

# 産総研 LINK

技術を社会へつなげるコミュニケーション・マガジン

09  
2018

SEPTEMBER

NO.20



国内最強の計算力を持つ“ABCI”で、  
社会問題の解決を!

オープンプラットフォーム  
「AI橋渡しクラウド」が本格稼働

Hiroataka Ogawa



ABCI運用開始記念式典開催

国内最高性能のスパコンABCIが、  
いよいよ運用スタート!



応用広がる超電導線材の開発

電気抵抗“0”!  
最高の臨界電流密度

Teruo Izumi



[ここにもあった!産総研]

世界初のプログラム内蔵型  
トランジスタコンピュータの作製

# オープンプラットフォーム

# 「AI橋渡しクラウド」が本格稼働

国内最強の計算力を持つ“ABCI”で、  
社会問題の解決を!



人工知能研究センター  
人工知能クラウド研究チーム  
研究チーム長

産総研・東工大  
実社会ビッグデータ活用  
オープン・イノベーションラボラトリ  
(RWBC-OIL)  
副ラボ長

**小川 宏高**

Hirota Ogawa

## KEY POINT



本格稼働が始まった産総研の大規模クラウド型計算機ABCI (AI Bridging Cloud Infrastructure)。世界のスーパーコンピュータの**速度性能ランキングTOP500 Listの5位**を獲得、国内最高性能の計算システムで、産学官連携による**人工知能の社会実装**を推進していく。

## 多様なユーザーが利用し、 研究開発が進めやすい

——小川チーム長はABCIの開発・設計において中心的な役割を担われてきましたが、ABCI開発の目的をお聞かせください。

**小川** ディープラーニングをベースとする人工知能技術の発展により、AIで実現できることが同時多発的に増加しつつあります。しかし、わが国では、産業界の関心の高さの割に導入が進んでいないというのが現状です。ABCIの目的は、ステークホルダーの強みを伸ばし、AIのすみやかな導入を試す「場」を提供することで、人工知能技術の社会実装を進めることです。

特に、ディープラーニングは膨大な計算を前提としますから、アルゴリズムだけあっても、あるいはビッグデータだけを持っていても活かすことはできません。十分な計算能力がなければ、この両者を結び付けて、実際のアプリケーション開発や応用技術に発展させることは困難です。ABCIは、そのための「橋」を提供すること、そして国や企業等のビッグデータの保有者と、産総研や大学、国や企業の研究所といったアルゴリズムに関する技術シーズを蓄積する機関が、連携して研究開発を進められる環境を提供することを目的としています。

——ABCIは、これまでの産総研のAI用計算システムと、どのように役割が異なるのでしょうか。

**小川** 産総研は1980年代からスーパーコンピュータの開発を続けています。一昨年度末にはABCIのプロトタイプとして、10分の1程度の規模の産総研AIクラウド(AAIC)を導入しました。AAICは性能上の限界により、産総研と、共同研究などによって直接連携をしている企業・機関のユーザーにしか開放してきませんでした。これに対してABCIは、独自のデータやシーズ、独自の目的を持った企業・機関のユーザーの方々にも幅広く使っていただけます。つまりABCIは、より高い計算能力を追求することによって、より多様なユーザーに柔軟に対応できるシステムになったのです。

## 世界5位、国内最高の計算能力が使える

——ABCIのシステムの特徴をお聞かせください。

**小川** ABCIは主に1088台の計算サーバーからなる高性能計算システムと、22 PB(ペタバイト)の大容量ストレージシステムと

いう2つのシステムで構成されています。

このうち計算サーバーは、1台につきIntel社の高性能CPU2基とNVIDIA社の最新GPU4基に加え、384 GBのメモリー、1.6 TBのSSDを搭載しています。ABCI全体での理論的な最高性能は、特に人工知能やビッグデータ処理の分野で有効な半精度浮動小数点演算では550ペタフロップスに達します。また、倍精度演算で37.2ペタフロップス、単精度演算でも75ペタフロップスと、総合的に非常に高い計算性能を持っています。100の研究グループに対して同時に数ペタフロップスの計算資源を提供できるシステムは、日本には現在ABCIしかありません。

——世界のコンピュータ速度性能ランキングTOP500 Listでは、ABCIは5位となりました。

**小川** 結果を聞いてホッとしたというのが正直なところですが、私たちはこの順位をあまり重視していません。TOP500は科学技術計算ベンチマークでの順位に過ぎず、AIアプリケーションによる大規模計算の結果がより重要だと考えています。また、ABCIはいわゆるスパコンのような大規模利用よりは、ニーズがはるかに多い中規模の利用を促進することに主眼を置いて開発されています。もちろん、それを実現するためには、計算機システムそのものが安定していないとできないので、TOP500のようなベンチマークを通じてシステムの安定性を示すことができたと考えています。

——ABCIの計算能力がどの程度なのか、わかりやすく教えてください。

**小川** 一般的なPCを数万台つなぐスケールの計算をABCI台でできるパワーがあります。

——省エネ性能ランキング(Green500)でも世界8位を獲得していますね。

**小川** Green500は冷却に要する電力を考慮しない省エネ性能ランキングであり、有用ではありますが、システム全体としての省電力性能を考えると部分的な指標でしかないと考えています。実のところ、ABCIの研究開発は人工知能研究センターの人工知能クラウド研究チームとRWBC-OIL(\*1)の共同で進めましたが、どのようにすれば高密度・省電力・大規模なAI向けインフラを作れるのかという課題からスタートしました。

国内データセンターのサーバーラックあたりの電力供給能力・冷却能力は、2016年末時点で平均2.87 kVA(キロボルトアンペア)、



2010年以降に竣工したデータセンターに限ってみても平均6.02 kVAとされています(\*2)。1台あたり最大2 kVA消費するABCIの計算サーバー 1088台を収容しようとするれば、360台以上のサーバーラックとそれらを設置するスペースが必要となり、現実的ではありません。これに対し、私たちはABCIシステムの導入を想定して、1平米あたり2トンの耐荷重性能と、サーバーラックあたり70 kVAの電力供給能力・冷却能力を持つ、高密度・省電力データセンター（AIデータセンター棟）を設計・構築しました。

AIデータセンター棟は、平屋建てでコンクリートスラブの床と非常に簡素な造りをしており、これは耐荷重性能を安価に達成するためです。また、AIデータセンター棟では32℃の高温冷却水を用いた直接液体冷却と、同冷却水を用いた空冷のハイブリッドシステムを構築し、サーバーラックあたり最大70 kVAの冷却を可能としています。冷却水の冷却は、年間を通じて建物の外にある冷却塔によるフリークーリングで行うため、消費電力が大幅に削減できます。省電力性に関しては、データセンターで使用しているすべての電力を計算機システムが使っている電力で割った「PUE(Power Usage Effectiveness)」という指標があります。この指標は通常のデータセンターでは優れたシステムでもせいぜい1.4~1.5ですが、ABCIでは最も条件の悪い夏場においても1.1程度と、設計通りの優れた省エネルギー性能が発揮できています。

これらの工夫により、ABCIでは計算サーバーをサーバーラックあたり34台、全1088台を32ラックに収容することが可能になりました。ちなみにサーバーラックあたりIT機器だけで1トン弱という規模です。従来のデータセンターに収容する場合にはこの10~20倍のサーバーラック数とスペースが必要になり、冷却に要する電力は最低でも3~4倍となります。

## 企業から学生まで、裾野の広いユーザーと連携

——連携を進めていく方法としては、どのようなものがありますか。

**小川** まず、「ABCIグランドチャレンジ」(6ページ参照)というプログラムを進めています。これはABCIの全システム1088台、GPU4352基を、24時間、1つの研究グループが利用する権利を無償で提供するものです。短い期間ですが、1088台すべてを一度に使うことで非常に大規模で複雑な問題を解くことができるので、例えば創薬のように大規模な計算を必要とし、産業に大きなインパクトがある重要課題に、産学官が連携して挑戦していただくことを想定しています。

ほかに、共同研究による利用はもちろん、HPCI連携など、複数の連携方法を提供していく予定です。HPCIというのは、理化学研究所の「京」を中心に、国内9大学および海洋研究開発機構の計算機センターを結んで相互利用する枠組みのことです。産総研はHPCIの運用開始時よりシステム構成機関として参画し、プライマリーセンター業務を担当していますが、2019年度よりABCIもHPCIのユーザーが利用できるシステムとする予定です。

さらに、連携とは少し異なりますが、AIST to B to Cモデルの実証も考えています。ここでいうBとはABCIを使ってクラウドサービスを提供する事業者のことで、産総研は事業者に計算機リソースを提供しつつ、その事業者が提供するサービスの利用者、例えば学生などにも個別にABCIを利用してもらうことを想定しています。それが実現すれば、研究者や学生などのユーザーが、ディープラーニングの実験やアプリケーション開発などに必要な開発環境をより簡便に利用できるようになり、国内発のイノベーションがさらに加速することが期待できます。また、B to C事業者の競争力強化にもつながります。

## 計算の高速化は、新たな応用を生み出す

——創薬のほかに応用が想定される領域は？

**小川** 現在では、画像、動画、音声、テキスト、それにさまざまなセンサーからの情報といった多様なデータから、ディープラーニングを用いて、認識、異常検知、将来予測など、価値のある情報処理を実現する試行錯誤が各所で盛んに行われており、応用

先はあらゆるところにあるといえます。ABCIは、多数の研究者が同時に使うのに十分な規模を備えているため、このような試行錯誤をアイデアが浮かんだときにすぐに試すことができます。

ABCIによる処理の高速化が応用上の意義を変える場合も多々あります。例えば、車で走りながら収集したセンサーデータを処理するのに通常のコンピュータで1週間かかるところ、ABCIならわずか10分でできるとなれば、10分後にはその道を走る人に対してここで事故が起きているとか、このイベントはどういうものかという情報を通知できるようになるなど、さまざまな応用が考えられるようになります。

また、ディープラーニングという技術は、まだ発展途上であり、膨大なデータ量と強力な計算能力によってブレークスルーがおこり、応用分野の飛躍的な拡大をもたらすことも期待されています。例えば、現在のディープラーニングが大きく成功している例は、あらかじめ正解と判定するラベルを付けたデータを用いる「教師あり学習」によるものです。一方で実社会のデータの大部分にはラベルが付いていません。このようなデータを活用する「教師なし学習」は「教師あり学習」に比べて桁違いに多いデータを集め、桁違いに多い学習処理をすることが必要です。ABCIは、このような新しい技術、新しい応用のためのテクノロジードライバーになるかもしれません。

——人工知能研究センターでは、工場やサービス業の現場に蓄積された知をAIで解析し、日本の産業力の強化につなげる試みをしているとお聞きしています。

**小川** はい、現在、産総研の臨海副都心センターにコンビニヤ工場の実空間を模した実験棟を建設中です。この臨海副都心センターとABCIがある施設を100 Gbpsの高速ネットワークで接続し、実験棟で生成したデータをそのネットワークを使ってABCIに送り、大容量ストレージに安全に格納し、アプリケーションの開発に活用、社会実装を目指す予定になっています。

——「AI橋渡しクラウド」という名前はABCIの役割を象徴していますね。

**小川** AIの技術を産業界へ橋渡しし、社会実装することが最終的な目標なので、そのものずばりの名前をつけました。

ABCIの開発においては、データセンターの整備と高性能計算システムの構築・導入をそれぞれ独立で進め、データセンターを作る技術と、そこに導入する高性能計算システムの構築・運用技術を、それぞれ技術移転可能な基礎技術として確立することを目指しました。これも、AIを支える計算インフラ技術を市場の多様なニーズに応じて技術移転できるようにしたかったからです。AIを支える計算インフラが民間データセンター等に普及し、ABCIで開発したアプリケーションや学習モデルがどこでも使えるようになることも、私たちは社会実装の1つの形だと考えています。

——運用していく上で目指していることはどのようなことでしょうか。

**小川** 先の回答とも関連しますが、技術移転がしやすい形でアプリケーションや新しい計算手法、学習モデルなどを開発できるようにすることです。特にABCIでは、ABCI上で作ったソフトウェアを他のユーザーが再利用したり、他の計算機システムでも利用したりといったポータビリティや相互運用性を実現するため、コンテナと呼ばれる使いやすいパッケージングシステムを導入しています。また、データや学習モデルの安全な利活用を促進するためのデータ基盤も整備して提供していく予定です。

ABCIでは、世界トップクラスの計算処理能力とデータ処理能力を手軽に利用できる環境を整えています。ぜひABCIの利用をご検討いただき、先進的な研究開発はもちろん、AIのいち早い導入を試す場としてお役立ていただきたいと思います。

\*1 産総研と東京工業大学が連携して進める実社会ビッグデータ活用オープンイノベーションラボラトリー  
\*2 IDC Japan 「国内データセンター電力キャパシティ調査結果」(2016年12月8日)

お気軽にお問い合わせください

産総研 情報人間工学領域



〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1



029-862-6028



<https://www.ith.aist.go.jp> (お問い合わせフォーム)

[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/dept/dithf.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/dept/dithf.html)

# ABCIグランドチャレンジ2018



産総研は、莫大な演算能力によりはじめて可能になる人工知能分野の最重要課題への挑戦を支援するため、AI橋渡しクラウド(ABCI)で「ABCIグランドチャレンジ」プログラムを実施します。ABCIグランドチャレンジは、ABCIがもつ最大計算ノード数である1,088ノード(4,352GPU)を最大24時間、1研究グループで占有利用ができる公募型チャレンジプログラムです。世界最大規模の人工知能処理向け計算インフラストラクチャであるABCIを用いて画期的な成果の達成が見込まれる、挑戦的な研究課題のご提案をお待ちしております。

## ■ ABCIグランドチャレンジ実施概要(2018年度)

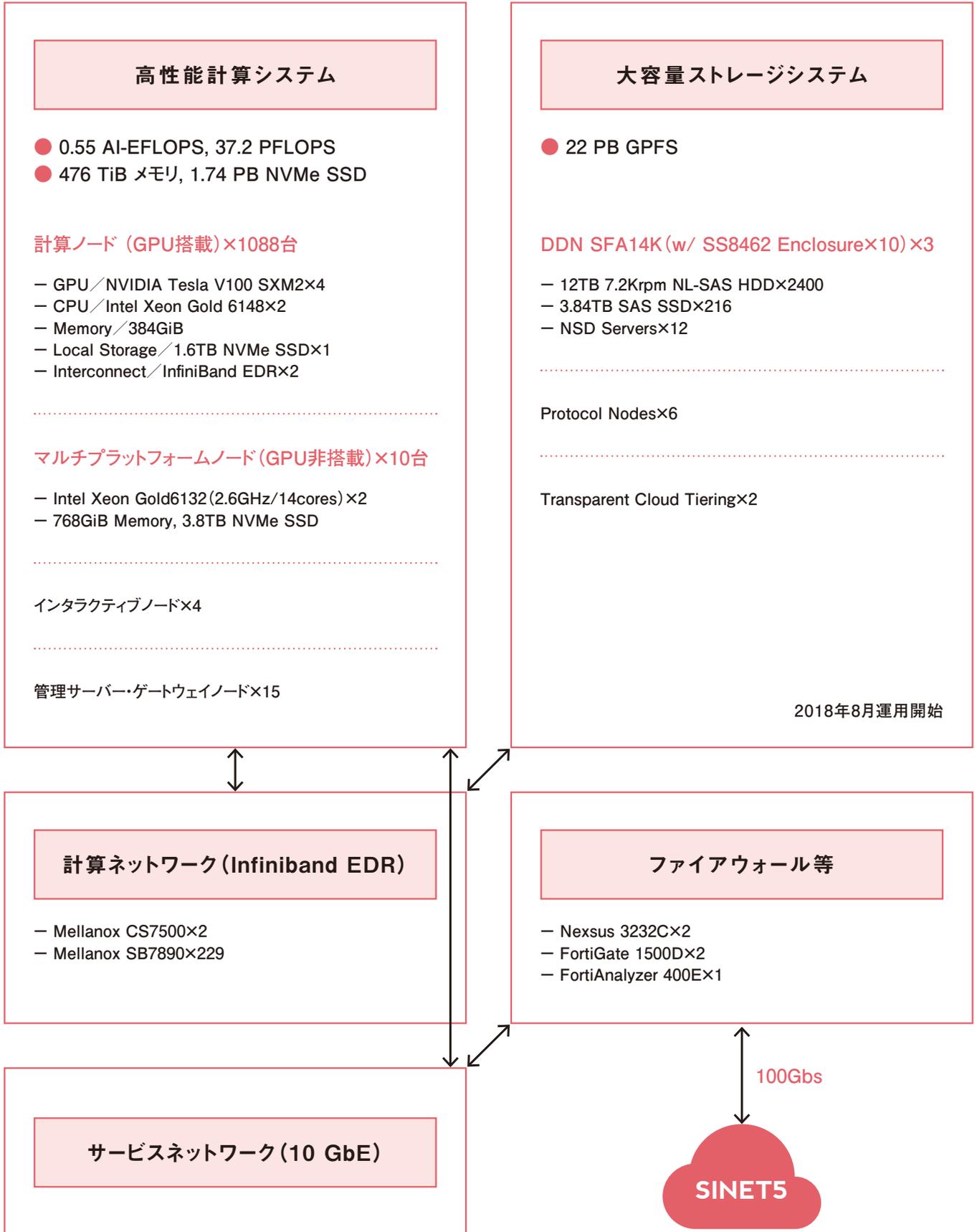
2018年度は以下の通り3回プログラムを実施します。

	応募締め切り	採択通知	実行予定日
第1回(終了)	2018.4.1-2018.4.30	2018.5.30	2018.7.23-2018.7.27
第2回(終了)	2018.8.1-2018.8.31	2018.9.30	2018.10末(予定)
第3回	2018.11.1-2018.11.30	2018.12.21	2019.1末(予定)

- 課題は公募制とし、個人、グループでの提案が可能です。
- いずれの回も2課題程度を採択する予定です。
- 必要に応じて産総研との共同研究として実施していただきます。
- 採択課題については、チャレンジ実施前にABCI上で小規模実行によるリハーサルを行う機会を提供します。
- 利用料金はリハーサルを含め無料です。
- ABCIの利用にあたっては、「国立研究開発法人産業技術総合研究所 共用高性能計算機ABCI利用約款」において定められる事項を遵守していただきます。



■ ABCIシステム概要



詳しくは、Webサイトをご覧ください。 <https://abci.ai/ja/>



ABCIのロゴは英文字を組み合わせて蝶に見立てています。この一つの羽ばたきから、世界の大きな潮流をつくっていくことが期待されています。

# 国内最高性能のスパコンABCIが、 いよいよ運用スタート!

8月1日、産総研のスーパーコンピュータ「人工知能処理向け大規模・省電力クラウド基盤 (AI Bridging Cloud Infrastructure: ABCI)」の本格運用が始まった。ABCIは2016年度の経済産業省による「人工知能に関するグローバル拠点整備事業」として計画され、産総研の人工知能研究センターと産総研・東工大 実社会ビッグデータ活用オープンイノベーションラボラトリ(RWBC-OIL)が設計・開発したシステムである。7月30日、東京大学柏Ⅱキャンパスに置かれたABCIの見学会および運用開始記念式典が開催された。



国立研究開発法人  
産業技術総合研究所  
理事長

**中鉢 良治**  
Ryoji Chubachi

ABCIはAIやロボットによる生産性の向上や三次元マップの分析への活用、医療診断や薬の設計等の研究に利用できます。それだけではなく、このABCIを中心に、先進的なAI研究を推進するコミュニティができ、AI分野のイノベーションや連携が起こると考えられます。AIの社会実装に向けて民間企業にも広く活用していただき、新たなイノベーションやビジネス創出につなげていただくことを期待しています。



国立大学法人  
東京大学  
総長

**五神 真氏**  
Makoto Gonokami

「東京大学ビジョン2020」では、産学官民が密に連携して新しい研究成果を世界に発信し、それを社会に転換する構想を掲げ、産業界との連携や大学発ベンチャーの育成、知的基盤の整備を進めています。産総研と東大、産業界が学術情報ネットワーク SINETを通じて、ABCIを用いた大規模な産学官連携を推進し、より良いソサエティ5.0をつくっていきたくと考えています。



内閣府総合科学技術・  
イノベーション会議  
人工知能技術戦略会議  
議長

**安西 祐一郎**  
Yuichiro Anzai

ABCIの活用戦略は「容易に構築できるAI」「人と協調できるAI」「実世界で信頼できるAI」です。きめ細かい技術は日本の特徴ですが、ソフトウェアでもその方向性を打ち出し、人を支援するAI技術を発展させることが大きな鍵となります。これまではハードウェアの能力がネックだったので、このABCIの活用開始は非常にタイムリーなものとなるでしょう。



経済産業省  
大臣官房審議官

**渡邊 昇治**  
Shoji Watanabe

政府が進めるソサエティ5.0においては、データを集め、共有し、分析することが大切であり、そこではAIがとても重要になります。大切なのは、AIを使って何を実現するか、社会や産業をどうしていくかということです。そして日本は、少ない情報量でも高精度な分析を実現するような領域にも挑戦していくべきではないかと考えています。そのためにABC Iの運用開始に期待しています。



産総研  
理事／情報・人間工学領域  
領域長

**関口 智嗣**  
Satoshi Sekiguchi

現在の人工知能ブームは、ビッグデータへのアクセス、高速処理、アルゴリズムの手法の確立から成立しています。しかし、民間企業ではAIの導入がなかなか進んでいません。AIをどこで試してよいかわからないこと、実需が見えないことがその一因でしょう。私どもはABC Iで、誰でも試せる環境をつくり、AIを普及させる基盤整備をしていきます。



産総研フェロー／  
人工知能研究センター長

**辻井 潤一**  
Junichi Tsujii

人工知能に関して日本は米国や中国に遅れをとっているといわれます。今回ABC Iができて、日本にも考えたAIをすぐに試せる計算環境が整いました。しかし、環境は必要条件であり十分条件ではありません。そこにどのようなデータを乗せ、どのように運用していくかが今後の課題となります。そして、これからますます多様なプレーヤーとの共同研究が重要となります。皆様のご協力をお願いします。



富士通株式会社  
執行役員常務

**山口 裕久**  
Hirohisa Yamaguchi



NVIDIA  
Corporation VP

**イアン・バック**  
Ian Buck



産総研  
人工知能研究センター

**小川 宏高**  
Hirotaka Ogawa

アイデアを試せる環境を整え、新ビジネスの創出を支援



産総研・東工大  
実社会ビッグデータ活用  
オープンイノベーションラボ  
(RWBC-OIL)  
ラボ長

**藤澤 克樹**  
Katsuki Fujisawa

2017年2月、産総研と東京工業大学は「産総研・東工大 実社会ビッグデータ活用オープンイノベーションラボトリ(RWBC-OIL)」を設立しました。人工知能によるビッグデータの解析・活用を産業利用に結びつけていくことが目的です。産総研がABC Iの開発に着手したのは2016年ですが、東工大にスパコン導入のノウハウが蓄積されていたこともあり、RWBC-OILがABC Iの設計・調達の段階から運用まで協力することになりました。今回運用が始まったABC Iは、「橋渡しクラウド」という名の通り、アカデミックな大学の資産を社会につなげていくという目的があります。新しいビジネスや製品を立ち上げるために企業が大規模な計算機を使いたい場合、外資系のクラウドサービスなどを利用する方法もありますが、その場合は、計算機の貸し手がアプリ

ケーション開発にともに取り組みわけではありません。それに対して産総研は企業が新ビジネスを創出するために、必要に応じて自分たちの持つビッグデータやAIに関する技術を提供し、新しいアプリケーションの実用化を支援していきます。公的機関によるオープンなAI基盤の整備は、これまで世界的に例がありませんでしたが、今後、世界各地で同様のコンセプトのAI基盤が増えていくでしょう。ABC Iはそのような潮流の先駆けといえます。日本を代表する大企業からベンチャーまで、ABC Iを利用した連携はすでにいくつも始まっています。アイデアをすぐに試せる環境が整ったことで、迅速に新ビジネスの創出につなげていけることを期待しています。皆さんもぜひご活用ください。

電気抵抗“0”!

最高の臨界電流密度

応用広がる超電導線材の開発



KEY POINT



超電導材料は電気抵抗がゼロで臨界電流密度も高い。産総研は、**低コスト**で**世界最高の磁場中臨界電流密度**を実現、**その実用化**へ向けて大きく歩を進めた。送電ケーブルやモーター・発電機に応用すれば、大幅な**省エネ化・軽量化**が期待される。



夢の材料と言われ続けて100年以上。  
まず克服すべきは取り扱いの難しさ

現在ほとんどの電線が銅製なのは、銅の電気抵抗がとても小さいからだ。しかし、それでも送電中にエネルギーの10～20%が熱として放出されてしまう。では、超電導材料で作られた電線を使えばどうだろうか？ そうなれば、超電導材料は電気抵抗がゼロのため、理論的には電力のロスもゼロとなり、発電した電力のすべてを使うことができるようになるのだ。

しかも、超電導材料は電流密度が非常に高く、電気抵抗がゼロのまま流せる電気の量(臨界電流)は銅に流せる電気の量の100倍にもなる。そのため電線を巻いてコイルをつくり、磁場を発生させて動力とするモーターに超電導材料を応用した場合、短い電線で強い磁場をつくれるので、大幅な軽量化が期待できるのだ。

「1911年の超電導現象の発見以来、超電導材料は「電気で作るものすべてに应用可能な“夢の材料”」と期待されてきました。しかし現状では、特殊な用途を除くと、ほとんど普及していません」

1990年代から超電導技術の研究開発に携わる和泉輝郎は、そう残念がる。

普及が限定的になった要因は、超電導材料の取り扱いの難しさにある。物質に超電導の性質をもたせるためには極低温状態を作り出さなければならない。そして極低温を実現するには、絶対零度(-273℃)近くまで冷やすことができる液体ヘリウムが冷媒として必要になる。この液体ヘリウムは天然ガスの副産物として得られるもので、天然ガスからシェールガスにエネルギー源が移行するなか、価格は高騰し、供給も不安定になってきている。また、極低温は温度が上がりやすく、小さな熱擾乱<sup>じょうらん</sup>で温度が上がると超電導状態はすぐに壊れてしまう。これらの課題を解決するため、高い温度で維持可能な超電導材料の発見が長い間望まれていた。

高温で超電導状態になる材料で  
より長く、より安い線材を

1986年、画期的な発見があった。それまでは純粋な金属しか超電導現象を示さないと考えられてきたが、銅酸化物の中に、もっと高い温度(-200℃程度)で超電導状態になる材料が見つかったのだ。こうした高温超電導性をもつ物質の探索は世界中で行われ、1987年にはイットリウム系酸化物が-180℃程度で超電導現象を示すことが発見された。

「-180℃程度なら液体ヘリウムを用いずとも、液体窒素で十分に冷やせます。窒素ですべて空気から作ることができ、これなら1リットル当たり100円ほどで、1リットル当たり3,000円の液体ヘリウムに比べると30分の1です。この価格なら汎用的な材料としても利用できると、一気に期待が高まりました」

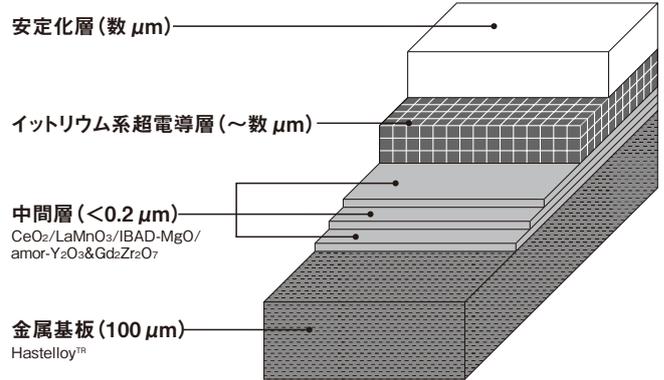
その後、室温に近い温度で超電導の性質を示す超電導物質を求めて、「超電導フィーバー」といわれる材料探しの競争が勃発したものの、目的の材料は未だ見つかっていない。現在の研究現場では、これまでに見つかった高温超電導材料の特性に注目した研究にシフトチェンジしている。

超電導材料は周囲の磁場が強くなるとともに流れる電流の限界が減少する性質を持つため、和泉は他の材料に比べ比較的周囲の磁場の影響を受けづらいイットリウム系酸化物に注目した。しかし、イットリウム系酸化物超電導材料は、高価である、多くの応用に利用するための線材への加工工程が複雑、高温、高磁場での使用では臨界電流値が十分ではないなどの課題があった。これでは、現在唯一ともいえる応用先の医療機器にも用いることができないため、低コスト化、高性能化が達成すべき目標となっていた。

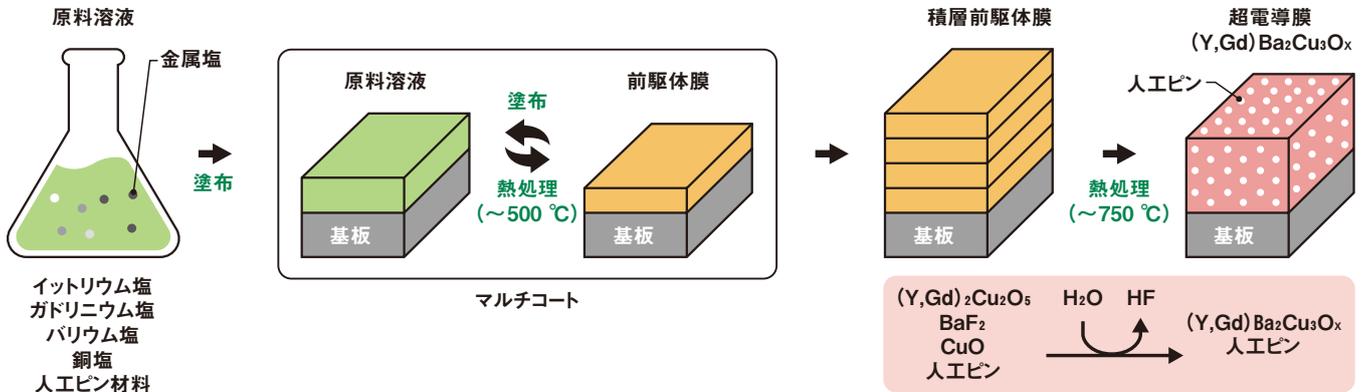
そんな中、和泉は昭和電線ケーブルシステム株式会社および



▲ この薄い線材(写真左)はいくつもの層(右図)を重ねてできている



▲ イットリウム系超電導線材の模式図



▲ 溶液塗布熱分解法の概要(多数回原料溶液を塗布・熱処理を繰り返す)

成蹊大学との共同研究により、イットリウム系酸化物を用いた線材で世界最高の磁場中臨界電流密度を実現したのだ。2017年のことだった。

和泉らの開発した線材の構造は、上図のようにになっている。層を重ねることで長尺化と高性能化を同時に達成しているが、このような酸化物の超電導の薄膜をつくるには高度な技術が必要となる。

「イットリウム系酸化物の結晶はイットリウム、バリウム、銅及び酸素が組み合わせられた3層構造をしています。金属結晶は立方晶系が多く、結晶がどんな向きでも電気は流れるのですが、イットリウム系酸化物の結晶は縦長の形状なので電気が流れる面が決まっており、1つでも結晶の向きが違えば電気が極端に流れ難くなってしまいます。つまり、この薄膜をつくる際には、大量の結晶を同じ向きに並べなくてはならないのです」

酸化物の結晶をきれいに整列させる研究は1990年代前半に始まったが、なかなかうまくいかず、線は長尺にならなかった。2000年ごろにできていたのは1 mぐらいまでで、流せる電流は

100 A (アンペア) 程度。これではとても工業材料にはならない。世界中で、できるだけ長い線材をつくる努力がされていた。

### 「人工ピン」で電流密度を保て

基板上に薄膜をつくる方法はいくつかあるが、和泉が選んだのは、材料に液体を塗って焼き固める溶液塗布熱分解法だった。一般的に用いられる気相蒸着法(以下、「気相法」という)が必要となる高額な装置がいらず、低コストで作ることが可能なためだ。

上図にある中間層の上に、超電導材料の液体に浸しては焼いて化学反応させ薄膜を形成するという作業を数回繰り返す。焼く温度や時間等を試行錯誤し、2008年には長さ約500 mで、臨界電流約300 Aという性質を示す線材ができるようになった。

次は高磁場で性質を維持させるための工夫である。超電導材料は前述のとおり磁場がかかると臨界電流密度が下がる性質があるため、約-210℃の酸化物の場合、10 T(テスラ)の磁場がかかると臨界電流密度は10分の1程度にまで減ってしまう

のだ。そのため和泉は、「磁場中で電気をたくさん流すために、超電導層に不純物を入れ込みました。きれいに結晶が整列した超電導層にわざと多くの不純物を入れていくことで、より多くの電気を流すことが可能になるのです」と言う。超電導材料の場合、磁場中では超電導体の中に磁束が入り込んでくる。磁束とは磁界中のある面を垂直に移動する磁力線のことだ。その移動で行う仕事により熱が生じるので、磁束が移動すると、その線に沿って局所的に超電導状態が解けて、電気の流れが悪くなってしまう。つまり、電気を多く流すには、磁束をできるだけ動かさないようにすることが重要なのだ。

「不純物があると、磁束はそこに捉えられます。そこは最初から超電導ではないので、磁束もそこにとどまる方がエネルギー的に楽なのですね。磁束を人工的に作った不純物でピン止めするのでこれを『人工ピン』といいます。この微細な人工ピンを超電導層に分散させておけば、磁界中でも超電導層に多くの電流が流れるわけです。人工ピンをいかに細かく分散させるかが、長尺化の次のテーマとなりました」

### より薄い層を多数重ねて 世界最高の電流密度を実現

ここで和泉は壁に突き当たった。溶液塗布熱分解法では、気相法に比べて人工ピンを細かく分散させることができなかったのだ。しかし、実用化を意識した場合、溶液塗布熱分解法以外の方法では高額な装置の導入が必要となりコストがかさむため、広く普及するための大きな壁となってしまう。

「安価な溶液塗布熱分解法でより多くの人工ピンを分散させるには、どうしたらよいのか。その方法を考え続けました」

2017年、その成果は-210℃程度の液体窒素温度で、3 Tの磁場中、超電導の薄膜1cmあたり400万Aという世界最高の磁場中臨界電流密度を示せたことで結実した。これを可能にしたのは、ごくシンプルな方法だった。

「線材の断面を顕微鏡で見ると、人工ピンは薄膜層に沿って並んでいました。それなら、層をより薄くしてもっと多層にすることで、多くの細

かいピンを入れられるのではないかと気づいたのです」

つまり、膜が薄くなれば、人工ピンはそれ以上に大きくなれず細かくなり、その薄い層を数多く重ねれば、そのぶん数を増やすこともできる。

「技術的には単純ですが、人工ピンのサイズを支配しているものを層だとイメージし、それを薄くしようと発想することが大変でした」

現在は昭和電線ケーブルシステム株式会社と、本格的な実用化に向けて共同研究を進めている。この線材が実用化されれば、船舶や飛行機のモーターにも、発電機にも使えるようになる。

「私が現在、最も注目しているのは飛行機です。超電導は臨界電流が高いのでコイルを軽くできます。据置き型の装置と異なり、飛行機なら軽量化に大きなメリットがあります。しかも航空機業界は現在、環境問題への対応という視点で国際社会からCO<sub>2</sub>の大幅な削減を要求されていますが、ジェットエンジンの効率化はほぼ限界にきています。この状況を打破するために検討されているのがエンジンの電動化です。飛行機はもともと非常に高額であり、コストに関して比較的寛容なので、超電導線材は大きな役割を果たせるでしょう」

大手航空機メーカーも超電導の導入に意欲的で、すでに産総研に視察に訪れているという。本格的な導入は2030年以降を想定しているとのことだった。

「夢の技術をものにするには強い意志が必要です。私たちは、強い意志をもち、ともに将来に向かっていけるパートナーを求めています。新たなチャレンジへの一歩を、ぜひ、私たちとともに踏み出しましょう」

お気軽にお問い合わせください

**産総研 エネルギー・環境領域 省エネルギー研究部門**

〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1 つくばセンター つくば東事業所

029-861-7239

<https://unit.aist.go.jp/ieco/>

ieco-info-ml@aist.go.jp



## 世界初のプログラム内蔵型 トランジスタコンピュータの作製

### デジタル式計算機の黎明期

現代社会はコンピュータが支えている。そう言い切っても過言ではないだろう。そんなコンピュータの時代、すなわち、アナログ式ではなく、電子回路をもったデジタル式計算機の時代が幕を開けたのは1930年代後半のことだ。

この時代、英国のチューリングが万能計算機を定義し、ステイビッツがリレー（継電器）式のスイッチ素子を用いた計算機を發明、米国のシャノンがスイッチング回路で論理演算することが可能であると示すなど、情報科学や計算機工学の歴史に残る大きな成果が立て続けに世に出ている。

そして世界中の研究者たちが多様な方式のコンピュータの開発にしのぎを削り、多くの「世界初」が出てきた中で、1950年代には商用化を果たすものも登場した。

（参照 <http://museum.ipsj.or.jp/computer/dawn/index.html>）

この時代の素子は真空管が主役だったが、真空管は寿命が短く消費電力も大きかった。そのため1940年代後半にトランジスタが発明されると、より長寿命で低消費電力が見込めるトランジスタ式コンピュータの研究開発が盛んになっていく。

### 産総研が生み出した、世界初の プログラム内蔵トランジスタコンピュータ

国内に目を転じよう。日本で本格的にコンピュータの開発が始まったのは、第二次世界大戦後のことだが、産総研では、その前身の一つである電子技術総合研究所、そしてそのさらに前身である電気試験所（以下、産総研）で、戦前からスイッチング理論の研究を進めていた。1952年に早くもリレー（継電器）式の計算機のパイロットモデル「ETL Mark I」を試作できたのは、



▲トランジスタ式電子計算機ETL Mark-IV全景

すでに電気計算機回路理論が構築できていたためだ。その後、1955年には実用機「ETL Mark II」を完成させた。

この時代、計算機には「リレー式」「真空管式」「パラメロン方式」の他、アナログコンピュータなども存在した。その中で国内では産総研を含む4者が真空管式コンピュータを完成させている。しかし、いずれの方式のコンピュータも商用化はされたものの大規模な市場を形成するには至らなかった。

そんな状況の中、いち早くトランジスタの将来性に注目したのも産総研だった。トランジスタコンピュータの研究開発に本格的に取り組もうと1954年に電子部を創設、部長の和田弘の指揮のもと、当時、国産で入手可能なトランジスタとして最も高速だった東京通信工業製（現在のソニー）の点接触型トランジスタを用いたコンピュータを試作。ダイナミック回路方式の、能動素子が少なくすむタイプのコンピュータだった。

1956年に完成したこのコンピュータは、当時の後藤以紀所長により「ETL Mark III」と命名された。トランジスタコンピュータとしては世界で3番目、プログラム内蔵式トランジスタコンピュータとしては、世界で初めてのものであった。

エポックメイキングだったことはほかにもある。それまでは記憶装置に水銀遅延線を用いるのが一般的だったが、「ETL Mark III」では、オリジナルの超音波遅延線を企業との共同研究によって開発しているのだ。光学ガラスを媒質とした安定した扱い

戦後始まった日本におけるコンピュータ開発。  
 産総研は発明されたばかりのトランジスタにいち早く目をつけ、  
 新部署を創設してトランジスタコンピュータの開発に着手した。  
 その成果は世界初のプログラム内蔵型トランジスタコンピュータに結実し、  
 国産商用コンピュータが続々と生み出されていく基盤となった。

やすい記憶素子の実現は、コンピュータ技術史において重要な出来事の一つである。

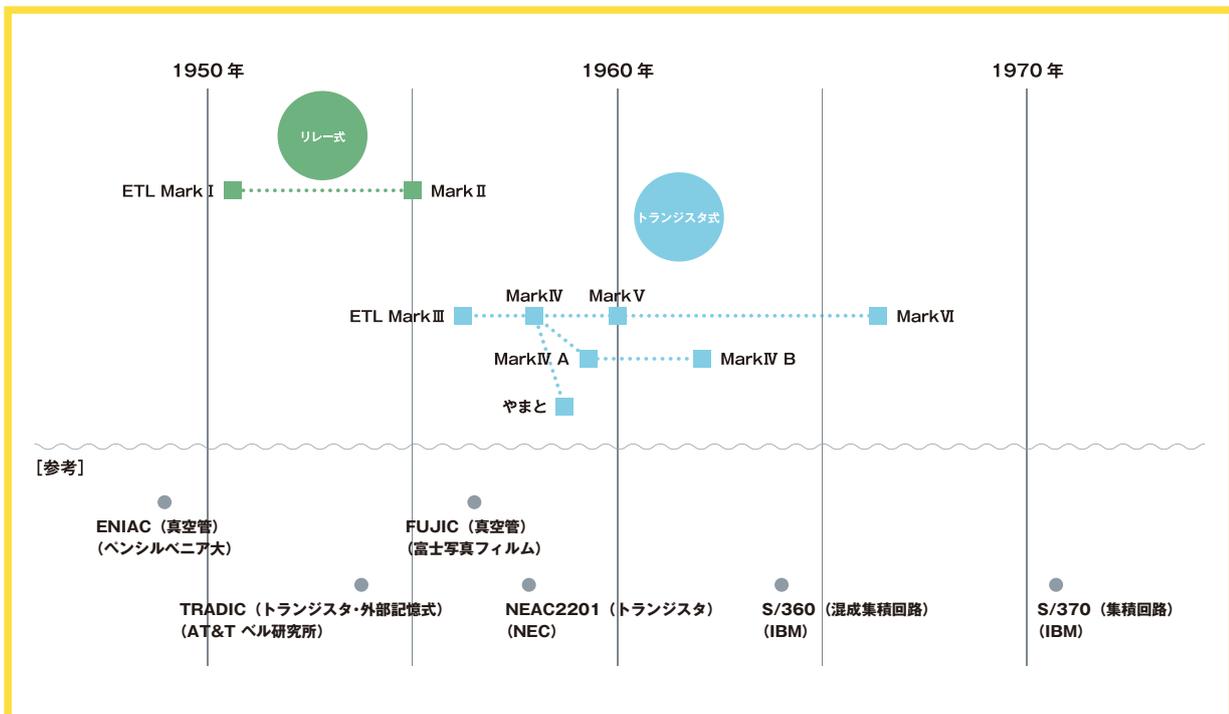
### 日本のコンピュータ開発における基礎技術となった

この「ETL Mark III」の成果をもとに実用機の開発が計画され、1年強の開発期間を経た1957年11月、「ETL Mark IV」が完成。ここでは不安定で生産中止の方向にあった点接触型トランジスタに代わり、低速ではあるが安定度の高い日立製作所製の接合形トランジスタを採用している。

基本回路はトランジスタ2個だけでデータを記憶できるダイ

ナミック・フリップフロップで、ゲート回路には日本電気製のゲルマニウムダイオードが用いられた。そして記憶装置には遅延線ではなく、北辰電機製作所（現在の横河電機）や東京通信工業と新たに開発した高速磁気ドラムを採用。この磁気ドラムは、当時としては画期的な記憶容量1000語、回転数18,000 rpm、アクセス時間1.65 ms(平均)を実現したものであった。

当時のオールジャパンの技術を結集した「ETL Mark IV」は、動作の安定性が非常に高いだけでなく、製作も容易だという優れたものだった。そのため、この後、続々とこれを基本として、日本電気の「NEAC 2201」「NEAC 2203」、日立製作所の「HITAC301」、松下通信工業「MADIC I」などが製品化され、技術導入により北辰電機製作所「HOC 100」他、多くの国産商用コンピュータが生まれていった。



▲ 電気試験所におけるトランジスタコンピュータの開発経緯  
 (出典:国立科学博物館技術の系統化調査報告第3集 山田昭彦著「電気試験所におけるトランジスタコンピュータの研究開発および資料保存状況」2003年12月)

サイエンスと技術を**LINK**する産総研  
科学技術とビジネスを**LINK**する産総研  
人々と科学技術を**LINK**する産総研

LINKの先にあるのは「技術を社会へ」  
そんな思いをのせたコミュニケーション・マガジン  
「産総研LINK」をお届けします

産  
総  
研 **LINK**

技術を社会へつなげるコミュニケーション・マガジン

産総研LINK No.20 平成30年9月発行

編集・発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
問い合わせ 企画本部 広報サービス室 出版グループ  
〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1  
TEL : 029-862-6217  
E-mail : prpub-ml@aist.go.jp



- 禁無断転載 ©2018 All rights reserved by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
- 所外からの寄稿や発言内容は、必ずしも当所の見解を表明しているものではありません。
- 「産総研LINK」へのご意見・ご感想がございましたら、上記E-mailまでお寄せください。今後の編集の参考にさせていただきます。

