

# 温泉における硫黄芝の形成と 硫黄細菌に関する研究

三好学，理学士，理学博士  
東京帝国大学理学部植物学教授

図版 XIV 付き

## はじめに

1895年8月に日光近郊の湯本温泉に滞在していたとき、この温泉に見られる硫黄芝の驚くべき形成に注目した。湯岳山麓の硫化水素の強い臭いのする温泉水が湧出している場所では、温泉水貯水池、廃水溝、植物由来のもの、石片などの中や上に並ぶ硫黄泉の流れが、数センチにも及ぶ房毛、細切れ、布切れの形の微細な硫黄の堆積物で覆われている(図1)。これを簡潔に「硫黄芝」と呼ぶことにする。この芝の形成は、水中に豊富に含まれる硫化水素から硫黄が分離し、温泉水の流れに生息するある種の細菌のゼラチン状物質に付着して完全に固まるために発生する。ヨーロッパ諸国の硫黄温泉に見られる「バルジン」<sup>1)</sup>と呼ばれる粘液塊である細菌ゼリーは、硫黄の外套で自分自身をコーティングする特殊な能力を持っており、そのプロセスは最も細い糸状の部分にまで及ぶ。

これらのゼラチン状細菌に加えて、*Beggiatoen* と *Thiothrixen* (Winogradsky) (図13、14) という硫黄細菌の一般的な形態もあり、これらは、少し温かい湧き水の流出部と、まだ  $H_2S$  を多く含んだ水が流れ込む小さな湖、湯ノ湖に生息している。

湯本周辺には、紅色硫黄細菌も少なくない。温水廃水が流入する溝や池に、桃色斑点状の細菌が見つかった。調査中に、これが *Chromatium Weissii* であるとわかった(図15)。

湯本の硫黄細菌叢を調査し、特に前述の硫黄芝の形成をより詳細に観察するために、私は今年の夏再び湯本を訪れた。そこで数日間の滞在中に、前回の訪問では見逃していた多くの他の種を発見し、また、その場所でしか実行できないいくつかの実験も行った。

昨年訪れた他の温泉でも同様の硫黄芝を発見したが、硫黄芝に関する私の研究はほぼ湯本温泉のみであったため、ここでは主に湯本温泉に関する報告をし、他の温泉での観察については簡単に触れるだけに留める。

本論文では硫黄芝の発生の性質についてのみ詳細に説明しており、硫黄芝を形成する細菌の形態学および生理学についてはほとんど注意を払っていないため、これについてはさらなる調査を今後したいと思う。

以下に示す紅色硫黄細菌に関する生理学的研究は、東京の植物学教室で実施された。

## 先行研究

温泉水の生物学的調査はドイツ、スイス、イタリアなどですでに数多く行われており、Carlsbad や Landeck などの温泉地の温泉水の中に下等藻類や細菌が存在することは、特に Cohn<sup>1)</sup>の研究からもわかるように、古くから知られていた。

これらの分裂して増える生物は温泉水中に生育し、その粘着性の菌体塊は硫黄、石灰、シリカ、酸化鉄などで覆われていることも知られている。

水中にマット状に広がる硫黄に関しては、これまで断片的な観察結果しかない<sup>2)</sup>。私の知る限り、文献には硫黄芝の形成に関する正確な情報はない。Certes と Garrigou<sup>3)</sup> は、Luchon の硫黄温泉を調査し、水温が 50° C になると「バレギネ」と呼ばれるぬるぬるした菌体塊が現れ、これは実際にはさまざまな生物によって生成されると報告している。一方、Peroncito と Valalda<sup>4)</sup> は、Piemont の Valdieri 温泉でマットまたは硫黄の広がり形成されることを報告している。マットは 55° C で明るい赤色になり、生物は含まれていなかった。マットが茶色になる低温でのみ、ゼラチン状の細菌と *Leptothrix Valderia* が緑色の生物とともに現れた。これらの観察結果やその他の観察結果は、硫黄芝の形成に直接関係しているようには見えないため、ここではこれ以上詳しく説明しない。

Winogradsky が「硫黄細菌」と名付けた生理学的に注目すべき生物に関する文献は、それほど多くない。より古い観察は、Perty<sup>1)</sup>、Ray Lankester<sup>3)</sup>、Cohn<sup>4)</sup>、Warning<sup>5)</sup>、Engler<sup>6)</sup>、Engelmann<sup>7)</sup>、Zopf<sup>8)</sup>などの論文で見つけることができる。しかし、硫化水素に関連する生物に関する徹底的かつ批判的な研究は Winogradsky<sup>9)</sup>によるもので、一連の長期間にわたる中断のない顕微鏡培養を通じてその形態を決定しようとした。<sup>1)</sup>

周知のように、紅色硫黄細菌に対する光の影響は、特に同化生理学の観点から、Engelmann<sup>2)</sup>によって詳細な研究の対象となった。

ある生物が酸素分圧の変化に対して示す驚くべき行動は、Winogradsky の研究からも明らかです。しかし、生物にとって非常に重要な硫化水素に対して生物が化学走性反応を起こすかどうか、また他の物質による化学的刺激にも敏感かどうかを決定するには、さらなる実験が必要です。

## 硫黄芝の形成

最も美しくよく繁茂した硫黄芝は、湯本の西端にある温泉（荒湯）と、そこから 50 歩ほど離れた硫黄水のプールで見つけた。湯本の道路の入り口近くにある鶴の湯では、それほど目立たない状態で見られる。すでに述べたように、硫黄芝は貯湯樽や木製の導水溝の外壁だけでなく、硫化水素を含む温泉が急速に流れ出る地面にも広がっている。硫黄芝が形成されるには、2 つの条件を満たす必要がある。まず、水が常に流れていること、次に、水深が非常に浅いこと。より深く流れている水では、芝生は水面のすぐ下にある物体にのみ形成され、溜まった水ではまったく形成されない。

硫黄芝が生える最高水温は荒湯泉の近くで 69.8° C であることが分かった。他の場所では、水温は 68.2°、67°、66.1°、61.5°、59°、58.2°、56°、55°、52°、51° C であった。硫黄芝が生える渋の湯と伊豆山温泉では、水温がそれぞれ 68° と 60° であ

った。したがって、硫黄芝が生える温度の限界は、約 70°<sup>1)</sup> から 51° の間であった。

硫黄芝の色は、場所によって異なり、流れの速いところではやや黄白色 (図 1) からほぼ純白に見えたが、流れが遅いほど黄色みが強くなった。私は、四角い木製の溝の裏側に、厚い黄色がかかった硫黄芝が覆っているのを見つけた。そこから大量の温泉水が流れ出て外壁に広がり白い硫黄フェルトで覆われていた。顕微鏡で調べたところ、この色の違いは硫黄の堆積物の形成方法によることがわかった。

ゆっくり流れる水では、細かくてかなり大きな結晶が、主に菱形八面体または単斜晶系の柱状になって形成され、光を強く屈折させて元素特有の色を呈した (図 2、5)。しかし、流れの速い水では、硫黄はきちんとした結晶構造でなく小さな非晶質粒子として沈殿する。これらの小さな粒子は光を強く反射し、全体をより白く見せる (図 3、4)。ただし、これら 2 つの極端な状態の間には、あらゆる中間段階があった。

ときどき見られる灰白色の硫黄芝は、汚れただけの普通の硫黄芝である。特に大雨のときに汚れがひどくなり、見事な硫黄芝が台無しになることもある。硫黄芝の長さは、流れの速さによって決まる。速い流れの水では、通常の間は約 3 ~ 5 cm である。遅い流れでは短く、約 0.5 ~ 2 cm だが、とても速い流れでは 20 cm 以上にもなる。これらの長くて黄白色の硫黄芝は、流れの方向に沿って多数の繊維が激しく揺れる動きを見せるときに特に優雅である。

もともと、硫黄芝はぬるぬるしたバクテリアゼリーによって木や石などの水中の固形物にしっかりと付着しているため、硫黄芝量が増えて引っ張られる力が増しても、付着点から簡単には剥がれない。針先を使って丁寧にほぐせば細い繊維に分離できる硫黄芝の小さな房を調べると、硫黄の結晶と非結晶性の粒からなる主要部分の周囲に、無数の鎌状のバクテリア細胞が付着しているのがわかる (図 6)。しかし、さらに詳しく調べると、硫黄芝の基質はもともとバクテリアゼリーで形成され、硫黄の堆積物は後から追加されたことがわかる。

このことは、硫黄芝の塊をスライドグラス上で乾燥させ、少量の二硫化炭素を加えることで簡単に証明できる。<sup>1)</sup> この方法で処理した標本では、硫黄の堆積物はほぼ完全に溶解しており、ヨウ素で染色すると、細菌細胞を含む残りのゼラチン状の塊がはっきりと浮かび上がる。ただし、検査には、わずかな硫黄の付着しか見られない硫黄芝片を選択するのが最善であった (図 2、6)。空気との自由な接触から多かれ少なかれ保護された場所でのみ見つかるこのような標本では、それ以上処理しなくても、細菌が埋め込まれた中央の無色のゼリー部分と、外側の所々に堆積した硫黄結晶をすぐに見ることができる。

個々の細菌細胞がぬるぬるしたゼリーによってまとめられているという事実は、顕微鏡下でカバーガラスを軽くたたか、吸取紙の切れ端をあてて水の流れを作ることによって実証できる。そのたびに細菌細胞は震える動きをするが、剥がれることはない。

ゼリーはぬるぬるした粘性があり、水から取り出すと小さなボールのように縮んだ。濃水酸化カリウム溶液と塩酸に部分的に溶解し、沸騰したお湯ではほとんど変化しなかった。ヨウ素を加えると黄色に、ヨウ素と硫酸を加えるとレンガ色から茶色に、赤珊瑚色素で鮮やかな赤に、Hanstein のアニリン混合物を加えると緋色に、コンゴ色素で赤に変わった。つまり、粘液物質の特徴的な様々な色反応が現れた。<sup>1)</sup>

粘液ゼリーには、円筒形、鎌形、またはビブリオのような、両側が丸い、長さ 6 ~ 28

$\mu$  (平均サイズは長さ 20  $\mu$ 、幅 1.4  $\mu$ ) のさまざまな寸法の無色の細胞が含まれており、糸状に伸びた *Leptothrix* のような細胞が含まれることもあった。

室温で観察すると、ビブリオ様細胞の一部は振動と回転運動を行っており、大きな細胞ではゆっくりと、小さな細胞ではより活発に動いているように見えた。A. Fischers<sup>2)</sup>の鞭毛染色法を使用した後、さまざまな個体の細胞の近くで完全に成長した鞭毛を観察することができた。

また、ゼラチン状の塊の中に他の種類の細胞も発見したが、これらの細胞は異なる場所で採取されたサンプルで異なる割合で存在していた。非常に小さな棒状の細胞は、その数が非常に多く、*Zoogloea termo* Cohn<sup>3)</sup>と命名された細菌のように見えた。細くて長い糸状の細胞は、その数は中程度であることが多かった。小さなスピロヘータのような細胞は、ゼラチン状のサンプルの中に散在しているのが見つかった。

したがって、ぬるぬるしたゼリー状の中に存在する細胞の形態は様々な特徴を有し、多くは *Zoogloea ramigera* Itzigsohn という種に類似していた。周知のように、Zopf<sup>4)</sup>は自身の研究に基づき、これを *Cladothrix dichotoma* Cohn とは異なる *Zoogloea* 種とみなした。私は、この細菌の増殖、およびおそらくその細菌が行っているゼラチン状体の形成について、まだこれ以上詳細な研究を行っていないため、このゼラチン状塊を形成している細菌が実際に Zopf が述べているようにこれらの *Zoogloea* の 1 つであり、したがって上記のすべての様々な大きさの形態が遺伝的に関連しているかどうか、または逆に、それが多数の異なる分裂菌の生息地と関係しているかどうかは、まだ不明である。これらの問題および他の形態学的疑問は、さらなる研究の課題であり、次の機会に取り上げるつもりである。

我々の鎌型の細菌細胞には、いかなる特徴的な内部構造も含まれていない。外部に硫黄粒子を持つ個体はごくわずかしか存在しない (図 6、7、8)。後者は球形で、比較的大きく、しっかりと付着しており、独特の黒色光沢があり、ほぼ等間隔で一列に並んでいる。一見すると、これらの硫黄粒子は細胞内に貯蔵されているように見え、場合によっては、その本当の位置を判断することさえ容易ではない。<sup>1)</sup>しかし、私はまだ、粒子が実際に細胞内に存在する明確な例を観察していない。もしそうなったとしても、硫黄含有個体が散発的に出現したからといって、我々の生物が硫黄細菌の一種であるとは言えないだろう。いずれにせよ、私はまだ、 $H_2S$  を含む温泉以外で問題の生物を発見していないので、 $H_2S$  の供給がこの細菌の生命活動に必要な可能性は高い。

このことから、我々の細菌が  $H_2S$  を吸収しているのではないかという疑いが生じる。一方では 51°C から約 70°C という異常な温度で活動する細菌細胞中の高いエネルギーと、他方では細菌の塊が薄い水の層によってのみ隔てられている過剰な酸素が、前述の酸化プロセスを容易に引き起こす可能性があることは理解できる。したがって、同じ時間で、酸素の供給が不十分な場合に最初に  $H_2S$  から硫黄を分泌しその後それを  $H_2S O_4$  に酸化する硫黄細菌 (例: *Beggiatoa*) よりも、はるかに多くのエネルギーが得られる。<sup>1)</sup>

伊豆山温泉には別の種類のゼラチン状細菌が生息しており、中央の温泉貯水池の外側に硫黄芝状の構造が形成されるのも観察した。硫黄芝状構造は白黄色で、長さは 1 ~ 2 cm だった (図 9)。鎌状の細胞は非常に小さく、長さ約 4  $\mu m$ 、幅 0.3  $\mu m$  しかなかった

(図 10、11)。細胞が小さいため、硫黄粒子が堆積しているかどうかは判断できできなかった。

それほど熱くはない酸性が強い硫黄温泉では、細胞壁にゆるく硫黄沈着物がある典型的な *Leptothrix* 種が繁殖していたが、ゼラチン状物質がないため硫黄沈物を形成していなかった。<sup>1)</sup>

細菌の表面に硫黄が沈着する仕組みを研究するため、まず硫黄を含まないゼラチン状の塊を探したがなかなか見つからず、ついに板で覆われた荒湯の導水溝で見つけた。導水管の上部、約 2 メートルの長さで、限られた空気の流入しかなかった場所で、69 ~ 69.8 °C の急流水の中に無色のゼラチン状の細菌が大量に発生し、木製の排水溝の内壁に密着しているのを確認した。さらに下流で水温が 68°C 以下に下がると、硫黄の沈着が場所によって始まり、特に水面近くのゼラチン状の塊に発生する。硫黄が完全に形成されたのは、貯水池から約 5 メートル離れた場所であった。

上で述べた一見無色透明のゼリーは、顕微鏡で調べたところ、表面に小さな硫黄の粒が散在していた。硫黄の塊が付着していないのは、空気が入らないため、 $H_2S$  の酸化が難しくなるためだと考えられた。同じ水をボトルに入れて蓋をせずに温泉水の流れの中に放置すると、硫黄がはっきりと沈殿しているのがわかった。さらに、次のような実験を行った。

1) 上記の場所から採取した硫黄を含まないゼリーの房を、同じ 69°C の温度で、空気にさらされた開いた導水管の別の部分に移した。ここでは、30 分後に硫黄の沈殿がはっきりと確認できた。

2) 硫黄を含まないゼリーの別の房を、硫黄沼の 59° C の温泉の中に置き、急流の水にさらした。わずか 1 時間後、ゼリーの塊は乳白色に変わりました。硫黄の出現は着実に増加し、1 時間後にはゼリーの房は硫黄で厚く覆われ、元の薄片状の形状とは大きく異なり、隣にもともとあった硫黄の房と区別できなくなった。

3) 数本の細い糸にデンプン糊、半凝固した卵白、濃縮ゼラチン溶液、または濃い接着剤を塗り、実験 2 と同じ場所に 4 時間浮かべた。これらすべての物体では、非常に微量の硫黄の付着しか起こらず、細菌ゼリー自体で起こった大量の硫黄の出現とは比べものになりません (実験 1)。

4) ゼラチン状物質で湿らせていない紙や糸の繊維では、1 時間後にはまばらな硫黄粒子しか見られません。

これらの実験から、試したいろいろな物質が硫黄で覆われる能力は、バクテリアゼリーのよりはるかに劣っていることがわかった。したがって、この硫黄の驚くべき付着は、ゼリー物質の特定の特性によるものであるに違いないことがわかった。この硫黄の付着は、ゼリー形成の最初から、流れの中で始まる必要があった。その後、ゼリーの塊全体が拡大すると、必ずそれに応じて硫黄層の体積が増加した。また、この硫黄のコーティングは最も細かい個々の繊維にまで及ぶため、上部が覆われていない湧き水の流出水で硫黄のないゼリーを探しても無駄である。必要な栄養素の供給が困難になることはないため、この濃い硫黄のコーティングがバクテリアの生命に有害である可能性は低く、むしろ、繊細なゼリーの塊が特定の外部の影響から保護されるという点で、このプロセスは有益である可能性がある。

前述のように、上部が激しく空気にさらされていない温泉水中に生育するゼリー状物質の場合は状況が異なる。そこでは、そのような状態が維持されている限り、硫黄は付着しない。

### 無色の硫黄細菌

湯本の温泉廃水中には、以下の一般的な硫黄細菌種が豊富に含まれる。

*Thiothrix nirea* (Rabenh.) Winog. [Beitr. p. 39. Plate. I. Fig. 7, 9, 10.] 硫黄沼やその他の場所 (20° ~ 29°C) では、水中の物体、特に植物の残骸に、硫黄の粒を含んだ灰白色の房を形成する。

*Thiothrix nirea* (Rabenh.) Winog. nov. var. *verticillata*. Fig. 13. 細胞はほぼ均一な太さで、2.5 ~ 3 μm である。付着点から集団で放射状に成長し、新しい細胞は成長した葉脈のようにさまざまな場所に再び放射状に配置され、特徴的な渦巻き状の外観になる。湯ノ湖 (22°C) では、苔の葉、藻類の糸などに生息する。

*Thiothrix tenuis* Winog. [Beitr. p. 40. Pl. I. Fig. 8, 11.] Fig. 14. *Thiothrix nirea* とともに、温泉水の流出中 (29° C) に生息する。

*Beggiatoa alba* (Vouch.) Trev. [Winog. Beitr. p. 23. Plate I. Fig. 1.] 溝や池 (16° -21° C) に生息する。

### 紅色硫黄細菌

湯本の硫黄沼の土壤表面はさまざまな色に染まっている。見事な白い硫黄芝のマットに加えて、青緑色の *Oscillaria* やその他の藻類の繁茂と、黄褐色の珪藻植物の泥が見られる。これらのカラフルな色に加えて、あちこちに、やや薄い赤色からカーマインレッドの斑点があり、かなり大きい。一見で、これらは *Chromatium* 種の生息地であることがわかる。よく見ると、湯本周辺の他の多くの場所でも見つかる。

次の種類の紅色硫黄細菌が見つかった。

*Chromatium Weissii* Perty. [Winog. Beitr. p. 97. Plate IV. Fig. 1.] Fig. 15. 最も一般的。1895年8月、自在湯のすぐ後ろの溝の底に大きな群落を見つけた。その表面は美しい赤い色でほぼ覆われていた。しかし、今年8月、同じ場所では痕跡も見つからず、前年には見られなかった別の溝に見られた。その場所の水温は23° Cから35° Cの間であった。

*Chromatium minus* Winog. [Beitr. p. 99. Taf. IV. Fig. 5.] 図 16. 硫黄沼の底。26°C。

*Chromatium vinosum* (Cohn) Winog. [Beitr. p. 99. Taf. IV. Fig. 6, 7.] 図 17. 上記と同じ場所。29°Cから42°C。

*Chromatium minutissimum* Winog. [Beitr. p. 100. Taf. IV. 図 8.] 図 18. 場所は上記と同じ。28°C。

*Thioderma roscum* nov. Gen. et Sp.<sup>1)</sup> 図 19. 細胞は球状で、長さ 2.5 μ、幅 1.5 μ、わずかに赤みがかっており、小さな硫黄の顆粒がある。細胞がまとまって、薄くて剥がれやすい鈍い赤紫色の皮のようになっている。さらにまとまることができる。自在湯の湿った土壤の草の葉、草の葉などに生息。27°C。

上記の 1 から 4 の種がすべて単独で見られることはほとんどなく、多くの場所で混在していた。

### Chromatium Weissii の生理学について

ここでは主に、我々の生物で実験的に証明しようとした走化性とその刺激について取り上げる。しかし、結果の説明に進む前に、培養について少し述べておく必要がある。

1895 年 8 月 26 日、私は *Chromatium* の群れを含む赤い水を少量の泥とともに現地から東京に持ち帰った。8 月 31 日に材料を検査したところ、元の美しい赤色はほとんど消えており、灰褐色の沈殿物に生きた細胞が少し含まれているだけだった。一連の培養を開始するために、私は 500 cc の開口部が広くて平らな容器を 3 つ選んだ。最初の容器には泥のみ、2 番目には泥に少量の硫酸カルシウム（石膏）を追加、3 番目には泥の代わりに硫黄芝（細菌ゼリー）を入れた。3 つの容器すべてに元の *Chromatium* を含む水を追加した後、蓋をして暗い戸棚に保管した。9 月 17 日、ボトル I の *Chromatium* は完全に新しい増殖が進み、容器内の水は赤く濁っていた。ボトル III では、硫黄芝上の特定の場所に鮮やかな色の斑点があるだけで、他の硫黄芝の白黄色の部分と明確に区別できた。ボトル II では、肉眼で見える増殖は発生していなかった。

その後、No. I と III では増殖は見られず、赤色は徐々に消えたが、11 月 8 日、No. II では、泥の外側、特にボトルの内壁に突然赤色が現れた。水は明らかに  $H_2S$  の臭いがし、鉛紙が茶色になった。赤い生物の発達は月の中旬まで毎日続き、その後徐々に減少したが、5 か月経っても群れは完全には死ななかつた。この間、私は、栄養不足や  $H_2S$  などの有害物質などの不利な条件にさらされた細胞が泥の中に沈んでいくのを観察したが、大量にビンの底と壁の間に特に蓄積し、鈍い赤い皮膜を形成した。

このようにして細胞はすぐには死滅せず、しばらくは生き続けた。なぜなら、私は、薄い  $H_2S$  水を加え、顕微鏡の鏡から反射した光に短時間さらした後、このような動かないがまだわずかに赤い色の細胞からなる膜を再び群がらせることに何度も成功したからである。以前は完全に動かなかつた細胞は、最初は塊の端で震える様に動き始めたが、これは次第に強く激しい動きに変わり、最後には塊から離れた。この現象は、膜の大部分が徐々にまた群がることのできるようになるまで続いた。これらの実験は、まだ色が赤く、細胞内部に硫黄がいくらか含まれている個体でのみ成功したが、色あせた硫黄のない標本で生命の兆候を誘発することはできなかつた。<sup>1)</sup>

Winogradsky の研究で示されているように、硫化水素は硫黄細菌の成長に重要な役割を果たすため、紅色細菌が  $H_2S$  によって化学走性刺激を受けるかどうか、また他の物質に対してどのように行動するかという疑問が生じた。そこで、上記の培養 II のサンプルを使用して、一連の実験が昨年秋に実施されました。よく知られている Pfeffer 毛細管法が使用された。<sup>2)</sup> 毛細管の口の直径は約 0.05 mm、長さは約 1 cm でした。材料を移すために、培養容器から直接紅色細菌を任意の量吸い上げることができる小さなガラスピペットを使用した。鮮やかな色と個々の細菌の大きさのおかげで、低倍率でも、投入された物質

に対する群れ全体の行動をはっきりと観察することができた。

硫化水素水。

A) 薄い溶液。鉛紙は薄茶色に変色した。

a) 細菌細胞が元の培養液の中にいた場合。

まず毛細管の口に強く集まり、次に毛細管の内部に浸透した。やがて細菌細胞は毛細管を離れ、外に出た。

b) 細菌細胞が普通の水の中にいた場合。

毛細管の口の周りに瞬間的に集まり、その後すぐに毛細管の内部に浸透した。浸透したものは (a) のようにすぐには外に出ず、逆にどんどん奥深くに浸透した。細菌細胞は初め普通の水の中にいたため「硫黄飢餓」に苦しんでいたため、 $H_2S$  の影響がより強かったと思われる。

B) 濃い溶液。鉛紙は茶色がかった黒に変色した。

細菌細胞は元の液体の中にいた。<sup>1)</sup> 最初は毛細管の口から一定の距離に集まった。細菌細胞は徐々に前進し、1 時間後には口の周り と 毛細血管の最初の部分に密集した群れが形成された。ゆっくりと、しかし常に前進する群れは、内部でより活発な動きで移動し、実験開始から 6 時間後には毛細血管内にすでに存在していた気泡に到達した。私は  $H_2S$  水で実験を繰り返し、同様の結果を得た。ただし、他の場合と同様に、この場合にも生物の刺激に対する感受性に紛れもないばらつきが存在し、このばらつきは、同様に強い  $H_2S$  水を使用した他の 2 つの同様の実験で矛盾した結果につながったことを強調する必要がある。

硝酸カリウム<sup>1)</sup>

0.3%。毛細管の周囲と上部空間に、瞬間的に強い集積が見られた (図 20)。そこに密集した細菌細胞が毛細管の内部にゆっくりと侵入する一方で、外の液体の中の細胞はさまざまな方向から毛細管に向かって移動し、数分間続き、外の液体には少数の細菌細胞しか残らなかった。実験開始から 1 時間後、侵入した個体は密集した約 1.5 mm の長さのゾーンを形成し、さらに前進し、3 時間後には毛細管の口から遠く離れた気泡に触れました (図 21)。湿潤チャンバーに保管された細菌細胞は、毛細管内で数日間生き続けた。<sup>1)</sup>

このように毛細管に引き寄せられた細菌細胞の数は、おおよそ計算できた。

我々の生物の平均サイズは約 10 から  $5\mu$  であり、ここで使用した毛細管の内径は 0.05 mm であるため、上記の実験で侵入した個体の実際の数 は 200 万以上であったに違いない。

毛細管内の細菌細胞ゾーン全体の移動速度は、1 時間あたり約 1.5 mm と非常に遅いものだった。しかし、それに比べて、通常の状態の個体の前進は非常に速く、1 秒あたり約  $80\mu$ 、つまり 1 時間あたり 288 mm だった。

多くの場合、毛細管の口の詰まりを引き起こす大量の細菌細胞の蓄積は、内部の刺激物質が外部の液体に迅速に混合していくことを困難にし、毛細管に侵入した細菌細胞にしばらくの間、刺激効果を発揮しつづけた。

0.5% では、0.3% と同様の細菌細胞の蓄積が達成されましたが、それほど強力

ではありませんでした。

1% は最初は反発効果がありましたが、その後、毛細管口から離れた場所に弱い蓄積を引き起こしました。

硝酸アンモニウム。

0.3%。毛細管口に蓄積。

硝酸カルシウム。

0.3%。毛細管口に弱い蓄積。

酒石酸アンモニウム。

0.5%。毛細管口の周囲に瞬間的に大量に蓄積。数分後、これは円形領域に整列し、その直径は毛細管の直径の数倍で、肉眼では赤い点として認識できた。その後、群れはゆっくりと毛細管の内部に進み始め、1 時間後には適度な深さまで進んだが、口の近くの外側にはまだ大量の細菌細胞が残っていた。おそらく、0.5% 溶液はすぐに浸透するには強すぎたため、内部溶液が拡散によってゆっくりと希釈されたときにのみ浸透が起こった。私は、生きた細胞を含むこのような毛細血管標本を、11 月 13 日から 12 月 16 日まで湿潤室に保管した。その最終日に同じ標本を検査したところ、毛細血管内の動かない細胞塊の赤色はまだ消えておらず、細胞内の硫黄含有物も部分的に残っていた。しかし、ランプからの反射光に 5 分間さらすと、細胞は次々と動き出し、毛細血管空間の奥に向かって泳ぎ始めた。一方、外部の液体に残っていた細胞は色あせ、もはや生きてなかった。

ロシュット塩（酒石酸カリウムナトリウム）

0.3%。毛細血管の開口部に強く蓄積し、最終的に内部に浸透した。

リン酸アンモニウム

0.3%。開口部に瞬間的に強く蓄積し、その後浸透した。

リン酸一カリウム（炭酸ナトリウムで中和）

0.3%。毛細管空間の上部に強く蓄積した。

0.8%。弱い反発。

塩化ナトリウム。

0.3%。非常に弱い引力。

0.8%。反発。

塩化アンモニウム。

0.3%。ほとんど無関係、または非常に弱い引力。

0.8%。反発。

硫酸アンモニウム。

0.3%。引力。

硫酸マグネシウム。

0.3%。ほとんど無関係。

炭酸ナトリウム。

0.3%。反発。

重炭酸ナトリウム。

0.3%。弱い反発。

塩素酸カリウム。

0.3%。反発。

ミョウバン。

0.3%。反発。

アンモニア（非常に濃い溶液）。

0.5%。反発。反発球の直径は毛細管の直径の約 5 倍でした。

ショ糖。

0.5%。毛細管開口部の周囲に弱い集積。

デキストロース。

0.5%。弱い引力。

乳糖。

0.5%。弱い引力。

アスパラギン。

0.5%。弱い引力。

グリセリン。

0.5%。ほとんど無関係。

ペプトン。

0.5%。開口部に集積。

肉エキス。

0.5%。開口部にかなり強い集積。

リンゴ酸。

0.5%。瞬間的に強い反発。そのときに形成された反発球は、直径が毛細管の直径の約 43 倍の、鋭い輪郭をしていた (図 22)。酸の作用域に偶然入った個体はすぐに外へ戻った。この現象は数時間続き、反発球は次第に不明瞭になっていった。

上記のテスト結果が明らかに示しているように、私たちの *Chromatium Weissii* は走化性刺激に非常に明確に反応した。私たちのテストで判明した最も優れた刺激物には、硫化水素、酒石酸塩、リン酸塩、硝酸塩（主に硝酸カリウム）があったが、これらは濃度がわずかに高くなるとすぐに反発を引き起こすため、より弱い濃度でしか誘引効果を発揮しなかった。他の研究<sup>1)</sup>で優れた刺激物であることが証明されている肉エキス、ペプトン、砂糖はいずれも、ここでは完全には効果がなかった。私が見つけた反発物質は、濃度または特定の条件によってのみ作用した。しかし、重要なのは、私たちの生物に特有な生活様式で重要な役割を果たす H<sub>2</sub>S に対する刺激性である。

他の自由に動き回る紅色硫黄細菌で同じ現象をテストする機会はなかったが、この特性がそれらにも見られることは間違いない。

私たちの紅色細菌は、接触刺激に対しても似た反応を示すことは否定できない。なぜなら、石膏や硫黄結晶、有機体の残骸などの固体の周りを転がる個体を私はよく観察しているからだ。沈殿したばかりの石膏結晶や洗浄した砂粒を加えることで、この現象を誘発す

ることができた。これは使用した物質の化学的刺激によるものではなく、一部の水中微生物で知られているように、接触刺激の一種によるものである。

私たちの細菌がスライドガラスやカバーガラスの表面に頻繁に定着して付着する傾向は、おそらく同じ原因に基づいており、この現象は *Paramacium*、*Colpidium*、その他の繊毛虫でよく観察される。小さな石膏結晶の周りに少数の個体がしばらく群がっているのを見たこともあるが、周囲から新しい個体が次々とやって来て、元々の小さな塊が中心の周りに成長して大きなクラスターを形成し、しばらくすると再び解けて群がるというケースもあった。この機械的刺激に群がる生物のクラスター形成がどれほど重要であっても、化学的刺激やその他の刺激によってもこのような細胞クラスターが形成される可能性があることを忘れてはならない。<sup>1)</sup>

### 結果の要約。

1) 湯本温泉（日光）と渋温泉の硫黄芝は、 $H_2S$  を含む温泉水（約  $51^\circ \sim 70^\circ C$ ）に含まれるぬるぬるしたバクテリアゼリーに硫黄が沈着して形成される。速い流れでは、硫黄は非晶質の粒子または不完全な結晶として沈殿するため、芝は黄色というより白っぽく見える。流れの遅い水では、硫黄はより大きな結晶（主に菱形八面体）として沈殿し、硫黄芝はより黄色くなる。

2) ゼリーの塊の中には、常に無数の鎌形のバクテリア細胞が見つかる。他にも様々な形態の細胞は、前者とともに、時々存在する。

3) 湯本では、無色の硫黄バクテリアが 4 種類、紅色の硫黄バクテリアが 5 種類見つけた。

4) 紅色硫黄細菌である *Chromatium Weissii* は刺激への化学走性があり、 $H_2S$ 、酒石酸アンモニウム、硝酸カリウム、リン酸アンモニウムなどの希薄溶液に強く引きつけられるが、これらの物質の高濃度や、他の特定の物質の特定の性質によって反発される。

5) *Chromatium Weissii* は接触によって刺激され、密集したクラスターを形成することがよくある。

### 付録。

大学の植物園の池から採取した *Brasenia peltata*（ジュンサイ）の根茎の一部と硫酸カルシウム（石膏）を入れた培養槽で、以下の種類の硫黄細菌が発生した。この培養槽は生物学教室の暗室に 3/4 年間放置されていた。

*Beggiatoa alba* (Vauch.) Trev. 腐った根茎に灰白色のコーティングが残っていた。

*Beggiatoa minima* Winog. [Beitr. p. 25. Taf. I. flg. 3] は、前の種と一緒に。

*Thiothlix nirea* (Rabe uh.) Winog. 薄片状の灰色の房として現れ、水面の真下に大量に垂れ下がっていました (図 23)。房状塊は長さ約 5 mm で、上部の無色のゼラチン状部分は、細菌塊とカルシウム結晶からなる薄い膜に付着していた。房状塊の下部は、糸状体の融合と、硫黄細菌種の定着により、より密度が高く、色が濃くなっていた。房状塊の形成は、内槽壁でも発生したが、最上層の水層に限定されていた。

*Thiosphaerion violaceum* nov. Gen. et Sp. (図 21)。細胞は球状楕円形で、大きさは約 2.5 ~ 1.8  $\mu$ 、紫色で、小さな硫黄の塊があり、ゼラチン状の物質でつながって、固く丸い集合体を形成した。群がることのできた。*Thiothlix nirea* の糸の上にいる。

*Thiosphaera glatinosa* nov. Gen. et Sp. (図 25)。細胞は球状楕円形で、大きさは 7  $\mu$  ~ 5  $\mu$  で、わずかに紫色で、無色のゼラチン状の物質で緩くつながって、集合体を形成した。硫黄酸化物は非常に豊富であった。群がることのできた。泥底の上にいる。

*Thioderma rubrum* nov. Sp. (図 26)。細胞は楕円形で、大きさは 4  $\mu$  ~ 2  $\mu$  で、わずかに赤色で、連なって集まって桃の花の色に見える。剥がれやすい皮状のものがある。群がることのできる。泥底の上にいる。

1896 年 9 月。

東京、帝国大学植物学教室。

~~~~~

### 図の説明。

図 1、24、25 は植物学教室 助手平瀬 作五郎氏が作成した。その他の図は私が作成した。

図 1。日光近郊の湯本の急流温泉から採取した硫黄芝の一部。ビーカーに浮かんでいる。元のサイズ。

図 2。球状のバクテリアが付着した、まだ硫黄で完全に覆われていないゼリー糸の断片。硫黄は菱形八面体に結晶化してる。倍率 420。

図 3。アモルファス硫黄が堆積した同様の断片。倍率 240。

図 4。硫黄粒子がまばらに付着したゼリー糸の先端。倍率 240。

図 5。緩やかな流れに生える硫黄芝から採取したゼリー糸の断片。硫黄はより大きな結晶の形で堆積している。倍率 240。

図 6。速い流れから採取した細い糸の断片。硫黄の沈着は、薄い細菌細胞上でも、ほとんどが無定形の顆粒の形で蓄積している。倍率 1000。

図 7。個々の細菌細胞。細胞には細胞壁に沈着した硫黄顆粒があり、細胞内部にあるように見えることもある。倍率 1000。

図 8、a、b、c。さまざまなサイズの細菌細胞。鞭毛は 2 つの個体にのみ見られる。倍率 1000。

図 9。伊豆山温泉の温泉流から採取した硫黄芝の断片。中央の黒い部分は硫黄の粒と硫黄の結晶で構成され、端の点はゼリーから出てきた細菌の塊を表す。倍率 420。

図 10。同様の硫黄芝の先端部分。プリズム八面体の硫黄結晶がはっきりとみえる。倍率 420。

図 11、a。2 本の長い *Leptothrix* のような糸がある前図と同様の先端部分。b。個々の細菌細胞。倍率 420。

図 12。さらに拡大した個々の細菌細胞。倍率 1000。

図 13. *Thiothrix nirea*, var. *verticilbita*。死んだ藻類の糸の上。若くて短い糸と、古くて長い糸が一緒になって、渦巻き状の分岐を形成している。倍率 420。

図 14. *Thiothrix tenuis*。硫黄結晶で部分的に覆われた 2 本の *Thiothrix nirea* の糸の上。倍率 420。

図 15. *Chromatium Weissii*。倍率 1000。

図 16. *Chromatium minus*。倍率 1000。

図 17. *Chromatium vinosum*。倍率 1000。

図 18. *Chromatiinn minutissimum*。倍率 1000。

図 19. *Thioderma roseum*。倍率 1000。

図 20。毛細管口の周囲と毛細管空間の最初の部分に、*Chromatium Weissii* の群れが大量に集まっている。毛細管には 0.8% の硝酸アンモニウムが含まれている。毛細管を挿入した直後に描いたものである。外部の液体にはまだ多数の浮遊細胞が残っている。横線はカバーガラスの端を表している。倍率 85。

図 21。毛細管に入れてから 8 時間後の同じ標本 (毛細管の位置がわずかに変化)。遊走塊は前進し続けた。倍率 85。

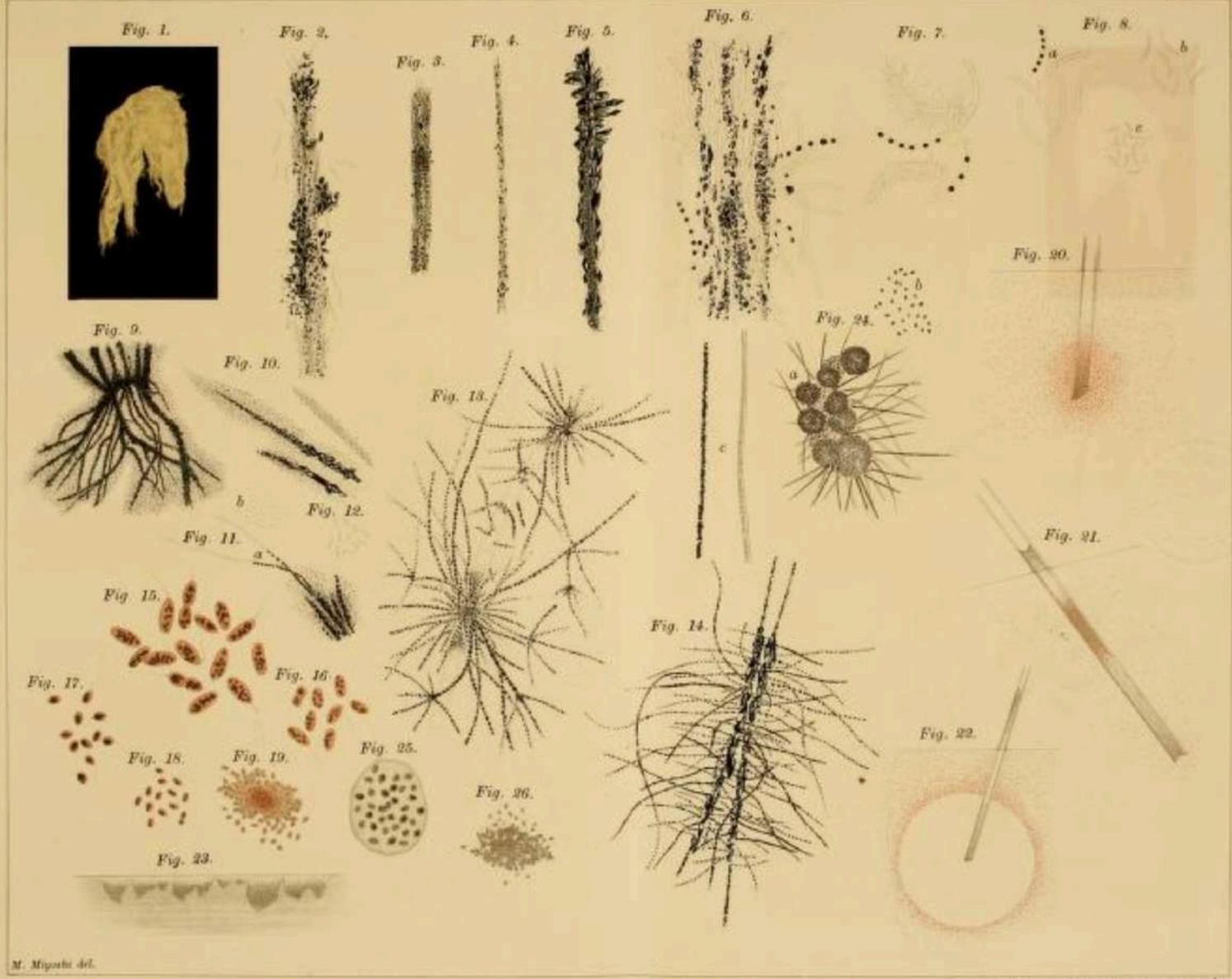
図 22。0.5% リンゴ酸によって *Chromatium Weissii* に形成された反発球。倍率 50。毛細管を挿入した直後に描いたもの。

図 23。水面下に垂れ下がった *Thiothrix nirea* の房の横顔。房は、上部の無色のゼラチン状部分が浮遊する細菌および石灰質結晶膜に付着している。糸状の構造の成長と硫黄細菌コロニーの定着により、下部はより暗く見える。元のサイズ。

図 24. *Thiosphaerion rioleceum*。a. *Thiothrix nirea* の糸状構造の上の球状コロニー。倍率 240。b. 個々の細胞。倍率 420。c. *Thiothrix nirea* の糸 2 本。1 本は硫黄の粒が密で、もう 1 本は硫黄が含まれておらず、もやっとした構造が見える。倍率 790。

図 25. *Thiosphaera gelatinosa*。緩く結合した細胞は、ゼラチン状の透明な基質に埋め込まれている。倍率 420。

図 26. *Thioderma rubrum*。細胞クラスターの断片。倍率 420。



M. Miyoshi del.

Lith. & Imp. the Tokyo Printing Co. Ltd.

Fig. 1.



Fig. 2.



Fig. 3.



Fig. 4.



Fig. 5.



Fig. 9.

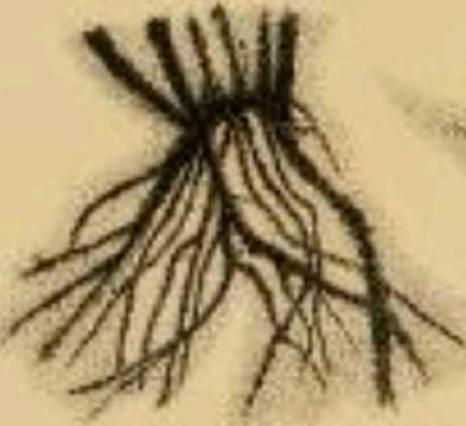


Fig. 10.



b

Fig. 12.

Fig. 13.



Fig. 6.

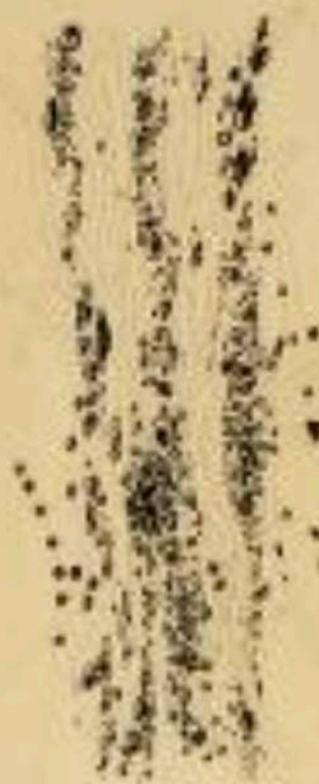


Fig. 7.

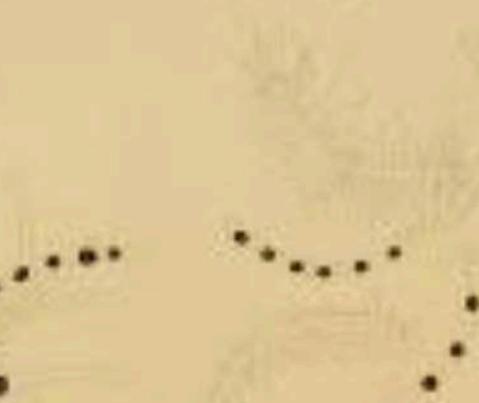


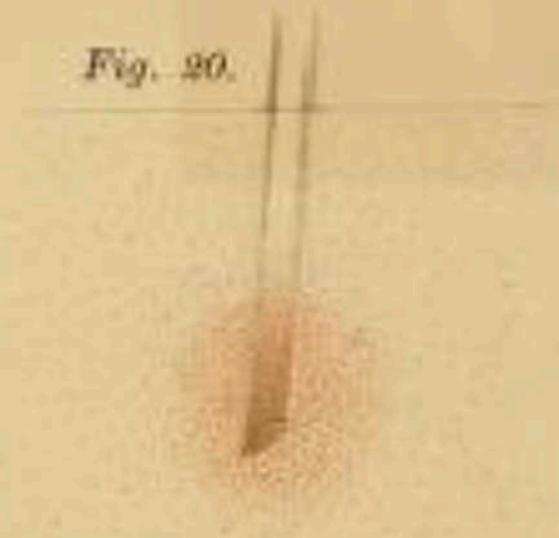
Fig. 8.



Fig. 24.

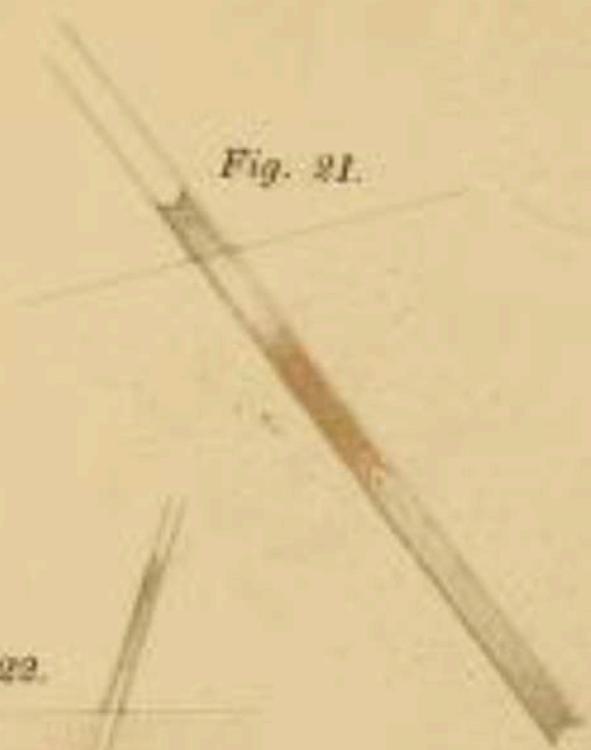
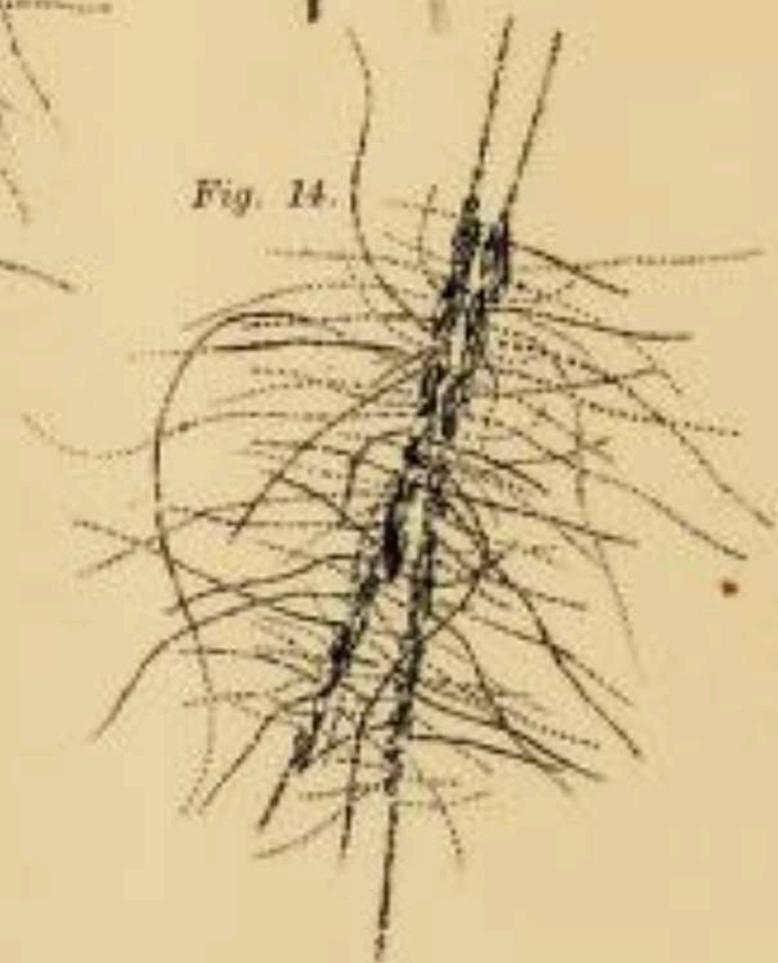


Fig. 20.



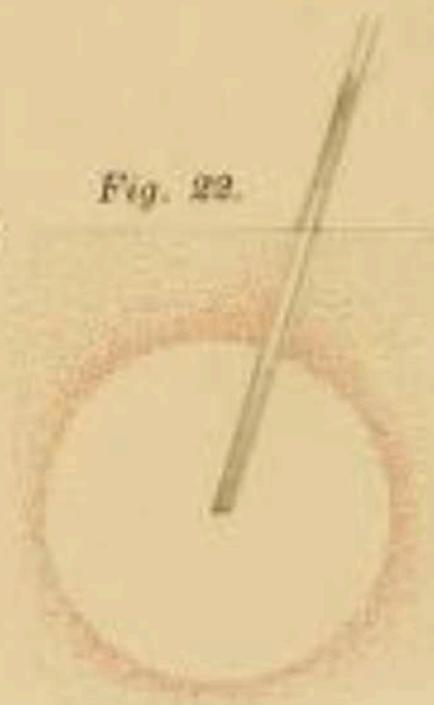


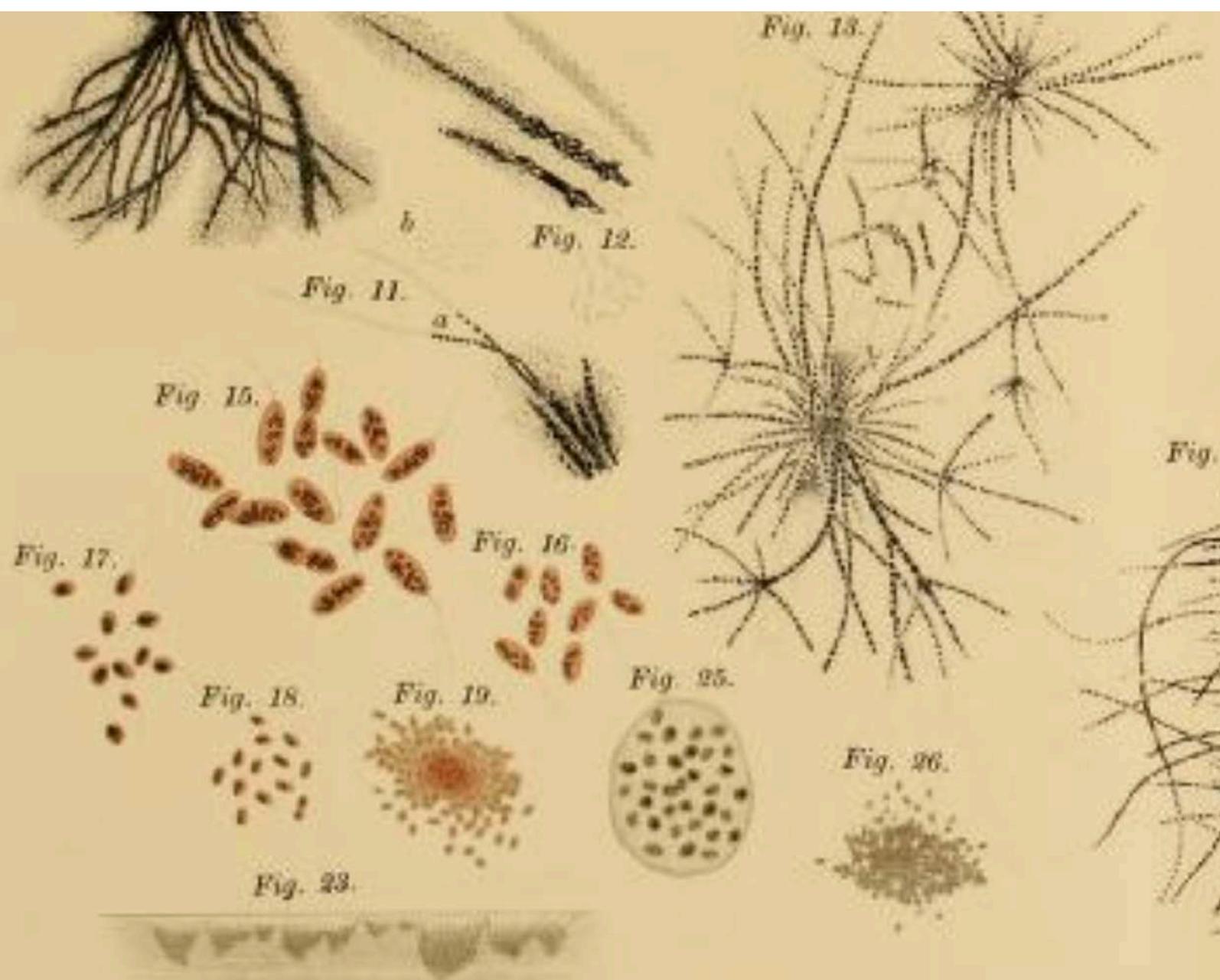
*Fig. 14.*



*Fig. 21.*

*Fig. 22.*





東京帝國大學紀要

理 科

第 十 冊

THE  
JOURNAL

OF THE

COLLEGE OF SCIENCE,

IMPERIAL UNIVERSITY OF TOKYO,

JAPAN.

VOL. X.



東京帝國大學印行

PUBLISHED BY THE UNIVERSITY.

TŌKYŌ, JAPAN.

1896-98.

MEIJI XXIX-XXXI.

## CONTENTS.

---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <p><b>On the Fate of the Blastopore, the Relations of the Primitive Streak, and the Formation of the Posterior End of the Embryo in Chelonia, together with Remarks on the Nature of Meroblastic Ova in Vertebrates.</b> (Contributions to the Embryology of Reptilia, V.). By K. MITSUKURI, <i>Ph. D., Rikuhakushi</i>, Professor of Zoölogy, College of Science, Imperial University, Tōkyō, Japan. (With Plates I-VI) ... ..</p> | 1   |
| <p><b>Ueber eine in Misaki vorkommende Art von Ephemera und über ihre Sporenbildung.</b> Von Dr. C. ISHIKAWA, Professor der Zoologie an der Kaiserlichen Universität zu Tōkyō. (Hierzu Tafeln XII und XIII.) ... ..</p>                                                                                                                                                                                                             | 119 |
| <p><b>Ueber das massenhafte Vorkommen von Eisenbakterien in den Thermen von Ikao.</b> Von MANABU MIYOSHI, <i>Rikushi, Rikuhakushi</i>, Professor der Botanik an der naturwissenschaftlichen Facultät der Kaiserlichen Universität zu Tokio. ... ..</p>                                                                                                                                                                              | 139 |
| <p><b>Studien über die Schwefelrasenbildung und die Schwefelbakterien der Thermen von Yumoto bei Nikko.</b> Von MANABU MIYOSHI, <i>Rikushi, Rikuhakushi</i>, Professor der Botanik an der naturwissenschaftlichen Facultät der Kaiserlichen Universität zu Tokio. (Mit Tafel XIV.) ... ..</p>                                                                                                                                       | 141 |
| <p><b>Die Entwicklung der Gonophoren bei Physalia maxima.</b> Von SEITARO GOTO, <i>Rikushi, Rikuhakushi</i>, Professor der Biologie an der Ersten Hochschule in Tokyo. (Hierzu Taf. XV.) ... ..</p>                                                                                                                                                                                                                                 | 175 |
| <p><b>Studies of Reproductive Elements. III Die Entwicklung der Pollenkörner von Allium fistulosum L., ein Beitrag zur Chromosomenreduktion in Pflanzenreiche.</b> Von Dr. C. ISHIKAWA, Professor der Zoologie an der Kaiserlichen Universität zu Tokyo. (Tafeln XVI und XVII.) ... ..</p>                                                                                                                                          | 193 |