

座 談 会

杉山先生を囲んで（前編・ロングバージョン）

電気学会 E 部門編集委員会

■ はじめに

E 部門も設立 20 周年を迎え、立ち上げ前後から E 部門やセンサ・マイクロマシン分野を牽引してこられた先生方をお迎えし、論文や講演では語りつくせない話題を語っていただく「座談会」企画の第 2 回目です。立命館大学の杉山進先生を囲んで 2014 年 9 月下旬に京都市内某所にて会食しながら、座談会を行いました。杉山先生の MEMS50 年の半生を祝って乾杯した後に、企業で研究開発をスタートされた御経歴から振り返っていただきつつ座談会を開始。

出席者：

三原孝士（一般財団法人マイクロマシンセンター）

横川隆司（京都大学）

洞出光洋（大阪大学）

ダオ ズン（グリフィス大学（オーストラリア）、スカイプで参加）

安藤妙子（立命館大学、本座談会企画立案・文責）



杉山 進（すぎやま すすむ）先生 1946 年 9 月 29 日生。愛知県出身。1965 年（株）豊田中央研究所入社。1970 年 3 名城大学理工学部電気工学科卒業。1994 年東京工業大学より博士（工学）学位授与。1995 年立命館大学教授、2012 年定年退職。現在立命館大学客員教授、（社）産業科学技術研究支援機構代表理事。

加。スカイプ越しで乾杯。

■ 電気少年から始まったものづくりの少年時代

安藤：50 年という話が出ましたので、まずは、高校を出て豊田中央研究所に入社されたんですね。

洞出：僕を含めて研究室でも、その辺の話はあまり伺ったことないですよ。

杉山：学生には将来の話の方をするからね。夢を持ってやっていって、ぶつかったときに過去の色々な経験でどうしたらいいかという話が出てくるんだけど。

安藤：豊田中研に入られてすぐに MEMS 圧力センサの研究室に入られたんですね。

杉山：ええ、入った研究室が半導体研究室っていう名前だったかな。学生のときはね、三原さんと一緒に電気少年で。中学の時から真空管ラジオを作ってたね。

三原：ああ、なるほど。嬉しいですね。真空管ですね。

杉山：そばにあった電気屋さんに真空管シャーシありますかって聞いても、そんなの置いてないから、東京でいう秋葉原みたいところを教えて貰って、そこまで行って真空管ラジオを作って、そのうちに友達のお兄さんがアマチュア無線をやっている。

ズン氏がオーストラリア、ビクトリア州からスカイプで参

三原：真空管でラジオが専門だったんですか？

杉山：中学の 2 年の時にやり出して、3 年の時に受験はどうだって言われたけど、勉強は好きじゃなかったからね、そればかりやった。

三原：私もまさに電気少年だったんですけど、私は真空管じゃなくトランジスタで、同世代とはいえちょっとしたギャップがあるんです。高校 2 年生くらいの時ですが、勉強しようと思って調べたら、シュレーディンガー方程式がはいっばい出てきて、わからないですよ、半導体の世界は。そういう世代ギャップです。

杉山：僕はね、中学校の時、お金がないからね。お正月郵便局の配達のパイトとかデパートのお中元とかお歳暮のパイトもやった。高校の時だったかな、アマチュア無線の雑誌を一生懸命見て自分で組み立てて、キットは高いから自分で部品集めてシャーシも自分で穴を開けて。

三原：穴を開ける、そうそう、そうなんです。

安藤：手作り感がありますね。

三原：あの頃にオシロスコープってありました？

杉山：ないないない。テスターだけだね。あとは放送局を聞けばわかるから。

横川：それでチューニングするんですね。



左 三原 孝士 氏, 右 洞出 光洋 先生 (立命館大学の杉山研究室にて博士学位取得)

杉山 : 最初は小学校 3 年の時、鉱石ラジオ。それから 20 個か 30 個か作ってる。

三原 : ゲルマニウムラジオですね。結晶に針をくっつけて。

杉山 : それがかう、筒に入ってたんです。

ズン : 杉山先生は一度ベトナムに行かれたとき、真空管を探しに行きました。

杉山 : ハノイに秋葉原みたいなどころがあるんですよ。ジャンクものがいっぱい置いてあって秋葉原よりすごい。

横川 : でももう真空管は要らないじゃないですか。

安藤 : そこで真空管を探したんですか？

杉山 : 真空管を探しに行っただんです。

三原 : 今は本当にいい真空管を作っている国っていうのは少ないんですよ。ロシア製のはいいですね。意外にホビーマスターの人たちには結構売れて。

杉山 : でも今ではだいたい中国製だね。

横川 : まだオーディオもマニアックなやつには乗っていませんもんね。

杉山 : 電気少年というのは小学校からで、夏休みの自由工作なんかよく作って持って行った。モーターなんか小学校の頃に一生懸命作ったね。

三原 : そうなんですよ。あの頃は学校しか文化的なエリアがなかったから、理科の先生が唯一の友達だったりするんです。

杉山 : 職業課程っていうのがあったでしょ。僕たちの時は中学校から就職する人が多かったから。のこぎりで木の箱を作ったり、中学校でエンジン回したりしたよ。

三原 : いや、確かにそうですよ。エンジンをちょっと分解したりとしか。

杉山 : ディーゼルエンジンをね。あの、農耕用のタッタタッタっていうね。原理的にどうかではなくて、エンジンを実際に触ったか触らないかでだいぶ違うものでしょ。ガソリン入れて、油入れて、回した。

安藤 : その経験はあるのとないのでは全然違いますよね。

横川 : 日本でも機械系の大学に入ってからですね。学部生でしたっけ、ディーゼルを分解して組み立てて。

洞出 : 僕もそうでした。僕も大学 1 年の時エンジン分解して作ってっていうのを初めてやりました。

三原 : 昔の人は誰でもやっていたんですよ、ある程度分解して洗ってオイルを入れないと何もできなかったですね。

安藤 : 子供たちがそういうのに自然に興味を持てるような環境だったんですね。

杉山 : うちが貧しかったから、中学校行った後高校に行かせてもらえばありがたいって感じだった。それで頭の中は最初から工業高校だった。おやじも木工所に勤めていたから自分も夢は技師になることだね。

三原 : じゃあお父さんは中小のベンチャーだった。

杉山 : いやいや、ベンチャーだったというか色々失敗したみたいだけど。結局工場。親父は木工に関しては玄人だから夏休みの宿題を作るのが大好きで。

三原 : 作ってくれるわけですね。

杉山 : こちらがゴリゴリ工作をやっていると、おやじはちょっと貸せ、こうやってやるんだって言ってやらせてくれない。それで大学の研究室では学生にやらせているよ。俺がやるって言いたいんだけど我慢してね。

洞出 : そうでしたね。

三原 : でもそれはすごく大事なことで、今の若い人っていうのは、父親がサラリーマンだから現場で何をやっているかわからないんですよ。

杉山 : 何かものを作るときに工程の広い部分を担当していれば全体がわかるから教えられるけど、分化されて自分の分だけやってるからものづくりじゃなくなってるわけ。ルーチンで、チャップリンの世界になっちゃってる。

三原 : いや本当にその通りだと思います。全体がわからないですよ。

■ サッカー少年から青年へ

安藤 : 先生の御経歴を拝見していたら、高校卒業して豊田中研に入って、その 1 年後に大学に入学されたのですね。

杉山 : 父母懇談会でおふくろが、うちの息子が高校に入ったとすごく喜んで。3 年間サッカー部をやって、工業高校は昔はそんなに強くなかったんだけど、インターハイ最終の県の決勝までいったの。ところが負けちゃってがっかりして。

三原 : すごいな。それはモテたでしょうね。

杉山 : いや工業高校は女の子いないから

三原・安藤 : 残念！！

杉山 : 中学校は 3 年間ずっと陸上をやっていました。3 段跳びをやったり、最終的には中距離をやったり。でも一人で走ってるとつまらないから、友達につられてサッカーに入って。2 年生の終わり頃に名城大学のコーチが体育の研修に来て、ときどき私たちを指導してくれた。指導するのはただ一つ、キックの仕方だけ。キックしたらボールは下がらなあかんと。

三原 : 回転ですね。それ“だけ”教えるんですか。剛体モーメントの再現ですね。

杉山 : 会社入ってサッカー部が無かったから作ったんだだけ

ど、社会人大会は夜しかやらない。夜に名古屋の真ん中のナイター付き公園でやってるわけ。審判が下手でジャッジが悪くて揉めるでしょ、それで審判やれよということになって。年2回くらい合宿セミナーがあって試験があって教習があって、翌日に実際に試合の審査があって、やっと資格がもらえる。

洞出：それで研究室では、先生はJリーグを裁けるみたいと噂になってましたよ。ライセンスを持ってるって。

杉山：いや、ぼく2級まで持ってる。

三原：へえ、すごいですね。

杉山：2級は会社を休まないといけないんで、だいたい学校の先生が多いですわ。1年中、東海エリアの土日に全部行かなきゃいけない。それで大学の東海リーグの学生連盟にも行って名城大学にも行ったわけ。僕が教えていただいた（それが言いたかった）

三原：そこでやっと名城大学とつながった。

杉山：教えていただいた先生が監督をやってたので、久しぶりに、色々ありがとうございましたっていう話をしたんですけどね。

三原：じゃあそのサッカーのご縁もあったんですか。

杉山：われわれが若い頃って、会社は土曜日は半ドンだったから昼からみんなスポーツやるの。それでサッカー部やって、市の大会で新人戦みたいなやつで優勝したの。

三原：すごいな。……先生、そろそろMEMS行かないと、時間的に。MEMS半生ですから

■ 会社の半導体研究室に入って、まずはひずみゲージの手作りから

横川：豊田中研に行って半導体研究室だったのですよね。

杉山：半導体研究室に入ったら、ひずみゲージをやったの。入った当初は来る日も来る日もひずみゲージを伸ばしてね。だいたい200 μm の幅で20 μm の厚さで、長さが1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm。

安藤：それは半導体のひずみゲージじゃなくて、金属のひずみゲージですか？

杉山：いや、半導体のひずみゲージ。ウェハはゲルマニウムやシリコンで、最初はゲルマニウムだった。シリコンは半田付けできなかつたから。

三原：ゲルマニウムでは簡単にオーミックコンタクトがとれたんですね。

杉山：インジウム錫で百数十℃かな？半田付けできて。シリコンは酸化物がすぐできるから使えなかつたの。昔のトランジスタだってそうですよ。オーミックが上手く取れないからゲルマニウムが使われて。だけどだんだん世の中技術が進んでシリコンが使えるようになったんですけど。それは酸化膜を取るというか、もっと言えば酸化膜を付けてから取るっていう技術ができたから。だからゲルマニウムをやって、後にシリコンをやりました。結晶の引き上げの機械もあったんですよ。



右 横川 隆司 先生

三原：引き上げ装置まであったんですか。

杉山：それでシリコンの引き上げも自分たちでやった。僕は横で見ているだけで、名大から来た研究員が一生懸命やってたけど、シリコンを引き上げるとちょうど芋の大きさくらいなんです。直径2cmか3cmだね。それを縦に切って、それでどうやって結晶方位を調べると。

三原：X線がないんですか。

杉山：だから光像法で。ウェハをエッチングするわけです。ピットが出やすいようなエッチング液があるでしょ。

三原：そこで見るわけですか。

杉山：光を当てると反射するわけですよ。反射した像を見ると、X線のラウエと一緒にですよ。そうすると明るいスポットが出る。スポットの対称性と出てくる点の角度を見ると、結晶がどの方向に切れたかわかる。

三原：それは何年ころの話ですか？

杉山：僕が中研に入った1965年。

三原：その頃っていうのは半導体はまだそういう世界だったんですか？

杉山：いやいやX線はあるけど、そんなの切断しているラボには持って来られないでしょ。引き上げするときの種結晶は買ってきてX線で調べた。それでやっていくと綺麗に結晶方位の筋がつくんですよ。それを目安にしてまずは切った。ダイヤモンドカッターのブレードでウェハを作るでしょ。とりあえず角度が何度以内に入っているか、さっきの光像法で調べて、OKということになる。今度はウェハがだいたい200 μm くらいでしょ。それを、手で研磨するわけですよ。ガラスの上に、ダイヤモンドペーストで何番何番って研磨やって、それで自分で手で触ってみると良いか悪いかって。

安藤：素手ですか。

杉山：我々は手でやった。ウェハをさっき言った20 μm くらいまで薄くするんですよ。

三原：手作業で薄くするんですか、20 μm まで、すごい。

杉山：そのうちラップマシンを買ったけど。それで、20 μm くらいになったら、それを短冊形に切るわけ。幅がさっき言った200 μm 、長さが1 mm, 2 mm, 3 mmだね。どうやって切るかという、だいたい1975年くらいかな、第一製砥所って行って、今のディスコですよ。砥石の会社でね。



ダオ ズン 先生とスカイブ越しに乾杯する杉山先生

そこが薄い $20\ \mu\text{m}$ とか $50\ \mu\text{m}$ のダイヤモンドの良いブレードができたといって、そこから始まったわけですけど。それまでは外国の製品で、一般名で言うとサンドブラスター。細かいノズルから出すサンドブラスターで $20\ \mu\text{m}$ のところを切って短冊ができる。やっぱり加工層や破碎層があるからフッ硝酸でエッチングして、鏡面にした。それでキラキラ鏡面が出たことで、今度はそれをピンセットでつかんで、その頃は超音波がなかったから、熱圧着でリードボンディング。

三原：その前に PN 接合を作りますよね。

杉山：いやいや、ひずみゲージだから。

三原：ひずみゲージ。なるほど、ただ単に p 型の半導体にすぎない。

杉山：p 型の半導体は自分たちが添加物入れてね。 $0.03\ \Omega\cdot\text{cm}$ を作るわけ。

横川：ボロンを入れてですね。

杉山：p 型も n 型も作りました。だからバルクです。熱圧着でリードボンディングをやりました。シリコンには直接付かないから、シリコンを切る前にマスクで蒸着する。でもゲルマニウムは金で上手くいったけど、シリコンは金が上手くいかない。

三原：金だけですか。接着層を入れますよね。Ti とか Cr とか。

杉山：シリコンはオーミック接合できないんですよ。例えば $1\ \Omega\cdot\text{cm}$ とか $2\ \Omega\cdot\text{cm}$ だよね。

三原：要するにうんとドーピングしてないと駄目なわけですね。

杉山：そういうことがだんだんわかってきたから、表面全体に p+ を入れる。例えば下が $\text{数}\ \Omega\cdot\text{cm}$ で上が 10 の 20 乗ぐらいボロンを入れるわけ。

三原：それはどうやって？拡散ですか？

杉山：全面拡散です。それで拡散して入れたところを切った後、金を付けます。

三原：でも金だけでは金シリコンになっちゃいませんか？

杉山：それは問題ないですよ。なぜかという PN 接合がないから、オーミックが取ればいいので。不純物のボロンを 10 の 20 乗ぐらい入れるわけです。アルミ蒸着し、その上に金蒸着して、金線を熱圧着でボンディングする。電

極表面は金になってるからフッ硝酸中で溶けずにゲージ部のシリコンだけ溶けるわけ。それで先ほど言った表面に入っているボロンが溶けて、最初は抵抗値が低くて $1\ \Omega$ 以下だけど、ひと皮むけて抵抗値がガッと上がるわけね。エッチングで抵抗調整をやって、所望の抵抗値にするの。

三原：昔はフォトリソがないからマスク蒸着で電極を作ったあと全面をエッチングしてという感じですね。

安藤：マスク蒸着って、今でいうステンスルマスクみたいなものですか？

杉山：そうそう。それで例えば $3\ \text{mm}$ 長さで厚みが $20\ \mu\text{m}$ で幅が $200\ \mu\text{m}$ のシリコンに金線が $20\ \mu\text{m}$ か $50\ \mu\text{m}$ がついてる。それを比抵抗を決めて作ったわけね。じゃあ次は感度を全部計る。どうやって計るかっていうと、金属バーの表面を研磨して鏡面にして、そこに手で貼り付けるわけ。

三原：貼るって接着剤で？

杉山：接着剤。その接着剤は熱硬化性で、ある熱をかけると溶ける。

三原：アラルダイトですよ。エポキシ系ですよ。

杉山：アラルダイトの A1 っていうやつはね、完全キュアしたらカチカチになっちゃうけど、未硬化で止める。その後、またアセトンではがせるから。15 本から 20 本くらい並べて、金線をクリップで 1 個ずつ留めて、カチャカチャと、可変抵抗器を回して 4 点支持荷重の等ひずみの間で計る。だいたい $5\ \text{kg}$ 位のおもりを掛けて計るのね。それで最初の抵抗を検流計で見る。

三原：アッテネータでしょ。

杉山：可変抵抗器。要はボリュームですよ。

三原：値が 1 から 0 まで、,, デジタル。

杉山：そう、124.5 って、それが $1\ \text{k}\Omega$ のやつ、 $100\ \Omega$ のやつ、 $10\ \Omega$ のやつって、カチャカチャやるんですよ。それを検流計を見ながらブリッジを作って、最初の抵抗をまず調べて、おもりを掛けた後またカチャカチャ回して検流計が真ん中に来るようにして抵抗を読む。厚みと幅と長さが決まっているから、断面 2 次モーメントからひずみが計算できますからね。そのバーを使って、あとそろばんで、それと計算尺かな。

横川：キャリブレーションをするんですね。

■ シリコンのひずみゲージから半導体圧力センサへ

三原：ドーピングシリコンをひずみゲージとして使えるっていうのは、先生が研究される前になんかあったんですか。論文とか。

杉山：アメリカにありましたね。それから半導体の IC、トランジスタの技術を見て。オーミックがとれないっていうのは同じ悩みだったでしょ。

安藤：ひずみゲージの論文自体、まだ 65 年とか 66 年くらいですよ。それが出たのとほぼ同時に豊田中研では圧力センサですね。

杉山：ひずみゲージのね。単体のバルクのシリコンのひずみゲージを使って、ステンレスとか高張力鋼でダイヤフラムを作るんですよ。そこにエポキシで貼る。

安藤：当時はまだバルクシリコンだったんですか。

杉山：でも半導体圧力センサでしょ。3 mm 直径のダイヤフラム厚みが 0.1 mm とか 0.2 mm の太鼓型のね。

安藤：私は当初からシリコンの膜にシリコンの半導体ひずみゲージを使っていたのかと思っていました。

杉山：それは僕が大学を卒業する 1 年前かな。だから 1969 年から拡散型圧力センサをやってるの。

安藤：やっぱり面白いですね。

三原：面白いですね。そういうなんか圧倒的な時代。半導体のプレーナー技術の前ですよ。我々は半導体っていうとプレーナー技術しか知らないから。

安藤：本を読むときにもその技術からもう見て勉強するので。その前の話は見えてこない。

杉山：僕は工業高校を出て 18 歳で半導体研究室に入ったら、毎日毎日ひずみゲージを伸ばして、バーの上に貼って、機械にかけて、クリップで留めて、カチャカチャやりながら検流計が動いて、何オームか見て、部屋に帰ってから計算機でひずみ感度がいくつと計算して。

三原：計算機があるわけじゃないから、計算尺で…すごいですね。

杉山：リレー計算機が出たか出ないかの頃で、皆さん手回し計算機でやってたの。3 桁出ればいから僕は計算尺でやってた。

三原：計算尺で 3 桁。すごいな。

杉山：それで、豊田通商から売ってたんだよ。ひずみゲージは商品になったの。

三原：それって元々はトヨタの車のどこかに使うっていう開発依頼があるとかじゃないんですか。

杉山：そうじゃなかった。豊田中研は車の方向のみを見た研究をやるんじゃないで、次の 10 年以上将来のことをやるんだから、それぞれの先端技術をやれという、そういうことで中研を作った。それぞれの会社にもあるでしょ、研究部とか、研究所とか。トヨタ自動車にも大きい研究所があるからそこで車のことをやってるんですよ。豊田中研はそうじゃなくて、先端技術をキャッチアップしてかつオリジナルをやれと。次のネタをどこかのトヨタグループの会社がやりたいときに、そのネタをちゃんと提供できるようにするための先行投資をするということですね。

三原：その時に何でひずみゲージだったんですか。

杉山：石田退三（元トヨタ自動車の社長・会長・相談役）さんという人がやっぱり今言ったような思想で中央研究所を作って、そのときに半導体をやらなきゃいかんと。半導体ということで、五十嵐さんは、あの江崎玲於奈さんとお友達になったんだよ。

全員：えーっ（大歓声）、すごい。

杉山：ぼくは時々ホテルで江崎さんに会ったことがありました。江崎さんは忘れたかもしれないけど。



安藤 妙子 先生

三原：じゃあまだまだ半導体をやっている人たちっていうのは先進的で、すごかったんですね。

杉山：江崎玲於奈さんは東京通信工業だったか、今のソニーの前身ね。そこでは半導体はメインでやっていてね。だから結晶なんかは貰ったりしました。五十嵐さんはその半導体ひずみゲージをひとつのきっかけとしてね、シーズとしてやり出して、まあそういう意味では機械と電気の両方をコンバインするためのキーですよ。

三原：半導体センサっていうのはその頃からイメージされたわけですね。

杉山：僕が入った 1965 年頃、ひずみゲージの応用として圧力センサはすでにやっていたから。自分が大学に通ってる最中くらいに拡散型圧力センサ、集積化圧力センサをたった 3 人でやり出したわけね。

安藤：3 人だけだったんですか。

杉山：名大から来た人がリーダーで僕ともう一人の技術員がついてね。小さい拡散炉だったな。

三原：2 インチくらいですね。

杉山：そうそうそう。それで 2 インチより小さい自分たちで引き上げた縦型の四角い基板を入れてました。パターンは自分たちで描くんですが、ようやくゼロックスの機械が出始めたから、例えばまず墨を入れて描く。ゼロックスで何枚も同じの写せるでしょ。それを B 紙にペタペタ貼って。あなたたち B 紙って知ってる？

横川・洞出・安藤：わかります。

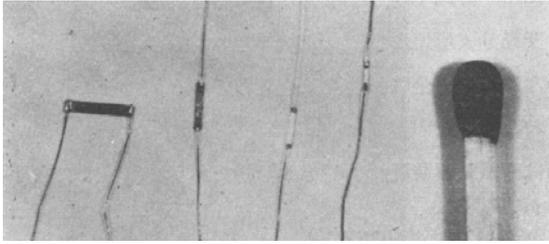
杉山：大きい用紙に貼って、白黒ははっきりコントラストつけて、ちょっと薄くなったところはマジックで塗って、それを置いて写真をパチッと撮るわけ。ガラス乾板で写真を撮ると、これがフォトマスクでしょ。フォトマスクも自分たちで作って、スピナーも作りましたよ。僕がモーターを買ってきて。

三原：そこまで手作りされていたんですね。

杉山：だって買うとすると 50 万 100 万ですよ。あの頃、コロナが 50 万だったから。

安藤：車と同じ値段だった時代ですか。

杉山：工作工場で作ってもらったアルミの板に穴や枠を開けて真空引きできるようにして、スピナーで、まずは注射器でレジストを滴下・塗布。乾燥機も自分たちで作ってピ



ひずみゲージ。シリコン単結晶に Al 電極を設け、金線リードを熱圧着あるいは超音波ボンディングした。

ーンと遠心で飛ばして、みんな手作りですよ。装置も売っていたけど高いんですよ。

三原：高かったですよね。

杉山：研究費があまりないからね。でもちゃんとひずみゲージができて、圧力センサができて、ダイヤフラムは、あの頃アルカリエッチングがまだそんなに普及してなかったから、ワックスを塗って顔を出してるところをフッ硝酸でエッチングした。それで圧力センサを作って、僕が大学を出たとき計測自動制御学会が名城大学でありましたから発表に行きましたよ。卒研の先生に会って「今こんなことをやっていて、こういう発表します」と報告しました。僕はまだ 22, 23 歳で大学出たばかりのとき。その頃の発表って想像つきますか？

三原：スライドじゃないですか？

杉山：スライドは高級だから。医学の先生方は使っていたけど、僕たちは B0 か B1 のポスターサイズ用の紙に、わり半紙で耳を貼って。バーがあって釘があってバサッとやる。自分たちでマジックで書いて、そうやって発表しました。

三原：紙芝居のようですね。

洞出・安藤：なるほど。

三原：我々のときは最初からスライドでした。次に OHP になって最後にパソコン。スライドはそれなりに大変で、ロットリングしてね。暗室でカシャンと撮って。ちょっとでも修正があると、最初から撮り直しになって。

杉山：そのうちにスライド作成機ができてね。ゼロックスみたいに。でもそれは白黒だったから、青いのが良いと言うと印刷室に頼んでね。ロットリングで描いて、それをカメラで 1 枚ずつ撮ってもらってネガにしてね。それで発表した。それが 1980 年くらいまでかな。80 年過ぎからは OHP が出て、OHP が 20 年近く続きますね。その後はプロジェクタが出たからね。プロジェクタも高かったな。

安藤：最初は 50 万くらいでしたね。

杉山：今は 10 万切ったりする時代になったけどね。その時代が真空管から、トランジスタ、IC になるのと同じくらいかな。

三原：杉山先生のお話って言うのは本当に半導体の初期をたどってますね。江刺先生とも絡みますけど。

杉山：それでね、会社では半導体センサをやるって言うプロジェクトでお金が出たわけね。さっきのエアブレイシ

ブはあまりにも遅い。たくさん削っちゃって取率悪いということ。それから「IC、半導体トランジスタのチップを切るのは今スクライバーでやってるから、豊田中研でも導入するべきだ」って言って、スクライバーを導入した。東京精密に見に行ったりして機種決めてね。スクライバー導入しても、どう切っても綺麗に切れなくて。結局は劈開面が重要でね、110 面でやらないといけないわけで、111 面がどこかに出てくると斜めになっちゃう。

三原：ガラス切りですよ。

杉山：スクライバー入れたときは大変効率上がったんだけど。ひずみゲージも。短冊まで作って切ってボンディングした後でバラバラとやる時代が終わって。その後ダイサができた。さっき言ったディスクがね。あの頃は第一製砥所っていったの。製砥って砥石のことね。京都でしょ。

三原：そうです。京都です。

杉山：どういうものですかって京都まで見に来た。それでやっとダイサが入るようになって楽になったんだけどね。

安藤：最先端を目指しながら、新しい機器を模索しながら、そういう機械があったら良いなって考えながら進められてきたんですね。

三原：結局、半導体製造装置っていうのはすごく高かったんですよ。スピコートが車一台分という話があったけど。その当時はドルも 300 円くらいだったし。ほとんどの半導体製造装置はアメリカとか欧州で作ったものだから、どんなに小さなものでもすごく高いわけ。本気でやるというのは、日立とか東芝とか大企業しかできなかったんですよ。

横川：なるほど。

■ ゲージ率を自動で計測する装置を自分で開発

杉山：話は戻るんだけど、ひずみゲージでは、僕は毎日毎日ね、おもりをねじで掛けていたわけ。大学に行っていた最中に毎日それをやっているから大変でね。それも恒温恒湿の部屋だから風邪引いちゃうしね。寒いからセーター着てやってたんだけど。上役に僕は「これを自動化したい」と言ったら。「ああ良いじゃない、君やったらいい」ということで、自動化を自分でやらなきゃいけなくなった。自分で図面を描いて工作工場へ持って行って、「こんなできない」と言われながらモーターを探して、その頃は高かったギア付きモーターも買ってもらう。その頃サイリスタが出たの。それも双方向サイリスタ。

三原：トライアックですね。

杉山：そのトライアックを使ってマイクロスイッチで、こちらになったらポン、止まってこちらに来たらポンとやりました。それとデジタルボルトメーターを頼んで買ってもらう。これもやっぱりカラー一台分の値段なの。

三原：そうですよ。50 万くらいしましたよね。

杉山：昔の 1 ドル 360 円くらいの頃の 50 万だから。それでデジタルボルトメーターを入れると、私がひたすらゴロゴロやってた作業を簡単な計算でできるようにして自動にし

たの。スイッチをポンって入れると、最初の抵抗さえ合わせればあとはバーでひずみがみんなわかるから、ひずみの値を入れていけば計算がすぐできるわけです。

三原：それって今のいわゆるアジレントやヒューレットパッカートの計算機みたいなものを使うわけではないんですね。

杉山：そこまではいかないけど、最初の抵抗値だけカチャカチャと入れると電圧が出てくるんですよ。

三原：なるほど。計算式を入れておいて。

杉山：それとゲージ率をね。それで抵抗値と定電流を流すと電圧になるでしょ。偏差分だけ電圧が出るようにして。最初はカチャカチャカチャとやった抵抗に電流を流すと電圧になるでしょ。次の変化した電圧の差をとってやる。それで直読で感度が出てくるやつを作ったんですよ。そうしたらそれを、豊田工機さん（現（株）ジェイテクト）が買ってくれた。中研でずっとやってられないから、ひずみゲージの生産工程をトヨタ系の会社に移して。五十嵐さんが「杉山、これ特許とったらどうか」って言っていたけど、僕はそれまで特許の取り方を知らなかった。要するに最初の発明はそれだったんですよ。

三原：「ひずみ自動計測装置、評価装置」でしょうか。

杉山：「ゲージ率測定装置」

安藤：私たちは集積化された圧力センサとか、その業績を見ているわけですけど、その前でその装置を作るところから始めたのですね。

杉山：その後、次のエポックメイキングというイベントは、さっき言った拡散型圧力センサでしたね。集積化型圧力センサはひずみゲージが4つ集積化されているんですよ。

三原：その時はキャビティはあったのですか。キャビティって概念はなかったんですか。

杉山：キャビティはないからエッチングで減らしました。金属に付けると温度特性が悪いからということで、結晶化ガラスまたはセラミックスですよ。シリコンと線膨張係数がほぼ一緒の $2\sim 3 \times 10^{-6}$ くらいの。それをセラミックス屋さんやガラス屋さんが作ってくれるようになって、そのガラスの上に低融点ガラスでくっつけて、キャビティを持つるものに真空にしてくっつけると絶対圧が計れる。

三原：だからひずみゲージはシリコンで、ホイートストンブリッジ用に4個作って、それをガラスのマウントの上に乗せているんですよね。上に載せて熱膨張係数を合わせて、そこでマウントというかガラス接合する。

杉山：我々の基本型がそれで出来ていた。

三原：陽極接合は使ったんですか？

杉山：その後だね。その前は接着剤だったけど、真空を保つためには低融点ガラスを使った。その後でもっと精度よくバインダーレスで付けられるって言うことで陽極接合になった。その頃はコーニングのガラスが一番ポピュラーだったんですが、それでなくても、さっき言った結晶ガラスに付くということでやってたんです。それで絶対圧が計れ



それまでは自動車用の圧力センサっていうのはまだ風が吹いてなかった。それまでは工業用っていうことで、プラント用の圧力センサだった。

と言うひとつ流れがあったんですが、それと同じ頃にアメリカのカリフォルニアで排ガス規制が始まったわけですよ。1970年代の頭からね。

安藤：ああ、そうでしたね。

杉山：そのマスキー法案って言う排ガス規制が始まって、何年以後に生産した車に関してはNOXが何パーセントじゃなきゃいかんという規制が輸入車にも与えられて、日本から輸出できなくなるという話でした。今で言う環境問題ですが、その頃はアメリカが先導していて自動車に対する排ガスの規制ができて、当時の日本は排気ガスがすごく問題になった。それまでは自動車用の圧力センサっていうのはまだ風が吹いてなかったの。それまでは工業用っていうことで、プラント用の圧力センサだった。

安藤：だからほんとに当時はトヨタと関係なくやってたわけですか。

三原：ですよ。

杉山：だから豊田工機さんが、例えば新日鉄さんのプラントの圧力を調べるための圧力伝送器ってあるでしょ、それを供給しました。製品として売っていて、我々の拡散型圧力センサはそこにに入れて売ってた。それから例えば“もんじゅ”のナトリウムの圧力を調べるからできないかっていう話もあったけど。

■ 半導体圧力センサが主流に。そしてMEMS登場

三原：ちなみにその頃にはいわゆる半導体ではない圧力センサっていうのはあったんですか。

杉山：あった、あった。長野計器、それから大倉電気。横河もやってた。

三原：そのころは金属のダイヤフラムですね。

杉山：かつ電磁型とか静電型とかで、大きいですよ。半導体をやったのはうちだけかな。大倉さんも途中からバルクのひずみゲージを使いながらやっていましたね。

安藤：五十嵐さんが半導体ひずみゲージをやっていた頃は、まだ貼り合わせのセンサで、杉山先生がやられた頃にやっ

と拡散が出てきたのですね。

杉山：それも五十嵐さんがやれってということで始めたんだけど。だから工業用が先でした。他に電磁トランス型だとか静電型とかもあったんですけど、半導体型は応答が速いんですよ。それと小型にできる。それでだんだん使い勝手が良いと評判をもらったんですね。

日本電電公社さんの茨城中研で開発した、電話通信用地下ケーブルの監視システム。

三原：ですよね。だからもともと圧力センサを作ったというのはそれをチェックするために。

杉山：そうそう。それをチェックするのは絶対圧じゃなきゃ駄目で、それを最初にやったのは豊田中研なんですよ。茨城中研まで機械を担いで行った覚えがあります。それで1年間で100個テストして1個も駄目にらずにクリアしたんですよ。それを大倉電気さんとかフジクラさんが今メインでやっていることですよ。昔圧力センサがなかったときは、どこか故障したら、封入してある窒素ガスの漏れを調べた。

三原：窒素を計測したんですか。

杉山：窒素が漏れるっていうことは、そこで道路が陥没したとか、あるいは何か事故があったわけですよ。だからそこを探しに行く方法としては、ケーブルのバルブのところにインレットを開けて、300 mか500 mに1カ所ずつある水銀柱で圧力を測って、グラフを書いて、ああここが漏れてると当たりを付けて掘るとだいたい合ってるの。

全員：はーはー。

杉山：そんなことやってると大変だから、電電公社のプロジェクトで、センサと一緒に埋め込むことになった。そうすると電話局・支局の中でメーターを見れば、どこが故障しているか、事故があったかわかる。

三原：すごい。初期のテレセンシングというか。

杉山：だからそれがネットワークセンシングですよ。我々が初めてかどうかは知らないけど、それを頼まれて開発して、絶対圧計で達成した。小型じゃなければいけないということもあって、そういうところで使われていたんですけど、自動車の風が吹いたのがさっき言ったマスクー法案というか排ガス規制がアメリカで始まって、日本車にも適用されるようになって、これは大変だということで、自動車メーカーが一斉にやり出したの。その時のトヨタ自動車は半導体型というのは頭になかったわけ。なぜかという半導体は温度に弱い。それからシリコンはダイヤモンドが割れそうとか言ってるね。そしたらモトローラ、デルコ・エレクトロニクス、フェアチャイルドセミコンダクターとかTIが、半導体圧力センサをやっぱりやり出したの。そういうニュースがあって半導体が良いかもしれんという話があってね。そうはいつでもエンジニアは機械屋さんだから半導体はちょっと心配ということでメインストリームじゃなくて、3人くらいで最初やっていたわけ。エンジン吸気圧計を。それで圧力センサを作って持って行って、ちょっとこういう不具合があったとか聞いて色々行ったり来たり、

何月何日までに間に合わせないと次の実験に採用してもらえないと、徹夜して作って持って行ったりね。その頃デンソーもまだ圧力センサはやってなかった。

そうしたらね、さっき言った電磁型だとか静電型だとかいいうのと比べて、こっちの半導体の方が小さいのね。それで並べてテストをやったら、まあまあ行けるんじゃないかということになった。

三原：そう意味ではすごい貢献ですね、豊田中研のMEMSに対する健闘って。

杉山：ええ、それでこれができるという見込みができた。当然、我々の力だけじゃなくて、黒船ですよ。外国から条件が出てきて、外国でもコストの問題で半導体センサをやっていると聞いて。今までのブルドン管型、電磁型だとか、結構コストが掛かるんですよ。作るのに人手が掛かって機械も大変で。半導体型としたら、今のトランジスタや集積回路のラインで流せる。大量生産でチップ1個が将来的には10円や20円くらいになるという見込みがあるでしょ。その他の要素としては、自動車の電子化でマイクロプロセッサを車に乗せるっていう機運がありましたね。排ガス規制は電子式の燃料噴射システムでなきゃクリアできない。キャブレターだと駄目だからといって電子式でやるとマイクロプロセッサが入るから、半導体のセンサの方が相性が良い。要はエレクトロニクスの設計者が馴染んでいるということですね。それがやっぱり全体の電子化の流れですね。今までの機械式のセンサより馴染みやすいっていうことがあった。要は全体のシステムで見ると半導体でうまくマッチングできるということで、その流れがあったんでしょう。最も大きなモチベーションはやっぱりコストだと思いますよ。

絶対圧型の圧力センサも、ガラス接合で封じればできるでしょ。電磁型だとかは溶接したりとかまだまだ信頼性がないうとかコストが上がるということで。接合技術も半導体の実装技術が進んでいたから、それで対応できる。デンソーが独自で判断したのかトヨタからの要求で判断したのか別ですが、量産するという決定をしたから、我々の技術がそこに採用されるということで。

三原：それはだいたい何年ですか。

杉山：1980年。

三原：1980年くらいですか。そういう意味では自動車のセンサの電子化っていうのは割と遅かった。遅いっていうのは失礼かもしれないけど。

杉山：でも1970年の後半よ。そんなもんですよ。それで80年になって、私達の出した特許が採用されて、それで作ったセンサが、実際の車に載ったんですよ。だから私も新車を買っちゃってね。あの頃、カローラとスプリンターについたの。電子式燃料噴射システムがね。そこに圧力センサがついたの。それでその車を買って、家族にこれは自分が開発したやつだと言って。その頃はまだセンサが見えたの。今は見えないけど。

三原：なるほど。これがそうだと見ることもできたんです

ね。

安藤：半導体の圧力センサが 1960 年くらいで発表されて、MEMS の登場が 1988 年くらいで。ギアとか。

杉山：1987 年ね。

安藤：ギアが 1987 年でモーターが 1988 年でしたね。この 20 年の間に何があったか全く知らなかったんですけど、今の話でやっぱり色々な変遷などあったんだとわかります。

杉山：私も MEMS という言葉を知らずにね、圧力センサが（車に）載った。それで僕はせっかく半導体で作るんだから小型化も一生懸命考えて。ダイヤフラムが 1 mm とか 2 mm とか 3 mm とか大きいのでウェハで数百個しか採れない。半導体でやってるんだからトランジスタと同じくらいの大きさのセンサを作らなきゃいかんと思ったんだね。そうしたら色々あって IC 化もやろうということで、2 人でやったかな。それが成功したからメンバーが増えたんだけど。

まずバイポーラのオペアンプをシリコン圧力センサの中に載せようということで、それが 1982 年。それで 1983 年の Transducers に行つて発表したんですね。英語もしゃべれなくて、わからなくてね、発表したらわーって皆さんからの質問にあつて。座長が休憩にするから休憩中に聞いてくださいということで。それで黒板に絵を描いて、あまり僕が丁寧に説明するから、「杉山さん、そんな丁寧に説明しなくてもいい」って。

僕はそのとき初めてで。1983 年にヨーロッパのデルフトであつたんですよ。デルフトで Transducers の第 2 回だったかな。その時に行ったんですよ。そのときに発表を初めてさせてもらってヨーロッパ行ったらいいなあと思いがながら、外国旅行ってこんな心地いいのかつて。

横川：それに味を占めて？

杉山：そうそう。私が海外に発表しに行っているのは、やっぱり外国を見たいからですね。論文を出して。

三原：先生、そうすると人生 MEMS そのものですね。センサそのもの。

杉山：それは先人がいてね。やってみたらということで「はいはい」とやってみて。

安藤：それでも先生はやっぱり日本で最初に MEMS をやった一人ですね。

杉山：MEMS の話に戻ると、僕は半導体の拡散型圧力センサは MEMS じゃないと思ってたわけ。1983 年に集積化を発表した後、1986 年かな。85 年くらいからセンサのグループの若手の技術員がエッチングしたら「杉山さん、ちょっと失敗しちゃった」っていうわけ。見たらピンホールがあいている。その頃はアルカリエッチングだったから、裏のダイヤフラムをエッチングすると、ピンホールがあるところにエッチングのピットができるよね。よく見ると、一個の小さい穴が開いてる、ゴミがついたか何かで穴が開いて、そこからエッチング液が入っちゃうでしょ。我々あの頃はエッチングに強いからと窒化膜を使ってたわけ。そうすると窒化膜が残って下のシリコンだけエッチングされて

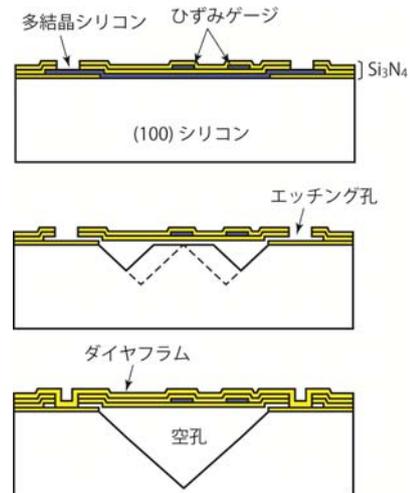


図1 犠牲層エッチングと異方性エッチングを組み合わせた表面型圧力センサの作製プロセス

いるわけで、きれいにピラミッド型のピットができているのを見て、失敗したって言うけど、これ面白いんじゃないかっていうことで、それで表面型圧力センサっていうアイデアが出てきた。

安藤：それでさらに小型化に。

杉山：そう、1 個のトランジスタと同じ大きさで作りたい、数十 μm 以下にしたいということで、これならやれるんじゃないかと思って、ダイヤフラムを取り敢えずは窒化膜で作って、ひずみゲージをポリシリコンで作ろうと p 型拡散して作った。けど真ん中に穴が開いてると圧力が漏れちゃうよね。そこで基板に最終的にエッチングでピラミッドを作る側に穴を開けて、一番下にポリシリコンを引くわけ。四角で作るから端っこ四ヶ所に窒化膜の窓を開けた。開けた窓からアルカリエッチング液が入ると、ポリシリコンを等方性エッチしていくわけ。ポリシリコンが導火線みたいになって、そのうちにシリコン基板が出てそこが今度は異方性エッチされる。(図 1 参照)

三原：犠牲層エッチと異方性エッチの組み合わせですね。

杉山：その通りで、犠牲層エッチで導火線を作ってシリコンの顔を出したところは異方性エッチング。こんな封じてるところにエッチング液が入るんかっていうと入るんですよ。ギャップが 2 μm しかないんですけど。ポリシリコンを 2 μm にして 2 μm のギャップを作って。2 μm の幅で数十 μm の穴しか開いてないから 4 個の口をプラズマ CVD で低圧中で封じると中が真空になる。1986 年に世界で一番小さい 40 μm の圧力センサを作って持って行ったんですよ。で MEMS なんていう言葉は知らなかったですね。1986 年かな、ロサンゼルスで IEDM のセンサのセッションがあつて、ウイスコンシン大学の H. Guckel 先生が、丸形でポリシリコンのダイヤフラムで作ったわけ。あの頃はお互いに何の情報もないけど、こう同じ時期に表面型で圧力センサを作っていたのね。



Transducers が1987年に日本の品川であったときに MEMS という言葉が出てきて、じゃあ、僕は MEMS をやってたんじゃなかったね。

三原：あの頃はそうですね。単独でやりましたからね。

杉山：その H. Guckel 先生とはその時からずっと仲良くしていただいた。それから H. Guckel 先生とはもう一つ共通点があって、あの頃 LIGA をやっていた僕も LIGA をやっていたから、ずっと一緒だね。そういう意味では仲良くずっとやりましたよ。

それで圧力センサの話に戻るけど、ピラミッドを逆に作って、ウェハを完全封止して、窒化膜にポリシリコンをつけて圧力センサ作って。でも小型化してどうするのって言う話があった。というのは小さく作ってもパッドがあるからセンサにすると数百 μm になっちゃうわけでしょ。だからやっぱり IC の中で一緒に使うんだということでアレイを作ったの。あの頃は 1000 個以上ほしいと思って、 32×32 の 1024 個の圧力センサアレイを MOS プロセスの中で作って完成しましたけどね。

Transducers が 1987 年に日本の品川であったときに MEMS という言葉が出てきて、じゃあ、僕は MEMS をやってたんじゃなかったね。僕は 1986 年に超小型圧力センサ作って IDEM で発表した帰りに、UC バークレーの R. S. Muller 先生に手紙を書いて、ロサンゼルスに行くから研究室訪問させてくれて言ったら OK で、そうしたらそこで、今でも出てくるリンク機構ってあるでしょ。歯車みたいなやつと引っかけのやつ、あれを見せてくれてね。えーってなって。わたしは機械的なメカニズムを半導体で作ろうなんていう発想はなかったわけ。でも彼らは積極的に IC の材料を使ってリンク機構とか歯車とか作ってるわけよ。

三原：だけどそれは杉山先生の方が遙かに実用的な。R. S. Muller 先生の歯車と違ってね、あれはもうほとんど使えない。。。。

杉山：それで彼らの話を聞いたらモーターを作っていると。まだ回っていないって話で MIT とバークレーとで競争をやっていた。

安藤：その後その学生が色々広がっていったんですね。

杉山：まあ、目から鱗でしたよ。使える使えないじゃなくて、機械的要素を作ったのが。

三原：そうですね。だから新しい概念だね、やっぱりバル

ーンを上げるっていう。

杉山：その時かその前か。K. Petersen の “Silicon as a mechanical material” という IEEE プロシーディングスの 30 ページか 40 ページの論文を見ていて、そうか、こういう発想もあるかってね。それから少し MEMS っぽいことをやりだしたの。次にやったことは、ダイヤフラムができるから、その上にジャンクションを作って赤外線センサを作ろうということで、でもその時は SOI ウェハがなかったから、ポリシリコンでジャンクションを作って、それで赤外線センサアレイを作ったの。まあ一応動いたけどあまり会社の方では反響がなかった。

安藤：当時はまだそうだったんですね。今だったら飛びつくと思いますが。

三原：ちょっと早すぎたんですね。

杉山：木股先生もその頃から赤外線センサをやっていたね。我々も赤外線センサを発表しましたが、感度がまだまだ低かった。ただ、ポリシリコンを単結晶にすれば解決するけど。88 年くらいまでやって、その後は会社の中で組織作りをやったの。MEMS という風が吹いてブームが来て、せつかく集積化技術があるからセンサを小さくするというで、センサは集積化の方向だったから、MOS とコンパインするというで、1989 年かな。

三原：早かったんですね。

杉山：その頃、会社の中に $0.5 \mu\text{m}$ の MOS ラインを入れたんですよ。

三原：何のために MOS ラインを作ったんですか。

杉山：その頃、トヨタ自動車はまだ半導体をやっていない頃で、先駆けとして。それで MOS ラインとバイポーラライン、それからパワートランジスタラインを入れて、あの頃はちょうど先端が $0.5 \mu\text{m}$ だったから $0.5 \mu\text{m}$ のラインを入れるということでトヨタ自動車まで何回もお願いに行って。

三原：その頃の $0.5 \mu\text{m}$ ラインって最先端ですよ。エミッタサイズが $0.5 \mu\text{m}$ っていうのはね。スーパーコンピュータでやっと思いたくはない。

杉山：それが入ったのが 1990 年くらいかな。だから $0.5 \mu\text{m}$ で集積化 MEMS をやれる環境を作ったんですよ。ちょうどよかったのは豊田中研がその頃長久手に移転したの。

安藤：もともとは違ったんですか。

杉山：今の豊田工大のキャンパスが豊田中研だった。

三原：そうだったんですか。

杉山：そこから 10 倍くらい大きいところに移ったの。最初の頃は従業員 100 人くらいしかいなかったですよ。今は 1000 人いるからね。

座談会「杉山先生を囲んで（後編）」に続く

* 電気学会 センサ・マイクロマシン部門誌 2016 年 10 月号をご覧ください。