

Treasure Microbox of Optoelectronics II

# 光エレクトロニクスの 玉手箱 II

伊賀健一・波多腰玄一

試し読み



Advanced Communication Media  
アドコム・メディア株式会社

# 光エレクトロニクスの玉手箱 II

## 目 次

まえがき		2. 980 nm 波長帯面発光レーザー	33
		3. 1100–1200 nm 波長帯 InGaAs/GaAs 面発光レーザー	33
第 18 章 面発光レーザーの登場 (その 1)	1	4. 1300 nm 波長帯面発光レーザー	35
1. 面発光レーザーの出現	1	5. 1550 nm 波長帯面発光レーザー	36
2. 面発光レーザーの特徴と種類	3	6. 他の材料系による長波長帯面発光レーザー	37
3. 面発光レーザーの発振条件と動作	4	7. 400～600 nm 波長帯面発光レーザー	38
4. 面発光レーザーにおけるキャリアと光の閉じ込め	10	8. フォトニック結晶面発光レーザー	42
5. 面発光レーザーのモードとビーム	11	9. 第 2 高調波発生を利用する面発光レーザー	43
6. 面発光レーザーの熱的特性	11	10. むすび	44
7. 面発光レーザーの偏波特性	13	コラム A: AlAs 酸化層とは?	34
8. 面発光レーザーの変調特性	13	コラム B: 可視光とは?	39
9. むすび	14		
コラム A: どうやって面発光レーザーが?	2	第 21 章 面発光レーザーの登場 (その 4)	47
コラム B: 面発光レーザーの由来	3	1. 面発光レーザーの偏波	47
コラム C: 整合利得構造	6	2. 傾斜基板を用いる面発光レーザーの偏波面制御	48
コラム D: 面発光レーザーの研究でのブレークスルー	7	3. 面発光レーザーの 2 次元アレイ	52
第 19 章 面発光レーザーの登場 (その 2)	16	4. 波長掃引機構の集積	55
1. 1980 年後半からの飛躍	16	5. 2 次元アレイとタルボ共振器	56
2. 初期の 850 nm 波長帯面発光レーザー	18	6. 外部共振器とモードロック	57
3. 850 nm 帯面発光レーザーの実用化	24	7. 近接場光生成への応用	58
4. 780 nm 波長帯面発光レーザー	25	8. 微小共振器と自然放出制御	59
5. 650 nm 波長帯面発光レーザー	26	9. 微小共振器とカシミール効果	62
6. むすび	30	10. 電子デバイスとの集積	63
コラム A: GaAlAs の屈折率とバンドギャップ	17	11. モジュール技術と応用システム	63
コラム B: $\lambda$ 共振器	21	12. 極限特性	65
コラム C: 面発光レーザーとナノテクノロジー	25	13. むすび	66
第 20 章 面発光レーザーの登場 (その 3)	32	コラム A: 近接場の光子とは	59
1. 面発光レーザーは破壊的技術か?	32	コラム B: カシミール力は引力か斥力か?	64
		コラム C: 半導体レーザー用の基板はなぜ n 型か?	68
		コラム D: 結局, 面発光レーザーとは?	68

## まえがき

本書は、アドコム・メディア社から出版されている O plus E 誌における連載「光エレクトロニクスの玉手箱」を書籍化した第II巻である。その連載は2013年3月から始まり、2018年11月現在、65章に至った。本書第I巻は、その第0章から第17章までをまとめて2018年6月13日に単行本として出版し好評を得た。

第II巻では、面発光レーザー (VCSEL)、発光ダイオード (LED)、周期構造における光の振る舞い、量子井戸、光ファイバーを主な内容としている。いずれも、光エレクトロニクスにおける重要な課題であり、それらの基礎から考え直してみたものである。

本書では、筆者等がこれまで研究してきた内容が多く含まれているので、それぞれに書いてきた書物や論文が元になっていることが多い。ただ、これまでの著作では、専門分野における研究論文がほとんどであるため、連載のために記述や図面を書き直す必要があり、逆に苦労したことも多々あった。

また、「コラム」を設けて、本文では取まらない内容を気楽に入れてみる試みを行った。このことが、読者に気楽な読み物としての潤いを醸し出すことになった。

第I巻をお読み頂いた方々から、その内容に論理性がないのではとのご指摘を頂いた。毎号の計画は直前に議論して決め、横道に逸れたりもしたので、ご尤もである。ただ、全巻を通して見ると、ほとんどの光エレクトロニクス分野はカバーできたのではないかと思う。そのため、全巻の目次を併せて本巻末に掲載した。これから2019年にかけて、第III巻、第IV巻の上梓を計画しているので、併せてご期待願いたい。

読者としては、光エレクトロニクス、光学、電子工学等の研究者、教職員の方々、学生諸君など、広きに渡っている。第I巻を見ていただいた文系出身の研究室の秘書さんから、式は分からないけれど内容は面白いとのコメントをもらった。特に、これから新しく光エレクトロニクスの分野に入ってくる人々への教科書、参考書として、第I巻と共にお役に立てば幸いである。

伊 賀 健 一

波 多 腰 玄 一

2018年11月吉日

本書では紹介できなかった「カラーの図表や動画」などを下記の web にてご紹介しています。

<http://www.adcom-media.co.jp/opluse/tmo/>

# 光エレクトロニクスの玉手箱

Treasure Microbox of Optoelectronics  
Kenichi Iga, Genichi Hatakoshi

伊賀 健一  
波多腰 玄一

## 第 18 章 面発光レーザーの登場（その 1）

**Q（編集子）：**面発光レーザーが登場しました。

**A（波多腰）：**伊賀先生が発案したレーザーです。

**A（伊賀）：**そうですね。考えたときは苦し紛れでした。

**Q（編集子）：**一言でいうと、面発光レーザーとは？

**A（波多腰）：**半導体レーザーの一つで、1977年に伊賀先生によって発案されました。半導体基板に対して垂直に光が共振し、表面から光が出るので名付けられました。共振器長が波長と同じ程度の大きさにできるので、単一波長動作が可能です。

**A（伊賀）：**横方向の大きさを数  $\mu\text{m}$  にすればレーザー発振に必要なしきい値電流が  $1\text{mA}$  以下と通常の半導体レーザーの 1 桁から 2 桁ほど小さくできるので、消費電力の低減が可能です。また、2次元アレイ状の特徴を活かした並列処理を可能にします。

**Q（編集子）：**なるほど。

本章では、半導体レーザーの一つである面発光レーザーの基礎、特徴、特性などについて紹介する。面発光レーザーでは、利得を得る活性層の厚みが小さいので、発振に必要な条件が厳しくなる。発振条件そのものは通常のレーザーと変わらないが、反射鏡の設計がより重要となる。

### 1. 面発光レーザーの出現

#### (1) 面発光レーザーの始まり

光ネットワークや光メモリなど光エレクトロニクス発展に関し、光デバイス研究が常にそのフロンティア開拓

を担ってきた。

さらに、情報基盤整備に光ファイバー網を始め大規模光エレクトロニクス技術に大きな期待が寄せられていた。つまり、画像などの大量の情報を瞬時に伝送/処理する技術、空間並列的に情報を送る超並列光伝送システム、データの光による連携を行うデータネットワーク、複数のコンピューターや LSI チップ間を結ぶ並列光インターコネクト、さらには光並列情報処理システムなどがあげられる。光の並列性を十分に活かしたシステムの実現には、大規模な 2次元集積化ができる並列光デバイスが重要で、半導体基板と垂直方向にレーザー共振器を構成し、光を垂直に射出する面発光レーザー (surface emitting (SE) laser または vertical cavity SE laser (VCSEL)) が筆者の一人 (伊賀) により 1977 年に提案され<sup>1)</sup>、現在も世界中の研究機関で精力的に研究開発されている<sup>2)</sup>。特に Gbit/s 以上の高速 LAN 用の光源あるいはコンピューター間を光で結ぶ光インターコネクトへの応用が注目され、mA より小さいしきい値をもつ素子

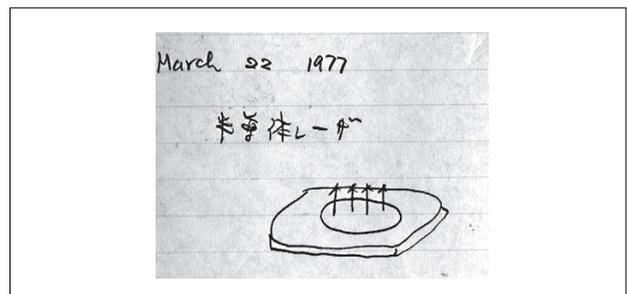


図 1 面発光レーザーのアイデアスケッチ<sup>1)</sup>



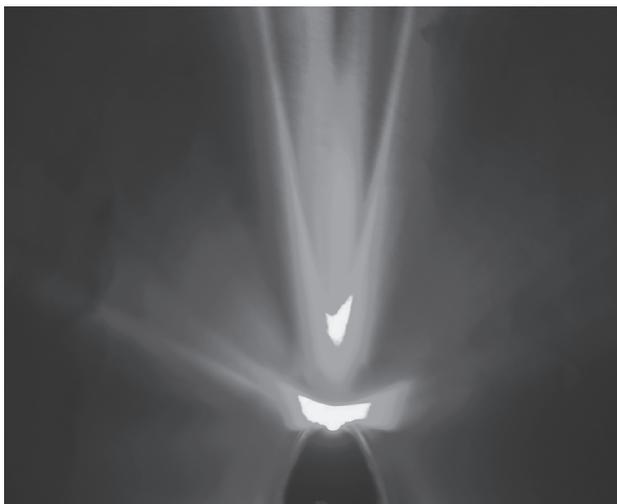


図1 青色LEDからの光 (撮影:伊賀健一)

効率の青色発光ダイオードの発明に与えられており、高輝度・低消費電力の白色光源を可能としたものとの限定が付いている。LED全般に対する賞ではなく、また初期の研究および他色や赤外域LEDの技術的発見や発明などは含まれていないようだ。このように賞のクレームを見ると、何故この3人を選んだかが推測できるであ

ろう。

多くの祝辞が各学会でも寄せられている<sup>1)</sup>。あとで、この授賞の背景を知るため、LEDの研究歴史を振り返ってみる。

## 2. なぜ青色か？

では、何故青色LEDとその研究に注目が集まったのかについて考えてみよう。

まず第1は、青色が是非欲しい領域がある。信号機やディスプレイである。それが実現できたのだが、駅伝でもテープを切った最後の走者は胴上げされる。というのは、今まで存在しなかった最後の可視半導体発光源であるからだ。

人間の眼は、ほぼ波長400–800nmの1オクターブしか見えないように神様が作っている。ISOなどの標準用語で光(light)と言えは可視の電磁波を言い、その他は電磁放射と呼ぶ(第20章, コラムB)。紫外光、赤外光とは一般に呼ばれてはいるが。

これまで、1962年に赤色、1968年に緑色、その他黄色、橙色、赤外などのLEDや半導体レーザーが発表

## コラム A

### このノーベル賞、ここがすごい

**Q (編集子) :** ノーベル賞を受賞した3人の研究はどこがすごいのでしょうか？



**A (伊賀) :** 赤崎勇教授による青色発光という目の付け所でしょう。ご本人が、whatが大事と言っておられます。

ただ、その前にGaAs系やInGaAsP系LEDにおける結晶成長、半導体物理の根本理解が基礎にあったことが重要ですね<sup>2),3)</sup>。p型半導体ができないという自己補償効果の学説に惑わされることなく、結晶性改善が本筋と喝破されていました。

それでもなかなかうまく行かなかったのに、諦めなかったところがすごいです。天野浩教授による低温バッファ層の発見は装置の故障がきっかけで偶然に発見されたようですが<sup>4)</sup>、ブレイクスルーは偶然に起こることも多いです。例えば、身近なところで申し上げますと、ノーベル賞の白川英樹教授による導電性ポリマー

の発見、加藤與五郎・武井武教授のソフトフェライトの発見などがあります。『時に神は味方してくれる』のだと思います<sup>5)</sup>。ただし、辛抱が肝心で、漫然と待っていても女神はほほえんでくれません。

企業は経営問題からプロジェクトをやめてしまうことがあります。RCAの場合は1974年にプロジェクトをやめてしまい研究者も方々の大学へ移ってしまいました。そして、伝統あるRCA研究所もつぶれてしまいました。ブラウン管から半導体への時の流れ、通信とコンピュータへのシフトが底流でしょう。

折しも、ベトナム戦争が米の経済に影響を落としました。松下電器もMIS型青色LEDの発売を断念しました<sup>3)</sup>。赤崎教授のグループは、周囲がやめても大学で研究を継続されました。名古屋大学という国立大学のシステムが息の長い研究を可能にしました。日本の国立大学のや

り方に批判はありますが、これがなかったら、RCAと同じことになっていただろう。アメリカでは、成果がすぐでないと研究は継続できなかったのでしょうか。

中村修二教授による結晶成長法の抜本的改善(2フロー法の発明による)は、急速に明るいLEDの企業化に成功しました。これは驚くべき速さです。腕の良さは天才的です。会社トップの理解を取り付け、かつ日本的なしがらみを気にせず研究に集中しました。青色LEDとBD用の青紫色半導体レーザーの実用化と普及を少なくとも10年は早めました。私が委員長をしていた科学技術庁の将来動向調査(1995年)の電子工学部門でも、青色半導体レーザーは当分の間(10年くらい)はできないと言う結果でしたから。

# 光エレクトロニクスの玉手箱

Treasure Microbox of Optoelectronics  
Kenichi Iga, Genichi Hatakoshi

伊賀 健一  
波多腰 玄一

## 第 28 章 井の中の電子 (その 1)

**Q (編集子):** これまでにも、半導体レーザーや LED の章で、量子井戸という言葉が頻繁にでてきましたが。

**A (伊賀):** そこに深く立ち入ると、なかなか先に進まないの、そういうものと仮定して通過してきました。決して見過ごしたわけではありません。

**A (波多腰):** 逆に言うと、水素原子のように電子があるエネルギーポテンシャルに閉じ込められた場合からスタートしたので、量子井戸に閉じ込められた電子のエネルギー固有値は考えやすいと思っていました。バルクの半導体は境界がなく、電子の固有状態を平面波で表現するのが普通なので茫洋としています。

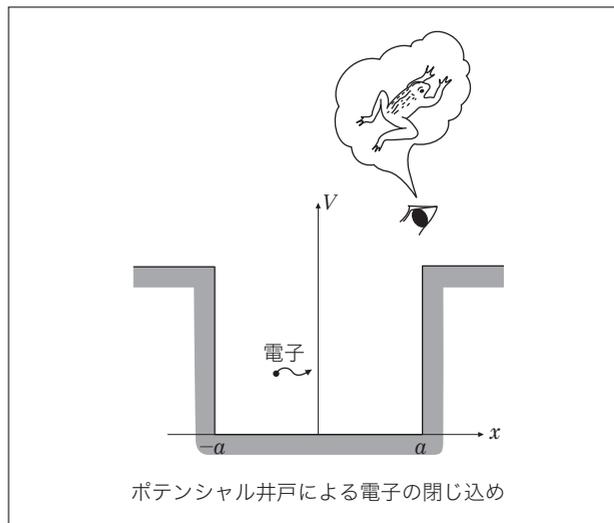
**C (編集子):** そういうものなんですか？ 素朴な質問ですが、この場合の「井戸」とはなんですか？

**A (波多腰):** 地面を深く掘ると水が出て来てたまります。それを well (井戸) と呼びます。単に「井」という場合もあります。半導体レーザーの世界でも小さい空間に電子を貯める構造を井戸という言葉で代用しています。

**A (伊賀):** 章の題目を「井の中の電子」としてみました。「井の中の蛙、大海を知らず」のパロディーです。図 1 がそのイメージです。

**C (波多腰):** ところが、現在の半導体光デバイスでは量子井戸無しでは考えられないほど色々な方面で使われています。

**A (伊賀):** 先のことわざに、いくつかの造語もあります。「…されど天の高さを知る」というのも。閉じこもっては



ポテンシャル井戸による電子の閉じ込め

図 1 井の中の電子<sup>1)</sup>

(伊賀健一, 武者利光: パソコン・グラフィクス・エレクトロニクス, オーム社 (1984))

いますが、どのくらい井戸の外で使われているかを電子はお見通しかもしれません。電子の章でも述べたように、電子にはこの世 (今の空間 3 次元 + 時間次元の世界) のものとは思えない想像しがたい振る舞いをするものもありますので。

本章では、半導体における量子構造、つまり、電子のド・ブロイ (de Broglie) 波長程度に小さい薄膜、細線、

- |            |                          |                   |                         |
|------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| 光子         | 59, 120, 196             | 自己位相変調効果          | 277                     |
| 光子エネルギー    | 17, 74, 129              | 子午光線              | 247                     |
| 光子寿命       | 4                        | 自然超格子             | 105, 180                |
| 格子振動       | 75                       | 自然放出              | 9, 59, 22               |
| 光子相関       | 196                      | 自然放出光係数           | 9, 59                   |
| 格子定数       | 17, 38                   | 自然放出再結合           | 5, 22, 184              |
| 格子不整合      | 40, 49, 180              | 自然放出遷移確率          | 62                      |
| 光子密度       | 60, 110                  | 室温連続発振            | 3, 18, 38, 42, 207, 263 |
| 高次モード      | 217, 256                 | 実効屈折率             | 9, 145, 226             |
| 光線         | 243                      | 実効格子定数            | 40                      |
| 光線方程式      | 243, 258                 | 自発分極              | 93, 185                 |
| 光束         | 39, 84                   | シミュレーテッド・アニーリング   | 162                     |
| 構造分散       | 229                      | 弱導波近似             | 214                     |
| 高調波発生      | 277                      | 周期ポテンシャル          | 75, 176, 190            |
| 国際光年       | 89, 101                  | 自由キャリア            | 5, 111, 145             |
| 黒体放射       | 62, 76, 105              | 収束円筒波             | 167                     |
| 固体照明       | 72                       | 収束光アレイ            | 161                     |
| コヒーレンス     | 11, 196                  | 集束定数              | 247                     |
| コヒーレント光    | 195, 280                 | 自由スペクトル領域幅        | 11, 130                 |
| 固有エネルギー    | 181                      | 自由電子              | 75, 236                 |
| コンタクト層     | 27, 35, 76               | 樹脂モールド            | 85                      |
| <b>さ 行</b> |                          |                   |                         |
| サイドモード抑圧比  | 13                       | 周波数掃引法            | 270                     |
| 再結合        | 5, 60, 76, 110, 184, 197 | 周波数多重方式 (→波長多重)   | 283                     |
| 再結合寿命      | 5, 60, 80, 98, 184       | 主波長               | 103                     |
| 最高発振温度     | 28                       | 主モード表示            | 218                     |
| 最小作用の原理    | 258                      | シュレーディンガー方程式      | 181, 198                |
| 材料分散       | 229, 278                 | 消衰係数              | 88, 237                 |
| サニャック効果    | 284                      | 状態密度 (電子)         | 49, 178, 191            |
| サファイア      | 40, 74, 93               | 状態密度 (光)          | 61                      |
| サブバンド      | 199                      | 障壁層               | 35, 181                 |
| 3準位系       | 200, 239                 | ショックレー-リード-ホール再結合 | 5, 60, 80, 110, 184     |
| 散乱損失       | 33, 232                  | ショットキーダイオード       | 73                      |
| ジオデシックレンズ  | 245                      | シリカ光ファイバー         | 232, 263                |
| 磁界・電界センサー  | 284                      | シングルヘテロ接合         | 76, 93                  |
| 視感効率       | 76, 100                  | 振動子強度             | 237                     |
| しきい値       | 3, 28, 33, 59, 183       | シンプレックス法          | 162                     |
| しきい値電流密度   | 3, 28, 60, 184           | 水蒸気酸化             | 33                      |
| しきい値利得     | 139                      | 垂直共振器             | 40                      |
| 色度         | 101, 104                 | 垂直共振器面発光レーザー      | 3, 24, 126              |
| 色度図        | 101, 105                 | スキュー光線            | 247                     |
| 刺激純度       | 104                      | ステップインデックス型       | 210, 261                |
|            |                          | ストークス光            | 280                     |

## あ と が き

連載「光エレクトロニクスの玉手箱」は、2013年3月から始まり、2018年11月には第65章に至った。第I巻でも述べたとおり、玉手箱は、O plus E誌にそれまで掲載されてきた2つの連載、「光の鉛筆」と「波動光学の風景」を参考にさせていただき、趣の異なる内容とタイトルにしようと考えたものであった。

“玉手箱”は、何が出てくるかわからないという魅力がある反面、本としての構成に論理性が薄いところご指摘も受けながら、概して好意的な読書評も頂戴した。

第II巻では、前巻で紹介した半導体レーザーについての知見を元に、面発光レーザーを登場させた。O plus E誌の掲載は2014年であったが、それから4年が経過し、思わぬ展開を見せ始めたデバイスである。すなわち、イーサネットの400 Gbit/s高速版への標準化、レーザープリンターへの搭載拡大と高速印刷機の置き換え、波長掃引型VCSELを用いるOCTなどの光センサーやガス検出、そして、スマートフォンにおける顔認識システムなど、産業規模の拡大が目立ってきた。これらのことは、本文では収まり切れない発展であった。

発光ダイオード(LED)でも同様に、大きな出来事があった。2014年秋に、青色発光ダイオードの研究にノーベル物理学賞が授与されたのである。それと呼応して、照明にLED電球が普及しはじめ、産業規模が世界的となった。本文では、意外に理解されていないLEDの基礎について詳しく掘り下げた。

それから、色々な光デバイスや半導体レーザーに使われる周期構造を取り上げた。周期構造に光が入ると、回折、ブラッグ反射、分布帰還共振器、光導波路レンズなどの機能が発揮され、興味ある話題が豊富にあることがわかった。

量子井戸では、電子が量子井戸の中に閉じ込められて、特異の性質を醸し出す。もちろん、ほとんどの半導体レーザーは量子井戸無くしては語れないので、できる限りの紹介に努めた。

最後は光ファイバーで、全世界に張り巡らされた光ファイバー長は $10^{15}$  mに達すると言われる。今や、インターネット、スマートフォン、データセンターなどの情報流通は光ファイバーを通っているのは驚くべきことである。しかも、色々な光ファイバーが登場して、今も光エレクトロニクス研究の主役の座を明け渡していない。

玉手箱の連載は、伊賀健一と波多腰玄一の共著で書かれている。お互いの持ち味がまったく異なっていて、1+1が2ではなく3以上になったのではないかと思う。そのためか、途中で脱線したり、迷い道に入り込んだことも度々であった。本文とは別に記した「コラム」も、色々な方にもご登場いただいて、興味ある横道にご案内できたのではないだろうか。

また、この連載のきっかけは、元東芝・東海大の後藤顕也さんのご助言によるところが大きい。また、応用物理学会／微小光学研究会メンバーにも多くの示唆を頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

伊 賀 健 一  
波 多 腰 玄 一  
2018年11月吉日

## 著者紹介

### 伊賀 健一 (いが けんいち), Kenichi Iga



1959年広島大学附属高等学校卒業。1963年東京工業大学理工学部卒業、1968年同大学院博士課程修了(工学博士)。同年より、東工大精密工学研究所に助手として勤務、1974年助教授、1984年教授に就任。面発光レーザー、微小光学の研究に従事。1979-1980年ベル研究所客員MTS。2001年東工大名誉教授。2001-2007年日本学術振興会理事、2007-2012年東工大・学長。

応用物理学学会フェロー/微小光学研究会代表。電子情報通信学会名誉員・フェロー・会長(2002年度)。レーザー学会フェロー。紫綬褒章、東レ科学賞、市村学術賞(功績賞)、朝日賞、藤原賞、C & C賞など受賞多数。2013年フランクリン賞(ゴールドメダル・パワー賞)、2018年瑞宝重光章。

趣味はコントラバス演奏(町田フィルハーモニー交響楽団所属、町田フィル・バロック合奏団主宰)、2001年から波多腰玄一氏(ピアノ)と“Duo 21”で演奏。

### 波多腰 玄一 (はたこし げんいち), Genichi Hatakoshi



1968年長野県松本深志高等学校卒業。1974年東京大学工学部卒業。1980年同大学院博士課程修了(工学博士)。同年より、東京芝浦電気(株)総合研究所(現・株)東芝研究開発センター)勤務。光デバイス、光半導体デバイスの研究開発に従事。2003年から2014年まで、東芝リサーチ・コンサルティング(株)フェロー。2006-2009年の間、科学技術振興機構研究開発戦略センターフェロー。2015年より早稲田大学非常勤講師。

日本学術振興会光電相互変換第125委員会名誉委員。ISO/TC172/SC9国内対策部会会長。応用物理学学会フェロー/微小光学研究会・運営副委員長。応用物理学学会光学論文賞、大河内記念技術賞、文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)、日本学術振興会・光電相互変換第125委員会功労賞など受賞。志音会オーケストラ所属(ヴァイオリン)。2001年から、ピアノで伊賀健一氏(コントラバス)と“Duo 21”で演奏。

## 光エレクトロニクスの玉手箱 II

## Treasure Microbox of Optoelectronics II

2020年4月25日初版発行

著者	伊賀 健一 波多腰 玄一
発行者	喜多野乃子
発行所	アドコム・メディア株式会社 〒169-0073 東京都新宿区百人町2-21-27 電話 (03)3367-0571(代)

Advanced Communication Media Co. Ltd., Tokyo, Japan, 2020

ISBN 978-4-910636-27-6 C 3042 ¥5200E

© Kenichi Iga, Genichi Hatakoshi 2020

印刷/製本 樹ブックフロント

Printed in Japan

・本書に掲載する著作物の複製権・翻訳権・上映権・譲渡権・公衆送信権(送信可能化権を含む)はアドコム・メディア(株)が保有します。

・**JCOPY** < 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, E-mail info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。