The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	頭部への電気刺激における電流経路の時空間解析を用いた感覚提示モデルの設計
Author(s)	青山, 一真
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55843
rights	©2021 IEEE. Reprinted, with permission, from Aoyama K., Miyamoto N., Sakurai S., et al. Electrical Generation of Intranasal Irritating Chemosensation. IEEE Access 9, 106714, July 2021.
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

頭部への電気刺激における電流経路の
時空間解析を用いた感覚提示モデルの設計

提出先：大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月：2015 年 12 月

青 山　一 真

発表論文リスト

学術雑誌論文

1. 青山一真，安藤英由樹，飯塚博幸，前田太郎, “前庭電気刺激における逆不感電流を用いた加速度感覚の増強”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol 19, No 3, pp.315-318 (2014)
   (4 章の内容に関連する)
2. 青山一真，櫻井悟，宮本靖久，古川正紘，前田太郎，安藤英由樹, “前庭電気刺激における不感電流を用いた往復電流刺激が与える身体動揺と逆電流印加時間の関係”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol 20, No 1, pp.65-68 , (2015)
   (4 章の内容に関連する)
3. Kazuma Aoyama, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando and Taro Maeda, "Four-pole galvanic vestibular stimulation causes body sway about three axes", Scientific Reports. 5, 10168; doi: 10.1038/srep10168 (2015)
   (3 章の内容に関連する)
4. 青山一真，安藤英由樹，桜井悟，宮本靖久，古川正紘，前田太郎, “頭頂方向前庭電気刺激が及ぼす加速度感覚知覚と身体反射応答への影響”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 , Vol. 20, No 3, pp.239-242 (2015)
   (3 章の内容に関連する)
5. 櫻井悟，青山一真，宮本靖久，古川正紘，前田太郎，安藤英由樹, “電気刺激による塩味および旨味を呈する塩の味覚抑制”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol 20, No 3, pp.219-228 (2015)
   (3 章の内容に関連する)
6. 青山一真，飯塚博幸，櫻井悟，宮本靖久，古川正紘，前田太郎，安藤英由樹, “往復電流刺激が及ぼす前庭電気刺激の身体動揺増大効果のモデル化”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol 20, No 4 (2015) [in-press]
   (4 章の内容に関連する)

国際会議（査読付き）

1. Kazuma Aoyama, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando, Taro Maeda

"Countercurrent Enhances Acceleration Sensation In Galvanic Vestibular Stimulation" International Conference on Artificialreality and Telexistance Japan-Tokyo (December, 2013)
(4 章の内容に関連する)

2. Kazuma Aoyama, Satoru Sakurai, Nobuhisa Miyamoto, Masahiro Furukawa, Taro Maeda, Hideyuki Ando "Modeling the Effect of Galvanic Vestibular Stimulation on Body Sway for Electrical Circuit", 10th AEARU Workshop on Computer Science and Web Technology, pp.51-52, Ibaragi-Japan (February, 2015), Poster
(4 章の内容に関連する)
3. Satoru Sakurai, Kazuma Aoyama, Masahiro Furukawa, Hideyuki Ando, Taro Maeda "Correlation between Magnitude of Current and Suppressing Saltiness Effect", 10th AEARU Workshop on Computer Science and Web Technology, pp.53-54, Ibaragi-Japan (February, 2015), Poster
(3 章の内容に関連する)

目次

1. 序論 1

2. 神経系の情報処理メカニズムと経皮電気刺激による感覚提示の諸問題 7
2.1. 神経発火のメカニズム 7
2.2. 電流経路仮説と経皮電気刺激が及ぼす神経系の情報伝達への影響 11
2.3. 前庭感覚 15
2.3.1. 前庭感覚器の感覚受容メカニズムと電気刺激のはたらき 15
2.3.2. 前庭感覚ディスプレイと前庭電気刺激 20
2.4. 味覚 23
2.4.1. 味覚の感覚受容メカニズム 23
2.4.2. 味覚ディスプレイと味覚電気刺激 25
2.5. 嗅覚 27
2.5.1. 嗅覚の感覚受容メカニズム 28
2.5.2. 嗅覚電気刺激と嗅感覚提示ディスプレイ 31
2.6. 本研究の目的 32

3. 頭部への電気刺激における電流経路仮説とその検証 33
3.1. 電流経路仮説 33
3.2. 頭部抵抗値計測による電流経路の存在の実証 35
3.2.1. 実験の背景と目的 35
3.2.2. 実験方法 35
3.2.3. 実験結果 36
3.2.4. 実験考察 37
3.3. 頭部への電流印加時の磁場計測による頭部内電流経路の推定 37
3.3.1. 実験方法 38
3.3.2. 実験結果 39
3.3.3. 実験考察 43
3.4. 電流経路に基づいた刺激設計による前庭電気刺激における加速度感覚提示の多自由度化 44
3.4.1. 提示加速度感覚の多自由度化を実現する電流経路 44

3.4.2.　4 極 GVS が惹起する主観的な加速度感覚の方向の検証実験..... 49
3.4.3.　4 極 GVS が誘発する身体動揺の計測実験 50
3.4.4.　実験結果 51
3.4.5.　実験考察 54
3.4.6.　頭頂方向前庭電気刺激が惹起する加速度感覚の方向 56
3.4.7.　頭頂方向前庭電気刺激が惹起する加速度の知覚方向の検証実験..... 57
3.4.8.　頭頂方向前庭電気刺激が誘発する身体動揺の方向の検証実験 58
3.4.9.　実験結果 61
3.4.10.　実験考察 69
3.4.11.　前庭電気刺激における電流経路の観点からの刺激設計の考察 73
3.5.　電流経路に基づいた刺激設計による嗅覚提示の実現 74
3.5.1.　電気刺激による鼻腔内神経の刺激 74
3.5.2.　嗅覚電気刺激が嗅覚を惹起するかどうかの検証実験 76
3.5.2.1.　実験方法 76
3.5.2.2.　実験結果・実験考察 77
3.5.3.　嗅覚電気刺激が惹起する嗅覚の質の検証 78
3.5.3.1.　実験方法 78
3.5.3.2.　実験結果・実験考察 78
3.5.4.　嗅覚電気刺激の極性の違いが及ぼす惹起される臭いの惹起タイミングへの影響 80
3.5.4.1.　実験方法 81
3.5.4.2.　実験結果と実験考察 81
3.5.5.　嗅覚電気刺激における電流経路の観点からの刺激設計の考察 83
3.6.　電流経路に基づいた刺激設計による味覚提示の実現 84
3.6.1.　電解質と非電解質に対する陰極刺激の味覚抑制効果 84
3.6.2.　電解質と非電解質に対する陰極刺激の抑制効果..... 86
3.6.2.1.　甘味を呈する電解質と非電解質に対する味覚抑制効果の検証実験86
3.6.2.1.1.　実験方法 86
3.6.2.1.2.　実験結果・実験考察 88
3.6.2.2.　苦味を呈する電解質と非電解質に対する味覚抑制効果の検証実験89
3.6.2.2.1.　実験方法 90
3.6.2.2.2.　実験結果・実験考察 91

3.6.2.3.　電解質と非電解質の水溶液に対する陰極刺激の味覚抑制効果の検証実験に関する考察 92
3.6.3.　陰極刺激による酸味と旨味を呈する電解質の呈する味覚抑制 93
3.6.3.1.　酸味を呈する電解質 93
3.6.3.2.　旨味を呈する電解質 93
3.6.3.3.　実験方法 94
3.6.3.3.1.　酸味 94
3.6.3.3.2.　旨味 95
3.6.3.4.　実験結果・実験考察 96
3.6.4.　味覚電気刺激における電流経路の観点からの刺激設計の考察 98
3.7.　電流経路の観点からの刺激設計 99

4.　前庭電気刺激における電流経路の時間特性の電気回路モデルと提示加速度感覚の強化 100
4.1.　頭部交流インピーダンスの計測による回路モデルの頭部等価回路としての妥当性の検証 101
4.1.1.　実験方法 101
4.1.2.　実験結果 102
4.1.3.　実験考察 103
4.2.　往復電流刺激の機序と着想 107
4.3.　往復電流刺激による前庭感覚強度の増強と CR 回路モデルの妥当性 108
4.3.1.　実験方法 111
4.3.2.　実験結果 112
4.3.3.　実験考察 116
4.4.　主観応答計測による往復電流刺激の加速度感覚増強効果の検証 119
4.4.1.　実験方法 119
4.4.2.　実験結果 120
4.4.3.　実験考察 123
4.5.　CR 回路モデルの妥当性と知覚の時間特性からの刺激設計 126

5.　総合考察 132

6. 結論 140

謝辞 143

参考文献 144

付録 A：本研究で利用した電気刺激装置 150
付録 B：CR 回路モデルの論理的な妥当性 153

1. 序論

人間の脳-神経系は外界の情報を電気信号として扱う．この考え方の起源は Luigi Galvani と Alessandoro Volta の研究にある．Galvani はカエルの解剖されたカエル足に銅と亜鉛を接触させる事でカエルの足が痙攣を起こす事を発見した．Galvani はこの痙攣現象を生物が体内に蓄えている「動物電気」によって誘発されるものであると考えた．これに対して，Volta の考えでは，筋肉は電気によって駆動されるだけの受動的な器官であり，カエルの足の痙攣現象はカエルの足が電源と検知器の両方の役目を担っているというものであった．彼はカエルの足の代わりに食塩水を染み込ませた紙を 2 種類の金属で挟む事で金属間に電位差が発生する Volta 電池を発明し，彼の説の妥当性を実証した．

この二人の研究者の説は考えようによっては双方とも，生体の情報処理機構を正しく表している．Galvani の説では生体は電気を蓄えるものであり，その電気を使って筋収縮を起こしているというものであった．一方で，Volta の説では筋肉は電気によって受動的に動くだけの器官であるというものであった．

この二人の科学者の発見は，電気刺激を利用する事で，生体の様々な感覚や情報の処理に干渉する事が可能である事を示す最初の発見であった．現代においては，彼らの研究の対象となった生体への電気刺激現象は筋肉への刺激以外にも，網膜，味蕾，前庭感覚器，触覚受容器，脳などの様々な組織を刺激する手法として利用されている[25,26,38,46]．これらの電気刺激は人の感覚や情報の処理に干渉する事で，感覚器の機能の検査や筋収縮を利用したリハビリテーションなどの医療目的，事故や疾患などによって失われた感覚器の代行，神経系疾患に起因する病気の治療，感覚を利用した情報提示技術，脳機能の向上をなど様々なシーンで利用されている．

生体への電気刺激には皮膚上に設置した電極から刺激を行う，侵襲性の低い経皮電気刺激(非侵襲型電気刺激・低侵襲型電気刺激)と生体組織に電極針を刺入したり，電極を生体内に埋め込む手術を行った上で刺激をする，侵襲型電気刺激がある．経皮電気刺激は皮膚の上から電流を印加するため，生体への負荷は最小限であるが，刺激の空間分解能が低く，特定の部位だけを刺激する事は非常に難しい．これに対して，侵襲型電気刺激は生体内に電極を刺入あるいは埋め込むため，生体への負荷は非常に大きいが，生体内部の特定の領域だけを刺激する事や

生体の深部を刺激する事が可能である．

侵襲型の電気刺激は電極の埋め込みなどの生体の不可逆性の変化を伴うため，病気の治療や失われた感覚の補償などの目的以外では通常は利用されない．一方で，経皮電気刺激は侵襲性が低いため，バーチャルリアリティ(VR: Virtual Reality)技術や情報提示技術である，感覚提示ディスプレイとしての利用が期待されている．

感覚提示ディスプレイは感覚器を通して人に狙った物理現象を知覚させる事ができる．人は感覚を通して外界の様子を理解し，様々な体験をする事が可能である．このため，感覚提示ディスプレイを利用する事で人は自身の環境下において，異なる環境下で起こった事を体験する事が可能となる．この感覚提示ディスプレイはゲームやアミューズメントパークなどのようなエンターテイメントの体験やリハビリ等の医療分野，電話やテレビ等の日常生活における様々な機器等に必ず使われており，我々の生活に欠かせないインタフェース技術である．

感覚提示ディスプレイ技術は大きく分けて二つの手法に分かれる．一つは電気刺激による感覚提示手法を利用する物であり，もう一つは感覚器が受容する物理現象を再現する手法である．電気刺激による感覚提示手法は物理現象を再現する手法と比較して，安価で軽量である事や，味覚等の化学物質受容器への刺激の際には化学物質が不要な事，電気刺激装置のみで様々な感覚提示が可能である事等の利点がある．しかしながら，現在電気刺激による感覚提示が産業用途でも利用されているのは触覚への電気刺激のみである[45].

表 1.1：経皮電気刺激の種類

刺激手法名	略称：英名	刺激する組織
機能的電気刺激	**FES**: Functional Electrical Stimulation	筋肉
網膜電気刺激	**ESoR**: Electrical Stimulation of Retina	視神経
味覚(舌)電気刺激	**GGS**: Galvanic Gustatory Stimulation **ETS**: Electrical Tongue Stimulation	味蕾
触覚電気刺激	**ETS**: Electrical Tactile Stimulation	触覚
前庭電気刺激	**GVS**: Galvanic Vestibular Stimulation	前庭感覚器
経頭蓋直流/交流電気刺激	**tDCS/tACS**: transcranial Direct/Alternate Current Stimulation	脳

経皮電気刺激によって刺激可能である部位と刺激手法の名称の例を表 1.1 に挙げる．これらの電気刺激手法が感覚提示手法としてさほど研究されていないのは，提示感覚の自由度･強度不足等の問題により，感覚を任意に作り出せない事に起因する．この経皮電気刺激による視覚，聴覚，触覚，味覚，嗅覚，前庭感覚提示の現状は以下の通りである．

- 視覚 …視野全体への瞬間的なフラッシュのみ提示可能[5,38]
- 聴覚 …内耳への電極の埋め込みで様々な音を提示可能[8]
- 触覚 …一般的な感覚提示手法として確立されつつある[25,45]
- 味覚 …電気味あるいは金属味のみ提示可能[29,73]
- 嗅覚 …電気刺激による嗅覚の提示はできていない[42]
- 前庭感覚 …微弱な前後，左右方向の加速度感覚のみ提示可能[40,61]

これらの感覚器のディスプレイの現状を考えると，視聴覚提示ディスプレイに関しては物理現象を再現する手法によって，モニターやヘッドフォン，スピーカーなどの軽量･安価なディスプレイが販売されており，それらは我々が通常知覚する事のできる視聴覚を再現する事が可能である．触覚ディスプレイは前述の通り，既に電気刺激を利用した多くの感覚提示ディスプレイが多数提案され，ゲームなどの産業面においても注目を集めている．これに対して，味覚，嗅覚の化学感覚提示ディスプレイは感覚器のある口腔内や鼻腔内，あるいは空気中に味物質や臭い物質を放出するディスプレイが提案されている．しかし，これらは多種類の化学物質を実際に用意していなければ感覚を再現する事ができない事や化学物質が空中に残留する事による，後続する臭いや味への影響を除去出来ない事，特に嗅覚の受容器は種類が非常に多いため，多様な臭いを提示するためには相当数の種類の化学物質を用意する必要がある等の問題点がある．このため，化学感覚提示ディスプレイは様々な臭いを一つのデバイスで提示するディスプレイとしては未完成であり普及していない．前庭感覚提示ディスプレイとしては，モーションプラットホーム等の人間を機械的に揺らす事で加速度感覚や角速度感覚を提示する手法が用いられる．しかしながら，このディスプレイは非常に大型かつ高価であるために，利用シーンはアミューズメントパークや一部の映画館などに限定されており，前庭感覚ディスプレイは普及しているとは言えない．

以上の事から，本研究では電気刺激による感覚提示ディスプレイが物理現象を再現する手法と比較して有効であると考えられる，味覚，嗅覚，前庭感覚の 3 つの感覚に注目した．

味覚，嗅覚，前庭感覚の感覚器は頭部にある．このため，これらの感覚提示においては頭部に電流を印加する必要がある．しかしながら，これらは全て電気刺激という共通の刺激によって感覚を作り出すにも関わらず，電気刺激の惹起する感覚器や感覚神経の発火の機序についての統一的な見解は示されていない．この機序の不明確さは，現在においても神経発火をコントロールする事ができていない事の主要因であると考えられる．

経皮電気刺激の従来研究においては，電極位置は刺激部位を決定するための重要な要素として扱われてきた．これは，電極を設置した部位の真下の組織が電流によって活性化あるいは抑制されると考えられていたためである．多くの生体への電気刺激の場合，この考え方はおよそ正しい物である．しかしながら，頭部への電気刺激においてはこの限りではない．これは頭部が電気的な抵抗値の低い体液や脳などの軟組織を抵抗値の高い頭蓋骨で包み込み，その外側を抵抗値の低い皮膚が包み込むという構成となっているためである．これに加えて，味覚，嗅覚，前庭感覚の感覚器や感覚神経は頭蓋骨の内側に存在する．味覚の感覚器や感覚神経は口腔内に，嗅神経や三叉神経等の嗅覚系は鼻腔内に，前庭感覚器は側頭骨錐体尖内に存在する[31]．このため，頭部の表面に電極を設置しても，電流は頭蓋骨を貫通する事ができず，電流は皮膚を伝わって流れる．よって，頭部に電極を設置しても頭蓋骨を貫通して電極の真下の組織を刺激する電流量は非常に小さい．

しかしながら，電気刺激は実際に感覚器を刺激して感覚を惹起する．これは，電気刺激が感覚器や感覚神経のニューロンの発火を誘発し，感覚を惹起している事を示している．ここで，電流がどのようにして感覚器まで流れることができるのかを考えると，眼窩や外耳道などの頭蓋骨に開いている無数の穴を通っていると考えられる．この穴の内部は体液や神経，皮膚などの軟組織で満たされているため，電気的な抵抗値が非常に低い．このため，頭部に印加した刺激電流はこの穴を通り，頭蓋内に流れ込むと考えられる．よって，この穴を通り，感覚器まで到達した電流のみが感覚を惹起することが可能となる．また，感覚器や感覚神経は電流の空間的な方向に選択性をもって発火する．これは，触覚電気刺激や味覚の電気刺激において，特定の極の周辺でしか感覚が惹起されないことなど

から推察される．よって，本研究では，「印加された刺激電流のうち，頭蓋骨の穴を通って感覚器に流れた有効な方向の電流のみが感覚を惹起する」という電流経路仮説を提唱する．

さらに，この電流経路仮説のうち，電流の空間的な方向に対する感覚惹起の選択性を説明可能な，電気刺激の神経発火メカニズムとしてとしてシナプス間隙イオン泳動説を提唱する．シナプス間隙イオン泳動説は神経系におけるニューロン間の情報伝達機構であるシナプスにおいて，刺激電流が形成した電場によるイオンの泳動から神経発火の誘発メカニズムを説明するものである．

また，前述の頭部の構成から，頭部の電気的な特性は単純な抵抗器では近似しえないと考えられる．頭部は抵抗値の非常に高い頭蓋骨が抵抗値の低い体液と皮膚の間にある構造である．この構造はキャパシタのような電荷の充放電を引き起こす素子と同様である．よって，頭部は電荷の充放電を引き起こす電気的な性質を持っており，印加電流の時間パターンに対して過渡応答を引き起こすことや周波数応答特性を持つことなどが考えられる．つまり，印加された電流のパターンは感覚器や感覚神経の発火を誘発する電流のパターンとは等しくない．よって，本研究では感覚器を実際に刺激している有効電流のパターンを推定することで，電気刺激によって惹起される感覚の強化やより精緻な提示感覚パターンの生成が可能なモデルの構築を行う．

本研究は電気刺激における「電流経路(空間的解析)」と「時間特性（時間的解析)」の二つのキーワードを軸に展開され，これらのキーワードの両方に共通する生体への電気刺激の神経発火メカニズムとして「電流経路仮説」と「シナプス間隙イオン泳動説」を唱え，その妥当性を論じる．

本論文の構成は以下のとおりである．

第 2 章では，本研究で提唱している電流経路仮説とシナプス間隙イオン泳動説の説明を行うために，神経系の情報伝達メカニズムと本研究で扱う前庭感覚，嗅覚，味覚を中心とした人間の感覚受容における神経生理の概要を説明する．また，それに伴う用語の定義と説明を行う．その後，電気刺激によるこれらの感覚提示の抱える問題点を示す．

第 3 章では電気刺激による感覚提示の機序として提唱している電流経路仮説を再度詳しく説明し，その存在を実証する．また，電流経路の観点からの刺激設計による前庭感覚，嗅覚，味覚提示の電気刺激の抱える諸問題を解決し，電流経路の観点からの刺激設計の有用性と妥当性を示す．

第 4 章では頭部の交流インピーダンス特性と前庭電気刺激によって惹起される前庭感覚の知覚特性の計測を通して，電流経路の時間特性を電気刺激と親和性の高い電子回路モデルによって近似し，その妥当性を示す．このモデルの妥当性の議論を通して，前庭電気刺激による感覚提示の強度が VR 技術で利用するには前庭感覚ディスプレイとして不足しているという問題を解決する事で，このモデル化の工学的な有用性を示す．

第 5 章では，本研究で行った実験によって得られた知見を総括し，電気刺激による感覚惹起のメカニズムに対する仮説の妥当性を論じる．

2. 神経系の情報処理メカニズムと経皮電気刺激による感覚提示の諸問題

電気刺激によって感覚が惹起されるという事実は，刺激電流が感覚神経を発火させているということを示している．しかしながら，刺激電流がどのように人の神経系に作用し，本章では電気刺激がどのように神経発火を励起するのかを考察するために，神経系の情報伝達メカニズムの概要を説明する．また，本研究で扱う前庭感覚，嗅覚，味覚の末梢神経系の感覚受容メカニズム，感覚提示ディスプレイの現状と経皮電気刺激経皮刺激によるとそれらの感覚提示に関する先行研究の知見を通して，電気刺激による感覚提示手法の感覚提示ディスプレイとしての問題点を説明する．

2.1. 神経発火のメカニズム

本節では人間の感覚受容と感覚情報処理の基本となる神経の発火メカニズム(機序)の要点について説明する．

人間は外界の様子を感覚器による物理現象計測を通して知ることができる．この感覚器で受容した物理現象は感覚神経によって脳へと伝達される．感覚器や感覚神経を構成しているのはニューロン(Neuron)と呼ばれる細胞の一種である．ニューロンは細胞体(Cell Body)と軸索(Axon)によって構成され，軸索終末(Axon Terminal)で他のニューロンと結合する．軸索には電気的に絶縁性の高いミエリン鞘(Myelin Sheat)がある物とないものがある．このミエリン鞘は信号の伝達速度を上げる働きがある．

ニューロンはリン脂質二重膜と呼ばれる膜によって形成されている．リン脂質二重膜は細胞外にあるイオンなどの物質と細胞内のそれを物理的に仕切っており，生体内の物質はそのリン脂質二重膜を通過することはできない．このリン脂質二重膜のことを細胞膜と呼ぶ．細胞膜にはイオンチャネルと呼ばれる，特定のイオンだけが通過することが可能なゲートがあり，細胞の内部や外部からの刺激によって開閉する．

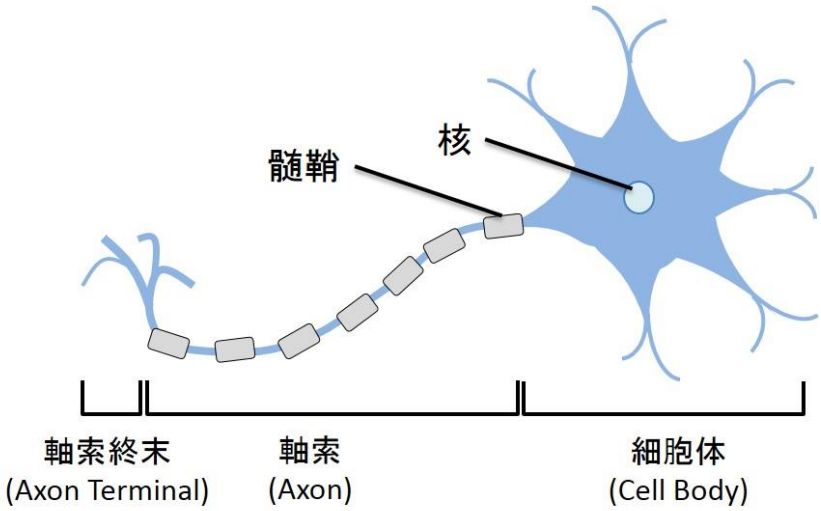


図 2.1.1：ニューロン細胞

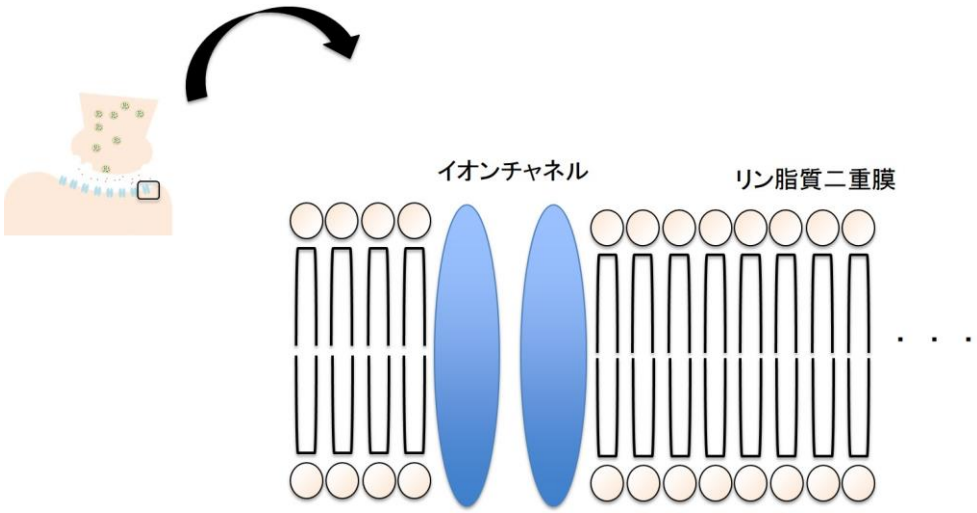


図 2.1.2：リン脂質二重膜[30]

ニューロンは細胞内と細胞外とで電位差を持っている．普段は細胞の内側の方が細胞の外側よりも電位が低い．この電位は静止膜電位(Resting Membrane Potential)と呼ばれ，約-70mV 程度である．この静止膜電位が細胞内のほうが低いのは，細胞内には多量の陰イオンを含んでいるためである．

ニューロンは通常はこの静止膜電位の状態にある．ここに何らかの刺激が入

った場合に，神経は発火する．ニューロンに特定の刺激が入ると，対応するニューロンのイオンチャネルが開口する．これによって，細胞外から細胞の中に陽イオン(主に K^+, Na^+)が流れ込み，細胞の電位が上昇する．これによって，細胞の電位は上昇し，細胞の外と内の電位差はわずかな時間ながら逆転する．この電位した電位を活動電位(Action Potential)と呼ぶ．活動電位は一度上昇すると 40mV 程度まで上昇する．その後，細胞内の陽イオンを細胞外に放出するためのイオンチャネルが開き，活動電位は下がる．この活動電位の上昇から下降までは約 1ms の間に行われる．

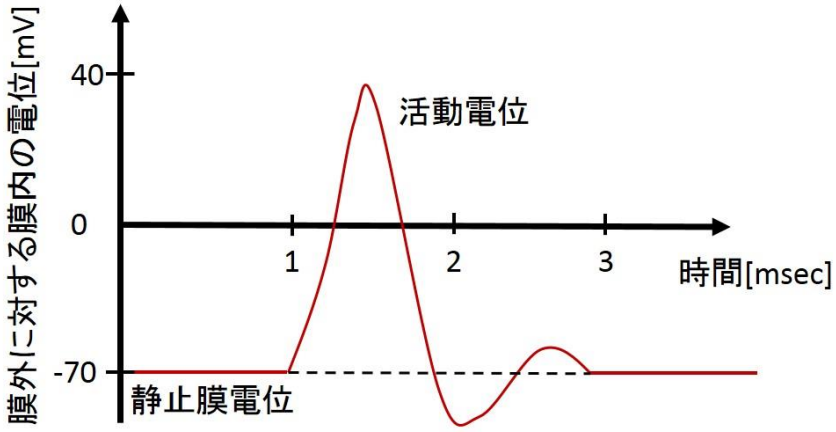


図 2.1.3：活動電位

ここまでは，単一のニューロンがどのようなメカニズムで発火するのかを説明してきた．しかしながら，この単一ニューロン発火が次のニューロンへと伝達されなければ，脳への情報は伝わらない．よって，次のニューロンへの発火の伝達メカニズムを説明する．

ニューロンは細胞体と軸索を持っている．この軸索の先は軸索終末と呼ばれ，次のニューロンに情報を伝える．この情報の伝達部位をシナプスと呼ぶ．シナプスは，情報を渡す側をシナプス前，情報を受け取る側をシナプス後と呼ぶ．シナプス前とシナプス後は非常に近い位置にあるが，わずかに隙間がある．この隙間のことをシナプス間隙と呼ぶ．基本的にシナプスでは，シナプス前から神経伝達物質(Neurotransmitter)が放出され，シナプス後ではそれを受け取ることで開口するイオンチャネルがある．この神経伝達物質のシナプス間隙への放出をエキソサイトーシス(Exocytosis)と呼ぶ．

シナプス前のニューロンの内部では，神経伝達物質はシナプス小胞と呼ばれる小胞の中にある．このニューロンの発火が起こると，Ca^{2+}透過性イオンチャネルが開口し，このカルシウムイオンが引き金となって，シナプス小胞は細胞膜と接着し，神経伝達物質を放出する仕組みになっている．神経伝達物質は，アミノ酸，アミン，ペプチドである．特に，早い神経伝達が必要な場合は，アミノ酸である，グリシン(Gly)，γ-アミノ酪酸(GABA)，グルタミン酸(Glu)が神経伝達物質として利用される．

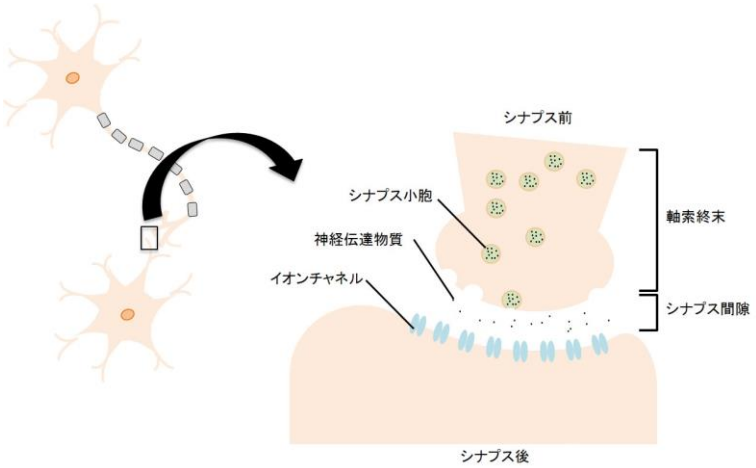


図 2.1.4：シナプス間隙での神経伝達の機序

神経伝達物質を受け取ったシナプス後では，活動電位が発生する．このメカニズムによって，細胞の発火は次の細胞へと伝達される．

感覚器は光や音，加速度，皮膚変形，化学物質の濃度など様々な物理現象を電気信号に変換する．この変換は感覚細胞とそれに接続する神経細胞によって行われる．この感覚細胞は中枢神経系に軸索を送る第一次感覚細胞と，中枢に情報を送る細胞と感覚を受容する細胞が分かれている第二次感覚細胞の 2 種類がある．

電気信号への変換は大きく分けると 2 つの段階がある．物理現象は感覚細胞によって受容器電位(受容器の膜電位)に変換される．これによって，物理現象は細胞のアナログ的な膜電位に変換される．この膜電位の変化に続いて，膜電位の大きさに応じた頻度のインパルス的な活動電位を発生する．第一次感覚細胞はその細胞の軸索において，第二次細胞は接続する神経に細胞においてインパルス的な活動電位への変換が行われる．つまり，感覚器は物理現象をアナログ電位

に変換した後，アナログ的な膜電位をインパルス的な活動電位の周波数に変換する．また，第二次細胞は接続する神経細胞と化学シナプスを形成しており，細胞が受容した刺激量ひいては感覚細胞の電位に応じた量の神経伝達物質を放出する．

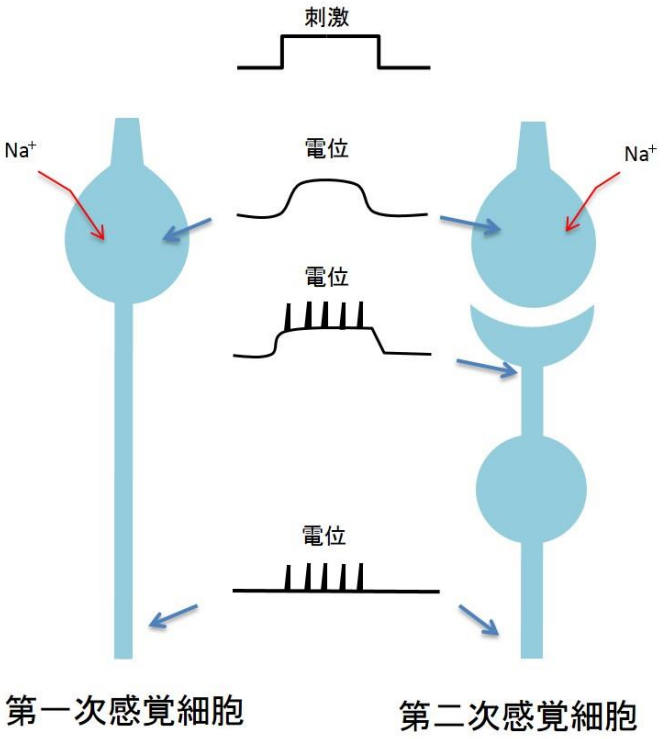


図 2.1.5：第一次感覚細胞と第二次感覚細胞における電位変換過程[74]

この神経伝達物質を受容する事で接続する神経細胞はインパルス的な活動電位を発生させる．

つまり，第二次感覚細胞は受容器のすぐそばで化学シナプスが形成されており，第一次感覚細胞は軸索の先という，受容器とは距離のある位置でシナプスが形成されている．

2.2. 電流経路仮説と経皮電気刺激が及ぼす神経系の情報伝達への影響

前節で説明した神経系の情報伝達様式をふまえて，電気刺激がどのように神経の発火を誘発するかを考える．この電気刺激による神経発火の誘発のメカニズムを考察するにあたり，本研究の重要な仮説である，電流経路仮説について先

に簡単に説明する．

従来の頭部への電気刺激研究において，電極位置は刺激部位を決定するための非常に重要な要素であると考えられてきた[39,46]．例えば tDCS 研究において，視覚野を刺激したい場合には後頭部に電極を設置し，運動野を刺激したい場合には頭頂部周辺に電極を設置する．これは，設置電極の真下の脳領域が刺激電流によって賦活/抑制されると考えられていたため，このような電極配置がとられてきた．しかしながら，頭部は電気的な抵抗値が低く，電流を通しやすい皮膚や体液，脳などの軟組織と，抵抗値が高く，電流を通しにくい頭蓋骨や脂肪などで構成される．さらに，頭部は，抵抗値の低い脳や脳髄液などの体液をインピーダンスの高い頭蓋が覆っており，さらにその周りを抵抗値の低い皮膚が覆っているという空間的な構造を持っている．

このため，頭部表面に電極を設置したとしても，印加した刺激電流は頭蓋骨を貫通することはできず，皮膚などの軟組織を流れると考えられる[1,22]．一方で，前庭電気刺激(GVS)などの感覚器への電気刺激は実際に感覚を惹起している．これは刺激電流が感覚器まで届いていることを示している．この感覚器への電流の流入を可能にするのが，頭蓋骨にあいている穴である．頭蓋骨には無数に穴が開いているが，特に大きな穴として外耳道や眼窩が挙げられる．これらの穴は，前庭感覚器をはじめとする感覚器や脳室まで電流を流すような電流経路を形成すると考えられる．実際に，Bryony ら(2002)の先行研究によって，頭蓋骨の穴が外部電極によって形成された電場の方向を歪ませるということが示されている[4]．よって，電気刺激において，感覚を惹起するのは頭蓋骨の穴が形成する電流経路を通り，感覚器に流れた電流のみであると考えられる．

さらに，感覚器や感覚神経の発火には電流の空間的な方向に対する選択性があると考えられる．これは，触覚の電気刺激や，味覚への電気刺激における陽極が舌の付近にある刺激等の例から推察できる．触覚電気刺激において圧覚が惹起されるのは陰極のみである．これは，圧覚を検知するメルケル細胞が皮膚に印加された電流の方向に対して選択性をもって発火していると考えられる[25, 30]．また，舌の付近に陽極を設置し，陰極を別の部位に設置する味覚電気刺激は電気味を惹起する．一方で，陰極側のみを舌の周辺に設置する味覚電気刺激は電気味を惹起しない．これは味覚の感覚神経は舌に流れる電流の空間的な方向に対して選択性をもって発火する事を示している．よって，感覚器に流れた刺激電流のうち，有効な方向の電流のみが感覚を惹起すると考えられる．

これらの事から，電流経路仮説において，頭部への電気刺激による感覚提示メカニズムは，「頭部に印加した電流のうち，頭蓋骨の穴を通って感覚器に流れた有効な方向の電流のみが感覚を惹起する」と説明される．この電流経路仮説については 3 章で再度詳しく説明する．

続いて，神経の情報伝達メカニズムに電気刺激が干渉する機序を考察する．

細胞膜は前述の通り，リン脂質二重膜で構成される．リン脂質二重膜は絶縁体である．これは，リン脂質二重膜が細胞外と細胞内のイオンを隔てていることからもわかる．つまり，刺激電流は細胞膜を貫通する事ができない．この事から，刺激電流が細胞の内部に流れ，直接的に細胞膜の上昇や下降を引き起こすとは考えにくい．

これらの事から，刺激電流は細胞外の要素に働きかけることで，細胞の発火を誘発すると考えられる．細胞外にあり細胞の発火に働きかけることが可能な要素としては，イオン，イオンチャネル，神経伝達物質が挙げられる．

これらに対して，刺激電流が与えられる影響としては，イオンや神経伝達物質の電気泳動，イオンチャネル付近の電位変化， pH の変化等が挙げられる．これらは刺激電流が作り出した電場によるイオンの泳動に起因するものである．よって，電気刺激によって誘発される神経発火はイオンの泳動が非常に重要な要素であると考えられる．

特に第二次感覚細胞においては，受容体のすぐそばにシナプス間隙が存在する．シナプス間隙には神経伝達物質やナトリウムイオン，カリウムイオンなど多くのイオンが存在し，イオンチャネルの密度も高い．よって，刺激電流が神経の発火を引き起こす機序としては，刺激電流がシナプス間隙に形成した電場によってシナプス間隙に存在するイオンが泳動し，イオンチャネル周辺のイオン濃度や神経伝達物質の濃度の上昇あるいは下降を引き起こし，ニューロンへ流入するイオンの量を増加/減少させるといった事が考えられる．本研究ではこの仮説を「シナプス間隙イオン泳動説」と呼ぶ．また，この仮説については，本研究で行った一連の研究によって得られた知見と先行研究によって示されている知見を合わせ，第 5 章でさらに詳しく考察する．

前述の通り，神経は電流の方向に対して選択性をもって発火する．これはシナプス間隙イオン泳動説で説明ができる．シナプス間隙イオン泳動説ではシナプス後のイオンチャネル付近の神経伝達物質や陽イオン濃度を上昇/下降させることで神経発火を促進/抑制するというものである．このイオンの移動量と移動方

向はシナプス間隙に形成される電場によって決定されると考えられる．つまり，電流経路仮説における有効な方向の電流とは，シナプス間隙にシナプス前-シナプス後の方向の電場を形成する電流の事であると考えられる．また，この時に形成される電場の強さは刺激電流の強度と相関があり，強い電場はより多くのイオンを泳動させることが可能であると考えられる．

このシナプス間隙イオン泳動説は単一の神経の電気刺激による発火の機序を説明する事は出来ていると考えられる．しかしながら，感覚が惹起されるためには同じ物理現象を検知する神経がまとまって発火する必要があるため，発火が誘発される神経が単一の神経のみである場合，感覚はほぼ惹起されないと考えられる．では，まとまった数の神経発火を誘発するには，多くの感覚器の持つシナプス間隙が電流の影響を受ける向きに揃っている必要があると考えられる．よって，神経系のシナプスの方向に注目すると，中枢神経系におけるシナプスの向きは一定ではない．これは，中枢神経系においては多くのニューロンが多数の軸索を持ち，様々な位置で多くのニューロンとシナプスを形成しているためである．一方で，末梢神経系においては，ある程度シナプスの向きが決まっている神経が存在する．これは，末梢神経は外界で起こっている物理現象を検知する必要がある事から，おおまかに受容細胞は感覚受容部を外界(物理現象が起こっている方向)に向けており，中枢神経系に情報を伝えるシナプスを体の内側に向けているためである．よって，刺激電流が感覚を惹起するのは，末梢神経系においてシナプスの方向がそろっているシナプス間隙のイオンを泳動させるためであり，神経発火が刺激電流の方向や極性に対して選択性を持つのはこのイオンの泳動が発火を誘発する方向に引き起こされたときにのみ神経が発火するためであると考えられる．

これらの事から，頭部への経皮電気刺激が神経の発火を引き起こすには，頭蓋骨の穴を通って感覚器に流れた電流の方向がシナプス間隙に有効な方向の電場を十分な強度で形成する必要があると考えられる．よって，電流経路により形成される感覚器周辺での電流の方向とシナプスの方向は電気刺激が感覚を惹起する上で非常に重要な要素である．

そこで，本章における以下の節では，前庭感覚，味覚，嗅覚の構造と感覚受容メカニズムを説明し，電流経路仮説とシナプス間隙イオン泳動説の二つの観点から前庭感覚，嗅覚，味覚を経皮電気刺激がどのように惹起しうるのかを考察する．

2.3. 前庭感覚

本節では前庭感覚器の感覚受容メカニズムの説明と用語の定義を行い，電気刺激が前庭感覚の情報処理にどのように干渉しうるかを電流経路とシナプス間隙イオン泳動説の二つの観点から考察する．さらに，既存の前庭感覚提示手法と前庭電気刺激の先行研究を通し，前庭電気刺激の前庭感覚ディスプレイとしての問題点を示す．

2.3.1. 前庭感覚器の感覚受容メカニズムと電気刺激のはたらき

本項では，本研究で対象としている感覚の一つである，前庭感覚器の感覚受容メカニズムを説明し，電流経路とシナプス間隙のイオン泳動の観点から電気刺激がどのように前庭感覚を惹起するかを考察する．

前庭感覚器は三半規菅(Semicircular ducts) と耳石器(Otolith)で構成されており，耳石器は卵形嚢(Utricle) と球形嚢(Saccule) に分けることができる．

このうち，三半規管は角速度を受容する器官である．左右の三半規管はそれぞれ 3 つの半規管で構成されており，それぞれ前半規管(Superior Canal)，後半器官(Posterior Canal)，外(水平)半規管(Horizontal Canal)と呼ばれている．これらの半規管の内部はリンパ液によって満たされており，半規管の膨大部にはクプラ(Cupula)と呼ばれるゼリー状の突起がある．ゼリー状の突起は直下の有毛細胞とつながっており，リンパ液の移動によってクプラが傾くと，有毛細胞(Hair Cell)が刺激される．この有毛細胞への刺激によって角速度の情報を伝達する．

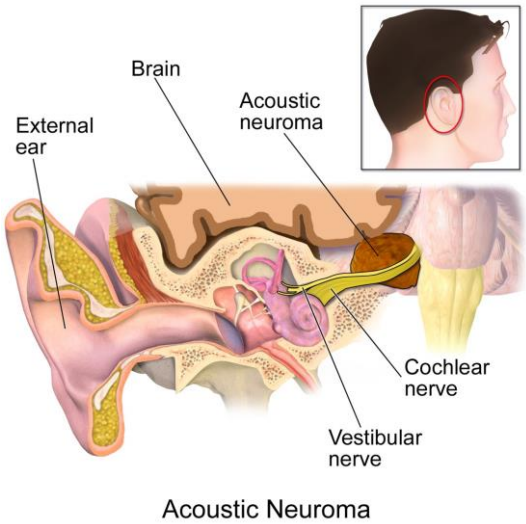


図 2.3.1：半規管の位置と前庭の構成[55]

卵形嚢と球形嚢は直線加速度を受容する器官である．卵形嚢と球形嚢は互いに垂直の関係にあり，この二つをまとめて耳石器という．卵形嚢が垂直方向の加速度に応答して，球形嚢が水平方向の加速度に応答する．それぞれには炭酸カルシウムでできた耳石と有毛細胞が存在する．体が動くと耳石が慣性の法則により動き，その動きによって有毛細胞が刺激される[30,66,77].

有毛細胞とは，感覚毛を持った細胞である．一つの有毛細胞は単一の方向への感覚毛の傾きに対して反応する．有毛細胞は支持細胞によって支えられる．この支持細胞は感覚毛の対側に位置し，支持細胞に埋もれるように感覚神経とシナプスが形成されている．

感覚毛が機械的な刺激によって倒されることで，イオンチャネルの開閉が起こり，細胞外から細胞内に流入するカリウムなどの陽イオンの量が変化する．有毛細胞内へのイオンの流入量の変化は，細胞内の膜電位の変化を誘発し，接続する感覚神経へのシナプス間隙に放出する神経伝達物質量を変化させる．神経伝達物質を受容した感覚神経はインパルス上の活動電位(Action Potential)を発生させ，活動電位の周波数によって脳へと情報を伝えていく[30,66].

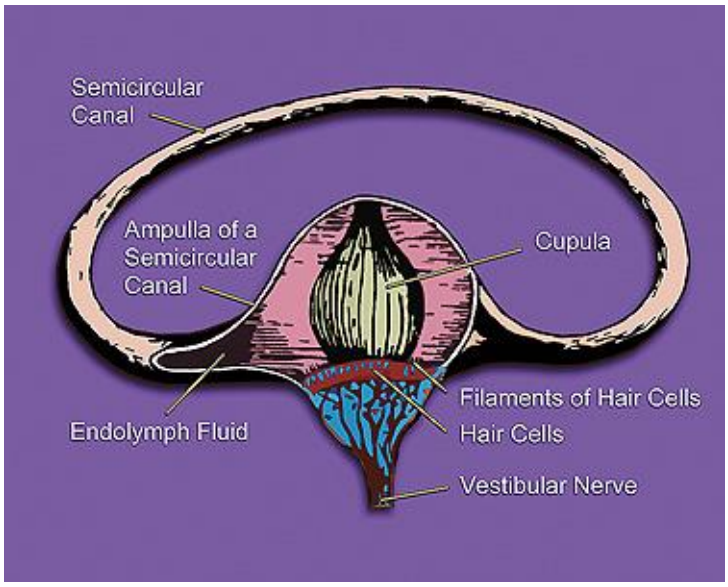


図 2.3.2：半規管の仕組み[53]

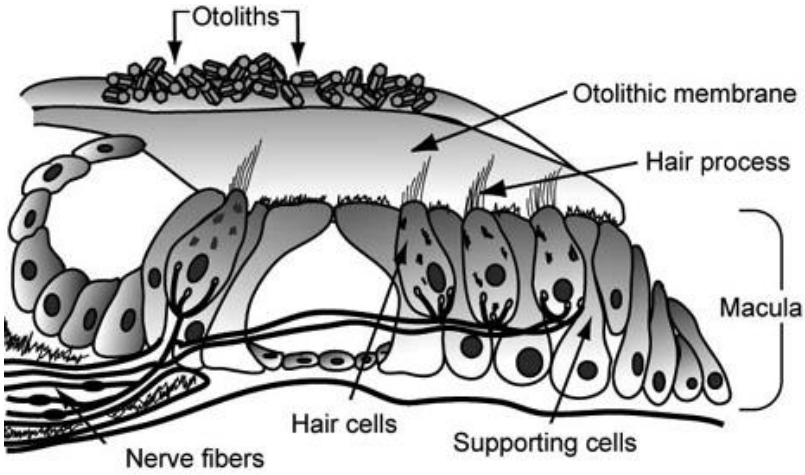


図 2.3.3：耳石器の仕組み[54]

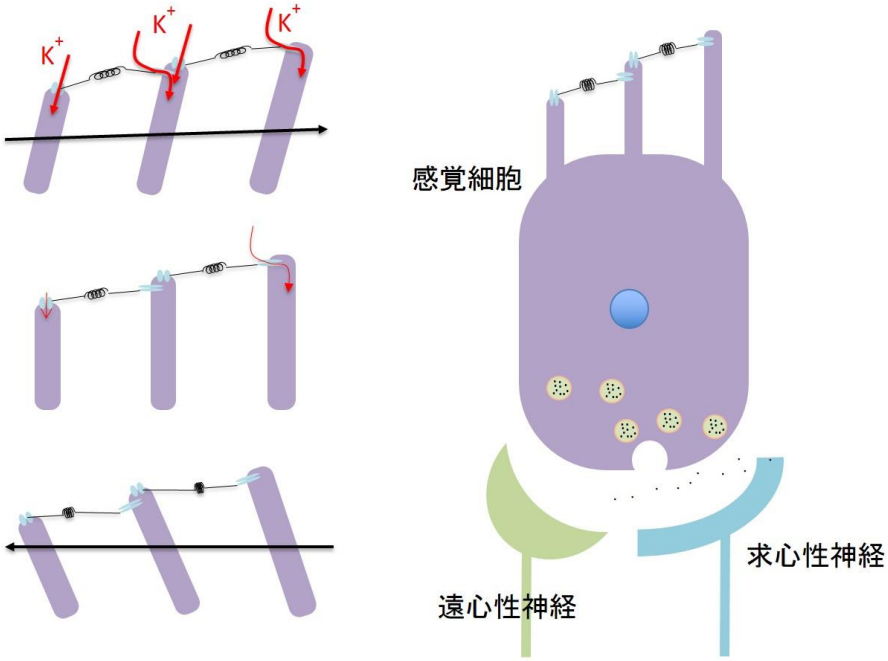


図 2.3.4：有毛細胞の発火機序[30]

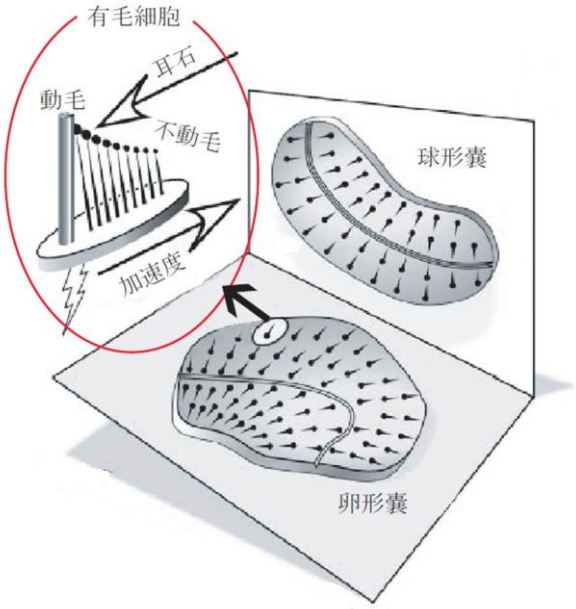


図 2.3.5：球形嚢と卵形嚢内の有毛細胞の向き[16]

卵形嚢と球形嚢の内部には無数の有毛細胞がある．卵形嚢であれば大まかに左右方向と前後方向の合成方向を向いており，球形嚢内部では上下から前後方向を向いている．よって，頭部の直線加速度はこれらの有毛細胞の発火量の合成として表されると考えられる．

前庭感覚器は第二次感覚細胞である．前庭感覚器では有毛細胞で受容された加速度や角速度などの物理現象によって受容器電位がアナログ的に変化する．この電位変化は感覚毛の傾き量と傾く方向に依存する．このアナログ的な電位変化によって，シナプス間隙に放出される神経伝達物質(グルタミン酸)の量が変化する．シナプス間隙に放出された神経伝達物質はシナプス後のイオンチャネルの開口を促進し，シナプス後の発火を誘発する．

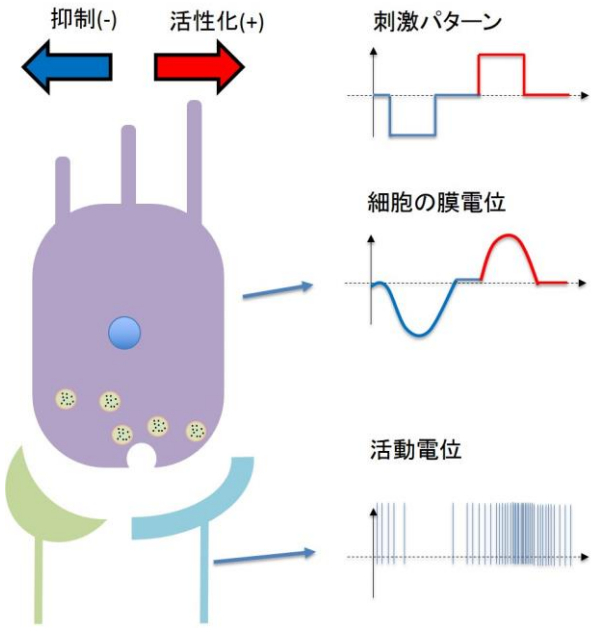


図 2.3.6：前庭感覚器における細胞の電気的挙動[68]

有毛細胞に接続している感覚神経はインパルス的な活動電位を伝達する神経である．有毛細胞の感覚毛の傾きと方向はこの活動電位の頻度によってコーディングされる．この感覚神経は中枢神経系に軸索を伸ばす．

これらの事をふまえ，前庭電気刺激がどのように前庭感覚器の発火を誘発し，前庭感覚を惹起するのかをシナプス間隙イオン泳動の観点から考察する．電気刺激による前庭感覚惹起のメカニズムを電流経路仮説とシナプス間隙イオン泳動説の観点から考える．一つの有毛細胞は単一軸方向の感覚毛の傾きのみを検知する構造である．このため，方向の加速度や角速度を検知する有毛細胞は同じ方向を向いている．この事から同一の方向を検知する有毛細胞のシナプス間隙はある程度同一の向きのシナプスを形成していると考えられる．よって，前庭感覚器に特定の方向の電流を流した場合，特定の方向の前庭感覚検知する有毛細胞のみを発火させる方向の電場をシナプス間隙に形成し，その方向の前庭感覚を惹起すると考えられる．

本項では前庭への電気刺激がどのように前庭感覚を惹起するかを解剖生理学的な知見と電流経路仮説，シナプス間隙イオン泳動説の観点から考察した．

2.3.2. 前庭感覚ディスプレイと前庭電気刺激

本項では，前庭電気刺激(GVS: Galvanic Vestibular Stimulation)やモーションプラットホームなどの前庭感覚提示手法の現状を示す．また，前庭電気刺激の感覚惹起メカニズムについての先行研究の説明を通して，既存の前庭電気刺激の感覚提示ディスプレイとしての問題点について示す．

前庭感覚は頭部の加速度と角速度を受容する．この感覚は視覚，聴覚，体性感覚などと強力な相互作用を持っている．このため，映像や音声などと同期して前庭感覚を提示する事で非常に高い臨場感を持った VR システムが構築できる[62,60,76]．これらのことから，映像や音声と同期できる空間的な自由度と時間的な分解能を持った前庭感覚ディスプレイが望まれている．

前庭感覚を提示する最も簡潔な手法としては人を機械的に振り回すモーションプラットホームが挙げられる．この手法は実際に人を振り回すため，前庭感覚のみならず触覚による空気の流れや慣性による皮膚変形，内臓感覚など様々な感覚を少ない齟齬で提示できる．このため，前庭感覚の再現度は非常に高い．一方で，この手法は機械が高価である事や大型である事等から，ウェアラブルデバイスや家庭用ゲーム機への応用などの日常で使うデバイスに搭載する事は困難である．また，この手法では重力の方向を変化させることでバーチャルな加速度を人に提示する．このため，人が知覚する加速度のノルムは常に重力加速度と等しい．つまり，この手法は加速度の強度について制約のある手法である．これは前庭感覚ディスプレイとしては一つの欠点であると言える．

軽量安価な装置でかつ重力に依らずに前庭感覚を提示可能な手法として，前庭電気刺激とカロリックテスト(温度刺激検査)が挙げられる．カロリックテストは前庭に温水あるいは冷水を注入する事で前庭感覚を惹起する．この手法で惹起される前庭感覚は非常に強力であるが，前庭感覚の惹起されている方向を回答するのが困難なほど複雑な回転感覚を惹起してしまうため，前庭感覚の提示方向の制御は困難であるほか，温度刺激を利用した場合，刺激の切り替え時に時間がかかってしまう．よって，この手法は前庭感覚ディスプレイとしては不向きな刺激手法である．

これらに対して，前庭電気刺激(GVS)は軽量安価な装置で多自由度な方向への前庭感覚を高い時間分解能で提示可能な手法となる可能性がある．GVS では左右の耳の後ろの乳様突起上あるいは，これらに加えて額に電極を装着し，電極間に微弱な電流を流すことで，バーチャルな加速度感覚を惹起させる．その方向は

陰極方向から陽極方向である．このバーチャルな加速度感覚によって，人間は重力方向をバーチャルな加速度と実際の重力方向の合成方向であると錯覚する．さらに，起立時の人間には重力方向に対して体を平行に保とうとする，姿勢反射(Attitudinal Reflex)が働いている．このため，GVS 提示が行われると，人は反射的に体を陽極側に傾けてしまう[9,12,23]．この姿勢反射に伴い，GVS によって足の筋肉に誘発筋電が発生する事が知られている．

また，前庭感覚は体内の血管の拡張/縮小に影響を及ぼす，前庭血圧反射(Vestibulo-Cardiovascular Reflex)の存在が知られており，めまいや血圧異常の患者のためのツールとしての応用が期待されている．他の医療応用としては前庭感覚へのランダム交流刺激によって神経疾患を改善するといったアプローチもされている[69]．

さらに，前庭電気刺激は記憶や運動機能，身体イメージの形成，脳活動などにも影響を与えると言われている[7,11,13,14,34]．

通常の GVS においては直流電流での刺激が行われる．これに対して，交流電流を GVS の刺激電流として用いる場合がある．この時には，周波数に応じて現れる身体反射応答が異なる．~0.5Hz 程度の範囲においては，極性の変化に応じて体が左右に揺れる．0.5~10Hz 程度までは，目の回旋運動が現れる．10Hz 以上の周波数からは，身体動揺も眼球の回旋運動も計測されない．この眼球運動は，前庭感覚による反射的なもので，前庭動眼反射(Vestibulo-Ocular Reflex)と呼ばれている[81,82]．また，先行研究においてこの前庭動眼反射を最も小さな電流値で誘発可能な周波数は 1Hz 程度であることが示されている[19,81]．

GVS は，従来から前庭器官の異常を検査するためのツールとして利用されてきた．また，GVS は直観的に人間の行動に働きかけるため，与えられた情報の解釈を必要としない歩行誘導への応用や，VR において視聴覚の情報と前庭感覚を合わせることにより，臨場感の向上が期待されている[18,60]．このため，歩行周期中のどのタイミングで前庭感覚が重要とされているのかに関する研究[84]や歩行軌跡への影響についての研究[60]や画面と同期した前庭電気刺激によって臨場感が向上するかどうかを検証する実験[60]も行われている．

前項で説明した通り，前庭感覚器は直線加速度を受容する耳石器と角速度を受容する半規管で構成される．GVS がどのように前庭感覚を惹起するのかについては，現在も議論の対象である．従来からの最も有力な説は Fitzpatrick らの説である．その説では前庭電気刺激がどのように感覚を惹起するかについて，次

のように説明される．「GVS は左右の内耳にある 3 つずつの半規管を均等に活性化する．その活性化によって惹起される角速度は電極の極性に依存する．それら 6 つの角速度の合成方向として左右，あるいは前後の角速度が惹起される」．この説においては，耳石器も全て均等に活性化され，その方向は電極の極性に依存するが，いくつかの実験の結果，支配的であるのは半規管であると主張している[6,17,16,33,37,48,49]．本研究ではこの説を「半規管均等刺激説」と呼ぶ．半規管均等刺激説において，刺激電流がどのように感覚を惹起するのかは説明されない．また，電流の経路や向きなどの議論はなされていない．

GVS は電気刺激装置のみで加速度感覚の提示が可能である．しかしながら，VR 技術としての応用を考えると 2 つの問題がある．1 つは，提示加速度感覚の自由度不足である．現状の GVS が提示できる加速度感覚の方向は左右と前後のみである．前庭感覚提示ディスプレイとして利用するには，人間が日常生活で受容する前庭感覚の方向を全て再現できることが望まれる．2 つ目は提示加速度感覚が微弱であるという点である．GVS の刺激電流の強度と惹起される加速度感覚の強度は相関があるため，強力な加速度感覚を惹起するには大きな刺激電流で刺激すればよいということになる．しかしながら，GVS は頭部に電流を印加するため，安全性の観点からは無制限に電流値を大きくすることはできない．そこで，本研究では文献の調査[36,64]や専門の医師との相談の結果，GVS を安全に運用するためのガイドラインを以下のように定めている．

- 刺激電流の最大値は 3.0mA.
- 刺激電流の最長持続時間は 5 秒.
- 一日の刺激時間の合計は 60 秒まで.
- 刺激と刺激の間には 3 分間の休息をとる.

このガイドラインは安全を担保する上で非常に重要なものであるが，3.0mA の電流値では，概算で最大でも重力の 20%程度の加速度感覚の強度までしか惹起できない．VR 技術においての前庭感覚ディスプレイとしては重力と同程度の加速度感覚提示が望まれる．よって，この加速度感覚の強度は不十分である．

そこで，本研究では前庭電気刺激による加速度感覚提示の多自由度化と強化を目指す．

2.4. 味覚

本節では前節の前庭感覚と同様に，電流経路とシナプス間隙イオン泳動説の両方の観点から，電気刺激が味覚の感覚情報の処理にどのように干渉しうるかを考察する．さらに，味覚提示の先行研究を通して，味覚提示の現状と電気刺激による味覚提示の問題点を示す．

2.4.1. 味覚の感覚受容メカニズム

本項では味覚の感覚受容の生理メカニズムの説明と用語の定義を行い，味覚の情報処理にどのように電気刺激がはたらきかけるのかを考察する．

味覚は口腔内に感覚受容器を持ち，口腔内の化学物質の種類と濃度を知覚する感覚である．味覚は基本五味(甘味，塩味，苦味，酸味，旨味)の組み合わせによって表され，それぞれに対応する 1 種類以上の受容器を持っている．これらの五味をそれぞれ呈味する物質の代表例として標準物質がある．この標準物質はそれぞれ，甘味 : グルコース($C_6H_{12}O_6$)，塩味 : 塩化ナトリウム(NaCl)，苦味 : 塩酸キニーネ($C_{20}H_{24}N_2O_2$)，酸味 : クエン酸($C_6H_8O_7$)，旨味 : グルタミン酸ナトリウム($C_5H_8NNaO_4$)とされている．これらはいずれも水溶性であり，水溶液は無色無臭である．

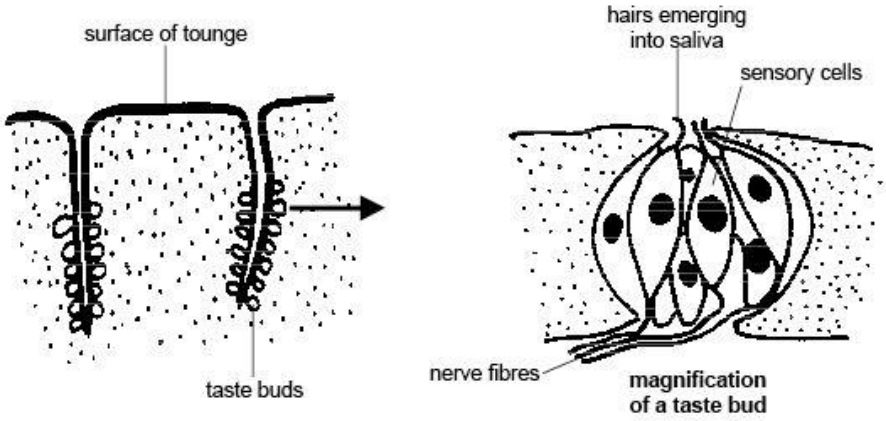


図 2.4.1 : 舌の味蕾と味細胞[50]

味覚の受容器は味細胞であり，これは舌を中心とした口腔内にある味蕾の中にある．味蕾は舌表面の乳頭の脇の窪みの中にあり，一つの味蕾は 50~150 個程

度の味細胞を含んでいる．90%以上の味細胞は 2 種類以上の基本味に対して反応する．

味細胞は第二次感覚細胞である．味細胞は味孔と呼ばれる先端部分に化学物質を受容する受容器やチャネルを持っており，対応する化学物質を受容すると，Na^+透過性チャネルが開く．これにより，細胞外から細胞内に Na^+イオンが流れ込み，味細胞は脱分極し，アナログ的に電位が上昇する．この脱分極を受けて，Ca^{2+}透過性チャネルが開き，エキソサイトーシスによって神経伝達物質(主として γ-アミノ酪酸)をシナプス間隙に放出し，次の神経へ情報を送る．この神経から，情報はパルス的な活動電位の周波数として情報が伝達される．

味細胞は受容器によって受容する味が異なる．塩味を受容する味細胞は受容器としてナトリウム透過性イオンチャネルを持っている．また，酸味を受容する味細胞は水素イオン透過性イオンチャネルを酸味受容器として持っており，その他の味は各化学物質を受容する受容器を持っている．

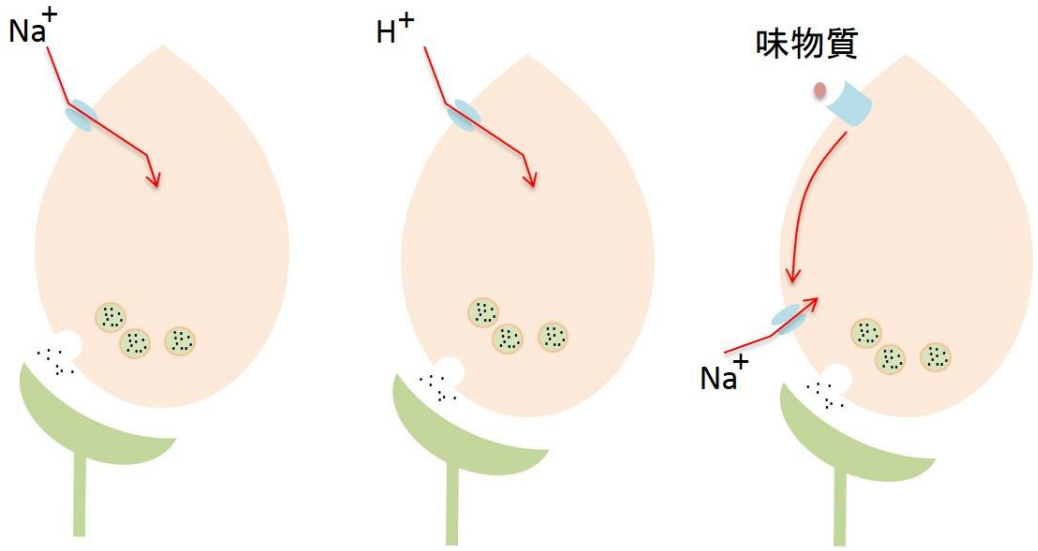


図 2.4.2：味細胞の味覚受容器と神経伝達の機序[30]
左:塩味　中央:酸味　右:その他の味覚

基本五味の他に，辛味が味覚として扱われることがある．しかし，辛味は味蕾中に受容器がなく，口腔内の三叉神経によって受容される．これは，辛味が痛覚や温冷覚などと同様に処理されていることを示している．このため，味覚研究においては通常辛味を含まない．

これらの味覚の神経生理的な感覚情報処理の機序をふまえ，電気刺激がどのように味覚に干渉しうるかを考える．味細胞は味孔を舌の表面側に向けて配置されており，味孔の対側は基底細胞によって支持されている．この基底細胞のすぐ傍で味細胞は接続する感覚神経とシナプスを形成している．この事から，味細胞は舌表面をシナプス前とし，舌の内側をシナプス後とするシナプスが形成されている．このため，舌表面から舌の内側あるいは舌の内側から舌表面に向かう電流を印加すれば味細胞は活性化され，味覚が惹起されると考えられる．ただし，これらの味細胞の向きは味細胞がどの味を受容するかに依らない．このため，電気刺激は味を惹起するが，特定の味のみを惹起する事は困難であると考えられる．

本項では電気刺激が味覚を惹起する機序を考察した．電気刺激による味覚の惹起については次項に示す．

2.4.2. 味覚ディスプレイと味覚電気刺激

本項では，電気刺激を含めた味覚ディスプレイの現状を説明する．さらに，電気刺激による味覚惹起に関連する先行研究を含め，前項に示した電気刺激による味覚惹起のメカニズムの考察の妥当性を議論する．

味覚提示ディスプレイとして求められるのは任意の味の提示である．味覚は基本五味それぞれの強度によって表される．このため，基本五味それぞれの味強度を任意にコントロールする事が必要である．

味覚を再現するディスプレイとして最も単純な物は味を呈する物質を混ぜ合わせて口腔内に放出するものである．この手法をとっている味提示ディスプレイの例としては Food Simulator[19]等が挙げられる．しかしながら，これらの手法は実際に味物質を準備しなければならないため，コストや手間がかかる事，味を口腔内に味物質を放出するため，味を変化させるには新たに味物質を投入させる必要があり，味質の変化を引き起こすには時間がかかる事等が問題点として挙げられる．

これに対して，電気刺激による味覚提示も例がある．味覚電気刺激(GGS: Galvanic Gustatory Stimulation)は舌付近に電極を少なくとも一つ設置し，電流を印加する事で口腔内の味受容器を刺激し，味覚を錯覚させる技術である．GGS は別名 ETS(Electrical Tongue Stimulation)などとも呼ばれる．従来から，GGS は陽極も陰極も口腔内に設置し，電流を印加する事で電気味あるいは金属

味といった嫌な味を惹起するため，味覚の異常検査ツールとして医療目的で利用されてきた[73].

先行研究において，電気味は陽極の周辺で惹起されることが知られている[71]. 一方で，陰極のみを口腔内に設置し，陽極を体の別の部位に設置した電気刺激においては，電気味を惹起せず，食塩水の塩味を抑制する効果がある事が知られている[43,79]．また，この電気刺激においては，電流印加中は塩味が抑制されるが，電流印加を中止すると，しばらくの間は，電気刺激をしていない時の同じ濃度の食塩水と比較して強い塩味を知覚する効果がある事が知られている[23]. 本研究では，舌の付近に陽極がある刺激を陽極 GGS(Anodal-GGS)，舌付近に陰極がある刺激を陰極 GGS(Cathodal-GGS)と呼び，陰極 GGS 終了後の味覚の増強効果をカウンター効果と呼ぶ.

これらの電気刺激は VR 技術への応用を考えたときには，味物質を用意し，混ぜ合わせて放出する必要がないためコストや手間は少ない．しかしながら，応用範囲は電気味を惹起したい時と，塩味を操作したい場合のみであり非常に限定的である．よって，GGS は味覚提示ディスプレイとしては味覚の操作の自由度が不足しているという問題点があった．一方で，温度変化や電流値が非常に微弱な交流刺激を利用することで，電気味だけではなく酸味や甘味，ハーブのような味を惹起する研究もあるが，これらは再現性があまり高くないため，誰にでも同じように味を提示できない[32,78]．味覚提示ディスプレイとして陽極刺激を利用するのは困難であると考えられる.

そこで，本研究では特に陰極 GGS による味覚抑制効果に注目している．現状の陰極 GGS は食塩水の呈する塩味のみの抑制が確認されているが，それ以外の四味についての味覚抑制が達成されれば，食べ物を食べながら好みの味に調整するといった拡張現実(AR)的な応用が可能となるほか，五味全ての味を含んだ標準物質に対して味覚抑制をかけることで，任意の味を呈する事が可能となると考えられる．塩味以外の四味について味覚の抑制効果が確認されていない現状は，陰極 GGS の塩味抑制効果の機序が明確でないことに起因する．このメカニズムが明らかになれば，他の味覚についても抑制が可能となると考えられる.

陰極 GGS の塩味抑制効果のメカニズムとして，二つの可能性が考えられる．一つは電気刺激による味を呈するイオンが刺激電流の形成する電場によって泳動することで，味細胞周辺に味を呈するイオンが欠乏した可能性である．本研究では，この仮説を「口腔内イオン泳動説」と呼ぶ．これの対立仮説は「神経刺激

説」である．神経刺激説において味覚の抑制効果は，電気刺激によって味細胞が活性化されることで神経疲弊を引き起こすか，電気刺激による味細胞の抑制によって味の知覚が困難になっていると説明される．

この陽極 GGS と陰極 GGS の感覚惹起と抑制の機序を考える．陽極 GGS 時には舌の付近に電極がある．舌は唾液などで覆われているため表面のインピーダンスが低いと考えられる．つまり，印加された電流は舌表面全体を覆うように広がりながら，舌の内側に向かって流れると考えられる．これは，唾液中の方が唾液-舌間よりもインピーダンスが低いと考えられるためである．舌にある味細胞は舌の表面から舌の内側に向かってシナプスを形成している．よって，舌への電気刺激においては味細胞のシナプス間隙に有効な方向の電場を形成しうると考えられる．よって，陽極 GGS 時に惹起される電気味は全ての種類の味細胞を発火させた五味の合成の味であると考えられる．

陰極 GGS に関しては，口腔内イオン泳動説を支持している．これは，先行研究において陰極刺激によって味が変化しない物質が確認されているためである．陰極 GGS が順応などの神経への影響によって誘発されている現象であれば，全ての呈味物質において抑制が起こると考えられる．一方で，口腔内イオン泳動説によって抑制されるのはイオン化する呈味物質のみである．先行研究で抑制が確認されている塩味を呈するのは電解質である塩化ナトリウムなどのナトリウム塩の一部であり，塩味を受容する味細胞はナトリウム透過性イオンチャネルを受容器として持っている．これらの事から，陰極 GGS の味覚抑制効果は口腔内のイオンの泳動によって引き起こされていると考えられる．

本項では味覚提示手法の現状を説明し，電流経路とシナプス間隙イオン泳動説の観点から味覚電気刺激の機序を考察した．本節の議論において示した，味覚電気刺激の感覚提示ディスプレイとしての一つの大きな問題を解決するために，本研究では陰極 GGS の及ぼす味覚抑制効果の機序を明らかにし，塩味以外の四味への味覚抑制の達成を目指す．

2.5. 嗅覚

本節では前節の前庭感覚，味覚の節と同様に，電流経路とシナプス間隙イオン泳動説の両方の観点から，電気刺激が嗅覚の感覚情報の処理にどのように干渉しうるかを考察する．さらに，嗅覚提示の先行研究を通して，嗅覚提示の現状と電気刺激による嗅覚提示の感覚提示ディスプレイとしての問題点を示す．

2.5.1. 嗅覚の感覚受容メカニズム

本項では嗅覚の感覚受容の生理メカニズムを説明し，嗅覚の情報処理に電気刺激がどのように干渉しうるかを電流経路とシナプス間隙イオン泳動説の観点から考察する．

嗅覚は味覚と同様の化学物質の濃度と種類を検知する感覚である．嗅覚は鼻腔内の空気中の化学物質の種類と濃度によって知覚される．嗅覚の感覚器は鼻腔内に存在する嗅神経と鼻腔内にある三叉神経枝である．嗅覚のほとんどは嗅神経によって受容されるが，アンモニア臭などの刺激臭は三叉神経で受容される[20,21]．嗅神経中の受容器の種類は非常に多く，300 種類以上と言われている[30,80]．このため，味覚でいう基本五味のような基本的な臭いは存在せず，嗅覚は非常に多様な種類の化学物質を同定することが可能である．

嗅神経での化学物質の受容は，嗅神経中の嗅覚受容細胞によって行われる．この嗅覚受容細胞は第一次感覚細胞である．嗅覚細胞は樹状突起の先に，線毛を持っており，その線毛は鼻腔内の粘膜まで伸びている．嗅覚における刺激変換機構は基本的に全てこの線毛にある．受容器に特定の化学物質が受容されると，線毛にある Na^{+}と Ca^{2+}イオン透過性チャネルが開く．これによって細胞外部から陽イオンが流入することで，線毛部では活動電位が発生する．この線毛で発生した活動電位は，そのまま嗅覚細胞内でインパルスに変換される．そして，嗅球(Olfactory Bulb)へと伝達される．つまり，嗅神経は嗅球に至るまでは，シナプスでの情報伝達はない．

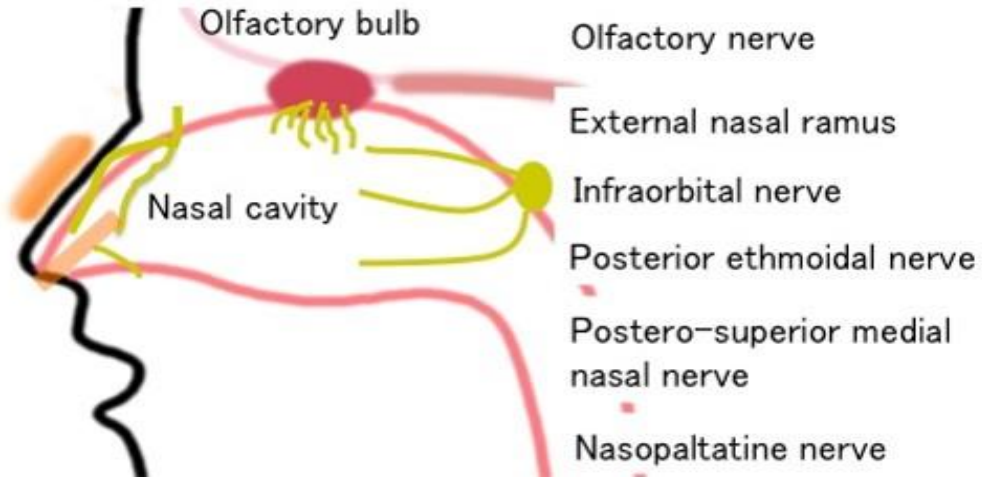


図 2.5.1：鼻腔内の神経配置　[41]

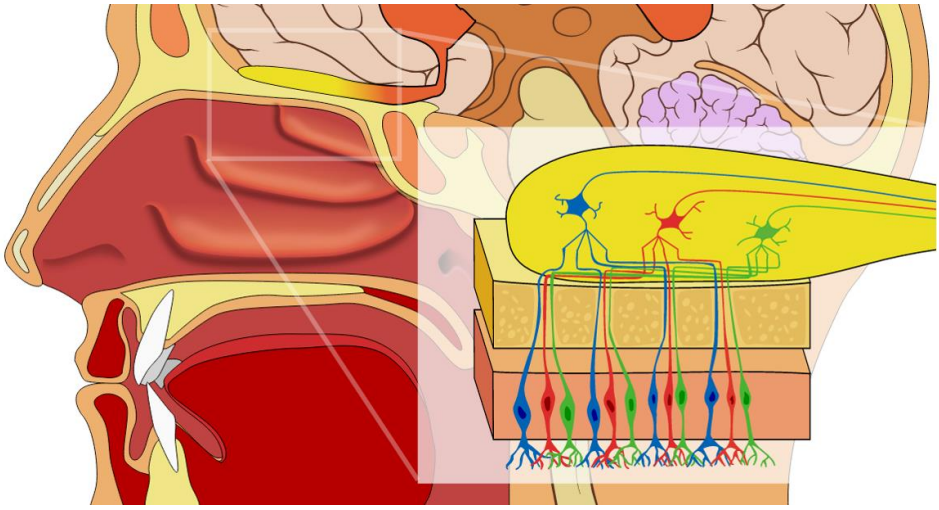


図 2.5.2：嗅覚神経系[51]

一方で，刺激臭を受容する三叉神経はやや異なる．刺激臭は三叉神経の自由神経終末において受容される[20]．このため，刺激臭は純粋な臭いというよりは痛みに近い感覚である．この痛みを伝達する神経は無髄繊維である C 繊維と薄い髄鞘をもつ Aδ繊維に分かれる．前者は痛みのうち，熱く焼けるような痛み(Burning Sensation)を伝達し，伝達速度は Aδ繊維と比較して遅い．Aδ繊維は情報伝達が早く，鋭く刺すような痛み(Stinging Sensation)を伝達する．自由神経終末は侵害受容器と呼ばれる．侵害受容器は機械的刺激や温度，化学的刺激のうち，組織を侵害する刺激に反応する．多くの侵害受容器はこれらの侵害刺激を複数受容する．このため，多種侵害受容器(Polymodal Nociceptor)と呼ばれる．一方で，侵害刺激に対して選択性を示す侵害受容器もある．機械刺激に対して選択性を持つ侵害受容器を機械侵害受容器(Mechanical Nociceptor)，温度に対して選択性を持つ侵害受容器を温度侵害受容器(Thermal Nociceptor)，化学侵害刺激に対して選択性を持つ受容器を化学侵害受容器(Chemical Nociceptor)と呼ぶ[10,30]．

侵害受容器の刺激変換メカニズムは，他の感覚器と比較して複雑である．機械侵害刺激に対しては，膜の伸展によってイオンチャネルが活性化されることや，傷を受けた細胞はプロテアノーゼ，ATP，カリウムイオン等の多くの物質を放出する．このうちサブスタンス P は肥満細胞に作用し，ヒスタミンを生成する．

プロアテノーゼは細胞外ペプチドを分解することで，ブラジキニンという物質を生成する．ブラジキニンは TRPA1 や TRPV1 などの侵襲受容器のイオンコンダクタンスを上昇させる．また，ATP は ATP 作動性イオンチャネルに直接結びつき，活性化させる．さらに，K^+濃度の上昇は膜電位を直接脱分極させる効果を持つ．

温度侵害受容器の動作原理としては，侵害受容器の熱感受性イオンチャネルが開口することで，自由神経終末の脱分極を引き起こす．

また，化学侵害受容器の動作原理としては，自由神経終末にある様々な受容体が化学物質によって開口する．これによって自由神経終末が活性化する．アンモニア臭などのツンとする感覚は，TRPA1 受容体の開口によって惹起される．この TRPA1 受容体は非選択性の陽イオンチャネルであり，開口すると Ca^{2+}の細胞内濃度が上昇することが知られている．TRPA1 受容体は低温によって活性化される事が知られている．気温の低い日に鼻から外気を吸い込むとツンとした感覚が惹起するのはこのためである．この TAPA1 受容体は pH の変化によっても開口する事が知られている[44,56]．アンモニアや二酸化炭素等の刺激臭はこの鼻腔にある細胞とその周辺の組織の pH を大きく変化させる．これによって TRPA1 受容体が開口し，刺激臭独特のツンとした感覚を惹起する．

この侵害受容器である三叉神経枝と嗅神経の働きによって，嗅覚は知覚される．

これらの嗅覚の感覚受容メカニズムをふまえて，電気刺激が嗅覚の情報処理にどのように干渉しうるかを考察する．嗅神経は第一次感覚受容器であり，嗅球に到達する程度に長い軸索を持っている．嗅神経は嗅球の内部において中枢に軸索を伸ばす神経とシナプスを形成しており，このシナプス形成よりも末梢側にはシナプスは無い．また，嗅球は全面に嗅神経からの投射を受けている．よって，刺激電流はこの嗅神経の形成するシナプスに有効な方向の電場を形成する事が困難であると考えられる．よって，経皮電気刺激は嗅神経やそれに接続する神経の発火を誘発する事はできないと考えられる．一方で，三叉神経枝の発火は誘発できる可能性がある．鼻腔にある三叉神経枝は自由神経終末に化学侵害受容器が存在する．これらの侵害受容神経は第一次感覚細胞であるため，ある程度の長さを持った軸索を中枢神経系に伸ばしている．このため，中枢神経系ではシナプスの方向が規則正しく並んでいるとは考えにくい．よって，経皮電気刺激は侵害受容器のシナプス間隙にも有効な方向の電場を形成する事はできないと考

えられる．一方で，この自由神経終末は鼻腔内の空気中の希薄な化学物質の濃度を検知可能な神経である．このため，電気刺激による細胞周辺のイオンの泳動によって pH の変化が引き起こされた場合に，化学侵害受容器が開口する可能性があると考えられる．この化学侵害受容器の開口を誘発する事ができれば少なくとも刺激臭を惹起する事が可能となると考えられる．

以上より，本項では嗅覚の情報処理の生理学的な機序と電流経路，シナプス間隙イオン泳動説の観点から，電気刺激が嗅覚を惹起する可能性についえて考察した．

2.5.2. 嗅覚電気刺激と嗅感覚提示ディスプレイ

本項では，既存の嗅覚提示手法と電気刺激を用いた嗅覚提示手法の現状ついて説明を行う．これらを通して，既存の嗅覚提示手法の感覚提示ディスプレイとしての問題点を示す．

従来から嗅覚を電気刺激によって提示することは難しいと言われてきた[24,42]．他の感覚が電気刺激による感覚提示に成功しているにもかかわらず，嗅覚のみがそれを達成することができなかった理由は明らかにされていない．このため，嗅覚提示のためのディスプレイ研究は化学物質をいかにして鼻腔内に届けるのか，また鼻腔内から除去するのかに重点を置いた研究が非常に多い．

嗅覚提示ディスプレイとしては，固形の化学物質を風によって鼻腔に運ぶ方式と，液体である臭い物質を振動や熱によって空気中に拡散させる方式が主である．これらの方式では，300 以上にもなる臭い受容体のそれぞれに対応する化学物質を準備することができないため，非常に限られた種類(~10 種類)の臭いの提示をアプリケーションに合わせて選定するというものであった[80]．

しかしながら，この方式は空中に臭い物質を放出するため，空気中に残った臭いが次に提示したい臭いと混ざってしまう．また，臭いをユーザーのみに提示したくても，空間的な選択性が低いために，近辺にいる他の人にも臭いを提示してしまうという問題点がある．

これに対して，電気刺激による嗅覚提示が可能であるならば，臭い物質を用意する必要がないことや，ユーザー個人にのみ嗅覚を提示できること，空間中に臭い物質を拡散しないために，次に提示したい臭いと物理的には混ざらないといった利点があると考えられる．

しかしながら，前述のように電気刺激による嗅覚提示は現在報告がない．嗅覚

の感覚受容メカニズムが他の感覚と大きく異なるわけではないことから，電気刺激による嗅覚提示は決して不可能なものではないと考えられる．よって，本研究では電気刺激による嗅覚提示の実現を目指す．

2.6. 本研究の目的

これまでの節において，前庭感覚，味覚，嗅覚のそれぞれの感覚モダリティごとに電気刺激がどのように感覚の情報処理に干渉し，感覚を惹起するかを考察し，これらの感覚提示手法の感覚提示ディスプレイとしての問題点を議論してきた．本章で列挙した問題点を解決する事で，前庭感覚と味覚，嗅覚を通した情報提示技術が普及していくと考えられる．

また，これらの感覚提示において共通しているのは，電気刺激がどのように人の神経系に働きかけ，感覚を惹起しているのかという機序が明確でないという点である．この機序の不明瞭さは本研究で扱う 3 つの感覚提示のための電気刺激だけでなく，生体への電気刺激全体に当てはまる．

生体への電気刺激は，感覚を惹起する電気刺激全てのはたらきを統一的に説明できる機序が存在すると考えられる．この生体への電刺激全体を統一的に説明できる機序を明確化する事は，生体への電気刺激による感覚提示ディスプレイの改善などの工学的な意義と神経系のはたらきに対する理解をさらに深めるという科学的な意義があると考えられる．

よって，本研究では前庭感覚，味覚，嗅覚の電気刺激による感覚提示における感覚提示ディスプレイとしての問題点の解決を通して，電気刺激が神経系はたらきかける機序の解明を目的として，本研究で提唱している電流経路仮説とシナプス間隙イオン泳動説の妥当性を論ずる．

3. 頭部への電気刺激における電流経路仮説とその検証

本章では，電気刺激の感覚惹起の機序についての仮説として，電流経路仮説を挙げ，その説明を行う．さらに，電流経路仮説に基づく刺激設計を行うことで，電気刺激による前庭感覚提示，味覚提示，嗅覚提示の抱える諸問題を解決し，電流経路仮説の妥当性と有用性を示す．

3.1. 電流経路仮説

本節では，2.2 節において概要を説明した電流経路仮説についてより詳細に説明する．

従来の頭部への電気刺激研究においては，電極位置は刺激部位を決定するための非常に重要なファクターであると考えられてきた[39,46]．例えば tDCS 研究において，視覚野を刺激したい場合には後頭部に電極を設置し，運動野を刺激したい場合には頭頂部周辺に電極を設置する．これは，設置電極の真下の脳領域が刺激電流によって活性化/抑制されると考えられていたため，このような電極配置がとられてきた．これは，GVS においてもある程度同様な考え方がなされている．2.3.2.項で触れた Fitzpatrick らの半規管均等刺激説はこの考え方とよく類似している．前庭感覚器は内耳に存在し，内耳は側頭骨の錐体尖と呼ばれる骨の中に存在する．彼らの説では，この真上である乳様突起上に設置された電極から電流を印加する事で陽極側と陰極側で異なる方向の回転が惹起されるとされている．しかしながら，半規管や耳石器がどの様にして均等に，かつ極性によって逆方向になるように刺激されるのかというメカニズムはこの説においては語られていない．

本研究では，Fitzpatrick らの半規管均等刺激説，ひいては電極の真下が刺激電流によって活性化/抑制されるという，電気刺激研究における一種のドグマに対する対立仮説として，「電流経路仮説」を提唱する．

電流経路仮説において，頭部への電気刺激による感覚提示メカニズムは，「頭部に印加した電流のうち，頭蓋骨の穴を通って感覚器に流れた有効な方向の電流のみが感覚を惹起する．」と説明される．これは，頭部を構成する組織の電気

的な特性から推察される．頭部は電気的な抵抗値が低く，電流を通しやすい皮膚や体液，脳などの軟組織と，抵抗値が高く，電流を通しにくい頭蓋骨や脂肪などで構成される．さらに，頭部は，抵抗値の低い脳や脳髄液などの体液を抵抗値の高い頭蓋が覆っており，さらにその周りを抵抗値の低い皮膚が覆っているという空間的な構造を持っている．

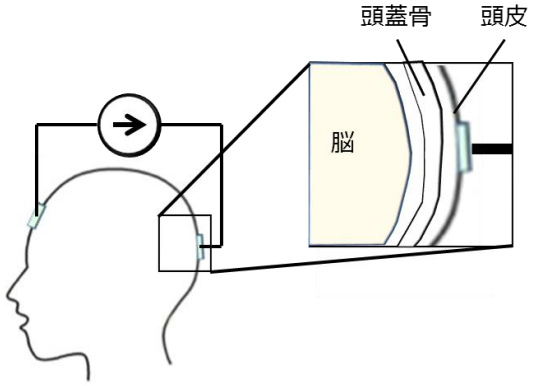


図 3.1.1：頭部への電気刺激と頭部の構成

このため，頭部表面に電極を設置したとしても，印加した刺激電流は頭蓋骨を貫通することはできず，皮膚などの軟組織を流れると考えられる[1,22]．一方で，GVS などの感覚器への電気刺激は実際に感覚を惹起している．これは刺激電流が感覚器まで届き，神経の発火を誘発していることを示している．この感覚器への電流の流入を可能にするのが，頭蓋骨にあいている穴である．頭蓋骨には無数に穴が開いている．特に大きな穴として，外耳道や眼窩が挙げられる．これらの穴は，前庭感覚器をはじめとする感覚器や脳室まで電流を流すような電流経路を形成すると考えられる．実際に，Bryony ら(2002)の先行研究によって，in vitro のモデルではあるが，頭蓋骨の穴が外部電極によって形成された電場の方向を歪ませるということが示されている[4]．よって，電気刺激において，感覚を惹起するのはこの穴の形成する電流経路を通って感覚器にながれた電流のみであると考えられる．

さらに，感覚器や感覚神経の発火には電流の空間的な方向に対する選択性があると考えられる．これは，触覚の電気刺激や味覚への電気刺激における陽極 GGS 等の例から推察できる．触覚電気刺激において振動覚が惹起されるのは陰

極のみである．これは，圧覚を惹起するメルケル細胞が皮膚に印加された電流の方向に対して選択性をもって発火していると考えられる[25,30]．また，舌の付近に陽極を設置し，陰極を別の部位に設置する陽極 GGS は電気味を惹起する．一方で，陰極側のみを舌の周辺に設置する，陰極 GGS は電気味を惹起しない．このことは味覚の感覚神経は舌に流れる電流の空間的な方向に対して選択性をもって発火すると考えられる．よって，感覚器に流れた刺激電流のうち，有効な方向の電流のみが感覚を惹起すると考えられる．

3.2. 頭部抵抗値計測による電流経路の存在の実証

本節では，3.1 節で説明した通り，頭蓋骨の穴が電流経路として成立しうることを検証するために行った，頭部の抵抗値計測実験について述べる．

3.2.1. 実験の背景と目的

前節で述べたように，頭部は導電体である組織と絶縁体である組織の両方によって構成されている．このため，頭部の表面に設置した電極から印加された電流は頭蓋骨を貫通することはできない．よって，感覚器や脳に到達するには，頭蓋骨の穴によって形成された電流経路を通ると考えられる．本実験の目的は，頭部の穴が実際に電流経路として機能していることを示すことである．

また，本実験では頭部に開いている穴の代表として外耳道と眼窩に注目した．この理由は，これらの穴が GVS における電流経路を形成していると考えられるためである．GVS においては乳様突起上に設置した電極間に電流を流すことで左右の加速度感覚が惹起され，額に設置した電極と左右の乳様突起上に設置した電極間に電流を流すことで前後方向の加速度感覚が惹起される．これらのことから，GVS においては前庭感覚器に流れた電流の方向が加速度感覚の方向を決定すると考えられる．この時に，電流経路を形成しうる頭蓋骨表面の穴を考えると，左右の耳に開いている外耳道や眼窩である．

3.2.2. 実験方法

実験の被験者は内耳に病歴のない健常な成人男性 6 名であった．いずれの被験者からも十分にインフォームドコンセントをとった．

実験は静かな実験室で行われた．被験者は頭部 6 つの電極(クリアローデ，フクダ電子社製)を設置された．電極の位置は，図 3.2.1 A に示すように頭部を額

と乳様突起を含む平面で切った時の円状に等間隔に設置された．この時，電極のうち 2 枚はおおよそ乳様突起上に設置されるようにした．この時，額に設置された電極を E0 とし，その右隣に E1, E2 の順番でナンバリングした．また，電極を設置する前に，被験者の皮膚はアルコールと角質除去剤(skinPure，日本光電社製)によって処理された．

その後，全ての電極間抵抗値の計測を行った．計測は電子回路テスター(Digital Multimeter CD731a，三和電子工業社製)によって計測された．このテスターは 0.3mA の直流電流を印加し，抵抗値を計測するものである．

計測されたデータは全電極間抵抗値の平均値で被験者ごとに標準化された．また，この計測方法は前田ら(2006)の方法に基づいている[83]．

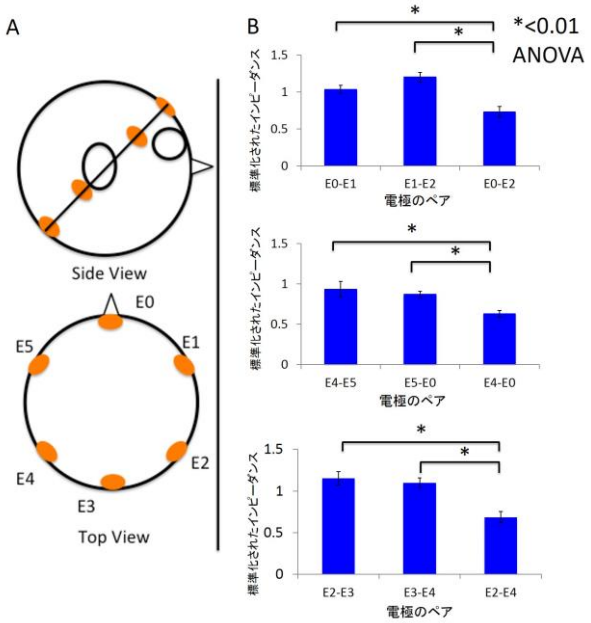


図 3.2.1：抵抗値計測実験[26]
A:電極位置，B:実験結果

3.2.3. 実験結果

図 3.1.1 B に抵抗値の計測結果を示す．各グラフは，E0-E1, E1-E2, E0-E2 間の標準化された抵抗値，E2-E3, E3-E4, E2-E4 間の標準化された抵抗値，E4-E5, E5-E0, E4-E0 間の標準化された抵抗値を示している．これらのグラフにおける error bar は標準誤差を示している．また，*は Kruskal Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較検定による有意差を示している．

これらの図から，電極間距離は 2 倍であるにも関わらず，E0-E2, E2-E4，E4-E0 間の抵抗値は各グラフの隣り合う電極間抵抗値よりも低い抵抗値を持っている．

3.2.4. 実験考察

電極間抵抗値に着目すると，額-乳様突起間と左右の乳様突起間に設置した電極は抵抗値が低いことが示されている．この事から，これらの電極間には抵抗値の低い電流経路が存在すると考えられる．その電流経路を構成しているのは，眼窩と外耳道であると考えられる．

この結果から，頭部の電流経路を図示すると，図 3.2.2 のようになると考えられる．

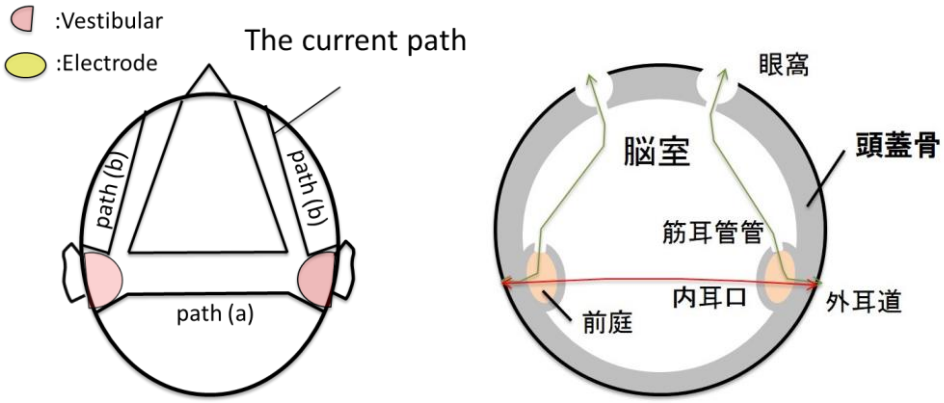


図 3.2.2：頭部内電流経路の概略図[26]

3.3. 頭部への電流印加時の磁場計測による頭部内電流経路の推定

前節において，頭部の抵抗値計測実験によって外耳道と眼窩が頭部内電流経路を構成していることが示された．そこで本節では，頭部に電流を印加したときの刺激電流が作る磁場を計測する事で頭部内を流れる電流を可視化する事で，頭部内の電流経路の推定を行い，眼窩や外耳道が電流経路を構成しうるのかを検証する．

前節で示したように，頭部に電気的な抵抗値が低く電流を通しやすい電流経路があり，眼窩や外耳道がそれらの電流経路を形成していると考えられる．そこで，本実験では頭部に設置した電極から電流を印加したときの頭部周辺磁場を計測し，電流の経路を可視化する事で，眼窩と外耳道が電流経路として成立しう

ることを示す.

この時の磁場計測装置として，通常脳活動に伴って生じる微弱な脳磁場を計測する装置である，脳磁計(MEG: Magnetic Encephalo Graphy)を利用した.

3.3.1. 実験方法

被験者は健常な成人男性 1 名であった．被験者から十分にインフォームドコンセントをとってから実験に参加してもらった.

実験は磁気シールド室内で行われた．被験者は左右のこめかみと外耳道の前の合計 4 か所に電極を設置された．また，額には MEG の SQUID センサーと頭部の相対位置・姿勢を計測するためのコイルが設置された．この実験において MEG デュアーのサイズが被験者の頭部のサイズに対して余裕がなかった．このため，今回の実験では前回の実験と同様の電極配置ではなく，眼窩付近と外耳道付近で電極を貼付可能な位置とした.

さらに，被験者の頭部形状と電極位置の相対的な位置関係を記録するために，3 次元位置センサーによって頭部表面と電極表面，コイル表面の位置を計測した.

頭部とコイル，電極位置の関係を計測した後に，被験者は MEG 用のベッドの上に横になり，デュアー内に頭部を入れて目を閉じた.

刺激条件はこめかみ間に電流を印加する条件と両耳の横に設置した電極間に電流を印加する条件，同側のこめかみ-耳の横の電極間に電流を印加する条件，対側のこめかみ-耳の横の電極間に電流を印加する条件の 6 条件とした.

MEG の SQUID センサーは，微弱な磁場を計測する事が可能なセンサーである．このセンサーに影響を与える磁場は，頭部に印加された電流の作り出す磁場と，刺激電流を頭部に流すための導線の作り出す磁場の二つがある．この他に脳活動に伴う脳磁もセンサーに影響を与えるが，刺激電流の作る磁場の大きさとはオーダーが異なる．よって，今回は脳磁の影響は無視する．この二つの磁場のうち，本実験の計測の対象は頭部に流れる電流の作る磁場のみである．しかしながら，導線は頭部に電流を印加するためには必要不可欠なものである．そこで，本実験では導線の空間的な配置とそこに流れる電流量から導線の作る磁場がセンサーに与える影響をビオ・サバールの法則による計算によって導出し，計測した磁場データから差し引くことで，導線を流れる電流が与えるセンサーへの影響を除去した.

ビオ・サバールの法則において，磁場は距離の二乗に反比例して減衰する事が示されている．つまり，センサーからある程度離れた導線は，頭部を流れている電流などと比較するとセンサーに与える影響は非常に小さい．よって，電極の直近の方向の導線が作る磁場のみをデータから差し引く対象とした．

頭部に印加される電流は最大値 0.68mA の交流電流であり，2.5, 10, 35, 70Hz のスイープ電流とした．

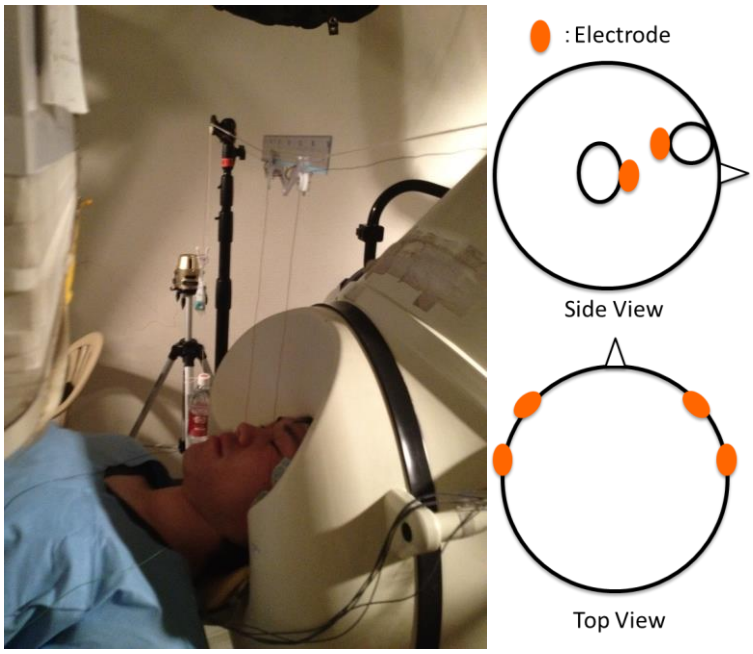


図 3.3.1：MEG による頭部内電流経路の推定実験の様子と電極位置

計測されたデータは Matlab と脳計測データ解析用プログラムである，Fieldtrip を利用して解析した．

3.3.2. 実験結果

図 3.3.2~図 3.3.7 は各電極間に印加した刺激の各周波数におけるピーク値における頭頂部から見た等磁界線図を示している．刺激電流に sin 波電流刺激を利用しているため，計測された磁場データは複数のピーク値を持つ．よって，データ解析の対象としては二つ目のピーク値を利用した．

この等磁界線図はセンサー軸方向の磁束から描画したものである．よって，これらの図における寒色の領域は頭部の垂線方向に磁場が吸い込まれる領域であり，暖色の領域は磁場が湧き出している領域である．また，磁場ゼロの線は電流

が流れている位置を示している.

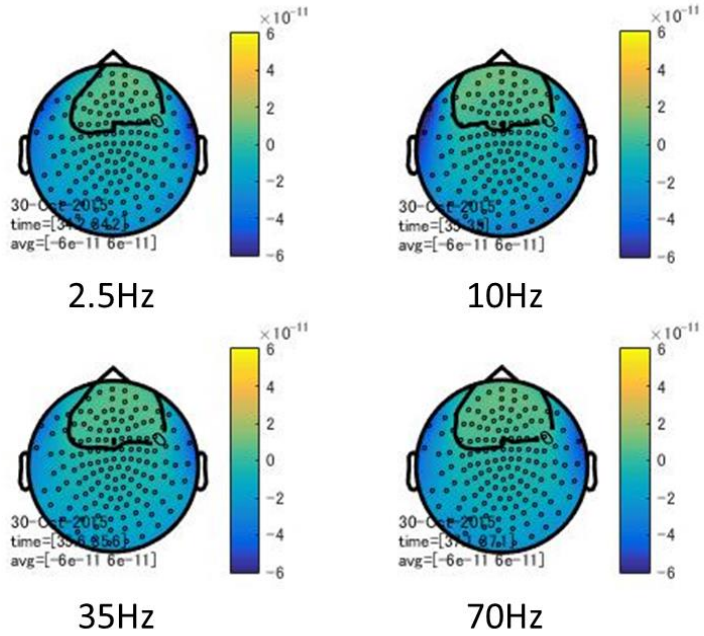


図 3.3.2：こめかみ間刺激時の等磁界線図

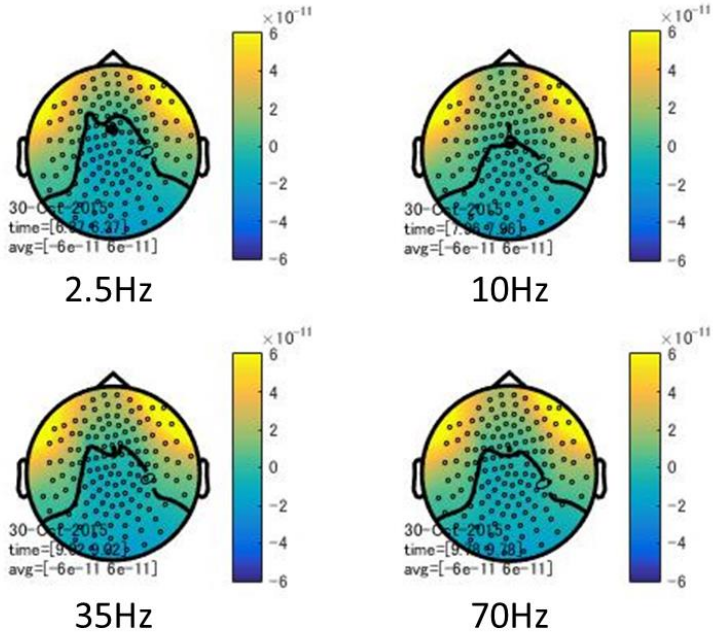


図 3.3.3：両耳間刺激時の等磁界線図

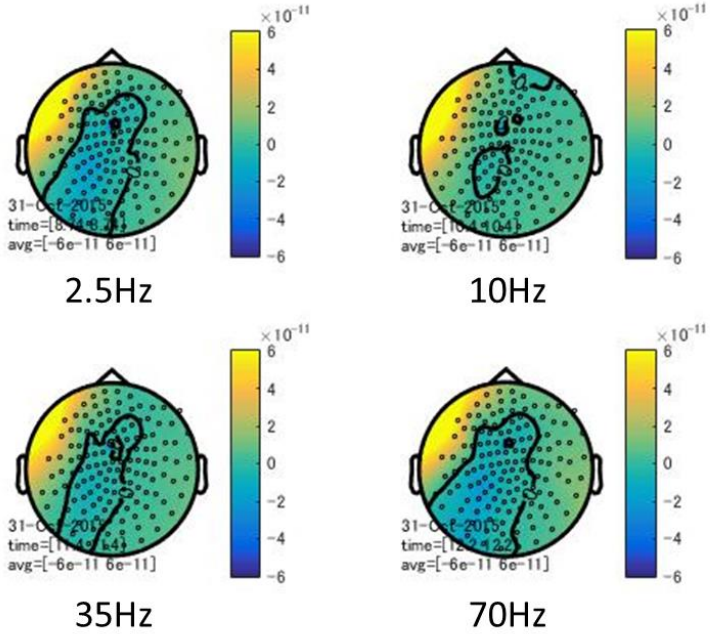


図 3.3.4：左耳-左こめかみ間刺激時の等磁界線図

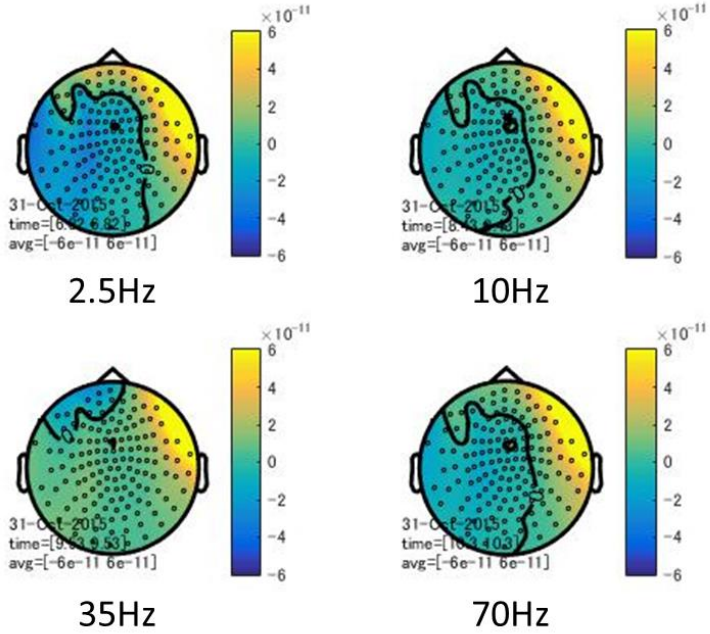


図 3.3.5：右耳-右こめかみ間刺激時の等磁界線図

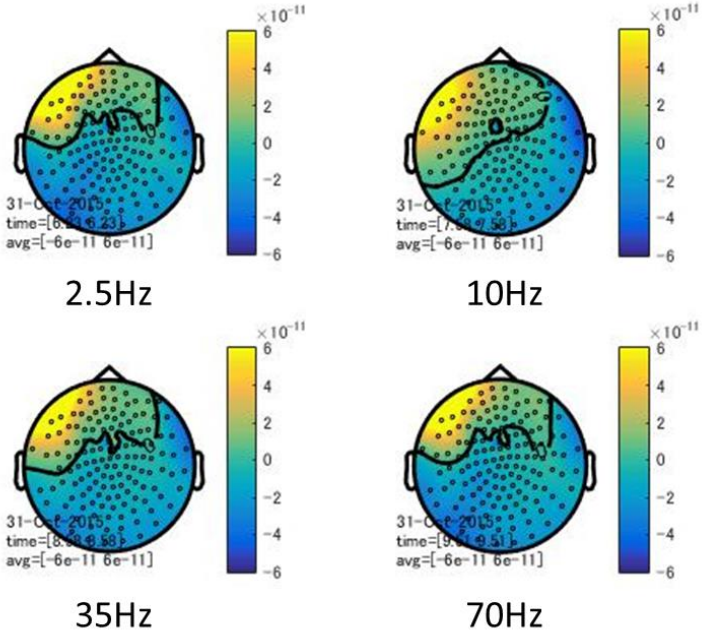


図 3.3.6：左耳-右こめかみ間刺激時の等磁界線図

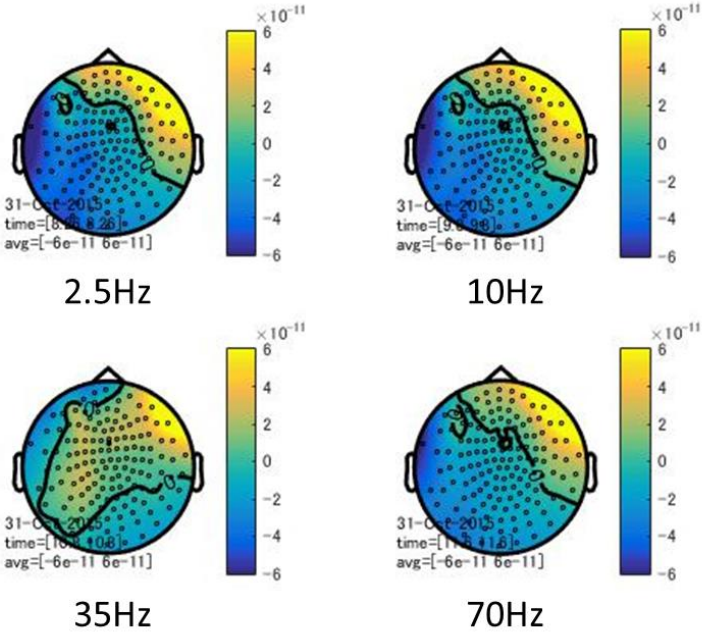


図 3.3.7：右耳-左こめかみ間刺激時の等磁界線図

3.3.3. 実験考察

図 3.3.2 と図 3.3.3，図 3.3.6，図 3.3.7 から電流の経路と考えられる磁場 0 の線を見ると，電流印加を行っている電極間をつなぐように磁場 0 線が走っている．また，図 3.3.6 と図 3.3.7 はおおまかに左右対称である．

一方で，図 3.3.4 と図 3.3.5 は電流印加で利用した間をつなぐような磁場 0 線はない．また，これらは頭部の左右対称性を考えると磁場 0 の線も対称となると考えられるが，これらは左右対称ではない．つまり，この二つの図において磁場 0 の線は正しい電流経路とは非常に異なる位置に描画されていると考えられる．これは頭部に電流を導入する導線・電極が頭部から電流を導出する導線・電極と非常に近く，S/N 比が他の条件と比較して低いことに起因すると考えられる．

よって，本実験ではこれらの 2 つの図を除外して考察する．図 3.3.2，図 3.3.3，図 3.3.6，図 3.3.7 において推定された磁場 0 線(電流経路)を見ると，電極直近の眼窩と外耳道周辺から頭部の内側にむかって線が伸びている．この事から，刺激電流は眼窩や外耳道の周辺から頭部内に流れ込んでいることが示唆される．

また，頭部が一様な抵抗値をもった球体であった場合，印加電流は電極間をほぼ直線的につなぐように電流経路が推定される．これに対して，図 3.3.7 以外の 3 つの図において推定された磁場ゼロの線は電極間を直線でつないだ線とは異なり，頭部の中心を迂回するように電極間をつないでいる．この事から，頭部に印加された電流は頭部の組織の電気的抵抗値の低い経路を流れる事を支持する結果であるといえる．

この推定された電流経路は頭部の構造と非常にマッチングが良いと考えられる．脳室は脳と脳髄液で満たされている．このため，頭部の中でも脳室はほぼ一様な抵抗値をもった大きな空間と考えられる．つまり，外耳道や眼窩などの穴を抜けてきた電流は脳室内では大きく広がると考えられる．また，脳室内に広がった電流は脳室から出るときに穴の周辺に集中して流れだす．この事から，脳室内を流れている電流の経路を等磁界線図で推定すると，脳室の中心を流れているように推定されると考えられる．よって，本実験において，頭頂部周辺に電流経路が存在する事は，ある程度頭部の構成と一致していると考えられる．

この実験において，導線がアーチファクトになりうるため，その影響を計算によって除外した．しかしながら，頭部において電流経路となる要素として頭皮が挙げられるが，その影響を今回の推定では考慮していない．よって，どの程度の

影響があるかは定かではないが，今回推定された電流経路は実際の経路とは異なる可能性がある．

本研究で計測した磁場データから，3 次元的な電流密度分布を推定し，電流経路をより精緻に同定する事が可能であると考えられる．しかしながら，磁場は電流からの距離の 2 乗に反比例して減衰する．さらに，センサから最も近い位置を流れる電流は頭皮を流れる電流である事を考えると，3 次元的な電流経路の精緻な同定には頭皮を流れる電流を差し引く事が不可欠である．これは，頭皮を流れる電流が頭部内の電流経路を流れる電流よりもセンサの近くを流れるために，計測される磁場の大きさは頭皮を流れる電流の方が大きいと考えられるためである．頭皮を流れる電流が作る磁場の大きさを差し引く方法として有限要素解析などが考えられる．しかしながら，この有限要素解析においては，頭部の精緻なメッシュを切る必要がある事やこのメッシュを切るためには MRI や CT による頭部の機能画像が必要不可欠である．この 3 次元的な電流経路の同定に関しては，本研究の延長として今後取り組むべき課題とする．

3.4. 電流経路に基づいた刺激設計による前庭電気刺激における加速度感覚提示の多自由度化

前節までで，頭蓋骨の穴が電流経路を形成する事を実証し，頭部に印加した電流はその穴を通って頭蓋内に流入する事を示した．これによって，電流経路の存在を実証した．そこで本節では，前庭感覚器周辺の解剖学的知見から，電流経路に基づいた刺激を設計し，GVS による提示加速度感覚の多自由度化を行う．これによって，2.3.2 項に示した GVS の抱える，提示加速度の自由度が低いという問題の解決を目指す．

3.4.1. 提示加速度感覚の多自由度化を実現する電流経路

従来の前庭電気刺激は，耳の後ろの乳様突起上に電極を設置し，電極間に電流を印加する事で左右方向の加速度感覚提示が可能な 2 極 GVS と，乳様突起とこめかみに電極を設置し乳様突起-こめかみ間に電流を印加する事で前後方向の加速度感覚を惹起する事ができる 3 電極 GVS がある．これらの GVS 提示が可能であることと，外耳道や眼窩が電流経路を形成しているという事実から考えると，これらの GVS 提示における電流経路はそれぞれ図 3.4.1 のようになると考えられる．この図から，頭部内を左右に貫く電流経路に電流を流し，前庭に左右

方向の電流の勾配を作ることで，左右方向の加速度感覚が惹起され，頭部を前後に貫く電流経路に電流を流し，前庭に前後方向の電流を印加する事で前後方向の加速度感覚が惹起されると考えられる．

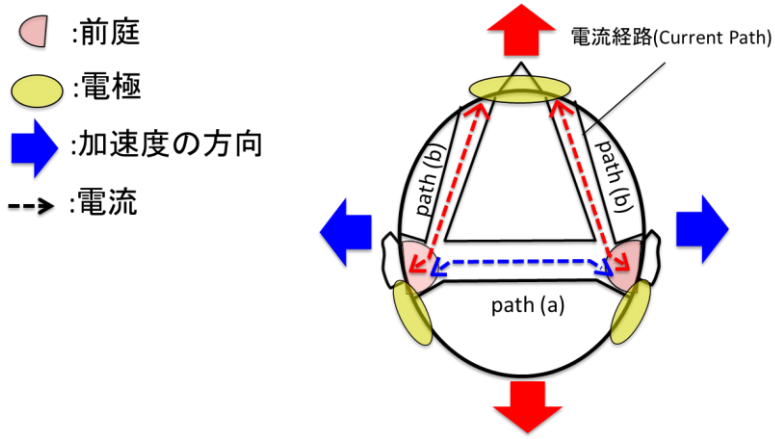


図 3.4.1：左右方向と前後方向の加速度を惹起する電流経路[26]

これまで，頭部の外から頭部内に電流を導入する経路として，眼窩や外耳道が機能していることは前述した．続いて，頭部内や前庭感覚器周辺の電流経路に関しての詳細を考える．

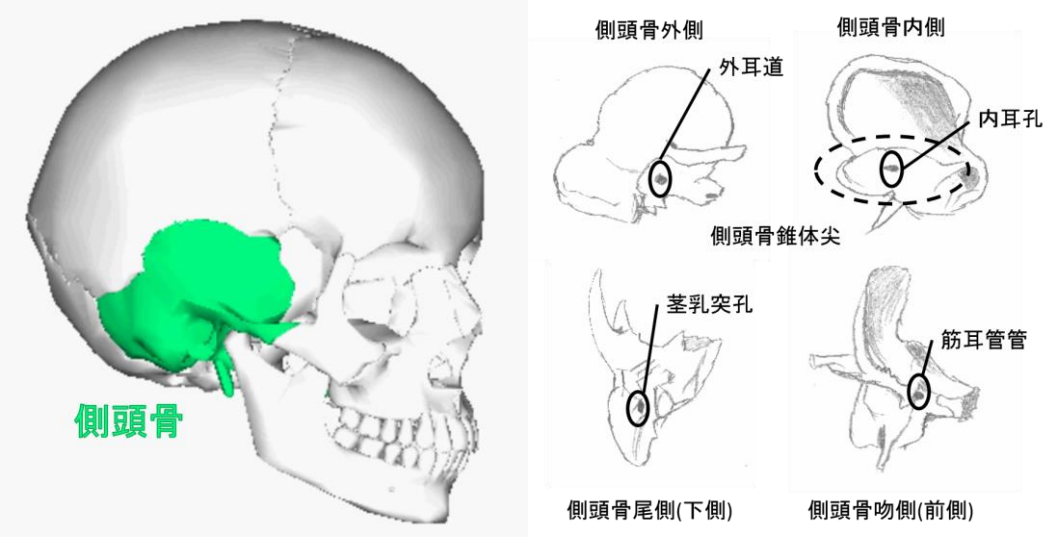


図 3.4.2：側頭骨と側頭骨の穴[52,75]．右の図は[75]を参考に作成

前庭感覚器は側頭骨の内側にある側頭骨錐体尖の中にある．この錐体尖は外側に外耳道という穴を持っており，内側には内耳口や前庭水管外口という穴が開いている．さらに，吻側(前側)には筋耳管管などの穴が開いており，尾側(下側)には茎乳突管などの穴が開いている．しかしながら，背側(後側)や頭側(上側)には穴はない．また，頭蓋骨全体を通してみると，顎の下などは無数に穴が開いているが，外耳道や眼窩より頭側には穴はない．

これらの知見から，左右方向と前後方向の電流経路は次の穴により形成されると考えられる．

左右方向： 外耳道→内耳口→対側の内耳口→(前庭)→対側の外耳道
前後方向： 眼窩→筋耳管管等の錐体尖の前の穴→(前庭)→外耳道

この前後方向の電流経路は左右の前庭に対して別々に電流を印加する事ができる．そこで，この電流経路を利用する事で，左右の前庭に前後逆方向の電流を印加する事で，yaw 回転方向の加速度感覚を惹起する事が可能となると考えられる．

よって，本実験では左右の乳様突起上と左右のこめかみ上に電極を設置し，同側のこめかみ - 乳様突起間，左右の乳様突起間への電流印加をそれぞれ独立電源によって駆動される電流回路行う，4 極 GVS を開発した(図 3.4.3，図 3.4.4)．この 4 極 GVS において，左右の乳様突起上に設置した電極間に電流を印加して左右方向の加速度感覚を惹起する刺激を LDS(Lateral Directional Stimulation)と呼ぶ．また，前後方向の加速度感覚を惹起する GVS 提示は額と乳様突起上の電極間に電流を印加するものであった．しかしながら，この刺激方法は，電流経路的な観点からみると，左右両側にある前後方向の電流経路に同じ極性の前後方向電流を印加していることと等価である．よって，4 極 GVS では同側のこめかみと乳様突起上の電極に接続されている刺激回路から同極性の電流を印加する事でこの前後方向の加速度感覚提示を実現する．本研究では，この前後方向の加速度感覚を惹起する GVS 提示を SDAS(Same Directional Anteroposterior Stimulation)と呼ぶ．これらの刺激に対して，本実験で提案しているのは，左右両側にある前後方向の経路に逆極性電流を印加する事で yaw 回転方向の加速度感覚を惹起する方法である．これは，同側のこめかみと乳様突起上の電極間に接続された刺激装置から逆極性の電流を印加する事で達成されると考えられる．

本実験において，この刺激を ODAS(Opposite Directional Anteroposterior Stimulation)と呼ぶ.

図 3.4.3：4 極前庭電気刺激

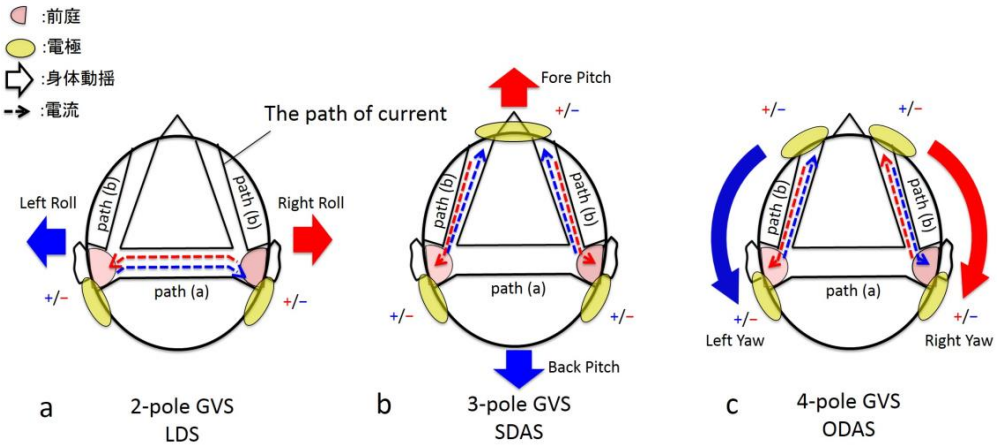


図 3.4.4：4 極前庭電気刺激による刺激手法[26]

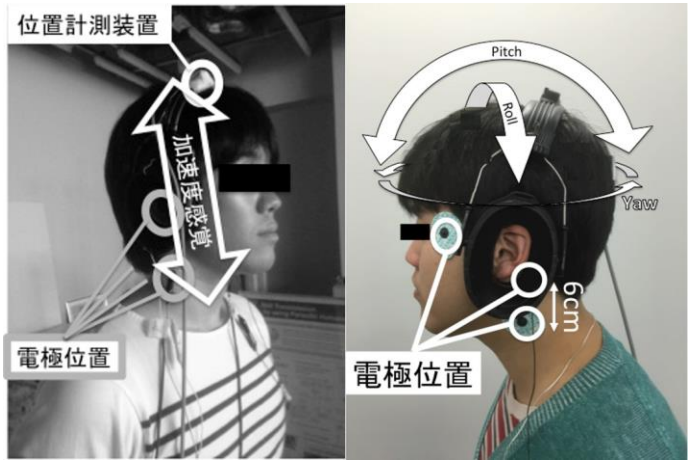


図 3.4.5：上下前庭電気刺激の電極配置[57]

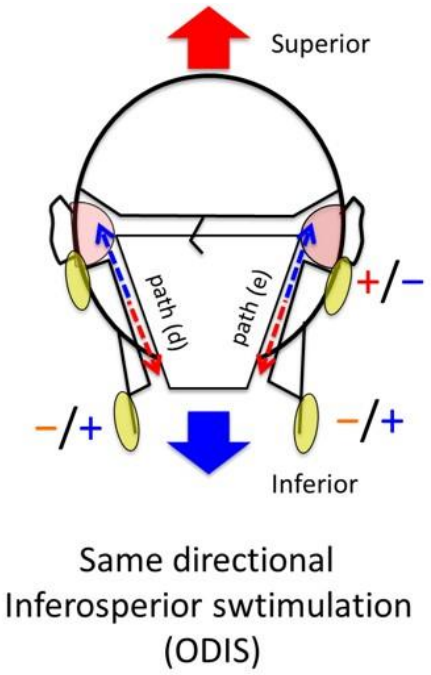


図 3.4.6：上下前庭電気刺激の電流経路の概念図

さらに，この電流経路仮説に基づいた刺激設計によって，前庭に上下方向の電流を印加すれば，上下方向の加速度感覚提示の実現が可能であると考えられる．そこで，乳様突起上と首の上に電極を設置し，電極間に電流を印加する刺激方法を開発した(図 3.4.5)．この電極配置によって，刺激電流が流れる電流経路は以

下の穴によって形成される.

上下方向： 頭蓋骨の下の穴→茎乳突管等の錐体尖の下の穴→(前庭)→外耳道

よって, 本研究では 4 極 GVS の 3 つの刺激と上下方向刺激が惹起するバーチャルな加速度感覚の方向を調査する.

3.4.2. 4 極 GVS が惹起する主観的な加速度感覚の方向の検証実験

本項では 4 極 GVS の各刺激が惹起する加速度感覚の方向を検証するために実験を行った. GVS 提示時に被験者が主観的に感じる加速度感覚の方向を口頭で回答させる実験について述べる. この主観的な加速度感覚は Virtual Head Motion と呼ばれることもある. これは, 加速度感覚が明確に意識上に上るかどうかは議論があるためである. 前庭電気刺激を被験者に印加すると身体動揺が誘発されずとも被験者は主観的な感覚をもとに方向を回答する事が可能である. このことを Virtual Head Motion と呼ぶ. しかしながら, 本研究では Virtual Head Motion を含めて被験者が主観的に感じる方向を加速度感覚として扱う.

被験者は健常な成人男性 7 名であった. すべての被験者から十分にインフォームドコンセントを得て実験に参加してもらった.

実験は静かな実験室で行われた. 被験者は左右の乳様突起上と左右のこめかみ上に電極を設置された. 被験者は水平な床の上に裸足になり, 閉眼ロンベルグ立位姿勢をとった. その後, 実験者の合図で刺激を開始した.

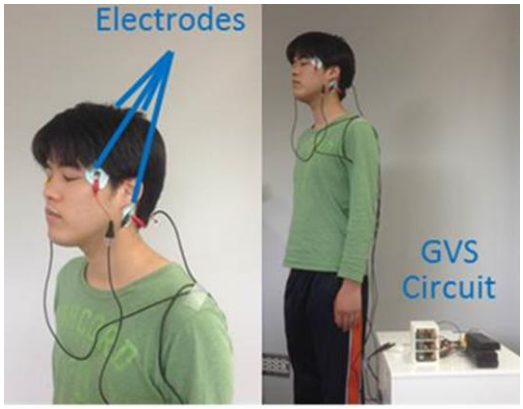


図 3.4.7：4 極前庭電気刺激の電極位置と刺激回路[26]

被験者は左/右が陽極の LDS, 乳様突起/こめかみが陽極の SDAS, 左のこめかみと右の乳様突起/左の乳様突起と右のこめかみが陽極の ODAS をランダムに提示し，その時にもっとも強く感じた加速度(あるいは，Virtual Head Motion)の方向を Roll, Pitch, Yaw の 3 つの方向から強制選択で口頭で回答させた．このときの刺激電流は 3.0mA の 1000ms の方形波電流とした．すべての条件の刺激条件が 5 試行ずつの合計 60 試行とした．

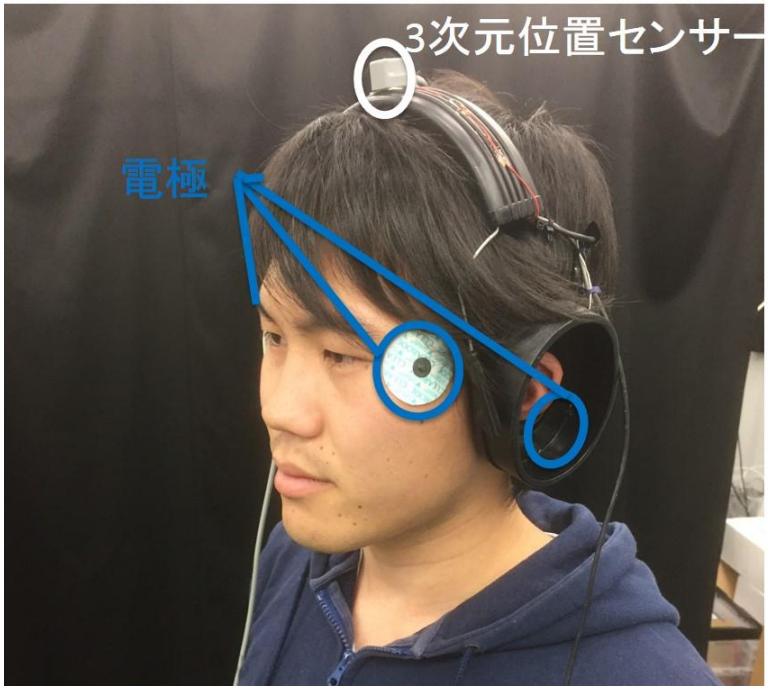
3.4.3. 4 極 GVS が誘発する身体動揺の計測実験

本項では 4 極 GVS の各刺激が惹起する加速度感覚の方向を検証するために行った．GVS 提示時に被験者が主観的に感じる加速度感覚の方向を口頭で回答させる実験について述べる．

被験者は健常な成人男性 7 名であった．すべての被験者から十分にインフォームドコンセントを得て実験に参加してもらった．実験は静かな実験室で行われた．被験者は左右の乳様突起上と左右のこめかみ上に電極を設置された．被験者は平行な床の上に裸足になり，閉眼ロンベルグ立位姿勢をとった．その後，実験者の合図で刺激を開始した．

被験者は左/右が陽極の LDS, 乳様突起/こめかみが陽極の SDAS, 左のこめかみと右の乳様突起/左の乳様突起と右のこめかみが陽極の ODAS をランダムに提示し, その時の被験者の身体動揺として, 頭部の角度変化を計測した(3.4.8 下).

頭部の角度変化の計測は，3 次元空間内の位置と姿勢を計測できるセンサー(Liberty, Polhemus. Inc)によって計測された．図 3.4.8 に示してあるように，センサーはイヤマフによって頭頂部に固定された．このセンサーのサンプリング周波数は 200Hz であり，計測したデータはアーチファクト除去のための 10Hz LPF をかけた後，計測開始前 1000ms 間のデータの平均値で全てのデータを差し引くことで，頭部の初期角度からの変化量を計算した．



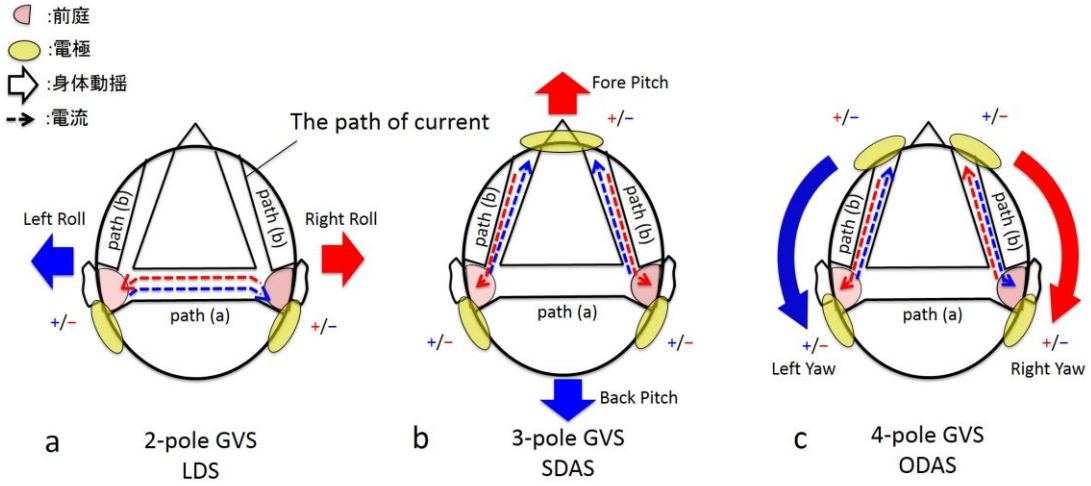


図 3.4.8：実験設定

3.4.4. 実験結果

図 3.4.9 は 4 極 GVS を提示したときの，被験者が主観的に知覚する加速度感覚の方向を口頭で回答させた実験の結果を示している．このグラフの横軸は 4 極 GVS の刺激手法を示しており，縦軸の選択率とは各色の示す方向が被験者によって選択される割合を示している．また，図中の error bar は標準誤差を示し

ており，*は Kruskal-Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較検定によって認められた有意差を示している．このグラフにおいて，被験者は強制 3 択で方向を回答しているため，チャンスレベルは 0.33 である．

この図から，LDS 提示の時には Roll 方向が，SDAS 提示の時には Pitch 方向が，ODAS 提示時には Yaw 方向が選ばれる確率がそれぞれ高いことがわかる．

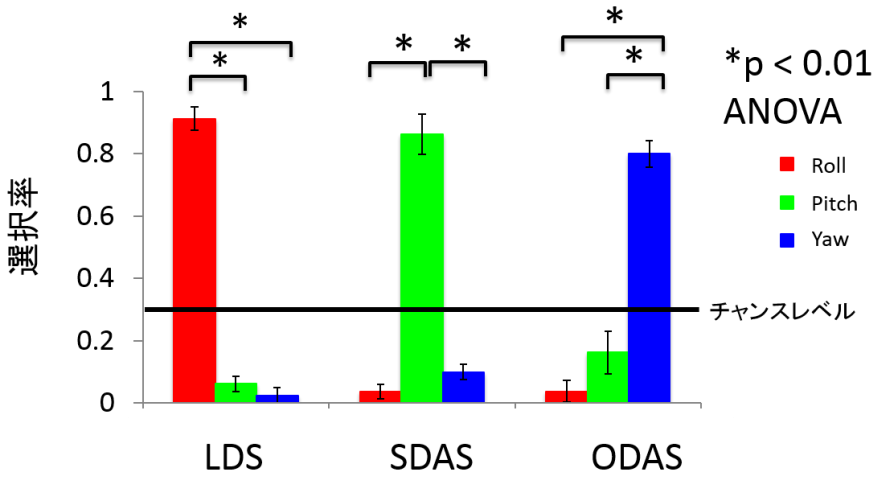


図 3.4.9：各刺激に対する被験者の選択割合[26]

図 3.4.10 は 4 極 GVS の各刺激を提示したときの，被験者の Roll, Pitch, Yaw の各方向への身体動揺の時間変化を示している．このグラフにおいて，横軸は刺激印加開始からの時刻，縦軸は Roll, Pitch, Yaw 方向の頭部の傾き角度の刺激印加開始前からの変化量を示している．また，この時の刺激パターンは図 3.4.4 と図 3.4.8 に示してある通りである．このグラフから，LDS は Roll 方向への大きな身体動揺が誘発されており，その方向は陽極方向であることがわかる．また，SDAS は Pitch 方向への大きな身体動揺が誘発されており，こめかみが陽極の刺激では前に，乳様突起が陽極の刺激では後ろ方向へ，大きな身体動揺が誘発されている．ODAS においては，右こめかみと左の乳様突起が陽極の刺激においては，左方向の Yaw 回転身体動揺が誘発されているのに対して，左こめかみと右乳様突起が陽極の刺激は右方向の yaw 回転が誘発されているのがわかる．また，左/右の乳様突起が陽極の LDS は左/右の Yaw 回転が誘発されており，左/右の Yaw 回転を誘発する ODAS 刺激は左/右の Roll 方向に身体動揺が誘発されていることがわかる．

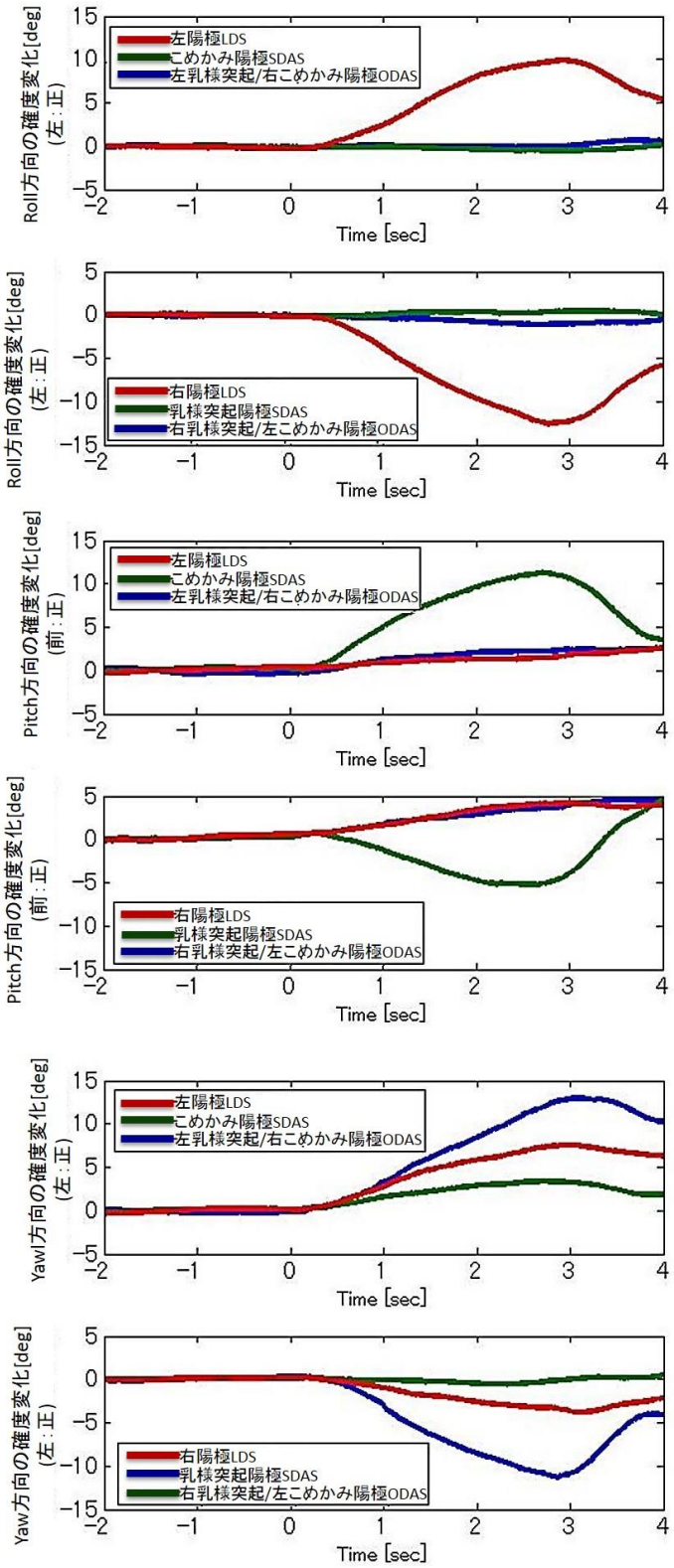


図 3.4.10：各刺激による各方向の身体動揺の時間変化の加算平均[26]

図 3.4.11 は LDS, SDAS, ODAS の各刺激の誘発した被験者の Roll, Pitch, Yaw の各方向への頭部角度変化の絶対最大値の平均値を示している．この図において，error bar は標準誤差を示しており，*は Kruskal-Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較検定によって認められた有意差を示している．また，この時の刺激パターンは図 3.4.4 と図 3.4.8 に示してある通りである． この図から，LDS は Roll 方向，SDAS は Pitch 方向、ODAS は Yaw 方向に最も大きな身体動揺が誘発されている．また，このグラフから，LDS 提示の時には Yaw 方向の身体動揺が Pitch 方向よりも有意に大きく，ODAS 提示の時には Roll 方向の身体動揺が Pitch 方向よりも有意に大きかった．

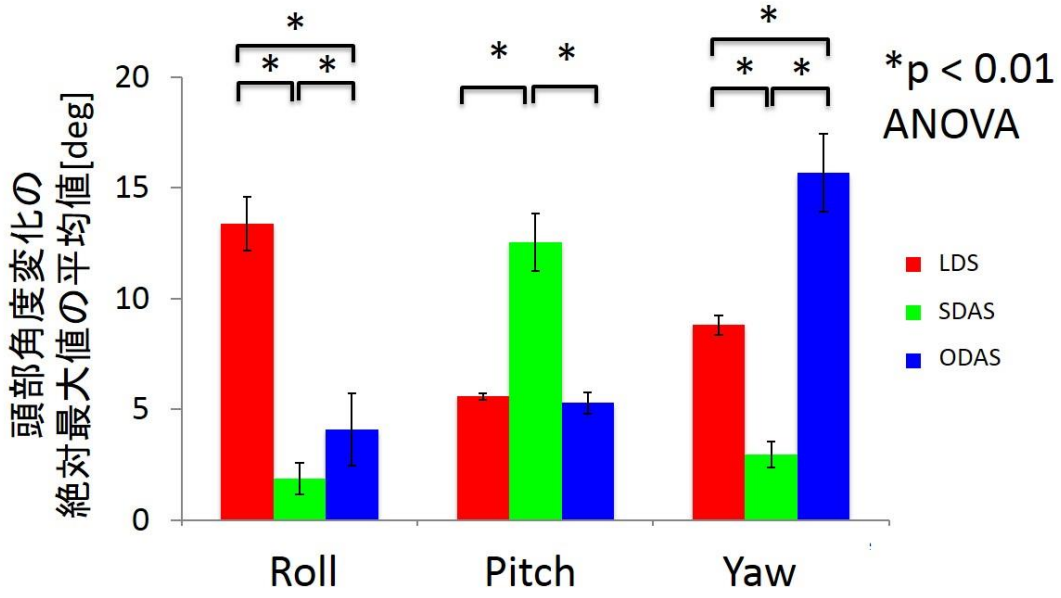


図 3.4.11：各刺激によって誘発された各方向の身体動揺の最大値の平均値 [26]

3.4.5. 実験考察

これらの実験結果から，LDS，SDAS，ODAS が主観的に感じた加速度感覚を回答させる実験は，それぞれ Roll，Pitch，Yaw 方向を回答し，誘発された身体動揺の方向を計測する実験でもそれぞれを Roll，Pitch，Yaw 方向に有意に大きな身体動揺を誘発する事が示された．よって，4 極 GVS は従来から提示可能であった，左右方向と前後方向の加速度感覚に加えて，Yaw 回転方向の加速度感

覚を惹起する事が示された.

また，これらの刺激手法がそれぞれ異なる方向の加速度感覚を惹起する事は本研究で提案している電流経路仮説の妥当性を示唆している.

これまで実証してきたように，頭部には電流経路が存在し，電流経路を通って前庭に流れた電流の方向が加速度感覚の方向を決定していると考えられる．よって，電流経路と前庭に流れる電流をコントロールする事で惹起される加速度感覚の方向をコントロールする事が可能となる．そこで本研究では，この電流経路の観点からの刺激電流の空間的な挙動を示すモデルとして，電流と親和性の高い，抵抗回路モデルを提案する．これまでの実験結果から頭部の電流経路は，図 3.4.12 に示すような 4 抵抗モデルとして近似する事ができる．この 4 抵抗回路は，左右の乳様突起間，同側の乳様突起-こめかみ間，左右のこめかみ間を抵抗器で接続している．このモデルは一つの電流経路を一つの抵抗器で表している．このモデルに，LDS，SDAS，ODAS をそれぞれ印加すると，前庭にはそれぞれ，左右方向の電流，前後方向の同じ極性の電流，前後方向の逆極性電流が流れる．これは，これまで議論してきた電流経路をながれる刺激電流の空間的な挙動と一致する.

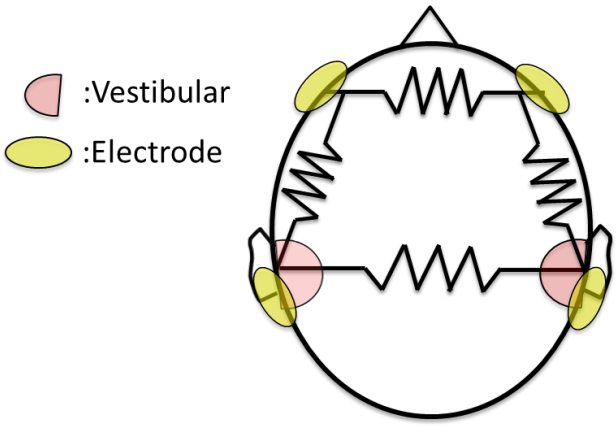


図 3.4.12：電流経路の抵抗回路によるモデル[26]

さらに，このモデルは LDS では Yaw 方向の，ODAS では Roll 方向の身体動揺が Pitch 方向の身体動揺よりも有意に大きく誘発される現象も説明する事ができる．モデルに LDS を印加すると，図 3.4.13 左のように，電流の多くは乳様突起間を流れる(黄色矢印)．一方で，乳様突起-こめかみ間の経路と左右のこめか

み間の経路通った回り込み電流も存在する(赤色矢印). この回り込み電流は前庭感覚器に Yaw 回転方向の加速度感覚を惹起する ODAS と等価な刺激とみなすことができ，その方向は，左 Roll 方向の身体動揺を誘発する LDS を印加したときには，左 Yaw 方向の身体動揺を誘発する ODAS と等価な電流の流れである．また，これは右 Roll 方向の身体動揺を誘発する LDS の場合は，右 Yaw 回転を誘発する ODAS と等価な電流の流れになる．さらに，このモデルに左/右 Yaw 方向の身体動揺を誘発する ODAS を印加したときには，左/右 Roll 方向の身体動揺が誘発される LDS と等価な回り込み電流が発生する．

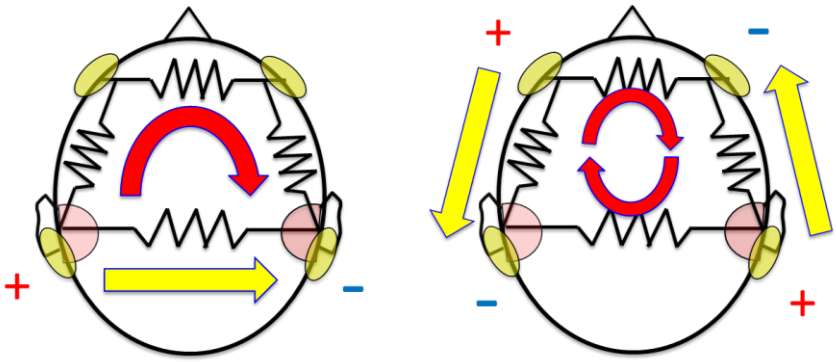


図 3.4.13：刺激電流と漏れ電流[26]

これらのことから, 4 抵抗回路モデルは頭部内電流経路を示すモデルとして妥当である．また，電流経路を抵抗回路としてモデル化する事で，刺激電流と惹起される加速度感覚の関係がより直感的になることから，このモデル化は工学的にも有用であると考えられる．

3.4.6. 頭頂方向前庭電気刺激が惹起する加速度感覚の方向

電流経路の観点からの刺激設計により，従来は提示が困難であった Yaw 方向の加速度感覚の提示に成功した．これによって，左右，前後，Yaw 回転の 3 方向への加速度感覚提示が可能となった．しかしながら，上下方向への加速度感覚提示は未だ達成されていない．この上下方向の加速度感覚提示を実現するためには前庭に上下方向の刺激電流を印加する必要がある．そこで，3.4.1 項に示したように，上下方向の電流を前庭に印加できる電流経路を前庭周辺の解剖学的

な知見から設計したところ， 茎乳突管等の錐体尖の尾側の穴を利用する経路が有望であると考えられる．

この電流経路を実現するために，本研究では被験者の乳様突起上とそこから約 6cm 下の首に電極を設置する電極配置を行った(図 3.4.5)．本実験ではこの左右の首-乳様突起上の電極間に同極性の電流を印加する事で上下方向の加速度感覚が惹起されるかどうかを検証する．

この電極配置は上下方向の成分を持った電流を前庭に印加する事が可能であると考えられるが，この電極配置では電極間をつなぐ直線上に前庭がなく，電極間の距離が約 6cm と短い事から，刺激電流の一部のみが前庭に流れる有効電流となり，大部分の電流は頭部内に流れずに皮膚を流れる．このため，前庭に影響を与える有効電流は小さいと考えられる．よって，この電極配置において上下方向電流を印加しても非常に微弱な加速度感覚しか提示できないと考えられる．

そこで，本研究では上下方向電流によって強力な加速度感覚知覚を惹起させるために，往復電流刺激を利用する事を考えた．この刺激手法の効果に関しては，本論文の 4 章に詳細な研究結果を示している．

往復電流刺激はあらかじめ逆極性の電流を被験者に印加する事で，後続する電流により惹起される加速度感覚と誘発される身体動揺を増大させる事が可能である事が，著者らの一連の研究によって示されている[58,59,60,80]．この往復電流刺激の効果は，先行する逆電流区間の電流値とその印加時間の積と相関がある事が示されている[27,60]．この往復電流刺激を利用して強力な加速度感覚を惹起する事で，上下方向前庭電気刺激が惹起する加速度感覚の方向を高い S/N 比で計測する事を狙う．

本項では，上下方向電流が惹起する主観的な加速度感覚の方向を口頭で回答する実験と誘発される身体動揺を計測する実験から，頭頂方向前庭電気刺激が惹起する加速度感覚の方向を検証する．

3.4.7. 頭頂方向前庭電気刺激が惹起する加速度の知覚方向の検証実験

本実験の目的は頭頂方向前庭電気刺激の惹起する加速度感覚の方向を調査する事である．

被験者は前庭に病歴のない健常な成人男性 5 名(23~25 才)であった．全ての被験者から，大阪大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会において承認された規定に基づき，十分にインフォームドコンセントを得た上で参加してもらった．

実験は静かな実験室で行った．図 3.4.5 に示すように，エタノールで拭いた被験者の左右の乳様突起上に電極(クリアローデ，フクダ電子社製)を貼付しイヤマフを用いて固定した．さらに乳様突起から直下約 6cm の首上にも同電極を設置した．被験者には水平な床の上のマーカーにつま先を合わせて裸足でロンベルグ立位姿勢をとらせた．そして，正面にある注視点を注視した後，目を閉じさせて実験を行った．実験者の合図で電流の印加を開始した．

印加電流は電流値 3mA，持続時間 2000ms の上下定電流刺激と電流値 3mA と持続時間 2000ms の左右定電流刺激，逆電流値 3mA，逆電流印加時間 3000ms，順方向電流の電流値 3mA，持続時間 2000ms の上下往復電流刺激の 3 種類とした．各刺激を極性を持たせて 2 試行ずつランダムに提示し，合計 12 試行(3 x 2 x 2)行った．また，試行間には 3 分の休憩を入れた．

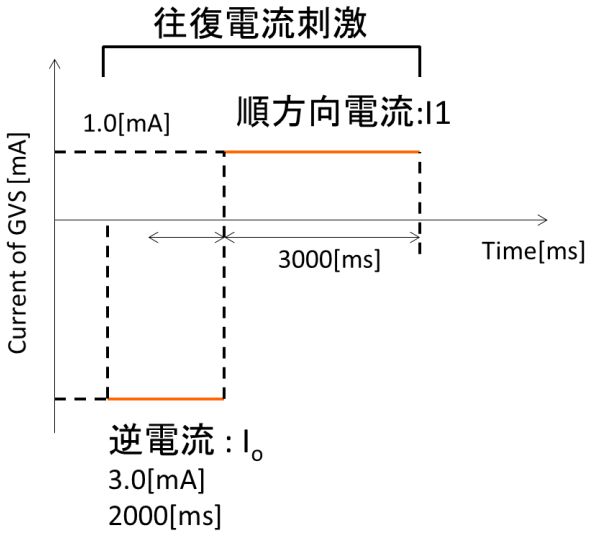


図 3.4.14 : 往復電流刺激の電流パターン[60]

被験者は刺激が終了した時に，その刺激によって最も強く惹起された主観的な加速度感覚(感じた力)の方向を左右，前後，Yaw 回転，上下の中から強制選択で回答させた．

3.4.8. 頭頂方向前庭電気刺激が誘発する身体動揺の方向の検証実験

GVS によって惹起される加速度感覚は電流と同じ軸方向であり，陽極側に体

が傾く身体動揺が誘発される．この事から，先行研究においては GVS による提示加速度感覚の方向と強度についての客観的な評価指標として身体動揺が利用されている[6,33,63,85]．しかし，上下方向への加速度感覚が惹起されたとしても，その加速度感覚のベクトルが身体の中心軸上にあるならば，通常の立位状態では，身体動揺は起こらないと考えられる．

GVS によって誘発される身体動揺は，前庭入力に対して人が立位を維持するための姿勢反射によるものと考えられる．中でも，Fitzpatrick らの研究グループは GVS 時の頭部初期姿勢が，誘発される身体動揺方向に寄与する事を示した[6,33]．これは，頭部姿勢が前庭入力に統合された上で姿勢反射が生じる事を示唆している．つまり，頭部を鉛直でない姿勢にとる事で，従来難しかった上下方向加速度感覚提示時の身体動揺計測が可能になると考えられる．

そこで，本節では両足のつま先を揃えて立つロンベルグ立位姿勢と両足のつま先を揃えた上で体と首を曲げて頭部を右側に 90°傾けた右傾き姿勢，体と首を曲げて頭部を 90°前に傾けた前傾き姿勢をとらせた被験者に対して，定電流刺激と往復電流刺激によって，上下方向電流を印加した時の身体動揺を計測した．これにより上下方向の加速度感覚を左右方向あるいは，前後方向への身体動揺として計測する事ができると考えられる(図 3.4.15)．

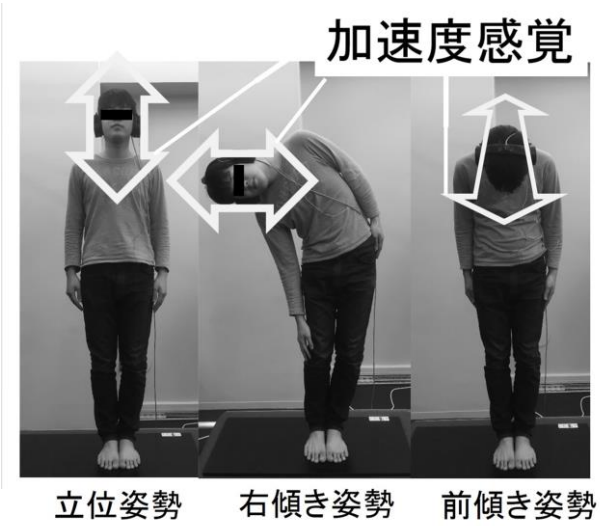


図 3.4.15：姿勢条件[60]

右傾き姿勢において，左右方向に身体動揺を誘発しうるのは，上下方向の加速

度感覚以外では，Roll 方向の角速度感覚を惹起された時である．この Roll 方向の角速度感覚を惹起する可能性のある GVS の刺激パターンは乳様突起間に電流を印加する左右方向刺激(LDS)のみである．また，前傾き姿勢において，上下方向への加速度感覚は前後方向への身体動揺を誘発すると考えられる．この前傾き姿勢において前後方向への身体動揺を誘発されるのは前後 Pitch 方向の角加速度感覚が惹起された時であり，その方向の角加速度感覚を惹起する可能性のある刺激は前後方向刺激(SDAS)のみである．先行研究においては，左右方向刺激と前後方向刺激は，前庭器官のうち耳石器と半規管の両方を刺激する事で Roll あるいは Pitch 角速度と左右あるいは前後方向の直線加速度の両方をそれぞれ惹起すると考えられている[6,17,16,33,37,48,49]．よって，本実験では上下方向刺激に加えて左右刺激と前後刺激を印加した時の，各姿勢における被験者の身体動揺を計測した．

被験者は前庭に病歴のない健常な成人男性 5 名であった．いずれの被験者からも，大阪大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会において承認された規定に基づき，十分にインフォームドコンセントを得た上で参加してもらった．
実験は静かな実験室で行った．被験者には水平な床の上のマーカーにつま先を合わせて裸足でロンベルグ立位姿勢と，ロンベルグ立位姿勢をとった後，体と頭を右に傾け，頭部が 90 度傾く様な姿勢(右傾き姿勢)，体と頭を前に傾け，頭部が 90 度傾く様な姿勢(前傾き姿勢)をとらせた．図 3.4.5 に示されているように，エタノールで拭いた被験者の左右の乳様突起上に電極(クリアローデ，フクダ電子社製)を貼付しイヤマフを用いて固定した．さらに乳様突起から直下約 6cm の首上とこめかみにも同電極を設置した．3 次元位置計測装置(Liberty, Polhemus 社製)によって身体動揺を計測し，センサをイヤマフ上に設置した．

被験者には正面にある注視点を注視させた後，目を閉じさせて実験を行った．各姿勢をとらせた後，実験者の合図で電流の印加を開始し，刺激終了の合図があるまでその姿勢を維持する様に被験者に指示した．

本研究では上下往復電流刺激条件と上下定電流刺激条件，左右定電流刺激条件，前後定電流刺激条件の 4 条件を比較するが，往復電流刺激は逆電流印加時においても身体動揺を引き起こす可能性が考えられる．そこで，被験者には，定電流刺激時には力を抜くように教示した．一方で往復電流刺激時では 2 つの異なる極性の刺激が連続して提示される事を予め伝えた上で，1 つ目の刺激では体を動かさないように姿勢を維持するように教示し，2 つ目の刺激では力を抜くよ

うに教示した.

上下定電流刺激, 左右刺激, 前後刺激などの定電流刺激条件は電流値 3mA, 電流印加時間 2000ms の方形波電流とした. 往復電流刺激条件は, 逆電流値 3mA の逆電流印加時間 3000ms の方形波電流, 順電流値 3mA の順電流印加時間 2000ms の方形波電流とした.

実験は上下定電流刺激条件と上下往復電流刺激条を姿勢 3 条件{立位姿勢・右傾き姿勢･前傾き姿勢}に対して行い, 左右方向定刺激は立位条件と右傾き条件の姿勢 2 条件, 前後方向定電流刺激立位条件と前傾き姿勢条件に対して行い, 各条件を極性を持たせて 2 試行の合計 56{(3x2 + 2x2 + 2x2)x2x2}試行を行った. 実験は上下方向定電流刺激を提示する session と, 上下方向往復電流刺激, 左右定電流刺激(以降左右方向刺激)を提示する session, 前後定電流刺激(以降前後方向刺激)を提示する session に分けて行った. また, 試行間には 3 分の休憩を入れた.

計測は刺激開始の 1000ms 前から連続して 8000ms 間, サンプリング周波数 200Hz にて行った. 計測したデータは 5Hz の LPF をかけて高周波ノイズを除去した.

3.4.9. 実験結果

図 3.4.16 は各刺激の各方向に対する被験者の選択率を示している. この図における横軸は前庭感覚の方向を示しており, 縦軸の選択率とはその各刺激手法にを印加したときに被験者がその方向を選択する確率を示している. また, error bar は標準誤差を示しており, *は刺激ごとに方向の選択率に対して Kruskal-Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較検定を行った時の有意差のある箇所を示している.

この図から, 上下往復電流刺激において被験者は有意に高い確率で上下方向を選択しており, 左右定電流刺激においては, 有意に高い確率で左右を回答している事が分かる. 上下定電流刺激においては, 最も高い確率で選択されるのは上下方向であり, その確率は前後や Yaw 回転が選択される確率よりは有意に高いが, 左右が選ばれる確率との間には, 有意差は認められず, 有意傾向(p<0.10)のみが認められた.

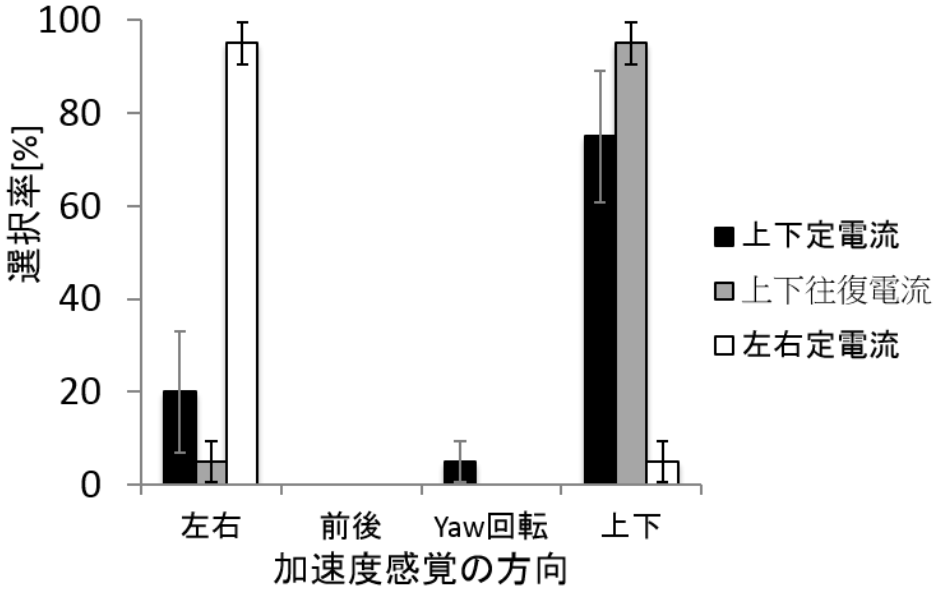


図 3.4.16：加速度感覚の方向の選択率[57]

図 3.4.17～図 3.4.20 は各姿勢条件での各刺激印加時の頭部位置変化の俯瞰図と左右方向と前後方向の頭部移動量の時間変化を示している．俯瞰図には刺激開始 1000ms 前から刺激終了後 2000ms までの頭部位置変化を 250ms ごとにプロットし，時間変化の図には刺激開始 1000ms 前から刺激終了後 2000ms までをプロットした．この頭部の位置変化は立位姿勢において被験者の正面を縦軸に, 左右方向に横軸を取った. 初期の姿勢は, 図 3.4.17~2.4.20A では立位姿勢, 図 3.4.17~2.4.19B では右傾き姿勢, 図 3.4.17~2.4.18C と図 3.4.20B では前傾き姿勢である．プロット色とプロットの形は刺激極性と刺激手法をそれぞれ示しており, 黒プロットと白プロットは下方向電流または左方向電流, 前方向電流をそれぞれ示しており上方向電流または右方向電流, 後方向電流を示している. 上向き三角印は上下方向定電流条件, 丸印は上下方向往復電流条件を, 右向き三角印は左右方向刺激条件を，四角印は前後方向刺激を示している．また，図 3.4.17~2.4.18D と図 3.4.19~2.4.20C は右方向を正とした左右方向の頭部移動量を示しており, 図 3.4.17~2.4.18E と図 3.4.19~2.4.20D は前後方向の頭部移動量(前方向が正)を示している．この図において，太い実線は右傾き姿勢条件，細い実線は立位姿勢条件，破線は前傾き姿勢を示している．

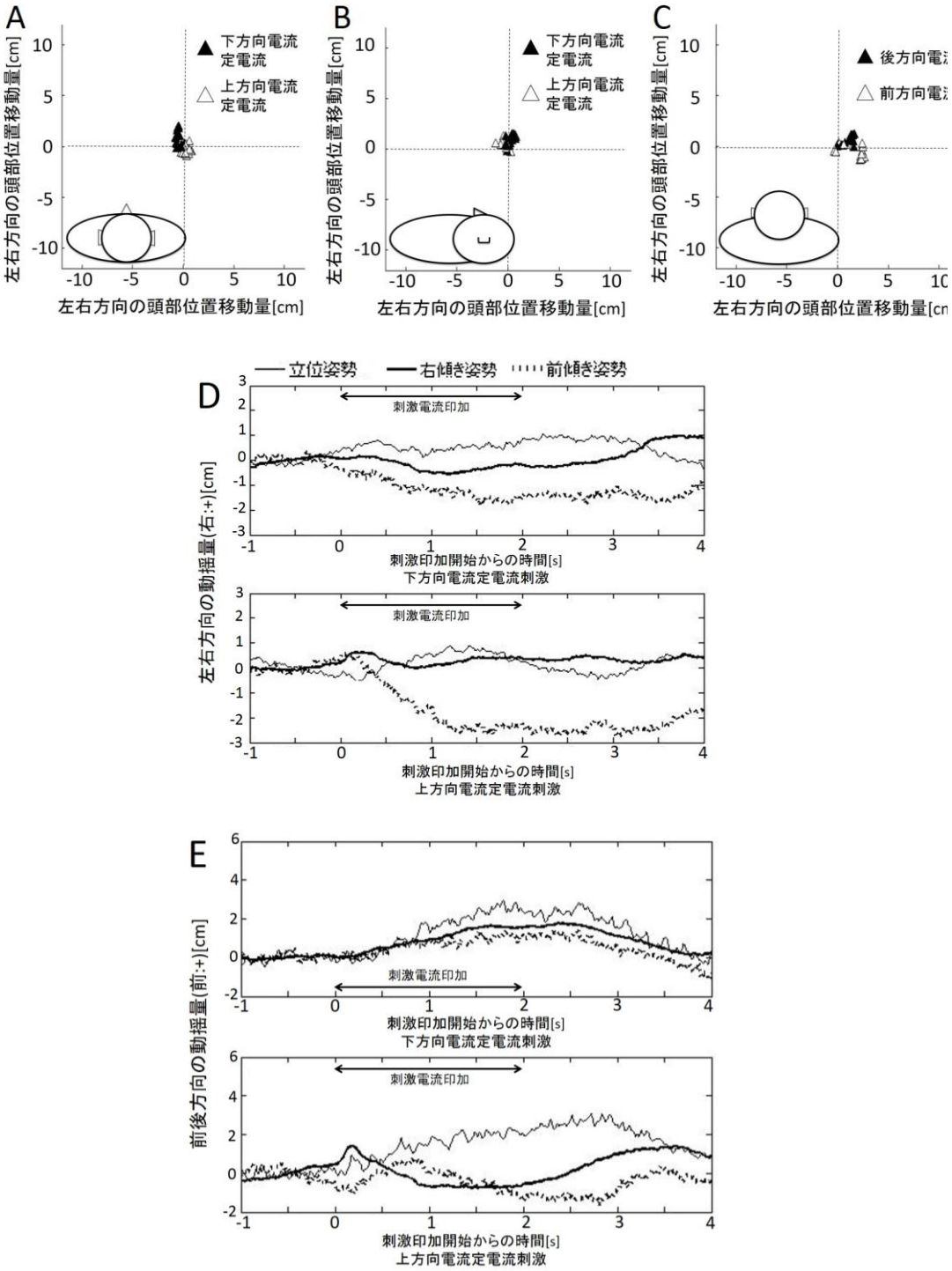


図 3.4.17：上下定電流刺激時の各姿勢における身体動揺の変化の俯瞰図と時間変化(A:立位姿勢,B:右傾き姿勢, C:前傾き姿勢,D:左右方向の身体動揺の時間変化，E:前後方向の身体動揺の時間変化)[57]

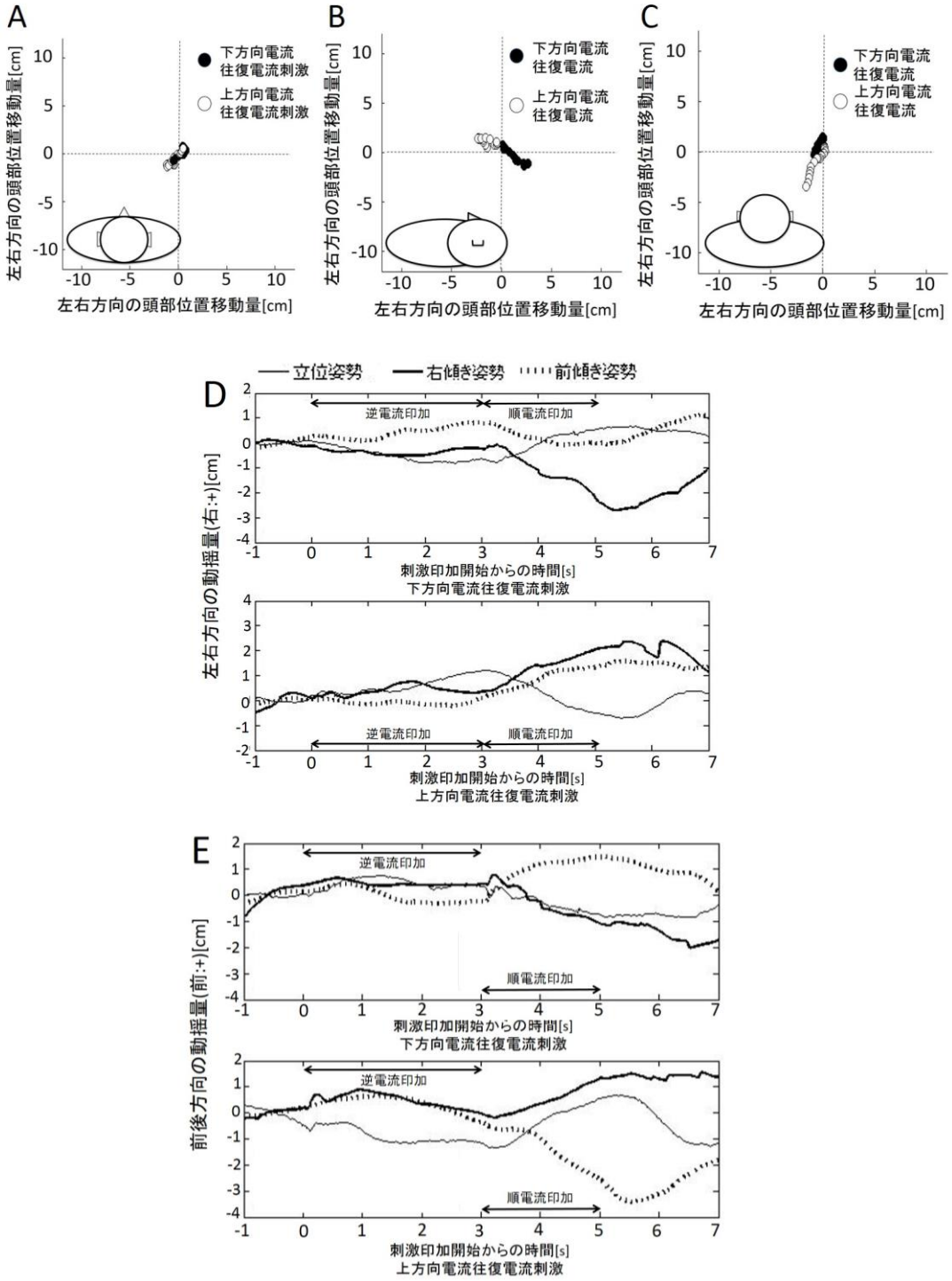


図 3.4.18：上下往復電流刺激時の各姿勢における身体動揺の変化の俯瞰図と時間変化(A:立位姿勢,B:右傾き姿勢, C:前傾き姿勢,D:左右方向の身体動揺の時間変化，E:前後方向の身体動揺の時間変化) [57]

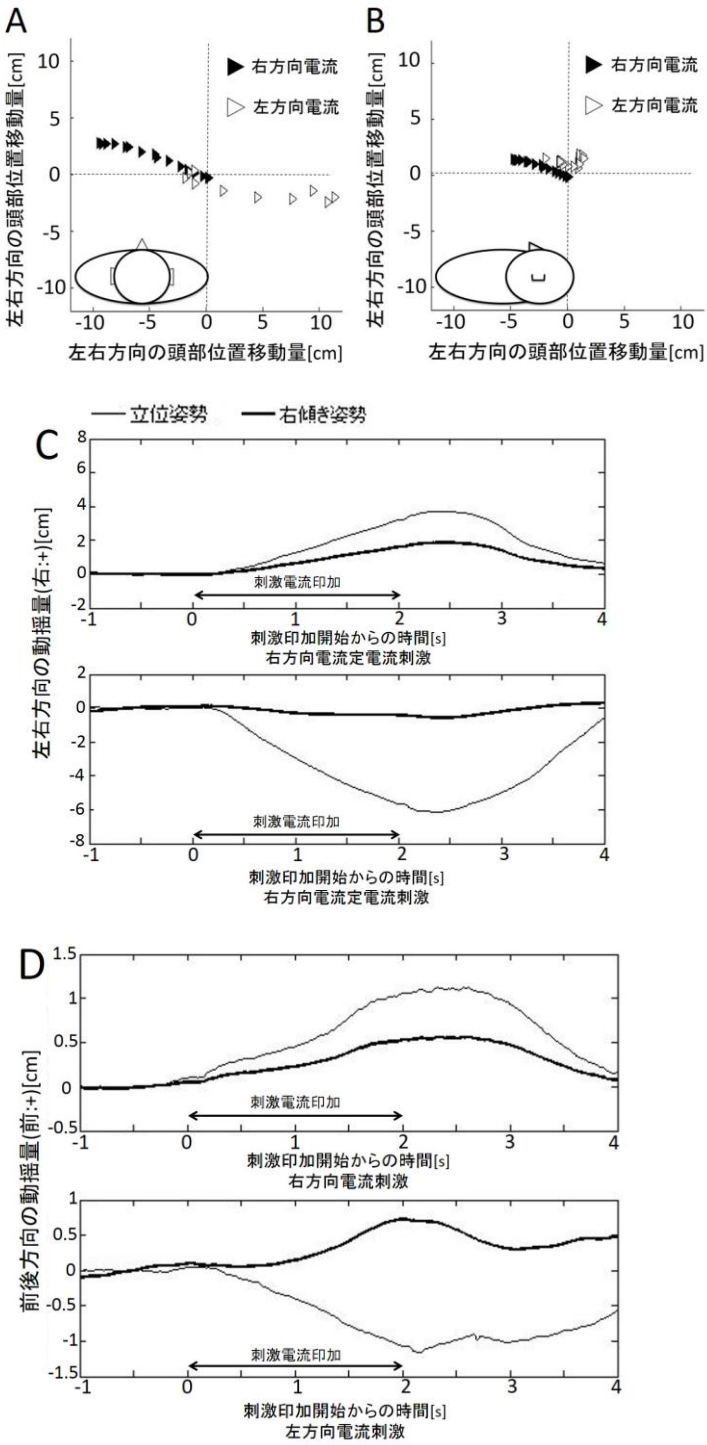


図 3.4.19：左右刺激時の各姿勢における身体動揺の変化の俯瞰図と時間変化(A:立位姿勢,B:右傾き姿勢, C:左右方向の身体動揺の時間変化，D:前後方向の身体動揺の時間変化) [57]

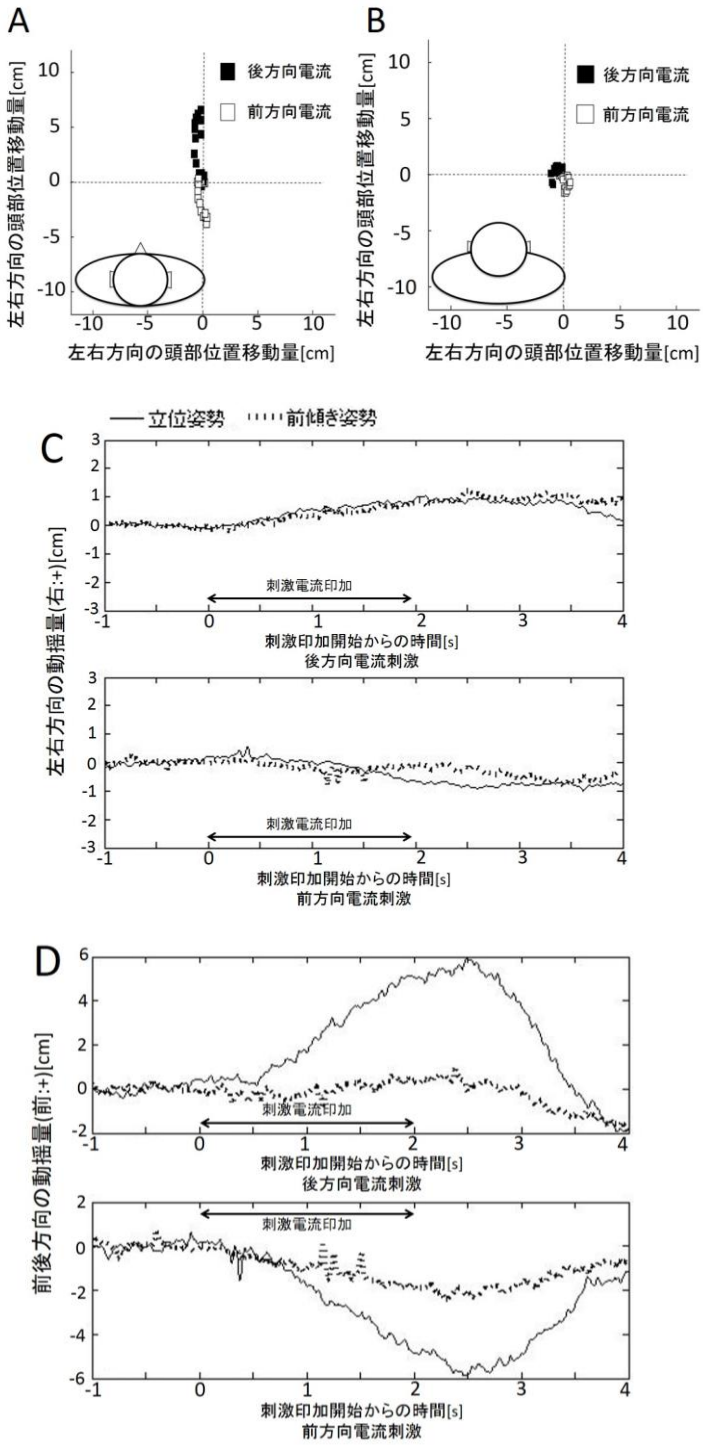


図 3.4.20：前後刺激時の各姿勢における身体動揺の変化の俯瞰図と時間変化(A:立位姿勢,B:右傾き姿勢, C:左右方向の身体動揺の時間変化，D:前後方向の身体動揺の時間変化) [57]

図 3.4.21 は定電流刺激条件と往復電流刺激条件における各試行の頭部の移動量の左右方向と前後方向それぞれの絶対値をとり，その最大値を平均化した結果を，姿勢条件ごとに示している．この図において，error bar は標準誤差を示している．また，図 3.4.22 は上下往復電流刺激の各姿勢における身体動揺の絶対最大値の平均値を示しており，図 3.4.23 は左右刺激の各姿勢における身体動揺の最大絶対値の平均値を，図 3.4.24 は前後刺激の各姿勢における身体動揺の最大絶対値の平均値を，それぞれ左右方向と前後方向ごとに示している．図中の error bar は標準誤差を示している．図 3.4.22 以外の図における*と†はそれぞれ Welch の検定による有意差と有意傾向を示しており，図 3.4.22 における*は立位条件を対照条件とした Steel の検定(ノンパラメトリック検定)による有意差を示している．

図 3.4.21 から，右傾き姿勢においても前傾き姿勢においても，上下往復電流刺激によって誘発された身体動揺は上下定電流刺激によって誘発された身体動揺よりも大きい事が分かる(図 3.4.21 立位姿勢条件左右方向： $p>0.05$,立位姿勢条件前後方向： $p>0.05$,右傾き姿勢条件左右方向： $p<0.05$,右傾き姿勢条件前後方向：$p<0.05$，前傾き姿勢条件左右方向：$p<0.10$,前傾き姿勢条件前後方向：$p<0.05$，Welch の検定).

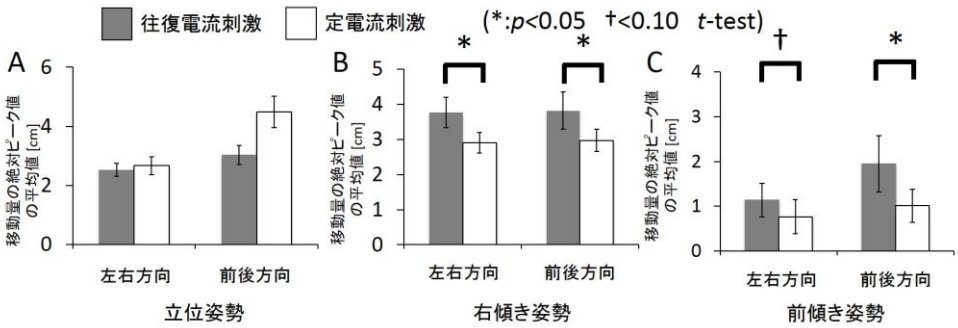


図 3.4.21：往復電流刺激と定電流刺激条件における各姿勢での頭部の移動量の絶対値の平均値[57]

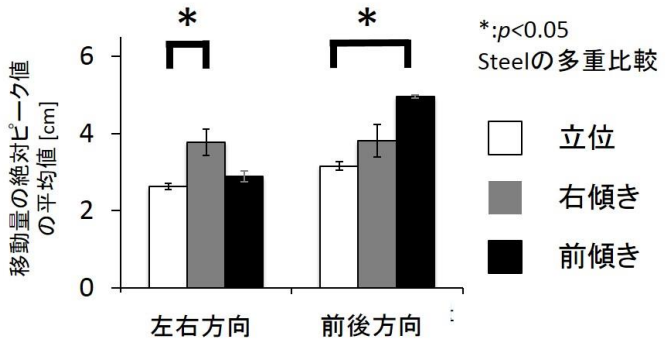


図 3.4.22：上下往復電流刺激時の各姿勢条件における頭部移動量の絶対最大値の平均値[57]

図 3.4.22 から，上下往復電流刺激においては，右傾き姿勢では，左右方向への頭部移動量が大きく，前傾き姿勢では，前後方向への頭部移動量が大きい事が分かる．(図 3.4.22 左右方向立位-右傾き：$p<0.05$,左右方向立位-前傾き：$p>0.05$ 前後方向立位-右傾き：$p>0.05$,前後方向立位-前傾き：$p<0.05$，Steel の多重比較検定)

図 3.4.23 から，左右刺激条件においては，立位姿勢における左右方向の頭部移動量は右傾き姿勢における左右方向の頭部移動量よりも有意に大きい事が分かる(図 3.4.23 左右方向：$p<0.05$，前後刺激：$p>0.05$，Welch の検定).

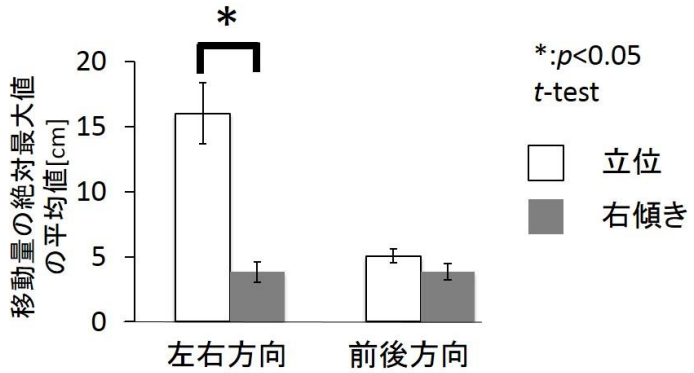


図 3.4.23：左右刺激時の各姿勢条件における頭部移動量の絶対最大値の平均値[57]

図 3.4.24 から，前後刺激条件においては，立位姿勢における前後方向の頭部

移動量は前傾き姿勢における前後方向の頭部移動量よりも有意に大きい事が分かる(図 3.4.24 左右方向：$p<0.05$，前後刺激：$p<0.05$，Welch の検定).

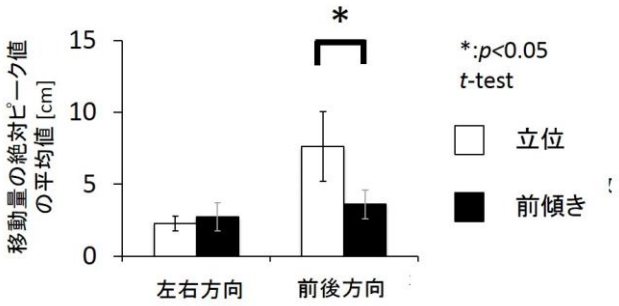


図 3.4.24：前後方向刺激条件下での姿勢条件に対する頭部位置変化の絶対最大値[57]

3.4.10. 実験考察

図 3.4.16 から，上下方向電流刺激の時には，定電流刺激でも往復電流刺激でも上下方向の選択率が最も高かった．これは，上下刺激において，被験者は上下方向の加速度感覚を最も強く知覚しているという事を示している．よって，上下方向電流は上下方向の加速度感覚を強く惹起している事が示された．また，左右刺激においては，従来の知見どおり被験者は左右方向への加速度感覚を感じている事が示された．

図 3.4.21 から，右傾き姿勢条件における左右方向と前後方向への身体動揺の絶対最大値の平均値を比較すると，上下方向往復電流刺激は上下方向定電流刺激よりも有意に大きい身体動揺を誘発している事が分かる．よって，上下方向往復電流刺激は上下方向定電流刺激よりも強力な加速度感覚を提示できているといえる．

図 3.4.18A と図 3.4.22 から，立位条件においては左右，前後ともに上下往復電流刺激による身体動揺量は大きくなく，刺激極性による移動方向の変化はみられない．しかし，図 3.4.18B，D が示すように，右傾き姿勢における下方向電流往復電流刺激条件と上方向電流往復電流刺激条件おける頭部位置がそれぞれ右方向と左方向に移動している．さらに，図 3.4.22 が示すように，体を右に傾ける姿勢における左右方向の身体動揺量は立位条件における左右方向の身体動揺量よりも有意に大きい．また，図 3.4.18C，E に示されているように，前傾き

姿勢における下方向電流往復電流刺激条件と上方向電流往復電流刺激条件おける頭部位置がそれぞれ前方向と後ろ方向に移動している．さらに，図 3.4.22 が示されているように，体を前傾き姿勢における前後方向の身体動揺量は立位条件における前後方向の身体動揺量よりも有意に大きい．これらの事から，上下方向往復電流刺激は立位姿勢時にはほぼ身体動揺を誘発せず，右傾き姿勢時に左右方向への身体動揺を誘発し，前傾き姿勢をとった時に前後方向への身体動揺を誘発するような方向の加速度感覚を惹起している事が示された．

図 3.4.19 と図 3.4.23 から左右刺激は立位姿勢条件において非常に大きな左右方向への身体動揺を惹起しているが，体を右に傾けるとその身体動揺は小さくなる事が分かる．さらに，図 3.4.20 と図 3.4.24 から，前後刺激は立位姿勢条件において大きな前後方向への身体動揺を惹起するが，前傾き姿勢条件においては，その身体動揺は小さい事が分かる．

これらの事から，上下方向往復電流刺激が惹起する加速度感覚の方向を考える．右傾き姿勢において，上下往復電流刺激によって誘発される身体動揺の方向は，図 3.4.18B と図 3.4.22 より，左右方向である．この右傾き姿勢において左右方向への身体動揺を誘発する加速度感覚の方向は上下方向あるいは Roll 回転方向が考えられる．Roll 方向の加速度感覚を惹起しうる刺激として左右刺激が挙げられるが，この左右刺激によって誘発される身体動揺は図 3.4.19，図 3.4.23 より，立位姿勢の条件において，右傾き姿勢の時よりも大きい．一方で，上下方向往復電流刺激は立位姿勢時には左右方向の身体動揺は見られないが，右傾き姿勢においては左右方向の身体動揺が見られる．

よって，上下方向往復電流刺激は Roll 方向の加速度感覚を惹起しているのではなく，上下方向の加速度感覚を惹起していると考えられる．同様に前傾き姿勢においては，上下方向往復電流刺激が誘発する身体動揺は前後方向である．前傾き姿勢において前後方向の身体動揺を誘発する加速度感覚は Pitch 方向の角加速度であり，Pitch 方向の角加速度を惹起できる刺激は前後刺激である．前後刺激によって誘発される身体動揺は，図 3.4.20，図 3.4.24 より立位姿勢条件における前後方向の身体動揺が，前傾き姿勢における前後方向の身体動揺よりも有意に大きい．この事から，上下往復電流刺激は前後刺激とは異なる加速度感覚を惹起している事が示され，その加速度感覚の方向は Pitch 方向ではないと考えられる．よって，上下方向往復電流刺激は従来手法では提示できていなかった，上下方向の加速度感覚を惹起していると考えられる．

図 3.4.21 から，右傾き姿勢における上下方向往復電流刺激が誘発する前後方向の身体動揺は上下方向定電流が誘発する前後方向の身体動揺よりも有意に大きい事が分かる．また，図 3.4.22 から，有意差は無いが，上下方向往復電流刺激が誘発する右傾き姿勢における前後方向の身体動揺は立位姿勢おける前後方向の身体動揺よりも大きい事が分かる．さらに，図 3.4.18B において，上下方向往復電流刺激は下方向電流刺激時にはやや後ろに，上方向電流印加時にはやや前に身体動揺が誘発されている．これは，上下方向往復電流刺激が惹起する加速度感覚の軸が本実験における左右の軸とややずれている事を示唆している．この原因のひとつとして，上下方向電流が惹起する加速度感覚が純粋な上下でなく，やや前後に傾いた方向である事が考えられる．他の原因として，今回の実験では被験者は両足の位置を世界座標の左右の軸と平行になるようにして，注視点を注視させた後で目を閉じさせる事で，立位時に重力方向を向いていた軸を左右方向の軸と平行となるようにした．この実験において，被験者の首の角度がわずかにずれてしまうだけでも，前後方向の身体動揺を誘発してしまう．この被験者の首の角度のずれが前後方向の身体動揺となって計測された可能性もある．よって，今後の研究としては首を固定し，頭の座標系と世界座標系を正確にあわせた状態で身体動揺を計測するなどの実験を行う事で，上下方向電流が惹起する加速度感覚の軸の正確な傾きを調査する必要がある．

図 3.4.18C において，前傾き姿勢における下方向電流往復電流刺激が誘発する前方向の身体動揺が同姿勢条件における上方向電流往復電流刺激が誘発する後ろ方向の身体動揺よりもやや小さい．これは，足と足の筋の前後非対称性と頭を前に傾けた事によって重心がやや前方に偏ったために，前方向への身体動揺が誘発されにくい初期姿勢であったと考えられる．

本実験では，3 つの姿勢を被験者にとらせた時の身体動揺の計測によって，GVS の惹起する加速度感覚の方向を調査した．そこで，各姿勢を被験者にとらせた時の姿勢自体が身体動揺に及ぼす影響を見るために，5 名の被験者に本実験で扱った 3 つの姿勢条件をとらせ，刺激を提示しなかった時の身体動揺の時間変化(各姿勢,各被験者 4 試行分)の俯瞰図と各方向への身体動揺の時間変化，身体動揺の絶対最大値の平均値を図 3.4.25 に示す．この図における A は被験者の頭部の位置変化の俯瞰図であり，縦軸が被験者の正面方向の移動量，横軸は被験者の左右方向の移動量を示している．この図におけるプロットの色は姿勢の条件をそれぞれ示しており，250ms ごとの被験者の頭部位置を示している．B は

実験開始からの時刻に対する被験者の頭部位置の時間変化を示している．C はそれぞれの姿勢条件における頭部移動量の絶対最大値の平均値を示しており，error bar は標準誤差を示している．これらの図から，GVS 提示を行わない条件は GVS 提示を行った時と比較して身体動揺が非常に小さい事が分かる．また，図 C において前傾き姿勢における前後方向の頭部移動量が立位姿勢におけるそれよりも有意に小さかった(p<0.05)．この事から，立位姿勢に比べて前傾き姿勢は前後方向の身体動揺が惹起されにくい姿勢であるといえる．この姿勢において，上下往復電流刺激が前後方向の身体動揺を誘発した事は，上下往復電流刺激が上下方向の加速度感覚を惹起している事を支持している．

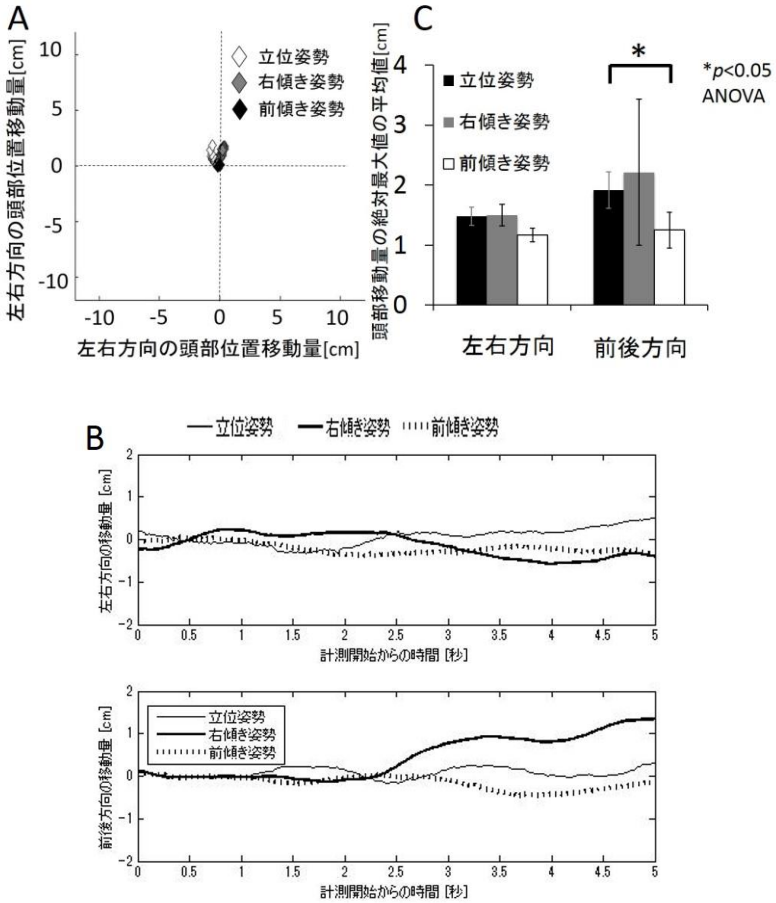


図 3.4.25：各姿勢における刺激なし条件での身体動揺の俯瞰図と時間変化 (A:俯瞰図，B:時間変化のパターン,C:絶対最大値の平均値) [57]

本実験は安全な電流値である 3mA を刺激電流として利用している．よって，

身体動揺として数 cm 程度の動揺を引き起こすだけの微弱な加速度であるが，上下方向への往復電流刺激は GVS の安全ガイドラインにおいて確実に安全とされている電流値で，従来提示ができなかった上下方向への加速度感覚を提示と身体反射応答の誘発が可能である事が示された．

3.4.11. 前庭電気刺激における電流経路の観点からの刺激設計の考察

本研究では，電流経路の観点からの刺激設計によって， 前庭電気刺激は従来提示可能であった，左右方向と前後方向の加速度感覚に加えて新たに Yaw 回転方向と上下方向の加速度感覚(角速度・角加速度)の自由度を獲得した．これによって，4 自由度の前庭感覚提示が可能な電気刺激手法が確立された．しかしながら，人間が現実世界で感じる前庭感覚は左右，前後，上下方向の直線加速度感覚と Roll，Pitch，Yaw 方向の角速度の 6 自由度である．

この前庭電気刺激において，左右方向と前後方向の加速度感覚が惹起されていることは，これまでの示してとおりである．本論文においてこれまで提示可能としてきた，左右方向と前後方向の加速度感覚は Roll 方向と Pitch 方向の角速度感覚と区別できない．このため，前庭電気刺激においては，電流が刺激しているのは半規管と耳石のうちどちらなのかという論争が未だに存在する．これらのことから，前庭感覚ディスプレイとしては，この 4 自由度の前庭感覚提示によって，現実で人間が感じるすべての前庭感覚の方向を提示可能であると考えられる．

以上のことから，前庭電気刺激においては，電流経路の観点からの刺激設計の妥当性と有用性が示された．

前庭電気刺激の刺激電流が耳石器と半規管のどちらを刺激しているのかという論争について，本研究ではどちらも刺激されるが支配的なのは耳石器への影響であるという，耳石器刺激説を支持している．これは，上下方向の加速度感覚は耳石器でなければ検知する事ができないからである．この頭頂方向前庭電気刺激に関して言えば，耳石器刺激の効果の寄与は非常に大きいと考えられる．また，この耳石器刺激説は左右，前後，Yaw 回転刺の加速度感覚の惹起も説明ができる．この考え方では，耳石器内の電流の方向に対応した神経のみが発火する事で，左右，前後，Yaw 回転を惹起していると考えられる．一方で，この左右，前後，Yaw 回転の前庭感覚については半規管への刺激でも説明ができる．角速度は前述のとおり，左右の前庭に 3 つずつの合計 6 つの半規管によって受容さ

れる．Fitzpatrick らの半規管均等刺激説ではこれらの半規管が均等に活性化/抑制された結果，傾いている半規管の回転方向の合成方向である Roll 方向(正確には両外耳道をつないだ線に対して鼻根部から垂線に対して 18° 上に傾いた軸周りの回転方向)と Pitch 方向への回転方向に角速度を感じるというものであった．半規管への刺激が不均等であったならば，Yaw 回転方向の加速度感覚は惹起されうる．例えば，GVS の刺激電流が半規管のうち Yaw 回転の角速度を受容する水平半規管を他の二つの半規管よりも強力に刺激したならば，惹起される角速度の回転軸は Roll 方向から Yaw 方向に近づく．

前庭感覚器は，半規管でも耳石器においても有毛細胞の向きによってその細胞が受容する加速度・角速度の方向が決定する．よって，電流経路によって決定された前庭感覚器上での電流の方向は，この有毛細胞の方向に対して選択性をもって発火を誘発すると考えられる．これは，本研究で提唱しているシナプス間隙イオン泳動説を支持するものである．

3.5. 電流経路に基づいた刺激設計による嗅覚提示の実現

2.5.2 項で示した通り，嗅覚を惹起する経皮電気刺激手法はない．しかしながら，嗅覚が電気刺激によって惹起可能となれば，化学物質を利用せずに嗅覚提示が可能となるため，工学的に非常に有用なディスプレイとなると考えられる．

本節では電流経路に基づいた刺激を設計によって実現した，電気刺激による嗅覚提示手法について述べる．

3.5.1. 電気刺激による鼻腔内神経の刺激

これまで，電気刺激による嗅感覚提示の報告はなく，嗅覚の惹起は非常に困難であると考えられてきた[42]．しかしながら，この理由については不明なままであった．これに対して，本研究で提案している電流経路仮説を適用すると，嗅覚を受容する嗅神経や三叉神経に対して十分な量の有効な方向の電流が流れてない事に起因すると考えられる．

ここで，鼻腔の解剖学的な知見を見てみると，鼻腔内の前方には外鼻枝等の前篩骨神経の内鼻枝がある．この神経三叉神経の第一枝である、眼神経の枝である．これらの枝の奥の鼻腔内の上壁からは嗅神経が伸びている．この嗅神経は鼻腔の上壁の骨を貫いて，嗅球へと接続する．また，鼻腔の中ごろから最奥部にかけては内側上後鼻枝や鼻口蓋神経などの三叉神経枝が伸びている．これらの神

経の向きを見てみると，前篩骨神経は鼻梁に沿って頭側から尾側に向かって伸びている．また，嗅神経に関しては大まかに頭側から尾側に向かっているが，受容体のある線毛は様々な方向を向いている．内側上後鼻枝や鼻口蓋神経などは背側から吻側に向かって枝を伸ばしている(図 2.5.1).

これらの三叉神経は神経束である．神経束への電気刺激は腕や脚への触覚電気刺激において前例がある．腕の神経束を狙った電気刺激では，尺骨神経を狙う刺激がある．この刺激においては尺骨神経に沿った電極配置が行われる[35]．また，尺骨神経上に片側の電極のみを配置する場合，陰極が神経上になければ感覚は惹起されない．このことから，神経束への電気刺激においては，神経と平行に電流を印加する必要があると考えられる．

よって，本実験では図 3.5.1 に示すように，電極を鼻梁と首の後ろに設置する事で，自由神経終末と平行な電流印加を実現した．この電極配置による電流の経路を考える．電流を印加すると電流は鼻梁の表面から外鼻孔を通って鼻腔内に流れ，鼻腔内壁を伝って鼻腔の奥まで流れた後に，頸部の軟組織を通過して首の後ろに設置した電極に流れると考えられる．この電流が鼻腔の内壁を流れるときに，外鼻枝や鼻口蓋神経，内側上後鼻枝等の三叉神経枝上を平行に電流が流れる．また，この刺激電流は嗅神経上も通過する．

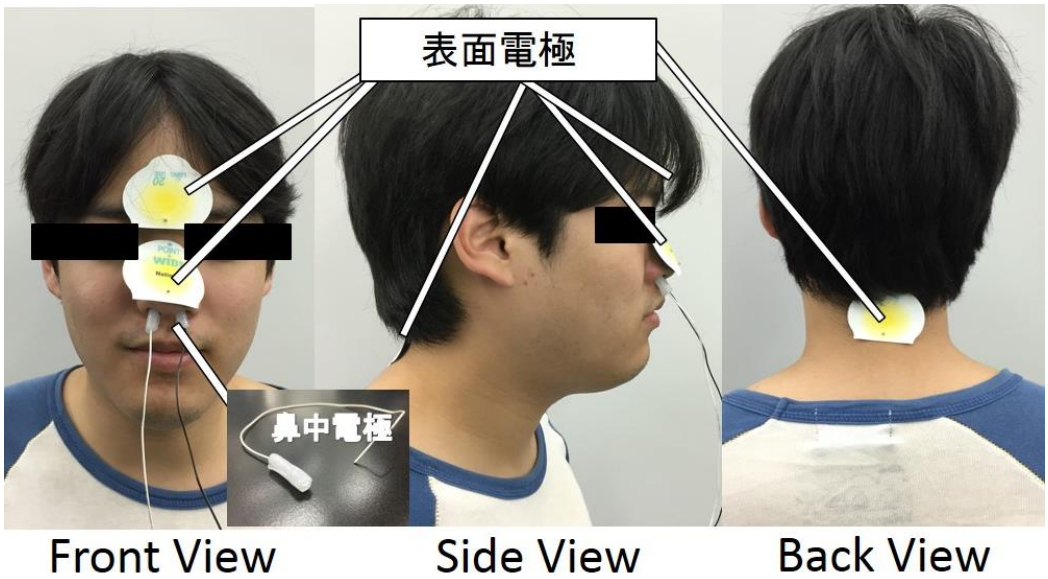


図 3.5.1：嗅覚電気刺激の電極位置

本研究では，この電極配置による，嗅覚提示を目的とした電流印加手法を嗅覚電気刺激(GOS: Galvanic Olfactory Stimulation)と呼ぶ.

一方で，電気刺激による感覚提示手法としては，抹消神経を刺激する方法と脳などの中枢神経系を刺激する手法があると考えられる．この中枢神経系を経皮電気刺激によって刺激する手法として tDCS がある．この tDCS は電極の真下の組織を刺激すると考えられている．つまり，嗅覚の中枢神経系を刺激するためには，可能な限り中枢神経に近い位置に電極を設置する必要があると考えられる．よって，嗅覚の中枢神経系を刺激するために，眉間と首の後ろに電極を設置する電極配置を行った．本実験では，この刺激手法を Olfactory-tDCS と呼ぶ.

3.5.2. 嗅覚電気刺激が嗅覚を惹起するかどうかの検証実験

この GOS が嗅覚を惹起するかどうかを検証するために，実験を行った.

被験者は健常な成人男性 6 名であった．実験は静かな実験室内で行われた．被験者は鼻梁と首の後ろに電極(Long use pad EW 0602P, Panasonic 社製)を設置された.

3.5.2.1. 実験方法

被験者は刺激を提示され，刺激終了後に何らかの臭いを感じたか否かを口頭で強制選択で回答するように教示された．刺激条件は陽極が鼻梁上の電極である+GOS と陰極が鼻梁上の電極である-GOS，眉間上の電極が陽極である+Olfactory-tDCS，眉間上の出極が陰極である-Olfatory-tDCS，鼻梁上の陽極と鼻腔内に設置した陰極間に電流を流す+Sham，鼻梁上の陰極と鼻腔内に設置した陽極間に電流を流す-Sham，刺激電流を印加しない刺激なし条件の 7 条件とした．これらの条件はそれぞれ 5 試行の合計 35 試行をランダムに提示した．また，これらの実験は閉眼で行われた.

刺激電流は電流値 3.0mA，電流の持続時間 2000ms の方形波電流とした.

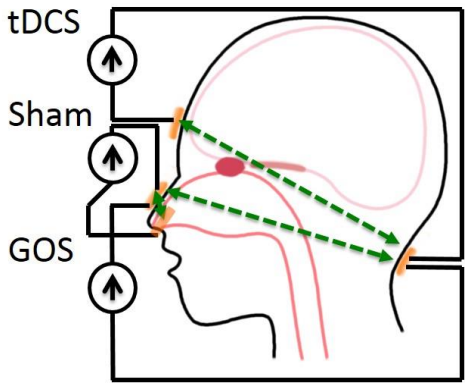


図 3.5.2：嗅覚電気刺激実験における電極位置

3.5.2.2. 実験結果・実験考察

本実験の結果を以下に示す.

図 3.5.3 は各刺激手法に対する嗅覚の惹起確率を示している．また，この図における error bar は標準誤差を示しており，*は Kruskal-Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較検定によって認められた有意差を示している.

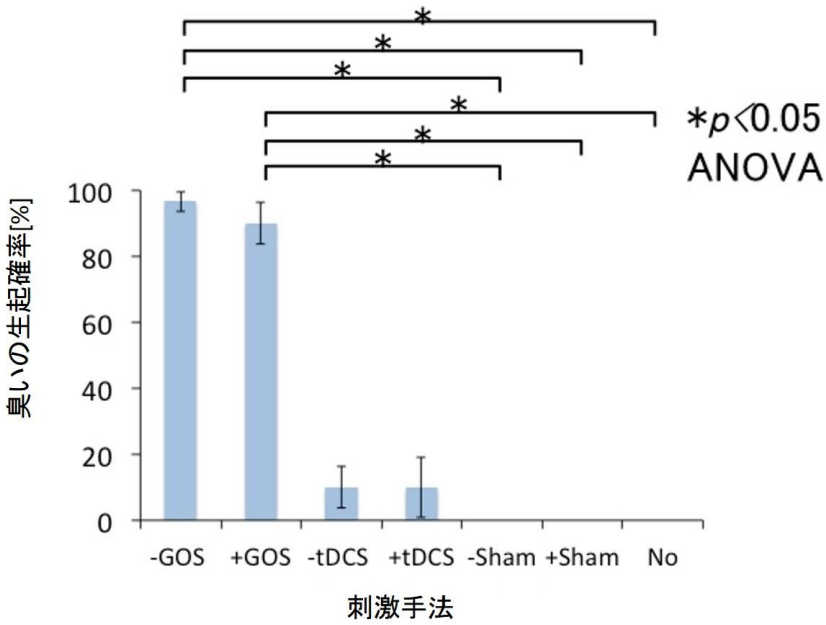


図 3.5.3：各刺激手法における臭いの惹起確率

この図から，GOS は極性によらず非常に高い確率で嗅覚を惹起する事がわかる．

本実験の結果から，GOS は電気刺激によって鼻腔内の神経を刺激し，嗅覚を惹起する事が可能であることが示された．

3.5.3. 嗅覚電気刺激が惹起する嗅覚の質の検証

GOS によって嗅覚が惹起されることが示された．しかしながら，GOS が惹起する臭いがどのような臭いであるかは不明なままである．よって，本実験では GOS によって惹起された臭いがどのような臭いであるかを検証する実験を行った．

3.5.3.1. 実験方法

被験者は健常な成人男性 6 名であった．実験は静かな実験室内で行われた．被験者は鼻梁と首の後ろに電極(Long use pad EW 0602P, Panasonic 社製)を設置された．被験者は+GOS と-GOS，刺激なしの 3 条件のうちのいずれかが提示された．刺激提示終了後に被験者には 0.1% アンモニア(Ammonia)水(大成薬品工業社製), 0.1% 次亜塩素酸カルシウム(Calcium Hypochlorite)水溶液（三栄化工社製), 31.55mg/5ml β-フェネチルアルコール(β-Phenylethyl Alcohol), 12.55mg/5ml メチル-シクロペンタン(Methylcyclopentenolo), 5mg/5ml イソ吉草酸(Isopentanoic Acid), 39.7mg/5ml γ-ウンデカラクトン(γ-Undecalactone), 3.975mg/5ml スカトール(Scatole) and 100% パラフィン(Parafin) (T&T Olfacto Meter, 第一薬品産業社製)をそれぞれ一度ずつランダムな順番で集気びん法によって提示し，それらの中で最も近い臭いのする薬品を選ばせた．アンモニア水と次亜塩素酸水溶液はそれぞれ刺激臭がする薬品であり，β-フェネチルアルコールはバラの香り，メチル-シクロペンタンはカラメルの香り，イソ吉草酸は汗の臭い，γ-ウンデカラクトンは桃の香り，スカトールは不快な糞臭がする薬品であり，パラフィンは無臭の薬品である．

3.5.3.2. 実験結果・実験考察

図 3.5.4 は各刺激条件における，各臭い物質の選択率を示している．このグラフにおける選択率とは各刺激を印加したときに被験者が縦軸の薬品を選択する確率である．これらのグラフにおける error bar は標準誤差を示しており，*は

Kruskal-Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較法によって認められた有意差を示している.

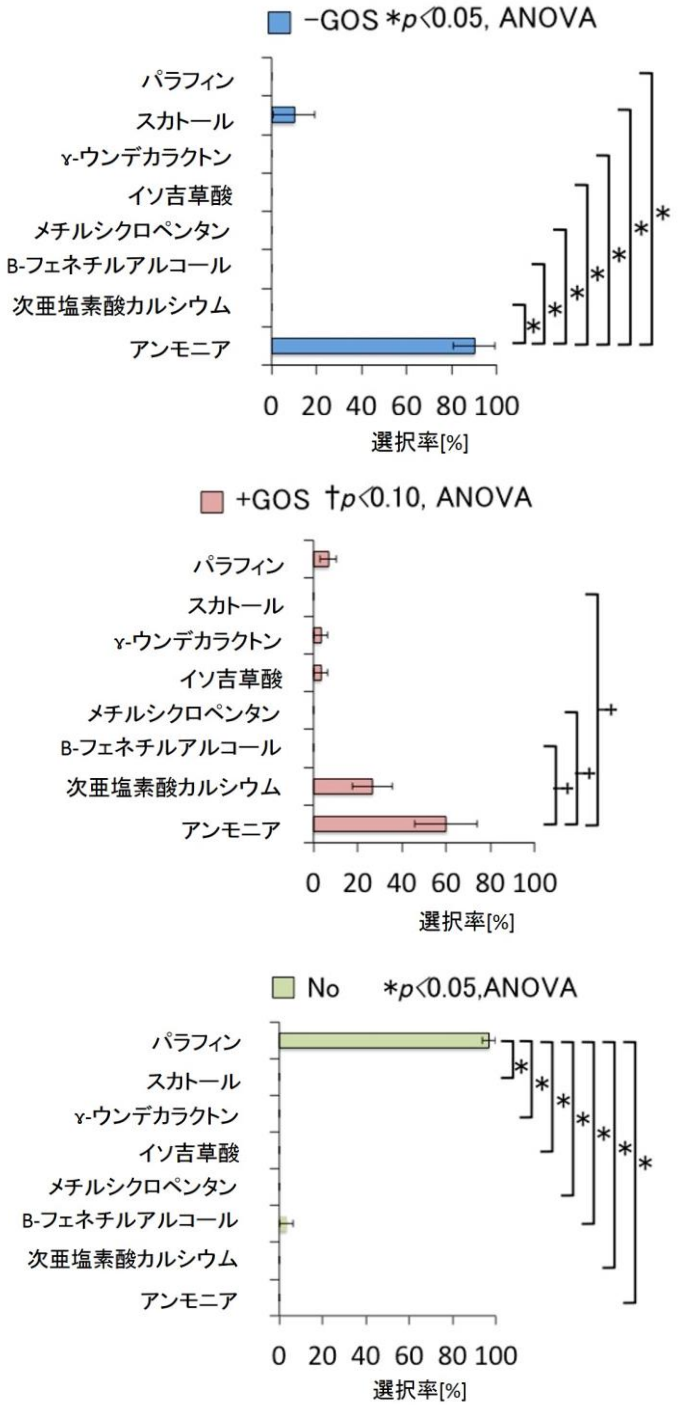


図 3.5.4：各刺激手法における，臭い物質の選択率

これらの図から，GOS はアンモニアの選択率が他の物質と比較して有意に高いことがわかる．また，刺激なし条件においては無臭であるパラフィンが有意に高い確率で選択されていることがわかる．

これらの結果から，GOS はアンモニア臭のような刺激臭を惹起していることが示された．

アンモニア臭などの刺激臭は侵害刺激を受容する三叉神経によって検知される．よって，GOS によって刺激臭が惹起されたということは，刺激電流は鼻腔内の三叉神経を発火させることで，嗅覚を惹起したと考えられる．

一方で，次亜塩素酸カルシウム水溶液も刺激臭を惹起する事が知られている．しかしながら，特に-GOS を提示したときには次亜塩素酸カルシウム水溶液よりもアンモニア水が有意に高い確率で選択される．このことから，被験者が知覚している臭いは，刺激臭の中でも GOS によって惹起されるのは次亜塩素酸カルシウム水溶液と胃よりも，アンモニア水に近い臭いであると考えられる．この刺激臭の弁別は嗅神経の寄与が大きい．アンモニアや次亜塩素酸などの刺激臭を発する物質の中でも，純粋に三叉神経のみを刺激できる物質は二酸化炭素のみであることが知られている[28]．この事から，GOS によって惹起される臭いが次亜塩素酸カルシウム水溶液よりもアンモニア水に近い臭いであると判断できるということは，GOS の刺激電流が三叉神経だけでなく，嗅神経の発火も誘発している可能性が考えられる．

3.5.4. 嗅覚電気刺激の極性の違いが及ぼす惹起される臭いの惹起タイミングへの影響

感覚器への電気刺激において，刺激電流の極性によって惹起される感覚が異なる．例えば，前庭電気刺激であれば前庭感覚の方向が異なり，触覚電気刺激であれば振動覚が惹起されるのは陰極側だけである．さらに，電流経路仮説の観点からも，神経の発火は電流の方向に選択性を持っていると考えている．よって，GOS においても極性によって感覚器へ与える影響は異なると考えられる．

一方で，前述した二つの実験結果から，GOS は極性によらず嗅覚を惹起しており，またその臭いの質も若干の違いはあるが，両者とも刺激臭の惹起が確認されている．

そこで，前述の 2 つの実験後の被験者に実験において気づいたことの自由回答を求めたところ，電気刺激オンセットで臭いがする刺激と電気刺激のオフセ

ットでにおいがする刺激が存在するという回答が得られた．この回答から，本研究では GOS の極性は惹起する臭いの惹起タイミングに影響を与えるのではないかと考えた．

よって，GOS の刺激電流が及ぼす臭いの惹起タイミングへの影響を調査するために次の実験を行った．

3.5.4.1. 実験方法

被験者は健常な成人男性 6 名であった．すべての被験者から十分にインフォームドコンセントを得て実験に参加してもらった．

実験は静かな実験室で行われた．被験者は鼻梁と首の後ろに電極を設置された．被験者はボタンを渡され，臭いがしている間中ボタンを押し続け，臭いがしていないときはボタンを離すように教示された．刺激電流は電流値 3.0mA，電流印加時間 2000ms と 4000ms の方形波電流とした．被験者には電流印加時間 2000ms と 4000ms の+GOS と持続時間 4000ms と 2000ms の-GOS，刺激なしの 5 つの刺激条件で刺激が提示され，各刺激とも 5 試行の合計 25 試行行われた．

ボタンが押されているかどうかの計測はマイクロコントローラ(mbed)によって，サンプリングレート 1kHz で計測された．

3.5.4.2. 実験結果と実験考察

図 3.5.5～図 3.5.7 は各刺激条件における，被験者がボタンをしている時間の平均値を示している．この図における error bar は標準誤差を示しており，*は Kruskal-Wallis ANOVA と Scheffe の多重比較法によって認められた有意差を示している．

これらの図から，-GOS は刺激時間が長くても短くても刺激の onset 直後に臭いが惹起されているのに対して，+GOS は刺激の onset から臭いが惹起されるまでの時間は刺激の長さに依存している．一方で，刺激の offset からの時間を見ると，+GOS は刺激の長さによらずほぼ一定である．

これらの結果から，GOS における極性の違いは嗅覚惹起のタイミングに影響を与える事がわかる．また，-GOS によって惹起される臭いの持続時間は最大で約 2000ms であるのに対して，+GOS は有意に短く，750ms 程度であった．また，+GOS は刺激の持続時間によって惹起される臭いの持続時間が異なるのに

対して，-GOS は 2000ms 刺激と 4000ms 刺激の間には有意な差は見られなかった.

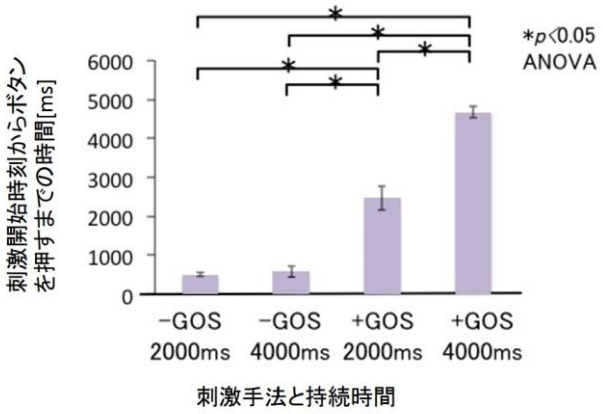


図 3.5.5 : GOS によって惹起される臭いの刺激開始時刻からの潜時

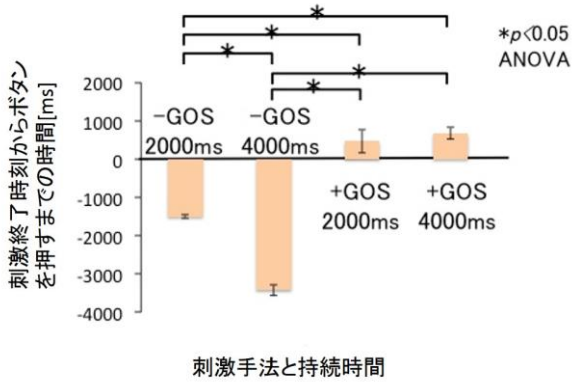


図 3.5.6 : GOS によって惹起される臭いの刺激終了時刻からの潜時

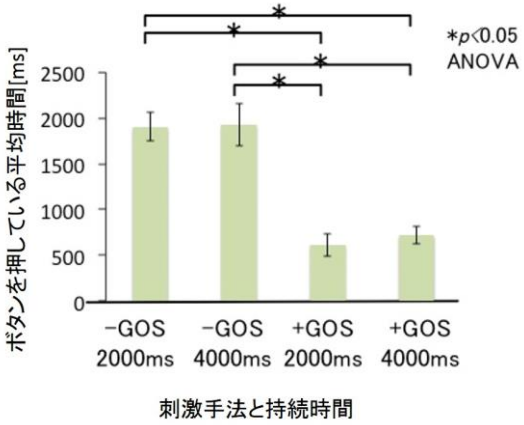


図 3.5.7 : GOS によって惹起される臭いの持続時間

これらのことから，GOS によって発火が誘発される神経は後方向の電荷の空間的な移動量の微分値に反応していると考えられる．

さらに，この GOS の持続時間は，従来研究で示されている化学物質を使った三叉神経の順応時間を計測する実験とは異なる[21,72]．先行研究においては，三叉神経は順応するまでに約 9 秒以上かかるとされていた．しかしながら，研究によって示された嗅覚の持続時間は最大でも 2000ms 程度である．また，化学物質を嗅いだ時の順応にかかる時間も 2000ms よりは長い[21]．この事は，GOS による嗅覚と化学物質による嗅覚を脳の中枢系が区別できていることを示している．

3.5.5. 嗅覚電気刺激における電流経路の観点からの刺激設計の考察

本節の実験によって，電流経路の観点から刺激を設計する事で，刺激臭のみであるが，電気刺激による嗅覚の提示に成功した．

本節における実験によって得られた知見は，嗅覚の感覚器である嗅神経と三叉神経のある鼻腔に対して有効な方向の電流を十分量印加する事で嗅覚を惹起する事が可能であるというものであった．また，その電流の方向は感覚惹起のタイミングに影響を与えるというものであった．本研究において提案している電流経路仮説を支持するものである．

しかしながら，嗅神経も三叉神経枝も第一次感覚細胞であり，軸索を中枢に伸ばしている．よって，経皮電気刺激による嗅覚提示においてはシナプス間隙イオン泳動説では説明が困難であると考えられる．これは，中枢に伸ばしている軸索

のシナプス間隙の方向がそろっているとは考えにくい事と中枢神経系のシナプスに影響を与えているのであれば，三叉神経系支配である歯や眼にも痛覚が惹起されると考えられるにも関わらず，それらに影響を及ぼさないためである．これらの事から，この嗅覚への電気刺激は主として三叉神経の末梢側に影響を与えていると考えられる．一方で，三叉神経枝の自由神経終末は常に同じ方向にイオンチャネルや受容器を向けていない．これらの事から，本研究ではこの電気刺激による刺激臭の惹起のメカニズムとして神経終末近傍の pH 変化による TRPA1 受容体の活性化によってアンモニアのような刺激臭が惹起されたと考えている．

よって，電気刺激による嗅覚提示ディスプレイにおいても電流経路の観点からの刺激設計は妥当であり，有用であると考えられる．

この GOS は現段階では惹起できる臭いが刺激臭だけであるため，感覚提示ディスプレイとして応用するには，非常に限定的である．しかしながら，今後は刺激量のコントロールや電流経路の再設計によって，より多種の臭いを提示できる GOS 提示手法を実現できる可能性があると考えられる．

本節で取り扱った実験においては，鼻梁上に設置した電極から電流を印加したときの電流経路を頭蓋の穴の配置から予測して刺激を行った．これらの実験において予想した電流経路は実証したものではない．しかしながら，経皮電位刺激によって嗅覚が惹起されたということは少なくとも鼻腔内の神経を発火させるために十分な量の電流鼻腔内に印加できている事を示している．

3.6. 電流経路に基づいた刺激設計による味覚提示の実現

これまでの実験によって，電流経路の観点からの刺激設計により，経皮電気刺激によって惹起される前庭感覚の多自由度化を達成し，嗅覚の惹起を実現した．

本節では，電流経路に基づいた刺激設計によって陰極 GGS による味覚抑制効果の機序を解明し，五味全ての味覚抑制の達成を目指す．

3.6.1. 電解質と非電解質に対する陰極刺激の味覚抑制効果

2.4.2 項に示した通り，従来から舌に電極を設置して電気刺激を行う(陽極 GGS)ことで，味覚提示を行う研究はなされてきた[78]．これらの一連の研究によって，舌の付近に陽極を設置する事で電気味や金属味と言われる嫌な味を惹起する事が可能であることが知られており，味覚検査等に用いられてきた．しか

しながら，この電気刺激は金属味以外の味を惹起する事ができないため，味覚提示ディスプレイとして非常に限定的な応用のみが可能であった．

一方で，陽極を舌以外の身体の別の部位に設置し，陰極を舌の付近に設置した場合(陰極 GGS)，味覚は惹起されない．しかし，食塩水を口に含んだ状態でこの刺激を行うことで，塩味を抑制する事が知られている(抑制効果)．

この抑制効果が確認されているのは，塩化ナトリウムなどのナトリウム塩による塩味の抑制のみであり，他の基本五味(甘味，苦味，酸味，旨味)を呈する水溶液に対しても有効であるかどうかはわかっていない．特に，塩味の抑制効果を示した先行研究においては，甘味を呈する味物質に対する物質であるサッカリンナトリウム水溶液の呈する味の抑制効果は見られなかったと報告している[43]．この陰極 GGS の抑制効果が基本五味全てに対して適応可能となれば，五味全てを呈する物質から各味を抑制する事で，あらかじめ物質を口に含んでおく必要はあるが，任意の味を作り出す味覚提示ディスプレイが実現できると考えられる．

基本五味全ての抑制効果を実現するためには，味覚抑制効果の機序を解明し，味覚抑制に必要な条件を明らかにする必要があると考えられる．味覚抑制効果の機序として，本研究では口腔内イオン泳動説を支持している．口腔内イオン泳動説とは，2 章で説明した通り，刺激電流によって形成された電場が味を呈するイオンを舌表面の味細胞から離反することで，味覚抑制が引き起こされるという仮説である．この仮説の対立仮説に神経刺激説が考えられる．神経刺激説は電気刺激によって味細胞が順応し，味物質を検知する事ができない状態になることで，味覚抑制が起こるという機序を唱えたものである．

よって，次節では甘味と苦味のそれぞれの味質を呈する物質から電解質と非電解質のものそれぞれ選び，それらの水溶液に対する陰極 GGS による味覚抑制効果が適用可能かどうかを検証する事で，口腔内イオン泳動説が正しいかどうかを検証するために行った実験について述べる．

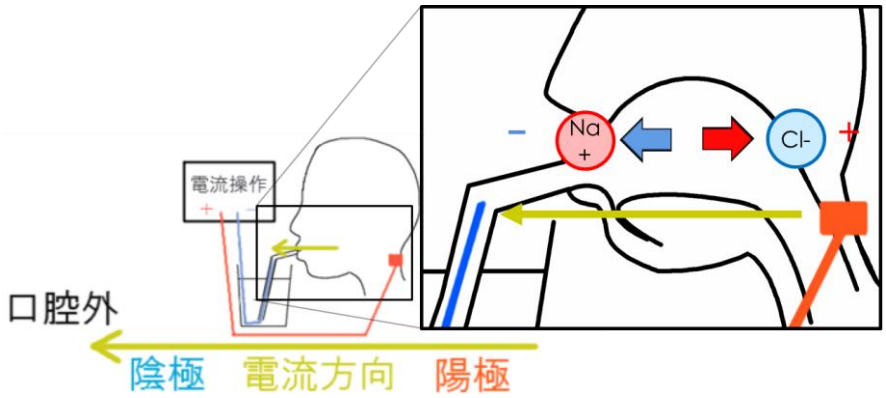


図 3.6.1：陰極刺激と口腔内イオン泳動説の概念図[71]

3.6.2. 電解質と非電解質に対する陰極刺激の抑制効果

味を呈する物質は水溶性の物質である．水溶性の物質は電離する電解質とそうでない非電解質に分類される．つまり，本研究で支持している口腔内イオン泳動説が正しければ，電解質の物質は抑制され，非電解質は抑制されないと考えられる．

そこで，甘味と苦味を呈する電解質と非電解質の物質を用意し，それらの物質を溶かした水溶液に対して陰極 GGS を行った時の被験者の主観的な味覚強度を比較する実験を行った．

3.6.2.1. 甘味を呈する電解質と非電解質に対する味覚抑制効果の検証実験

本実験では非電解質の甘味としてショ糖(スクロース)，電解質の甘味としてアミノ酸の一種であるグリシンを用い，これらの水溶液に対して陰極 GGS を行った時の味覚抑制効果の有無について検証する．ショ糖は味覚提示実験用の標準物質[65]として扱われており，グリシンも主に甘味を呈する物質である[79].

3.6.2.1.1. 実験方法

精製水を用いて 5.0%のグリシン水溶液を電解質試料として用意した．電解質試料を被験者に提示し，これと等価な甘味となるようにショ糖水溶液を被験者に調整させ，非電解質試料とした．この手順により，被験者にとって主観的に等価な甘味である電解質と非電解質の 2 種類の試料を用意した．

実験は 1 回の試行で被験者に 2 度の試料提示を行った後に試料の甘味の強弱関

係について質問をするものとした．回答は「1 つ目の試料の方が甘く感じた」「2 つ目の試料の方が甘く感じた」「1 つ目と 2 つ目の試料は同程度に甘く感じた」の 3 択とした．提示刺激の条件は,

A：グリシン電気刺激なし

B：グリシン電気刺激あり

C：ショ糖電気刺激なし

D：ショ糖電気刺激あり

の 4 種類であり，試料提示の組み合わせ(提示条件)は①試料 A vs 試料 B，②試料 C vs 試料 D，③試料 A vs 試料 C，④試料 B vs 試料 D の 4 通りとした．条件①，②ではグリシンとショ糖それぞれについて電気刺激による味覚抑制効果が生じるかを検証する．条件③では，試料を等価な甘味として被験者が知覚することを確認する．条件④は条件①，②の結果と照らし合わせ，味物質の違いにより抑制効果に差があるかどうかを検証することを目的とする．

電気刺激は 1.0mA で 3 秒間印加するものとし，被験者には試料提示直前に電気刺激が入るか入らないかを伝えた．さらに電気刺激ありの場合は，電流印加中の味の強さを比較するように指示した．

被験者にはストロー(径 6mm，長さ 200mm）を用いて試料提示を行い，そのストローに導線を通して陰極側電極とした．陽極側の電極は首の後ろに設置したゲル電極(フクダ電子製，NIPRODE Ⅱ）とした(図 3.6.2).

被験者は 20 代の男性 5 名であった．各被験者は条件①～④について各 6 試行を行うものとし，24 試行の実行順序は被験者間でカウンタバランスした．

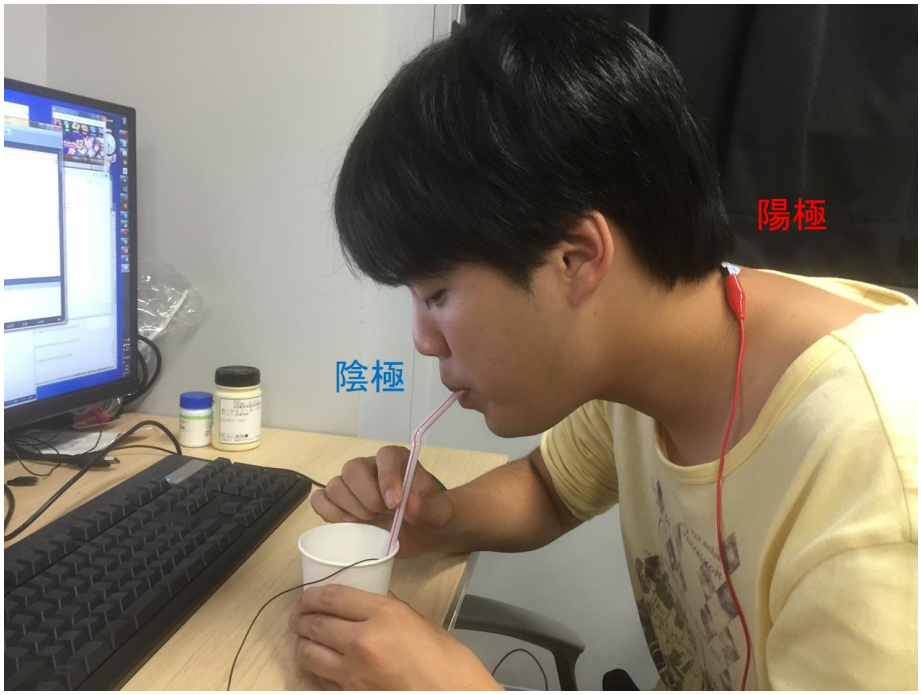


図 3.6.2：実験における電極配置

3.6.2.1.2. 実験結果・実験考察

図 3.6.3 は，各提示条件における被験者の回答の選択率を示している．このグラフにおける選択率とは 2 つの条件の刺激を提示したときの被験者がどちらが味が強い，あるいは同程度の味の強度であると選択する確率である．この図は左上が条件①，右上が条件②，左下が条件③，右下が条件④に対応している．グラフの横軸(項目)は質問に対する 3 択の回答であり，縦軸は全被験者の選択率である．図中の*は Kruskal-Wallis ANOVA と Shcffe の多重比較検定によって認められた有意差($p<.05$)を示しており，†は有意傾向($p<.10$)を示している．

条件①については電気刺激のあり条件のグリシンの方が甘いという回答が最も多かった．しかし，このグラフにおいては有意差・有意傾向は認められなかった．これはグリシンの抑制効果が明確でないことに起因する可能性がある事を示している．条件②は「同程度」が回答される確率が有意に高かった．これは，非電解質であるショ糖は電気刺激を印加しても味覚に変化を起こさない事を示していると考えられる．条件③は「同程度」が回答される確率が有意に高く，これは被験者自身が調整した 2 つの試料が間違いなく同程度の味であることを示している．条件④では「ショ糖に電気刺激あり」の条件における選択率は「グリ

シン電気刺激あり」における選択率に対して有意に高く，「同程度」における選択率に対して有意傾向ではあるが，高い事が認められた．条件②においては示された，ショ糖には電気刺激による味覚抑制効果が生じないことと，条件④において示された，電気刺激印加時のグリシンとショ糖それぞれの甘味を直接比較した時にグリシンの方が有意に味強度が弱いということ，条件①で示された，有意差は認められないが，グリシンに対して電気刺激をした場合としなかった場合の甘味を比較させた時に，グリシンに電気刺激をしなかった場合の方が甘いと回答する確率が高いことから，陰極 GGS は甘味を呈する電解質であるグリシンに対しては味覚抑制効果を生じさせ，非電解質であるショ糖には抑制効果を生じさせないと考えられる．

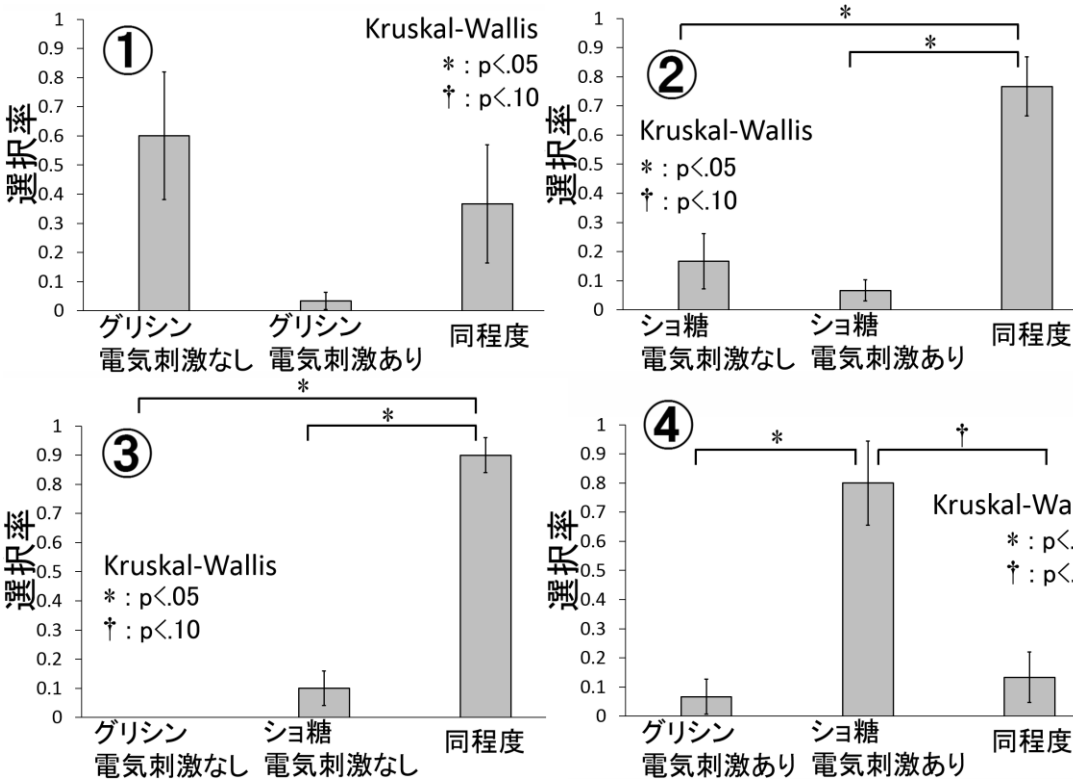


図 3.6.3：甘味抑制実験の結果[71]

3.6.2.2. 苦味を呈する電解質と非電解質に対する味覚抑制効果の検証実験

甘味を呈する電解質と非電解質の水溶液への陰極 GGS が及ぼす味覚抑制効果の有無を検証した実験と同様に苦味を呈する電解質と非電解質の水溶液への

陰極 GGS が及ぼす味覚抑制効果の有無を検証する実験を行った．電解質の苦味としては $MgCl_2$（塩化マグネシウム）が，非電解質の苦味としてカフェインが上げられる．本実験ではこれらを用いて実験を行った．これらの物質は無色無臭で苦味を呈することが知られている[72].

3.6.2.2.1. 実験方法

精製水を用いて 0.30%のカフェイン水溶液を電解質試料として用意した．電解質試料を被験者に提示し，これと等価な甘味となるように塩化マグネシウム水溶液を被験者自身に調整させ，非電解質試料とした．この手順により，被験者にとって主観的に等価な甘味である電解質，非電解質の 2 種類の試料を準備した．

実験は 1 回の試行で被験者に 2 度の試料提示を行った後に試料の苦味の強弱関係について質問をするものとした．回答は「1 つ目の試料の方が苦く感じた」「2 つ目の試料の方が苦く感じた」「1 つ目と 2 つ目の試料は同程度に苦く感じた」の 3 択とした．提示刺激は,

A：カフェイン電気刺激なし

B：カフェイン電気刺激あり

C：$MgCl_2$ 電気刺激なし

D：$MgCl_2$ 電気刺激あり

の 4 種類であり, 2 度の試料提示の組み合わせ(提示条件)は①試料 E vs 試料 F, ②試料 G vs 試料 H，③試料 E vs 試料 G，④試料 F vs 試料 H の 4 通りとした．条件①，②ではそれぞれの陰極 GGS による味覚抑制効果が生じるかを検証する．条件③では，被験者に調整させた 2 つの試料が等価な苦味を被験者に知覚させているかどうかを検証する．条件④は条件①, ②の結果と照らし合わせ，味物質の違いにより抑制効果に差があるかどうかを検証することを目的とする．

電気刺激は 1.0mA で 3 秒間印加するものとし，被験者には試料提示直前に電気刺激が入るか入らないかを伝えた．さらに電気刺激ありの場合は，電流印加中の味の強さをもって試料間の比較を行うように指示した．被験者にはストロー(直径 6mm，長さ 200mm）用いて試料提示を行い，そのストローに導線を通して陰極側電極とした．陽極側の電極は首の後ろに設置したゲル電極(フクダ電子製，NIPRODE Ⅱ）とした．

被験者は 20 代の男性 5 名であった．各被験者は条件①～④について各 6 試行を

行うものとした.

3.6.2.2.2. 実験結果・実験考察

図 3.6.4 は各提示条件における被験者の選択率を示している. このグラフにおける選択率とは 2 つの条件の刺激を提示したときの被験者がどちらが味が強い, あるいは同程度の味の強度であると選択する確率である. これらのグラフにおいて, 左上が条件①, 右上が条件②, 左下が条件③, 右下が条件④に対応している. グラフの横軸(項目)は質問に対する 3 択の回答を示しており, 縦軸は全被験者の選択率を示している. 図中の*は Kruskal-Wallis ANOVA と Shcffe の多重比較検定によって認められた有意差($p<.05$)を示しており, †は有意傾向($p<.10$)を示している.また, error bar は標準誤差を示している.

条件②について, 「$MgCl_2$ 電気刺激なし」の選択率は「$MgCl_2$ 電気刺激あり」の選択率に対して有意に高く, 「同程度」の選択率に対して有意傾向ではあるが高かった. これは, $MgCl_2$ は陰極 GGS により抑制効果が生じることを示していると考えられる. また, 条件③では「同程度」の選択率が他の 2 つの回答の選択率に対して有意に高い事から, $MgCl_2$ の水溶液とカフェインの水溶液は被験者にとって同程度の苦味強度を呈している事がわかる. 条件①には有意差・有意傾向が認められなかったが, 「カフェイン電気刺激なし」の選択率が「カフェイン電気刺激あり」と「同程度」の選択率よりも高かった. この事から, カフェインに対して陰極 GGS が全く苦味を抑制しないとは言えない. しかし, この抑制効果は非常に微弱であると考えられる.

口腔内イオン泳動説に従うならば非電解質であるカフェインには抑制効果が生じないため, カフェインに対する抑制効果の機序として考えられるものとして神経刺激説が挙げられる. これは味覚神経が電気刺激によって順応することで味物質による刺激を知覚しにくい状態となるとする仮説である. これに関して, 条件④で電気刺激印加時のカフェインと $MgCl_2$ の苦味の比較ではカフェインの方が苦味を強く感じるとする回答が多くなっている. このことから, カフェインに対して神経刺激説に基づく抑制効果が生じていたとしても, 口腔内イオン泳動説に従う $MgCl_2$ の方がはるかに強い抑制効果が生じていたと考えられる.

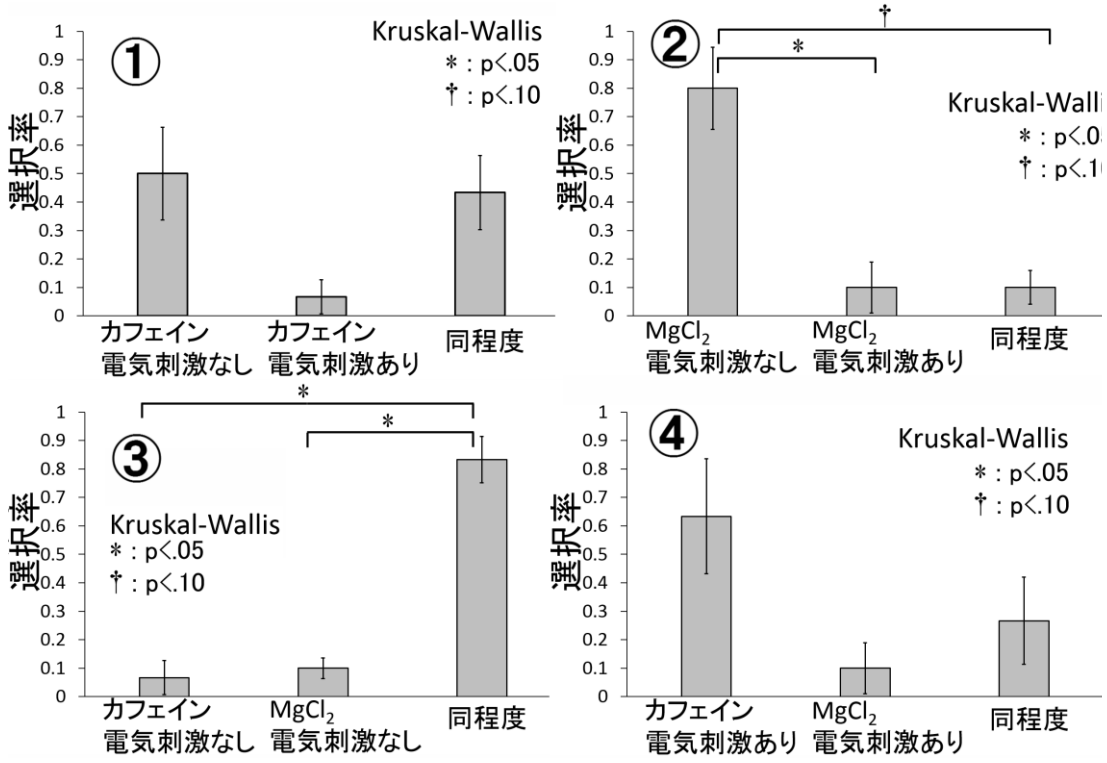


図 3.6.4：苦味抑制実験結果[71]

3.6.2.3. 電解質と非電解質の水溶液に対する陰極刺激の味覚抑制効果の検証実験に関する考察

これらの実験結果から，電解質に対しては陰極 GGS による味覚抑制が有効であり，非電解質の物質に対してはほぼ無効であることが示された．よって，陰極 GGS における味覚抑制の機序としては味を呈するイオンの泳動により，味覚受容器付近の呈味イオン濃度が下がるという口腔内イオン泳動説が支持されると考えられる．

また，陰極 GGS で味が惹起されないのは，口腔内の舌や内壁上の味蕾における電流の方向に対して味細胞が選択性をもって発火していることを示唆している．電流経路の観点から考えれば，本実験で行った電極配置は電流を味蕾の内側から外側に流していると考えられる．これは，首の後ろと口腔内に電極を設置した時には口腔の内壁や舌といった水溶液との界面をとおって電流が流れると考えられるためである．味蕾にある味細胞の発火によって味覚が惹起される事を

考えると，電極をどのように配置しようとも，この味蕾上の電流方向が内側から外側に向かっていれば，電気味を惹起しない刺激設計が可能となると考えられる．

また，シナプス間隙イオン泳動説の観点から考えると，陽極 GGS は陽イオンをシナプス後に泳動させる刺激であり，陰極 GGS は陽イオンをシナプス前側に泳動させる刺激であると考えられる．陽極 GGS がシナプス後に陽イオンを泳動させ，シナプス後のイオンチャネル付近の陽イオン濃度の上昇が味細胞の発火が誘発するのであれば，この陽イオン濃度を下げる方向に泳動させる陰極 GGS は味覚を抑制させると考えられる．よって，本研究で見られた非電解質の苦味物質であるカフェインの微弱な抑制効果はこのシナプス間隙イオン泳動によるものの可能性があると考えられる．

3.6.3. 陰極刺激による酸味と旨味を呈する電解質の呈する味覚抑制

これまでの実験から，陰極 GGS によって味を呈する電解質の味覚抑制効果が確認された．よって，電解質の呈味物質であれば陰極 GGS によって味が抑制されると考えられる．

そこで，本項では基本五味のなかで味覚抑制が未達成である酸味と旨味の味覚抑制を達成する実験について述べる．

3.6.3.1. 酸味を呈する電解質

酸味を呈する標準物質はクエン酸であると言われている．クエン酸は電解質の物質である．よって，口腔内イオン泳動説の考え方に従えばクエン酸は味が抑制されると考えられる．

そこで，本項では陰極 GGS 印加中のクエン酸水溶液が呈する味覚の強度と刺激電流の強度の関係を明らかにする事で，陰極 GGS がクエン酸水溶液の呈する酸味を抑制する事を示す．

3.6.3.2. 旨味を呈する電解質

旨味を呈する標準物質はグルタミン酸ナトリウムであると言われている．グルタミン酸ナトリウムは電解質の物質である．よって，口腔内イオン泳動説の考え方に従えばグルタミン酸ナトリウムは味が抑制されると考えられる．

そこで，本項ではクエン酸に加えて陰極 GGS 印加中のグルタミン酸ナトリウ

ム水溶液が呈する味覚の強度と刺激電流の強度の関係を明らかにする事で，陰極 GGS がグルタミン酸ナトリウム水溶液の呈する旨味を抑制する事を示す.

3.6.3.3. 実験方法

3.6.3.3.1. 酸味

本実験では，0.50% のクエン酸水溶液を陰極 GGS 印加用試料とし，0.40% , 0.30% , 0.20% , 0.10% クエン酸水溶液を比較用試料として用意した．被験者には比較用試料の味強度を記憶させ, 陰極 GGS 印加用試料に印加する電流量を被験者自身に操作させることで陰極 GGS 印加用試料と比較用試料について味強度の主観的等価点を計測し, 味覚抑制効果の定量評価を行った. 操作可能な電流量は 10-2000uA であり，被験者にはプラスチックカップに入れた試料を，陰極側電極とするための導線を通したストロー(径 6mm,長さ 200mm)を用いて口に含ませ，舌先 1-2cm が試料に触れるように指示した．これらの手続きは先行研究[32]に基づいている．また，陽極側は首の後ろに設置したゲル電極(フクダ電子製，NIPRODEⅡ)とした.

被験者は 20 代男性 3 名であり，比較用試料である 0.40% , 0.30% , 0.20% , 0.10%のクエン酸水溶液についてそれぞれ 6 回ずつ, 計 24 回の測定を行った. 4 種類の比較用試料は被験者毎に提示順をカウンタバランスした．また試料温度が実験前に室温(25 ±3 ℃) であることを確認した.

被験者には試行間に精製水を用いて口を濯がせたが，比較用試料の味強度の記憶が薄れる可能性があるため，味強度の記憶後には濯ぎを行わないものとした．ただし，陰極 GGS 印加用試料を口に含み，電流量操作をする過程で比較用試料の味強度を忘れた場合には精製水を用いて口を濯がせた後に再度，比較用試料で味の記憶を行うことを認めた. また, 舌を動かすと味の強度知覚が変わるため，極力舌を動かさないように指示した.

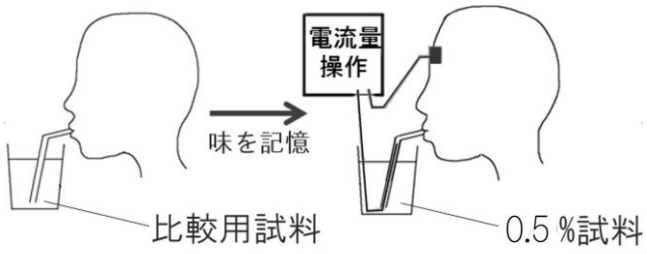


図 3.6.5：実験手順の概要[70]

3.6.3.3.2. 旨味

本実験ではクエン酸を用いた酸味と陰極 GGS の電流量の関係を検証する実験同様に，グルタミン酸ナトリウム（旨味）の比較用試料と陰極 GGS 用試料を用意した．比較用試料は各物質の 0.2, 0.4, 0.6, 0.8%水溶液とし，陰極 GGS 用試料は 1.0%水溶液とした．

被験者は 4 種類の比較用試料のうち 1 つを提示され，その味の強度を記憶する．その後，陰極刺激用試料を口に含んで陰極 GGS を印加した．これによって抑制効果が生じ，被験者は陰極刺激用試料を 1.0%より薄い水溶液であると知覚すると考えられる．被験者にスライドレバーによって電流量を操作させ，記憶した比較用試料と，陰極刺激用試料の味強度が等しいと被験者が感じたときの電流量を記録した．また，レバーの操作は可能な限り早く終わらせるものとした．

被験者は 5 名（20 代男性）であった．比較用試料の濃度 4 条件ついてそれぞれ 6 回ずつ提示し，合計 24 試行行った．比較用試料の提示順序はカウンタバランスした．口腔内に味物質が残留し，試料のもつ味の強度が変化する事を防ぐため，試行間には口を精製水により濯がせた．被験者には試料を口に含むときには舌先端から 2cm 程度を水溶液が満たし，ストロー先端を舌先でふさがない状態とするよう教示した．また，味の強度を確認する際は舌を極力動かさないように指示した．この時，試料の温度は室温（25±3℃）であることを確認した．

電極の配置は図 3.6.6 のように，舌近辺に設置する陰極側電極は味物質の水溶液を口に含むために使用するストロー(直径 6mm，長さ 200mm)に導線を通したものとし，陽極側電極は前額部に設置したゲル電極（ディスポ電極 F ビトロード，日本光電工業製）を用いている．

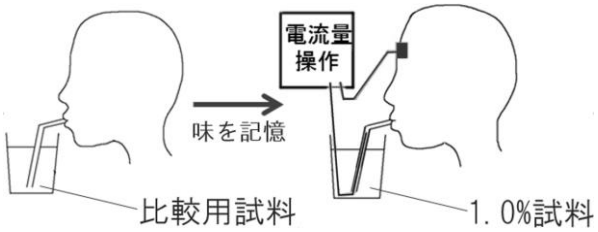


図 3.6.6：実験手順の概要[70]

3.6.3.4. 実験結果・実験考察

図 3.6.7 と図 3.6.8 はそれぞれクエン酸とグルタミン酸ナトリウムの比較用紙料濃度に対する，1.0%濃度の電気刺激印加用試料を比較用紙料と同じ酸味,旨味強度になる時の陰極 GGS の正規化した電流値を示している.

これらの図から，クエン酸とグルタミン酸ナトリウムによって呈される酸味と旨味は陰極 GGS の電流量が大きくなればなるほどその抑制効果は強くなる事がわかる.

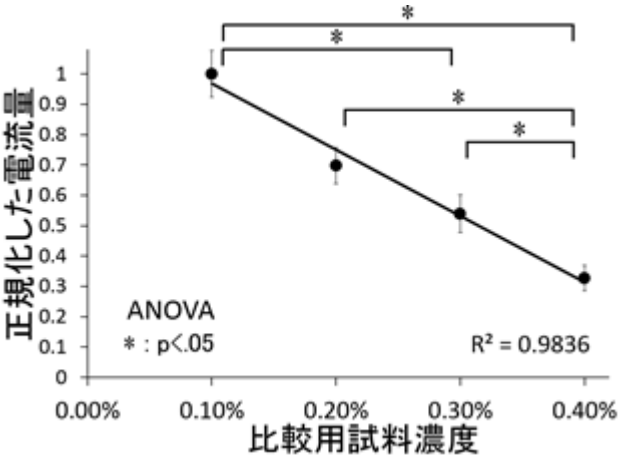


図 3.6.7：電流量と酸味抑制効果の強度の関係[71]

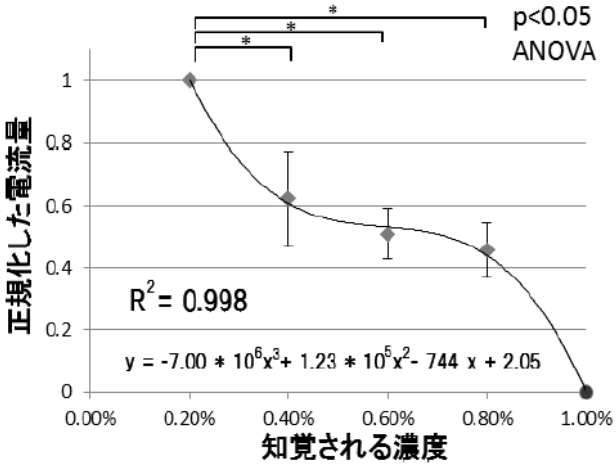


図 3.6.8：電流量と旨味抑制効果の強度の関係[70]

電流量と酸味抑制効果の関係が線形であるのに対して，電流量と旨味抑制効果の大きさの関係は非線形であると考えられる．この差が現れた要因として，クエン酸とグルタミン酸ナトリウムでは味神経を刺激するイオンの極性が異なることが考えられる．クエン酸は陽イオンである水素イオンが酸味受容体への刺激に関与しており，陰イオンは味覚に対する影響が小さいことが知られている[30]．一方で，グルタミン酸ナトリウムについては，主に酸味を呈する物質であるグルタミン酸が，ナトリウム塩であるグルタミン酸ナトリウムとなることで旨味を呈する[67]ことが分かっている．このことから、グルタミン酸ナトリウムによる旨味提示には陰イオンであるグルタミン酸イオンと陽イオンであるナトリウムイオンの両方が必要であると考えられる．陰極刺激により陽イオンは舌から遠ざかり，陰イオンは舌に近づくと考えられ，呈味に関与するイオンが 1 つである塩味と，極性の異なる 2 つである旨味では電流量と抑制効果の大きさの関係に差が現れたと考えられる．

この電流量と味覚抑制効果の強度との関係は口腔内イオン泳動説を支持する結果であると考えられる．口腔内イオン泳動説では刺激電流によって作られた電場が味を呈するイオンを泳動させることによって味覚の抑制を実現する．つまり，より多くのイオンを泳動させ，味細胞の近傍でのイオン濃度をより低くすることで，味覚の抑制効果も強力なものとなると考えられる．水溶液中のイオンは拡散によって水溶液中に一様な濃度になるように動く．この力は電場がイオンに加える力の抗力となる．よって，大きな電流値で刺激する事で大きな電場を

口腔内に発生させることで，より多くのイオンを電極側に泳動させることが可能となると考えられる．これは，味細胞周辺のイオン濃度をより低下させ，より強力に味覚を抑制すると考えられる．

3.6.4. 味覚電気刺激における電流経路の観点からの刺激設計の考察

本節では舌への電気刺激の中でも舌付近に陰極のみがある陰極 GGS の及ぼす味覚の抑制効果に注目して実験を行った．本研究では陰極刺激の及ぼす味覚抑制効果の機序として口腔内イオン泳動説を支持し，その妥当性を証明する実験を行った．これらの研究を通して従来は味覚の抑制が困難であった，甘味，苦味，酸味，旨味の四味に対する味覚抑制を達成した．これによって，先行研究において抑制が確認されている塩味を含めて，基本五味全ての味についての味覚抑制が達成された．

この味覚抑制を実現するために，舌から離れた位置に陽極を設置し，電気味がしない状態を作り出した．これは，電流経路的な観点から見ると，味蕾を刺激しない電流の方向を実現した事と等価であると考えられる．

本研究では，この電気刺激による味覚抑制手法を利用したディスプレイとして，味を呈する物質にこの手法を適用する事で基本五味を抑制し，任意の味を作るディスプレイを提案している．このディスプレイを実現するための問題点として，各基本五味を独立に抑制する必要がある事が上げられる．この一つの解として，酸味や旨味の実験で示した様な電流量に対する味覚抑制の特性を利用する事が上げられる．しかし，この手法では五味全てを独立に扱う事は困難である．

イオン泳動の観点から考えれば，分子量やイオン化したときの価数によって電場から受ける力の大きさが物質ごとに異なると考えられる．この違いを利用する事で，交流刺激等や刺激の電気的なパターンからイオンの口腔内のイオンの空間的な分布を制御する事ができれば，本研究で提案しているような味覚提示ディスプレイが開発できる可能性はあると考えられる．

本節では，電流経路の観点から口腔内の電場の様子を予測する事で，電気刺激による味覚抑制の機序を実証し，基本五味全ての味覚抑制効果を実証した．これらの事から，電気刺激による味覚提示ディスプレイにおいても電流経路からの刺激設計は妥当であり有用であると考えられる．

3.7. 電流経路の観点からの刺激設計

本章においては電流経路の空間的な配置とシナプス間隙イオン泳動説の二つの観点から頭部への電気刺激が感覚を惹起する機序を考察し，頭部への電気刺激の設計を行うことで，電気刺激による前庭感覚，嗅覚，味覚提示手法が抱える感覚提示ディスプレイとしての諸問題の解決に挑んだ．本章で達成したことをまとめると以下のようになる．

- 頭部の抵抗値計測と磁場計測による電流経路仮説の存在の実証
- 電流経路仮説に基づく刺激設計による前庭電気刺激の多自由度化
- 電流経路仮説に基づく刺激設計による嗅覚提示手法の開発
- 陰極 GGS による味覚抑制効果の機序の解明と五味全ての味抑制の達成

これらのことから，従来の電気刺激による前庭感覚，嗅覚，味覚提示手法の抱える感覚提示ディスプレイとしての諸問題を解決したといえる．

一方で，本研究によって前庭感覚，嗅覚，味覚の電気刺激手法の抱える問題を解決した．しかし本件研究によって，これらの電気刺激手法が感覚提示ディスプレイとして抱える問題のすべての解決したわけではない．しかしながら，従来の電気刺激による前庭感覚，嗅覚，味覚提示手法では提示が困難であった感覚の再現が本研究では可能になった．よって，この事実は電流経路の考え方の妥当性と有用性を示している．

電流経路仮説においては，神経が電流の空間的な方向に対して選択性をもって発火していることに言及している．この発火の選択性はシナプス間隙の向きと電流が作り出すシナプス間隙での電場の方向に起因していると本研究では考えている．本章で行った実験の結果はシナプス間隙イオン泳動説を支持するものである．このシナプス間隙イオン泳動説の妥当性は 5 章において詳しく考察する．

4. 前庭電気刺激における電流経路の時間特性の電気回路モデルと提示加速度感覚の強化

前章までの実験おいて，4 極 GVS は頭部内の特定の電流経路を刺激電流が流れることにより，Roll，Pitch，Yaw 方向への加速度感覚を提示可能である事が示されたが，4 極 GVS により誘発される Pitch 方向と Yaw 方向の加速度感覚は Roll 方向のそれに比べて微弱である事がわかる．これは，図 3.4.9，図 3.4.11 からもある程度推察できる．GVS により提示される加速度感覚の強度は刺激電流値と正の相関があるため，前章の実験等で用いた 3mA やそれ以上の刺激電流を用いる事で，比較的強力な加速度感覚の提示は可能であると考えられるが，高い電流値の刺激電流は痛覚や触覚を提示してしまい，ゲーム，シミュレータなどにおける不快感やリアリティの低下を引き起こす．また，2.3.2 項で示したように，GVS は頭部に電流を印加するため，安全性の観安全性の観点から無制限に電流値を上げることはできない．よって，低い(安全な)電流値で強力な前庭感覚を提示できる刺激手法の開発が必要である．

GVS において一般的に直流刺激が用いられるが，交流刺激が用いられる場合もある．交流刺激は 2Hz 以下の低周波数帯では左右への身体動揺と眼振を引き起こし，2-10Hz までの周波数帯では眼振のみを引き起こすが，それ以上高い周波数帯ではそれらの現象は見られなくなる．永谷ら(2005) は交流 GVS による視界への影響を心理物理実験によって計測している．この結果から 1Hz 程度の周波数をもった交流刺激はそれよりも低周波な刺激よりも小さい電流値で眼球運動を誘発する事を示している[43].

さらに，George ら(2010)は直流前庭電気刺激を一方向に印加し続ける事で，徐々に知覚される前庭感覚が微弱になっていき，完全に GVS による前庭感覚を知覚する事ができなくなった時点で電流印加を中止すると逆方向の前庭感覚を知覚するということを示している．

この研究結果を前章で構築した前庭電気刺激における電流経路を示す回路モデルに当てはめて考えると，GVS の刺激電流の加速度感覚惹起の効果には周波数応答特性や過渡応答特性があり，頭部等価回路としてはこれまでの抵抗回路では不十分であると考えられる．また，この過渡応答を利用する事で小さい電流

値で強力な加速度感覚を誘発する刺激を構築できるのではないかと考えた．交流刺激により提示される加速度感覚が直流刺激によるそれよりも大きくなる事から，頭部等価回路モデルは図 4.1.3 (C)のように抵抗とキャパシタで構成され，前庭はこの回路モデル中のキャパシタを通る Ic と相関があると考えられる．よって，提案している回路モデル中の I_1 を小さくし，Ic を大きくするような刺激を実現できれば，安全な電流値で強力な疑似前庭感覚を知覚させることのできる刺激を構築する事が可能と考えられる．また，頭部回路モデルを，キャパシタを含む回路として構築した回路モデルが妥当であれば，キャパシタの充放電を利用する事で前庭に流れ込む電流を増加させ，加速度感覚を増強できると考えられる．

そこで，本章ではキャパシタの充放電を利用して提示されるバーチャルな前庭感覚を増強させ，誘発する身体動揺を大きくする刺激として往復電流刺激を提案し，往復電流刺激が提示する前庭感覚と身体動揺の増強/増大効果を調査するとともに，構築した CR 回路モデルの妥当性を検証する．

4.1. 頭部交流インピーダンスの計測による回路モデルの頭部等価回路としての妥当性の検証

本章の冒頭で説明した通り，交流前庭電気刺激は眼振を誘発し，眼振を誘発しやすい周波数帯域を持っている．また，直流の GVS も印加中に徐々に惹起する前庭感覚が微弱になってしまう．このある種の周波数応答特性や過渡応答特性は，電気回路として考えると，キャパシタのような電荷の充放電を引き起こす素子が頭部内の電流経路に存在することに起因すると考えられる．

このような挙動を引き起こす要因として頭部の電気的な特性としてのキャパシタが挙げられる．頭部は皮膚や脳髄液などの導電体が頭蓋骨という絶縁体を挟み込むような構造である．この構造により，頭部電気刺激をしたときにはこのキャパシタ成分による充放電が引き起こされると考えられる．

そこで，本研究では実際に頭部がキャパシタを含む回路と等価な電気的な挙動を示すかどうかを検証するために，頭部の交流インピーダンスを計測する実験を行った．

4.1.1. 実験方法

被験者は健常な成人男性 4 名であり，十分にインフォームドコンセントをと

った．実験は静かな実験室で行われた．被験者は乳様突起上に銅電極(1 x 1cm)を設置された．図 4.1.1 示すように，頭部と頭部に直列につながれた抵抗にファンクションジェネレータから 0，1，2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000Hz の振幅 10V 電圧交流正弦波電圧を印加したときの頭部両端電圧と抵抗両端電圧をオシロスコープで計測し，各周波数における頭部インピーダンスを計算し，その計測結果に図 4.1.1 に示す様な回路の合成抵抗をフィッティングした．計測時にはオシロスコープ，ファンクションジェネレータをグランドから浮かせた状態で計測するために，絶縁トランスとバッテリーを用いて機器を駆動し，オシロスコープと PC 間は光通信によりデータを計測した．

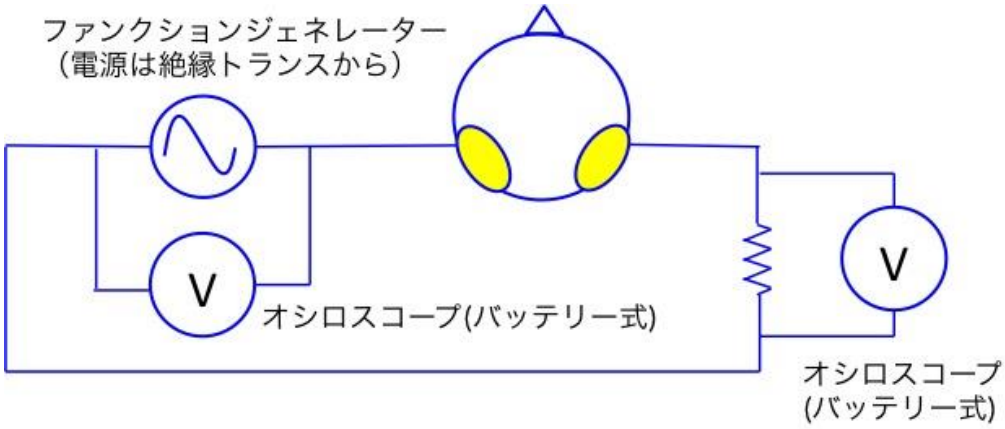


図 4.1.1：交流インピーダンス計測実験の設定

4.1.2. 実験結果

図 4.1.2 の o は周波数に対する頭部インピーダンスを示している．この図から，頭部の交流インピーダンスは低周波数帯で高く，高周波数帯では低いことが分かる．

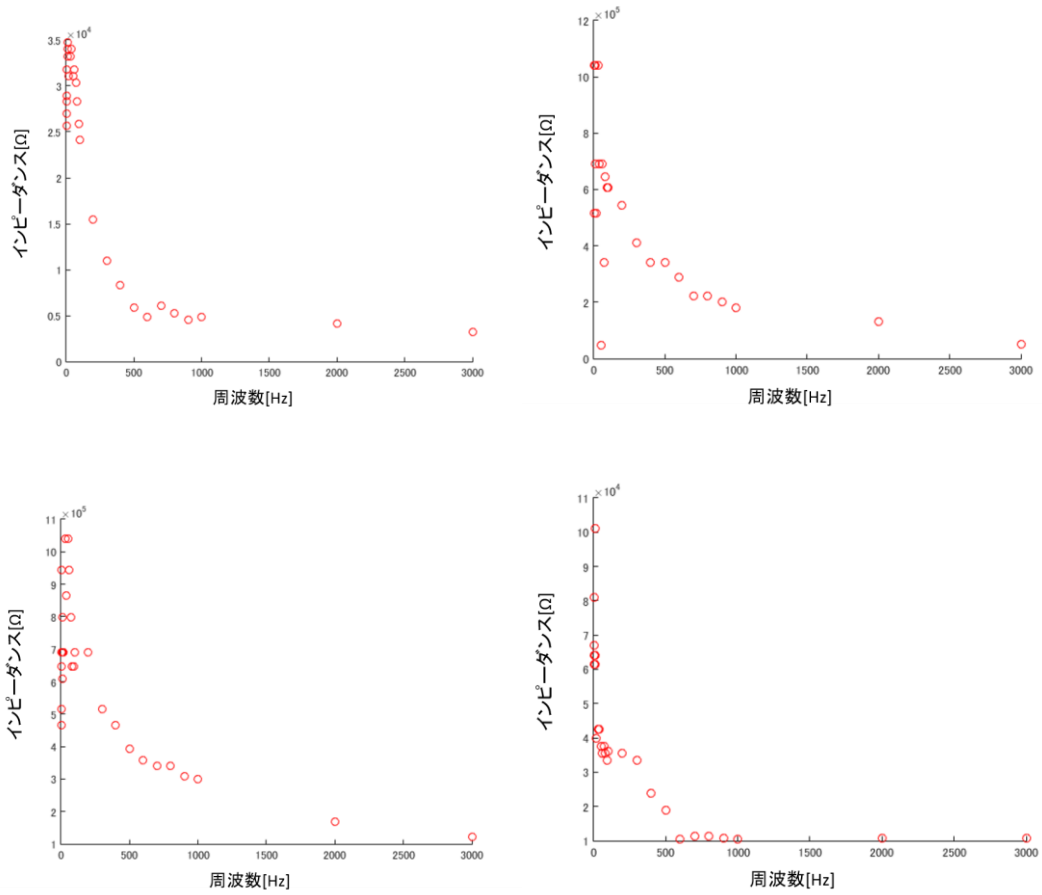


図 4.1.2：交流インピーダンス計測実験結果(左上：Sub1，右上：Sub2，左下：Sub3，右下：Sub4)

この結果を見ると，低周波帯は推定されたインピーダンスがばらついているが，周波数が高くなるにつれて安定した変化をしている．

4.1.3. 実験考察

図 4.1.2 に示されている結果から，交流インピーダンス計測結果の変化が安定している部分をみると，低周波帯ではある程度高いインピーダンスが 500Hz の周波数帯までで急激に低下し，それ以上高い周波数帯域以外ではほぼ低下しない．この周波数に対するインピーダンスの減少の様子から，少なくとも 0～3000Hz の周波数帯域では頭部を一つのキャパシタを含んだ CR 回路モデルとして近似可能であると考えられる．これは，複数のキャパシタ含んだ回路と頭部が等価である場合，周波数に対するインピーダンスの減少は今回の結果のよう

な様子ではなく，急激にインピーダンスが減少する周波数帯域とインピーダンスがあまり変化しない周波数帯域が複数存在すると考えられる．

そこで，前庭への刺激の挙動を示すモデルとして，電荷の充放電を起こすキャパシタ(C)と抵抗器(R)を含んだ CR 電気回路モデルを提案する．

具体的な CR 回路を考えると，頭部に電流を印加し続けても頭部のインピーダンスは無限にならない事から，回路モデル内にはキャパシタと並列に電流が流れる経路が存在すると考えられる．また，人に定電圧を印加した瞬間に頭部には無限の電流が流れない事から，キャパシタには直列に接続されている抵抗があると考えられる．よって，キャパシタを中心に抵抗網を考えると，キャパシタの直近にある抵抗が直列であるか並列であるかの 2 通りが考えられる．これらの事から，先行研究で示されている現象を満たすモデルとして図 4.1.3A, B に示す様な 2 通りの CR 回路が挙げられる．

これらの回路モデルは図 4.1.3C に示されているキャパシタ 1 つに，抵抗器 3 つの CR 回路において，それぞれが，$R3$=0 のときと，$R1$=0 のときとして表される．よって，本研究ではこの図 4.1.3C に示す回路を往復電流刺激の加速度感覚と身体動揺の増強，増大効果を表すモデルとして利用する．また，キャパシタ一つを含む回路の挙動を示すモデルの構成として，この回路にさらに抵抗器を追加した回路が考えられる．しかしながら，この回路に対してどのように抵抗器を追加しても，この回路の形で等価回路を構成する事が可能であると考えられる．この理由は付録 B に詳しく記載する．

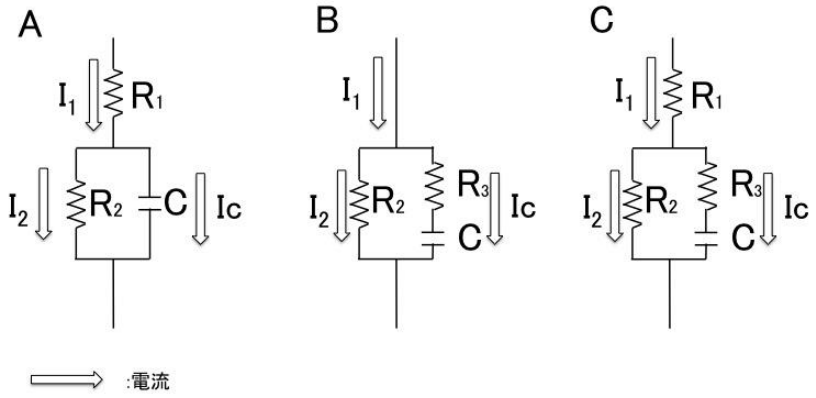


図 4.1.3：提案している回路モデル[60]

頭部に定電流を長時間印加すると誘発される加速度感覚は減少し，その電流印加を終了した直後は逆方向に加速度を感じる[37]. これらの事は定電流印加時には前庭への刺激量は徐々に減少し，電流印加終了後には外から電流を印加せずとも，前庭は逆方向に刺激されている事を示唆している．よって，回路モデル内において，前庭はキャパシタの充放電の効果を受ける位置にあると考えられる．

このモデルにおいて，定電流を印加し続けたときに減少し，キャパシタの放電によって増加するのは, キャパシタを流れる電流 Ic である. これらの事から, GVS の刺激電流印加時には Ic が加速度感覚を惹起し, 身体動揺を誘発していると考えられる．また，この回路に直流電流と交流電流を印加したときに，同じ電流値でも Ic は交流電流の方が高い電流値となる．このため，永谷ら(2005)の研究結果である，交流電流の方が直流電流よりも小さい電流値で眼振を引き起こすという知見と矛盾しない. また, この回路に直流電流を印加し続けるとキャパシタを流れる電流 Ic の量は減衰する．この事は George ら(2010)の直流 GVS を印加し続けると知覚される前庭感覚の強度が減衰していくという報告とも矛盾しない.

よって，本章ではこの電気回路モデルが電流経路の電気的特性と前庭電気刺激の知覚特性を示すモデルとして妥当であるかどうかを検証した実験について述べる.

本研究で提案している回路の交流インピーダンス Z は, 周波数 ω, 虚数を i とすると，次の式 4.3.1 で表される.

$$\mathrm{Z} = R_1 + \frac{R_2R_3\omega^2C^2 + 1 + (R_2R_3C\omega - C\omega R_2R_3)i}{\omega^2C^2(R_2+R_3)^2 + 1} \qquad (4.3.1)$$

この式 4.1.3 を計測結果に対してフィッティングすることによって, 頭部の電気的な特性が本研究で提案している CR 回路として近似可能かどうかを検証した.

式 4.3.1 を図 4.1.2 にフィッティングした結果が図 4.1.4 の線であり, 表 4.1.1 はフィッティング結果から導出された各素子の値を示している.

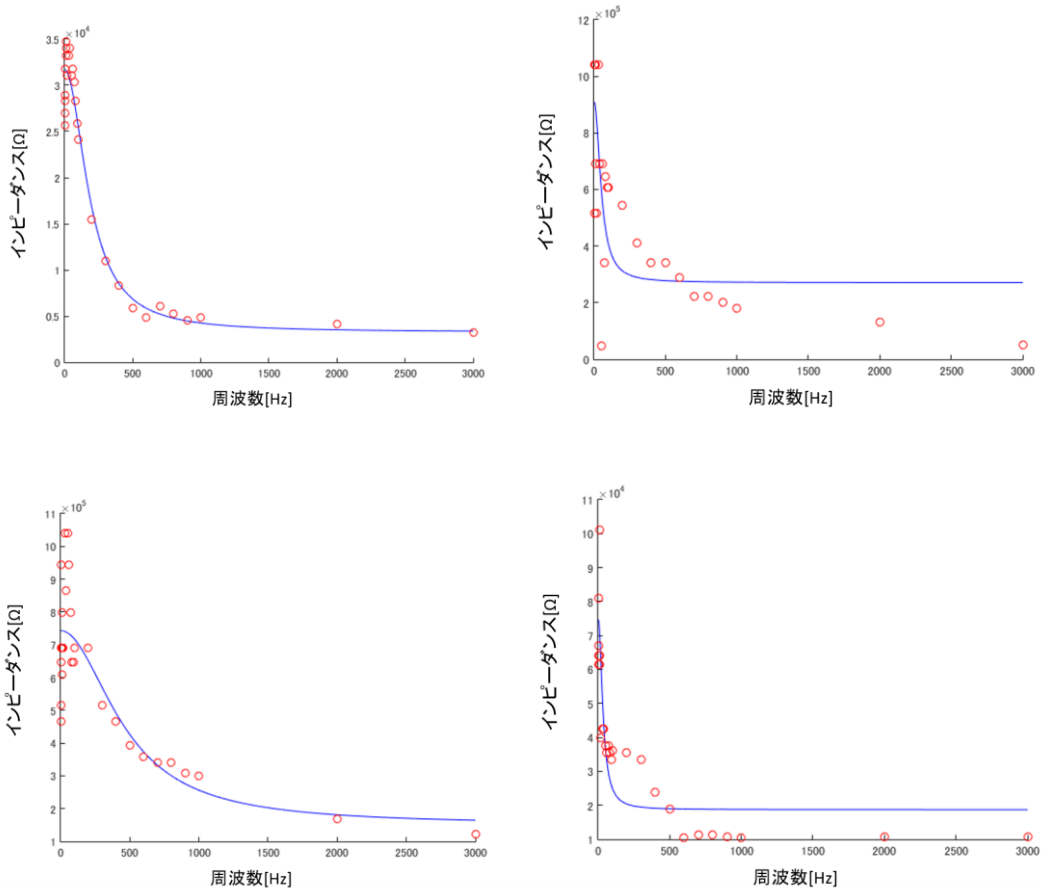


図 4.1.4：交流インピーダンス計測実験結果

図 4.1.4：交流インピーダンス計測実験結果に対する式 4.3.1 のフィッティング結果(左上：Sub1, 右上：Sub2, 左下：Sub3, 右下：Sub4)

表 4.1.1：推定された素子値

	R1[Ω]	R2[Ω]	R3[Ω]	C[F]
Sub1	3261	28441	72	0.00007
Sub2	28714.	55986	1522	0.000019
Sub3	280825	638813	13505	0.000001
Sub4	160600	592290	2071	0.0000010

図 4.1.4 のフィッティング結果が非常によく当てはまっている事から，図 4.1.3 C の回路モデルは頭部の電気的特性を的確に捉えたモデルであるといえる．また，本実験で計算された，回路の特性を示す時定数を被験者ごとに表 4.1.2 に示す. この表から, 各被験者の頭部の交流インピーダンス計測実験から推定される時定数の平均を計算すると 1489ms であった. また, この時の標準偏差は 407ms であった.

表 4.1.2：推定時定数

	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4
時定数 [ms]	1995	1072	922	1970

さらに, 推定された各素子の値は生体内に存在し得る大きさであった. このことから，本研究で提案している CR 回路は頭部等価回路として妥当であるといえる.

これらの実験結果から，図 4.1.3 C に示されている回路は頭部等価回路モデルとして妥当であり頭部はキャパシタの様な電荷の充放電を引き起こす素子を含む電気回路として近似可能である事が示された.

4.2. 往復電流刺激の機序と着想

前節の実験から，頭部は CR 回路モデルとして近似可能な電気的特性を持っている事が示された．本研究では CR 回路モデルにおけるキャパシタを流れる電流 Ic が加速度を惹起する有効電流であると考えている．この仮説が正しければ，CR 回路におけるキャパシタの充放電を利用し，キャパシタを流れる電流 Ic の電流量を増加させる刺激パターンを設計する事で，惹起される加速度感覚を増強する事が可能となると考えられる.

そこで，キャパシタの充放電をコントロールする刺激手法として往復電流刺激(CCS: Counter Current Stimulation)を開発した．往復電流刺激は図 4.2.1 に示すように，実際に加速度感覚を発生させたい極性とは逆極性の刺激電流をあらかじめ印加しておくという刺激手法である．この逆極性の刺激電流を逆電流と呼び，実際加速度を感じさせたい方向の刺激電流を順電流と呼ぶ.

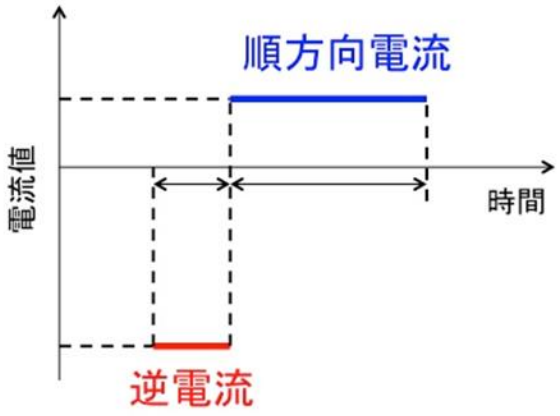


図 4.2.1：往復電流刺激[60]

本研究で提案している CR 回路モデルに往復電流刺激を印加したときのことを考える．往復電流刺激における逆電流を印加時にはキャパシタは電荷を蓄える(充電)．その後，順電流が印加された時には順方向の電流と共に，キャパシタに蓄えられた電荷が放出される(放電)．この放電によってキャパシタを流れる電流 Ic は増加する．つまり，往復電流刺激においては逆電流によるキャパシタの充電によって順電流の有効電流の増加を狙った刺激である．

本研究においてはキャパシタを流れる電流 Ic が加速度感覚を惹起していると考えている．この仮説が正しければ，Ic の電流挙動をシミュレートする事で，提示される加速度感覚の挙動を任意に操作し，安全な電流値で強力な加速度感覚を惹起する事が可能であるほかに，より精緻に提示加速度感覚のパターンを設計する事が可能となると考えられる．

そこで，本章では往復電流刺激の及ぼす身体動揺増強効果と加速度感覚の増強効果を調査し，前庭電気刺激によって惹起される感覚量予測モデルとしての CR 回路モデルの妥当性を評価する．

4.3. 往復電流刺激による前庭感覚強度の増強と CR 回路モデルの妥当性

本節では往復電流刺激が誘発する身体動揺量を計測するする実験を通して得られた，CR 回路モデル内の Ic と身体動揺の増大効果の関係に対する知見について述べる．

本研究では CR 回路モデル内の Ic が加速度感覚を惹起していると考えている．

この仮説を検証するために，CR 回路モデルへの往復電流刺激印加時の定電流印加時に対する *Ic* の増加率と被験者への往復電流刺激印加時の定電流印加時に対する身体動揺量の増大率の関係を調査した．

まず，CR 回路モデルへの往復電流刺激印加時の定電流刺激印加時に対する *Ic* の増加率の計算を行う．このために，電流印加時の *Ic* の挙動を考える．定電流印加時の *Ic* を $Ic_{(constant)}$とすると，この挙動は，定電流(I_1)印加開始からの時間を *t* としたとき，次の式(4.3.1)で表される．

$$Ic_{(constant)} = -k_1 k_2 e^{k_2 t}$$

$$k_1 = CR_2 I_1 \ , k_2 = -\frac{1}{C(R_2 + R_3)} \qquad (4.3.1)$$

この式(4.3.1)が示すように，*t* の係数である k_2 は負の値であるため，*Ic* は定電流印加開始から徐々に減衰する．

次に，提案している回路モデルにおけるキャパシタの充電量を考える．定電流(I_1)印加開始からの時間を *t* とすると，キャパシタの充電量 *Q* は次の式(4.3.2)で表される．

$$Q = CV = k_1\{1 - e^{k_2 t}\} \qquad (4.3.2)$$

この式(4.3.2)が示すように，キャパシタの充電量 *Q* は印加電流 I_1 と電流時間 *t* によって決定される．

続いて，キャパシタの放電時における *Ic* の挙動を考える．提案している回路モデルに対して，逆電流値 $I_{(opposite)}$，電流持続時間 $t_{(opposite)}$の電流印加によって溜まる電荷量 *Q* は，式(4.3.2)で与えられる．

$$Q = CV = CR_2 I_{(opposite)}\{1 - e^{k_2 t_{(opposite)}}\} \qquad (4.3.3)$$

さらに，放電時にキャパシタを流れる電流 $Ic_{(discharge)}$は放電開始からの時間を *t* とすると，式(4.3.4)で与えられる．

$$Ic_{(discharge)} = \frac{Q}{C(R_2 + R_3)} e^{k_2 t}$$

$$= -k_2 C R_2 I_{(opposite)}\{1 - e^{k_2 t_{(opposite)}}\}e^{k_2 t}$$

$$= -k_1 k_2 \frac{I_{(opposite)}}{I_1}\{1 - e^{k_2 t_{(opposite)}}\}e^{k_2 t} \qquad (4.3.4)$$

これらの事から，往復電流刺激時の Ic の挙動を考える．往復電流刺激においては，二つの異なる極性を持った定電流が印加される．この往復電流刺激の逆電流部の電流値を $I_{(opposite)}$,電流持続時間を $t_{(opposite)}$とし，順方向電流を I_1, 順方向電流印加からの時間を t とすると，Ic の挙動はキャパシタの放電と順方向電流の重ね合わせになるため，次の式(4.3.5)で与えられる．

$$Ic_{(counter)} = Ic_{(constant)} + Ic_{(discharge)}$$

$$= -k_1 k_2 e^{k_2 t} - \frac{I_{(opposite)}}{I_1} k_1 k_2 \{1 - e^{k_2 t_{(opposite)}}\}e^{k_2 t}$$

$$= -k_1 k_2 e^{k_2 t}\{\frac{I_{(opposite)}}{I_1}\{1 - e^{k_2 t_{(opposite)}}\} + 1\} \qquad (4.3.5)$$

よって，定電流印加時の Ic に対する往復電流刺激印加時の Ic の増加の割合(増加率:R)は次の式(4.3.6)で与えられる．

$$R = \frac{Ic_{(counter)}}{Ic_{(constant)}} = \frac{Ic_{(constant)} + Ic_{(discharge)}}{Ic_{(constant)}}$$

$$= \frac{I_{(opposite)}}{I_1}\{1 - e^{k_2 t_{(opposite)}}\} + 1$$

$$= r_1\{1 - e^{r_2 t_{(opposite)}}\} + 1$$

$$r_1 = \frac{I_{(opposite)}}{I_1},\ \ r_2 = k_2 = -\frac{1}{C(R_2 + R_3)} \qquad (4.3.6)$$

これらの式から，提示される加速度感覚を増強するためにはキャパシタの充放電を利用する事が効果的であると考えられる．このキャパシタの充電量は回路に流れる電流の電流値とその印加時間によって決まる．そこで，このキャパシタの充放電を利用した刺激として往復電流刺激を提案する．往復電流刺激は定電流で加速度感覚を提示したい方向とは逆方向に電流を印加しておき，その後

実際に加速度感覚を提示したい方向に電流を印加する刺激である．この逆電流の印加時間と電流値によってキャパシタの充電量を制御できる．

本章の提案しているモデルが妥当であり，キャパシタの充放電による Ic の増加が往復電流刺激の身体動揺の増大効果を引き起こすかどうかを検証するために，逆電流印加時間と逆電流値を変化させたときの往復電流刺激が誘発する身体動揺を計測する実験を行った．

4.3.1. 実験方法

被検者は内耳に病歴のない健常な成人男性 5 名であった．全ての被験者から十分にインフォームドコンセントを得て実験に参加してもらった．

被験者の乳様突起上にゲル電極(クリアローデ，フクダ電子社製)をイヤマフによって固定した．実験は静かな実験室で行われた．被験者には水平な床の上に裸足でロンベルグ立位姿勢をとってもらい，まっすぐ前を見た後目を閉じてもらった．その後，実験者の合図で実験が開始された．

電流刺激は逆電流部を逆電流値 0.3, 1.0, 2.0, 3.0mA，逆電流印加時間 0, 250, 500, 750, 1000, 2000, 3000ms の方形波電流,順電流部を電流値, 1.0mA，電流印加時間 2000ms の方形波で構成される往復電流刺激とした(図 4.3.1-A)．0ms 条件以外の逆電流印加時間条件と逆電流値条件の組み合せと 0ms 条件に対して極性を変えて 2 試行ずつの合計 100 試行行った．刺激はランダムな順序で提示された．

0ms 条件において逆電流は印加されないため，0ms 条件は定電流刺激と等価である．また，0.3mA の電流値は被験者が加速度感覚も触覚的な刺激も感じない不感電流値である[58]．このため，これらの条件においては，被験者は刺激を 1 つしか感じない．そこで，被験者は 0ms 条件と 0.3mA 条件を除いた条件において，極性の異なる刺激が連続で印加される事と 1 つ目の刺激中には体を傾けないように姿勢を維持し，2 つ目の刺激では体を楽にするように教示された．また，0ms 条件においては 1 つだけ刺激が印加される事と体を楽にする様に教示された．

各試行における身体動揺として頭部の Roll 角の変化量を頭頂部にイヤマフで固定した 3 次元位置センサー(Liberty, Polhemus 社製)によって計測した(図 4.3.1-B)．

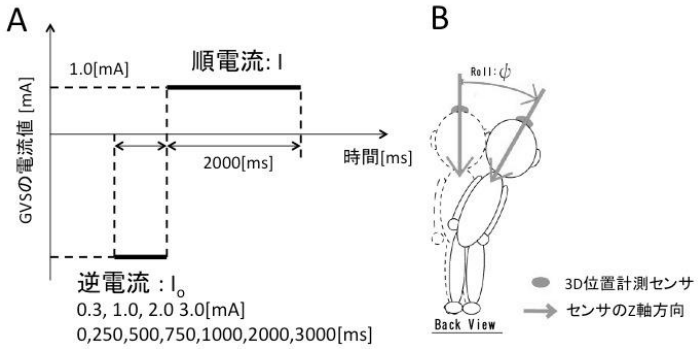


図 4.3.1：実験条件と計測システム[60]

頭部の傾き角度は三次元位置計測センサーを使ってサンプリングレート 200Hz で計測刺激開始 1000ms 前から,刺激開始後 6000ms まで計測された．計測したデータはアーチファクト除去のための 5Hz LPF をかけ，刺激印加前の 1000ms 間のデータの平均値で差し引かれた．これによって，頭部の初期角度からの変化量を計算した．刺激開始時間を合わせて条件ごとに加算平均された．また，被験者ごとに逆電流印加時間 0ms 条件の絶対ピーク値の平均値で各条件の全データを割る事で定電流によって誘発された身体動揺量対する往復電流刺激によって誘発された身体動揺量の増大の割合(増大率:R)を計算した．さらに，刺激開始時間を合わせて加算平均した．

4.3.2. 実験結果

図 4.3.2～図 4.3.5 は往復電流刺激を印加したときの被験者の身体動揺増大の割合の時間変化を逆電流値条件ごとに示している．これらの図において，左方向への身体動揺が正，右方向の身体動揺が負であり，各図の上のグラフ（A）は順電流印加時に左側の乳様突起が陽極，下のグラフ(B)は順電流印加時に右の乳様突起が陽極である条件を示している．これらのグラフにおいて逆電流印加時間 0ms～750ms の条件は細線で順に濃い黒で示されており，1000～3000ms の条件は太線で順に濃い黒色で示されている．また，これらのグラフにおける 0s は，逆電流印加開始時刻である．このため，逆電流印加時間の条件によって，順電流印加開始時刻が異なる．定電流条件のピーク値の平均値で全てのデータを割っているため，これらのグラフにおける時間波形は実際の身体動揺と等しい．

1

これらのグラフから，順電流によって陽極方向に身体動揺が誘発されている事が分かる．

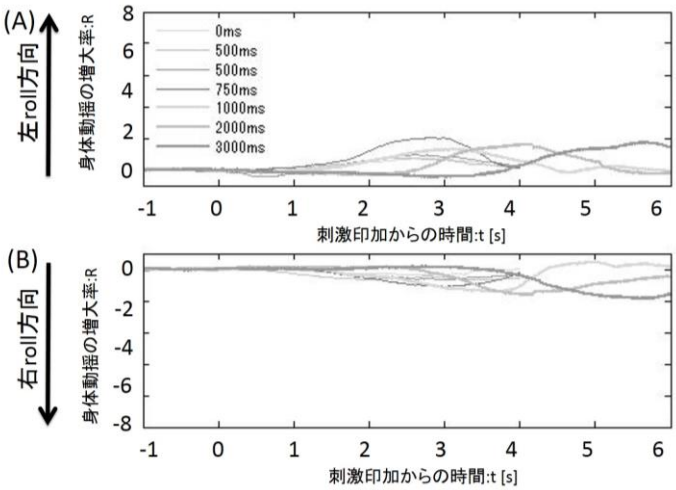


図 4.3.2：逆電流 0.3mA 条件における Roll 方向頭部角度の増大割合(増大率:R)の平均値の時間変化[60]

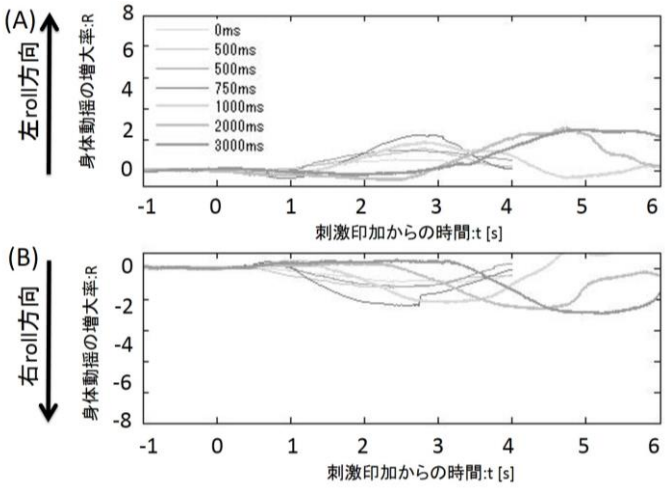


図 4.3.3：逆電流 1.0mA 条件における Roll 方向頭部角度の増大割合(増大率:R)の平均値の時間変化[60]

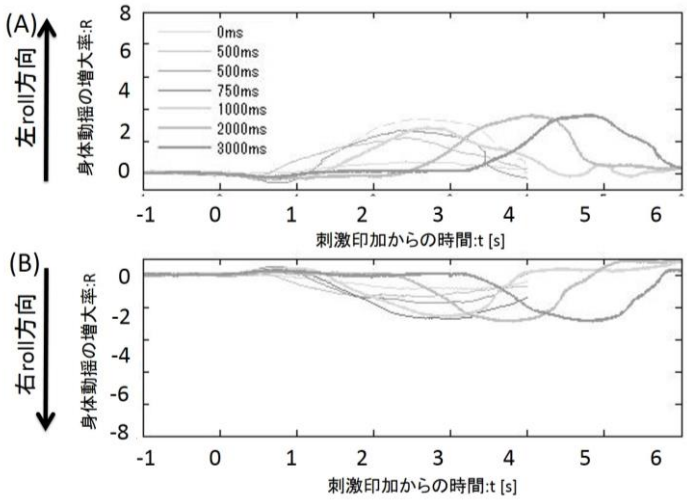


図 4.3.4：逆電流 2.0mA 条件における Roll 方向頭部角度の増大割合(増大率:R)の平均値の時間変化[60]

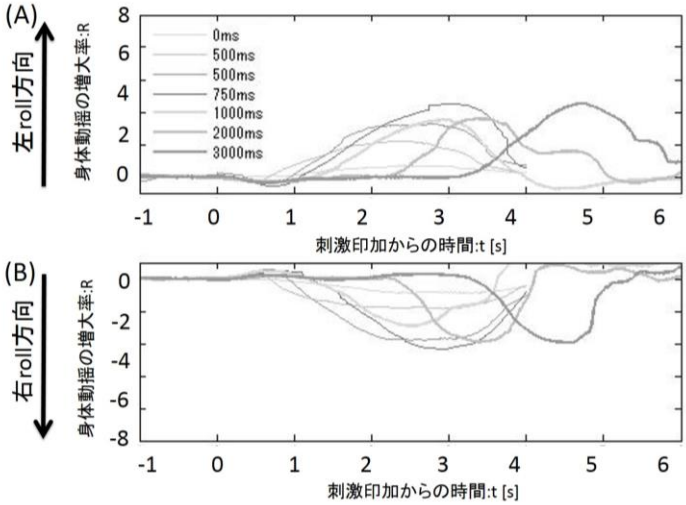


図 4.3.5：逆電流 3.0mA 条件における Roll 方向頭部角度の増大割合(増大率:R)の平均値の時間変化[60]

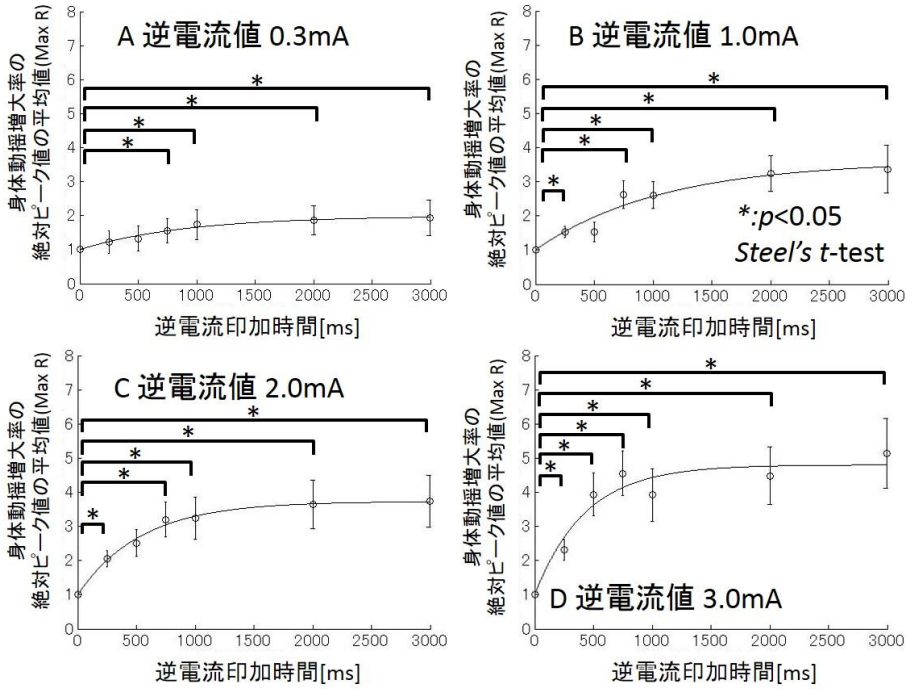


図 4.3.6：各条件における Roll 方向頭部角度変化の増大の割合(増大率：R)の絶対ピーク値の平均値(Max R)とキャパシタを流れる電流 *Ic* の増加率の当てはめ結果から得られた推定値を用いたシミュレーション[60]

図 4.3.6 中の円プロット(o)は逆電流印加時時間に対する誘発された身体動揺の絶対ピーク値の平均値を逆電流値条件ごとに示しており，error bar は標準誤差を示している．これらの図の中の*は 0ms 条件との間の有意差を示している(Steel の多重比較，$p<0.05$)．これらの図から，誘発される頭部の傾き角度は全ての逆電流値条件において逆電流印加時間と相関がある事が分かる．

逆電流印加時間に対する誘発された身体動揺の増大率の絶対ピーク値の平均値は，往復電流刺激の逆電流印加時間が長くなるほど大きくなっている．しかし，逆電流印加時間が長くなるほど身体動揺の増大率の増加量(傾き)は小さくなっている．よって，これらは線形的な関係ではない事が分かる．

本研究の仮説に則ると，この身体動揺の増大は提案回路モデルの *Ic* の増加によって引き起こされる．よって，誘発された頭部傾き角度の絶対ピーク値の平均値に提案している回路モデルの *Ic* の増加率の式(式 4.3.6)を最小二乗法によって近似した(nlinfit, matlab2014a)．その結果推定された係数と各データに対する

決定係数を表 4.3.1 に示し，その推定された係数を式 4.3.6 に代入したときの計算結果を図 4.3.6 のそれぞれのグラフに曲線として示す.

表 4.3.1：推定された係数と決定係数

$I_{(opposite)}$	0.3mA	1.0mA	2.0mA	3.0mA
r_1	0.99	2.6	2.73	3.8
r_2	−1.09	−0.92	−1.83	−2.32
決定係数	0.93	0.88	0.99	0.90

近似の結果，全ての条件において決定係数が 0.8 を以上と非常に当てはまりが良い事が分かる．よって，この近似の妥当性が支持された.

4.3.3. 実験考察

本実験の結果から，往復電流刺激は誘発される身体動揺を増大させる事が示された. さらに, その増大効果は逆電流印加時間と逆電流値の両方と相関がある事が示された.

また，往復電流刺激は 1.0mA の GVS の刺激電流を利用した時に最大で 5 倍程度の身体動揺を誘発できる事が示された.

図 4.3.6 と表 4.3.1 から，逆電流印加時間と誘発された頭部傾き角度の増大率の関係は線形ではなく，式 4.3.6 の曲線当てはめの決定係数が全て 0.8 以上と高い値を示した．この事から，本章で提案している CR 回路モデルは GVS によって誘発される身体動揺の大きさを予測するモデルとして妥当であることが示された．この結果は，提案している回路モデル内の Ic の増加が身体動揺の増大を引き起こしていることを支持するものである.

この CR 回路モデルにおいて，キャパシタの充電量が最大値の約 63%になるまでの時間である，回路時定数 τ は次の式で求められる.

$$\tau = \frac{-1}{r_2}\ [s] \tag{4.3.7}$$

この式と推定された係数 $r2$ を用いて時定数を計算した結果が表 2 である.

表 4.3.2：推定された時定数

	0.3mA	1.0mA	2.0mA	3.0mA
時定数[ms]	920	1080	544	430

時定数の平均値を計算すると 743ms であった．この事から，平均で約 750ms 以下の逆方向電流はその電流印加時間によって誘発される身体動揺の量が大きく変化し，それ以上の逆電流印加では逆電流印加時間による身体動揺の変化は小さいと考えられる．よって，往復電流刺激においては，750ms 程度の持続時間を持った逆電流が短時間で最も効果的に身体動揺を提示する事のできる刺激手法の一つであると考えられる．

本実験の結果において，モデルのデータへの当てはまりを示す決定係数が非常に高い値を示した事から，本章で提案している CR 回路モデルは往復電流刺激の身体動揺増大効果を予測するモデルとして，妥当であるといえる．この事は，モデルを利用することで，往復電流刺激によって誘発される身体動揺の大きさを予測する事が可能である事を示している．

また，これらの時定数は逆電流値が大きくなると，短くなっている．この理由として考え得られるのは，逆電流値が大きくななると，惹起される加速度感覚の増強効果の時定数が実際に小さくなることである．一方で，今回計測の対象としている身体動揺の起こりやすさの身体動揺量に対する非線形性も理由として考えられる．立位姿勢においては身体動揺が十分に小さく，重心が立位時の支持基底面から外れない場合には身体動揺は誘発されやすく，支持基底面の外に出そうな状況下には身体動揺は誘発されにくいと考えられる．これらは，本実験で行った実験では明らかにする事ができない．

逆電流値 0.3mA 条件と 0ms 条件以外の条件において逆電流印加時に被験者は体を傾けず，立位姿勢を維持する様に教示された状態で実験を行った．逆電流印加時に立位姿勢を維持するときには，被験者は身体動揺が起こる方向と反対方向に向かって足に力を入れると考えられる．この方向は順方向によって身体動揺が誘発される方向である．逆電流印加による身体動揺の増大がこのあらかじめ被験者が力を入れている事による物である可能性が考えられる．しかし，0.3mA 条件において被験者は逆電流印加時から体の力を抜くように教示されて

いるにもかかわらず，身体動揺の増大効果は見られている．また，図 4.3.6 と表 4.3.1 に示すように，全て条件において式 4.3.6 の当てはまりを示す決定係数が 0.8 以上と高かったことから，それらの条件における逆電流印加時間と身体動揺の増大効果の関係は 0.3mA 条件と他の条件は同様である．よって，逆電流印加中に立位姿勢を維持した事が順方向電流によって誘発される身体動揺の増大に及ぼす影響は小さいと考えられる．

本章では，頭部内の抵抗網内にあるキャパシタは一つであると仮定して回路モデルを提案し，そのキャパシタの直近にある抵抗が並列である場合と直列である場合の二通りの回路モデルを提案した．これらのモデルは，回路 C 内の R3 の値が 0 か R_1 が 0 かの違いである．本実験では各素子の値は不定であるため，どの回路がモデルとして妥当であるかは不明である．しかし，近似の当てはまりが非常に良かったことから，身体動揺の予測モデルとしては，回路 C は妥当であるといえる．また，この回路モデルに関する議論は付録 B にも記述してある．

本研究で提案しているモデルにおける，Ic の増加の割合を示す式 4.3.6 において，身体動揺のピーク値の増大率に対して最小二乗近似を行ったときに，$I_{(opposite)}$ も I_1 も既知の値であるが $r1$ を推定値として扱っている．これは，加速度感覚の強度と電流値の関係の非線形性[63]から，身体動揺量と電流値の関係も線形ではないと考えられるためである．

本実験では，回路モデルの Ic と誘発される身体動揺の大きさを比較する事で，Ic が及ぼす身体動揺への影響を調査し，Ic の挙動と誘発される身体動揺量の挙動の類似性を示した．しかしながら，GVS の惹起する主観的な加速度感覚の増強効果に対して本章で提案しているモデルが適応可能かどうかについては不明である．しかし，GVS の刺激電流は前庭感覚器を刺激する事で，加速度感覚を惹起する．身体動揺は，その惹起された加速度感覚に対する反射としての応答である．また，本研究で提案しているモデルの Ic の挙動は先行研究で示されている直流電流の長時間印加時の被験者の感じる加速度感覚の減衰や，ある程度の周波数を持った交流刺激が低周波の交流刺激よりも小さな電流で眼振を引き起こしやすいなどの現象を説明できる．この事から，Ic が惹起されている加速度感覚を示している可能性が高いと考えられる．この仮説が正しければ，この Ic の電流挙動をより詳細にシミュレーションする事で GVS によって惹起される主観的な加速度感覚の時間パターンを精緻に制御する事ができると考えられる．この時間パターンの精緻な制御が可能になれば，従来はできていなかった，加速

度知覚の質を任意に提示する事が可能となり，例えば,「ふわっ」とした加速度知覚や「ずしっ」とした加速度知覚などを提示ができるようになると考えられる. よって, 今後は人が感じている主観的な加速度感覚と本章で提案しているモデル内の *Ic* とのマッチングを行う必要がある. また, このマッチングによって, 逆電流が大きくなるほど，回路時定数が減少していく理由もあわせて明らかになると考えられる.

4.4. 主観応答計測による往復電流刺激の加速度感覚増強効果の検証

本節では往復電流刺激が惹起する加速度感覚の強度を計測する実験を通して得られた，CR 回路モデル内の *Ic* と主観的な加速度感覚の増強効果の関係に対する知見について述べる.

前節において，往復電流刺激の及ぼす身体動揺の増大効果はキャパシタを流れる電流 *Ic* の挙動と非常に近い事が示された．しかしながら，これは往復電流刺激が誘発する身体動揺の挙動であるため，この往復電流刺激が GVS の惹起する加速度感覚を増強するかどうかは未知である．そこで実験では CR 回路モデルへの往復電流刺激印加時の *Ic* の定電流印加時時の *Ic* に対する増加量と往復電流刺激印加時の定電流印加時に対する主観的な加速度感覚の増強効果の関係を調査した.

身体動揺のような計測が容易な指標とは異なり，被験者が主観的に感じている加速度感覚の強度は定量的な計測が難しい. そこで, 本実験では様々な組み合わせの二つの異なる条件の往復電流刺激を提示し，その二つの刺激の惹起する加速度感覚強度の強い方を強制選択で回答させる実験を行った．そのデータを Thurston の一対比較法を用いて，間隔尺度を計算した．間隔尺度とはデータの絶対値には意味がないが，データ間の差分には定量的な意味を持つ尺度基準である. このサーストンの一対比較法によって得られた尺度値に対して, キャパシタを流れる電流 Ic の挙動を近似する事で，本研究で提案している CR 回路モデルの検証を行う.

4.4.1. 実験方法

被験者は前庭に病歴のない健常な成人男性 5 名であった．全ての被験者から十分にインフォームドコンセントを得た上で実験に参加してもらった.

実験は静かな実験室内で行われた．被験者は両耳の後ろの乳様突起上に電極

(クリアローデ，日本工電社製)を設置され，モニタが前においてある椅子に座った．実験では，設置された電極から極性と逆電流値が等しく，逆電流印加時間が事なる CCS を一度ずつ印加した．この時，あらかじめ加速度が提示される方向(Left/Right)をモニタで示した．被験者は 2 つの刺激によって惹起された，モニタに表示されている方向への加速度感覚のうち，どちらがより強かったかを強制 2 択で回答した．この 2 つの刺激が提示され，どちらの惹起する加速度が強いかを回答するまでを 1trial とした．また，被験者がキーボードのキーを押す事で刺激印加が開始され，回答もキーボードによって行われた．

刺激電流の電流値は順電流 1.0mA，順電流印加時間 2000ms で，逆電流値が 0.3, 1.0, 2.0, 3.0mA の 4 条件，逆電流印加時間が 0, 250, 500, 750, 1000, 2000ms の 6 条件とした．実験は，逆電流値毎に session を分けて行われた．各 session では各逆電流印加時間の組み合せ(6 条件のから 2 条件選ぶ組み合せ 6C2)15 通りに対して極性(Left/Right の 2 通り)を持たせて，順番を入れ替えて提示する事で，60 trial(15x2x2)行った．これらを逆電流値の異なる 4 session でそれぞれ行う事で，合計 240 trial 行った．また，これらの電流印加時間の組み合せの条件はランダムな順序で被験者に提示された．

主観的な加速度感覚を定量的に評価するために，本実験では，Thurston の一対比較法を利用した．Thurston の一対比較方では，2 択強制選択法によって得られたデータを間隔尺度に変換する手法である．この Thurston の一対比較手法によって各 CCS の逆電流値，逆電流印加時間条件における主観的な加速度感覚の強度を定量的に評価する．ただし，Thurston の一対比較法においては，選択率が 1 あるいは 0 をとる条件含まれると，尺度値を計算出来ない．よって，これらの選択率を取った条件を解析から除外した．

4.4.2. 実験結果

表 3.4.1～3.4.4 における各マスはそのマス属する列と行の第一列と第一行に示してある逆電流印加時間を持った CCS の組み合せを提示したときに，被験者が逆電流印加時間の長い CCS を選択する確率を示している．この表から，1 つの trial で提示される 2 つの CCS の逆電流印加時間の差が大きいほど長い逆電流印加時間をもつ CCS が選択される確率が高いことがわかる．

また，逆電流値 2.0, 3.0mA 条件において，0ms 条件が trial に含まれる条件の選択率が 0 である条件が含まれている．よって，これらの逆電流値条件にお

ける 0ms 条件を解析から除外した.

表 4.4.1：逆電流値 0.3mA において長時間の逆電流条件が選択される割合

提示条件	0ms	250ms	500ms	750ms	1000ms
250ms	0.65				
500ms	0.7	0.75			
750ms	0.75	0.55	0.75		
1000ms	0.85	0.8	0.65	0.55	
2000ms	0.9	0.6	0.55	0.75	0.55

表 4.4.2：逆電流値 1.0mA において長時間の逆電流条件が選択される割合

提示条件	0ms	250ms	500ms	750ms	1000ms
250ms	0.75				
500ms	0.8	0.8			
750ms	0.8	0.8	0.8		
1000ms	0.85	0.9	0.9	0.55	
2000ms	0.9	0.9	0.7	0.65	0.7

表 4.4.3：逆電流値 2.0mA において長時間の逆電流条件が選択される割合

提示条件	0ms	250ms	500ms	750ms	1000ms
250ms	0.95				
500ms	0.85	0.8			
750ms	0.95	0.6	0.75		
1000ms	1	0.9	0.8	0.85	
2000ms	0.95	0.85	0.75	0.65	0.8

表 4.4.4：逆電流値 3.0mA において長時間の逆電流条件が選択される割合

提示条件	0ms	250ms	500ms	750ms	1000ms
250ms	1				
500ms	1	0.75			
750ms	1	0.95	0.8		
1000ms	1	0.9	0.8	0.8	
2000ms	1	0.9	0.85	0.9	0.6

図 4.4.1 における o プロットは，Thurston の一対比較法によって求めた各逆電流印加時間条件における間隔尺度値である．この図から，逆電流印加時間が長くなればなるほど加速度感覚の強度は大きくなるが，その関係は線形ではない事がわかる．

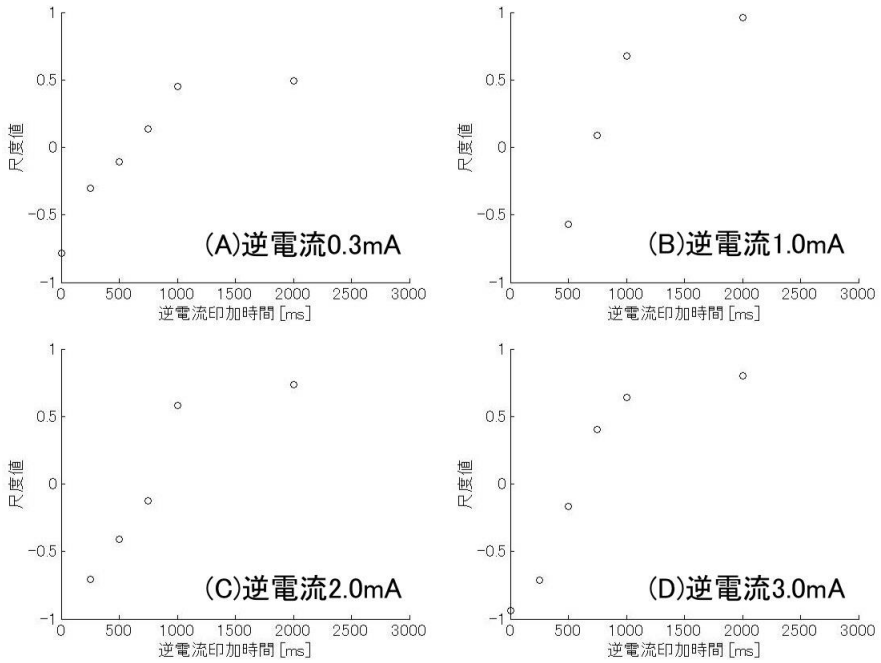


図 4.4.1: 各逆電流値条件における逆電流印加時間と Thurston の一対比較法によって得られた尺度値の関係[60]

4.4.3. 実験考察

本実験の結果から，逆電流印加時間と CCS の主観的な加速度間隔の増強効果の間には相関があるが，その関係は線形ではなく，身体動揺の増大効果と同様にある程度以上は大きくならない事が示された．

本実験の主たる目的は，提案している CR 回路内の *Ic* が CCS の主観的な加速度間隔の増強効果を示すモデルとして妥当であるかどうかを検証することである．この検証を行うために，図 4.1.3(C)に示されている CR 回路モデルにおける *Ic* の挙動を考える．CR 回路モデルに定電流(I_1)を印加した時，*Ic* の挙動 *Ic(constant)*は *t* を電流印加からの時間とすると，次の式(4.4.1)で表される．

$$Ic_{(constant)} = -k_1 k_2 e^{k_2 t}$$

$$k_1 = CR_2 I_1 \ \ , k_2 = -\frac{1}{C(R_2 + R_3)} \qquad (4.4.1)$$

この時，印加された定電流によってキャパシタに電荷が溜まる．この充電量 *Q* は定電流の電流値を *I(charge)*，電流の持続時間 *t(charge)*とすると，次の式(4.4.2)で表される．

$$Q = CV = CR_2 I_{(charge)}\{1 - e^{k_2 t_{(charge)}} \qquad (4.4.2)$$

キャパシタの充電量が Q であるときに，定電流の印加が終了すると，キャパシタの放電が起こる．このときの *Ic* の挙動 *Ic(discharge)*は放電開始からの時間を *t* とすると，次の式(4.4.3)で表される．

$$\begin{aligned} Ic_{(discharge)} &= \frac{Q}{C(R_2 + R_3)} e^{k_2 t} \\ &= -k_2 CR_2 I_{(charge)}\{1 - e^{k_2 t_{(charge)}}\} e^{k_2 t} \\ &= -k_1 k_2 \frac{I_{(charge)}}{I_1}\{1 - e^{k_2 t_{(charge)}}\} e^{k_2 t} \qquad (4.4.3) \end{aligned}$$

ここで，CR 回路に CCS を印加したときの事を考える．CCS の逆電流部は定電流であり，キャパシタに電荷を充電する．その後，逆電流とは異なる極性を持

った順方向電流(I_1)が定電流として印加される．この時，逆電流によって充電されたキャパシタの放電が起こる．よって，電流重ね合わせ之法則より，CCS の順方向電流印加時の *Ic* の挙動 *Ic(counter)*は順方向電流印加からの時間を *t* とすると，次の式(4.4.4)で表される．

$$Ic_{(counter)} = Ic_{(constant)} + Ic_{(discharge)}$$
$$= -k_1k_2e^{k_2t} - \frac{I_{(opposite)}}{I_1}k_1k_2\{1 - e^{k_2t_{(opposite)}}\}e^{k_2t}$$
$$= -k_1k_2e^{k_2t}\{\frac{I_{(opposite)}}{I_1}\{1 - e^{k_2t_{(opposite)}}\} + 1\} \quad (4.4.4)$$

Thurston の一対比較法によって得られるのは，間隔尺度である．このため，各データの絶対値には意味がなく，その差分に意味がある．そこで，本実験によって得られた尺度値を各条件における，最も逆電流印加時間が短い条件における尺度値で全ての条件における尺度値を差し引く事で，最も逆電流印加時間が短い条件における尺度値がゼロになるように補正した．これに合わせて，2 つの異なる逆電流印加時間における *Ic(counter-A)*と *Ic(counter-B)*の差分 *Sub Ic(counter)*を計算すると，次の式(4.4.5)のようになる．

$$Sub\ Ic_{(counter)} = Ic_{(counter-A)} - Ic_{(counter-B)}$$
$$= -k_1k_2e^{k_2t}\frac{I_{(opposite)}}{I_1}\{1 - e^{k_2t_{(opposite-A)}} - 1 - e^{k_2t_{(opposite-B)}}\}$$
$$= -k_1k_2e^{k_2t}\frac{I_{(opposite)}}{I_1}\{e^{k_2t_{(opposite-B)}} - e^{k_2t_{(opposite-A)}}\} \quad (4.4.5)$$

このとき，その最大値 Max Sub Ic(counter)は，t=0 の時であり，式(4.4.6)で表される．

$$Max\ Sub\ Ic_{(counter)} = -k_1k_2\frac{I_{(opposite)}}{I_1}\left\{e^{k_2t_{(opposite-B)}} - e^{k_2t_{(opposite-A)}}\right\} \quad (4.4.6)$$

よって，式(4.4.6)を補正した Thurston の一対比較による尺度値に，-

*k1k2(I(opposite)/I1)*と *k2* を推定係数として最小二乗法で近似した.

図 4.4.2 に補正をかけた尺度値を o プロットで，推定した変数と式(7)を利用したシミュレーション結果を実践で示し，表 4.4.5 に推定された変数と決定係数，推定された回路時定数を示す.

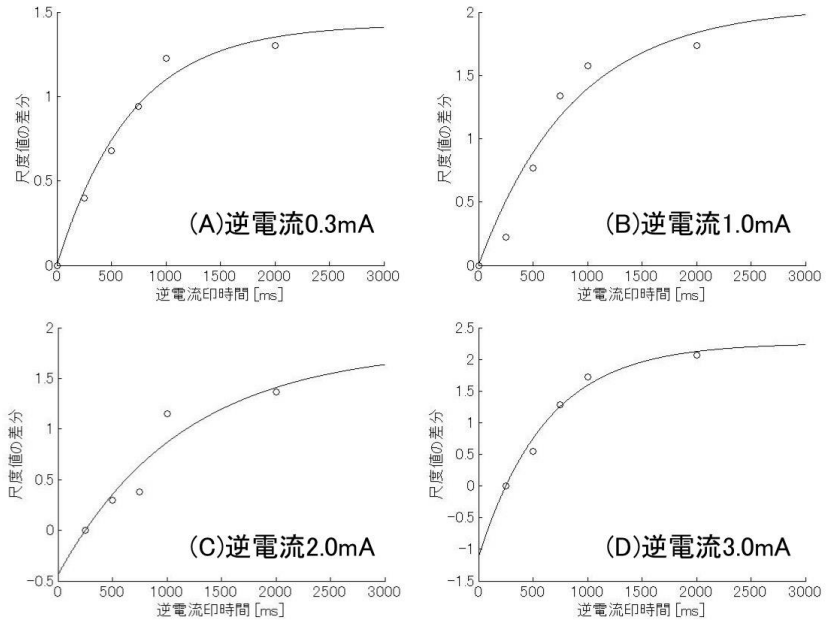


図 4.4.2：推定された係数を用いた Ic のピーク値の補正された尺度値への近似[60]

表 4.4.5：推定された係数と決定係数，回路時定数

	0.3mA (A)	1.0mA (B)	2.0mA (C)	3.0mA (D)
$-k_1k_2(I_{(opposite)}/I_1)$	1.37	2.04	2.30	3.61
k_2	−1.60	−1.14	−1.15	−1.68
決定係数	0.96	0.81	0.83	0.92
時定数[ms]	620	870	870	590

これらの図と表から，決定係数が全ての条件で 0.8 以上と，近似は非常に良く当てはまっている．この事から，CR 回路は CCS の主観的な加速度感覚の増強

効果を示すモデルとして，妥当であると考えられる．

また，この近似の結果から得られた回路時定数が約 750ms であった．この事から，逆電流は 750ms 以上印加してもその増大効果はあまり大きくならない事が示された．この事から，CCS の増強効果は時定数 750ms の CR 回路モデルとして近似し，CCS の及ぼす加速度感覚と物理加速度の等価点を 2 点計測する事で，制御可能であると考えられる．

4.5. CR 回路モデルの妥当性と知覚の時間特性からの刺激設計

本章では，前庭電気刺激は安全が担保されている電流値の範囲内では，惹起される前庭感覚が微弱であり，前庭感覚ディスプレイとしては不十分であるという問題の解決に挑んだ．この問題を解決するために，電流経路の時間的な特性に着目し，その特性を CR 回路モデルとして近似する事で安全な電流値でも強力な前庭感覚を惹起可能な刺激手法を検討した．

本章で達成したことをまとめると，以下のようになる．

- 頭部の交流インピーダンス特性を計測し，頭部がキャパシタを含む CR 回路として近似可能である事を実証した
- CR 回路モデル内のキャパシタの充放電に着目し，惹起される前庭感覚を増強できる刺激として往復電流刺激を開発した
- 往復電流刺激の身体動揺の増大効果を示すモデルとして CR 回路が妥当であることを示した
- 往復電流刺激の加速度感覚の増強効果を示すモデルとして CR 回路が妥当であることを示した

これらの事から，頭部の電気的な特性から推定された CR 回路モデルは往復電流刺激の誘発する身体動揺増大効果と惹起する加速度感覚の増強効果を示すモデルとして妥当であることが示された．また，CR 回路モデル内のキャパシタを流れる電流 Ic が前庭電気刺激によって惹起される感覚の挙動と非常に近い挙動をしていることが示唆された．

また，本章で行った時間的な解析により得られた知見から，往復電流刺激によって最大でどの程度の前庭感覚の強度までが提示可能かどうかを検証する予備実験を行った．3 名の被験者(いずれも 4 章の実験に参加した被験者)に対して逆

電流値 3.0mA, 逆電流印加時間 2000ms，順電流値 3.0mA, 順電流印加時間 3000ms の往復電流刺激利用した LDS(左右方向刺激)を印加した. この時の被験者の Roll 方向の頭部の傾き角度を計測し，そのピーク値から被験者が惹起された加速度感覚の強度を概算した．その結果を表 4.5.1 に示す．この表から，往復電流刺激は重力の約 35%程度の加速度感覚まで惹起できている事が示された.

表 4.5.1:往復電流刺激が惹起する加速度感覚の最大値

実験結果	傾き角度の平均値	標準偏差	加速度感覚の強度 $9.8 \times \tan \frac{19.33}{180} \pi$
	19.3[deg]	11.1	3.4[m/s^2]

この前庭感覚の強度は身体動揺量から計算したものである．本研究や先行研究で示されているように，定電流を印加した場合加速度感覚は時間とともに減衰していく. つまり, 身体動揺のピーク値が誘発されるまでにもある程度時間がかかるため，誘発された身体動揺量から計算された加速度感覚の強度は被験者が感じた加速度感覚の強度の最大値よりも小さいと考えられる. さらに, 本研究において行われた身体動揺量を計測する実験では全ての被験者にロンベルグ立位姿勢を取らせている．この姿勢は重心の支持基底面積が最少となる姿勢であるため，被験者はある程度以上傾くと転倒を恐れて重心が支持基底面外に出ないように, 身体動揺の誘発を抑える方向に力を入れると考えられる．よって，本研究の実験では往復電流刺激によって惹起される加速度感覚の最大値は重力の 35%程度であると推定されたが，実際にはより大きな加速度感覚が惹起されていると考えられる.

この重力の 35%の強度の加速度感覚は重力と比較すると微弱ではあるが，車やバイクなどの乗り物に乗っているときに人がさらされる加速度とは同程度である. よって, 従来の前庭感覚提示手法に比べてゲームやシミュレーター等に応用した際に，強度が不十分であるという問題は本研究の成果によって一部解決されたと考えられる.

本研究では頭部の構造によってもたらされる電気的な特性としてのキャパシ

タが前庭電気刺激によって惹起される前庭感覚の過渡応答特性や周波数応答特性を示すと考えてきた．また，本研究の実験によって頭部の電気的な特性の計測実験と往復電流刺激が及ぼす誘発される身体動揺の増大効果を計測する実験，同刺激が及ぼす加速度感覚の増強効果を計測する実験のすべての結果が CR 回路として近似可能である事が示された．しかしながら，実験によって推定された CR 回路の時定数の平均値を見てみると，頭部の電気的な特性を計測する実験で得られた時定数は他の二つの実験によって得られた時定数よりも大きかった．ここで，これらの時定数から頭部の電気的な特性が前庭電気刺激の過渡応答特性や周波数応答特性を生み出しているかどうかを議論する．表 4.5.2 は，各実験で推定された時定数の平均値と各計測実験において被験者ごとに時定数を推定した時の時定数の標準偏差と条件ごとに時定数を推定した時の標準偏差を示している．

表 4.5.2：各実験において非線形近似で推定された時定数

	交流インピーダンス計測実験	身体動揺量の増大効果	主観的な加速度感覚の増強効果
推定された時定数[ms]	1489	743	831
条件間標準偏差[ms]		265	132
被験者間標準偏差[ms]	407	16184079	

この表の主観的な加速度感覚を計測する実験においては，本実験の結果から被験者ごとに時定数を推定することが困難であったため，被験者間の標準偏差を計測する事は出来なかった．これは，この実験において Thurston の一対比較法を用いて主観的な応答を数値化しているためである．この手法においては，異なる逆電流印加時間の刺激を 2 種類提示し，どちらがより強い前庭感覚を感じたのかを強制選択によって回答させ，その選択確率を用いて数値化する．この実験においては一つの条件の組み合わせに対して 4 度の提示を行うが，これでは選択率が 25%ごとに記録されるため，分解能の良い計測とは言えない．また，

Thursuton の一対比較法を用いた場合，選択率が 100%あるいは 0%となると数値化できない．このため，これらの条件をデータから除外する処理を行うと，1 点あるいは 2 点と非常に少ないデータに対して近似を行うこととなるため，正確な時定数を推定する事は困難であると考えられる．よって，この実験においては被験者ごとに時定数を計算する事は出来ない．また，頭部の交流インピーダンス計測実験において条件間の標準偏差が示されていないのは，この計測は 1 つの条件での計測のみ行っているためである．

この表から，頭部の交流インピーダンス計測実験においては時定数の平均値は他の 2 つの計測によって得られた時定数よりも大きい値を示しているが，身体動揺の増大効果から得られた被験者間の標準偏差が非常に大きいため，これらの計測によって得られた時定数が有意な差を持っているとは言えない．

よって，本研究ではこの往復電流刺激による前庭感覚の増強効果が頭部の電気的な特性によるものであるかどうかを明らかにできない．

一方で，本研究で行った身体動揺の増大効果を計測する実験において，被験者ごとに時定数を推定した時の分散が非常に大きかった．この時の各条件において被験者ごとに推定された時定数を表 4.5.3 に示す．

表 4.5.3：身体動揺増大効果の計測実験で非線形回帰により被験者ごとに推定された時定数

時定数[ms]	0.3mA	1.0mA	2.0mA	3.0mA
Sub1	-1.6×10^{8}	881	355	187
Sub2	594	605	1.0×10^{6}	1.0×10^{6}
Sub3	4	3821	965	1071
Sub4	1.2×10^{5}	0.2	1.0×10^{-7}	82
Sub5	803	454	1.6×10^{6}	7.7×10^{5}
平均	-3.2×10^{7}	1152	5.1×10^{5}	3.6×10^{5}
標準偏差	5.9×10^{7}	1246	6.0×10^{5}	4.0×10^{5}

この表から，条件によっては負の時定数や非常に大きな値をとっている被験者も存在する事がわかる．これらの条件におけるデータを見てみると，特に往復電流刺激の逆電流印加時間が短い条件において，定電流刺激と等価である逆電流印加時間 0ms の条件における身体動揺よりも小さい身体動揺が誘発されてい

る条件が存在していた．本研究で提案している CR 回路モデルでは切片が 1 で固定されており，往復電流刺激における逆電流印加時間に対して単純増加するものである．よって，0ms 条件よりも低いデータが存在すると推定されるパラメータは大きく変化するために，推定されたパラメータから計算される時定数も大きく変化したと考えられる．

本研究においては，近似手法として非線形回帰を用いた．一方で縦軸の対数をとり，これに対して線形回帰を行うことで CR 回路の時定数を推定する手法によって近似を行い，その推定値から時定数を計算する事も可能である．よって，本研究で行たった身体動揺の増大効果を計測する実験結果を利用して，各被験者に対して線形近似によるパラメータの推定を行った結果を表 4.5.4 に示す．また，この時に推定された時定数が負の場合は，推定がうまくいっていないとみなし，平均値と標準偏差の計算からは除外した(表 4.5.4 斜線).

表 4.5.4：身体動揺増大効果の計測実験で線形回帰により被験者ごとに推定された時定数

時定数[ms]	0.3mA	1.0mA	2.0mA	3.0mA
Sub1	~~−15808~~	1651	1246	1065
Sub2	1771	2378	9093	3222
Sub3	3454	1102	953	845
Sub4	2340	5421.7	4453	3074
Sub5	3890	~~−5989~~	~~−36651~~	8780
平均	2863	2637	3936	3397
標準偏差	847	1670	3279	2866

この線形回帰を利用した場合には，時定数の平均値は 2165ms であった．この時定数は頭部の交流インピーダンス計測実験によって得られた時定数である 1489ms よりも大きい値である．また，線形近似を利用した場合，非線形近似を利用するよりも小さい分散で時定数が推定可能である事がわかる．

このように，本研究で行った実験によって得られた時定数を比較すると，統計処理の過程で生まれる誤差によっても時定数は大きく変動する．よって，本研究の結果から得られた時定数によって，往復電流刺激の発生メカニズムに迫るこ

とは困難であると考えられる．この頭部の電気的な特性が与える往復電流刺激の前庭感覚強度への影響の評価は今後の研究で明らかにするべき課題とする．

また，本章での実験で行った，往復電流刺激が及ぼす身体動揺の増大効果を計測する実験において被験者のデータの平均値に対する近似では，非線形回帰でも非常に当てはまりのよい近似ができており，刺激条件が変わっても，推定された時定数の標準偏差は被験者ごとに推定された標準偏差の分散と比べて非常に小さい(図 4.3.6，表 4.5.2，表 4.5.3)．これは，単一の被験者では近似が困難なデータでも平均化されたことで S/N 比が上がった結果，推定すべき母集団である全人類の時定数の平均値に近づいたためであると考えられる．よって，本研究で行った身体動揺の増大効果を計測する実験で推定された時定数は往復電流刺激が及ぼす身体動揺の増大効果の特性を示す指標であると考えられる．

本章の一連の実験を通して感覚の時間的な特性を考慮する事で電気刺激による感覚提示における問題を解決し，安全な電流値で強力な加速度感覚を惹起する事に成功した．よって，本章で示した知覚の時間的な特性からの刺激設計は妥当であり有用である．

本研究では電気刺激が神経発火を誘発するメカニズムとしてシナプス間隙イオン泳動説を提唱している．このシナプス間隙イオン泳動説は本章で提案した往復電流刺激による前庭感覚増強効果を説明可能であると考えられる．この詳細については 5 章で議論する．

5. 総合考察

本研究では，頭部への電気刺激による感覚提示における統一的な機序として電流経路仮説を挙げ，その妥当性と有用性を示してきた．また，前庭電気刺激によって提示される前庭感覚の強化のために，電気刺激によって惹起される感覚の時間特性を電気回路によってモデル化し，そのモデルの妥当性と有用性を示した．

電気刺激による感覚提示の研究においては，電流を印加すると感覚が惹起される事，電流の強度と惹起される感覚の強度は相関がある事等が示されているが，刺激電流がどのようにして感覚を惹起しているのかという，電気刺激が感覚を惹起する機序については未知である．そこで，本章では本研究で示してきた前庭電気刺激，味覚電気刺激，嗅覚電気刺激による感覚提示の研究結果を軸に，電気刺激が神経発火を誘発するメカニズムについて考察する．

2 章で述べたように，本研究では電気刺激の感覚神経の発火誘発メカニズムについて，シナプス間隙イオン泳動説を提唱している．本章ではこの説について，再度詳しく説明し，本研究で行った実験の結果と先行研究の知見からシナプス間隙イオン泳動説の妥当性について論ずる．

神経の発火は感覚細胞のイオンチャネルの開口に端を発する．イオンチャネルは各細胞が対応する刺激を検知する事で開口する．これによって，感覚細胞が発火し，神経伝達物質を次の感覚神経とのシナプス間隙に放出する事で，接続する神経イオンチャネル開口を誘発し，次の神経を発火させる．これらの事から，電気刺激が神経発火を誘発する機序としては，

1. 電気刺激は細胞上のイオンチャネルを刺激する事で開口させる(イオンチャネル刺激説).
2. 電気刺激は細胞上の受容体を刺激する事でイオンチャネルを開口させる(受容体刺激説).
3. 電気刺激は感覚神経の神経伝達物質受容体を刺激する事でイオンチャネルの開口を誘発する(神経伝達物質受容体刺激説).
4. 電気刺激はシナプス間隙に放出した神経伝達物質やシナプス間隙にあるイオンをシナプス間隙に作った電場によって泳動させる事で，神経伝達物

質作動性イオンチャネル付近の神経伝達物質やイオンの濃度を上昇させる事で，感覚神経の発火を励起する(シナプス間隙イオン泳動説).

等が考えられる.

これらの説において，本研究で実証してきた電流経路仮説を説明可能である説を考えると，4 番目の説のみである.

電流経路仮説においては，神経は電流の向きに対して選択的に発火し，その感覚を惹起する．これは，前庭電気刺激において電流の方向と加速度感覚の方向が対応する事や味覚電気刺激においては陽極側が舌の付近にある場合にのみ電気味が惹起される事からも分かる．これらの例から，前庭感覚器においては対応する方向の前庭感覚を惹起する神経が同じ方向を向いている必要があり，味覚においても味を受容する感覚器が同じ方向を向いている必要がある．しかながら，イオンチャネルや受容器は細胞上の位置が一定ではなく，向いている方向も異なる．このため，電気刺激の空間的な方向に対してイオンチャネルや受容器が受ける影響は一定でないと考えられる．よって，1 番目と 2 番目の説は電気刺激が感覚を惹起するメカニズムとしては妥当ではないと考えられる.

これに対して，第二次感覚細胞のシナプス間隙は細胞の向きに対して大まかに位置が決まっている．例えば，前庭感覚を受容する有毛細胞で言えば，有毛細胞の有毛部の対側にシナプスを持っている．有毛細胞は受容する加速度感覚の方向に対して垂直な方向を向いているため，同じ方向の前庭感覚を受容する有毛細胞と接続する感覚神経が持つシナプス間隙の向きは，ほぼ一定であると考えられる(図 5.2).

しかしながら，シナプス間隙に放出された神経伝達物質はシナプス後にある神経伝達物質受容体で受容される．これによって，細胞のイオンチャネルが開口し感覚細胞の発火が感覚神経へと伝わって行く．この神経伝達物質受容体を電気で刺激している可能性は否定出来ない．しかし，この説では電流の空間的な方向に対して神経細胞が選択的に発火する理由を説明出来ない.

一方で，刺激電流がシナプス間隙につくった電場による神経伝達物質やイオンの泳動が，シナプス後の神経伝達物質作動性イオンチャネルの周辺の神経伝達物質やイオンの濃度を上昇させる事によって，シナプス後が受容する神経伝達物質やイオンの量を増加させるという，シナプス間隙イオン泳動説は非常にシンプルに電流経路仮説を説明できる．神経伝達物質は，アミノ酸，アミン，ペ

プチドなどである．特に，早い応答が必要とされる神経系においてはアミノ酸である，グルタミン酸，GABA，グリシン等が神経伝達物質として利用される．グルタミン酸やグリシン等は本研究で扱っている電気刺激による味覚抑制においても利用される電解質であり，これらが呈する味覚の電気刺激による抑制効果が確認されている．つまり，刺激電流は少なくともこれらの物質を電場によって泳動させることが可能である．また，シナプス間隙は細胞外であるので，多くのナトリウムイオン，カリウムイオン，カルシウムイオン，塩素イオン等が存在する．特に，グルタミン酸作動性イオンチャネルは 3 種類あるが，これらはいずれも，陽イオン透過性チャネルである．同様に，グリシン動作性イオンチャネルも主として陽イオンを透過させる．一方で，GABA 動作性イオンチャネルは陰イオンを細胞内に流入させるチャネルである．

電気刺激によって感覚の惹起が確認されている感覚器の中でも，前庭感覚を受容する，有毛細胞と視覚を受容する視細胞は神経伝達物質としてグルタミン酸を放出する事が知られている．また，味覚を受容する味蕾の味細胞は神経伝達物質としてアデノシン三リン酸(ATP)を放出する．グルタミン酸は体内では陰イオンになっており，ATP もまた，体内では陰イオンとなる．

このシナプス間隙イオン泳動説は刺激電流の方向に対する神経発火の選択性を説明する事ができる．図 5.1 に示すように，シナプス間隙に放出された神経伝達物質はシナプス後で受容される．このため，神経伝達物質泳動説において神経発火を誘発するためには，シナプス間隙に放出された神経伝達物質をシナプス後の方向に泳動させる電場を形成する必要がある．つまり，このシナプス間隙とシナプス後の位置関係によって，神経発火を誘発する電場の方向が決定される．網膜や前庭感覚器の構造を考えると，感覚細胞と接続する神経細胞の向きはある程度揃っている．よって，この感覚器の感覚細胞をシナプス前とするシナプス間隙の方向が，刺激電流の空間的な方向に対する神経発火の選択性を形成していると考えられる．

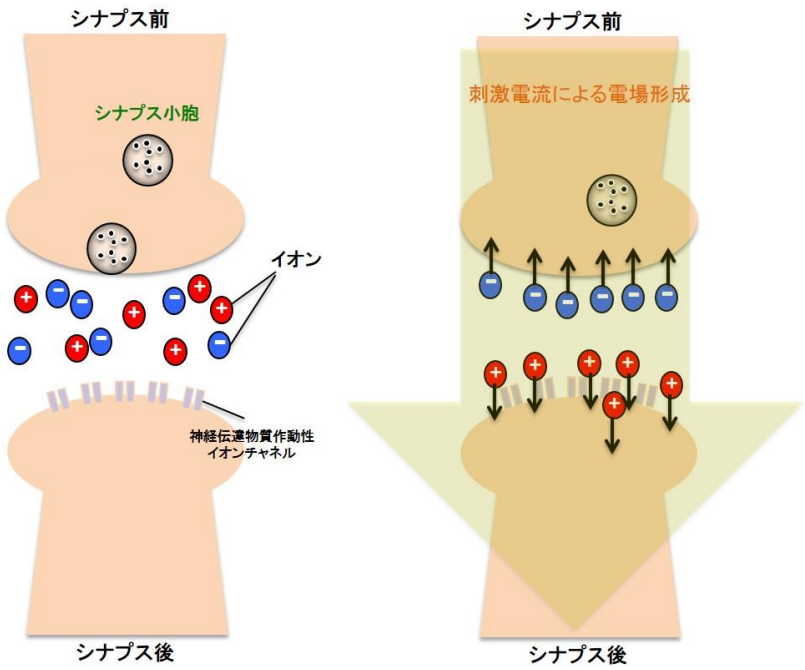


図 5.1：シナプス間隙イオン泳動説の概略

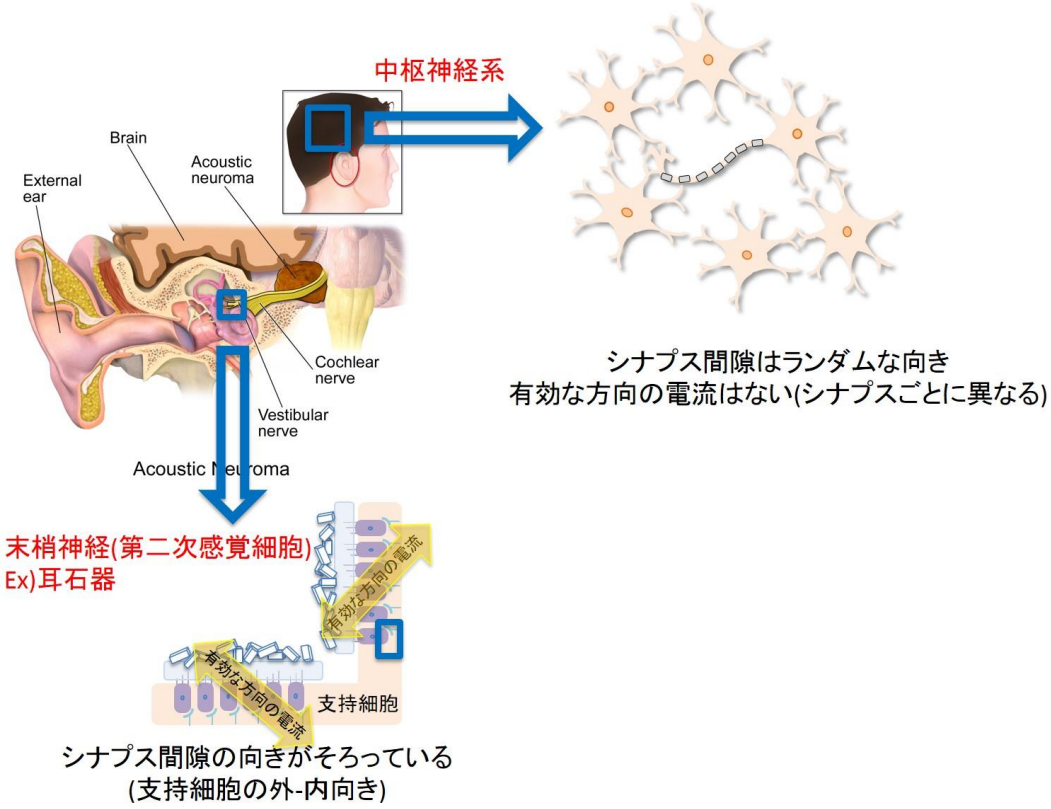


図 5.2：耳石器を例にとった電気刺激の感覚惹起の概略[55]

この電気刺激による感覚惹起の機序のシナプス間隙イオン泳動説での説明を左右方向の前庭感覚を惹起する前庭電気刺激を例にとってまとめると，次のようになる(図 5.2)．前庭感覚器官への左右方向刺激(LDS)を印加した場合，刺激電流は主として外耳道から内耳口に向かって電流が流れます．この時，大まかには左右方向の電流が流れる．また，内耳口を抜けた電流は脳室を通って対側の耳口から側頭骨錐体尖に流れ込むと考えられます．この時，耳石器あるいは半規管に左右方向の電流に対して選択的に発火する左右方向の加速度あるいは Roll 方向の角速度を受容する細胞が存在すると考えられる．刺激電流によって第二次感覚細胞のシナプス間隙には電場が形成され，シナプス間隙のイオンが泳動する．この泳動の向きがシナプス後に有効な方向であった場合に神経は発火すると考えられる．しかしながら，シナプスの方向が揃っていないと発火できる神経はわずかな数になる．また，それらが伝達する情報に齟齬があった場合，脳はそれらの信号をノイズとして扱うと考えられる．よって，感覚の惹起のためには同様の情報を受容伝達する神経群を十分量発火させる必要がある．十分量の発火のためにはシナプス間隙の向きが揃っている神経群が十分量存在する必要がある．この神経の向きが揃っている部分はどこかを考えると，第二次感覚細胞を持った感覚受容器が挙げられる．前庭感覚器は耳石器も半規管も第二次感覚細胞を持った末梢神経系である．よって，第二次感覚細胞を持った末梢神経系にのみ有効であると考えられる．

さらに，このシナプス間隙イオン泳動説は本研究で示してきた往復電流刺激による感覚の増強効果を説明する事が可能である．往復電流刺激において逆電流を印加している時にはシナプス間隙においてシナプス前側に神経伝達物質を泳動させていると考えられる．この時，シナプス後の神経伝達物質受容体付近は神経伝達物質の濃度が低くなっている．逆電流印加中にも神経伝達物質は放出され続けるため，この間にシナプス前側の神経伝達物質濃度は上昇する．その後，順方向電流が印加されると，シナプス間隙での電場は神経伝達物質をシナプス後側に泳動させる方向になる．この時，シナプス前側に泳動させてあった神経伝達物質がシナプス後側に泳動するため，神経伝達物質受容体付近では神経伝達物質とイオンの濃度が急激に上昇する．このイオンの泳動による受容体付近の神経伝達物質とイオン濃度の急な上昇が往復電流刺激による感覚強度の増強効果の機序であると考えられる．つまり，本研究で提案してきた CR 回路モデルはこの神経伝達物質とイオンの滞留と解放を示している可能性があると考えら

れる．この他にも，シナプス後側を発火させる方向とは逆方向の電場をシナプス間隙に形成した場合，シナプス後から見ると刺激量が非常に少ない状況と等価である．この時，シナプス後側が順応から復帰する事や，シナプス後側が少ない刺激量に対して発火の閾値を下げるといったある種の順応が引き起こされる可能性も考えられる．これらの仮説はいずれも CR 回路モデルと矛盾せず，4 章で示した往復電流刺激による身体動揺の増大効果や前庭感覚の増強効果の時定数はシナプス間隙に滞留しているイオン濃度の上昇の様子やシナプス後側の順応の様子を示していると考えられる．

これらに加えて，味覚電気刺激における陽極刺激が，シナプスイオン泳動説の妥当性を示唆する知見として挙げられる．味覚電気刺激における陽極刺激では舌付近の口腔内に陽極を設置する．これによって，電気味と言われる味覚を惹起する．陰極の設置位置は体のどの部位でも問題ないが，ここでは本研究で設置した首の後ろで考える．この電極配置によって電流を印加すると，口腔内では舌や内壁の外側(口腔側)から内側の方向の電場が形成される．口腔内の味覚受容器は舌や内壁の外側(口腔側)を向いている．このため，味覚受容器付近では味細胞側から味覚神経方向の電場が作られていると考えられる．つまり，味細胞-味覚神経間のシナプス間隙にはシナプス前からシナプス後に向かう方向の電場が形成される．

この時のシナプス間隙のイオン泳動を考えると，作られた電場によって陽イオンである ナトリウム，カリウム，カルシウムイオンがシナプス後に集中し，陰イオンである塩素イオン等がシナプス前に泳動される．神経伝達物質で言えば，グルタミン酸や ATP などは負に帯電しているため，電気的にはシナプス前側に引っ張られ，GABA は陽イオンであるためシナプス後側に引っ張られる．しかしながら，これらの神経伝達物質はシナプス間隙での濃度が低いため，拡散によるシナプス後への泳動の影響は金属イオンに比べて大きいと考えられる．よって，味覚電気刺激おいて電気味が惹起されるのは，シナプス間隙において陽イオンがシナプス後のイオンチャネル付近に泳動し，イオンチャネル付近の陽イオン濃度を上昇させるからであると説明ができる．

このシナプス間隙イオン泳動説は，従来から電気刺激による嗅覚の提示が困難であった事も説明できる．嗅覚神経は感覚細胞が中枢神経系まで軸索を伸ばしている，第一次感覚細胞である．また，嗅覚情報は受容されてから嗅球まで一つの細胞で情報が伝達される．さらに，嗅球内でのシナプスの方向はそろってい

ない．このため，電気刺激によってシナプス間隙に有効な強度の電場を形成する事は非常に困難である．これらのような解剖生理学的知見とシナプス間隙イオン泳動説の考え方から，従来の電気刺激手法が嗅覚を惹起できなかった事が説明できる．

以上の議論から，本研究では電気刺激による感覚提示の機序を，シナプス間隙におけるイオン泳動の効果であるとする説を提唱する．

本研究では，頭部への感覚電気刺激における電流経路仮説の妥当性と有用性を実証してきた．さらに，これらの研究結果から電気刺激による感覚惹起の機序について，シナプス間隙におけるイオンの泳動の影響に着目し，その仮説の妥当性を論じた．

本研究では前庭電気刺激の持つ前庭感覚への過渡応答特性や周波数応答特性について，シナプス間隙イオン泳動説を軸に語ってきた．しかしながら，シナプス間隙イオン泳動説だけでは説明が困難な現象として，直流前庭電気刺激を長時間印加したときに惹起される前庭感覚の強度が徐々に減少していくという現象である．シナプス間隙イオン泳動説においては，直流電流が印加されている間中イオンの泳動は続いている．つまり，シナプス後におけるイオン濃度が徐々に減少していくとは考えにくい．この直流前庭電気刺激に対する前庭感覚の過渡応答は神経の発火特性に依存するものであると考えられる．このような神経の発火特性として順応が挙げられる．多くの神経は刺激量が一定の場合，刺激開始時に最も強く発火し，徐々にその発火頻度を減少させていく．直流の前庭電気刺激の場合，シナプス間隙におけるイオン濃度が刺激量になると考えられる．狭いシナプス間隙に発生した電場はシナプス間隙にあるイオンを非常に短い時間で泳動させると考えられる．よって，直流前庭電気刺激における前庭感覚の過渡応答については，シナプス間隙イオン泳動説と神経の順応という応答特性によって説明可能であると考えられる．

本研究では電流経路と CR 回路モデルの二つの観点から頭部への電気刺激による感覚提示の機序に迫ってきた．頭部への電気刺激は感覚器への刺激以外に脳を狙った刺激手法がある．この刺激手法としては経頭蓋直流電気刺激(tDCS)と経頭蓋交流電気刺激(tACS)がある．tDCS は直流電流を頭皮上に設置した電極から印加する事で，脳部位を刺激するというものである．これに対して，tACS は交流電流を頭皮上に設置した電極から印加する事で対応する脳部位を刺激可能であるとされている．tACS にはいくつかの派生があり，ランダムな周波数成

分を含む経頭蓋ランダムノイズ刺激(tRNS)[2,47]や最新の刺激方法では経頭蓋細胞外インピーダンス制御(tEIC)[2]等がある．tEIC においては脳波と連動した電流制御によって負の抵抗値を持つ抵抗器を頭部に接続している事と等価な刺激を頭部に印加するというものである．

tACS や tRNS，tEIC は本研究で提案してきた電流経路や頭部等価回路を適応できないと考えられる．これは，本研究行ってきた電気刺激はこれらの電気刺激とは対象にしている周波数帯域が異なるためである．例えば，tEIC などは脳波と連動して刺激をするため，γ 帯の周波数まで(~35Hz)の刺激を行う．これに対して本研究ではほぼ 1Hz 以下の低周波刺激のみを取り扱っている．また，交流刺激が用いられる GVS による眼振の誘発などにおいても最大で 10Hz 程度までの周波数しか利用されない．

脳波や tACS などのある程度高い周波数を持った交流電流は頭蓋を貫通しうると考えられる．これは頭部が頭皮と脳髄液などの導電体で頭蓋という絶縁体を挟むような構成になっているからである．このような構成はキャパシタのような電荷の充放電を引き起こすと考えられる．電荷の充放電を引き起こすということは，交流電流に対して電気的なインピーダンスが非常に低くなる．つまり，交流電流は頭蓋の穴を通らずとも頭蓋を貫通するようにインピーダンスの低い電流経路が形成されると考えられる．よって，本研究の結果はこれらの刺激の機序や効果を否定するものではない．

一方で，tDCS は直流電流を扱うものである．このため，本研究で取り上げてきた電流経路の考え方が適応できると考えられる．tDCS においては多くの場合で電極の真下組織が刺激電流によって活性化/抑制されると考えられてきた．しかしながら，これらの直流電流に対して頭蓋の持つ電気的なインピーダンスは非常に大きい．このため，印加電流は頭蓋骨の穴を通って頭部内に侵入すると考えらえる．しかしながら，これでは電極のほぼ真下の組織が活性化/抑制されるという事実[3]の機序が不明である．この tDCS の脳機能修飾効果の機序はこれらの電流経路の観点とつながりがあると考えられるが，その解明は今後取り組むべき課題とする．

6. 結論

本研究では頭部への経皮電気刺激による前庭感覚，味覚，嗅覚の感覚提示モデルを電流経路の空間的配置とその時間特性の 2 つの観点から設計し，従来の電気刺激による前庭感覚，嗅覚，味覚の感覚提示手法の課題解決とこれらの観点からの刺激設計の妥当性と有用性の実証を通し，電気刺激の感覚惹起メカニズムの解明に挑んだ.

本研究の 2 章では前庭電気刺激，嗅覚電気刺激，味覚電気刺激による感覚提示手法のディスプレイとしての問題点を次のように提起した.

- 前庭電気刺激によって惹起される前庭感覚の方向の自由度が不足している
- 前庭電気刺激によって惹起される前庭感覚の強度が不足している
- 電気刺激によって嗅覚を惹起する事ができていない
- 味覚電気刺激によって抑制できる味質の自由度が不足している

これらの諸問題は従来の頭部への電気刺激手法の陥っていた，設置電極の真下の組織が賦活あるいは抑制されるというドグマにある事を述べ，この対立仮説として，電流経路仮説を提唱した．さらに，頭部への電気刺激研究がこのようなドグマに陥っていたことの原因として電気刺激の神経発火の機序が未解明な点を挙げ，その機序を示す説としてシナプス間隙イオン泳動説を提唱した．電流経路仮説とは，頭部に印加された刺激電流のうち，抵抗値の低い頭蓋骨の穴を通って感覚器に流れた有効な方向の電流のみが感覚を惹起するというものである.

3 章ではこの電流経路の存在を頭部の抵抗値計測と頭部に電流を印加したときの磁場を脳磁図(MEG)によって実証した．さらに，この電流経路の観点からの刺激設計によって次の事を達成し，前庭電気刺激と味覚電気刺激，嗅覚電気刺激の感覚提示ディスプレイとしての問題点を解決した.

- 頭部の抵抗値計測と磁場計測による電流経路仮説の存在の実証(業績リスト 4)
- 電流経路仮説に基づく刺激設計による前庭電気刺激の多自由度化(業績リスト 3,4)

- 電流経路仮説に基づく刺激設計による嗅覚提示手法の開発
- 陰極 GGS による味覚抑制効果の機序の解明と五味全ての味抑制の達成(業績リスト 5)

これによって，電流経路の観点からの刺激設計の妥当性と有用性を実証した．

4 章では, 安全な電流値の範囲内での前庭電気刺激が惹起する前庭感覚の強度が微弱であるという問題点の解決を行った．この章では前庭電気刺激が惹起する前庭感覚と頭部の電気的な特性の過渡応答特性と周波数応答特性に着目し，これらを CR 回路モデルで近似できることを示した．この CR 回路モデルの特性から，小さい電流値でも強力な前庭感覚を惹起できる刺激手法として往復電流刺激を開発し, その前庭感覚の増強効果を検証した. これらの研究を通して達成したことをまとめると次のようになる.

- 頭部の交流インピーダンス特性を計測し, 頭部がキャパシタを含む CR 回路として近似可能である事を実証した
- CR 回路モデル内のキャパシタの充放電に着目し, GVS が惹起する前庭感覚を増強できる刺激として往復電流刺激を開発した(業績リスト 1)
- 往復電流刺激の身体動揺の増大効果を示すモデルとして CR 回路が妥当であることを示した(業績リスト 2,4,6)
- 往復電流刺激の加速度感覚の増強効果を示すモデルとして CR 回路が妥当であることを示した(業績リスト 1,2,6)

本研究で行った実験の結果は，頭部の電気的な特性が前庭電気刺激の惹起する前庭感覚の過渡応答特性や周波数応答特性を生んでいる事を支持しないものであった.

5 章では, これまでの一連の実験の結果と先行研究によって示されている経皮電気刺の感覚惹起の機序を統一的に説明できる説として，本研究で提案しているシナプス間隙イオン泳動説が妥当であることを論じた.

以上より，電流経路の観点からの刺激設計は電気刺激の感覚惹起メカニズムを踏襲した合理的な刺激設計指針であり，電気刺激を利用した感覚提示ディスプレイの設計においては有用かつ妥当である. また, この生体への電刺激全体を統一的に説明できる機序提唱した本研究は，生体への電気刺激による感覚提示

ディスプレイの改善などの工学的な意義と神経系のはたらきに対する理解をさらに深めるという科学的な意義を併せ持つものであると言える.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多くの方々からのご教授･お力添えをいただきました.

博士前期課程と博士後期課程での 4 年間を通し，指導教官として熱心な研究指導を賜りました前田太郎教授に深謝し，ここに御礼申し上げます.

博士論文の審査を担当していただいた，　清水浩教授，松田秀雄教授，若宮直紀教授に感謝の意を表します.

研究のみにとどまらず公私とも多大なご指導いただきました安藤英由樹准教授に深く謝意を表します.

飯塚博幸元助教(現北海道大学准教授)，古川正紘助教には日頃から研究の方針から実験の細やかな設定，論文の書き方などにおいて度重なる議論にお付き合いいただき，貴重なご助言をいただきました．深謝いたします.

本研究は多くの優秀な研究室の後輩の協力によって支えられたものです．特に味覚に関する実験と嗅覚に関する実験では共同研究者として櫻井悟君と宮本靖久君に実験装置の作製，結果のディスカッション，論文の執筆･添削等多くの御助力を賜りました．ありがとうございました.

また，ここに名前を挙げた方以外にも数えきれないほど多くの方に支えられ，これまで本当に楽しく研究をする事ができました．厚く御礼申し上げます.

参考文献

[1] Abhishek Atta, Marom Bikson and Felipe Fregni, “Transcranial direct current stimulation in patients with skull defects and skull plates, “High-resolution computational FEM study of factors altering cortical current flow”, NeuroImage, Vol. 52, pp.1268-1278 (2010)

[2] Ayumu Matni, Masaaki Nakayama, Mayumi Watanabe, Yoshikazu Furuyama, Astushi Hotta, Shotaro Hoshino, “Transcranial Extracellular Impedance Control (tEIC) Modulates Behavioral Performances”, PLOS ONE, doi:10.1371/journal.pone.0102834 (2014)

[3] Antal, A., Nisuche, M.A., Paulus, W., “External modulation of visual perception in humans”, NeruroReport., Vol.16, pp.3553-3555 (2001).

[4] Bryony C. Heasman, Antonio Valentin, Jorge J. Garcia Seoane, Colin D. Binnie and Chris N.Guy, “A Hole in the Skull Distors Substantially the Distribution of Extracranial Electrical Fields in an in Vitro Model”, Journal of Clinical Neurophysiology, Vol. 19 No. 2, pp.163-171 (2002).

[5] Caspar M. Schwiedrzik, “Retina or visual cortex? The site of phosphine induction by transcranical alternating current stimulation”, Frontiers in Integurative Neurosicience, Vol.3, pp.1-2 (2009)

[6] Cathers, I., Day, B. L. & Fitzpatrick, R. C., “Otolith and canal reflexes in human standing”, Journal of Physiology, Vol. 563, 229–234 (2005)

[7] Christophe Lopez, Bigna Lenggenhager, Olaf Blanke, “How vestibular stimulation interacts with illusory hand ownership”, Consciousness and Cognition, Vol.19, pp.33-47 (2010).

[8] Colletti, Shannon RV, Mandalà M, Carner M, Veronese S, Colletti L, “Recent Developments in Bionic hearing Restoration from the Round Window to the inferior Colliculus”, Otology Japan, Vol.19, No.5, pp.677-685, (2009)

[9] Daty, B. L., Fitzpatrick, R. C., “Virtual head rotation reveals a process of route reconstruction from human vestibular signals”, Journal of Physiology., Vol.567, pp.591–597 (2005).

[10] David Julius and Allan I. Basbaum, “Molecular mechanisms of nociception”, Nature, Vol.413, pp.203-210 (2001).

[11] David Wilkinson, Sophie Nicholls, Charlotte Pattenden, Patrick Kilduff, William Milberg, “Galvanic Vestibular Stimulation Speeds Visual Memory Recall”. Experimental Brain Research., Vol.189, pp.243–248 (2008).

[12] Day, B. L., Séverac Cauquil, A., Bartolomei, L., Pastor, M. A. & Lyon, I. N., “Human body-segment tilts induced by galvanic vestibular stimulation: a vestibularly driven balance protection mechanism”, Journal of Physiology., Vol.500, pp.661–671 (1997).

[13] Diana J. Kim, Vignan Yogendrakumar, Joyce Chiang, Edna Ty, Z. Jane Wang, Martin J. McKeown, “Noisy Galvanic Vestibular Stimulation Modulates the Amplitude of EEG Synchrony Patterns”, PLOS One, doi: 10.1371/journal.pone.0069055 (2013)

[14] Elisa Raffaella Ferre, Elenora Vognoni and Patrick Haggard, “Galvanic vestibular

stimulation influences randomness of number generation", Experimental Brain Research., Vol.224, pp.233-241 (2013).

[15] Erich Schneider, Stefan Glasauer, Marianne Dieterich, "Comparison of Human Ocular Torsion Patterns During Natural and Galvanic Vestibular Stimulation", J. Neurophysiol, Vol.87, pp.2064-2073 (2002)

[16] Fitzpatrick, R. C. & Day, B. L., "Probing the human vestibular system with galvanic stimulation", Journal of Applied Physiology., Vol.96, pp.2301–2316 (2004).

[17] Fitzpatrick, R. C., Marsden, J., Lord S. R. & Day, B. L., "Galvanic vestibular stimulation evokes sensations of body rotation", Neuroreport, Vol.13, pp.2379–2383 (2002).

[18] Fitzpatrick, R. C., Wardman, D. L. & Taylor, J. L., "Effects of galvanic vestibular stimulation during human walking", Journal of Physiol., Vol.517, pp.931–939 (1999).

[19] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Takahiro Uemura, Tetsuro Moriya, "Food Simulator: A Hptic Inteface fo Biting", Proceeding of the 2004 Virtual Reality, pp.51-57 (2004)

[20] Hummel, T., Livemore, A., "Internasal chemosensory function of the trigeminal nerve and aspects of its relation to olfaction", International Archives of Occupational and Environmental Heaalth and PublicHealth, Vol.75, 305-313 (2001).

[21] Hummel, T., Livemore, A., Hummel, C., Kobal G., "Chemosensory event-related potentials in man: relation of olfactory and painful sensation elicited by nicotine", Electorencepharography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials SEction.,Vol.84, pp.192-195 (1992).

[22] Iikka Laakso & Akimasa Hirata, "Computational analysis shows why transcranial alternating current stimulation induces retinal phosphenes", Journal of Neural Engeering, Vol. 10, 046009(9pp) (2013)

[23] Inglis, J. T., Shupert, C. L., Hlavacka, F. & Horak, F. B., "Effect of galvanic vestibular stimulation on human postural response during support surface translations", Journal of Neurophysiology, Vol.73, pp.896–901 (1995).

[24] Ishimaru, T., Sakumoto, M. Kimura, Y., Furukawa, M., "Olfactory evoked potentials produced by electrical stimulation of the olfactory mucosa", Auris Nasus Larynx.,Vol.23, pp.98-104 (1996).

[25] Kajimoto, Kawakami, N., Tachi, S. H., Inami, M., SmartTouch, "Electric skin to touch the untouchable", IEEE Computer Graphics. Vol.24, 36-43 (2004).

[26] Kazuma Aoyama, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando and Taro Maeda, "Four-pole galvanic vestibular stimulation causes body sway about three axes", Scientific Reports. 5, 10168; doi: 10.1038/srep10168 (2015).

[27] Kazuma Aoyama, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando, Taro Maeda, "Countercurrent Enhances Acceleration Sensation In Galvanic Vestibular Stimulation", International Conferenceon Artificialreality and Telexistance (2013)

[28] Komai, M., Bryant, B. P., "Acetazolamide specifically inhibits lingual trigeminal nerve responses to carbon dioxide", Brain Research., Vol.612, pp.122-129 (1993).

[29] Krarup, B., Electro-gustometry, “A method for clinical taste examinations”, Acta Oto-laryngol, Vol. 49, 294-305 (1958).

[30] M.F.Bear, B.W.Connors, M.A.Paradiso: 神経科学: 脳の探求,西村書店 (2007)

[31] Myerson, M. C., Rubin, H. & Gilbert, J. G., “Anatomic studies of petrous portion of the temporal bone”, Archives of Otolaryngology, Vol. 20, 195–210 (1934).

[32] Nimesha Ranasinghe, Adrian Cheok, Ryohei Nakatsu, Ellen Yi-Luen Do, “Simulating thesensation of taste for immersive experiences”, ImmersiveMe ’13 Proceedings of the 2013ACM international workshop on Immersive media experiences, pp.29-34 (2013)

[33] Omar S. Mian, Christopher J. Dakin, Jean-Sebastien Blouin, Richard C. Fitzpatrick and Brian L. Day, “Lack of otolith involvement in balance responses evoked by mastoid electrical stimulation”, Journal of Physiology, Vol.588, No.22, 4441-4451（2010）

[34] Patrick A. Forbes, Christopher J. Dakin, Anoek M. Gees, Matrij P. Vlaar, Riender Happee, Gunter P. Siegmund, Alfred C. Schouten, Jean-Sébastien Blouin, “Electrical Vestibula Stimulation to Enhance Vestibulo-Motoro Output and Improve Subject Comfort”, Plos One. Vol.9, doi: 10.1371/journal .pone.0084385 (2003).

[35] Pfeiffer, E. A., “Electrical stimulation of sensory nerves with skin electrodes for research, diagnosis, communication and behavioral conditioning: a survey”, Medical & Biological Engineering &Computing., Vol.6, 637-651 (1968).

[36] Poreisz, C., Boros, K., Antal, A., Paulus, W., “Safety aspects of transcranical direct current stimulation concerning healthy subjects and patients”, Brain Resarch Bulletion, Vol.72, 208-214 (2007).

[37] Rebecca J. St George, Brian L. Day, Richard C. Fitzpatrick, “Adaptation of vestibular signals for self-motion perception”, The Journal of Physiology, Vol. 584, issue 4, 843-853 (2010)

[38] Ryota Kanai, Leila Chaieb, Andrea Antal, Vincent Walsh, Walter Paulus, “Frequency-Dependent Electrical Stimulation of Visual Cortex”, Current Biology., Vol.18, pp. 1839-1843, (2008)

[39] Schwiedrzik, C M., “Retina or visual cortex? The site of phosphene induction by transcranial alternating current stimulation, Frontiers in Integrative Neruroscience., Vol 3, 1–2 (2009).

[40] Séverac Cauquil, A., Martinez, P., Ouaknine, M., & Tardy-Gervet, M. F., “Orientation of the body response to galvanic stimulation as a function of the inter-vestibular imbalance”, Experimental. Brain Research, Vol.133, pp.501–505 (2000).

[41] Susan Standiring, Gray’s Anatomy, 39th Edition: The Anatomical Basis of Clinical Practice, Churchill Livingstone (2005)

[42] TELESCOPE:Magazine : http://www.tel.co.jp/museum/magazine/human/120709_interview/06.html

[43] Thomas P. Hettinger, Marion E. Frank, “Salt taste inhibition by cathodal current”, Brain Research Bulletin, Vol.80, No.3, pp.107-115 (2009)

[44] Tomoko Moriyama, Asako Shima, Koji Shibasaki, Hitoshi Inada, Takaaki Sokabe and

Makoto Tominaga, “Intracellular alkalization causes pain sensation through activation of TRPA1 in mice”, The Journal o Clinical Investigation, Vol.118, No.12, pp.4049-4057, (2008)

[45] UnlimitedHand: Touch and Feel the Game World : https://www.kickstarter.com/projects/1551369150/unlimitedhand-touch-and-feel-the-game-world?ref=email

[46] Utza, K. S., Dimovaa, V., Oppenländer, K. & Kerkhoff, G. Electrified minds, “Transcranial direct current stimulation (tDCS) and Galvanic Vestibular Stimulation (GVS) as methods of non-invasive brain stimulation in neuropsychology—A review of current data and future implications”, Neuropsychlogia, Vol. 48, 2789–2810 (2010)

[47] Voss, U., Holzmann, R., Hobson, A., Paulus, W., Koppehele-Gossel, J., Klimke A., NitscheInduction, M. A., “Induction of self awareness in drams through frontal low current stimulation activity”, Nature Neuroscience., Vol.17, pp.819-812 (2014).

[48] Wardman, D. L. & Fitzpatrick, R. C., “What does galvanic vestibular stimulation stimulate?”, Advances in Experimental Medicine and Biology, Vol.508, 119–128 (2002)

[49] Wardman, D. L., Day, B. L. & Fitzparick, R. C., “Position and velocity responses to galvanic vestibular stimulation in human subjects during standing”, Journal of Physiology, Vol. 547, 293–299 (2003)

[50] Wikimedia Commons File: Anatomy and physiology of animals Taste buds on the tongue.jpg https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_and_physiology_of_animals_Taste_buds_on_the_tongue.jpg?uselang=ja

[51] Wikimedia Commons File: Olfactory : system.svg,https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olfactory_system.svg

[52] Wikimedia Comons File:Temporal bone lateral2.png, : https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Temporal_bone#/media/File:Temporal_bone_lateral_animation.gif

[53] Wikimedia Commons File: Vestibular system’s semicircular canal-a cross-section.jpg https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Vestibular_system%27s_semicircular_canal-_a_cross-section.jpg?uselang=ja

[54] Wikimedia Commons File Otolith organ of vestibular system.jpg: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Otolith_organ_of_vestibular_system.jpg

[55] Wikimedia Commons File: Blausen 0009 Acoustic Neuroma.png: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0009_AcousticNeuroma.png

[56] Yuanyuan Y. Wang, Rui B.Chang, Emily R. Liman, “TRPA1 Is a Component of the Nociceptive Response to CO2”, The Journal of Neuroscience, Vol.30, pp.12958-12963, doi:10.1523/JNEUROSCI.2715-10.2010 (2010)

[57] 青山一真, 安藤英由樹, 桜井悟, 宮本靖久, 古川正紘, 前田太郎, “頭頂方向前庭電気刺激が及ぼす加速度感覚知覚と身体反射応答への影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol 20, No 3, pp.239-242 (2015)

[58] 青山一真, 安藤英由樹, 飯塚博幸, 前田太郎, “前庭電気刺激における逆不感電流を用いた加速度感覚の増強”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.19, No.3, 315-318

(2014)

[59] 青山一真, 橋本悠希, 近藤大祐, 米村朋子, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎, “多極前庭電気刺激に置ける動的な電流印加手法の影響”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 628-631（2007）

[60] 青山一真, 飯塚博之, 櫻井悟, 宮本靖久, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹, ”往復電流刺激が及ぼす前庭電気刺激の身体動揺増大効果のモデル化”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌[in-press]

[61] 青山一真, 櫻井悟, 宮本靖久, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹, “前庭電気刺激における往復電流刺激が及ぼす加速度感覚知覚の増強効果モデル”, 第 20 回日本 VR 学会大会論文集, pp.476-479 (2014)

[62] 安藤英由樹, 吉田知史, 前田太郎, 渡邊淳司, ” Save YourSelf !! ”-前庭刺激による平衡感覚移植体験-”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.225-232 (2007)

[63] 安藤英由樹, 渡辺淳司, 杉本麻樹, 前田太郎, “前庭感覚インタフェース技術の理論と応用”, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No 3, 1326-1335（2007）

[64] 宇川義一, 生駒一憲, 魚住武則, 鬼頭俊輔, 斉藤洋一, 谷俊一, 寺尾安生, 飛松省三, 藤木稔(臨床神経生理学会　脳刺激法に関する委員会), “経頭蓋直流電気刺激 (transcranial direct current stimulation, tDCS) の安全性について”, 臨床神経生理学会論文誌, vol.39, No.1, 59-60 (2011)

[65] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房

[66] 大森治紀, “有毛細胞”, Equilibrium research 58(6), pp.582-591 (1999)

[67] 河合美佐子: アミノ酸の味　その2, 食と健康の情報誌, No.209 (2003)

[68] 外界からの刺激の受容:http://www.tmd.ac.jp/artsci/biol/textlife/sense.htm

[69] 郭 伸, Struzik, Zbigniew, 相馬 りか, 大橋 恭子, 潘 衛東, 山本 義春, “前庭神経の経皮的微弱ランダム電流刺激による神経疾患の治療の試み”, Equilibrium Research, Vol.67, No.1, pp.58-64 (2008).

[70] 櫻井悟, 青山一真, 宮本靖久, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹, “電気刺激による塩味および旨味を呈する塩の味覚抑制”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol 20, No 3, pp.219-228 (2015)

[71] 櫻井悟, 青山一真, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎,, “舌への電気刺激と温度刺激が五味へ及ぼす効果の検証”, 第 19 回日本 VR 学会大会論文集,pp.94-97

[72] 下澤達雄, 穆　勝宇, 藤田敏郎 : 塩分の過剰摂取と高血圧の関係, 化学と生物, Vol.50, No.4 (2012)

[73] 高橋洋一郎, 後藤昌昭, 岡増一郎, 田代英雄, “電気味覚の正常値について”, 日本口腔外科学会雑誌, Vol.25, No.5, pp.967-972 (1979)

[74] 塚原仲晃, 脳の情報処理, 朝倉書店 (1986)

[75] 船戸和弥のホームページ, 骨骨格系: http://www.anatomy.med.keio.ac.jp/funatoka/anatomy/osteologia/osteologia02.html

[76] 竹中毅, ”空間帝位における自己受容感覚情報と外部感覚情報の統合過程に関する研究”, 神戸大学博士学位論文 (2015)

[77] 中井義明, “前庭器の構造およびその病態”, Equilibrium Research, (1987)

[78] 中村裕美, 宮下芳明, “一極型電気味覚付加装置の提案と極性変化による味質変化の検討”, 情報処理学会論文誌, Vol.54, pp.1442-1449 (2013)

[79] 中村裕美, 宮下芳明、“陰極刺激の提示と停止による塩味味覚感度制御”, 情報処理学会インタラクション 2013, pp.103-110 (2013)

[80] 中本高道, 嗅覚ディスプレイ　におい・香りのマルチメディアツール:フレグランスジャーナル社 (2008)

[81] 永谷直久, 杉本麻樹, 新居英明, 前田太郎, 北崎充晃, 稲見昌彦, “前庭電気刺激による視界への影響”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 10, No 4, 475-484（2005）

[82] 橋本悠希, 杉崎有, 米村朋子, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎, ”前庭電気刺激を用いた眼球運動誘導手法の基礎的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.17, No.1, pp.23-32 (2012).

[83] 前田太郎, 安藤英由樹, 雨宮智浩, “加速度感提示のための前庭電気刺激における電流密度分布のモデル化”, 第 11 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5-8（2006）

[84] 前田太郎, 安藤英由樹, 渡邊淳司, 杉本麻樹, “前庭感覚電気刺激を用いた感覚の提示”, バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.2, pp.82-89 (2009)

[85] 宮田祐樹, 濱田和孝, 加藤翼, 北原悠樹, 安藤英由樹, 前田太郎, “4 極前庭電気刺激における電流量と頭部姿勢との対応の実測”, 第 13 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 234-237　(2008)

[86] 柳田康幸, “バーチャルリアリティにおける香り提示技術の展開”, 名城大学理工学部研究報告, No 47, pp.69-75 (2007)

付録 A：本研究で利用した電気刺激装置

A.1　頭部への電流印加時の磁場計測による頭部内電流経路の推定実験(3.3 節)で利用した電気刺激回路

図 A.1 は脳磁図による電流印加中の頭部周辺の磁場計測実験において利用した電気刺激回路の電圧-電流変換部の回路図である．

この回路では，レール to レール汎用オペアンプ(LM358)と N チャネル MOS-FET による制御電流をカレントミラー回路で複製した電流を刺激電流として利用した．また，回路が故障しても MEG の磁場センサを破壊しないように，制限電流 0.1mA の定電流ダイオードを電流出力部に使用した．この回路を向い合せて使うことで，オペアンプの動作電圧の範囲内で交流電流を発生させることが可能である．

また，電圧制御は各電圧-電流制御部にそれぞれ搭載されているマイクロコントローラ(mbed LPC1768)によって制御され，このマイクロコントローラは PC とフォトトランジスタ(PC123)を介した光絶縁での Serial 通信によって制御された．

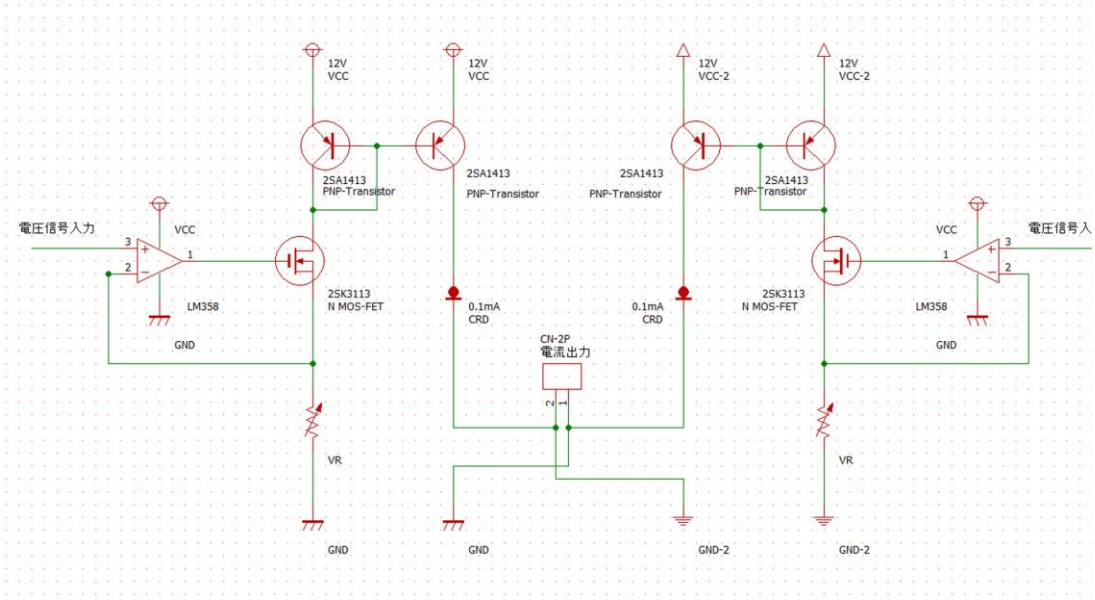


図 A.1：脳磁図による磁場計測実験で利用した回路の回路図

A.2 陰極電気刺激による旨味味抑制実験において利用された電気刺激回路

図 A.2 は陰極 GGS による旨味抑制実験において，舌に電流印加を行うために利用された電気刺激回路の電流発生部である．

この回路では，レール to レール汎用オペアンプ(LM358)と抵抗器によって構成される．この回路は単極性の電流のみ印加可能な回路である．

また，電圧制御は各電圧-電流制御部にそれぞれ搭載されているマイクロコントローラ(mbed LPC1768)によって制御され，このマイクロコントローラは PC とフォトトランジスタ(PC123)を介した光絶縁での Serial 通信によって制御された．

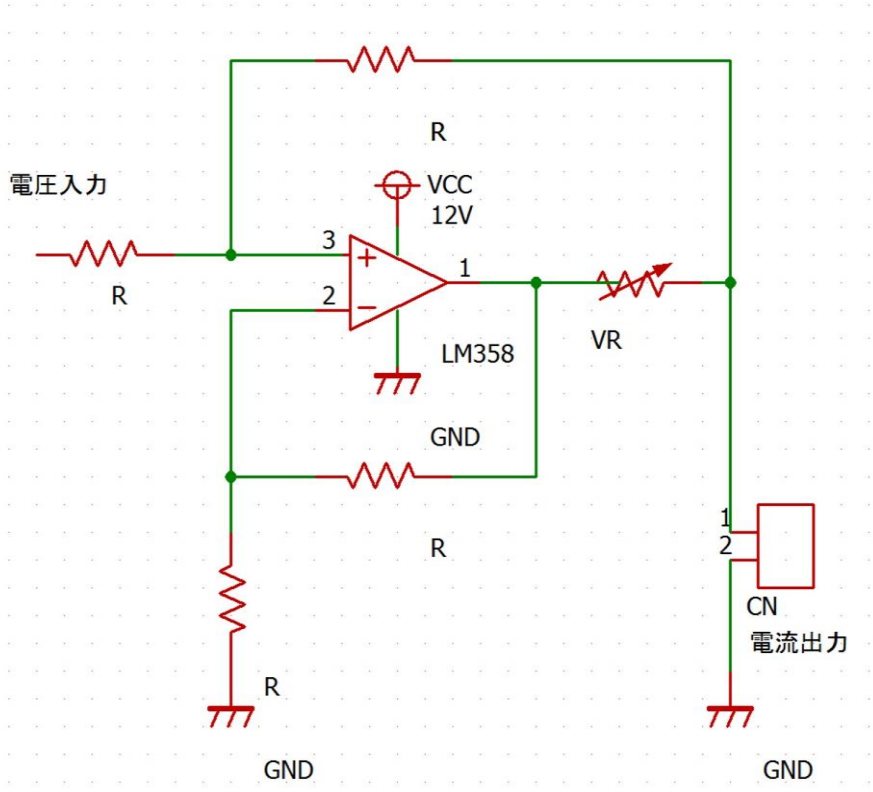


図 A.2：旨味の抑制効果の検証実験において利用した回路の回路図

A.3 前庭電気刺激と嗅覚電気刺激，甘味，苦味，酸味の抑制効果の検証実験において利用され刺激回路

図 A.3 は前庭電気刺激と嗅覚電気刺激，陰極 GGS による甘味，苦味，酸味の

抑制実験において利用された刺激回路の電流電圧-電流変換部の回路図を示している．この回路は安藤ら(2007)において利用された回路と同様の回路である[63].

この回路では，レール to レール汎用オペアンプ(LM358)と N チャネル MOS-FET による制御電流をカレントミラー回路で複製した電流を刺激電流として利用した．電流の極性変化は PhotoMOS リレー(AQV214)によって構成された H ブリッジ回路によって制御した.

また，電圧制御は各電圧-電流制御部にそれぞれ搭載されているマイクロコントローラ(PIC)によって制御され，このマイクロコントローラは PC とフォトトランジスタ(PC123)を介した光絶縁での Serial 通信によって制御された.

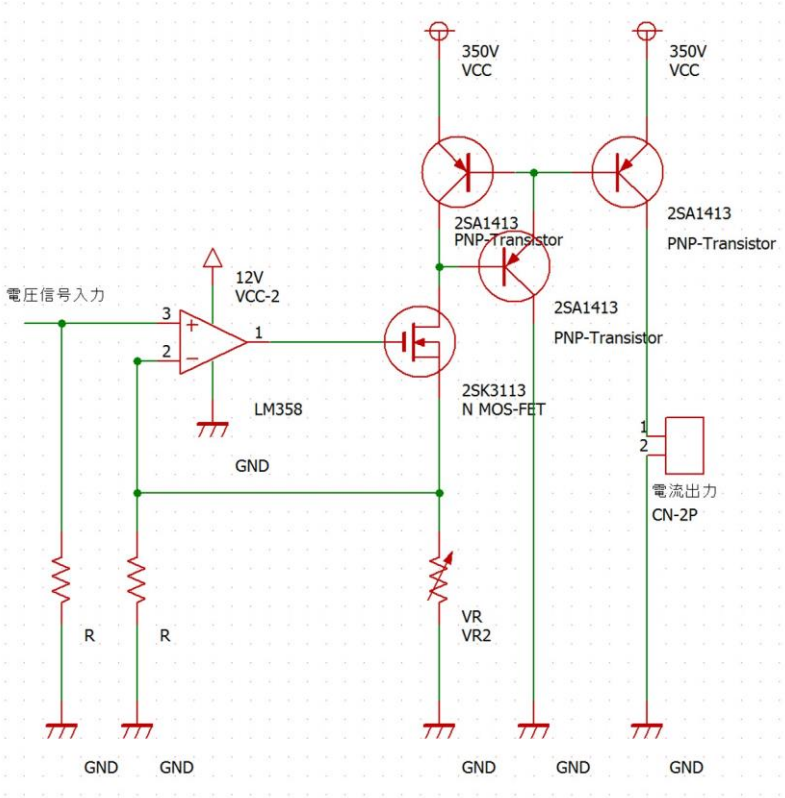


図 A.3：前庭電気刺激と嗅覚電気刺激，甘味，苦味，酸味の味覚抑制実験において利用された回路の回路図

付録 B：CR 回路モデルの論理的な妥当性

本研究で提案している CR 回路モデルはキャパシタ 1 つと抵抗器 3 つで構成されている回路モデルである．しかしながら，頭部の構成要素はキャパシタを一つであると仮定したとしても，抵抗器は無数に存在し，その抵抗 3 つのみではないと考えられる．よって，本研究で提案した図 4.1.3 (C)に示す回路に追加の抵抗器を接続した場合にも，本研究で提案してきた CR 回路と等価なものとして扱える事を示す．

本研究で提案した CR 回路の要素それぞれに対して抵抗器を並列あるいは直列に接続した場合を考える．

a. R_1 に抵抗器を直列，並列に接続した場合

この場合，どちらの接続であってもオームの法則から R_1 の合成抵抗として追加の抵抗器を扱うことが可能である．

b. R_2 に抵抗器を直列，並列に接続した場合

この場合，どちらの接続であってもオームの法則から R_2 の合成抵抗として追加の抵抗器を扱うことが可能である．

c. R_3 に抵抗器を直列，並列に接続した場合

この場合，どちらの接続であってもオームの法則から R_3 の合成抵抗として追加の抵抗器を扱うことが可能である．

d. C に抵抗器を直列に接続した場合

この場合，R_3 の合成抵抗として追加の抵抗器を扱うことが可能である．

e. C に抵抗器を直列，並列に接続した場合

図 B.1 のように R_1 に流れる電流を I_1，R_2 に流れる電流を I_2，R_3 に流れる電流を I_3，キャパシタを流れる電流を Ic，追加の抵抗器(R_4)を I_4 とする．この時，図 B.1 の回路の合成インピーダンス $Z_{(図 B.1)}$は次の式(B.1)であらわされる．また，図 4.1.3(C)の回路の合成インピーダンス $Z_{(図 4.1.3)}$は式(B.2)で

あらわされる．これらの二つの回路は同様の形で表されることから，図 B.1 の回路は図 4.1.3 の回路形で等価な回路を作ることが可能であると言える．よって，この回路は図 4.1.3 (C)の回路と等価な回路として記述する事が可能である．

$$Z_{(図B.1)} = R_1 + \frac{R_2 \dfrac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} + kR_2R_3 \dfrac{R_4}{R_2 + R_3 + R_4}}{1 + k(R_2 + R_3)\dfrac{R_4}{R_2 + R_3 + R_4}} \tag{B.1}$$

$$Z_{(図4.1.3)} = R_1 + \frac{R_2 + kR_2R_3}{1 + k(R_2 + R_3)} \tag{B.2}$$

$$\mathrm{k} = \mathrm{j}\omega\mathrm{C}$$

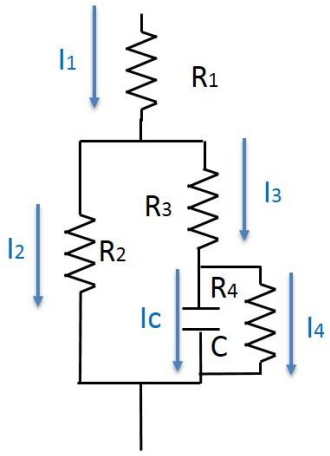


図 B.1：キャパシタに追加の抵抗(R4)がついた時の回路

f. 回路全体に追加の抵抗器が並列に接続した場合

この場合も図 4.1.3 (C)の回路と等価な回路として記述する事が可能である．

これらのことから，この CR 回路にどのように抵抗器を接続しても，図 4.1.3 (C)の回路と等価な回路として記述できると考えられる．