



# 人工視覚の新視点

## 工学&再生医療 バイオハイブリッド型人工視覚

眼から脳へ、届かなくなったバトンをつなげる。

からだの中のことだから、難題ばかり。

でも、からだの中にはちゃんと

解決策が用意されていた。

網膜の働きと画像処理

### 計算高い眼

「ロボットだとか、ロケットだとか、そういうものを作るんだ、という思いで大学に入ったのですが……」

機械工学を専攻する新生入生として、八木透さんの志はしごくもったもなものだった。でも、大学1年生のときに教養課程で心理学の授業を受けたことから、その後の進路が大きく変わる。

「先生が教えてくれた『情報処理心理学入門』という本の中で、マッハバンドという現象が紹介されていました(図-1)。輝度が均一な面と、リニアに変化する面が繰り返されているだけなのに、人間の目にはバンド(帯)が見えてしまう。なぜそう見えるのかは長らく謎で、何らかの心理現象だろうということ片付けられていました。ところが、1950年代になってハートラインとラトリフが、カプトガニの眼の細胞を使ってバンドが見える原因を解明したのです」

ごく基本的な仕組みだけ紹介しよう

(図-2)。横に並んだカプトガニの網膜の細胞を4つだけ取り出して、光を当てる。このとき中央の2つの細胞は、つながっている次の細胞にプラスの信号を伝え、両側の細胞はマイナスの信号(抑制信号)を送る。「細胞によってつながり方が違う。つまり網膜の細胞でちょっとした演算を行うことにより、輪郭が強調されていたわけです。ハートラインとラトリフはこの仕組みを『側抑制』と名付けました」

彼らは側抑制の発見だけでは満足せず、その仕組みを数式で表した。「さらに僕がすごいなあと思ったのは」と八木さんが続ける。

「実はこの計算方法が現在、画像処理におけるエッジ検出処理などに応用されているのです。このように、心理的な現象を、細胞を用いて電気生理学的に説明することができる。さらにそれを数理モデルとして理解し、工業的に応用することもできる。これはおもしろいと思いました。機械工学をやっている場合じゃない、と(笑)」

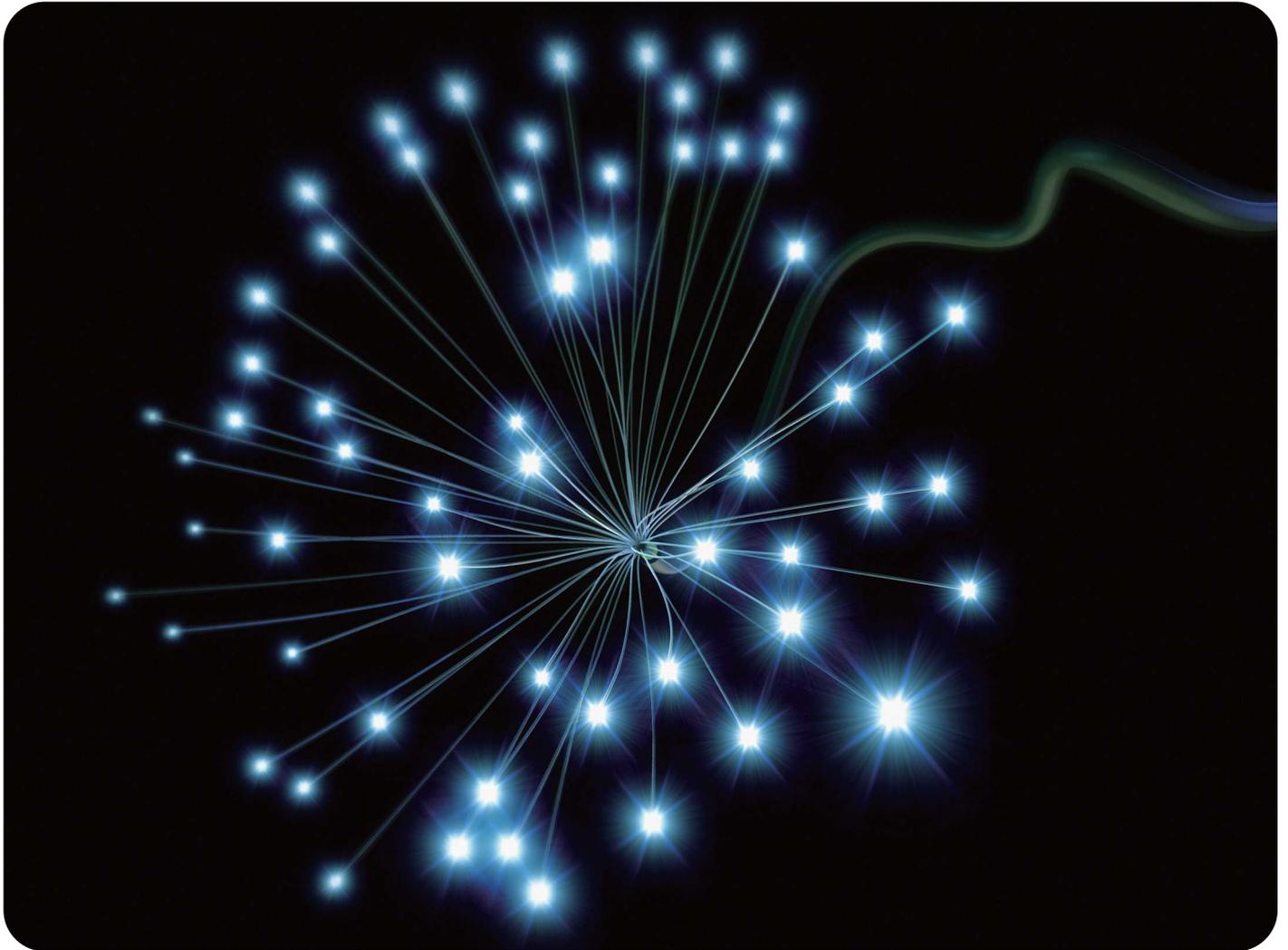
八木さんはやがて、人間の眼の動きを応用したロボットビジョンの研究で博士号をとる。すると今度は逆に「ロボットの



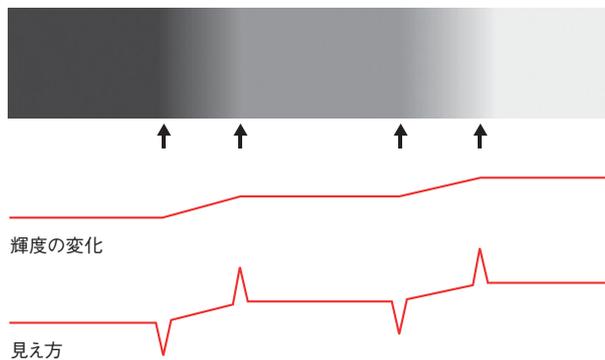
八木 透 (やぎ とおる)  
Tohru Yagi

東京工業大学  
情報理工学研究所  
情報環境学専攻  
准教授  
博士(工学)

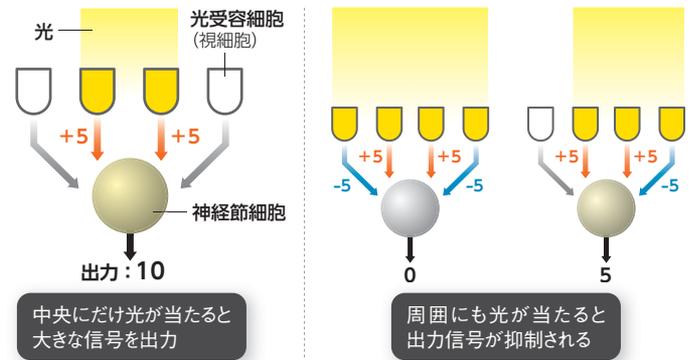
1996年、名古屋大学大学院博士課程修了、同年理化学研究所基礎科学特別研究員。1998年、名古屋大学助手。2001年、株式会社ニデック人工視覚研究所所長(NEDO「人工視覚システム」プロジェクト)。2005年、東京工業大学准教授、現在に至る。脳や視覚を中心とした医用生体工学、生体情報工学、ロボット・システム工学に関する基礎・応用研究に従事。



■ 図-1 マッハバンド 物理的にないはずの「帯」が見えてしまう

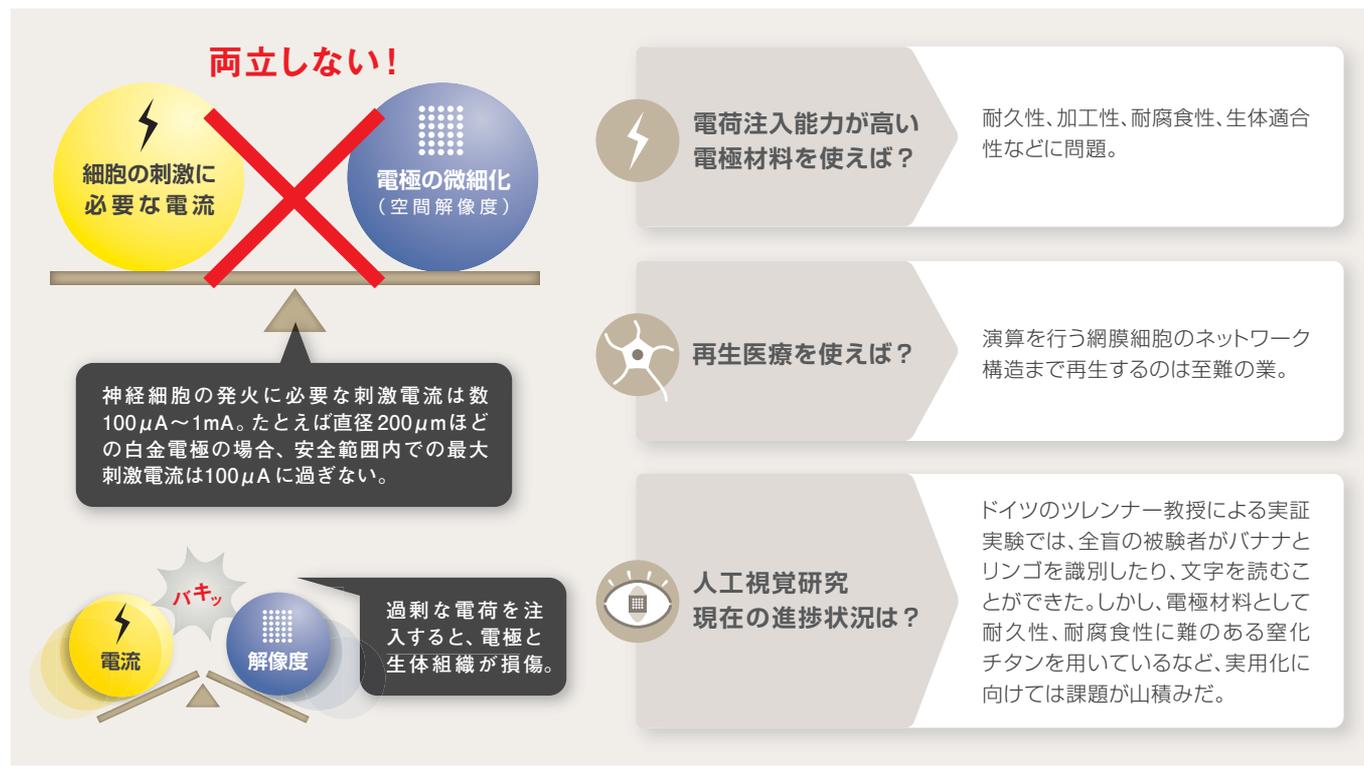


■ 図-2 網膜細胞による演算処理 「側抑制」による輪郭強調



### ■ 図-3 視覚の再建に向けた課題

人工視覚研究の歴史は古く、すでに1960年代には、人を対象に脳や網膜を電気刺激する臨床研究が始まっている。しかし、今日に至るまで「刺激電極の問題」という壁を乗り越えられていない。



眼を人間に使えないか」という発想が生まれる。人工視覚研究の始まりだ。

#### 刺激電極の微細化と電流しきい値

### 微細化を拒む身体

私たちはどうやって物を見ているのだろう。眼に届いた光は、網膜の一番奥にある視細胞で光から電気信号（神経信号）に変換される。この電気信号が、視神経を伝って脳の後方にある視覚野に送られ、映像として認識される。

この経路のどこかで障害が起ると、電気信号が脳に伝わらなくなり、物が見えなくなってしまう。人工視覚は、身体に埋め込んだ電極を使い、網膜から脳に至る経路中の神経に電気刺激（多局所刺激）を与えるシステムだ。この人工的な刺激により、光の点の情報が脳の視覚野に伝わり、映像が見えるようになる。

人工視覚による物の見え方はどのようなものだろう。網膜の中でも、最も細かな情報を脳に送っている中央部（直径2ミリ）に、100個（ $10 \times 10$ ）の電極を埋め込ん

だとする。電気刺激によって“見える”のは、目の粗い電光掲示板に「何かが映っている」程度の映像だ。これでも、何も見えないのとでは大きな違いなのだろう。でもどうせなら、同じスペースにもっと多くの電極を埋め込み、解像度を上げればいい。既存の技術でも、その程度の微細化は十分に可能なはずだから。デジタルカメラ、イメージセンサの知識のある方なら当然そう考えるだろう。「話はそうそう簡単ではないんですよ」と八木さんは言う。

「生体内での電気刺激は、電解質溶液中で行われるため、電荷の担い手は電子ではなく電解質イオンなのです。だからイメージセンサというよりも、むしろ電池の技術に近いわけですね」

電解質溶液中のプラス電極とマイナス電極に、それぞれマイナスイオンとプラスイオンが付いたり離れたりすることで、充電／放電が行われる。これが電池の基本的な仕組み。注入できる電荷量は、電極の表面積に比例する。つまり電極を微細化すると電荷量も減ってしまう。電気刺激が弱くなってしまふ。細胞は興奮せず、神経信号は発信されない（図-3）。

「神経組織の刺激に必要な電流のしきい値を超えるために、過剰に電荷を注入すれば、電気分解が生じてしまいます。電極やリード線の金属が溶けたり、電極の周囲からガスが発生して生体組織を損傷してしまうのです」

解像度を上げるために電極を微細化すると、刺激に必要な電流が得られない。無理に電流を高めようとすると、電極も身体も損傷してしまう。全面包囲のこの状態を、どう打開すればいいのだろう。

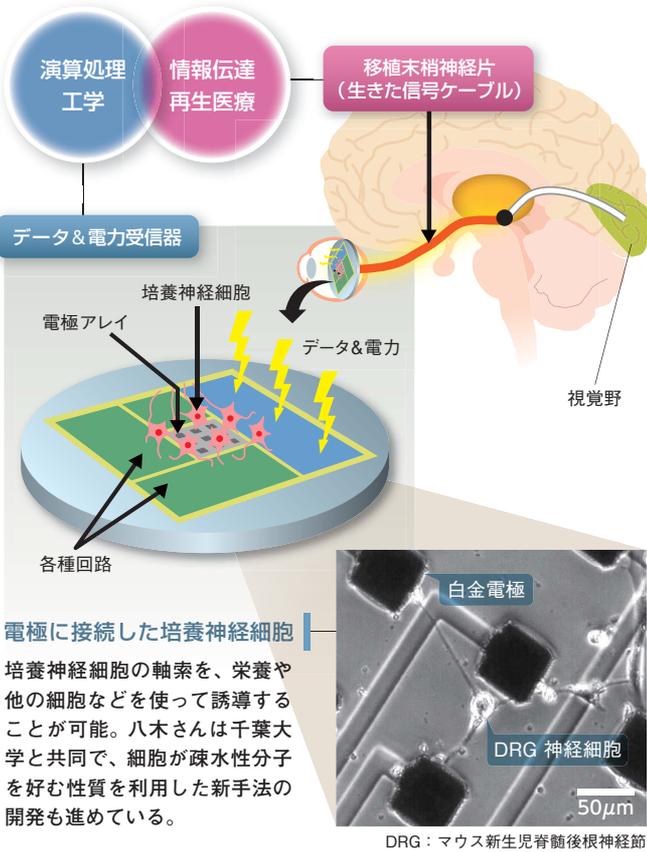
#### 生体機能を利用した細胞内刺激

### トンネルでつながる細胞

八木さんが人工視覚の研究を始めた1990年代半ば、すでに欧米では人を対象に、網膜や脳を電気刺激する研究がかなり進んでいた。「これはとても追いつけない。彼らとは違う発想でモノを作ってみよう」と八木さんは考えた。

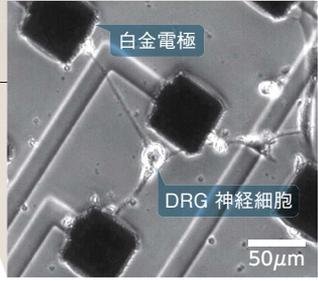
一方、1990年代後半から、生体の細胞を使い、傷んだ臓器や組織を修復・再生させる「再生医療」が大きな注目を集めて

■ 図-4 バイオハイブリッド型人工視覚



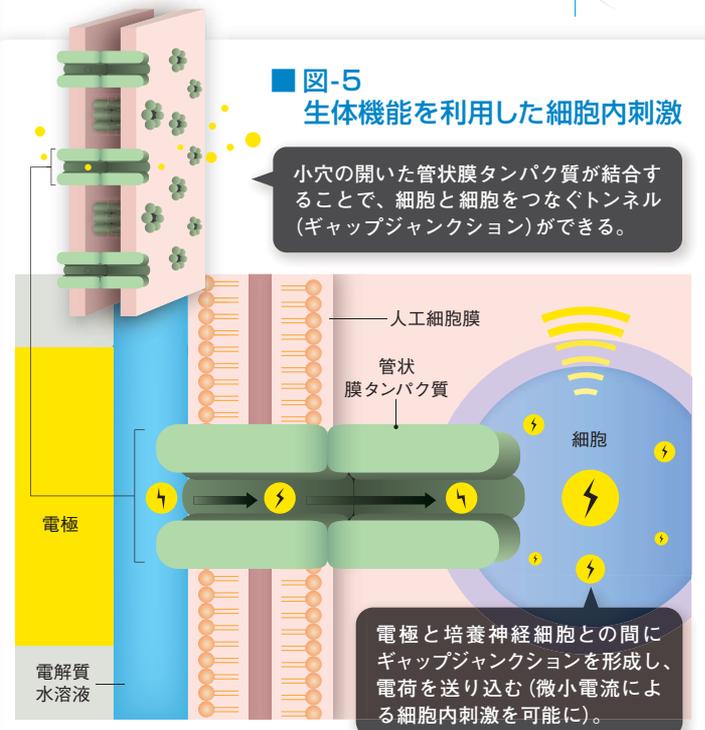
電極に接続した培養神経細胞

培養神経細胞の軸索を、栄養や他の細胞などを使って誘導することが可能。八木さんは千葉大学と共同で、細胞が疎水性分子を好む性質を利用した新手法の開発も進めている。

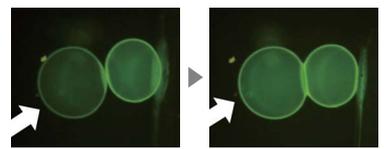


DRG : マウス新生児脊髄後根神経節

■ 図-5 生体機能を利用した細胞内刺激



八木さんは細胞内電極作成の前段階として、リン脂質の膜で作った2つの小胞をギャップジャンクションでつなぐことに成功。小胞間のイオンの移動も確認した。



いく。ゆくゆくは電気刺激に代わり、再生医療が視覚再建の主流となることも予想されていた。

このとき、八木さんが人工視覚研究を行うきっかけとなった大学1年生のときの驚きが——冒頭で紹介した網膜細胞の側抑制が、再び八木さんの背中を押す。

「網膜の細胞は単につながっているだけではなく、演算が行えるようなネットワーク構造を持っています。そこまで再生医療で作るのは至難の業、当分は無理でしょう。でもその部分は人工的なデバイス(半導体素子)で処理させることが可能です。あとは再生医療の力を借り、電極上に神経細胞を培養し、その軸索——ケーブル状のものを眼から脳に向けて誘導すればいいと考えました。視覚情報が伝わる道を作ってあげるわけです」

電極と「生きた信号ケーブル」との接続。従来の人工視覚技術と再生医療の融合。これが八木さんの提唱する『バイオハイブリッド型人工視覚』だ(図-4)。

バイオハイブリッド型の大きな利点は、大半の失明疾患に有効なこと。たとえば、国内で最も患者数が多い糖尿病網膜症や

緑内障による失明では、網膜神経節細胞が完全に変性するため、脳への神経路が遮断されてしまう。このような失明には、網膜刺激型や視神経刺激型の人工視覚は適用できない。でも、バイオハイブリッド型なら失われた神経細胞が再生医療によって補われるため、機能回復が期待できる。

さらに、バイオハイブリッド型は、従来の人工視覚技術の最大の壁だった“刺激電極のジレンマ”をも突破し得る可能性を持っている。電極を小型化すると、刺激に必要な電流のしきい値を超えられなくなってしまうというジレンマを。

「そもそもそれだけの電流が必要なのは、細胞の外から刺激しているためです。細胞の中から刺激すれば、しきい値を大きく下げることができます。ただ、ガラス管や金属などの針電極をブスッと刺すのでは細胞を傷つけてしまう。ほかに細胞内刺激を行う方法はないかと探しているなかで、ギャップジャンクションに着目しました」

細胞膜上にはもともと小穴の開いた管状の膜タンパク質が存在している。隣接する細胞の管状膜タンパク質同士が結合することで、トンネル構造のギャップジャ

ンクションが形成され、イオンなどの微小物質を細胞間でやりとりできるようになる。

「このトンネルを利用して電荷を送り込めば、細胞を傷つけることなく細胞内刺激を実現することができるはずだ」

電極上に人工細胞膜を形成し、管状膜タンパク質を導入する。これを培養神経細胞の管状膜タンパク質と結合させることで、電荷を送り込むトンネルが開く。

「山!」「川!」。細胞内に入る秘密の合言葉を手に入れるようなものだ(図-5)。

この技術が確立されれば、数マイクロアンペアの微弱電流を電極に流すだけで、視覚情報を発信できるという。

「膜タンパク質を持った電極がその第一歩になるのかもしれませんが、生物がもともと持つ機能をうまく融合したデバイスを開発していきたいと思っています。生物由来材料を有効に利用して、組織や器官の再生を助けたり、自然治癒力を誘導・促進できるようなデバイスを」

ギャップジャンクションではないけれど、八木さんの研究活動を貫いているのは生体への強い関心なのだろう。そもそもの始まりが網膜に対する驚きだったように。