

総合科学技術・イノベーション会議有識者議員懇談会

議事概要

日 時 令和元年10月31日(木) 10:00～11:07

場 所 中央合同庁舎第8号館 6階623会議室

出席者 上山議員、梶原議員、小谷議員、小林議員、篠原議員、松尾議員、
山極議員

(学識経験者)

祖父江愛知医科大学理事長、土井NICT監事、荒川東京大学特任教授、北
川大阪大学教授

(文部科学省)

渡邊課長

(JST)

古賀部長

(事務局)

須藤プログラム統括、別府内閣府審議官、松尾統括官、佐藤審議官、
高原審議官、柿田審議官、十時審議官、堀内審議官、坂本参事官、
河合参事官、大塚政策企画調査官

議題 ムーンショット国際シンポジウムに関する有識者プレゼンテーションについて

議事概要

午前10時00分 開会

上山議員 皆様、おはようございます。

定刻になりましたので、ただいまより総合科学技術・イノベーション会議有識者議員懇談会
を始めます。

本日は、橋本議員が御欠席でございます。

本日の議題は公開で行います。

議題は一つで、「ムーンショット国際シンポジウムに関する有識者プレゼンテーションにつ
いて」、これについて意見交換をさせていただければと思います。

本日は、国際シンポジウムの分科会のチェアを予定されている愛知医科大学の祖父江理事長、
情報通信研究機構(NICT)の土井監事、東京大学の荒川特任教授、北川教授にお越しいた

だいております。3つの分科会に関して、御説明と質疑でそれぞれ20分ずつ意見交換をさせていただきたいと考えております。

では、分科会2、神経系とその関係組織等生命メカニズムの完全理解による「心身共に成長し続ける人生の実現」のチェアであります祖父江理事長からまずお願いいたします。

よろしく申し上げます。

祖父江理事長（愛知医科大学） どうぞよろしくお願いいたします。

それでは、御説明申し上げます。

今、御紹介していただきましたように、第1ページにタイトルがございますが、神経系とその関係組織等生命メカニズムの完全理解による心身共に成長し続ける人生の実現というタイトルでございます。

2ページ目を見ていただきますと概要が出ておりますが、中身としては脳及び末梢神経系全体の神経回路網とそれに関連する組織、例えばそこに腸管、あるいはリンパ系と書いてありますが、それぞれについては非常によく調べられているんですが、その関係性についてまだ非常に未開拓である。これらを脳と一般臓器の網羅的なコネクトーム解析というような形で解析して、最終的な目的に達したいというのが目標でございます。その赤字で書いてございます、神経系とその関係組織から、代謝、免疫、睡眠等の生命メカニズムの解明の糸口を探り、生命現象理解のブレークスルーをもたらすというのがテーマでございます。

1ページめくっていただきまして、3ページ目は、25のイグザンプル項目と言いますが、そういうお題を頂いておりますが、そこに赤で書いてございます21番目の全神経回路網デジタルコピーモデル化、これは今の演題に近い題目でございますが、それに 、 、 が非常に近い領域にあるということで、これを統合できたらというふうに考えております。

4枚目のスライドでございますが、ヒトがヒトを理解するということでありまして、先ほど申し上げたように、臓器とか細胞という構成要素を理解するだけではなかなかヒトの全体像、個体というものを理解できないということがずっと言われてまいりまして、例えば免疫や代謝などの生命の主要な現象を理解するには、各臓器間の連携、どういう連携関係にあるのかということをも明らかにする必要があるわけでありまして。

その中でも、特に、脳・神経系とその関連の諸臓器の関係性の解明は非常に重要なポイントであります。ただ、従来は臓器、例えば心臓なら心臓、脳なら脳という非常にマクロの現象で関連をとらえていたということでございますが、最近になりまして、ICT技術、計測技術の進歩によりまして、神経とか細胞の単一のマッピング、単一細胞のマッピング、あるいは機能

解明が非常に進歩しているところがございます、そういう進歩に伴うべきお互いの連携、相関作用ということになりますと膨大な相関というふうになってまいりまして、その関係性はまだほとんど未解明でございます。

目標といたしましては、2050年までに今のような、下のカッコ内に書いてありますが、脳や臓器の網羅的コネクトーム解析、関係性の解析を通して、代謝、免疫、睡眠等の生命メカニズムを解明するということでございます。

次のページをめくっていただきますと、現在世界で動いている関連のビックプロジェクトを俯瞰して見ますと、1つは左側に書いてありますヒトの全細胞、細胞1個ずつカタログ化ということが、HUMAN CELL ATLASというプロジェクトで動いております。

それから、脳については、U.S. BRAIN Initiative、これはオバマ大統領の名前で始まったものでございますが、アメリカで行われております。

ヨーロッパでは、Europe Human Brain Projectというのが動いておりますし、日本はJapan Brain/MINDSというのが動いているわけでありまして。ちょっと簡単に説明しますと、次の6ページでございますが、HUMAN CELL ATLASというのは、今申し上げたように、ヒトの全細胞、1個ずつ種類、形態、状態、系統などを分類してカタログ化する。その地図、それから地図化していくと、トランスクリプトーム、細胞種、3次元位置、人種的な違いということをやります。日本からは理化学研究所が参加しております。

7ページをめくっていただきますと、U.S. BRAIN Initiativeでございます。これはヒトの脳の全ての脳回路網を網羅的に解析するということございまして、2014年から始まっておりますが、そこに費用が書いてありますが、日本円にしますと年530億円ということで、非常にビックプロジェクトでございます。

その次のページは、Europe Human Brain Projectでございますが、これはどちらかというと、脳研究の技術革新を狙ったものというふうに言ってもいいかと思えます。

その次の9ページでございますが、これはJapan Brain/MINDSの概略でありまして、これはBRAIN Initiativeとちょっと似ているんですが、日本版ということでもあるわけですが、脳の構造と機能を様々な階層でマッピングする。特に、霊長類のマーモセットを非常に大きなターゲットにしておりまして、最終的には回路解明ということでもあります。

次のスライドは、その中身を少し説明しておりますが、マクロレベルの回路です。これが例えばMRIとか遺伝子発現アトラスというものになりますし、ミクロのスパインとミクロコネクトームという解析、あるいは標準脳、ビッグデータ解析、疾患モデルマーマセットというものから最終的に脳全体の神経回路の構造、活動マップの完成というところまで持っていきたいということでございます。

11ページをめくっていただきますと、じゃあどういふふうにこれをやっていくのかというのがここから始まりますが、細胞間、大型国家プロジェクト、各組織の細胞レベルのマップ、あるいは機能の解明が進行しているわけです。ただ、脳と神経系と臓器間のネットワークがどのように機能して、それが関連しているのかというところがなかなか解明されていません。

しかも先ほど述べたように、ヒトを対象にしているということであるために、動物のような介入実験がなかなかできないということがございまして、矢印のクエスチョンが書いた図がございまして、Brainと右下は一般臓器、左側は末梢神経ということですが、それぞれの個別のHUMAN CELL ATLASに代表されますような細胞レベル、あるいはもっと細かいレベルの機能がどんどん解析されているわけですが、この相関というのがなかなか見えてこない、その下に書いてありますように、脳や臓器の構成要素の網羅的コネクトーム解析というのが今後非常に重要な領域として発展するだろうということでもあります。

臓器間連携の事例というのは、トピカルに幾つかの事例は既にございまして、非常にプリミティブな形で出ております。

例えば、次のページで、ストレス、痛みがストレスで出ますと、その回路が明らかにされておりまして、病気が非常に悪くなる。これは当然と言えば当然なんです。神経ガイダンス因子の中に、セマフォリンというのがございまして、これが免疫にも代謝系にもあるいは神経系にも影響しているということが分かってきております。

それから、次のページをめくっていただきますと、これは腸の炎症、腸の中にはたくさん細菌がいることは御存じだと思いますが、それが時に炎症を起こすわけですが、その炎症が何らか由来する何らかの毒素やタンパク質が脳に運ばれて、パーキンソン病を発症してくるということがだんだんエビデンスとして見えてきているわけでありまして。ですから、腸と脳、特にパーキンソン病のような神経変性疾患の発症に関わるということがだんだん分かってくるというような関連も見えてきているわけでありまして。

次のページですが、どういう形でこれを進めていくのかということですが、予算的に見ると、欧米のビックサイエンスプロジェクトよりはちょっと小ぶりでございまして、どこかに焦点

を当てて、かつ欧米に対抗できるような潮流を先取りするということが非常に大事でありまして、先ほど申し上げたような、脳と神経系、臓器間の相互作用を網羅的に解析して、そこから見えてくるものを取り出すということで、そこに時間系列でこういうものをやっていくというのは下に図が出ておりますが、デジタルモデル化ということが非常に重要だというふうに感じております。

次のページであります、どういう動物モデルで仕事をやっていくのかということでございますが、ヒトから線虫まで並べてございますが、今回、やはりヒトは省けないだろうと。先ほど、介入実験ができるという意味で、動物、特にマウス、ゼブラフィッシュ、線虫というものは非常に重要ではないかというふうに思っております。

次のページ、分科会の目標をどうアプローチしていくのかというイメージですが、グリーンのところを書いてありますが、生物学的アプローチと計算機のアプローチ、生物学的アプローチというのは、高度化した計測技術を駆使して生命現象に直接アタックするアプローチです。

計算機アプローチというのは、ビッグデータ解析をAI、シミュレーション等で行っていくということで、そのイメージ図が下に書いてございます。

最終的には先ほど来申し上げている脳や臓器の構成要素の網羅的コネクトーム解析ということになります。生物学的アプローチの事例というのは、若干の例がございまして、次のページを見ていただきますと、神経のスパインというのがありますが、それが生体との相互作用で非常に変わってくるとか。それを計測できるとか。それから、脳の中のタンパク質の播種状況を計測できるとか、ミクログリアの状態を計測して、腸内細菌との関係を見たとか。リンパ管のシステムも細菌非常に見えるようになってきたということがあります。

次のページは、新しいイメージング理論の開発。あるいは新規のレーザー技術、非線形工学素子とか高感度検出器の開発ということが次のアプローチの重要な生物学的なツールになると思います。

機能プローブの開発、組織透明化技術というものも非常に重要なものになると思いますが、この下を書いてある国内企業、我が国で非常に力があるというのは下の3つぐらいが非常に力があると思います。

次の19ページを見ていただきますと、それに対して計算機のアプローチというのは、先ほど申し上げましたように、非常にたくさんのデータを収集して、それをAI等を使って、計算機的にアプローチしていくというアプローチでございます。例えば、先ほど来、申しておりますヒトの構成する細胞は従来400種類ぐらいだと言われてきましたが、それがどんどん増え

てきて、今は数千種類以上あるというふうに言われておりますので、そういうものをビッグデータと考えて、お互いの特徴をつなぐ関係性をAI的なアプローチをしていくという、いわゆるデータドリブン型のアプローチであります。最近ではこれが非常に生物学の中では重要な方向になってきております。

次、これは論文数で、脳神経回路の関連の論文数の傾向を見てみますと、脳神経回路、先ほど、BRAIN Initiativeはアメリカでどんどん行われているということをおし上げましたけれども、アメリカはやはりダントツであります。実は日本は蓄積の上では第2位です。ただ最近このブルーの中国が非常に伸びてきているということでございます。

次のスライド、21番目でございます。

これは国内外の研究開発の状況を御説明した、ちょっと複雑な図で申し訳ございませんが、左側の国、地域ということで、日本、米国、欧州というところを見ていただいて、フェーズというところ、基礎研究のところを見ていただきますと、関連領域がここにずっと並んでおりまして、が、非常に人材とかポテンシャル、蓄積、それから今後の展望があるということを示しておりますが、日本はが4つでございます。欧州も実は4つです。米国は全てがでございます。世界の中で、日本はそのうちの1極に当たるだろうということでありまして、今、これをやっていく、非常にいいビックチャンスではないかということでございます。

それから、最後のスライドでございますが、これはまとめでございます。先ほど来申し上げているように、目標のイメージとしては2050年までにとありますが、段階的にこれをしていくわけですが、脳や臓器の構成要素の網羅的コネクトーム解析というふうに集約できるのではないかと思います。それを一つは先ほど来申し上げている生物学的アプローチ、それからもう一つは計算機的使用をしまして、その下に書いてあるような、多角的、網羅的測定、あるいは要素間の関連性、複数生物種での検討というような、縦系、横系型で攻略していこうということでございます。

全体としてはビッグデータのデータドリブン型のアプローチがいいのではないかと考えているところでございます。

御清聴ありがとうございました。

上山議員 ありがとうございます。

では、ただいまの御説明に対して、御質問、御意見等がございましたら、いかがでしょうか。

篠原議員 どうもありがとうございます。ヒトそのものを完全に理解するというのは非常に大きな目標で素晴らしいと思います。これを国民の方々に説明するに当たって、「理解する」

とだけ言ってしまうと、取り組んでいる方々のためにあるのだろう、という話になるじゃないですか。そうではなくて、それを理解したことによって、2050年という非常に長いスパンですけれども、マイルストーン的に例えば何年後ぐらいにはこんなことにつながりそうだとか、そういうストーリーを今の段階でお話しただけなのでしょうか。

祖父江理事長（愛知医科大学） その辺が実は分科会の中で議論して詰めたいと思っているところですが、最終のアウトカムとしては先ほど来、触れておりますが、やはりこういう今までは脳なら脳、一般臓器なら一般臓器という形で攻めてきたものが、要素的にもっと細かく分かってきたというものをつなぐということをどんどんやっていくと、これは生体の病気に対する抵抗力とか、病気に行きやすい傾向とか、そういうことが恐らく分かってくるだろうというようにも考えられます。例えば脳のどこかで神経細胞が活動が上昇してくるとどの臓器のどの部分に影響を及ぼすのかということが例えばビジュアルに見えたりすると良いと思います。これは医療的にも非常に重要。病気を攻めていく上でも非常に重要な方向であり、重要な出口として位置付けられる。ただ、どういうものが本当に出てくるかは、データドリブン型のアプローチでは、恐らくいろいろなものが出てくるのではないかと思います。それは疾患の解決にもなるし、老化の理解にもなるし、それから老化の予防にもなるし、それから睡眠とかそういう生理的なものの理解も大変進むだろうと思います。一般国民、あるいは市民の皆様に対するアピールという点では、私は非常に大きいのではないかと思います。

篠原議員 これから分科会の議論になるとは思いますけれども、やはり30年かかるとなったときに、頂上に向かってどう歩いていくか、その歩き方によって、一般の方々に言える中身も違ってきますよね。ですから、バランスよく登る道筋を考えて議論いただけたらと思います。

祖父江理事長（愛知医科大学） ありがとうございます。非常に貴重な御指摘どうもありがとうございます。

篠原議員 あともう1点、新規のレーザー技術というお話がございました。荒川先生の御専門かもしれませんが、量子センサーが使えるのではないかと思ったのですけれども、その辺を視野に入れて考えていらっしゃるのでしょうか。

祖父江理事長（愛知医科大学） 測定技術ということがデータ基盤を作るという点で重要なテーマでございます。この中でどの測定技術を取り入れていくかという点ですが、特に生物学的アプローチというところは、測定技術が威力を発揮する領域だと思っておりまして、今先生が御指摘になりましたようなレーザー技術、非線形光学素子みたいなものも十分視野に入れてやっていきたいと考えているところでございます。

ご指摘の量子コンピューターなども、実用化の進展に伴って、将来使っていければ、大きな進展になるのではないかと考えております。

松尾議員 大変素晴らしいプレゼンでしたけれども、ちょっと1点お伺いしたいのは、この計算機的方法、これは非常に興味があるんですけども、これ1個1個の細胞を、例えば情報をとっていくと言うと、細胞はいろいろな働き、いろいろなものをつくっていて、遺伝子にしても膨大にある。

そうすると、1個、1個の細胞の出す情報というのは、多分膨大にあって、それを37兆個の細胞それぞれでやっていく。そういうところからビッグデータをとって、それで臓器間を調べるといって、かなり壮大なものですが、この分野は既に、ATLASということで世界的にやっていて、利権が絡んでいるということで、お聞きしたいことは我が国がこれをしていく競争力というか、あとは国際的な連携、この点、この2つはどういうふうにお考えなのか、ちょっと簡潔にお願いします。

祖父江理事長（愛知医科大学） 先ほどHUMAN CELL ATLASのお話をしましたように、臓器別に、脳なら脳の中の局所的な、例えば神経細胞、あるいはグリアについてカタログづくりをやっている。例えば、腎臓なら腎臓のセルのカタログづくりをやっているというところが、恐らくまだ相当時間がかかると思います。我々そのようなカタログ的なものとは別に、例えばここに炎症が起こったときに、脳はどういう反応をするのかと。そういう関連性を検討するという点で、現時点では一定のアドバンテージがあると思います。先ほども申し上げましたように、我が国には、一定の競争力は備わっているのではと考えております。

先生がおっしゃったように、個々の細胞は、スタティックな状態だけでなく、機能的な状態によっても1個の臓器細胞も色々変化すると考えられるので、膨大なデータ量になると思います。一方で、我々は、動物モデルなどで何かインターベンションを入れたときに、それがどう例えばほかの臓器との関連が出るのかというようなことを明らかにするという点を一つのターゲットにしていきたいと思っております。

スタティックな網羅的なものと、何か刺激が入ったときの反応性というものと、両方のターゲットがあるんじゃないかなと思っています。

松尾議員 これは生物学的な研究のところではまだアドバンテージがあるということで、よく日本が負けてしまうのがシステムのところで負けしまうので、それは是非よろしく願いたします。

祖父江理事長（愛知医科大学） それは是非心して進めたいと思います、ありがとうございます

ます。

小谷議員 ほとんど同じような趣旨で、違う言い方になるのですけれども、ここで言われている相互作用というのは、相関を見られるのか応答を見られるのか、それともメカニズムと言われているので、機構の因果というか機構解明まで言われているのかということをお聞かせください。また、今、松尾先生が言われたように、実際に網羅的にコネクト解析をやるのは大変だと思えますけれども、応答を制御して治療につなげるというようなことは既にやられていることも多いので、短い期間のターゲットとしてそのようなことも考えられるのか教えてください。

祖父江理事長（愛知医科大学） 今、先生が3つ出されましたが、できればそれを包括したいというふうに思っております。先ほどもちょっと申し上げましたけれども、スタティックなエレメント間のコネクトームと、それからダイナミックな動き、何かの例えば外界に対する反応に対してのダイナミックな動き、恐らく両方必要だろうというふうに思っております、この辺の考え方で動くというのは非常に時間はかかりますけれども、まだ世界が手をつけていない領域ですので、それを持続的にやって、世界をいつもリードできるというところに持っていくかなと。

小谷議員 恐らく時間の問題というよりはデータが膨大になるので、数理的な手法が必要だというふうに思っています。

祖父江理事長（愛知医科大学） ありがとうございます。数理的なモデル開発という点も大きな柱になるかと思えます

上山議員 ありがとうございました。

ちょっと時間がございませんので、この分科会についてはここまでとさせていただきます。

続きまして、分科会1の人の持つ能力の向上・拡張等による「誰もが夢を追求できる社会の実現」のチェアであります土井先生からよろしく願います。

土井監事（NICT） 今、御紹介いただいたように、「誰もが夢を追求できる社会の実現」というのが、本分科会のテーマになっております。

お聞きいただきまして、2ページ目に概要が記されておりますけれども、年齢、文化、身体能力、時間、距離等の制約を超えて社会参画を可能とするということが急務であります。そのために身体機能を拡張、補完、代替するシステムを実現するということが書かれております。

実際には、別にあります分科会3のところの開発されるようなロボットも使いますし、コンピューターとか生体と融合したサイボーグということはどうするかという話とか、脳が人間の

体の制御をしておりますので、そのブレイン・マシン・インターフェース、あるいは人間からの五感のフィードバックとかフィードフォワードをどうするか。それらを実現するために、大量の情報をリアルタイムに伝送しないといけませんので、ビヨンド5Gとされているようなそういう通信の技術ということもあわせてシステムとしてどういうものを実現するかというところを議論する必要があると考えております。

おめくりいただきまして、3ページ目ですが、25のミッション目標の中で、本分科会が位置しているところは下の方の、誰もが夢を追求できる社会のところにあります、サイボーグ化技術、移動の完全ユビキタス化、全ての人がアバター使用ということと、年齢に関わるところがありますので、100歳まで健康不安なく人生を楽しめる社会のどこでも医療アクセスという、この4つの目標例が関連しております。

それを具体的にどういうふう目標をつくるのかというところが、4ページ目に記しております。人間の能力を拡張するというところにどういうふう臨むかということと考えますと、サイボーグという技術は何をするかと言いますと、身体的な制約から自由になるということを目指しております。なので、1つ目としては身体制約からの解放というのを挙げております。そこにはSensor Augmentation and Robotics Attachment、Exo-Skeletonと呼ばれているような、ウェアラティブ的なロボット技術というのがありますし、またBio-mechanical Cyborgということで、身体内から細胞をつくるという、そういう技術もあるかと思えます。これは結構遠い話になるかもしれません。

あともう一つは、その身体を制御するというところにもやはり課題があります。なので、その脳の制約からの解放ということも重要であると考えています。BMIはその一つとして脳からの情報、いろいろな指令を取り出すということが可能ですけれども、もう一つは、先ほどもストレスの話がありましたけれども、やはりストレスに強い人間というのも、これから非常に重要なことと思っております。

今、機械翻訳、音声翻訳などで言語間のトランスレーションができるようになっていますが、コンセプトが本当に伝達されているかというところはまだ未解明のところがありますが、脳の情報から入力されている映像で、どのような言語化がされているか、名詞とか形容詞を取り出すような技術もできておりますので、そういう技術を使うコンセプトエスケンジというものもあると思えます。

先ほども睡眠について触れられましたけれども、睡眠を価値あるものにしたいということで、

考えて言いますと、睡眠自身の質をよくするとか、あるいは無意識下で、どうやって学習ができるかというようなことも考えていくということが脳の制約からの解放になるかと思います。

もう一つが、アバターに代表される場所の先ほどのモビリティの話ですけれども、時間と空間の制約からの解放が挙げられます。アバターがその1例であります。自動化した技術を遠隔で使うとか、そこにミックスして人間も完全自動でできないところは、人間が遠隔からサポートするというアバターもあります。あるいは、BMIで直接、ロボットとか自動化されたいろいろなデバイスを制御するというのもありますが、そのときにBMIだけでは全てのいろいろな情報が伝わっていかないので、Human Behavior recognitionを使って、人間の意思の伝達を図っていき、Telexistenceを実現するというのが挙げられます。

この3つの身体の時空間からの解放というのが最終的にAugmented Human Competenceを実現するというふうにイメージしております。

そのときに技術ですが、おめくりいただきまして、5ページです。これはロボティクスのところですが、私たちの分科会はロボット自身を開発するというものではなく、その上の方に書いてありますが、実際に行けないような場所にロボットがいて、それを遠隔からやるということで、遠隔化、擬態化というのがあります。あとサイボーグとして身体を補強するということでは、例えば今分科会のメンバーである、稲見先生がやっていたらっしゃるような第3の手というような身体的に本当に拡張するというものがあります。これらが身体制約からの解放につながると思っております。

また、そのロボットを操作デバイスとして駆使するというのがあのアバターの技術として時空間からの解放につながるというふうに考えております。

一方、おめくりいただきまして、6ページですけれども、こちらにはAugmented Humanの関連の海外の動向が書かれております。実際に国際会議としては、Augmented Human International Conferenceというのがあります。こちらでは日本の研究者が多くの発表をし、またチェアなど重要な位置を占めております。

北米では、軍主導でこういうAugmented Humanの技術が開発されましたけれども、今はExo-Skeleton的なものとかで、結構スタートアップが多く出ています。Ekso Bionicsであるとか、SARCOS Roboticsとか、そういうところがこういう技術をやっております。欧州では、補綴工学ということで、義肢とかそ

う研究が盛んなんですが、Cybathlonということで、スイスのETHの教授が始めた義肢とか義手を使ったスポーツの大会などというも行われております。アジアでも同様にAugmented Humanに関する研究が行われております。

次のページには、Brainの関連ですけれども、先ほどありましたBrain InitiativeとかEUのHuman Brainプロジェクトとかありますけれども、ここでちょっとBrainとは違うのですけれども、スマートシティであります米国のUS Igniteが掲げてあります。なぜこれを掲げているかと言いますと、先ほど申し上げましたように、遠隔でロボットとかいろいろなものを制御しようとする、伝送の技術が非常に重要になりますが、そういうところは今はスマートシティという中で行われていて、人間が制御していくというところでの観点での研究開発はまだ行われておりません。

8ページに、2050年の未来社会像を掲げております。Symbiotic Diversity Societyと呼んでおりますが、ここではいわゆるクラウドの上にはいろいろな身体を持った、いろいろな人たちというか、その生物、人工的なものもありますし、人間とか動物とか植物もあるというようなことをイメージしている、非常に多様な個性のある人たち、ロボットなどが連携して、一つのシステムをつくり上げて、いろいろなビジネス、あるいはワークスタイルを提供するということが重要ではないかというふうに考えております。

メンバーの1人のソニーの北野さんがこのイメージを海外で話すときには、攻殻機動隊を例に挙げると、あちらの若手研究者は是非、是非日本でそういう研究をやるんだったら、自分たちは行きたい、と言われるそうですが、攻殻機動隊は確かにサイボーグのイメージとしては若手にものすごく受けるんですが、ちょっとここで考えているSymbiotic Diversity Societyと違うのは、攻殻機動隊は戦うためのサイボーグ化で、なのでちょっとディストピアなので、ここではユートピアの攻殻機動隊として、こういうSymbiotic Diversity Societyというのを、是非それを日本から発信したいというふうに思っております。

そのときに、一つは先ほども御質問がありましたけれども、それは一体どういうところに結実するのかというのはやはりムーンショットとしては、ロケットを使って、月に着陸する、月に着陸するという具体的な出口があったわけなんです、こちらではこの中では、例えばHyper Olympic、先ほどCybathlonなど挙げましたけれども、今はまだオリンピック、パラリンピックということでそれぞれ分かれて協議をしていますけれども、でも2050年の世界はそれに関係なく、みんなが一緒になって協議ができる、あるいは一人ずつの

協議ではなく、ロボットも合わせてチームで協議をするという、そういう世界がやはり求めている世界なのかなということで、一つはHyper Olympicを出口として挙げたいと思います。

あともう一つが、Hyper Olympicの方はどちらかというと身体の制約からの解放というところの出口の一つですが、もう一つが時空間制約からの解放の出口として、ここにTele International Farmingを挙げています。国際的に例えば日本のすいかがおいしいから、ドバイでつくってくださいという要求が来ても、なかなかドバイまで行って、あの暑い中でお酒も飲めないような場所で、畑づくりをやりたくないということで日本が行かないと、韓国が行っちゃってつくっているという話があるのですが、それをそうではなく、日本にいてもあちらでロボットとか自動トラクターとかいろいろなものを駆使して、Telexistenceで農業ができる。それで日本の精密農業を海外で展開できるということのを是非アバターの技術、Telexistenceの技術を使って実現できないかということを考えております。

なので、この辺りのところ、本当にニーズがあるのかということでは、12月のシンポジウムのときに、少し海外の方にも来ていただけないかということで、分科会のメンバーでは話し合っております。

9ページ目が、本当にムーンショットでいくのに、どういう技術があるのか、やらなければいけない技術はたくさんございます。そういう意味では、分科会2、3とも関わるところがありますので、2050年までのところではこういうものがいろいろ絡み合って、最終的にAugmented Human Competenceを実現したいと思っております。

一方で、10ページですが、実際に12月18日に何をディスカッションするかということで、本当にこのゴールイメージでいいかということで、身体、ブレイン、時空間の制約からの解放というのを挙げていますけれども、これだけで本当にいいのかということの議論もしたいと思います。

また、ムーンショットのプログラムが世の中にどうインパクトを与えるかということで考えていくと、Symbiotic Diversity Society、ユートピアとしての攻殻機動隊というこのイメージがいいのか。それを実際に具現化するものとして、Hyper Olympic Tele International Farmingということで、ほかにもあるのか、分科会のメンバーからは是非ブレインからの解放ということでは、Well-beingのもう少し何か例がないかということのお話を頂いてはいるのですが、介護とか

そういうところを取り上げるとなかなか5年間とかいうところで明確な成果を出していくところが難しいので、少しその辺りでいいテーマがあるのかということも議論していただければと思います。

International Farmingのところでは、International Cooperationが重要ですので、その辺りのSocial Issuesとか、あと実際にこれを使いますと、今まで就業できなかった方も就業できるようになるわけです。そういう意味ではワークスタイルが随分変わってくると思います。そういうワークスタイルが変わっていくところに日本のレギュレーションも合わせていくということも重要なので、是非こういうところを取り上げて、こういう問題は、Social Issuesのところは、この分科会だけではなく、このムーンショット全体のところでも是非省庁横断で議論していただければ有り難いというふうに思っています。

以上です。

上山議員 ありがとうございます。

早速、御質問等を頂きたいと思います。

山極議員 義肢装具国際学会というのが開かれまして、神戸で、日本学術会議が主催しましたから行ってきたんですけど、大変賑わっていました。160のブースが出て、義肢装具の科学技術を駆使した製品が並んでいて、ドイツなんかは数百万円もするような義肢があったり、これは既にビジネス化しています。

お聞きしたいのは、これはAugmented Human Competenceで人間の能力をはるかに上げるような話に持っていくのか、義肢装具の場合には、障がい者の方々が普通の能力を発揮できるように、普通の能力まで行く、あるいはちょっと超えるぐらいあるかもしれない。でも、Augmentedはかなり能力を上げてということになると、例えばHyper Olympicでは、そういう義肢装具をつけた人の方がはるかに能力が高いということになります。どういう方向を目指すのか、つまりこれはエシックスの問題にも関わると思うんだけど、これからやはり人間の能力をアップグレードするような装具、あるいはアバターというものを考えていくのか、その辺りかなり重要な話になってくると思いますが、どの辺りを考えていらっしゃるのか。

土井監事(NICT) 個人的な見解では、後者を目指したいと思っております。なぜかと申しますと、今、私たちコンピューター、IoTという技術を使って、今まで人間ができなかったような速さで情報をやり取りできています。ある意味では、これもAugmentati

onなわけなので、そういう意味では情報系の人間としては、ロボット、あるいはサイボーグとかそういうものを駆使して、どこまで能力を上げていけるかというところは、突き詰めていきたいと思っています。

ただ、それをやるところで、実際にエシックスとして問題があるということなので、逆にこういうものをムーンショットで先取りをして、もちろん世の中のアラウアンス、本当に受容性があるかとか、そのために法律を変えなければいけないものがあるのか、そういうことを逆に探るということが重要で、今まで日本はどちらかという、ちょっと申し訳ないですが、海外がやったから日本もついていきますというやり方だったので、それでいつも要素技術、基礎技術は持っているのに、システム化が後れたと、いつもそういうふうに批判を受けていますが、ムーンショットがそうではなく、もうリスクは覚悟して進めていく、それをやることによっていろいろな問題を提起して解決していくという、そういう位置付けにするというふうに考えています。これはあくまで私個人の考えです。

上山議員 梶原さん、それから小林さん。

梶原議員 ボディ、ブレイン、スペースやタイムのリミテーション3点の解放とおっしゃっている中で、ブレインの解放は、人らしさや人の個性などに対する考え方が大分変わってくるようなイメージもあります。Concrete R&D Imagesのところは、具体的に何をすることがまだ決まっていないというお話でしたが、ブレインの制約解放というところはかなりセンシティブだなと思いました。それを社会や世の中にどうやっていくのか。日本はより一層そういったことに対してセンシティブな文化だと思っています。その点について、今、どのようにお考えになっているのかをお聞きしたいです。

土井監事（NICT） 御指摘のとおりだと思います。非常にセンサティブではあります。ですが、5年間で本当にそこまで行くかというのは、まだまだ、そういう意味ではサイエンスとして突き詰めないといけないところもありますし、脳のネットワークが分かって、それをどういうふうに刺激すればいいか、医学的には介入という話になるかもしれませんが、そういうところもできるようになるかもしれないというところまでが、多分5年間ぐらいでできるころなので、本当にその後にそれが、逆にどういう、デメリットも生じるかということもそこをやりながら考えていくということも重要なんじゃないかと思います。やはりこちらもそういう意味では、環境が変わると人間も変わっていくので、そういう影響が脳にもどう及ぶかとか、例えば今まで歩けなかった方が歩けるようにいろいろなサイボーグというか、そちらの方でなったときに、脳がどう変わるかとか、そういうこともきちんと見ていくということも重要であ

るというふうに思っております。よろしくお願いいたします。

小林議員 この分科会1で、そもそも何を議論して、何を決めるのかというのがポイントだと思います。個々のテクノロジーまで入り込んでしまうと、様々な方向の個別論に拡散してしまうので、恐らくフィロソフィーというかエシックスというか、その辺が議論の基本になるべきだと思います。例えば先ほどのお話のように、Hyper Olympicに照準を合わせて、これに向けたAugmentationとはそもそも何なのかとか、そういうかなり絞った議論をされるのでしょうか。しかしながら、データイズムというものが下手をすると社会をディストピアにしかねない中で、そもそも我々が目指すべきユートピアが何か分からない限り、研究テーマも分からないのではないかと僕は思うんですけれども、そのあたりはいかがですか。

土井監事（NICT） すごく哲学的な難しい御質問を頂いたのですが、哲学的な後者に関しては、ムーンショットの中で、エシックスとか、そういうイシューズの中で常に考えていかなければいけない問題であるとは思っています。

一方で、ディストピアにならないために、Hyper Olympicであるとか、International Farmingというのを挙げさせていただきました。やはりオリンピックというのは人間の身体をもうとにかく極めていく、Augmentationするということですとずっと続いてきているので、やはりそこでどこまでできるのかというのを試すための場が用意されているんだと思うので、そういうことを活用していくということで、それが一つだと思います。

Farmingの方も全部自動で動かしてやるんだったら、人間は何もする必要はないですが、やはり非常に細かく人間じゃないとできないところとオートノマスにできるところの分業というのがあります。それを5Gとかビヨンド5Gを使ってどうやってやっていくのか。本当にインターナショナルにやって、それで日本の農業技術を海外に展開できるのかというのを、どちらかという、ビジネス的にそういうことを考えると最終的には地方活性ということで、首都圏とか都心、そういうところに出てこなくても地方でもビジネスが成立するわけなので、そういうところで、高めていければいいなというふうに思っております。

上山議員 ありがとうございます。

では、次の分科会6に行きたいと思えます。

「量子現象等の活用による未踏領域の創出」のチェアであります荒川特任教授、北川教授、お願いします。

荒川特任教授（東京大学） 主査を務めております東京大学の荒川でございます。どうぞよ

ろしくお願いいたします。

今、御紹介していただきましたように、「量子現象等の活用による未踏領域の創出」というのが分科会6のタイトルでございます。

次のページをおめくりいただきまして、これが1ページ目になります。ビジョナリー会議で、25のミッションが出されておりますが、私どもの分科会は、2050年をターゲットとしております22の汎用型量子コンピューターネットワーク、こちらに関わる議論をしていくというものでございます。

次のページをおめくりいただきまして、2ページ目として、分科会の概要について、確認をさせていただきたいと思えます。御承知のように、量子技術は産業等、安全保障も含めて飛躍的に発展させる可能性を持つ重要技術であるということが十分認識されているわけでございます。

それを受けて、本分科会では次世代の情報処理、通信の基盤となり得るネットワーク型量子コンピューターの実現に必要な量子技術を特定し、ムーンショットとしての目標を検討することが使命となっております。

3ページをおめくりいただきまして、これは量子コンピューター、研究開発に取り組む背景でございます。御承知のように、ムーアの法則の限界、あるいは爆発的に増える情報量ということで、既存技術が抱える課題が多々あります。

この課題を克服する技術として、量子コンピューターに対する期待が高まっております。また、我が国としても野心的目標をこのムーンショットを通じて、世界に先駆けて掲げ、産学官の力を結集して取り組むことが求められます。

御承知のように、量子コンピューターというのは、簡単に申せば、量子ビットの重ね合わせ状態を活用した高速並列計算であり、また大規模データを扱えるというものでございます。

御承知のように、グーグルがこの1、2週間前に、『nature』で成果を発表しております。社会に対して大きなインパクトを与えております。

ただこれで量子コンピューターが実現できるのかといいますと、そうではありません。現在開発中の量子コンピューターというのは、いわゆる誤り訂正ができない、誤り耐性を持たないため、現在の汎用計算機のような信頼性はないということになるわけでございます。

誤り耐性の汎用量子コンピューターの実用化には、後で北川先生からチャートをお示ししますが、ちょうどこれから30年程度の時間を要することが、これまでのトレンドを外挿していきますと見込まれます。大変長い期間ではありますが、誤り耐性の汎用量子コンピューターの

実現は、ムーンショットの目標として適切であり、長期的観点から研究開発を進めるべき目標と考えられます。

次の4ページ目をおめくりいただきまして、この量子コンピューターは、様々な用途・応用に役に立つわけでございます。創薬、気象、金融、輸送、エネルギー、材料開発、これら諸々に役立つであろうということが期待されています。これらがムーンショットが目指す社会未来像に合致することは申し上げるまでもありません。

そういうことで、量子コンピューターの実現によりまして、現在の多様な社会問題を解決しまして、将来の産業競争力強化につながることを期待できるのではないかと考えております。

次の5ページ目をちょっと飛ばしていただいて、6ページに若干触れます。この後、北川先生に交代させていただきたいと思います。

6ページ目を御覧いただきたいと思います。

ムーンショット目標としてのイメージでございますが、私どもとしては、誤り耐性型汎用量子コンピューターの開発を山の頂上としております。先ほど申し上げましたように、2050年はちょうどいい時期です。さらに、この頂上に向けて、分散型の量子コンピューターの開発、量子誤り訂正の実現などが5合目ぐらいにあるかと思っております。

図には、これらの下に、これから5年間、あるいは10年間、開発すべき研究開発の具体例を書かせていただいております。ここから北川先生に交代をして、説明を続けさせていただきたいと思っております。

北川教授（大阪大学） 大阪大学の北川です。

それでは、まず5ページ目に戻らせていただきまして、現在、グーグルやIBMが59ビットぐらいの量子コンピューターというのを実際につくってございまして、インターネットで公開などして使うことができるようになっております。ちょうど2週間前に、グーグルがここに大きく書いてありますが、量子超越というのを達成したということを『nature』で発表しました。

これは、最後の方でもう一回説明しますが、一応スパコンでできないことが量子コンピューターで初めてできましたということです。それは必ずしも役に立つかどうかは別にしまして、とにかくスパコンで届かないところに届いたということでもあります。

ところが、現在の量子コンピューターは、昔で言いますと、ちょうど真空管でコンピューターができたころの当時のようなもので、非常にノイズとか欠陥が多くて、大きくしていく必要はあるんですけれども、大きくしていても計算が長く続かないという問題があります。

今、10⁹ビットぐらいから更に10⁶乗9ビットぐらいまで、キュービットを増やしながらか更にエラーを下げていって、かつ誤り訂正というのを組み込んで、どんどん誤り訂正を繰り返していきますと、ついに誤りなく計算が持続できるという、そういうスレッシュホールドがあります。それを達成するというのが次の目標であります誤り耐性量子コンピューターです。

それには一つの計算単位である論理キュービットを最低でも1万で守るとか、100万で守るとかそういうことが必要になってきます。

6ページのところで、30年後の誤り耐性汎用量子コンピューターというのを目標といたしますと、それに一番最初の下のところ3つ書いてありますけれども真ん中に書いてあるのが、その量子コンピューターの現在我が国でも取り組んでいるハードウェアです。超伝導とイオンと光量子があります。それに対しまして、これに誤り耐性を持たせるために、そのための理論、アーキテクチャ、ソフトウェア、そういう研究が右側に必要なものです。

そして、その誤り耐性、誤り訂正というのは、実は日本が割と得意としています量子通信の中継、量子中継の技術と非常に共通するものがあります。共通する原理というのがありますので、ここをあわせてやっていくことによって、分散型の量子コンピューターをつかって、そこで誤り訂正を実現して、最終的に誤り耐性を持たせようと、そういうのが一つのイメージでございます。

7ページを見ていただきまして、これは開発研究の例ですけれども、量子ハードウェアとしては、これは日本の東大、理研、中村先生が最初に始めた超伝導量子コンピューター。今、メインの柱です。

その前から、実は有力だと言われていましたイオントラップの量子コンピューター、これも日本でやっておりまして、日本はイオントラップの量子コンピューターの複数、光で結合するということに非常に世界的に見ても一番いい技術を持っています。

右側は、東大の古澤先生が考案されて、なおかつ研究されています光量子コンピューターというものでありまして、これはX a n a d uという海外のベンチャーなどもこれを集積化するような開発を行っております。

その次が量子ネットワークで、割と日本が得意としている、将来のインターネットの中核となるような技術、量子中継の技術などを研究します。下が理論とソフトウェアでありまして、誤り訂正の理論、誤り耐性を持たせる理論とか、機械学習とかで、そういうものを使ってこの部分を解決していこうということでもあります。

この量子コンピューター、誤り耐性の概念は余りなかったのでありますが、量子コンピューター

ター自体の研究は1990年代の後半から始まっておりますので、既に量子コンピューターの次の8ページ、頂上を目指したところで、アポロ計画でいう、周辺波及技術、スピアウトするようなものが出てきていますので、そういうものもムーンショットで取り組んで、社会に還元していこうということを考えております。

次の9、10、11ページは、これは量子技術イノベーション中間整理に書かれているもので、ちょっと省略させていただきます。

下に書かれているところで、先ほど言いましたように、超伝導とかイオントラップ、光、量子で日本が少しエッジを持っているということを書いております。

そして12ページは、各国、相当な研究開発のリソースをここに入れているということを示しています。

飛ばしまして、14ページですけれども、これが2週間前に発表されたものですが、グーグルが達成した量子超越性というものですけれども、時間がないので簡単に説明しますと、超伝導でグーグルがつくった量子コンピューター上で、ランダムな回路を生成して、その出力を出します。それをスパコンでそれと同じことをやったらどうなるかということ、グーグルの最初の試算だと、量子コンピューターで200秒だったのが、スパコンで1万年かかる。すぐIBMが反論して、これは2.5日でできると言ったんですが、それにしても200秒と2.5日という相当な差があります。これは量子コンピューターが得意な問題について優越性を示しただけで、必ずしも役に立つ問題ではないですけれども、一つ、スパコンを超える部分があったということは非常にこの分野を活気付けております。

この論文では、中村先生の論文がファインマン等に次いで3番目に引用されておりますし、この論文の査読者は米国のアロンソン、オリバーという非常に有名な先生と、それと日本の藤井先生ということで、この分野で相当日本は食い込んでいるということを示すことになっていると思います。

荒川先生、よろしく申し上げます。

荒川特任教授（東京大学） 以上が技術の説明でございますが、最後に、分科会における議論の内容について御紹介したいと思います。実はこの分科会が開催される12月18日、実は16日から開始している京都で日米欧の共同による量子技術に関する国際会議と重なっております。つまり、ちょうど各国からこの分野の研究者が集まってからきておりまして、12月18日に分科会を開催することは、大変タイミングとしてよいのではないかと考えております。

ここでは、2050年のムーンショット目標案を議論するわけですが、もちろん国際的に共

有、共鳴できる目標設定することを目指したいと思います。先ほど申し上げた耐性型汎用量子コンピューターは、日米欧が共有できる目標になっているかと思っております。

目標達成時に、実現が期待されるとき社会像の明確化も議論をさせていただきたいと思っております。倫理的な課題も含むかと思いますが、できるだけポジティブに考えていきたいと思っております。

また、具体的にロードマップとマイルストーンの設定についても議論を行います。もちろん、頂上は2050年でありませぬけれども、この5年、10年でどのような技術を達成していくか、あるいはどう開発していくかについて、国際的観点から議論していきたいと考えております。

以上でございます。

上山議員 ありがとうございます。

では、御質問、御意見等はいかがでしょう。

篠原議員 ワールドワイドに連携して、これをやっていくというお話だとしたら、非常に分かるのですけれども、一方で、日本としての強みをどこに持っていくか、お話いただいた内容の全てを日本が手がけるとするのは多分資金面から難しいのではないかと思います。これを運営していく中で、特にこの部分を日本が絶対に守るんだ、というのはもう見えているのでしょうか。

北川教授（大阪大学） まずハードウェアの部分で、今、3つメインなものを抱えていますけれども、光量子コンピューター、古澤先生は日本オリジナルのアイデアで、逆に世界が追随しているようなところですので、これはトップを走れると考えております。あとイオントラップ量子コンピューターについては、イオントラップというのは無限にたくさんイオンを入れることはできないので、例えば50個とか100個とかたまたまたくさん並べてそれを結合するというところで、その結合するところの技術というのは日本が割と強いです。

それで、最終的に量子コンピューターは、超伝導にしてもすごい大きな量子コンピューターを1個つくってというよりも、今は普通のコンピューターも系列計算、たくさんネットワークでつないでやっておりますけれども、多分量子コンピューターもそういう形になるということを考えていまして、日本の強みのある量子通信技術、量子中継、並列型、分散型のところのアーキテクチャで誤り耐性を持たせるというところが多分理論的にも日本の技術としてもオリジナリティを発揮できる部分ではないかと考えております。

篠原議員 北川先生に怒られるかもしれませんが、非常に極端な言い方をすると、八

ードウェアについてはビット数を増やしていくというのは資金の勝負でもあると思います。それを日本でできるのかということを冷静に考えたときに、根元の技術を日本がしっかり持って、製品化の部分の逆にやめて、根元を持っているから勝てるというロジックはあり得ないですか。

北川教授（大阪大学） 量子ビットを増やしていくというのは、超伝導では日本が最初に始めたんですけども、今はグーグルとかIBMの方が増えています。確かにそこはリソースの入れ方というのは非常に効いてくると思います。

ところが、ここの誤り耐性に行くためには、誤り耐性を持たせるために、誤り訂正をやるというアーキテクチャとか、いろいろな理論的アプローチとかアイデアが必要です。その部分はまだギャップがありまして、これをやれば絶対にできるという、力技でリソースを入れていけばいけるというふうにはなってないです。

その部分に関しては、日本は理論が非常に強いので、アイデアとか理論の部分で、このギャップを埋める部分に貢献できるというふうに、確かに全部日本というふうには思っていないです。これは多分先頭集団の中に日本が入っていて、コントリビュートするということが重要だと考えております。

小林議員 単なる質問なんですが、この分科会はやっぱりコンピューテーションをメインで考えるということなのでしょうか。例えば、中国科学院は量子暗号が相当進んでいると聞いていますし、今盛んに5Gとかポスト5Gとか言われていますが、量子通信も相当国家戦略に直結していて、そういった国家間の関係でもかなり重要なポイントになると思うんですが、今回の会議に中国は来るのでしょうか。

荒川特任教授（東京大学） 今回の会議につきましては、当初、中国の研究者をパネル討論で招くことを構想しましたが、諸事情を鑑みて呼んでおりません。

ただし、今おっしゃられたように、中国はこの分野で大変重要な研究開発国でありますので、何らかの対応をしていきたいと思っています。

松尾議員 今、中国の話が出たので、日本で今非常に理論が強くてアドバンテージがあると言われてはいますが、結構、頭脳流失とっていいのかわからないか、人材がやっぱり外に流れているという話も聞かれますけれども、この辺りの研究のコアをしっかりと日本でつくって、研究者を日本にとどめてしっかりと研究する、日本でやっていくというのは非常に重要だと思うんですが、その辺りはどういうふうにお考えですか。

北川教授（大阪大学） それは一つはペイという面だけではなくて、むしろ研究環境と言いますか、研究費が持続的にかつどこまでふんだんというのはあれですけど、持続的にサポート

されるかというのは結構重要だと思っています。どちらかというと、研究者は研究環境を求めて流れていくところがありますので、日本にもちゃんとした目に見える形の量子関係の拠点をつくって、優秀な研究者が切磋琢磨できるような環境をつくって、これはムーンショットまで30年ありますから、これをきっかけにして、将来にわたってこの分野にしっかりと研究投資するという姿勢を保てれば、日本の環境はそんなに悪くないと考えております。

上山議員 先生方、どうもありがとうございました。

今日、聞いておりました、どの分科会にもエシックス、法的、社会的の課題、日本におけるこれまでのELS活動とは違って、新しいサイエンスとテクノロジーを突き詰めた先にどんな世界が生まれるのか。どんなライフスタイルを提言できるか。それらを議論していただきたいと考えております。このELSIの分科会には私自身もポジティブな形で関わっていきたいと思っておりますので、今後とも議論させていただきたいと思っております。

どうもありがとうございました。

では、以上で終了いたします。

午前11時 7分 閉会