

## Hans Berger の夢 — How did EEG become the EEG? — その 2

宮内 哲

**要旨** その1において、(1) Berger が脳波の研究を始める前に、神経解剖学的研究、脳血流・脳温の計測、脳への電気刺激など、さまざまな当時としては最先端の研究を行っていたこと、(2) それらの研究の多くは闇雲に行ったのではなく、19世紀の自然科学に大きな影響を与えたエネルギー保存の法則に基づいた Berger ならではの脳活動と精神活動に関する壮大な構想に基づいて行われた可能性があることを述べた。その2では、Berger がヒトの脳波を発見する前に行われた動物の脳波に関する研究、Berger によるヒトの脳波の研究を紹介し、Berger の研究が当時の神経生理学に受け入れられなかった理由について考察する。

### 3. Berger による脳波の研究

#### 3-1 動物の脳波の計測

脳波の発見に関しては、Berger によるヒトの脳波のみが取り上げられることが多いが、それよりも前に数名の研究者が動物での脳波記録に成功していた。Berger のヒトの脳波記録に先立つこと約50年、イギリスの Richard Caton が、ウサギ、イヌ、サルなどの脳から脳波を記録し、脳波が定常的に変動し、その変動が光刺激や運動によって変化すること、さらに睡眠や死亡によって変化することを1875年と1877年に報告している<sup>1-5)</sup>。次にポーランドの Adolf Beck (1890) がイヌとウサギで自発性脳波と誘発性脳波の記録に成功し、視覚刺激、聴覚刺激でそれぞれイヌの視覚野、聴覚野が、四肢への触覚刺激で対側の感覚運動野の自発性電位変動が脱同期することを発見していた<sup>4,5)</sup>。ほぼ同時期にウィーン(オーストリア)の Ernst Fleischl von Marxow, ロシア(現ウクライナ)の Vasili Yakovlevich Danilevsky もイヌやウサギの脳波を記録している\*<sup>1</sup>。Marxow は1890年の論文の中で「いずれ、さまざまな精神作業に伴ってわれわれの脳内で生じる電流を頭蓋上から記録できるようになるかもしれない」と述べている。さらにウクライナの Vladimir Právdicz-

Neminski も1913年にイヌの脳波を記録し、ヒトのアルファ波とベータ波に相当する成分を報告しただけでなく、それらが大脳皮質上だけでなく、硬膜上や頭蓋骨上からも記録できたことを1925年に報告している<sup>6,7)</sup>。

Berger も Caton, Beck, Marxow らの論文を参考にしながら Lippmann の毛細管電流計\*<sup>2</sup>を用いて1902年にイヌとネコで、1907年にイヌで、さらに1910年には弦線電流計\*<sup>3</sup>によってイヌでの脳波記録を試みている<sup>8)</sup>。その結果、微小な自発性の電位変動や前足への触覚刺激に対する電位変動を観察している。しかし非常に微小な変動が稀に記録できただけだったため、一旦は動物での脳波計測を中止している。このようにヒトの脳波の発見は、20世紀初頭の段階で時間の問題だったが、不思議なことに Berger 以外に誰も

\*<sup>1</sup> Danilevsky の共同研究者の一人が Vladimir Ulyanov, 後にロシア革命を主導した Lenin (レーニン) だった。

\*<sup>2</sup> 毛細管電流計 (capillary electrometer): 水銀と硫酸を封入したガラス製の毛細管の両側から電極を伸ばし、両電極間に生体からの微弱電流が流れるとファラデーの電気分解の法則にしたがって、毛細管内の水銀と電解液(硫酸)の境界面が動く。この動きを顕微鏡で拡大して観察したり、光学的に拡大して記録した。高感度だったが、動作が不安定で定量的計測は困難だった。Waller による最初の心電図(1887)や Caton によるイヌの脳波記録(1875)に使われた<sup>50)</sup>。Berger も1900年代初頭のイヌの脳波記録に用いた。

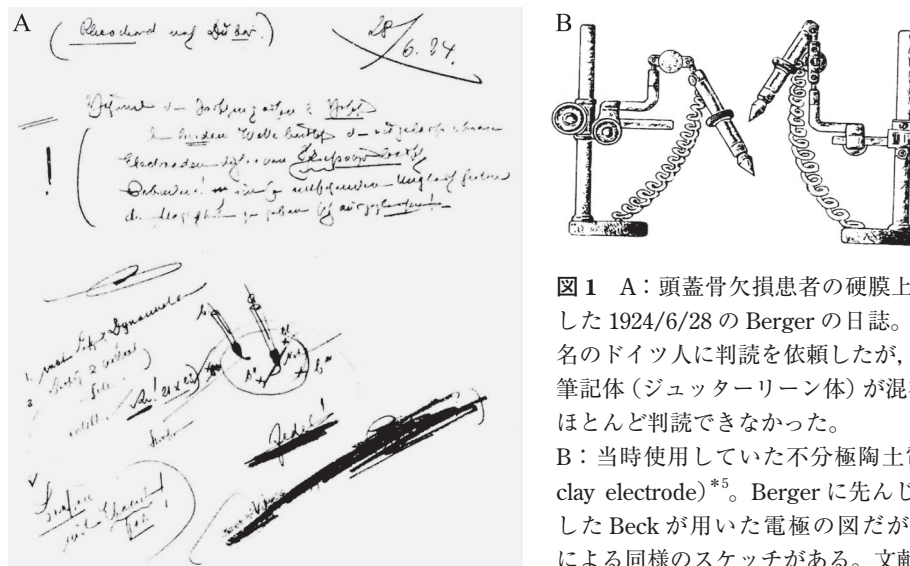


図1 A: 頭蓋骨欠損患者の硬膜上から脳波記録に成功した1924/6/28のBergerの日記。文献8より引用。数名のドイツ人に判読を依頼したが、現在の筆記体と古い筆記体(ジュッターリーン体)が混在して使われており、ほとんど判読できなかった。  
B: 当時使用していた不分極陶土電極(non-polarizable clay electrode)<sup>\*5</sup>。Bergerに先んじて動物の脳波を記録したBeckが用いた電極の図だが、Aの中央にBergerによる同様のスケッチがある。文献4より引用。

ヒトで試そうとしなかった。

### 3-2 ヒトの脳波の計測

Bergerは1920年に頭髪のない被験者の頭皮上から弦電流計を用いて脳波記録を試みているが失敗している。詳細は書かれていないが、その後も電流計をシーメンスの可動コイルガルバノメーター<sup>\*4</sup>に変えたり、電極の材質や位置をさまざまに変えて試行錯誤を繰り返している。そして1924年7月6日に脳腫瘍の疑いで減圧の穿頭術を受け、左半球に頭蓋骨の欠損がある17歳の男性の欠損部を覆っている皮膚の上に置いた電極から小型の弦電流計によって最初の脳波記録に成功した。図1Aに、その直前の1924年6月24日の日記と、図1Bに当時Bergerが使っていたのと同様の不分極陶土電極<sup>\*5</sup>を示した。ただしこのときは記録装置がなかったため、脳波によってわずかに振動する弦電流計の弦の振動を観察しただけで、記録は残ってい

<sup>\*3</sup> 弦線電流計あるいは弦電流計(string galvanometer): 磁界の中に、1/1000 mm程度の非常に細い石英の線に金あるいは銀でメッキした弦を張り、電流が流れると電磁誘導によって弦線が振動する。その振動を顕微鏡などで光学的に拡大して生体の電流を観察・記録した<sup>51)</sup>。心電図を記録するためにオランダのEinthovenがそれまでの弦電流計を改良した<sup>52)</sup>。まだ増幅器がなかったため、微弱な電流で弦の振幅を大きくするためには、基本的には磁場の強度を上げるしか方法がなかった。Einthovenが製作した弦電流計では、電磁石で約2 Teslaという、現在の医療用MRI装置の超電導磁石で作出す磁場強度に匹敵する磁場を用いていた<sup>53)</sup>。電磁石を冷却するために水冷装置を必要とし非常に大型の装置だったが、感度が1 mV/cm, 200 Hzまでの現象が記録できた<sup>54)</sup>。その後改良されて小型になり、活動電位の計測、脳波の計測にも用いられた。しかし弦が断線しやすく、取り扱いには注意が必要だった<sup>55)</sup>。

ない。図2Aが1929年の第一報に載っている硬膜外電極から記録した最初のヒトの脳波である<sup>10)</sup>。図2Bが息子のKlausから記録した最初の頭皮脳波で(いつ記録されたのかは記載されていないが、Klausが15歳の時の記録で、Klausが生まれたのが1912年3月なので、1927年の記録と考えられる)、明瞭なアルファ波のwaxing and waning(数秒周期でのアルファ波の振幅の漸増・漸減)が認められる<sup>11)</sup>。図2Cの1930年に記録した頭皮脳波は、現在の脳波計による記録と遜色がなく、触刺激による明確な $\alpha$ -blockingが出現している<sup>11)</sup>。しかし最初の記録に成功して、すぐにこのような記録が可能になった訳ではない。図2Aを見れ

<sup>\*4</sup> コイルガルバノメーター: 磁界の中に可動コイルを置けば、コイルに流れる電流に応じて回転力が発生する。コイルに小さな鏡を付けてコイルの回転を光学的に拡大して記録した。ガルバノメーター自体は毛細管電流計よりも前から使われていた(例えば、d'Arsonval galvanometer<sup>6)</sup>)。しかし周波数応答が悪く、そのままでは心電図の記録も困難だったが、その後徐々に改良された。コイルにインク書きのペンを装着したものが、今日一般的に見かけるガルバノメーターになるが、そのためには電流増幅が必要であり、電流増幅には三極真空管が必要だった。また微弱な生体電位の計測には同相ノイズを除去する差動増幅器が必要だった。1906年に発明された三極真空管に増幅作用があることは1912年に発見されていたが、真空管による差動増幅器の発展は1930~1940年代以降だった。

<sup>\*5</sup> 不分極陶土電極(non-polarizable clay electrode): ガラス製のチューブに硫酸亜鉛溶液を満たして、チューブ上端からアマルガム化した亜鉛の棒を入れ、亜鉛の棒から伸びるリード線を電流計につないだ。チューブの下端には生理食塩水で濡らした木綿糸を詰め込んだ陶土を詰めて、チューブ先端から露出した木綿糸を計測部位に押し当てて計測した。19世紀の神経生理学分野で数々の発明や発見をしたE DuBois-Reymondが考案した。

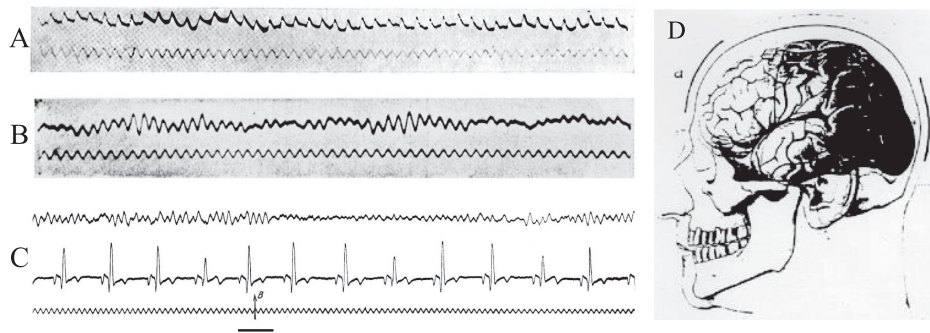


図2 Bergerの脳波記録の変遷

- A: 40歳の男性の頭蓋骨欠損部に置いた硬膜外電極から二重コイル電流計で記録した最初のヒトの脳波。下段がタイムマーカ（10 Hzのサイン波）。文献10より引用。
- B: 健常者の頭皮上から記録された最初の脳波。息子のKlaus（15歳）の頭皮上電極から二重コイル電流計で記録した。Dに示したように、前額部と後頭部に置いた電極の差分波形（前額部と後頭部に沿って曲線が引かれ、小さく“a”、“b”と書かれている）。下段はタイムマーカ（10 Hzのサイン波）。文献10より引用。
- C: Bergerが1930年の第二報に載せた、30歳の男性の頭皮上電極（前額部と後頭部）から二重コイル電流計で記録した脳波。現在の脳波計による記録と遜色がない。下線部の小さな上向き矢印と“B”は、ガラスの棒で被験者の右手背に触覚刺激を与え始めた時点を示している（下線は本稿の著者が記入）。明確なアルファ波の減弱が認められる。中段は心電図。下段はタイムマーカ（10 Hzのサイン波）。文献11より引用。
- D: BのKlausの頭皮上から脳波を記録した際の電極配置。前額部（a）と後頭部（b）に鉛製の電極プレートをゴムバンドで固定した。文献62より引用。

ば、誰もが「これが本当にヒトの脳波か？」と思わざるを得ないし、それはBerger自身の疑問でもあったであろう。後述するように、その後も電流計、電極の材質、電極の位置などを変えながら試行錯誤を繰り返している。

Bergerが頭皮上からの記録が間違いなく脳の電気的活動であると確信したのは1927年に入ってからのものである。1927年2月12日の日誌には、「私の洞察は確実なものとなった。Klausのカーブ（著者注：脳波）は、大脳内から導出した被験者Wのカーブと、詳細に至るまで一致している。もはや（脳波がアーチファクトである可能性を検証するための）対照実験は必要ない<sup>9)</sup>。10月14日の日誌にも、「Eureka!<sup>\*6</sup> Klausから記録した波は、脳内から記録した波と全く同じである。私は無傷の頭から脳波を記録できるようになった！」と記している<sup>5)</sup>。それでもなお、Bergerは自分が記録した電位変動が脳の電気的活動ではないかもしれないという疑心を消しきれず、1928年の日誌には、「私は長年にわたって架空の脳波のために無駄な時間

を費やした。どうするべきか？ 脳波の研究は断念する！」と記している<sup>8)</sup>。5年間に及ぶ試行錯誤と逡巡の末に、Bergerは1929年にヒトの脳波に関する論文の第一報“Über das Elektrenkephalogramm des Menschen”<sup>10)</sup>を出した。このとき、Bergerは既に56歳だった。

Bergerは1929年の第一報に続いて、1938年までに計14本の脳波に関する論文を出した<sup>10-23)</sup>。その中でも1929年に出した第一報が圧巻である。1924年に最初の脳波記録に成功してからの5年間にBergerが行ったことのおそらく全てが、44ページに及ぶ第一報の中に書かれている。5年間で14名の健常被験者で48回の実験（合計231個の記録）<sup>\*7</sup>、そのうち息子のKlausから14回（73個の記録）、Berger自身から11回（56個の記録）、頭蓋骨欠損患者で101回の実験（合計506個の記録）の脳波計測を行っている。そして彼が頭部から記録した電位変動が脳の電気的活動以外のアーチファクトではないかという疑いに対して、44ページ

<sup>\*6</sup> Euleka(あるいは Heureka): 「私は見つけた!」「分かったぞ!」。アルキメデスがアルキメデスの原理に気づいた際、思わず叫んだとされる言葉。

<sup>\*7</sup> 実験回数と記録数の違い: Tönniesが最初の連続記録ができるペン書き脳波計を開発したのが1932年だった(資料1)。それ以前は図3Hに示したように、弦の振動を光学的に拡大して数秒間の記録を複数回写真撮影した。そのために実験の回数と記録数が大幅に異なる。Bergerは1925年の2月10日から、全ての脳波記録に通し番号を付け、1938年の退官までに3,567個の脳波記録を行っている<sup>56)</sup>。



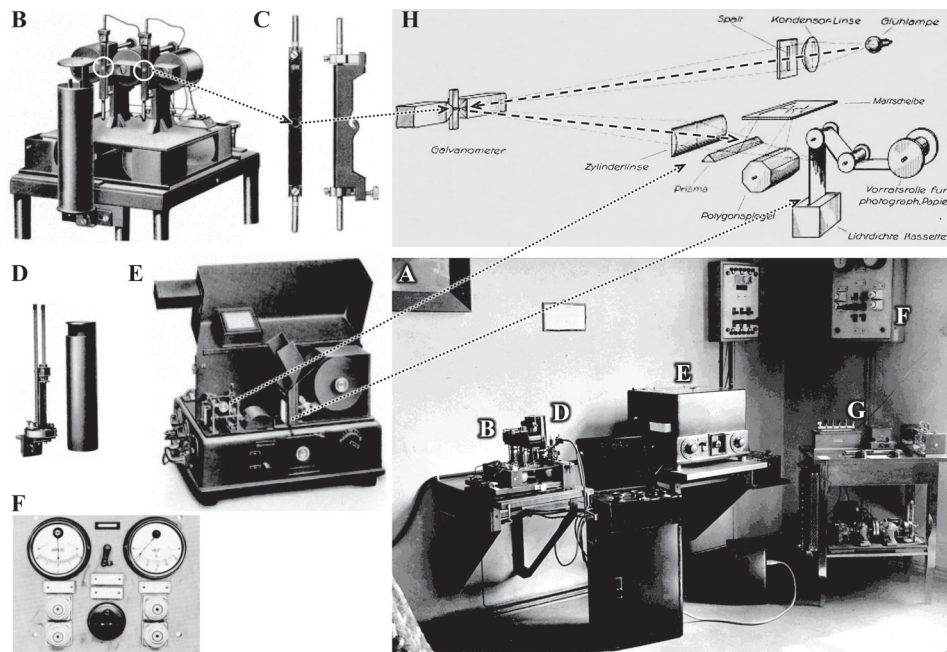


図 3

- A: 1926~31年のBergerの脳波実験室と計測・記録機器。左下隅に、脳波記録時に被験者が横になったソファがわずかに見える。
- B: Siemens & Halske社の可動コイル(moving coil)式ガルバノメーター。本来は心電図用に製造された装置を使用していた。ガルバノメーターの下部に見える白い球は、空気圧を利用して機械的な振動を吸収するためのクッション。写真のガルバノメーターの仕様かどうかは不明だが、1926年の段階でSiemens & Halske社のガルバノメーターの感度は $130 \mu\text{V}/\text{cm}$ 、入力インピーダンスは3-10 k $\Omega$ にすぎなかった<sup>54)</sup>。
- C: 可動コイル(B, C内の白丸と矢印は著者が記入)。
- D: 時間記録ユニット(図2A, B, Cの下段の10 Hzのサイン波を発生した)。
- E: 光学系および写真記録ユニット。前面のカバーを開けた状態(1チャンネル用, Aの中のユニットは2チャンネル用で、外観が若干異なる)。
- F: Ladeschalttafel(おそらく、安定した直流電圧を得るための充電制御盤。Aの中の制御盤とは外観がわずかに異なる)。
- G: 抵抗計測用装置。
- H: (おそらく)Eの左側面から投射したスリット光が、電流に伴って可動コイル上で振動する小さな鏡(Bの白丸内およびCの矢印)で反射し、戻ってきた光をE内部の光学系(E中央左側)で拡大してフィルムに投影し(E中央右側)、数秒の脳波を写真撮影した(破線は著者が記入)。
- Aは文献63より引用。B~GはSiemens & Halske社の1923年の心電計のカタログから転載して加工(文献64)。

の論文の12ページ近くを割いて、5年間に行った動物実験、Klausや自らが被験者となった実験結果に基づいて否定している。彼が検討したアーチファクトは、心電図、心拍による電極の動き、呼吸、血液と血管の摩擦、汗腺の電位、立毛筋、眼球運動、まばたき、顔面筋による動きなど、実に10種類以上に及ぶ。その中には、心電図や血流に起因するアーチファクトの可能性を除去するために、イヌで心臓を止めたり、頸動脈を結紮しても脳波が出現することを確認している。さらに電位変動が軟部組織や骨との接触によるもので

はないことを証明するために、自らの(脳からできる限り離れた)脛骨付近に針電極を刺した記録も行っている<sup>24)</sup>。それでも第一報を出した後もアーチファクトかもしれないという疑念は払拭しきれず、1931年に出した第三報では、頭蓋骨欠損患者の灰白質と白質から記録して、白質からは脳波は記録されなかったことを確認している<sup>8,12)</sup>。

図3がBergerが1926~1931年に使用していた実験室と脳波計の写真である。Bergerがヒトの脳波記録に成功した背景には、次のような幸運もあった。

- 当時の Jena 大学の送電システムは直流だった。また Berger の脳波の実験はいつも夕方からだったが、病院の他の機器の電源が切られて電磁気ノイズが少ない時間帯だった(あるいは、意識的に電磁気ノイズが少ない夕方以降に計測を行った)。さらに Berger の兄(あるいは弟)が、Jena に本社がある Carl Zeiss のエンジニアで、さまざまなアドバイスや便宜を受けることができた<sup>6)</sup>。1924 年の段階で彼が使用していた弦電流計は、1 mV で 1 cm 振れるに過ぎず<sup>6,10)</sup>、これらの好条件が揃わなければ、差動増幅器もシールドルームもなしに脳波を記録することは困難だったろう。
- 後述するように、Berger は Jena 大学内では比較的孤立していたが、脳血流・脳温計測のときから Jena 大学外科学教室の Prof. Guleke より脳腫瘍などの苦痛緩和のための頭蓋穿孔術を受けたり、第一次大戦で頭部外傷を負い頭蓋骨に欠損のある患者を多数提供された<sup>24)</sup>。上述したように、Berger より前に動物の脳波を計測した研究者は何名もいたにもかかわらず、ヒトでの計測を最初に試みたのが Berger だったのは、この理由が大きいかもしれない。

#### 4. なぜ Berger の脳波の研究は信用されなかったのか?

アーチファクトの可能性を否定するために5年の歳月を費やしたにもかかわらず、Berger の第一報はほとんど注目されなかった、というより信用されなかった。「その報告は国内はもとより、国外からも、『君は Berger 波を信ずるか?』という質問がその当時の神経に関する研究者の間でとりかわされていて、Berger の報告した脳波をアーチファクトとして疑問視する研究者もあった<sup>25)</sup>。1938 年にその 1 の図 1 のカードを Berger に送った Jasper ですら、1932 年に最初に Berger の記録を見たときは、それが脳活動に由来する電位であるとは信じなかった<sup>26)</sup>。Berger の第一報の引用は、ドイツの別の研究グループが 1932 年に Berger の記録と動物の皮質脳波記録の比較を国内および国外の学会で発表したに過ぎなかった<sup>27)</sup>。欧米の主要なジャーナルでは、4 年後の 1933 年に、Gasser と Graham がネコの脊髄後根への電気刺激に対する脊髄での記録で活動電位の後に緩徐な電位変動が出現することを発見

し、Berger の第一報を短く引用した<sup>28)</sup>。しかし論文の結果自体ではなく、Berger が第一報でまとめた動物の脳波の研究史に短く触れただけだった。後述するように、後にノーベル賞に推薦されるほどの研究が 5 年間も注目されなかった理由として、以下の 4-1 から 4-4 に挙げた原因が考えられる。

##### 4-1 当時の神経生理学の状況<sup>\*8)</sup>

一言で言えば、Berger のヒトの脳波の研究は、当時の神経生理学の主流とは対極に位置していた。前述したように Berger によるヒトの脳波記録に先んじて、1890 年前後に Beck, Marxow, Danilevsky が相次いで動物の脳波を記録したことを発表した。その際に誰が最初に脳波を記録したかが論争になったが、1891 年に Caton から届いた「私 (Caton) が、動物の脳波を記録した研究を 1875 年の The British Medical Journal に Abstract として出している」という手紙によってあっさり決着した<sup>4,29)</sup>(文献 4 の p. 9 に、Caton が出した当時のアブストラクトが掲載されている)。このエピソードが物語っているように、Berger 同様 Caton の研究も当時の学会ではほとんど注目されなかった<sup>\*9)</sup>。Caton は彼が記録した電位変動が灰白質で生じていると考えたのに対して、Liverpool 大学での Caton の後継者であり、神経興奮の不应期を発見した Gotch は、神経系の電気現象は全て白質で生じていると考え、Caton の結果を認めようとしなかったからだった<sup>30,31)</sup>。

ここで 19 世紀末から 20 世紀前半の神経生理学の歴史を手短に辿ってみると、

- Sherrington による拮抗筋の抑制、脊髄反射などの一連の研究が 1890 年代後半から 1900 年代前半、
- Adrian がカエルの坐骨神経を用いて 1913 年に「全か無の法則」を発見し、ノーベル賞を受賞したのが

<sup>\*8)</sup> 当時の神経生理学：単一神経細胞記録も頭皮脳波も、神経細胞の電氣的活動を記録しているという点では同じであり、現在の脳神経科学ではどちらも神経生理学的研究の中の一計測手法として位置づけられる。しかし本文(4-1)に記したように、20 世紀初頭において脳波は脳の電氣的活動としてなかなか認められなかった。1940~50 年代以降、シナプス後電位の存在が明らかにされた後も、頭皮脳波と単一神経細胞活動の関連を調べたり、同一の次元で考察する研究者は少なかった。以上の理由から、本稿では脳波を神経生理学に含めず、対比的に扱った。

<sup>\*9)</sup> Richard Caton: Canton の動物を用いた脳波の研究が知られていなかったことには、もう一つの理由がある。後に Caton は Liverpool の市長になった (1907 年)。当時のイギリスでは既に動物愛護運動が定着しており、Caton は自らが行った動物を用いた研究を意図的に隠した<sup>4,5)</sup>。

1932年,

- Erlanger と Gasser がオシロスコープを發明し、1929年にやはりカエルの坐骨神経を用いて神経線維の直径と伝導速度の関係を見出し、ノーベル賞を受賞したのが1944年,
- Hodgkin と Huxley がイカの巨大神経軸索で活動電位を記録したのが1939年,
- 神経-筋接合部で持続時間の長い EPP (endplate potential: 終板電位) が発見されたのが1940年前後<sup>32, 33)</sup>,
- 中枢神経系のシナプスで同様のアナログ的な電位変化が(シナプス後電位)発生し、それが時間的・空間的に加重されることが明確になったのは、Eccles が細胞内記録を中枢神経系に適用した1950年代以降のことだった(資料1)<sup>\*10</sup>。

すなわち19世紀末~20世紀初頭の神経生理学とは、

- (1) (両生類、魚類、昆虫などの) 下等動物の
- (2) (運動神経・感覚神経の) 末梢の(単一) 神経線維の
- (3) (電気刺激などの人工的な刺激による) 誘発性の
- (4) (持続時間が1ms前後の) 活動電位

を調べることに他ならなかった。それは当時 Adrian の研究室の大学院生だった Walter によれば、「イギリスの研究所の人びとは脊髄の頂上より以上には進もうとしなかった。ある者は脳を解剖学的に瞥見して絶望して顔をそむけてしまった。(中略) 脳の無数の機能の中で、ただ一つの変数、ただ一つの活動様式を分離するということが不可能なように見えた。そこで脳を研究することはタブーであるように思われていたのである。(中略) この両学派(著者注: ケンブリッジ学派とオックスフォード学派)において、科学の方法の伝統的な要求に応ずるために採用したのは、研究すべき器官とかその一部分を切り出したり分離したりすることであった。それはしばしば、ある単一の機能的単位以外の全てを除外するために、直径がわずか何千分の1mmしかない単一神経線維を分離するとい

<sup>\*10</sup> The Kanematsu Memorial Institute of Pathology: 第二次大戦前から大戦中にかけて、シナプスの研究で偉大な成果を挙げた Eccles, Katz, Kuffler らが研究を行ったのは、オーストラリアとの羊毛貿易を行っていた日本の商事会社、兼松江商(現: 兼松)からの寄付によってオーストラリアのシドニーに開設された研究所(The Kanematsu Memorial Institute of Pathology, 1933年竣工)だったことは日本ではあまり知られていない<sup>57, 58)</sup>。後に Eccles と Katz はノーベル賞を受賞している。

うような極端なところまで達した<sup>34)</sup>。

- このような状況の中で発表された Berger の脳波は、
- (1) ヒトの
  - (2) (末梢の単一神経線維に比べて「絶望的に複雑」な) 脳の
  - (3) (実験的な刺激との対応がとれない) 自発性の
  - (4) (活動電位と比べて) あまりに遅く規則的な電位変動

だった。それは当時の神経生理学者から見れば、「私は(著者注: H. Davis<sup>\*11</sup>), Berger が報告したものは、彼の装置の振動か何かのアーチファクトに違いないと辛抱強く説明した。なぜなら脳の中であのように遅い電位を生み出すために多くの神経線維が同期して活動するとは思ってもよらなかった<sup>35)</sup>, p. 10)。そして「ケンブリッジはなお脳を生理学者の本来の研究対象としては認めていなかった。その動揺する線はわれわれをも、またその当時の誰をも納得させなかった。ベルガーの『脳電図』はほとんど全く無視された<sup>34)</sup>。

当時の神経生理学でも、後述する Adrian を始めとして一部の研究者は活動電位よりも遅い電位変動があることに気がついてはいた(例えば、文献28)。しかし「当時(著者注: 1930年代前半)は、Berger の研究を除いて、脳の遅い電氣的活動に言及することは忌み嫌われていた。そのような遅い活動は多くの研究者によって観察されていたが、(著者注: 神経線維で観察される)活動電位が唯一の神経系の電氣的活動であり、それでは説明できない現象として仕方なく記述しているにすぎなかった<sup>36)</sup>, p. 5)。

然るに当時の神経生理学が神経線維で測っていたのは何だったのか? 19世紀末から20世紀初頭の神経生理学では、「“神経インパルス”の本性・実体は何ら明らかではなかった。中枢神経系から筋へ向かう神経中を移動して筋縮を引き起こしたり、外界の刺激を感覚として伝える”何か”が、漠然と“神経インパルス”と呼ばれていたにすぎない<sup>37)</sup>。そして「刺激した箇所から検出部位まで伝導していく“神経インパルス”それ自体が電氣的なものである、と彼らが考えているわけではない点である(著者注: 「彼ら」とは、Sherrington や神経の不応期を発見した Gotch や Horsely

<sup>\*11</sup> Hallowell Davis: Jasper と並んで、1933~1934年にアメリカで最初にヒトの脳波を記録した。



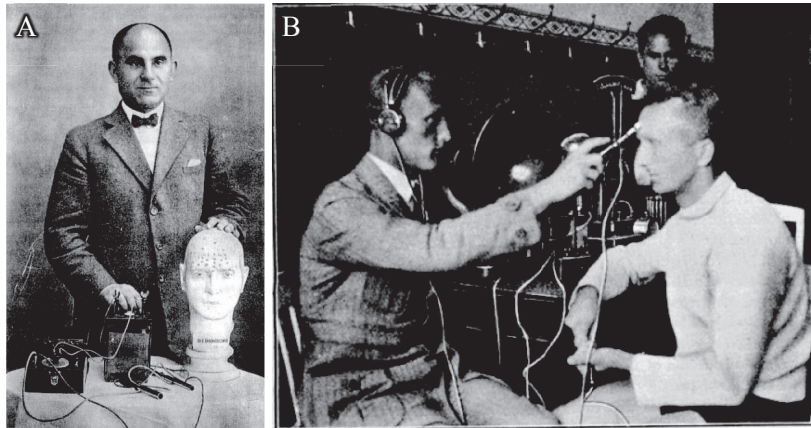


図 4

A: Diagnosticscopy と発明者の Zachar Bišky。文献 9 より引用。

B: Diagnosticscopy による計測風景。被験者(右)が一方の電極を両手で握り、検査者(左)がもう一方の電極を頭蓋の特定のポイントに当てて、微弱な電流を流した際に聞こえる音の大きさをプロットして、プロフィールを作成した。文献 39 より引用。

らを指す)。彼らは、あくまでも“神経インパルスに付随する電気変化”を測定するのだ、というスタンスを崩さない。“神経インパルスの本性”は不問に付したまま、ほとんどの研究者が疑問を挟まない“神経インパルスに付随する電気変化”のみを対象と<sup>37)</sup>していた。Berger が脳波について書いた 14 本の論文, Über das Elektrenkephalogramm des Menschen I~XIV<sup>10~23)</sup>でも、脳波に対して“concomitant phenomena (ドイツ語の原文では Begleiterscheinung) of psychological processes”あるいは“concomitant phenomena of the nervous processes”という表現が頻繁に使われているが、おそらく同じ理由だろう。

それでは当時の神経生理学が不問に付した「神経インパルスの本性」とは何だったのか? 元をたどれば、デカルトの「動物精気」あるいは「神経流体」に行き着く。動物精気とは、デカルトによれば、「ここで私が『精気』と呼ぶのは単なる物質的組織体である。それらは、松明からの炎の噴射と同じように極めて速やかに移動する極度に小さい組織体であるという特性以外にはいかなる特性も持たない。それらはいかなる場所でも静止することはいっさいなく、あるものは脳室へ入り、あるものは脳腔の小孔から出て行く。それらの小孔はそれらの組織体を神経へ、さらには筋肉へと導く。このようにして動物精気は、あらゆる可能な仕方

の定義そのままではなかったにせよ、「20 世紀最初の第 2 世代の神経科学者の中の最も傑出した人々、例えばシェリントン (Sherrington), エックルズ (Eccles), ペンフィールド (Penfield) らは、公然たるデカルト的二元論者であった。第 3 世代もデカルトの基本的理論構造を堅持したが、ただしそれを(著者注: 精神-身体二元論から)脳-身体二元論へと変換させた」にすぎない<sup>38)</sup>。このように考えると、当時の神経生理学者にとっての「神経インパルスの本性」と Berger が考えていた精神エネルギーとの間に本質的な差異があるとは思えない。

#### 4-2 疑似科学の一種とみなされたこと

Berger が最初の論文を出す 4 年前に、ウクライナの医師 Zachar Bišky が Diagnosticscopy という装置を発表した(図 4 A)。頭皮上の約 50 のポイントに微弱な交流電流 (335 Hz) を流し、電流によって引き起こされる脳活動を増幅して音の強弱に変換した(図 4 B)。実際に何によって音量が変化したのかは不明だが、さまざまな性格特性・精神能力に対応した各ポイントの音量からプロフィールを作成して、自己中心性、儉約性、意欲性などの性格や職業適性を診断するための装置だった。言わば 18 世紀に一世を風靡した Gall の骨

\*12 神経の伝導速度: 神経の伝導速度を最初に計測したのはヘルムホルツだが、当時の認識でいえば、彼が測ったのは「神経の伝導速度」というよりは「電気を利用して測った神経流体の伝導速度」だった<sup>50)</sup>。

相学の電気版であり<sup>39,40)\*13</sup>、何の科学的根拠も無かったが、大きな社会的関心を引き起こした。企業での人材採用の際に面接に代わる科学的資料として使われただけでなく、生理学、心理学、医学分野で *Diagnoscopy* を用いた研究もドイツ各地で行われた。Jena 大学で Berger の同僚だった Vogt らの尽力もあり、数年で信用を失った<sup>40)</sup>。

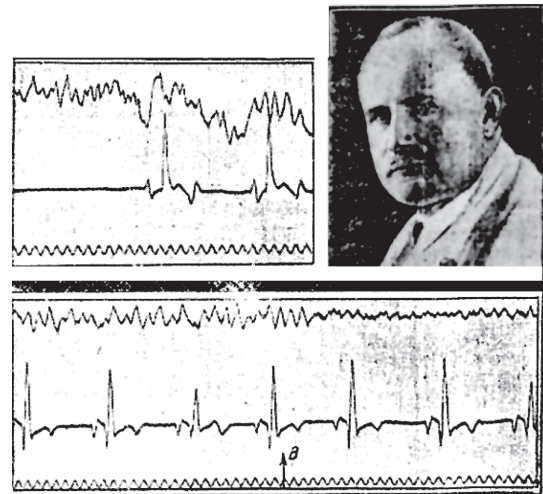
ほぼ同時期に、イタリアの精神科医 Cazzamalli は、シールドルーム内で送信機と受信機の間に被験者を置き、被験者が鮮明なイメージを浮かべたり、情動的なことを思い出したりすると、受信機からパチパチという音 (crackle) が聞こえることを報告した。そして情動などの強い精神活動に伴ってヒトの脳からは数十～数百 MHz の電磁波が放出され、これがテレパシーの正体であると主張した<sup>41)</sup>。上述のように Berger の 1929 年の論文が、最初に短く引用されたのが 4 年後だったのとは対照的に、Cazzamalli の論文は 2 年以内にフランス語、ドイツ語、英語に翻訳され、ヨーロッパ各国の無線技術者、実験心理学者、哲学者などによって活発な議論が行われた<sup>42)\*14</sup>。

Berger の脳波に関する論文は、これらの疑似科学が登場した後に出版された。Berger 自身は第一報の考察で *Diagnoscopy* を「自分が記録している脳波とは無関係である」と述べ、非常に慎重な解釈をしている<sup>10)</sup>、またその後の論文で Cazzamalli が報告した現象との関連も保留・否定している<sup>20,23,43)</sup>。しかし当時のマスメディアは Berger の研究を *Diagnoscopy* や Cazzamalli の研究と同列のものとしてセンセーショナルに扱った (図 5)<sup>39)</sup>。このことも、一般社会はともかく、研究者の間で Berger の論文を胡散臭いものとみなす傾向を助長したと思われる。

Borck は、*Diagnoscopy* や Cazzamalli のテレパシーに代表される、電波・電気と精神に関する当時の社会

\*13 *Diagnoscopy* と *Psychograph* : ドイツで *Diagnoscopy* が流行した数年後に、アメリカでも Gall の骨相学 (phrenology) に基づく *Psychograph* が一世を風靡した<sup>60)</sup>。どちらも科学を装った怪しげな装置で性格や精神能力を測定し、職業適性の診断を主目的とした似非科学だった。ドイツは第一次大戦の巨額の賠償金支払いに起因する経済的困窮、アメリカは 1929 年 10 月の株価の暴落を端緒とする大恐慌という共通の経済状況があり、職業適性の診断が社会的に大きな関心事だったとはいえ、奇妙な一致ではある。

\*14 Cazzamalli と超心理学 : Cazzamalli は、1937 年にイタリアで超心理学に関する学会 (the Italian Society of Metapsychics) を設立している<sup>61)</sup>。



Eine sensationelle deutsche Entdeckung: Die elektrische Niederschrift der Gedanken  
Die elektrische Schrift des Hirns (oben des tierischen, unten des menschlichen) und der  
Entdecker Prof. Dr. Hans Berger

(ドイツでの驚くべき発見: 思考の電氣的記録  
脳の電氣的記録 (上段が動物, 下段がヒト) と  
発見者の Hans Berger 教授)

図 5 1930 年 8 月 3 日のドイツの日報で紹介された Berger の研究

枠内は、本稿の著者による和訳。よく見ると、図下段のヒトの脳波は図 2 C と同じである。しかしこの記事では、上向き矢印のところで“B”という文字を思い浮かべたときの脳活動として紹介された (図 2 C の説明を参照のこと)。文献 39 より引用。

の狂騒とも言える状況の背景として、19 世紀末から 20 世紀初頭の無線通信 (特にラジオ) と電灯を始めとする電気の日常生活への急速な普及を指摘している<sup>9,39)</sup>。当時の社会の電化および無線通信に関する出来事を辿ると (資料 1),

- Bell による電話機の発明が 1876 年,
- Edison による電球の発明が 1879 年,
- Marconi による大西洋横断無線通信が 1901 年,
- 最初のラジオ放送 (アメリカ) が 1906 年,
- 最初の商業ラジオ放送が 1920 年

だった。電気あるいは電波という目に見えないエネルギー・波によって、ガス灯よりもはるかに明るい電灯が灯り、人の声や信号が一瞬にして数千キロも離れた他人に伝わる。そして前項で述べたように、18 世紀のガルバーニ以降の神経生理学の成果として、それはまだ脊髓反射や神経線維のレベルではあったが、脳や身体も同じ「神経インパルスに付随する電氣的な信号によって動いている」ことが明らかにされた。当時の人びとが、電気・電波を上述べた「神経の中を流れる



動物精気の実体」として捉えたことは想像に難くない。後述する Berger の死を伝えた New York Times の記事の文章が, “Professor Hans Berger of the University of Jena, who discovered the effects of electrical manifestation on the human brain, ... (中略). About sixteen years ago Dr. Berger attached small electrodes to the skull and wired them to a modified radio receiver ...” (下線は著者による) だったことは, 当時の社会がラジオ・電波と脳活動との関連をどのようにとらえていたかを雄弁に物語っている<sup>44)</sup>。

#### 4-3 $\alpha$ ブロッキングおよび心電図・筋電図との対比

安静閉眼時に出現する  $\alpha$  波が, 開眼や精神活動によって減弱して低振幅の  $\beta$  波に変わる, いわゆる  $\alpha$  ブロッキングも当時の神経生理学にとって受け入れがたいものであった。シナプス後電位が空間的・時間的に加重されて脳波を構成するという考え方がなかった当時の神経生理学にとって, 脳活動を反映する電気的活動ならば, 刺激によって神経線維上に活動電位が発生するのと同じように, 精神活動によって脳波の振幅は増大するはずだった<sup>45)</sup>。

また心電図は Einthoven が 1903 年に心電計を開発し (1923 年にノーベル賞受賞), 既に臨床に使われていた。心電図は周波数は遅いが活動電位と波形が類似し, しかも心臓の拍動と一致していた。また筋電図も筋活動によって振幅が増大した。それに対して, 脳波はあまりに律動的で, 精神活動時ではなく閉眼安静時に最大振幅 ( $\alpha$  波) を示すことも, 脳波がアーチファクトではないかと疑われた原因の一つだった<sup>45)</sup>。このことは Berger にとっても悩ましい結果の一つだったと考えられる。エネルギー保存の法則に従えば, 精神作業によって脳血流が増大し, 脳温が上昇するならば, 電気的エネルギーである脳波の振幅も上がらなければならなかった。したがって開眼や精神作業によって (脱同期して) 脳波の振幅が下がることは, 大きな矛盾だった。Berger もこの点に関しては, おそらくは Pavlov による条件反射の研究の影響と思われるが<sup>\*15)</sup>, 開眼に伴う  $\alpha$  波  $\rightarrow$   $\beta$  波の変化は脳での抑制過程の反映だろうという苦しい解釈をしている<sup>8,46)</sup>。

#### 4-4 その他の理由

上記の三つの理由に加えて,

- Berger は当時の神経生理学や電磁気学の専門的知

識が乏しかったために, 論文の記述が曖昧だったり精密さを欠いているところがあった<sup>34)</sup>

- Berger の脳波に関する論文は全てドイツ語で書かれていたため, 英語圏, 特にアメリカの研究者の目に触れる機会が少なかった<sup>36)</sup>
  - Berger は 1919 年に Otto Binswanger の後継者として Jena 大学精神科の教授になったが, その際に同僚だった Wilhelm Strohmeyer との間に熾烈な後継者争いがあった。その争いの後遺症として, Jena 大学医学部でも孤立していた<sup>47-49)</sup>
- ことも影響しているかもしれない。(その 3 に続く)

#### 謝辞

執筆にあたり, 橋本文彦氏 (大阪市立大学経済学部・哲学), 加藤誠氏 (情報通信研究機構) の協力を得た。文献や資料を無償で送ってくれた Ms. Sabine Weiß (ドイツ, イェーナ在住のツアーガイド) と Prof. G. Pancaldi (Università di Bologna, Italy) に感謝する。

#### 文献

- 1) Ahmed OJ, Cash SS: Finding synchrony in the desynchronized EEG: the history and interpretation of gamma rhythms. *Frontiers in Integrative Neuroscience* 7: 1-7, 2013.
- 2) Lerner AJ: Some Liverpool contributions to neurology and medicine. *The Bulletin of the Liverpool Medical History Society* 20: 79-84, 2008-2009.
- 3) Sykes AH: Dr Richard Caton (1842-1926): Medicine, education and civic affairs in Liverpool. *The Bulletin of the Liverpool Medical History Society* 22: 11-18, 2010-2011.
- 4) Coenen A, Zayachkivska O: Adolf Beck: A pioneer in electroencephalography in between Richard Caton and Hans Berger. *Advances in Cognitive Psychology* 9: 216-221, 2013.
- 5) Coenen A, Zayachkivska O: *Adolf Beck, Co-founder of the*

\*15) Berger と Pavlov: ほぼ同時期に Berger と Pavlov の両者に会っている Walter によれば, Pavlov は Berger の脳波に対して興味を示さなかった。以下の Walter による Pavlov に関する記述はパブロフの研究を考える上で非常に興味深い。「私 (著者注: Walter) は, 脳の活動を観察する二つの方法, 彼 (著者注: Pavlov) の方法とベルガーのそれ (著者注: 脳波) との間に何らかの関係をみとめるかどうかを質問した。その時すでに, 私は, ベルガーの方法が何らかの方法で, 反射の条件づけがどのようにして脳の中で効果を生ずるかという点についてのいとうちを与えるのではないかと考えはじめていたのである。しかし, パブロフは現象の裏を調べようとする望みを示さなかった。彼は脳現象のメカニズムには少しも興味を示さなかった。彼が興味をもったのは, 起ってしまったこと, すなわち現象であり, 結果であったのである。それがいかにして起るかということではなかった」<sup>34)</sup>。

- EEG: An Essay in Honour of His 150th Birthday*. Department of Physiology of the Jagiellonian University Medical College, pp 1-34, 2013.
- 6) Collura TF: History and evolution of electroencephalographic instruments and techniques. *J Clin Neurophysiol* 10: 476-504, 1993.
  - 7) Edwards E: Electrocortical activation and human brain mapping. Dissertation, University of California, Berkeley, 2007.
  - 8) Gloor P: Hans Berger and the discovery of the electroencephalogram. In Gloor P (ed). Hans Berger on the electroencephalogram of man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl* 28: 1-36, 1969.
  - 9) Borck C: *Hirn Ströme. Eine Kulturgeschichte der Elektroenzephalographie*. Wallstein Verlag, Göttingen, 2005.
- ※以下の14本のBergerの脳波に関する論文は、Gloor P<sup>8)</sup>の英訳による。第一報のBerger, H. (1929)は、ドイツ語の原典および山口：精神医学 23: 829-838, 951-962, 1073-1081, 1981の和訳も参考にした。
- 10) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 87: 527-570, 1929.
  - 11) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen II. *Journal für Psychologie und Neurologie* 40: 160-179, 1930.
  - 12) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen III. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 94: 16-60, 1931.
  - 13) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen IV. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 97: 6-26, 1932.
  - 14) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen V. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 98: 231-254, 1932.
  - 15) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen VI. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 99: 555-574, 1933.
  - 16) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen VII. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 100: 301-320, 1933.
  - 17) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen VIII. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 101: 452-469, 1933.
  - 18) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen IX. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 102: 538-557, 1934.
  - 19) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen X. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 103: 444-454, 1935.
  - 20) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen XI. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 104: 678-689, 1936.
  - 21) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen XII. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 106: 165-187, 1937.
  - 22) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen XIII. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 106: 577-584, 1937.
  - 23) Berger H: Über das Elektrenkephalogramm des Menschen XIV. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 108: 407-431, 1938.
  - 24) La Vaque TJ: The history of EEG Hans Berger: Psychophysiological. A historical vignette. *Journal of Neurotherapy* 3: 1-9, 1999.
  - 25) 山口成良：Hans Bergerの性格と死。日本病跡学雑誌 23: 15-19, 1982.
  - 26) Jasper HH: Herbert H. Jasper. In Squire LR (ed). *The History of Neuroscience in Autobiography*. Vol. 1. Society for Neuroscience, Washington DC, pp 318-347, 1996.
  - 27) Borck C: Between local cultures and national styles: units of analysis in the history of electroencephalography. *Comptes Rendus Biologies* 329: 450-459, 2006.
  - 28) Gasser HS, Graham HT: Potentials produced in the spinal cord by stimulation of dorsal roots. *Am J Physiol* 103: 303-320, 1933.
  - 29) Brazier MAB: *A History of the Electrical Activity of the Brain. The First Half-Century*. Pitman Medical Publishing, London, 1961.
  - 30) Brazier MAB: The EEG in epilepsy. A historical note. *Epilepsia* 1: 328-336, 1959. (三原 博訳：てんかんの脳波—歴史的覚え書き。弘前大学医学部神経精神医学教室同窓会 59-63, 1982.)
  - 31) Brazier MAB: *A History of Neurophysiology in the 19th Century*. Raven Press, New York, 1988.
  - 32) Eccles JC, O'Connor WJ: Responses which nerve impulses evoke in mammalian striated muscles. *J Physiol* 97: 44-102, 1939.
  - 33) Eccles JC, Katz B, Kuffler SW: Nature of the "endplate potential" in curarized muscle. *J Neurophysiol* 4: 362-387, 1941.
  - 34) Walter WG: *The Living Brain*. Gerald Duckworth & Co. Ltd, London, 1953. (懸田克躬, 内菌耕二訳：生きている脳。岩波書店, 東京, 1959.)
  - 35) Barbara JG: The physiological construction of the neurone concept (1891-1952). *C R Biologies* 329: 437-449, 2006.
  - 36) Lindsley DB: Average evoked potentials—achievements, failures and prospects. In Donchin E, Lindsley DB (eds). *Average Evoked Potentials. Methods, Results, and Evaluations*. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, pp 1-44, 1969.
  - 37) 上田理沙, 杉山滋郎：19世紀末の“神経インパルス”—その本性と研究方法。科学史研究第II期 42: 76-87, 2003.
  - 38) Bennett MR, Hacker MS: *History of Cognitive Neuroscience*. Wiley-Blackwell, 1998. (河村 満訳：脳を繙く—歴史でみる認知神経科学〈神経心理学コレクション〉。医学書院, 東京, 2010.)

- 39) Borck C: Electricity as a medium of psychic life. Electro-technological adventures into psychodiagnosis in Weimar Germany. *Science in Context* 14: 565-590, 2001.
- 40) Borck C: Mind and brain in Weimar culture. In *The Cultural Alchemy of the Exact Sciences: Revisiting the Forman Thesis at the University of British Columbia*. Vancouver, pp 1-16, 2007.
- 41) Cazzamalli F: Phenomenes telepsychiques et radiations cerebrales. *Revue Metapsychique* 4: 213-233, 1925. (Buchner E, Bruck C (transl). Ausstrahlung von "Gehirnwellen" bei telepsychischen Phänomenon. *Zeitschrift für Parapsychologie* 1: 65-76, 1926.)
- 42) Borck C: Electrifying the brain in the 1920s. In Bertucchi P, Pancaldi G (eds). *Electric Bodies. Episodes in the History of Medical Electricity*. Universita di Bologna, Dipartimento di Filosofia, Centro Internazionale per la Storia delle Università e della Scienza, pp 239-264, 2001.
- 43) Berger H: *Psyche*. Verlag von Gustav Fischer, Jena, 1940.
- 44) Hans Berger, Discoverer of electrical 'Brain Waves' in humans was 68. *The New York Times*, June 10, 1941.
- 45) Kiloh LG, McComas JW, Osselson JW, et al: *Clinical Electroencephalography*. forth edition. Butterworths, 1981. (中川泰彬 監訳: 臨床脳波学 第4版. 西村書店, 新潟, 1986.)
- 46) Kroker K: *The Sleep of Others and the Transformations of Sleep Research*. University of Toronto Press, Toronto, 2007.
- 47) Ginzberg R: Three years with Hans Berger. A contribution to his bibliography. *J Hist Med Allied Sci* IV: 361-371, 1949.
- 48) Demmler A: Wilhelm Strohmayer (1874-1936) Ein Wegbereiter der Kinder- und Jugendpsychiatrie. Dissertation, Zur Erlangung des akademischen Grades doctor medicinae (Dr. med.), Vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2003.
- 49) Millett D: Hans Berger: From psychic energy to the EEG. *Perspect Biol Med* 44: 522-542, 2001.
- 50) Fisch C: Centennial of the string galvanometer and the electrocardiogram. *J Am Coll Cardiol* 36: 1737-1745, 2000.
- 51) 眞下俊一: 電気心働計の解説 その一 弦電流計. 日本循環器病學 5: 2-3, 1939.
- 52) 岡島光治: 心電図 ME の 100 年—その足跡と展望—. *BME* 4: 4-12, 1990.
- 53) Einthoven W: The string galvanometer and the measurement of the action currents of the heart. "The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1924". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 1 Apr 2015. [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/medicine/laureates/1924/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1924/) よりダウンロード.
- 54) Grass AM: *The Electroencephalographic Heritage until 1960*. Grass Instrument Company, 1985.
- 55) 田辺福德: 心電計渡来. 心臓 22: 361-361, 1990.
- 56) Jung R, Berger W: [Fiftieth anniversary of Hans Berger's publication of the electroencephalogram. His first records in 1924-1931 (author's transl)]. *Arch Psychiatr Nervenkr* 227: 279-300, 1979.
- 57) 杉 晴夫: 生体電気信号とは何か 神経とシナプスの科学. 講談社, 2006.
- 58) McComas A: *Galvani's Spark—The Story of the Nerve Impulse—*. Oxford University Press, 2011. (酒井正樹, 高畑雅一訳: 神経インパルス物語—ガルヴァーニの火花からイオンチャネルの分子構造まで—. 共立出版, 東京, 2014.)
- 59) 酒井正樹: 動物精気の実体はこうしてつきとめられた—4. 動物精気の実体—. 比較生理化学 14: 151-168, 1997.
- 60) 宮内 哲: 脳を測る—改訂ヒトの脳機能の非侵襲的測定—. 心理学評論 56: 414-454, 2013.
- 61) Biondi M: Marco Levi Bianchini: A forgotten Italian supporter of parapsychology. *Journal of Scientific Exploration* 23: 323-328, 2009.
- 62) Roesler F: From single-channel recordings to brain-mapping devices: the impact of electroencephalography on experimental psychology. *History of Psychology* 8: 95-117, 2005.
- 63) Greim V: Validierung und Optimierung eines Algorithmus zur Detektion epileptischer Anfälle im Oberflächen-EEG. Doctoral Thesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2010.
- 64) Siemens & Halske AG: Elektrokardiographen zur Registrierung der Aktionsströme des Herzens, 1923.