

第2章

工学研究の100年

1942（昭和17）年に作成された理研創立25周年記念映画の中で、大河内正敏所長は次のように語っている。「理化学研究所は、純正物理、純正化学を研究するのが目的であります。そうして同時にその応用方面、例えば医学、農学、工学等の研究をするのであります。」まさにこの言葉のとおり、理研における工学研究は、基礎科学と切れ目なくつながって発展してきたという伝統を持っている。そのため、工学の研究だけを取り出して述べるのは難しいのであるが、ここでは研究室や、領域に工学という名が付された研究を中心に取り上げて、その活動を見ていくことにする。

第1節 工学研究の半世紀

理研の工学研究は、1918（大正7）年に設立された大河内研究室から始まる流れが主流を成してきた。そしてよく知られているように、研究成果は理研コンツェルンを形作る企業群によって事業化され、わが国の産業の発展に大きく貢献した。しかし、第二次世界大戦の敗戦により大河内所長は辞任し、大河内研の流れを継いで1945（昭和20）年に大越研、福井研、大山研などが発足する。また、その前1940年には海老原研が立ち上がっている（第Ⅲ編資料「研究室の推移」を参照）。

それ以降の研究室の流れを辿ってみると、海老原研は機械計測、摩擦工学、表面界面工学を経て伊藤ナノ医工学研究室につながり、福井研は塑性加工、変形工学、素形材工学を経て大森素形材工学研につながっている。これらは機械系の研究室と言える。大山研は、化学工学の流れと、粉粒体工学、分離工学、武内ナノ物質工学の流れとに分かれ、化学系の研究室を形作ってきた。

一方、戦前の1923年に立ち上がった眞島研究室は、光弾性、光学計測、光工学、河田ナノフォトンクス研究室につながる光学系研究を進めてきた。もう一つの流れが、1926年に発足した木下研究室で、半導体工学研から石橋極微デバイス工学へとつながる半導体をテーマとしてきた研究室である。比較的新しく立ち上がった分野が、1981年から始まったレーザー科学研究グループで、それが光量子工学研究領域の核を成している。

以上が大まかな研究室の流れであるが、1995（平成7）年近くから、新しい研究センターの発足などで、これまでずっと400人規模で推移していた理研の研究者の数が急激に増え始め、2005年には3000人近くと7倍近くになり、理研全体としてはバイオ系を中心に研究分野が広がった。また、社会の変化を受けて新しく環境、医療・健康、高齢社会、人工知能、ロボット、計算機シミュレーショ

ンなど新しい分野の課題が取り上げられ、工学研究課題を手掛ける研究者が理研全体に広がり、理研の工学研究の状況は様変わりした。

例えば2017年3月に、理研でエンジニアリング・ネットワーク・リトリートという集まりが開かれたが、そこに参加した研究者は57名に上り、それらの研究者は理研のほとんど全ての研究センターや領域に分散して所属している人たちで、科学と工学の境界、異なる研究分野間の境界が、ますますあいまいになってきたことを如実に示している。最初に引用した大河内所長の言葉が、ますます徹

Column

工学研究の源流

理研における工学研究の主流は、大河内正敏から始まった。『理研彙報』によると、大河内は「電解鐵」の研究を1921（大正10）年4月から着手しており、後に発展する薄鉄板の製造につながる研究も行っている。1922年5月1日現在の大河内研究室の構成は次のとおりである。

研究員	工学博士	大河内正敏
研究員	工学博士	眞島正市
嘱託	工学士	日比勝治
研究生		池田平次
研究生	工学士	中上川勇五郎
助手	工学士	花岡元吉
助手	工学士	橋本七良
助手		松井晋作
雇		秦龍人
雇		鵜飼三五郎
雇		鈴木万壽

大河内は、東京帝国大学造兵学科教授として、砲身等の材料の物性や機械的性質、機能特性等の基礎研究、材料加工法としての鑄造、電解、浸炭を進めており、理研においては、加えて、生産工学的研究を組み込み、基礎と応用の研究を進展させていった。それらは、①金属材料の物性とその応用、②金属材料の加工、とまとめることができる。

①の物性研究については、研究員の眞島正市が独立し（1923年-）、そこに移されていった。眞島研究室からは計測研究を主体とする辻二郎の研究室（1938年-）が生まれ、さらに、眞島研究室から分離した黒田正夫の研究室（1946年-）では、鉄鋼を中心とした基礎と応用の研究へと発展していった。

②は鑄造、切削ならびに塑性加工の基礎と応用の研究であり、鑄造は海老原敬吉の研究室（1940年-）により、今日の鑄造技術の開発につながっていく。

なお、財団理研時代のその他の工学の源流としては、木下正雄の研究室（1926年-）があり、ここから、半導体の研究を経てナノデバイスの研究へとつながっている。

底されてきたとも言えるだろう。

理研の工学研究の産業界への貢献について触れると、理研コンツェルンについては改めて言うまでもないが、戦後は、1960年代に始まった変形工学研究室の主導する「薄鋼板成形技術研究会」が極めて重要な役割を果たした。具体的には、日本の全ての鉄鋼、自動車メーカーを糾合して、大きな研究組織を形成し、日本の自動車車体成形技術の発展に決定的な貢献をしたのである。ここから日本の国産自動車産業の隆盛が始まったと言っても過言ではない。この流れからさらに、素材材工学研究室が主催する「板成形シミュレーション研究会」が生まれ、鉄鋼、自動車だけでなく、コンピュータなど31の大手企業を集めた組織によって、ものづくりのソフトウェア開発という大きな仕事が達成された。

研究成果の産業界への移転については、理研ベンチャー制度の導入が重要である。1996年にフォトダイナミクス研究センターの田代チームリーダーが戦後第1号の理研ベンチャー企業を設立してから、研究者によるベンチャーの立ち上げが次々と行われるようになった。また、産業界との融合的連携研究制度が始まると、その制度を使って既存企業への技術移転が活発に行われることになったのである。

〈金属加工〉

第2節 金属板材成形シミュレーションソフトウェアの開発研究

理研における自動車車体成形技術の研究は、第4章に詳述されているように、1960年代の初頭から福井伸二、吉田清太、中川威雄と歴代の主任研究員の主導のもとに、日本の全ての自動車メーカーと鉄鋼メーカーの参加する「薄鋼板成形技術研究会」において進められてきた。研究拠点としての理研には企業からの多くの研究生が集まり、当時、大型高炉の設置、新鋭圧延設備の駆動開始、オープンコイル焼鈍法の開始など鉄鋼メーカーで進む材料製造技術の進展と、大型トランスファープレスの導入、プレスラインの高速化、金型の大型化など自動車メーカーにおける成形設備の発展など、目覚ましい技術の変化に対応するために、活発な研究が積み重ねられてきた。そんな中、1960年代の後半にアメリカにおいて航空機や自動車など機械や構造物の設計を支援するためにCAD（Computer Aided Design、計算機支援設計）と計算機シミュレーション技術が開発され、1970年代初めにはそのための計算機ソフトウェアが市販された。

薄鋼板成形技術研究会で行っていた実験的手法に基づく研究では、新しい材料や新しい成形方法などが取り上げられるたびに、その特性をとらえるための実験を積み重ねることが必要となる。それは、技術が複雑になればなるほど大変な作業量になる。そんな中、これを計算機シミュレーションに置き換えれば、効率的に適切な成形方法・条件、望ましい材料特性などを決めることができるのではないか、という声が、この分野の技術者から聞かれるようになった。1970（昭和45）年から80年代にかけての、理研における薄鋼板成型技術研究会の活動は素

形材工学研究室が担っており、吉田主任研究員の下に、研究員として阿部邦雄、宮内邦雄、牧野内昭武、栗山慎峰、池浩、林央が、プレス成形域区分、成形性試験、塑性力学、トライボロジー、成形実験などの課題を担当して、企業からの研究者と協力しながら研究を行っていた。このうち牧野内が板材成形に生じる不具合を計算機シミュレーションで予測するという課題に興味を持った。板材成形を力学で扱おうとするならば、それは高度に非線形の現象であり、まだ連続体力学の基礎理論も確立していない分野であった。素形材工学研究室は1970年代後半からこの分野の研究を開始した。

そうこうしているうちに、1980年代末ごろから、フランス、ドイツ、アメリカなどに、国の予算で運営される強力な産学官連携の研究グループが発足し、金属板材成形過程シミュレーションを行うためのソフトウェアの開発が始まった。牧野内はこのままでは日本のソフトウェア開発が世界から置いてきぼりにされ、ひいては自動車車体成形の分野も後れを取ることにになりかねない、と危機感を募らせた。このころ、日本では、大阪大学の仲町英治助教授も3次元膜理論に基づくプレス加工解析のソフトウェア開発を進めていた。

そこで、牧野内は仲町助教授と相談し、理研が中心になって研究グループを組織することを計画して、理研や科学技術庁に予算獲得の交渉を行ったが、残念ながら理解を得ることができなかった。日本のものづくりは高度な技術を持った熟練技術者が支えており、シミュレーションなどなくても十分強いという意識が強かったことも背景にあった。

板成形シミュレーション研究会

牧野内は仲町助教授と組んで、企業に呼び掛けて研究会を設立し、企業からの資金で研究を進める計画を立てた。薄鋼板成形研究会が国の予算に頼らず、企業の予算で大きな研究を動かしていることが、その計画の後押しになった。素形材工学研究室の中川威雄主任研究員、佐田登志夫理研副理事長の強い支援が得られたことが非常に大きかった。

佐田副理事長のアドバイスで、研究会の年会費を1社200万円と決めた。何社が計画に乗ってくれるかまったく分からない状況であること、また本当に企業で使えるソフトウェアの開発ができるかどうかの見通しも立っていないことなど、不安材料だらけであったが、それでも、何も手を打たないで、外国の国を挙げての研究に負けるわけにはいかないという思いに押されて、企業からの資金を集めて最先端のソフトウェア開発を進める決意をした。

1989（平成元）年、理研に「板成形シミュレーション研究会」を発足させることの趣意書を作り、企業に呼びかけ始めた。研究会会長は牧野内、副会長 仲町、顧問 佐田、中川の体制を決めた。顧問二人が積極的に企業に声を掛けてくれて、1990年10月、素形材工学研究室の中に以下のメンバーが参加する研究会を発足させた。

鉄鋼：川崎製鉄、神戸製鋼、新日本製鐵、住友金属、日新製鋼、NKK
非鉄：スカイアルミニウム、住友軽金属、古河電工

自動車：いすゞ自動車、スズキ、中央精機、トヨタ自動車、日産自動車、日産車体、日野自動車、富士重工、プレス工業、マツダ、三菱自動車、ヤマハ発動機

プレス機械：コマツ

コンピュータ・ソフトウェア：日本IBM、日本ユニシス、日立製作所、富士通、日本HP、KGT、電通国際情報サービス

金型：アマダメトレックス

電機：三菱電機

大学：大阪大、東北大、電通大、東京農工大、琉球大

日本の大手の製造業が多数参加してくれたのは励みになった。背景には、板材成形シミュレーションが、自動車、鉄鋼だけでなく、コンピュータ、金型などさまざまな分野の企業にとって重要な技術であると認識されていたことがあった。

研究会の活動

研究拠点は理研素形材工学研究室に置かれた。開発担当者としては、参加企業からの出向者と外国人の研究者が中心であった。ワルシャワ工科大学教授だったマレク・カフカ博士が理研の定年制研究員となって、開発のリーダーとして精力的に開発を進める体制を敷いた。ポーランド、ポルトガル、フランス、中国などから多数の研究者が参加する国際的なグループとなった。

企業メンバーに対しては、年に4回、2日間ずつの会合を持ち、開発担当者からの基礎理論の講義、アルゴリズムに関する検討内容や開発の進捗状況の報告、国外の研究グループの動きの紹介などを行い、開発すべきソフトウェアの機能などに関する討論がなされた。会合には毎回100人以上のメンバーが参加した。この会合は、非線形有限要素法や成形シミュレーションに関して高度な知識を持つ技術者の養成に貢献した。

開発したソフトウェア

開発プログラムはITAS3D（3次元の板成形：ITA Seikeiのイニシアルをとったもの）と名付けた。研究の範囲は、変分原理の時間積分法、弾塑性構成式の定式、工具と材料の刻々と変わる接触・摩擦条件の扱いなど、基礎的な問題から、それに基づく高度に非線形な問題を解くための計算機アルゴリズムの検討、開発したソフトウェアの検証まで、多くの課題に及んだ。

ITAS3Dの特徴は、時間積分に静的陽解法と命名したオリジナルな手法を開発したことで、これにより、解の分岐や接触の不連続が起こる時点で確実に増分ステップが切られるため、計算精度が非常に高く、板成形で予測が難しいと言われたしわの発生やスプリングバック（プレス後のはね戻り）などの予測が可能となった。その反面、計算時間がかかるのが問題であった。

このソフトウェアの開発にあたっては、厳しい国際的な競争にさらされているという現実があった。

国際活動

世界で行われている板成形シミュレーション研究に関する情報交換と、開発されたソフトウェアの国際的な評価を行うことを目指して、板成形シミュレーションに関する国際会議NUMISHEETを発足させた。会議の設立者は、牧野内（理研）、仲町（大阪大学）、オニャーテ（E. Onate、カタルニア大学）、ワゴナー（R. H. Wagoner、オハイオ州立大学）の4名である。第1回会議は、1993年に日本の伊勢原で開催した。

会議の目玉は、会議主催者が課題を設定して、世界中のソフトウェア開発者にその課題を解いてもらい、どのソフトウェアが一番実際の現象に近い答えを出すかを競う「ベンチマークテスト」であった。いわば、ソフトウェア機能比較オリンピックといった催しである。このベンチマークテストには世界中から23の研究グループがそれぞれのソフトウェアを携えて参加した。

この機能オリンピックの結果がどうなったかであるが、実はソフトウェアの優劣を付けることができなかった。なぜなら、比較すべき正解としての実験結果が一つに定まらなかったからである。実験も世界中のグループに参加してもらった。主催者から参加者に統一された材料と潤滑剤を送り、工具条件、実験条件を細かく指示したにもかかわらず、集まった実験結果が大きくばらついてしまったのである。すなわち、現実に行っている複雑な現象を実験で正確に捉えることの難しさを思い知らされたベンチマークテストであった。

第2回のNUMISHEETは3年後の1996年にアメリカで開かれ、さらに17のソフトウェアが新しく参加し、2回のベンチマークテストに参加したソフトウェアは全部で31本となった。

以降、NUMISHEET国際会議は3年おきにアジア、北米、ヨーロッパの持ち回りで開催され、2016年現在も続いている。

板成形シミュレーション研究会終了後の活動

1996年、ITAS3Dは企業で実際に行われている板材成形過程を高精度でシミュレーションできるという機能を達成し、研究会会員に完成したバージョンを配布して研究会は終了した。同時に、理研としての研究も終了した。

ITAS3Dは世界的にも計算が安定であることや計算精度が高いことなど最先端の機能を持つソフトウェアであったが、それを使いこなすためのいわゆるプリプロセッサ、ポストプロセッサ、CADとのつなぎ、材料データベースなどは研究の中に含まれなかったため、「研究ソフトウェア」の域を出ていないというのが実情であった。いわば頭脳だけで手足を持たないものであった。

そのため、このソフトウェアを使う企業は、自社で周囲のソフトウェアをそろえなくてはならない。そのためITAS3Dを実用に使うことにした企業はあまり多くなかった。ちょうどこのころ、プリ・ポスト、CADとの連携機能を備えた、使い勝手の良い欧米のソフトウェアが商品として急激に普及し始めたのであった。

理研ベンチャーの設立

このままではせっかく開発したソフトウェアが死んでしまうと危惧し、1998年に理研ベンチャー制度が発足したのを機に、牧野内は企業を興すことを決意した。開発されたソフトウェアを商品化し、製造業に広く普及させることを目的に、1999年4月に（株）先端力学シミュレーション研究所（ASTOM R&D）を設立したのである。

3人で始めたベンチャー企業は、2017年現在、従業員60名となり、製造業の工程設計の現場などで使う各種ソフトウェアに範囲を広げ、多くの企業の現場で使われるソフトウェアの開発販売など、活発な活動を展開している。ASTOMによりITAS3Dの製造現場への導入は順調に進み、例えば従業員1300人規模の中堅自動車ホイールメーカーの例を挙げると、金型開発のためのトライ回数が導入前の6分の1、開発期間が2分の1、開発コストが3分の1になるというように大きな成果を上げている。ASTOMの社長は最初から、事業経験を持つ理研外の方をお願いしており、初代社長は小倉璋、次いで大崎俊彦、安藤知明、そして現在は常木優克と次々若い社長にバトンタッチしながら、健全な経営を続けている。

なお、金属プレス成形の解析法およびシミュレーションソフトウェアの開発で、牧野内は2005年に紫綬褒章を受章した。

第3節 VCADシステム研究

板成形シミュレーション研究会の成果を引き継ぐ形で、2001（平成13）年4月に「ものづくり情報技術統合化研究プログラム」が発足し、5年後の2006年4月には「VCADシステム研究プログラム」と名称を変え、さらに5年間続くこととなった。この研究は国の予算によるものである。「VCAD」とはボリュームCADの略で、3次元物体の内部情報を扱う設計・製造支援技術であることを意味する。ものづくり情報技術統合化研究プログラムの立ち上げについては^{88年史}の467ページにいきさつが詳しく書かれているので繰り返さない。ここでは発足にあたって意図したことについて補足しておく。

ものづくり情報技術統合化研究プログラムが立ち上がったのは、日本のものづくり現場における情報化の遅れが、各方面から指摘されるようになったという社会的な状況があり、一方で理研におけるITAS3Dソフトウェアの開発実績と、そこから生まれたベンチャー企業の先端力学シミュレーション研究所によりソフトウェアが商品化され、産業に貢献したことが評価されたという背景がある。われわれは、ITAS3Dの開発を通じて、ものづくりの現場で使われているソフトウェアの現状について多くのことを学んだ。その中で特に重要な問題点を挙げれば次の2点である。

- (1)製造業で使われている計算機支援ツールは、ばらばらのデータ構造を持ったソフトウェア群を無理やりつなげたものであるために、ソフトウェア相互のつながりが悪く、形状を計測したデータがCADに受け渡せないなど、

システムとして十分に機能していないこと

- (2)製造業で扱う材料や製品の内部は均一ではなく複雑な構造や欠陥を持っているが、それらをきちんと扱えるツールがないこと

また、ものづくりのツールとして普及させるソフトウェアの開発にあたっては、以下のことを構想の段階からしっかりと考慮することが極めて大切であることも学んだ。

- (3)研究ソフトウェアでは生き残れない

- (4)知的所有権の確保は絶対要件

- (5)商品化には研究開発以上の費用が掛かる

- (6)ソフトウェア普及のための戦略をはっきり立てる必要がある。公開ソフトにするのか、最初から商品を目指すのか

当時日本で、大学や研究所の研究者が研究目的で開発したソフトウェアを広く普及させた例がほとんど無かったために手本となるケースが無く、(3)から(6)までの普及戦略は欧米の例を参考に手探りで進めることとなった。

要件(4)については、開発されたソフトウェアの著作権は全て理研が持つこととし、参加する研究者に納得してもらった。(3)と(5)に関しては、最初からプロジェクトの中にソフトウェアの普及を担当するチームを作り、共に開発を担ってくれる企業との関係を築くこと、あるいは自分たちで事業化を目指すベンチャーを立ち上げ育てることを積極的に推進した。また広い範囲の企業や理研外の研究者、技術者に呼び掛けてユーザーの立場でソフトウェアを育ててもらうことも開始した。そのための組織として、開発企業、ベンチャー企業、ユーザー企業、理研内外の研究者が集まって情報交換をする組織として「VCADシステム研究会」を発足させた。この、VCADシステム研究会がソフトウェアの普及に関して重要な役割を担うのであるが、その具体的な内容については後に述べる。

要件(6)については、全てのソフトウェアを公開することとし、ダウンロードサイトからインターネットを通じて自由にダウンロードして使うことができる仕組みを構築した。すなわち、われわれの戦略は、公開ソフトウェアとして興味を持つ人には自由に使ってもらうバージョンを提供し、ものづくりの現場で、日常業務に使うためには、使い勝手の良い、商品化バージョンを提供するという2本立てにするというものであった。

目指したシステム

上記要件(1)、(2)を考慮し、ものづくりの「もの」を扱うデータ形式に、3次元の形状情報だけでなく物体内部の構造や物性情報を持たせることとし、それをVCADモデル（ボリュームCADモデル）とよび、設計・製造を扱う情報技術の中心に据えるという構想を中心に、ものづくり分野を支援するため次のようなシステムを開発することを研究の目的とした。

- (a)個別ばらばらの要素技術の寄せ集めではない、設計、測定、モデリング、シミュレーション、可視化、加工などの機能が統合されたシステムであること

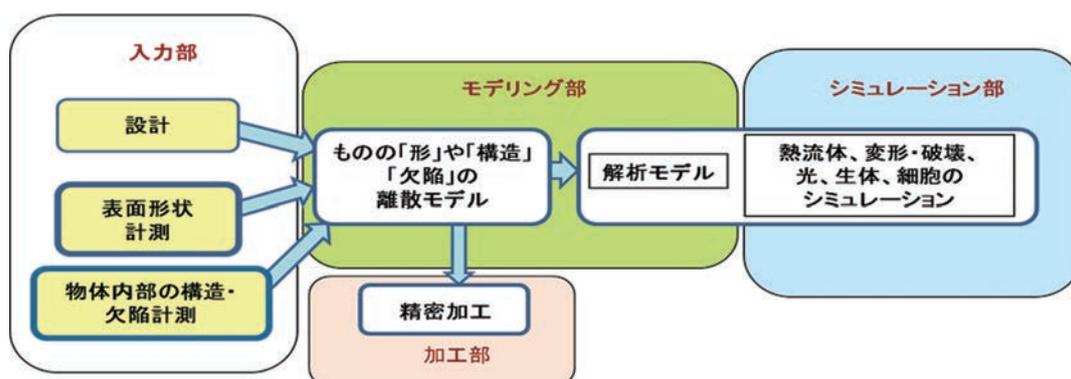


図1 VCADシステム図

(b)ものの形だけでなく、内部の複雑な構造や不均一な物性、欠陥まで扱えること

ものの内部の構造を扱うことを掲げているシステムであるため、理研で大きな研究分野となり始めていた生物科学の研究者から、ぜひ生物を扱うことも考慮してほしいという要望が出された。生物は細胞、臓器、神経、筋・骨格など極めて複雑な内部構造を持つ。そのためプログラムの後半からは、ものづくりだけでなく生物科学分野も対象とすることとした。

システム全体は、図1のように、入力部、モデリング部、シミュレーション部、加工部からなり、それぞれの部が目的に応じた個別の機能を持つソフトウェア群から構成されており、それらのソフトウェアがつながってシステムをつくる構造になっている。

開発チーム

システムの開発にあたったチーム数は、プログラムの最初の5年は5チーム、後半の5年は生物系のチームを二つ増やして7チーム、研究者数約50名であった。

プログラムディレクターは牧野内昭武が努め、後半の七つのチームの名称と、チームリーダーは以下のとおりである。

VCADモデリングチーム	加瀬究
機能情報シミュレーションチーム	小野謙二
加工成形シミュレーションチーム	Cristian Teodosiu
加工応用チーム	山形豊
普及推進チーム	須長秀行
生物基盤ツール構築チーム	横田秀夫
細胞シミュレーションチーム	安達泰治

開発したシステム

膨大なシステムであるため、ここではその一部について述べる。まず「入力部」であるが、ものを、外部の形状だけでなく内部の構造や欠陥を含め、計測によってデータとして計算機の中に取り込むことが求められる。そのためのツール

として、新しく3次元内部構造顕微鏡（横田）が開発され、また小型中性子装置の開発（山形、大竹淑恵）が実施され、新しいイメージング技術が誕生した。「モデリング部」を担うのはV-Catソフトウェア（横田）で、計測されたノイズの多い点群データから構造および物性を抽出し、3次元構造・形状モデル、物性分布モデルを生成し、可視化する。本システムにおけるモデリング部は構造データだけでなく、設計データ、表面形状計測データなど性質の異なるデータを統合して扱う役割も任されており、そのためのモデリング手法として、KittaCube（加瀬）、長田パッチ（長田隆）、陰関数表現（大竹豊）など、オリジナルな構造・形状表現法が開発された。「シミュレーション部」はその構造・形状モデルに、解析用のメッシュを生成し、各種のシミュレーションを実施する。具体的には複雑な物体内部の情報を考慮して3次元非線形変形・破壊を解析するソフトウェアシステム（Teodosiu）、複雑な構造の中を流れる流体の高速モデリングを可能とするボクセルベースの熱流体シミュレーションシステム（小野）、非球面レンズなどの超精密光学素子の設計、製造を支援するためのソフトウェアシステム（山形）、アクチン細胞骨格構造システムの力学と生化学の相互作用をモデル化する細胞力学シミュレーションシステム（安達）など、大変広い範囲の課題を扱うソフトウェアシステムが開発された。

開発ソフトウェアはダウンロードサイト上に全て公開されており、インターネットを通じ自由に使うことができる。2011年3月のプログラム終了時点でVCADシステムは47本のソフトウェア群からなっており、目的に応じて必要な機能のソフトウェアをつなげ、組み合わせて、課題の解決に使用できる。

一つ例を挙げると、内部に介在物や、空隙などの構造を持つ金属材料の変形強

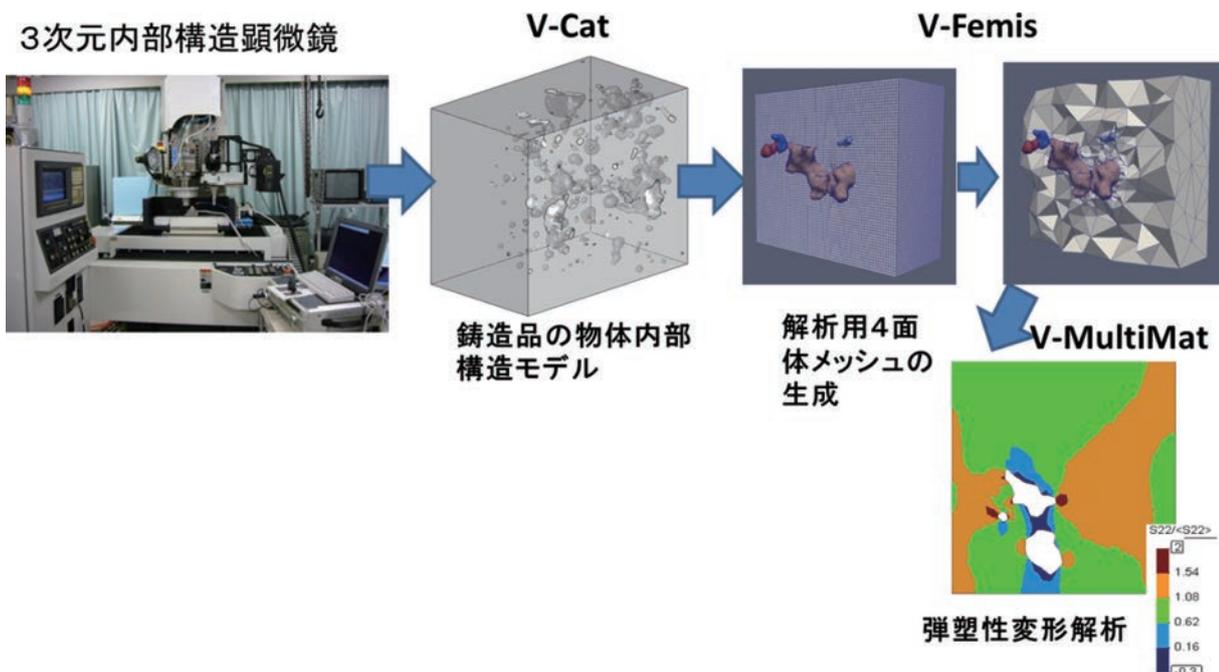


図2 内部に構造を持つ物体の変形解析

度をシミュレーションで評価するには、図2のように、複数のソフトウェア、V-Cat、V-Femis、V-MultiMatをつなげて使用する。この図で解析の出発点となる3次元内部構造顕微鏡は物体内部の色情報を持った点群データを採用ことができ、その点群データを3次元構造モデルにするのがV-Catであり、構造を持った物体の内部の境界を考慮した構造解析メッシュを切るのがV-Femisで、そのメッシュを用いてV-MultiMatで物体に力を加えた時の大変形弾塑性解析を行える。

公開ソフトウェア

VCADシステム研究プログラムが終了した後も、VCADシステムの公開ダウンロードサイトはソフトウェアの公開を続けており、VCADシステム研究プログラム終了後6年になる2017年7月現在も1カ月で4000人を超える訪問者がある、専門技術分野としては人気のサイトになっており、累計では1万6000本のソフトウェアがダウンロードされている。

NPO法人VCADシステム研究会

2002年11月に、理研外の企業や個人を対象にVCADシステムの普及を図るための任意団体組織として、VCADシステム研究会を立ち上げた。この研究会は2011年に理研のプログラムが終了してからは、自立したNPO法人となり、2017年現在も、年3回の全体会合と、特定の課題について研究を実施するための「分科会」を中心に活発に活動を続けており、三和田靖彦（トヨタ自動車／理研）が会長を務めている。

会員は法人会員と個人会員、賛助会員からなり、大企業から、中小企業、ベンチャー企業、大学や、公的な研究機関の研究者などさまざまな会員が集まるユニークな会となっている。2017年現在、法人会員37社、個人会員49名、賛助会員17名と、多くの会員で構成されている。

プログラム終了後の活動

このように、理研のVCADシステム研究プログラム終了後も、研究成果をもとにしたソフトウェアの商品化や、理研ベンチャーの立ち上げが進み、VCADシステム研究から発した理研内の研究チームがさらに新しい研究分野を切り開く活動を行っている。それらを挙げると次のとおりである。

(1)ソフトウェアの商品化

(a)ポリゴンエンジニアリングソフトウェア POLYGONALmeister

日本ユニシス・エクセリションズ（株）。理研の担当研究者：横田秀夫

(b)腹腔鏡手術シミュレータ・ソフトウェアシステム Lap PASS

三菱プレジジョン（株）。理研の担当研究者：横田

(2)新しい理研ベンチャー企業

理研ベンチャー企業として、

(a)（株）先端力学シミュレーション研究所（ASTOM）

を立ち上げたことを第1節で述べたが、VCADシステム研究の成果を企業化する目的で、さらに二つのベンチャー企業が設立された。

(b) (株) トライアルパーク

代表取締役：鈴木正敏。理研の担当研究者：須長秀行、高村正人

(c) インテグレーションテクノロジー (株)

代表取締役社長：船田浩良。理研の担当研究者：山形豊

(3) 理研におけるVCADシステム研究を引き継ぐ新しい研究チーム

量子工学研究領域内の次の3チームが、VCADシステム研究の研究課題を引き継ぎ、新しい研究へ発展させる役割を担っている。

(a) 画像情報処理研究チーム。チームリーダー：横田

(b) 先端光学素子研究チーム。チームリーダー：山形

(c) 中性子ビーム技術開発チーム。チームリーダー：大竹淑恵

また、産業界との融合的連携研究制度を利用して、企業と理研が一体となった融合連携3チームが、産業連携本部イノベーション推進センター内に設置された。VCADシステム研究の成果をより迅速に実用化へつなげて、社会的課題を解決すべく、研究開発を推進する役割を担っている。

(d) 計測情報処理研究チーム。

提案企業：日本ユニシス・エクセリューションズ (株)

チームリーダー：谷本茂樹 (提案企業所属)

副チームリーダー：横田 (理研)

研究実施期間：2012年4月-2017年3月

(e) ボクセル情報処理システム研究チーム。

提案企業：日本ユニシス・エクセリューションズ (株)

チームリーダー：松林毅 (提案企業所属)

副チームリーダー：横田 (理研)

研究実施期間：2017年4月-2022年3月

(f) ガラス成形・シミュレーション研究チーム。

提案企業：インテグレーションテクノロジー (株)

チームリーダー：石山英二 (提案先企業)

副チームリーダー：山形 (理研)

研究実施期間：2017年4月-2022年3月

VCADシステム研究を始めるにあたって、ソフトウェアの普及戦略を定めた
が、その戦略は実を結んで、理研のプロジェクトが終了してからも、上記のよう
に商品化を担当する二つの既存企業と、三つの理研ベンチャー企業が活動を続け
ており、理研から自立し研究成果を発展させて社会に届けることが可能となっ
ている。三つのベンチャーの従業員の数を総計すると約95人を数え、それなりに
充実した規模といえる。また、NPO法人VCADシステム研究会では多くの企業
や、大学、理研の研究者との交流が活発に続いており、理研における三つの研究
チームおよび三つの融合連携チームの活動や理研内の産業連携に関するバトン
ゾーン制度とも呼応して、VCADシステム研究から始まった研究の流れは、着

実に広がりを見せている。

第4節 超精密鏡面研削技術ELID

素形材工学の伝統

理研における加工技術の研究は、塑性加工研、変形工学研、素形材工学研と名前を変えながら継承されてきた。戦後、大河内研（大河内正敏所長）の後継の一つとして生まれた福井研（福井伸二主任研究員）がその出発である。すでに述べた薄鋼板成形技術は、この福井から吉田清太主任研究員という流れによって大河内となった。素形材工学はその後、中川威雄主任研究員、牧野内昭武主任研究員、大森整主任研究員と続いていった。

1987（昭和62）年、のちに伝統を引き継ぐ大森整は、中川の研究室で問題を抱えていた。中川は伝説の加工技術開発者で、大河内記念技術賞を二度も受賞している。プレス加工、粉末成形、砥粒加工、切削加工、型加工、複合材加工とその専門は広い。数百の課題に取り組み、実用化された技術は30件を下らないという。

当時の大森はまだ理研の職員ではなく、中川が兼務する東京大学生産技術研究所の大学院生だった。研究テーマは、切れ味の悪い砥石で、できるだけよい加工面を得ることであり、なかなかうまくいかなかった。

その砥石とは、鑄鉄繊維とダイヤモンド砥粒とを焼結させたものであったが、強靱すぎて、砥粒の刃先の目立て（ドレッシング）が困難を極めたのである。切れ味は悪いままで、少し削れるようになってもすぐに目潰れして削れなくなるという状況が続いた。そんなとき、若い大森の頭にひらめきが浮かんだ。

結合材の鑄鉄だけをうまく溶かし出すことができれば、ダイヤモンド砥粒だけが後に残り、よく削れる状態になる。砥粒だけを残すには、選択性を利用するという手がある。それは例えば電気分解で鑄鉄だけを溶出できれば、ダイヤモンドが露出して、バリバリと削れる理屈になる。

ELIDの誕生

大森のアイデアに協力して試作品作りを助けたのが、当時は技術部とよばれていた伝統ある理研工作部の高橋一郎技師であった。大森は「真夜中に鏡面研削ができたのは感動的でした」と『理研ニュース』（1992年10月号）に書き残している。

この画期的な研削法はELID（エリッド）と命名され、さまざまな産業分野で実用化されるとともに、理研と大森の名声を高めた技術である。ELIDは電解インプロセスドレッシングの英語から造語した名前で、電解によって（electrolytic）、作業中に（in-process）、目立て作業をする（dressing）という意味である。

ただし、発明発見から2年間の研究により、ELIDの作用機構は大森が当初考えたものではないことが明らかになった。電解で結合材が単純に溶出されてダイ

ヤモンド砥粒が次々と突出してくるのではなかった。ある程度砥粒が突出すると、金属イオンが水酸化物や酸化物に化学変化し、砥石表面に不動態被膜ができる。これによって、電解溶出速度が低下するのである。そうでなければ、結合材はどんどん溶け出してしまうはずだ。

これは一種の自動制御と言える。加工が進んで被膜が薄くなって剥がれると、その分だけ新たに電解が進んで砥粒が突出し、削り機能が高まる。その繰り返しというわけである。しかもこのELIDでは、砥粒によって被加工物の表面が削られる時に、延性モード加工という、塑性流動を主体とした加工現象が安定して得られることなども分かった。

実用化とその後の進化

ELID鏡面研削法は原理的に優れていたこともあり、早くも1988年から1989年にかけて製品化・実用化された。ELIDが優れていることは、その用途の広さからも明らかだった。セラミックス、超硬合金、サファイア、ガラスといった材料はもちろん、延性材料である焼結金属、ステンレス鋼、鉄鋼材、その他プラスチックまで研削可能だったのである。真っ先に採用した信越半導体、オリンパス、ミットヨ、日本ピラー、松下電工などの半導体、光学、測定機器、セラミックス部品などのメーカーを中心に普及が進んでいった。

1991（平成3）年には「ELID研削研究会」が設立されて約40の企業が参加したが、目的は、それまで伝統的な経験技術と見なされてきた砥粒加工技術、研削技術を、ハイテク用の革新技术へと変身させることであった。研究会の委員長には大森整が就任、主顧問に中川威雄、協力者に高橋一郎が名を連ねた。研究会メンバーとしてELIDをいち早く採用した工作機械メーカーには不二越などの企業があった。また、砥石や電源は新東ブレーター、富士ダイス、スタンレー電気が担当し、以後、商業的に供給されるようになった。

ELIDはその後も進化を続けた。1993年にはメタルレジン複合ボンドによる弾性砥石を使って凹凸差が平均で0.3nmという鏡面加工に成功した。この場合の結合材は、60-70%が金属で残りはプラスチックであった。この研究により、茨城大学の伊藤伸英教授（客員研究員）が博士学位を取得することとなった。そしてこれ以降、レンズやミラーなど光学部品の仕上げ工程には、こうした弾性砥石が主流になったという。この砥石を用いる加工機として「ヒカリオン」の開発にマルトーが協力した。砥石の研究はその後、茨城高等専門学校の長谷川勇治教授（客員研究員）の協力も得て、未利用植物をカーボンとして結合材に混合した砥石やラバーボンド砥石、後述するP-ELID法による新しい砥石の製作手法へとつながっていく。また、ELID用の砥石として特筆すべきであった鋳鉄ボンド砥石は、故刈込勝比古教授（当時 都立航空高等専門学校、客員研究員）によって、メカノケミカル作用を持つ酸化セリウムやシリカなどの砥粒や、アルミナなどの一般的な砥粒を用いた砥石が試作され、同程度の粒度のダイヤモンド砥石に比べ、平滑な鏡面を得ることに成功した。この流れは継承され、ガラスレンズなどの超平滑な鏡面創成に応用されている。

ELIDによる超精密な形状加工にも挑戦した。その原点となったのは、1994年、ナガセインテグレックス製の成形・平面研削盤にELIDを搭載して、ミラーの加工を行った実験であった。同社はいち早く油静圧軸受とガイドを採用した超精密研削盤を開発、製造していた。その後、砥石や加工対象物（ワーク）の位置を、ナノの精度で検出したり合わせたりできる超精密工作機械と、ELIDとを組み合わせる研究開発が本格化した。当時、国産品がほとんどなかったナノ精度加工機であったが、前述の不二越、ナガセインテグレックスに加え、東芝機械や、旧理研グループであった理研製鋼などの装置メーカーとの連携がスタートした。そしてコンピュータ制御により1nmの位置制御が可能となり、超精密多自由度のマシンを実現、複雑な形状を持つ非球面レンズの鏡面加工や回折格子の微細加工などに成功した。

2004年には実用的なデスクトップ型の小型ELID加工機の開発に成功した。これは、1997年に卓上フライス盤にELIDを搭載する基礎研究に着手したことにさかのぼる。1999年に上原嘉宏テクニカルサイエンティスト（当時）が着任すると、開発に拍車がかかり、さまざまな機能を持つデスクトップ加工機が誕生した。その後開発されたマイクロツール用デスクトップELID加工機により、例えば針の先端部分40 μm 長を1 μm 径に研削することが可能になった。その針はナノの表面精度を持つ。この機械は2010年に電源部もコンパクト化され、多くの民間企業や研究機関に納入された。ユーザーは光学部品、半導体、金型、自動車、医療産業と多彩である。デスクトップ加工機の開発には、IMAX（当時 池上精工）や前述のマルトーが主体的な役割を果たした。特にIMAXは、精密金型を主力とする企業母体を持ち、開発されたデスクトップ加工機やナガセインテグレックス製の超精密研削盤を駆使し、超精密金型、微細金型の製造事業にいち早く乗り出している。これと前後して、池上金型工業と連携して金型の自由曲面加工ツールによる「FreeDOM」工法も誕生し、ELID研削による金型の鏡面研削に関わる研究開発を進めた。

ELIDをカスタマイズして量産ラインに導入されたケースもある。2006年、大森らは富士重工（現在のSUBARU）と共同で、自動車エンジンのシリンダー内壁を磨くホーニングという装置にELIDを応用した。このELIDホーニング工法は品質の向上と作業時間の半減化に貢献した。

このような産業や研究の基本となる加工マシンや計測器の開発は、大正から昭和にかけて理研の第3代所長の大河内正敏や物理学部長の長岡半太郎が追い求めたものにほかならない。当時の理研工作部で製造された科学機器は、日本の研究機関や産業の技術開発基盤として、その屋台骨を支えたのである。

くしくも90年前、理研はエンジンの性能向上にピストンリングを通して重要な貢献を果たした。その流れが今日のリケン（旧理研ピストンリング）である。そして今日、昔よりはインパクトは小さいかもしれないが、シリンダー内壁の研磨技術という形で、再びエンジンの生産技術向上に重要な貢献を果たしたのである。

トライボロジーとの接点

研削や切削において、工作物を成果物として捉えると加工であることはもちろんであるが、工具を主体として捉えると摩擦摩耗（トライボロジー）との戦いとなり、加工とは近接した別の分野となる。つまり、どちらを主体として捉えるかによって、加工とトライボロジーのいずれかが表または裏の関係となる。これらを双方向の関係、つまりお互いのインタラクションにより成り立つ現象として理解して、加工の合理化に取り組む領域をトライボファブリケーションと命名した。この研究の契機となったのは、小野（加藤）照子研究員が基礎科学特別研究員として1998年に入所して以来、ELID研究にトライボロジーの概念を導入したことが始まりであった。同研究員との連携によって、研削における除去形態や加工歪の理解、摩擦摩耗に関わる現象のリアルタイム観察に取り組むこととなった。これらの手法は、茨城大学の伊藤伸英教授らとの連携により植物由来の素材を用いた砥石の開発や、ナノダイヤモンドを含有させることで研削時の摩擦低減を狙った一連の新しい砥石の開発の際に、適正な組成の洗い出しに寄与することとなった。ナノダイヤモンドを含有した砥石は、2008年、春日博テクニカルスタッフによってその効果が実証され、著しい加工面品質の改善に利用されることとなった。現在、上述のメタルレジソンド砥石と並んで、ナノダイヤモンド含有砥石は多くの加工に応用されることとなった。

表面改質加工

ELIDの応用は、表面や形の超精密加工にとどまらない。独自の着想と片平和俊専任研究員の協力により、大森は新しい表面改質加工法を創出した。少し前まで大森の研究室は、和光本所と板橋分所の二つの拠点に分かれて活動しており、それぞれの実験室の廊下には、ELIDによる鏡面加工されたサンプルが多数展示されていた。特に板橋分所は、戦前からの建物をそのまま活かして研究していたため、隙間風が入り込むという、けっして良い環境とは言えなかったが、定期的に見学会を催すと多くの技術者や研究者が訪れてくれていた。

ある時、何度か訪れたことのある見学者が「不思議ですね、ELIDで鏡面加工された金属サンプルはいつまでも錆びないですね」と語っていたことが気になった。そして、ELID研削により加工された金属表面は錆びにくくなっているのではないかとひらめいたのである。早速、表面分析を含めた研究に取り組むと、驚くべきことに、やはりELID研削によって加工された金属表面は改質されて、錆びにくくなっていたのである。

大森は引き続いて、ELID研削によって、加工面に特定の元素を拡散できることも突き止めた。こうした研究の流れから、ELIDによる表面の改質・加質という新たな加工法が創出されたのである。現在では、金型の耐久性や医療用部品の生体親和性の改善、あるいは撥水や親水性など表面機能を作り分ける方法として使われており、新たな応用分野の創出・展開も期待されている。一連の研究は、小茂鳥潤教授（慶應義塾大学、客員研究員）、水谷正義准教授（現 東北大学、当時 基礎科学特別研究員）らによる生体親和性を付与する加工研究やバイオイン

ターフェース研究、そして江面篤志主任（栃木県産業技術研究センター、客員技師）らによる医療部品開発への流れにつながっていった。

技術支援と分析・天文観測機器開発

一方で、大森らは、理研内外の多くの技術者、研究者のニーズを受け、放射光や加速器などの研究基盤施設や天文観測機器に必要な光学素子やセンサーの開発に取り組んできた。具体的には、ELID研削をキーテクノロジーとして、X線解析装置の開発や中性子光学、デジタルマイスターなどのいくつかのプロジェクトなどを契機として、研究機器や天文観測機器の心臓部品の超精密加工、ナノ精度加工に寄与・貢献してきた。こうした支援活動は、実質的なプロジェクトマネージャとして、当時、埼玉大学で博士学位を取得したばかりであった林偉民教授（現 群馬大学、当時 研究協力員）を起用して強力に推進された。同氏は、埼玉大学・河西敏雄教授の下で、異種材料の同時研磨の研究を進めてきた人物であったが、ニーズが寄せられるさまざまな光学素子開発において、自ら研磨試験にあたりるとともに、多くのプロジェクトの進捗を管理して屋台骨を支えることとなった。

大森らはさらに、ポリウムCADのデータを用いて、非球面加工を行うための専用CAMであるV-CAMを開発、また屈折率傾斜レンズなどの性能を予測するために、光線追跡ソフトV-OPTの開発を進めた。これらの研究開発プロジェクトも、林偉民教授や上原嘉宏テクニカルスタッフらの実行体制の下で進めることができた。これらの経験はその後、ナノ加工機におけるCAMデータの利用やピコ精度加工システムの構築に大いに役立つことになる。

基礎試験を求める企業の技術者から新素材や特殊素材が持ち込まれることもある。金允智テクニカルスタッフは、こうした要求にあたり、自身の加工スキルを駆使し、最良の鏡面仕上げを目指して、多くの加工事例を作ってきた。また、2014年には、超小型人工衛星搭載型の非球面レンズの超精密加工に成功し、ELID研削により作られたレンズとして宇宙に打ち上げられた最初の事例となった。この加工には根気が必要であり、精度を測りながら何度も修正を施す必要があった。その任には利根直樹テクニカルスタッフ（当時）が当たり、完成までやり遂げるに至った。

研究機器や天文観測機器の心臓部品の加工には、ELID研削以外にも、磁性（磁気粘性）流体研磨（MRF：アメリカのロチェスター大、QED社）や大阪大学の山内和人教授が実用化したEEMを組み合わせて、より高い精度を達成した例も多い。MRFについては、国村伸祐講師（現 東京理科大学、当時 基礎科学特別研究員）との連携によって、ポータブルタイプの蛍光X線分析装置に用いられる全反射ミラーの開発研究につながった（図3）。

さらに、超精密切削（ダイヤモンド切削）を、天文観測機器の開発に応用した代表的な事例として、超高エネルギー宇宙線観測を目的としたEUSO（Extreme Universe Space Observatory）用超精密フレネルレンズ、回折レンズの開発がある（図4）。この意義深い一連のレンズ開発に取り組むことになった契機は、

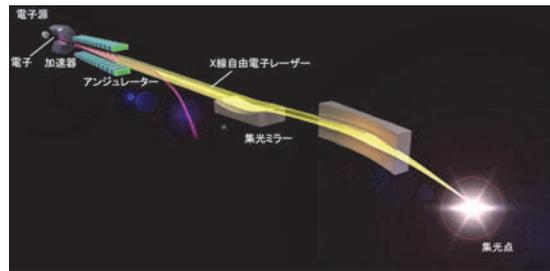


図3

ELIDと大阪大学のEEM加工法を組み合わせ、長さ400mmのXFEL集光鏡（左写真）を原子レベル精度で製作した。右図は集光鏡のシステム内での位置を示す。



図4 EUSOに使われるフレネルレンズ

ELID研削を主体とした超精密加工技術により実現。

1999年、アラバマ州立大学ハンツビル校の故高橋義幸教授とNASAの技術者の訪問を受けたことであった。当時、大森の研究室で作れる超精密フレネルレンズは、200mm程度が上限であった。しかしその後、2008年に超大型旋盤の運用によって、直径1.5mの超精密フレネルレンズの開発に成功、以後、戎崎計算宇宙物理研究室とEUSOチームとの連携によって、2m級のレンズ開発に対応できる環境とテクノロジーを構築することができた。この成功には、上原嘉宏テクニカルスタッフ、八須洋輔テクニカルスタッフ（当時）、そして戎崎計算宇宙物理研究室の滝澤慶之専任研究員らの貢献が大きい。

地上観測（TA-EUSO）用レンズ、気球飛翔（EUSO-Balloon、EUSO-SPB）用レンズの開発に成功し、気球観測実験が2014年8月と2017年4-5月に行われた。特に後者の実験は、超高圧成層圏気球（SPS：Super Pressure Balloon）にEUSOレンズを搭載して上空40kmに飛翔させ、超高エネルギー宇宙線の観測を目指す実験であった。今回初めての成功例となり、国際研究コミュニティに強いインパクトを与えるとともに、理研として宇宙線天文学の進歩に大きく貢献することとなった。

特殊加工への流れ

ELID研削の研究は、それを取り巻く周辺技術や、特殊加工との複合化によって、当初予期していなかった新風をもたらすこととなった。その一つは、梅津信二郎准教授（現 早稲田大学、当時 基礎科学特別研究員）と連携して進めた

P-ELID (Patterning with Electrostatically Injected Droplet) 法がある。これは除去加工ではないものの、偶然にも“ELID”と類似のタームとなった。この手法は、静電場で液滴を飛翔、次々に着床させることによって、微細なパターンニングを可能とするとともに、粘性の高い液体も配列、立体的に積層することが可能となった。同氏が大学院博士課程在籍時に考案した手法が元となっているが、同氏が大森の研究室に合流すると、配列させる対象物を大きく変更した。それは、生きた細胞であった。この手法は、数kVという電場で、液滴を飛翔させるものであり、生きた細胞をそのような場で操作することは、一見すると危険を伴うものと感じられた。ところが、静電場であることを考えると、細胞は無傷で飛翔し、生きたまま着床させることが可能であることが実証できた。この研究によって、細胞を生かしたまま、立体的に積層するというバイオプリンタの原理として利用できることが分かった。大森らは、この研究は将来再生医療に大きく貢献することは間違いないと確信した。また、2014年には、この研究論文がCIRP（国際生産工学アカデミー）に採択されるという快挙を成し遂げた。

もう一つは、噴射加工という特殊加工との連携であった。具体的には、ブラストやピーニングなどの加工である。亀山雄高准教授（現 東京都市大学、当時 協力研究員）が着任したのは、当初、技能継承にかかるプロジェクトを推進するためであった。このプロジェクトは、技能を可視化するとともに、テンプレートにまとめることで、若手技術者が技能を修得しやすくし、技能継承をスムーズにすることを意図したものであった。同氏は、この研究の傍ら、ピーニング加工に関する専門性を活かし、中国・四川地震で被災した学生の受け入れと研究指導に主体的な役割を果たした。その時、ブラスト処理によって一定の凹凸を持つ表面を形成、その上にDLC（ダイヤモンドライクカーボン）コーティングを施した後に、ELID研削により平坦化するというものであった。

この一連の加工によって、DLCコーティング膜は、素材表面と強固な密着力を付与することができ、さらにその表面はELID研削によって平坦化され、さまざまな用途展開を可能とするという発想であった。中国の学生の受け入れは短期間であったが、その後、同氏が東京都市大学へ異動後も共同研究が進められ、微粒子ピーニングの傾斜角を変化させることによって、被加工面に周期的な微細構造を効率よく生成できることを見いだした。また傾斜角を変えることによって、投射方向と、その垂直方向に周期構造を作り分けられることを見いだした。さらに、この方法によって作り出された周期構造の凸部のみをELID研削によって選択的に平坦化するというプラトー加工を施すことによって、トライボロジー特性を大きく改善できることを見いだした。

一連の方法によって作り出された表面構造は、今後、低摩擦・耐摩耗性を有する摺動材やアクチュエータの機構部品などへ応用することが期待されるとともに、ELID研削中に偶発的に起こった置換鍍金現象によって、窪み部にCuを析出することも可能となり、抗菌性などの機能を付与できることが期待される。このことから、医療用材料やバイオロジーの分野における機能性表面としても応用できる可能性がある。これらのいずれの研究も、基本的な現象に注目するとともに、

工学的な有用性を考え、ELID研削との組み合わせによって得られる効果に着目して進められたものであり、将来大きく発展する可能性のある機能性表面創成や再生医療分野など、多方面への応用が期待される成果として特筆される。

〈レーザー、光学〉

第5節 レーザー同位体分離

レーザーによるトリチウム濃縮に世界で初めて成功

1974（昭和49）年6月20日、東京丸の内の日本工業倶楽部で、伝説の会談が行われた。霜田光一（マイクロ波物理研究室）、難波進（半導体工学研究室）、中根良平（同位元素研究室）という当時の理研の主任研究員3人が話し合い、それぞれが指導的役割を果たしている分野に基づいて協力し合えば、「レーザーを用いた同位体分離」に取り組む新しいグループ研究ができる、という結論に達したのである。その後、理研、科学技術庁（当時）の賛同を得て、1976年より「レーザー科学研究」と称するプロジェクト研究が発足した（理研におけるその後の組織の発展形として、ここから任期制研究者による国際フロンティア研究システムが生まれ、さらにそこから、脳やゲノムなどの研究センターが誕生していった）。

トリチウム（三重水素）は水素の放射性同位体で、原子力施設の排水を経由してトリチウム水として環境に放出されるので、その濃縮回収が必要とされる。トリチウムの濃縮には、いくつかの在来法があるが、いずれも分離係数が低いため、巨大な装置が必要であった。そこで、原理的に分離係数を大きく取れるレーザー法が注目された（図5）。

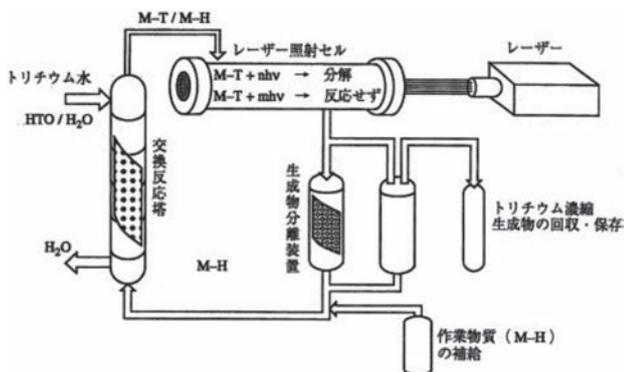


図5 レーザー法によるT/H分離プロセスの概念図

武内一夫らは、反応工学的な視点をレーザー同位体分離に導入し、何を測定すれば濃縮がで

きたことを証明できるか、さらに、この方法の分離係数の評価法を明らかにした。トリチウム化合物の振動数計算の結果、理研グループはトリフルオロメタンが有望な作業物質であることに気が付いた。後から分かったことであるが、アメリカのローレンス・リバモア国立研究所がまったく同じ物質にたどり着き、世界初のレーザー法による濃縮を目指していた。同研究所がトリチウム化トリフルオロメタンの赤外分光スペクトルのデータを公表するまで、理研の研究者たちはこの競争相手を知らなかったのである。

1980年に武内らは、このレーザー法をトリフルオロメタン系に適用して赤外多光子解離（IRMPD）とよばれる分解反応を用いると、トリチウム化したトリフルオロメタンが、軽水素化したトリフルオロメタンに比べ、選択的に分解することを見いだした。結果的に、武内らの理研グループはリバモア研より約1カ月先を進んでおり、世界初の濃縮に成功したことが明らかになった。後に武内らは、

この方法を改良することによって、分離係数が1万を超える結果を得ている。また、レーザー反応工学を適用して、連続攪拌槽列型反応装置を設計開発し、工業化の方向を明らかにした。

IRMPD法によるウラン同位体濃縮

原子番号92の元素ウランは、天然には、核分裂性のウラン235 (0.7%) とウラン238 (99.3%) の混合物として存在するが、現在日本を含む各国で発電に使用されている軽水炉とよばれる原子力発電所で燃料として利用するためには、ウラン235の濃度を3%程度まで高める必要がある。このウラン濃縮のために、ガス拡散法や遠心分離法などが採用されていた。しかし、こうした在来法の実分離係数は一概に低いため、一段階のプロセス (処理工程) では目的を達することができず、操作を重ねた巨大なプロセスにする必要があった。しかし、新しいレーザー法を用いれば、分離係数が大きく一段のコンパクトなプロセスによって目的を達することができる。そのため、国内外でレーザー法によるウラン濃縮プロセスの開発が競争となっていたのである。

レーザーを用いたウラン濃縮法を大別すると、高温の金属ウラン蒸気に多波長の色素レーザー光を照射して、U-235を選択的にイオン化して回収する方法 (原子法) と、6フッ化ウランにレーザー照射する方法 (分子法) になる。アメリカでは、原子法をローレンス・リバモア研究所が、分子法をエクソン社とロスアラモス研究所が担当した。後に日本では、電力各社が支援したLASER-Jとよばれる組織と日本原子力研究所が原子法を、一方、理研が分子法をそれぞれ開発し、両者ともにいずれ動燃に移管する、というスキームが考えられた。

分子法には、U-235を含む6フッ化ウラン分子を赤外レーザーで選択的に励起し、さらに紫外レーザーで分解して生成物の5フッ化ウラン粒子の中にU-235を濃縮するIR+UV法と、強力な赤外域のパルスレーザーによって誘起される赤外多光子解離 (IRMPD) 反応を用いる方法がある。次第に後者の優位性が知られるようになったので、理研では、もっぱらIRMPD法によってウラン濃縮研究を進めた。

分子法は従来から核燃料サイクル内で使われている6フッ化ウランを使う点が、腐食性の高温ウラン蒸気を使う原子法に比べて優れていることが分かっていたが、どれほどの分離係数が得られるかは、実験結果を待つほかはなかった。また、U-235を含む6フッ化ウラン分子を赤外多光子解離させるためには、強力な16 μm 域の赤外レーザーを開発する必要があった。そこで、理研では分子レーザー法研究開発室と、その中にレーザー開発チームと分離プロセスチームを設置して、研究開発を推進した。

分離係数は、6フッ化ウランガスを冷却することによって、向上させることができる。1985年から1987年に行われた原理実証研究においては、この方式の分子法によって、一段で十分高い分離係数が得られることが分かった。分子法研究開発推進室の活動は、わが国の原子力委員会において評価され、合格と判断されたので、引き続き、1988年度から1992 (平成4) 年度まで工学基礎研究が実施

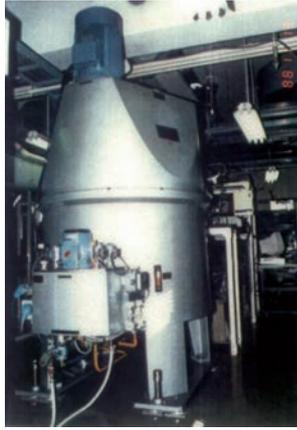


図6 ウラン同位体分離に用いた反応装置

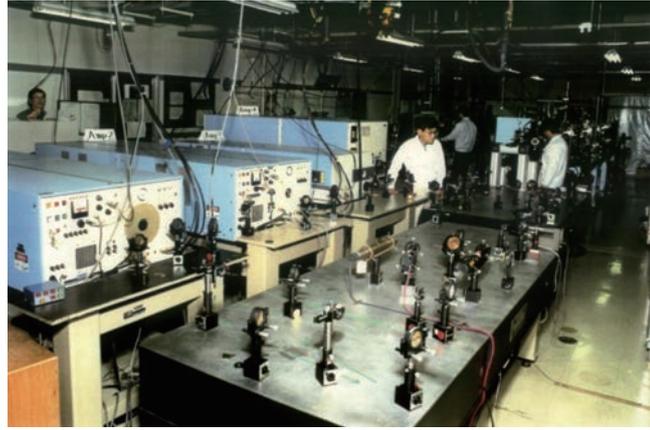


図7 ウラン同位体分離に用いたレーザーシステム

された。この工学基礎研究においては、最も効率的な励起法と照射条件について反応の最適化が実施され、 $16\mu\text{m}$ 域の励起用レーザーのスケールアップの可能性について工学的な検討が行われた（図6、図7）。

これらの成果は、順次、動燃事業団（現在の日本原子力研究開発機構）へ移管され、さらにスケールアップした分子法によるウラン濃縮の実用化の体制が進められた。理研では、分子法技術のいくつかの弱点を克服することを目指して、分子法のブレークスルー研究を行った。その中で、超音速ノズル内で 100K 以下に過冷却された6フッ化ウランガスが凝縮を始める機構を検討し、レーザー光を照射することによって、凝縮を意図的に阻害して、高い分子密度と低いガス温度において同位体分離が実行できることを示した（**88年史**230-237ページを参照）。

ところで、多光子解離の生成物である5フッ化ウランラジカルは、凝集して5フッ化ウランナノ粒子となる。このナノ粒子が生成するとき、イオンを添加すれば生成した粒子が大きくなり、補集プロセスの負担が軽減されることが分かった。この時のナノ粒子の計測技術は、後に武内ナノ物質工学研究室においてナノ粒子の計測装置DMA（Differential Mobility Analyzer）を開発するきっかけとなった。

第6節 ナノテクノロジー

ナノ粒子のサイズ測定技術を開発

同じ物質でも粒子を細かくしていくと、元の性質とまったく異なる性質が現れる。それが例えばナノ物性とよばれるもので、新規の機能や性質を持った物質の創製を目指し、世界中で研究が展開されている。こうしたナノテクノロジー分野の最重要課題として、粒子そのものの計測法が検討されてきた。なぜなら、ナノテクノロジーが進展し、新産業に結び付くには、その前提として、ナノスケールの測定技術が確立していなければならないからである。気体中のナノ粒子のサイズ測定法としては、電子顕微鏡観測、光散乱による測定などもあったが、現実的

には、微分型電気移動度測定装置（DMA：Differential Mobility Analyzer）を用いるよりほかはなかった。

この装置の原理は明快である。帯電（荷電）粒子を空間の静電場に置くと、力を受けて移動する。その電気移動度は、粒径と帯電数によって異なる。したがって、その違いを整合性よく利用すれば、粒径を求めることができる。それがDMAで、しかもこの方法であれば、同じ粒径のナノ粒子だけを集団として取り出すこともできる。つまり分級もできることになる。

しかし、従来のDMAでは、測定時の感度および安定性が悪く、10nm以下のナノ粒子の測定時のノイズを抑制して測定することができなかった。さらに、低圧での測定ができないことから、その場でのリアルタイム観測が困難であった。

安全・安心な環境の確保や自然環境の保護が一層強く認識される時代となり、自動車から排出されるナノ粒子の健康に与える影響なども指摘されるようになった。このような微粒子の測定技術は、DMAを用いる方法しかないとされているにもかかわらず、自動車排ガス中のナノ粒子測定等には、既存のDMAをそのまま使用することができない。

つまり、既存のDMAの問題点を解決し、より小さな粒子を高精度で測定し、自動車の加速・減速などの過渡現象にもリアルタイムで追従できる、応答速度の速い高性能なDMAの開発が強く望まれていたのである。

武内一夫らが開発・改良した高性能DMAは、従来の装置に比べて極めて高感度で安定性に優れ、従来は不可能であった低圧下等での測定を可能とするとともに、標準粒子（フラーレン）を用いて1nm粒子の計測を校正することもできる、高い信頼性および世界最高性能を誇るナノ粒子計測装置であった。

高感度検出器、流体力学的解析、標準粒子を利用した高性能DMAは、これまで測定できなかった低圧下での計測や、ナノテク製品の製造・品質管理で重要になる数nmオーダーの粒子、排ガスに含まれる有害なナノ粒子の計測など、幅広い分野で利用されている。（株）島津製作所との業務提携により、量産型高性能DMAの製品化も実現した（図8）。

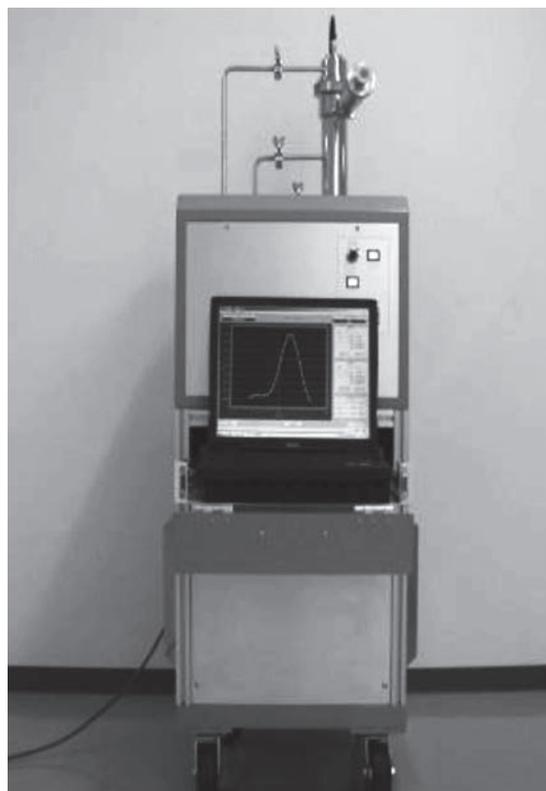


図8 ナノ粒子計測用DMA
（理研ベンチャーのワイコフ科学製造）

DMAの活躍分野

近年の技術発展に伴い、ナノマテリアルや製品等の製造過程や品質管理において、ナノ粒子の計測はますます重要となっている。一方で、大気中に浮遊するナノ粒子が人体に与える影響が指摘されており、粒径100nm程度以下のナノ粒子は、人体の細胞壁を通過して、血液によって身体中のいろいろな臓器に運ばれ、蓄積して身体に影響を及ぼす危険性が指摘されている。

このように、ナノ粒子を取り巻く正と負の両面から、ナノ粒子の計測技術の重要性が増してきており、高性能DMAは、その優れた性能を活かして、次のような多様な分野での利用を可能としている。

- 半導体、精密機械などの製造プロセスにおける粒子汚染、ナノマテリアルの製造プロセスにおける不純物混入のチェック
- ナノテク製品の材料機能を引き出すためのナノ粒子のサイズ選別、およびそれを利用したナノデバイス開発
- 水のナノ粒子を発生する機能を付加したエアコン、ヘアドライヤーなど電化製品の開発（パナソニック（株））
- 病院、原子力施設における気相中の有害なナノ粒子を測定する環境モニター、フィルターの開発
- 車の排ガス中のナノ粒子の測定、中国からの大気汚染物質の観測
- ナノ粒子の化学反応・物性、水のクラスター等に関する研究、基礎研究用装置（カミオカンデなど）の不純物管理

製品化など

ワイコフ科学（株）と（株）島津製作所は、高性能DMAをベースとし、自動車の排ガス中に含まれ、人体に悪影響を及ぼすと言われている100nm以下のナノ粒子の計測を主な目的とする環境測定用の量産型高性能DMAの製品化に関する業務提携を締結し、製品開発を進めた。

また、高性能DMAを発展させ、既存のDMAでは不可能であった自動車からの排ガスのような加速、減速等の過渡応答時におけるナノ粒子の排出挙動をオンラインで測定する「デュアル型DMA」を、（独）交通安全環境研および群馬大学と共同で開発した。

さらに、航空機等に搭載して、低圧である高層大気中の大気汚染等をその場でリアルタイムに計測するために、軽量でコンパクトであり、航空機特有の電圧に対応した「航空機搭載型DMA」も開発した。

高性能DMAは、数nmの粒子、低圧である高層気相中および排ガス中のナノ粒子を測定することを可能にするなど、測定の対象、範囲等を大きく広げ、新しい研究分野を開拓するとともに、生活環境の改善、製造効率の向上等の一助となっており、それ自体の改良も進められている。

第7節 機能性ナノマテリアル

近年、フラーレンやナノチューブなどのナノカーボンやナノ粒子に、さまざまな機能を賦与した機能性ナノマテリアルの開発が進み、材料科学分野において飛躍的な高機能化、多機能化、高性能化が実現しつつある。そうしたナノマテリアルを工業的に利用する際には、多種多様な物質との組み合わせによる複合化が前提となり、複合材料工学の観点からその分散構造（モルフォロジー）や界面を制

御する高度な技術が求められる。化学修飾などによって機能化されたナノマテリアル（機能性ナノマテリアル）は、材料の高機能化や耐久性向上などに寄与することができる。

フラーレン誘導体の応用とCFRPの高性能化

具体的には、田島右副らが1994（平成6）年に発見した光酸化誘起重縮合（Photo-induced Oxidation Polycondensation：POP）機構を用いると、フラーレン等を微量添加することで、ポリメタクリル酸エステルなどの汎用樹脂を光硬化することが可能となり、ポリイミドなどの耐熱性高分子に適応することで、高耐熱性の感光性樹脂などが開発可能となった。

また、近年盛んに開発が進められている有機薄膜太陽電池（OPV）では、機能性ナノマテリアルの一種であるフラーレン誘導体をp型半導体マトリックス中に適切に配置することによって、性能が飛躍的に改善される。そのため、本格的な実用化に向けて、高性能なフラーレン誘導体の製造コスト低減への努力が続けられている。田島らはフラーレン酸化物を原料とする独自の手法で、OPV用n型半導体として高性能化と低コスト化を両立可能なフラーレン誘導体の製造法を確立した。

先進複合材料の代表である炭素繊維強化樹脂（CFRP）の高性能化においては、田島らが開発した機能性ナノカーボンを利用することによって、炭素繊維／マトリックス樹脂間の界面付着力の強弱を制御する方法を見だし、CFRPの機械特性を向上させる技術を確立した。この技術によって、炭素／マトリックス樹脂の界面における剥離強度を従来技術に比べ2倍以上に向上させることができた。このCFRP改質技術は、高度な耐剥離性、耐久性が求められる次世代航空機のほか、原子力産業や風力発電への応用が、東レ（株）をはじめとする民間会社との共同研究を介して、検討されている。

ベンチャー設立、企業との連携

これらフラーレンを中心とした機能性ナノマテリアルの産業応用を促進するため、田島ユニットリーダー（当時）は2005年に理研ベンチャー認定企業FLOX（株）を設立し、代表取締役社長として自ら実用化研究に取り組んだ（2016年に社長を交代）。また、これまでに固有技術を駆使して企業や大学の技術開発支援を担い、原子力、エレクトロニクス、医薬・化粧品（最近流行の「まつげエクステ」にいたるまで）など、さまざまな産業分野に向けた機能性ナノマテリアルの開発とその応用に成功している。

さらに、2011年からは材料工学に機械工学や電子工学など異分野の技術を融合することにより、有機エレクトロニクス分野で国際競争力に優れた科学技術を創成するため、分野横断型の応用研究プロジェクト（社会基盤技術開発プログラム・有機光電子工学研究チーム）を設立し、有機ナノ結晶コロイドと静電噴霧堆積法による革新的なエレクトロニクス製造技術の開発を行っている。この技術は『日本経済新聞』（2014年2月18日の科学技術欄）で紹介され、化学、電気、機械、

印刷、などさまざまな業界からの問い合わせを受けている。

本プロジェクトで確立された技術を実際に社会還元するため、2012年1月、異業種の複数企業〔カルソニックカンセイ（株）、東レエンジニアリング（株）、（株）T&K TOKA、黒金化成（株）、（株）コアコンセプト・テクノロジー、FLOX（株）〕と埼玉大学および理研で構成される「新世代塗布型電子デバイス技術研究組合」が設立された。田島は、この組合の初代理事長として、産学公の垂直連携による研究開発モデルの推進にも取り組んでいる。

第8節 光応用計測——光弾性ホログラフィとスペckルによる計測

光弾性学の研究——光弾性研究室（1930-1967）

理研における光応用計測の研究をさかのぼると、光と画像を使って各種機械部品の計測を行い、検査の究極目的である動作確認を行った研究にまで行き着くであろう。最初に取り上げられたのは光弾性学であった。透明プラスチックで部品のモデルを作り、それに力や荷重を加えると、分子構造に生ずる異方性が複屈折を引き起こすので、その分布を示す縞模様から応力分布を求めるといった計測法であった。1937（昭和12）年に辻二郎主任研究員によって創設され、高感度の光弾性材料の開発、写真記録法の確立、高輝度の水銀灯光源を使った高速度映画記録による高速現象の解析など、世界的な成果が上げられた。

戦後、光弾性の研究は1956年に西田正孝主任研究員に引き継がれた。さまざまな光弾性モデルが高度な技術を用いて製作され、各種の荷重がかかった状態における応力集中や残留応力が解析され、実験力学の基本手法が確立された。機械部品や土木建築構造、さらには人の骨格まで、複雑な光弾性モデルが高度な技術によって製作され、図9に示すような光弾性縞が写真撮影されて入念に解析された。また、重要な課題であった主応力分離のための新しい手法として、光干渉法と組み合わせた新しい観測法が開発された。

光弾性学の研究はその後、計算機による画像処理やオプトエレクトロニクスを導入して進歩を続けたが、21世紀に入ると、以下に述べるホログラフィやスペckルによる変形測定法や、計算機による有限要素法を用いた応力解析の進歩によって、可視域では下火となった。



図9 フックの応力分布を示す光弾性縞

ホログラフィ、スペckル、モアレの研究——光学計測研究室（1967-1985）

1967年、斎藤弘義主任研究員は光弾性研究室を光学計測研究室として引き継いだ。斎藤主任研究員は、その直前に発明されたレーザー・ホログラフィを実験力学に初めて導入し、光弾性法に代わる新しい可能性を拓いていった。

そもそもホログラフィは、1948年にハンガリー人のガボール（Dennis Gabor、1971年ノーベル物理学賞受賞）が発明した技術であり、従来の写真法で記録される光の強さだけでなく、波面の形状に相当する位相分布を記録・再生できるところがポイントであった。これによって真の立体像が表示され、さらに物体の表面の形状や厚みの分布に関する光情報を記録して、後で取り出すことができるようになった（図10）。

光の干渉と回折を巧みに利用するホログラフィを実用化技術として実現させたのが、1960年に発明されたレーザーであった。レーザー光の優れた単色性と指向性、そしてレーダーにおけるマイクロ波信号の変調と復調の理論を転用した再生像の画質の改善が、ホログラフィ実用化のカギとなった。こうして1960年代前半にレーザー・ホログラフィが一気に開花した。

光弾性学と比較した時、ホログラフィの最大の特徴は、プラスチックで実物のモデルを作る必要なしに、機械部品や車両などの実物の変形や振動を完全に非接触測定できることにあった。この手法は「ホログラフィ干渉法」とよばれ、19世紀以来の光干渉計測がレンズや鏡面の形状にのみ適用されたのに対して、粗面の形状や変形を初めて光波長の感度で測定することを可能としたのであった。理研では、理論によりこの新しい手法の基礎付けがなされるとともに、応力測定や振動解析への適用が実験で探究されたのである。

山口一郎（元主任研究員）は1967年に理研に入所した。入ったのは和光研究所に開設されたばかりの新しい研究室であった。そこでは、暗室の整備から始まり、レーザー、光学定盤、レーザー電源、光電検出器などを、工作部の協力を受けながら次々と設置した。その後、中島俊典、谷田貝豊彦、中橋末三、伊藤雅英の諸氏が研究員として加わり、新分野を拓いていった。

〈a. ホログラフィ干渉法〉

ホログラフィ干渉法では試料の各点の動きを光波長の感度で検出することができる。しかも鏡面に限らず粗面の光干渉計測を実現し、実物を含むいろいろな対象について、それらの表面が外力や温度の変化によって受ける変位の分布を、非接触で計測できるようになった。しかし、光波長感度での粗面干渉計測は以前にはなかった新技術であり、実際に観察される縞模様の性質や解釈に多くの疑問点が見いだされた。

理研ではこれらの問題に対して、理論と実験の両面から取り組んだ。そして理論面では、粗面の不規則な

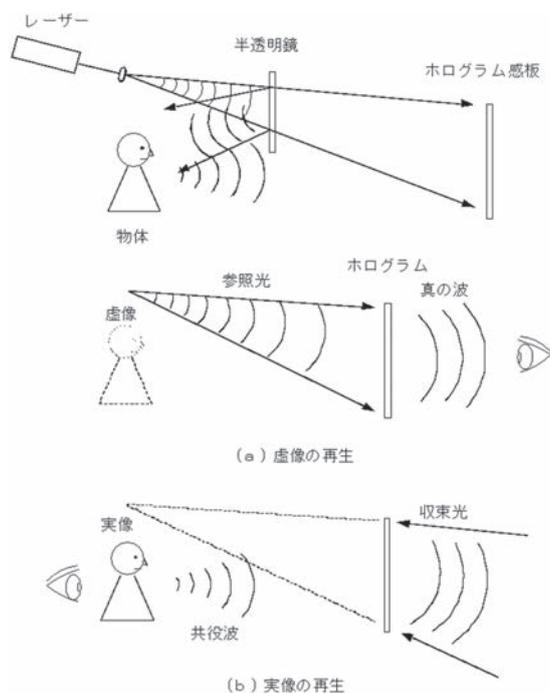


図10 ホログラムの記録 (a)、像再生 (b)

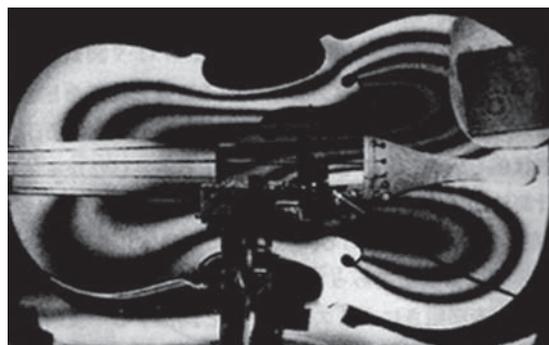


図11 ホログラフィ干渉法による振動モード

凹凸によって光の場に生じるランダムな変動に対して、相関関数を用いて解析することにより、見通しのよい理論を構築することができた。また実験では、ホログラフィ干渉法を用いて、音響機器、楽器、自動車の振動解析などが研究された。特に図11のように振動モードが非接触で可視化できるのは画期的で、産業界の注目を集めた。

〈b. レーザー・スペckル〉

ホログラフィによって粗面物体の3次元像が得られるようになったが、重大な障害として、新たにスペckルノイズの問題が生じた。これはレーザー光の干渉

性が高いために、粗面の各点で散乱された光が不規則な位相関係で干渉し合うために生じる不規則な斑点模様のものであり、ホログラムの再生像など、レーザー光で作られる画像の最大の敵となった。

理研では、その有効な抑制法を探索するため、スペckルの統計的な性質をフーリエ光学の手法を使って一般的に導き出すことに成功した。次に、この手法を拡張し、粗面の動きや変形によるスペckルの動的な性質の解析にも成功した。そして、スペckルがレーザーによって印付けされた粗面の明瞭なマークとなっていることが判明したのである。すなわち、粗面が変位や変形を受けると、明瞭なスペckルも3次元空間内の至る所で一緒に動くのである。その動き方は複雑であるが、この動きを検出することによって、粗面の変形を非接触で計測できることが明らかとなった(図12)。

スペckル模様の細かさは光学系によって自由に調節できるので、写真より解像力の低い光電撮像素子で記録し、得られる画像信号を計算機で処理することもできる。この特徴を利用して、1980年前後に実用化したマイコンと半導体撮像素子を組み合わせ、スペckル移動を検出する「スペckル相関法」とよぶ計測法が考案された。その一つであるスペckルひずみ計は、レーザー・ビームを当てた1点におけるひずみを、一切の加工も接触もせずに、測定できる(図13)。これによって、各種材料の弾性率や熱膨張係数の測定や生体の成長速度を容易に求めることができるようになった。

高解像力の写真記録から光学処理によって得られる粗いパターンを光電処理する手法も考案された。これは、変位の分布を測定する方法で、まず、変形の前

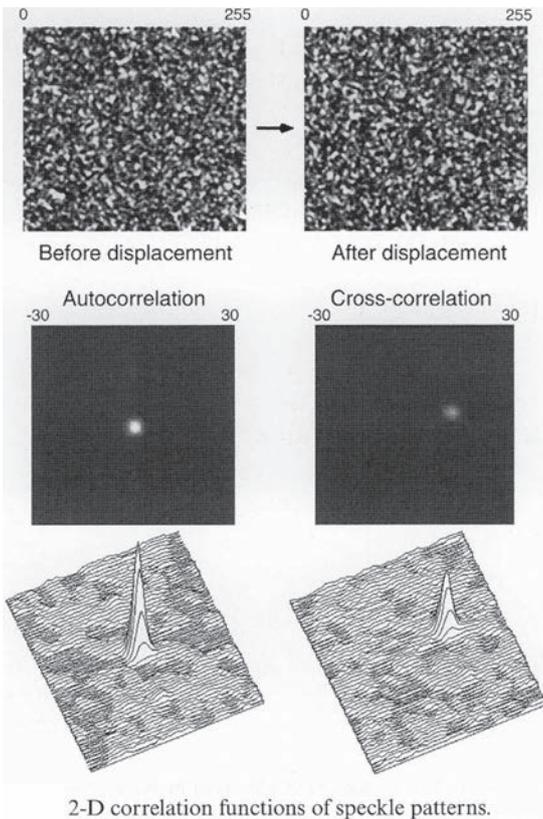


図12 粗面の変形によるスペckル模様の変化と相関関数によるスペckル移動の検出

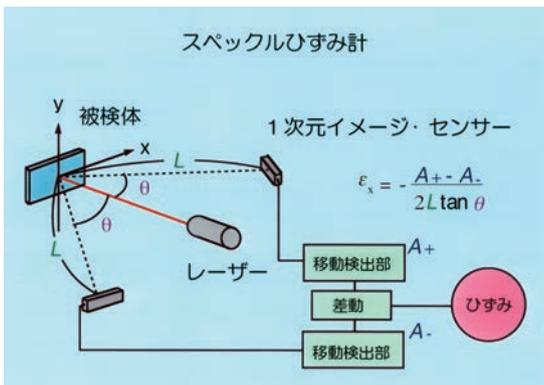


図13 レーザースペckルひずみ計

でスペックル像を2重露光した写真ネガ（スペックルグラム）をレーザー・ビームで走査する。このとき、平行で等間隔のヤング干渉縞が得られるので、それをイメージセンサーで受け、その出力をマイコンで解析して変位分布を解析する装置を製作したのであった。ただし、当時は細かい2次元画像を撮像素子で記録し、計算機で自動解析するのはまだ困難であった。

〈c. 計算機画像処理〉

1968年に提案された計算機ホログラフィの研究も、理研の研究室で開始された。これはホログラム・パターンを計算機で作成し、仮想的な物体像を光により再生するという方法である。和光本所の研究本館地下にあった大型計算機をパンチカードによって制御し、計算されたホログラム原図を大型プロッターで描かせ、それを写真で縮小撮影して計算機ホログラム（CGH）を作成した。これにレーザー光を当てて種々のパターンを再生したのである。応用として、非球面光学素子の検査、仮想物体の多重ステレオ・ディスプレイが取り上げられた。

その後急速に発展した計算機画像処理の先駆けとなった研究に、走査モアレ法による人体や大物体の形状計測、干渉縞画像処理による鏡面の高感度自動計測がある。当初は画像メモリの容量も読み出し速度も低く、扱える画像も粗いものに限られた。

光干渉計測技術のデジタル化と機能向上——光工学研究室（1985-2002）

1985年に創設された光工学研究室は、山口一郎主任研究員によって主宰された。当時産業界で急速に高まりつつあったのが、生産技術の高度化に伴う非接触かつ高感度が特徴の光計測技術への関心であった。エレクトロニクス産業は、真空管や撮像管や映像（ブラウン）管から、半導体素子や液晶表示装置へと急速に移行していった。また光ファイバーを使った光通信の実用化、光ディスクメモリの普及もあった。これらのシステムを接続し、制御するコンピュータの高性能化と小型化も著しかった。

光工学研究室は、デジタル技術の進歩と普及を生かし、従来に比べて広い環境領域で使える技術の開発を目指して、その自動化と実用化を図った。在籍した所員は、中島俊典、中楯末三、岡本隆之、加藤純一、山本明弘、城田幸一郎であった。さらに1990年代に入ると、基礎科学特別研究員や埼玉大学との連携大学院の博士後期課程の学生も新たに加わった。

〈a. 電子式スペックル相関法〉

すでに述べたように、スペックルの細かさは光学系によって自由に調節できるので、撮像素子の解像度に合わせた記録ができる。この性質を利用して、写真より2桁以上も解像度が低い光電記録による実時間計測が、まずスペックルで実現した。その後の撮像素子とコンピュータの進歩により、物体の全体をレーザー照射して得られるスペックル画像を直接コンピュータに取り込み、各物体領域のスペックル移動を解析して、変位やひずみの分布を求めることが可能になった。こ

れは、一足先に出現していたテレビ・スペックル干渉計と相補的な役割を果たした。そこでは電子的にスペックル画像信号の積を取って変位の等高線を表わす縞が表示された。

〈b. 干渉計の高機能化〉

精密加工技術の高度化、特に光学素子や半導体ウェーハなどの研磨面の検査のために、干渉計に多くの課題が課せられるようになった。まず干渉縞解析の高速化である。1990年代半ば以前においては、まだ細かい干渉縞をビデオレートで処理することは容易でなかった。理研では、これを指して電子的なモアレを利用した実時間の位相シフト干渉計を開発した。

もう一つは、干渉計の定盤離れである。これに対応するため、振動などの外乱による干渉縞の動きを止めて、光学定盤の外で使えるフィードバック干渉計を開発した。これには、①縞の動きを光電的に実時間で検出し、半導体レーザーの注入電流にフィードバックして波長を変化させる方法と、②半導体レーザーへの戻り光による自律的な縞のロックングを利用する方法と、2通りの方式を開発した。さらに機械的な可動部分のない絶対測定可能な干渉計として波長走査干渉計を開発した。

多点測定のためには、それまでは1点の測定に限られていた光ファイバー干渉計にファイバー束を導入し、画像処理を組み合わせることで多点の温度変化やひずみの測定に成功した。

レーザー以外の光源を利用する干渉計の応用として、白色光干渉と共焦点顕微鏡を組み合わせ、多層透明膜の屈折率と厚みを分離測定する方法も考案された。

〈c. デジタルホログラフィとスペックルの融合〉

ホログラムは光波長に近い細かい構造を有するので、主として高解像度の写真フィルムに記録され、通常の撮像管で記録するのは困難であった。しかし1990年代に入ると2次元の固体撮像素子の画素数と感度が大幅に向上し、さらに計算機の能力が飛躍的に増大して、それまで写真記録に頼っていたホログラフィの記録と再生をデジタル的に行えるようになった。

研究室ではデジタルホログラフィの画質を改善する位相シフト・デジタルホログラフィ（図14）を開発して、多機能な3次元顕微鏡、カラーの3次元像の記録再生や大型物体の計測に応用した。

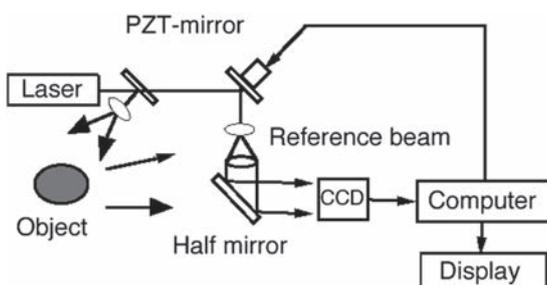


図14 位相シフト・デジタルホログラフィの配置

さらに、従来は別々に扱われていたホログラフィ干渉法とスペックル法の関係が理論的に明確になり、しかもデジタルホログラフィの普及によって同じ道具を使い、異なるデジタル処理を施すことにより、両手法を目的に応じて使い分けることも可能となった。光学計測研究室時代に展開されていた基礎理論がここで大いに役立ち、最適な信号処理アルゴリズムを選択するための有力な手がかりとなった。

〈d. その他の研究〉

光と物質の相互作用の研究として、光励起表面プラズモンを利用する屈折率センサー、レーザー光による誘電体や金属の粒子のトラップと回転駆動の研究を行った。また強誘電体液晶の光によるスイッチングの研究も行った。その原理は光照射による強誘電体液晶の配向やピッチの制御である。これらの技術は光工学の新しい応用分野である生物学や医学での応用が期待されている。

その後の進展

山口が定年退職した2002（平成14）年以降も、デジタル画像技術はますます発展していった。上で述べた計測手法は光学定盤を離れて広く工業現場で使われるようになった。その背景には、理研で培われた基礎的な研究成果が重要な役割を演じている。1980年代の研究目標としていた「画像を介する測定自動化と定量化と高速化」は、21世紀に入るとデジタル処理によって実現され、多くの技術の実用化が達成された。理研の光学計測研究室および光工学研究室で展開された基礎研究の成果が生かされたのである。

光工学研究室は、個人の発想による自由な研究姿勢が第一義とされた。研究費をあまり掛けずに基礎的なアイデアをいろいろな角度から深く検討し、基本原理の確立と検証を中心に論文がまとめられていった。デジタル技術以前の光干渉計測は、その高感度性のゆえに光学定盤の上での使用に限られており、得られるパターンの解析には時間と熟練が必要であった。しかし、計算機と撮像素子の性能向上が急速に進み、デジタルホログラフィを代表とする定量化・自動化と定盤離れが実現した。位相シフト・デジタルホログラフィを提案した論文は2016年現在、デジタルホログラフィ分野で最高の1200の引用件数を数えている。これらの成果を通じて、光工学は従来の機械工学の応用分野を抜け出て、医学や生物学などの新しい応用分野に足を踏み入れたのである。

（本節の関連文献はアーカイブ版に掲載されている）

第9節 理研の半導体工学研究

理研の半導体工学系研究は、大きく二つの流れに従って進んできた。一つは半導体工学の本流とも言うべき流れであり、イオン注入技術、集束イオンビーム技術、そしてナノテクノロジーに代表される将来に向けた半導体電子デバイス技術開発とその基礎研究という流れである。もう一つは、新レーザー開発、半導体プロセスのための新光源開発、さらに光集積回路に代表される半導体光デバイスの技術開発とその基礎研究という流れである。そしてこれらの流れの中で、それぞれの研究に必要な分子線エピタキシャル結晶成長（MBE）、有機金属結晶成長（MOCVD）、電子ビーム励起プラズマ装置（EBEP）などの新たな材料創成技術の開発が並行して進められてきた。

理研における「半導体工学研究室」は木下正雄主任研究員（任期：1926-1951）

を源流とし、菅義夫主任研究員（1952-1965）、難波進主任研究員（1966-1981）と流れが生まれ、その後豊田浩一主任研究員（1982-1991）青柳克信主任研究員（1991-2003）、そして現在の「石橋極微デバイス工学研究室」の石橋幸治主任研究員（2003-）、「平山量子光素子研究室」の平山秀樹主任研究員（2012-）と続いている。その間に「レーザー科学研究グループ」、「国際フロンティア研究プログラム」、ならびに「原子スケール・サイエンジニアリング研究グループ」と深く関わりつつ、半導体工学研究が進められたのである。

絶対温度の決定などに貢献

木下は理研ではレオロジー（流動学）や高分子物理の基礎研究に取り組み、併任していた東工大物理教室においては、大石二郎助手とともに、当時重要であった温度の精密測定で絶対零度の決定に挑んだ。小数点以下2桁目の値を決めるため、ガラス細工を駆使した手作りの装置を作製、 $0^{\circ}\text{C} = 273.16\text{K}$ の国際標準が決まる上で決定的に重要な研究成果を発表し、世界を驚かせた。その後、東大工の菅が「物性論研究室」を主宰し、「半導体研究室」と名前を変えていく。そして数年後には「高分子物理研究室」も主宰している。菅はZnS蛍光体の電場発光、蒸着薄膜回路、電子ビームによる加工、レーザーの瞬間写真への応用等、当時の学術的トピックスの中から実用面に比重を置いた研究を選び、研究室を運営した。特にレーザーの瞬間写真撮影への応用は、理研のレーザー研究に対する取り組みが非常に早かったことを示している。また「物性論研究室」から独立した「高分子物理研究室」において、溶液中の高分子の形態あるいは高分子結晶の分子運動等、基礎的な研究も進めた。

菅が主宰する「半導体研究室」では、難波進研究員が電子ビーム微細加工研究をスタートさせている。これが1962（昭和37）年ごろから金弼鉦副主任研究員らと始めるレーザー微細加工の先駆的研究へとつながっていく。

第10節 光通信や回折格子の開拓

光通信の開拓

難波進は1950（昭和25）年ごろの就職の難しい時期（第1次科研の時代）の入所だったため、当初は工作課に籍を置いた。そこで高感度ガルバノメーターの作製に成功した。その後、光弾性学の辻二郎研究室に移り、高感度の光波干渉縞の電氣的計測を試み、干渉縞の自動追尾に成功している。難波は1955年ごろからADP（リン酸二水素アンモニウム）やZnS結晶の電気光学効果をつぶさに調べ、菅研究室に移った後、電気光学効果による光変調実験に成功した。その成果は応用物理学会誌に日本語で発表されたが（1959年）、翌年レーザーが発明され、この研究が世界から大きな注目を集めることとなった。その後、彼の計算した電気光学効果のテーブルは多くの教科書に引用されたのである（図15）。

東工大の末松安晴教授は光通信の研究における光変調の実験の折りに、難波

から彼が用いた非線形結晶を借り受けて実験を行っている。後に末松は世界の光通信の基礎を確立した。

イオン注入法

難波はその後「半導体工学研究室」の主任研究員となり、1955年代から電子・イオン・光ビームに関する先駆的な研究を行ってきたが、中でも重要な業績の一つに、半導体デバイスプロセスへのイオン注入技術の導入がある。イオン注入法は1950年に東北大の西澤潤一教授によって特許が出されているが、1965年ごろには高周波トランジスターの高性能化やトランジスターの集積化において常套手法であった熱拡散法の限界を乗り越える手法として、難波が非熱平衡プロセスで不純物が添加できるイオン注入法の利用を推進した。

彼は世界に先駆けて、シリコンヘイオン注入した不純物の分布が飛程理論と一致することを示し、不純物分布がイオン注入条件で制御できることを実証して、不純物ドーピングの学術的基礎を確立した。1968年には、これらの基礎研究の成果に基づいた半導体用のイオン注入装置の開発が新技術開発事業団の委託開発課題として採択され、早稲田大の伊藤糾次教授らとともに（株）日立製作所、東京芝浦電気（株）と組み、彼らの指導によって当時世界最高性能の高周波トランジスターが開発された。

ちなみに難波と伊藤は近くに居住しており、時折酒を汲み交わしながら将来の研究を語り合ったという。難波は国内でイオン注入に関する理研シンポジウム「半導体へのイオン注入」を毎年開催し、イオン注入技術の国内での普及、発展の礎を築いた。このシンポジウムは1970年の第1回以来20年間続き、イオン注入技術研究に関する討論の中心となった。

イオン注入を代表とする難波のイオンビーム研究は、その後、集束イオンビーム装置の開発研究と進み、塩川高雄研究員がその研究に従事した。

ホログラフィック回折格子

一方、理研では当時勃興しつつあった光ICの研究にも精力的に取り組んだ。

- 434 (64) -

応用物理 第28巻 第7号 (1959)

Table 1 Electro-optical properties of ZnS crystal.

	$E \perp (001)$ plane $E_x = E_y = 0 \quad E_z = E$	$E \perp (110)$ plane $E_x = E_y = \frac{E}{\sqrt{2}} \quad E_z = 0$	$E \perp (111)$ plane $E_x = E_y = E_z = \frac{E}{\sqrt{3}}$
index ellipsoid	$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + 2r_{41}E_xxy = 1$	$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + \sqrt{2}r_{41}E(yz + zx) = 1$	$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + \frac{2}{\sqrt{3}}r_{41}E(yz + zx + xy) = 1$
n_x'	$n_0 + \frac{1}{2}n_0^3r_{41}E$	$n_0 + \frac{1}{2}n_0^3r_{41}E$	$n_0 + \frac{1}{2\sqrt{3}}n_0^3r_{41}E$
n_y'	$n_0 - \frac{1}{2}n_0^3r_{41}E$	$n_0 - \frac{1}{2}n_0^3r_{41}E$	$n_0 + \frac{1}{2\sqrt{3}}n_0^3r_{41}E$
n_z'	n_0	n_0	$n_0 - \frac{1}{\sqrt{3}}n_0^3r_{41}E$
$x'y'z'$ coordinate			
directions of optical path and axes of crossed polarizer			
phase difference $\Gamma(V = Ed)$	$\Gamma_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} V$ $\Gamma_{xy} = \frac{\pi}{\lambda} \frac{1}{d} n_0^3 r_{41} V$	$\Gamma_{max} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{d} n_0^3 r_{41} V$	$\Gamma = \frac{\sqrt{3}\pi}{\lambda} \frac{1}{d} n_0^3 r_{41} V$

Table 2 Measured samples of zincblende.

	direction of electric field	d	direction of light beam	l
Crystal No. 1	$E \perp (110)$ plane	2.8	$\perp (\bar{1}10)$ plane	2.5
No. 2	$E \perp (111)$ plane	2.0	$\perp (\bar{1}10)$ plane	2.3
No. 3	$E \perp (111)$ plane	2.3	$\perp (\bar{1}10)$ plane	2.0

の結晶を偏光場に入れて観察すると綺麗な光弾性縞模様が見られる。歪が入っている結晶は電気光学効果測定用には使用できないので、多くの結晶中から比較的歪の小さいものを選び、更にそれを800°Cで数時間 anneal して使用した。ZnS 結晶の annealing はかなり難しく、水晶管にアルゴンガスと共に封入して加熱した場合は、結晶表面から S が逃げるために表面のかなりの厚さが不透明層で覆われ、測定に使用しうる試料は得られな

図15 難波が計算したZnSの電気光学効果

この計算を用いて光変調の実験を行った。この研究はレーザーの発明に伴い光通信の基礎となった。その後長い間、光変調の最初の計算として多くの教科書に使われた。

特に、現在通信用レーザーに用いられている分布帰還型レーザーが話題になり始めた初期のころ（1974年ごろ）に、半導体工学研究室の연구원となった青柳克信研究員が中心となって、日本で初めてホログラフィック回折格子と有機色素を用いた分布帰還型レーザー（DFBレーザー）の発振に成功した。さらに分布帰還型レーザーは波長が固定であるという通説に反して、等価屈折率の概念を用いることによって波長可変にできることを実証、世界的に注目された。

ここで用いたホログラフィック回折格子が、後の分光器用のブレードホログラフィック回折格子の開発へとつながっていく。この回折格子はナノテクノロジーが騒がれる20年も前に1 μm を切る精度を持った回折格子を作製する技術であった。青柳らは1976年ごろ、ホログラフィック回折格子の高い精度とイオンエッチングのエッチング異方性を利用し、任意の角度にブレード（鋸歯状断面）を作り、迷光も少なく分解能も上げることができる優れた回折格子の作成に成功した。

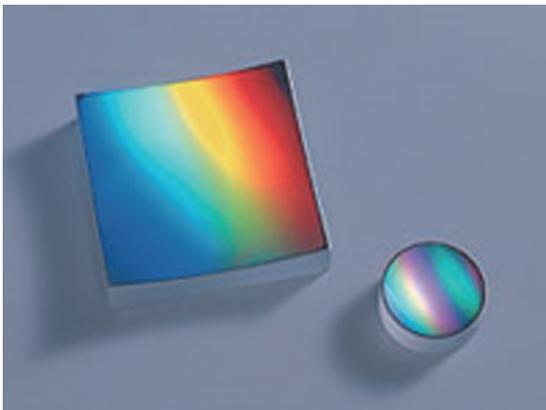


図16 理研で開発され島津製作所（株）で実用化されたブレードホログラフィック回折格子

回折格子は、当時は、ルーリングエンジンという巨大な精密機械で切り削って作るのが一般的であった。しかしこの技術は、その古典的な機械切削技術を退場させ、エレクトロニクスを応用した微細加工技術によって置き換えるものであった（図16）。現在でも、世界で作られている回折格子のほとんどが、この方法を採用して作られている。（株）島津製作所で実用化され、理研の特許が切れるまで、同社は一時60%以上のシェアを占めていた。ちなみに本技術で作成された回折格子はハワイにある国立天文台のすばる望遠鏡にも搭載された。

〈半導体、化学〉

第11節 レーザー科学研究グループの中の半導体工学

レーザー同位体分離

1974（昭和49）年ごろ、レーザーによる同位体分離が世界的な関心となった。理研でも難波進、霜田光一主任研究員、中根良平主任研究員が集まりレーザー同位体分離の研究に着手した。中根は同位体分離の権威、霜田はレーザー分光の権威、そして難波はレーザープロセッシングの権威であり、それぞれが日本での指導的役割を果たしていたので、最高の人材によるグループ結成であったと言える。当時レーザー同位体分離はローレンスリバモア米国立研究所が提案する原子法と、理研が提案する分子法がしのぎを削っていた（**88年史**225-237ページ参照）。

理研では1976年にレーザー科学特定研究を発足させた。そして、新たな主任研究員枠がこの「レーザー科学研究グループ」に認められたのである。当時の理

研では新たな主任研究員枠は認められていなかったため、まさに画期的な出来事であった。本グループの初代の主任研究員は霜田で、その後、難波進（1981-88年）、青柳克信（1988-91年）、豊田浩一（1991-97年）が務めた。この間、1984年にアドホックな組織である「分子レーザー法ウラン濃縮研究推進室」（武内一夫室長、田代英夫リーダー）が設置され、レーザー同位体分離研究はそちらへ移管された。移管されなかった研究は1997（平成9）年3月まで「レーザー科学研究グループ」として継続された。1997年に緑川克美主任研究員（現在、光量子工学研究領域長）による「レーザー物理工学研究室」が発足し、新たに「コヒーレント科学研究」がスタートした。

エキシマーレーザー、大出力レーザー

半導体工学研究室は、難波が1982年に「レーザー科学研究グループ」の主任研究員に異動して空席となったので豊田が主任研究員となり、その後を継いだ。豊田は「半導体工学研究室」で種々の新しいレーザー開発の研究を進めた。特に、河村良行研究員と電子ビーム励起KrFエキシマーレーザー（249nm）の発振に成功し、それを用いて有機材料のレーザーフォトリソグラフィの実験に世界に先駆けて成功した。これは0.5 μm より小さなサブミクロン加工を可能にしたもので、エキシマーレーザーリソグラフィのパイオニア的な仕事であった。エキシマーレーザーによるリソグラフィは、2016年現在、半導体の微細加工に必要不可欠な技術となっている。外国から日本にエキシマーレーザーによる特許出願がなされた折り、理研の仕事が重要な防波堤となったが、あまり知られていない。このような意味でも、理研の半導体産業に果たした役割は大きい。

さらに、豊田は杉岡幸次研究員、田口俊弘研究員らと半導体の紫外線レーザープロセッシングの研究およびその装置開発を進め、いろいろな材料の紫外線レーザープロセッシングの可能性を明らかにした。また河村が中心となり、自由電子レーザーの基礎研究を10年にわたって行った。発振した波長は30GHzと長波長であったが、理研に自由電子レーザー研究の基礎を築いた。この研究は後に播磨における大型自由電子レーザーへと発展していった。

豊田はまた、1981年ごろ、藤岡知夫慶應大教授らとケミカルレーザーの開発を手掛けている。これは化学反応を利用してレーザー発振させようとするもので、大出力レーザーを実現できる夢のレーザーであった。また「レーザー科学研究グループ」が発足してからは、金弼鉦が中心となり、レーザー同位体分離が研究課題の一つであった臭素で、その同位体スペクトルを明らかにし、臭素における同位体分離に成功している（1976年ごろ）。

励起子分子の存在を証明

半導体工学研究室の青柳、瀬川勇一郎研究員らは「レーザー科学研究グループ」の中の「レーザー分子加工グループ」を兼務し、レーザーを用いた半導体物性の解明、レーザーの半導体プロセスへの応用に取り組んだ。特に、1974年というかなり早い時期から、ピコ秒分光のための装置開発とそれを用いた極短時間

域での材料物性の研究、ならびにその応用研究を始めていた。

瀬川は理論的に予言されていた励起子分子が実在することを実験的に初めて証明したが、彼はこの研究をさらに発展させ、青柳とともに、1980年代の半ばに、光は半導体中では励起子ポラリトンになり、その光は半導体の中を通常の400分の1以下の遅い速度で進むことを発見した。そして、ある条件下においてピコ秒の光パルスを半導体に入射すると二つの光に分裂することを見つけ、この現象がマックスウエルの電磁気学における通常の境界条件では説明できず、付加境界条件が必要であることを実験的に初めて示した。

また、青柳、瀬川は新たな技術としてダイナミック回折格子分光法を開発し、従来測定不可能であった半導体の電子、ホール（正孔）の2極性拡散定数を直接測定する方法を見だし、CuClにおける電子・ホールの2極性拡散速度、ならびにそれぞれの寿命を世界で初めて明らかにした。これらピコ秒分光の研究は、理論で予言されていた励起子分子の存在が実際に存在することを実験的に初めて証明したものである。光物性の専門家である瀬川と、装置開発と応用研究が得意な青柳による共同研究の賜物であった。

半導体材料を育てる

ところで「半導体工学研究室」では1985年当時、半導体材料を自分たちの手で作ることはなかった。しかし今後は、自らの手で自らが設計した材料を持つことが、極微デバイスの研究に必要な不可欠であるとの考えから、液層結晶成長法でGaAs/AlGaAsヘテロ構造の結晶成長を行い、日立から来た土居功年研究員が中心となって半導体レーザーの研究とその実用化研究を進めた。

その後、有機金属結晶成長（MOCVD）装置を導入した。当時は、MOCVD装置は市販されておらず、土居、青柳が自ら設計していくつかの会社と一緒に装置を開発した。この開発にあたって、当時技術部の三原勝技師（後に半導体工学研究室技師）が重要な役割を果たし、三原の協力なしには成し遂げられなかった。三原は土居、青柳の学会発表に間に合わせるために、正月まで研究室に出てきて装置開発を進めた。半導体工学研究室の発展は技術部の協力なくしてはあり得なかったのである。

土居、青柳らは1986年ごろ、GaAs半導体結晶成長中に結晶表面に光を当てることにより、完全な単原子層での結晶成長の自己停止機能を持った結晶成長に成功した。そしてその成長機構も明らかにし、多くの話題を集めた。

小型軟X線レーザーの可能性

1988年に難波の定年退職後、青柳が主任研究員となり、1985年からスタートした第2期の「レーザー科学研究グループ」を率いることとなった。青柳は原民夫研究員とともに、ウォーターウィンドウ（20-40nm）狙いの小型軟X線レーザーの開発研究に着手した。その結果、1989年ごろ、6ジュールのガラスレーザー励起によってAl多価イオンを作り出し、波長105.7 Åで非常に高い利得 3.4cm^{-1} を観測することに成功した。これにより、ウォーターウィンドウでの軟

X線レーザー実現の可能性を示した。

電子ビーム励起プラズマイオン装置 (EBEP) など

少し時計を戻して第Ⅱ期レーザー科学研究の1986年ごろ、「短波長レーザープロセッシンググループ」では、電子ビーム励起プラズマイオン装置 (EBEP) の開発を行い、それをを用いて大面積、低電圧、高速エッチング装置を実現した。この技術は大電流、低加速エネルギーであることが特徴で、当時ECRエッチング装置と実用化を競った。ECRエッチング装置が一步早く実用化され、本装置は(株)東芝で実用化されて十数台売れたものの、事業部を動かすほどの力はなく、やがて市販は中止となった。

1990年ごろには、目黒多加志副主任研究員が中心となって、単原子層エッチング技術すなわちイオンならびに短波長レーザーを使う方法で単原子層ずつ結晶をエッチングする究極の材料創成技術を開発し、自己停止機能を伴った新たなエッチング法として世界的に注目された。

第Ⅲ期「レーザー科学研究」

1991年、「レーザー科学研究」が第Ⅲ期に移行した。体制を一新するために、豊田浩一が「レーザー科学研究グループ」の主任研究員となり、青柳が「半導体工学研究室」主任研究員へと異動した。ただ青柳はレーザー科学研究グループの中の「短波長レーザープロセッシンググループ」のグループリーダーを兼務し、豊田は「新レーザー技術研究グループ」を兼務した。

第Ⅲ期の「レーザー科学研究グループ」では、短波長レーザーや可変波長レーザー光源開発と、それらのレーザーを用いた新しいエレクトロニクスへのアプローチという、装置開発からその応用までを結びつける理研独特の特徴ある研究が行われた。

第Ⅲ期レーザー科学研究の期間の1992年、スペースシャトルを用いた第1次材料実験「ふわっと '92」で無重力環境下での材料創成の研究が始まった。半導体工学研究室はこれを受け、岩井荘八研究員と瀬川がPbSnTe混晶半導体結晶成長を無重力下で行い、地上の重力下で起こる組成の重力偏析が無重力下では一切起こらず、地上では得られない均一組成の材料が創成できることを実証した。

レーザー科学研究は1996年度末をもって終了したが、その後、「コヒーレント科学研究推進グループ」が組織され、青柳がグループリーダーとなってプロジェクトを立ち上げ、その後、緑川に引き継がれた。このコヒーレント科学は、レーザーを中心とした「コヒーレント自由電子制御」、量子ドットなどを扱う電子工学分野の「コヒーレント量子プロセッシング」、フラーレンやナノチューブなど規則正しい物質構造を扱う化学・材料科学分野の「コヒーレント構造制御」、表面分子と吸着分子の相関を扱う表面科学の「コヒーレント分子相関」があり、和光キャンパスの理研研究者が横断的に連携し、制御する対象も光子、電子、原子、分子、構造と広範囲に及んだ。

MOCVDでGaN

目黒は多価イオンを用いた半導体プロセッシングという画期的な方法を開発し、その基礎実験を行った。また、新たにGaN材料専用のMOCVD装置を岩井が中心となり構築し、平山秀樹、岩井荘八らが中心となり、世界に先駆け深紫外発光デバイスの開発に着手した。これは有害な水銀ランプに置き換わるもので、当初はあまり注目されなかったが、現在ではノーベル賞の受賞テーマとなり照明革命とも言われる白色LEDの次なる大きなターゲットとして、世界中で注目されている。この仕事は「平山量子光素子研究室」の主要な研究テーマとなり、パナソニック（株）で実用化された。

アンチサーファクタント

また、当時不可能であったGaN量子ドットの研究を精力的に進め、1996年ごろ、田中悟研究員が中心となり、アンチサーファクタント（反界面活性剤）という新しい概念を導入し、結晶の表面自由エネルギーを制御することにより、通常できない材料系でも量子ドットができることを示し、世界の関心を集めた。従来の半導体量子ドットの自然形成は、結晶格子の歪みエネルギーを利用するいわゆるストランスキー・クラスタノフ結晶成長モード（2次元膜構造が3次元島状構造に変化する仕組み）によっており、格子整合系では量子ドットは形成されないと考えられていた。しかし本研究は表面エネルギーの制御により、完全格子整合系でも量子ドットができることを示し、従来の常識を覆すものであった。少し先の話になるが、2000年ごろには、GaNのMOCVDで原料ガスならびにn型不純物、p型不純物を交互に供給する「交互供給コーピング法」を岩井が中心となって開発し、不純物の制御されたコーピングに成功した。そして、理論で示されていた高濃度のp型ドーピングをGaN、AlGaNで実現し、大いに注目された。

今日的課題へつなぐ

フォトリック結晶に関しても研究を進め、青木画奈研究員が中心となって2002年に3次元フォトリック結晶の新しい作成法を開発した。また平山らは1998年ごろ、フォトリック結晶を用いれば、物理常数で外部から制御できないと考えられていた自然発光寿命が、外部から制御できることを理論的に示して多くの関心を引いた。

また、尾笹一成研究員はMOMBE（有機金属分子線エピタキシー）結晶成長技術を開発し、GaAs、AlGaAs、ならびにGaN、AlGaNの高品質結晶を作成した。また、それらの超格子の作製等、高性能材料創成の構築を進めた。さらに尾笹は、バイオと半導体の接点が重要になるとの観点から、バイオの研究に乗り出していった。

半導体工学研究室へ移籍

石橋幸治研究員（現 石橋極微デバイス工学研究室主任研究員）は国際フロンティア研究システムから、1992年に「半導体工学研究室」へと移籍した（石橋

は国際フロンティア研究システムより前は大阪大学に所属しており、半導体における電子波干渉の実験に世界で初めて成功していた)。石橋は電子を1個ずつ制御し、1電子単位で電流のスイッチ(オンとオフ)を可能にする単電子デバイスの研究を行った。野村晋太郎研究員も1996年に同様な形で移籍し、ナノ構造の光物性の研究を行い、実験と同時に理論計算も行うことでナノ構造物性を明らかにした。

一方、青柳は1992年ごろスウェーデンのルンド大学に招聘され、理研とルンド大学の間で多くの共同研究を行った。理研からは野村や田中など多くの研究員がルンド大学を訪問し、またルンド大学からはサムエルソン(L. Samuelson) ナノセンター長やラムバル(P. Ramval)研究員ら多くの研究者が理研に来て共同研究を進めた。

塚越一仁研究員は、日立ケンブリッジ研究所に在籍中、カーボンナノチューブへのスピン注入に世界で初めて成功していた。彼は半導体工学研究室の研究員になった後、経験を生かしてナノチューブ材料を研究室へ導入した。その電子物性を明らかにするとともに、ナノドットを通しての電子トランスポート、また未来のデバイスである有機発光デバイス(有機EL)の基礎研究を進めた。また沖仲元毅研究員は将来のナノ構造の量産をふまえたナノインプリントの研究を行った。

第12節 国際フロンティア研究システムの中の半導体研究

ナノテクの先駆

1986(昭和61)年、理研の国際フロンティア研究システムが発足した。これは任期制という新しい雇用制度に基づくもので、メンバーの3分の1は外国人研究者を雇い、国際的な研究を展開するのが主旨であった。久保亮五東大名誉教授をシステム長に迎え入れ、5年3期の計画で、3グループ9チームで発足した。その「フロンティア・マテリアル研究グループ」の中に量子化素子研究チームが設置され、難波進がチームリーダーを兼務した。このチームの目標は原子レベルで材料の構造を制御するための技術開発と、この構造上に展開される電子の量子力学的振る舞いを素子化するための基礎研究を進めることであった。

計画の第I期は1991(平成3)年に終了し、その後組織の見直しが行われ、第II期が8年の研究期間でスタートした。第II期ではグループディレクターに菅野卓雄東大工教授を迎え入れ、ナノ材料に焦点を当てた「フロンティア・マテリアル研究グループ」が発足した。この中の「ナノ電子材料研究チーム」の目的は、表面・界面過程の評価・制御に関する研究、ナノプロセッシングに関する研究、ナノ電子材料の特性に関する研究、ナノ電子材料のデバイスへの展開に関する研究を進めることであった。当時はナノテクノロジー研究の黎明期であり、それから10年を待たずに、2000年のクリントン大統領による「国家ナノテクノロジー計画」(National Nanotechnology Initiative)が発表されるというタイミング

であった。大統領は、これからの技術はナノテクノロジーに依拠すると宣言し、大きな予算を投入することを発表したのだった。



図17 ナノサイエンス実験棟の全景

リエゾン体制を活かす

「国際フロンティア研究システム」はリエゾン体制をとり、理研本体と密接な関係を維持しながら研究が進められた。第Ⅰ期の「量子化素子研究チーム」のリエゾンは、最初は豊田浩一が、後には青柳克信が担当した。そこでは、簡易的ではあるがクラス1000以下のクリーンルームを初めて理研の中に設置し、ナノテクノロジーの研究が遂行できる土台を作り上げた。後にナノサイエンス実験棟が理研内に建設され(図17)、クラス100以下の本格的なクリーンルームができあがり、青柳がこの施設の支援チームリーダーを務めた。

フロンティア第Ⅰ期

1980年代終わりから90年代初めのころ、5年間の任期制雇用枠で、飯村靖文研究員、永田公研究員、田昭次研究員らは有機金属分子線エピタキシー(MOMBE)によるGaAs、GaN、AlGaNの新しい結晶成長法の開発を進めた。同じく、李定埴研究員はMOCVDを用いてGaN/AlGaN超格子結晶成長を試みた。野村、花田貴研究員、野々山信二研究員らは、英国からバード(J. Bird)研究員の参加も得てナノ構造電子輸送の実験、理論計算を精力的に進めた。特にこのチームでは、半導体2次元電子ガス構造における電子のバリステック伝導、電子波干渉効果、単電子トンネル効果の研究が中心に進められた。

一方、草野淳一研究員、瀬川らは、超高品質のGaAs/AlGaAs超格子構造をMBE結晶成長法で作成することに成功し、励起子ポラリトンが量子化されることを世界で初めて実証した。また、下村哲研究員はその後世界で話題となる傾斜基板へのMBE結晶成長の足掛かりとなる研究を始めた。

フロンティア第Ⅱ期

すでに述べたように、国際フロンティア研究システムの第Ⅱ期(1991-1999)では、名前も「ナノ電子材料研究チーム」と変え、ナノスケール構造に発現する量子効果や量子相関に着目した研究が行われた。バード(J. Bird)、ストウパ(M. Stopa)、バーンズ(C. Barns)、ポノマレンコ(V. Ponomalenko)、スレビン(K. Slevin)といった研究員らと共に、石橋は、ナノ構造デバイスにおける電子の可干渉性や電子相関に起因する量子的な電子輸送の研究を進めた。村尾美緒

研究員は量子コンピュータにおける量子相関に関する理論的研究を行った。石橋はこの間、オランダのデルフト大学に出向しNTTの藤沢利正研究員と共に共同研究を行い量子コンピュータの基礎となる半導体人工分子の観測に成功した。

一色秀夫研究員はフィボナッチ構造超格子を開発し、その光学的特性を明らかにした。趙新為研究員は希土類をドーブしたSiナノ微結晶を作成し、それが効率よく発光することを見だし、さらにそれを用いたレーザー利得の観測に成功した。野村郎研究室がその理論的計算を行った。また、神田晶申研究員、蓮見真彦研究員は超伝導ナノ構造の電子輸送の実験を、飯高敏明研究員はこれらのナノ輸送の理論計算を、またスウェーデンから来たラムバル (P. Ramval) がGaN/AlGaN量子ドットの光物性の研究を行った。

原子スケール・サイエンジニアリング研究 (1993-2002)

これらと並行して1993年、理研に「原子スケール・サイエンジニアリング研究」が青野正和主任研究員をグループリーダーとして発足した。この研究の仕掛け人は青野と青柳で、原子スケールでの機能発現を主眼に置いた研究計画であった。ここに川合眞紀主任研究員が加わり、グループとして発展していった理研の原子スケール・サイエンジニアリングはナノテクノロジーを先取りしたものであったため、社会からも大きく注目された。

すでに述べたクリントン教書発表の7年前のことで、ナノのさらに先を行く原子スケールを標榜したのがポイントであった。ちなみに1999年アメリカのナノサイエンス・テクノロジー研究世界動向調査団 (E. L. Hooら) が理研のナノサイエンス・テクノロジー研究の調査のために訪れ、その結果は1冊の本の中にまとめられて紹介された (*WTEC panel report on: Nanostructure science and technology* (Kluwer Academic Publishers, 1999) として)。

このグループの「原子スケールプロセッシング研究チーム」のチームリーダーに青柳がなり、原子層を一層ずつ制御して貼り付けたり、剥がしたりする原子層マニピュレーション技術を開発した (図18)。また青野はアトムスイッチを新たに発明し、原子1個ずつでスイッチができることを初めて示した。この技術は青野が物質材料研究機構に異動してからも大きく発展し、実用化されようとしている。一方川合はSTMを使ってベンゼン分子1個における電子の共鳴状態を初めて実測し、われわれが化学で習っていたことが実際に起こっていることを目で見える形で証明した。

この原子スケール・サイエンジニアリング研究グループは、「桃源会」と称する研究室横断的な“ナノ”の研究会を年に一度泊まりがけで開催し、夜を明かして白熱した討論が展開された。

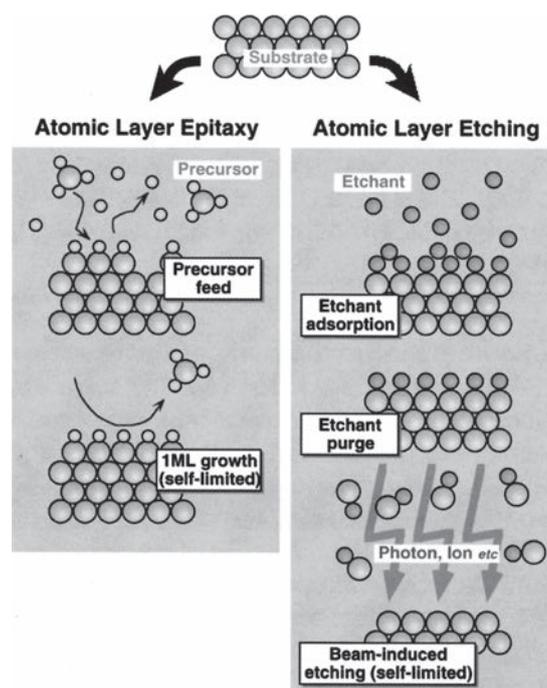


図18 原子層マニピュレーションの概念図



図19 ハワイでの国際会議

2003年12月に開催されたInternational Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures (NPMS) で顔を合わせた面々。中央がMPIのKlaus von Klitzing博士、右が難波、左前列が石橋、石橋の後ろは、Klitzingのヴュルツブルク大学における指導教官だった故Gottfried Landwehr教授。

151委員会

1986年に日本学術振興会の産学協同委員会「極限構造電子物性」151委員会が発足し、極限微細構造での物理と応用を企業も含めて討論する場ができあがった。もちろん、この当時はまだ“ナノ”という言葉は使われていなかった。初代委員長を難波が、その後、青柳、石橋が委員長を務めた。研究分野の移り変わりに伴い、名称も設置当初の「極限構造電子物性」151委員会から、「先端ナノデバイス・材料テクノロジー」151委員会と改められた。また、この委員会が主体となって、1989年よりナノサイエンスとナノテクノロジーの専門家の集まる国際会議をハワイで開催し（現在でも他の国際会議と融合し名前を変えて続いている）、アメリカをはじめとするこの分野の世界の研究

者の情報交換の場となった。量子ホール効果を発見してノーベル物理学賞を受賞したマックスプランク研究所のクリッツィング（Klaus von Klitzing）も参加した（図19）。現在も活発な議論がなされている。

21世紀の半導体研究

2003年、青柳が定年退職した後、石橋幸治が半導体工学研究室の主任研究員となった。21世紀の理研での半導体研究の流れは、石橋が主宰する「極微デバイス工学研究室」におけるナノ構造デバイス研究と平山秀樹が主宰する「理研フォトダイナミクス研究センター」のチームにおけるテラヘルツ帯半導体発光素子の研究に受け継がれている（表1）。「極微デバイス工学研究室」では、まず、山口智弘研究員、河野行雄研究員が参加し、新材料としてのカーボンナノチューブを用いたナノデバイス研究が行われた。単電子インバータや2重結合量子ドット



図20 ナノ構造の電子のトランスポートの実験をするための希釈冷凍装置
温度は50mKの極低温で実験が行われている。

などの高機能構造を作製するとともに、カーボンナノチューブが1次元人工原子としての電子構造を持つことを明らかにした。

また、ナノチューブ量子ドットがテラヘルツ波の光子を吸収することを初めて実証し、量子検出器への応用可能性を示した。さらに最近では飛田聡研究員とディーコン（Russell S. Deacon）研究員が中心となり、カーボンナノチューブと分子からなる新しいナノ構造の研究、半導体ナノワイヤーを用いた単スピンのコヒーレント操作やマイクロ波共振器との相互作用の研究、

表1 理研での半導体研究の歴史系図

1926-1951	1952-1955	1956-1981	1982-1991	1992-2003	2003-	2012-
木下 (半導体研) 管 (半導体物性研)		難波 (半導体工学研)	豊田 (半導体工学研)	青柳 (半導体工学研)	石橋徹微デバイス研	平山光デバイス
		<ul style="list-style-type: none"> 電子・イオンビーム技術の開発 (難波) 非線形結晶による光変調の開発 (難波) 	<ul style="list-style-type: none"> イオン注入技術の開発 (難波) 	<ul style="list-style-type: none"> 深紫外LEDの開発 (平山、青柳) フォトニック結晶レーザーの理論計算 (平山、青柳) 3次元フォトニック結晶の作製技術の開発 (青木、平山、青柳) 量子ドット光物性の観測と理論証明 (野村、青柳) 多価イオンエッチング技術の開発 (目黒、青柳) カーボンナノチューブトランスポートの究明 (塚越、青柳) 有機ELの開発 (塚越、青柳) ナノインプリント技術の開発 (沖仲、青柳) アンチサーファクタントによる量子ドット形成法の開発 (田中、青柳) 	<ul style="list-style-type: none"> ナノチューブ量子ドットのTHz光吸収の実証 (河野、山口、石橋) ナノチューブからの励起子発光の観測 (飛田、Deacon) 	<ul style="list-style-type: none"> 深紫外LEDの実用化研究 (平山、パナニック (株)) THzカスケードレーザーの研究 (平山)
		<ul style="list-style-type: none"> 可変波長DFBレーザーの開発 (青柳、難波) ホログラフィックブレーズド回折格子の発明 (青柳、難波、(株)島津) 光の超低速度伝搬の発見 (瀬川、青柳、難波) 光の分裂、付加境界条件実証 (瀬川、青柳、難波) 過渡回折格子分光法の開発 (青柳、瀬川、難波) 集束イオンビーム装置の開発 (塩川、難波) 				
		Ndガラスレーザーの開発 (金、難波)	<ul style="list-style-type: none"> 単原子層結晶成長法の開発 (青柳、土居、難波) 単原子層エッチング法の開発 (青柳、目黒、難波) 			
		レーザー科学特定研究 (中根 '76-'78)	レーザー科学研究 (霜田 ('78-'82)、難波 ('82-'88))	第二期 (青柳 '88-'92)、第三期 (豊田 '93-'97)	コヒーレント科学 (緑川 '98-)	
		ケミカルレーザーの開発 (豊田、藤岡 (応応大)、難波)	<ul style="list-style-type: none"> 紫外レーザープロセスの開発 (河村、田口、豊田、難波) エキシマレーザープロセス技術の開発 (河村、豊田、難波) 	<ul style="list-style-type: none"> EBEPの開発 (原、青柳、難波、(株)東芝) 小型X線レーザーの開発 (原、青柳、難波) 		
		・臭素の同位体分離 (金、難波)	・自由電子レーザーの開発 (河村、豊田、難波)			
		量子化素子研究チーム (難波、リエゾン豊田、青柳 '86-'91)、ナノ電子材料研究チーム (青野、リエゾン青柳 '91-'98)		'86フロンティアマテリアル研究グループ		
		<ul style="list-style-type: none"> 励起子ポラリトンの量子化の実験的検証 (草野、瀬川、青柳、難波) CBE結晶成長技術の開発 (飯村、長田、田、青柳、難波) MBE結晶成長技術の開発 (下村、青柳、難波) ナノ材料の電子トランスポート (Bird, 石橋、青柳、難波) ナノ材料電子トランスポートの理論 (野々山) 		<ul style="list-style-type: none"> 半導体人工分子の観測に成功 (石橋、藤沢 (NTT)) 単一電子デバイスの開発 (石橋、Bird (Arizona Univ)、青柳、難波) セボナッチ超格子の光学的特性の解明 (一色、青柳、菅野) EuドーパナノSiからの発光利得の観測 (翅、野村、青柳、菅野) 超伝導の構造の電子輸送の解明 (神田、蓮見、青柳、菅野) GaN/AlGaIn量子ドットの光物性の解明 (Ramval 青柳、菅野) ナノトランスポートの理論 (Ponomalenko, Slenden, Stoppa, 飯高) 量子相関の理論 (村尾) ナノインプリント技術の開発 (沖中、青柳、菅野) 		
				原子スケールサイエンスエンジニアリング研究グループ (青野 '93-'97)		
				<ul style="list-style-type: none"> 原子スイッチの発明 (青野) 4探針STMの開発 (青野) 原子層マニピュレーション技術の開発 (青柳) 単一ベンゼン分子の電子雲観測に成功 (川合) 		

(出所) 青柳克信作成。

さらにトポロジカル超伝導接合などの新しい研究を開始し、構造を制御したカーボンナノチューブ量子ドットからの励起子発光の観測に初めて成功している (図20)。

平山は主任研究員として2012年から和光キャンパスで「量子光素子研究室」を主宰し、寺島亘研究員と定昌史研究員が参加し、「半導体工学研究室」時代から続く窒化物半導体を主材料とした深紫外発光デバイスの実用化を目指した研究や、新たにテラヘルツ発光素子の開発を進めている。窒化物系材料を用いた量子カスケード構造で初めてテラヘルツ帯レーザー発振スペクトルを得ることに成功している。

第13節 表面界面工学研究からナノサイエンスの研究へ

表面界面工学研究室

1986 (昭和61) 年、筑波の無機材質研究所から、青野正和が理研に主任研究員として着任した。摩擦工学研究室の佐田登志夫 (後に副理事長) の定年退任に伴うもので、佐田自身が「摩擦工学」をモダンな「表面科学」へと装いを新たにするために青野を無機材質研究所から招請した。研究室名も「表面界面工学研究室」と改められた。



図21 ERATO 青野アトムクラフト プロジェクトの発足披露会（久保亮五システム長の激励スピーチ）。



図22
事務所を置いた
理研板橋分所



図23 実験グループが活動した筑波研究コンソーシアム

ERATO青野プロジェクト

着任して3年を経た1989（平成元）年、青野は、新技術開発事業団（現在の科学技術振興機構JST）による創造科学技術推進事業ERATOのプロジェクトリーダーに選ばれた。そして、1994年までの5年間、「青野原子制御表面プロジェクト（Aono Atomcraft Project）」を組織して、研究を進めた。英語名のatomcraftは青野の造語であり、「原子を手細工のように操って構造を作る」という意味である。プロジェクトの発足会では、当時の小田稔理事長、佐田副理事長、フロンティア研究システムの久保亮五システム長などから激励があった（図21）。プロジェクトの事務所と理論グループは理研の板橋分所（宇宙線研究室があった場所）に置き（図22）、残りの実験のグループは筑波研究コンソーシアムに置いた（図23）。

このプロジェクトで行った研究は、走査型トンネル顕微鏡STMを単なる顕微鏡としてだけでなく、その探針をあたかも指先のように用いて、固体表面の上で原子を1個ずつ操る（引き抜く、付与する、移動する）研究だった。STMは1981年にIBMチューリッヒ研究所のビーニッヒ（G. Binnig）とローラー（H. Rohrer）の両博士が発明したもので、彼らは1986年にノーベル物理学賞を受賞した。青野は主として、半導体シリコンの表面において、個々のシリコン原子を室温で操る研究を進めた。図24に一例を示す。(a)、(b)、(c)、(d)はシリコンの表面の任意の位置からシリコン原

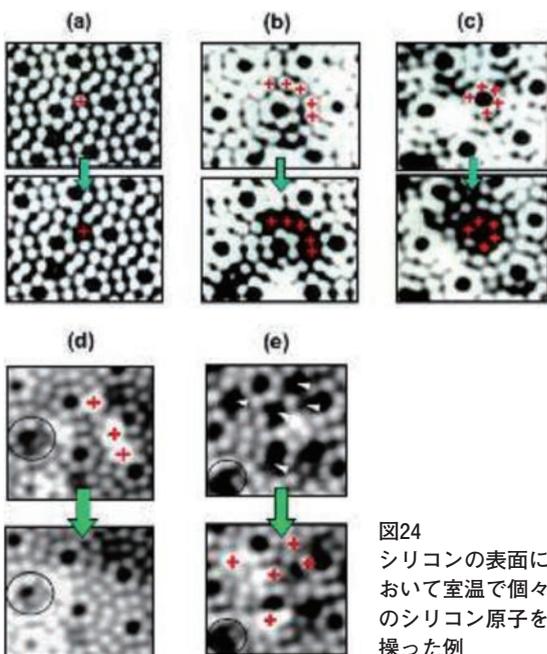


図24
シリコンの表面において室温で個々のシリコン原子を操った例

子を1個ずつ引き抜いた例、(e)はシリコンの表面の任意の位置にシリコン原子を1個ずつ付与した例である。

このプロジェクトは結果として、「国家政府機関がサポートした世界最初のナノテクノロジー研究プロジェクト」となった。少し後の2010年、青野はファインマン賞（Feynman Prize in Nanotechnology 2010）を受賞するが、受賞理由には、「その着想はあらゆる世代の研究者を刺激し、それぞれが独自のナノテクノロジーの開拓者となるよう導いていった」と述べられている。

原子スケール・サイエンジニアリング・グループ

サイエンジニアリングsciengineeringという言葉は青野・青柳・川合らによる造語で、scienceとengineeringを1語にしたものである。原子スケールの世界を制御しようとするれば、scienceとengineeringに区別などないことを主張した。このグループは1993年から5年間の短期間だったが大成功で、特に若い研究者が、研究の自由や独創の意味を真に体得して羽ばたいて行った。図25は、このグループの発足当時に開催された国際会議の写真である。若くてやる気満々の理研研究者の顔が写っている。

このグループにおいて、青野はその後のナノサイエンスやナノテクノロジーの発展に、重大な寄与をすることになったいくつかの研究成果を上げた。すなわち、固体表面の構造解析のための新手法として、青野らが開発した直衝突イオン散乱分光法（CAICISS）の拡充、走査型トンネル顕微鏡（STM）から放出される光の偏光を測定して資料の局所の磁性を解析する方法の開発、STMの探針（チップ）を2、3、4本にした多探針STMの開発（これによって試料の任意の位置で、ナノスケールの電気伝導度が初めて測定できるようになった）、後年に（十数年後の2016年に）NECとの10年以上にわたる共同研究を経て実用化に至った原子スイッチの原型の開拓、などである。図26に多探針STMの開発を当時の『理研ニュース』で紹介した際に表紙に掲載された図を示す（試料の任意の位置で、ナノスケールの電気伝導度を測定することが、初めて可能になったことを示す図）。

青野は、物質・材料研究機構の岸輝雄理事長に引き抜かれ、5名の研究員と4



図25 原子スケール・サイエンジニアリング研究グループの主催による国際会議

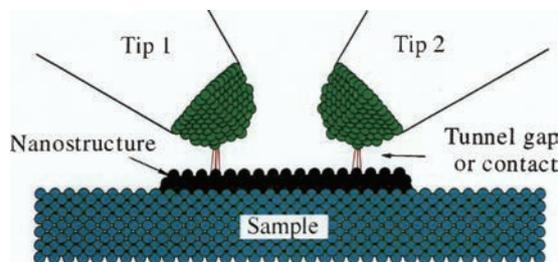


図26 『理研ニュース』（No.209, 1998年）の表紙を飾った2探針STMの図

名のポスドク全員が、2002年に理研から移籍した。2007年からは文科省の「世界トップレベル研究拠点育成事業（WPIプログラム）」の国際ナノアーキテクトニクス研究拠点MANAの拠点長として活躍中である。

第14節 生化学システム研究室

理研の化学工学研究室は、1945（昭和20）年、大山義年（東京工業大学元学長、東京工業大学名誉教授）が主任研究員に就任して発足し、主として液体および粉粒体の攪拌混合の研究が展開された。その後、1964年に井上一郎（東京工業大学名誉教授、理化学研究所名誉研究員）が研究室を継承した。1973年には、山口賢治（北海道大学名誉教授）が粉粒体工学研究室を興して独立している。

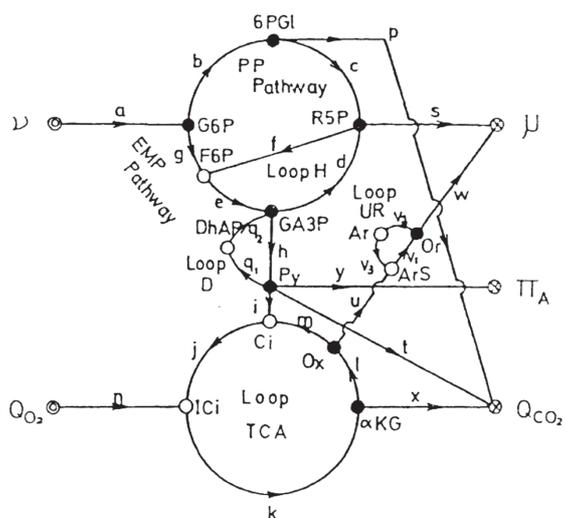
1985年、井上が退官した後、遠藤勲が化学工学研究室を主宰することになった。遠藤の主要な関心は生物化学工学にあり、1996（平成8）年には生化学システム研究室と改称している。化学工学の定義は研究者によって異なるが、物質やエネルギーの流れに着目しながら、「工場やプラント全体として、化学製品を合理的に生産するプロセスシステムを考案したり設計したりする学問」という言い方ができるかもしれない。そのような化学工学を生物の代謝・生理まで拡張したのが、生物化学工学といえる。以下、生物化学工学を中心に生化学システム研究室で進められた研究を紹介する。

生物化学工学の開拓

遠藤は理研に入所した1970年、井上主任研究員から、「生物化学工学の研究をしたいなら、生物の代謝・生理を、工学の言葉で表現しなければならない」と指摘された。これはまさに正鵠を射た指導であった。例えば微生物の中の酵母菌を取り上げてみよう。酵母菌の代謝経路の研究は当時もかなり進んでおり、例えばグルコース代謝経路などは、その全容がほぼ解明されていた。つまり、グルコースがまずグルコース-6-リン酸になり、それがどう分解されて何と何になり、さらにその先がそれぞれどう変化して、最終的に水や二酸化炭素に変換される……、という道筋自体は、明らかにされていた。

しかし、これは物質変換のマップではあるが、物質を実際に作り出すシステムではない。遠藤が生物化学工学を名乗るためには、井上が指摘したような「代謝・生理を工学の言葉に置き換える」ことをしなければならなかった。では、具体的には、どうするのか。

酵母菌は、基質（ここでは糖分）を消費し、酸素を呼吸し、菌体を増殖させ、アルコールを生産して、炭酸ガスを放出する。そこで、これらが時々刻々どう変化していくのか、モニターするシステムを作る必要がある。具体的には、単位菌体量、単位時間当たりの菌体量の変化、糖分（グルコース）の消費速度、アルコールの生産速度、酸素呼吸速度、炭酸ガス放出速度などを観測できるシステムである。その上で、酵母菌が健全に育成、アルコールを生産するよう、常に全体



6PGI: 6-ホスホグルコン酸
 F6P: フルクトース-6-リン酸
 Py: ピルビン酸
 ICI: イソクエン酸
 Ci: クエン酸
 Or: オルニチン
 Ar: アルギニン
 G6P: グルコース-6-リン酸
 R5P: リボース-5-リン酸
 GA3P: グリセルアルデヒド-3-リン酸
 DhAP: デヒドロキアセトンリン酸
 Ox: オキサロ酢酸
 αKG: α-ケトグルタル酸
 ArS: アルギニノコハク酸

PP Pathway: ペントースリン酸経路
 EMP Pathway: EMP (エムデン-マイヤーホフ-パルナス) 経路
 Loop H: ヘキソース-リン酸回路とEMP経路の一部
 Loop TCA: TCA回路 (クエン酸回路)
 Loop UR: 尿素回路
 Loop D: デヒドロキアセトンリン酸回路 (ここではこう呼ぶ)

図27 代謝信号線図

を制御する仕組みが必要となる。

しかし、その当時、できることは限られていた。①培養液を採取して濁度(だくど)を測定し、濁度と乾燥菌体量との較正曲線から菌体量を求めること。②培養液を液体クロマトグラフィーに注入して糖分濃度を求めること。③培養液をガスクロマトグラフィーに注入してアルコール濃度を求めることであった。

遠藤が代謝・生理を工学的に記述できるようになったのは、1978年である。菌体量の変化 μ 、アルコールの生産速度 π 、炭酸ガス放出速度 Q_{CO_2} を、それぞれ、糖分の消費速度 v と酸素呼吸速度 Q_{O_2} と関係づけることができた(図27)。遠藤はこの図を「代謝信号線図」とよんだが、それは、個々の変換経路における変化量ないしは変換速度が、次の代謝物質の変換にどのように関わっているかを指し示しているからである。つまり、個々の物質代謝の変化の相対的な関係を、入・出力関係で表示した。

プロセスの情報化、知能化とエキスパートシステムの構築

生物化学工学における中心課題は、生物反応状態を正しく迅速に測定し、それに基づいて反応プロセスを制御することである。

長棟輝行研究員(元化学工学研究室副主任研究員、現東京大学工学系大学院教授)と遠藤は、1989年、富士ファコム制御(株)と小松川化工機(株)と共同で生物反応プロセスの自動監視制御システムを世界に先駆けて開発した。ここでは次のような三つの技術を開発した。

- ①セラミックス管を用いて、反応液を自動的にサンプリング採取するシステムを開発して、基質濃度、細胞外代謝生産物質濃度をインラインで測定できるようにした(図28)。この技術によって遠藤は、1993年4

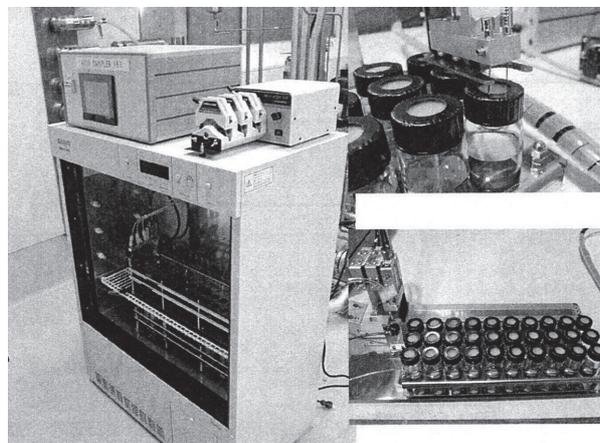


図28 生物反応プロセスの自動監視制御システム (小松川化工機(株)、エイエスアール(株)提供)

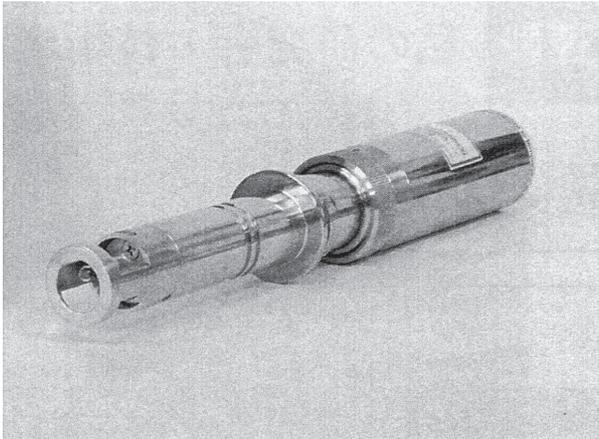


図29 オンライン濁度センサー
(小松川化工機(株)、エイエスアール(株)提供)

月、市村産業賞功績賞を受賞した。

- ②オンライン濁度センサーを開発し、微生物の増殖速度を実時間で計測できるようにした。これらの測定センサーは、蒸気殺菌(120℃、1.2ゲージ気圧)に対応でき、かつ長時間培養にも耐えられるものにした(図29)。
- ③測定時に入り込む外乱をカットするため、カルマンフィルター(ソフトウェア)を開発し、比速度をオンラインで測定できるようにした。ちなみにカルマンフィルターというのは、誤差を含む観測値から時々刻々と変化する量を推定する計算法のことである。

以上を総合して微生物の代謝活性を表すファクトデータベース(1次情報のデータベース)を構築した。図30はそのシステムの概要である。バイオインダストリーでは測定センサーの開発が著しく遅れていたもので、遠藤らの開発した自動監視制御システムは世界の研究者から注目を浴びた。

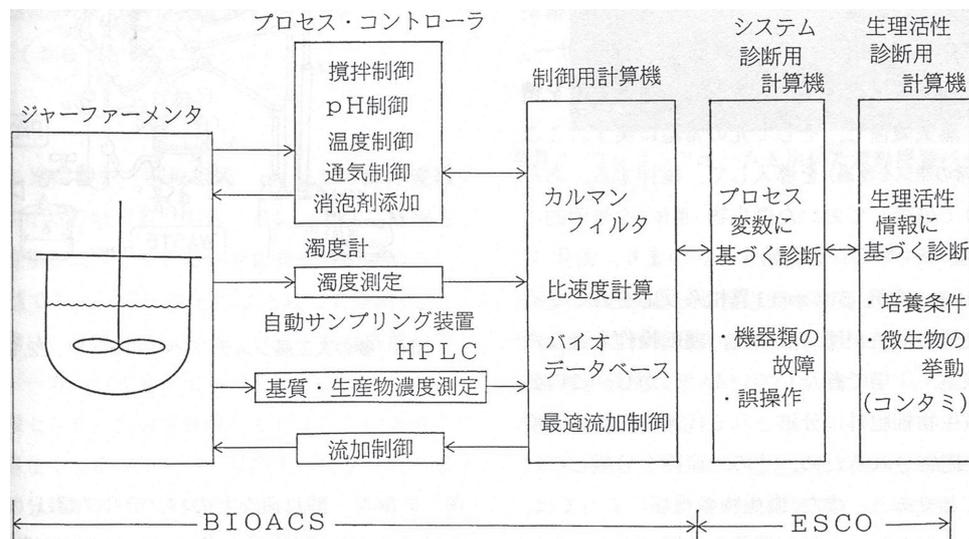


図30 バイオプロセスの自動監視制御システム

次に、このシステムを基礎に、バイオプロセスの異常診断と対応措置が可能なエキスパートシステム(人工知能ソフトウェア)を構築した。生物を扱う産業の現場では、1次情報が得られていても、想定外の事態、例えば雑菌の混入や反応器の故障がいつ起こるかもしれない。このような時、現場では熟練作業員の経験と勘に基づいて処理をしていた。グループに加わった浅間一研究員(生化学システム研究室元副主任研究員、現東京大学工学系大学院教授)が中心となり、微生物反応の異常診断用エキスパートシステムを開発した。すなわち、前記データ

ベースに格納されている代謝機能に関するファクトデータベースに基づいて、まず熟練作業員にヒアリングし、かつ実験で確認した知識をファジーメンバーシップ関数で表現して、フレームを構築した。これは、if thenルールに基づく前向き（原因から結果）および後ろ向き（結果から原因）の推論エンジンで成り立っている。

このシステムを作った目的は、人と計算機が相互に通信し、協調しながら微生物反応プロセスを運転、監視、保全すれば、生産現場では、より安全にプラントを運転できると考えたからである。このころ遠藤らは、フィンランドのヘルシンキ工科大学のリンコ教授（Pekka Linko）や早稲田大学の故平田彰教授と共同研究を行っており、この研究業績で遠藤は、ヘルシンキ工科大学から名誉工学博士号を授与された（1994年9月）。

新規のバイオリアクターを開発

これまで、バイオリアクターといえば通気攪拌槽のことであった。遠藤らが研究した代謝機能の解析も、自動監視制御システムやエキスパートシステムの構築も、全て通気攪拌槽を用いていた。この装置は、pHセンサー、温度センサー、前記各種センサーを装填して、培養液を槽内に蓄えたのち蒸気殺菌し、元の常温に戻すようになっている。そしてここに無菌空気を導入して攪拌する。その後、あらかじめフラスコ内で培養しておいた微生物を植菌して、微生物反応を開始する。言い換えれば、微生物（固体）、培養液（液体）、空気（気体）という三つの異なる物質相を用いた反応装置である。

装置の構造が簡単な上、運転操作も楽なため、現在でも実験室や工場で広く用いられている。しかしこの装置の欠点は、細胞外に分泌される代謝生産物の濃度が増すと、反応が阻害されるようになることで、その解決策として、生産物を系外に分離しなければならない。また、微生物の種類によっては、前述のセンサー類が機能を発揮できなくなるケースがある。

そこで遠藤らは、反応と生産物の分離が同時にできる分離型バイオリアクターを開発した。その一つ目が多孔質管型バイオリアクターで、これは動物の腸にヒントを得た反応装置である（図31）。1975年、遠藤が理研に入所して早々に発明したものの、当時は良い濾過膜に恵まれず、10年以上もアイデアのまま眠っていた。1985年ごろになって、滅菌操作に耐える堅牢なセラミック管（孔径 $1\mu\text{m}$ 以下）がフランスで開発され、市販されるようになった。もともとはウラン同位体を隔膜分離するために開発されたもので、遠藤らは早速このセラミック管を購入し、それを中心に管型バイオリアクターを構成・製作した。

この装置により、大腸菌、乳酸菌、酵母菌など微生物が増殖しても、液の粘度がそれほど変わらない高密度の培養が可能になった。例えば（株）ヤクルト本社中央研究所と共同して、乳酸菌を高密度培養し、乳酸飲料を高効率に生産することに成功した。また、住友重機械工業（株）、アサヒ

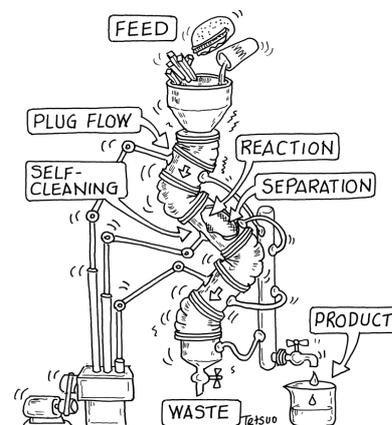


図31 夢の人工腸システム
(ペトロテック, 22,91 (1999))

ビール（株）と共同研究を進め、リングワインを生産するシステム装置を開発した。

新型の分離型反応装置の二つ目は、ウレタン発泡体を用いた流動層型バイオリアクターである。

放線菌や黴^{かび}などの微生物の中には、抗生物質や酵素を生産する極めて有用な微生物がある。これらを通気攪拌槽の中で培養すると、菌糸と菌糸とが絡み合って培養液の粘度が極めて高くなる（パルピー増殖）か、あるいはマリモのような小球体（ペレット）を形成する。これらは、植菌量、培地組成、pHなどの微妙な差によって生じる生物増殖の分岐現象である。

ペレット状に増殖した場合、その直径が大きくなると、栄養物質や酸素がペレットの内部まで行き届かなくなり、内部の菌体が死滅して空洞化する。ペレットはリアクター表面に浮いてきて、触媒機能も著しく劣化する。一方、パルピー増殖して培養液の粘度が高くなると、リアクター内部に装填した各種センサー表面を微生物が覆ってしまい、正しく計測できなくなるばかりか、目的生産物を含む培養液と微生物との分離が、著しく困難になる。

遠藤らは、糸状菌を固定化するさまざまな材料を検討し、その結果、ウレタン発泡体が最適な材料であることを見いだした。具体的には、ウレタン発泡体を適当な大きさ（約5mm角）に切り、蒸気滅菌する。すると発泡体表面が親水化され、糸状菌が適度に付着し、その付着密度も適当なために、酸素や栄養分も微生物に十分に供給されることが分かった。

神鋼パンテック（株）と共同して、ペニシリン生産菌（放線菌）をこの発泡体に付着させ、流動層型バイオリアクターを開発した。すると、目標どおり、リアクター内部に装填した各種センサーの表面が常に発泡体によってぬぐわれる状態となり、かつ、ペニシリンを含んだ培養液と微生物は、きれいに分離できた。さらに、回分反応の一時期に培養液を抜き出し、それを、滅菌処理した培養液と発泡体につき足す継代培養を行った結果、通常の実験操作の実に100倍もの生産性を上げることに成功した。

分離型反応装置の開発と同時に、分離工程そのものの研究も始めている。言うまでもなく、分離プロセスは製品化に直結するため、安全性や価格を支配する重要な工程である。1985年以降、さまざまな有機・無機膜や液体クロマトグラフィー用担体、それらのプロセス化技術などが登場してきた。そのような背景の中で遠藤らは、東京大学の古崎新太郎教授（現東京大学名誉教授）をはじめ多くの大学、企業の研究者の協力を得て、「バイオ分離プロセス工学」を立ち上げた。世界中の研究者がこの考え方に賛同し、国際会議も頻繁に開かれるようになった。

光応答性ニトリルヒドラーゼの構造と機能

環境負荷の少ないグリーンケミストリー（環境共生化学）が標榜されているが、2016年現在、その最大の成功例が、「ニトリルヒドラーゼを用いたアクリルアミドの生産」と見なされている。アクリルアミドは、世界の年間生産量が数十万トン程度と推定されており、ポリアクリルアミドに合成されて、高分子凝集剤や

製紙・有機ガラスなどで使われている。かつては金属触媒を用いて製造されていたが、1980年代にニトリルヒドラーゼ（酵素）による生産技術が開発され、金属触媒方式に取って代わった。この酵素プロセスは効率が極めて高く、省エネで低環境負荷のため、今日では大半がこの酵素方式で生産されている。

その仕組みを簡単に紹介すると、原料（基質）のニトリル化合物に酵素を添加すると、酵素は基質と結合するので、そこに光を当てる。すると、酵素分子の中の二つのシステインが二つのスルフィン酸に酸化されるとともにNO分子が放出される。この過程で酵素が活性化され、水和反応が生じ、アミド化合物ができる。そして変換された分子は酵素から離脱する。以上が、現在分かっている酵素によるアクリルアミド生産の概要である。

遠藤らがこの酵素反応と出会ったのは、まさに偶然であった。友人から電話があり「自分たちが培養している微生物は、いつもデータがばらついて困る」というボヤキ話だった。遠藤はただちに「そのようなことはない。測定器が不備か、測定法が間違っているからだ」と答えた。

しかし数カ月後、再び友人から連絡が入り、実験日誌に基づいてデータを整理したところ、曇りの日よりも晴れの日の方が、明らかに微生物活性が高いということだった。遠藤は、このバクテリアはひょっとすると光応答性があるのではないかと直感した。試料を譲り受けて実験すると、微生物中の酵素（ニトリルヒドラーゼ）そのものが、光応答性を示したのである。この酵素の活性は、暗所に置くと一日で活性を失うが、失活している過程で光を照射すると、短時間のうちに元の活性に戻ることが判明した。

その後、遠藤らはその仕組みを検討し、この酵素が3個の鉄原子を持っており、光を照射すると2個の鉄に還元されることが判明した。また、失活させる物質は一酸化窒素NOで、これが鉄原子に結合するためであることも突き止めた。NO分子が鉄元素から脱離する時間はナノ秒以下であった。この研究は、星野幹雄副主任研究員（元放射線化学研究室）、野口功研究員（現名古屋大学理学系大学院教授）らと共同で進めた。

次に、酵素のどこに鉄原子があるのか、鉄原子とNOはどのように結合しているのかを検討した。この問題を解明するために、酵素を結晶化し、X線構造解析をしなければならない。しかし、その結晶を得ることが大変であった。X線を照射しても壊れない結晶で、一辺100 μm くらいの立方体が必要であった。この結晶を得るためにかなり長い時間がかかった。

中迫雅由研究員（慶應義塾大学理工学系大学院教授）をはじめ、理研の多くの研究員の協力を得てようやく結晶化に成功し、X線を照射することができた。論文は*Nature*に投稿した。ところが、アメリカ、スウェーデンの研究グループが同じ酵素の結晶を解析し、姉妹誌に1週間早く投稿していたことが分かった。

遠藤らの落胆は大きかった。しかし、1997年に発表されたライバルの論文を精査すると、解像度ははるかに悪く（2.63 \AA ）、水和反応酵素なのに水分子が一つも見えていなかった。一方、遠藤らの構造解析の解像度は、1.7 \AA だったので、酵素の周りに水分子が600個以上も見えていたのである。この酵素は、 α と β 二

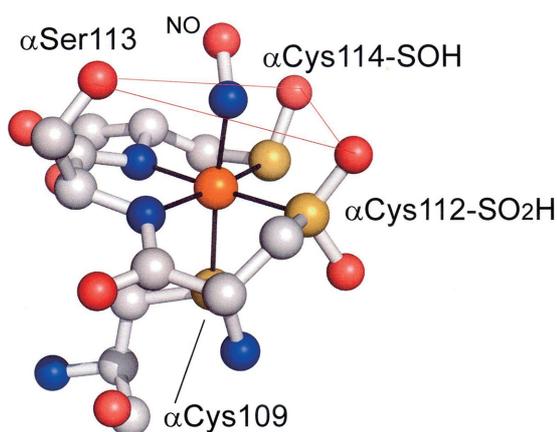


図32 Fe原子に結合しているNO分子

つのサブユニットから構成されており、水分子は酵素全体の構造を安定化すると同時に、サブユニット表面を中性化している。さらに鉄分子の周りには18個の水分子が配位していて、安定化に寄与していた。ちなみに、計算機シミュレーションによれば、水分子を除くと分子構造は潰れてしまった。

次に、すでに概要を述べた活性化の仕組みが明らかになった。二つのアミノ酸（システイン112、114）が、それぞれスルフィン酸とスルフェン酸とに翻訳後修飾されていて、もう一つのアミノ酸（セリン113）とで鉄原子に結合するNOを指輪の立て爪のように保持していた（図32）。この状態では不活性であるが、

光を照射すると二つのシステインが共にスルフィン酸に酸化して、NO分子を脱離し、活性化することが分かったのである。

このように、鉄原子の周りにおける水分子の配位の様子や、アミノ酸が特別に翻訳後修飾されていることなど、極めて新しい知見を発見することもできた。これらの成果は、国際的に著名な蛋白質データベースに掲載された。

遺されたNO分子を脱離する速度の問題は、東京農工大学の養王田正文教授と秋田大学の尾高雅文教授らが研究を続けており、酵素反応速度論に新しい展開や顕著な貢献が期待されている。

実は、生化学システム研究室では、ここで紹介したテーマ以外にも、ロボット工学、ナノマイクロバイオテクノロジー（元生化学システム研究室副主任研究員、現在東京大学生産技術研究所長の藤井輝夫研究員らと進めたポータブルで利便性の高い流体システム）、ヒト遺伝子自動解析システム、沙漠工学などの研究が進められてきたが、詳細は省略する。

自動車産業に貢献した薄鋼板のプレス技術

《薄鋼板成形技術研究会》

財団法人理化学研究所の時代、第三代所長大河内正敏により、研究成果・発明を商品化することで、財源を確保する体制が確立された。1927（昭和2）年の理化学興業（株）創設以降、63社からなる理研産業団が形成され、さまざまな分野への展開が図られた。敗戦と共に財閥解体の一環として理研産業団は解散となり、理研は（株）科学研究所に改組された。その後、基礎科学の重要性に鑑み、1958年に国の出資を主とする特殊法人理化学研究所として再スタートした。

この戦後のかなり早い段階から、産業界との連携活動を開始したのが、自動車車体生産技術を対象とする「コニカルカップテスト研究会」である。理研の塑性加工研究室が主導し、自動車・鉄鋼業界との連携を図ったものである。この研究会は「薄鋼板成形技術研究会」として、2017年現在も年4回、130名を超える自動車・鉄鋼会社の技術者の参加を得て、活発な活動を続けている。理研の塑性加工研究室、変形工学研究室、素形材工学研究室と、薄鋼板成形技術研究会の関わりは、60年を超えることになる。

薄鋼板の成形技術に関する膨大な成果と知識は、同研究会の編集（編集委員長・林央）による『プレス成形難易ハンドブック第4版』（日刊工業新聞社、2017年）に詳しく書かれているが、ここでは、理研の産業界との連携の一例として、同研究会の意義と歴史を紹介する。

第1節 自動車・鉄鋼産業と理研の関わり

研究会スタートの背景

わが国の主要製造業の市場規模は年間約290兆円であるが、その中で自動車関連産業は52兆円と約18%を占め、日本の産業をけん引する位置にある。関連産業の従事者は530万人と全産業人口6300万人の9%弱になる（2014年経済産業省のデータより）。2016（平成28）年の国内自動車生産台数は920万台であるが、海外における日本企業の生産1900万台を加えると、世界の総生産台数9500万台の約3割に達し、世界をリードする状況にある。

このように重要産業として発展してきた自動車産業も第二次世界大戦の敗戦直後は厳しい時代にあった。GHQの管理下におかれた自動車生産は、1945年のトラック生産再開、1947年に小型乗用車の限定生産許可を経て、1949年により乗用車の生産解除に至った。本格的な自動車産業の復興は1951年のサンフランシスコ講和条約調印を待つことになる。政府の国産車構想を背景に、1950年代後半に黎明期を迎え、近代的な自動車工場の建設が相次ぎ、急速に生産拡大の方向に向かっていった。

自動車の技術開発の主な対象は、パワートレイン（駆動系）と車体である。車体は、デザイン・機能・軽量化・安全性を付加し、自動車の商品価値を高める役割を担う。その車体をつくる生産技術がプレス成形である。プレス成形は、金型を用いて薄板材料から容器状のものを形作る工程であり、一見単純に見える作業である。しかしそう簡単ではない。成形中に割れることなく所定の形状と寸法を実現するために、自動車車体のように複雑な形状を持つ大寸法の部品では多くの課題がある。金属薄板が所定の製品になるかどうかの性能が「成形性」とよぶものである。

金属薄板のプレス成形に関する研究は、20世紀に入り欧米を中心に展開され、今日の成形理論の基礎となる論文が多く発表されてきた。わが国では、1935年に福井伸二が深絞り成形の理論的考察と実験結果を発表し、プレス成形に関する系統的な研究が始まっている。鍛造、プレス成形、高速加工、潤滑など塑性加工の幅広い分野で活躍していた福井は、1945年に理研の主任研究員として塑性加工研究室を主宰し、理研をプレス成形研究の拠点に築き上げた。研究室では、福井が深絞り成形で論じた円錐ダイを利用したコンカルカップテストをはじめ、多くの成形性評価試験法の理論的・実験的研究を展開した。

車体の主な材料は薄鋼板である。戦後、国内における車体用薄鋼板の生産はわずかで、大半は輸入に頼る状況であった。鉄鋼産業の近代化が進められ、1954年に自動車用鋼板の国産化が始まり、輸入材から国産材への切り替えが始まる。

車体のプレス成形の中心課題は、破断せずに車体部品を成形できるかどうかであった。しかし自動車のプレス成形の現場では、どのような材料がプレス成形に優れているか、材料の選択基準を何に求めれば良いか分からなかった。一方、鉄鋼メーカーでは、どのような薄鋼板が自動車用として使えるのか、暗中模索の状態にあった。実際のプレス成形評価値（例えば不良率）と、薄鋼板の冶金的特性値や薄板製造工程の操業条件（例えば冷間圧延率）との関係を調べるなど、努力が重ねられたが成功しなかった。国産化された薄鋼板が車体に加工できるのか、その判定基準となる成形性を評価する指標が求められたのである。

このような状況において、鉄鋼、自動車、それぞれの技術者からコンカルカップテストが成形性の評価に使えるのではないかと提案が出された。共同で実験的検証を進めるために、理研が主導する形でコンカルカップテスト研究会設立の準備が始まった。

コンカルカップテスト研究会

1957（昭和32）年1月25日、松原寅男（八幡製鐵（株））、宮島尚（日産自動車（株））、吉田清太（科学研究所）の各氏が第1回会合を開催し、その後、小井戸（富士精密工業（株））、羽鳥（トヨタ自動車工業（株））、熊井（富士製鐵（株））の各氏が加わって数回の会合を重ねた。4月5日にコンカルカップテスト研究会準備会を開催し、会長に福井伸二、推進員として宮島、松原、吉田（事務局を兼ねる）を選出した。こうして4月25日に自動車会社、鉄鋼会社、研究機関から成る共同研究組織「コンカルカップテスト研究会」が活動を開始したのである。

発足時の研究会は次の六つの組織で構成されていた。

富士製鐵株式会社（現在 新日鐵住金（株））

八幡製鐵株式会社（現在 新日鐵住金（株））

トヨタ自動車工業株式会社（現在 トヨタ自動車（株））

日産自動車株式会社

富士精密工業株式会社（プリンス自動車工業を経て、日産自動車（株））

科学研究所（現在 理化学研究所）

研究会発足と前後して、1959年に提案された吉田清太によるプレス成形域区分の概念は、それまでの曲げと絞りという単純な成形性の概念から、「深絞り」、「張出し」、「伸びフランジ」、「曲げ」に区分される成形性へと展開され、プレス技術、材料特性、成形性試験法の相互の関連が重要であることを明確に示した。この提案と研究会の発足を受けて、プレス成形の研究は加速度的に活発になった。

コニカルカップテストは、プレス成形現場の実証試験によりその有用性が確認され、1963年にJISの規格として制定された。プレス成形技術と薄鋼板製造技術の間の架け橋として、成形性評価試験が導入されたのである。それは二つの技術分野の人々が垣根を越えて話を通じ合える共通語となった。これこそが成形性の概念が産業界に導入された最大の意義である。成形性の概念が明確に位置づけられたことで、プレス成形の技術水準が高まり、現在まで続く自動車産業と鉄鋼産業の発展の基礎となったのである。

その後、組み立てラインを持つ国内の自動車会社、高炉を有する鉄鋼会社の参加が進み、現在の薄鋼板成形技術研究会となっていった。発足時からの研究会の



『理化学研究所報告』の役割

研究成果は、論文や講演を通して発表されるが、薄鋼板成形の分野では、論文誌『理化学研究所報告（理研報告）』がきわめて重要な役割を演じてきた。理研の研究者は専門の日本塑性加工学会などに発表するとともに、『理研報告』（1992年まで刊行）と欧文誌*Sci. Papers IPCR*（1991年まで刊行）へも発表し、多数の素晴らしい研究成果とともに、理研の名声をも高めてきたのである。

例えばプレス成形分野でターニングポイントとなった1959年の吉田清太博士の「薄板のプレス成形の塑性学的成形域区分と成形性試験」は特に有名である。

術語つまり専門用語は、文字どおり、学問の中身を象徴している。例えば成形域区分という言葉は、そのような概念が必要であるから生まれたのであり、それが議論の対象となることで、成形に関する高度な概念、改良が加えられていった。新しい世界がそこから広がっていったのである。

形状凍結性、変形状態図、予変形効果、極限変形能など、当時生まれた多岐にわたるキーワードは、現在もなお、プレス成形技術分野で広く使われている。薄鋼板成形技術研究会が60周年記念として刊行した『プレス成形難易ハンドブック（第4版）』でも、理研報告の研究論文はいまなお数多く引用されている。



吉田学校の「修学旅行」

塑性加工研究室・変形工学研究室では、企業から多くの委託研究生を迎え入れ、共同研究を進めてきた。1960-70年代にかけて、毎年5-10名の研究生が在籍し、総数は優に100名を超える。鉄鋼会社、自動車会社にとどまらず、部品メーカー、プレス機械メーカー、潤滑油メーカーなど、幅広い業種から研究生が派遣されてきた。

若手の研究者・技術者は、研究室員とタッグを組み、研究を推進した。それは、プレス成形の研究を牽引する「吉田学校」とよばれた。伝説の「吉田学校」には修学旅行があった。毎年、1週間程度の会社訪問旅行が計画されたのである。製鉄所、自動車製造ラインなどの見学を通じて、見聞を広める機会が設けられた。会社間の垣根を越えた交流の場であり、会社に戻ってからも、多くの優れた業績が生まれた。

委託研究生と共に、大学・大学院在籍の学生も多く受け入れていた。これは当時としては画期的だった。理研共済会主催の春秋のスポーツ大会で、例えばソフトボールには研究室から2チーム編成で出場するほどの大所帯であった。

研究テーマについては、次節で表1にまとめておく。この研究会における主要なテーマの設定、あるいは基礎的研究成果の発信基地として、理研の塑性加工研究室、変形工学研究室は大きな役割を果たしていった。吉田は多くの研究生を受け入れ、企業との共同研究を積極的に推進し「吉田学校」とよばれた。その研究室には、累計で100名を超える企業からの技術者が在籍した（エピソードを参照）。

同じ時期に国際深絞り研究グループIDDRG (International Deep Drawing Research Group) が結成され、1960年にはパリで第1回の国際会議が開かれた。この国際会議でコニカルカップテストの提案、プレス成形域区分認識の報告がなされ、わが国の成形研究の存在感を示すことができた。また、この組織を通して国際交流が活発になり、わが国のプレス成形技術は世界的な水準へと飛躍することになったのである。

1960年以降、わが国の経済活動は急速に拡大した。国民の生活水準が上がるとともに国際競争力も著しく強化された。自動車メーカー各社は競って乗用車の専門工場を新設し、生産台数は1965年には約190万台となり、そのうち20万台が輸出されるようになった。

研究会は「薄鋼板のプレス成形と試験法研究会」と名称を変え、コニカルカップテストを含め多くの成形性試験法の体系化に関する共同研究を進めた。成形性試験は直接試験と間接試験とに分けられる。直接試験は実際のプレス成形をモデル化して特性値を抽出しようとするものであり、実際のプレス成形の一部を取り出した部分実寸モデル試験、あるいは全体を縮小したモデル試験などが行われる。また、実物に近いモデル試験から、単純なモデルに分解した基本形状試験まである。一方の間接試験は、円筒や角筒などの基本形状による成形、あるいは引張試

験などによって、より純粋な変形の特性を抽出しようとするものである。成形性試験を利用することにより、割れを対象とした成形性と材料特性の相関関係を明らかにする活動が展開された。

これらの成果は、成形性を向上するための材料開発に生かされ、集合組織の制御による深絞り性に優れた高 r 値鋼板の開発へとつながっている。材料の機械的性質を得る引張試験に関して、国際規格ISOで規定されていた引張試験片形状について理研が中心となって、研究グループを組織し検討を進め、JIS規格として制定することにも尽力している。

第2節 経済の成長と体系的な成形性研究

総合成形性と成形難易の概念の確立

日本の自動車産業はさらなる成長を続け、生産台数は飛躍的に伸び、1970（昭和45）年には530万台、1972年には700万台に達し、そのうち200万台が輸出されるようになった。日本の人口は1億人を超え、GNP（国民総生産）もアメリカに次いで世界第2位になった。

1964年「薄鋼板成形技術研究会」と名を変えた研究会は、割れに限定されていた成形性研究の対象を広げた。プレス成形現場における観察を通して不良現象を収集し、不良現象の実態・発生原因・対策技術・影響する材料特性を体系的にまとめた。割れ以外の主要な不良現象であるしわ、寸法精度不良、外観品質不良も含めた成形性研究を課題とするようになった。これは、技術の進歩と自動車への社会的要求が高度化・多様化してきたことに起因する。耐割れ性、しわ・外観品質を対象としたなじみ性、寸法精度不良の成形可否をみる形状凍結性、などを主要な成形性評価とする総合成形性を問題とするようになった。

寸法精度不良は加工後の弾性回復によるスプリングバックが発生原因であるが、この現象に材料の降伏点が大きく影響する。降伏点を下げることが求められ、低降伏点薄鋼板であるオープンコイル焼鈍材や炭素などの不純物を低減した極低炭素IF（Interstitial Free）鋼が開発され、プレス現場で採用されるようになった。

総合成形性を評価するために新しい手法も用いられた。1965年にキーラー（S.P. Keeler）が提案した成形（変形）限界線FLD（Forming Limit Diagram）は、成形性評価の手段としてその価値が認識された。一方、わが国独自の研究としては、変形限界に対する変形経路の影響、変形状態図の提案などがあり、現在も世界的に受け入れられている。これらの研究は理研で展開されたものである。しわに関する系統的な研究も積極的に進められ、その後の面ひずみの研究へと引き継がれていった。

プレス成形において、製品の形状・寸法に対する被加工材の成形の難しさ、すなわち成形難易を定量的に予測・評価することが求められる。この成形難易という概念は、薄鋼板成形技術研究会活動の早い時期から取り上げられ、1967-69年には成形難易分科会において、活発な研究が実施された。成形難易は、プレス品

の形状と寸法で決まる成形度（例えば素板の線長増加率で表される指標）と薄板特性（成形性・変形能）に対して、適用される成形技術（型設計、工程設計、潤滑など）の影響度を評価することである。成形性が材料の優劣を表す相対的な評価であるのに対して、成形難易は絶対評価であるといえる。

成形難易評価法を確立することにより、プレス成形の立場からは、生産準備段階における部品設計、工程設計、型設計、成形方法選択などの生産準備段階から、実生産における手直し、成形不良率の低減、鋼板のグレートダウンなどの対策・指標を得ることができる。また、鋼板製造の立場からは、適正な鋼板品質供給基準の確立、適正鋼板の製造指針を得ることができるのである。

薄鋼板成形技術研究会の活動は、成形難易を定量的に事前評価する手法を求めて展開されてきたとあってよい。そのためのさまざまな課題に対して、理研の変形工学研究室、素形材工学研究室が、基礎的研究の立場から参画してきたのである。

わが国の鉄鋼技術の進歩が世界的に注目を浴び、1970年に東京で鉄鋼科学技術国際会議が開かれ、その一環として第6回IDDRG会議も開催された。成形技術、材料開発、成形性研究におけるわが国の成果が注目され、これを契機にプレス成形における日本の先進性が認められることになった。福井伸二は1972年までIDDRG会長を務めた。

高強度鋼板の車体への適用の始まり

1973年と1979年の二度にわたるオイルショックは、世界の経済活動に大きな衝撃を与えたが、わが国はいち早く回復し、産業活動はいつそう活発になった。自動車の生産台数も増加し続け、1979年には1000万台を突破、そのうち半数の500万台が輸出されている。

オイルショックの影響は自動車車体製造にも強く現れた。低燃費化、排ガス規制対策のために軽量化が追求された。そのために車体構造の設計変更や高強度鋼板（ハイテン）採用による車体軽量化が展開されることになる。高強度鋼板のプレス成形に関する検討は1970年ごろから始まっていたが、実用化への本格的な検討は、オイルショックのインパクトで加速された。アメリカで始まった消費者運動により、自動車の安全対策も強く求められるようになり、高強度鋼板はこの要請にも対応できる材料として注目された。

高強度鋼板は難加工材であり、その上に薄肉化（ゲージダウン）が使用上の必要条件であるために、新たな成形技術が必要になった。この困難な事態に対応するために、成形技術、材料製造技術、基礎的研究の結合はいつそう強まった。1973年に薄鋼板成形技術研究会が実施した高強度鋼板の成形トライでは、比較的単純な形状のものを除いて、多くの部品は破断発生のために成形不可であり、破断が回避できた場合でも、形状不良や寸法精度不良のために実用化は難しい状況にあった。しかし引張強さが500MPa以下であれば、何とか成形できるという感触が得られたのである。鉄鋼製造では成形性に優れた高強度鋼板開発の努力が続けられ、低合金鋼や複合組織鋼板を生み出し、自動車車体への採用を促した。

高強度鋼板製造のために開発された連続焼鈍法の役割は非常に大きく、この技術は世界中に輸出され、普及している。

高強度鋼板の成形技術に関しても、プレス作業時の型かじり問題から始まり、しわや面ひずみの制御対策へと総合的な検討が展開された。型かじりは高強度鋼板採用により顕在化した不良現象であるが、基礎的な研究を基に、そのメカニズムの解明が理研を中心に進められ、対策技術の開発が研究会で議論された。1960年代に集中的に実施されたなじみ性・形状凍結性に関する検討が、高強度鋼板の実用化という課題を抱えて再び活発になった。微小な形状不良である面ひずみは、自動車車体の見栄えを損ない製品価値を下げることから、その制御が重要になった。自動車メーカーから実際のプレス部品を集め、面ひずみの実態解明を行い、発生機構の解析、対策技術への展開が共同研究として実施された。面ひずみ解析の手法としての「なじみ線図」の提案、影響因子として低ひずみ域の材料特性が重要であるとの指摘は理研が行った。

1979年には高強度鋼板を採用した自動車が出た。高強度鋼板部品はホワイトボディ重量の5-10%であった。

防錆用表面処理鋼板の成形

北米や北欧の寒冷地向けの輸出車の冬季の凍結防止塩による腐食対策として、防錆用表面処理鋼板（めっき鋼板）が使われるようになり、車体の長寿命化のためにその使用量は増えることになる。めっき鋼板では、プレス成形時のめっき層のはく離が作業環境の劣化をもたらすとともに、めっき層の存在による摺動特性（摩擦特性）の変化が成形性の低下をもたらす。1980年代後半には理研が中心となって、表面処理鋼板のトライボロジーの研究が進められた。その中で、摺動性を評価する試験法として、「PRIKEN-シミュレーター」が開発され、広く使われるようになった。

IT時代のプレス成形

順調に成長を続けてきたわが国の経済活動も、1980年代に入ると低成長期とよばれる時代になり、貿易摩擦という問題も抱え、困難な時代を迎えた。自動車産業も一時的に生産が減少するが、その後年間生産台数は増加傾向を続けた。一方で、消費者の自動車に対する高級化、個性化志向から車種の仕様が広がり、大量生産指向であるプレス成形技術にも、多種少量生産技術の開発が求められるようになった。

具体的には、プレス成形のFMS化、CAD/CAM/CAEの導入、複合技術化などが課題となった。これらの実現のためには、過去の技術・研究の成果に基づいた総合的な成形難易評価システムの確立が急務となった。数値解析による成形シミュレーションを用いて、成形難易の事前評価を行うという概念が芽生えたのもこの時期である。現在実用化されている、あるいはそれが検討されている新しい成形技術、例えば、しわ抑え力制御、テーラードブランクの利用、対向液圧成形などの基礎的な検討も進められた。

1986年1月11日、薄鋼板成形技術研究会を主導し、研究活動の方向性を示してきた吉田清太（当時、理研理事）が急逝した。大黒柱を失った感の研究会であったが、活動継続を求める声が強くと、集団運営体制を確立して活動を続けることになった。中川威雄、林央が運営に加わることで、理研は研究会活動に引き続き関与することになった。

数値解析による成形難易評価技術の開発

1980年代後半から飛躍的な進歩を遂げたのが、数値解析による成形難易評価技術である。成形難易の事前評価としての成形シミュレーションの開発が、積極的に展開された。手法としては、モデル実験とともに、幾何学的手法、塑性力学に基づく初等解析、有限要素法FEMによる3次元変形の厳密な解析などがある。特にFEMの開発は目覚ましく、コンピュータの進歩とともに、自動車車体製造の場に積極的に導入されてきた。FEMは成形性の事前予測にとどまらず、成形用の新材料の開発、新成形技術の開発への利用も期待されている。

このような状況に対応して、牧野内昭武は1990年に「板成形シミュレーション研究会」を組織し1996年まで活動、その後「VCAD研究会」へと展開している。牧野内の目標は、プレス成形シミュレーションのための3次元弾塑性有限要素法ソフトウェアITAS3Dの開発と普及、非線形有限要素法や成形シミュレーションに関し、高度な知識を持つ技術者の養成などであった。成形シミュレーションに代表されるCAEは、いまやプレス成形技術分野では必須のツールとして欠かせないものになっている。

地球環境保全を見据えたプレス成形

1990年代から叫ばれている温暖化対策を主とした地球環境保全は、21世紀に入りますますその重要性が増している。1997年の京都で合意したCO₂排出削減目標は、2016年11月のパリ議定書へと進み、自動車の燃費規制もいっそう強まる方向にある。従来エンジンから電気自動車EV、燃料電池車FCVへのシフトなどの駆動系の変換とともに、さらなる自動車軽量化が求められる。衝突安全対策、高齢化社会に向けた自動運転システムの開発は、自動車重量の増加につながり、車体軽量化に対する要求は厳しい。

今後の車体として、高強度鋼板と共にアルミニウム合金や炭素樹脂強化樹脂CFRPも利用したマルチマテリアル化ボディの開発が進められている。マルチマテリアル化が進むとしても、鉄鋼材料の役割、重要性、有用性は変わらないと思われる。車体への高強度鋼板使用比率は2004年には40%、2015年には50%超に達し、2025年には約70%近くになると予測されている。引張強さ980MPaを超える超高強度鋼板の採用が始まっているが、これまでの知見では対処できない課題が多い。このため、薄鋼板成形技術研究会では、プレス成形の原点に戻って、割れ、寸法精度（スプリングバック予測と抑制技術）、しわ・面ひずみ、型かじりの限界予測手法に関する共同実験を実施してきている。これらの検討では、成形シミュレーションを含めたCAE技術が大きな役割を果たしている。

自動車メーカーと鉄鋼メーカーの協力による材料開発や生産技術（加工、接合など）に関する開発を今後もさらに進化させることが、要請に対応する軽量化車体の実現につなげることになり、薄鋼板成形技術研究会の役割は続くといえる。

表1 薄鋼板成形技術研究会の研究活動

(1)

西暦年	材料・成形技術・成形性の研究テーマ
1957-1960	<p>薄板成形に関する基礎的研究 薄鋼板の成形性評価</p> <p>福井コニカルカップテスト 吉田プレス成形域区分 カップリング試験の解析・試験法の体系化</p> <p>福井コニカルカップテストの有用性を調査するために、1957年コニカルカップテスト研究会（現在の薄鋼板成形技術研究会）発足 自動車会社・鉄鋼会社・研究機関の共同研究体制 吉田のプレス成形域区分に基づく成形性試験の体系化（エリクセン試験、Swift深絞り試験など）</p>
1960-1970	<p>薄鋼板の成形性 深絞り性の改善・材料開発 高r値鋼板 集合組織制御</p> <p>塑性異方性の解析 成形性と材料特性の相関関係 成形性試験 壁割れの研究 引張試験片の検討</p> <p>Hillの塑性異方性係数をr値で表現する試みと深絞り性の関係の理論的明確化 深絞り性 張出し性に及ぼす材料特性の影響 伸びフランジ性の検討 壁割れの検討 ISO準拠の引張試験片の提案（JIS13号試験片）</p>
1964-1970	<p>形状凍結性 低降伏点鋼 オープンコイル焼鈍材 IF鋼</p> <p>形状凍結性の基礎研究 形状凍結性に及ぼす材料特性の影響</p> <p>実成形における不良現象の観察と分類 弾性回復によるスプリングバックなどの形状凍結不良 形状凍結性の概念の提示と対策 → 低降伏点鋼の開発・実用化</p>
1966-1972	<p>成形難易評価 延性の改善</p> <p>FLDの研究、FLDへの予変形効果 変形状態図 成形性解析のためのSCT利用 塑性不安定の研究</p> <p>KeelerのFLD提案とほぼ同時期に変形限界の調査を開始し、成形難易を検討 変形状態図…成形における板材各部位のひずみ分布、ひずみ比の2次元表示 FLD（変形状態線図）の実験的・理論的解析 予変形材の成形限界（2次成形性） スクライプドサークルテスト（SCT）の利用 プレス成形における不良率と作業安定性</p>
1966-1976	<p>モデル実験による成形性の研究 Alコアキルド鋼 リムド鋼の改善（脱炭リムド鋼）</p> <p>材料流れによるモデル実験の解析 傾斜壁を有する成形体の研究 成形限界高さの予測式 しわの制御</p> <p>四角筒・楕円筒成形における材料流れ 伸びフランジ成形のモデル実験…縁割れ、内割れのシミュレーション しわの制御対策に関する共同研究の推進</p>

西暦年	材料・成形技術・成形性の研究テーマ	
1972-1980	高強度鋼板のプレス成形 HSLA 複合組織鋼板 固形潤滑鋼板 耐食性表面処理鋼板 自動車の軽量化・安全対策のための高強度鋼板の利用 HSLA（低合金高強度鋼板）のプレス成形性 成形性に優れた高強度鋼板の開発・実用化 張り剛性・耐デント性の研究 型かじりに関する共同研究の推進	HSLAの成形 型かじり 固形潤滑鋼板の利用
1976-1985	面ひずみ・寸法精度不良の制御 低ひずみ域における材料特性 実成形における面形状精度不良・寸法精度不良の調査 モデル実験の推進 面ひずみ・寸法精度不良評価試験法の提案	実成形における面ひずみの解析 実寸大モデル型による実験的検討
1983-1986	表面処理鋼板の皮膜損傷 各種防錆鋼板 表面処理鋼板の皮膜損傷・ピンブルに関する共同実験	表面損傷評価試験
1985-1988	樹脂複合鋼板の成形 制振鋼板 軽量ラミネート鋼板 樹脂複合鋼板の成形性に関する共同実験	樹脂複合鋼板の成形性評価
1984-	成形シミュレーションと成形難易事前予測 成形難易評価に関する研究会活動の総括 → 成形難易ハンドブック（初版）刊行（1987） 成形難易評価法の検討 成形シミュレーションの実用性評価	CAD/CAM/CAEのための成形難易予測 成形シミュレーション
1989-1992	表面処理鋼板の摩擦特性 新しい表面処理鋼板の開発・実用化 表面処理鋼板の摩擦特性と成形性 成形用表面処理鋼板の開発	表面処理鋼板のトライボロジ
1991-1994	高強度鋼板の適用拡大に向けて 成形性に優れた高強度熱延・冷延鋼板の開発 超高強度鋼板 成形性に優れた熱延高強度鋼板	高強度鋼板の成形性
1991-1994	材料特性・成形条件の変動と成形性・品質管理 実プレスラインにおける成形問題の抽出と新しい研究課題の探求 → 成形変動・成形余裕度テストへの展開	
1993-1995	材料評価試験・成形性試験の再検討 材料評価試験法の見直し 穴広げ試験法の標準化案の提示 → ISOへの提案・ISO規格化 FLDの再検討	
1994-1998	成形変動と余裕度テスト 成形成績に影響を与える要因の調査	
1999-	高強度鋼板の成形性と成形技術	

西暦年	材料・成形技術・成形性の研究テーマ
2000-2003	高強度鋼板の形状凍結性 超高強度鋼板の開発 TS 980MPa級高強度鋼板の成形 スプリングバックの実験的・理論的解析と制御 スプリングバックの予測式の実用性検討 テーラードブランクの成形 スプリングバック予測技術・成形シミュレーション スプリングバック制御技術
2003-2006	高強度鋼板の形状凍結・面形状精度 超高強度鋼板の形状凍結性 高強度鋼板の外板パネルへの適用と面ひずみ スプリングバック予測技術の課題の明確化 面ひずみの解析と制御技術 成形シミュレーションの課題の明確化
2007-2010	CAEによる割れ予測精度の向上 伸びフランジ割れの予測技術の検討 超高強度鋼板の曲げ・せん断技術の開発 サーボプレスの利用技術 ホットスタンプ技術の開発
2011-2013	CAEによる型かじり予測技術の開発 TS 1.2GPa級超高強度鋼板の適用 高強度鋼板成形用金型技術の開発 プレス工程の生産性向上
2014-	しわ予測技術の開発 CAEの活用によるリードタイムの短縮、成形技術の向上 プレスラインへの種々のセンサー・測定技術の導入

(出所) 薄鋼板成形技術研究会編：プレス成形難易ハンドブック第4版

研究会が成功裏に60年間続いた理由

自動車の車体製造は、デザイン、機能性の面から商品としての自動車の価値を生み出すものであり、自動車各社の競争が最も厳しく、製造技術には多くのノウハウが存在する分野である。このような技術分野で、同じ土俵で議論を交わし、共同研究も実施してきた薄鋼板成形技術研究会は、まさに異色の存在である。最先端の技術開発は個々の自動車メーカーがしのぎを削り、車体用材料を提供する鉄鋼メーカーも独自の製品開発を行ってきた。薄鋼板成形技術研究会が目指したものは、先端技術の開発は個々の企業が実施するものであるが、共通する課題に関して、日本全体の技術水準をレベルアップすることにあった。その意義をまとめると以下ようになる。

- (1)材料の評価法、成形性試験法を共同研究の対象として取り上げたこと。
- (2)各社の現場で使われる用語に関して、議論を進めるために共通語を導入したこと。
- (3)議論、共同研究の結果に関して、必ず現場での検証を行ったこと。
- (4)現場における諸課題を、研究対象とはなりにくい泥臭い問題も含めて対象としたこと。
- (5)若手技術者の交流の場を提供していること。
- (6)ギブアンドテイクの精神にのっとり、活動を進めたこと。

薄鋼板成形技術研究会での交流を通じて、個々の自動車会社と鉄鋼各社との間の共同研究も進められた。60年にわたる研究会活動が続けられたのは、吉田清太の強い指導力があったことが最大の要因であるが、中立機関として理研が参加してきたこともまた大きい。プレス成形技術に関しては、一時期、もう共同研究の必要はないとの声も上がったが、2017年4月に60周年を迎え、本当にその必要性がなくなる日まで、活動を続けていくことになっている。