

CASE 1

高分子の相転移エネルギーを 直接電気に変換

熱力学で習うギブス(Gibbs)エネルギーは、有用な仕事に変換できる「自由なエネルギー」と関連する。

石油と酸素からCO₂と水を作る際のGibbsエネルギー変化(燃焼熱)を用いてタービンを回せば電力が得られる。

燃料電池は、この反応エネルギーを直接電力に変換できる。

では、どんな種類の自由エネルギーを直接電力に変換できるだろうか。

水の融解エネルギーはどうか。

われわれは、ある種の相転移エネルギーを直接電力に変換できることを世界で初めて実証した。

電力は便利なエネルギーであり、なるべくCO₂を出さずに電力を作る必要がある。太陽光発電や地熱発電、潮汐発電、廃熱などの再生可能エネルギーを利用した発電は21世紀の重要課題である。熱を電気に変換する技術としては、半導体を用いた方法に加えて、近年では酸化還元反応を利用した熱化学電池に関する研究も注目を集めつつある。

熱化学電池は酸化還元反応を用いた熱電変換システムである。溶液中に酸化還元反応を示す物質を溶解しておく、酸化体と還元体がお互いに電子をやり取りする平衡が生じる。この平衡は他の平衡と同様にさまざまな条件の変化により移動し、温度によっても平衡移動が起こる。そのため、一つの溶液に温度差をつけ、それぞれに電極を挿入すると、低温側と高温側で平衡が移動し、電極に一方の電流が生じる。これが熱化学電池の原理である。

われわれはこの熱化学電池のシステムが、エネルギー変換の基盤として利用できると考えた。それを実証するために高分子の相転移を利用した。

図(a)に示した高分子は、30℃以下ではらせん状のひも構造(コイル構造)になり、それ以上の温度では丸まった構造(グロビュール構造)になるという相転移を示す。コイル構造では親水的になり、分子が水中でばらばらになるのに対し、グロビュール構造では疎水的になり、高分子同士が集まる凝集状態になる。これは一種の相転移とみなすことができ、氷が水になるのと同様に、吸熱する。

私たちはこの高分子に、酸化還元できる部位を導入した。すると、この分子は酸化すると電荷が大きくなり、より親水性になるためにコイルになり、また還元すると逆にグロビュールになる。つまり電氣的にコイル-グロビュール相転移ができる化合物を作成した。このコイル-グロビュール転移にともなって酸化側で発熱、還元側で冷却するはずである。実際に電気を流すと冷却効果が観測された(c)。これは新しい仕組みによる電子冷却素子であるといえる。

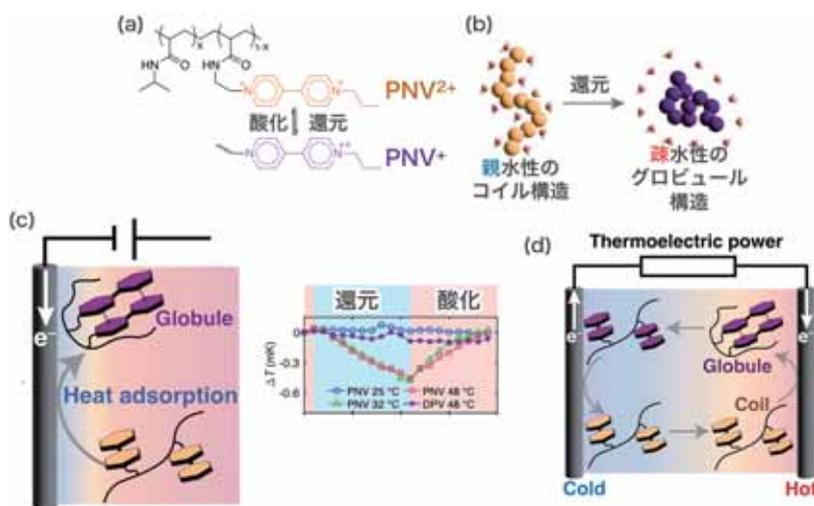
さらに、この化合物に温度差を与えると、低温ではコイル状態が安定な酸化状態が、高温側ではグロビュール状態が安定な還元状態になる。これにより熱電変換の電圧(正確には単位温度差あたりの電圧変化、ゼーベック係数)が得られる(d)。

この発電で得られる単位温度差あたりの電圧(V/K)は、酸化還元反応によって相転移する際の電荷あたりの相転移潜熱のエントロピー変化(J/K/C)とほぼ一致することも明らかになった。このことは、相転移により生じるギブスエネルギー変化を直接電気エネルギーに変換することに成功したことを意味する。

つまり、われわれは、相転移のギブスエネルギーを電気エネルギーに変化する新しい方法を開拓することに成功したといえる。この現象は、高分子のコイル-グロビュール転移に限らず、酸化還元反応によって変化するあらゆる自由エネルギーに適用できると期待される。

本研究成果は、T. Yamada *et al.*, *Advanced Materials*, 35, 2303341 (2023) に掲載された。

(2023年7月18日プレスリリース)



(a) PNVの模式図。主鎖のポリマーがコイル・グロビュール転移を示し、側鎖のピオロゲン部位が酸化還元能を示す。(b) コイル・グロビュール転移の模式図。(c) 外部電流によりPNVが還元されると高分子が丸まり、熱を吸収する。コイル・グロビュール転移がおきない25℃では熱の吸収が見られない。またピオロゲン部位のみでコイル・グロビュール転移を示さないDPVは、48℃で酸化還元を行っても熱の吸収はほとんど見られない。(d) 外部の温度差により、高温側で丸まり還元、低温側で伸びて酸化がおき、発電できる

CASE 2

メダカから探る 大脳の多様性と進化

大脳は、運動や知覚、記憶などに重要な働きをもつ。ヒトの大脳はいくつかの領域(脳領域)に分けられ、それぞれの脳領域にどのような機能があるかといったことが少しずつ明らかにされている。しかし、哺乳類以外の脊椎動物の大脳を見てみると、形態や領域の数や位置に大きな種間差が存在する。脊椎動物の多様な形態の大脳はどのように進化してきたのだろうか。そして、それぞれの種ではどの脳領域にどのような機能があるのだろうか。われわれは、メダカの大脳構造と一つ一つの脳領域の性質を解析することで、これらの謎の解明を目指した。



大脳は、ヒトでは脳の大部分を占める「大脳皮質」や記憶に重要な「海馬」などの複数の領域が含まれ、知性に大きく関わる。一方、哺乳類以外の脊椎動物の大脳は、種間で比べると大まかな領域の構成は保存されているが、各領域の形態や場所、領域内の区画の数は種ごとに異なっており、それぞれの領域の機能やそれらが形成される仕組みは未だ明らかになっていない。特に、脊椎動物の進化の過程で初期に分岐した魚類の大脳には未知な点が多い。これまで魚類の中では、遺伝子やタンパク質のはたらきを調べる手法が整備されている分子生物学のモデル動物としてゼブラフィッシュ^{注1}が広く研究に使われてきたが、ゼブラフィッシュの大脳には明瞭な解剖学的な区画がなく、ヒトの脳などと対応づけた研究が困難であった。一方、シクリッドやマハゼの大脳には明瞭な解剖学的な区画があるが、分子生物学のモデル動物として確立されていないため、分子レベルの詳細な研究が困難であった。そこで、われわれはメダカに着目した。メダカは分子生物学のモデル動物として確立され、さらに大脳内に明瞭な解剖学的な区画がある。

今回われわれは、まずメダカの成魚の大脳内の解剖学的な構造を解析した。卵の時期に数個の神経幹細胞(将来神経細胞へと分化する細胞)だけが蛍光タンパク質を発現するよう遺伝的に改変し、脳の発達後にその神経幹細胞から生まれる細胞群(クローン)が大脳内のどこに位置するか調べた。その結果、メダカの大脳の背側部分はクローン同士が混じり合うことなく一つ一つの脳領域を形成

していることがわかった。次に、各クローンの性質を知るために、クローンごとに染色体のクロマチン構造^{注2}を解析した。というのも、一つ一つの神

経細胞の個性は、その細胞が発現している遺伝子の組み合わせで決まるが、各遺伝子の発現状態はクロマチンの構造に大きく依存するからである。解析の結果、クローンごとにクロマチン構造が大きく異なることがわかった。特に、Ddと呼ばれるメダカ大脳の背側の領域ではクロマチン構造が特殊であり、神経細胞の情報伝達を担うシナプスを制御する遺伝子群の発現調節状態がほかの脳領域と大きく異なることを発見した。実際に、このDd領域ではシナプス密度が高いことも確認できた。これらの結果から、メダカの大脳の各領域はそれぞれ特有のクロマチン構造をもつクローンから作られ、特に背側には特殊な情報処理が行われている領域が存在することが示唆された。これまで魚類を使った脳の研究では、世界中でゼブラフィッシュが用いられてきた。今回は大脳の解剖学的な区画がわかりやすいメダカを研究材料に用いたからこそ、大脳の背側領域の特異性について明らかにできた。今後は、メダカ大脳の各領域の機能を解明し、大脳の多様性の進化およびヒトの知性の起源の一端を明らかにすることを目指す。

本研究成果は、Y. Isoe *et al.*, *eLife*, 12:e85093 (2023)に掲載された。

(2023年7月25日プレスリリース)

これまで魚類を使った脳の研究では、世界中でゼブラフィッシュが用いられてきた。今回は大脳の解剖学的な区画がわかりやすいメダカを研究材料に用いたからこそ、大脳の背側領域の特異性について明らかにできた。今後は、メダカ大脳の各領域の機能を解明し、大脳の多様性の進化およびヒトの知性の起源の一端を明らかにすることを目指す

注1:ゼブラフィッシュ

縞模様が特徴的な熱帯魚のゼブラフィッシュ (*Danio rerio*) は、体長が3 cmほどで卵が透明である。研究室での飼育・繁殖、そして行動・発生の観察が容易であるため、これまで世界中で発生学・遺伝学・行動学の研究に良く用いられてきた

注2:クロマチン構造

遺伝子がコードされているのがDNAである。そのDNAが円柱状のタンパク質(ヒストン)に巻き付けて折りたたまれたものをクロマチンと呼ぶ。遺伝子が発現するためには、DNAを解読するタンパク質がDNAに結合する必要があるため、折りたたまれたクロマチンが開きDNAが露出した状態になる。本研究ではこのクロマチンの開閉構造を解析した

CASE 3

スロー地震のルールとは？

地下で静かに発生している、さまざまなスロー地震。その現象の時間と大きさを規定するスケール法則が16年ぶりに最新データを使って検証された。そしてスロー地震とは、この法則にしたがって進行する普遍性のある現象だとする仮説が、より定説に近づいた。スロー地震こそが地球内部でいつでもどこにでもおこる現象で、普通の地震はむしろ異常な地球内部の変形現象だと認識しなおす必要があるかもしれない。



地球内部の岩盤に強い力がかかると、岩盤中の断層が破壊、急激にすべることで、地震が発生する。大地震の強烈な地震波は震災をひきおこす。ところが、地震と同じような岩盤の破壊すべり現象なのに、すべりがゆっくり進行するために、ほぼ地震波を放射しない現象がある。これが今世紀に発見されたスロー地震である。

スロー地震と普通の地震は、何が違うのか？この問題を、物理学的に現象の大きさの違いを表すスケール法則の違いとして解き明かしたのが、今回の研究成果である。

まず、普通の地震には、よく知られたスケール法則がある。小さな地震はあっという間に終わるが、大きな地震は長く続く。岩盤の破壊の継続時間を T とすると、地震のマグニチュードが2大きくなるごとに、 T は10倍になる。この関係は、現在地震の大きさの単位として用いられる、地震モーメント^注 M_0 を使って、 M_0 は T の3乗に比例すると、言い換えることができる。

スロー地震にも大小があり、その地震モーメント M_0 も継続時間 T とともに増加する。ただし M_0 は T の1乗、つまり比例するようにみえる。そこで、大小のスロー地震が、普通の地震とは異なるスケール法則に支配されたユニバーサルな現象だという仮説が、2007年に提案された。この仮説は、その重要性から、過去16年間、地震研究者の間で、多くの議論を生み出してきた。

当初、ばらついた貧弱なデータしかなかった仮説は、いくつかの批判にさらされた。しかし、16年間、多数の研究によって、 T として1秒弱から1年近く、実に約8桁にわたって、連続性の良いデータが蓄積された。このデータは、 M_0 が T に比例するという仮説を裏付ける。一方で、本研究では、仮説に対する批判のほとんどが、不適切なデータ処理に起因することを示した。ただし、観測限界によって、小さなスロー地震が検出できていないことも明らかになり、 M_0 と T の比例関係は、一対一の関係というより、時間 T だけ継続するスロー地震の大きさ M_0 の限界を規定する法則だと再解釈された。

現在、大小さまざまなスロー地震が世界各地で観察され、その存在はありふれたものとなってきた。地球内部の破壊すべり現象としては、地震より、スロー地震のほうが普遍的現象だと示唆される。その普遍的現象の限界を示すスケール法則は、逆にその限界に従わない、「普通の地震」こそ、異常な現象だと、私たちに教えているようだ。普遍的現象（スロー地震）が、どのように異常現象（地震）に切り替わるのか？両者の関係を探る研究は、まだまだ始まったばかりだ。

本研究結果は S. Ide *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. (PNAS)*, 120, (32) e2222102120, 2023 に掲載された。

(2023年8月1日プレスリリース)

スロー地震のスケール法則 (M_0 と T の関係) とファスト地震のスケール法則

注：地震モーメント
地震時に断層の運動によって引き起こされる回転運動の大きさ（単位 Nm）。地震断層のすべり量を断層面上で積分し、岩盤の剛性率を乗じた量と等しい。地震モーメントはマグニチュードに1対1で変換でき、マグニチュードが2大きくなるごとに、地震モーメントは1000倍になる

