

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



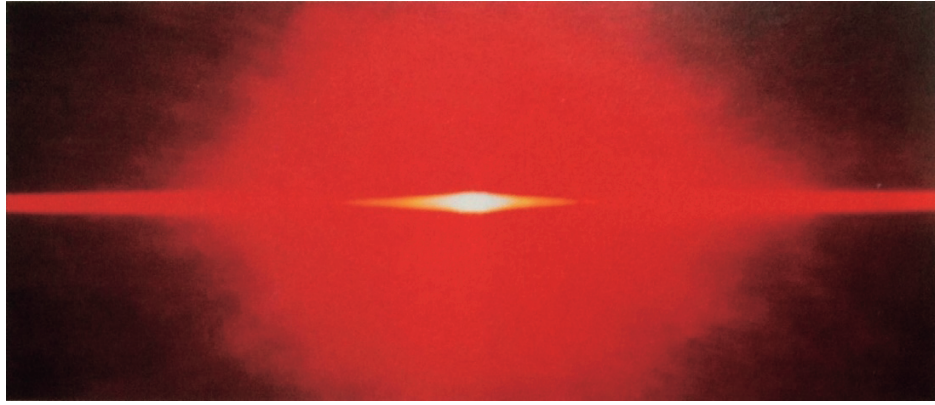
Advanced Communication Media  
アドコム・メディア株式会社

# 光エレクトロニクスの玉手箱 IV

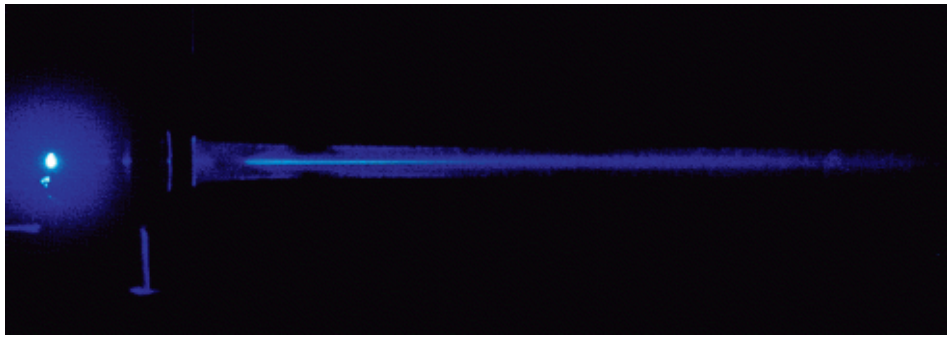
## 目 次

まえがき	i	コラム B：微妙な設計：単一横モードで	
目次	iii	縦多モード	28
第 50 章 忘れないで：光ディスクメモリー (その 1)	1	第 53 章 忘れないで：光ディスクメモリー (その 4)	33
1. 音と光のメモリー	1	1. BD 用の波長 405 nm 帯レーザー	33
2. 光メモリーの発展と種類	3	2. 光ディスクの多層化と高速化	38
3. 光ディスクのしくみ	4	3. 記録内容の変遷と将来	42
4. 波長と回折限界	7	4. むすび	43
5. 記録と読み出し	8	付録 AP1 2 進法に基づくバイトの単位	44
6. CD, DVD, BD の比較	9	付録 AP2 光ディスクメモリー用語集 (4)	45
7. むすび	11	コラム A：なぜ blue disc とは言わないの？	34
付録 AP1 光ディスクメモリー用語集 (1)	12	コラム B：CD-R のデータ用と音楽用の	
コラム A：光の日、音の日	2	違いは？	39
コラム B：音が良い：CD とアナログ LP,		コラム C：いろいろな回転	40
どちら？	4	コラム D：なぜ、高出力レーザーが必要か？	41
コラム C：光ディスクとレコード	5	コラム E：光ディスクは BD で終わりか？	42
コラム D：光ディスクをつまんでよいか？	11	コラム F：メモリーはなにが残るか？	43
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	第 54 章 目にも鮮やかディスプレイ (その 1)	46
1. いろいろなディスクと記録読み出し方法の		1. はじめに	46
実際	14	2. ディスプレイとは	47
2. 光ディスクの光学系	15	3. LCD 表示装置	48
3. 焦点誤差検出法	16	4. 有機 EL	57
4. トラッキング誤差検出法	18	5. おわりに	58
5. 誤り訂正	20	付録 AP1 ニブコー円板	60
6. むすび	21	付録 AP2 ディスプレイ用語集 (1)	61
付録 AP1 光ディスクメモリー用語集 (2)	22	コラム A：TN 液晶のねじれ方向は	
コラム A：CD の規格余話	15	どうやって決まるの？	50
コラム B：CD のエラー訂正	21	コラム B：スマートフォンは	
コラム C：最初に出た CD はなにか？	21	何故スマホか？	55
第 52 章 忘れないで：光ディスクメモリー (その 3)	23	第 55 章 目にも鮮やかディスプレイ (その 2)	62
1. 光ディスク用の半導体レーザーとその要件	23	1. 色域	62
2. CD 用の波長 780nm 帯レーザー	24	2. レーザーディスプレイとは	63
3. DVD 用の波長 650nm 帯赤色レーザー	26	3. レーザープロジェクターの原理	63
4. むすび	30	4. レーザーディスプレイ研究の歴史	64
付録 AP1 光ディスクメモリー用語集 (3)	32	5. ディスプレイ用レーザー光源	64
コラム A：光ディスクを何に使う？	26	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

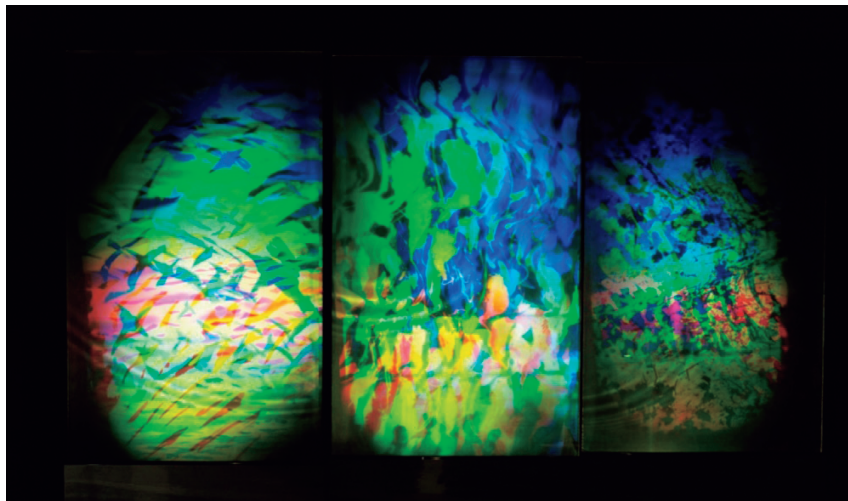




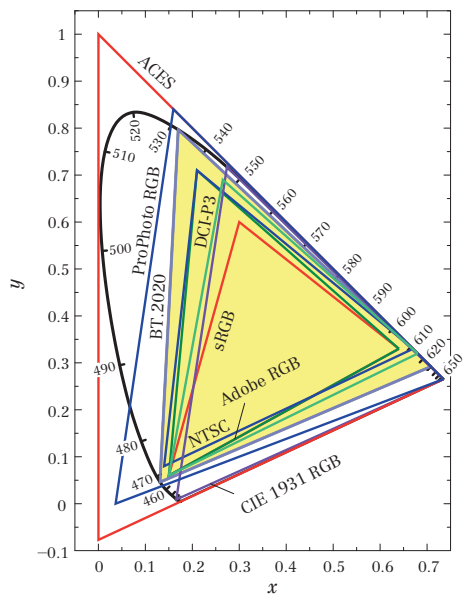
第 52 章 図 1 赤色半導体レーザーの夜明け (本文 p. 24)  
 (InGaAlP 系赤色レーザーの近視野像：1985 年室温連続発振)  
 (東芝レビュー, Vol. 41, No. 4, p. 284 (1986))



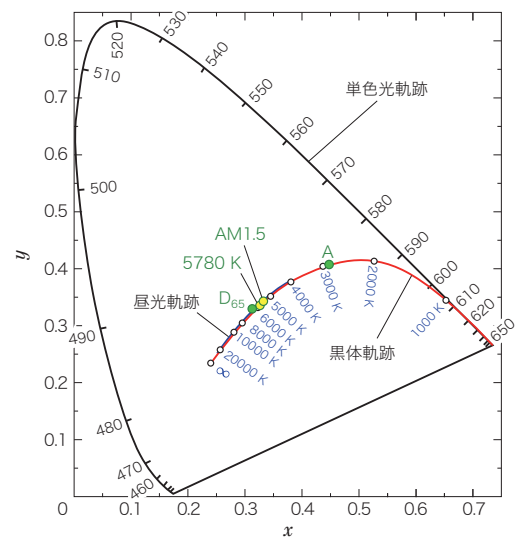
第 53 章 図 1 青紫色半導体レーザーの発振光 (本文 p. 33)  
 (波長 417 nm, 室温パルス発振：左がレーザーで，線状の光はレンズでコリメートされたビーム)  
 (東芝レビュー, Vol. 52, No. 3, p. 5 (1997))



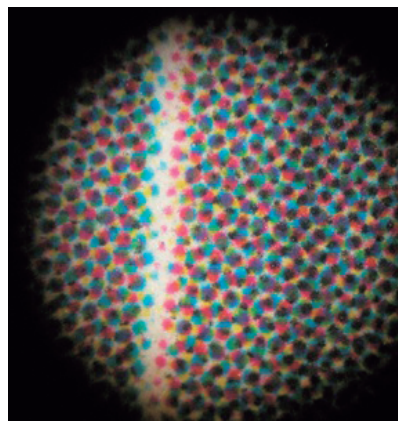
第 56 章 図 21 石井勢津子氏作のホログラフィー『アクエウスのつぶやき』(本文 p. 84)  
 (東京工業大学博物館所蔵。許可を得て掲載)



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)

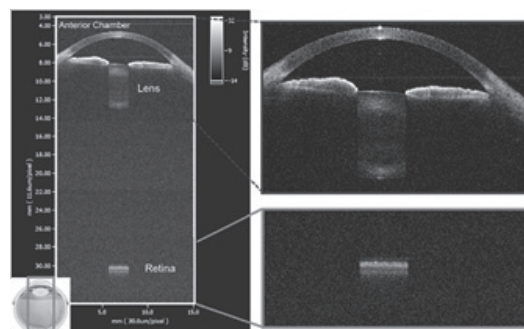


第62章 図13 レーザープリンターによる画像の例 (本文 p. 141)

((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。量子論的思考方、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 巻を手にした方々には、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ます。

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、それからデジタル信号を処理するプロセッサ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。

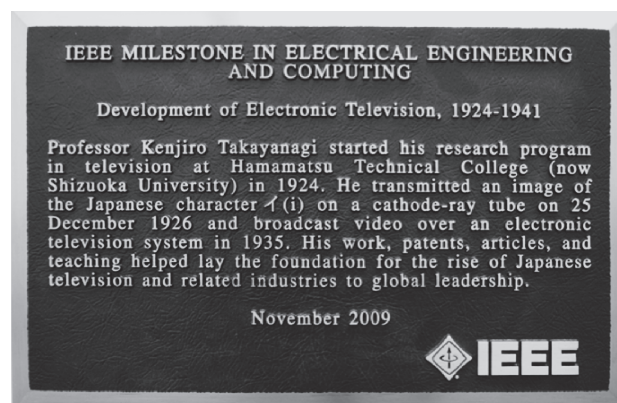


図 1 高柳健次郎の電子表示に関する IEEE Milestone (東京工業大学博物館所蔵)

### 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か？



**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。その後続く光速測定で有名なものは、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<sup>1)</sup>。

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

**A (伊賀):** 丹野さんはわれわれとほぼ同じ世代でしたし、Fujimoto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、最近では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。

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、ウイルス

## 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えてきた。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。

## (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。

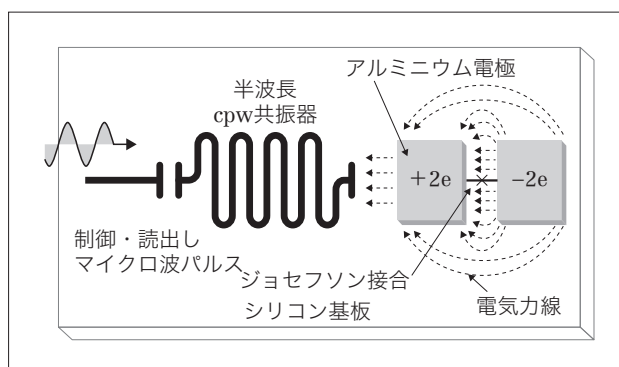


図3 量子ビットの例（超伝導ジョセフソン接合を用いる例<sup>18)</sup>）。  
（田淵豊，杉山太香典，中村泰信：電子情報通信学会誌，Vol. 101, No. 4, pp. 400-405 (2018)，許諾番号：19KA0003）

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うておこう。

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<sup>18)</sup>。

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<sup>19)</sup>、IBMの50 Q-ビット<sup>20)</sup>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<sup>13)</sup>。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、 $2\omega$ のポンプ光から非線形結晶により、 $\omega$ 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

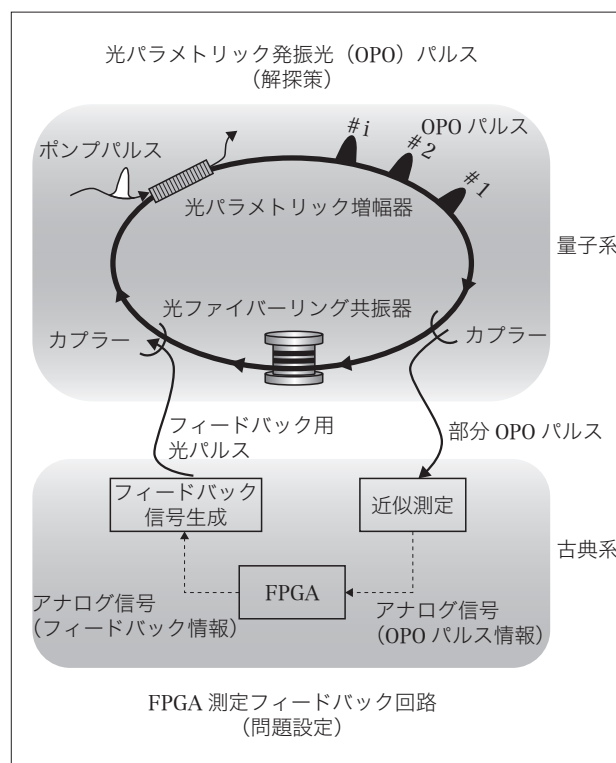


図4 光をQ-ビットとする量子ニューラルネットワーク<sup>21)</sup>  
(<http://www.jst.go.jp/impact/program/12.html>)

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。

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

## 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  
 $\alpha$  乗分屈折率光ファイバー II-253; III-186  
 Alq<sub>3</sub> 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 (chemical 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<sup>3+</sup>: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<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> 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 tomography) 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 transient 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  $\mu\text{m}$  のドットをデ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・パワワー賞)、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 “Duo21” 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 “Duo21” 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)

Adcom Media Co. Ltd., Tokyo, Japan, 2020

©Kenichi Iga, Genichi Hatakoshi 2020

ISBN 978-4-915851-73-5 C3042 ¥2000E

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** (一社) 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、(一社) 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。