

Treasure Microbox of Optoelectronics I

光エレクトロニクスの 玉手箱 I

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 I

目 次

まえがき

著者対談：連載の目指すところ	1
第1章 光エレクトロニクスと元素	5
1. はじめに	5
2. 原子半径と格子定数	6
3. 結晶構造とバンド構造	9
4. 凝集エネルギー	12
5. 金属	13
6. 希土類	14
7. レーザーに使われる元素	15
8. 光エレクトロニクスの周期表	16
第2章 電子とは何者？（その1）	17
1. 電子とは	17
2. 電流と磁界	18
3. 電子は波のようでもある	19
4. 原子に捕まった電子	19
5. 波束とその広がり	23
6. むすび	29
第3章 電子とは何者？（その2）	31
1. シュレーディンガーの粒子型方程式	31
2. 不確定性原理	37
3. 電子はフェルミ粒子	38
4. 電気と熱の伝導	40
5. 電子は蓄えられる	42
6. むすび	44
第4章 光はどこから？（その1）	45
1. 光の生まれは？	45
2. 光の生まれる仕組み	47
3. 双極子からの光放射	49
4. 光と双極子の関わり	52
5. 電子が光を放射・吸収しない場合	55

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」を書籍化したものである。この連載は 2013 年 3 月から始まり、本書第 I 巻はその第 0 章から第 17 章までをまずまとめたものである。

本連載は光エレクトロニクスにおけるいろいろな分野についてやさしく解説することを目的として企画された。ところが始めてみると、各デバイスや材料等に基本的に見直す事柄が多くあることに気がついた。書き進んでいくうちに 1 つの章を予定していた内容が 3 章分に増え、当初は 1 年くらいで終わる予定であったが、2018 年 6 月現在、62 章になってしまった。

内容としては、電子、光、光導波路、レーザー、半導体レーザー、などにわたる原理や材料、デバイスなどについての原理や動作の面白さについて紹介してきた。幸い、読者の皆様からご好評を持って読んで戴き、ここで書籍として纏めることとした。

本書の内容としては、著者らが別々に書いてきた書物や論文が元になっているものの、書き始めるとこれまでの著作では読書によく伝わらないこともあるということがわかってきた。そこでお互いに工夫をこらし、これまでの教科書や論文にない表出が生まれた。見過ごしてきた基本的な原理、数式や図の表現が必要になったことがわかり、3 倍以上に内容が増えた章もあった。

また、「コラム」欄を設け、本文ではどうしても取まらない内容を入れてみる試みを行った。このことが、概して読者に気楽な読み物としての潤いを醸し出したとすれば幸いである。

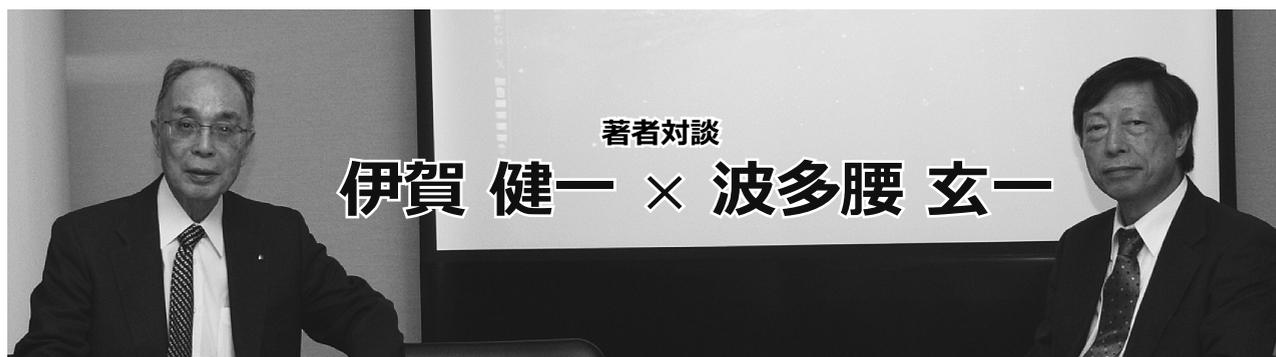
読者は、光エレクトロニクス、光学、電子工学等の研究者、教職員、学生諸君など、広きに渡っている。特に、これから新しく光エレクトロニクスの分野に入ってくる人々への教科書、参考書としてお役に立つものと信ずる。

伊 賀 健 一
波 多 腰 玄 一
2018 年 5 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」 連載の目指すところ



著者対談

伊賀 健一 × 波多腰 玄一

■伊賀 健一 (Iga Kenichi)

1963年東京工業大学工学部卒業、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勤務、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。2001年から東工大名誉教授。2001-2007年日本学術振興会理事、2007-2012年東工大・学長。応用物理学会/日本光学会/微小光学研究グループ・代表。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)、2001年から波多腰玄一氏(ピアノ)と“Duo21”で活動。

■波多腰 玄一 (Hatakoshi Genichi)

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、東京芝浦電気株式会社総合研究所(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年から東芝リサーチ・コンサルティング株式会社フェロー。2006-2009年科学技術振興機構研究開発戦略センターフェロー。1997年から日本学術振興会光電相互変換第125委員会幹事。ISO/TC172/SC9国内対策委員会委員長。応用物理学会/日本光学会/微小光学研究グループ・運営副委員長。2001年から伊賀健一氏(コントラバス)と“Duo21”で活動。

■編集子：この講座の目指すところはどこにあるのでしょうか？

■伊賀・波多腰：およそ次のように考えています。

- ・光と電子の原点を探って多くの人々がその性質を知る
- ・そこに意外性が発見できれば新しい展開に役立つかも
- ・光で世界中が住みよい環境を作る

■編集子：本誌は光エレクトロニクスの専門誌なのですが、あらためて光エレクトロニクスについてのお考えをお聞かせいただけませんか？

■伊賀：この分野は主に1960年にセオードル・メイマン(Theodore Maiman)が初めて実現したレーザーや、同じころ出現したLEDなどとともに発展してきた学術、技術、産業分野です。私たち2人は、応用物理学会・日本光学会・微小光学研究グループに属しています。2012年12月に開かれた第126回の研究会で、元素を見直すという特集を組みました。そこで、元素表を微小光学の目から見てみようということになり、著者の一人である波多腰玄一が中心となり、グループのメンバーが意見を出し合ってまとめ、アドコム・メディア社が

デザインしたのが、O plus E誌2013年3月号付録の「光エレクトロニクスの周期表」¹⁾です(図1)。

■波多腰：そこで気がついたのは、ほとんどの元素が光エレクトロニクスに使われているという事実でした。同グループおよび親学会である応用物理学会のお許しを得て、本連載の1回目に元素を取り上げ、研究会資料を基に解説を加えて登場させました。とまかく光エレクトロニクスは、学問的にはマクスウェルの方程式に基づく「光」、シュレーディンガーの方程式に基づく「電子」が主役となってそれらの相互作用をもとに、材料、デバイス、システムなど、非常に多岐にわたっています。

■伊賀：将来の発展のためには単なる応用事例の紹介ではなく、いつも原理と基礎に立ち返って考える必要があると考えてこの連載を始めることにしました。

3つの学術を総合的にとらえる

■編集子：ところで「光と電子の原点に戻る」とは？

■伊賀：ちょっと長くなりますが、原点、基礎と言うと、物理学や化学などのいわゆる基礎科学があり「発見・理

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4章 光はどこから？（その1）

前章の電子に引き続き、第4章も編集子に光子へのインタビューを行ってまいります。

編集子：次は“みつこ”さんですね？

光子：いえ、光子（こうし）と申します。

編集子：あなたも落ち着きのない方そうですね。

光子：はい、もともとじっとしてられない波なのです。

編集子：走るのがとても速いそうで？

光子：はい、私より速いものは世の中にはないんです。ただ最近、私より速いものが発見されたいです。

編集子：それは？

光子：はい、それは“のぞみ”だそうで。

編集子：波なので、大きさとか重さはないのでしょうか？

光子：はい、ありません。ただ、皆さんがご存じの海の波と違って、エネルギーの粒だということが分かってきました。

編集子：ところで、あなたは裁判にかけられたそうですが、何か悪いことでもしたのですか？

光子：いえ、別に私が悪いわけではなく、2つドアがあって入って来たのですが、どちらのドアから入って来たのか裁判で問い詰められて…。これについては、朝永振一郎という物理学者の方が戯曲を書いていて、芝居にもなっています。

編集子：それは大変でしたね。でも、波であって粒だと仰る。あなたもよく分からない方ですね。でも、すごい素質がありそうですね！

1. 光の生まれは？

われわれは地球に住んでいて、光の恩恵を受けている（**図1**）。それでは、光はどこから来るのだろう。光がやってくるのは88の星座に2000-4000億個もある恒星からで、太陽もその1つであり、



図1 宇宙，太陽，地球

50億年前に生まれた。惑星は自分では光らない。地球でも、太陽の日差しがある昼間は直接太陽光が届くが、裏側に回った夜間は暗闇で、わずかな月の光と星明かりである。夜空の色は何色か？ この問題が米国光学会（OSA）で出されたそうで、国際会議のディナーの際に話題になった。

では、太陽の光はどうやって生まれるのだろうか。それは、太陽の内部における主として核融合の際に余ったエネルギーが γ 線となり、X線や可視光などに変えられる。長い年月を経て太陽の表面に達し宇宙空間へと放出され地球にも届く。この余ったエネルギーの源は核力と呼ばれる核子（陽子や中性子）を結びつける相互作用で、クーロン力より距離が近ければ非常に強いものとなる。その源は、湯川秀樹博士の予言した中間子の交換によるという。太陽は主に水素（H）とヘリウム（He）からで

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9章 半導体が光る (その1)

Q (編集子)：電子，光の基本的性質についてこれまで見てきましたが，いよいよ半導体ですね。

A (伊賀)：シリコンやガリウム・ヒ素などの半導体は，見たところ鉱物のようで，とても光が出るとは思えないのですがね。

Q (編集子)：そう言われてみれば，炭だって黒いのに火を付けると赤く光ります。

A (波多腰)：炭が燃えるのと半導体が光るのとは原理が異なりますが，そこから光が出てくるという点では同じです。赤く見えるのは可視光が出ているからです。半導体にも赤い光を出すものがあります。

Q (編集子)：半導体は普通の固体とどこが違うのでしょうか？

A (伊賀)：ものは原子からできています。そこに捕まっている電子が，電池と同じ 1.5 V 位のエネルギーを与えると動き出せるかどうかが決めます。半導体では，原子の束縛から離れて動けるということから始まります。

A (波多腰)：そのために，まず半導体のエネルギーバンド構造の理解が必要となります。

本章では，半導体の中の電子の振る舞い，半導体にエネルギーのバンド構造ができるわけ，電子とホール，などについて見ていく。

1. エネルギーバンド

(1) 半導体におけるエネルギーバンド

最初に，半導体を構成している原子に束縛されている電子のエネルギー準位になぜバンドができるかを見てみよう。Si や Ge などのIV族あるいは GaAs や InP などのIII-V族では，構成元素の最外殻電子が隣り合う原子に共有された，いわゆる共有結合により結晶が構成される。この最外殻電子の軌道は s 軌道および p 軌道である。孤立原子における ns および np (n は主量子数で，1, 2, 3, ...) のエネルギー準位を図 1 に示す。s 軌道は

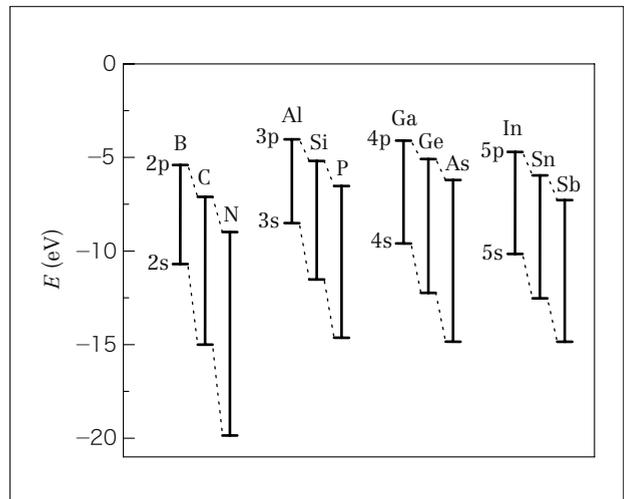


図 1 III族，IV族，V族元素の最外殻電子のエネルギー準位

コラム C

pn 接合はなぜ必要か?



Q (伊賀) : ところで、波多腰さん、何故 pn 接合が必要なのでしょう?



A (波多腰) : 改めてそう言われても困ります。大学の先生なら、これはどうしてもそうなんだ、と言うかもしれませんね。

Q (伊賀) : もう少しなんとか! 電子とホールを注入すれば良いのですから。

A (波多腰) : それでは、このように説明しましょうか。

- 1) まず電流が流れるためには、動くことのできる電子またはホールがないといけませんので、n 型半導体または p 型半導体が必要です。
- 2) n 型または p 型のどちらかだけでも電流は流れるのですが、例えば n 型半導体だと、上の準位 (伝導帯) に電子はいるのですが、下の準位 (価電子帯) が既に電子で一杯になっているため、上の電子が遷移する先がありません。逆に p 型半導体だと、下の準位は空きがありますが、伝導帯に電子がないため、やはり遷移は起こりません。
- 3) そこで、上の準位に電子がいる n 型半導体と、下の準位に空きがある p

型半導体を接合してやります。そうすると、接合部では、上に電子がいて下に空きがあるという状況を作り出すことができます。この領域で遷移あるいは準位間で波動関数の干渉が起こり、光が出てくる訳です。

電位の傾きで電子あるいはホールが流れているだけではだめで、水力発電のように、落差のある場所が必要なのです。それが pn 接合部です。

という説明ではいかがでしょうか。

A (伊賀) : なるほど、これなら分かりやすいですね。

ところで、不純物を半導体にいれることと pn 接合は誰が発明したのでしょうか?

C (波多腰) : pn 接合は 1939 年に、米国 Bell 研究所のラッセル・オル (Russell Shoemaker Ohl) による発明ということになっているそうです。pn 接合ではなく、金属と鉱石 (半導体) の接合 (MS 接合) で整流作用が起こることは 1870 年代から知られていて、この整流作用を説明する理論を作ったのがショットキー (Walter Schottky) です。これから金属と半導体の接合がショットキー接合と呼ばれるようになりました。オルの発明の前年 (1938 年)

のことです。

オルの発明に関心を持ったのがブラッテン (Walter Houser Brattain) で、これが 1948 年のトランジスターの発明に繋がったようです。ブラッテンはバーディーン (John Bardeen) との連名で特許を出しましたが、最初の特許 (点接触型トランジスター) にはチームリーダーのショックレー (William Bradford Shockley) の名前がなく、ショックレーは別の構造の接合型トランジスターの特許を単独で 9 日遅れで出願したそうです¹⁵⁾。ショックレー、バーディーン、ブラッテンの 3 人は 1956 年のノーベル物理学賞を受賞していますが、ショックレーと他の 2 人とは上記のような確執があったようです。バーディーンはその後超伝導現象の研究に移り、クーバー、シュリーファーと共に 1972 年のノーベル物理学賞を受賞することになるのですが、ショックレーとの確執が 2 度目のノーベル賞受賞の速因だったかも知れません。

なお、電流-電圧特性とバンド構造の変化の様子をスライドショーにしてみましたので、アドコム・メディア社の web を御覧ください。

図 8(b) は発光再結合電流 ($=\eta_i J$) を示したもので、これは電流-光出力特性に相当する。実際の光出力は構造に依存して変わるので、この図は光取り出し効率を考慮していない電流-光出力特性と考えればよい。この図からも 2 重ヘテロ構造がいかに優れた構造であるかが窺える。

5. 金属と半導体の接合

(1) 金属のバンド構造

金属の基本的かつ重要な性質は電気伝導と熱伝導である。電子は電気を伝えると同時に熱も伝える。

金属結晶も周期構造のポテンシャルによってバンド構造ができる。もう少し詳しく見ていこう。

金属のバンド構造は半導体と似ているものもある。第 1 章¹⁴⁾の図 12 にスズ (Sn) を例として示してあったが、

価電子帯の上端と伝導帯の下端が重なっている。また、両バンドが重なっているものもある。実空間で見ると、これらは連続した一つのバンドとして定義される。すなわち、一つのバンドの途中まで電子が詰まっている状態、それが金属である。もし、このバンドを伝導帯とみれば、強力にドーピングされた n 型半導体で、電子は自由キャリアーとして電気伝導に寄与する。あるいは、価電子帯とみれば、強力にドーピングされた p 型半導体ということになり、ホールが自由キャリアーとして電気伝導に寄与するという見方もできる。

金属を特徴付けるのは、電子がエネルギーを貰って自由電子になる仕事関数で電子のエネルギー状態を表すのが便利である。図 9(a) の左側に電子の状態を示す。

右に n 型半導体を置いてみる。n 型半導体のフェルミ準位がこの場合には金属のフェルミ準位 F_m (真空準

sinc 関数	70, 119
SMSR (side mode suppression ratio)	270
sp ³ 混成軌道	9, 145
s 軌道	7, 28, 127, 145
TA フォノン (transverse acoustic phonon)	184
TE モード (transverse electric mode)	83, 97, 244
TEM (transmission electron microscope)	265
THG (third harmonic generation)	214
TM モード (transverse magnetic mode)	83, 97, 244
VCSEL (vertical-cavity surface-emitting)	273
WDM (wavelength division multiplexing)	174
XRD (X-ray diffraction)	265
X 点	132, 146, 170, 233
YAG レーザー	15, 192, 213

あ 行

アインシュタインの <i>A</i> 係数, <i>B</i> 係数	54, 141, 167
アインシュタインの関係式	42
アインシュタイン-ファウラーの公式	197
アクセプター	150, 157, 253, 264
アノード	166, 275
アボガドロ数	43
アラン分散	273
アルゴンレーザー	217
アレイレーザー	273
アレキサンドライトレーザー	15, 224
暗線	5, 263
暗点	263
アンペアの法則	18, 63, 174
イオン化エネルギー	167
イオン化されたアクセプター密度	153, 159, 264
イオン化されたドナー密度	153, 159, 264
イオン性度	10
イオン半径	6
イオンレーザー	217
位相速度	24, 65, 88, 100, 123
移動度	37, 159, 264
色温度	12, 206

色消しレンズ	90
インコヒーレント光	197, 267
インパクトイオン化	242
ヴィーデマン-フランツ-ローレンツの法則	13, 42
ウィグナー分布関数	268
ウエハー	229, 271
宇宙	4, 5, 18, 45, 188
埋め込みヘテロ構造	247
ウルツ鉱構造	10, 146, 231, 242
運動量	9, 24, 37, 56, 71, 130, 146
運動量保存	55, 146, 169, 242
エーテル	63
エキシマーレーザー	15, 218
液相成長法	234
液体レーザー	218
X線回折法	265
エネルギー準位	7, 23, 47, 127, 150, 159, 180, 210
エネルギーバンド	127, 145
エネルギー保存	55, 86, 123, 146, 169, 242
エバネッセント波	87, 100, 121
エルミート-ガウスビーム	68
エルミート多項式	67
エレクトロルミネッセンス	48
円形開口	117
遠視野像	102, 118, 230, 249, 269
オージェ効果	242
オージェ再結合	54, 160, 242
オージェ電子	242
オージェ電子分光	242, 265
オーバーフロー	162, 241
小澤の不等式	37
重い正孔	129
温度特性	261

か 行

ガーネット	223
開口数	118, 233

あとがき

連載「光エレクトロニクスの玉手箱」は、2013年3月から始まった。玉手箱というタイトルは、O plus E誌にそれまで掲載されてきた2つの連載、すなわち「光の鉛筆」と「波動光学の風景」を拝見しながら、苦勞して考えたものであった。ご存知の“玉手箱”は、何が出てくるか分からないという魅力、“日本書紀”の時代にタイムトンネルを扱った画期的なものである。そのことが気に入って名付けたのであった。

各章を別々の分担で書くのではない。では、どのような方法で本連載をまとめてきたかを紹介しよう。どちらか1人、章の内容により得意な方が、まず全体的な構成をあらかじめ書き、著者と編集子が編集会議を行って読み合わせる。それを第1稿とし、それからしばらくお互いに内容を精査しながら補筆と修正を行う。その修正稿はクラウド上に置き、いつでも共有できるようにする。その間、数式の整備、図面の清書、場合によっては新しい図面を描き充実を図った。

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。著者等は主にレーザーや発光デバイスの研究を、それぞれ独立に行ってきたものの、共同で研究をしたということにはなかった。それに、伊賀健一は大学で、波多腰玄一は企業で、という異なる場で過ごしてもきた。ただ、著者らには共通点がある。1つは応用物理学会・微小光学研究会のメンバーであること、もうひとつはアマチュアとして楽器を演奏することである。

また、お互いの持ち味が全く異なっていることも次第にわかってきた。したがって、本書の内容は、1人では出来上がるものではなく、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、数多くの異なるポケットがあるようで、迷い道が色々と表れてくるのである。本文とは別に「コラム」の形で記述したのも、著者らの楽しみの1つであった。

また、何故この連載が始まったかと言えば、後藤顕也氏が微小光学研究会メンバーでもあり、執筆へ強くご推薦いただいたことが発端である。ここに深く感謝申し上げます。また、5年の長きにわたって編集を担当いただいた編集子の皆様にお礼を申し上げます。

伊賀 健一
波多腰 玄一
2018年5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 I Treasure Microbox of Optoelectronics I

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 978-4-910636-26-9 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。