Treasure Microbox of Optoelectronics Ⅳ

光エレクトロニクスの玉手箱 Ⅳ

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 IV

目　次

まえがき　i
目次　iii

第 50 章　忘れないで：光ディスクメモリー（その 1）　1
1. 音と光のメモリー　1
2. 光メモリーの発展と種類　3
3. 光ディスクのしくみ　4
4. 波長と回折限界　7
5. 記録と読み出し　8
6. CD, DVD, BD の比較　9
7. むすび　11
付録 AP1　光ディスクメモリー用語集（1）　12
コラム A：光の日，音の日　2
コラム B：音が良い：CD とアナログ LP, どちら？　4
コラム C：光ディスクとレコード　5
コラム D：光ディスクをつまんでよいか？　11
コラム E：第 50 章を迎えて　13

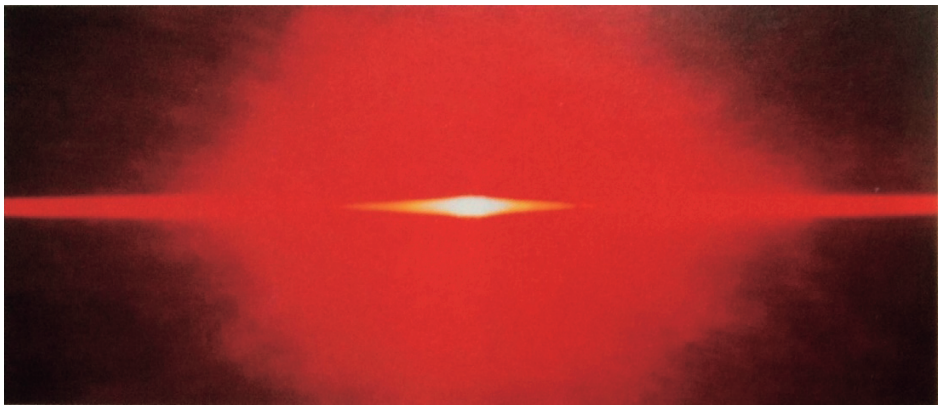
第 51 章　忘れないで：光ディスクメモリー（その 2）　14
1. いろいろなディスクと記録読み出し方法の実際　14
2. 光ディスクの光学系　15
3. 焦点誤差検出法　16
4. トラッキング誤差検出法　18
5. 誤り訂正　20
6. むすび　21
付録 AP1　光ディスクメモリー用語集（2）　22
コラム A：CD の規格余話　15
コラム B：CD のエラー訂正　21
コラム C：最初に出た CD はなにか？　21

第 52 章　忘れないで：光ディスクメモリー（その 3）　23
1. 光ディスク用の半導体レーザーとその要件　23
2. CD 用の波長 780nm 帯レーザー　24
3. DVD 用の波長 650nm 帯赤色レーザー　26
4. むすび　30
付録 AP1　光ディスクメモリー用語集（3）　32
コラム A：光ディスクを何に使う？　26
コラム B：微妙な設計：単一横モードで縦多モード　28

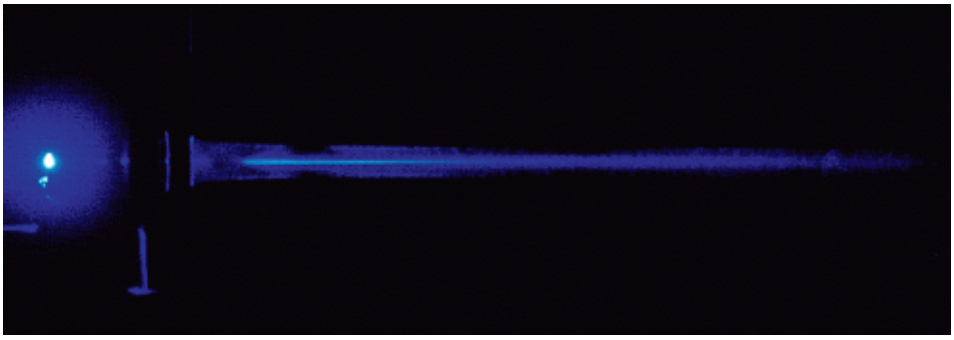
第 53 章　忘れないで：光ディスクメモリー（その 4）　33
1. BD 用の波長 405 nm 帯レーザー　33
2. 光ディスクの多層化と高速化　38
3. 記録内容の変遷と将来　42
4. むすび　43
付録 AP1　2 進法に基づくバイトの単位　44
付録 AP2　光ディスクメモリー用語集（4）　45
コラム A：なぜ blue disc とは言わないの？　34
コラム B：CD-R のデータ用と音楽用の違いは？　39
コラム C：いろいろな回転　40
コラム D：なぜ，高出力レーザーが必要か？　41
コラム E：光ディスクは BD で終わりか？　42
コラム F：メモリーはなにが残るか？　43

第 54 章　目にも鮮やかディスプレイ（その 1）　46
1. はじめに　46
2. ディスプレイとは　47
3. LCD 表示装置　48
4. 有機 EL　57
5. おわりに　58
付録 AP1　ニプコー円板　60
付録 AP2　ディスプレイ用語集（1）　61
コラム A：TN 液晶のねじれ方向はどうやって決まるの？　50
コラム B：スマートフォンは何故スマホか？　55

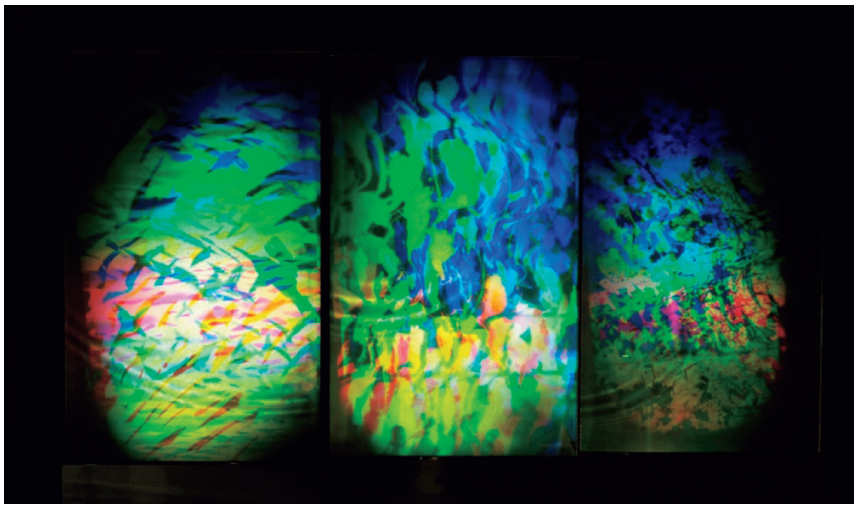
第 55 章　目にも鮮やかディスプレイ（その 2）　62
1. 色域　62
2. レーザーディスプレイとは　63
3. レーザープロジェクターの原理　63
4. レーザーディスプレイ研究の歴史　64
5. ディスプレイ用レーザー光源　64
6. レーザープロジェクターの構成技術　66
7. レーザープロジェクターとその応用　67



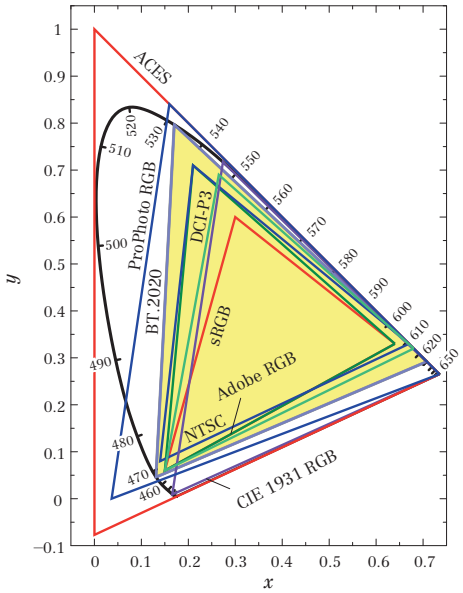
第 52 章 図 1　赤色半導体レーザーの夜明け（本文 p. 24）
（InGaAlP 系赤色レーザーの近視野像：1985 年室温連続発振）
（東芝レビュー, Vol. 41, No. 4, p. 284 (1986)）



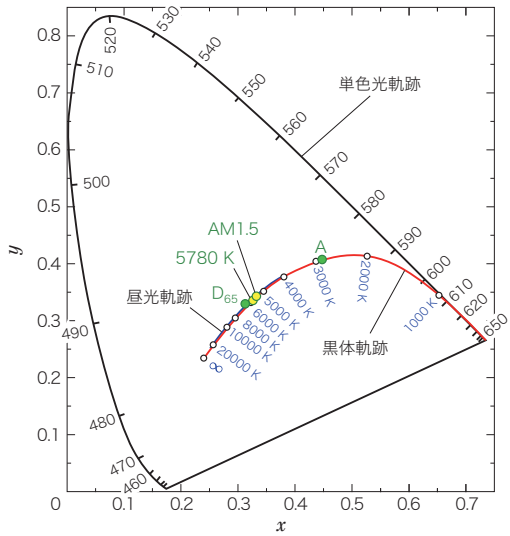
第 53 章 図 1　青紫色半導体レーザーの発振光（本文 p. 33）
（波長 417 nm，室温パルス発振：左がレーザーで，線状の光はレンズでコリメートされたビーム）
（東芝レビュー, Vol. 52, No. 3, p. 5 (1997)）



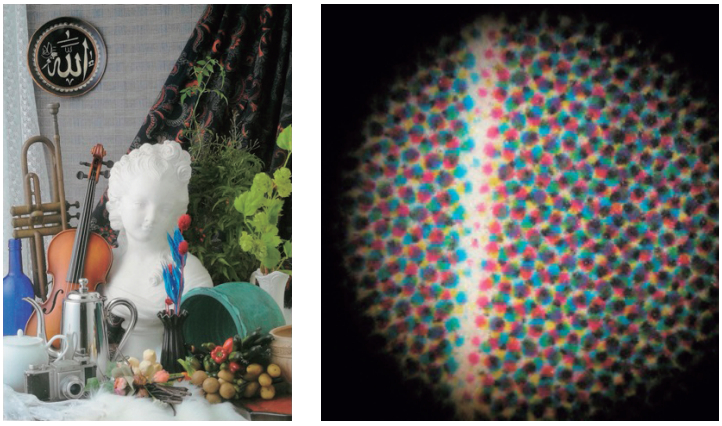
第 56 章 図 21　石井勢津子氏作のホログラフィー『アクエウスのつぶやき』（本文 p. 84）
（東京工業大学博物館所蔵。許可を得て掲載）



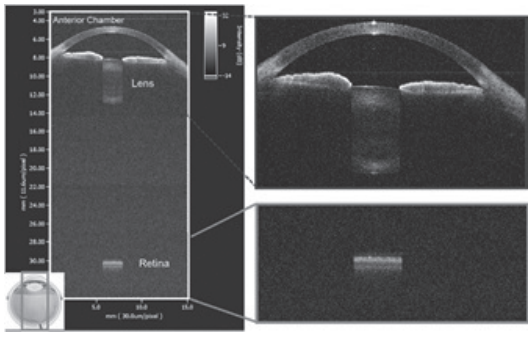
第 55 章 図 1　いろいろな色域（本文 p. 63）



第 57 章 図 10　xy 色度図と黒体軌跡（本文 p. 92）



第 62 章 図 13　レーザープリンターによる画像の例（本文 p. 141）
（(株) リコーのレーザープリンターによる出力を撮影したもの。
撮影は伊賀健一，宮本智之による。）
(a) A4 版へのプリントをスキャンしたもの　(b) ヴァイオリンの G 線を顕微鏡で拡大したもの



第 63 章 図 12　光トモグラフィーによる眼球の断面像（本文 p. 150）
(a)：眼球の深さ方向の OCT 像（上側が眼頭）
(b) 上：上側が角膜，中央下部が水晶体　　下：網膜部
（santec（株）鄭台鎬社長のご厚意による）

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Ⅳ巻（最終巻）である。その連載は 2013 年 3 月から始まり，2019 年に第 67 章をもって完了した。本書はその第 50 章から第 67 章までをまとめて，2019 年 12 月 4 日に単行本として出版した書籍版である。

第Ⅳ巻では，主として光エレクトロニクスの応用システムについて取り上げた内容となっている。本編第Ⅰ巻では，光エレクトロニクスの基礎について詳しく解説し，第Ⅱ巻では，デバイスを中心とした。第Ⅲ巻では，デバイスから構成されるコンポーネントを内容の中心に据えた。そこで，最終巻となる本書では，光エレクトロニクスのいろいろなシステムについてその原理から動作までを詳しく紹介することとした。

第 50 章から第 53 章は「光ディスクメモリー」で，透明な円盤の表面あるいはその近くになんらかの印をつけてメモリーとし，それをレーザー光で読み出すしくみである。LP 盤などのアナログレコードと異なり，ディジタル的なピットを密に書き込み，記録する。1982 年頃から始まる CD，1990 代の DVD，2000 年代に実現した青紫色の半導体レーザーを用いる BD などのしくみについて見ていく。身近なところにあるディスクなのだが，その技術が誠に精緻であることに読者も驚かれることであろう。

第 54 章から第 57 章の 4 つの章を「ディスプレイ」に当てた。やや詳しく述べたのは，われわれが目にするはずのいろいろな情報を具現化する手段であり，永遠に消えることのない技術であるとの認識に立ったものである。液晶ディスプレイ（LCD）では，液晶のスイッチ列で光を on-off させて画面に映像を映し出す。有機 EL では，自発光の有機 EL 列により画面を明るく表示する。それらの仕組みも，なかなかおもしろい。

第 58 章から第 60 章の 3 つの章では，ものの像を撮るいわゆる「撮像」について見ていく。カメラから始まって，物体の像を記録することはこれまた永遠の課題である。CCD センサーが先行したが，シリコン技術の発展で，CMOS 技術をもとにしたセンサーが台頭した。

第 61 章はレーザーを用いるレーダーである「ライダー」について取り上げた。人工知能（AI）の応用や Deep Learning を駆使する応用が進むにつれて，自動運転や安全のキーとなる技術である。

第 62 章は「レーザープリンター」で，現在，われわれが手にすることのできるきれいなプリント資料は，その精緻な技術によることを探る内容である。

第 63 章は「光センシング」で，撮像とはまた少し異なる視点からのセンシング技術であり，高速，安全，医用などの基盤技術となる。

第 64 章から第 66 章では，量子について全編を振り返って考えることとした。量子論的考え方，量子力学，量子情報処理など，光エレクトロニクスにはどこかで使われていながら，まだ理解しがたいところが残っているという印象から，まとめて考え直そうという試みである。第 66 章では，量子コンピューターについて紹介というより，読者の皆様と一緒に考えようと，もとになる情報を提供することを目的として整理した。

また，第 67 章は，これまで本連載をお読みいただいた後藤顕也さん，植之原裕行さんにご参加いただいた座談会で，本連載・本書籍版についての感想や意見などを伺い，興味ある内容となったので，番外編として本書に収納させていただいた。

本書の第 I 巻から第Ⅲ巻までお読みいただいた読者の皆様に深く感謝しながら，この最終巻を捧げたい。初めて第Ⅳ巻を手にされた方々には，システムの基礎になっている原理や材料など，前 3 巻に網羅されていることをご紹介しておく。

また，本連載では「 コラム 」を設けて，本文では収まらない内容を気楽に入れてみる試みを行った。全編のコラムを眺めてみると，筆者等にとってもおもしろい議論ができたと感じられるものとなった。全巻の総目次も併せて本巻末に掲載した。

本書の読者としては，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。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，第 II 巻，第Ⅲ巻と共にお役に立てば幸いである。

伊 賀　健 一
波 多 腰　玄 一
2019 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。
https://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 54 章　目にも鮮やかディスプレイ（その 1）

Q（編集子）：前章まで，4 回にわたって光ディスクについて解説いただきました。CD など一般によく使われているものなのに，その原理を理解するのは大変でした。

C（伊賀）：光ディスク装置は，半導体レーザー，ディスクそのもの，光検出器，それからディジタル信号を処理するプロセッサーが詰まっているシステムでした。

C（波多腰）：メモリーと光通信を併せたような高度な仕組みです。

Q（編集子）：本章では，ディスプレイです。ディスプレイと言えば，まずはテレビですね。

A（波多腰）：電子的に画像を表示するのは，テレビが最初でした。

A（伊賀）：高柳健次郎先生が世界で初めて「**イ**」の字をブラウン管に表示したのです。これについては本文で詳しくご紹介しましょう。

A（波多腰）：最近では，スマートフォンから映画館などの大型スクリーンまで，多種多様のディスプレイが発展しています。

C（編集子）：いろいろ勉強するのが楽しみです。

本章では，電子的に文字や画像，あるいは動画などを表示する，いわゆるディスプレイ（display）について見ていくことにする。レーザーディスプレイ，液晶ディスプレイなど，表示，投影技術についてながめてみる。

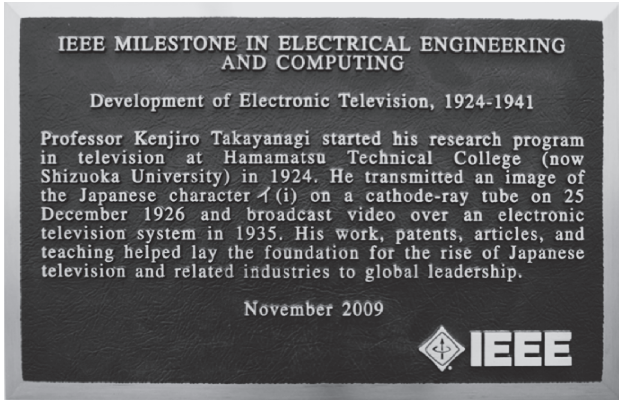


図 1　高柳健次郎の電子表示に関する IEEE Milestone（東京工業大学博物館所蔵）

1.　はじめに

英語の display は，ラテン語由来のフランス語 pli（折りたたむ）を dis によって否定することから来ているらしい。つまり，display は広げるという意味となり，大きく広げて見せることで，日本語の「表示」が対応する。ちなみに，演ずるという play は別の語源から来ている。

さて，高柳健次郎の電子表示は，2008 年に世界初の技術として，マイルストーン（IEEE　Milestone）に選定された。高柳は東京高等工業学校（後の東京工業大学）を卒業後，浜松高等工業学校（後の静岡大学工学部）の教授となり，電子的表示装置の研究を行った。**図 1** にマイルストーンの銘板を示す。静岡大学が申請したもの

コラム A

最初の光センシングは何でしょうね？

Q（伊賀）：最初の光センシングは何があるのでしょう？

A（波多腰）：光そのものの測定になりますが，光速の測定は光センシングに関連の深い技術だと思います。第5章で紹介したように，1676年にレーマーが木星の衛星イオの食を利用して光速を測定しました。その後に続く光速測定で有名なのは，1849年にフィゾーが回転歯車を用いた方法です。これは回転歯車による光の高速変調を利用していることになります。このときは遠くに置いた鏡までの距離がわかっていて，それから光速を求めたのですが，逆に光速がわかっていれば距離が求められます。これは実は現在の距離計と同じ原理です。レーザーができた1960年以降，光計測の分野が広まりました。

C（伊賀）：北大の朝倉利光教授，大塚喜弘教授らがいろいろと研究されていたことを記憶しています[1)]。

Q（波多腰）：ところで，後のOCTのところで，山形大学の丹野さん，MITのFujimotoさんのことができますね。

A（伊賀）：丹野さんはわれわれとほぼ同じ世代でしたし，Fijimotoさんとは，同じ年のランク賞の授章式で一緒でした。

コラム B

光センシングは分類できるか？

Q（波多腰）：光センシングは系統的に分類できますかね？

A（伊賀）：それはなかなか難しいですね。昔から，センサー（千差）万別と冗談で言っていたくらいですから。

C（波多腰）：それでも，最近はAIやIoTが進んできてセンサーの重要性が増してきました。

A（伊賀）：そこで，できる限り系統化を試みましょう。

2. あらためて光センシングとは？

光センシングにどのようなものがあり，どのような方法があるかを，まず眺めてみよう。

第58~60章の撮像では，物の像を撮るという視点で見てきた。もちろん，防犯カメラなどでは，写真のデータを保存して，後で参照するというセンシングである。

ところが，それだけでは情報が得られない場合がある。例えば，

- 物体や人体の内部
- 瞬時に変わる状況の把握（写真を撮っても直ぐに処理ができない高速事象）
- 速度などの動的物理量
- 精度の高い測定

などがある。そこで，以下のような対象物があることに気づく。

表1　光センシングの対象と例

対象	例
距離	測定点からの距離，横方向距離
位置	方向，GPS座標
形状	大きさ，形
性質	人，自動車，動物
量	寸法，濃度，屈折率，血流，インピーダンス
変位	物体の移動量，振動量
速度	流速，飛来速
スペクトル	吸収スペクトル，色，吸収率，反射率
偏波	偏波の有無，方向
電気磁気	脳波など
臭気	熟度，腐敗度
存在性探査	油田，星，あるかないか，危険物，ガス，爆発物，薬物，害虫，ウィルス

(1) 光センシングの対象物

表1に，対象物の分類を示す。これを見ると，センシングは，われわれの周りにあるあらゆる物の情報を獲得するという行為であることに思い至る。であるから，暮らしや生活を快適にすることをミッションにすることが重要で，悪意に基づいたものであってはならない。

(2) 測定法の原理

ここでは，光センシングにおける測定あるいは感知するための要素について考えてみよう。**表2**に，光センシングにおける測定法についてまとめた。

光センシングに関する文献では，対象物を中心とする測定方法を扱っているものが多い。本章では，測定法の概念に注目して見ていくことにしたい。

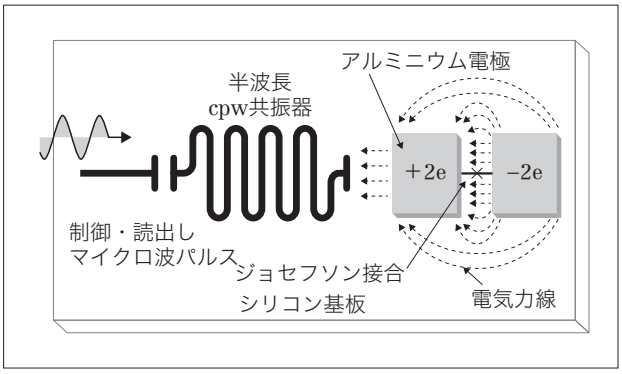


図 3　量子ビットの例（超伝導ジョセフソン接合を用いる例[18]）。（田淵豊，杉山太香典，中村泰信：電子情報通信学会誌，Vol. 101, No. 4, pp. 400–405 (2018)，許諾番号：19KA0003）

量子計算機においても，計算するためのプログラミングが必要である。簡単に言うと，Q-ビットへの重みづけとでも言っておこう。

量子ビットには，**図 3** に示すような超伝導ジョセフソン接合を用いる例が報告されている[18]。

現在開発が進んでいる量子ゲート型計算機では，はっきりとは明示されていないが，超伝導回路が用いられていることが多い。Q-ビットの数は，Google の 72 Q-ビット[19]，IBM の 50 Q-ビット[20] が報告されている。後者では，これを用いて 2020 年頃に実用化が予定されている。

5.　量子ニューラルネットワーク

図 4 に示すこの方式は，山本喜久教授が提案し，科学技術振興機構（JST）の ImPACT プログラムで実現しようとしているものである。同プログラムのホームページには，ビデオによる解説もある[13]。この方式では，光の位相をビットに用いる。すなわち，ゼロ度から始まる光と 90 度から始まる光を固有解とし，その重ね合わせを Q-ビットとする，いわば光子計算機である。古典的には，光通信における 2 値の光位相変調に相当する。ただ，この光は，**図 4** に示すように，光パラメトリック増幅器のところで，2ω のポンプ光から非線形結晶により，ω の角周波数をもつ 2 つの光を生成する。これを約 1 km 長の光ファイバーに入れ周回させる。非線形結晶へのポンプ光を強くして，リング共振器の損失を打ち消すと発振が起こり，光パラメトリック発振器（OPO）となる。2 つの光は，それぞれ 0 度の光と 90 度の光に分割されるが，発振しきい値以下では，それがランダムに発生する。ところが，発振が起こると，どちらかが優勢になって周回する。そこへ，光カプラーを通して部分パルスを FPGA（field-programmable gate array）によって帰還信号を作り，リング共振器へ戻す。こうして，多くの光 Q-ビットが伝搬しながら結合し，並列的に計算を実行していく。最適化問題などを高速に計算できるという。

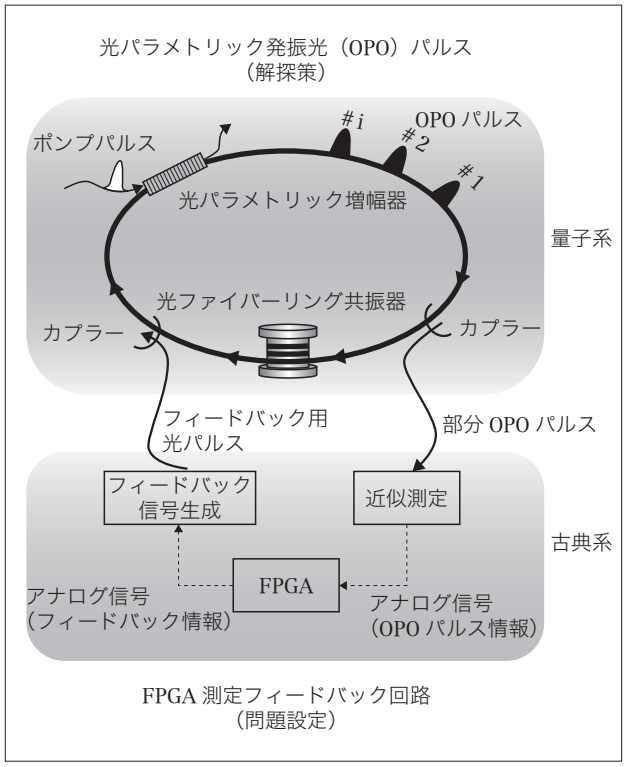


図 4　光を Q-ビットとする量子ニューラルネットワーク[21]（http://www.jst.go.jp/impact/program/12.html）

6.　量子アニーリング計算機

(1) シミュレーテッド・アニーリング

われわれの周りには，数値計算を行うというより，最適な場合を模索するという場合もある。このような最適な場合を求めるために特化された計算手法が，量子アニーリング計算法である。

これに類した計算手法としては，シミュレーテッド・アニーリング（simulated annealing）法があり，古典

索　引

LPE (liquid phase epitaxy) 27
MBE (molecular beam epitaxy) 26
MD (mini-disc) 3
MEMS (micro electro mechanical systems) 63, 129
MKB (media key block) 39
MO (magneto-optical) ディスク 5
MOB (micro optical bench) 160
MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) 27, 34
MOS (metal oxide semiconductor) 122
MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) 122
MPEG (moving picture expert group) 22
MPEG2 15
MPRT (moving picture response time) 52
MQW (multi-quantum well) 35
MR (mixed reality) 96
MRI (magnetic resonance imaging) 145
MVA (multi-domain vertical alignment) 51
n 型液晶 49
NA (numerical aperture) 7, 54, 104
NAND ゲート 183
NFP (near field pattern) 32
NRZI (non-return to zero inverted) 6
NTSC (National Television System Committee) 63
OCB (optically compensated bend) 52
OCT (optical coherence tomography) 148
OLED (organic LED) 58
OPO (optical parametric oscillator) 184
OSA (Optical Society of America) 87
OTF (optical transfer function) 119
p 型液晶 49
PC (phase change) 12
PCM (pulse code modulation) 22
PD (photodiode) 124, 149
PET (positron emission tomography) 145
PPI (plan position indicator) 127
PPLN (periodically poled lithium niobate) 65
PPS (passive pixel sensor) 125
PRLM (partial response and maximum likelihood) 10
ProPhoto RGB 62
P7V2 71
PVA (patterned ITO vertical alignment) 52
Q-ビット 181
QED (quantum electrodynamics) 162
QUBO (quadratic unconstrained binary optimization) 187
R2R (roll to roll) 58
RADAR (radio detection and ranging) 127
RAM (random access memory) 6
RDS (random dot stereogram) 75
rect 関数 150
RGB 56, 86
RGB 表色系 89
rg 色度図 91
RIN (relative intensity noise) 134
ROM (read only memory) 2, 38
ROMM (reference output medium metric) RGB 72
RSA (Rivest-Shamir-Adleman) 暗号 182
RW (rewritable) 4
SD-OCT (spectral domain OCT) 149
SHG (second harmonic generation) 65
SHV (super hi-vision) 72
SI (Système International d'unités) 44
SIRDS (single image random dot stereogram) 76
SLD (superluminescent diode) 130, 148
SLM (spatial light modulator) 64
SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) 72
SMSR (side mode suppression ratio) 134
SP (standard playing) 2
sRGB 63
SSD (spot size detection) 17
SS-OCT (swept-source OCT) 149
STN (super-twisted nematic) 50
TD-OCT (time domain OCT) 149
TFT (thin film transistor) 50
TJS (transverse junction stripe) 24
TN (twisted nematic) 48
TOF (time of flight) 127, 145
TS (transverse junction stripe) 25
TSP (traveling salesman problem) 182
TSTN (triple STN) 51
3 スポット法（3-spot method） 19
3 ビーム法（3-beam method） 19
3D ディスプレイ 82
UCS (uniform-chromaticityscale) 色度図 92
UDF (universal disk format) 15
UHDTV (ultra high definition TV) 62, 82
uv 色度図 92
$u'v'$ 色度図 92
VA (vertical alignment) 51
VBG (volume Bragg grating) 65
VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) 42, 65, 126, 129, 138
VR (virtual reality) 67, 96
VSIS (V-channeled substrate inner stripe) 25
WORM (write once read multiple) 4
X 線 CT 145
xy 色度図 92
XYZ 表色系 91
$X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系 91
YAG レーザー 128
ZCAV (zoned CAV) 5
ZCLV (zoned CLV) 5

あ　行

アイコノスコープ 47
アヴァランシェフォトダイオード 129
青色半導体レーザー 64
青紫色半導体レーザー 33
赤色半導体レーザー 24
アクティブマトリックス 50

総　索　引

アルファベット，略語

AACS (advanced access content system) IV-39
ACES (Academy Color Encoding System) IV-62
Adobe RGB IV-63
AES (Auger electron spectroscopy) I-242, 265
AFM (atomic force microscope) I-265
AI (artificial intelligence) IV-143
AlN II-39, 87, 92
ALOHA (additive links on-line Hawaii area, ALOHA net) III-216
α 乗分布屈折率光ファイバー II-253; III-186
Alq_3 III-156, 168
AM (air mass coefficient) III-95
AM1.5 III-95, 116
AMPAS (Academy of Motion Picture Arts and Sciences) IV-72
AO (acoustooptic）効果 III-60
APC (automatic power control) I-272
APD (avalanche photodiode) III-65, 83, 183, 212; IV-129
APS (active pixel sensor) IV-125
AR (anti-reflection) III-10
AR (augmented reality) IV-67, 96
AROG (air-hole retained over-growth) II-42
a-Si (amorphous silicon) III-121
AWG (arrayed waveguide grating) III-56
BB84 IV-187
BD (blu-ray disc) I-228, 274; II-39, 74, 90; IV-3, 20, 33
BDXL IV-40
BH (buried heterostructure) I-247; II-10; IV-24
BIS (burst indicator subcode) IV-21
BK7 II-128; III-10
BPF (band-pass filter) II-7, 131
BPM (beam propagation method) III-30
BSF (back surface field) 太陽電池 III-120
BT.2020 IV-57, 63
b-V 曲線 I-98; II-217, 250
CATV (cable television) III-199
CAV (constant angular velocity) IV-5, 14
CBE (chemica beam epitaxy) II-37
CBP III-157, 168
CCD (charge coupled device) IV-122
CCD イメージセンサー IV-124
CD (compact disc) I-5, 173, 228, 258, 274; II-25, 74, 117, 159; III-216; IV-3, 14
CD-DA (compact disc-digital audio) IV-3, 15
Ce^{3+}:YAG III-135
CHSH (Clauser-Horne-Shimony-Holt) 不等式 IV-179
CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) I-12; II-105; IV-71, 89
CIE 1931 表色系 IV-89
CIE 1931 RGB IV-63, 89
CIE 1964 表色系 IV-91
CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間 IV-93
CIGS ($Cu(InGa)Se_2$) III-121
CIRC (cross interleave, Reed-Solomon code) IV-20
circ 関数 I-119
CL (cathode luminescence) I-49, 265
CLV (constant linear velocity) IV-5, 14, 40
CMOS (complementary MOS) II-63; III-173; IV-123
CMOS イメージセンサー（CMOS センサー） IV-125
CMOS インバーター IV-124
CO_2 レーザー I-216
COD (catastrophic optical damage) I-261
CNOT ゲート IV-183
CPA (continuous pinwheel alignment) IV-52
CPBH (circular planar buried heterostructure) II-35
CPRM (content protection for recordable media) IV-39
CRI (color rendering index) IV-95
CRT (cathode ray tube) IV-47
CR 定数 I-269
CSP (channeled substrate planar) IV-24
CT (computed tomogaphy) IV-145
CVD (chemical vapor deposition) II-263
C-V 法 I-264
CW (continuous wave) I-213, 233; II-2, 28, 42
CZ (Czochralski) 法 III-120
DACT-II III-145, 154
DBR (distributed Bragg reflector) I-183, 228, 270; II-7, 19, 34, 83, 107, 119, 128, 145, 204; III-166
DCI (Digital Cinema Initiatives) IV-72
DCI-P3 IV-63
DCM III-156, 168
DFB (distributed feedback) I-131, 183, 228, 270; II-2, 19, 55, 136, 140; III-166
DFD (depth fused display, depth fused 3D) IV-74
DFT (density functional theory) III-143, 154
DH (double heterostructure) I-162, 228, 253; II-18, 76, 93
DLOS (deep-level optical; spectroscopy) I-265
DLTS (deep-level tramnsient spectroscopy) I-265
DMX (demultiplexer) III-61
DPD (differential phase detection) IV-8, 19
DSM (dynamic scattering mode) IV-48
DSM (dynamic single mode) I-228, 270; II-144
DSTN (dual STN) IV-51
DTP (desktop publishing) IV-71
DVD I-5, 174, 230, 258, 274; II-26, 74, 158, 180; IV-3, 15
DWDM (dense wavelength division multiplexing) III-189; IV-74
EA (electro-absorption）変調器 III-58
EB (electron beam) 描画 II-156
EBIC (electron beam induced current) I-265
EBL (electron barrier layer) IV-35
ECL (electrochemiluminescence) III-167
EDC (electronic dispersion compensation) III-191
EDFA (erbium-doped fiber amplifier) I-230; II-65; III-207
EFM (eight to fourteen modulation) IV-6
EH モード II-216
EIL (electron injection layer) III-159
EL (electroluminescence) I-48; II-72, 91; III-127, 156, 173

あとがき

連載「光エレクトロニクスの玉手箱」は，O plus E 誌において 2013 年 3 月から始まり，2019 年 3 月に第 67 章をもって完結した。これまで，その書籍版第Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ巻を出版してきたが，本書はその第Ⅳ巻（最終巻）で，全巻の目次，全編の索引，コラムの総目次を設けたので，手早く検索可能にもなっている。

これまでにも述べてきたとおり，1960 年のレーザー登場に始まる光エレクトロニクスに関して，“玉手箱”のタイトルをもって眺めてみることにしたものであった。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があるし，浦島太郎の昔話そのものにも，時空を超えた世界が広がるのであった。光と電子の誕生から始まる壮大な世界を背景としながら，レーザーが登場して以来発展した約 60 年間の技術が閉じ込められていた。この「光エレクトロニクスの玉手箱」がそれを一気に開いてみたと言ってもよい。光エレクトロニクスの原理, 基礎, 材料，デバイス，コンポーネント，システムなど，まとめて紹介するものとなった。

第 50 章から第 53 章の「光ディスクメモリー」では，音楽ソフトで使う CD から，映像の記録に多用される DVD, 大容量の BD ディスクまで, その技術について詳細に紹介した。光記録, 読み出し，エラー訂正システム，回転メカニズムなど，驚くような技術が巧みに使われていることを知った。

第 54 章から第 57 章では「ディスプレイ」について調べた。コンピューター用のパネル, スマートフォンなどの小型ディスプレイ，テレビ，会議，映画館における大画面のシステムなどには，最先端の技術が詰め込まれていた。

第 58 章から第 60 章は,「撮像」で，カメラの像形成機構から始まり，受光素子などこれからの映像技術の要（かなめ）になる技術について概観した。

第 61 章はレーザーレーダー（ライダー）で，すでにいろいろなモバイル機器や自動車などの自動化に向けて発展しつつあることを紹介した。

第 62 章は,「レーザープリンター」で，現在われわれが手にすることのできるきれいなプリント資料は，その精緻な技術によることを探る内容である。2001 年頃から，面発光レーザーアレイを用いるレーザープリンターが登場し，高速，高精細化が図られ，印刷機以上の性能が超高速で発揮できるようになった。数 μm のドットをディジタル的に分離して印刷する技術もすばらしいものがある。

第 63 章は,「光センシング」で，これからますます重要となる技術であり，高速，安全, 医用などの社会基盤に必須のものとなる。

第 64 章から第 66 章は量子についてまとめた。光エレクトロニクスにはどこかで使われていながら今ひとつ分からないという問題を，改めて振り返って考えることとした。量子におけるパラドックス，光は粒子か，電子は波か，第 2 量子化の考え方，量子コンピューターなどについて紹介というより，読者の皆様と一緒に考えるための情報を提供することを目的として整理した。

この玉手箱の連載は，伊賀健一と波多腰玄一の共著で書いてきた。前 3 巻でも述べたが，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。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」でも，いろいろな方にご登場いただいて，興味ある散歩道にご案内できたと思う。

本連載の著述を通じて，本当はそうだったのだと分かってきたこと，専門家でさえ分からない問題，専門家は解決済みだが著者らがまだ理解し得ていないことなど，正直に書いてきたつもりである。読者の皆様も，分かっていたのだけれど，よりはっきりしたという問題もおありだったとお聞きしている。ここに，長きにわたる連載のご愛読に感謝申し上げる。

また，この連載のきっかけは，元東芝・東海大学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いただいた。ここに深く感謝申し上げたい。

本連載は 6 年間，冒頭の著者対談から始まって第 1 章から第 67 章の座談会にわたるもので，月ごとのページ制限を大幅に上回ることも多かった。そのために書籍版も大部になってしまった。ここに，出版社のアドコム・メディア社の社長，出版担当の方々にご理解とご容認をいただいたことに深甚なる感謝の意を表したい。

伊　賀　　健　一
波多腰　玄　一

写真は，2019 年 6 月 13 日　パシフィコ横浜，アドコム・メディア社主催の
画像センシング展における第Ⅲ巻出版記念サイン会にて。
（左：伊賀健一　右：波多腰玄一）

2019 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。
https://www.adcom−media.co.jp/opluse/tmo/

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・バウワー賞），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国内対策部会部会長。応用物理学会フェロー/微小光学研究会・運営副委員長。応用物理学会光学論文賞，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 IV
Treasure Microbox of Optoelectronics IV

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 978-4-910636-29-0　C3042　¥5200E

© Kenichi Iga, Genichi Hatakoshi 2020

印刷/製本　㈱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㈱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。