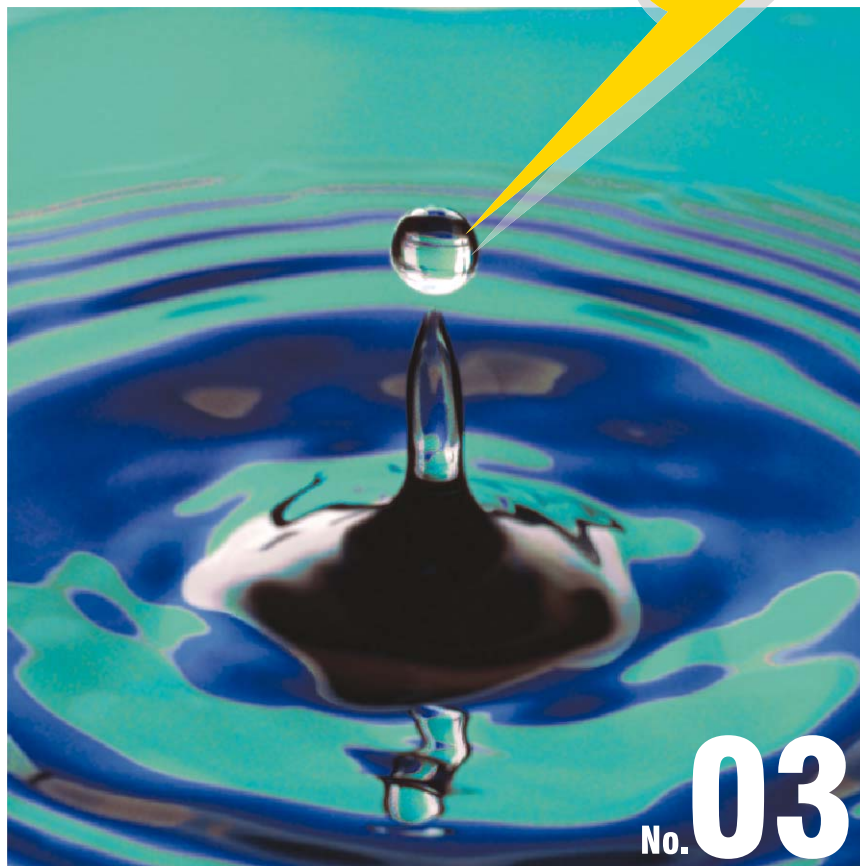


横河テクニカルブックレット

Project



ミクロの豎琴[DPharp]
— シリコン振動式圧力センサの開発 —

YOKOGAWA 

*1

1991年12月、世界に先駆け商品化された「DPharp」(ディーピーハープ)とは、共振周波数で差圧を測定することから、楽器のハープと「High Accuracy Resonant Pressure Sensor」の頭文字を取ってネーミングされたものである。

センサのインテリジェント化

我々の快適な生活を支える電気、ガス、水道、そして様々な製品は、自動制御技術によって作られている。巨大な工場の入り組んだ配管やタンクには、工場を安定して運転するためのたくさんのセンサが取り付けられ、温度、圧力、流量等を測定し、制御装置に信号を送っている。差圧伝送器は2点の間の圧力の差を測定することで、配管を流れる流体の流量やタンクの中の液位等を計るための代表的なセンサである。

1980年後半、周囲を取り巻いているビジネス環境は大変厳しく、製品競争が一層激化し、圧倒的な国内シェアが2～3年で数%低下する状況にあった。プラントでは圧力を計測する市場が急速に拡大し始め、より精度の高いものへとユーザのニーズが高まっていった。そしてもう1つの動きにインテリジェント化があった。プロセス計装では全面的にコンピュータ化が進んでおり、従来製品では対応できないアプリケーションも増えてきた。是非とも新しい伝送器の開発が必要だった。

世界初の原理の差圧伝送器開発へ

伝送器の心臓部となるのはセンサ。当時の圧力センサはピエゾ抵抗式、容量式、振動式の3つの原理があったが、その内どれを選ぶかは厳しい選択だった。振動式センサは昔からあったが、機械加工技術では、弾性体の素材や加工技術によってばらつきが大きく、大量生産、コスト低減が難しかった。また、振動子が液体に触れると減衰してしまうという難点がある。一方、ダイヤフラム(特殊な金属膜)の圧力によるたわみを弾性体の振動数の変化に換えることで、マイコン処理しやすいパルス信号にすることは有望な手法であった。問題点を克服し、前人未到の独自製造プロセスを

完成させれば、一躍世界のトップに立てることは間違いない。研究開発1部の部長(原田)はこれまでの経験上、振動式の利点を熟知していた。差圧伝送器をやるなら新しい方式を出して、工業計器の最大市場である差圧伝送器の流れを変えたいという願望と野心があった。

その頃、シリコン単結晶上に高精度な3次元加工をする技術(マイクロマシニング)が可能になり始めていた。この技術は複雑な構造や単結晶の材料を使いながら、小型のものを安く、大量に作れるという利点がある。シリコンのマイクロマシニングというキーになる技術を入れるというブレークスルーが問題を一気に解決に導いた。

横河電機のプロセスオートメーション技術の中核を担う、DP(ディファレンシャル・プレッシャー) harp*1は3次元マイクロマシニング技術を応用した、単結晶のシリコンレゾナントセンサを世界で初めて工業計測に実用化し、工業用差圧伝送器の世界にデジタルセンシング技術を持ち込んだ。

半導体やICについてよく知らなかった機械屋達が、半導体プロセス屋には思いもつかないプロセスを開発することになった。

これはそのような横河電機の技術者達のエピソードである。

伝送器の心臓部に世界初のシリコンレゾナントセンサを採用

1987年2月、プロジェクトリーダー池田恭一のもとに、渡辺哲也から内線が入った。それはシリコンレゾナント式差圧・圧力伝送器DPharpの要とも言える、「振動子の真空封止」成功の一報であった。この真空室を作り出すために、池田を始め渡辺ら開発グループは、幾晩も徹夜を繰り返していた。この真空室開発の成功こそ、世界初の技術に向けての第一歩だったのである。

差圧式流量測定器の歴史は古く、オランダのベルヌーイによって「差圧の平方根が流速に比例する」という理論が打ち立てられて以来、絞りの上下の圧力差を測定する、アナログの差圧式流量測定器が主流となった。現在、工業用流量測定器の約8割に用いられている。この差圧測定に、ダイヤフラム上に形成したシリコン振動子の共振周波数変化(レゾナント方式)を採用したところに、池田らDPharp開発グループの新しさがあった。シリコンレゾナント方式には、測定の感度・精度が極めて高い、圧力や温度変化の影響が極めて少なく、長期安定性がある等のメリットがある。それまでシリコンを使用した圧力センサには、抵抗式歪センサを始め、数多くの種類があった。そして、そのほとんどが製造は比較的容易だが、精度に難があるという問題を抱えていた。例えば、測定圧力を1とした場合、抵抗式歪みセンサだと、抵抗値はたかだか0.5~1%しか変化しない。しかし、振動式センサであれば共振周波数の変化する割合は約10%、従来のシリコンセンサの数十倍の精度を求めることができる。

1975年から、クラシカルな金属機械加工技術を応用した振動式センサの開発に携わっていた池田は、レゾナント方式を応用すれば、ADコンバータ

の必要がなく、しかも、精度の高い計測器を製造できる、そのノウハウを持っていた。そして、実際、航空機や気象台で使用される気圧測定器の技術開発、製造にも関わってきた。しかし、従来の金属機械加工技術ではあまりにもコストがかかり過ぎる。また、従来型振動式センサでは、技術としての新しさもない。より精度が高く、しかも低コストで生産可能な新技術はないものか...池田は日々、試行錯誤を繰り返し、模索していた。

最新技術マイクロマシニングを導入

この時、池田の右腕となったのが入社2年目を迎え、研究開発への若い情熱を持ち合わせていた渡辺である。1984年、池田と渡辺だけによるアンダー・ザ・ベンチがスタート。プラントで使用する高精度・高安定なセンサを実現するには、振動子を環境要因から隔離しなければならない。池田は「基本的な設計としては、ダイヤフラムの上に振動子があり、その上に蓋をして密閉するというものだが、安定化を図るためには中を真空にする必要があった。しかし、前例がなく極めて困難な作業だと感じた。」と当時を振り返る。2人がまず着手したフィジビリティ・スタディはシリコン振動子のエッチングによる加工技術だった。振動子はダイヤフラム上の微小な真空室の中に入っている。その幅わずか $35\mu\text{m}$ ・高さ $10\mu\text{m}$ (1μ は100万分の1)。この、人の髪より細い空洞にシリコンの弦を張り、圧力をかけ、弦の共振周波数によって差圧を測定する。DPharpは石油精製・化学・電力・鉄鋼・紙パ等の分野において広く使用されるが、プラント中を流れる流体には約40MPaにも達する場合もある。しかし、測定する差圧は20kPaと、その値は極めて低い。プラント中に高い圧力が発生すれば、真空室がつぶされる場合もあり得るので、

*2

磁場中でH型振動子の一方の梁に交流電流を流すと電磁力が発生し、振動子は上下に振動する。交流周波数がH型振動子の固有振動数と一致すると共振が起きる。磁場中で運動する導体には起電力が発生するので、もう一方の梁には共振周波数の交流電圧が発生し、これを正帰還させると振動子は自励発振する。共振周波数は圧力によって変化するので、これから圧力を測定できる。

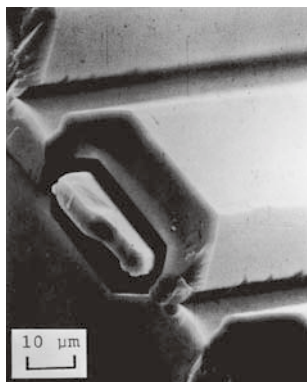
ダイヤフラム中の真空室はごく微小に作らなければならない。

その当時、異方性エッチングの普及によってシリコン上に高精度な3次元加工をする技術(マイクロマシニング)が話題に上り始め、最先端技術として学会で研究・発表がなされていた。「**マイクロマシニング技術を導入してみてもうどうだろう。シリコンの半導体プロセス技術を応用すれば、1度に100や200のシリコンセンサを1枚のウエハから作ることができる。シリコン+振動式。もし、成功すれば世界最強のセンサができる!**」池田の脳裏に閃くものがあつた。機械屋出身の池田にとって半導体プロセスは未知の世界だった。池田は単身、まだ世界でも例の少ないマイクロマシニング技術獲得のためにドイツ・フランクフルトへ飛んだ。

1986年7月、強力な助っ人が加わり、DPharp開発プロジェクトが組織された。原田謙爾を長とする通称「七人の侍」の面々は、**池田恭一、桑山**

秀樹、西川直、小林隆、渡辺哲也、吉田隆司だった。発想力で勝負する池田、渡辺と、何事もじっくりねばって出方を待つ桑山、吉田といった違うタイプの人間が存在していた。異なる個性のバランスとコミュニケーションが、DPharp開発に功を奏したのは言うまでも無い。

彼等はシリコン製のダイヤフラム上にマイクロ振動子を形成する実験に明け暮れた。マイクロ振動子の製造工程は非常に複雑かつ微妙で、あたかもマイクロのブロックを積み重ねるようなものだった。0.1 μm の誤差でも振動子はうまく動かなかった。深夜まで続く根気の要る、地道な作業。年末に成果を出すはずだったが、年を越してしまつたが遂に1月末、連日の徹夜作業の結果、シリコンレゾナント振動子は出来た! この振動子が膜変化を増幅し、信号を伝える役割を果たす。振動子のサイズは厚さ5 \times 幅30 \times 長さ700 μm 。まさにマイクロレベルの弦が完成した。(図1・写真)



振動子の断面の電子顕微鏡写真

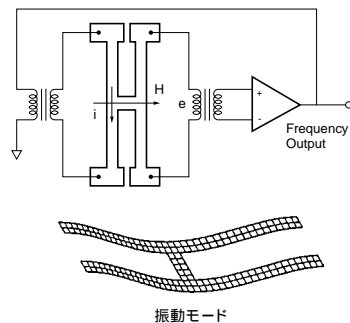
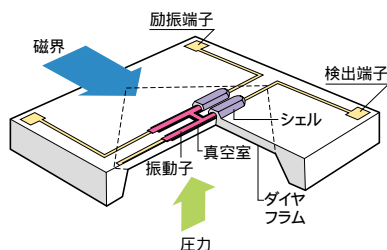


図1：シリコン振動式圧力センサの構造と原理*2

レーザー核融合技術がヒントに

振動子は完成したものの、次なる大きな問題は真空室をいかにして真空にするか、だった。しかし、意外なところから道が拓けた。この真空室開発を成功に導いたのは、大学時代、レーザー核融合研究室に籍を置いたことのある渡辺の次の一言である。「レーザー核融合で使っていた方法でやってみたらどうだろう。」ある条件下で中空のガラス玉に水素ガスが浸透する現象を渡辺は知っていた。「入ってくるなら出ることもあるはず!」非常に微細な三重水素原子(^3H)は、シリコンの酸化物であるガラス($\text{Si} + \text{O}_2$)原子の隙間を通して内側に入り込む。1000 のシリコンガスにシリコン・ウエハを入れるとエピタキシャル成長によってシェルが埋まるが、その時、その中に水素原子を閉じ込めることができる。核融合とは逆に、シリコンを通して水素原子が外へ出ればその中は真空になるはずだ。

池田と渡辺はすぐさま真空封止の研究に取り掛かることにした。しかし、何度実験を繰り返してもうまくいかない。肝心の共振周波数によるデジタル信号が発信されないのである。来る日も来る日もウエハを作っては壊しを繰り返す。こうした2月のある日、その日も実験室で真空封止にチャレンジしていた渡辺から、池田に内線があった。「池田さん、とうとうやりました。」これが冒頭の、伝送器の心臓部であるセンサができたシーンである。

ところが、とりあえず1個は成功したが、その後2つ目はなかなか出来なかった。シリコン・ウエハのエピタキシャル成長に何か問題があるのかもしれない。いや、振動子自体に問題があるのかもしれない!...、一向に見えてこない再現性という新たな壁を前に、またしても「七人の侍たち」はトライ&エラーを繰り返す。

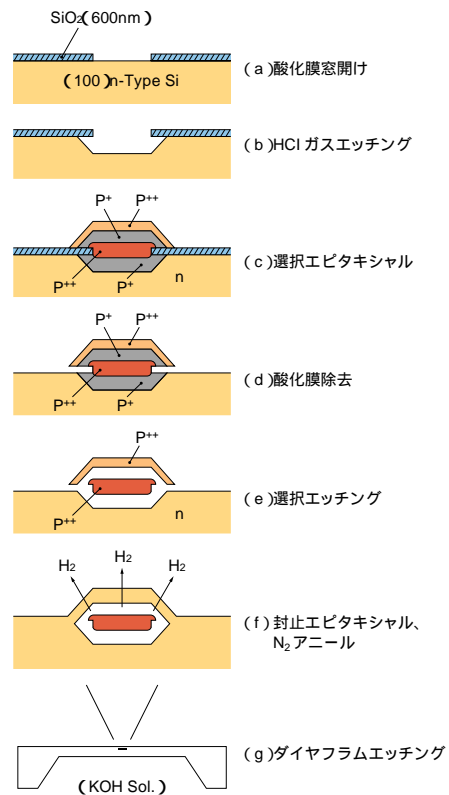


図 2 : センサ製造プロセス *3

研究開発とは、失敗と挑戦の繰り返しである。ひとたび壁を乗り越えても、また新たな壁が目前に立ち上がる。これは研究開発者に課せられた宿命とも言えよう。道のりは果てしなく思えた。真空の中でシリコンを成長させて真空室を作るといふ別なアプローチも試してみた。ともすればくじけそうになるメンバーを最初の方法にこだわり続ける辛抱強い他のメンバーが支えた。そんな中でチームの結束力が強まっていくのも事実である。そしてついに2つ目が再現し、辺り構わず大歓声を上げた夜、原

*3

振動子は選択エピタキシャル成長という技術を用いて4層のホウ素原子濃度の異なったシリコン単結晶膜から作られる。振動子と真空室になる部分は、高濃度にホウ素原子が導入されていて、アルカリ溶液で溶解せず低濃度の部分のみが溶解する。最後に水素中で封止し、窒素中で熱処理すると内部に残留していた水素ガスが拡散して真空室が完成する。(図2)

*4

理化学研究所の第3代所長大河内正敏博士の業績を賛え、1954年に創設され、生産工学・生産技術・多量生産方式の実施等に特に優れた業績を上げた個人または事業体に贈られる。中でも記念賞は最も栄誉ある賞とされている。

田は「明日は休んでも良い。今日は徹底的に飲もう!」と言った。

彼等は、数々の壁をクリアし、その研究結果を1988年「日本電気学会センサシンポジウム」、1989年「Transducers '89 固体センサに関する国際学会」(於:スイス)で発表。その成果は世界で認められることとなった。こうした社外からの大きな反響を宣伝に使って社内に認識させ、売り込むという幸運な状況にも恵まれた。

二番煎じでなく、世界一の差圧伝送器を作れ
「研究開発の方で非常に感度が良く、安定性のいい、優秀な振動式センサが完成した。」との報告を受けたトップから指示がくだり、1989年1月原田を除く6名は異動し、事業部技術部と一体となって総勢50名からなるDPharp製品化プロジェクトが結成された。最も厳しいニーズに世界初のセンサが挑戦するという意義ある開発の舞台が幕を開けた。

一番力を入れたのは、3次元のマイクロマシニングの半導体プロセスを量産化できるプロセスに再度作り直すことであった。電子デバイス部門の精鋭がこれに当たった。新しい原理を取り込み、耐圧や精度という厳しい要求をクリアし、実用に耐える量産プロセスを開発する過程は歩留まり率(一定の品質が保たれる割合)との戦い。多大な人と時間を必要とし、当初の予想2年を越え、3年に及んだ。

グローバルシェア1位を目指して

1991年末発表されたDPharpは久々の大型新製品の発売ということでマスコミからの注目度も高く、1992年2月初出荷の日を迎えた。特別仕立てのデモバスで全国のコンビニートを中心に展開された拡販活動も話題になった。こうしてシェアを一気に拡

大していった。

1995年横河電機はこのマイクロマシニング技術を使った圧力センサで大河内記念賞*4と全国発明表彰特別賞をダブル受賞した。マイクロマシニング技術は当時の最先端技術として学会では応用例が研究・発表されていたが、実用的なレベルで使われることが証明された。

発売以来10年以上経過した現在、DPharpシリーズは世界で120万台が稼働。1992年発表のEJシリーズは主に国内市場に合致した製品だったが、1995年グローバル製品を意識したEJAシリーズ発売でシェアを一気に拡大、世界に及びグローバル2位の地位に到達した。2003年差圧の他に静圧を同時に測ることが出来る、従来製品を大幅に向上させた世界戦略製品を開発。2005年シェアトップを目標に打って出る。

「七人の侍」たちはそれぞれの道へ進んだ。池田は1991年に10年間(1978～1988年)の研究成果をまとめた“円筒振動式圧力センサとその高性能化に関する研究”で東京大学より工学博士の学位を受けた。現在は東京農工大学で教鞭を取り、横河電機で培った技法を学生達へ伝え続けている。渡辺は今日も新しいセンサの開発に情熱を傾けており、桑山はDPharpのグローバルシェア1位を目指して海外への売り込みに尽力している。

製品紹介

当社は1961年に日本で初めて産業用差圧・圧力伝送器を発売し、この市場に参入。1991年に開発したDPharp EJシリーズは、伝送器の心臓部である圧力検出部に当社独自で開発・設計した従来とまったく異なる測定原理を用いた単結晶シリコン振動式センサ(シリコンレゾナントセンサ)を世界で初めて搭載。1994年には小形軽量ボディにその高性能を凝縮したEJAシリーズを発売し、高性能とともに極めて優れた安定性、信頼性が認められ、世界中で120万台が稼動しています。2004年にはEJAを上回る高性能に加え、マルチセンシング機能(差圧・静圧同時測定)、高速応答性能(95ミリ秒)、安全計装SIL 2適合の信頼性を特長としたEJXシリーズをDPharpシリーズに追加発売し、対応アプリケーションをさらに拡大していきます。

DPharp



EJAシリーズ



EJXシリーズ

EJXの主な特長は

- ・マルチセンシング：差圧静圧同時測定
シリコンレゾナントセンサの進化により、1つのセンサで差圧と静圧の同時測定が可能。
例えばタンク液位計装における液位(差圧測定)と内圧(静圧測定)の同時測定を実現。
- ・総合精度 $\pm 0.12\%$
精度 $\pm 0.1\%$ に加え、総合精度() $\pm 0.12\%$ (最大スパン)、 $\pm 0.25\%$ (最大スパンの1/5)を実現。
当社が提案する、実使用環境下における誤差要因(周囲温度変動、静圧変動、過大圧)を考慮した総合的な性能指標
- ・高速応答：95ミリ秒
インテリジェント形として世界最速の95ミリ秒を実現。タービン蒸気流量制御のような高速制御アプリケーションへの対応が可能。

- ・高信頼性
DPharpシリーズ以来の高信頼性設計継承に加え徹底した安全設計の概念を導入し、安全規格IEC 61508のSIL2(Safety Integrity Level 2)の認証をTÜV ITから取得。汎用差圧伝送器でありながらSIL2適合は世界初。
- ・予知診断機能
マルチセンシング機能を活用し、導圧管つまりやスチームトレースなどの診断機能を順次開発・搭載し、メンテナンスコスト削減に貢献。

お問い合わせ先

制御プロダクトフィールド機器事業部 PMK 部
 電話：0422-52-5690
 F A X：0422-52-2018
 メール：fld_request@csv.yokogawa.co.jp
 Home Page：
<http://www.yokogawa.co.jp/Sensor/>

横河テクニカルブックレット Project Y No.3

題 目 : ミクロの豎琴 [DPharp]

シリコン振動式圧力センサの開発

発行人 : 永島 晃

編 集 : 技術開発本部開発基盤支援センター

発行日 : 2004年2月20日

・掲載の会社名・商品名等は横河電機株式会社
及び各社の商標または登録商標です。



池田 恭一



桑山 秀樹



渡辺 哲也

取材協力 : DPharp 開発関係者(50音順)

