電気設備の絶縁診断入門

江原　由泰
江藤　計介 共著
末長　清佳

コロナ社

ま　え　が　き

電気設備の信頼性は，絶縁の良否で決まるといっても過言ではない。重要部位にもかかわらず，絶縁はきわめて地味な存在で，トラブルを経験して初めて，責任者はその重要性を認識する。絶縁とは「空気」のようなものである。

ひとたび，電気設備の絶縁が破壊して停電事故を引き起こすと，社会的波及は大きく，企業の経済的損失は甚大なものとなる。したがって，電気設備のメンテナンスは，社会的にも企業的にも重要であり，絶縁診断に関する技術の修得は意義深い。

電力用の電気設備は，電気的には共通して高電圧が課電されている。しかし，機械的には発電機や電動機などつねに動いている回転機や，変圧器やケーブルのように停止している静止器，さらにときどき作動する開閉装置などさまざまである。したがって，電気設備はそれぞれの目的に合った仕様により，形や大きさなどの構造が異なり，適用される材料も異なっている。そして，各電気設備の絶縁材料は，製造年代や電圧階級ごとに変遷を遂げている。天然材料から人工材料へ転換し，さらに高度に複合化して絶縁設計も変更となっている。一方，設計精度の向上により絶縁材料の厚さは薄くなったが，過負荷時の絶縁耐力は低下し，電気設備の寿命も短くなった。これら絶縁材料の変化に伴い，劣化部位や劣化モードが変わる場合があり，適用する絶縁診断も変更が必要となっている。

このような電気設備において，その絶縁診断を理解するには，対象とする設備の構造や絶縁材料の特性，さらには劣化メカニズムなどの専門知識が必要である。これらの知識を得るためには，電気設備の絶縁診断に関する技術を体系的にまとめた教本が必要となる。残念ながら現在，絶縁診断に関する出版物は

少なく，特にこれらを初めて理解しようとする，技術者や学生にとっての良書はほとんどない。かつては，速水敏幸先生の著書『電気設備の絶縁診断』が出版され，多くの技術者が入門書として活用していた。著者らもこの本を読み，絶縁診断技術の修得に役立てていたが，すでに絶版となっている。速水先生が執筆されてからすでに20年以上経ち，その間に絶縁診断技術も大きく進歩している。このようなことから，著者らは電気設備の絶縁診断に関する入門書として，新たに本書を執筆することにした。

本書の対象者は電気主任技術者や保全技術者を目指す人たちで，特に一般企業の電力ユーザや電力会社の保守・点検従事者，電気設備メーカの設計者，メンテナンス会社の技術者らで，大学の博士前期・後期課程におけるテキストとしても活用できる。また，本書は絶縁診断技術に関する実用書やハンドブックなどの記載内容をよく理解するために，できるだけ専門用語や絶縁診断のポイントをわかりやすく解説している。

電気設備にとって適切な絶縁試験方法を選択し，精度の高い診断を行うためには，多くの現場経験も必要で，技術者の育成には長い年月を要することになる。それらを軽減するために，本書は著者らが電気設備の絶縁診断の現場において，見いだした経験を主体としてまとめたものである。

1章（江原由泰）では絶縁劣化診断の基礎として，絶縁材料の特性や劣化の要因，各電気設備に共通する代表的な診断技術などを解説した。2章（末長清佳）では，各電気設備の絶縁構造と劣化現象や診断技術の最新動向，そして絶縁抵抗試験の注意事項なども解説した。3章（江藤計介）では，実際に起こったトラブル事例を基に，現場で適用されている絶縁診断方法を解説し，絶縁劣化以外のトラブル事例も紹介している。さらに，各章には絶縁診断に関係する豆知識や，著者らが不思議に思ったことをコラムとして記載している。

2022年10月

著 者 一 同

本書に出てくる製品名は，各社の商標または登録商標です。本書では，™，®マークは明記しておりません。

目　　次

1. 絶縁劣化診断の基礎

1.1　絶　縁　材　料……1
1.1.1　絶縁材料の特性……1
1.1.2　気体絶縁材料……5
1.1.3　液体絶縁材料……8
1.1.4　固体絶縁材料……9
1.1.5　複　合　絶　縁……11
1.1.6　絶　縁　破　壊……13
1.2　劣化の要因……15
1.2.1　電気的劣化……16
1.2.2　機械的劣化……16
1.2.3　熱　的　劣　化……17
1.2.4　環境的劣化……18
1.2.5　よくある劣化現象……19
1.2.6　部分放電劣化……23
1.3　絶縁劣化診断（各機器に共通する代表的な診断技術）……27
1.3.1　直　流　特　性……29
1.3.2　交　流　特　性……32
1.3.3　部分放電特性……34
1.3.4　ガ　ス　分　析……40
1.3.5　オフライン診断，オンライン診断……42

2. 電力機器・ケーブルの絶縁診断

2.1 電力ケーブル……44
2.1.1 電力ケーブルの絶縁構造と劣化……44
2.1.2 電力ケーブルの事故統計……50
2.1.3 電力ケーブルの診断技術……50
2.1.4 電力ケーブルの故障点標定技術……62
2.2 変　圧　器……65
2.2.1 変圧器の絶縁構造と劣化……65
2.2.2 変圧器の事故統計……67
2.2.3 変圧器の診断技術……67
2.3 回　転　機……76
2.3.1 回転機の構造と劣化……76
2.3.2 絶縁診断技術……78
2.4 ガス絶縁開閉装置……90
2.4.1 ガス絶縁開閉装置の絶縁構造と劣化……90
2.4.2 GIS の事故統計……92
2.4.3 GIS の診断技術……92
2.5 遮断器および配電盤……94
2.5.1 絶　縁　抵　抗……94
2.5.2 部　分　放　電……96
2.5.3 化学的絶縁劣化診断法……103

3. 電気設備のトラブルと診断の実際

3.1 ケ　ー　ブ　ル……105
3.1.1 ケーブルの現場におけるトラブル事例……105
3.1.2 ケーブルの劣化要因と劣化プロセス……110
3.1.3 ケーブルの現場における診断方法……113
3.2 変　圧　器……118

3.2.1　変圧器の現場におけるトラブル事例 …… 118
3.2.2　変圧器の劣化要因と劣化プロセス …… 121
3.2.3　変圧器の現場における診断方法 …… 123
3.3　回　　転　　機 …… 128
3.3.1　回転機の現場におけるトラブル事例 …… 128
3.3.2　回転機の劣化要因と劣化プロセス …… 132
3.3.3　回転機の現場における診断方法 …… 137
3.4　ガス絶縁開閉器 …… 139
3.4.1　ガス絶縁開閉器の現場におけるトラブル事例 …… 139
3.4.2　ガス絶縁開閉器の劣化要因と劣化プロセス …… 142
3.4.3　ガス絶縁開閉器の現場における診断方法 …… 146
3.5　遮断器および配電盤 …… 148
3.5.1　遮断器および配電盤の現場におけるトラブル事例 …… 148
3.5.2　遮断器および配電盤の劣化要因と劣化プロセス …… 151
3.5.3　遮断器および配電盤の現場における劣化診断技術 …… 154

引用・参考文献 …… 158
索　　　　引 …… 162

1 絶縁劣化診断の基礎

電気設備の寿命を決定する要因の一つは絶縁材料の劣化である。劣化は，長期間にわたり電気設備を稼働して生じる現象である。絶縁材料は仕様により選択されるため，その種類は多く，電気設備ごとに製造年代や電圧階級によって異なる場合がある。絶縁材料自体やその構造，そして稼働時のストレスによっても，劣化の形態は変化する。また，電気設備の長期稼働により劣化が顕在化することがあり，設計時には想定しない劣化が発生する場合がある。絶縁材料の劣化状態を的確に把握するには，対象となる電気設備に使用されている絶縁材料の特性をよく理解し，適切な絶縁劣化診断を適用することが重要である。

1.1 絶 縁 材 料

電気設備に使用されている絶縁材料は，その形態から気体，液体，固体の 3 種類に分類される。実際には，3 種類の絶縁材料を組み合わせた複合絶縁体（複合絶縁材料）として用いることが多い。

1.1.1 絶縁材料の特性

絶縁材料には電気を流さず電圧を維持する，絶縁性の特性がある。ただし，絶縁体に絶縁限界以上の高電界が加わると，絶縁性能を維持できずに絶縁破壊が生じる。大気圧空気において，平行平板電極のような電界の分布が一様な平等電界で，電極間隔が 1 cm 程度の場合，絶縁破壊電界は約 30 kV/cm である。また，針–平板電極のような電界の分布が異なる不平等電界では約 5 kV/cm で

ある。一方，絶縁破壊以下の電界を長期間，絶縁材料に課電しても，絶縁性能が低下する劣化現象が生じる。この絶縁劣化現象については，1.2 節で述べる。

さらに，絶縁材料には電荷を蓄える誘電性の特性を持つ。絶縁体に電圧が印加されると，絶縁体中の正または負の電荷が移動する誘電分極が生じる。誘電分極には，**図 1.1** のような電子および原子が変位する変位分極と，双極子が配向する配向分極がある。物質中の原子に電界が加わったとき，原子核より軽い電子が電界によりプラスの方向に変位し，電子の分布が偏って分極が生じる。これが図（a）の電子分極である。また，正および負極性の原子が変位する現象が図（b）の原子分極（イオン分極）である。一方，分子内で双極子が存在する場合，双極子が電界方向に配向するために図（c）の配向分極が生じる。その他分極には，界面分極や空間電荷分極が見られることもある。

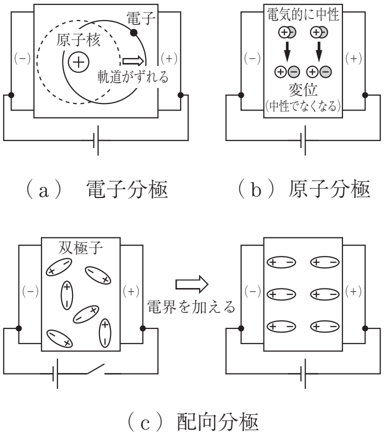

図 1.1　誘電分極

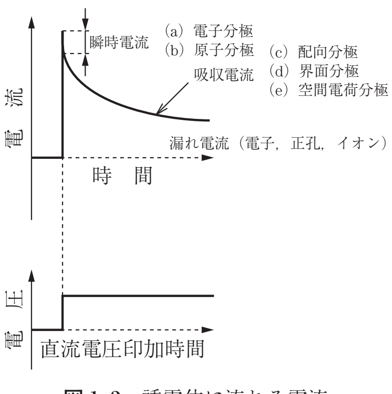

図 1.2　誘電体に流れる電流

誘電体に直流ステップ電圧を印加すると，**図 1.2** に示すような電流が流れる。電子や原子が関与する変位分極は時間応答が速く，瞬時電流となる。その後，比較的に時間応答が遅い配向分極などによる吸収電流が流れる。これらの分極による電流が終了すると，定常的な漏れ電流だけが流れる。この直流漏れ電流を計測した絶縁劣化試験法については，1.3.1 項で述べる。

絶縁材料に要求される特性には電気的特性，機械的特性，熱的特性，環境を

含む物理化学的特性などがある。主要な絶縁材料の基礎特性を**表 1.1**[1)]†に示す。絶縁材料には気体や液体，固体の形態があり比重はさまざまであるが，比誘電率は低く，誘電正接は非常に小さく，抵抗率が非常に大きいことが特徴である。これら絶縁材料の特性を測定することにより，電気設備の劣化状態を評価することができる。

コラム 1.1　空間電荷とは何か？

空間電荷は，絶縁体の内部に正極性または負極性の，どちらかに偏って存在する電荷のことである。空間電荷が絶縁体内に存在すると，その電荷の周辺では電界が形成される。この空間電荷は，絶縁体内の電界分布を歪ませることになる。つまり，外部から印加される電界よりも電界が強調されたり，緩和されたりする。そのため空間電荷は，絶縁体の電気伝導現象や絶縁破壊現象に大きく影響を及ぼすことがある。

気体中の放電現象では，電子が気体分子に衝突してイオンが発生する。イオンは電子に比べて移動速度が遅いため，放電空間に残留し空間電荷を形成する。高分子絶縁物に挿入した針電極に直流高電圧を印加すると，針電極と同極性の空間電荷が針電極近傍に蓄積する。十分な空間電荷が蓄積した状態で，針電極を接地すると，針電極先端から電気トリーが発生する。このトリーは接地トリーと呼ばれている（**図**参照）。

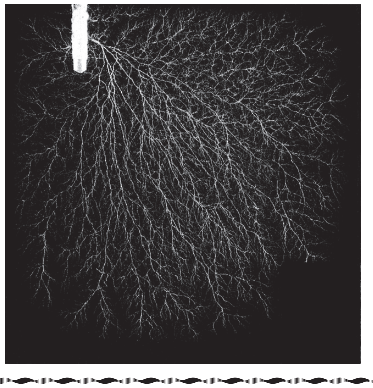

図　電子線照射により空間電荷を蓄積した後の接地トリー

† 肩付き数字は，巻末の引用・参考文献番号を表す。

コラム 1.2　火花放電と開閉サージ

火花放電（**図**参照）は気体が電子の増倍作用によって，非常に短時間に導電率の高い電離プラズマとなり，電極間を短絡する現象であり，フラッシオーバともいわれている。平行平板電極のような平等電界下の大気中で，ギャップ 1〜2 cm とすると，火花放電の発生する電界の強さは 29.0〜31.2 kV/cm である。この値は覚えやすく，「常温における大気中の火花放電は約 30 kV/cm で生じる」とよくいわれる。しかしながら，ギャップが 1 mm では約 46 kV/cm，0.1 mm では 95 kV/cm と，ギャップが狭くなると火花電圧は徐々に高くなることに留意する必要がある。

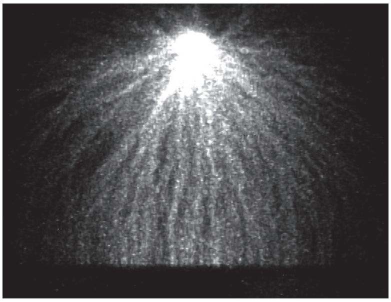

図　火花放電

スイッチやリレーなどのオン・オフ時に，火花放電が発生する場合がある。急激な電流変化と回路や配線のインダクタンスやキャパシタンスにより，接点に誘発される過渡的な異常電圧を開閉サージと呼ぶ。特に，遮断時の無負荷変圧器の励磁電流などを，電流零点前に強制的に遮断した場合，di/dt がきわめて大きくなるため，$L\,(di/dt)$ で定まる大きな過電圧が発生する。このサージ電圧のため，スイッチの接点間で火花放電が生じたり，インダクタンスと接点の浮遊静電容量による大きな減衰振動電流によって，熱や電磁波を放出したりすることがある。

表 1.1　絶縁材料の基礎特性[1)]

絶縁材料	比重〔g/mL〕	比誘電率	誘電正接（$\times 10^{-4}$）	体積抵抗率〔Ω·cm〕
SF_6	6.1×10^{-3}	1	−	−
絶縁油（鉱油）	0.88	2.2	10	7.6×10^{15}
クラフト紙（油浸）		3.5		
プレスボード（油浸）		4.4		
エポキシ樹脂（アルミナ充填）	2.3〜2.5	5.9〜6.2	20〜50	10^{16}
エポキシ樹脂（シリカ充填）	1.7〜1.8	3.8〜4.6	30〜200	10^{16}
長石磁器	2.3〜2.5	5.0〜6.5	170〜250	10^{13}〜10^{14}
XLPE	0.93	2.2〜2.6	2〜10	$>10^{16}$
マイカ	2.7〜3.1	6〜8	50	10^{14}〜10^{15}

1.1.2 気体絶縁材料

空気は優れた絶縁材料の一つである。先に述べたように，大気圧下で電極間隔が 1 cm 程度であると約 30 kV/cm の絶縁性能を持つが，絶縁間隙が狭い場合は絶縁性能が著しく低下する。**図 1.3** はパッシェン曲線（Paschen curve）

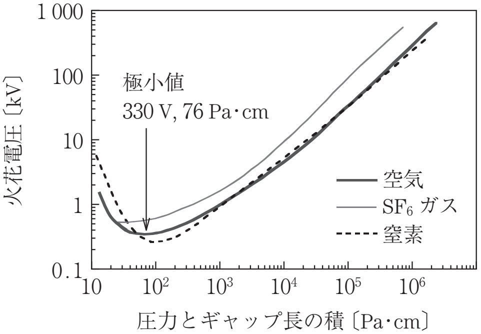

図 1.3　パッシェン曲線

コラム 1.3　SF_6 ガスは天然には存在しない

SF_6（六フッ化硫黄）は S 原子を中心として，6 個の F 原子が完全に対称に配置した正八面体の構造である（**図**参照）。SF_6 は，天然には存在しない。1900 年にフランスの化学者である Moissan と Lebeau が初めて合成した。その後 1937

索　　　引

【あ】

アスファルトコンパウンド
　絶縁　81, 135
アセチレン　40
アレニウスの式　17

【い】

位相特性　36
一酸化炭素　41

【え】

エステル油　9
エタン　40
エチレン　40
エポキシ含浸絶縁　81, 135
エポキシ樹脂　11, 12

【お】

オゾン　25
オフライン診断　42
オンライン診断　42
オンライン絶縁診断　115

【か】

外導水トリー　21
開閉サージ　4
化学トリー　108
かご形誘導電動機　88
ガスクロマトグラフ　68
ガス絶縁開閉装置　7
ガスパターンによる診断
　124
過渡接地電圧　38, 71
可燃性ガス総量　41
ガラス繊維強化プラス
　チック　12
環境的劣化　18
乾式架橋　45

【き】

機械的劣化　16
気泡的破壊　15
吸収電流　2
橋絡水トリー　21

【く】

空間電荷　2, 3
グリースの固着　152
群小部分放電　24

【け】

ケーブルの寿命　116
原子分極　2
検出インピーダンス　35

【こ】

高周波 CT　35, 71
合成ゴム　11
交流重畳法　57
交流電流　28, 33
交流電流試験　83, 138
故障点標定　62
コルゲートケーブル　46
コロナ放電　14, 15

【さ】

酸化度　68
残留電荷　51
残留電荷法　53

【し】

磁　器　10
湿式架橋　45
遮水層付きケーブル　46
遮蔽銅テープ　106, 112
重合度　71
充電電流　31, 32
周波数応答解析　73
シュリンクバック　49, 107
循環電流による過熱　124
瞬時電流　2
純熱的過程　15
硝　酸　136
焼　成　62
食　害　109
シリコーン油　9
真空加圧含浸　76
真空遮断器　148
真空絶縁　7
真空電磁接触器　148
真空バルブ　155

【す】

水　素　40
水　分　124
ストリーマ　14
スロット放電　129

【せ】

成極指数　30, 80
静電容量試験　138
絶縁紙　10
絶縁スペーサ　91, 143
絶縁特性試験法　27
絶縁破壊　1, 13, 118
絶縁破壊電圧　7, 122
絶縁物の余寿命推定技術　155
絶縁油　8, 121
接触抵抗　110
接触不良　124
線形 SVM による様相診断
　方法　125
全酸価　68, 124
全路破壊　8

【そ】

層間短絡　123
側帯波　131
損失電流　31, 53

【た】

体積抵抗率　124
耐電圧試験法　27
多重接地抵抗計　59
炭酸カルシウム　148
単心ケーブル　107
弾性波　72

【ち】

超音波　97
直流重畳法　58
直流特性試験　138
直流ブリッジ法　58
直流漏れ電流　28, 30, 51, 113

【て】

抵抗率　3
テープシールド方式　46
電気的劣化　16
電気トリー　3, 19
電気・機械的過程　15
電子的過程　15
電子的破壊　15
電磁波　35, 99
電子分極　2
電流急増電圧　34, 83
電流スペクトル診断　130
電流増加率　34, 83

【と】

等価過熱面積を用いた診断方法　125
特定ガスによる診断　125
トラッキング　18, 22, 108
トリプルジャンクション　26
トリプレックスケーブル　107
トレンド分析による様相診断　125

【な】

内導水トリー　21
ナフテン系油　8

【に】

二酸化炭素　41

【ね】

熱的劣化　17

【は】

配向分極　2
バー切れ　88, 131
パッシェン曲線　5
パラフィン系油　8
半導電層　12, 109

【ひ】

引張強度　41
火花放電　4, 7
比誘電率　3
表面抵抗　28, 29

【ふ】

フェノール樹脂　11
複合絶縁材料　11
ブッシングタップ　71
部分放電　8, 23, 28, 34
部分放電試験　138
フラッシオーバ　4
フルフラール　42
プレスボード　10
分解ガス　28, 40
分解ガスセンサ　93

【へ】

平均重合度　42, 125
変位分極　2

【ほ】

ボイド放電　23, 36, 37
ボウタイ状水トリー　21
放電電流　31
ポリアミドイミド　11
ポリイミド　11
ポリエステル樹脂　153
ポリエチレン　11
ポリ塩化ビニル　11
ポリ塩化ビフェニル　9

【ま】

マイカ　9, 10
マイカテープ　12
マレーループ法　62

【み】

未橋絡水トリー　21
水トリー　21, 105
密閉形機器　123

【む】

無電圧タップ切替器　118

【め】

メタン　40

【も】

漏れ電流　2, 31, 114, 138

【ゆ】

誘電吸収率　80
誘電正接　3, 28, 32, 33, 138
誘電分極　2
油浸絶縁　13
油浸絶縁紙　122
油中ガス　28, 40
油中ガス分析　124

【よ】

様相診断　124

【ら】

ラミネート紙　12

【れ】

レジンリッチ　76

【わ】

ワイヤシールド方式　46

【A】

AE センサ 35, 71, 93
AR 80
ARM 法 64

【C】

CBM 42
C-GIS 90
CO 41
CO_2 41
CV ケーブル 11

【D】

DFR 75

【E】

E–E タイプ 47
E-T タイプ 48

【F】

FDTD 101
FRA 74

【G】

GCB 140
GIS 7, 142

【H】

HF 40

【I】

IRC 法 55

【M】

MCSA 88

【N】

NO_x 25

【O】

O_3 137, 147

【P】

PD パターン 38
PI 31, 80
PRPD 86

【S】

SF_4 40
SF_6 5, 7, 40
SO_2 40

【T】

tanδ 33, 56, 81
TBM 42
TCG 41
TDR 法 63
TEAM ストレス 77
TEV 38, 71
TF マッピング 89
T–T タイプ 47

【U】

UHF 71
UHF 法 92

【V】

VLF–tanδ 法 56
VCB 148
VMC 148
VPI 76

【X】

XLPE ケーブル 44

【ギリシャ文字】

ΔI 34

――著 者 略 歴――

江原　由泰（えはら　よしやす）

1979 年　群馬大学工学部合成化学科卒業
1980 年　三恵技研工業株式会社勤務
1984 年　武蔵工業大学（現 東京都市大学）技術員
1996 年　博士(工学)(武蔵工業大学)
1998 年　武蔵工業大学講師
2002 年　武蔵工業大学助教授
2002 年
～03 年　Ford Research Laboratory 客員研究員
2012 年　東京都市大学教授
2022 年　東京都市大学名誉教授

江藤　計介（えとう　けいすけ）

1974 年　出光興産株式会社入社
1993 年～
2004 年　出光興産株式会社徳山工場 電気主任技術者
2006 年　出光興産株式会社設備管理センター 電気分野上席主任部員
2014 年　出光興産株式会社生産技術センター 電気分野シニアエンジニア
　　　　　現在に至る

【資格】技術士（電気電子），IEEJ プロフェッショナル

電気主任技術者時代は電気ユーザー会である山口県電力協議会技術部会委員長などを歴任し全国の電気関係ユーザー会と連携し電気主任技術者の育成や保安技術向上のための啓蒙をしている。

本社勤務時代は社内各事業所の電気技術の向上に努めた。社外では電気学会技術調査専門委員会活動や日本電気協会での講演を数多く行い，国内の電気保安技術向上に努めている。

末長　清佳（すえなが　きよか）

1976 年　川崎製鉄株式会社（現 JFE スチール株式会社）入社
2007 年
～15 年　JFE スチール株式会社西日本製鉄所(倉敷地区)電気主任技術者
2015 年　一般社団法人電気学会プロフェッショナル認定
2021 年　一般社団法人電気科学技術アカデミー代表理事
　　　　　現在に至る

JFE スチール勤務時代は，受変電設備や発電設備の建設から保守・運用まで幅広く担い，海外の診断技術導入や，診断装置の開発も積極的に展開してきた。

退職後は，老朽化が進む電気設備と格闘する若い電気技術者を側面支援するべく電気科学技術アカデミーを創設し，絶滅危惧種と揶揄される電気技術者の保護活動に力を注いでいる。

電気設備の絶縁診断入門

Introduction to Insulation Diagnosis of Electrical Equipment

© Yoshiyasu Ehara, Keisuke Etoh, Kiyoka Suenaga 2022

2022 年 11 月 15 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　者　江　原　由　泰
江　藤　計　介
末　長　清　佳

発 行 者　株式会社　コ ロ ナ 社
代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所　新 日 本 印 刷 株 式 会 社
製 本 所　有限会社　愛 千 製 本 所

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発 行 所　株式会社　**コ　ロ　ナ　社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-00985-9　C3054　Printed in Japan　（齋藤）

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。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。