 MHzで発振している水晶振動子20個と3次オーバートーン15

MHz で発振している水晶振動子 25 個を用いて、5～50°C の温度範囲で水晶振動子に外力を加え、応力感度とその温度特性を明らかにした。さらに、応力感度とその温度特性は外力の方向の関数で、水晶振動子の主面に平行で X 軸（電気軸）と約 35° の方向に外力を加えたとき応力感度の温度特性がフラットになること、このときの応力感度が約 18.7×10^{-12} [Pa⁻¹] となることを明らかにした。

- (2) 水晶振動子をロボットハンドなどに搭載するには、その機械的強度をあらかじめ知っておく必要がある。主面に平行で X 軸（電気軸）と約 35° の方向に引張りの静荷重を加えた場合の、矩形 AT カット水晶振動子の破断強さが 150 MPa 程度であることを明らかにした。つぎに、指に装着した水晶振動子について、引張と圧縮の静荷重を電気軸から約 35° の方向に加えた結果、引張に対して 70～100 MPa 程度、圧縮外力に対して 140～180 MPa 程度となった。また、固定端近くに水晶振動子を装着したジュラルミン製の指を用い、この自由端付近を厚さ 1 mm のシリコンゴムで覆った場合と覆わない場合について、この部位に鋼球を衝突させて衝撃荷重に対する強度を調べた。

以上により、水晶振動子は感度および機械的強度の面でロボットセンサとして有用であることが明らかとなった。

3 章では、水晶振動子の力センサへの応用として、水晶振動子式力センサに適用するための差動法の原理を示した。この差動法は、力感度や力分解能の向上、力感度の温度依存性の改善、同相ノイズの除去などを目的としたもので、水晶振動子を力センサとして実用するとき重要となる。差動法を適用した水晶振動子式力センサの応力感度の温度特性がフラットになる条件を求め、この条件を満たすとき応力感度は 37.3×10^{-12} [Pa⁻¹] となり、個々の水晶振動子の和となることを確認した。差動法を適用した水晶振動子式力センサを試作し、このセンサの応力感度とその温度特性を調べ所望の結果を得た。また、このセンサの振動外力に対する応答を調べ、2 kHz 程度までの外力に対して減衰することなく応答できることを明らかにした。

4 章では、水晶振動子式力センサの把持力センサへの応用として、2～4 対の水晶振動子を指に装着した把持力センサを示した。これらの把持力センサについて、把持力の 2 方向成分や把持位置と水晶振動子対の差周波数変化量との関係を明らかにした。その結果、2 組の水晶振動子対からなる把持力センサでは、把持力の 1 方向成分とその作用点が検出で

きること、3組の水晶振動子対からなる把持力センサでは、水晶振動子の主面に平行でない把持力に対して、指の軸線に垂直な断面内での把持力の2方向成分とその作用点が検出できることを明らかにした。4組の水晶振動子対からなる把持力センサでは、指の軸線に垂直な断面内の全ての方向での把持力の2方向成分とその作用点が検出でき、さらに、水晶振動子の主面に平行でない把持力に対して、任意の3組の水晶振動子対から各3個の把持力の2方向成分と把持位置の値が求まるため、これらの値を比較することにより、水晶振動子対相互の異常監視や、1対の水晶振動子に不具合が生じた場合に急場を凌ぐことも可能となることを明らかにした。また、4対の水晶振動子からなる接触力センサを用いて、一定の接触力のもとで対象をなぞって対象の2次元形状をセンシングし、所望の結果を得た。これらを通じて水晶振動子が把持力センサとして有用であることを明らかにした。

5章では、耐ノイズ性、高感度、高分解能、広帯域といった特長を有する水晶振動子式力センサを把持滑りセンサ（本論文では把持力センサに含まれる）に応用するため、水晶振動子式力センサにより滑りに伴う摩擦力変化を検出した。まず、1対の水晶振動子を角柱に装着した1次元把持滑りセンサを試作し、アクリル樹脂、アルミニウム、布テープ、ケント紙、ビニールテープ、シリコンゴムの6種類の対象物をこのセンサに接触させて滑らせ、このときの滑り特有の摩擦力変化を検出した。この結果、シリコンゴム以外の対象物について“滑り”と“ずれ”を識別できる摩擦力変化の時間波形が観測できた。つぎに、2対の水晶振動子を角柱に装着した2次元把持滑りセンサを試作し、対象物をこのセンサに接触させて滑らせ、摩擦力の2方向成分の時間波形を検出した。また、これらの時間波形から滑り方向の時間波形も求めた。この結果、 $\pm 2^\circ$ 程度以内で滑り方向の検出が可能であることが明らかになった。これらにより、水晶振動子が滑りやその方向のセンサとしても有用であることを明らかにした。

以上により、水晶振動子が耐ノイズ性、高感度、高分解能、広帯域といった特長を有する力センサとして使用できること、この水晶振動子式力センサがロボット搭載用把持力センサとして有用であることを明らかにした。

謝 辞

本論文をまとめるに当たり、ご多忙のなか終始温かく懇切なるご指導ならびにご教示を賜りました神戸大学教授 高森年 博士 に衷心より感謝の意を表します。

本論文を詳細にご検討を頂き、適切なるご助言を賜りました神戸大学教授 峯本工 博士、神戸大学教授 賀谷信幸 博士 に衷心より感謝の意を表します。

本論文作成の機会を与えて頂き、終始親身に温かくご指導ご激励を賜りました大阪工業大学教授 松本治弥 博士 に衷心より感謝の意を表します。

本研究についてご討論ご援助を賜りました神戸大学助教授 小谷学 博士、小澤誠一 博士、大阪工業大学の同僚をはじめ関係各位に衷心より感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、実験機材をご提供頂いた大阪工業大学特任教授 真崎才次 博士、大阪工業大学助教授 二宮春樹 博士、杉山司郎 博士、山本正明 博士 に衷心より感謝致します。

本研究は、著者が大阪工業大学における研究業務の一環として行ったものであり、この間本研究の機会を与えていただき、かつご指導ならびにご鞭撻を賜りました故元大阪工業大学教授 増尾竜一 博士、元大阪工業大学教授 前田親良 博士 に衷心より感謝いたします。

本研究の初期においてご教示頂きました株式会社クボタ 日野正道氏 に衷心より感謝いたします。

振動子の設計製作においてご協力賜りました東洋通信機株式会社 に感謝いたします。

なお、著者は平成10年度～12年度の3年間本研究の一部に対して日本学術振興会 科学研究費補助金（基盤C）の交付を受けた。ここに記して謝意を表します。

最後に、心身ともに陰に陽に私を支えてくれた私の家族に深く感謝の意を表します。

本論文に関する論文および講演

1. 学会論文集掲載論文

- 1) 村岡茂信, 西村博之: カセンサとしての矩形ATカット水晶振動子, 計測自動制御学会論文集, 32-4, 604/606 (1996)
- 2) 村岡茂信: 差動法を用いた水晶振動子による力センサ, 計測自動制御学会論文集, 33-12, 1117/1123 (1997)
- 3) 村岡茂信: 水晶振動子による3成分把持力把持位置センサ, 計測自動制御学会論文集, 35-6, 715/722 (1999)
- 4) 村岡茂信: 4対の水晶振動子を用いた接触力・接触位置センサとこれによる外界センシング, 電気学会論文誌 E, 120-3, 99/104 (2000)
- 5) 村岡茂信: 水晶振動子による滑りとその方向のセンシング, 計測自動制御学会論文集, 36-8, 639/644 (2000)

2. 国際会議発表論文

- 1) S. Muraoka, R. Masuo, C. Maeda: Temperature Dependence of Force Sensitivity of a Quartz Resonator Used in a Force Sensor, ACTA IMEKO XII, Measurement of Force, Mass, Pressure, Flow and Vibration, 379/384, (1992)
- 2) S. Muraoka: Application of Quartz Resonator to Grasping Force Sensor, 14th IMEKO World Congress, Vol. IXB, 55/60 (1997)
- 3) S. Muraoka: Detection of Grasping Force and Slip Using Quartz Resonators, 15th IMEKO World Congress, Vol. X, 165/172 (1999)
- 4) S. Muraoka: Contact Force and Position Sensor with Quartz Resonators, 16th IMEKO World Congress, Vol. XI, 39/44 (2000)

3. 国内学会口頭発表論文

- 1) 増尾龍一, 前田親良, 村岡茂信, 日野正道: 水晶による力センサのはかりへの利用 – 温度変化による一実験 –, 第28回応用物理学会関係連合講演会, 第28回応用物理学会関係連合講演会予稿集, 37, 1981.4.1
- 2) 増尾龍一, 前田親良, 村岡茂信, 日野正道: 水晶による力センサのはかりへの利用 (その2) – 温度変化による感度特性 –, 第14回SICE北海道支部学術講演会, 第14回SICE北海道支部学術講演会論文集, 17/18, 1982.2.2
- 3) 増尾龍一, 前田親良, 村岡茂信, 細川浩一: はかりのセンサとしての水晶振動子, 第3回SICE質量・力計測部会, 第3回SICE質量・力計測部会資料, 25/26, 1983.9.7
- 4) 増尾龍一, 前田親良, 村岡茂信, 細川浩一: 力センサとしての水晶振動子 – 温度変化による感度特性 (2) –, 第3回SICE九州支部学術講演会, 第3回SICE九州支部学術講演会予稿集, 117/118, 1984.11.23
- 5) 村岡茂信, 前田親良, 増尾龍一, 細川浩一: 力センサとしての水晶振動子 – 温度変化による感度特性 (3) –, 第17回SICE北海道支部学術講演会, 第17回SICE北海道支部学術講演会論文集, 39/40, 1985.2.7
- 6) 村岡茂信, 前田親良, 増尾龍一: 力センサとしての水晶振動子 – 感度のばらつきと再現性 –, 第24回SICE学術講演会, 第24回SICE学術講演会予稿集, 941/942, 1985.7.25
- 7) 村岡茂信, 前田親良, 増尾龍一: 力センサとしての水晶振動子 – 感度の温度特性と外力の方向の関係 –, 第20回SICE北海道支部学術講演会, 第20回SICE北海道支部学術講演会論文集, 67/68, 1988.2.3
- 8) 村岡茂信, 増尾龍一, 前田親良: 差動法による水晶力センサ, 第33回自動制御連合講演会, 第33回自動制御連合講演会 (前刷), 567/570, 1990.11.16
- 9) 村岡茂信, 増尾龍一, 前田親良, 西村博之: 力センサに用いる水晶振動子の応力感度の温度特性, 第34回自動制御連合講演会, 第34回自動制御連合講演会 (前刷), 531/534, 1991.11.22
- 10) 村岡茂信, 増尾龍一, 前田親良, 西村博之: 力センサに用いる水晶振動子の応力感度の温度特性と湿度の影響, 第31回SICE学術講演会, 第31回SICE学術講演会予稿集, 659/660, 1992.7.24

- 11) 村岡茂信：水晶振動子の動的力センサへの応用，第33回SICE 学術講演会，第33回SICE 学術講演会予稿集，591/592, 1994.7.28
- 12) 村岡茂信：水晶振動子による把持力センサ，第34回SICE 学術講演会，第34回SICE 学術講演会予稿集，621/622, 1995.7.27
- 13) 村岡茂信：水晶振動子による把持力センサの動特性，第35回SICE 学術講演会，第35回SICE 学術講演会予稿集，525/526, 1996.7.25
- 14) 村岡茂信：水晶振動子による把持位置把持力センサ，第36回SICE 学術講演会，第36回SICE 学術講演会予稿集，295/296, 1997.7.29
- 15) 村岡茂信：水晶振動子による滑り検出，第37回SICE 学術講演会，第37回SICE 学術講演会予稿集，219/220, 1998.7.29
- 16) 村岡茂信：4対の水晶振動子による把持力と把持位置の検出，第38回SICE 学術講演会，第38回SICE 学術講演会予稿集，341/342, 1999.7.29
- 17) 村岡茂信：水晶振動子による滑りとその方向のセンシング，第39回SICE 学術講演会，第39回SICE 学術講演会予稿集，102 A-3, 2000.7.26