

# 科研費 NEWS

KAKENHI 2015年度 VOL.3



文部科学省

MINISTRY OF EDUCATION,  
CULTURE, SPORTS,  
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN



JSPS

JAPAN SOCIETY FOR THE PROMOTION OF SCIENCE  
日本学術振興会

## 科学研究費助成事業 Grants-in-Aid for Scientific Research

科学研究費助成事業(科研費)は、大学等で行われる学術研究を支援する大変重要な研究費です。このニュースレターでは、科研費による最近の研究成果の一部をご紹介します。

## 1 科研費について 3

## 2 最近の研究成果トピックス

|                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| 人文・<br>社会系                     | 移動動詞の実験的研究 4        |
|                                | 神戸大学 人文学研究科 教授 松本 曜 |
|                                | 人材育成と事業システム 5       |
| 京都女子大学 現代社会学部 教授 西尾 久美子        |                     |
| パネルデータから、日本の家族関係のダイナミクスをとらえる 6 |                     |
| 東洋大学 社会学部 教授 西野 理子             |                     |

|                                                  |                                     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 理工系                                              | 1次元ナノ細孔中ヘリウムの超流動と朝永-ラッティンジャー液体的挙動 7 |
|                                                  | 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 助教 谷口 淳子         |
|                                                  | 原始惑星系円盤形成に伴う分子組成の劇的変化 8             |
|                                                  | 理化学研究所 准主任研究員 坂井 南美                 |
|                                                  | 高分子鎖の空間連結が産み出すトポロジー変換可能な高分子 9       |
| 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 高田 十志和                       |                                     |
| 微細管路の特性から見えてくる新しい化学プロセス技術 10                     |                                     |
| 徳島大学 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 教授 外輪 健一郎                 |                                     |
| 温度分布制御型マイクロフローリアクタによる燃焼化学反応の研究—火炎クロマトグラフ法の誕生— 11 |                                     |
| 東北大学 流体科学研究所 教授 丸田 薫                             |                                     |

|                                                 |                                                                        |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 生物系                                             | 脚の短いプロセッシブミオシンが運動している様子のビデオ撮影に成功 12                                    |
|                                                 | 金沢大学 理工研究域 バイオAFM先端研究センター 准教授 古寺 哲幸                                    |
|                                                 | 植物診断ロボットを用いた太陽光植物工場の環境制御の高度化 13                                        |
|                                                 | 愛媛大学 農学部 准教授 高山 弘太郎                                                    |
|                                                 | 石油代替燃料生産を目指した微細藻 <i>Botryococcus braunii</i> のトリテルペン系炭化水素合成メカニズムの解明 14 |
|                                                 | 東京大学 大学院農学生命科学研究科 准教授 岡田 茂                                             |
| 卵巣癌のoriginを解明する 15                              |                                                                        |
| 島根大学 医学部 産科婦人科学 教授 京 哲                          |                                                                        |
| CYLD によるMet1 およびLys63 結合型ユビキチン鎖特異的切断メカニズムの解明 16 |                                                                        |
| 東京大学 放射光連携研究機構 助教 佐藤 裕介                         |                                                                        |

## 3 科研費からの成果展開事例

|                               |
|-------------------------------|
| 心停止中から脳を保護する咽頭冷却装置の開発 17      |
| 岡山大学病院 集中治療部 准教授 武田 吉正        |
| 新商品の効果を考慮した消費者購買指数と単価指数の開発 17 |
| 一橋大学 経済研究所 教授 阿部 修人           |

## 4 科研費から生まれたもの

|                                                       |
|-------------------------------------------------------|
| わが国の光ファイバ通信研究（前編） 18                                  |
| 東京工業大学栄誉教授（元学長）、高知工科大学（元学長）と国立情報学研究所（元所長）の各名誉教授 末松 安晴 |

## 5 科研費トピックス 31

## 1. 科研費の概要

全国の大学や研究機関においては、様々な研究活動が行われています。科研費（科学研究費補助金/学術研究助成基金助成金）はこうした研究活動に必要な資金を研究者に助成するしくみの一つで、人文学、社会科学から自然科学までのすべての分野にわたり、基礎から応用までのあらゆる独創的・先駆的な「学術研究」を対象としています。

研究活動には、「研究者が比較的自由に行うもの」、「あらかじめ重点的に取り組む分野や目標を定めてプロジェクトとして行われるもの」、「具体的な製品開発に結びつけるためのもの」など、様々な形態があります。こうしたすべての研究活動のはじまりは、研究者の自由な発想に基づいて行われる「学術研究」にあります。科研費はすべての研究活動の基盤となる「学術研究」を幅広く支えることにより、科学の発展の種をまき芽を育てる上で、大きな役割を有しています。

## 2. 科研費の配分

科研費は、研究者からの研究計画の申請に基づき、厳正な審査を経た上で採否が決定されます。このような研究費制度は「競争的資金」と呼ばれています。科研費は、政府全体の競争的資金の5割以上を占める我が国最大規模の競争的資金制度です。

（平成27年度予算額2,273億円（※）平成27年度助成額2,318億円）

※平成23年度から一部種目について基金化を導入したことにより、予算額（基金分）には、翌年度以降に使用する研究費が含まれることとなったため、予算額が当該年度の助成額を表さなくなったことから、予算額と助成額を並記しています。

科研費の審査は、科研費委員会で公平に行われます。研究に関する審査は、専門家である研究者相互で行うのが最も適切であるとされており、こうした仕組みはピア・レビューと呼ばれています。欧米の同様の研究費制度においても、審査はピア・レビューによって行われるのが一般的です。科研費の審査は、約6,000人の審査員が分担して行っています。

平成27年度には、約10万7千件の新たな申請があり、このうち約3万件が採択されました。何年間か継続する研究課題と含めて、約8万件の研究課題を支援しています。（平成27年9月現在）

## 3. 科研費の研究成果

### ■研究実績

科研費で支援した研究課題やその研究実績の概要については、国立情報学研究所の科学研究費助成事業データベース（KAKEN）（<https://kaken.nii.ac.jp/>）により、閲覧することができます。

（参考）平成26年度検索回数 約4,260,000回

### ■新聞報道

科研費の支援を受けた研究者の活躍がたくさん新聞報道されています。

平成27年度（平成27年4月～平成27年9月）

| 4月   | 5月   | 6月   | 7月   | 8月   | 9月   |
|------|------|------|------|------|------|
| 447件 | 536件 | 748件 | 802件 | 588件 | 466件 |

（対象：朝日、産経、東京、日本経済、毎日、読売の6紙）

次ページ以降では、科研費による最近の研究成果の一部をご紹介します。➡

## 移動動詞の実験的研究

神戸大学 人文学研究科 教授

松本 曜



### 研究の背景

日本語と英語には、事物の移動をどのように表現するかについて、大きな違いがあることが知られてきました。たとえば、〈上方向〉の移動は、日本語では〈上がる〉などの動詞で表すのに対して、英語ではupなどの副詞・前置詞で表します。このような絶対的方向に関する表現の違いについては、多くの研究がなされてきました。でも、「行く」「来る」などで表される、話者との位置関係、すなわち「直示性」の表現については、あまり考察がなされていませんでした。また、多くの研究は、母語話者としての研究者自身の直感に頼って研究を行ってきました。

### 研究の成果

これに対して、科研費プロジェクト『日英語と移動表現の類型論：直示性に注目した通言語的実験研究』では、2つの点で新しい試みを行いました。1つは直示性に注目したこと、もう1つはビデオ実験という新しい研究手法を取り入れたことです。私たちが行った調査は、人が様々な移動を行う様子をビデオで撮影して話者に見せ、それをどのように表現するかを答えてもらうというものでした。これによって、統一的な具体的場面を設定した上で、日英語の話者がどのように「来る」「come」などの直示動詞を用いるのかを調べることができました。

この実験により、両言語で直示動詞を使う機会が異なることが明らかになりました。日本語では、調査したほぼすべての移動事象に対して「行く」か「来る」が使われまし

た（「駆け込んで来た」のように複数の動詞の1つとして使われる場合を含む）。それに対して英語では、移動者が話者と同じスペース（部屋）に入る場合や、移動の際に話者に話しかけるなどの行為を行う場合のみ、直示動詞が多く使われました。このような違いは、日英語の主観性や行為性の違いといった、より大きな違いを反映したものと考えられますが、この研究はそれを実験的、実証的に証明したことになります。

### 今後の展望

2015年度から始まった科研費プロジェクト『移動表現による言語類型：実験的統一課題による通言語的研究』では、諸言語において、様々な経路がどのような形式で表現されるのかについて、いままで以上に多様なケースを取り上げて実験を行います。それにより、言語間の差異と共通性の両方について、さらに多くのことを明らかにしたいと思います。

### 関連する科研費

平成17-20年度 基盤研究(B)「言語類型論と日英語：音韻、統語、意味、談話における類型論の総合的研究」

平成22-25年度 基盤研究(C)「日英語と移動表現の類型論：直示性に注目した通言語的実験研究」

平成27-30年度 基盤研究(B)「移動表現による言語類型：実験的統一課題による通言語的研究」

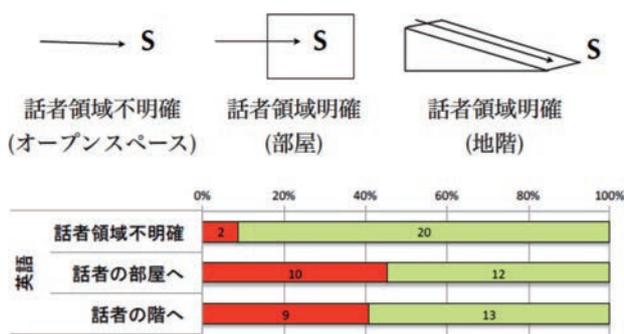


図1 話者が特定の仕切られた空間にいると、そこへの移動はcomeで表現されやすい。



図2 移動動詞の性質に関する学会発表

# 人材育成と事業システム



京都女子大学 現代社会学部 教授

西尾 久美子

## 研究の背景

人材を育成しながら事業を継続していく上で、個人にとっても組織にとってもメリットが大きい仕組みはどのようなものだろうか、また得られた研究成果は少しでも社会に役立つようにまとめたい、これが企業勤務を経験して研究者になった私の研究に対する基本的な考え方です。

京都花街の芸舞妓の人材育成と一見さんお断りに代表される事業システムとの関連を博士論文にまとめた後、科学研究費の支援のもとで、人材を育成しながら長期的に事業を継続している、エンターテインメント産業や地域の基幹産業の事例を取り上げて研究を続けてきました。

## 研究の成果

華やかなスポットライトを浴びるタカラジェンヌたちは、全員が学校で基礎教育を受けています。さらに、舞台での多様な能力発揮の機会をファンが見守り、評価し、将来を期待しながら応援する「劇場型選抜」の仕組みがあり、それらが10代の少女がトップスターへ成長する長期的なキャリア形成につながっています。日本のエンターテインメント産業の特色は、この人材育成のプロセスそのものが顧客へのサービス提供に付加価値を生み出していることであり、それを支えているのが人材育成と事業システムの密接な関わりでした。

宝塚歌劇や京都花街のような教育制度を活用した基礎技能の育成は、日本を支える中小企業にとっては負担が多く実践することが難しいのが現状です。しかし、広島県因島<sup>いんのしま</sup>では、造船業の中小企業が連携して技能育成のセンターを設立・運営しています。このセンターは、大企業が撤退した後、地域の基幹産業を担う新人教育を目的に1999年にスタートしました。「3カ月で3年の効果」と形容される成果は、地元の経営者層、造船関連団体、

行政、そして退職した技能者たちが指導育成を担うという連携の仕組みによって成り立っています。これは、新人の離職率の低減や地域外の人材の新規雇用という成果にもつながり、2005年には今治に、2006年には大分などと、日本全国の複数地域に同様のセンターが設立されています。

人材育成のために利害関係にある複数の事業者が連携すると、それがさらに波及して地域の基幹産業である中小企業の技能育成の基盤になっていくという研究成果は、海外の学会で驚きをもって迎えられました。

## 今後の展望

技能レベルの高い組織や個人が、そのメリットを独り占めしないのはなぜなのでしょう。そこで、今後は数百年という長い歴史を持つ伝統的専門職組織の「能楽」を事例に、専門家同士の連携による能力発揮や、流儀の中に複数の一門がある組織運営など、超長年にわたって続く人材育成と事業システムについて探究したいと考えています。伝統という時間の流れの中で知恵を蓄えてきた事例を取り上げて研究し、その知恵を適切に受け取って次の変革に活用する、そんな研究成果を目指したいと思います。

## 関連する科研費

平成21-23年度 基盤研究 (C) 「エンターテインメント産業における人材育成と事業システムに関する研究」

平成24-26年度 基盤研究 (C) 「地域基幹産業における人材育成と事業システムに関する研究」

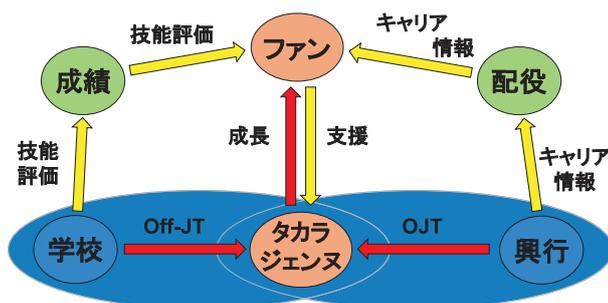


図1 宝塚歌劇の人材育成と事業システム—タカラジェンヌとファンの関係—  
西尾久美子 (2012), 「エンターテインメント産業のビジネスシステム-宝塚歌劇の劇場型選抜の仕組み」、『日本情報経営学会誌』第33巻第2号、3-15頁より引用。



図2 因島技術センターでの実技研修の様子 因島技術センターより写真提供

## パネルデータから、 日本の家族関係のダイナミクスをとらえる

東洋大学 社会学部 教授

西野 理子



### 研究の背景

中年期の夫婦関係は安定しているイメージがありますが、実際にはどの程度あてはまるのでしょうか。「経済的に貧困だと夫婦仲が悪い」など2変数間の関連が指摘されても、それが因果関連であるかどうかはわかりません。たとえば、夫がよく家事をしていると、その妻の夫婦関係満足度が高いことが以前からわかっていますが、それは夫が家事をすると妻の満足度が高まるのか、それとも、夫がよく家事をするような緊密な夫婦関係にあれば、当然その妻の満足度が高いのでしょうか。こうした疑問に答えるには、同一個人を継続的に追跡調査して収集した「パネルデータ」が必要です。

### 研究の成果

私たち日本家族社会学会有志は、研究会を組織し、全国規模の家族パネル調査を実施して、得られたデータセットを用いて研究を進めています。2009年から2013年まで5年間にわたって、1,879名の方々について毎年調査をさせていただきました。研究テーマは多岐にわたりますが、ここでは上記の疑問に私たちの研究会メンバーがどのように答えているのかをご紹介します。

分析の結果、実際に夫の家事が増減した時に妻の満足度に変動していることが確かめられました。満足度だけでなく、情緒的なサポート認知、日常の会話頻度など複数の側面のすべてにおいて、夫の家事が増えると妻の側にも夫婦関係の改善が認められました。

一方で、夫婦関係がまだ安定していない結婚15年以内のカップルに限定すると、夫の家事が増えると妻の満足度が上昇しているわけではなく、夫の家事が減ると妻

の満足度が低下していることがわかりました。実は、夫の家事参加が夫婦関係を良好にするわけではなく、家事をしないと関係が悪化するというわけです。つまり、夫の家事が妻の満足度を高める効果と低める効果は同じではなく、区別してとらえる必要があったわけですが、こうした区別はパネルデータがなかったらわからないものです。

また、定年退職を機に男性の家事参加が進むことはよく知られており、私たちのデータでも定年退職後に夫の家事頻度も夫婦の会話も実際に増えていました。しかし、夫の家事が増えたからといって妻の家事量は減っていないし、妻の夫婦関係満足度も変わっていませんでした。定年を機に夫が夫婦関係を見直しても、その効果は薄いのかもしれません。

### 今後の展望

他にも、離死別経験の影響、親子関係の変化、きょうだい関係など、研究の成果を学会発表や刊行物で発表しています。研究を展開してみると、家族関係の変化と時間との絡み合いにはまだまだ未解明の部分が大きいことに気づかされます。私たちが行った調査は5年という短い期間でしたが、より長期間継続して追跡するパネル調査が必要だと考えています。

### 関連する科研費

平成21-25年度 基盤研究 (A) 「パネルデータによる現代日本家族の動態研究」

平成26-28年度 基盤研究 (C) 「パネルデータによる家族関係の変容過程の研究」



図1 国際社会学会横浜大会にてテーマセッションを開催 (2014年7月)



図2 日本家族社会学会第24回大会にてテーマセッションを開催 (2014年9月)



図3 毎年複数回の研究会を開催して、研究成果を発表・検討

# 1次元ナノ細孔中ヘリウムの超流動と朝永-ラッティンジャー液体的挙動

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 助教

谷口 淳子



## 研究の背景

一般に、低次元系は強い量子揺らぎが多様な現象を引き起こすため、物性物理の重要な課題であり続けてきました。その中で、1次元フェルミ系は朝永-ラッティンジャー (TL) 流体として振る舞うことが知られており、すでに1次元電子系を中心に実験的研究が進んでいます。一方、1次元ボーズ系は理想気体ではBEC(ボーズ・アインシュタイン凝縮) 状態にならず、1次元系 $^4\text{He}$ においても超流動性を示さないと考えられてきました。しかし最近、1次元系 $^4\text{He}$ がボーズ系TL液体となり超流動性を示すことが理論的に予測されました。特に、東京大学物性研究所の押川らは、「TL液体の超流動応答は動的な現象で、超流動応答に伴うエネルギー散逸のピーク温度が観測周波数に対して“べき的”な依存を示す」という重要な指摘をしています。

私たちはこれまで、1次元ナノ細孔 (図1) に $^4\text{He}$ を閉じ込めることで1次元系 $^4\text{He}$ の実現を目指し、その超流動性をねじれ振り子法により実験的に調べてきました。ねじれ振り子は、ねじれロッドと試料セル (細孔と $^4\text{He}$ が中にある) で構成され、超流動成分を共振周波数の上昇として検出するものです。孔径2.8nmの細孔中では、超流動はバルク $^4\text{He}$ の転移温度より1K以上低温で現われ、さらに、その成長はエネルギー散逸のピークを伴う動的な現象であることが分かっていました。

## 研究の成果

私たちは、細孔中の超流動がTL液体的な特徴を有するかどうかを調べるために、複数の周波数で超流動を観

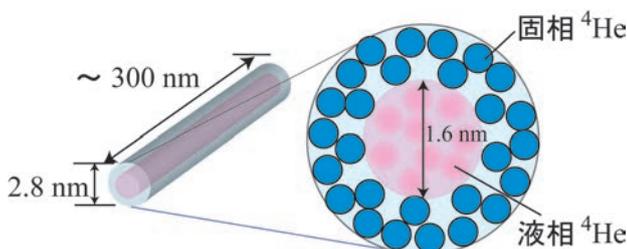


図1 1次元ナノ細孔中 $^4\text{He}$ のイメージ図

測することを考えました。そのために、ねじれロッドに試料セルとおもりをつけることで2つの共振モード (2 kHzと0.5kHz) を持たせた、2重連成振り子を開発しました。(図2挿入図) これを用いて測定した結果、図2に示すように、超流動の立ち上がり、およびエネルギー散逸のピークが、周波数の低下により低温側に40mK程度シフトすることが分かりました。この大きさは押川らの予測とほぼ一致しており、細孔中 $^4\text{He}$ でTL液体が実現している可能性を示す、初めての観測事実となりました。

## 今後の展望

今後、広範囲の周波数領域で超流動を観測する測定法を開発し、周波数依存の詳細を調べていきたいと考えています。これにより、細孔中の超流動とTL液体との関連が実験的に明らかになるでしょう。系の次元を下げることで初めてあらわになる「量子揺らぎの効果」を、超流動という現象を通して明らかにしていければと考えています。

## 関連する科研費

平成23-25年度 若手研究 (B) 「1次元細孔中の液体 $^3\text{He}$ を用いた朝永-ラッティンジャー液体的の研究」

平成26-28年度 基盤研究 (C) 「ナノ細孔中 $^4\text{He}$ を用いた1次元特有の動的な超流動応答の実験的解明」

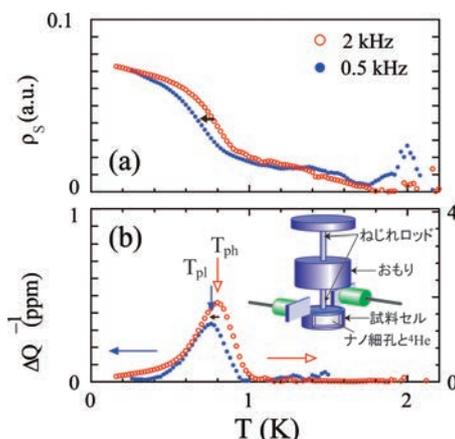


図2 孔径2.8nmの細孔中 $^4\text{He}$ の超流動応答。 $T_{ph}$ 、 $T_{pl}$ はそれぞれ2、0.5kHzにおける散逸ピーク温度。挿入図は2重連成振り子の模式図。

# 原始惑星系円盤形成に伴う 分子組成の劇的变化



理化学研究所 准主任研究員  
**坂井 南美**

## 研究の背景

恒星は、星と星との間に漂うガスや塵からなる雲(星間分子雲)が自己重力で集まることで誕生します。その際、周囲に作られるガス円盤が惑星の起源です。私たちの住む太陽系も46億年前、そのようにして誕生しました。「太陽系は宇宙の中でありふれた存在なのだろうか?」この問いは、宇宙における私たちの起源や存在意義を考える上で極めて重要な問題です。これまで、構造や運動などの物理的視点から原始惑星系円盤の形成が調べられてきましたが、その視点だけからは円盤と周囲のガスの区別が難しく、円盤形成現場を捉えることができませんでした。また、円盤形成に伴うガスの化学組成変化についても、太陽系環境の物質の起源に直結する課題にもかかわらず、観測研究はほとんど進んでいませんでした。

## 研究の成果

南米チリのアタカマ砂漠に建設されたアルマ望遠鏡を用いて、おうし座分子雲にある原始星L1527周辺の高感度・高空間分解能観測を行い、生まれつつある円盤に付随するガスの運動状態と化学組成を調べました。その結果、中心星から半径100 AUよりも内側で、炭素が直線状に連なった炭素鎖分子やその仲間の分子が急激にガス中からなくなっている一方で、一酸化硫黄分子はその半径付近でリング状に局在していることがわかりました。ドップラー効果の精密測定から、この半径は、落ち込んでくるガスが遠心力のために滞留し(遠心力バ

リア)、原始惑星系円盤に移り変わっていく半径であることがわかりました。落ち込むガスが円盤に突っ込むときに弱い衝撃波が生じ、それによって塵の表層に凍りついていた一酸化硫黄分子がガス中に放出されてリング状に観測されたと見られます。原始惑星系円盤は、角運動量を何らかの機構で抜き去られた物質が遠心力バリアの内側に入り込んで形成されると考えられますが、円盤内は低温、高密度なのでほとんどの分子が星間塵に凍りついてしまいます。このため、炭素鎖分子やその仲間の分子はバリアの内側では検出されなかったと考えられます。同様の現象は、ごく最近、他の複数の原始星天体の周辺でも確認されました。これまで、星間空間の物質は静々と惑星系円盤に取り込まれていくと考えられていましたが、その考えは単純すぎることで示されました。

## 今後の展望

この結果は、化学組成が原始惑星系円盤の形成に伴って劇的に変化することを示したばかりでなく、その化学変化を利用して円盤形成の物理過程を調べる新しい方法を開拓した点で大きな意義があります。この新しい切り口から、惑星系形成過程とそこでの化学進化の一般性、多様性が、ここ数年程度でかなりわかってくるでしょう。それを通して我々の太陽系の起源の理解が大きく進むことが期待されます。

## 関連する科研費

平成23-24年度 若手研究 (B) 「原始星円盤から原始惑星系円盤への化学的多様性の伝播を探る」  
平成25-27年度 基盤研究 (C) 「ALMAによる太陽型原始星の化学進化の探究」

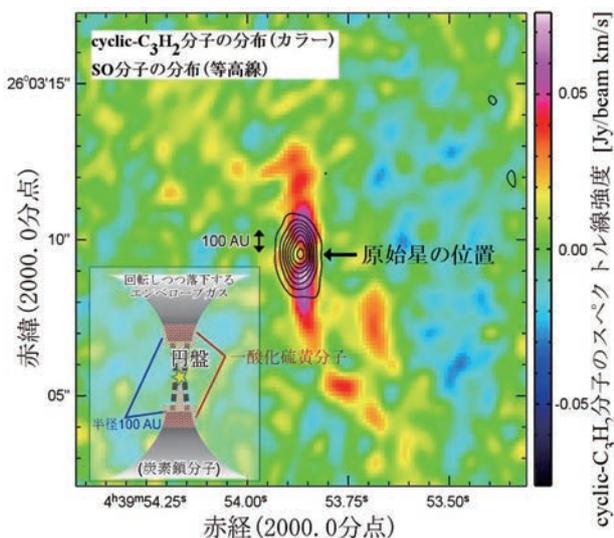


図1 ALMA望遠鏡で観測されたL1527原始星まわりのcyclic-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>分子およびSO分子の分布

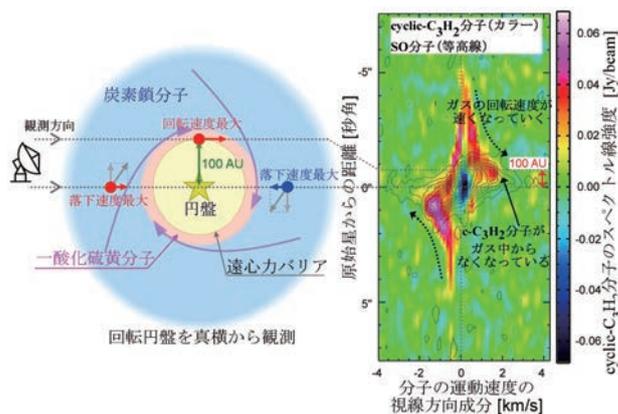


図2 (左) L1527原始星まわりの円盤の向きと視線方向の関係 (右) cyclic-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>分子およびSO分子の視線方向の運動速度

# 高分子鎖の空間連結が産み出す トポロジー変換可能な高分子

東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

高田 十志和



## 研究の背景

加える刺激に応じた物性や機能を示す刺激応答材料は、多種多様で有用なものもたくさんあります。しかし、可逆的に形状（トポロジー）、特性を変化させることのできる高分子材料は多くありません。私たちは、その可逆性を保証する最も有効なスイッチ機能を持つ微小ユニットとして、ロタキサンに注目して研究をしています。1980年代から始まったロタキサン科学の興味の中心はそのスイッチ機能（図1）に基づく分子素子でしたが、今日その活用の幅は大きく広がっています。しかし、高分子にロタキサンのスイッチ機能を付与した例はこれまでありませんでした。それは、1本の高分子にロタキサン構造を1つだけ導入する手法がなかったからです。

## 研究の成果

最近、私たちは、ロタキサン構造を1つだけ高分子に導入することに成功しました。それは、重合反応の擬ロタキサン構造を持つ開始剤を使い、軸末端からリビング重合を進めて最後に高<sup>かさたか</sup>高い基を軸末端に導入することで達成されました（図2A）。この手法は、以下に示すように、微小な部位のスイッチで高分子の形状と特性が変わる興味深い高分子システムの構築に応用できます。

線状高分子の末端は高分子の性質に大きな影響を及ぼすため、最近、末端のない環状高分子に高い関心が集まっています。しかし、効率のよい合成手法が限られており、また線状高分子を直接環状高分子に変えるには、1つの分子の末端どうしだけを結合させるという非常に困難な手法しかありませんでした。私たちは、線状高分子の片末端にロタキサン構造を導入し、その末端と輪成分を結合

させました。そして、輪成分を左から右に移動させるだけで環状高分子に可逆的に誘導できること、移動前後で大きく物性も変化することを明らかにしました（図2B）。

また、輪成分に高分子鎖を持たせた高分子[2]ロタキサンでも、輪成分を軸成分である高分子鎖の中央から端に移動させることで、星形高分子が線状高分子に変換され、そのトポロジー変化に伴って、粘度などの物性が大きく変化することも明らかにしました（図2C）。

## 今後の展望

この手法が確立されれば、1つの分子が刺激に応じて2つの物性・機能をもつ高分子を自在に合成できるようになります。外部刺激として、例えば力学刺激を想定した場合、強い打撃には固くなって遠くに飛び、弱い打撃には柔らかくなって操作しやすいボールや、夏場の暑い場所では通気性がよく、日陰では保温性のある服など、様々な応用が考えられます。今後は、ロタキサン連結機能を存分に活かして、さらに大きなトポロジー変化とそれに伴う物性・機能の変化を示す高分子の開発を進めていく予定です。

## 関連する科研費

平成23-26年度 基盤研究 (A) 「微小管状高分子を基盤とする動的超分子マテリアルの創製と制御」  
平成26-27年度 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「トポロジー変換可能な新規超分子ポリマーの合成と組織化・機能制御」

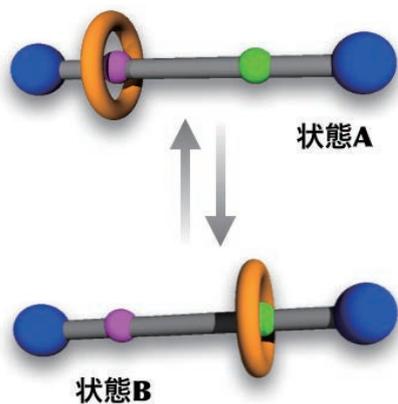


図1 ロタキサンスイッチのイメージ図

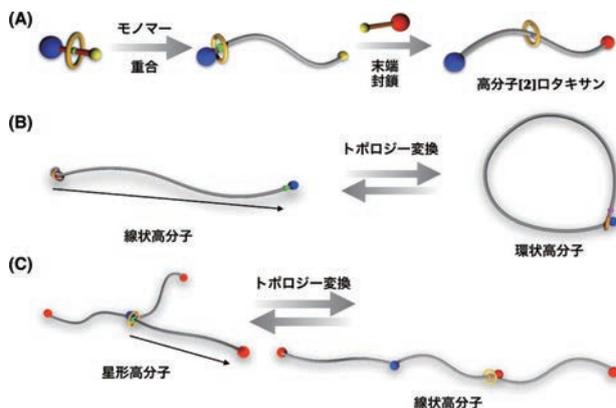


図2 高分子ロタキサンの形成と変換のイメージ図：(A) 高分子 [2]ロタキサンの合成、(B) 線状-環状高分子トポロジー変換、(C) 星形-線状高分子トポロジー変換

## 微細管路の特性から見えてくる 新しい化学プロセス技術

徳島大学 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 教授

外輪 健一郎



### 研究の背景

化学産業は長い歴史の中で発展を続け、現代の私たちの生活を支える様々な物質や材料を提供していますが、化学工場で使われている装置は、昔ながらの大型の攪拌装置や加熱・冷却装置が現在も主役の座についています。一方で、21世紀に入った頃から、マイクロリアクタと呼ばれる新しい技術が注目されるようになりました。これは径が0.1~1mm程度の微細管路の中で反応や加熱・冷却を行う技術です。温度を一定に保ちやすい、反応の結果を左右する混合速度を制御しやすいといった特長があるため、多くの反応を効率よく実施できることが確認されており、すでに実用化も始まっています。

### 研究の成果

私たちはマイクロリアクタが高い性能を発揮する理由について興味を持ち、深く考察してみました。すると、微細管路が使われていることに加え、接触、混合、伝熱といった基礎的な要素部分にはっきりと分化した構造もっている点も重要なことが分かりました。これは微細管路を使うことで自然にできた構造ですが、化学装置をより基礎的な要素に分解し、それらを再構成することでいっそう高機能な装置を創出できることを実証した技術といえます。

私たちのグループは、この考え方に基づいた考察を進め、いくつかの新しい化学装置を提案しました。その1つは新しい蒸留装置です。蒸留は化学工場で多用されている分離技術ですが、エネルギー消費量が多いことが1つの欠点です。私たちは蒸留を気液接触、気液平衡、気液分離という基本操作の繰り返しであると捉え、装置全体を再構成することで従来なかった等温型の蒸留装置を提案することができました。理論計算では、この蒸留

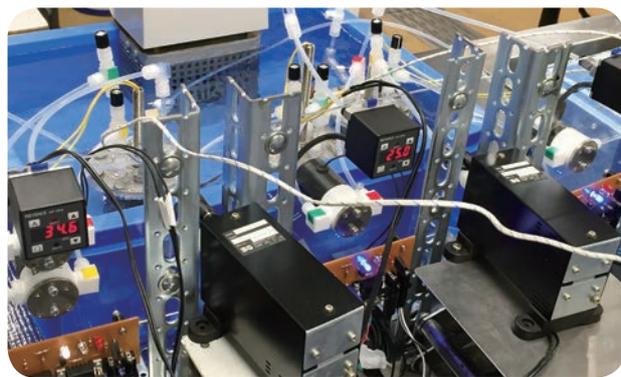


図1 提案する新規蒸留技術の実験装置。

法が大幅な省エネルギー性を示すことが明らかになっており、現在その実証試験を進めています(図1)。

別の事例としては、マイクロリアクタと従来型装置を融合させた反応装置を提案しています。これは酸素ガスを使った液体の酸化反応のように、気体と液体を接触させる必要がある反応の速度を増大できることを確認しています。私たちは、この装置の工学的な性能を詳しく調査するとともに、マイクロリアクタを気液反応に適用する際に重要になる、微細管路中の気液の流動状態の解明(図2)も進めています。

### 今後の展望

マイクロリアクタの登場は、化学工業の発展の中で装置の考え方を革新させたといえます。微細管路の有用性だけでなく、マイクロメートルあるいはミリメートルオーダーでの現象をもう一度見直し、基本的な要素の構成を再検討すると、新しい化学技術を多く創出できることを示した点が特に重要だと捉えています。私たちは、化学産業のいっそうの発展に貢献できるよう、このような視点に基づいた新しいコンセプトの化学装置や化学プロセス技術の提案を続けていきます。

### 関連する科研費

平成21-23年度 挑戦的萌芽研究「温度分布を持たない蒸留装置の創出による化学工場の省エネルギー化技術の開発」

平成24-26年度 挑戦的萌芽研究「不均一反応のためのバッチ-マイクロ融合型反応システムの開発」

平成26-28年度 基盤研究(B)「ガス要求量の大きい気液反応のためのマイクロ反応システム設計論」

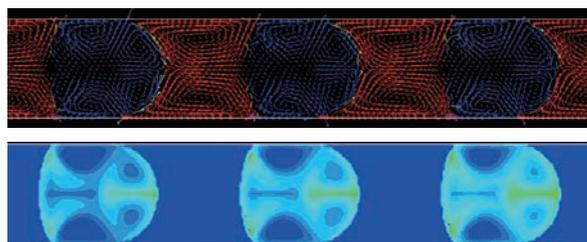


図2 微細管路を流れる液滴の数値解析の結果。流路幅は0.5mm、流れは右方向です。液滴が管路と同程度の大きさの場合に、液滴内に見られる循環流(上)とその流れによって溶質が外部から内部に拡散する様子(下)を示しています。

# 温度分布制御型マイクロフローリアクタによる燃焼化学反応の研究 -火炎クロマトグラフ法の誕生-



東北大学 流体科学研究所 教授

丸田 薫

## 研究の背景

自動車のエンジン、ガスタービン、ボイラなどの、暮らしを支える燃焼器をより高効率、クリーンに改良していくためには、燃料ごとに異なる燃焼化学反応を詳細に理解する必要があります。これまで、こうした研究には衝撃波管や急速圧縮装置などの比較的大規模で、特殊な装置が用いられてきました。

## 研究の成果

10年ほど前、燃焼式の超小型ヒータ「マイクロ燃焼器」を開発しようと1~2ミリ程度の炎の性質を調べていたところ偶然、後に鍵となる特異な燃焼現象を発見しました。この現象によって、従来手法の苦手領域を補う燃焼化学反応の分析が可能になりました。本装置（温度分布制御型マイクロフローリアクタ）の基本原理は非常にシンプルで、透明な細い石英管の一端を外部熱源で加熱して管内の温度分布に勾配を設け、石英管の另一端から調べたい燃料と空気の混合気を通して管内の炎を観察するだけです（図1）。管内では、青い炎が1枚だけ観察されると予想していましたが、実際には細管であることや温度勾配があることに起因して多様な現象が観察されました。中でも微小流速条件では、温度レベルごとにいくつもの青い微弱な反応帯（Weak flame）が観察され、これら複数の反応帯は、エンジンなどで高速に進む着火時の化学反応が、温度レベル順に空間的に分離して安定化したものであることがその後の研究によって明らかになりました。このWeak flameが鍵となり、燃料によって異なる着火や燃焼化学反応、さらには着火性の指標となるオクタン価（図2）やセタン価に相当する情報が得られることも次々と明らかになりました。

この手法を、通常は1つの燃焼化学反応帯を分離して観察できるので、「火炎クロマトグラフ法」と名付けました。また本手法は、計測装置として製品化されました。さらに電機、重工、自動車、ガス、燃料などさまざまな企業やJAXAとの産学連携研究へと発展しています。

温度分布制御型マイクロフローリアクタによる分析では、当初は複数反応帯の位置（温度域）に注目し、既存

の化学反応モデルによる数値計算と比較して分析していましたが、説明しきれない現象も見られるようになり、現在は管内の各位置からガス・サンプリングを行い、中間生成物を含む反応過程の全体像分析を行っています。また、リアクタ部を昇圧状態で試験できる昇圧型装置も製作し、稼働しています。レーザー光を特定化学種に吸収させ、その蛍光を観察する光学的手法も導入しました。

## 今後の展望

本研究では、装置の精度向上を図るとともに、サンプリング分析にガスクロマトグラフに加えて各種の質量分析器を導入し、分析対応物質の範囲が「すす前駆体」などにまで広がりつつあります。最近では、リーンバーンガソリンエンジンでの性能予測に用いる燃焼化学反応機構の検証や、新しいエネルギーキャリアとして注目されているアンモニア燃焼への適用も始めています。さらに、外部熱源を用いるという装置の特色を活かし、可燃限界外の予混合気や、難燃性物質の燃焼性評価への適用も模索しています。

今後はこれまで決定的な手法のなかった温度1000K以下における化学反応特性と実用燃焼器での燃焼安定性との相関検討や、特殊燃焼場の化学反応機構の提案など各種用途へ研究を展開したいと考えています。

## 関連する科研費

平成19-20年度 萌芽研究「マイクロ燃焼の手法による連鎖分岐反応停止に起因する最低火炎温度の特定」

平成23-25年度 基盤研究(A)「革新的火炎クロマトグラフィと微量化学種吸収分光による分子レベル燃焼反応制御」

平成26-28年度 基盤研究(B)「火炎クロマトグラフによる高級炭化水素燃料の多段酸化反応場の分離抽出とその応用」

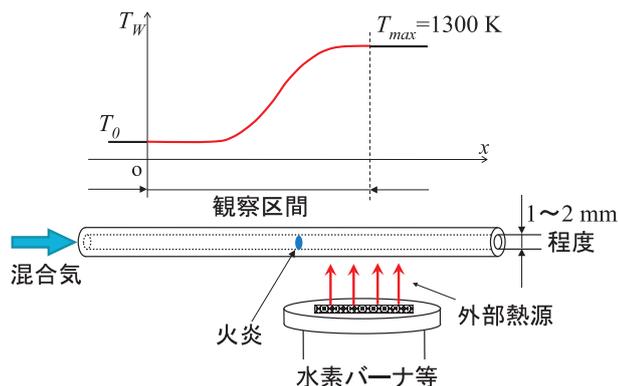


図1 温度分布制御型マイクロフローリアクタの概要

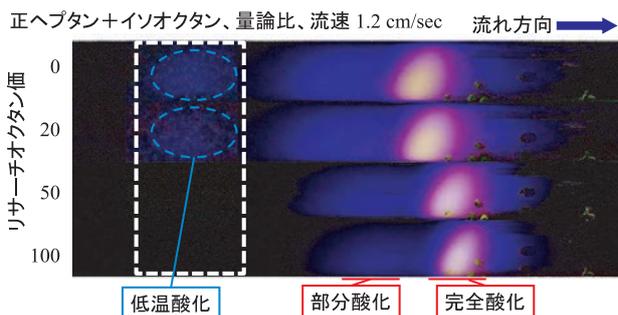


図2 リサーチオクタン価と複数反応帯（Weak flame）の変化。着火しやすい低オクタン価では顕著な低温酸化（600K〜）が見られ、オクタン価の増加とともに、反応体全体が高温側へシフトしている。

# 脚の短いプロセッシブミオシンが運動している様子のビデオ撮影に成功

金沢大学 理工研究域 バイオAFM先端研究センター 准教授  
古寺 哲幸



## 研究の背景

様々な細胞運動に関わるミオシンのうちミオシン6とミオシン10は、2本の“短い脚”を持ち、アクチン繊維の上を1分子で長距離移動することができるプロセッシブミオシンです。その脚の長さは、同じくプロセッシブミオシンに分類されるミオシン5に比べて短く、ミオシン10はミオシン5の半分(図1e)、ミオシン6にいたっては3分の1しかありません(図1a)。これまで、ミオシンがアクチン繊維に沿って運動するときの歩幅は、脚の長さに比例することが広く信じられていましたが、驚くことに、“脚の短い”ミオシン6とミオシン10も、“脚の長い”ミオシン5と同じ歩幅で運動することが、蛍光顕微鏡などを用いた実験によって示されてきました。近年になって、脚の一部が伸びて大きな歩幅を実現していることが示唆されてきましたが、ミオシン6とミオシン10が大きな歩幅でアクチン繊維に結合している構造的な証拠は一切ありませんでした(図1)。

## 研究の成果

本研究では、金沢大学の安藤敏夫教授が世界に先駆けて

開発した高速原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて(科研費NEWS2010年度vol.4に掲載)、アクチン繊維に沿って運動している最中のミオシン6とミオシン10のビデオ撮影を行いました。その結果、それぞれのミオシンが大小の歩幅を混ぜながら、前進運動、ならびに、まれな後進運動を起ししながら、全体として一方向へ運動する様子を直接観察することに初めて成功しました。このときの運動様式は、ヒトが歩くように、2つの足の前後関係を交互に変えながら進むハンドオーバーハンド様式と、シャクトリムシが動くように、2つの足の前後関係を一定に保ったまま進むインチワーム様式が混在していました。また、大きな歩幅で動くときは、脚の一部が伸びていることを直接観察できました(図2)。さらに、これまでの手法では観察できなかった、“足踏み運動”や“脚の構造変化”の観察に成功しました。これにより、ミオシン6とミオシン10の運動メカニズムをより詳細に理解することができました。

## 今後の展望

ミオシンはATPの加水分解エネルギーを使ってアクチン繊維の上を運動しますが、本研究によって、ミオシンのエネルギー変換機構の解明に関する重要なヒントも得ました。今後は、このエネルギー変換機構を解き明かしたいと考えています。

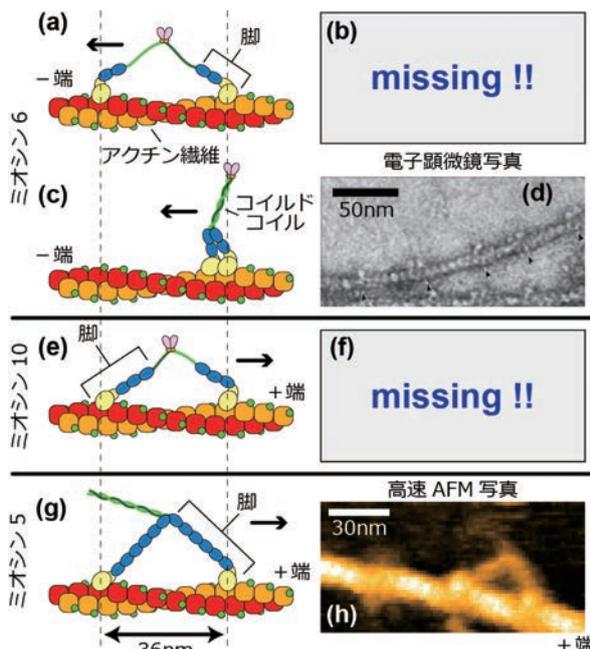


図1 プロセッシブミオシンのモデル構造(左側)と構造的証拠(右側)。(a-d) ミオシン6、(e-f) ミオシン10、(g-h) ミオシン5について。ミオシン6はアクチン繊維の一端方向へ、ミオシン10とミオシン5は+端方向へ運動する。(d) Nishikawa et al., BBRC 2002より転載。(h) Kodera et al., Nature 2010より転載。

## 関連する科研費

- 平成22-23年度 研究活動スタート支援「高速原子間力顕微鏡によるミオシン6の運動メカニズムの解明」
- 平成24-26年度 若手研究(B)「高速原子間力顕微鏡による脚の短いプロセッシブミオシンの運動メカニズムの解明」

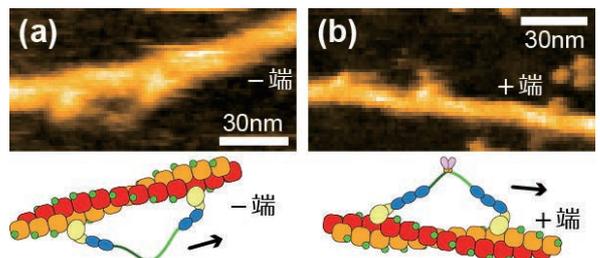


図2 高速AFMで撮影した運動中の(a) ミオシン6と(b) ミオシン10。大きな歩幅で運動する様子を直接観察することに成功した(上段)。下段はそのモデル構造。

# 植物診断ロボットを用いた 太陽光植物工場の環境制御の高度化

愛媛大学 農学部 准教授

高山 弘太郎



## 研究の背景

太陽光植物工場は、太陽光エネルギーを最大限に活用して大規模に農作物を生産する施設で（図1）、競争力の高い農作物生産システムとして注目されています（日本学術会議 マスタープラン2014 学術大型研究計画）。この施設では、気温・湿度・CO<sub>2</sub>・光強度などの様々な環境要因を自動制御することが可能ですが、制御目標値の設定は依然として人間の主観的判断（目視での植物体の観察に基づいた生育評価）に拠っており、自動制御システムの能力を十分に発揮できていないと言え難い状況です。

## 研究の成果

本研究では、太陽光植物工場で栽培している作物の生育状態のわずかな変化を把握できる実装型クロロフィル（Chl）蛍光画像計測ロボットを開発し、2015年1月に植物生育診断装置（井関農機（株））として商品化しました（図2）。Chl蛍光とは、Chlが吸収した光エネルギーのうち、光合成反応に使われずに余ったエネルギーの一部を赤色光として放出したものです。本装置では、暗条件に置いたトマトに一定強度の青色光を照射すると誘導されるChl蛍光インダクション現象（Omasa et al., 1987）を画像計測し、トマトの光合成機能を数値で評価します。図3は、トマトを商業生産する大規模太陽光植物工場（約1.3ha）における光合成機能指標の分布です。このような光合成機能の不均一分布は、人間の目では認識することができない新しい生育情報であり、潜在的な生育の不均一性を検出していると考えられます。

## 今後の展望

様々なセンサを用いて植物生体情報を計測して生育状態

を診断し、診断結果に基づいて栽培環境を最適に制御する一連の技術をSPA（Speaking Plant Approach）技術と呼びます。これは、わが国の研究者らによって30年以上前に提唱されたコンセプトです。近年の計測機器の廉価化やICTの発達により、SPA技術の農作物生産現場への導入が急速に進みつつあります。今後は、高時間、高空間分解の高精度な生体情報を活用した知的環境制御の実現に向けて研究開発を推進し、農作物の生産性向上と農業の競争力強化に貢献したいと考えています。

## 関連する科研費

平成26-28年度 基盤研究 (B) 「SPA技術を基盤とした並列試行型強化学習による太陽光植物工場への知能実装」

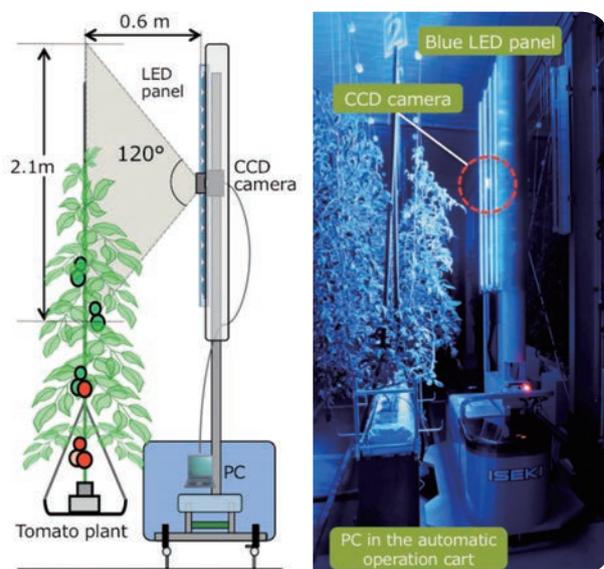


図2 商品化したChl蛍光画像計測ロボット



図1 太陽光植物工場におけるトマトの周年栽培

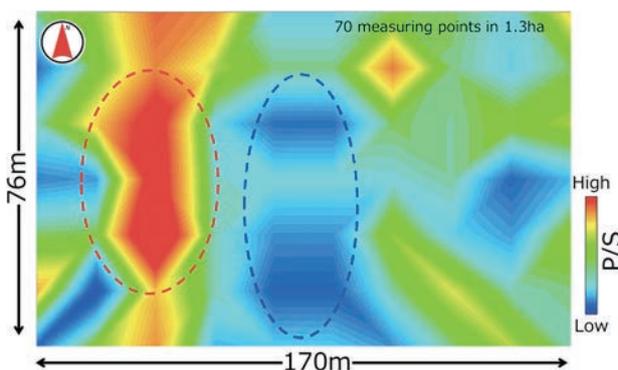


図3 大規模太陽光植物工場における光合成機能分布

# 石油代替燃料生産を目指した微細藻 *Botryococcus braunii* のトリテルペン系炭化水素生合成メカニズムの解明

東京大学 大学院農学生命科学研究科 准教授

岡田 茂



## 研究の背景

群体性微細緑藻 *Botryococcus braunii* は、生体の乾燥重量の数十パーセントにも及ぶ大量の液状炭化水素を生産・分泌し、個々の細胞をつなぎ止めている細胞外マトリクスと呼ばれる部位に蓄積します (図1)。本藻種には生産する炭化水素の種類が異なるA、BおよびLの3品種があり、B品種はbotryococcene類とメチルスクアレン類という、トリテルペン系炭化水素を生産します。これらの炭化水素は、バイオ燃料源として魅力的です。その一方、本藻種は増殖が遅く、大量培養による商業的炭化水素の生産は、いまだに難しい状態です。そこで、本藻種のトリテルペン系炭化水素の生合成メカニズムを解明し、より効率のよい炭化水素生産への道を拓くことを目指しました。

## 研究の成果

B種が生産するbotryococceneはスクアレンと分子構造が似ていることから、スクアレン合成酵素 (Squalene synthase=SS) と似た酵素により、ファルネシルニリン酸 (FPP) を前駆体として生合成されるものと推定されてきましたが、証明されていませんでした。そこで、私たちはアッセイ法を改良し、*B. braunii* の藻体ホモジネートとFPPから、botryococceneとスクアレンの両者が生成されることを明らかにしました。このアッセイ法を利用し、スクアレン合成酵素様タンパク質 (SS-like protein=SSL) 遺伝子の探索を行ったところ、本藻種には通常のSS (*Botryococcus* SS=BSS) のほかに、SSL-1、2および3という3種類のSSL遺伝子が存在することがわかりました (図2)。SSL-1は2分子のFPPを基質として、プレスクアレンニリン酸 (presqualene pyrophosphate=PSPP) を生成する

のに対し、SSL-2およびSSL-3は、FPPではなくPSPPを基質として、それぞれスクアレンおよびbotryococceneを生成するという、本藻種に特異的なメカニズムを明らかにすることができました。

## 今後の展望

これまでの研究で特定された炭化水素生合成酵素遺伝子を手がかりに、さらに研究を進めることで、本藻種が「なぜ」「どうやって」、トリテルペン系炭化水素を作っているかを明らかにすることができれば、より効率よく炭化水素を生産できる培養方法の開発や、培養しやすい新規藻株の作出が期待できると考えています。

## 関連する科研費

- 平成12-13年度 奨励研究 (A) 「微細類からの有用炭化水素合成酵素遺伝子の探索」
- 平成14-15年度 若手研究 (B) 「有用物質生産を目指した微細緑藻のテルペノイド前駆体生合成経路の解明」
- 平成16-17年度 基盤研究 (C) 「石油生産微細緑藻における有要イソプレノイド生合成酵素の活性発現機構の解明」
- 平成18-19年度 基盤研究 (C) 「微細緑藻による有用イソプレノイドの大量生産の鍵となる生合成酵素の解明」
- 平成21-23年度 基盤研究 (B) 「EST解析情報を利用した微細緑藻による有用炭化水素生合成メカニズムの全貌解明」

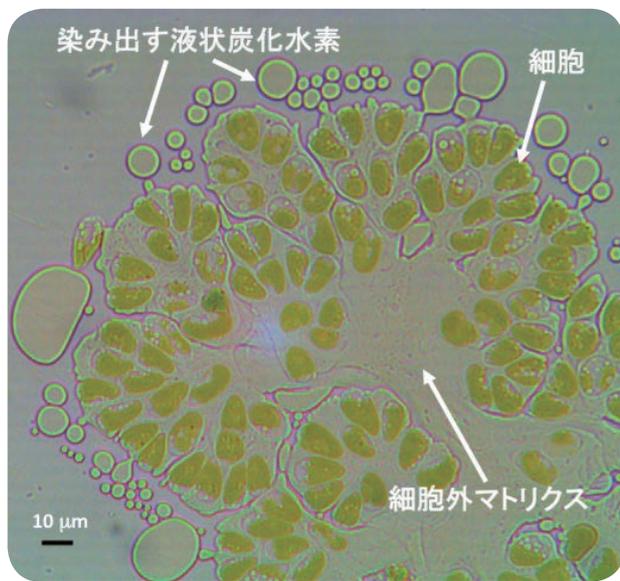


図1 *B. braunii* B品種の群体と染み出る液状炭化水素

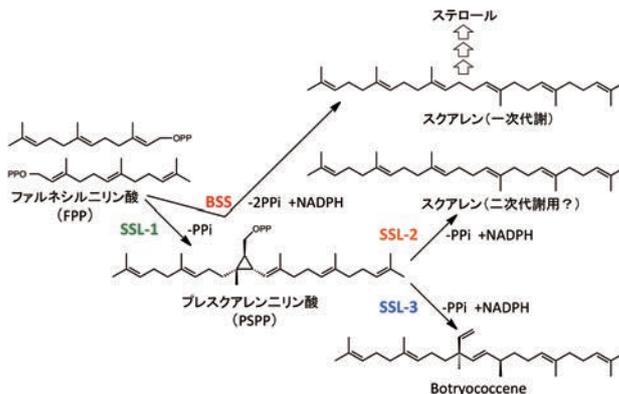


図2 *B. braunii* B品種におけるトリテルペン系炭化水素の生合成メカニズム。通常のスクアレン合成酵素 (BSS) が行う二段階の反応のうち、一段階目と同じ反応のみを行う酵素 (SSL-1) により生産されるプレスクアレンニリン酸を基質として、スクアレンを生成する酵素 (SSL-2) とbotryococceneを生成する酵素 (SSL-3) が存在する。

# 卵巣癌のoriginを解明する

島根大学 医学部 産科婦人科学 教授  
**京 哲**



## 研究の背景

上皮性卵巣癌の組織形態は卵管や子宮内膜に非常に類似していますが、そのような組織は正常卵巣には存在しません。では、なぜこのような形態の癌が発生するのでしょうか？ これは長らく謎でした。

最近、Kurmanらにより上皮性卵巣癌の多くはその起源が卵巣外にあり、卵巣にはそれが2次性に波及するという新たな説が提唱され注目されています (Kurman R et al. Am.J.Surg.Pathol. 34: 433-443, 2010)。

Kurmanらがまず提唱したのは卵管采 (卵管の先っぽの組織) 起源説です。これまで卵巣癌の前癌病変は卵巣内にあると考えられていたため卵管は注意深く調べられていませんでしたが、最近になり、卵巣癌患者の卵管采の50-60%に卵管上皮内癌が認められることが報告されました。卵管上皮内癌には癌部と同一のp53遺伝子変異が高率に見出されることから、卵管上皮内癌の細胞が卵管采末端から卵巣表面に剥離、侵入し、2次性に卵巣癌が発生するのではないかと考えたわけです。

今回私たちは卵巣癌の卵管采起源説を検証するために卵管采細胞を元に不死化細胞を作成し、これに様々な遺伝子操作を加え、漿液性腺癌が作れないかを試みてみました。

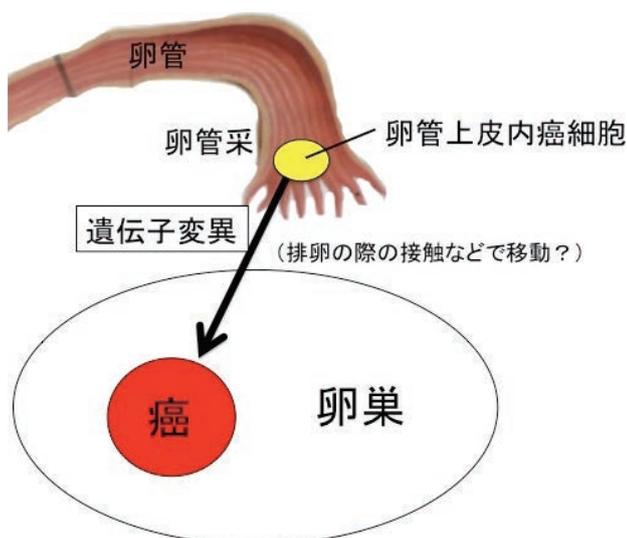


図1 卵巣癌の卵管采起源説  
卵管采細胞の卵管への移植は、排卵時に卵管采が卵を捕捉する際などに起こると推定される。排卵の際に破裂する卵胞にはエストロゲンなどの増殖因子が多量に含まれ、移植細胞には絶好の環境であると言える。

## 研究の成果

まず良性の子宮筋腫の患者から摘出された卵管から同意を得て卵管采上皮細胞を分離し、これを初代培養に供しました。卵管采上皮細胞は基本的にはたった1層の細胞層からなり、非常に細胞の数が少ないので培養は至難の業だと思われましたが、絶妙な上皮分離操作で上皮細胞のみを純化して初代培養することに成功しました (図2)。

ついで、この初代培養細胞にテロメラーゼ遺伝子などを強制発現させる方法で不死化させることに成功しました。さらにこの不死化細胞に特定の3つの遺伝子変異を導入することで癌化した細胞を作成することができました。驚くことに、この癌化細胞をマウスに接種して出来た腫瘍を顕微鏡で観察すると、まさに卵巣漿液性腺癌の形態を示していたのです。

## 今後の展望

私たちの実験成果は卵巣癌が卵管采由来であることを証明するものですが、導入した3つの遺伝子変異こそが卵巣癌の癌化の必須メカニズムと考えられます。この3つのステップをさらに解析することで、癌化機構の解明と新たな分子標的治療の開発につなげたいと考えています。

## 関連する科研費

平成27-29年度 基盤研究 (B) 「卵巣漿液性腺癌の卵管起源説に対する実験的検証と発癌分子機構の解析」

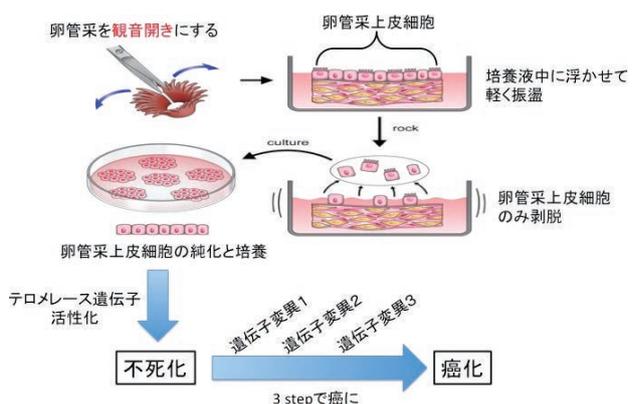


図2 卵管采上皮細胞の培養と不死化、癌化  
不死化細胞から特定の遺伝子変異を3つ入れることで癌化が起こる。卵巣癌の卵管采からの多段階発癌を単純化したモデルである。

# CYLD によるMet1 およびLys63 結合型 ユビキチン鎖特異的切断メカニズムの解明

東京大学 放射光連携研究機構 助教

佐藤 裕介



## 研究の背景

ユビキチンは、他のタンパク質とつながることで働き、私たちの細胞内のさまざまな機能を制御するタンパク質です。ユビキチン同士がいくつもつながって形成されるポリユビキチン鎖も重要な役割を持ち、そのつながり方の違いで役割が異なります。このポリユビキチン鎖は、ユビキチンの末端 (Gly76) が次のユビキチンのどの場所につながるかによって8種類あります (図1)。このうち、免疫・炎症反応や細胞のがん化に関わるNF-κB経路は、先頭のアミノ酸 (Met1) や63番目のリジン (Lys63) とつながったポリユビキチン鎖によって活性化されます。一方、がん抑制タンパク質CYLDは、Met1やLys63でつながったポリユビキチン鎖を選択的に切断し、NF-κB経路を抑制します。しかし、CYLDがどのようにポリユビキチン鎖を見分けているのかは明らかにされていませんでした。

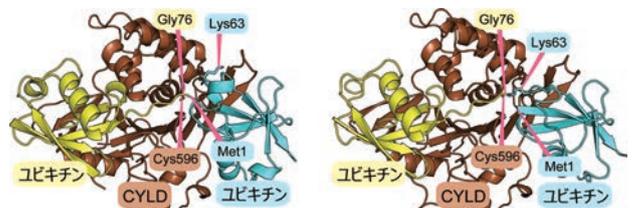
## 研究の成果

私たちはMet1でつながったポリユビキチン鎖がCYLDと結合した状態の結晶と、Lys63でつながったポリユビキチン鎖がCYLDと結合した状態の結晶をそれぞれ作成し、立体構造を決定しました (図2)。立体構造を見ると、この2種類のポリユビキチン鎖に対応してCYLDはわずかに構造を変えながら、ユビキチンの形をしっかりと認識していました。さらに、CYLDは他の6種類のポリユビキチン鎖を認識できないことも明らかになりました。CYLDは596番目のシステイン (Cys596) でユビキチン鎖を切断することが知られていましたが、立体構造では、実際にCys596がポリユビキチン鎖をちょうど切断する位置で見つかりました。この結果から、CYLDはMet1かLys63でつながったポリユビキチン鎖

とだけ選択的に結合し、Cys596でポリユビキチン鎖を切断する、という詳細なメカニズムを明らかにしました。

## 今後の展望

本研究では、Met1やLys63でつながったポリユビキチン鎖をCYLDが選択的に切断するメカニズムを解明しました。8種類存在するポリユビキチン鎖が細胞内でどのように見分けられているのかという問題は未解明な点も多いものの、本成果によってポリユビキチン鎖の機能について理解を深めることができます。また、本成果はポリユビキチン鎖に関わる免疫・炎症反応、細胞のがん化を解明する今後の研究に役立つと期待されます。



Met1でつながったポリユビキチン鎖とCYLD Lys63でつながったポリユビキチン鎖とCYLD  
図2 ポリユビキチン鎖とCYLDが結合した状態の立体構造

## 関連する科研費

- 平成23-24年度 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「CYLDによるK63結合型および直鎖型ポリユビキチン鎖選択的切断の構造的基盤」
- 平成24-27年度 若手研究 (A) 「LUBACによる直鎖型ポリユビキチン鎖形成メカニズムの構造的基盤」
- 平成25-26年度 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「CYLDによるK63結合型および直鎖型ポリユビキチン鎖選択的切断機構の詳細な解析」

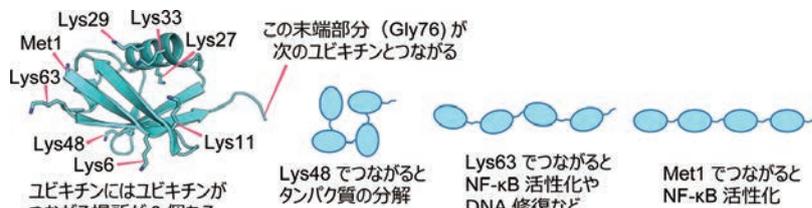


図1 ポリユビキチン鎖のモデル

## 心停止中から脳を保護する 咽頭冷却装置の開発

岡山大学病院 集中治療部 准教授 **武田 吉正**



### 科学研究費助成事業(科研費)

急速脳冷却法の開発(1999-2000 奨励研究 (A))

N-アセチルシステインが脳虚血障害後のミトコンドリア機能に及ぼす影響(2001-2002 基盤研究 (C))

コバルトイオンが脳虚血後のミトコンドリア機能に及ぼす保護効果(2004-2005 基盤研究 (C))

脳表のNADH自家蛍光を用いた脳虚血監視モニターの開発(2014-2016 基盤研究 (B))

メディカルテクノおかやま(2006) 科学技術振興機構シーズ発掘試験(2006) 厚生労働省医療技術実用化総合研究事業(2007-2009) 消防庁消防防災科学技術研究推進制度(2008-2010)(2012-2014) ちゅうごく産業創造センター新産業創出研究会(2011-2012) 特別電源所在県科学技術振興補助事業(2011)

脳の血流が悪くなり、酸素や栄養が不足している状態を脳虚血という。心停止に陥ると脳虚血が引き起こされる。一刻も早く血流を回復させないと、神経細胞が死滅して蘇生しても重い後遺症が残ってしまう恐れがある。

こういった障害を防ぐには体温を下げる低体温療法が有効である。早い段階から開始すると更に大きな効果が期待できる。しかし、全身の体温を下げる従来の方法では心拍が再開してからでないと体温を下げる事ができなかった。

脳へと続く動脈は喉のすぐ横を走行することに着目し、喉を冷やして脳を効率的に冷却する方法を考案した。この手法をもとに、医療機器メーカーと共同で、世界で初めて蘇生時に脳を保護する咽頭冷却装置の開発に成功した。

口から喉へ柔らかい風船状の物(咽頭冷却カフ)を挿入し5℃の冷却水を循環させる。これにより、心拍の再開前から脳を急速に冷却し、心臓や肺に悪影響を与えることなく脳のダメージを軽減することができる。

既に製造販売承認を受け、臨床の現場で利用可能になった。現在は、蘇生の現場で使用可能な小型装置の開発に取り組んでいる。

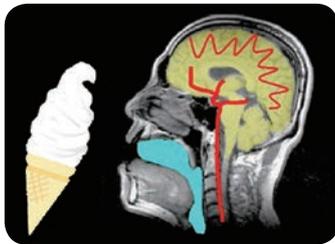


図1 アイスクリームを急いで食べると頭痛が起こることがある。同じ仕組みで脳を急速に冷却する。



図2 咽頭冷却カフ(左上)を喉に挿入し(下)、冷却水灌流装置(右上)で5℃の冷却水を循環させる。心臓に負担無く、脳を急速に冷却する。

## 新商品の効果を考慮した 消費者購買指数と単価指数の開発

一橋大学 経済研究所 教授 **阿部 修人**



### 科学研究費助成事業(科研費)

年齢間所得格差を用いた家計消費行動と消費格差・リスクシェアリングの実証分析(2006-2008 若手研究 (B))

日次マーケティングデータに基づく家計消費・労働供給の分析(2009-2013 若手研究 (S))

POSデータを活用した家計別物価水準の計測と家計消費行動の分析(2015-2018 基盤研究 (A))

イメージ・一橋大学・新日本スーパーマーケット協会共同「流通・消費・経済指標開発プロジェクト」(2014-)

常に変化する経済全体の現状を把握するために、広範囲かつ精度の高い経済指標への需要が高まっているが、経済全体の動向を反映する高精度な統計データとなると、公表に時間がかかる問題があった。

そこで、いつ・どこで・なにが・いくつ・いくらで売れたのかをあらゆるPOSデータを、マーケティングリサーチ会社及び業界団体と連携することで、様々な業態の全国約4000店舗から収集し、家計の購買行動の実態を把握することを目的に、SRI一橋大学消費者購買指数を開発した。

これは、消費者の支出・購買価格・購買数量の分析だけでなく、新規取扱商品・既存商品・取扱中止商品の支出を区別することによって、商品入れ替えの効果も分析できる。さらに、その後開発したSRI一橋大学単価指数では、新規取扱商品と取扱中止商品の価格変化の分析も可能となった。これにより、これまで計測が難しかった新商品効果が考慮できる。

これらの指数は迅速な算出が可能で、2週間前の指数データを無償で公開し、毎週更新している。地域別、業態別の指数も公表しており、企業の経営だけでなく、行政施策にも役立つことが期待される。



図1 乖離の進む単価指数と標準的な価格指数 2013年秋、特に消費税率改定以降、単価指数と標準的な価格指数の乖離が大きくなっている。

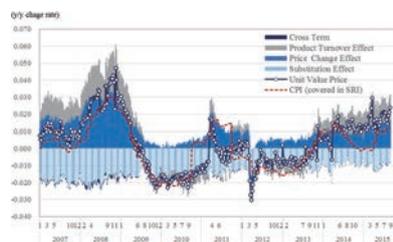


図2 単価指数の変動要因分析 灰色の領域が割高な新商品の影響、水色は主に特売の影響を反映している。近年の単価指数と標準的な価格指数間の乖離の背景には近年、特売の重要性が低下し、逆に新商品投入が増加していることがわかる。



一橋大学経済社会リスク研究機構(左)およびイメージ社(右)のウェブサイトから無償でダウンロードできる。

## わが国の光ファイバ通信研究（前編）



### I はじめに

光は人類が制御出来る周波数が最も高い電磁波として、光通信などの情報通信の分野で広く用いられている。ここでは、光ファイバ通信の発展を生み出した研究について、情報・通信技術を発展させて新しい情報通信技術（ICT）社会を生み出したという観点から振り返って調べてみたい。現在、光ファイバ通信は多様な使われ方をしているので、紙面の関係上、通信に於いて世界を結ぶ役割を果たしている大容量長距離光ファイバ通信を中心に要約した。出来るだけ多くの研究についての記述を試みたが、紙面の関係と浅見にして追跡出来なかった研究についてはご容赦を頂きたい。

**参考資料について** 本文は光ファイバ通信に関する国内の学術的研究を概観するために、関連が強い電子情報通信学会の業績賞、{IEICE業績賞}、の中の光通信関係事項を目安としてすべて参照し、また国際的な視野で研究成果を収録する閲覧が容易な{日本国際賞}と{京都賞}の関連研究を引用し、さらに紙面の関係で通常使われている学術文献は{IEICE 業績賞}との重複を避け、これらを補間するのに必要な最小限度の引用に留めた。

なお、{IEICE業績賞}の内容は、主要学会が表彰してきた代表的な研究・開発を日本学術振興会が卓越研究成果公開事業（通称「発明と発見のデジタル博物館」）によってデータベース（DB）として国立情報学研究所からネットワーク上で公開している卓越研究の中の当該学会関係DBで、誰でも容易にネットワーク上で検索出来るものである。

### II 知識情報を担う印刷情報と映像情報そして通信技術

**2-1 文明を支える知識情報を担う印刷文書** 四大大河文明発生以来、知識情報は光の反射模様で認識される文書の形で、石や革、木、竹、そして紙などに記録され、利用されてきた。そして1450年頃のJohanes Gutenberg(独)による活版印刷の開発により紙文書が実質的に量産されるようになって、知識情報がより安価に広く交換・活用され、現代文明展開の基盤となった。

**2-2 瞬時に情報を伝える電気通信技術** 一方、瞬時に遠隔連絡や緊急情報などを伝える通信の歴史は古く、光を用いる通信としては、ウイंक、のろし、灯台、

BC500頃のDarius大王の通信ネットワークにおける太陽光反射通信、船舶間通信、1791年のClaude Chappe(佛)によりフランスで実用された"Semaphore"、1880年のAlexander Graham Bell(米)の"Photophone"の着想、1936年の関杜夫と根岸博(日)の光路を反射鏡で曲げるガラスロッド通信の特許出願など多種多様な発想や試みがあった。

他方、レーザが出現するまで、人類が制御出来た最高の周波数の電磁波として、電波や高周波を用いる電気通信が広く用いられてきた。すなわち、1844年頃に始まったSamuel Morse(米)による電信、1876年のBellによる電話、そして1896年のGuglielmo Marconi(伊)による無線通信などが、情報容量は極く少量ながら、即時の双方向通信として社会の連携とダイナミズムを生み出してきた。

**2-3 紙媒体に匹敵する情報量を担う電子映像** 他方では、1839年のLouis Daguerre(佛)により初の銀板写真が発明され、映像が即刻作成されてフィルムや紙媒体として記録されたのみならず、紙文書の保存・流通にも用いられてきた。また、1926年の浜松高等工業の高柳健次郎(日)による初の電子映像表示、1928年頃のVladimir Zworykin(米)による撮像管、1968年のGeorge H. Heilmeyerらによる液晶パネル表示の実現、Willard Boyle(米)らによる1969年の撮像固体素子CCDの発明、そしてその後に行われた1977年の東北大学の岩崎俊一(日)による超大容量記録の発明{垂直磁気記録方式の発明、開発、1978 IEICE業績賞}、{2010日本国際賞}などにより、知識情報を含む大量の文字情報や映像が電子的に作成・記録され、電子表示できるようになった。そして、TV放送が始まり、一方向ではあるが電子映像が個人へ伝えられるに至った。さらに、トランジスタ、LSIやMicro-Processor{1997 京都賞}、電子計算機の開拓などを踏まえて、1970年代にはAlan Curtis Kay(米)らによりPCが発展して電子映像情報が個人的に手軽に活用され始めた{2004 京都賞}。しかし当時は、情報の容量が大きい電子的知識情報を、伝送容量が小さな電気通信により双方向で同時活用することは困難であった。

**2-4 大容量長距離光ファイバ通信の開拓により電子映像が即時活用されるICT社会が出現** 現代の情報通信ネットワークの基盤となったインターネットは、Vinton CerfとRobert KahnによりTCP-IPプロトコル(米)が

## 著者:末松 安晴

東京工業大学名誉教授 (元学長)、高知工科大学 (元学長) と国立情報学研究所 (元所長) の各名誉教授

略歴: 半導体レーザーを中心に、光ファイバー通信の先駆的な研究を行う。昭和58年ワルデマ・ポールセン金メダル (デンマーク)、平成8年紫綬褒章受章、平成26年日本国際賞受賞、平成27年文化勲章受章。

1973年に統合された [2008 日本国際賞] のを契機とし、さらに世界に分散する大容量データを活用できるサーバー、World Wide Web (WWW) が1991年にTimothy Berners-Lee (英) により公開されて [2003 日本国際賞]、情報通信技術としての機能が飛躍的に高まった。そして、物理網としての光ファイバ通信の飛躍的な進歩により、このインターネットの目覚ましい発展がなされた。1990年前後の大容量長距離光ファイバ通信の出現は、インターネットの発展を支えて、大容量情報の電子映像を双方向で瞬時に活用できる人の営みの形態を生みだし、新しい社会、ICT文明、を生み出す原動力となった。

### III 連続動作の半導体レーザーと低損失光ファイバが出現

1953年に現在用いられている型の光ファイバの原型が開拓され、1960年にレーザーが出現して光ファイバ通信が実現する素地となった。

**3-1 レーザの出現** 1917年にAlbert Einstein(瑞西)は黒体輻射スペクトルの説明のために電磁波の吸収・放出に関わる分子の誘導放出の考えを発案した<sup>[1]</sup>。1953年にJanos von Neumann(米)は、初めて、電流注入で逆転分布させた半導体pn接合で誘導放出により光の増幅ができることを講義で具体的に明らかにした<sup>[2]</sup>(John Bardeen収録)。1958年に、Arthur L. Schawlow と Charles H. Townes(米)が光メーザ(現在のレーザー(Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation))の概念を提案<sup>[3]</sup>したのを契機に、1960年にTheodore H. Maiman(米)により初のレーザー、ルビー・レーザーが実現 [1987 日本国際賞]、翌年にHe-Neガスレーザー(米)と続き、人類は制御出来るコヒーレントな光を得た。そして1962年にGaAsを用いたホモ接合のGaAs半導体レーザーがGE (Robert N. Hall et al)、IBM(Marshall I. Nathan et al)、MIT(Ted M. Quist et al)、並びにGaAsPレーザー

がGE(Nick Holonyak [1995 日本国際賞] et al) の4グループ(米)により、低温でパルス動作ながら初めて実現し、学術分野では光への関心が高まっていった。なお、1954年に上記のTownesらは分子の誘導放出によるマイクロ波の増幅器、メーザを開発し、レーザーへの発展の素地となった。1957年には、東北大の渡辺寧と西澤潤一は半導体メーザを特許出願した。

**3-2 光ファイバの出現** 他方、ガラスを熱して細く引いただけの単純なベア・コアの光ファイバはガラス細工に付随してエジプト時代から知られていたようで、中世ベニスでは装飾用の光ファイバ・フラワーなどとして商品化され、その後は光ファイバが計測用などにも用いられていたが光の伝送特性は不安定であった。1953年にAbraham van Heel<sup>[4]</sup>は実用的な光ファイバ、すなわち光を通すコア(芯)の周りに低屈折率のガラスを衣(クラッド)のように着付けて全反射により特性を安定させた現在の光ファイバ、クラッド付き光ファイバ、を開拓した。そして1954年にHarold H. Hopkins とNarinder S. Kapany(英)らはそれを発展させた<sup>[5]</sup>。さらに1961年には導波モードの解析から単一モード光ファイバが認識された。1964年にはCharles KoesterとElias Snitzer(米)は、光ファイバに希土類元素Ndをドープした光ファイバ増幅器の実験を行った。この頃の光ファイバは損失が大きく、光ファイバ束などによる計測応用が主な対象となっていた。

**3-3 光通信実験** 1961年にIvan P. Kaminow(米)は光学結晶を用いてHe-Neガスレーザー光のマイクロ波変調実験を行った<sup>[6]</sup>。同年にはHe-Neガスレーザーを用いた空間伝送の光通信実験が、“Talking Light”と呼ばれてベル研究所(米)で、初めて行われた<sup>[7]</sup>。

**3-4 光ファイバ通信実験** 1963年5月26日の東京工業大学全学祭において、筆者、末松は学生らと、情報を載せたレーザー光を光ファイバで送る「光“ファイバ”通信」実験(日)を、初めて行った<sup>[8]</sup>。この実験は、図1のように、NEC製のHe-Neガスレーザーから出たレー

[1] A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung," *Physik Zeitschr*, XVIII, pp. 121-128, 1917.

[2] J. von Neumann, "Notes on the photon-disequilibrium-amplification scheme (JvN), September 16, 1953," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp. 659-673, June 1987.

[3] A.L. Schawlow and C.H. Townes, "Infrared and optical masers," *Phys. Rev.*, vol. 112, no. 6, pp. 1940-1949, Dec. 1958.

[4] A.C.S. van Heel, "Optische afbeelding zonder lenzen von afbeeldingspiegels," *De Ingenieur (Netherlands)*, vol. 65, 25, 1953.

[5] H.H. Hopkins and N.S. Kapany, "A flexible fiberscope, using static acanning," *Nature*, vol. 173, 39, 1954.

[6] I.P. Kaminow, "Microwave modulation of the electro-optic effect in KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, No. 10, p. 528, May 15, 1961.

[7] W. Sullivan, "'Talking' Light, Bell Shows Beam of 'Talking' Light," *New York Times*, Feb. 1, 1961.

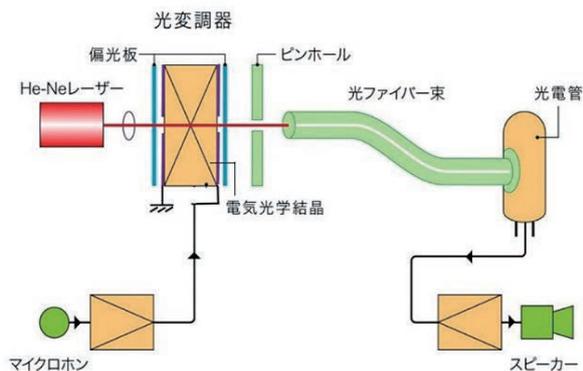


図1 初の光“ファイバ”通信実験、1963-5-26 東京工業大学創立記念日の全校祭で公開<sup>[8]</sup>。

ザ光に、自作の光変調器で音声信号を乗せ、光ファイバ束（キヤノン研究所より提供）を通して、光電管（RCAブランドの浜松テレビ製）で受けて音声信号に戻す光ファイバ通信実験であった。光変調器は光学結晶ADP（Ammonium Dihydrogen Phosphate）を用いて試作した偏波方向を変えて偏光板で強度変調に変換する形式で、光に音声を乗せる装置であった。このADP結晶は1957年に理化学研究所で難波進と小川智哉が作製したもので、現在でも東工大の博物館に保存されている。当時用いた光ファイバは多成分ガラス製で、損失は大きく、1m程度の長さで光の強さは数分の一に減少した。

**3-5 レンズ導波路と分布屈折率光導波路** 1964年にNTTの平野順三と深澤良治は、レンズ列光導波路では光ビームが伝搬につれてレンズから外れてしまう不安定性の不具合を見出した。1965年に、Herwig Kogelnik（米）や筆者と吹抜洋司（日）などはガスレンズ状媒質などの分布屈折率光導波路の伝搬モードを解析的に明らかにした。同年に、東北大の西澤潤一と川上彰二郎（日）は、ガラスの分布屈折率媒質のクラッド層による損失の解析を行い、1968年には分布屈折率光ファイバの伝搬モードの等速性を明らかにした。1969年に日本板硝子とNEC（日）で、二重坩堝法による多成分ガラスの分布屈折率光ファイバが開発された【セルフォックファイバの研究開発、北野一郎・内田禎二、1973 IEICE業績賞】。損失は、当時、20dB/km程度に低下し、1975年にはさらに10dB/km程度に減少したが、その後のシリカ系の低損失化に押された。

### 3-6 低損失シリカ光ファイバの示唆と製造技術の開拓

1966年にSTCのCharles K. Kao（英）ら<sup>[9]</sup>は熔融石英の光散乱実験から、不純物を除去すれば低損失光ファイバ通信の可能性があるとして指摘した【1996 日本国際賞】。1970年にコーニング社のRobert Maurerのグループ（米）はシリカ光ファイバの製造技術を開拓し<sup>[11]</sup>、波長0.63μm帯で実用レベルの20dB/kmの低損失化を達成した。この方法はシリカのロッドを石英チューブに差し込んだ母材から紡糸したもので、更なる低損失化には難点があった。

1973年にDonald Keck（米）らは波長1.4～1.8μmくらいの間長波長帯のどこかで極低損失化されると示唆した<sup>[12]</sup>。1974年にJohn B. MacChesney（米）らは、石英チューブの内側に気相成長（CVD）でシリカの煤を堆積してその後に熔融して母材を作るMCVD（Modified Chemical Vapor Deposition）法を開発し、極低損失光ファイバの発展に道筋を付けた<sup>[13]</sup>。

### 3-7 室温連続動作の0.85μm帯半導体レーザー開拓

こうした間に、1966年に筆者は池上徹彦（日）と小型で小電力動作などの利点がある半導体レーザーが数GHz以上の高速で直接変調ができる利点がある事を理論的に見出すと共に<sup>[10]</sup>、まだ低温パルス動作しか出来なかった三菱電機のGaAsのホモ接合レーザーを用いて実験的に明らかにした。半導体レーザーの動作理論は1964年にGordon Lasher（米）らがバンドテール理論を発表したが、レーザー動作が扱えなかったため、1970年に筆者は大学人として、西村吉雄（日）らと半導体レーザーの利得やその抑制に関する電子緩和に基づいた基礎理論を開拓した<sup>[21]</sup>。

さて、1963年にHerbert Kroemer（米）がヘテロ接合レーザーを提案し、1967年に三菱電機の須崎渉（日）らはAlGaAs/GaAs単一ヘテロ接合結晶を用いて赤色発光を達成した。そして、1969年にIoffe研究所のZhores I. Alferov（ソ）ら、並びに1970年にベル研の林厳雄とMorton B. Panish（米）らは、AlGaAs/GaAs二重ヘテロ接合を用いた0.85μm帯のFP（Fabry-Perot）型半導体レーザーの室温連続（RT-CW; Room Temperature Continuous Wave）動作を独立に達成して実用化への道を開いた【2001 京都賞】、【長寿命半導体レーザーの研究開発の先導、林厳雄・南日康夫（NEC）、

[8] 末松安晴、「最初の光ファイバ通信の実験は東京工業大学の全校祭か～昭和38年（1963）5月26日～」、クローニクル（東工大発行）、pp. 3-4、1986年10月号。  
 [9] K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric fiber surface waveguide for optical frequency" *Proc. IEEE*, vol. 113, no. 7, p. 1151-1154, 1966.  
 [10] T. Ikegami and Y. Suematsu, "Resonance-like characteristics of the direct modulation of a junction laser," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 1, pp. 122-123, Jan. 1967.  
 [11] F.P. Kapron, D.B. Keck and R.D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 7, p. 423, Nov. 15, 1970.  
 [12] D.B. Keck, R.D. Maurer, and P.C. Schultz, "On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 307-309, Apr. 1973.  
 [13] J.B. MacChesney, P.B. O'Connor and J.R. Simpson, "A new technique for the preparation of low-loss and graded-index optical fibers", *Proc. IEEE*, Vol. 62, No. 9, pp. 1280-1281, Sept. 1974.

1974 IEICE業績賞}。このAlGaAsレーザに関して、初の横単一モード動作のTJSレーザが開発された {単一モード低しきい値TJSレーザダイオードの研究開発、白幡潔・須崎渉・浪崎博文 (三菱)、1980 IEICE業績賞}。

この頃から企業においても光ファイバ通信への関心が増した。当時の光ファイバの損失はAlGaAs/GaAsレーザの0.85 $\mu$ m帯で最低となっていたので、この波長帯の光ファイバ通信の研究が国内外で行われ、NTTでは直接変調による0.85 $\mu$ m帯FP型半導体レーザによる通信の諸問題などが検討された {通信用半導体レーザの研究、池上徹彦・伊藤武、1983 IEICE業績賞}。

#### IV 大容量長距離光ファイバ通信用の半導体レーザの開拓

**4-1 1.3 $\mu$ m帯半導体レーザ** AlGaAs/GaAs系半導体レーザの実用化が進められる一方で、先に述べたようにKeckの予測を先取りして、光通信用の半導体レーザの研究関心も0.85 $\mu$ m帯からより長波長帯へと移し、この新しい半導体材料を開拓する必要があった。この長波長帯のレーザ開拓では、R. Moon・G. Antypasら (1974) によると、InP基盤かGaSb基盤の4元混晶による二つの可能性があった。1975年頃に筆者は高い熔融温度や堅さなどからInPを基板にした4元混晶GaInAsP/InP(InP系)のレーザが有力と見なした。こうした未知の材料分野の開拓には、当時の科研費のみでは資金的に対応しきれない恐れがあり、他所に協力を求めたが不首尾の中で、中込雪男KDD研究所長から資金協力が得られ、新しいレーザの研究に専念できた。筆者らが開拓した(100)面InP基盤は現在でも広く用いられている<sup>[21]</sup>。MIT Lincoln研究所では1976年、InP系により1.1 $\mu$ mの発振を成功させていた。1977年には、NTT、KDDと東工大が、それぞれ1.3 $\mu$ m帯のInP系半導体レーザを発振させた<sup>[21]</sup>。この1.3 $\mu$ mの波長帯では、大容量伝送を妨げる光ファイバの材料分散効果が零になるという特徴があって、最低損失には成らないにしても多モード発振により複数の波長で動作するFPレーザでも用いることができる特徴があった。こうして、企業ではこの1.3 $\mu$ m波長帯を用いる光通信の開拓に関心が向かった。

他方、光出力の安定のための横モード制御については、1974年に日立製作所で開発されたAlGaAsレーザの埋込みヘテロ (BH: Buried Hetero) 構造が、その当時はAlの酸化問題でAlGaAs/GaAs系レーザには用いられなかったが、Alを含まないInP系レーザには標準構造として活かされた {埋込みヘテロ構造半導体レーザの発明・開発、塚田俊久・伊藤良一 (日立)、1983 IEICE業績賞}。1.3 $\mu$ m帯レーザは、1980年代初頭には、長距

離用に用いられたが、1.5 $\mu$ m帯が開拓されてからは、温度特性に優れた特長を活かして短い距離用に用いられている。

**4-2 動的単一モードレーザ (波長1.5 $\mu$ m帯)** 話は前後するが、1975年に筆者、末松安晴はこれから開拓しなければならない本格的な大容量長距離光ファイバ通信として、Keck により1.4-1.8 $\mu$ mの間くらいではないかと予想されていた光ファイバ最低損失波長帯において (最終的には図2の様に1.5 $\mu$ m帯となった)、単一モード光ファイバと動的単一モードレーザ (Dynamic Single Mode Laser (DSMLレーザ)) と名付けた通信用の半導体レーザ {2014 日本国際賞} からなる、単一モードシステムを提案した<sup>[14]</sup>(この招待論文は当初、単一モードシステムのみで執筆したが、査読者の要望で多モードファイバを加えさせられて出版が遅れた)。このDSMLレーザは筆者が科学研究費の支援で学生達の協力で開拓した通信用の半導体レーザで、その後の発展をも含めると、次の様な3機能を併せ持つ半導体レーザである: 1) 光ファイバが最低損失となる1.5 $\mu$ m長波長帯で動作し、長距離伝送に適應する、2) 安定な単一の波長で動作し、光ファイバ伝搬定数の波長分散による伝送特性の劣化を最小化する、そして3) 波長可変/同調性で、温度的または電氣的に波長同調を行い、通信には必然な複数の波長利用が出来るようにすると共に、ヘテロダインの局部発振器などに適應させる。

このDSMLレーザが実用化された例には、温度同調のDSMLレーザとしての「片端面鏡一様分布帰還 (DFB: Distributed Feed Back) レーザ (一様DFBレーザ)」と「位相シフトDFBレーザ」(図3) とがある。さらに電気同調のDSMLレーザとしての「波長可変レーザ (Wavelength Tunable Laser)」(図4) がある。

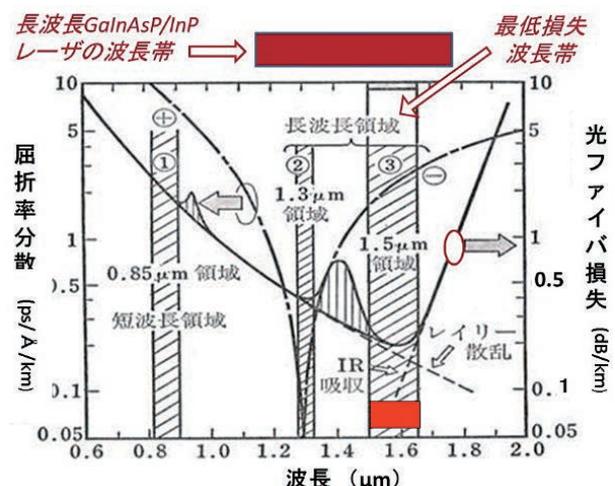


図2 GaInAsP/InP長波長レーザの発振波長範囲とシリカ光ファイバの最低損失波長帯。素データは長波長レーザについては (荒井・末松・板屋)<sup>[18]</sup>と光ファイバの損失データ (宮・照沼ら)<sup>[19]</sup>による。

[14] Y. Suematsu, "Long-wavelength optical fiber communication," *Proc. IEEE*, vol. 71, no. 6, pp. 692-721, Jun. 1983.

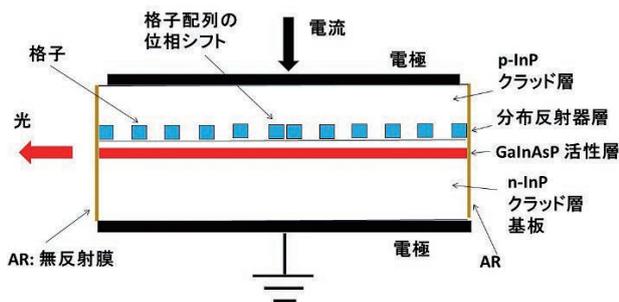


図3 位相シフトDFBレーザー～温度同調のDSMレーザー～、(Sekartedjo・江田・古屋・末松・小山・Tanbun-Ek)<sup>[24]</sup>を基に作成。

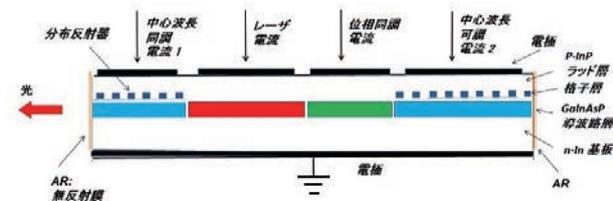


図4 波長可変レーザー～電気同調のDSMレーザー～(末松・宇高)<sup>[25]</sup>と(東盛・蔀・末松)<sup>[26]</sup>を基に作成。

1972年に筆者は屈折率の低い材料で活性領域を囲む横単一モード動作と<sup>[21]</sup>、そして1974年に、2個の分布反射鏡 (DFB/DBR(Distributed Bragg Reflector)) を位相シフトさせて結合させた共振器からなる単一モード共振器を見出して<sup>[15]</sup>、DSMレーザーを示唆した。DFBレーザーを提案したHerwig Kogelnik(米) は、1972年に屈折率差結合の様な分布帰還レーザーでは2モード(2波長)で発振するという問題<sup>[16]</sup>を指摘したが、上記の単一モード共振器によりこの問題は解決された。その後、単一モード共振器に関しては様々な発展がなされた。1973年に米国で中村道治(日立)とAmnon Yarivらは、0.85 $\mu\text{m}$ 帯で光ポンプによる最初の半導体による一様DFBレーザーを試作して波長選択性が強いことを示した<sup>[17]</sup>。筆者は、多重共振器による単一モード共振器についても検討を進め、その後のリング共振器レーザーなどに発展している。

こうした単一モード共振器や波長可変機構を作り付けた、図4に見られるような半導体レーザーや、さらには光

集積回路の実現のために必要不可欠な、レーザー活性層と損失の少ない出力導波路が一体化された集積レーザーを、初めて、1974年に実現した {モノリシック光集積回路の基礎研究、末松安晴・山田実・上林利生、1977 IEICE業績賞}。この集積レーザーは、後の波長可変レーザーなどの新しい機能を持つDSMレーザーを生み出す中核技術と成った。

さて、筆者はKeckがシリカ光ファイバの極低損失波長帯と予想した1.4-1.8 $\mu\text{m}$ 帯で働かせるために長波長帯GaInAsP/InPレーザーの開拓を進めた<sup>[18]</sup>。この間に同時進行で、シリカ光ファイバの最低損失波長帯が1.55 $\mu\text{m}$ 帯にあることがNTTの宮哲雄、照沼幸雄らにより明らかにされた(図2)<sup>[19]</sup>。同年の1979年に、筆者は大学院生の荒井滋久や板屋義夫らと、この最低損失波長帯で働く1.5 $\mu\text{m}$ 帯GaInAsP/InP-FPレーザーの室温連続動作を達成した<sup>[14]</sup>{長波長帯半導体レーザーに関する先導的研究、荒井滋久、2010 IEICE業績賞}。これらの長波長レーザーの研究は、筆者としては、DSMレーザーを達成するための通過点であった。この年には、他に、KDDの秋葉重幸ら、NTTの河口仁司ら、ベル研のKaminowらもこの波長帯で室温連続動作を達成した。

**a) 温度同調のDSMレーザー** 1980年に、筆者の末松は大学院生の宇高勝之らと、単一モード共振器を一体集積した1.5 $\mu\text{m}$ 帯のDSMレーザーを実現し、高速直接変調の下で単一モード動作を達成し<sup>[20]</sup>、さらに室温連続動作に成功した<sup>[21]</sup>。このレーザーは温度同調のDSMレーザーであった。安定な横単一モード動作には、先述の埋込みヘテロ接合を用いた。

このDSMレーザーの実現が契機と成り、1981年の後半には、KDDの宇高勝之(同社に就職)・秋葉重幸・堺和夫ら<sup>[22]</sup>や、NTTの松岡隆志・永井治男・板屋義夫(NTTに就職)らは<sup>[23]</sup>、実用的な温度同調のDSMレーザーとして、片端面鏡一様DFBレーザーを実現した。そして、これが企業に於いて実用化され、大容量長距離光ファイバ通信実験が行なわれるようになった {長距離大容量光通信用半導体デバイスの開発、小林功郎・水戸郁夫・田

[15] 末松安晴、林健二、「分布反射器とこれを用いたレーザー共振回路の一般解析」、昭和49年度電子通信学会全国大会、1200, p. 1203, July 25-27, 1974.(英文表記: Y. Suematsu and K. Hayashi, "General analysis of distributed Bragg reflector and laser resonator using it," in *Nat. Convention of IECE*, 1200, p. 1203, July 1974.)

[16] H. Kogelnik and C.V. Shank, "Coupled wave theory of distributed feedback lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 2327-2335, May 1972.

[17] M. Nakamura, A. Yariv, H.W. Yuen, S. Somekh, and H.L. Garvin, "Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 515-516, May 1973.

[18] S. Arai, Y. Suematsu, and Y. Itaya, "1.11-1.67 $\mu\text{m}$  (100) GaInAsP/InP Injection Lasers Prepared by Liquid Phase Epitaxy," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-16, no. 2, pp. 197-205 (Feb. 1980).

[19] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka and T. Miyashita, "An ultimately low-loss single-mode fiber at 1.55  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.*, 15, 4, pp. 106-108, Feb. 1979.

[20] K. Utaka, K. Kobayashi, and Y. Suematsu, "Lasing characteristics of GaInAsP/InP integrated twin-guide lasers with first-order distributed Bragg reflectors," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 5, pp. 651-658, May 1981.

[21] Y. Suematsu, "Dynamic Single-Mode Lasers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 6, pp. 1144-1157, March 15, 2014.

[22] K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai, and Y. Matsushima, "Room-temperature CW operation of distributed feedback buried-heterostructure InGaAsP/InP lasers emitting at 1.57  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.*, vol. 17, no. 25/26, pp. 961-963, Dec. 1981.

[23] T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki, and T. Ikegami, "CW operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength region," *Electron. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 27-28, Jan. 1982.

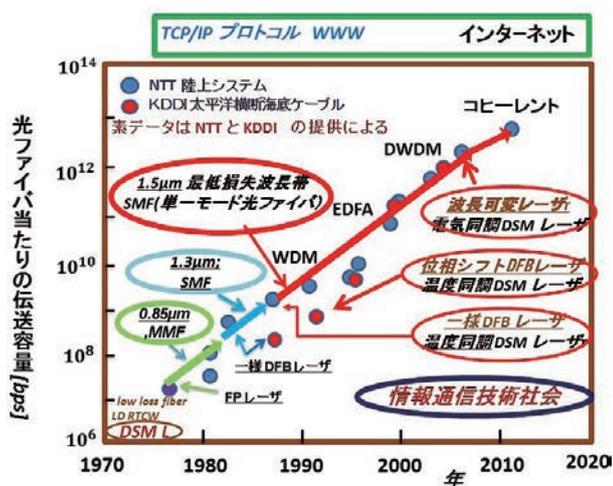


図5 光ファイバ当たりの商用伝送容量の年次増加と、システムそして光源の半導体レーザー。素データはNTTとKDDIのご厚意による。

口剣申 (NEC)、1988 IEICE業績賞}。

さらに、1983年に筆者は東工大の古屋一仁らと単一モード共振器<sup>[15]</sup>を実装した、上記の位相シフトDFBレーザー (図3) を実現した<sup>[24]</sup>。このレーザーは、製造段階で、電子ビーム露光機によるレジスト露光で単一モード分布反射共振器が作り込まれるので、所定の位相シフト量が製造プロセス時に設定され、指定した単一波長性を保証する製造の歩留まりが高い (三菱電機で実証)。1984年に、このレーザーはKDDの宇高・秋葉らにより実用化された。生産の歩留まりが高いこのレーザーは、AT&TやNTTで開拓された広範囲の波長帯をカバーするレーザー・アレーの個々のレーザーとしても多用されている。1.5μm帯の位相シフトDFBレーザーは、1992年に太平洋横断光海底ケーブル、TPC-4、に用いられて以来、大容量長距離光ファイバ通信の標準レーザーとして陸海で広く用いられている (図5)。

DSMレーザーの単一モード性能は、所望の光出力 (普通は数十mW) を、抑圧された隣接モードの微少な光出力で割った比、すなわちSMSR (Side Mode Suppression Ratio) で表した (普通は約40dB前後) が、後にはこの学術用語がJISやIECの国際的な標準用語となった ([21]参照)。初期のDSMレーザーの開拓と長波長帯の単一モード光ファイバ通信の考えは招待論文にまとめられている (1983)<sup>[14]</sup>。

## b) 波長可変レーザー；電気同調のDSMレーザーの開拓

電氣的に波長が同調できる電気同調のDSMレーザー、いわゆる波長可変レーザーは1980年に筆者の末松らが提案し<sup>[25]</sup>、<sup>[26]</sup>、ついで1983年に大学院生の東盛裕らと共に実証した<sup>[21]</sup>。この波長可変レーザーはDBR型レーザーで、図4に示すように電子注入によるプラズマ効果やマイクロヒータ (金子ら<sup>[27]</sup>) で温度を局所的に変えるなどによって、二つの反射器と位相領域のそれぞれの屈折率を変え、二つの反射器のそれぞれの中心波長や、位相領域の位相量をそれぞれ変化させる。こうして、波長可変レーザーは単一モード共振条件を満足させながら、電氣的に波長を変えられる。

その後、1987年にNECの村田茂らや富士通の金子らで代表される企業人によって、当初に提案した反射器領域と位相領域の屈折率を、それぞれ複数の制御電極で電氣的に変えて波長を制御する、波長可変レーザーが実現された (図4)。さらに1993年にはNTTの東盛裕・吉国裕三ら<sup>[28]</sup>やLarry Coldren (米) らが、複数の周期構造を混在させた分布反射器を用いると共に、バーニア効果<sup>[29]</sup>と呼ばれる共振の波長を飛び飛びに変える技術を導入して、波長可変範囲を拡大した。

波長可変レーザーには、2個の分布反射器を図4の様に両端に置く代わりに、Y型の導波路を用いて、2個の各々の枝に分布反射器を作り付けた波長可変レーザーも実用化されている。このY型波長可変レーザー<sup>[30]</sup>は、1984年から一年半留学していたBjoern Brobergがスエーデンに帰国後立ち上げたベンチャー企業Syntuneで商用化されている。さらに、分布反射器の代わりに2重リング共振器を外部鏡として用いるものもある。

また、前項で述べたアレーレーザーをも波長可変レーザーと呼ぶことがある。

これらの波長可変レーザーは、まず米国で2004年に高密度の波長領域多重 (DWDM; Dense Wavelength Division Multiplexing) 通信用に商用化され、2005年からは国内でも用いられている (図5)。さらに、デジタル・コヒーレント通信の実用化に伴って、狭スペクトルで同調が容易なレーザーとして広く用いられるようになった。

[24] K. Sekartedjo, N. Eda, K. Furuya, Y. Suematsu, F. Koyama, and T. Tanbun-Ek, "1.5μm Phase-Shifted DFB Lasers for Single-Mode Operation," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 80-81, Jan. 1984.

[25] 末松安晴、宇高勝之、昭和56-116683、「同調及び周波数変調機構を具える分布反射型半導体レーザー」、特許公開：昭56/9/12 (1981)、出願番号：昭55-19049、出願：昭和55/2/20b, 1980.

[26] 東盛裕一、蔣霽、末松安晴、「半導体レーザーの波長制御」、電子通信学会研究会資料、OQE84-81, pp.15-22, 1984.(英文表記：Y. Tohmori, X. Jiang, and Y. Suematsu, "Wavelength tuning of semiconductor lasers," *IEICE Jpn., Tech. Group Report*, OQE84-81, pp. 15-22, 1984.)

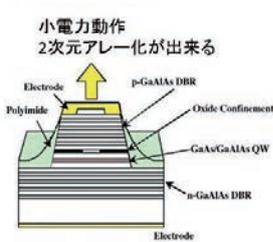
[27] T. Kaneko, Y. Yamauchi, H. Tanaka, T. Machida, T. Ishikawa, T. Fujii, and H. Shoji, "High-power and low phase noise full-band tunable LD for coherent applications," *OFC/NFOEC*, Mar. 24, 2010.

[28] Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1817-1823, June 1993.

[29] V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L.A. Coldren, "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, June 1993.

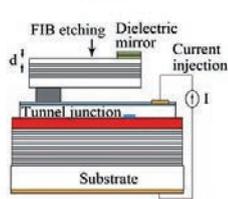
[30] J.O. Wesstroem et al, "State-of-the-art performance of widely tunable modulated grating Y-branch lasers," *Optical Fiber Communication Conference. OFC 2004*, 2004.

### VCSELの構造



Proposal K. Iga, 1977  
RT-CW Operation, F. Koyama & K. Iga, 1988

### 温度無依存マイクロ機構付き VCSEL



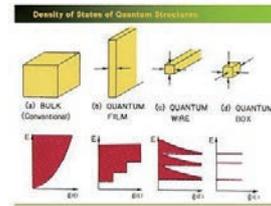
Janto, Hasebe, Nishiyama, Caneau, Sakaguchi, Matsutani, Koyama and Zah, 2006

図6 面発光レーザー: VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) {伊賀 1990 IEICE業績賞}、と温度無依存波長のVCSEL (Janto・長谷部・西山・Caneau・坂口・松谷・小山)<sup>[32]</sup>を基に作成。

**4-3 面発光レーザー (VCSEL)** 東工大では、基板面に垂直に光を出す面発光レーザーが1977年に着想され、1988年に室温連続動作が達成され〔面発光半導体レーザーの先駆的研究、伊賀健一、1990 IEICE業績賞〕(図6)、実用化には小山二三夫らの協力があつた。このレーザーはその後VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) と呼ばれ、小電力動作や二次元アレー化できる特徴があつて、中・近距離光ファイバ通信の有力な光源として、長距離用の大きな光出力のDSMLレーザーを補完し、広く用いられている。VCSELは原理的には短共振器長のDBRレーザーで、中間領域長を適切に位相シフトさせればDSMLレーザーとして働く。短距離では多モード動作で十分なこともあり、また波長も、1.5 $\mu\text{m}$ 帯に比べて温度特性に優れた0.85 $\mu\text{m}$ 帯の短波長帯を中心にして用いられる。

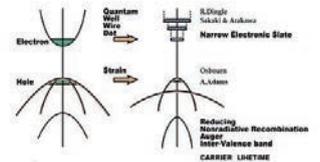
2000年にはConnie J. Chang-Hasnain (米) はMEMSを装着して機械的に波長を可変させるVCSELを開拓した<sup>[31]</sup>。2006年には小山らが温度変化では波長が変わらないVCSELを開拓するなど、多彩な発展を続けている。2008年には古河電工の粕川秋彦のグループで高効率のVCSELが開発され、電力効率が62%、光出力10mWが報告されている。なお、2001年のブッシュ大統領による米国のナノテクノロジー技術推進イニシアティブではHEMTと共にVICSELが他山の石として例示された。

**4-4 歪み量子井戸・量子ドット構造によるレーザー特性の改善と材料** この間に薄膜作製技術の進歩があつて、超格子構造によってバルク材料よりすぐれた電気・光変換特性を達成する研究が発展した。バルク材料では



QW: J.P.van der Ziel, et al. 1975  
QD: Y.Arakawa and H.Sakaki 1982

### Electronic Band Control and Valence Band Control.



Strain Super Lattice :  
G.C. Osbourn : 1983  
A.R. Adams : 1986

図7 歪み量子井戸構造と量子ドット構造のエネルギー構造、(van der Zielら)<sup>[33]</sup>、(Osbourneら)<sup>[34]</sup>、(Adamsら)<sup>[36]</sup>と{榊・荒川1990 IEICE業績賞}を基に作成。

高信頼動作の要請から材料に歪みを残さないために、ヘテロ構造間の格子整合は約0.03%以内と厳しかった。しかし、膜厚が数十nmの超格子構造ではこの制限がなく、逆に、歪みを加えて材料の性能向上に使われるようになった。1975年にJ.P. van der Ziel(米)らは量子井戸構造を用いるレーザーを発表し(光励起)<sup>[33]</sup>、1982年にはGordon C. Osbourn(米)らは歪みを加えた超格子構造<sup>[34]</sup>の有用性を提言し(図7)、1986年にEli Yablonovichらはホールの有効質量低減効果<sup>[35]</sup>を述べた。またInGaAsP/InPレーザーの開拓の初期に筆者と共に研究を行ったAlfred Adamsらは、帰国後の1986年にSurry大学で歪みによる価電子帯の状態を好転させるBand Structure Engineering<sup>[36]</sup>を唱え、PhilipsのPeter J. A. Thijsを促して1.5 $\mu\text{m}$ 帯量子井戸構造レーザーの発振閾値や温度特性などの基本特性を抜本的に改善した<sup>[37]</sup>(図8)(1991)。国内外でこうした研究が盛んに行われた〔光通信量子井戸構造半導体レーザーの開発、茅根直樹(日立)・Won-Tien Tsang(BTL)・水戸郁夫(NEC)、1995 IEICE業績賞〕。

1982年には東大で量子箱(現在のQuantum Dots (QDs))構造のレーザーが提言され〔量子効果デバイスの先駆的研究、榊裕之・荒川泰彦、1990 IEICE業績賞〕、1993年にはD. Leonardら(佛)が蒸着により表面に粒々に固まったQDsが直接に作製されると明らかにして<sup>[38]</sup>、作製条件を広げた。1994年に大学院生の平山秀樹らと筆者はQDs構造のレーザー発振に初めて成功した<sup>[39]</sup>。2004年に荒川は大坪らと共に、QDsレーザーの光出力が温度によらない優れた特性を示すことを実証し

[31] C.J. Chang-Hasnain, "Tunable VCSEL," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 978-987, Nov./Dec. 2000.

[32] F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga, "Room-temperature cw operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser", *Trans. IEICE*, vol. E71, no. 11, pp. 1089-1090, Dec. 1988.

[33] J.P. van der Ziel, R. Dingle, R.C. Miller, W. Wiegman, and W. A. Nordland, Jr., "Laser oscillation from quantum states, in very thin GaAs-A<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no. 8, pp. 463-465, Apr. 1975.

[34] G.C. Osbourn, "In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As strained-layer superlattices: A proposal for useful, new electronic materials," *Phys. Rev. B*, vol. 27, pp. 5126-5128, Apr. 1983.

[35] E. Yablonovich and E.O. Kane, "Reduction of threshold current density by the lowering of valence band effective mass," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 5, pp. 504-506, May 1986.

[36] A.R. Adams, "Band structure engineering for low-threshold, high-efficiency semiconductor lasers." *Electron. Lett.*, vol. 22, pp. 249-250, 1986.

[37] P.J.A. Thijs, L.F. Tiemeijer, P.I. Kuindersma, J.J.M. Binsma, and T. Van Dongen, "High performance 1.5 $\mu\text{m}$  wavelength InGaAs/InGaAsP strained quantum well lasers and amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 1426-1439, June 1991.

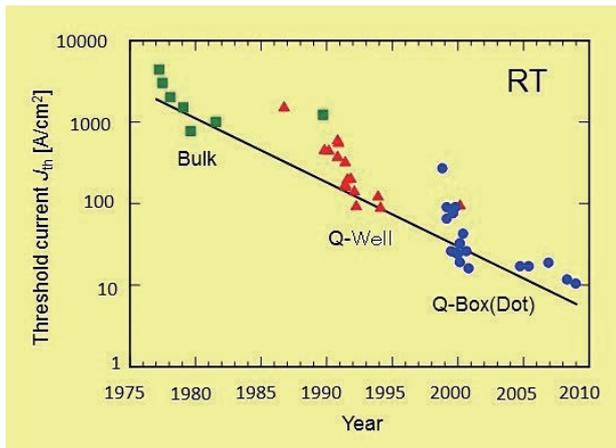


図8 長波長帯半導体レーザーの発振閾値電流密度の年次の改良、波長1.2~1.7 $\mu\text{m}$  (西山信彦による)。

た<sup>[40]</sup>。量子井戸や量子ドット構造の活用は伝導帯の電子準位を高密度化し、ひずみ構造は価電子帯の構造を改善した(図7)。こうした超格子構造は、主として、DSMLレーザーなどの活性層に用いられて、温度特性の改善に役立てられている。

また、高温動作を目標にしてクラッド材にエネルギー幅の大きな半導体を用いるレーザーの開拓が行われ、日立ではInGaAlAsが開発された{InGaAlAs材料系を用いた毎秒10ギガビット伝送用高温動作通信用光源、中原宏治・土屋朋信・青木雅博、2006 IEICE業績賞}。

**4-5 半導体レーザーの基礎理論** 通信用半導体レーザーの発展には、現象の本質を理解し、究極的な性能を引き出すのに、理論的基礎の解明が不可欠であった。初期の動力学的開拓を初め、下記の多くの研究者の優れた貢献があった：Alfred R. Adams (英)、秋葉重幸、Markus G. Amann (独)、浅田雅洋、茅根直樹、Magnus Danielson (丁抹)、Herman A. Haus (米)、Charles Henry (米)、Gordon D. Henshall (英)、伊藤良一、神谷武志、小林功郎、Thomas L. Koch(豪)、小山二三夫、Gordon Lasher (米)、Kam Y. Lau (米)、大津元一、水戸郁夫、西村吉雄、覧具博義、Kristian Stubkjaer (丁抹)、魚

見和久、山田実、Eli Yablonovich (米)、そしてAmnon Yariv (米) など。ここでその詳細を述べる紙面は許されないなので、総合論文を参照されたい<sup>[21]</sup>。

以下に一、二の例を述べたい。半導体レーザーに不安定性をもたらす非線形現象<sup>[8]</sup>は、レーザー共振器の横幅をキャリアの拡散長、すなわち2 $\mu\text{m}$ 程度、とすることで実質抑制される(1978)。また、自然放出と誘導放出とを結びつける自然放出光係数(1977)により半導体レーザーのスペクトル線幅が表わされ、これが共振器長の二乗に反比例することから、共振器長を長くすることで狭スペクトル化が達成されている。さらにレーザー効率を妨げる非発光遷移の解明や共振器内の注入キャリアの流失などの現象も明らかにされ、新たな材料開拓に活かされている(1980)。

**4-6 半導体光増幅器** 半導体による光増幅器(SOA; Semiconductor Optical Amplifier)は将来性のあるデバイスであり、すでに1966年にはCroweらがその利用を提唱し<sup>[41]</sup>、1978年に東工大の岸野・末松・宇高らにより半導体レーザーと半導体レーザー増幅器が一体集積され<sup>[42]</sup>、1981年には上林・末松によりバルク型の雑音特性が<sup>[43]</sup>、1985年にはNTTの向井・山本・木村が半導体レーザー増幅について述べ<sup>[44]</sup>、1991年に小森・荒井・末松らにより量子箱型(QD)による雑音指数向上が提唱された<sup>[45]</sup>。実用面では偏波を考えなくても良いPICs(光集積回路)<sup>[66]</sup>の内部や出力端でブースター増幅にSOAが広く用いられている。他方では、光回線に用いるために、1991年には偏波依存性の少ない伸張ひずみを加えたMQWを用いるSOAがNTTの曲・岡本・野口により試みられ<sup>[46]</sup>、田口・浅香・藤原らにより、光アクセスの次世代規格(NG-PON2)候補、TDM/WDM-PON応用のフィールドトライアルの結果が報告されている<sup>[47]</sup>。

- [38] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbaars, and P.M. Petroff, "Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 23, pp. 3203-3205, Dec. 1993.
- [39] H. Hirayama, K. Matsunaga, M. Asada, and Y. Suematsu, "Lasing action of Ga<sub>0.67</sub>In<sub>0.33</sub>As/GalnAsP/InP tensile-strained quantum-box laser," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 2, pp. 142-143, Jan. 1994.
- [40] K. Otsubo, N. Hatorim, M. Ishida, S. Okumura, T. Akiyama, Y. Nakata, H. Ebe, M. Sugawara, and Y. Arakawa, "Temperature-insensitive eye-opening under 10-Gb/s modulation of 1.3- $\mu\text{m}$  P-doped quantum-dot lasers without current adjustments," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 8B, pp. L1124-1126, July 2004.
- [41] J.W. Crowe and W.E. Ahearn, "Semiconductor laser amplifier," *IEEE J. QE-2*, pp. 283-289, Aug. 1966.
- [42] K. Kishino, Y. Suematsu, K. Utaka, and H. Kawanishi, "Monolithic Integration of Laser and Amplifier/Detector by Twin-Guide Structure," *Japan. J. Appl. Phys.*, vol. 17, no. 3, pp. 589-590, Mar. 1978.
- [43] T. Kambayashi and Y. Suematsu, "Amplification characteristics of integrated twin-guide laser amplifier," *Trans. IEICE Japan*, vol. E64, no. 7, pp. 489-496, July 1981.
- [44] T. Mukai, Y. Yamamoto, and T. Kimura, "Optical amplification by semiconductor laser," *Semiconductor and Semimetals, Academic*, vol. 22-E, pp. 265-319, 1985.
- [45] K. Komori, S. Arai, and Y. Suematsu, "Noise in Semiconductor Laser Amplifiers with Quantum Box Structure," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 39-41, Jan. 1991.
- [46] K. Magari, M. Okamoto, and Y. Noguchi, "1.55 $\mu\text{m}$  polarization-insensitive high-gain tensile-strained-barrier MQW optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 11, pp. 998-1000 (1991).
- [47] K. Taguchi, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, K.-I. Suzuki, and A. Otaka, "First field trial of 40-km reach and 1024-split symmetric-rate 40-Gbit/s  $\lambda$ -tunable WDM/TDM-PON," *OFC '2015*, Th5A. 6, Los Angeles, USA, March, 2015.

## V 極低損失光ファイバの開拓

### 5-1 極低損失シリカ光ファイバの製造技術

すでに述べたように、半導体レーザーが室温連続動作を達成された1970年、奇しくも同年に、前述の様にF.P. Kapronら(米)は低損失シリカ光ファイバの製造技術を開拓し、波長0.63 $\mu\text{m}$ 帯で実用レベルの20dB/kmを達成した<sup>[11]</sup>。しかし、この製造技術は更なる低損失化には難点があった。1974年にJohn B. MacChesney(米)らは、石英チューブ内側に気相成長(CVD)でシリカの煤を堆積してその後ろに熔融して母材を作る、MCVD法を開発した<sup>[13]</sup>。

1976年には、この技術に基づいてNTTと藤倉では1.3 $\mu\text{m}$ 帯で低レベルOHの光ファイバを作成して極低損失、0.47dB/km、を初めて達成した{極低損失長波長帯光ファイバの研究、堀口正治(NTT)・小山内裕(藤倉)、1976 IEICE業績賞}。さらに1979年に、NTTの宮、照沼らは光ファイバの最低損失波長帯が1.55 $\mu\text{m}$ にあることを明らかにし(図2)<sup>[19]</sup>、1986年には住友電工の金森弘雄らが、その最低損失波長帯で0.154dB/kmの極低損失を達成した<sup>[48]</sup>。ガラスファイバの損失は図9に示すように1970年代に劇的に減少した。

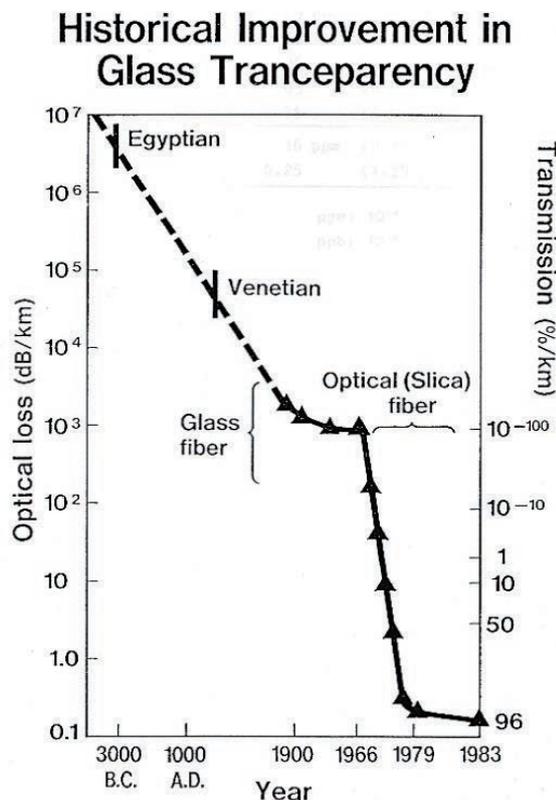


図9 ガラス光ファイバ損失の年次改善(村田浩による)。

5-2 VAD法の連続製造技術 NTTはガラス中の微量OH基濃度の分布測定技術を開発して、極低損失シリカ光ファイバ製造技術の開発を進めた。惨憺たる苦勞の末に、1977年にNTTでは日本の電線メーカーと、図10に示すように、シリカを煤として軸方向に堆積し、その後ろに熔融して母材を作る光ファイバ製造技術VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 法が開発された{光ファイバ連続製造法(VAD)の研究開発、伊澤達夫・枝廣隆夫・中原基博(NTT)、1980 IEICE業績賞}。現在、世界のシリカ光ファイバの多くが、このVAD法による光ファイバの連続製造技術で製造されている。

5-3 分散シフト光ファイバ 単一モード光ファイバの伝送特性を阻害する要因の一つは、前述の様に、伝搬モードの伝搬定数が波長によって異なる群速度の分散である。1975年にDavid N. Payne とWilliam A. Gambling(英)は、シリカ光ファイバの材料分散が零になる零分散波長は波長1.3 $\mu\text{m}$ であると明らかにした。

同年に、東北大で、W型屈折率分布の単一モード光ファイバにより零分散波長がシフトされ、分散特性が制御出来ることが明らかにされた{光ファイバの高性能化に関する先駆的研究、川上彰二郎、1987 IEICE業績賞}。さらに、例えば1994年に大西正志(住友)らは、長距離伝送用に広い波長帯に亘って分散の少ない高性能な分散補償光ファイバを実現し、単一モード光ファイバの性能を向上させた。ただ、後述の非線形現象により波長の異なるチャンネル間で混信が起こるので、伝送方式によっては広い範囲で分散を零にするととは限らない。

5-4 光ファイバ増幅器 光通信の主力波長帯、1.5 $\mu\text{m}$ 帯に於いて、光ファイバ増幅器が広く用いられて、長距離光通信の低コスト化に貢献している。

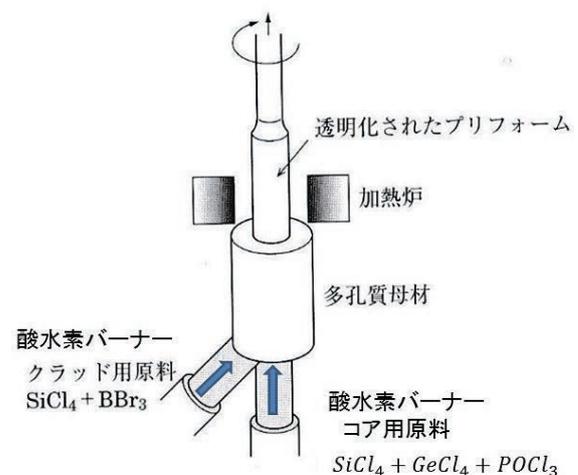


図10 光ファイバの連続製造方法：VAD (Vapor-phase axial deposition)、{伊澤・枝廣・中原 1980 IEICE業績賞}を基に作成。

[48] H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itou, Y. Asano, S. Tanaka, "Transmission Characteristics and reliability of pure silica core single mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-4, No. 8, August, 1986.

**(a) 光ファイバ・レーザ** 1984年に、NTTの中沢・徳田らは、Er<sup>3+</sup>(Erbium) ドープの光ファイバ・レーザを開拓し、光ファイバのOTDR(Optical Time Domain Reflectometry) に用いている。各種の光ファイバ・レーザが開拓されており、1.5μm帯ソリトン通信の光源や、大容量通信の光源などに用いられている。

**(b) 1.5μm帯光ファイバ・ラマン増幅器** 1.4-1.5μm帯の偏波保存光ファイバを用いて、1985年に、NTTの中澤・中島・青海らにより、光励起によるラマン効果の原理を用いた光増幅器が開発された<sup>[49]</sup>。この様な光増幅器の導入で、光ファイバ伝送路を総体として損失が補償された活性伝送路 (Active Transmission line) として扱うことが出来、実用が進んでいる。

**(c) Er<sup>3+</sup>ドープの光ファイバ増幅器** 1.5μm帯において、1987年にDavid N. PayneのグループのRobert J. Mears (英) らは28dBの増幅度をもつ希土類元素のErを光ファイバにドープしたEr<sup>3+</sup>ドープ光ファイバ増幅器 (EDFA; Erbium Doped Fiber Amplifier) を実現した (図11)<sup>[50]</sup>。1989年にNTTで、半導体レーザで光励起したEDFAにより低損失の長波長帯を40nmと広くカバーするコンパクトな光増幅器が開拓され、EDFAの実用化を促進した {エルビウム光ファイバ増幅器とその応用に関する先駆的研究、中沢正隆・萩本和男、1993 IEICE業績賞}。

EDFAが開発されて各中継기所で電気信号に落とすことなく、光を一括増幅出来るので、長距離光システムが低コスト化した。Er以外の材料を用いる光増幅器も開拓されている。

**5-5 光励起用半導体レーザ** 1.5μm帯のEDFA用の光励起光源には1W近くの大出力が要求され、Donald B. Scifres(米) らが1991年に波長980nmの光励起用レーザを開発した。Atul Mathur (米) らは2000年に励起

波長1.4μm半導体レーザで、出力1Wの単一モード共振器レーザを開発した。2003年にはNECで、波長1.4μmで出力パターンが単峰な、出力結合効率が84%に達する低消費電力型の多モード共振器レーザが開発された。また古河電工では高出力の励起用レーザモジュールが開拓されている {光ファイバアンプ励起用高出力レーザモジュール、粕川秋彦・伊地知哲朗・池上嘉一、2000 IEICE業績賞}。

**5-6 光ファイバの接続技術・偏波制御・低曲げ損失化** 1978年にNTTの畠山巖と土屋治彦らは低損失の熔融接続法を開発し、その後の発展により単一モード光ファイバの利用拡大に弾みを付けた {光ファイバ接続技術の開発、杉田悦治 (白山)・佐武俊明 (US Conec)・加島宜雄 (芝浦工大)、2010 IEICE業績賞}。

通常の光ファイバでは、伝えられる光の偏波面は伝搬につれて変化する。ヘテロダイン通信方式などのように偏波面を一定の方向に保つために偏波保存光ファイバが用いられている {偏波面保存光ファイバの開発、大越孝敬 (東大)・佐々木豊 (NTT)・松村宏善 (日立)、1982 IEICE業績賞}。

1996年にJonathan C. Knight (英) はフォトニック結晶光ファイバを開拓した。2004年にNTTでは、ほぼ直角に曲げられる光ファイバとして、コアを複数の空孔で取り囲んだ光ファイバが開拓されて、屋内配線に役立てられ、FTTHの普及に貢献をした {低曲げ損失光ファイバの実用化、中島和秀・三川泉・富田茂 (NTT)、2012 IEICE業績賞}。

**5-7 光入力電力制限** 光ファイバは小さなコアに光を閉じ込めるので、一定以上の光電力を入れると損傷が生じ、利用出来る入力光電力の大きさが制限され、伝送距離が制限される。さらに、4次の非線形性によるチャンネル間の混信がもう一つの光電力制限要因となっている<sup>[51]</sup>。

1984年に、光ファイバのコアに水素が発生して損失が経年的に増大することが報告されて、光ファイバの信頼性に暗雲が垂れ込めようとした<sup>[52]</sup>。幸いなことに、この光ファイバ通信の開拓史上での危機は、水素の発生を妨げる光ケーブル材料の開拓等で切り抜けられた。

**5-8 光ソリトン伝送** 光ファイバの非線形性を用いたソリトン伝送がベル研の長谷川晃により1973年に提案され、実証的な研究や実用化が計られている {光ソリトン伝送技術に関する先駆的研究、中沢正隆 (NTT)・長谷川晃 (阪大)・藤井陽一 (東大)、1995 IEICE業績賞}。

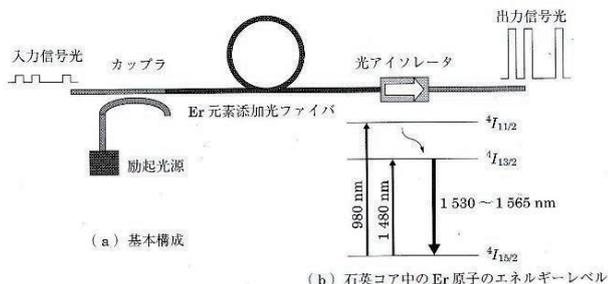


図11 Er<sup>3+</sup>ドープの光ファイバ増幅器、「フォトニクス」オーム社 (2007) より。(Mears・Reekie・Jauncey・Payne)<sup>[50]</sup>や {中沢・萩本、1993 IEICE業績賞} を基に作成。

[49] M. Nakazawa, T. Nakashima, and S. Seikai, "Raman amplification in 1.4-1.5 μm spectral region in polarization-preserving optical fibers," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. B-2, pp. 515-521, 1985.  
 [50] J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey and D.N. Payne, "Low-Noise Erbium-Doped Fiber Amplifier Operating at 1.54 μm," *Electron. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1026-1028, Sept. 10, 1987.  
 [51] R.H. Stolen, "Nonlinearity in fiber transmission," *Proc. IEEE*, Vol. 68, No. 10, pp. 1232-1236, Oct. 1981.  
 [52] J.D. Rush, K.J. Beales, D.M. Cooper and W.J. Duncan, "Influence of hydrogen on optical fibres - implications and potential solutions," *ECOC '84*, pp. 108-109, Sept. 1984.

**5-9 光ファイバの設計理論と光伝送路理論** 光ファイバを安定に用いるために、1980年には中原恒雄らにより光ケーブルの設計と計測が進展し<sup>[53]</sup>、それ以前の1977年には古屋一仁と筆者による光ファイバの不規則曲がりによるケーブル化損失の解析が行われ、単一モード光ファイバのコア径設定の指針となり<sup>[54]</sup>、さらに、光ファイバのケーブル化技術が発達した〔光ファイバケーブル設計理論と評価方法の研究、内田直也・徳田正満・青海恵之（NTT）、1985 IEICE業績賞〕、〔高密度光ファイバケーブル並びに関連技術の実用化、高島征二・川瀬正明・上野谷拓也（NTT）、1992 IEICE業績賞〕。

初期には、誘電体による光伝送の基礎研究〔ミリ波、光波、弾性波の導波伝送とその応用に関する研究、熊谷信昭（阪大）、1984 IEICE業績賞〕や、田中常雄（1976）らにより多モード光ファイバの厳密解析手法が開拓され、また多モード光ファイバ設計の研究〔光ファイバ内屈折率分布の最適設計と測定法の研究、大越孝敬・岡本勝就・保立和夫（東大）1978 IEICE業績賞〕、そして、高精度解析法〔光・電磁波工学における高精度数値解析法に関する先駆的貢献、小柴正則、2003 IEICE業績賞〕などが、精力的に行われた。

## VI 光デバイス・光回路・光集積回路（PICs）の発展

**6-1 光検出器** 光検出器は原理的には太陽電池と同じ半導体のpn接合であるが、変換効率を上げるために受光領域を厚くし、応答速度を上げるために受光面積を小さくして並列キャパシタンスを低減するなどの工夫がなされている。1953年に、西沢潤一らはPINダイオードとアバランシェダイオード（APD：Avalanche Photo Diode）を特許出願した<sup>[55]</sup>。1966年に、L.K. Anderson（米）はSiの高速光検出器、PD（Photo Diode）、について述べ<sup>[56]</sup>、R.J. McIntyre（米）はアバランシェ効果で受光電流を増倍するAPDの雑音問題を明らかにし、光吸収で発生する電子かホールのかどちらかのキャリアを強調して雑音を下げることがあることを見

い出している<sup>[57]</sup>。1978年にNTTの神戸宏らは1.1-1.6 $\mu\text{m}$ 帯用のGe-APDを開発した<sup>[58]</sup>。1980年にはFederico Capasso（米）らは1.3-1.6 $\mu\text{m}$ 帯用のInGaAsP/InGaAsヘテロ接合p-i-n検出器を開発した<sup>[59]</sup>。この長波長帯用PDでは専らInGaAsが用いられている。1997年にNTTの石橋忠夫らは、電子のみを走らせる単一走行キャリア・フォトダイオード（UTC-PD）の高速光検出器を開発した<sup>[60]</sup>。

PDの高速化には受光領域を薄くする必要があるが、そうすると受光効率が悪くなる。こうした平面型PDの欠点を補うために、2000年にNECの竹内剛らは導波路を用いて高速導波路型PDを開発した。2001年にKinsey（米）らは導波路型の1.55 $\mu\text{m}$ 帯APDで、利得・帯域巾積が320GHzの極めて優れた広帯域性を達成した<sup>[61]</sup>。

**6-2 光変調器** すでに述べた様に、1961年にKaminow（米）は光学結晶KDP（ $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ）を用いて、光のマイクロ波変調を行った<sup>[6]</sup>。その後様々な光学結晶が開発され、また、1969年に阪大では導波路型の変調器の低電圧・高速動作の検討が行なわれた〔光変調器の高速化と集積化に関する研究、末田正・井筒雅之1988 IEICE業績賞〕。1987年にはNECの小松耕哉らにより光学結晶LiNbO<sub>3</sub>（LN）の表面にTi/Mgをドープして導波路を形成した導波路型の高速度位相変調器が開発されている<sup>[62]</sup>。1994年に野口らは広帯域変調器を開発した。また、1986年にKDDの野田らはGaInAsP平面導波路による高速吸収変調器を開発した。東大ではこうした分野の基礎が展開された〔半導体光変調器・光スイッチの基礎的研究 多田邦雄1998 IEICE業績賞〕。また富士通では位相変調用のLN変調器の研究が進められた〔大容量光伝送を実現するための多値位相変調用LN光変調器の先駆的研究、田中一弘・土居正治・杉山昌樹2000 IEICE業績賞〕。

**6-3 分波器・合波器** 多波長の光波を一つに集めて光ファイバに導く合波器や、逆に、光ファイバで送られて来る多波長の光を各々の波長に応じて選り分ける分波器は、光システムで多用されている。1996年にNTTでは

[53] T. Nakahara and N. Uchida, "Optical cable design and characterization in Japan," *Proc. IEEE*, vol. 68, no. 10, pp. 1220-1226, Oct. 1980.

[54] K. Furuya and Y. Suematsu, "Random Bend Losses in Single-Mode Optical-Fiber Cables: Power-Spectrum Estimation from Spectral Losses," *Electron. Lett.*, vol. 4, no. 19, pp. 653-654, Sep. 1978.

[55] 西沢潤一、渡邊寧、高抵抗博領域を有する半導体光電変換器、特許公報、昭30-8969、出願30/6/1953.

[56] L.K. Anderson and B.J. McMurtry, "High-speed photodetectors," *Proc. IEEE*, Vol. 54, No. 10, p. 1355, Oct. 1966.

[57] R.J. McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-13, no. 1, p. 164, Jan. 1966.

[58] H. Kanbe, H. T. Kimura, T. Yamaoka, T. Kaneda, "Characteristics of germanium avalanche photodiodes in the wavelength region of 1-1.6 $\mu\text{m}$ ," *Quantum Electronics, IEEE J.* vol. 14, no. 11, pp. 804-809, 1978.

[59] F. Capasso, R.A. Logan, A. Hutchinson and D.D. Manchon, "InGaAsP/InGaAs heterojunction p-i-n detectors with low dark current and small capacitance for 1.3-1.6  $\mu\text{m}$  fiber optic systems," *Electron. Lett.*, vol. 16, no. 23, pp. 893-895, Nov. 1980.

[60] T. Ishibashi, S. Kodama, N. Shimizu, and T. Furuta, "High-speed response of uni-traveling-carrier photodiodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 10, pp. 6263-6268, Oct. 1997.

[61] G.S. Kinsey, et al., "Waveguide Avalanche Photodiode Operating at 1.55  $\mu\text{m}$  with a Gain-Bandwidth Product of 320 GHz," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 13, pp. 842-844, Aug. 2001.

[62] K. Komatsu, S. Yamazaki, M. Kondo, and Y. Ohta, "Low-loss broad-band LiNbO<sub>3</sub> guidedwave phase modulators using titanium/magnesium double diffusion method," *J. Lightwave Tech.*, vol. LT-5, pp. 1239-1245, Sept. 1987.

WDM通信用にPLC (Planar Lightwave Circuit) と呼ばれるガラス平面光回路を用いた合波・分波器が開拓され {光通信用平面光波回路の先駆的研究、河内正夫・岡本勝就・大森保治 1997 IEICE業績賞)、さらに高精度のアレー導波路回折格子フィルタが開発されている {WDM伝送用アレー導波路回折格子波長フィルタの先駆的研究、高橋浩・井上靖之・鈴木扇太 2012 IEICE功績賞}。

**6-4 光アイソレータ** 光は反射して戻るとレーザや光増幅器で増幅されて不安定となる。これを断ち切るのが一方向にしか光を通さない光アイソレータで、極めて重要な機能である。1981年にはNECの青山、土井、内田らはGd: YIGを用いた光アイソレータを開拓している<sup>[63]</sup>。

**6-5 光集積回路** 1960年のレーザの出現と共に光通信の研究が始まったが、マイクロ波の研究者には、レーザや光回路を一体化する光導波路を用いた光集積回路の考えが芽生えていた。光集積回路は光デバイスを高性能化するのみならず量産化によって光デバイスの低コスト化に役立つ。1963年に筆者らは平面レーザの伝搬状態の解析を、Yarivら (米) はpn接合の導波モードの解析を行った。1964年にはD.F. Nelson (米) らはpn接合による光変調を行い、1966年にD.B. Anderson (米) らはリソグラフィによる光回路形成を試み、1968年にはオハイオ州立大 (米) で筆者は導波路型の半導体光パラメトリック発振器を提案した。1969年にStewart E. Miller (米) は自社技術誌BSTJ (Bell System Technical Journal) で光集積回路を具体的に提唱した<sup>[64]</sup>。1973年に中村らが光ポンプで動作させた0.85 $\mu$ m帯のGaAlAs DFBレーザ<sup>[17]</sup>は、1975年に室温連続発振に達した。

1974年に筆者らは集積二重導波路ITG集積レーザ [前出] を、そして1981年にBJB集積レーザを開拓した<sup>[21]</sup>。1975年になるとJames L. Merzがテーパ結合集積レーザ、Frans K. ReinhartらがDBR集積レーザ、Charles E. HurwitzらやJ.A. Rossiらがそれぞれ異なる集積レーザを開拓した。日立の相木国男らが1976年に0.85 $\mu$ m帯のDFBレーザによる周波数多重光源を開拓した<sup>[65]</sup>。

集積レーザは、波長可変レーザのようにレーザ自体の

性能向上に役立てられると共に、能動光集積回路のコア技術として発展した。1977年に筆者は集積レーザを中心とした能動光集積回路を提案、1978年には岸野克己らと半導体レーザと半導体光増幅器 (現在はSOA: Semiconductor Optical Amplifierと呼ばれている) や光検出器との一体集積を達成し、1987年にはこの様なレーザ中心の平面型の光集積回路はPICs (Photonic Integrated Circuits) と呼ばれるようになった<sup>[66]</sup>。能動光集積回路はInP基板を用いるのでInP-PICsと云われることもある。レーザと他の光回路との結合のためにNTTの板屋らは1997年にスポットサイズ変換器付きレーザを開拓した<sup>[67]</sup>。また、1987年にNTTの川村・脇田らにより吸収型のMQW光変調器を一体集積したDFBレーザが開拓された<sup>[68]</sup>。1980年にRobert F. Leheny (米) らは能動/受動一体集積の受光器を開拓した<sup>[69]</sup>。2010年に、NTTの瀬川徹と松尾慎治らは二重リング共振器波長同調レーザを一体集積した大規模の波長ルーティングスイッチを開拓し (図12)<sup>[70]</sup>、L.A. ColdrenとDaniel J. Blumenthal (米) らは、ルーティングに大量なPICsを開拓した<sup>[71]</sup>。2011年のRadha Nagarajan (米) らは超高速Tb/sのコヒーレント受光PICsを開拓した<sup>[72]</sup>。大規模集積化は一層進み、2014年には、Summers (米) らは40X57Gb/s (2.25Tb/s) のコヒーレント送信PICsを開拓した。光集積回路では光強度の増大のために、発振前の半導体レーザによる光増幅器 (SOA)

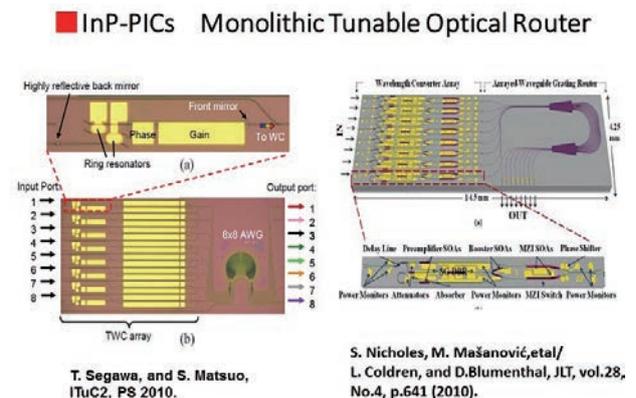


図12 InP基盤の光ルーティングの集積回路、(InP-PICs) (瀬川・松尾)<sup>[70]</sup>、(Coldren・Blumenthalら)<sup>[71]</sup>。

[63] T. Aoyama, K. Doi, H. Uchida, T. Hibiya, K. Matsumi and Y. Ohta, "A low cost compact optical isolator using a thick Gd: YIG film growing liquid phase epitaxy", *7th ECOC*, Section 8-2, Copenhagen, Sept. 1981.

[64] S.E. Miller, "Integrated optics: An introduction," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, p. 2059, Sept. 1969.

[65] K. Aiki, M. Nakamura and J. Umeda, "Frequency multiplexing light source with monolithically integrated distributed feedback diode lasers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 29, No. 8, pp. 506-508, Oct. 1976. Built-in Distributed Bragg Reflector", *Electron. Lett.*, vol. 19, no. 17, pp. 656-657, Aug. 1983.

[66] Y. Suematsu and S. Arai, "Integrated Optics Approach for Advanced Semiconductor Lasers," *Proc. IEEE*, Vol. 75, No. 11, pp. 1477-1487 (Nov. 1987).

[67] Y. Itaya, Y. Tohmori, M. Wada, and H. Hukao, "Spot-size converters integrated laser diodes," *OECC '97*.

[68] Y. Kawamura, E. Wakita, Y. Yoshikuni, Y. Itaya, and H. Asahi, "Monolithic integration of a DFB laser and MQW optical modulator in the 1.5 $\mu$ m wavelength range," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp. 915-918, June 1987.

[69] R.F. Leheny, R.E. Nahory, M.A. Pollack and E.D. Beebe, "In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As PIN-FET photo-receiver for 1.0-1.7  $\mu$ m wavelength fiber optic systems", *Tech. Dig. Integrated and Guided Wave Optics Meet. (Incline Village, NV)*, Paper WC4, Jan. 1980.

[70] T. Segawa, and S. Matsuo, *ITuC2*, PS 2010.

[71] S.C. Nicholes, M.L. Mašanović, B. Jevremović, E. Lively, L.A. Coldren, and D.J. Blumenthal, "640 Gbps 8  $\times$  8 InP monolithic tunable optical router," *Communication*, Aug. 2009.

が随所で用いられている。こうした状況の下で、PICs 開拓にはまだ幾つかの問題がある。その一つは、集積型の光アイソレータである。2000年に東工大で導波路型アイソレータが実現し【光非相回路の先導的研究 水本哲弥 2011 IEICE業績賞】、2005年には東大の中野義昭らは能動型の損失非対称光アイソレータを試作した。

1990年にSi基板上に構成されたシリカ光受動回路のSiO<sub>2</sub>/Si集積光回路がNTTの河内正夫により提案され、Si-PICsに発展している。1998年に横浜国大のBrent E. Littleと國分泰雄らは極めてコンパクトなSi/SiO<sub>2</sub>マイクロリング共振器を開拓した。

Si-PICsでは光を出すレーザが無く、その欠陥を埋めるためにSi基板やSiやSiO<sub>2</sub>導波路にレーザやInP材料を貼り付けるInP-Si-Hybrid-PICs開拓の試みがなされている。2007年にJohn E. Bowers (米)らはインターコネクトを目ざしてSi導波路上に、短波長帯のAlGaInAsレーザウエーハを貼り付けるAlGaInAs-Siの研究を行い、2012年に荒井滋久らはGaInAsPレーザウエーハを貼り付ける研究を行った。2014年にNTTの松尾慎治らは薄いInP薄膜をSi基板に貼り付けて、その上にレーザを作製する研究を行い<sup>[73]</sup>、2013年に上智大の下村和彦らは厚いInP膜をSiに貼り付けるなど、InP-Si Hybrid PICsの研究が活発に行われている。さらに、2014年にBowers(米)らはSi基板上に直接に1.3μm帯のQ-Dot

レーザを作製した温度特性の良いレーザを開拓している。InP-Si-Hybrid-PICsの発展が期待されている。

1979年には、I. UryとYariv (米)らはレーザとFETが一体集積された光送信集積回路を開拓し<sup>[74]</sup>、1980年にR.F. LehenyとR.E. Nahory(米)らはInGaAs-PIN光検出器とFETの一体集積を行った<sup>[69]</sup>。1985年に富士通の和田修らは受光素子と前置電子増幅器の一体集積回路を開発し<sup>[75]</sup>、光デバイスと電子デバイスの一体集積回路はOEIC(Opto-Electronic Integrated Circuits)と呼ばれている。

**a) フォトニック結晶と光集積回路** 1979年に東大で大高一雄(現千葉大)はフォトニック結晶を示唆し<sup>[76]</sup>、1987年にEli Yablonovitch(米)によりフォトニック結晶に於いて光デバイスの自然放出禁止帯があると指摘されて、フォトニック結晶への関心が高まった<sup>[77]</sup>。2012年にはNTTの松尾らは極低しきい値電流で動作するフォトニック結晶レーザの室温連続発振に初めて成功した<sup>[78]</sup>。Michal Bajcsy (米) (2003) などにより超低速光伝搬と光保存の研究も行われている。

**b) 積層光集積回路** 1981年に東工大の伊賀健一は、2次元アレーレンズと面発光レーザなどの積層集積光回路を提案した。これらはNECの内田禎二が提案したマイクロオプティックスの基礎ともなっている。

(後編は次号に掲載します。)

[72] R. Nagarajan, M. Kato, J. Pleumeekers, P. Evans, S. Corzine, S. Hurtt, A. Dentai, S. Murthy, M. Missey, R. Muthiah, R.A. Salvatore, C. Joyner, R. Schneider, Jr., M. Ziari, F. Kish, and D. Welch, "InP Photonic Integrated Circuits," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 16, no. 5, pp. 1113-1125, Sept./Oct. 2010.

[73] S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, et al, *ECOC 40 Anniv. Mo4 3 3*, 2014

[74] I. Ury, S. Margalit, M. Yust and A. Yariv, "Monolithic integration of an injection laser and a metal semiconductor field effect transistor", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, no. 7, pp. 430-431, Apr. 1979.

[75] O. Wada, H. Hamaguchi, S. Miura, M. Makiuchi, K. Nakai, H. Horimatsu, and T. Sakurai, "AlGaAs/GaAs p-i-n photodiode/preamplifier monolithic photoreceiver integrated on a semi-insulating GaAs substrate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, no. 10, pp. 981-983, May 1985.

[76] K. Ohtaka, "Energy band of photons and low-energy photon diffraction," *Phys. Rev. B*, vol. 19, pp. 5057-5067, May 1979.

[77] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2059-2062, May 1987.

[78] T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki, and T. Ikegami, "CW operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 1.5 μm wavelength region," *Electron. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 27-28, Jan. 1982.

## 平成28年度科学研究費助成事業公募要領等説明会を実施しました。

9月3日から9月14日にかけて、全国8会場で、「平成28年度科学研究費助成事業公募要領等説明会」を文部科学省と日本学術振興会が合同で実施しました。

本説明会には、のべ約3千人の方にご参加いただき、科学研究費助成事業の概要、平成28年度公募要領、研究費の不正使用、研究活動における不正行為の防止等について説明を行いました。

当日の資料については、下記のホームページをご覧ください。

[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/hojyo/1362010.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/1362010.htm)

## 学術調査官（科学研究費補助金担当）を任命しました。

8月1日付で、文部科学省の学術調査官（科学研究費補助金担当）27名のうち、15名を新たに改選、任命しました。科研費担当の学術調査官は大学等の現役の研究者により構成され、科研費の審査・評価、制度全般の改善、広報等に関する業務について、専門家の立場から幅広く関わっています。

●掲載ホームページアドレス

[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/hojyo/1284449.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/1284449.htm)

## 審査委員を表彰しました。

日本学術振興会の学術システム研究センターでは、科研費の審査結果の検証を行い、翌年度の審査委員の選考に適切に反映させています。

このたび、平成27年度の審査を行った第1段（書面）審査委員約5,500名の中から有意義な審査意見を付していただいた審査委員189名を選考し表彰しました。表彰については、本会のホームページ等を通じて公表するとともに賞状と記念品を贈呈しました。

●掲載ホームページアドレス

[https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/26\\_hyosho/index.html](https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/26_hyosho/index.html)

## 平成28年度ひらめき☆ときめきサイエンスの実施プログラムを募集します。

募集内容、応募手続きについては、募集要領をご覧ください。

●掲載ホームページアドレス

<http://www.jsps.go.jp/hirameki/boshu.html>

### 募集の概要

#### I. 事業の目的

- ・我が国の将来を担う児童・生徒を対象として、若者の科学的好奇心を刺激してひらめき、ときめく心の豊かさや知的創造性を育むこと
- ・科学研究費助成事業（以下、「科研費」という。）による研究について、その中に含まれる科学の興味深さや面白さを分かりやすく発信すること
- ・上記を踏まえ、学術の文化的価値及び社会的重要性を社会・国民に示し、学術の振興を図ること

#### II. 応募資格

これまでで、科研費の研究代表者として研究を実施したことがある研究者が所属している機関の長とします。

#### III. 募集するプログラム

以下の項目をすべて満たすプログラムを募集します。

- 1) 小学校5・6年生、中学生及び高校生のいずれかを対象とすること。
- 2) 科研費による研究に関わる基礎的な内容をより分かりやすく伝え、科学に興味を抱けるよう企画すること。
- 3) 機関の長を中心に組織的な取組として行われること。
- 4) 平成28年7月下旬～平成29年1月下旬に開催されること。





### 【科研費に関するお問い合わせ先】

文部科学省 研究振興局 学術研究助成課

〒100-8959 東京都千代田区霞が関3-2-2

TEL. 03-5253-4111 (代)

Webアドレス [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/hojyo/main5\\_a5.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/main5_a5.htm)

独立行政法人日本学術振興会 研究事業部 研究助成第一課、研究助成第二課

〒102-0083 東京都千代田区麹町5-3-1

TEL 03-3263-0964,4758,4764,0980,4796,4326,4388 (科学研究費)

03-3263-4926,1699,4920 (研究成果公開促進費)

Webアドレス <http://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/index.html>

※科研費 NEWS に関するお問い合わせは日本学術振興会研究事業部企画調査課 (03-3263-1738) まで