



New Energy and Industrial Technology Development Organization

ISSN 1348-5350

国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構

〒212-8554
神奈川県川崎市幸区大宮町1310
ミュージアム川崎セントラルタワー
(総合案内 16F)
<https://www.nedo.go.jp>

NEDO 海外レポート

2023.9.29.

1138

1	【バイオテクノロジー分野】 微生物はクリーンバイオマニュファクチャリングに多大に貢献できる (米国)	2023/5/8 公表	1
2	【バイオテクノロジー分野】 ギ酸でカーボンニュートラルを目指す (ドイツ)	2023/5/12 公表	4
3	【新エネルギー(燃料電池・水素)分野】 重曹を使ったクリーンな水素貯蔵方法 (米国)	2023/6/12 公表	7
4	【電子・情報通信分野】 多種類の色の光で大量のデータを同時送信 (米国)	2023/6/29 公表	13
5	【バイオテクノロジー分野】 超微小な記憶媒体としての DNA の可能性を探求 (シンガポール)	2023/7/11 公表	18

※ 各記事への移動は Adobe Acrobat の「しおり」機能をご利用ください

URL : https://www.nedo.go.jp/library/kankobutsu_report_index.html

《本誌の一層の充実のため、ご意見、ご要望など下記宛お寄せください。》
海外レポート問い合わせ E-mail : q-nkr@ml.nedo.go.jp
NEDO は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の略称です。

【バイオテクノロジー分野】

仮訳

微生物はクリーンバイオマニュファクチャリングに多大に貢献できる(米国)

2023年5月8日

科学者らは、産業の脱炭素化に向けた新たな経路をバクテリアに見出した。この発見は、燃料、医薬品、化学物質の製造による温室効果ガスの排出を削減する可能性がある。

重要ポイント:

- ・ このブレイクスルーは、通常は化石燃料に依存する化学製造プロセスに代わる持続可能な手段を提供する。
- ・ バクテリアの生物学的プロセスを利用することで、環境に優しい化学合成アプローチを提供する可能性がある。
- ・ 高価な化学反応物を、バクテリアが生産できる天然物質に置き換える。

米国エネルギー省(DOE)のローレンスバークレー国立研究所(LBNL)とカリフォルニア大学バークレー校(UCB)を中心とする研究チームが、持続可能な生化学物質への強力な経路の提供が期待できる、新しい天然炭素生物を生産するバクテリアを開発した。

先般 [Nature](#) で発表されたこの研究成果は、バクテリアを使用して天然の酵素反応と「カルベン転移反応」と呼ばれる新しい自然の反応を組み合わせるものである。この成果は通常は化石燃料に依存している化学物質の製造プロセスの持続可能な代替手段を提供することから、産業における温暖化ガス排出量の削減にも役立つ可能性がある。

「この論文では、カルベン転移反応により、天然の酵素からカルベンまであらゆる物質をバクテリアの細胞内で合成できることを示しています。糖を加えるだけで、あとの作業は細胞が担当します」と、本研究の主任研究員であり、[DOE Joint BioEnergy Institute \(JBEI\)](#) の CEO でもある [Jay Keasling](#) 氏は説明する。

カルベン是非常に反応性の高い炭素ベースの化学物質であり、さまざまな種類の反応に使用することができる。数十年間にわたり、燃料や化学物質の製造、また創薬と医薬品合成でのカルベン反応の利用が望まれていた。

“糖を加えるだけで、あとの作業は細胞が担当します”

— Jay Keasling DOE Joint BioEnergy Institute (JBEI) 主任研究員/CEO

しかし、これらのカルベンのプロセスは試験管を介した少量ずつの実施に限られ、化学反応促進のための高価な物質を必要とする。

今回の研究では、この高価な化学反応物質を、バクテリアの *Streptomyces* の遺伝子操作株によって生産される天然物に置き換えた。このバクテリアは糖を使用してその細胞の代謝によって化学物質を生産するため、「化学合成に一般的に使用される有毒な溶媒や有毒ガスを使用せずに、カルベン化学反応の実施が可能になります」と、筆頭著者でありバークレー研究所の Keasling Lab 博士研究員である [Jing Huang](#) 氏は言う。

「この生物学的プロセスは、今日の化学物質の合成方法よりもはるかに環境に優しいものです」と Huang 氏は続ける。

研究者たちは JBEI での実験中に、このバクテリアが糖を代謝してカルベン前駆体とアルケン基質に変換する様子を観察した。このバクテリアはまた、これらの化学物質を使用してシクロプロパンを生成する、進化した P450 酵素を発現した。シクロプロパンは、新しい生物活性化合物や先進的なバイオ燃料の持続可能な生産に使用できる可能性のある高エネルギー分子である。「バクテリアの細胞内でこれらの興味深い反応を行うことができるようになりました。細胞がすべての試剤や補助因子を生産することは、(大量生産に向けて) この反応を非常に大きなスケールに拡大することができます」と Keasling 氏は説明する。

化学物質合成のためにバクテリアを採用することも、炭素排出量の削減において重要な役割を果たす可能性があるという Huang 氏は言う。バークレー研究所の別の研究者によると、[温室効果ガス排出量の 50%近くが化学物質、鉄鋼、セメントの生産によるものである](#)という。[気候変動に関する政府間パネル \(Intergovernmental Panel on Climate Change\) の最近の報告書](#)によると、地球温暖化を産業革命前の 1.5° C に抑えるには、2030 年までに温室効果ガスの排出量を半減させる必要がある。

この完全一体型のシステムにより、カルベン
供与体分子やアルケン基質を多量に生産する
ことが期待できるが、商業化の準備はまだで
きていないと Huang 氏は言う。

「新しい進歩を遂げるには、誰かが最初の一
歩を踏み出す必要があります。そして科学で
は成功するまでに何年もかかることがある。
しかし、やり続けることが大切です。諦める
わけにはいかないのです。私たちの研究結果
が、より環境に優しく持続可能なバイオ製造
の解決策の探求を鼓舞することを願っていま
す」と Huang は言う。



DOE Joint BioEnergy Institute での実験中、研究
者らは *Streptomyces* というバクテリアの遺
伝子組み換え株が、新しい生物活性化合物や
先進的なバイオ燃料の持続可能な生産に使用
可能性な高エネルギー分子のシクロプロパン
を生成する様子を観察した。
(画像提供:Jing Huang)

この論文の他著者： Andrew Quest、Pablo Cruz-Morales、Kai Deng、Jose Henrique
Pereira、Devon Van Cura、Ramu Kakumanu、Edward E.K.Baidoo、Qingyun Dan、
Yan Chen、Christopher J.Petzold、Trent R.Northen、Paul D.Adams、Douglas
S.Clark、Emily P.Balskus、John F.Hartwig、Aindrila Mukhopadhyay

本研究は DOE 科学局と DOE 生物環境研究局の支援を受けた。また、アメリカ国立科
学財団(NSF)の支援も受けた。

訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター）

出典：本資料は、米国ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)の記事 “Tiny
Microbes Could Brew Big Benefits for Green Biomanufacturing ”
(<https://newscenter.lbl.gov/2023/05/08/tiny-microbes-could-brew-big-benefits-for-green-biomanufacturing/>)を翻訳したものである。

【バイオテクノロジー分野】

仮訳

ギ酸でカーボンニュートラルを目指す(ドイツ)

CO₂ の持続可能な利用方法の開発

2023年5月12日

CO₂ を固定する新しい合成代謝経路は、大気中の CO₂ 含有量の低減に役立つだけでなく、従来の医薬品や有効成分の化学的な製造プロセスをカーボンニュートラルな生物学的プロセスに置き換えることができる。今回の研究では、CO₂ をギ酸を介してバイオケミカル産業に有用な材料に変換するプロセスを実証した。



ギ酸塩は、(電気)化学的手段を通じて CO₂ から製造され、酵素カスケードや人工微生物によって付加価値製品に変換される、カーボンニュートラルなバイオエコノミーの中核的な役割を担う。ギ酸塩同化を発展させる重要なステップは、熱力学的に困難なホルムアルデヒドへの還元。写真では黄色への色の変化として見ることができる。© Max Planck Institute for Terrestrial Microbiology/Geisel

温室効果ガスの排出量が増加する中、大規模な排出源から CO₂ を隔離するカーボンキャプチャーは喫緊の課題である。自然界において炭素同化は何百万年も前から行われているが、その容量は人為的な排出量を補うには決して十分ではない。

マックス・プランク陸生微生物学研究所の Tobias Erb 博士の率いる研究チームでは、自然界のツールボックスを使った炭素固定の新しい方法を開発している。今回の研究では、人工光合成の中間生成物となるギ酸から反応性の高いホルムアルデヒドを生成する人工的な代謝経路の開発に成功した。ホルムアルデヒドをいくつかの代謝経路に直接供給して、貴重な物質を毒性作用なく生成することが可能となる。これには、自然のプロセスと同様にエネルギーと炭素の 2 つの主要成分が必要となり、前者は直射日光だけでなく、例えば太陽電池モジュールからの電気によっても供給できる。

ギ酸は C1 ビルディングブロック

付加価値連鎖内において炭素源は様々であり、CO₂ のみならず、一酸化炭素、ギ酸、ホルムアルデヒド、メタノール、メタンといったすべてのモノカーボン (C1 ビルディングブロック) が選択肢となる。しかし、これらの物質のほとんどは、生物 (一酸化炭素、ホルムアルデヒド、メタノール) や地球 (温室効果ガスとしてのメタン) に対して非常に毒性が高い。ギ酸に限り、ギ酸塩に中和されると高濃度でも多種類の微生物が耐えることができる。

「ギ酸は非常に有望な炭素源ですが、これを試験管内でホルムアルデヒドに変換するにはかなりのエネルギーを消費します」と、この研究論文の第一著者である Maren Nattermann 博士は説明する。これは、ギ酸の塩であるギ酸塩が容易にホルムアルデヒドに変換できないためである。「これらの分子間には深刻な化学的障壁があり、実際の反応を行う前に、生化学的エネルギー、ATP(アデノシン三リン酸)を使って橋渡しする必要があります」。

研究者らの目標は、より経済的な方法を見つけることだった。代謝への炭素供給に必要なエネルギー量が少ないほど、成長や生産を促進するためのエネルギーが残せる。しかし、このような経路は自然界には存在しない。「複数の機能を持つ、いわゆる非選択性の酵素を発見するにはある程度の創造性が必要です」と、Erb 博士は言う。「しかし、候補となる酵素の発見は始まりに過ぎません。反応は非常に遅く、場合によっては 1 つの酵素で 1 秒間に 1 回を下回ることもあります。自然の反応はその 1000 倍の速さで起こります」。そこで、合成生化学が活用できると Nattermann 博士は言う。「酵素の構造とメカニズムがわかれば、どこに介入すればよいかわかります。これに関しては、基礎研究における同僚の予備研究から多大な恩恵を受けています」。

ハイスループット技術で酵素最適化を高速化

酵素の最適化は、ビルディングブロックの交換や、ランダムな突然変異の生成とその能力に基づく選択というアプローチを通じて実施した。「ギ酸塩とホルムアルデヒドは、どちらも細胞壁を透過する最適な物質です。私たちの酵素を生産する細胞の培地にギ酸塩を入れると、数時間後には毒性のない黄色のホルムアルデヒドに変換されます」と Nattermann 博士は説明する。

このハイスループットな手法を使わなければ、このような短期間で結果を出すことはできなかっただろう。これには、ドイツのエスリンゲンに拠点を置く産業パートナーの Festo と協力した。「約 4000 の変異体の作製後、4 倍の生産量を達成しました」と Nattermann 博士は言う。「このようにして、バイオテクノロジーの微生物の主力であるモデル微生物の *Escherichia coli* がギ酸で増殖するための土台を作り出しました。ただし、現時点では私たちの細胞はホルムアルデヒドの生成のみに限られ、それ以上の変換はできていません」。

現在、共同研究者であるマックス・プランク分子植物生理学研究所の Sebastian Wenk 博士と共に、中間体を取り込んで中枢代謝に供給できる菌株を開発している。また、Walter Leitner 博士率いるマックス・プランク化学エネルギー変換研究所のワーキンググループと共に、CO₂ からギ酸への電気化学的変換に関する研究を行っている。長期的な目標は、電気生化学的プロセスを経て CO₂ からインスリンやバイオディーゼルのような製品を製造する「オールインワンプラットフォーム」である。

Original publication

Nattermann, M.; Wenk, S.; Pfister, P.; He, h.; Lee, S.H.; Szymanski, W.; Guntermann, N.; Zhu, F.; Nickel, L.; Wallner, C.; Zarzycki, J.; Paczia, N.; Gaisert, N.; Francio, G.; Leitner, N.; Gonzalez, R.; Erb, T. J.

Engineering a new-to-nature cascade for phosphate-dependent formate to formaldehyde conversion in vitro and in vivo.

Nature Communications 14, 2682 (2023)

[DOI](#)

訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター）

出典：本資料は、マックス・プランク陸生微生物研究所の記事“With formic acid towards CO₂ neutrality” (<https://www.mpg.de/20293586/0512-terr-formic-acid-carbon-dioxide-neutrality-153410-x>)を翻訳したものである。

(Reprinted with permission of Max Planck Institute for Terrestrial Microbiology)

【新エネルギー(燃料電池・水素)分野】

仮訳

重曹を使ったクリーンな水素貯蔵方法(米国)
PNNL の科学者らが豊富な資源である塩の優れた特性を調査
2023年6月12日

温暖化の続く世界では、エネルギー源の炭素排出量ゼロ、またはほぼゼロを求める世論が高まっている。これは、再生可能エネルギー源をより多く使用し、石炭、石油、天然ガスを代替して行くことを意味している。

再生可能エネルギーを貯蔵・運搬するための最も有望な媒体の 1 つに、化石燃料を使わずに生産されるクリーンな水素がある。

これが有望なアイデアである理由は、水素が宇宙に最も豊富に存在する元素であり、あらゆる物質の 75%に含まれていることだ。さらに、水素分子には、無毒でありながら非常に燃えやすい、対になった原子 2 個が含まれている。

水素の燃焼能力は、世界中のエネルギー研究者にとって魅力的な研究テーマとなっている。

[Pacific Northwest National Laboratory \(PNNL\)](#) の研究チームは、主には水素の化学結合を壊すことで、水素をエネルギー貯蔵・放出媒体として利用する研究を実施している。この研究の多くは、米国エネルギー省 (DOE) の [Hydrogen Materials-Advanced Research consortium \(HyMARC\)](#) に関連するものだ。

水素貯蔵はまだ最適化されていない

PNNL の研究の焦点の 1 つは、解決しがたい問題である水素貯蔵の最適化に関するものである。現時点では、完全に安全で費用対効果が高く、エネルギー高効率で水素を大量に貯蔵できる方法は存在していない。

PNNL の研究者らは先般、[水素を貯蔵する手段としてベーキングソーダ\(重曹\)の溶液を調査する論文](#)を共同で執筆している。この研究はすでに、王立化学会が発行する学術誌『*Green Chemistry*』により「ホットペーパー」と呼ばれている。つまり、関心を示すクリック数を多く得ているということだ。



化学者の Tom Autrey 氏 (撮影:Andrea Starr | PNNL)

PNNL における水素ベースの貯蔵の取り組みには、DOE のエネルギー効率・再生可能エネルギー局 (EERE) の[水素燃料電池技術室\(HFTO\)](#)が資金を提供している。この研究は、DOE の [H2@Scale](#) イニシアティブと同機関の [Hydrogen Shot](#) を推進するものである。

この論文の主な執筆者は、[化学者で PNNL Laboratory Fellow の Thomas Autrey 氏](#)と、その同僚で化学反応を迅速かつ費用対効果的にする専門家の [Oliver Gutierrez 氏](#)の 2 人である。

豊富にあり、安価で穏やかな物質の重曹が、大きな問題への答えとなる可能性を楽しむ Autrey 氏は、「少しばかりクリエイティブでなければなりません」と言う。「すべての化学物質が効率的に水素を貯蔵できるわけではありません。母なる自然が与えるもので対処する必要があります」。

長期的なエネルギー需要に向けたクリーン水素

PNNL の Autrey 氏と Gutierrez 氏らは、[長期的なエネルギー貯蔵](#)が再生可能エネルギーを貯蔵・運搬する手段としての水素の将来への鍵となると考えている。

現在のバッテリー技術は数時間のエネルギー貯蔵の設計となっており、再生可能エネルギーグリッドでは貯蔵需要の約 80%に対応できる。

しかし、「残りの 20%にはユニークな戦略が必要です」と Autrey 氏は言う。「*Dunkelflaute* (ドゥンケルフラウテ) に備え、余剰エネルギーを蓄える必要があります」。

ダウンケルフラウテとは、十分な太陽エネルギーと風力エネルギーが生産できない状態を表すドイツ語である。ダウンケルフラウテである曇天で風の吹かない期間には、数時間以上にわたりグリッドにエネルギーを蓄える方法が必要となる。

水素の有利な点の一つは、このような季節に応じたエネルギーの貯蔵能力である。また、水素によるエネルギー貯蔵はどの場所でも可能であるという事実も同様に有利で、専門家が言うように「場所を選ばない」。例えば、水力発電では発電のための余分な水を蓄える標高差を必要とするが、水素によるエネルギー貯蔵には特別な地理的条件は不要である。

さらに、スケールが大きくなるにつれ、[水素貯蔵はより経済的になる](#)と Autrey 氏は言う。バッテリーを大量に購入するよりも、水素貯蔵タンクをいくつか使い購入する方が安い。

最適な水素貯蔵方法の発見

クリーンな水素は、エネルギー源として大いに有望である。例えば、電気分解と呼ばれるプロセスは、水を水素と酸素に分解する。電気分解の電力を太陽光、風力、地熱などの再生可能エネルギー源から得ることができれば理想的である。

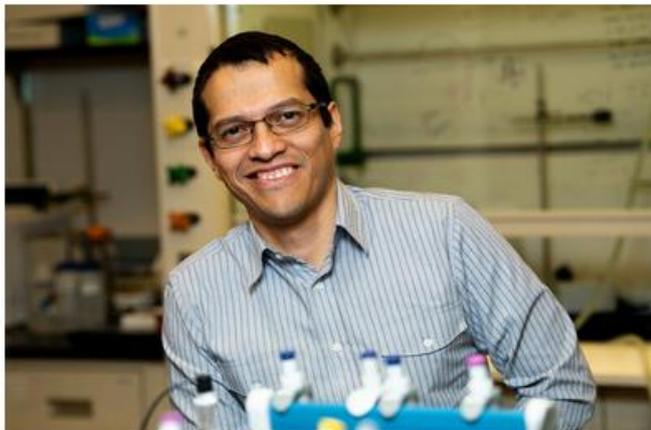
とはいえ、困難な問題は、水素をより安価に製造することである。

この問題に対処するため、DOE は 2021 年にクリーンエネルギー技術のブレークスルーを支援する 6 つのステップである [Energy Earthshots イニシアティブ](#) を発表している。最初に導入されたのは、10 年間で水素のコストを 1 kg あたり 5 ドルから 1 ドルの、80% の削減を目指す「Hydrogen Shot」であった。

クリーンな水素の製造コストを低減することに加え、「輸送して貯蔵する方法を見出す必要がある」と Autrey 氏は言い、このことが水素コストをさらに増大させる。しかし、水素貯蔵に最適な媒体の発見は達成しがたいものとなっている。水素は圧縮して気体にするができるが、それには最大で 10,000lb /in² の非常に高い圧力が必要になる。安全な水素貯蔵タンクには、鋼鉄や航空宇宙グレードの高価な炭素繊維でできた非常に厚い壁が必要になるだろう。

極低温の液体水素は実証済みの貯蔵媒体だが、極めて低い温度(−471F/−279.4C)が必要となりエネルギーコストが増大する。

最も有望と考えられるものは、水素の貯蔵・放出に最適化された液体分子である。持続可能なエネルギーの専門家である [Jamie Holladay](#) 氏は、先般 [PNNL 主導](#) の研究を指揮し、水素を液化するよりシンプルで効率的な戦略を提案している。



化学エンジニアの Oliver Gutierrez 氏 (撮影:Andrea Starr | PNNL)

そのような液体を貯蔵媒体として使用することには、パイプライン、トラック、列車、タンカー等の既存のエネルギーインフラを利用できるという利点があると Gutierrez 氏は言う。

重碳酸塩ーギ酸塩の循環

クッキーを焼くにも、水素エネルギーを貯蔵するにも、重曹(ベーキングソーダ)が使えるだろう。穏やかで安価なこの重碳酸ナトリウムは、無毒で地球に豊富に存在する。

厳密には重曹ではないが、PNNL の研究チームは、長年研究されている重碳酸塩ーギ酸塩のサイクルによる水素エネルギー貯蔵の可能性について調査している(ギ酸塩は安全で穏やかな液体有機分子)。

この水素エネルギー貯蔵の仕組みは次の通り：水中のギ酸イオンの溶液(水素と二酸化炭素)が、非腐食性のアルカリ金属ギ酸塩として水素を保持する。ギ酸イオンは触媒を介して水と反応し、水素と重碳酸塩が生成される。Autrey 氏は、環境に影響を及ぼさない「重曹」として、この重碳酸塩を賞賛している。

圧力を適度に調整することで重碳酸塩とギ酸塩のサイクルのリバースが可能で、水素を交互に貯蔵・放出する水溶液のオン・オフスイッチになる。

PNNL の研究チームは、重曹を研究する前に、液体有機水素キャリア(水素を貯蔵・輸送する有機化合物を意味する用語)としてエタノールの使用を検討しており、これと並行して水素を放出する触媒を開発した。

触媒とは、化学結合の生成・切断に使用されるプロセスをエネルギー効率の高い方法で高速化するデザイナー・アディティブ(特製の添加剤)である。

2023年5月、PNNLの取り組みに関連するプロジェクトに向けて、EEREはワシントン州リッチランドの [OCOchem](#) に対し、二酸化炭素からギ酸塩とギ酸を生成する電気化学プロセス開発のための資金 250 万ドルを 2 年間にわたって提供している。このプロセスでは、水を示すアイコン的な化学結合 H₂O の水素に二酸化炭素を結合させる。

PNNL は、始まったばかりのパートナーシップにおいて、OCOchem の製品から水素を放出する方法を開発する予定である。

「水のように見える」水素貯蔵

重炭酸塩ーギ酸塩サイクルは、水素貯蔵の研究においてかなり前から話題になっている。何ととっても、豊富にあって燃えにくく、毒性のない物質を利用しているのだ。

このサイクルは、あまりにも穏やかなため「水のように見える」水溶液を利用していると Autrey 氏は言う。「これで火を消すこともできます」。

しかし、これが水素エネルギーを貯蔵する実用的な手段となるには、経済的に実現可能なシナリオの展開が必要である。この技術による現時点での水素貯蔵量は、液体水素の業界標準である 70 kg/m³に対し、わずか 20 kg/m³である。

より本質的には、この技術の電気化学と触媒作用をシステムレベルで理解する必要があると Autrey 氏は言う。機能できる重炭酸塩ーギ酸塩サイクル技術の、工業用語で言う技術成熟度(TRL)は現時点ではまだ低いのだ。

「触媒の問題を解決すれば、真の関心が得られるかもしれません」と Autrey 氏は付け加える。

『きらりと光る素晴らしい技術』

PNNL の検討するこの塩の溶液が、水との反応で水素を放出することは有利な面である。また、適度な温度と低圧での作動も同様である。

少なくとも Autrey 氏と Gutierrez 氏がその 2023 年の論文で説明しているように、理論的に重炭酸塩ーギ酸塩サイクルは水素の「エネルギーを貯蔵し輸送するための実現可能なグリーンな代替手段」である。

この重曹を利用するアイデアは、2023 年の論文において「いくつかの緊急の科学的課題」と呼ばれているものの中心にもあるものだ。

それらの課題には、捕獲した余剰の二酸化炭素から水素貯蔵媒体を作る方法も含まれている。また、その媒体を使用して電子を貯蔵する、直接ギ酸塩燃料電池の可能性をも提供する。

さらに、この PNNL による研究は、液(水)相における触媒作用に関する見識を提供する可能性がある。触媒候補として、今のところパラジウムを使用している。PNNL の取り組みには、レアメタルの安定化、再利用と長寿命化の方法の解明が含まれている。

重曹を使用するこのアイデアは、水素貯蔵に向けた「きらりと光る素晴らしい技術です」と Autrey 氏は言う。「その可能性にわくわくしています」。

訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター）

出典：本資料は、米国パシフィックノースウェスト国立研究所(PNNL)の記事“A Baking Soda Solution for Clean Hydrogen Storage” (<https://www.pnnl.gov/news-media/baking-soda-solution-clean-hydrogen-storage>) を翻訳したものである。

【電子・情報通信分野】

仮訳

多種類の色の光で大量のデータを同時送信(米国)

2023年6月29日

新しいフォトニックチップが指数関数的に高速・エネルギー高効率の AI を可能に



回路ボードに電気・ファイバーオプティック接続で据え付けられたフォトニックトランスミッターチップ

Credit: Lightwave Research Laboratory/Columbia Engineering

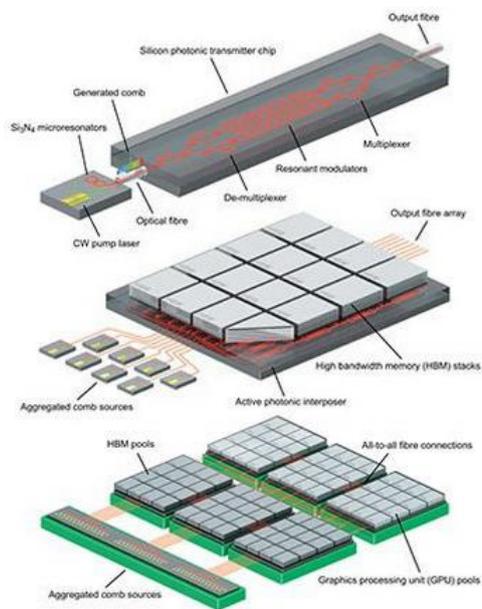
大規模言語モデルなどの人工知能プログラムを実行するデータセンターや高性能コンピュータの性能を制限するものは、個々のノードの演算能力だけではない。これらのシステム性能とスケールアップを制限する「帯域幅のボトルネック」の原因である、ノード間で転送可能なデータ量という別の問題がある。

これらのシステムのノードは、1 キロメートル以上離れていることもある。データを高速転送する場合、金属ワイヤが電気信号を熱として放散してしまうため、これらのシステムは光ファイバーケーブルを介してデータを転送するが、残念なことに、ノード間での信号送信時に電子データから光データへの（または光データから電子データへの）変換プロセスにおいて、大量のエネルギーが無駄になっている。

[Columbia Engineering](#) の研究者らは、[Nature Photonics](#) に掲載された研究において、ノードをつなぐ光ファイバーケーブルを介してエネルギー効率の高い方法で大量のデータを転送する方法を実証した。この新技術は、同一の光ファイバーケーブルで複数の信号を同時に転送する過去の試みを改良したものだ。新しいチップでは、それぞれの波長の光の生成に異なるレーザーを使用するのではなく、単一のレーザーだけで数百種類もの波長の光を生成し、個別のデータストリームを同時に転送することができる。

よりシンプルでエネルギー効率の高いデータ転送方法

このミリスケールのシステムでは、波長分割多重 (WDM) と呼ばれる技術と、単一の色の光の入力により多くの新しい色の光を出力する、カー周波数コムと呼ばれるデバイスを使用している。電気工学の Higgins Professor で応用物理学教授の [Michal Lipson](#) 氏と、応用物理学・材料科学の David M. Rickey Professor で電気工学の教授である [Alexander Gaeta](#) 氏が開発したこの重要なカー周波数コムにより、個別の正確な光の波長を通じ、空間を挟んでクリアな信号を送ることができるようになった。



カー周波数コム駆動のシリコンフォトニクスリンクをベースとした、細分化されたデータセンターの階層構造のイラスト

Credit: Lightwave Research Laboratory/Columbia Engineering

「これらのデバイスは、各色の光に個別の情報チャンネルをエンコードし、一本の光ファイバーでの伝搬を可能にする光通信の理想的なソースになると思います。」と、コロンビア大学の電気工学の Charles Batchelor Professor で、[Columbia Nano Initiative](#) の学部長でもある論文上席著者の [Keren Bergman](#) 氏は言う。このブレイクスルーにより、指数関数的により大量のデータを、それに見合う量のエネルギーを使用することなく、転送できるようになる可能性がある。

約数ミリサイズのチップ上に微細化して配置した光学コンポーネントの発する光に電子データでエンコードした後、光データをターゲットノードで電気信号に変換する。隣接するチャンネルとの干渉を最小限に抑えながら、各チャンネルを個別にデータでエンコードできる、新しいフォトニック回路のアーキテクチャを開発した。ここでは、各色の光で送られた信号が混乱したり、レシーバでの受信と電子データへの変換が困難になったりすることがない。

「このように、私たちのアプローチは、他の同様なアプローチよりもはるかにコンパクトでエネルギー効率が高いのです」と、論文筆頭著者である Anthony Rizzo 氏は言う。彼は Bergman 教授の研究室で博士課程の学生として本研究を実施し、現在は米国空軍研究所(AFRL)の研究員である。「また、シリコン窒化物によるコム生成チップは、高価で専用の III-V 属半導体ファウンドリではなく、マイクロエレクトロニクスチップを製造する標準的な CMOS ファウンドリで製造できるため、低コストでスケールアップも容易です」。

コンパクトなこれらのチップはコンピューターの電子チップとの直接のインターフェースが可能で、電子データの信号は数十センチではなく数ミリの距離の伝播で済むため、総エネルギー消費量を大幅に削減できる。

「この研究は、システムのエネルギー消費を大幅に削減すると同時に、計算能力を桁違いに向上させ、環境への影響を最小限に抑えながら AI アプリケーションの指数関数的な成長を可能にする、実現的な道筋を示しているのです。」と Bergman 教授は説明する。

実現への道を開くエキサイティングな成果



32 の個別の周波数チャンネルにデータをエンコードできるフォトニック集積チップと 25 セントとのサイズの比較
Credit: Lightwave Research Laboratory/Columbia Engineering

1 波長あたり 16Gb/s の、32 の個別の波長の光による 512 Gb/s を単一の光ファイバーで伝送する実験では、1 兆ビットのデータ伝送のうち、エラーが 1 ビットを下回った。これは信じられないほど高いレベルの速度と効率である。データを送信するこのシリコンチップはわずか 4mm×1 mm、また、光信号を受信して電気信号に変換するチップはわずか 3mm×1 mm という、どちらも人間の爪よりも小さなサイズである。

「概念実証では 32 波長のチャンネルを使用しましたが、このアーキテクチャは 100 チャンネルを超える対応に拡張できます。これは標準的なカーコム設計の範囲内です。」と Rizzo 氏は付け加える。

これらのチップは、一般的な消費者向けノートパソコンや携帯電話に搭載されているマイクロエレクトロニクスのチップの製造に使われているものと同様の設備を使って製造することができ、ボリュームスケーリングや実社会への展開への確実な道筋を提供する。

この研究の次のステップでは、チップスケールの駆動・制御エレクトロニクスにフォトニクスを集積し、システムのさらなる微細化を図る。

訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター）

出典：本資料は、米国コロンビア大学の記事 “Transferring Data with Many Colors of Light Simultaneously”

(<https://www.engineering.columbia.edu/news/transferring-data-with-many-colors-of-light-simultaneously>) を翻訳したものである。

(Reprinted with permission of Columbia University)

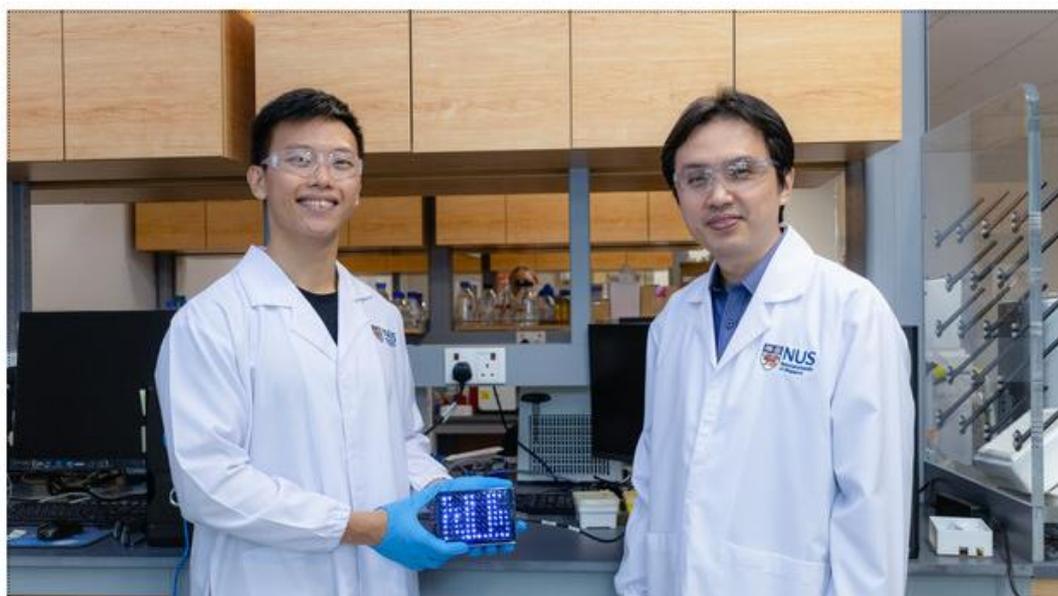
【バイオテクノロジー分野】

仮訳

超微小な記憶媒体としての DNA の可能性を探求(シンガポール)

2023 年 7 月 11 日

NUS のデザイン工学部 (CDE) が、情報ストレージの新しいパラダイムを切り開く革新的な「バイオリジカルカメラ」の開発を先駆ける



Poh Chueh Loo 准教授 (右) の率いる研究チームは、生きた細胞とその生物学的機構を通じてデータをエンコードして記憶する、革新的な「バイオリジカルカメラ」の開発を先駆ける。

世界初の「バイオリジカルカメラ」は、現在の DNA 保存方法の制約を回避し、生きた細胞とその固有の生物学的メカニズムを利用してデータをエンコードして保存する。これは、画像を直接 DNA にエンコードして保存する主要なブレイクスルーであり、デジタルカメラのような情報ストレージの新しいモデルを創出するものだ。

主任研究者である [NUS 国立大学デザイン工学部\(CDE\)](#) の Poh Chueh Loo 准教授と [NUS Synthetic Biology for Clinical and Technology Innovation \(SynCTI\)](#) が率いるチームの研究成果は、データストレージ業界を揺るがす可能性のあるもので、2023 年 7 月 3 日に [Nature Communications](#) 誌に掲載されている。

グローバルなデータ過負荷に対処するための新しいパラダイム

世界ではこれまでにない速度でデジタルデータが生成されており、データは 21 世紀の「通貨」と考えられるようになってきている。2018 年の世界のデータ量は 33 ZB(ゼタバイト)と推定され、2025 年までに 175 ZB に達すると予測されている。このため、従来のデータストレージの枠を超えた、リソース集約型のデータセンターによる環境への影響に対処できるストレージの代替手段が模索されている。

画像や動画などの情報の保存に DNA を使用するというアイデアが注目を集めたのは、最近のことだ。これは、DNA の卓越したストレージ容量、安定性と長きにわたる情報の記憶媒体としての適合性によるものである。

「私たちは、現在データ過負荷の危機に直面しています。地球上のあらゆる生物の重要な生体材料である DNA には、様々な生命機能を担う一連のタンパク質をエンコードする遺伝情報が保存されています。1g の DNA には 215,000TB(テラバイト)を超えるデータ量を保持することが可能で、これは 4,500 万枚の DVD に保存されるデータ量に相当します」と Poh 准教授は説明する。

「また、DNA は現代の分子生物学ツールで簡単に操作でき、室温下で多様な形態で保存でき、何世紀にもわたり存続できる耐久性があります」と Poh 准教授と共に研究活動に従事する大学院生の Lim Cheng Kai 氏は説明する。

DNA ストレージのこれらのような大きな可能性にもかかわらず、現在の研究では細胞外での DNA 鎖の合成が注視されている。この合成プロセスは高価で、複雑な機器に依存しており、エラーも発生しやすい。

この障壁を克服するために、Poh 准教授とその研究チームは、「データバンク」として機能する DNA を豊富に含む生きた細胞に着目した。生きた細胞の利用により、外部での遺伝物質合成の必要性を回避することができる。

研究チームは、真の独創性と巧みなエンジニアリングを通じ、様々な生物学的技術とデジタル技術を融合させ、生物学的構成要素を利用してデジタルカメラの機能を模倣する新しいシステムの「BacCam」を開発した。

「細胞内の DNA を未現像のフィルムと想像してください。オプトジェネティクス(光遺伝学)、つまりカメラのシャッター機構のような、光で細胞の活動を制御する技術

を使い、その DNA “フィルム” に光の信号を刷り込むことで “画像” を撮影することに成功しました」と Poh 准教授は説明する。

次に、写真のラベリングに類似したバーコード技術を用い、撮影した画像に独特な識別用のマークを付けた。そして、保存されたこれらの画像を機械学習アルゴリズムにより整理、分類、再構築した。この新技術は、デジタルカメラによるデータ収集、保存、検索プロセスを再現する「バイオリジカルカメラ」である。

本研究では、様々な色の光を使って複数の画像を同時に捕獲して記憶する、このバイオカメラの機能を提示した。特に重要なのは、初期の DNA データストレージに比べると、今回開発した革新的なシステムは再生産と規模の拡大が容易なことである。



Poh Chueh Loo 准教授 (右)と協力して DNA に直接画像を取り込んで記憶させる新しいシステムを開発した大学院生の Lim Cheng Kai (左)。

「DNA データストレージの限界が押し広げられる中で、バイオとデジタルの両システム間のインターフェースの橋渡しへの関心が高まっています」と Poh 准教授は言う。

「私たちが開発した新技術は、バイオシステムとデジタルデバイスの統合における主要なマイルストーンです。DNA と光遺伝学的回路の力を利用して、費用対効果が高く効率的なアプローチを DNA データストレージに提供する “生きたデジタルカメラ” を初めて開発したのです。本研究では、DNA データストレージのさらなる応用を探索

するだけでなく、既存のデータキャプチャ技術の生物学的枠組みへの再設計も試みています。これらにより、情報の記録と保存における継続的なイノベーションの基礎が築かれることを期待しています」。

訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター）

出典：本資料は、シンガポール国立大学(NUS)の記事“Capturing the immense potential of microscopic DNA for data storage” (<https://news.nus.edu.sg/capturing-the-immense-potential-of-microscopic-dna-for-data-storage/>) を翻訳したものである。
(Reprinted with permission of National University of Singapore (NUS))