

# 医療・ヘルスケアイノベーションにおける 倫理課題への対応と社会受容促進の取組 —遺伝情報、生殖医療、ヒトキメラ、脳操作—

本間 央之

## 概 要

医療・ヘルスケア分野のイノベーションへの期待が非常に高まっているが、本分野の技術の発展とともに、これに伴う倫理課題について、十分な考慮と社会受容を図る必要があり、各国でも様々な取組が行われている。

最近の米国の話題として、遺伝情報差別禁止法成立後も雇用等での課題があったが、「究極の個人情報」であるゲノム情報を扱った研究の進展とともに、規制・制度の整備はもちろんのこと、秘密計算（データを秘匿した状態で解析を行う技術）等のプライバシー保護技術の進歩により、リスク軽減・解消の実効性確保が急速に進みつつある。

また、米国国防高等研究計画局（DARPA）による発展型脳深部刺激のブレイン・コンピュータ・インターフェイス技術開発等も、技術の進展とともに倫理課題や社会受容促進の取組を行いつつある。

ほかには、中国でのヒト受精卵のゲノム編集の課題や、最近検討が進みつつあるヒト臓器作製等を目的とした動物性集合胚作製の課題への取組がある。

これらに対し、規範倫理学の議論、さらに試行錯誤的・漸進的な考え方に立った議論が必要であるが、より幅広い専門家や利害関係者（市民を含む）の合意形成を促進するために、ウェブを活用した双方向的な合意形成システムの構築が期待される。

**キーワード：**ELSI, 個別化医療／精密医療, CRISPR-Cas, 動物性集合胚, BMI/BCI, デルファイ法

## 1 はじめに

米国国立衛生研究所（National Institute of Health：NIH）の現所長 Francis Collins が、NIH 傘下の国立ヒトゲノム研究所（National Human Genome Research Institute：NHGRI）所長であった 2007 年当時、遺伝情報差別禁止法（Genetic Information Nondiscrimination Act:GINA）成立に向けた議会での証言において、遺伝差別の脅威は研究の妨げとなっていたとし、「米国人が情報を悪用されないと確信しない限り、個別化医療の時代は決して来ないだろう」と述べたように<sup>1)</sup>、倫理的・法的・社会的課題（ethical, legal and

social implications or issues：ELSI）に向き合うことは、医療イノベーションの促進において不可欠と考えられている。その対応のため米国 NHGRI の ELSI 研究プログラムの予算は、開始された 1990 年の 157 万ドルから、2013 年には 1,800 万ドルにまで増加している。

本稿では、最近の ELSI 関連の話題（遺伝情報保護、受精卵ゲノム編集、動物性集合胚、感情制御脳埋込装置）とともに、課題解決（技術的解決、合意形成）についての示唆を述べる。

## 2 情報とプライバシー

### 2-1 米国での遺伝情報差別禁止法の成立

1995年の最初の法案提出から2008年の大統領署名まで13年間を要したGINAは、医療保険(2009年12月施行)と雇用(2011年1月施行)について、遺伝情報に基づく差別を禁止している。一方、米国雇用機会均等委員会(Equal Employment Opportunity Commission: EEOC)への遺伝情報差別の訴えは、2010年の201件から2013年の333件へと年々増加した。

### 2-2 医療関連団体からの個人情報漏えい

他方、1996年の『医療保険の携行性と責任に関する法律(Health Insurance Portability and Accountability Act: HIPAA)』や2009年の『経済的及び臨床的健全性のための医療情報技術に関する法律(Health Information Technology for Economic and Clinical Health Act: HITECH)』に基づく米国保健福祉省(United States Department of Health and Human Services: HHS)による健康・医療情報のセキュリティ/プライバシー規制があるにもかかわらず、医療関連団体(保険会社、政府機関、医療機関)からの数百万件以上の個人情報漏えい事件は相次いだ。例えば米国第2位の医療保険会社Anthemは2015年2月、約8,000万人分の情報を含むデータベースが不正侵入を受けたことを公表した。流出した情報に医療記録は含まれていないとのことだが、医療関連団体へのサイバー攻撃としては過去最大規模の被害と見られる。

我が国にはまだ遺伝情報差別の規制はないが、規制・制度の整備はもちろんのこと、リスク軽減・解消に実効性を持たせるため、セキュリティ/プライ

バシー保護技術の進歩が望まれる。

### 2-3 米国でのゲノム情報を利用する研究の進展

ゲノム疫学<sup>注1)</sup>の進展は、新たな診断に基づく治療・予防法の発見・選択や医療の効率化につながるとの期待が大きい。従来型の全ゲノム関連解析(genome-wide association study: GWAS)で多数の疾患関連一塩基多型(single nucleotide polymorphism: SNP)<sup>注2)</sup>が発見されたものの、遺伝素因全体の一部しか説明できていない。しかし、次世代シーケンサを用いた大規模疫学で、まれなバリエーションも検出することにより、説明できていない遺伝性(missing heritability)の解明が大きく期待される。

米国オバマ大統領が2015年1月に発表した、100万人以上を対象に、ゲノムデータを他の生体情報等とともに統合・解析する「精密医療(Precision Medicine)<sup>注3)</sup>イニシアチブ<sup>2)</sup>」も、その一つである。短期的にはがん、長期的には全ての健康・疾患に有用な知識の創出を目指している。目的と2016年度予算は図表1のとおりである。このイニシアチブでは、厳格なプライバシー保護を最初から確保するために、ホワイトハウスがHHS等とともに、多様な利害関係者(患者グループ、生命倫理学者、プライバシー・人権擁護者、技術者、ほか専門家)が関与するプロセスの立ち上げを計画している。

### 2-4 プライバシー保護技術の必要性

ゲノム情報は、個人を識別する情報であるとともに、個人の特徴に関する情報である、「究極の個人情報」である。今後、研究・利用の発展とともに、ゲノム情報を取り扱う関係者も拡大することが想定され、またゲノム情報から抽出できる特徴情報も増大することから、プライバシー保護の必要性もより高

注1 ゲノム疫学：疾患コホートゲノム研究(過去の事象について調査する後ろ向き研究)やゲノムコホート研究(新たに生じる事象について調査する前向き研究)。

注2 SNP：バリエーション(集団における塩基配列の違い)のうち、0.5%あるいは1%以上の頻度で見られる一塩基の違い。

注3 精密医療：最も影響力のある経営思想家(Thinkers50)であるクリステンセンらが2008年の著書<sup>3)</sup>で造語した。破壊的イノベーションにより医療を良質で低コストなものに変革するための3つの牽引役(牽引技術、革新的ビジネスモデル、パリューネットワーク)のうちの牽引技術である。鍵となる診断・分類に対して、必ずしも個別の治療がある訳ではないので、個別化医療という言葉を使っていないが、類似した概念である。全米研究評議会の報告書<sup>4)</sup>により、専門家にも広まった。

図表1 米国「精密医療イニシアチブ」

◆目的		
①より多くのより良いがん治療 ②ボランティアからなる国家的研究コホート構築 ③プライバシー保護への責任 ④規制近代化 ⑤官民連携		
◆予算(2016年度: 2億1,500万ドル)		
機関	予算(ドル)	内容
NIH	1億3,000万	100万人以上のコホート構築、新たな研究方法基盤設立(積極的参加者、データ共有)
NCI	7,000万	がんのドライバー遺伝子同定や治療法開発
FDA	1,000万	規制・制度のための専門知識獲得やデータベース開発
ONC	500万	プライバシーやシステム間データ交換のセキュリティを実現する相互運用標準・要件開発
NCI: 国立がん研究所 (National Cancer Institute)		
FDA: 食品医薬品局 (Food and Drug Administration)		
ONC: 国家医療情報技術調整室 (Office of the National Coordinator for Health Information Technology)		

出典: 参考文献2を基に科学技術動向研究センターにて作成

まると考えられる。ゲノム情報漏えいによるリスクも、ゲノム提供者自身の医療保険や雇用の差別のほかに、血縁者情報の推定(実例として祖先探索商用データベースを用いた匿名精子提供者である父親特定)や人工合成DNAの犯罪目的での利用(DNA鑑定の誤誘導)等に及び、範囲を確定できない。

米国の消費者向け遺伝子解析サービス会社23andMe社からもデータ提供を受けている、ハーバード大学医学部発の“Personal Genome Project (PGP)”は、ゲノムデータのほか、医療データ等の広範な匿名データを公開しているが、プライバシーの確約をしていない。データを提供するボランティアは、オンラインでリスクに関する試験を受け、全問正解する必要がある。実際、2002年にk-匿名性<sup>注4)</sup>の概念を提案したことで著名なハーバード大学Sweeneyらにより、容易にPGPデータの個人名を再識別化できることが示されたが<sup>注5)</sup>、このような状況は、国に係る大規模ゲノム疫学では許容され難いであろう。

こうした中、ゲノム情報解析において、規制・制度の整備と並んで、それ自体が知的財産となりうるプライバシー保護技術の開発は、ますます重要になると考えられる。

## 2-5 プライバシー保護技術の研究と種類

日本の学術機関におけるプライバシー保護技術の研究としては、科学技術振興機構(Japan Science

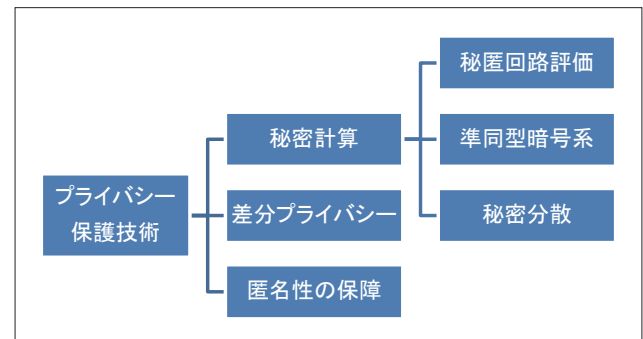
and Technology Agency: JST)のCREST・さきがけ複合領域<sup>注5)</sup>に、『自己情報コントロール機構を持つプライバシー保護データ収集・解析基盤の構築と個別化医療・ゲノム疫学への展開(研究代表者: 筑波大学・佐久間淳)』があり、一層の活発化が望まれる。

プライバシー保護技術は、佐久間の解説論文<sup>6)</sup>から図式化すると図表2のように分類される。

秘密計算では、本来興味があるのはデータそのものではなく、最終的な解析結果のみであることを考慮し、結果のみを安全に知らせることを目指す。ゲノム情報や臨床情報といったデータを複数の組織に分散し、お互い閲覧できない状態にあるときに、データを共有せずにデータ解析を実現する。

マイクロソフトのDworkが2006年に提案した差分プライバシーでは、データベースに対する質問への応答データを閲覧した者が、特定個人のデータが含まれていたのか否かを推測できないように、応答

図表2 ゲノム解析のためのプライバシー保護技術



出典: 参考文献6を基に科学技術動向研究センターにて作成

注4 k-匿名性: 代表的な匿名性であり、同じ属性の人がk人以上いる状態をk-匿名性を満たすという。識別推定を困難にするために、そのようにデータを加工することをk-匿名化と呼ぶ。

注5 『ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化(研究総括: 国立情報学研究所/東京大学・喜連川優)』



データを加工（ノイズ加算）する。

匿名性の保障では、データと個人を一対一で紐づけられないように、データを加工する。

## 2-6 最近のプライバシー保護技術の進歩

米国の研究会で2015年3月、小さなデータセットではあるが、準同型暗号法を用いて、約10分で疾患関連のバリエーションを見いだせることが示された<sup>7)</sup>。実際のゲノム解析のDNA量では、依然計算量が膨大であり、実用化には今後も開発を要するが、大規模な解析に有用なクラウド計算でのセキュリティ確保に道を開く可能性がある。準同型暗号の概念は1978年に提案されたが、2009年に初めて現在IBMのGentryによって実現可能性が示された。以来、2009年からは飛躍的な進歩を遂げた。

## 3 受精卵・胚操作の生命倫理の課題

ほかにも、倫理面で話題となっている技術は、世界を大きく変える可能性を秘めており、技術の発展を期待するとともに、これに伴う倫理課題について、十分な考慮と社会受容を図る必要がある。日本学術会議の報告書『生命科学の全体像と生命倫理』<sup>8)</sup>にあるように、規範倫理学の二つの立場—功利主義と尊厳主義、さらに試行錯誤的・漸進的な考え方も考慮し、社会的な合意を形成する努力が必要である。

### 3-1 受精卵ゲノム編集

中国広州の中山大学のグループは2015年4月、ヒト受精卵でゲノム編集を試みた論文を発表した<sup>9)</sup>。急速な進歩を遂げるゲノム編集技術であるが、比較的簡便で特異性の高いCRISPR-Casシステムを使って、ゲノム編集のヒト胚でのメカニズム、効率及びオフターゲット（狙った標的以外への）効果を調べた。倫理的配慮から、体外受精由来の廃棄される異常胚<sup>注6)</sup>を用いた。ヒト多能性幹細胞やマウス

受精卵でのオフターゲット効果は低いことが報告されていたことからヒト受精卵でも期待したが、期待に反してオフターゲット効果は高く、ゲノム編集の効率は低かった。遺伝子治療への臨床応用には時期尚早であり、課題があるとしている。

この研究に対し、論文発表以前の2015年3月から、掲載を拒否したScience、Natureをはじめとした各種学術誌等で、「ヒトの生殖系列のゲノムを編集すべきでない」との論調の意見が示された。発表前の研究の情報が広まっていた米国では2015年1月に、CRISPRの開発に関わった分子生物学者が、科学者、倫理学者、法律専門家に呼びかけ会議を開いた。短期的に次のようなステップを踏むことを提言している<sup>11)</sup>。

- ① 科学者や政府の組織で社会・環境・倫理課題が議論されている間は、規制の緩い国においても、生殖細胞系列のゲノム改変に強く反対する。
- ② 公開討論会を組織し、科学と生命倫理の専門家が、新技術の幅広い応用のリスクと便益及び付随するELSIについて、情報提供・教育する。
- ③ どのような臨床応用が許容されうるか熟慮するために、生殖細胞系列の遺伝子治療応用に適切なモデルでCRISPR-Cas技術の有用性・特異性を評価する透明な研究を推進する。
- ④ 世界を代表するゲノム工学技術開発者・利用者及び遺伝学、法律、生命倫理の専門家、さらに科学コミュニティー、一般市民、政府機関、利益団体のメンバーを招集して問題を検討し、必要に応じて政策提言を行う。

また、研究者は、「デザイナーベビー」への道を開くことになるかもしれないという連想等から一般市民の反発を招き、正当な研究にさえ疑いがかかることも恐れており、壮大な議論が巻き起こっている。

NIHは2015年4月、ヒト胚の遺伝子改変を行う研究には助成金を付与しない方針であることを発表した。ホワイトハウスも2015年5月、医療目的での受精卵の遺伝子改変について、「将来世代への影響が不透明で、現時点では超えてはいけぬ一線だ」と反対する声明を出した。

このように、特に米国では、倫理問題に対し、研究者をはじめ関係者が迅速に議論・対応を始めている（なお、生殖細胞系列の遺伝子改変についての世界各国の規制状況は、北海道大学・石井らの報告に詳しい<sup>12)</sup>）。一方で、リスクと便益を考える功利主

注6 2精子受精3前核卵。ただし、3倍体の一部が発生初期に正常2倍体に復することが最近報告されている<sup>10)</sup>。

義の立場と違って、尊厳主義の立場は宗教や文化によって大きく異なることも想定され、国家を超えて議論をする必要がある。

## 3-2 動物性集合胚

東京大学・中内のグループは2010年9月、ヒト臓器を動物内で作製する方法の開発に道を開く研究成果を発表した。胚盤胞補完法<sup>注7)</sup>により、膵臓欠損マウスの体内で、異種であるラットの膵臓を作製した。続いて2013年2月、膵臓欠損ブタで健全なブタ由来の膵臓を作製したことを報告した。ブタ体内でヒト臓器を作製する方向に進んでおり、圧倒的に移植用臓器が不足する中、様々な臓器での今後の成功が望まれる。例えば、末期腎不全患者の透析医療費は我が国で年間1兆5,000億円を超えるが、移植用腎臓ができればこの市場を革新できる。特に、腎臓のような複雑臓器では、他の方法による臓器作製が難しいことが想定され、発生によってひとりでに作られる本方法への期待は大きい（本方法では、技術的課題の解決が比較的容易と予想される膵臓で研究が先行しているが、膵島細胞作製では、ハーバード大学・Meltonらの方法等、他の方法との競争が厳しい）。

一方、クローン技術規制法に基づく特定胚指針では、ヒト細胞を導入して得られるキメラ胚（動物性集合胚）について、当分の間、人又は動物の胎内への移植を禁じることとしている。しかし、中内の研究等の状況を踏まえ、総合科学技術会議生命倫理専門調査会では、2012年から、動物性集合胚を用いた研究の取扱いの見直しの可否及び見直しの場合の方向性について、倫理的観点及び科学的観点から検討を重ねた。そして、本技術がクローン技術規制法制定時と比較して進展し、科学的知見が大幅に増大していると考えられたため、動物胎内への移植の是非を検討する前提が整ってきていると考え、文部科学省に検討を求めるに至った。同調査会の見解<sup>13)</sup>を踏まえ、動物性集合胚の取扱いに係る専門的事項について、科学的観点から調査・検討を行うために、文部科学省は2013年9月、特定胚等研究専門委員会「動物性集合胚の取扱いに関する作業部会」を設置し、同年12月から会議を

開催している<sup>14)</sup>。

筆者も中内とは独立して、2001年から重ねて企業内で胚盤胞補完法によるヒト臓器作製を提案した経験がある（受け入れられず実施はしていない）が、現在の中内らの開示されている状況は技術の原初段階であり、倫理面の課題のクリアも含め、今後も技術の統合やブレイクスルー（種間の壁の克服等）を積み重ねることで、実際の移植に広く使用できるレベルに達することができると考えられる。今後、動物性集合胚の胎内移植を認めることとする場合でも、胎内における許容発生期間の決定に当たっては、人工妊娠中絶等、社会的に許容している倫理水準を参照する等して、試行錯誤的・漸進的な考え方をとることも重要である。

## 4 脳科学とBMI/BCIの課題 —感情制御脳埋め込み装置

米国国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）が2013年10月に発表したSUBNETS（Systems-Based Neurotechnology for Emerging Therapies）プログラム<sup>15)</sup>では、心的外傷後ストレス障害（post-traumatic stress disorder: PTSD）や外傷性脳損傷のため現役軍人や退役軍人に多い難治性の精神神経疾患の治療を目指して、脳内埋め込み型のクローズドループの診断・治療（測定、記録、分析、刺激）システムの開発を行っている。SUBNETSには、2013年4月にオバマ大統領が発表したBRAINイニシアチブの一部として、5年以上にわたり7,000万ドルが投じられる。本態性振戦やパーキンソン病等の治療で既にFDAの承認を受け、うつ病治療の研究も進んでいる脳深部刺激療法（deep brain stimulation: DBS）を飛躍的に発展させた形の技術となる。脳の可塑性を利用し、脳情報をモニターしながら刺激することで、正常機能を回復できると考えている。

倫理的側面からは、脳ネットワークの操作は、一種のマインドコントロールに使用できるのではないかという懸念があり、理化学研究所/MITの利根川らが2013年7月Science誌に発表した過誤記憶と絡めて話題にされることもある<sup>16)</sup>。遺伝子操作/ゲノム編集に対する、物理的なミーム操作・ミノ

注7 胚盤胞補完法：特定の細胞系譜を欠損した胚盤胞に、正常な多能性幹細胞（ES細胞、iPS細胞等）を注入し、キメラを成立させて、欠損した細胞系譜を完全に多能性幹細胞由来のものに置き換える方法。

ム編集<sup>注8)</sup>のようにも受け止められ、さらにゲノム情報同様、プライバシーの問題が生じる可能性がある。元々 DARPA でのブレイン・コンピュータ・インターフェイス (brain-computer interface : BCI)<sup>注9)</sup>技術の開発においては、神経行動機能の回復に加え、訓練とパフォーマンスの向上を目指している側面もある。

DARPA は SUBNETS がどう受け止められるか心配し、初めから独立した ELSI の委員会を立ち上げている。また生命倫理課題研究のための大統領諮問委員会 (Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues : PCSBI) も、BRAIN イニシアチブの全側面を監督している。PCSBI は 2014 年 5 月、神経科学研究に関連する倫理問題を検討した報告書を発表し、倫理課題の早期特定や、科学者と倫理課題専門家との協力等の重要性を指摘している。

## 5 合意形成のためのシステム構築

技術の ELSI は、研究、実用化・産業化への参入の課題ともなりうる。技術による福祉の向上を妨げないためにも、幅広い専門家や利害関係者が関与する仕組みを作って合意形成を促進させる努力も必要である。

諸外国における生命倫理に係る法制度の現状については、他の文献<sup>17,18)</sup>で報告されている。当研究所からは 2009 年、生命科学技術の事例検討を踏まえた科学技術の社会的ガバナンス制度として、英国のヒト受精・胚機構 (Human Fertility and Embryology Authority : HFEA)<sup>注10)</sup>等を参考に、社会 (市民)、科学技術 (専門家)、政府 (政策策定者) の協働の核となる中間的専門機関設置の提言がなされた<sup>19)</sup>。

一方で、幅広い専門家や利害関係者の合意形成を促進するために、調査・検討等を行う双方向的な合意形成支援システムは有用である (図表 3)。診療ガイドライン作成等の幅広い分野で利用されている

意見収束技法であるデルファイ法<sup>注11)</sup>は合意形成に有用であるが、ウェブを活用したシステムを用いることにより格段に効率化される。当研究所では 2014 年、1971 年から約 5 年ごとに実施されてきた科学技術発展の将来展望を専門家に問うデルファイ調査の第 10 回を、これまでの紙ベースからウェブベースに変更して実施した。郵送を伴う紙ベースの調査に対して、ウェブベースの調査は、スピードや利便性等多くの面で優れていた。ウェブを活用した交流システムの利用は、デルファイ法に限らず、必要知識のオンライン学習を伴う調査や個別意見の提示・検討等、合意形成の促進に寄与しうるだろう。

ウェブベースの調査を活用した事例としては、一方向的ではあるが、2015 年 4 月に英国のグループから報告された、ゲノム配列解析による偶発的所見の取扱いに関する、75 か国の約 7,000 人を対象としたアンケートによる調査研究がある<sup>20)</sup>。遺伝子医療従事者、非遺伝子医療従事者、ゲノム研究者、一般市民を対象としており、この課題に関するこれまでで最大の調査である。調査の限界も考察し、更なる研究の出発点と見なすべきであると慎重であるが、価値のある知見を提供できている。

図表 3 ウェブを活用した合意形成促進



注8 ミーム (meme) : 『利己的な遺伝子』で著名なドーキンスにより、遺伝子 (gene) になぞらえて考案された言葉であり、人々の間で心から心へとコピーされる情報のこと。ゲノムに対応する言葉は、memome 又は menome。

注9 BCI : BMI (brain-machine interface) より狭い概念であるが、日本と異なり PubMed や Google では、BMI よりはるかに言葉の使用頻度が高い。

注10 HFEA : 廃止論がなくなった経緯や他国が同様の規制機関を設立することについて、参考文献 17 に記載がある。

注11 デルファイ法 : 全体の回答結果をフィードバックして反復してアンケートを行い、意見を組織的に集約・収束させる技法。

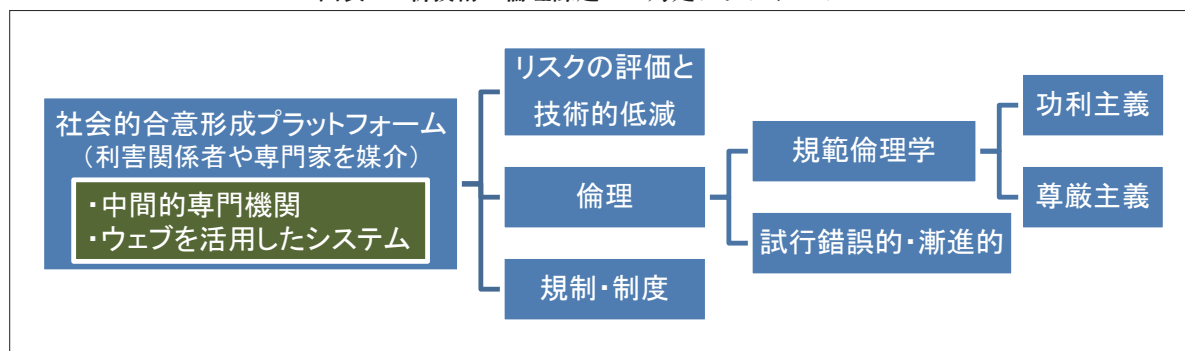


## 6 おわりに

倫理面が課題となっている技術（遺伝情報保護、受精卵ゲノム編集、動物性集合胚、BMI / BCI）はいずれも、社会への潜在的影響が非常に大きい。倫理面の課題に関し、技術的解決が図れるのであれば、

それが一番望ましい。一方、技術の潜在的な有用性を適正に生かすために、幅広い専門家や利害関係者が関与する合意形成の仕組みを作る方向での努力も必要であろう（図表4）。広範な専門家や利害関係者が調査・検討・議論できる場として、デルファイ法等が容易に実行できるウェブを活用した合意形成支援システムの構築・活用が期待される。

図表4 新技術の倫理課題への対処プラットフォーム



## 参考文献

- 1) Holden C. "Long-awaited genetic nondiscrimination bill headed for easy passage." *Science* 2007;316(5825):676.
- 2) The White House. "Fact sheet: president Obama's precision medicine initiative." 2015年1月：  
<https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/01/30/fact-sheet-president-obama-s-precision-medicine-initiative>
- 3) Christensen CM, et al. "The innovator's prescription: a disruptive solution for health care." McGraw-Hill 2008
- 4) National Research Council. "Toward precision medicine: building a knowledge network for biomedical research and a new taxonomy of disease." National Academies Press 2011.
- 5) Sweeney L, et al. "Identifying participants in the Personal Genome Project by name." Harvard University. Data Privacy Lab. White Paper 2013;1021-1.
- 6) 佐久間淳『ゲノムとプライバシー』IEICE Fundamentals Review 2014;7(4):348-364.
- 7) Hayden EC. "Extreme cryptography paves way to personalized medicine." *Nature* 2015;519(7544):400-401.
- 8) 生命科学の全体像と生命倫理特別委員会『生命科学の全体像と生命倫理』日本学術会議 2003年7月。
- 9) Liang P, et al. "CRISPR/Cas9-mediated gene editing in human tripronuclear zygotes." *Protein Cell*. 2015;6(5):363-72.
- 10) 藤田真紀 "Dispermic tripronuclear zygotes spontaneously develop into biparental embryos." 千葉大学大学院医学薬学 府 2014年7月：[http://mitizane.ll.chiba-u.jp/metadb/up/thesis/FHA\\_1062\\_Y.pdf](http://mitizane.ll.chiba-u.jp/metadb/up/thesis/FHA_1062_Y.pdf)
- 11) Baltimore D, et al. "A prudent path forward for genomic engineering and germline gene modification." *Science* 2015;348(6230):36-8.
- 12) Araki M, et al. "International regulatory landscape and integration of corrective genome editing into in vitro fertilization." *Reprod Biol Endocrinol*. 2014;12:108.
- 13) 総合科学技術会議 生命倫理専門調査会『動物性集合胚を用いた研究の取扱いについて』2013年8月。
- 14) 文部科学省 特定胚等研究専門委員会 動物性集合胚の取扱いに関する作業部会：  
<http://www.lifescience.mext.go.jp/council/council013.html>
- 15) DARPA. Systems-Based Neurotechnology for Emerging Therapies (SUBNETS). 2013年：  
<http://www.darpa.mil/program/systems-based-neurotechnology-for-emerging-therapies>
- 16) Internet Medicine. "DARPA: on the hunt for neuroprosthetics to enhance memory." 2014年10月：  
<http://internetmedicine.com/2014/10/25/darpa-on-the-hunt-for-neuroprosthetics-to-enhance-memory/>

- 17) みずほ情報総研『平成24年度科学技術戦略推進費委託 諸外国における生命倫理に係る法制度の現状と最新の動向に関する調査』内閣府 2013年3月.
- 18) 研究開発戦略センター『研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野 (2015年)』科学技術振興機構 2015年4月.
- 19) 牧山康志 他『中間的専門機関』科学技術政策研究所 Policy Study No.15. 2009年3月.
- 20) Middleton A, et al. "Attitudes of nearly 7000 health professionals, genomic researchers and publics toward the return of incidental results from sequencing research." Eur J Hum Genet. 2015. doi: 10.1038/ejhg.2015.58. [Epub ahead of print]

..... **執筆者プロフィール** .....



**本間 央之**

科学技術動向研究センター 特別研究員

博士(医学)。免疫やがんの創薬研究に従事し、2012年11月より現職。長年にわたり、生命・社会の自己組織化および 'disruptive innovation' (胚盤胞補完法による臓器作製、標的構造の制約や送達の限界を突破する創薬等) に関心を持つ。