

日立 総研

特集

バイオデータ活用が加速する産業革新

vol.13-2

2018年8月発行

表紙題字は当社創業社長(元株式会社日立製作所取締役会長)駒井健一郎氏 直筆による

日立 総研

vol. 13-2
2018年8月発行

- 2 巻頭言
4 対論 ～ Reciprocal ～

特集

バイオデータ活用が加速する 産業革新

- 12 研究レポート
世界的に加速するバイオデータ活用
研究第三部 部長 松本 洋人
研究第三部 技術戦略グループ 主任研究員 宮崎 祐行
- 16 寄稿
バイオ×デジタルによる産業革新
経済産業省 商務情報政策局 商務・サービスグループ 生物化学産業課 課長 上村 昌博
- 20 寄稿
Digitally-driven Bio Innovation Convergence
in the Bioeconomy: a U.S. Perspective
CEO, Global Helix LLC and Director - Engineering Biology Research Consortium (EBRC);
iGEM Foundation; and BioBricks Foundation
Richard A. Johnson
- 26 寄稿
Market Formation of the Bioeconomy in the UK
Co-directors UK National Innovation and Knowledge Centre for Synthetic Biology SynbiCITE,
Imperial College London
Richard Kitney, Paul Freemont
- 32 Voice from the Business Frontier
デジタル化によるオーストラリアの社会・産業の変革の可能性
日立オーストラリア 研究開発センタ センタ長 古川 直広
オーストラリア連邦科学産業研究機構
製造事業部プロジェクトリーダー/シニアリサーチサイエンティスト Murat Gel
- 36 研究紹介
38 先端文献ウォッチ

デジタルとノイズ

(株) 日立総合計画研究所

所長 嶋田 恵一

生物は常に揺らいでいるという。揺らいでいるため、生物は決められた動きを正確に繰り返し続けることが苦手らしい。確かに私は、同じことを繰り返し作業するのが苦手である。子どもの頃、漢字の書き取りが大の苦手だったことを思い出しながら、合点がいった顔をして話を聞いていると、それは飽きやすい性格や、忍耐力、根性の無さといった個人的な話ではなく、生物の体の仕組みに揺らぎが組み込まれているという話であった。

例えば、ロボットはネジを締めるような単純な作業を均一な品質で、継続的に行うことができる。一方、人間は、同じ作業場所で、同じ箇所の、同じ形のネジを締めるにしても、力の入れ方は一定しない。人間は脳からの命令信号によって筋肉が働き、体が動くが、脳の神経回路であるニューロンは知覚情報に対して時には強く、時には弱く反応し、動作を担う個々の筋肉線維は、脳からの命令信号に対して張力にばらつきがあるという。つまり、脳、筋肉それぞれに入力と出力間に揺らぎという不確実性が存在しているのだという。

揺らぎは生物のさまざまな動きに関係している。生物の遺伝子には体の働きに関する情報が格納されており、外部環境の変化に対して情報にスイッチが入る。食事による栄養吸収であったり、体づくりであったり、体を動かすための体内でのエネルギー生産であったり、代謝反応はこのような遺伝子に格納されている情報の発現が起点になっている。しかし、遺伝子は外部環境に対して必ず発現するわけではなく、細胞によってはスイッチが入ったり、入らなかったりと、個体レベルではばらつきがあり、ここでも揺らぎが存在している。つまり、生物の働きには遺伝子などのナ

ノレベルから体の動作のミリやメートルのレベルに至るまで揺らぎが介在している
のである。

このような生物の揺らぎは、言い換えれば入力に対する出力の「ノイズ」のよう
なものである。しかし、そのような細胞や生物が集まり、システムを構成すると、「ノ
イズ」が増幅されるのではなく、総体として安定的な動きを示すようになるという。
不思議である。農業や医療などはこのような生物の揺らぎ、ノイズ、不思議への挑
戦の積み重ねで成り立ってきたと言えるかもしれない。そして、近年、その挑戦が
遺伝子編集に効果的な酵素の発見というバイオ技術と、センサの精度向上や AI・ビッ
グデータ解析といったデジタル技術の進化によって、大きな進展をみせている。バ
イオとデジタルの融合によって、生物機能を活用した、新機能素材の開発や、環境
負荷の低いものづくりへの期待が高まっているというのである。例えば、工業的ア
プローチによって、農業生産をコントロールする世界や、自然界に存在する希少な
有用物質の量産化、高温・高圧を必要とする生産システムを、生物の代謝反応の原
理を使用し省エネルギーな生産プロセスに転換するなど、夢は大きく広がっている。

しかし、デジタルにとってノイズはある意味、敵である。情報通信、電子工学の
世界ではノイズをどのように排除し、必要な信号を取り出してやりとりするかが重
要であったはずである。そのようなデジタルとバイオを融合させるとはどのよう
なものだろうか。ノイズを排除してきたデジタルが、生物のノイズを表現するとは、
矛盾しているようにみえて不思議に思う。と同時に、「集合すると安定化する」とい
うからには、単なる無造作なノイズと異なり、生物の揺らぎには法則が存在するの
ではないか、とするとデジタルでできることがあるのではないかとも思う。要する
に私の思考が揺らいでしまっているのである。デジタルとバイオの間には、広大な
空間が存在しているように感じられるが、だからこそ、これからのイノベーション
領域としての可能性が詰まっていると言える。

米中パワーバランスの動向と日本

～国際秩序の変化を捉え、日本企業が進むべき道を考える～

冷戦終結から約30年、米国は自国中心の政策展開により世界への影響力が低下し、中国のプレゼンスが高まっています。世界の覇権・国際秩序を巡り太平洋を挟んで米中が対峙するなか、企業経営の舵取りはますます難しくなっています。

今回は東京大学政策ビジョン研究センター長の藤原帰一氏をお迎えし、混迷する世界はどこへ向かうのか、日本企業はどう対処するべきかを伺います。



藤原 帰一 氏

東京大学
政策ビジョン研究センター センター長
法学政治学研究科(国際政治) 教授

東京大学法学部卒業、同大学大学院博士課程単位取得満期退学。フルブライト奨学生としてイェール大学大学院に留学。東京大学社会科学研究所助手を務め、千葉大学法経学部助手、同助教授、東京大学社会科学研究所助教授を経て、1999年から現職。フィリピン大学アジアセンター客員教授、ジョンズ・ホプキンス大学高等国際研究院客員教授、米国ウッドローウィルソン国際学術センター研究員などを歴任した。著書に『戦争を記憶する』(2001)、『デモクラシーの帝国』(2002年)、『国際政治』(2007年)、『戦争の条件』(2013年)がある。

国際秩序が大きく変化

白井: 日立は戦後の自由主義経済、自由貿易のなかでビジネスを拡大してきました。1978年に鄧小平氏の改革開放政策が始まった後、1981年には日本の製造企業で初めて中国にテレビの生産工場を設立しました。

現在、世界第二位の経済大国となった中国と第一位の米国が、世界のGDPの約4割、軍事費の5割弱を占める二大大国(G2)として対峙^{たいじ}しています。この状況を歴史的にどのように捉えておられますか。

藤原: 冷戦終結後、米国、欧州、日本は自由主義経済、民主主義の国として結束し市場経済の拡大をリードしてきました。旧ソ連と中国も自由主義経済へ徐々に統合され、主導権は米国、欧州、日本にありました。軍事面では、旧ソ連は米国への対抗政策を転換、中国は鄧小平氏の米国訪問を機に対立は収まり、世界は政治的、経済的に安定していくと思われました。現在は中国が経済的・軍事的に台頭する過程にあり、米国、日本との協力路線から自国に有利な政策を強く打ち出すようになってきました。経済での台頭とともに独自の対外政策を追求しており、それは一帯一路構想からもみえてきます。世界のパワーバランスは中国が上昇し、相対的に米国、欧州、日本が下降しました。中国は軍事面でも世界有数の海軍力を持つまでに成長し、黄海から外洋へ出てインド洋、東シナ海、南シナ海、尖閣諸島沖合にも活動領域を広げています。

中国の躍進とは対照的に、欧米中心の世界は大きく後退しました。先進国はこれまでの新興経済圏の統合による成長を維持することができなくなっています。

1980年代から1990年代まで雁行型^{がんこう}経済発展が続き、日本を先頭にアジア諸国も経済成長していくと思われました。地域的分業で日本がVTRを製造すれば、韓国はカラーテレビ、タイは白黒テレビを生産するというように、技術水準で日本が先頭に立ち、後に続く国を日本企業が支える形です。これに中国も加わると考えられましたが、企業も垂直分業から水平分業へ移行し、結果的に日本が常に先頭をいく状況は揺らいでいます。こうした秩序の変化は先を走っていた側の優位を脅かします。

短期的に地政学的変化が大きいのは中国以上にロシアです。クリミアを併合し、ウクライナの東部地域を事実上制圧、シリアにも大規模な派兵を行っています。

冷戦終結から約30年、世界の勢力図は変わり、政治的、経済的、軍事的な不安定要因が高まっています。

米国と中国の動向

白井: 米国ではトランプ政権が「米国ファースト」を掲げ、米中二国間の貿易交渉、北朝鮮の非核化交渉など、オバマ政権の時代に比べ良くもあしくもさまざまな変化が起きています。

現在のトランプ現象は今後も続き米国自体が大きく変わるのか、あるいは軌道修正され以前の米国に回帰していくのでしょうか。

藤原: トランプ氏が大統領に就任してから1年半、国際関係は米国に振り回されています。トランプ氏が大統領に当選しても米国の外交政策は大きく変わらないとみられていました。それはこれまでの貿易秩序、国際秩序が米国に極めて有利であり、制度の見直しは長期的に自分の首を絞めることになるからです。米国中心の同盟ネットワークを構成する北大西洋条約機構(NATO)、日米安全保障条約、米韓相互防衛条約などは米国の力の源泉といえます。しかし、トランプ氏の支持者からみるとこれらの制度は見直すべきものでした。彼らは貿易は一部の米国企業を除き、他国が米国経済を食い物にし、同盟は他国の安全のために米軍が使われている、と確信を持っています。彼らの固い支持を得たトランプ大統領は、貿易・同盟体制の見直しに取り組み、最近ではEUに鉄鋼・アルミニウムの追加関税を課すという予想外の動きをみせています。

ここで問題となる点が二つあります。一つは、予測可能性が大きくなってきたことです。政策に選択の幅があっても既得権を脅かす道は選ばないと読めば範囲は狭まります。しかし、排他的な国内世論を基礎に政策を進める大統領の登場により、起こる可能性のある変化の幅、予測範囲は極端に広がりました。安全保障においても、例えば北朝鮮対策で歴代の大統領が採択しなかった選択が二つあります。一つは北朝鮮への先制攻撃、もう一つは米朝首脳会談です。二つの政策とも米国にとって不利益と考えられ、オバマ政権の8年間^{こわう}は膠着状態が続きましたが、トランプ大統領は後者については実行済み、前者についても実行しかねない状況です。要するに、国際的な制度の安定性が著しく損なわれる可能性がある、ということです。国際的な制度とは、国連などの国際機構に限らず、自由貿易の仕組みや通貨体制なども含みます。米国がその枠組み全てを見直す立場を取るだけで世界に大きな影響が及びます。

二つ目は、米国社会にはトランプ氏を支持する世論(共和党右派)があり、政権を取るだけの力を発揮したことです。トランプ大統領にはロシアゲート疑惑などもあり、政権が長続きするかどうか現時点では分かりません。トランプ支持層は年齢が高く、大多数が白人です。人口構成を見れば次第に白人の比重は下がるた

め、票に影響を及ぼす強いグループになるとは思いませんが、なくなることはありません。むしろ緩やかに減少すると見込んでいるからこそ声を上げ、強硬な意見を訴えてくるでしょう。

白井: トランプ政権が自国中心の内向き志向に傾斜するなか、中国は中央アジアのインフラ整備、パリ協定の推進など、少なくとも表向きは自国の役割をきちんと果たす姿勢を世界にみせています。しかし、中国が「一帯一路」を掲げる背景に對外権益を拡大する狙いもみえます。ビジネスの中でも例えば、中国は将来を見込んで電気自動車(EV)に使用されるレアメタルの安定供



給を確保し、米国を抜いてEV分野の世界シェアトップに躍り出ました。膨大な人口を抱えた中国が成長を続けるために権益や資源を追求するのは当然といえば当然ですが、しっかりと世界への貢献をアピールしています。

マーシャルプラン以来、米国中心に自由と民主主義のビジョンを共有する国と連携してきた西側と、権威主義的な中国、この二つの異なる価値観が共存しています。一帯一路を様子見していた日本も協力する方向へ動き始めましたが、日本は中国の立ち回りにどう対処すればよいとお考えですか。

藤原: これまで日本政府の対中政策は「経済的なチャンス」「軍事的な脅威」の二つで揺れてきましたが、今は経済協力を深めながら軍事的脅威を抑制する方向に向かっていきます。

中国にはさまざまな側面があるため、三つに大別して考えます。一つ目は、「責任ある大国としての中国」です。かつては自国の主張を通し、意に沿わない場合は協力しないという、ゼロサム的な判断をしていた中国が世界貿易機関(WTO)に加盟し、国際機構を担う活動も始めました。現在、国連の平和維持活動は中

国の協力なしには成り立ちません。スーダンの内戦を機に大規模な軍事経済協力を展開し、他の国が国連活動に関与しないなかで積極的に関わっています。習近平国家主席の発言を聞くと、自由貿易の担い手は米国から中国に代わった印象さえ受けます。環境分野においても、再生可能エネルギーの開発・拡大は他の国に比べて抜きん出ています。

問題は「責任ある大国」とは正反対の行動が同時に起こっていることです。中国は経済が弱かった過去があり、改革開放政策の時代には米国や欧州のルールを受け入れてきました。将来の発展を見込んで、外資にさまざまな優遇措置を与えては国内に引き寄せてきましたが、今はそのころと同じ優遇措置は期待できません。実は、1960年代から1970年代に日本経済が台頭したときも米国への反発は起こりました。鉄鋼貿易を巡り「日本には競争力がある、それなのになぜ米国の言うことを聞く必要があるのか」と日本の強い立場を訴えました。中国にも同様の動きがみられますが、日本と決定的に違う点は「貿易や経済と軍事のリンク」です。これが二つ目のポイントです。

中国は一帯一路の周辺諸国に投資や援助を申し出る際、途上国が到底返済できない借款を与えています。例えば、スリランカの港の建設に協力し、借款の抵当として港を使う権益を確保しています。中国に日本はどう向かい合えば良いのか。まず中国とのビジネスを断つ選択肢はないと考えます。仮にビジネスを断ったとしても軍事的な対立は打開できませんし、中国の代わりになる市場もありません。インドの急成長が見込まれますが、インフラ整備が不十分で国内市場も限られています。中国経済は世界金融危機以前より成長率は下がりましたが、バブル崩壊のような転落はありません。今でも他の新興経済圏全ての合計を超える規模の成長をしているのです。中国の軍事的脅威は米国以上に警戒しなければいけません。今の安倍政権が中国に協力する方向に向いているのは、習近平政権が安定しているからです。

三つ目のポイントは、「政権が安定し、予測可能性が高い中国」です。胡錦濤政権は経済を中心に、国際貿易体制との関係ではむしろ開放経済を志向していました。胡錦濤氏の政策は中国経済の状況に見合った適切なおもであったと私は考えますし、また日本にも有利なものだったと思うのですが、胡錦濤政権自体が政治的に弱く、軍を統制することもできなかった。これとは逆に、習近平政権では共産党が軍と政府を統制し、安定しています。人民解放軍が党政治局の判断を仰ぐことなくベトナムの排他的経済水域にプラットフォームをつくりましたが、そのプラットフォームも解体させたのは象徴的な事件でした。党政治局が軍に対する統制を取り戻したわけです。人民解放軍の軍事戦略の基本的

な方向性そのものは変わりませんが、新たな勢力圏を確保するより、既に手にした勢力圏を安定的に支配していくことが習近平政権の方向だと思えます。例えば台湾問題では妥協しないといったように、目標や方向性がはっきりしており、米国よりも予測可能性が高い。他方で、広域に覇権拡大を追求しています。以前、ハワイまでが米国、それより近い方は中国と発言した軍将校がいましたが、今はそうした主張をする幹部は更迭されます。こうした流れからも、中国は望ましい相手ではなくとも予測可能であり、日本も協力というより相対的な安定化をめざすスタンスを取っています。

日中関係より問題なのは米中関係です。米国政府内では、中国の軍事的脅威についての議論が対立を続けています。これはトランプ政権が非常に不安定な体制であることの表れでもあり、例えばポンペオ国務長官の路線が中心となれば、中国を強く牽制すると同時に、安定化を探る伝統的な外交になります。中国は軍事的な地域覇権に向かっており、今は牽制を強めるのが望ましい選択です。マティス国防長官、ボルトン大統領補佐官(国家安全保障問題担当)も同じ側に入ります。6月にシンガポールで開催された第17回アジア安全保障会議(シャングリラ・ダイアログ)の場で、マティス国防長官が中国の軍備拡張に対し極めて厳しい発言をしたのは、米国政府に向けたメッセージでもありました。経済活動でも米国にとって中国は不公正な貿易慣行で一番問題のある国です。米国企業が打撃を受けたとしても、貿易関係見直しを優先する立場を取る可能性があります。米国が経済的・軍事的な牽制を強化した場合、当然中国は対抗策を強めます。今注目されている鉄鋼・アルミニウム関税はその一例です。貿易摩擦が拡大し、結果的に日本が影響を受ける可能性はあります。日本が中国での経済機会を優先しても、米国の政策によっては土台から壊されてしまいます。いずれにしても習近平政権よりトランプ政権が予測困難という不安要素があります。

白井:中国は、一带一路構想において国際協力の新たなフレームワークを提起しました。これに対抗する形で自由主義を共有する日本、米国、オーストラリア、インドが「インド太平洋戦略」を提起しています。一带一路に対し、伝統的経済連携のインド太平洋戦略はうまく機能していくとお考えですか。

藤原:これは地域覇権の対抗です。中国が米国に代わる大国をめざしているとは思いません。そもそも中国指導部はそれだけの国力があると考えていないからです。改革開放政策を担ってきた世代がまだ政治権力の中核におり、彼らは自国の弱さをよく認識しています。石油危機のときの日本経済が大きな打撃を受けても非常に早く立ち直ったのは、自国の弱さをリアルに認識して政府が早急に産業政策を打ち出し、企業の投資活動を誘導したから

でした。企業もすぐに労働組合の協力を取り付け、解雇しないことを条件に賃金を減額、同時に生産の再構築に取り組みました。今の中国指導部には石油危機当時の日本のような「弱さの自覚」があり、それが危機に対応する力の源になっています。もっとも中国はこれから先、一人っ子政策の時代に生まれ「中国が偉い」と考える世代が政治を担う時代が来ます。その時はどうなるか分かりません。

一带一路は、欧米に左右されず、友好国と市場を確保する経済圏構想で、目的が限定された固い政策なので、簡単には妥協し



ないでしょう。大きなターゲットとされるイラン、パキстанは、もともと中国との関係が深い国です。特にエネルギー供給拠点としてのイランは、欧米の影響が限られます。つまり中国が信頼を得られる国と協力を強める狙いがあります。

一带一路を日本にとってのASEAN(東南アジア諸国連合)に例えるとよく分かります。ASEANは巨大市場であり、日本に協力的です。国連で議決する際は、日本と同じ票を投じると期待できます。宮澤元首相の「ASEANは日本の選挙区」という発言を聞いたとき、非常にうまい表現と思いました。中国は一带一路構想で「選挙区」を広げようとしており、それは外への影響力拡大には有効な政策です。インド太平洋戦略で対抗するのは容易ではないでしょう。中国が展開する政府開発援助(ODA)は、各国に膨大な経済的インセンティブを提供しています。以前、米国は対テロ戦争の協定の一環としてパキстанに関与し、財団やNGOなどと関係を深めようとしたが成果は限られました。何よりもインセンティブが弱かったからです。中国の強みはインセンティブの強さ、つまりお金です。軍事的に脅して各国を言いなりにしようとしているわけではありま

せん。巨額の資金を援助し、それが無駄になろうとも権益を追求するスタンスです。その中国に対抗措置を取る国はありません。旧ソ連に属していたアゼルバイジャンは依然としてロシアの影響力が強い国ですが、カザフスタン、モンゴルでは中国が存在感をみせています。繰り返しになりますが中国の影響力拡大を左右する国はイランとパキスタンです。中国が提供するインセンティブに見合ったものを、われわれがどれだけ提供できるかにかかっています。

通商政策の行方

白井: 米国と日本がリードしてきた環太平洋パートナーシップ協定(TPP)は、世界で最も高水準の自由貿易協定(FTA)です。自由貿易の促進が経済発展をもたらす流れは変わらないと思われましたが、米国が離脱したため11カ国(TPP11)でのスタートとなりました。米国の通商政策は多国間協議から二国間協議へシフトしていますが、中長期的にどう変化していくとお考えですか。

藤原: 世界の貿易秩序は変動が始まったばかりですが、今後、状況はさらに厳しくなります。その根拠を申しあげる前に、貿易自由化は相当進んでいることを認識しておく必要があります。貿易自由化は、TPP協議が始まる前にほぼ達成されています。逆に言うと、残された領域は知的財産権、豚肉、米など実現が難しい政治的な懸案事項ばかりで貿易拡大によるメリットも限られます。例えば、アフリカ諸国の経済政策が西側との協力を深める方向に変わったとしても、ケニア、ナイジェリア、スーダンなどは国内市場が小さいため市場拡大は期待できません。

貿易自由化に反対するグループは、これまでは基本的に左派の人々でしたが、そこに今変化が生まれています。英国のEU離脱では、保守党の離脱支持者と労働党の左派がともにEUに反対でした。それまで左派のポピュリズムが貿易の自由化にくさびを打つ役割を担っていましたが、現在は左派と右派、両方のポピュリズムが勢いを持っています。ハンガリーとポーランドのように、EUに加盟したことで明らかに利益を得ている国でも右派のポピュリズムは高まっています。

米国では、貿易自由化についてバーニー・サンダース氏を支持する若いミレニウム世代の支持はまとまっていませんが、トランプ氏支持者のハードな保守層は懸念を抱いています。多くの先進工業国が貿易自由化に反対するグループを抱えているのに対し、それが相対的に少ない国が日本です。日本の反対派は農業関係者が中心のため、TPP協定ではそこまで大きな問題になりませんでした。米国のTPP離脱は、自由貿易に反対したのではなく、米国に不利な貿易に反対したものです。そもそも自由貿易はどちらか

に有利、不利の問題ではないのですが、TPPの合意事項を大幅に変えなければ米国が戻ることはないでしょう。米国に有利な自由貿易とは、全ての貿易協定の見直しです。これを集団的に行うのは不可能であり、米国用のWTOもあり得ないので二国間協定になるのは必然ですが、この状況は貿易体制を不安定にします。甘利明元大臣がTPP推進に尽力されたのも、個別に二国間で合意すること自体が制度の安定性を損なうためです。貿易はどうしても国内の反発があり、総論賛成、各論反対になるからこそWTOが設立されました。二国間協定に頼る動きはトランプ大統領が登場する以前から続いています。現在、二国間協定によって貿易体制を骨抜きにすることが起こっています。TPP離脱



は間違いなく米国の首を絞めます。日本がTPPの日米交渉で、日本側に厳しい内容でも受け入れたのは、TPPの実現が全体として有利になると考えたからです。現在の流れは、集団的に合意した貿易体制が緩やかに後退していく過程とみています。

さらに問題なのは、短期的にはこれが経済に有利に働く側面があることです。長期的には経済に大きな打撃を与え、政策が後退すると分かっているにもかかわらず、マーケットはネガティブな反応をみせていません。交易条件を自国有利に見直すことができるという期待にポジティブに反応し、米国の株価は高水準を維持しています。短期的に景気を刺激しても、結果的には不利益な悪循環に陥ります。かつての日米貿易紛争で注目された通商法301条が再び出てきたのはWTOが発足して以来初めてです。

短期的に厳しいのは景気後退が進むEUでしょう。この先、EUを離脱する国が出なくても域内の貿易秩序が揺らいでしまうと、成長が停滞し、経済には大きな打撃となります。

白井: 米国の最大の貿易赤字国は中国ですが、中国の米国向け輸出の6割は米国企業を中心とする多国籍企業によるもので、両国は極めて強い相互依存関係にあります。米国の制裁対象は、鉄鋼など既存の貿易製品から通信・ハイテク製品まで広がり、中国の投資政策や「中国製造2025」などの産業育成策、先進技術移転要求も批判しています。米中の貿易摩擦が日本にも飛び火し、世界経済にショックを与えるリスクもあります。米中間の通商問題は今後どのように推移し、日本への影響をどう考えるべきでしょうか。

藤原: 米国と中国の貿易摩擦は、日本も制裁対象に加えられる可能性があり、短期的にみて一番大きな課題です。ただ実際には、日本の鉄鋼・アルミニウムの輸出規模はそれほど大きくなく、



トランプ政権はこれらが米国市場に及ぼす影響に過剰に反応している節があります。誤った認識に基づいて政策を立案する可能性は否定できません。

少し視点を変え、トランプ政権の政策立案者は誰なのか考えてみます。トランプ大統領が自らつくるわけではなく、閣僚やそれぞれのプロフェッショナルから提起された政策に対しダメ出しをする、という構図が徐々にはっきりしてきました。時には、プロフェッショナルが反対する政策も公表してしまいます。鉄鋼・アルミニウム関税については十分に政策検討されたとは思えず、プロフェッショナルであれば慎重に協議し、公式発動前に相手に譲歩を求めるはずですが、実際、水面下の交渉が繰り返されている最中に、大統領がTwitter®で発表して流れを変えてしまうのがトランプ政権の大きな特徴であり、かつてのレーガン政権とは決定的に違う点です。レーガン政権では、実務家が立案した政策に沿って大統領がリーダーシップを取る筋書きでした。

米国は中国の不正な貿易慣行に対する規制を強化しており、貿易摩擦は避けられないでしょう。もっとも、米国政府が強い圧力を加えるのは、日本にとっても望ましい中国市場をつくる一助にもなります。米国の政策を利用しながら、中国により公正な貿易慣行の実現を迫る機会でもあります。

中国側は過大な公共投資について緩やかに見直しているところですが、公共投資を拡大したのは世界金融危機の打撃を回避する手段でした。貿易拡大にも協力し、膨大な公共投資を行うイメージからは変化していますが、中国企業の不利益になる合意を受け入れる可能性はむしろかつてなく低くなっています。米国が中国に制裁を加えると、中国は国内市場中心の経済運営に向かうことになり、国際貿易量は激減します。米国の対中貿易と中国の対米貿易の依存度を比較すると、依然として中国の対米依存度が高く、米国は圧力を加えれば中国が妥協する、と期待するかもしれません。ただ、中国の対米依存度は急速に下がっており、制裁を受け入れる必要はないと判断する可能性もあります。舞台裏の交渉が続くなか、現在のところ中国側は米国が求める条件を受け入れないことを表明しています。日本が制裁のターゲットにされる可能性もありますが、一番の問題は貿易が後退して世界経済に悪影響を及ぼすことです。

デジタル時代のイノベーション

白井: ^{がんこう}雁行型経済発展の時代は、先進国が技術革新を生み出してきました。IT時代に入ると「イノベーションの起源は米国」といわれるようになり、シリコンバレーを中心に最先端技術が次々と開発されていました。2012年ごろまでは米国の中国人留学生は帰国するよりシリコンバレーなど米国で起業することの方が成功への道でした。しかし最近では「innovate in the United States, commercialized in China」という現象が起こっています。中国の若者が米国で学んだ後、帰国して深圳などで起業し大成功する事例も増えており、イノベーションの概念が変わりつつあるように感じます。特にデジタル産業は限界コストが下がるため、莫大な投資をしなくてもアイデア一つでビジネスになることもあります。外国企業に先進技術移転を強く求める中国が、これまでと違う形のイノベーションで世界をリードしていくパターンも増えると思います。ボーダレス時代におけるイノベーション、知的財産保護をどう考えるべきでしょうか。

藤原: AmazonやGoogle®は米国から発信されていますが、近年、中国ではこうしたプラットフォームビジネスで主導権を握ろうとする動きがあります。米国で成功したプラットフォームをコ



ピーし、中国に合わせたものに換えて国内市場のシェアを拡大していく。このパターンは以前から高速鉄道などでも見られました。この電子版と考えると分かりやすいでしょう。

しかし、中国はコピービジネスで知的財産権に反する行動をしているだけと捉えるのは間違いです。科学技術の発展も著しく、物理学の分野では論文数も米国を凌駕するまでに至っています。国内の技術力が飛躍的に向上しており、新たなイノベーションを生み出すのもそう遠くないかもしれません。中国発の技術をわれわれが学習する時代が到来する可能性もあります。

日本は、未来の技術システムで主導権を取るために、米国、中国両国の研究者と共同で技術開発力の強化に取り組んでいくべきです。中国や米国だけにやらせないことが重要です。日本は、高効率、低コスト製造など、産業技術分野では依然として卓越した存在です。その点では、まだ中国が後追いでいる状況にありませんが、相対的に重要性は下がっています。変化のスピードは非常に速く、日本が主導権を握ってプラットフォームビジネスに関わることができない、極めて厳しい現状に危機感を抱いています。

白井: デジタル化が進むなか、データが価値を生む「データ資本主義」という言葉も出てきました。デジタルビジネスにおける米中間の競争は激しく、米国は対米外国投資委員会(CFIUS)による規制を強化、中国はインターネット安全法による外資系企業の国内データ持ち出し禁止や先端分野における国内企業優遇政策を進めています。また、EUの一般データ保護規則(GDPR)では、EU域外への個人データ持ち出しが禁止される一方で、産業用機械から得たデータはEU各国間で移転可能です。世界が

ルールを共通化してきた流れのなかで、データに関しては米国、中国、欧州、日本がとる政策はそれぞれ異なるものです。

これまで異形とされてきた中国型の制度やシステムが、データ資本主義社会に親和性があるように見えます。中国では政府がデータを大胆かつ自由に活用できます。その典型が国内に張り巡らせた監視システムです。全てを映像で撮影し、大勢が集まるなかでも特定人物を見つけ出すことができます。西側ではプライバシーの侵害とされることが、中国では治安維持に貢献し、顔認証技術や情報通信技術を応用することでデジタル社会の便益も広げています。データやプライバシー保護に関する政策は、今後のビジネスにどのような影響を与えていくのでしょうか。

藤原: 中国のデータ規制や個人情報保護は、欧米や日本と全く異なります。中国がこのままデータの管理統制を続けられるとは思いません。その理由は二つあります。一つは、社会の自由化が急速に進み、情報を完全に規制することが難しくなり、いちごこの状態になるという点です。

もう一つは、金融関係の取り引き情報です。米国は世界中のドル決済情報を掌握しており、マネーロンダリングを摘発して国内法を適用したケースもあります。

イランに対する経済制裁で大きな影響力を持ったのは、米国の経済制裁というより、イランと取り引きのある外国金融機関に対する規制で、これを「二次制裁」といいます。西側が制裁を加えている北朝鮮、イランと中国との取り引きの情報も米国はつかんでいます。

日本はプライバシー保護、個人情報流出に対する規制が強く、世界の動きにどう巻き込まれていくのかは不透明です。ただ、イ

ランとの金融取引における規制では、米中間の問題とは別に日米間でも争点になると思われます。

日本がとるべき道は

白井:米中両国は日本企業にとって重要な市場であり、事業・生産拠点も多数存在します。米国が中国に対して圧倒的優位だった時代は終わり、表面的には対立しても、裏では戦略的に連携するなど、今後もさまざまな状況が考えられます。巨大市場を持つ米中に日本企業はどう対応すべきとお考えですか。

藤原:日本は大きな国内市場を持ちますが、経済活動は貿易中心です。貿易立国であることを前提とし、自由貿易制度が重要であるというスタンスを崩してはなりません。日本でも右派・左派のポピュリズムが力を持つ可能性があります。

米国との関係については、市場開放圧力や、米国の関税引き上げなどの規制にも備えなければならない状況です。1960年代、1970年代の米国は保護貿易に向かう動きを示しながら、市場開放へ圧力をかけてきましたが、ここにきて保護主義的な政策を強めています。米国が国内市場の保護に向かうことは、そもそもWTOの原則に反しますので、日本は単独でなく多国間で対抗すべきです。個別交渉では米国から対価を求められ、対抗政策を続けることが難しくなるでしょう。そうなると米国市場へのアクセスを保つには譲歩するしかないという議論が必ず出ますが、譲歩すれば自由貿易体制は一気に弱まってしまいます。原則論からみてもこれは決して譲ってはいらない一線です。他国とのチームプレーで臨むのは、国際協力が個別国の利益より重要という意味でなく、多国間プレーでなければ対抗できないためです。貿易体制は数で動くため、多数派を手にした方が圧倒的に強くなる、つまり貿易政策の圧力はマーケットで大きなシェアを持つ団体の共同行動が重要なのです。また、必要に応じてWTOに提訴することも重要です。現在の状況が続けば、G8の中ではまず欧州が米国に対抗するでしょう。その際、直接対決ではなく、米国の貿易規制に賛成できないという立場を堅持するのではないのでしょうか。中国の自由貿易を維持する政策は日本にとって歓迎すべきことです。中国との関係においても自由貿易の立場を崩さず、中国がルールから大きく外れる時もチームプレーで打開していくべきです。TPPの推進は、中国に対する牽制という側面もあります。もともとTPPには「中国不在の巨大な市場をつくる」「中国が制度を変えるための圧力」という二つの捉え方があり、それぞれの意図は全く異なります。前者の場合は巨大な市場を失う可能性があるため、

望ましい戦略的連携になりません。中国はWTO加盟時に法制度を変えており、その流れでいくとTPPに参加することも考えられます。しかし、中国が知的財産権や直接投資などの問題に真剣に取り組まなければ、安定した貿易を期待することはできません。

中国との関係において、安倍政権が協力路線に変わりつつあるのは良い判断です。協力するなかで、日本が受け入れられないことは明確に示していく。日本が単独で対抗できる力は限られており、各国との協力は不可欠です。TPPをベースに考えると、協力すべき国はオーストラリアとカナダです。オーストラリアは資源輸出で中国への依存度が高く、一方で不公正貿易慣行に対する反発も強い国です。カナダも中国との貿易が拡大する一方で、貿易摩擦を経験しています。米国の貿易規制に対抗する際も、EUやオーストラリア、カナダと連携を強め、多数国間で取り組むのが賢明です。可能なら、米国がTPPに復帰したうえで、多国間で中国に対する貿易政策の要求を展開する方向を模索していけるとよいと思います。以前はトランプ政権も共同のスタンスを取り、成果を上げていました。現在の単独制裁から引き戻すことが必要です。

白井:国際関係の現実を捉えつつ、これまでになく複雑な連立方程式を解きながら進んでいくような世界ですね。

藤原:そう思います。難しさが表に出た分だけ、取り組みやすくなったとも言えるでしょう。

白井:本日はお忙しいところありがとうございました。

藤原:こちらこそありがとうございました。

編集後記

今回は、国際政治をご専門とされる東京大学藤原教授に、国際秩序の変化から通商政策でのパワーバランス、イノベーションまで幅広くお話を伺いました。貿易立国である日本が、貿易自由化を巡る諸外国の動きを背景にどのようなスタンスをとるべきか、というお話は大変示唆に富むものでした。また企業としてもデジタル時代において米中両国と日本の産業技術を生かした共同開発の方向性を考える重要性を改めて実感いたしました。



世界的に加速するバイオデータ活用

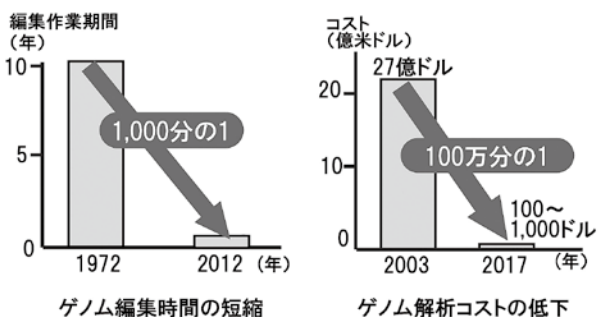
研究第三部 部長 松本 洋人
研究第三部 技術戦略グループ 主任研究員 宮崎 祐行

ビッグデータ、AI (Artificial Intelligence) などの ICT (Information and Communication Technology) の発展は、さまざまな産業分野のデジタル化を促進し、業界の構造変化をもたらしている。バイオ産業においても、ゲノム編集技術とセンサや計測機器などの技術進展により、データ主導型の研究・事業開発が活発化している。

本稿では、膨大なデータの利活用拡大によって変革が進むバイオ産業について英国や米国の動向を検証するとともに、日本の競争力強化に向けた施策を論じる。

1. 増大するバイオデータ

2012年にカリフォルニア大学バークレー校とスウェーデンのウメオ大学から発表された、ゲノム編集技術 CRISPR/Cas9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, CRISPR Associated Protein 9) は、バイオ研究の世界に劇的な変化をもたらした。従来、ゲノム編集は試行錯誤的な実験を必要とし、目的の結果が得られるまで10年以上の膨大な期間を必要としていた。これに対して、CRISPR/Cas9 技術を活用することで、生物のゲノム編集を目的どおりに数日以下で行えるようになった (図1)。



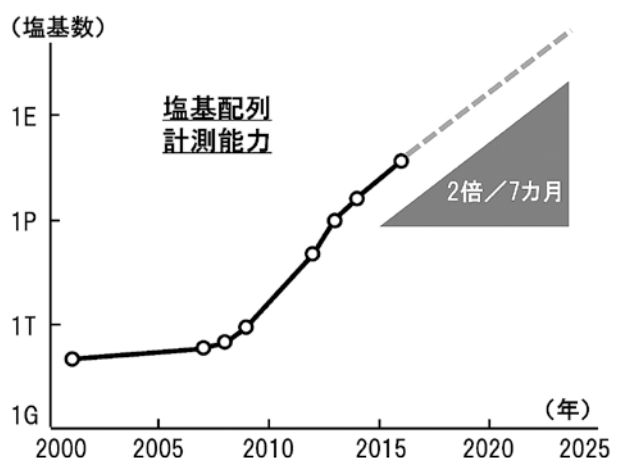
資料：各種資料より日立総研作成

図1 ゲノム編集時間とゲノム解析コストの変化

ビッグデータ処理技術とゲノム計測シーケンサ技術の進歩も2000年代の後半から加速した。2003年にヒトゲノム計画が完了した時点で27億ドルだった遺伝子解析コストは、現在では100～1,000ドルまで劇的に低下している (図1)。

このような、ゲノム編集・解析にかかる時間と費用の圧倒的な削減は、バイオ産業の発展を加速させる。特に、編集作業やシーケンサから生み出されるバイオデータ (遺伝子情報、細胞内代謝反応情報など) の蓄積量は、7カ月で2倍というペースで増大し続けている (イリノイ大学) (図2)。このような膨大なバイオデータの蓄積は、素材・医療分野や石油化学分野において、新事業創生の可能性を生み出している。

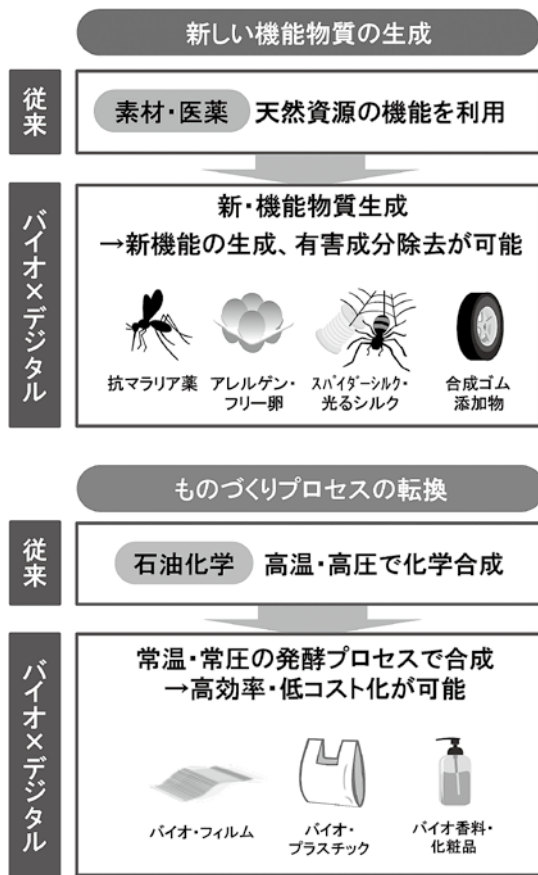
新事業創生は、2種類ある (図3)。一つは、新しい機能物質を生成するもの、もう一つは、ものづくりプロセスを環境負荷の低いバイオプロセスに転換するものである。新しい機能物質の生成では、バイオデータを活用することで天然資源からは得られない新機能素材を設計したり、天然資源の有害成分を特定・除去



注：研究所・企業に蓄積される遺伝子情報を塩基数で計測

資料：各種資料より日立総研作成

図2 バイオデータ量の推移



資料：各種資料より日立総研作成
 図3 バイオ関連データの活用による新産業

することで有用物質を生成したりすることが可能になる。絹糸に伸縮性を持たせたスパイダーシルクや、アレルギーを含まない卵を産む鶏などが、挙げられる。バイオ医薬品も、タンパクなどの新機能物質生成分野に該当し、2022年には30兆円の市場規模となる。ものづくりプロセスの転換では、高温・高圧の石油化学プロセスで合成していた物質を、常温・常圧のバイオ発酵プロセスにより生成する。この分野の市場規模は2030年に130兆円と見込まれている。ここでは、バイオデータを活用し、発酵や物質転換に効果的な酵素を特定し、化学変化でなく代謝反応などを活用し、物質を生成することが求められる。バイオ燃料やバイオプラスチックなどの植物由来製品の高効率かつ低コスト生産が可能になる。

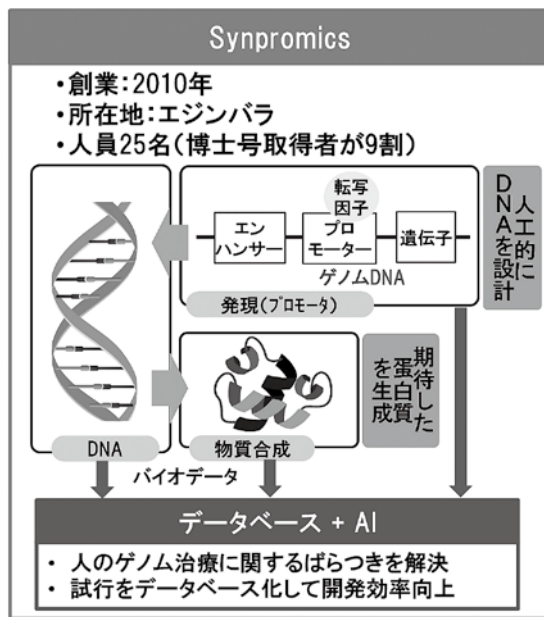
このような、バイオデータを活用した新事業創生への期待の高まりに伴い、英米を中心に同分野のスタートアップ企業などへの投資が拡大している。これまでIT分野への投資を得意にしていたベンチャーキャピタル、ソフトバンク、Google元CEOなどの投資家グループが投資ファンドを組成し、バイオ分野のスター

トアップ企業への投資を始めている。英国では、バイオベンチャーへの投資が金額、件数ともに年々増加しており(160M£・15件/年)、参入企業も増加している。

2. バイオデータ利用の研究開発を加速する英国

英国は、バイオデータ活用により新しい機能物質の生成を行うシーズ技術の研究開発に注力している。特に、政府が積極的に投資を行い、次世代産業の研究を担う優秀な人材を世界中から集めている。実際、英国の学生数約230万人に対し、バイオ・デジタル分野の研究者が15万人、そのうち留学生が9万人となっており、有数な人材集積地となっている。バイオ分野に特化した科学研究費を助成する、政府BEIS (Department for Business, Energy and Industrial Strategy) の助成機関BBSRC (Biotechnology and Biological Sciences Research Council) は、人材の受け皿となる大学など研究機関への科学研究費を提供し、また、同Innovate UKは大学からスピンアウトしたバイオベンチャー企業に出資することで、シーズ技術の研究開発を支援している。さらに、Med Cityなどロンドン金融街に集まるIT系ベンチャーキャピタルが、バイオベンチャーに積極的に投資を進めている。バイオベンチャーの活動が活発な地域は、エジンバラやロンドンである。エジンバラには、クローン技術開発に成功したロスリン研究所やエジンバラ大学があり、ロンドンにはDNA構造を発見したケンブリッジ大学やオックスフォード大学、インペリアル・カレッジ・ロンドンがある。

これら地域で政府の助成やベンチャーキャピタルの投資を受けることで、ゲノムデータを活用し新物質研究を推進するベンチャー企業が出現している。エジンバラ大学のベンチャーであるSynpromics (図4)は、プロモータ(細胞の酵素生成機能活動を命令するゲノム内の遺伝子情報)を人工的に創出・知財化。複数のプロモータ情報をライブラリ化して、医薬品などの分野における顧客にライブラリを有償提供している。自社で持つプロモータライブラリとそこから発現する遺伝子機能の関係を機械学習アルゴリズムにより相関解析し、所望の遺伝子機能を得る可能性が高い複数プロモータの組み合わせを抽出・提案している。顧客である医薬品メーカーなどは、新機能物質を生成するためのゲノム編集において、Synpromicsのプロモータライブラリを参考にし、研究開発期間を短縮している。

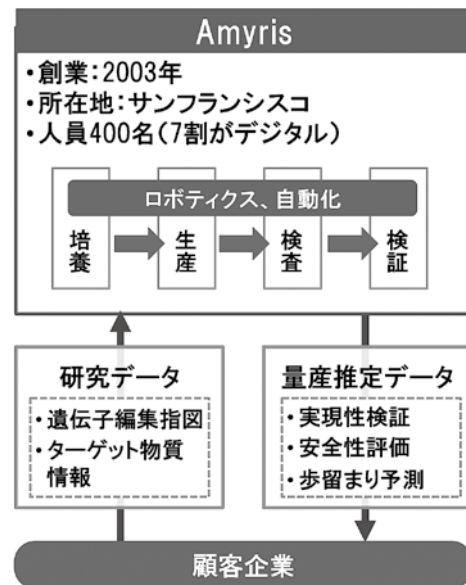


資料：各種資料より日立総研作成
図4 英国 Synpromics 社の取り組み

3. バイオデータにより量産技術開発を進める米国

米国では、サンフランシスコやボストンにバイオデータを活用した機能物質開発のための産業集積が進んでいる。それぞれの地域では、新機能物質の量産化に必要な素材や設備を産学で共有、共同使用することで、ベンチャー企業の開発リスクを抑制する仕組みが構築されている。カリフォルニア大学バークレー校(UCB)の共同実験設備(QB3)や、CRISPR/Cas9 データ・サンプルを貯蔵するボストンのNPO バイオ銀行(Addgene)などが、その機能を担っている。QB3では、スタートアップ企業などが安価に設備を利用でき、自社の開発物質に対して実験を行い、量産可能性の検証を行うことができる。Addgeneは、研究開発フェーズにある研究組織に、バイオサンプルを安価に提供している。量産前に自社の設計データとAddgeneのバイオサンプルを使い試作することで、ターゲットとなる物質の品質検証を可能にしている。それぞれの地域では、サンプル・設備支援を行う共有施設を核として技術支援を行う大学や、量産に向けた研究開発を行うユニコーン企業が集積し、早期事業化を実現する仕組みが構築されている。

ここでは、Amyris、Zymergen、Ginkgo Bioworksなどの量産開発支援バイオベンチャーが重要な役割を担っている。Amyrisは、自社内にロボットを活用した微生物の培養・生産・検査・検証プロセス自動化



資料：各種資料より日立総研作成
図5 米国 Amyris 社の取り組み

設備を備えている(図5)。これにより、顧客である医薬メーカーからバイオ医薬品に関わるバイオデータを受け取り、短期間で量産化実験を行うことができる。Amyrisは自動化設備を活用して、生産量を段階的に追加しながら検査・検証し、量産試作前に量産性能を推定、この推定データを顧客企業に提供することで、顧客は設備投資を抑えつつ量産化の可否判断ができる。Zymergenも同様に、実験設備からサンプル搬送にいたるまで全ての実験環境を自動化し、顧客のバイオデータによる新機能物質の量産化を支援している。このように米国の量産開発支援バイオベンチャーは、シーズとなる物質の研究開発と量産化開発との間をつなげる役割を果たしている。

政府内部では、米国エネルギー省が、これら地域で進められる研究開発によって生み出される量産化バイオデータを包括的に蓄積するためのAgile Bio Foundry(ABF)の構築を推進している。ABFは、官民コンソーシアムであり、米国内バイオの量産開発推進を目的として量産データに加え、全米9ヶ所の国立研究所の設備や技術をオープン化し、国内民間企業に開放する計画である。ABFは、2020年までに100種類の新物質生成を目標としている。

4. バイオデータ強化に向けた日本の対応と今後の課題

データ主導型のバイオ研究・事業開発が活発化する中、米国や欧州では総合的な国・地域内バイオデータ

表1 世界のバイオデータ集積状況

	バイオサンプル種 ('18)	ゲノム解析装置数 ('12)	ゲノム解析プロ ジェクト数 ('18)
米国	21,717	785	25,675
中国	3,617	200	2,457
英国	561	136	388
ドイツ	535	111	555
日本	141	34	117

資料：JGI データベースなど各種資料より日立総研作成

蓄積への取り組みが進んでいる。米国では、2012年に大統領公約として National Bioeconomy Blueprint が、2016年にエネルギー省および省庁間協力で Federal Activities Report on the Bioeconomy が発表され、国内バイオデータの収集・解析ツール開発加速によるバイオ産業の拡大と環境など社会課題解決への対応の重要性が提言された。重点分野として、石油由来燃料のバイオマス代替などが掲げられている。前述の ABF はその一環としての取り組みになっている。EU は 2012年に Innovation for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe を採択し、研究開発プログラム「Horizon2020」において、7年間で37億ユーロをバイオ開発やバイオデータベース整備に投資する計画を決定した。英国は2016年に SBLC (Synthetic Biology Leadership Council) が Bidesign for the Bioeconomy を発表した。この中ではバイオ産業を育成するために、データフォーマット標準化、データベース整備、データセキュリティ確保や国際間のデータ流通の必要性などを述べている。中国においても、2016年より国家ゲノムバンクが運営を開始し、国内バイオデータの生成・蓄積が加速している。このように、米国・欧州・中国などでは政府主導で広範囲の応用分野を想定したバイオデータの収集・蓄積が進んでいる。

一方日本では、これまで遺伝子組み換え食品などに対して、社会の忌避感が強く、医薬品など一部の分野を除いてバイオ技術に関わる研究開発が停滞していた。これまでに公表されているバイオデータについて、各国の集積状況を確認すると、日本は欧米や中国と比べて大きく下回っている（表1）。

近年の各国におけるバイオ戦略提言や技術革新を受け、日本でもデータを活用したバイオ産業振興政策の検討が始まっている。政府の未来投資戦略2018（内閣官房）において、バイオ分野についても示された。具体的には、①バイオとデジタルの融合による革新的バイオ技術の研究開発を通じた社会課題解決への貢

表2 COCN 「i-バイオ」の構成

ワーキング	名称	概要
WG1	高機能化成品	バイオプロセスによる高機能化学素材の設計
WG2	高機能食品素材	バイオプロセスによる高機能食品素材の設計
WG3	新規バイオ素材	廃棄物・廃水処理およびバイオセンサ
WG4	先導技術	バイオデータ課題把握 データ統合・活用・流通

資料：COCN 報告書など各種資料より日立総研作成

献、②健康に寄与すると期待される機能性表示食品などの新たな表示実現、③炭素循環社会に貢献するバイオ素材・バイオマス資源の評価・表彰の仕組み作り、④ゲノム編集技術に関するカルタヘナ法適用範囲の明確化、を目標としている。

これと並行して大学および研究機関においては、バイオサイエンスデータベースセンタ(NBDC)を中心に、国内研究所や大学をつなぎ、学術分野を中心にバイオデータベースの統合化プロジェクトが進行している。

産業界においては、2017年から産業競争力懇談会(COCN)で「デジタルを融合したバイオ産業戦略(i-バイオ)」テーマを推進している(表2)。本テーマは、日本のバイオ産業競争力向上に向けて、近年急激な蓄積が進むデジタルデータ活用によるバイオ産業戦略提言を行うことをめざしている。ここでは、化成品、食品、新分野における有望なバイオ技術応用分野の検討に加え、国内バイオデータ活用に向けた、制度、技術上の課題と対応策についての検討を行っている。特にバイオデータについては、民間企業が個別に開発を行っているケースが多く、結果として、実験や開発によって生み出されたバイオデータが企業に偏在し、未公開となっている問題点が指摘されている。

今後、国内でバイオデータの活用、流通を加速させるためには、以下の技術開発や制度設計が必要になる。バイオデータの活用にあたっては、現在進められているデータベース統合プロジェクトを、学術分野から民間分野に拡大し、プロジェクト持続に向けた取り組みが、一方バイオデータ流通については、バイオ情報銀行の構想具体化が必要となる。バイオ情報銀行では、データを信託する制度、データ提供へのインセンティブを与える制度設計、およびデータ価値を決定するデータ流通市場の形成が重要になる。さらに、データ保護の観点で、ブロックチェーンやセキュリティなどの技術開発も求められる。

バイオ×デジタルによる産業革新

経済産業省 商務情報政策局 商務・サービスグループ
生物化学産業課 課長 上村 昌博

CONTENTS

1. 大きく成長するバイオ市場規模
2. バイオとデジタルの融合
3. スマートセルが拓く未来
4. コネクテッド・インダストリーズ
5. 新たなバイオ戦略の発信

(うえむら まさひろ) 東京大学工学部卒、Imperial College London 修士。経済産業省生物化学産業課長。1993年 通商産業省入省。サービス産業、環境リサイクル分野、バイオテクノロジー分野 中小企業政策に従事。2008年から4年間長崎県庁産業労働部へ外向。その際五島列島に次世代 ITS を備えた電気自動車を100台規模で展開し、「未来型ドライブ観光システム」の構築に取り組む。2012年からサイバーセキュリティ分野にて、制御システムセキュリティや官民情報共有スキーム構築を推進。2017年7月に現職に就任。

バイオとデジタルの融合により、新たな産業革新が起きつつある。バイオロジーには不明なことも未だ多く、科学技術の観点のもとより、産業化という観点からも、極めて大きなフロンティアである。その世界を切り拓いていく強力なツールとして、デジタル化を最大限活用していくことが期待されている。

1. 大きく成長するバイオ市場規模

バイオテクノロジーは、医療、環境・エネルギー、ものづくり、食料など、さまざまな分野で利用されている。こうしたバイオ関連市場の将来予測について、パリに本部を持つ国際機関である経済協力開発機構(OECD)は、2009年に、“The Bioeconomy to 2030”というレポートを取りまとめており、その中で、2030年には、バイオ市場は、OECD加盟国のGDPの2.7%、貨幣価値にして約1.6兆ドル(約200兆円)にまで成長するものと予測している。その内訳は、健康関連分野が25%、工業関連分野が39%、農業関連分野が36%を、それぞれ占めるとされている。

2. バイオとデジタルの融合

いわゆる次世代シーケンサーの登場により、ヒトを含むあらゆる生物の遺伝子の配列情報を読み解くのに要する時間とコストが、劇的に圧縮されるようになった。国際的なヒトゲノム解読計画の際(1990年代)には、そのゲノム解読に、総額で約30億ドル、13年近くを要していたのが、現在では、約千ドル、1日程度に短縮されている。ここ7年程度の間にも、解読コ

ストは約1万分の1以下に低下した。こうして、さまざまな生物の遺伝子の情報を、安価かつ短期間で解読し、デジタル情報として扱えるようになってきたのである。

さらに、ディープラーニングなどのAI技術が非連続に発展していく。すなわち、昨今の、画像・動画の認識や、異常検知・将来予測といった技術を第1段階とすれば、今後3~5年で、試行行動を伴う異常検知、仮説生成・高度なシミュレーションといった第2段階へ、そして、今後5~10年ではさらに進化し、言わば第3段階へと、非連続な形で、AI技術が発展していくことが見込まれている。こうしたIT/AI技術の進化により、次世代シーケンサーにより解読された遺伝子の配列情報から、タンパク質を始めとするその発現系などの機能解明が、より効率的・効果的に行われ、さまざまな生物のゲノムが持つ塩基配列の情報と、その生物機能の相関関係の解明が飛躍的に進み、生命現象の解明・理解、そして活用が大いに発展していくものと考えられる。

さらに、このようにして生命現象の理解が進むことに併せて、その生物機能を最大限に活用していくためのデザイン(設計)が可能になってきている。遺伝情報のデジタル化と、その機能相関関係の解析成果といったものを踏まえ、より欲する物質や機能を発現するように、生物をデザインする、合成生物学(インダストリアル・バイオロジー、エンジニアリング・バイオロジーなどとも称する)を可能とする技術が開発されてきている。2013年初め、ゲノム編集技術であるクリスパーキャス(CRISPR Cas)の登場により、従来のバイオテクノロジーでは考えられなかったような

成功確率で、生物の遺伝子構造のデザインを適切に行うことが可能となった。このことにより、産業応用などのために、狙った固有の特性を、生物機能上で発現出来るようにする、いわゆるスマートセル（賢い生物細胞）の作製が現実的なものとなったのである。

こうした状況に対して、例えば、マサチューセッツ工科大学のメディア・ラボの創設者や研究者らによる、「バイオこそ、デジタルの次の革新的技術（Bio is the new digital）」、「生物の世界が、設計の分野で機械を置き換え始めている」という発言につながっている。また、スイスのダボスで毎年開催されている世界経済フォーラムでも、スマートセルに関わる技術を、新規技術（Emerging Technology Top10）の一つとして位置付けた。また、米国においては、IT系VC（ベンチャーキャピタル）が、バイオとデジタルの融合領域のベンチャー企業に対する投資を加速させており、2016年には関連分野へ6億ドル（約660億円）超を投資している。

このように、生命現象をより良く理解し、生物機能を最大限に利活用していくことによる、新たな産業の創造が大いに期待されている。バイオとデジタルの融合による新たな産業は、デジタル技術と同様、さまざまな異分野と融合する次世代の基盤革新技術「Connected Industries」（コネクテッド・インダストリーズ）へと成長していくことが期待されている。

3. スマートセルが拓く未来

バイオとデジタルの融合による、スマートセル・インダストリーの発展により、健康・医療分野はもとより、工業（ものづくり）、エネルギー、農畜水産業に至る、広い分野において大きなパラダイムシフトが起こることが期待される。バイオ情報の蓄積とIT技術の融合による、生物機能のデザインと、生物機能の発現を制御するための、培養・育種、代謝制御、ゲノム編集などに係る技術によって、スマートセルを適切に創出し、それを活用した新規産業（スマートセル・インダストリー）が創造され得る。生体内で機能を発現させる点からは、医療・ヘルスケアの分野において、従来型の、外部からの単一因子に対する投薬などの医療技術では不可能であった根本治療、新たな医療手法の実現（個別化医療、バイオ医薬品、再生医療、体内代謝制御など）に資する可能性がある。また、スマートセルにより機能物質を生産・抽出して利活用する観点からは、新た

なものづくり、生物資源の高度利用の実現など、広範な産業構造の変革へとつながっていく可能性がある。例えば、工業における、常温・常圧での反応プロセスといった省エネ化、一次投入資源の枯渇懸念から解放された製造法などであり、強靱で人工的な繊維、香料や機能性化学品、医薬原料などの分野にも貢献できよう。エネルギー分野では、バイオエタノール、バイオジェット、バイオガスの製造など、化石燃料からの脱却に貢献することが期待される。さらに、農畜水産業においては、消費者にとってはアレルギーフリーや栄養価の高い作物、生産者にとっては農薬利用減少などにつながることを期待される。

しかし、こう言ってみても、業種、企業によっては、半信半疑の印象を持たれるかもしれない。確かに、いずれの場合も、伝統的な一次資源及び生産プロセスによる製品と比較して、コスト面で不利であることは、一般的に言って否めないであろう。しかし、だからといって、この分野に取り組みないまま、自らの業界、あるいは企業が、将来における産業構造においても持続可能なビジネスを行っているイメージを描くことに果たして自信を持ち得るだろうか？ グローバルで見れば、たとえ現状では経済的に打ち勝てなくとも、環境対応、資源循環対応など、社会的な課題も踏まえ、持続可能なビジネスを希求し、同様の考えを持つ産学などで各国内外において連携して、新たな価値を生み出そうと、研究開発やシステム構築に取り組んで行っている状況がある。こうした活動から将来、バイオマスやバイオテクノロジー、プロセス、そしてデジタル技術を活用した新たなバリュー／サプライチェーンが創造されたときに、仮に、自らは積極的に関与をしていなければ、結局、そうした先駆者・先行者が描き確立した土俵（プラットフォーム）の中、あるいは、それをただ利用させられる立場に、置かれてしまうのではなかろうか。それでよしとする場合もあるのかもしれないが、そうではないとするならば、現状の各業種、企業の置かれた状況、保有している技術的な強みなどを考慮しつつ、メインのビジネスとの関係性において、どの程度のエフォートによって、この新たなバイオに関わる分野にコミットし、そのネットワークを構成する一員となって行くのか、重要な経営・技術課題として一考いただいた上で、対応の是非・程度について意思決定していただくような動きを、ぜひ多くの経営層の方をお願いしたいと思う次第である。

4. コネクテッド・インダストリーズ

バイオとデジタルの融合は、「Connected Industries」につながる。歴史を振り返れば、かつて社会は、狩猟社会から農耕社会へと変わり、第一次産業革命において、蒸気機関による動力を得て、工業社会に突入し、その動力が電力・モータへと変わる第二次産業革命を経て、工業化がさらに進展した。そして、コンピュータ導入などによる自動化が進む第三次産業革命により、情報化社会、知識経済化社会へと変化して来た。こうした産業の変遷を見ると、それは、あくまで、「個々の産業ごと」での、これら各次の産業革命の恩恵を活用した発展であったとすることができるのではなかろうか？しかしながら、今、まさに起こりつつある、情報化社会から、第4次産業革命を通じて、Society5.0、超スマート社会、すなわち、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した社会へと遷移して行くに当たっては、「Connected Industries」という新たなビジネスモデルを形作ろうとしている。つまり、これまで、とすれば「データ」は、往々にして、各々の企業や業種の中で囲い込まれ、共有されず、広がりをもった展開が図られて来なかったが、今後は、大量のデータを基に人工知能(AI)が効率的に最適解を探る、ということが可能になってきたことを背景に、この状況を転換し、データを適切に共有し、その解析手法を共同で開発し、新たな価値の創出や、社会課題への対応につなげていく。そこに、イノベーションをもたらす新たなビジネスチャンスがあると考えられる。

2017年10月初旬には、世耕経済産業大臣による東京イニシアティブとして、「Connected Industries」に関して、5つの重点取り組み分野が公表された。これら分野は、市場成長性、我が国産業が有する強み、社会的意義の大きさなどから定められ、その中に、「バイオ・素材」分野が位置付けられている。同分野の展開に期待される社会的意義は、革新的な素材の創出、医療・創薬・健康増進の革新、エネルギー資源利活用への抜本対応に、有用な貢献をする、ということである。

東京イニシアティブを踏まえ、①グローバルを見据えた、データの共有・利活用の進め方・ルール化、②AIシステムについて、国内のみならず海外からのデータも活用していくためのプラットフォーム構築の進め方、③バイオとデジタルの両方を理解する人材の育成や社会受容性の確保、といった課題に取り組んでいくこととしている。その具現化の一歩として、本年5月

に成立した生産性向上特別措置法に基づく産業データ活用事業認定制度の立ち上げや当該事業者への税制支援策、また、リアルデータを持つ大手・中堅企業とAIベンチャーとの連携によるAIシステム開発支援、実証事業を通じたモデル創出・ルール整備などを進めようとしている。例えば、バイオ分野では、微生物などの培養条件に関するデータを多様なセンサーの活用などにより複数企業から各種各様に多く収集・共有し、研究開発効率の大幅な向上をめざす開発が行われようとしている。具体的には、データをAI解析に供することによって最適な培養条件を探索し、生産性向上に資する方法の開発や、バイオプロセスの鍵となるような酵素反応を触媒する新規酵素を大量の候補物質からなるデータベースを基に、AIシステムの深層学習を使い、目的となる酵素の候補をin silicoで絞り込み、従来の物理的な検証工程を省き得る可能性を探る。また、再生医療において産業利活用性の高い細胞を生体計測、画像処理、分取技術を融合し、超高速・正確に分取できるシステム開発などが実施されようとしている。さらに、革新的な機能性素材の創出に関しては、欲しい物性について、その構造との相関関係に関するデータから、機能性素材を合理的に設計する方法論を確立し、欲しい機能から逆に、バイオプロセスによるモノマーを用い、従来型の化学合成技術でポリマー化が可能な素材を探索していく、ということがあろう。創薬分野では、データのIT/AIによる解析により、ゲノム情報などを用いつつ患者を層別化して、副作用は小さく薬効は大きい薬の開発などを、効果的・効率的に進められるようになることが期待される。

5. 新たなバイオ戦略の発信

政府の成長戦略である、未来投資戦略2018は、本年6月15日に閣議決定された。その具体的施策の中で、バイオ分野についても示されている。位置付けとしては、Society5.0の実現に向け今後取り組む重点分野の一つとして、日々の生活や産業を変える次世代産業システムの一つとして、「バイオ・マテリアル革命」を起こすために、①バイオとデジタルの融合による革新的バイオ技術の研究開発・実用化を通じ、食による健康増進・未病社会や革新的バイオ素材による炭素循環社会の実現に向けた取り組みを推進し、飢餓、エネルギー、気候変動などの持続可能な開発目標を含めた社会課題の解決に貢献すること、②健康の維持および

増進に寄与することが期待される特定保健用食品や機能性表示食品などについて、2018年度より5年間で科学的知見の蓄積を進め、免疫機能の改善などを通じた保健用途における新たな表示を実現することをめざしていくこと、③炭素循環社会の実現などに貢献する革新的なバイオ素材の有用性及び環境性能、国産バイオマス資源の循環性能を適切に評価するための表示や表彰などの仕組みを2019年度から創設すべく、2018年から検討を開始すること、④遺伝情報を高精度に改変し得るゲノム編集技術について、その円滑かつ迅速な産業利用を実現すべく、2019年3月末までをめどに、現行のいわゆるカルタヘナ法上の遺伝子組み換え生物に当たらない範囲を明確にすべきこと、などが盛り込まれた。

さらに具体的なバイオ戦略としては、昨年の未来投資戦略2017において、その策定を行うこととされ、これを受け、本年6月13日には、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議の政策討議を踏まえ、有識者や関係府省庁から構成される、バイオテクノロジーによるイノベーションの推進に向けた政府の戦略（バイオ戦略）に向け検討を行ってきたワーキンググループから、中間取りまとめが公表されたところである（このバイオ戦略中間取りまとめを踏まえて、そのエッセンスが、上述の未来投資戦略2018にも盛り込まれた、という流れである。）。世界の技術革新の潮流であるデジタルとの融合による「データ駆動型」の研究開発と社会実装などについて、日本も取り組みを加速することが必要であり、そのために政府が今後取り組むべきとされた主な政策は次のとおりである。

1) 研究開発に関する推進事項

- ◎スマートセルによる有用物質の工業生産技術の開発。
- ◎バイオマス利活用の促進のため、高付加価値素材を低コストで安定的に製造する技術や、バイオマス変換プロセスに適した新規酵素の効率的な探索技術、ビッグデータから大量培養・生産の最適条件を発見する技術などについての開発促進。
- ◎個人の健康・生活状況に応じて、健康の維持・増進を図る食生活をデザインするシステムの開発（食と健康に関する網羅的なデータ取得・解析を実施）。

2) 研究環境に関する推進事項

- ◎府省、産学連携による、基礎から実用化の段階までを対象とした研究開発プロジェクトの推進、そ

のマネジメントの強化。

- ◎国研や大学、企業間のデータ協調によるオープンイノベーションを推進するためのルール作り。
- ◎各種データベースの統合・機械可読化の促進。
- ◎研究者向けに加え、産業界のニーズに対応した生物資源、データの収集・整備・提供。
- ◎産業界とアカデミアの連携による、データ科学など異分野融合人材の育成、産業界などへの橋渡し。
- ◎バイオベンチャーの成長段階に応じた切れ目ない資金調達環境整備、経営人材に関する支援、発掘。

3) 産業利用に関する制度面での事項

- ◎ゲノム編集作物に対するカルタヘナ法、食品衛生法における取り扱いの早期明確化。
- ◎ゲノム編集技術など先端技術の国民理解の促進。
- ◎遺伝子組み換え生物の産業利用に係る各種手続きの合理化。
- ◎生物素材の有用性やバイオマス製品の環境性能の見える化、公共調達での利用促進。
- ◎食の健康増進に関する研究の進展に伴い蓄積される科学的エビデンスの保健機能食品制度への反映、機能性表示の規格化、国際標準化など。

もちろん、政府によるバイオ戦略は、日本以外でも、米国やEU各国、ASEAN諸国、中国などにおいて、2010年代前半頃から最近にかけて、続々と策定されてきている。そして、こうしたバイオに基づく経済社会の変革を、Biologizationと称し、Bioeconomyの時代の到来として表現している。グローバル・バイオエコノミー・サミットという国際会議も既に2回開催され、SDGsなどの世界的課題に対して、国際的に連携して、バイオの力によるイノベーションで対応しようとしている。このようなバイオに関わる国際的なネットワークへの積極的な参画・貢献・発信も、日本の科学技術力や企業の力に鑑みれば、大きな期待が持たれていると感じる。企業間を超えてデータの協調領域を特定・拡大し、具体的なケースでの取り組みをスピード感を持って実現して行くことが大切であろう。「Connected Industries」におけるバイオ分野の進捗状況など、本年10月のCEATECや、ドイツにおけるCeBITや米国におけるCES、さらにはグローバル・バイオエコノミー・サミットといった、国内外の機会を捉えて、産業界とも連携して、積極的に取り組み状況を発信していきたいと考えている。

Digitally-driven Bio Innovation Convergence in the Bioeconomy: a U.S. Perspective

Richard A. Johnson

CEO, Global Helix LLC and
Director – Engineering Biology Research
Consortium (EBRC);
iGEM Foundation; and BioBricks Foundation

Rick Johnson plays a leading policy strategy and thought leadership role in advancing synthetic biology/engineering biology and the bioeconomy. He has been a member of the National Academy of Sciences (NAS) Board on Life Sciences, the NAS Synthetic Biology Forum, the co-chair of the Six Academies Synthetic Biology Initiative, a Director of several leading U.S. foundations and companies, and numerous industry-university task forces.

21st Century innovation and the rapidly growing bioeconomy increasingly will be driven by the convergence of the life sciences, digital tools and data, and engineering. For simplicity, I will call this paradigmatic shift Digitally-driven Bio Innovation Convergence, or “DBIC.”

Cutting-edge R&D and disruptive innovation based on DBIC already are beginning to reshape business model strategies, develop new products and services at industrial scale, replace or disrupt traditional markets and supply chains, and attract significant new investments and collaborations.

Nowhere is the broad impact of DBIC likely to be greater than through the exponential growth of synthetic biology or engineering biology. Advances in our ability to read, write, transform, and debug DNA have made genetic engineering a transformational technology with broad business applications across multiple markets.

It involves using Digital Bio technologies both to engineer or re-design living organisms for novel or enhanced functions and, over time, to design and construct useful new bio-based parts, materials, and organisms that could open the door to making and marketing new products that cannot be made at scale today. DNA synthesis made possible by Digital Bio, for example, enables the *de novo* generation of genetic sequences that specifically program cells for any of a wide range of purposes.

As noted in a recent U.S. National Academies report, “synthetic biology [or engineering biology] collectively refers to concepts, approaches, and tools that enable

the modification or creation of biological organisms.” Synthetic biology not only builds on a robust Digital Bio tools revolution, including genetic circuits and digitally redesigned genomes, but it also provides business with new general purpose Digital Bio technology platforms for multi-use applications that often break down traditional disciplines, supply chains, and business sector boundaries.

This relatively new field represents a truly international enterprise with global scope as more than 40 countries now have synthetic biology national strategies or comprehensive bio-innovation initiatives that include them. The United Kingdom and China, for example, not only regard synthetic biology, enabled by DBIC, as one the most critical technologies for next-generation economic growth and societal well being in their countries but also have developed comprehensive synthetic biology national strategies.

This article, however, focuses on DBIC and synthetic biology in the United States. In particular, it examines why synthetic biology and DBIC have become so important to U.S. strategic thinking about innovation and the bioeconomy, and what is driving the rapid confluence of the bioeconomy, synthetic biology/engineering biology, and DBIC in the United States.

1. Setting the Context

The Digital Bio revolution enabling the bioeconomy is based on the confluence and self-reinforcing interaction of at least seven key drivers and paradigm shifts. They, in

turn, are reshaping Digital Bio R&D, business strategies, and investments in the United States. For simplicity, this article summarizes these seven key drivers under the following headline categories: (1) Digital Bio Convergence as the new Paradigm; (2) the Digitalization of Biology and Life Sciences as an Information Technology; (3) the Industrialization of Biology; (4) Making Biology Easier to Engineer and More Predictive; (5) DBIC as a Tools Revolution; (6) “Cell as Factory”: Biology as a Next-Generation Manufacturing Platform that Leverages Biology as Technology; and (7) Accelerating Investments and Innovating Disruptive DBIC Business Models.

These advances are based largely on our increasing technological capacity to link the biological world with the digital one, and to accelerate the move from today’s design-build-learn iterations to tomorrow’s truly predictive biology that can be digitally simulated, and reliably designed and constructed. The U.S. National Academy of Sciences and others have concluded that the 21st Century will be the era of biology, a century of grand synthesis driving new innovation and the bioeconomy.

Bio-based markets enabled by DBIC already are significant in the United States – representing more than 2.5% of gross domestic product in 2014, or more than \$350 billion in economic activity. The full range of U.S. bio-based economic activity is estimated to have been more than \$1.5 trillion in 2012, or nearly 10% of U.S. GDP.

But the biggest market opportunities remain ahead. Estimates are that the bioeconomy as a percentage of U.S. GDP likely will more than double by 2025. And many believe this is too conservative. Recent estimates suggest that the value of the DBIC biology stack may approach 20-25% of U.S. economic value in the next 25 years.

As a result, the U.S. foresees broad applications of emerging DBIC tools and technologies and core synthetic biology platforms for multiple uses in new bio-based materials, products and services; new markets for Digital Bio enabling tools, platforms, and services; next-generation advanced manufacturing platforms; DBIC-oriented Big Data, AI, and data analytics; and new bio-based applications in traditional digital markets such as semiconductors,

computing, or massive storage.

2.1 Digital Bio Convergence as the New Paradigm

Solutions to complex and multi-faceted societal and scientific challenges increasingly depend on research and innovation at the intersection of multiple disciplines that go beyond interdisciplinary approaches to create new, integrated modes of thought. The emerging American consensus is that DBIC captures at least two new dimensions. First, as an MIT faculty study concluded, it involves “the merging of distinct technologies, processing disciplines, or devices into a unified whole that creates a host of new pathways and [market] opportunities.”

Second, it involves the formation of the web of partnerships involved in supporting such scientific investigations and enabling the resulting advances to be translated into new forms of innovation and new bio-based products and services. In many cases, it changes fundamentally the questions we now can ask and the answers to them, including business models and value chains, corporate strategies, and workforce deployment.

2.2 The Digitalization of Biology and Life Sciences as an Information Technology

Biological systems and the digital world increasingly are interchangeable, interconvertible, and interoperable. Synthetic biology’s increasing ability to move back and forth between the “1”s and 0’s” of the digital world that has powered ICT’s for more than 50 years and the ACTG genetic letters of the biological one increasingly powers the bioeconomy. By digitizing living organisms, we now can send the “program” for an organism over the Internet and recreate or construct it anywhere around the world.

In many ways, we finally are realizing that biology should be viewed as a complex information science. It also is an increasingly automated enterprise that relies on cutting-edge digital technologies, artificial intelligence, machine learning, and data analytics.

The key point is that we increasingly can make living organisms programmable. This allows innovative companies to link biological systems with the digital and

cyber-physical world as we use the logic of ones and zeroes not only to understand life but also to design new products and services.

2.3 The Industrialization of Biology

The lab to market push for DBIC and synthetic biology is accelerating and poised for rapid growth as they move out of university research centers and national labs into a broad portfolio of commercial applications at scale. An important part of the lab-to-market trend is the Industrialization of Biology, or the “biologizing” of industries and services. The goal is to create commercially competitive products and services at scale based on DBIC and engineering biology that can serve as a foundation for the bioeconomy, more sustainable economic growth, and smart society solutions.

For example, the National Academy of Sciences Board on Life Sciences convened a national task force of experts to examine the Industrialization of Biology. Our initial study focused on the industrialization of biology to accelerate the advanced manufacturing of chemicals largely for four reasons – the size of the markets for high-value and high-volume chemicals, the beneficial societal impacts that could be achieved (including the replacement of fossil fuel sources), the readiness of business to move in this direction, and the timeliness of new technological advances that enable it.

In the course of our study, we found that \$4 trillion of products are made by chemical transformations globally but that only about 5-7% of the potentially “addressable markets” have been addressed biologically. In addition, as our report noted, this industrialization of biology also “will lead to more complex chemical structures and composite nanomaterials, which require precise control over dozens of genes.”

In the course of our study, we developed a technological and organizational roadmap for the industrialization of biology in advanced chemicals. We concluded that, within 10 years, biological synthesis and engineering can be on a par with, or superior to, chemical synthesis and engineering for chemical manufacturing covering at least 50% of all

to chemical transformations – i.e., potentially \$2 trillion in addressable markets for expanding the bioeconomy and replacing the oil barrel.

2.4 Making Biology Easier to Engineer and More Predictive

At the heart of many emerging DBIC and synthetic biology strategies is the concept of “making biology easier to engineer” and trying to make biology truly predictive, replicable, and re-usable. This, however, requires combining engineering principles and mindsets such as abstraction, modularity, standardization, and iterative design-build-test-learn cycles with digital technologies and electrical engineering insights adapted to the life sciences and biomedicine.

The underlying concept of modularity and abstraction, for example, is that complex problems can be broken down into smaller or more modular technical challenges or problem sets. As a result, complex or novel bio products based on biological parts, chassis, or assemblies now can be constructed by analyzing, modeling, testing and building new genetic circuits, parts, chassis, and subsystems.

Standardization is another prerequisite. One only needs to look at the engineering of Roman Empire roads or aqueducts, at the role of standardized tools, such as the Whitworth screw, in enabling the industrial revolution in the 19th Century or, more recently, the standardized interoperability of ICTs to recognize the power of standardization and metrology.

As a result, American companies are deeply engaged in developing new approaches to measurement for commercial applications in synthetic biology. This includes commonly accepted measurements for the effect of biological context and evolutionary dynamics, standards to enable exchanges, reuse, rules for common assembly, common reference points, reproducibility, and shared data and open innovation models for new collaborations.

2.5 DBIC as a Tools Revolution

In many ways, DBIC and synthetic biology represent a tools revolution propelled by “exponentials”. Each tool

in the DBIC toolkit – whether sequencing, synthesis, high throughput manipulations of biomolecules, AI/machine learning analytical tools, genome engineering tools, bio-CAD software, or highly automated processors – can be considered an “exponential” because it is accelerating faster than the pace of Moore’s Law and providing far greater functionality at ever reduced costs. As important as each tool is individually, the real power and transformational impact likely will come from the synergies achieved by combining these “exponentials” or “mixing and matching” them.

For example, American companies are collaborating with each other, as well as with universities and government labs, to develop and commercialize DBIC foundational tools in three principal areas. The first focuses on DBIC methods and technologies such as DNA synthesis and assembly, genome scale engineering tools, and analytical tools for metabolic and regulatory networks that mediate biological functions.

The second covers the development of DBIC platforms for synthetic biology. It involves companies working on: biological design principles; genetically tractable organisms or chassis; minimal cells and *in vitro* systems; tools for plant systems and various microorganisms; and biocontainment mechanisms.

Finally, some of the most extensive efforts take advantage of digital advances and insights from electrical engineering by adapting them to DBIC and engineering biology. In particular, this focuses on new computational tools, bioinformatics resources, predictive modeling and simulation capabilities, bio-CAD and other types of software, and data analytics for synthetic biology.

2.6 “Cell as Factory”: Biology as a Next-generation Manufacturing Platform that Leverages Biology as Technology

The United States increasingly sees the “killer apps” for engineering biology and the Digital Bio revolution as next-generation advanced manufacturing and knowledge-intensive services. In this new bioeconomy production paradigm, as Neri Oxman from the MIT Media Lab has

commented: “The biological world is displacing the machine as a general world of design.”

This includes leveraging biology as technology. We increasingly can design and construct genetic pathways, networks and systems to harness the powerful synthetic and functional capabilities already found in biology. As Tim Gardner, an American synthetic biology executive commented: “There’s almost no physical problem that hasn’t been solved by a biological system.”

It also encompasses the concept of the “cell as factory.” This includes: combining genes and functions in new and useful ways (but not necessarily as evolution would dictate); doing things in nature more efficiently; the “cell as factory” where microbes perform tasks nature never intended; designing and constructing useful biological parts, components and circuits; and reprogramming genomes.

As my colleague David Rejeski has noted, this new cyber-biological-physical production paradigm is “digitally interconnected, increasingly automated, flexible and cost-effective.” It enables highly distributed production, sophisticated customization and flexibility, and accelerating cycle times for rapid design-build-test-learn iterations.

This new bio-based production ecosystem:

- makes possible new production systems, especially distributed manufacturing and customized production – often with the ability to produce in small or large volumes, far greater sustainability, and greater efficiency of both mass production and custom design and production;
- helps drive innovation, productivity, and, the new markets for “solutions-based” enterprise and new market opportunities responding to societal challenges in areas like health, nutrition, the environment, and energy;
- produces goods, services, and data that minimize the use of resources while maintaining or improving costs and performance at commercially competitive scales; and
- is based on new multi-functional platforms and multi-directional DBIC tools.

An increasing number of synthetic biology manufacturing

strategies and business models are based on decoupling design from fabrication and manufacturing. They seek to replicate the dramatic advances in the semiconductor industry made possible by decoupling design from fabrication.

Second, we already are seeing the “de-verticalization” of supply and value chains. Much as traditional vertically integrated computer companies such as IBM, DEC, NCR, and Honeywell Bull were overtaken by newer, more agile, and more innovative entrants that reshaped ICT value chains, the same is beginning to occur in the Digital Bio revolution. The traditional, vertically integrated models of large chemical, biopharmaceutical, and agrifood companies are being challenged by, or at least complemented by, the development of new DBIC and synthetic biology smart specialization strategies at different places along the value chain and the adoption of innovative disaggregation strategies.

Third, as Jason Kelly, the CEO of Gingko Bioworks has noted: “As we get better at designing biology, we’ll use it to make everything, disrupting sectors that the traditional tech industry hasn’t been able to access.”

2.7 Accelerating U.S. Investments and Innovating Disruptive Business Models

American synthetic biology/engineering biology, driven by DBIC and disruptive new business models, increasingly is viewed as a significant investable opportunity. It is attracting increased investment attention and funding from the full spectrum of American private sectors investors – venture capitalists, corporate venture funds, internal corporate R&D allocations, venture philanthropists and impact investors.

According to SynBioBeta, more than US\$1.7 billion was invested in new U.S. synthetic biology ventures related to DBIC in 2017 and, this year, investments in various American engineering biology start-ups are on track to exceed US\$3 billion, an increase of about 60% in one year.

In the last four years, more than 400 new synthetic biology/engineering biology SMEs have been created in the United States. Their business models are diverse and

include companies in differentiated market sectors such as genome synthesis, Digital Bio software, aquaculture, next-generation drugs and diagnostics, protein engineering, DBIC tools and automation, food and agriculture, organism engineering, and new biomaterials.

Several anecdotal calculations suggest that larger established companies and corporate venture funds have invested an additional US\$2-3 billion, coupled with more than US\$1.5 billion in U.S. government research funding and at least US\$250 million from venture philanthropies and social entrepreneurs who believe that DBIC and engineering biology hold transformational promise for solving vexing challenges in health, conservation and ecology, environment, or food and nutrition that are aligned with their non-profit missions.

A striking feature of this new American investment wave is the breadth of innovative business models emerging and the scope of how many different companies and sectors are involved. Most initial business models and investments were centered on the potential of synthetic biology for creating biofuels and renewables, for attempting to harvest the sun’s energy with microorganisms, or for biopharmaceutical-related discoveries.

Many of these efforts continue with second-generation biofuels and a broader health portfolio that now includes new vaccines, pandemic preparedness, and new delivery mechanism. But most business models and investments have shifted away from the first generation investments. Many now involve a broad range of novel or more sustainable consumer products; agricultural applications and the development of novel foods; flavors, fragrances and cosmetics; bio-CAD and other Digital Bio software, and, especially, high-valued added chemicals and new materials for industrial uses.

Five promising U.S. synthetic biology start-ups based on DBIC underscore how companies are translating DBIC and synthetic biology into innovative business models with significant commercial value and follow-on investments. They already are reshaping the competitive landscape and creating new types of supply and value chains while attracting large new investments.

- Zymergen uses a sophisticated DBIC automation platform, AI, and machine learning to create biologically produced materials for a wide range of applications that require performance-enhanced materials.
- Gingko Bioworks engineers customized microbes for cultured ingredients in a variety of industries such as cosmetics and fragrances, flavors, and nutritional ingredients, as well as other applications. It uses a highly automated proprietary biofoundry and sophisticated DBIC tools for discovery, custom design, and construction.
- Twist Bioscience focuses on providing new tools through customized DNA synthesis, including high-density data storage. It is a new type of synthetic DNA service company that uses a DBIC platform for DNA production and also has an early stage DNA writing on silicon platform.
- Amyris, based on technology developed at Berkeley, was an early market entrant showing the promise of multi-use DBIC platforms for novel bio-production. It started with health applications, specifically a much lower cost and more efficient way to develop artemisinin for malaria drugs. But the same multi-use technology platform, however, also can be used to more sustainably produce farnesene for the production of tires or advanced biofuels for aviation and other transportation uses.
- Synthetic Genomics' business model centers on data that drives design. It has developed an integrated technology platform engineered to harness biology complexity through a combination of bioinformatics, biodiscovery, advanced automation for Digital Bio, and cell optimization. From this integration, it has developed advanced biological-to-digital converters for next-generation bio-production.

New and unexpected markets already are emerging. For example, recent National Academy of Sciences, BioBricks Foundation, and SynBioBeta conferences have highlighted how synthetic biology and DBIC can sustainably create and commercialize protein-rich animal products to meet global

and domestic demands for food and improved nutrition. A number of U.S. companies are developing novel agricultural and food products from cells and microbes, such as lab-grown meat and dairy products. Others are focused on next-generation aquaculture or the diversity of oceans for genetically engineering algae for new animal vaccines.

Two other significant American business trends merit attention. First, large new market opportunities exist for those companies that develop and commercialize Digital Bio tools. As many American history students learned from the California Gold Rush in the 19th Century, the companies that sold the picks, shovels, and supplies to the miners usually outperformed the high-risk prospectors looking for gold.

These market opportunities for developing DBIC tools and technologies have not gone unnoticed. Established life sciences tool providers such as Agilent, Illumina, and Thermo Fischer are investing heavily in the new DBIC space, as are large information technology product and service providers such as Microsoft Life Sciences, Google, and IBM.

Second, DBIC and synthetic biology in the United States are attracting significant interest, collaborations, and investments from “non-traditional” players outside more traditional biopharma, chemicals, or agrifood sectors. The engagement of companies as diverse as Lockheed Martin, Nike, Autodesk, IKEA, Amazon, Procter & Gamble all underscore the growing role of the bioeconomy, DBIC, and synthetic biology.

Finally, large future markets for DBIC loom, even in existing digital technologies. For example, semiconductors and massive storage represent significant new business opportunities based on DBIC and synthetic biology. The U.S. recently has launched a public-private partnership, SemiSynBio, to advance semiconductor synthetic biology for information processing and storage technologies. This may include: (1) cytomorphic-semiconductor circuit designs that apply lessons from cell biology to new chip architectures and vice versa; (2) bio-electric sensors, actuators and energy sources dedicated to enabling hybrid semiconductor-biological systems; and (3) molecular-precision additive fabrication that creates manufacturing processes at the mini-nanometer scale inspired by biology.

Market Formation of the Bioeconomy in the UK

Professor Richard Kitney
Professor Paul Freemont

Co-directors UK National Innovation
and Knowledge Centre
for Synthetic Biology SynbiCITE,
Imperial College London, UK

Paul Freemont is Professor of Structural Biology, Fellow of the Royal Society of Biology; member of European Molecular Biology Organization, member of AHTEG Group on synthetic biology UN-Convention for Biological Diversity.

Richard Kitney is Professor of Biomedical Systems Engineering, Fellow of the Royal Academy of Engineering, Fellow of the Royal Society of Edinburgh, member of the UK's Ministerial Leadership Council for Synthetic Biology.

**Please note that the views expressed in this presentation are our own, and do not necessarily represent the opinions of Imperial College or the UK government.*

Introduction

Petroleum has played an important role in the social, economic and political history of the world. Since the nineteenth century petroleum has been used as a source of energy production, which with developments in synthetic chemistry at the start of the 20th century, led to an industrial revolution in petrochemicals. The petrochemical industry is by far the largest of the industrial chemicals sectors, accounting for about 40% of the global chemicals market of around \$3 trillion representing the majority of all chemicals shipped between the continents of the world. Basic petrochemicals such as olefins, aromatics and methanol, together with plastics, are the key building blocks for the manufacturing of a vast and wide variety of durable and nondurable consumer goods. Such products include the clothes we wear, the houses and offices we live and work in, the household appliances and electronic equipment we use, the food and drink packaging we consume, and many products used for transporting us around the planet never mind the energy required from petroleum to do so. The concept of “make-use-dispose” is not sustainable as is the over-reliance on oil, coal and gas for global energy production. Given the growing global population, the widespread effects of climate change and the growing environmental pollution problem - including non-degradable plastic waste products - now requires a complete re-think on how to sustain human activity for the future. One growing area which aims to address these challenges

is the concept of the Bioeconomy - underpinned by rapid technology advances in synthetic biology. In this article we will describe the strategy, policy and methodology for implementing the Bioeconomy from a UK perspective - taking into account the recent UK government's investment in synthetic biology research, training and translation.

The Bioeconomy – what is it?

The European Commission defines the Bioeconomy as “the production of renewable biological resources and the conversion of these resources and waste streams into value added products, such as food, feed, bio-based products and bioenergy”¹. The application of innovative bio-based technologies to primary production processes, health and industry could result in the development of a Bioeconomy, where biotechnology contributes to significant economic growth and output. The overall strategy for the EU is to become a resource-efficient and sustainable economy (more innovative and low-emissions). This would be an economy based on more sustainable agriculture and fisheries, food security, and the sustainable use of renewable biological resources for industrial purposes - whilst ensuring biodiversity and environmental protection². The EU Bioeconomy is estimated to be worth €2.2 trillion and employs 18.6 million people and there is a major

¹ EU Report - Innovating for Sustainable Growth

² <https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/index.cfm?pg=policy>

opportunity for growth³. The UK is currently developing a Bioeconomy strategy which will be launched in 2018 - with the Bioeconomy contributing ~£220 billion to the overall UK economy involving 5.2 million jobs and is expected to grow by ~13% in the next decade⁴. The working definition of the UK Bioeconomy is aligned with the strategy of other governments and is - “all economic activity derived from bio-based products and processes which contributes to sustainable and resource-efficient solutions to the challenges we face in food, chemicals, materials, energy production, health and environmental protection”⁵. Growing the UK Bioeconomy also offers strategic opportunities for investment in research and development. A key underpinning technology will be synthetic biology (see below).

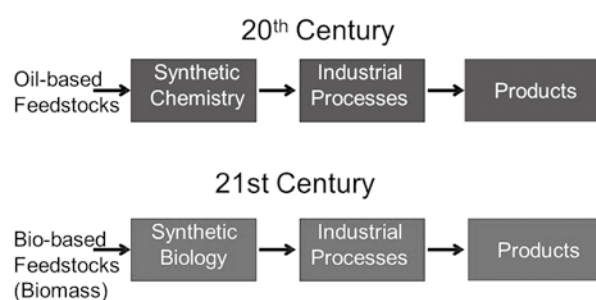
A Fourth industrial revolution using biotechnology?

The recent development of synthetic biology/engineering biology as a new and interdisciplinary field has come about due to several factors. Firstly, the foundations of synthetic biology are based on our ability to manipulate biological systems at the genetic level and over a short period of forty years (between 1950 and 1990) a step-change took place in our understanding of the molecular basis of life. During this period we were able to understand how genetic materials are stored and coded in the form of a molecule called DNA and how this code is replicated and translated into proteins. Developments in molecular biology techniques allowed the movement of pieces of DNA between organisms (called molecular cloning). This was quickly followed by technology developments that allowed the code to be read (DNA sequencing) and chemically written (DNA synthesis). Synthetic biology, which utilises these foundational advancements also encapsulates the engineering principles of modularity, standardisation and reproducibility. Together, this is leading to a paradigm shift in how to design and construct biological systems for specific applications. At the centre is the engineering

Design-Build-Test-Learn (DBTL) cycle. This enables automation, computational modelling, part modularity and robust metrology allowing rapid prototyping of biological designs using systematic protocols and automated processes (see below). These developments have led to the recent establishment of ‘biofoundries’, including the London DNA Foundry⁶ that contain integrated infrastructure (e.g. liquid handling robots, analytical instruments) to facilitate the DBTL cycle. At a recent meeting at Imperial College London, fifteen global foundries came together to discuss how they could form a global alliance to enable closer working, sharing and collaboration⁷. The speed of these developments has been driven by the adoption of an engineering design cycle which has to lead to the idea of a fourth industrial revolution, driven by synthetic biology and biotechnology, combined with the need to adopt bio-based feedstock models for sustainable industrial production and economic growth.

Alternative model based on bio-based feedstocks

Figure 1 illustrates the traditional model for industrialisation developed in the late 19th and 20th centuries. This comprises oil-based feedstocks as its input and the use of synthetic chemistry - leading to industrial processes and products. The model forms the basis of many of today's major industries. An alternative, sustainable industrial model, based on synthetic biology, comprises



Source: Kitney and Freemont. Engineering biology: a key driver of the bio-economy

Figure 1 Transition to Bio-based synthetic biology processes

³ The BioEconomy in the EU in Numbers - Factsheet

⁴ Report - Evidencing the BioEconomy

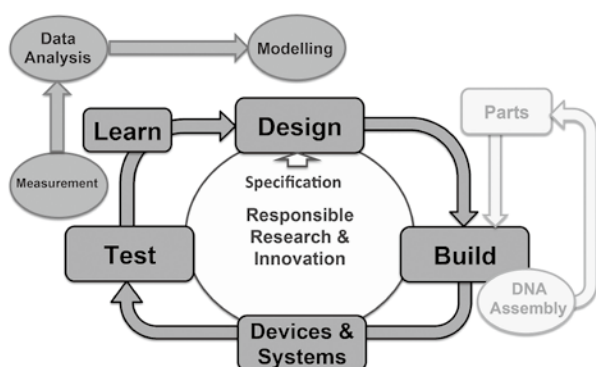
⁵ <https://bbsrc.ukri.org/research/briefings/bioeconomy/>

⁶ <http://www.londondnafoundry.co.uk/>

⁷ <http://www.synbicite.com/news-events/2018/jun/25/global-biofoundry-meeting-london-june-2018/>

bio-based feedstocks (biomass) as its input and synthetic biology – leading to industrial processes and products. The basic elements of the synthetic biology/engineering biology approach comprise the confluence of synthetic biology with engineering science and the application of the engineering principles of modularity, characterisation and standardisation. These are normally implemented according to a hierarchy comprising BioParts (consisting of sections of DNA), standard devices and standard systems which in a biological context relates to designed genetic regulators and multi-gene operons or “circuits”.

Central to the whole approach is biodesign. This is normally implemented according to a design paradigm consisting of the DBTL cycle. The paradigm is usually incorporated into a design cycle (illustrated in Figure 2). Referring to the figure, the core comprises the development of a design, based upon modelling. A design aims to use standard components (BioParts) that reside in a database - known as a registry, although parts can be obtained virtually by bioinformatics searches of existing DNA sequence databases. The DNA components can then be assembled by a build process to create the physical DNA design that has been specified. Once this has been built, it is tested either *in vitro* cell-free extracts or in living cells and assessed using analytical measurement techniques (such as mass spectrometry and data analysis). The design is then compared, in terms of its function and performance, with the specification and, if necessary, a second cycle of the process is undertaken. This systematic approach is complimentary to alternative high-throughput screening



Source: Freemont and Kitney.
Figure 2 The Design, Build, Test, Learn cycle for synthetic biology

methods where optimal target functions like product yields from biosynthetic pathways are optimised. Biodesigns can also involve very large DNA regions including whole genomes or even chromosomes as in the Yeast Sc2.0 project⁸.

The whole biodesign approach, based on synthetic biology, is now possible because of the development of the ability to read DNA and write DNA chemically (sequencing and synthesis). Fundamentally, this arose from technology that was developed for the human genome project. The technology for reading and writing DNA is now reliable and inexpensive (in the case of sequencing) and reliable and relatively inexpensive (in the case of synthesis). Typically, DNA parts (BioParts) are ordered by synthetic biology companies from specialist companies (see below). They are then shipped back for assembly - prior to testing (a process known as characterisation). An important aspect of the design and build process is reproducibility and reliability. Increasingly, building and testing are undertaken using DNA foundries. These comprise multiple liquid handling robots and other associated analytical instruments, in the context of high levels of automation. DNA foundries facilitate the ability to build and test multiple designs variants in parallel with high levels of reproducibility and reliability.

Policy

The global synthetic biology market is estimated to reach \$38.7 billion by 2020⁹. A number of international bodies - including the UK and US Governments, the EC and the OECD - are predicting that synthetic biology will have a significant impact on the economy, growth and jobs over the coming years. These are some of the key reasons why there is developing interest in creating strategy for the Bioeconomy in the UK. As previously discussed, the strategy is based on the implementation of the alternative, sustainable industrial model illustrated in the Figure 1. This

⁸ <http://www.syntheticyeastresource.com/main>

⁹ “Global Synthetic Biology Market (Products, Technologies, Applications and Geography) - Global Opportunity Analysis and Forecast - 2013 – 2020” (2014) Allied Market Research, Portland, OR, USA <http://www.alliedmarketresearch.com/synthetic-biology-market>

comprises an alternative industrial model based on bio-based feedstocks (biomass) the use of synthetic biology – leading to industrial processes and products.

The UK's original synthetic biology roadmap, published in July 2012¹⁰, resulted in the creation of six new basic research centres in synthetic biology at the Universities of Bristol, Cambridge/John Innes Centre, Edinburgh, Manchester, Nottingham and Warwick - in addition to the original basic research centre at Imperial College. The Government's £300 million investment resulted in the centres working in different areas of synthetic biology: Bristol (biomolecules to biosystems), Cambridge/John Innes (agro-science and open technology development), Edinburgh (mammalian synthetic biology), Manchester (synthetic biology for fine and speciality chemicals), Nottingham (sustainable industrial production processes) and Warwick (engineering effectors systems in plants, biosynthetic pathways and microbial communities) - with Imperial College continuing to work on platform (or foundational) technology, with a range of applications. In addition, the UK government established the national industrial translation centre for synthetic biology (SynbiCITE) at Imperial College. The second phase of the development of synthetic biology strategy for the UK resulted in a new report (BioDesign for the Bioeconomy, published in February 2016)¹¹. This report focused on a number of areas, but, principally, on: accelerating industrialisation and commercialisation; maximising the capability of the innovation pipeline; building an expert workforce; developing a supportive business environment; and building value for national and international partnerships.

The UK's strategic developments have resulted in an emergent UK industry involving start-ups and spinouts - as well as the creation and development of new technology opportunities that can be exploited by existing companies. These include emerging technologies and new market opportunities for large multinational companies, as well as

¹⁰ Synthetic Biology Roadmap for the UK 2012

¹¹ Biodesign for the Bioeconomy - UK Synthetic Biology Strategic Plan 2016

small to medium companies (SMEs). To fully realise the potential that this opportunity presents to the UK, the gap between university-based research and industry needs to be bridged. Research outputs from academic institutions are usually classified at technology readiness level (TRL) 1 and 2; as such, they are not, typically, ready for development by industry. Technologies need to be matured and de-risked and potential products and markets defined to make them attractive for investment and product development, at TRL 5, by industry. Since its inception in October 2013, SynbiCITE, in concert with its industrial and academic partners, has established an industrial translation platform for research using synthetic biology. This combination is capable of advancing technologies (as diverse as protein therapeutics and gene therapy; fine and specialty chemicals; biofuels; the agriculture and bioremediation- see below) through TRLs 3 and 4, leading to investment and product development by industry at TRL 5 and beyond.

More recently, in 2017, there has been the publication of further UK government strategic documents that define a new industrial strategy: Building our Industrial Strategy – Green Paper;¹² Life Sciences Industrial Strategy;¹³ and Industrial Strategy – Building a Britain Fit for the Future.¹⁴ Other key international documents include: Industrialisation of Biology – US National Academies¹⁵.

Platform technology enables multiple applications

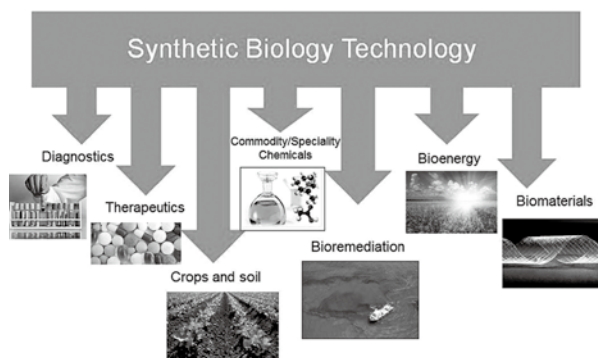
The basic strategy for implementing synthetic biology translation in the UK is focused around the development and adoption of platform (or foundational) technology. As shown in Figure 3 synthetic biology platform technology can be applied to many different applications and market sectors including pharmaceuticals, chemicals, materials, energy and agriculture. The technology also allows novel product development particularly around biomaterials and natural product discovery and production. The public investment for developing platform technology has been

¹² Building Our Industrial Strategy – Green Paper 2017

¹³ Life Sciences Industrial Strategy, 2017

¹⁴ Industrial Strategy - Building a Britain Fit for the Future, 2017

¹⁵ Industrialization of Biology - National Academies Press



Source: Freemont and Kitney

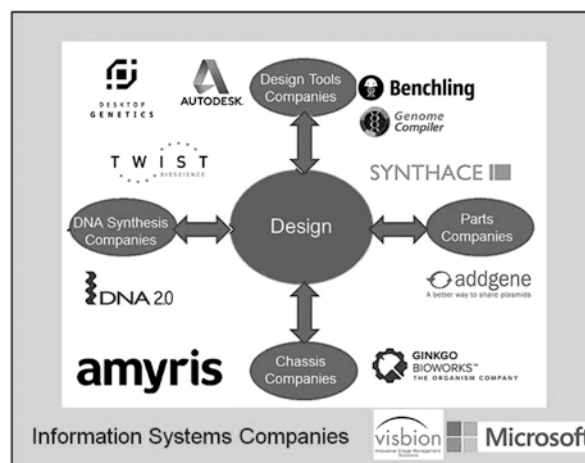
Figure 3 Applications enabled by synthetic biology platform technology

primarily focused around the UK seven synthetic biology research centres and four DNA foundries (see footnote 7), where biofoundries act as the prototyping environment for synthetic biology designs and processes. The global development of biofoundries also validates this strategy - where the systematic and industrial processes needed for the new biotechnology industries and value-chains that are developing will be driven by distributed biofoundries. With platform technology enabled at biofoundries, there is also real possibility that in the future much of the fabrication and testing of biodesigns and engineered organisms will be done in the Cloud by biofoundry service providers.

New products and value chains

As stated above, the development of platform technologies within Biofoundry service providers leads to the opportunity of new business models, value chains and products. At the centre of synthetic biology is Biodesign. This approach has already led to new supply companies for DNA synthesis, software tools, genetic part and chassis or organism companies. This is illustrated in Figure 4, where a number of US start-up companies (e.g. Ginkgo Bioworks, Zymergen, Amyris) have business models based on delivering engineered organisms for specific product production (e.g. fine and speciality chemicals like perfumes or cosmetic additives). In addition, specialist DNA synthesis providers (e.g. Twist, GeneArt/Thermo Fisher Scientific) supply these companies and the growing synthetic biology industry with raw material namely synthetic DNA.

Others specialist companies like Synthace and Desktop



Source: Kitney and Freemont

Figure 4 The Biodesign supply chain

Genetics in the UK and Benchling in the US offer software tools to enable biodesign (BioCAD) and automation integration. Multinational software companies like Microsoft and Visibion are also developing information systems and tools to accelerate the whole biodesign process. In the UK synthetic biology start-up scene, there are a number of new companies which are building their business models around biodesign (both as tool and service providers) to product development companies (see Figure 4).

With the advent of synthetic biology tools and processes, there is a growing market opportunity in the area of biomaterials and consumer biotechnology products. This exciting market development has been pioneered by two US start-ups, Bolt Threads and Modern Meadow. Their business models are centred upon the sustainable production of insect and animal materials without using the source organism. By using synthetic biology to produce spider silk in Baker's yeast – and, more recently, mycelium cells to produce leather like material - Bolt Threads have launched a consumer spider silk tie product. Modern Meadow is producing collagen to make natural leather like materials that can be incorporated into luxury fashion products, recently receiving much fanfare and support from world-famous designer Stella McCartney. In the UK a Cambridge start-up Colorifix are using engineered bacterial cells to produce sustainable natural dye products such that material can be dyed by simply growing bacterial cells on the material. The growing market of sustainable material

products for the fashion industry exemplifies the potential opportunity for a growing circular economy of re-use, repair and recycling driven by synthetic biology tools and processes.

SynbiCITE

As previously stated, SynbiCITE¹⁶ is the UK's industrial translation centre for synthetic biology, based at Imperial College. It works with over 50 companies (of which the 11 are multinationals- and the rest are start-ups and SMEs) and over 20 UK universities. While SynbiCITE works with large companies on a range of projects, a principal focus of activity relates to start-ups and SMEs. SynbiCITE supports these types of companies in three ways: providing funding in support of projects and company development; providing technical support and facilities; and providing business courses. Figure 5 illustrates the SynbiCITE projects and funding pipeline. Referring to the figure, the first stage in the process comprises ideation, which may be via a sandpit or the development of an idea within a company. Using the example of a start-up company, once an idea has been developed, the next stage in the process is, typically, to fund a proof of concept (PoC) project – which may last 3 to 6 months.

This is normally funded at around £50,000, using public funds to provide seed funding. Once this phase of the project has been completed successfully from a scientific point of view, if it is judged to be worth developing, the next stage is for members of the company to undertake the SynbiCITE four-day MBA. The second phase of

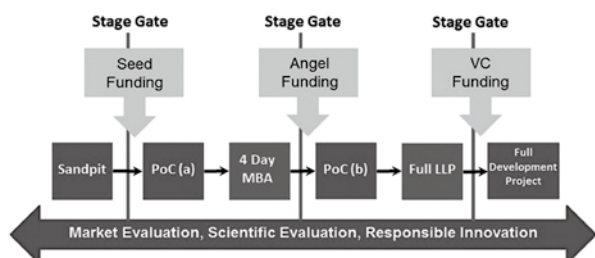
the development (PoC (b)) is normally funded from a combination of public and Angel Funds. This phase, depending on the project, can last a year and be funded at around £250,000 - depending on requirements. Once the scientific work for the phase has been completed, members of the company undertake a 12-week Lean LaunchPad (LLP) course. This is a customer facing course that is designed to align the results of the projects with potential customers and the market. The final phase of the pipeline comprises a full development project that is usually funded from venture capital sources.

UK Synthetic Biology Start-ups

In 2017, SynbiCITE undertook a survey of start-up companies in the UK in the area of synthetic biology. The survey covered the years between 2000 and 2016. The survey showed that UK has created more than 146 synthetic biology start-ups over the period. On average, the number of synthetic biology companies has been doubling every five years. More than half (54%, 79) of start-ups are tech transfer start-ups, with fewer (46%, 67) non-tech transfer start-ups produced over the same period. (Tech transfer companies are defined as companies that come out of universities via the Tech Transfer Office; whereas, non-tech transfer company start-ups are independent of any university.) However, over the last few years, non-tech transfer start-ups have been outpacing the more traditional tech transfer start-ups by 2:1. Currently, of the 146 companies surveyed, 111 remain active - representing 76% of the original total (8% were acquired and 16% are inactive). Over the period of the survey, £620 million has been raised from the private sector, of which £487 million went to tech transfer start-ups and £133 million to non-tech transfer start-ups.

Summary

The article addresses the Bioeconomy as a key area for economic growth – based on synthetic biology. With significant government investment the UK is now second to the US in terms of synthetic biology start-up companies, a sector which is expected to grow rapidly.



Source: Kitney and Freemont
Figure 5 SynbiCITE project pipeline and funding

¹⁶ <http://www.synbicite.com/>

Voice from the Business Frontier

日立オーストラリア 研究開発センタ センタ長 古川 直広
オーストラリア連邦科学産業研究機構

製造事業部プロジェクトリーダー/シニアリサーチサイエンティスト Murat Gel

～デジタル化によるオーストラリアの社会・産業の変革の可能性～



(ふるかわ なおひろ)
1997年日立製作所入社。
中央研究所にて文字認識や文書管理、ユーザインタフェースの研究に従事。2008年システムエンジニアとして公共システム事業部に異動。2010年中央研究所主任研究員。2015年東京社会イノベーション協創センタユニットリーダー主任研究員。2018年日立オーストラリア研究開発センタセンタ長に就任、現在に至る。



(ムラト ゲル)
2006年東京大学機械工学専攻 助教。バイオエンジニアリングの研究に従事。2011年オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)入社。CSIROの技術を活用したソリューションの研究開発に従事。2018年CSIROから日立オーストラリア研究開発センタに出向、現在に至る。

都市化が進展しているオーストラリアでは、社会インフラのスマート化ニーズが拡大。日立オーストラリア（以下 HAUL）は、インフラ事業などで培った知見やノウハウを活用し、社会に貢献すべく、シドニーに研究開発センタを設置して新たな事業機会の創出に努めています。同センタを率いる古川直広氏、現地パートナーであるオーストラリア連邦科学産業研究機構（以下 CSIRO）から HAUL に出向しているゲル・ムラト氏にお話を伺いました。

Q1. オーストラリアでの「HAUL」「CSIRO」協業の概要と、古川さんとムラトさんがそれぞれ注力している研究内容や業務についてお聞かせください。

古川: 日立のオーストラリア事業は約半世紀にわたる歴史があり、ビクトリア州の鉄道をはじめ、これまで多くの社会インフラ整備を手がけてきました。HAULはオセアニア地域に展開するグループ現地法人を統括する機能を持ちます。当該地域では、日立建機オーストラリアなど計9社のグループ企業がマイニング、IT、電力、産業用機械など幅広い分野で事業を展開しています。

HAUL 研究開発センタは、お客さまのそばでお客さまとともに事業上の課題を検証し、解決策を創り上げていく「協創」の取り組みを推進していくことを目的に2016年に設置された組織です。現地パートナーとの協創により、マイニングや農業、鉄道システム、ヘルスケア、セキュリティといった事業ニーズの拡大が見込まれる分野を中心に、社会イノベーション事業を通じた新たなソリューションを提供していくことをめざしています。

これらの活動を強化するため、2018年5月にオーストラリア最大の研究機関であるCSIROと新事業創出の協創プロジェクトを立ち上げました。CSIROでソリューション開発などに従事されていたムラト氏をHAULにお招きし、文字どおり机を並べて議論を交わしながら、オーストラリアの社会や産業の将来動向を予測・分析し、想定される社会課題や経営課題の解

決に資するビジネスやテクノロジー像を明確にし、そこでの日立の貢献可能性について検討を重ねています。

CSIRO はオーストラリアを代表する研究機関で、多分野にわたる最先端技術を有しています。また、オーストラリアのあらゆる産業に対してコネクションを持っています。CSIRO とパートナーシップを組むことにより、そのネットワークを有効活用できることは HAUL にとって大きなメリットです。今後も両組織が緊密に協業していくことにより、オーストラリアの社会や産業の発展に貢献していきたいと考えています。

ムラト：CSIRO はオーストラリア産業イノベーション科学省所管の研究機関で、日本の理化学研究所と産業技術総合研究所を合わせたような組織です。農業、環境、IT、素材、製造、鉱物、エネルギーなど多岐にわたる研究を手がけ、現在では 5000 人以上のスタッフを抱えています。私は、CSIRO の技術シーズを活用したソリューションを開発し、社会課題解決を推進する業務に従事しています。主に“CYBERTONGUE”というバイオセンサ技術を用いた乳業向けソリューションの開発に従事していました。

2018 年 5 月に HAUL に出向してからは、日立の顧客協創手法である“NEXPERIENCE”を用いて、将来のオーストラリアの社会・産業動向を予測し、世に先駆けて社会に新たな価値を提供するためのソーシャルイノベーション分野での事業化や事業開発戦略の策定に携わっています。

Q2. 資源・エネルギー産業が成長を牽引してきたオーストラリアの経済や社会においても、昨今ではデジタル化が進展し、社会や産業全体が大きく変革しつつあると聞いています。その具体的な事例についてお聞かせください。それらを踏まえて、どのような課題に着目しているか教えてください。

古川：オーストラリアでは人口増加によって都市化が急激に進んでおり、慢性的な交通渋滞や都市交通の不足など交通インフラに課題を抱えていますし、医療費の増加への対応、マイニングや農業といった基幹産業

の競争力強化において、IoT 技術を活用した生産性向上、高付加価値化など産業のスマート化が強く求められています。また、産業のデジタル化が世界規模で進んでいる中、オーストラリア政府はセキュリティ対策の強化も推進しています。

オーストラリアでは以前からデジタル化の取り組みが進められています。例えば、シドニーでは 2016 年に鉄道の乗車券が廃止されました。鉄道を利用するためには、“オパールカード”という IC カードを購入し、クレジットカードなどから料金をチャージする必要があります。また、有料道路には料金所が設置されておらず、車載の電子タグで料金が自動精算される仕組みになっていますし、空港の入国審査も無人化が進んでおり、まるで鉄道駅の自動改札のようにスムーズかつスピーディな入国が可能になっています。

同国のデジタル化ニーズ拡大の要因の一つに、「最低賃金」が高く設定されていることが挙げられます。現在、オーストラリアの最低賃金は、週 38 時間労働の場合、日本円にして時給約 1500 円に定められています。背景には人手不足で労働力の確保が困難になっていることがあり、その解決策の一環として、最低賃金を高く設定することで海外人材やホリデーワーカーも含めた労働力の取り込みを企図していると考えられます。これがオーストラリアでデジタル化によるサービスの自動化や無人化のニーズを押し上げる要因になっています。

HAUL 研究開発センターでは、こうした社会や産業の変化の胎動を素早くキャッチし、取り組むべき事業領域や課題を整理したうえで、最適なソリューションを提供していくことが大切だと考えています。

ムラト：オーストラリアは成長が見込まれる有望市場であることは間違いありませんが、一方で、有力シンクタンクの一つであるロイ研究所の分析によると、インド、インドネシア、パキスタン、タイの台頭によって、アジア・オセアニア地域におけるオーストラリアの国際競争力は 2030 年までに大きく低下する可能性が指摘されています。競争力の低下を防ぐためには、官民が強固なパートナーシップを組み、デジタル技術を最大限に活用した生産性の向上に取り組む必要があると思っています。

そうした中で、私が特に注目している課題として、高齢者をケアする医療従事者の不足が都市部以外の地域で顕在化しつつあることが挙げられます。この問題については、ビデオ会議システムなどを活用した遠隔医療サービスの導入などによって改善が期待できると考えています。

Q3. 産業のデジタル化が進むにつれ、世界中で社会や産業の変革が求められる時代になりました。いわゆる「デジタル・トランスフォーメーション」を促進していくために、オーストラリア政府が実施している各種政策の中で、特に注目している施策についてお聞かせください。

古川： 前述した鉄道乗車券廃止のケースからも、オーストラリアにはデジタル・トランスフォーメーションが浸透しやすい土壤があると感じています。例えば、日本の鉄道ではICカードと乗車券が併用されています。これは、デジタル化に馴染めない一部の利用者、すなわち「マイノリティ」に配慮した結果だと言えます。対照的に、オーストラリアは「マジョリティ」を重視する考え方が一般的で、制度や仕組み、システムを変更する場合は一から刷新するケースが見られません。

オーストラリアのデジタル化政策で私が注目しているのは、教育省が今後10年間の国内研究基盤開発の優先事項について定めた“2016 National Research Infrastructure Roadmap”です。オーストラリア政府は、このロードマップの内容に沿って研究開発を推進しており、設定された優先分野に対して多額の税金が投入されています。

例えば、ロードマップが注力分野の一つに掲げている“Complex Biology”の分野では、今後5年間で約5340万豪ドル、12年間で約2億1620万豪ドルが投入される計画になっています。もっとも、ひとくちに“Complex Biology”と言っても対象領域は幅広く、次世代農業のためのインフラ研究開発なども含んでいます。こうした分野での事業機会の創出や市場拡大の可能性が考えられます。

ムラト： 政府が実施している政策ではありませんが、

今年に入ってマッキンゼーが発表したレポートは実に興味深い内容でした。デジタル技術がオーストラリアのさまざまな産業に与える影響を分析したレポートで、それによれば、特にヘルスケアとマイニングの分野のデジタル化を推進することによって、オーストラリアは多大なメリットを得ることができると報告されています。

具体的な数値を紹介すると、ヘルスケア分野では、サービス事業者と公共機関が連携することによって業務コストを8～12%削減することができ、マイニング分野では、掘削機械などのリアルタイム稼働監視やオペレーション最適化を実施することにより、同国の資源会社の業績をEBIT（支払金利前税引き前利益）で約800億豪ドル改善が期待できると記されています。

もちろんオーストラリア政府も手をこまねているわけではなく、国内の研究機関や非営利団体にデジタル化の社会的メリットに関する調査や技術評価を依頼しています。例えば最近では、オーストラリアの学術アカデミー評議会に、「AIアプリケーションのリスクと機会とその影響」、「技術的リーダーシップと責任ある開発を促進するためのIoT技術」というテーマで調査を依頼しており、こうした動きは、社会・産業のデジタル化に対するオーストラリア政府の前向きな姿勢と捉えてよいと思います。また、オーストラリアの最大のデータ・サイエンスの組織であるCSIROのData61は優れた研究成果とビジネスノウハウを組み合わせ、官民、またコミュニティが変革するデジタル社会を上手にナビゲートできるように支援をしています。

Q4. 近年、バイオ分野では技術革新が進み、ゲノム自体を「デジタルデータ」として捉える動きが顕著になっています。欧州などでは、ゲノム編集などのバイオテクノロジーを経済に活用した“バイオエコノミー”の実現に向けた産業育成政策が導入されていますが、オーストラリアではそうした取り組みは実施されているのでしょうか。

ムラト： 現状では目立った取り組みはありませんが、当然のことながら、ゲノム編集による遺伝子改変には

倫理を含めたさまざまな問題がつきまとうため、オーストラリア政府は指針の策定に向けて動き出しているようです。一方で、オーストラリア政府の研究機関であるCSIROは、遺伝子組み換えによる品種改良を施した植物や動物が環境に与える影響などに関する研究などに着手しています。

古川: 前述した“2016 National Research Infrastructure Roadmap”に目を通すと、“Complex Biology”の分野において、遺伝子の塩基配列を高速に読み出す“次世代シーケンサー”装置に関する記述が散見されます。このことからオーストラリア政府がバイオ分野に対して資金を投入する必要性を感じている様子が見えませんが、オーストラリアはどちらかといえば、民間企業などによる自主規制よりも法律による規制を重視するところがありますから、産業育成政策の策定に先立って、法律を含む関連制度の整備が進むことが予想されます。

Q5. オーストラリアの社会・産業はデジタル化により今後ますます発展していくと思いますが、デジタル・トランスフォーメーションはバイオ産業を含むオーストラリアの産業にどのような影響を与えるのでしょうか。それに対し、日立グループおよびCSIROはどのように貢献することができるのかお考えをお聞かせください。

古川: 先に述べましたが、オーストラリアでは労働力不足が大きな社会問題になりつつあります。特にマイニングや農業などオーストラリアの強みでもある1次産業では、労働需要が都市部ではなく地方や郊外に集中しているという問題があります。現在は、“Fly In Fly Out（以下FIFO）”と呼ばれる雇用制度でその労働需要を賄っています。これは、労働者が遠隔地の鉱山などで2～3週間ほど勤務した後、飛行機で自宅に戻って休暇を取る勤務形態です。このオーストラリアの労働力不足の問題は、今後ますます深刻化していくに違いありません。そのためデジタル・トランスフォーメーションによる鉱山オペレーションの自動化や鉱山機械のリモート操作の推進によって、労働力不足の解消や緩和をめざす方向に進む

と考えています。前述のようにFIFOは2～3週間の短期間勤務が一般的で、このことは自ずと勤務の過酷さを物語っていると言えます。その意味においても、IoT技術などを用いたオペレーション自動化のニーズが高まると予測しています。

こうした分野に対して、日立が強みを持っているセンシングやAIなどの技術を活用することができると考え、その可能性や適用の方向性についてムラトさんと検討しています。

ムラト: CSIROは自前の技術を活用して、これまでもオーストラリアのデジタル化に貢献してきました。例えばヘルスケア分野では、最近クイーンズランド州保健省と合弁事業を立ち上げました。クイーンズランド州では、質の高い医療・福祉サービスを提供することが、住民の健康維持だけでなく地域の経済や社会の発展にも寄与するという考えに基づき、保健医療の向上と福祉の増進をめざした“健康増進2026”という施策を実施しています。合弁事業はその施策の一環で、医療サービスにおける臨床システムの大部分をデジタル化することをめざしています。

また、デジタル農業の実現にも取り組んでいます。例えば牛肉産業において、CSIROはスタートアップ企業と提携し、牛の耳に取り付けるスマートタグ（電子追跡タグ）を開発しました。このタグを利用することで、牛の移動管理・制御を可能にし、必要とする牧草地の面積を減らすことで牧草地経営の最適化を促進します。牛と牧草地の双方を管理するこの技術により牧草地経営からマーケティングまで、牛肉産業の生産性を改善させるトータルソリューションを実現しました。

これらのプロジェクトにHAULは参画していませんが、今後は社会イノベーション事業の実績と経験が豊富なHAULとの協創を深化させ、新たなソリューションを開発・提供することによってオーストラリア社会のデジタル化促進によりいっそう貢献していきたいと考えています。そのためには、CSIROとHAULがお互いの強みをきちんと理解し、かつうまく融合・機能させることによってシナジーを生み出すことが欠かせません。

鉱山開発における IoT 推進

研究第三部 産業グループ 研究員
片岡 美理

近年、海外の資源メジャーによる自動走行ダンプやビッグデータ解析による鉱山機械制御システムの導入など、IT/IoT を活用したオペレーション効率化に取り組む動きがみられる。鉱石品位の低下や鉱山の深部化・奥地化などにより、開発コストが増大傾向にあることに加え、低品位鉱・複雑鉱など環境的に厳しい鉱山でも安定操業を実現し収益を確保すること、安全性の向上や作業の負荷を軽減し多様性のある働き方を受け入れることなど技術的・社会的課題解決が、IT/IoT 導入推進の背景にある。

日立総研では、「平成 28 年度 鉱山開発における IoT 推進による生産性・安全性向上策に関する基礎調査」（経済産業省）と、「平成 29 年度 鉱山操業における生産性及びエネルギー使用効率高度化のためのシステムの開発検討」（NEDO）の二つの委託調査事業を受託し、豪州やチリへの海外調査、および大学の研究者や鉱山会社などからなる検討会開催を通して、日本の鉱山会社にとって最適な IoT 導入の方向性を検討した。ⁱ

特に調査・検討に当たっては、日本の鉱山会社が先進事例として高い関心を持つ、チリ国営鉱山公社「CODELCO」の IoT 導入状況把握を行い、日本の鉱山会社の操業状況に即した IoT プラットフォーム開発の方向性についてまとめている。

1. チリにおける鉱業のデジタル化

Corporacion Nacional del Cobre de Chile（以下、CODELCO）は、チリ国営の鉱山公社であり、世界最大の銅生産企業である。日本経済とも関係が深く、多くの産出銅が日本に輸出されている。

CODELCO は、2005 年ごろ、「デジタルトランスフォーメーション」と称し、鉱山運営のデジタル化を推進するプロジェクトに着手した（図 1）。

CODELCO は 6 つの鉱山でデジタルトランスフォーメーションを実施した（表 1）。ここでは鉱山ごとで

ⁱ 一般的な鉱山の操業プロセスと、鉱山 IoT プラットフォームの概念については、日立総研 Vol.12-3（2017 年 11 月発行）掲載の先端文献ウォッチ（p.32-33）「Understanding Mine to Mill by Cooperative Research Centers」を併せて参照されたい。

CODELCOの重点5要素	主な取り組み
① 異常の視覚化	● 危険、生産効率が下がる異常、従業員の状態(眠気、疲労)などをカメラで検出
② データ解析	● 既に蓄積されている膨大なデータを解析、活用
③ シミュレーション	● 短・中・長期の鉱山計画などに反映(2より長いスパンで解析)
④ 自動化・遠隔化	● 設備・機械の自動化、遠隔オペレーションの導入
⑤ AI活用	● ①～④を統合した鉱山操業の最適化

資料：CODELCO 資料およびヒアリングをもとに作成

図 1 CODELCO デジタルトランスフォーメーション 5 つの要素

表 1 CODELCO の各鉱山で進むデジタルトランスフォーメーション

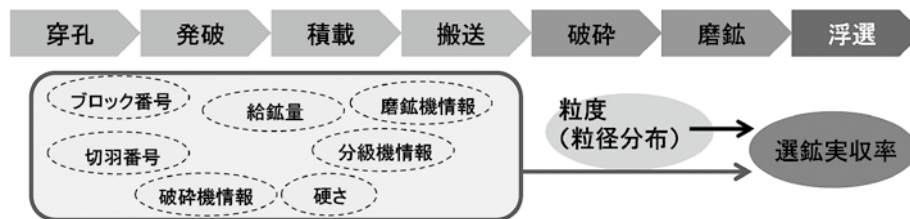
	鉱山	取り組み
①	Radomiro Tomic	◎設備予兆保全用センサー導入 ◎バイオリチング開発
②	Gabriela Mistral	◎ダンプ自動化
③	Chuquicamata	◎カメラを活用した浮遊選鉱プロセス自動化
④	Ministro Hales	◎地質および水質モニタリングによる崩落危険性の低減 ◎リモートオペレーションセンター導入 ◎焙焼プロセスのシミュレーション開発
⑤	Andina	◎リモートオペレーションセンター導入を計画 ◎ダンプ・ショベルの自動化開発
⑥	El Teniente	◎LHD 自動化 ◎リモートオペレーションセンター導入を計画 ◎選鉱の操業データ解析

資料：CODELCO 資料およびヒアリングをもとに作成

LHD：Load Haul Dump（積載運搬車両）

異なる操業上の課題に対して IoT を導入し、その後同様の課題を持つほかの鉱山に横展開をしている。例えば、④ Ministro Hales 鉱山で導入した「リモートオペレーションセンター」では、鉱山から 1,000km 以上離れた首都サンティアゴにある同センターから、オペレータがカメラや計器類を確認しながら、遠隔で機器を制御するシステムを導入した。CODELCO によると、各部門のオペレータが 1 カ所に集まり、オペレータ同士が対面でのコミュニケーションが取れるようになったことで、業務の受け渡しやトラブル対応がスムーズになり、結果として生産性が約 10% 向上した。今後は Andina など他の鉱山への導入を計画している。

デジタル化に投資を進める CODELCO であるが、AI の導入や、全社的なデータ利活用の高度化、適用



資料：日立総研作成

図2 採鉱プロセスと選鉱実収率の相関のイメージ

業務範囲の拡大による更なる生産性向上のための課題として、①ビックデータ解析に用いるデータの信頼性ⁱⁱや、②データ量が膨大で整理ができておらず有効に活用されていないこと、の二点を挙げている。

2. 日本の鉱山会社に必要な IoT

世界最大の操業規模を持つ CODELCO は、各鉱山で実証中の技術・ノウハウを、特定の業務をターゲットにして水平展開し経営効率の改善につなげることができる。しかし、日本の鉱山会社は、マジョリティ権益を持つ鉱山を複数保有しておらず、複数の鉱山にまたがったノウハウの横展開で生産性を向上させる余地が限られている。そのため、日本の鉱山会社の IT/IoT 導入を考えるには、一鉱山内の一連のプロセスの中で効率化を追求するのが現実的である。

ここで重要となるのは操業の各プロセス間での情報共有の仕組み構築である。しかしながら、鉱山操業においては、探鉱は地質部門、採鉱は採鉱部門、選鉱は選鉱部門、メンテナンスは整備部門、計画は生産計画部門といった形で、個別部門で情報を管理し、他部門に情報共有を行うことは少なく、情報を共有しようにも、それぞれのデータ出力形式が異なり、簡単に連携させることができない状況にある。

情報共有の仕組みを構築するに当たっては、投資対効果の高い業務に絞り込んで導入することが重要である。検討会での議論の結果、①鉱石性状や採鉱情報を活用した選鉱実収率の向上、および②稼働率向上によるコスト削減、の二点にとりわけ鉱山開発企業の要望が多いことが判明し、技術開発テーマとした。

その上で操業効率性向上のための、情報取得・共有・分析基盤である「鉱山 IoT プラットフォーム」の具体的な内容について検討を行った。

ⁱⁱ 人手でサンプリングしたデータは作業者の判断の影響を受け、取得条件が一定ではない。そのため、CODELCO ではセンシングの自動化なども検討している。

3. 鉱山 IoT プラットフォームの要件検討

鉱山 IoT プラットフォームについて、最低限のスペックとコストで、前述の二点の技術開発テーマ案に沿う機能を検討した。具体的にはどのデータを用いて何を解決するかといった内容を整理し、プラットフォームの機能要件を整理した。

① 鉱石性状や採鉱情報を活用した選鉱実収率の向上

鉱石品位の低下が続く中、実収率の安定化・向上には、穿孔や発破などの上流業務で取得可能なデータの活用が重要である（図2）。これらデータを基に鉱山 IoT プラットフォーム上で、選鉱実収率などの KPI に与える影響を解析することで、選鉱プロセスの機器制御、薬剤投入量などの微細な調整に反映し生産性向上につなげることが可能になる可能性が高い。

② 稼働率向上によるコスト削減

1カ所で操業が停止すると、前後の工程にもズレが生じ、全体の操業に多大影響を及ぼし、稼働率が低下する。鉱山運営では復旧作業を効率的に行うことが求められるが、復旧作業の効率性はオペレータの指示に負うことが多く、個人の経験や勘に依存しているのが実情である。これに対し、鉱山 IoT プラットフォーム上で、各工程での異常発生データ、復旧作業記録を蓄積し、復旧所要時間などの相関性を分析することで、有効な作業指示方法の抽出・類型化が可能になり、作業手順の標準化、効果的な指示支援につながる。

4. 今後の展望

一連の調査研究活動により、鉱山の上流から下流まで各プロセスで蓄積された膨大なデータの処理や活用上の課題と、国内外の鉱山会社の IoT 導入ニーズが明らかになった。

日立総研では、これらニーズに対応した鉱山 IoT プラットフォーム開発の方向性具体化を進めていく。

Shaping the Fourth Industrial Revolution By Klaus Schwab

SI-PI 推進室 主任研究員 三木田 聖

日本政府は、今年6月に閣議決定した「未来投資戦略2018」において、IoTや人工知能、ロボットなどの第4次産業革命技術の社会実装を通じた産業のデジタル化と生産性向上を図ることで、人口減少・高齢化や環境・エネルギーなどの社会課題を解決し、日本ならではの持続可能でインクルーシブな経済社会システムである Society 5.0 の実現と、国連「持続可能な開発のための2030アジェンダ」(Social Development Goals:SDGs) 達成に寄与することをめざすと述べた。デジタル新時代の価値の源泉であるデータを一部の者が独占する「デジタル専制主義」への懸念が拡大する中、Society 5.0 の実現は、さまざまなデータを共有財産と位置付け、社会課題解決を担うビジネスに活用し、イノベーションを牽引する多様なプレーヤを創出するという意味で意義のあるものであり、短期の利益第一主義では対応できない新たな社会・産業モデルを世界に提示するものである。

同様の視座に立ちながらも、より大局的な観点から第4次産業革命による世界の社会の変化を俯瞰し、国家や官民の枠を超えたグローバルな枠組みの構築をめざすが、ダボス会議で知られる世界経済フォーラム(World Economic Forum: WEF) である。クラウス・シュワブ WEF 会長は本書において、世界の現状を、マデレーン・オルブライト元米国務長官の言葉を換言して「われわれは21世紀の技術を、20世紀のマインドセットと19世紀の組織で統治している」と端的に表現し、21世紀型のマインドセットとリーダーシップに基づく人間中心の社会・産業の復興・再生により、どのように第4次産業革命の時代を形成すべきかを示唆している。

1. 第4次産業革命に係る課題と21世紀型マインドセット

本書では、第4次産業革命の中核を成す12の新技术を挙げている(表1)。そして、技術的フィージビ

リティ、セキュリティリスク、環境への負荷、社会の許容性、法規制の必要性などの課題を示すとともに、それぞれの新技术の潜在的影響力のみならず、どのように複数の新技术がシステムの形でつながり、その結果としてどのような影響が社会にもたらされるのかについて述べている。

表1 第4次産業革命の中核を成す新技术

①新コンピューティング技術	⑦バイオテクノロジー
②ブロックチェーン	⑧ニューロテクノロジー
③IoT	⑨仮想現実と拡張現実
④人工知能とロボティクス	⑩エネルギー技術
⑤先端材料	⑪地球工学
⑥付加製造と多次元プリンタ	⑫宇宙工学

資料：本書より日立総研作成

その上で、政府、民間セクタ、NGOなどすべてのステークホルダに対し、①今後の技術革新と社会変革を見通し、第4次産業革命による恩恵を公正に社会に分配する手段を確保すること、②第4次産業革命がもたらすリスクや弊害などの外部性をマネージする仕組みをつくること、③人間が中心となり第4次産業革命を主導する環境を構築すること、の3つの共通課題を挙げている。ここで重要なのは、あるべき将来の社会・産業システム像から技術革新の方向性を考えるための21世紀型マインドセットの醸成である。本書はそのための4つの原則を次に掲げている。

第一の原則は、技術よりシステムを重視することである。第4次産業革命の議論では個別の技術に焦点が当たることが多いが、真に重要なのは人々に幸福をもたらす社会システムの実現である。政治的意思と投資、ステークホルダ間の協力関係と新技术とを組み合わせ

ることで、より良い社会システムを構築することができる。

第二の原則は、人間が主体的に技術の活用方法を判断することである。技術がシステムのあり方を決定するのではなく、すべてのステークホルダが協力して、生活や人生のより多くの選択、機会、自由を人々に提供する社会像を構想し、そのために必要な技術を選択し、開発することが重要である。

第三の原則は、新しいシステムの構築をめざすことである。格差や環境悪化などの問題を抱える既存システムに新技術を組み込むのではなく、人間中心のデザイン思考による全く新しいシステムをまず構築し、そこに新技術を活用する概念が不可欠である。

第四の原則は、技術の社会的価値を尊重することである。技術を単なるツールとして見るのではなく、すべての技術にはアイデアから開発・実装までのあらゆる段階において人間社会に新しい知見や価値観をもたらす可能性が存在する。複数技術を結び付けることを含め、使い方次第で技術の価値を生み出し高められることを理解すべきである。

2. マルチステークホルダ・リーダーシップとシステム・リーダーシップ

著者は、第4次産業革命を実現するためには、各国政府、民間セクターやNGOなどのステークホルダが参加するマルチステークホルダ・アプローチが望ましいと指摘する。代表的な取り組みとして、2015年9月の国連サミットで採択されたSDGsと、同年12月の国連気候変動枠組条約第21回締結国会議で採択されたパリ協定が記憶に新しい。

ここでは、政府、民間セクター、NGOがそれぞれ政策立案、ビジネス貢献、貧困・環境問題撲滅といった異なる観点を持ちながら、主体的に社会課題解決に向けた議論に関与することで共有ビジョンが形成された。本書はこれを、責任ある地域・国際社会のマルチステークホルダ・リーダーシップの発揮と指摘する。

また、第4次産業革命実現には、このマルチステークホルダ・リーダーシップに加え、共有ビジョンに呼応する形で政府が政策立案を行い、民間セクターが新技術の可能性を追求する技術開発と人材投資を行い、市民が自発的に政治への関与や先端技術体験を行う形で協調・連携し、変化に適応した、持続的な社会・産業

システムの構築を図るシステム・リーダーシップも必要と訴える。

3. むすび

WEFは第4次産業革命センタ（Center for the Fourth Industrial Revolution：C4IR）を昨春、米国サンフランシスコ市に、今年7月には東京に設立した。C4IRでは、多様な国と分野から人材を集め、本書が示す理念や課題を共有し、技術革新とデジタル化がもたらす社会と産業の構造変化を人々の幸福に結び付けることをめざして、新技術の社会実験や社会実装のほか、法規制や道徳的基準の策定、サイバーセキュリティへの対応など、多角的な研究や議論を通じた人間中心のシステム構築に取り組んでいる。

しかし、世界各国はすでに第4次産業革命下のグローバル競争に向けて、政府主導でデジタルイノベーションへの取り組みを加速させており、国家安全保障に関わる政府関連データや税関連データなど、越境データの流通を規制する動きも拡大している。また、民間レベルでもデジタル・プラットフォームをはじめとする各種技術・サービスにおける開発・ビジネス競争が激化しており、一部企業の独占が新たな格差を生んでいる。

こうした状況下、WEFはいかに21世紀型のマインドセットを浸透させ、国や企業の利害を超えたリーダーシップを確立・強化することができるかが問われている。途上国の開発を先進国が援助する形で始まった国連ミレニアム開発目標はSDGsの策定につながり、経済・社会・環境のすべての側面を対象とし、先進国における生産や消費なども課題とする形で進化した。また、温暖化ガス排出量の数値目標の達成を先進国のみならず義務づけた京都議定書は、途上国を巻き込んだ自主的削減目標策定・提出プロセス導入を経て、国際社会が長期目標を設定したパリ協定へと発展した。第4次産業革命実現には、国家間の調整や共通基準の策定など、WEFのみでは解決が困難な課題も存在する。SDGsなどの枠組みと協調し、すべてのステークホルダによる持続的な社会システム構築と新技術開発・社会実装に向けたグローバルなガバナンス体制を構築することが必要である。そうすることで、21世紀の技術とマインドセットが21世紀の組織の下、第4次産業革命時代の新しい社会・産業システム実現の形で結実するであろう。

日立 総研

vol.13-2

2018年8月発行

発行人 白井 均

編集・発行 株式会社日立総合計画研究所

印刷 株式会社 日立ドキュメントソリューションズ

お問合せ先 株式会社日立総合計画研究所

東京都千代田区外神田一丁目18番13号

秋葉原ダイビル 〒101-8608

電話：03-4564-6700（代表）

e-mail：hri.pub.kb@hitachi.com

担当：主任研究員 宮崎 祐行

<http://www.hitachi-hri.com>

All Rights Reserved. Copyright© (株)日立総合計画研究所 2018（禁無断転載複写）
落丁本・乱丁本はお取り替えいたします。

日立 総研

www.hitachi-hri.com