

青色発光デバイス

山口 栄一

同志社ビジネスケース 05-03
2005年8月



青色発光デバイス

同志社大学大学院ビジネス研究科 教授 山口 栄一

本ケース・スタディは、同志社大学ビジネススクールの山口栄一がクラス・ディスカッションの基盤になる資料としてみずから作成したものであり、推薦の言、一次データの源、経営における有効なあるいは無効な実例としての使用を意図するものではない。著者は今回のケース・スタディに際し、インタビューに応じてくれた、科学者・技術者たちに感謝の意を示すものである。ただし、本事例に於けるいかなる間違いや欠落もすべて著者に帰する。

Copyright © 2003 by Professor YAMAGUCHI Eiichi, the Doshisha University. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means – electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise – without permission from the Doshisha Business School. 著者及び同志社大学ビジネススクールの許諾なしにこの出版物の一部または全てを複製複写、情報検索システムへの保存、またいかなる形態いかなる手段（電子的、機械的、写真複写、録音録画ほか）により配信することを禁ず。

1. パラダイム破壊 Paradigm Desruption

プロローグ

赤崎勇は、大学院生の天野浩が恐る恐る差し出したその透明の円板を見て目をみはった。

1981年に松下電器・東京研究所を辞し、名古屋大学に戻ってきて、4年が経とうとしていた。青色発光デバイス¹を実現するために、窒化ガリウム²の単結晶³をサファイアの上に生やしてやろう。こうして1500回以上の実験を行い、1500枚以上の不透明で気味の悪い作品ができあがった。顕微鏡でこの作品を見てみると、その表面は6角形の不規則な山が重なり合って月面のようなようだった。

ところが今日のは、まるでちがう。あたかも結晶成長をしていないサファイア基板のように無色透明だ。

赤崎は、この板を光の方向に向けてその表面からの反射光を斜めから眺めた。光は虹に分解されて膜があるときだけ生ずる7色の干渉色⁴が表面を走り回った。

確かに窒化ガリウムが成長している。完全無欠な鏡面の単結晶だ。

「うまく行くときは、一発目でうまく行くものだ」

赤崎はこの板を長いあいだ凝視したあと、気が抜けたように突っ立っている天野の顔を見据えて、思い立ったように言った。

「X線回折⁵で結晶性を測ってみなさい」

天野は、その時はじめて赤崎の長く遠い夢を、みずからの手で実現したのを知った。1985年2月の夕暮れどきのことだった。

翌朝、天野は名古屋駅から電車に乗ってX線回折装置のある大阪府立大学に向かいながら、自分の手で育てたその窒化ガリウムをケース越しにこっそりと、しかし何度もながめた。大学院に入学してすでに2年が経っていた。彼は、正月を除く毎日MOVPE⁶装置に火

を入れた。しかしこれまで、できあがった作品を赤崎のもとに持っていくたびに

「君の作る結晶はいつも白いね」という苦渋の言葉を恩師からもらった。そのたびに「自分は、何のためにこんなことをやっているのだろう」と思い続けた。

そもそも天野は、こんな結晶成長をやりたくて大学に入ったのではなかった。少年時代にアメリカでマイクロ・プロセッサが誕生。世界初のマイクロ・プロセッサ i4004 や名作 i8080 などを設計した嶋正利にあこがれて電子工学の道を選んだ。しかし当時の名古屋大学には、コンピューターの専門家がいなかった。それ以上に、どの研究室も「論文を書くだけの研究」をやっているようにさえ思えた。わずかな例外を除いて。

その例外とは、彼が学部3年生のときに松下電器から移ってきた赤崎であった。少なくともこの先生は、今この世の中になくものを生み出そうとしている。そこで天野は、ゼミの選択に先立って赤崎を訪ね、どうしても先生の弟子にしてほしいと訴えた。だから1983年4月に大学院に進学して赤崎研に配属されたときも、三途の川原で小石を積むようなこの研究テーマに悔いはなかった。

しかし結局のところ修士課程の2年間、何の成果も上げられず、1カ月ほど前に惨憺たる思いで修士論文を提出した。窒化ガリウムの結晶成長など、元来不可能なのではないだろうか、とも思い始めていた。

できるかどうか分からないことに挑戦する。これほど怖いことはない。もしできなければ、技術の世界においては何もしなかったのと同じことになる。これから送らねばならない博士課程の生活を考えると底の見えない陥穽の中に落ちていく気がしていた。

しかし目の前にあるたった1枚のこの試料が、彼に希望のありかを示したのだ。天野は、祈りながらこの試料をX線回折装置に装着した。

未踏分野への挑戦

ここにいたるまでの物語は、22年前の1963年にさかのぼる。

その年に赤崎は、松下幸之助が肝いりで作った松下電器産業・東京研究所に第四研究室長として赴任した。

昭和30年代の高度成長の波に乗って、エレクトロニクス企業に中央研究所ブームが到来。松下電器も1961年に川崎市の生田に東京研究所を設立した。松下幸之助は、松下電器の内部から研究室長を採用しないことを決め、各大学の気鋭の助教授を研究室長に招いた。ガスを原料として半導体の結晶を成長するVPE法を開発した赤崎にも白羽の矢が当たった。

赴任してすぐ赤崎は、ヒ化ガリウム⁷（通称ガリウム・ヒ素）やリン化ガリウム⁸（通称ガリウム・リン）という半導体の結晶成長に取りくんだ。すでにエレクトロニクスの中核材料となっていたシリコンではなく、まだ将来性の分からないこれらの半導体を選んだのは、何よりも自分が築いた結晶成長法を化合物で試したかったからだ。

とりわけ、とても強靱で作るのが困難だとされている窒化アルミニウム⁹や窒化ガリウムもやってみよう。そう決意したのは、2年目の1965年のことだった。36歳。未踏分野の中でも、もっとも難しいことに挑戦したいと、そればかりを考えていた。

ところが1969年にアメリカRCA研究所のH・P・マルスカらが、VPE法で窒化ガリウムの単結晶成長に成功。先を越された赤崎は思った。1973年以来、彼は残りの人生をこの研究にかけることを決意する。

しかし、すでに窒化ガリウム成長のあまりの難しさに、世界中の研究者が撤退し始めて

いた。1971年に世界で初めて窒化ガリウムの青色発光ダイオードを作ったアメリカ RCA 研究所の J・I・パンコフらも、1974年に撤退。最後までライバルでありつづけたフィリップス社・フランス研究所も1977年までには撤退をした。世界中の研究者が窒化ガリウム研究にさじを投げた。

ついに1981年のある日、松下電器の幹部から「窒化ガリウムなんか、ものになるはずがない。早く止めちまえ」と電話がかかってきた。赤崎は、「わかりました。窒化ガリウムの研究を止めます。そして私も辞めます」と答えた。

赤崎は、こうしてこの年に松下電器を辞め、名古屋大学に移ってきた。松下時代に熟慮を重ねて、すでに「窒化ガリウムの結晶成長には、VPE法でガリウム源として有機金属を使う MOVPE法が最適だ」という結論に達している。そこでただちに、これを始めるための装置作成に取りかかった。52歳の新しい挑戦であった。

青色発光は、なぜ困難だったか

そもそも発光ダイオードや半導体レーザーのうち、どうして青色を発するものだけが困難をきわめたのか。

レゴとよばれるデンマーク生まれのおもちゃがある。ブロックの上下に結合手となる凹凸があり、ブロックの凹部に別のブロックの凸部を次々にはめて格子状に壁を作るのできる積み木の一種だ。

このレゴの上に、他社製のブロックを組もうとしても、つながらない。もし他社製のブロックがスポンジでできていれば、何とか強引に押しこんでつなげることができよう。しかしそれでも、ところどころにすきまを入れてやらないとブロック同士の接合部周辺に溜まった歪を解消できない。

半導体結晶を基板結晶の上に成長させることは、この積み木に似ている。ある基板の上に、異なる結晶を成長させると同じことがおきる。だから結晶構造と原子間距離をそろえること、すなわち格子整合¹⁰こそが結晶成長学のパラダイム¹¹であった。

さて、青を発光できる半導体の一候補が窒化ガリウムであることは、古くから分かっていた。ところが問題は、窒化ガリウムと格子整合する基板結晶がないことであった。となると、格子整合しない基板結晶を選ばざるを得ない。最終候補としてサファイアが選ばれた。

サファイアとは、酸化アルミニウムの結晶のことだ。原子間距離は窒化ガリウムより10パーセント以上も小さく結晶構造もちがう。それでも強引に結晶成長すると、萩焼の貫入のようにひび割れができたり、あばたのように成長したりする。

では、青色発光のための半導体として、窒化ガリウム以外に候補はないのだろうか。

ある。セレン化亜鉛¹²である。このセレン化亜鉛は、旧来の半導体であるヒ化ガリウムと同じ結晶構造で原子間距離もほぼ等しいので格子整合条件を満たしており、みごとな結晶ができあがる。

「窒化ガリウムとセレン化亜鉛。さあ、どちらの道を選びますか」

この究極の質問が、青色発光デバイスに挑戦する研究者に突きつけられた。多くはセレン化亜鉛の道を選び取った。彼らは、「結晶成長学のパラダイムを踏み外してはならない」として、窒化ガリウムを選んだわずかばかりの人々を高みから眺めた。

第1のパラダイム破壊¹²

なぜ赤崎は、格子整合条件という結晶成長学のパラダイムを敢えて打ち破ろうとしたのか。彼は、こう語った。

「サファイアという、結晶構造も格子定数も窒化ガリウムからかけはなれた基板を使ったのには、積極的な理由がありました。結晶成長では、基板と成長物とが同じ結晶構造と原子間距離を持っている、ということが重要な決まりごとです。しかし、もしこの決まりごとを破って、基板の上にそれとは異なる結晶を積むことができれば、これは新しい物質の創生につながるわけです」

しかし、どうやればレゴとレゴでないブロックを無理なく整合できるのか。

界面付近だけスポンジ仕立てにすれば良い。つまり、結晶性が良くない物質を、まずサファイアの上にスポンジ代わりにつける。そのためには、低温で成長させねばならない。そのスポンジの上に窒化ガリウムの硬い結晶をつけるのだ。

奇しくも 1983 年に、沖電気・基盤技術研究所の秋山正博らがこの考え方に基づいてシリコンの上にヒ化ガリウムを結晶成長させている。秋山がこのバッファ層技術¹³を応用物理学会で発表したその年に、名古屋大学で赤崎研究室の大移転が行われた。数カ月に及んだこの移転のあいだ、天野はそのブルドーザーのようなバイタリティをもてあます。そこで秋山の方法をがむしゃらに勉強した。そのうちに秋山のバッファ層技術を窒化ガリウム成長に応用してみたいという欲望が熟成していった。

しかし天野は、実際にこれやってみることを、修士論文を書き上げるまでためらった。結果は惨憺たるもの。修士論文を出し終わったあと、気のゆるんだ彼は、変ったことをしてみようと思いつく。その時、秋山の方法がふと頭に浮かぶ。藁をもつかむ思いで、彼は冒険をしてみる…。

「あの汚らしい試料に基づいて修士論文を何とか書き上げ、しかしその程度のひどさに打ちひしがれていたある日のこと、炉の調子が悪くて温度があまり上がらなかったときがありました。窒化ガリウムの成長温度は摂氏 1000 度くらいですが、窒化アルミニウムの成長温度はこれよりも高く摂氏 1200 度くらいです。だから窒化ガリウムの成長温度は、窒化アルミニウムにとっては低すぎます。そこで炉の調子が悪いこの日、あえて窒化アルミニウムをバッファ層として付けてみようと思いました。窒化アルミニウムは窒化ガリウムより 6 角形の山の密度が高く、比較的早くサファイアの全面を山が覆うことをすでに経験していました。だったら最初に窒化アルミニウムのバッファ層を付けてやれば均一にサファイアを覆うだろう。いったん窒化アルミニウムが均一に付けば、窒化ガリウムはうまく育つだろう。このへんの感触は、2 年間の経験でわかっていました」。

天が、天野に向かって微笑むまで、それから数時間しかかからなかった。たった 1 回で見事な窒化ガリウム薄膜ができあがったのだ。冒頭にかかげた場面がここに続いた。そして X 線測定の結果、それがまぎれもなく良質の単結晶であることを天野は見出した。それは、人類がはじめてサファイア上に生まれた完全な窒化ガリウム単結晶を手にした瞬間で

¹ Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. and Toyoda, Y., “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer”, Appl. Phys. Lett. **48**, 353 (1986).

² 真部勝英・加藤久喜・赤崎勇・平松和政・天野浩, 「窒化ガリウム系化合物半導体の気相成長方法」, 日本国特許 3026087 (1989).

あった。

第2のパラダイム破壊³

1985年2月に赤崎と天野がこの最初のパラダイム破壊を成し遂げたあとも、窒化ガリウムに目を向ける研究者は、なかなか現われなかった。しかし2人にとって、これからは本当の始まりだった。

いったん欠陥の少ない良質の半導体ができ、不純物濃度を極限にまで下げられると、次にやるべきことはp型¹⁴（電子の抜け穴が電流を運ぶタイプ）の実現だ。はたして、できるのか。窒化ガリウムの場合、窒素がわずかでも少ないとp型にはならないと理論物理学者は説いた。ならば事実上p型にすることは、不可能になる。

天野は、結晶成長のときに亜鉛を添加してみた。しかし何度、実験をやってみても、p型化しない。やはり理論家のいうとおり、この物質はp型にはならないのではないかと、もしそうならば、窒化ガリウムで実用に耐える青色発光デバイスは作れない。

1987年の夏が終わろうとしていた。

博士課程2年生になっていた天野は、夏休みの研修のためNTT武蔵野研究開発センターで2カ月間を過ごす機会を得た。最後の1週間、彼はNTTから電子顕微鏡を自由に使ってよいという許可を得る。そこで細心の注意を払いながら、名古屋大学から持ちこんだ窒化ガリウムをかばんの中から取り出し、電子顕微鏡に装着した。それは、亜鉛を添加した試料だった。

電子顕微鏡からの撮像をながめていた天野は、ほどなく奇妙なことに気がついた。電子顕微鏡の中で電子線を浴びた窒化ガリウムがしだいに光りはじめるのだ。彼は、ただちに赤崎に電話で報告。赤崎は、もしかしたら亜鉛Znが電子線で活性化したのではないかと考えた。つまり、結晶格子の間に入り込んで「死んで」いた亜鉛原子が、電子ビームを浴びて結晶格子を構成するガリウム原子と置き換わり、結晶の構成メンバーとなったのではないかと、ということだ。

NTTでの研修を終えて名古屋に戻った天野を、赤崎は待ち構えていた。赤崎と天野は、さっそく最新の電子顕微鏡を持つ豊田合成に出向いて追試を試してみた。

確かにNTTでの結果通りだ。

窒化アルミニウム・バッファ層の上に亜鉛を添加しながら成長した窒化ガリウムを、電子顕微鏡の中に入れる。しっかりと真空引きしたあと電子ビームを照射。ブラウン管モニターに映る試料をながめる。すると、しだいに試料が光り始める。

結晶のすきまに入りこんで「死んで」いた亜鉛原子が、電子線を浴びて活性化し、結晶を構成する原子の一員になったのだ。

電子ビームを浴びて原子が動くなると、まったく奇妙だ。しかし、もし電子ビームにその力があるとするならば、原子の結合エネルギーの小さいマグネシウムMgの方が、亜鉛よりも効果的であることになる。

そこで2人は、添加する不純物をマグネシウムに切りかえることにした。さっそくアメリカの化学会社にマグネシウムの有機金属原料を発注。1年以上待って1988年の暮れにこ

³ Amano, H., Kito, M. Hiramatsu, K. and Akasaki, I., "P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy beam irradiation (LEEBI)", Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L2112 (1989).

の原料を手に入れた2人は、正月返上でさっそく実験を開始した。

予想はみごとに的中した。マグネシウムを添加した窒化ガリウムに電子ビームを照射すると青色発光は何ケタも増大した。その発光強度は、亜鉛の時よりも10倍以上大きい。そこで彼らは、ホール効果¹⁵を測定した。磁石の中で電流を流す。磁場によって電流の担い手がどちらに曲げられたか、電流とは直角方向の電圧を測る。こうすることで電流の担い手が電子なのか、電子の抜け穴なのかが判別できる。

確かに電子の抜け穴が電流を運んでいる。世界で初めてp型窒化ガリウムを手中に収めた2人が、そのp型であることを真に証明した瞬間は、こうして訪れた。1989年1月のことであった。

第3のパラダイム破壊⁴

青色発光デバイスがイノベーションになるまでのプロセスには、前回述べた2つのパラダイム破壊に加えて、第3のパラダイム破壊が関わっている。窒化ガリウムと窒化インジウム¹⁶の混晶¹⁷の実現だ。これができて初めて、青い光を出すことができる。これは、NTT光エレクトロニクス研究所の松岡隆志らが成し遂げた。1989年のことであった。

1978年に大学院修士課程を修了して電電公社(当時)の武蔵野電気通信研究所に入った松岡は、1980年代前半に一貫して光通信用の赤外線半導体レーザーの開発に取り組んだ。

電電公社NTTは、70年代後半から日本全国に光ファイバーによる光通信網を張りめぐらせる国家プロジェクトを立ち上げたものの、光を射出する肝心の半導体レーザーが未完成だった。光ファイバーは石英、つまり酸化シリコン(SiO₂)の人口結晶からできている。無色透明なので、どんな色の光を通して問題なさそうに見えるが、実は波長1.55μmの赤外光が、もっともロスなく光ファイバーの中を通る。そこで、特にこの波長にチューンした赤外線半導体レーザーを作らねばならない。それは最優先の社命であった。

松岡は、先輩らとともにLPE¹⁸装置を自作した。ベンダーでステンレスのガス管を曲げながら、スエジロックでこの配管をつなぎ合わせる。これを自分で細工した石英管につなぎこみ、4種類の原料物質を別々に入れたグラファイト製のボートを中央に置く。さらに、前もって臭素(Br)溶液を使って丁寧に研磨したリン化インジウム¹⁹基板をフェースダウンに置く。ガス漏れをチェックしたあと、石英管を炉の中に突っ込む。するとボートの上に置いた原料物質が液体になって、リン化インジウム基板下面でゆっくりと結晶化するのである。

こうして温度条件を微妙に変えながら、リン化インジウム基板の上にインジウム・ガリウム・ヒ素・リン(In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y})の単結晶膜を生やしていく。所定の膜厚にまで生やしたら、インジウムやガリウム、そしてヒ素やリンの量を微妙に変え、半導体レーザーのヘテロ構造を作り上げる。

研究を始めて2年後の1982年、28歳の松岡は、波長1.55μmのレーザー光を室温で連続的に出す半導体レーザーを創り出すことに成功した。彼は、その喜びにひたる暇もなく翌日から現場に供給するためのレーザーを、LPE法で毎日夜中の2時までかけて作った。

⁴ Matsuoka, T., Tanaka, H., Sasaki, T. and Katsui, A., "Wide-gap semiconductor (In,Ga)N", Inst. Phys. Conf. Ser. **106**, 141 (1990). (Proceedings of Int. Symp. GaAs and Related Compounds, Karuizawa, 1990).

世界初のプロダクトであるため、このレーザーを生産するメーカーがないからだ。けっきょく研究所がそのまま生産工場となり、研究者がそのまま工場労働者となった。

当時を振り返りながら、松岡は言う。

「量子力学的な計算をすることで、どのような構造にすれば波長 $1.55\mu\text{m}$ のレーザー光を出せるかは容易に分かります。ところが LPE 法ではエピタキシャル成長した膜厚と組成が正確にコントロールできないので、できあがって見ないと所望の波長が出るかどうか分かりません。だから宝くじを当てるような気分でした。本当に色とりどりの光を出すレーザーができました。おかげで $1.55\mu\text{m}$ 以外の波長のレーザーを色んな人々に譲りました」

1985 年、民営化した NTT の厚木電気通信研究所で研究室長補佐となった松岡は、太陽を見ることのないような毎日から解放され、ふたたび技術の全体像とそのゆくえを俯瞰できる時間を獲得した。

この時点ですでに人類は、半導体レーザーにしても発光ダイオードにしても、赤外線から赤にかけての波長の長い発光を制覇していた。今度は緑から青そして紫に挑戦すべきだ、と彼は思った。そのためには既に述べたように、2つの道がある。セレン化亜鉛を中心とする II-VI 族化合物半導体か。それとも、窒化ガリウムを中心とする窒化物半導体か。

企業の研究所であるならば、格子整合する基板がありリスクも少ない前者を、まちがいをなく選ぶ。しかし民営化した直後で国研としての性格を保持していた NTT 研究所では、できないことに挑戦する気風が、まだ残っていた。

理論的にはガリウムの一部をほんの少しアルミニウムに置き換えるだけで急激にバンドギャップを変えられる窒化ガリウムのほうが半導体レーザーの材料として望ましい。しかも、青色を出すためにはガリウムの一部をインジウムに置き換えて窒化インジウム・ガリウム ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) を作り、バンドギャップをせばめる必要があるのだけれども、この窒化インジウム・ガリウム ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) のエピタキシャル成長を、まだ誰も手がけていない。挑戦しがいのあるテーマだった。

こうして 1987 年 7 月、松岡は「窒化物半導体による青色半導体レーザーの研究をさせてほしい」と希望した。光通信の役には立たない青色半導体レーザーの研究を行なうには、厚木にある光通信の研究所から茨城にある材料の研究所に移らなくてはならない。もし移れば、光通信用レーザーの実用化を成し遂げて約束されていた松岡の前途は不確実なものとなる。彼のキャリア・アップを心配する上司は当然のごとく反対した。しかし未踏分野に挑戦したいという少年のような松岡の決心は、変わらなかった。

茨城研究所に移った松岡は、すでに窒化ガリウムの MOVPE 成長に取り組んでいた新人の佐々木徹からその成長の方法を学びながら、研究戦略を構築していった。当時を振り返りながら、佐々木は当時の上司、松岡のことをこう語る。

「あの頃ぼくは、良いものを作りたいという欲求よりも、物事のまだ知りえていない部分を知りたいという欲求が強い年頃でした。そこに松岡さんがいらっしゃいました。彼の目標は青色半導体レーザーを作ることです。だから悠然と物理を楽しむのではなく、いかに目標に近づくかが最優先課題になりました。こうして赤崎先生らのバッファ層をすぐに導入しました。そしてまずは絨毯爆撃のように成長条件を変えながら、キャッチアップを最優先しました」。

1 年かけて何とか赤崎のレベルにまで追いついた松岡は、本来の目標であったインジウム導入に取り組むことになる。ところがこの実験は、ことごとく失敗。装置の中にイン

ジウムの原料ガスを入れるとススが発生するばかりなのだ。この克服は、意外な偶然によってもたらされた。

MOVPE という結晶成長法では、原料ガスを運ぶためのガスを流しこむ。このガスに不純物が混ざっているのは、できた半導体が使い物にならなくなるので、水素ガスを用いるのが定石であった。当時は水素を純化する装置しかなかったからだ。

ところが佐々木は素人の悲しさで、このガスとして窒素を用いていた。水素を使うことが常識だと松岡は驚きつつ、しかし佐々木が作った装置で、ためしに窒素を使ってみた。

一発で驚くべき結果が出た。今までススしか生まれなかった成長条件のもとで、みごとに窒化インジウムができたのだ。1988年のことである。

次は、窒化インジウムと窒化ガリウムの混晶を実現することだ。いつものようにガスの流量を変えながら実験をするが、うまくいかない。

あきらめかけていた松岡はある日、根本に帰ってみようと思いつく。そもそもインジウム In とガリウム Ga では、窒素 N と結合する力がまるでちがう。ガリウム Ga のほうが 10 万倍も強い。

そこで彼は、古い文献にあたりながら何度も化学反応の計算を繰り返してみた。その結果、温度が摂氏 800 度において窒素源のアンモニアを 16000 倍入れてやればかろうじてインジウムを混ぜこんだ成長が可能であることを発見する。

こうして 1989 年 3 月、松岡らは窒化インジウムと窒化ガリウムの混晶の成長に成功。彼らのこの発見によって最後のハードルは越えられ、見出された結晶成長条件は、それ以来インジウム導入の際の手本となった。

2. セレンディピティ

中村修二の屈辱

松岡らが、第 3 のパラダイム破壊に到達したことを国際会議で発表した 1989 年の夏、日亜化学工業の中村修二は、納入されたばかりの MOVPE 装置に火を入れようとしていた。

フロリダ大学から戻ってきたばかりの彼は、1 年間のアメリカ留学のあいだに味わった屈辱を何度も思い出していた。30 代半ばになろうとしながら一人前の研究者として認められていない自分には、無駄なことをやっている時間がなかった。何よりも物理学者になろうと思った志に、これからは忠実に生きよう。彼には、生き急ぐ必要があった。

中村にとって、人生の転換点は納得できない失望から成り立っていた。

1954 年 5 月、四国の佐多岬で生まれた中村は、幼い頃からお茶の水博士にあこがれ物理学者になって理論物理学を研究したい、と思っていた。森羅万象の根源にある美しい法則を学びたいと心から思ったからだ。しかし高校の先生は、彼にこう言った。

「理学部の物理学科なんかに行ったら、就職でけへんぞ」

就職ができなかったら大変だ、と中村は単純に思い、けっきょく工学部の電子工学科に進むことにした。電子とついているから、物理に近いのだろうと単純に思ったのだ。

この決断が、最初の失望を彼に強いた。電子工学科に入った彼は、そこに自分の知的好奇心を満たしてくれる教師がいないことを知った。しかたなく下宿にこもって物理の原書を手当たり次第に読む。しかし...

「立派な先生に習ったわけではないので、いまだに物理の理論に対してはある種の引け

目があります。ものごとの基本を知りたいという思いから出発した私にとって、物理学科に行かなかったことは、人生の最大の失敗でした。今でも後悔しています」。

第2の失望は、就職した直後にやってきた。中村は、1979年に大学院修士課程を修了したあと徳島県阿南市の日亜化学工業に入社する。1956年に創業した蛍光体メーカーで、戦後に生まれたベンチャー企業だ。蛍光灯の普及とともに、売り上げを伸ばした優良企業である。

社長の小川信雄は、薬剤師として戦地ガダルカナルに赴任し、死淵を経験して故郷に戻ってきた勇者であった。彼はすぐに中村の高い志を見抜き、開発課に彼を配属する。

とはいえ、資本力の乏しい会社が新しい半導体製造に新規参入できるほど、半導体産業の世界はすでに未熟ではなかった。しかも、独学の若造がたった1人でいきなり半導体物理学のプロフェッショナルな研究に踏みこむなど、上司に取ってみれば無謀を通り越して青くさい恥辱に他ならなかった。地元の人たちばかりによる200人足らずの組織。20年以上この会社に奉公してきた幹部は、研究者となることを本気で夢見る新入社員の高邁さを「身のほど知らず」とせせら笑った。

「私は就職したあと、自分の人生は終わった、と本当に思いました。製品、つまり売れるものを作らないと評価されない。入社して数カ月で、本を読むのをあきらめました。何かを考える時間がまったくないわけですから、もう理論は捨ててモノづくりに徹することに決めました」。

第3の失望は、アメリカに留学したときに強いられた。入社以来、中村はリン化ガリウム GaP の多結晶などを見よう見まねで作り、これを自ら売り歩いて会社に数百万円の売り上げをもたらした。しかしそれがいかに空しい所業だったかということ、10年かけて悟った。辺縁の地にある小さな会社が、大企業ならだれでも作れる製品を二番煎じのようにして作ったところで、儲けはたかが知れている。技術として飽和している場で身を挺してがんばっても、自分として誇れるものを何も残せない。

彼は、小川信雄社長を口説き落とす。まだ誰も実用化に成功していない青色発光デバイスを作って売らしようと。今この世界にないものを作ってその付加価値を売らない限り、市場は創造できない。新しい市場を創造しない限り、中小企業はピラミッドの底辺で踏みつけられ、いつまでたっても下積みのまま苦しまなくてはならないと。

経験豊かな小川は、それが少年じみたホラであることをすぐに見抜いた。が、それは悲痛なホラであった。アメリカ軍の捕虜収容所で蛍光灯をはじめて見、その光を再現したいとゼロから日亜化学を創業した小川には、中村の叫びが痛いほど判った。彼は、中村のホラに5億円の研究費をかけてみることにした。

こうして中村は1988年3月、フロリダ大学に研究生として留学する。フロリダ大学を選んだのは、大学時代に2年先輩だった酒井士郎がすでに客員研究員として赴任しており、結晶成長の研究をやっていたからだ。ところが、学位も持たず論文を書いたこともない彼は...

「ひどい屈辱を味わいました。一人の対等の人間として認めてくれません。自分がこれまでやってきたことがすべて無視されました。研究会には呼んでくれませんが、何か壊れたら修理しろと呼びつけられます。実際、フロリダ大学にすでにMOVPE装置があるということだったので、行ってみると部品だけがあります。さあ組み立てろ、という。ぼくは結局、韓国人や中国人の大学院生とともに1年かけてこれを組み立てました。完成

したのは、帰国の1カ月前でした」。

中村修二の僥倖

1989年の4月に、中村はアメリカから帰国。それからの彼は、肝をすえた。もうわき目をふりはしない。ちっぽけな上司の言うことだって、いっさい聞くものか。

とはいえ、彼は結晶成長学においては一介の素人に過ぎない。頼れるのは、すでに帰国し徳島大学に赴任していた酒井だけだ。そこで酒井に相談して、市販のMOVPE装置を購入。その改造に明け暮れた。

そうして1年後の1990年夏に、中村は途方もない金鉱を掘り当てた。窒化ガリウムの良質な単結晶を再現よく成長する条件を見つけたのである。このセレンディピティ²⁰の契機は、2フロー法と彼自身が名づけた独特の成長法⁵に辿り着いたことによる。炉の中に原料ガスを横から流しこむほか、上からも窒素と水素の混合ガスを多量に流す方法だ。

「装置を手に入れて1年のあいだ結晶成長を試みてきたのですが、とにかく窒化ガリウム薄膜が、まったくできません。しかし考えてみると、成長温度1000度という高温ですから横から原料ガスがやってきてもすぐに温められて対流で上に行ってしまう。だから原料ガスがサファイアのところに辿り着けないのではないか。そう、はたと思ったのです。そこで、上から2つ目のガス流を入れて原料ガスを押さえこんでみたら、と思いつきました。これで熱対流を押さえこもうというのです」。

中村はこの2フロー法に変えてから一発で成功。無色透明の窒化ガリウムの薄膜がサファイアの上に見事に生えている。発光スペクトル²¹を観測してみると赤崎ら最先端の研究者の報告よりも圧倒的に良い。

この結晶成長で中村は、赤崎・天野によるバッファ層技術を用いた。しかし彼はその約半年後に、窒化アルミニウムではなく窒化ガリウムをバッファ層として用いることにした⁶。その結果、すべての物性値が世界最高の値となった。それからは、何をやっても「世界初」だ。この窒化ガリウム・バッファ層特許こそ、日亜化学最強の特許⁷となった。

p型を作る際も、自分なりの工夫を行なった。なぜマグネシウム原子を活性化できないか。中村とその部下・岩佐成人は、実験を繰り返すうちに、あることに気づく。

「アンモニアを流してマグネシウムを添加した窒化ガリウムを熱処理すると、抵抗値が変わるんです。これはアンモニアが分解してできる水素が悪さしよる。水素がマグネシウムとくっついて身動きが取れなくなっているにちがいない」。

そこで、結晶を窒素中で単純に熱処理して結晶に潜りこんだ水素を追い出したところ、窒化ガリウムが容易にp型化した⁸。1991年12月のことである。これが日亜化学にとって2番目に強力な特許⁹となった。

⁵ Nakamura, S., Harada, Y. and Seno, M., "Novel metalorganic chemical vapor deposition system for GaN growth", Appl. Phys. Lett. **58**, 2021 (1991).

⁶ Nakamura, S., "GaN growth using GaN buffer layer", Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L1705 (1991).

⁷ 中村修二「窒化ガリウム系化合物半導体の結晶成長方法」, 日本国特許公告・平8-8217, 及び日本国特許3257344 (1991).

⁸ Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M. and Iwasa, N., "Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films", Jpn. J. Appl. Phys. **31**, L139 (1992).

⁹ 中村修二・岩佐成人「p型窒化ガリウム系化合物半導体の製造方法」, 日本国特許2540791 (1991).

こうして第1、第2のパラダイム破壊について先人の方法をマスターするのみならず独自の方法をも編み出した中村も、第3のパラダイム破壊の導入だけには、難儀をすることとなる。実際、ここまで1カ月に1本の論文を書いてきた中村が、ぱたりと論文を書くことをやめる。1992年の7月までの半年の沈黙。

この間、中村は、インジウム導入の方法について松岡に問う。それに対して松岡は、「論文に書いてあるとおりにやるといい」と教える。中村は松岡のレシピを守った。ただし2フロー法のおかげで、できあがった混晶の品質は、圧倒的に良かった。

こうして中村は1992年に青色発光ダイオードの実用化を成し遂げた¹⁰。だから中村はゼロからたった一人で青色発光を発明したのではない。むしろ彼の歴史的業績は、各パラダイム破壊からの学びを自分のものにしてそれらを見事な製品にまで仕立てあげた「統合」にこそあるのだ。

一方、不思議なことにその同じ年、当の松岡らは忽然とこのイノベーションの歴史から消えてしまった。いったい彼らに何がおきたのだろうか。

3. NTT の場合

NTT の研究中止の謎

「NTTの松岡隆志さんたちのその後をご存知ですか」

私は、そう中村に問うてみた。中村は、いったい何がおきたか見当もつかないという顔をして、ちがう話をはじめた。

「もし日亜化学に入社していなければ、この研究の成功はあったか。そう問われたら、答えはおそらくノーです。当時の日亜のように200人くらいの小さな会社だったから、ルールを無視して自由にやれたと思います。もっとも日亜も今は大きくなってしまいましたから、あんなむちゃくちゃなことをやっていたらまちががなくクビです。規則が明文化されてしまいました」。

確かに松岡らは、中村と同様に企業の研究者であった。大学人であった赤崎と異なり産業を興すことのできる立場にいたのだから、今もこの著しいイノベーションの歴史の先頭を走っていても良かった。

ところが彼らは、中村が青色発光ダイオードを論文投稿した1992年に、忽然とこの歴史から消えた。

なぜか。それは、その年の3月にNTTが研究中止命令を出したからである。

もっとも大切な時に、いったいどのような経営判断に基づいてこの奇妙な中止命令が出されたのか。

幹部の力量が足らずにリスクを避けたり、あるいは正しい情報が上に流れなかったり、といった、語るに落ちる原因によるものではない。それどころか、研究幹部は数々の研究・開発を成功に導いた優秀な研究者で、情報伝達の齟齬もまったくなかった。では、なぜなのか。以下、簡単にその経緯をまとめておこう。

¹⁰ Nakamura, S., Senoh, M. and Mukai, T., "P-GaN/n-InGaN/n-GaN double heterostructure blue-light-emitting diodes", Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L8; "High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes", Appl. Phys. Lett. **62**, 2390 (1993).

松岡が青色発光に執念を燃やして茨城研究所に移ってきた 1987 年、同じ研究グループに、セレン化亜鉛の研究チームも移ってくることとなった。こうして同じグループの中にセレン化亜鉛の研究をするチームと窒化ガリウムの研究をするチームが同居することとなった。どちらも目標は青色発光だったから束ねられたのだ。不幸の契機は、ここに始まる。

当時NTTは、アメリカのAT&Tベル研究所²²を見習ってその研究所の研究員に潤沢な研究資金を与えていた。研究テーマも、目的重視とはいえ「基礎研究をしっかりとしないと技術の最前線から取り残される」という判断から、研究者の自由意志を尊重していた。日本では大学がイノベーションの方を向いていないから、NTTが日本の最先端技術を率いていくのだという強いプライドがあったといえる。

ところが、1990 年ころから事態が変わりはじめた。

これからの NTT は競争環境が厳しくなり、自由に研究・開発をすることができなくなる可能性がある。したがって選択と集中を強化しなくてはならない。

そういう議論が、くりかえし研究開発本部でなされるようになる。各研究所は、特許料収入などを勘案した評価関数を作って評価される、という時代になったのである。すると必然的に「材料の研究は、NTT に要るのか。買ってくればいいじゃないか」という議論が公然とされるようになった。

研究開発本部の中に、今後の戦略を審議する材料研究連絡会という有識者会議があった。この連絡会がその空気を察して「資源をさらに重点配分すべきだ」と本部長に答申。本部長からの下命を受け、各研究所は NTT の事業に直接関係のない研究・開発を整理することになった。言うまでもなく、青色発光デバイスは、情報通信に直接関係はないので再編成（リストラ）の対象となる。

となると、1 グループで 2 つの選択肢を持ち続けることは、当然ながらできなくなる。最善でもセレン化亜鉛か窒化ガリウムのどちらにするかの決断をせざるを得ない。

では、どちらを選ぶか。

いうまでもなく事業部門に対して、説明責任を果たせる方だ。

それにはまず p 型化ができていのかどうか第 1 の決め手となる。すでに 1990 年に、セレン化亜鉛ではそれがクリアできていた。しかも 1991 年 6 月にはアメリカのスリーエムが、青色に光るセレン化亜鉛の青色レーザーで室温パルス発振²³に成功したことを米国デバイス研究学会で披露してセンセーションを巻き起こしたばかりであった。

一方、窒化ガリウムでは、赤崎らが「電子線照射で p 型ができた」ということを学会で報告したものの、p 型化の可能性について第三者の確認が取れていない。確かに松岡らがインジウムの導入に成功しているものの、これについても p 型化は、見るからに程遠い。となると窒化ガリウムの方に資源を集約して実用化を推進すべし、とする研究計画書を論理立てて記述することは不可能な状況であった。

それでも、かつて公的研究機関として研究者の意思を尊重する伝統の中で育った研究幹部は、松岡らに「ただちに窒化ガリウムの研究を止めてセレン化亜鉛に集中せよ」と言い出せなかった。佐々木は言う。

「実は 1991 年に研究所長から宿題をいただきました。とにかく来年の 3 月までに青色半導体レーザーを実現せよ。もし実現できたら、窒化ガリウムの研究を続けられるべく何とか上に働きかける、と。そこで松岡さんから、こう説得されました。

『これは、何としてでも光らせないといけない。所長は材料を問わないと言っているけ

れど、窒化ガリウムですぐに光らせるのは、来年の3月まではとても無理だ。しかし光ったあとは何をやっても良いと彼は言ってくれた。だから、とにかくセレン化亜鉛で光らせてから、また窒化ガリウムに戻ろうよ』と」。

この最後通告を受けて確かに松岡らは死に物狂いに研究をした。そして1992年の3月17日までに何と、セレン化亜鉛で半導体レーザーをパルス発振させるところまでこぎつけた。それは日本初の快挙だった。

しかし、なぜ事業に直結しない研究に資源を振り向け、守らねばならないのか。これが、研究開発本部の本音であった。その3月末日をもって窒化ガリウムの研究は中止された。

それから1年もたたないうちに、日亜化学による青色発光ダイオードの開発成功のニュースが世界を駆け巡った。しかもそれに先立って日亜化学の研究者が窒化ガリウムの青色発光ダイオードを持参している。これを目の当たりにした研究幹部は「どうしてこんなに良く光るんだろう」と思ったという。しかし研究所としては、セレン化亜鉛に資源を集中することを決裁した直後なので、その決裁をまたぞろ覆すことなどできるはずがなかった。

天の配剤

その後も松岡隆志は、窒化ガリウム研究の再開を訴え続けた。1994年までには日亜化学の青色発光ダイオードの優秀さは誰もが認めるものとなり、しかもこの技術が20世紀最後のイノベーションになりえる予感を誰もが感じていたので、NTTは研究中止の2年後に松岡の研究再開を認めている。ただしチームを編成することもなく予算も微々たるもので2年間の致命的な遅れを取り戻すには程遠いものであった。

いっぽう佐々木徹は、研究所を去り子会社のNTTエレクトロニクスで光通信の半導体レーザーの生産に従事することとなった

「どうして、中止命令に従ったのか」という私の問いに対して、彼は、イノベーション・マネジメントを考察する上できわめて重要な、次のような回答を返した。

「セレン化亜鉛を選ぶか、それとも窒化ガリウムを選ぶか。この問いかけに対して1992年当時、『セレン化亜鉛を止めて窒化ガリウムを続けるべきだ』と主張できるような空気は、ありませんでした。

もっとも私は個人的には、むしろセレン化亜鉛のほうを止めて窒化ガリウムをやろうと、言葉の勢いではあれ言っていたんです。なぜって、ぼくには窒化ガリウムのほうが絶対に素性がよいという気がしてならなかったからです。たとえばほんの小さなことですが、窒化ガリウムではホール測定用の電極が簡単に作れる。ところが、セレン化亜鉛の場合はとても苦勞する。このことから、窒化ガリウムの方が、表面の素性がいいのではないかと何となく思っていました。このような積み重ねで、『窒化ガリウムはゲテモノだけれども、何か天の配剤めいたものを持っている』と感じるようになりました。

この感をもっと強くしたのは、セレン化亜鉛のレーザーがすぐに壊れるけれども窒化ガリウムのレーザーは長くもつ、という事実遭遇してからです。この材料には何やら天賦性がやっぱりあるのではないかと、思いました。でもそのことに気づいたのは、窒化ガリウムの研究を止めた1年ほど後のことでした」。

4. 東芝の場合

研究開始が早かった東芝

奇しくもこれと同じことを、東芝・研究開発センターで最初に窒化ガリウムの研究を始めた大場康夫は私に語った。

「私は、大学院時代にミクロな欠陥を研究する研究室にいたおかげで、セレン化亜鉛の素性の悪さを感じ取っていました。セレン化亜鉛は欠陥が誘導されやすい。これはセレン化亜鉛が弱い材料だからです。弱いものでがんばっても、うまくいかない」。

1983年に大学院博士課程を修了して東芝総合研究所に入った大場康夫は、電子部品研究所に配属されDVD用の赤色半導体レーザー²⁴材料の結晶成長に従事した。

この開発成功については伝説が残っている。軽井沢で行なわれた1985年の国際会議において、東芝・NEC・ソニーが偶然にも同時に「赤色半導体レーザーの室温連続発振²⁵の成功」を世界に先駆けて発表する。この東芝の発表者が、大場康夫であった。大場は、発表中に学会が用意したヘリウム・ネオン・レーザー（波長0.63 μm）のポインターを自作の半導体レーザー（波長0.67 μm）にすりかえた。聴衆は最初まったく気がつかなかったが、そのうちに最前列の聴衆がこのすりかえに気づき、拍手をはじめた。次第にその拍手はうねりになって後方に伝播し、皆が彼の成功を祝福したという。

このDVD用赤色レーザーが自分の手を離れた1988年、大場は新しい研究ターゲットを探し始めた。当然、だれもまだ実用化していない緑色発光そして青色発光への挑戦しかない。

セレン化亜鉛か、窒化ガリウムか。

大場は、迷うことなく窒化ガリウムを選んだ。その動機こそ、先に掲げた言葉であった。さらに彼は、次のように続けた。

「セレン化亜鉛の素性が悪いという勘以上に、誰もやっていないことをやろうとする時には、自分がある意味でだまして、モチベーションを高めなければなりません。青色発光という未踏のことをやるのですから、どうせやるのだったら誰もやっていないことをやろうと考えたのです。すなわち窒化ガリウムです。こうしてセレン化亜鉛を研究するグループの傍らで1年かけて新しいMOVPE装置を作り、1990年から窒化ガリウムの成長を始めました」

この時点では既に赤崎のバッファ層技術が公表されていた。しかし大場は初期の佐々木と同様に「真似はやめよう」と決める。

1991年に中村が2フロー法の発明を報告したあと、翌年には、驚異的な性能を持つ青色発光ダイオードの開発をアナウンスする。それでも大場は、頑固にみずからの方法で窒化ガリウム成長を続けていった。

ここで興味深い事実がある。1996年の9月11日に東芝は「窒化ガリウムの青色半導体レーザーを開発した」と記者発表した。室温でパルス発振するレーザーの実現で、日亜化学について世界で2番目の快挙であった。ところが、これを発表した研究チームは、大場とは異なるメンバーだったという点だ。実際、同月30日の日経新聞の「先端人」では、結晶成長チームのリーダーだった板谷和彦が「青色発光レーザーの開発に成功した」若きホープとして紹介され、さらに翌年1月の同紙には「研究開発センター材料・デバイス研究所の東実所長（51）が陣頭指揮に立つ。（中略）東氏の下には中村優ラボラトリー・リー

ダー（45）や板谷和彦研究主務（37）ら実力派の中堅と若手が第一線の研究に携わる」とチーム編成を公表している。

光を創ることへの思い入れが元来強かった東芝では、青色発光デバイスをめざして1980年代からセレン化亜鉛の結晶成長の研究を行っていた。それは、日本の半導体・デバイス産業を引っ張ってきた東芝の自負によるものであった。

このセレン化亜鉛の研究グループが、1993年11月の日亜化学の新聞発表直後にその研究を止めて窒化ガリウムに転進することをただちに決定する。その転進決定のすばやかさは見事という他はない。大場に窒化ガリウムの自由な研究を許しつつ、社長命でセレン化亜鉛の研究を行ってきており、両者の暗黙知²⁶が決裁者の東に正確に伝わっていたからこそこの判断だった。

ところが1996年の新聞発表以後、にわか仕立てのこのグループは思いのほか苦しむことになる。会社の大きすぎる期待に背いて、青色発光の連続発振がいつこうにおきないのだ。まったく前進が見られないまま3年が経過した。その間にアメリカのクリー社²⁷や富士通など他の企業が次々に連続発振に成功して自分たちを追い抜いていく。

いったい東芝に何があったのか。

あまりに早くパルス発振の実現にこぎつけたので、このイノベーションの「パラダイム破壊性」を見誤ったのではないか。次のような経緯があったと思われる。

研究現場のリーダーは、半導体レーザーの要素技術を詳しく分析することを企てた。第1に、光を効率的に閉じ込めて増幅を最大化するデバイス構造。その最適設計をきちんと行なった。第2に、デバイス構造を作りこむプロセス技術。半導体にダメージを与えない工夫を徹底した。第3に、電極の形。多量の電流を流すことで熱がこもらないように、電極の形を厳密に計算した。

このように、要素技術を分析して組み合わせの仕方を精査することは、新製品開発を行なう際の模範である。ただしこの有効性は、イノベーションが既存知識の統合によって成就される場合に限られる。

青色半導体レーザーの場合、連続動作しない原因は、実はどれくらい完璧な窒化ガリウム単結晶を達成したかという点にあった。その問題を解決するためには、固体物理学の地平に下りていく必要があったのだ。

もっとも、何年も成果が出なければ、研究者の暗黙知は、「時間がかかってもよいから技術のレベルから、科学的思考の原点に帰るべきこと」を教えるものだ。しかし会社の期待に押しつぶされて互いの共鳴が得られなくなった場の中では、失敗の責任を取らされることを誰もが恐れる。こうして、科学に回帰しようとは一人として言い出せなくなった。結局、東芝は開発レースから脱落した。

板谷和彦は、岡山西大寺の会陽（えよう）という奇祭に例えながら、こう語る。

「あのはだか祭では、陰陽一對の宝木（しんぎ）をめぐる男たちが争奪戦をします。一生のうちに2回以上手にする人もいます。青色レーザーという宝木は、ぼくらの手をすり抜けていったけれど、ぼくらはそれに触れることができたんです」。

しかし東芝の場合、宝木がすり抜けていった科学的意味を深く熟考することをしなかった。そのため、すり抜けた宝木の残像がしだいに幻想と化して、研究者を焦燥の中に駆り立てていったのである。

5. 他の大企業の場合

ソニーの場合

では、それ以外の企業は、なぜ遅れを取ったのか。その理由は共通している。究極の選択で、セレン化亜鉛を選び取ってしまったからだ。

問題は、1993年に日亜化学が青色発光ダイオードの量産開始を新聞発表したあともなお、数年ものあいだ窒化ガリウムを無視し続けた点だ。いったいなぜなのか。セレン化亜鉛に最後まで執着したソニーの場合を追ってみよう。

ソニーは、常にイノベーションの最先端に位置することを社是としてきた。だから青色発光という未踏分野に乗り出すことにかけては、東芝以上に執念を燃やしていた。

実はそのことが、窒化ガリウム研究への転進を極端に遅らせた。結局ソニーがセレン化亜鉛の研究中止を決意するのは、1997年になってからのことであった。

ソニーは、1980年代からセレン化亜鉛で青色発光デバイスを作ろうと決意。その研究に強く肩入れしてしまったのである。実際、日本中でセレン化亜鉛からの撤退が相次ぐ中、ソニーでは30人以上の研究者をむしろ重点投入し、1997年にはついにセレン化亜鉛・青色レーザーで300時間の連続発光を成し遂げた。

しかし同年、日亜化学が「窒化ガリウム・青色レーザーの寿命が1000時間を越えた」と発表。ソニーは、この新聞報道に完全に打ちのめされて、方針転換を余儀なくされた。

お家取り潰しになったセレン化亜鉛の研究メンバーは、窒化ガリウム研究に移ったり、ソフトウェアや有機ELなどまったく関係のない研究に移ったりして散り散りになる。

しかしその後のキャッチアップは驚異的に早かった。

青色半導体レーザーによる次世代DVD「ブルーレイ・ディスク (BD)」の規格化を主導。日亜化学との特許の相互利用を進め、量産可能なBD規格のDVDを、今春をめどに開発する、と昨年末に発表。

そして2003年の4月10日にソニーは、世界に先駆けてBD規格のビデオ・レコーダーを発売した。記憶容量はDVDの5倍。ディスク1枚で12時間の録画が可能である。達成の鍵は、日亜化学との巧みなアライアンスだけではなく4半世紀以上にわたる結晶成長学の蓄積にあった。

NECの場合

NECの窒化ガリウム研究への着手は、ソニーより早く1996年のことであった。それでも3年間、手をこまねいていたことになる。

むろん優秀な研究者集団をかかえる研究所の中では、悶々としていた人が何人もいた。

「しかしとても窒化ガリウムに手を伸ばせる立場になかった」と、当時を振りかえりながら水田正志（NEC光・無線デバイス研究所長）は言う。

「やはり図体がでかい会社の宿命です。実は、セレン化亜鉛研究のリーダーは窒化ガリウムの研究を併せてすることに強い願望をもっていたのですが、会社としてはセレン化亜鉛に多額かつ継続的な投資をしていたので、よほど強い理由がない限り窒化ガリウムに資源配分することができませんでした。資源配分を変更するのに長い時間がかかったのです」。

それでも、1996年のはじめに2人の結晶成長技術者が窒化ガリウム研究に投入される。しかしこの時点ですら、人も金もセレン化亜鉛への投入が圧倒的に多かった。

日亜化学ではその後、窒化ガリウムによる青色レーザーの連続発振に成功。1997年には1000時間を越える長寿命化を達成して実用化まで射程距離に入った。この時点で、NEC幹部は事の重大さに気づき、セレン化亜鉛からの撤退を決断した。水田は続ける。

「だから、日亜化学では出来上がってしまった段階で、NECは窒化ガリウムのレーザーを始めたんです。完全に後追いになってしまいました。しかも、この技術に関しては、『後発者の利益』があまり成り立ちません。一つ一つの改善に後発者が先行者とほぼ同じだけ時間がかかってしまうのが現状です。いかに難しいか、またいかに科学的に解明されていなかったかということだと思います」。

それでも、1996年の暮れにNEC光・無線デバイス研究所の碓井彰らは、ELO²⁸法とよばれる画期的な技術を開発している。これは、窒化ガリウムの成長と同時に発生した洞穴状の欠陥（貫通転位という）を劇的に減らす技術である。針金を巧みに利用して盆栽を作るように、「添え木」を半導体の上に仕込んで結晶成長の方向を誘導し、ある場所に貫通転位を追い込んでしまう方法だ。

このELO法については後日談がある。

碓井はこの技術を隠したまま、窒化ガリウムの劇的な低欠陥化に成功したことを、1997年春の応用物理学会で報告した。座長をしていた中村は、すかさずどのような方法を用いたのかを質問。碓井は「詳細は申し上げられないが、マスク²⁹を使った」とだけ答えた。中村は、その一言で技術の全貌を看破する。

その場に居合わせていた板谷はこう語る。

「ええ、ぼくも碓井さんの話を聞いて、どのような技術なのかを見破りました。でも作るの大変だぞと思い、やってみる気はしませんでした。半導体レーザーは、安く作らなくてはならないから…。

そういえば、中村さんはあのあとすぐ、会社に電話していましたよ」。

結局、中村はこの技術を間髪いれずに取り入れ、レーザーの長寿命化を達成する。1997年の秋に徳島で行なわれた国際会議では、できあがった青色半導体レーザーを会場で披露しながら、この成功がELO技術に依存していることを報告した。

「マスク」というたった一言から出発して半年に満たないうちに技術をモノにし、製品にまで仕上げさせてみせる。確かに中村は、巨人たちの肩に乗るべくして乗った天才であった。

2003年現在においても、青色半導体レーザーを世の中に送り出しているのは、中村のいた日亜化学ただ1社である。無意味な階層構造を持たないからこそ、このパラダイム破壊を産業としてのイノベーションにまで高められたことになる。

ここで読者は、多くの疑問に到達するであろう。その中で、特に2つの疑問を取り上げてみよう。

第1の疑問：なぜ松下電器は赤崎に研究中止命令を出し、なぜNTTは松岡に研究中止命令を出したのか。

第2の疑問：なぜ大企業はこのイノベーションに遅れをとり、なぜ遅れてきた中村と辺縁のベンチャー企業・日亜化学がこのイノベーションの最終エンジン足りえたのか。

用語集

- ¹ 青色発光デバイス blue light emitting devices = 青色発光ダイオード blue LED (Light Emitting Diode) と青色半導体レーザー blue LD (Laser Diode) をさす。
- ² 窒化ガリウム GaN (gallium nitride) = 窒素原子とガリウム原子を 1 対 1 に化合し結晶化した半導体。熱に強く放射線にも強いので、エンジンの中や宇宙空間でも使用可能な半導体デバイスを作れる。しかしその強靱さゆえに、結晶成長は困難を極めた。
- ³ 単結晶 single crystal = 物質全体にわたって同一の周期構造からなる固体。これに対して、同一の結晶がモザイクのようにいろいろな方位を持って集まった固体を多結晶という。
- ⁴ 干渉色 interference color = ある平坦な物質の上にある透明な薄膜に光が入射すると、薄膜の表面で反射した光の波と膜と物質との界面で反射した光の波とが重ね合わさって、強めあったり弱めあったりする。これを干渉という。強めあうか否かは、膜厚と光の波長に依存するので、膜厚に応じて色が見える。これを干渉色という。水に浮いた油に色が付いて見えるのは、このためである。この現象を利用して薄膜の厚さを測定することができる。
- ⁵ X線回折 X-ray diffraction = X線を固体に照射してその回折波（原子にあたって散乱されたX線の合成波）を観測し、固体を構成する原子の配列状態を調べること。結晶性の良さや結晶構造を精密に調べることができる。
- ⁶ MOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) = 原料として、気体を用いる結晶成長をVPEという。さらにVPEにおいて原料として有機金属を用いるものをMOVPEという。
- ⁷ ヒ化ガリウム GaAs (gallium arsenide) = ヒ素原子とガリウム原子を 1 対 1 に化合し結晶化した半導体。
- ⁸ リン化ガリウム GaP (gallium phosphide) = リン原子とガリウム原子を 1 対 1 に化合し結晶化した半導体。
- ⁹ 窒化アルミニウム AlN (aluminum nitride) = 窒素原子とアルミニウム原子を 1 対 1 に化合し結晶化した半導体。
- ¹⁰ 格子整合 lattice match = 原子が周期的に配列した系を格子とよぶ。成長する結晶格子の結晶構造と原子間距離とが、下地の結晶格子と同じであること。レゴの上にレゴをつないだ状態。
- ¹¹ パラダイム (paradigm) = 定説として受け入れられた科学的知見の枠組みで、自然に対する問いかけ方と答え方の模範を示す概念。米国のトーマス・クーン Thomas S. Kuhn が科学的世界観の変革を説明するために提唱した。経営のパラダイムなど、異なる意味に用いられることもあるが、ここではクーンの原義そのもの。
- ¹² セレン化亜鉛 ZnSe (zinc selenide) = セレン原子と亜鉛原子を 1 対 1 に化合させて結晶化した半導体。柔らかい物質で、比較的低温で結晶成長することができる。そのまま青い光を射出することができる。
- ¹³ バッファ層技術 buffer layer technique = ある基板結晶の上に、格子整合しない結晶を成長させるために、その間に結晶になりきっていない物質を挟む方法。芝浦工業大学の長友隆男らは、中村修二が特許を出願する以前に窒化ガリウムのバッファ層を用いて結晶成長を試みており学会でもそれを発表している。

- ¹⁴ p型 p-type=電子の抜け穴が電流を運ぶタイプの半導体（一方、電子が電流を運ぶタイプの半導体をn型という）。ヒ化ガリウムでは亜鉛原子をわずかに添加することで実現できる。窒化ガリウムでは、マグネシウム原子を入れたほうがよいことが後にわかった。
- ¹⁵ ホール効果 Hall effect=導電性のある固体に電流を流しながらこれと垂直に磁場をかけると、電流と磁場の両方に垂直な方向に電場が生ずる現象。1879年にアメリカのエドウィン・ホールEdwin Hallによって発見された。電場の向きを測ることで、電流の担い手がプラスかマイナスのいずれの電荷を持っているかが分かる。
- ¹⁶ 窒化インジウム InN (indium nitride)=窒素原子とインジウム原子を1対1に化合し結晶化した半導体。
- ¹⁷ 混晶alloy=2つ以上の異なる物質が均質に混ざってできた結晶。一般にそれぞれの中間的な性質を示す。松岡らよりわずかに早く、芝浦工業大学の長友隆男らもまたこの混晶の実現に成功している。しかし彼らの半導体は単結晶とは言い難いので、本稿では松岡の物語を取り上げた。
- ¹⁸ LPE (Liquid Phase Epitaxy)=原料として液体を用いる結晶成長法。
- ¹⁹ リン化インジウム InP (indium phosphide)=リン原子とインジウム原子を1対1に化合し結晶化した半導体。
- ²⁰ セレンディピティserendipity=思いもよらないものを偶然に発見したり掘り出したりする能力。
- ²¹ 発光スペクトルphotoluminescence spectrum=発生する光をプリズムで波長ごとに分解して、光強度を波長の関数として分析したときの物質の特性。
- ²² AT&Tベル研究所Bell Laboratory=アメリカ電話電信会社の研究所。多数のノーベル賞受賞者を輩出するとともに、トランジスタや太陽電池、MOSFETなど半導体産業の主要なイノベーションを創出し、20世紀における技術創造のモデルとされた。1995年に改組され、ルーセント・テクノロジー社Lucent Technologiesの研究所となった。
- ²³ 室温パルス発振pulse oscillation at room temperature=室温でレーザー光がパルスのように発生する状態。レーザー開発において、一つの重要なマイルストーンである。
- ²⁴ 赤色半導体レーザーred laser diode=リン化インジウムとリン化ガリウムの混晶を母体とする。波長約0.65 μm の赤光を射出し、DVDに用いられている。1983年、電電公社電気通信研究所の朝日一らが世界で初めて室温パルス発振に成功した。
- ²⁵ 室温連続発振continuous oscillation at room temperature=室温でレーザー光が連続的に発生する状態。室温連続発振すればレーザーの開発は成功したといえることができる。
- ²⁶ 暗黙知 tacit knowledge=言語の背後にあつて言語化されない知識。元来、共同体の中で醸成される集合意識を説明するために、イギリスのマイケル・ポラニー Michael Polanyiによって概念化された。知識になっていない（言語化されていない）知慧。
- ²⁷ クリー社 Cree Research=ノースカロライナ州にある半導体ベンチャー企業。1987年設立。炭化シリコンを製造するとともにそれを基板とする青色発光デバイスを開発している。中村修二（現在カリフォルニア大学サンタバーバラ校教授）がコンサルタントを務める。
- ²⁸ ELO (Epitaxial Lateral Overgrowth)=結晶成長を行なう表面の一部に、マスクを付けてから結晶成長を行なう技術。マスクを付けてない剥き出しの表面だけから結晶成長がおき、や

がマスクの上を横方向に結晶成長がおこる。マスクの右側からやってきた成長面と左側からの面とが邂逅して成長が止まるが、貫通転位の末端は、この邂逅面にすべて集められる。その上に改めて結晶成長すると、貫通転位のない結晶が得られる。

²⁹ マスク mask=半導体表面の一部を覆い隠すもの。ここでは、マスクとして酸化シリコンが使われた。マスクを付けた部分は結晶成長が妨げられ、マスクを付けてない部分から結晶成長がおこる。