

バーチャルリアリティ学ライブラリ

2

# 神経刺激インタフェース

日本バーチャルリアリティ学会 編

青山一真 編著

コロナ社



## バーチャルリアリティ学ライブラリ出版委員会

---

|      |       |                          |
|------|-------|--------------------------|
| 委員長  | 清川 清  | (奈良先端科学技術大学院大学, 博士 (工学)) |
| 副委員長 | 北崎 充晃 | (豊橋技術科学大学, 博士 (学術))      |
| 委員   | 青山 一真 | (群馬大学, 博士 (情報科学))        |
|      | 山岡 潤一 | (慶應義塾大学, 博士 (政策・メディア))   |

---

(2023年11月現在)

## 編著者・著者一覧

---

|     |           |                     |       |          |
|-----|-----------|---------------------|-------|----------|
| 編著者 | 青山 一真     | 1章, 3.7-3.8節, 3.11節 |       |          |
| 著者  | 安藤 英由樹    | 2章                  | 玉城 絵美 | 3.1-3.2節 |
|     | Yem Vibol | 3.3節                | 高橋 哲史 | 3.4節     |
|     | 中村 裕美     | 3.5節                | 前田 太郎 | 3.6節     |
|     | 武見 充晃     | 3.9節                | 雨宮 智浩 | 3.10節    |
|     | 河野 通就     | 4章                  | 北尾 太嗣 | 5章       |

---

## 刊行のことば

今日、バーチャルリアリティ（VR, virtual reality）は誰もが知り、多くの人々が使う技術となった。特に、ヘッドマウントディスプレイ（HMD, head mounted display）を用いたゲームやスマートフォン向けの360°動画などは広く普及しつつある。安価なHMDが普及し始めた2016年はいわゆる「VR元年」などと呼ばれ、2020年からのコロナ禍ではリモートで現実さながらの活動を支援するVR技術にさらに注目が集まった。現在では、医療、建築、製造、教育、観光、コミュニケーション、エンタテインメント、アートなど、さまざまな分野でVRの活用が進んでいる。VRは私たちの社会生活に少しずつ、かつ確実に浸透しつつあり、今後はメタバースのような社会基盤の基幹技術としてさらに重要度を高めていくと考えられている。

The American Heritage Dictionaryによれば、バーチャル（virtual）とは「みかけや形は現物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり現物であること」とされており、これがそのままVRの定義を与える。端的に言えば、VRとは「現実のエッセンス」である。すなわち、VRは人間のありとあらゆる感覚や体験、その記録、再生、伝達、変調などに関わるものである。一般にイメージされやすい「HMDを用いたリアルな視覚体験」は、きわめて広範なVRのごく一部を表現しているにすぎない。

日本バーチャルリアリティ学会は、黎明期のVRを育んだ研究者が中心となって「VR元年」のはるか20年前の1996年に発足した。以来、学問としてのVRは計算機科学、システム科学、生体工学、医学、認知心理学、芸術などの総合科学としてユニークな体系を築いてきた。学会発足から14年後の2010年に刊行された『バーチャルリアリティ学』は、当時の気鋭の研究者が総力を挙げて執筆したものである。同書では、VRの基礎から応用までを幅広く取り

扱っている。「トピックや研究事例は最新のものではないが、本質的あるいは効果としてはVRを学ぶこと」ができ、時代によって色褪せることのない「VRのエッセンス」が詰まっている。しかしながら、近年のVRの進展はあまりにも目覚ましく、『バーチャルリアリティ学』を補完し、最新のトピックや研究事例をより深く取り扱う書籍への要望が高まっていた。

「バーチャルリアリティ学ライブラリ」はそのような要望に応えることを目的として企画された。『バーチャルリアリティ学』のようにさまざまなトピックをコンパクトに一括して取り扱うのではなく、分冊ごとに特定のトピックについてより深く取り扱うスタイルとした。これにより、急速に発展し続けるVRの広範で詳細な内容をタイムリーかつ継続的に提供するという難題を、ある程度同時に解決することを意図している。今後、バーチャルリアリティ学ライブラリ出版委員会が選定したさまざまなテーマについて、そのテーマを代表する研究者に執筆いただいた分冊を順次刊行していく予定である。

くしくも『バーチャルリアリティ学』の刊行からちょうど再び14年が経過した2024年に、委員や著者、また学会の協力を得て「バーチャルリアリティ学ライブラリ」の刊行を開始できる運びとなった。今後さらにVR分野が発展していく様子をリアルタイムで理解する一助となり、VRに携わるすべての人々の羅針盤となることを願う。

2024年1月

清川 清

# ま え が き

本書は日本バーチャルリアリティ学会編のバーチャルリアリティ学ライブラリの第2巻として、同学会研究委員会の1つである、神経刺激インタフェース研究委員会にて企画した書籍である。この書籍では、VRの中でも先端的な内容である神経刺激インタフェースという分野を取り扱っている。

お読みいただくにあたり、できるだけ本書のみで神経刺激に関する基礎研究から実応用までおおよそ理解できるように構成した。一方で、バーチャルリアリティ（VR, virtual reality）という近年では耳なじみとなってきた技術・学術分野において、神経刺激がどのように研究されて発展してきたのか、現在の神経刺激技術はVR分野においてどのように考えられているのかといった、神経刺激以外の技術との対比の関係はVR技術に精通しなければ理解することが難しいだろう。神経刺激には刺激するための目的があり、その目的を達成するためには神経刺激を利用する利点と欠点が存在する。読者諸氏の神経刺激への理解を深め、今後神経刺激の研究や利活用を検討する際には是非とも『バーチャルリアリティ学』をご一読いただきたい。

昨今ではヘッドマウンテッドディスプレイ（HMD, head mounted display）が安価で販売されるようになり、さまざまなコンテンツも充実してきていることから、VRという用語からは頭にかぶって使う装置を思い浮かべる方が多いのではないだろうか。一方で、VRを題材にしたアニメや小説、漫画などのコンテンツも数多く見受けられるようになってきている。そうしたコンテンツの中には、神経刺激を利用して高度なVR体験を実現しているという「背景設定」がなされており、神経刺激が未来のVRやAR（拡張現実, augmented reality）技術と目されているといってもよいだろう。このような背景設定をもつコンテンツとして有名なアニメーション作品としては、『攻殻機動隊』が挙げられる。

比較的新しい作品としては『ソードアート・オンライン』や『アクセル・ワールド』が明示的に神経刺激を使っている設定であるといえる。どの作品も非常に素晴らしい作品であるので、本書読者には是非ともご覧いただくことをお勧めする。

このようにSF (science fiction) 作品の世界でも取り上げられてきている神経刺激手法がこれまでどのようにVR分野にて発展し、どのように利活用されてきたのかを、本書では詳しく解説している。本書読者には神経刺激のこれまでを本書で学び、神経刺激インタフェースの未来を考える一助としていただきたい。

VRにおいて、感覚提示や感覚変容の技術が非常に重要であることは、本書読者は既にご理解いただいていることと思う。神経刺激インタフェース研究においては、感覚提示ディスプレイ技術として利用されている例が多く見受けられる。最もポピュラーなものとしては指や手などの皮膚上に電極を設置して電流を印加することで触覚を生起させるものだろう。経皮電気刺激のもつ能力は感覚の提示だけではない。近年では製品としてもよく見かけるようになってきたが、筋電気刺激は筋肉を電気刺激によって収縮させることで、運動を誘発する技術や、脳を電気刺激や磁気刺激によって刺激することで脳機能を高める刺激手法などが存在する。さらに、唾液腺などの漿液腺分泌に介入する電気刺激の研究なども存在する。

これらの多数の神経刺激はVR分野以外に利活用先があり、各分野で利用される刺激手法に関する知見が集約され、書籍やレビュー論文としてまとめられている。一方で、VR分野においては神経刺激による感覚提示手法や運動誘発手法に関してまとめられた書籍などはない。これは、利用される神経刺激が多種多様で、応用先も刺激の特性に合わせて多様だからと考えられる。このため神経刺激を広範に扱う研究に取り組むハードルは高いといえるだろう。本書が神経刺激インタフェースの研究を志す学生・研究者諸氏の手助けになる書籍となればよいと考えている。

また、神経刺激インタフェースの研究や開発を行う際に問題となりえるの

が、その安全性である。安全性に関する知見は実施されたこれまでの研究によって日々更新されている。一方で、神経刺激インタフェース研究をこれから始めようと考えている学生・研究者諸氏には、ある程度専門の知識がなければ理解しにくいところもあるだろう。本書では神経刺激において世界的に受け入れられつつある安全性のガイドラインについても詳しく解説している。ご注意いただきたいのは、神経刺激はそのメカニズムが完全には解明されていないことや、手法によっては侵襲性が高いと考えられるものがあること、長期的な影響がわからないことから、本書で取りあげる既存のガイドラインが必ずしも安全性を保障するものではないということである。

神経刺激と一口に言っても、さまざまな神経刺激手法がある。最もわかりやすいものは電気刺激だろう。電気刺激はその名のとおりに、身体に電圧や電流を印加して神経系に働きかける方法である。電気刺激以外にも、磁気刺激や超音波、ひいては薬剤を使った刺激も神経刺激ということができるだろう。本来であれば神経刺激はこれらすべてを網羅した技術領域であるが、本書はVRに関連した神経刺激を扱うものとする。VRにおいてよく使われる神経刺激としては、やはり電気刺激が他の刺激手法と比較してはるかに多いだろう。これは、電気刺激がコストの面でも扱いやすさの面でも、刺激装置のサイズの面でも他の手法より優れているためである。このため、本書では一部電気刺激以外の手法も解説するが、多くは電気刺激を対象としている。また、電気刺激もさらに細かく分類することができる。針などを電極として利用するために身体に挿入して刺激する侵襲的な手法と皮膚上にゲルや皿電極を設置して電流を印加する非（低）侵襲な手法である。非侵襲な手法を経皮電気刺激と呼ぶ。非侵襲な手法で神経を刺激することが可能であることから、VRやHCIの分野では非侵襲な経皮電気刺激が主として利用される。よって、本書でも経皮電気刺激による神経刺激インタフェースについて解説している。なお、経皮電気刺激は非侵襲とされる場合と低侵襲とされる場合があるが、本書では非侵襲として扱うものとする。

本書を通して、神経刺激インタフェースへの興味をもち、読者諸氏の勉学や

研究開発の推進に寄与できればと願っている。

末筆となったが、本書を執筆するにあたり、多くの協力をしてくださった日本バーチャルリアリティ学会の関係者の皆様に深く感謝を申し上げる。また、本書内の図を作成してくださった、大阪芸術大学芸術学部アートサイエンス学科の井上七海氏、仁田脇珠惟氏の両氏にもここで深く感謝申し上げます。

2024年1月

著者を代表して 青山 一真

### **神経刺激インタフェース研究委員会**

神経刺激インタフェース研究委員会は2019年より、日本バーチャルリアリティ学会の研究委員会として発足した委員会である。神経刺激インタフェース研究委員会は、近年VR分野やヒューマンコンピュータインタラクション(HCI, human computer interaction)において、電気刺激や磁気刺激、超音波刺激等の神経刺激を利用した研究や作品が増えている事や、脳科学分野においても経頭蓋直流電気刺激法(TDCS, transcranial direct current stimulation)等のように脳を非侵襲に刺激する手法を利用した研究が増えてきている事を受け、それらの研究を推進し、安全に研究を実施できるような知見・ノウハウの共有、安全性や倫理に対する啓発などを目的として設立された。

# 目 次

## 第 1 章 神経刺激と VR の歴史

|     |                     |   |
|-----|---------------------|---|
| 1.1 | 電気刺激の歴史を学ぶ重要性       | 1 |
| 1.2 | 電気の発見               | 1 |
| 1.3 | ライデンびんの登場と静電気研究の発展  | 2 |
| 1.4 | ガルヴァーニの発見と動物電気      | 4 |
| 1.5 | 神経刺激装置の起こり          | 5 |
| 1.6 | バーチャルリアリティへの神経刺激の応用 | 7 |

## 第 2 章 侵襲性と非侵襲性の刺激

|     |                              |    |
|-----|------------------------------|----|
| 2.1 | 侵襲性神経刺激とその研究の実施              | 11 |
| 2.2 | 感覚受容細胞や軸索末端に対する襲性神経刺激インタフェース | 12 |
| 2.3 | 感覚や運動の神経軸索に対する侵襲性神経刺激インタフェース | 15 |
| 2.4 | 脳神経に直接接続する侵襲性神経刺激インタフェース     | 16 |

## 第 3 章 非侵襲性刺激

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 3.1   | 非侵襲性刺激の総論      | 20 |
| 3.1.1 | 非侵襲性刺激の定義      | 20 |
| 3.1.2 | 末端器官や末梢神経系への刺激 | 21 |

|            |                     |           |
|------------|---------------------|-----------|
| 3.1.3      | 中枢神経系への刺激           | 24        |
| <b>3.2</b> | <b>筋電気刺激</b>        | <b>25</b> |
| 3.2.1      | 筋電気刺激の定義と原理         | 25        |
| 3.2.2      | 侵襲性と非侵襲性の筋電気刺激の例    | 27        |
| 3.2.3      | 筋電気刺激による身体所有感への影響   | 28        |
| <b>3.3</b> | <b>触覚電気刺激</b>       | <b>31</b> |
| 3.3.1      | 触覚電気刺激の概要           | 31        |
| 3.3.2      | 指先の触覚を提示するディスプレイ技術  | 31        |
| 3.3.3      | 皮膚電気刺激              | 32        |
| 3.3.4      | 刺激の安定化              | 38        |
| 3.3.5      | 皮膚電気刺激の応用           | 40        |
| <b>3.4</b> | <b>腱電気刺激</b>        | <b>42</b> |
| 3.4.1      | 腱がもたらす感覚と反応         | 42        |
| 3.4.2      | 骨格筋周辺の自己受容器の構造と機能   | 43        |
| 3.4.3      | 腱への刺激と効果            | 46        |
| <b>3.5</b> | <b>味覚電気刺激</b>       | <b>49</b> |
| 3.5.1      | 味覚の受容とおいしさ          | 49        |
| 3.5.2      | 味覚電気刺激の基礎           | 53        |
| 3.5.3      | 味覚電気刺激の応用           | 62        |
| <b>3.6</b> | <b>前庭電気刺激</b>       | <b>70</b> |
| 3.6.1      | 前庭電気刺激の概要           | 70        |
| 3.6.2      | GVS がもたらす平衡感覚の神経支配  | 72        |
| 3.6.3      | GVS がもたらす加速度知覚と身体応答 | 73        |
| 3.6.4      | 電流刺激と前庭器官           | 75        |
| 3.6.5      | 身体応答の評価手法           | 80        |
| 3.6.6      | VR 等の感覚提示技術への応用     | 84        |
| <b>3.7</b> | <b>視覚電気刺激</b>       | <b>87</b> |
| 3.7.1      | 視覚電気刺激の概要           | 87        |

|             |                              |            |
|-------------|------------------------------|------------|
| 3.7.2       | 眼 球 の 構 造                    | 88         |
| 3.7.3       | 侵襲性神経刺激による視覚提示               | 89         |
| 3.7.4       | 非侵襲性神経刺激による視覚提示              | 91         |
| <b>3.8</b>  | <b>嗅覚電気刺激</b> .....          | <b>94</b>  |
| 3.8.1       | 嗅覚電気刺激の概要                    | 94         |
| 3.8.2       | 嗅覚の受容と情報伝達                   | 94         |
| 3.8.3       | 中枢神経系への電気刺激                  | 95         |
| 3.8.4       | 末梢神経系への電気刺激                  | 95         |
| <b>3.9</b>  | <b>経頭蓋電気刺激</b> .....         | <b>97</b>  |
| 3.9.1       | 経頭蓋電気刺激の概要                   | 97         |
| 3.9.2       | 経頭蓋直流電気刺激                    | 97         |
| 3.9.3       | 経頭蓋交流電気刺激                    | 100        |
| 3.9.4       | 経頭蓋ランダムノイズ刺激                 | 101        |
| 3.9.5       | VRにおけるTCSの利用例                | 102        |
| 3.9.6       | TCSを用いる際に考慮すべきこと             | 103        |
| <b>3.10</b> | <b>経頭蓋磁気刺激</b> .....         | <b>109</b> |
| 3.10.1      | 経頭蓋磁気刺激の概要                   | 109        |
| 3.10.2      | 刺激部位の同定                      | 111        |
| 3.10.3      | 刺 激 強 度                      | 112        |
| 3.10.4      | 相 関 と 因 果                    | 113        |
| 3.10.5      | 刺激方法の種類                      | 113        |
| 3.10.6      | VRにおけるTMSの利用例                | 115        |
| 3.10.7      | TMSの安全性                      | 116        |
| 3.10.8      | TMSとTCSの比較                   | 118        |
| <b>3.11</b> | <b>漿液分泌に影響を与える電気刺激</b> ..... | <b>119</b> |
| 3.11.1      | 効果器としての漿液分泌腺                 | 119        |
| 3.11.2      | 唾液腺への電気刺激                    | 119        |
| 3.11.3      | 涙の分泌を調整する電気刺激                | 123        |

## 第 4 章 電気刺激の安全性

|                   |             |     |
|-------------------|-------------|-----|
| <b>4.1 電気入力</b>   | <b>の安全性</b> | 124 |
| 4.1.1             | 電気入力の種類     | 125 |
| 4.1.2             | 電気入力の危険性    | 127 |
| 4.1.3             | 電流による影響     | 128 |
| 4.1.4             | 電圧による影響     | 130 |
| 4.1.5             | 周波数による影響    | 130 |
| 4.1.6             | 時間による影響     | 132 |
| 4.1.7             | 経路と身体部位     | 132 |
| <b>4.2 安全のために</b> |             | 133 |
| 4.2.1             | 設計指針        | 133 |
| 4.2.2             | 制約          | 134 |

## 第 5 章 神経刺激の応用

|                        |                  |     |
|------------------------|------------------|-----|
| <b>5.1 神経刺激</b>        | <b>の応用分野</b>     | 136 |
| <b>5.2 XR 技術</b>       | <b>と人間拡張への応用</b> | 137 |
| 5.2.1                  | 視覚電気刺激           | 137 |
| 5.2.2                  | 触覚電気刺激と筋電気刺激     | 138 |
| 5.2.3                  | 味覚電気刺激           | 139 |
| 5.2.4                  | 前庭電気刺激           | 139 |
| <b>5.3 医療・ヘルスケア・美容</b> | <b>への応用</b>      | 140 |
| <b>引用・参考文献</b>         |                  | 142 |
| <b>索引</b>              |                  | 161 |

# 第1章 神経刺激とVRの歴史

## 1.1 電気刺激の歴史を学ぶ重要性

神経刺激がどのように研究され、どのようにバーチャルリアリティの分野に  
応用されてきたのかを知ることは、今後の**神経刺激**の研究開発の方向を考える  
ために非常に重要である。その歴史から、先人の研究者たちが何をどこまで理  
解した状態で、研究に挑んだのか、その研究はどうなったのかを知り、研究を  
どのように遂行すれば成功し、どのようにすると失敗するかを予測できるため  
である。

本書は神経刺激インタフェースを解説するための書籍であるが、多くは電気  
を使った非侵襲な刺激手法である**経皮電気刺激**を対象としている。これは、侵  
襲性や安全性、操作性などさまざまな理由で神経刺激の中では経皮電気刺激が  
バーチャルリアリティ等の分野において盛んに利用されていることによるもの  
である。本章ではこの電気が及ぼす人への効果がどのように研究されてきたの  
か、それが電磁気学の起こりとどのように関連するのかについて概要を解説す  
る。

## 1.2 電気の発見

古来より最も身近にあった電気現象は**雷**であった。雷は雲ができれば見るこ  
とができ、大きな音と強烈な光、時には火災の原因になるものであるため、

人々に恐れられてきた。この雷が「電気現象」であることを人類が解明するためには、(1)他の電氣的な現象の発見と(2)電気を計測する装置の開発が必要とされる。前者は実は紀元前には発見されており、後者は世界初のコンデンサと言われるライデンびんの登場する17世紀を待たねばならない。

人が雷を認知したのはいつ頃であるか、特定は困難であるが、多くの時間を屋内で過ごす現代でさえ雷を見たことのない人は少数であることを考えれば、雷こそが人が最初に認知した電気現象であると言ってよいだろう。雷以外の電気現象として記録に残っている最古のものは、プラトンの報告である。その報告によると紀元前600年ごろにタレスによって、琥珀が軽いものを引き付けるという現象を発見したとされている。つまり、琥珀を擦ると、琥珀にほこりなどが吸い付くことを発見したのである。これは今日では**静電気**と呼ばれている現象であり、字面のとおり電氣的現象であると理解されているが、当時はなぜこのようなことが起こるのかはわからなかったようである<sup>1)†</sup>。

さて、このタレスの発見した現象は確かに雷以外の電氣的現象であるが、電気をその身体で感じた例ではない。身体に積極的に印加された電流を人類が感じた最初の例は、シビレイによる感電であったと考えられる。紀元前4世紀ごろ、アリストテレスはシビレイが人をしびれさせると報告している<sup>1)</sup>。アリストテレス自身がこのシビレイによる電気刺激を体験したかどうかはわからないことや、それ以前に雷に打たれた人類が存在することも大いに考えられるが、記録に残っている人類最初の神経刺激はシビレイによってもたらされたと言ってよいかもしれない。

なお、紀元後50年ごろのローマの医師によれば、シビレイの電気刺激を積極的に利用した治療が行われていたようである<sup>1)</sup>。

### 1.3 ライデンびんの登場と静電気研究の発展

静電気と言えば、空気が乾燥してくるとドアノブでパチパチと火花が散って

<sup>†</sup> 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

触覚を感じたりする現象を読者諸氏は思い浮かべるであろう。電気研究の発展の歴史は静電気から始まり、その後、**ボルタ電堆**の発明によって動電気研究へと発展していく。

**ライデンびん**の発明は静電気がどのような現象なのかを解き明かすための道具であると同時に、電気を持ち運んでさまざまなデモンストレーションを行うためにも役立った。

図 1.1 はライデンびんの概略図である。ライデンびんはガラスびんの内壁と外壁に金属箔を張り付けておき、びんの中には導線としての金属鎖がびんの外までつながっている。外につながっている金属導線に帯電した琥珀等を近づけることで電気（電荷）を溜めることができる。溜めた電気は、びんの外側の金属箔と、内側の金属箔とつながっている金属鎖を電極として使用することで電気を取り出すことができる。例えば、びんの外側の金属箔を片手で触りながら、もう一方の手で内側の金属箔とつながっている電極に触れることで、パチッとした電気による触覚を感じるすることができる。

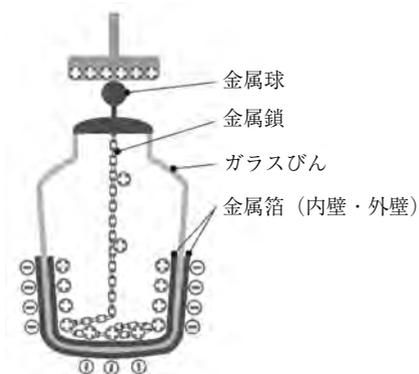


図 1.1 ライデンびんの概略図

このライデンびんの他、物体どうしの摩擦を利用して静電気を作り出す摩擦起電機（本書では解説をしない）の開発によって、実験遊戯といわれるデモンストレーションが当時上流階級の人々の中で流行した。例としては、多くの人に手を繋いでもらい、ライデンびんから電流を流すことで多くの人に触覚（あるいは痛覚）を与えるデモが行われた。日本でもこの実験は阿蘭陀始制エレキ

テル究理原の中で橋本宗吉が述べており、「百人嚇<sup>おどし</sup>」と呼ばれている<sup>1)</sup>。

また他の例では、「まことの愛を示す電気キス」と称し、起電機に触れながらキスをすることで火花が飛び、触覚を感じるといったデモも行われていたようである<sup>1)</sup>。

当時は電気という概念が存在しない（あるいは存在しても非常に限定的）時代であったため、電氣的な現象を利用したこの手のデモが喜ばれたのであろう。

現在の神経刺激研究においても、神経刺激がどのように神経系に働きかけ、どのような現象を作り出すのかはイメージが難しく、多くの体験者に警戒される。一方で、電気の歴史がそうであったように、その現象を突き詰めたときに、インタフェースとしての電気や磁気、その他刺激手法も社会の発展に寄与するものであると筆者らは考えている。

## 1.4 ガルヴァーニの発見と動物電気

神経刺激研究については、ガルヴァーニの発見がその本格的なはじまりと考えられる。ガルヴァーニは1700年代に活躍したイタリアの医師であり物理学者である。ガルヴァーニが神経刺激に関連した最初の発見をした際の状況に関しては諸説あるが、1771年に解剖の実験で使っていたカエルの脚に異なる2種類の金属を接触させると、解剖済みの脚の筋肉が収縮することを発見した。人を対象とした神経刺激ではないが、カエルという生体に対して電流を印加することによって反応を引き出したという意味では、おそらくこの記述が最古のもの1つであろう。ガルヴァーニはこの発見から、生体内の電気によって筋肉が収縮すると結論付け、筋肉を収縮させるこの力を**動物電気**と名付けた。なお、前述の静電気を溜めるライデンびんを使って人に電流を流すことで、触覚を発生させる実験遊戯はこのガルヴァーニの発見よりも数十年早い。

ガルヴァーニは動物電気が生体内で発生するものであると考えていたが、ボルタは異なる金属をカエルの脚を通して触れ合わせることで起こる電気現象で

あると捉えており、両者の間で論争が起こるが、最終的にはボルタ電堆の発明でその決着がつく。

一方で、ガルヴァーニの唱えていた説とは異なるものの、生物の体内ではイオンの移動による電気的な現象が起こっている。例えば、神経細胞は常に静止膜電位として負の電位をもっているし、発火する際には陽イオンを取り込んで電位は正になる。ある意味ではガルヴァーニの提唱した説のように、動物の体内では電気が発生するのである。

ボルタの発明したボルタ電堆とそこから派生する電池は安定した電流が得られるために、電磁気研究や電気化学研究にとどまらず、以降の神経科学研究のための刺激装置としても大いに活躍することになる。

## 1.5 神経刺激装置の起こり

神経刺激は神経の働きを検証するためのツールとして利用されてきた。神経の働きを調べる神経科学研究の領域では、電気刺激や磁気刺激、超音波刺激など、さまざまな神経刺激手法が利用されている。侵襲性の高い刺激を含めると、刺激針を刺入しての電気刺激や、薬剤、レーザー等もあるが、侵襲性に関わらず神経刺激を目的とした刺激としても最も利用されているのは現状でも電気刺激であると言ってよいだろう。

現在、医療用途に限らず電気刺激を利用した製品が市販されている。医療用途の電気刺激装置以外に商品で最も広く普及しているのは腹筋をはじめとするさまざまな筋肉を電気刺激によって収縮させ、トレーニングやダイエット、マッサージに応用する目的の装置であろう。これらの装置では、電流パターンや強度、持続時間などをさまざまに操作することができる。このような任意波形を安定して出力できるようになったのは、トランジスタ等をはじめとする半導体の発展によるものである。

一方で、神経科学研究において電気刺激を利用した研究はすでに1800年代から行われていた。もう少し前の時代にも、ライデンびんや摩擦起電機などの

# 索引

|             |     |            |         |            |     |
|-------------|-----|------------|---------|------------|-----|
| <b>【あ】</b>  |     | <b>【け】</b> |         | 神経筋電気刺激    | 25  |
| 圧覚          | 31  | 経頭蓋交流電気刺激  | 100     | 神経刺激       | 1   |
| 安静時運動閾値     | 113 | 経頭蓋磁気刺激    | 25, 109 | 人工網膜       | 88  |
| <b>【う】</b>  |     | 経頭蓋直流電気刺激  | 24, 97  | 心室細動       | 129 |
| 運動誘発電位      | 110 | 経頭蓋電気刺激    | 24, 97  | 侵襲         | 11  |
| <b>【え】</b>  |     | 経頭蓋ランダムノイズ |         | 侵襲性刺激      | 20  |
| 塩味抑制物質      | 52  | 刺激         | 101     | 深部感覚       | 22  |
| <b>【お】</b>  |     | 経皮電気刺激     | 1, 91   | <b>【す】</b> |     |
| おいしさの構造のモデル | 50  | 減衰効果       | 56      | 錐体         | 88  |
| <b>【か】</b>  |     | <b>【こ】</b> |         | <b>【せ】</b> |     |
| 化学効果器       | 119 | 効果器        | 119     | 生体恒常性      | 106 |
| 確率共鳴効果      | 102 | 口腔外設置型刺激手法 | 65      | 静電気        | 2   |
| カフ型電極       | 15  | 高周波振動      | 31      | 前庭感覚       | 70  |
| 過分極         | 97  | 興奮性減弱      | 97      | 前庭電気刺激     | 70  |
| 雷           | 1   | 興奮性増大      | 97      | 前庭動眼反射     | 81  |
| 感覚器         | 22  | 国際電気標準会議   | 128     | 前庭皮質       | 72  |
| 桿体          | 88  | 固有活動周波数    | 100     | <b>【そ】</b> |     |
| 感電          | 127 | 固有感覚       | 22, 42  | 増強効果       | 56  |
| 眼内閃光        | 90  | ゴルジ臓器官     | 44      | 側頭骨錐体尖     | 77  |
| 甘味誘導物質      | 52  | <b>【さ】</b> |         | <b>【た】</b> |     |
| 甘味抑制物質      | 52  | 三叉神経       | 95      | 対電極        | 99  |
| <b>【き】</b>  |     | <b>【し】</b> |         | 脱分極        | 97  |
| 機械効果器       | 119 | 刺激周波数      | 100     | <b>【ち】</b> |     |
| 機械刺激        | 32  | 刺激電極       | 99      | 力          | 44  |
| 嗅細胞         | 95  | 刺激皮質領域     | 98      | <b>【つ】</b> |     |
| 驚愕反応        | 128 | 自己受容感覚     | 42      | 通電時間       | 98  |
| 極性          | 98  | 視軸回旋       | 82      | <b>【て】</b> |     |
| 筋電気刺激       | 25  | 耳石         | 72      | 低周波振動      | 31  |
| 筋紡錘         | 43  | シータバースト刺激法 | 114     | 電気安全       | 124 |
| <b>【く】</b>  |     | 周波数特異性     | 101     | 電気味覚       | 53  |
| クトゥルフシールド   | 139 | 漿液         | 119     | 電気味覚計      | 53  |
|             |     | 条件刺激       | 98      |            |     |
|             |     | 触覚電気刺激     | 31      |            |     |
|             |     | 食器一体型装置    | 64      |            |     |

|                          |     |            |       |                      |        |
|--------------------------|-----|------------|-------|----------------------|--------|
| 電流経路                     | 133 | 百人嚇        | 4     | ラバーハンド               |        |
| 電流密度                     | 98  | 表層感覚       | 23    | イリュージョン              | 115    |
| <b>【と】</b>               |     | <b>【へ】</b> |       | <b>【り】</b>           |        |
| 同期                       | 100 | 平衡感覚       | 70    | 力覚                   | 48     |
| 動物電気                     | 4   |            |       | 領域特異性                | 101    |
| 特殊感覚                     | 22  | <b>【ほ】</b> |       | <b>【る】</b>           |        |
| <b>【な】</b>               |     | ボルタ電堆      | 3     | ルフイニ終末(小体) 31        |        |
| 内臓感覚                     | 23  | <b>【ま】</b> |       | <b>【英字】</b>          |        |
| <b>【に】</b>               |     | マイスナー小体    | 31    | EMS                  | 25     |
| 苦味抑制物質                   | 52  | 膜電位        | 97    | EVS                  | 71     |
| <b>【の】</b>               |     | <b>【み】</b> |       | FES                  | 26     |
| 脳内電場                     | 105 | 味覚修飾物質     | 52    | GVS                  | 70     |
| 脳波                       | 25  | 味覚電気刺激     | 53    | Ib 反射                | 47     |
| <b>【は】</b>               |     | 脈絡膜上経網膜刺激型 | 12,90 | ICNIRP ガイドライン        | 131    |
| パチニ小体                    | 31  | 味 蕾        | 49    | Meet SpoonTEK        | 140    |
| バーチャルリアリティ               | 1   | <b>【め】</b> |       | MEP                  | 110    |
| パッチテスト                   | 31  | メデイリフト     | 141   | nGVS                 | 80     |
| 半規管                      | 72  | メルケル細胞     | 31    | NMES                 | 25     |
| <b>【ひ】</b>               |     | <b>【も】</b> |       | Norimaki Synthesizer | 139    |
| 皮質律動                     | 100 | 網膜下刺激型     | 12,90 | RHI                  | 115    |
| 微弱筋収縮時閾値                 | 113 | 網膜刺激       | 90    | rTMS                 | 25,114 |
| 非侵襲性刺激                   | 20  | 網膜上刺激型     | 12,90 | TACS                 | 100    |
| 人を対象とする医学系研究<br>に関する倫理指針 | 11  | <b>【や】</b> |       | TCS                  | 97     |
| 皮膚インピーダンス測定              | 32  | やけど        | 127   | TDCS                 | 97     |
| 皮膚感覚                     | 23  | <b>【ら】</b> |       | Teslasuit            | 139    |
| 皮膚変形                     | 31  | ライデンびん     | 3     | TMS                  | 25,109 |
|                          |     |            |       | TRNS                 | 101    |
|                          |     |            |       | Unlimited Hand       | 139    |

—編著者・著者略歴—

**青山 一真**（あおやま かずま）

2016年 大阪大学大学院情報科学研究科博士課程修了（バイオ情報工学専攻），博士（情報科学）  
2023年 群馬大学准教授，ならびに東京大学特任准教授，現在に至る

**安藤 英由樹**（あんどう ひでゆき）

1999年 愛知工業大学大学院工学研究科修士課程修了（電気電子工学専攻）  
2004年 博士（情報理工学）（東京大学）  
2020年 大阪芸術大学教授，現在に至る

**玉城 絵美**（たまき えみ）

2011年 東京大学大学院学際情報学府博士後期課程修了（総合分析情報学コース），博士（学際情報学）  
2021年 H2L株式会社代表取締役，ならびに琉球大学教授，現在に至る

**Yem Vibol**（ヤェム ヴィボル）

2015年 筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程修了（知能機能システム専攻），  
博士（工学）  
2023年 筑波大学准教授，現在に至る

**高橋 哲史**（たかはし あきふみ）

2022年 電気通信大学大学院情報理工学研究科博士課程修了（情報学専攻），博士（工学）  
2022年 シカゴ大学研究員，現在に至る

**中村 裕美**（なかむら ひろみ）

2014年 明治大学大学院理工学研究科博士課程修了（新領域創造専攻），博士（工学）  
2020年 東京大学特任准教授，現在に至る

**前田 太郎**（まえだ たろう）

1987年 東京大学工学部計数工学科卒業  
1994年 博士（工学）（東京大学）  
2007年 大阪大学教授，現在に至る

**武見 充晃**（たけみ みつあき）

2015年 慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了（基礎理工学専攻），博士（工学）  
2021年 慶應義塾大学特任講師，現在に至る

**両宮 智浩**（あめみや ともしろ）

2004年 東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了（知能機械情報学専攻）  
2008年 博士（情報科学）（大阪大学）  
2023年 東京大学教授，現在に至る

**河野 通就**（こうの みちなり）

2018年 東京大学大学院学際情報学府博士後期課程単位取得退学，博士（学際情報学）

**北尾 太嗣**（きたお たかし）

2015年 大阪大学大学院情報科学研究科修士課程修了（バイオ情報工学専攻）  
2020年 Ghoonuts株式会社取締役，現在に至る

# 神経刺激インタフェース (バーチャルリアリティ学ライブラリ 2)

Nerve Stimulation Interface

© 特定非営利活動法人 日本バーチャルリアリティ学会 2024

2024年3月28日 初版第1刷発行

★

検印省略

編者 特定非営利活動法人  
日本バーチャルリアリティ学会  
編著者 青 山 一 真  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 壮光舎印刷株式会社  
製本所 株式会社 グリーン

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 978-4-339-02692-4 C3355 Printed in Japan

(新宅)



**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。