Osaka University Knowledge Archive

Title	ナノテクノロジーとその医療への応用における倫理的諸問題
Author(s)	加藤, 穣
Citation	医療・生命と倫理・社会. 2009, 8, p. 92-103
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/10083
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

ナノテクノロジーとその医療への応用における倫理的諸問題

加藤　穣
（大阪大学大学院医学系研究科博士課程、医の倫理学）

はじめに

本稿は、ナノテクノロジー（以下ナノテクと略す）、特にその医療への応用における倫理的諸問題を紙幅の範囲で網羅的に提示することを目的としている。以下では、ナノテク研究の現状をまず素描し、続いてナノテクの定義の問題を扱い、さらに、これまで問題とされてきた事柄を提示した上で、これまでほとんど論じられてきていないが論じられるべき問題、そして日本での論じられ方自体の問題等を指摘することにしたい。

1　ナノテク研究の現状

現時点で問題とすべきナノテクとその医療への応用における倫理的諸問題を明確化するために、ナノテク研究の経緯と現状を要約しておく。歴史的には、20世紀中頃から次第に分子･原子レベルを観察、そして次第に操作できるようになってきたことを背景とする。1959年のリチャード･ファインマン（Richard Feynman）の“There's Plenty of Room at the Bottom”と題された講演が一つの重要な契機であり、現在でもしばしば言及される。1974年には「ナノテクノロジー（Nanotechnology）」という用語が谷口紀男により提唱され、1985年に炭素原子60個で構成されるサッカーボール状の構造を持つC60フラーレン、1991年には飯島澄男によるカーボンナノチューブ（CNT）という共にナノテクを象徴するといってよい材料が発見された（バッキーボールと呼ばれることもあるC60のフラーレンの直径は約1nmである。1nmは1mの10億分の1である）。1990年には走査型トンネル顕微鏡を用いてキセノン原子でかかれたIBMの文字が『ネイチャー』の表紙を飾っている。

その後の最重要の契機となったのはクリントン米国大統領の予算教書（2000年）のNational Nanotechnology Initiative（NNI）であり、そこでは、ナノテクの可能性として、「米国議会図書館の全蔵書を角砂糖の大きさのデバイスに収める」こと、「原子や分子からボトムアップで材料や製品を組み立てる」こと、「水や空気から最も微細な汚染物質をも除去する」ことなどが言及された [1]。このNNIには各国が追随し、日米欧などの先進国を中心に新興国・発展途上国が膨大な資金を投入して研究･開発競争の様相を呈している。さらに、ナノテクとしてくくられる研究分野はきわめて多岐にわたる。ナノテクの医療への応用であるナノメディシンに限ってみても、例えばInstitute for Molecular Manufacturingのロバート・フレイタス（Robert Freitas）は、95の分野を列挙している [2]。ただ、そのような活発で広範な研究にもかかわらず、ナノテクはいまだ初期的な段階にとどまっているというのが大方の見方である。現在の状況はNNI教書などに見出される当初の構想には程遠い。実現そのものの可能性、実現する時期の予測に関する議論も盛んである。

ナノサイズの分子は人間の「太い指」で直接作ることができないことから、ナノのスケールに到達する方策としてトップダウン型のアプローチとボトムアップ型のアプローチが試みられてきた。前者は「半導体の微細加工に見られるように、大きいものからナノメートルサイズまで微小化するという流れである」。これに対してボトムアップ型は、「原子・分子の操作技術の発展により、原子・分子を積み上げて構造体を形成させる」（産業技術総合研究所、86頁）ものである。「トップダウン型アプローチは半導体分野を主として、微細加工、リソグラフィー、エネルギー・ビームの利用により発展し、1970年頃には100ナノメートル以下を扱うことができるようになった」（同上、87頁）のであり、例えば、原子間力顕微鏡（AFM）では、針の先端の原子と表面の原子とが入れ替わるという現象を利用することができる。ただし、トップダウン型アプローチの限界も認識されるようになってきている。「自律的で高い機能を持った医療用微小ロボット」（同上、114頁）というアイデアは、上述のファインマンの講演にあるものだが、「仮に、天然のNK細胞と同程度に効率よくがん細胞を殺すことができる医療用微小ロボットができたとしても、一人のがん患者を治療するのには100万～1億台もの抗がん微小ロボットが必要になる計算となり、これをトップダウン型のナノテクで製造することは、コスト的に全く成り立たない」（同上、118頁）とされる。また、フレイタスが1998年の論文においてデザインを示した（実用化には程遠いが）医療用ナノマシン（ホダイン、106頁以下）は一台あたり180億個の原子から構成されているなど、複雑な機能を持たせるために積み上げなければならない原子の数は膨大となる。これをトップダウンで製造することは現実的ではないと考えられることから、「複雑な微小デバイスを作成しようと思えば、ボトムアップ型のアプローチ、すなわち自己組織化プロセスに依存するほか道はないように見える」（産業技術総合研究所、115頁）という考えも表明されている。現実には原子を組み合わせて機能をもつ機械を組み立てることは困難であることから、天然の分子機械である生物や生体分子の利用という方向性も強まったということである。

「現在は、ナノテクノロジーにおけるトップダウン型アプローチとボトムアップ型アプローチは、それぞれ制御できる大きさが同一の領域に収斂」（同上、88頁）しつつあるとされるものの、ボトムアップ型のアプローチの進展は遅れていた。生物や生体分子の利用という方向性は「ナノバイオテクノロジー」と呼ばれることもある（同上、14頁）。「ボトムアップ型ナノバイオテクノロジー」が「従来のトップダウン型ナノテクノロジーの欠点を克服し、大量生産、精密制御、省エネなどへの新たな道が開かれると期待されている」（同上、90頁）。とはいえ、生体分子は寿命が短く、世代交代があれば機能を最適な状態で維持することが困難であることなど、容易に克服できないと考えられる弱点がある。「ナノバイオテクノロジーの中でも特にボトムアップ型の研究開発は、まだまだ始まったばかりであり、要素技術を研究開発する段階にある。そのため、実際にテクノロジーとしてどのような有用性があるかわからないという声も聞かれる」（同上、97頁）とされるように、例えば、微小管上のキネシンの運動を利用して物質を運ばせることは可能になったが、実際に臨床でどのように利用できるかについてはいくつかアイデアが出されているに過ぎない段階である。

また、自己複製能をもつ分子が自己をより小さい形で複製することでナノスケールに到達する、というアイデアは既にファインマンが示していたが、このような自己複製能をも

つ分子が幾何級数的に際限なく増殖して地球を埋め尽くす「グレイ･グー」（Gray Goo）に関する議論がエリック･ドレクスラー（Eric Drexler）とフラーレンの発見により1996年度ノーベル化学賞を受賞したリチャード・スモーリー（Richard Smalley）の間などで以前盛んに行われた。昨今では特許権との関連から特許出願されるまで（あるいは出願公開されるまで）公表されない事柄も少なくないと考えられるものの、2009年初頭の時点では分子アセンブラは登場していない [3]。

現時点で「ナノメディシン」として研究されているものは上記のフレイタスの論文に詳しいが、イメージング、計測、ドラッグ・デリバリー・システム（DDS）[4]、ナノ材料、ナノバイオロジー、再生医療などが主なものである。例えば「ナノバイオ医療革命」（6頁以下）で挙げられているのは、DDSのためのミセル（直径50nm）、マイクロ化学チップ（「マイクロチャネル」と呼ばれるナノからマイクロサイズの溝が掘られている）、MPCポリマー（細胞膜と同じリン脂質構造を持ち、人工関節の長寿命化などに有効）、骨の切削面の「マイクロ、ナノレベルでの微細加工技術」、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）、マイクロ･モーター、DNAピンセット、バイオ・マニピュレーション（「光ピンセット」によりDNAを切断、DNAをつまんで再配置、DNAを糸巻きに巻きつける、電気パルスにより細胞の中に物質を導入、細胞を融合させるなど）、DDSにおける分子シャペロン（通常はタンパク質を修復する生体分子）の利用、インクジェットプリンターによる人工骨の創製等である。

ナノテク、またその医療応用は共に初期の段階にあると既に述べたが、その一方で市場へは「ナノテク」を謳った商品が多数投入されてきた。例えば、代表的なナノ材料であるフラーレン配合の化粧品、CNTを用いたテニスやバドミントンのラケット、スノーボード、自転車、ゴルフクラブなどもありふれたものとなっている。CNTのアスベスト様の健康被害の可能性の指摘など、リスクに関する議論と同時進行していることが注目に値する [5]。

医療への応用はあまり進んでいないのが現状であるが、ナノテクという周りに広がる巨大な外部からいつどのような技術やアイデアがナノメディシンの領域内に入ってくるか分からないことから、現時点でナノメディシンとされているものだけでなく、ナノテク全体を扱うこととする。同時に、現在における技術および近い将来に登場しうる技術の問題と、例えば次世紀以降に可能になるかもしれない技術の問題とを区別する必要があると考えるので、以上のような状況を踏まえることにする。

２　ナノテクの定義

「ナノ倫理」について考察する上で、ナノテクという用語の定義を避けて通ることができないが、この用語はそれほど自明であるわけではない。UNESCO加盟国が1998年に設立したWorld Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology（COMEST）の報告書所収の“Identifying ethical issues of nanotechnologies”において、ドイツ・ダルムシュタット工科大学（Department of Philosophy）のヨアヒム・シュマー（Joachim Schummer）は、ナノテクの倫理的問題を考える上での3つの困難として、定義のあいまいさを、公衆に対する誇大広告（いわゆる「ナノハイプ」[6]）、技術が初期の段階にあることとともに挙げている（79頁）。そして、倫理的諸問題を特定する前置きとし

て、定義の問題を扱い、ナノテクという名称に基づく定義（以下参照）、ナノテクが目標とする内容に基づく定義、現実に「ナノテク」として研究・開発されているものによる定義の3つを区別している（同上、80頁以下）。とりあえず一般論として、いずれの学問領域も常に自らを再定義しながら進展するということが言えるであろう。例えば、生物学は、現在と100年前とでは大きく範囲を異にしている。このことがナノテクにも当てはまる、とまずは言えるであろう。シュマーを除けば、UNESCOの報告書では、「ナノテクノロジー」を「少なくとも一つの次元が100nm以下の物質をコントロールすることにより、機能をもつ材料、デバイス、システムを研究、設計、創出、合成、操作、応用すること、そしてそのスケールで通常現れる新たな現象や特性を利用すること」と定義している（同上、99頁。他に156頁など）。NNIもこの定義を用いている [7]。OECD（経済協力開発機構）工業ナノ材料安全部会、国際標準化機構の国際規格ISO/TC229も「少なくとも一つの次元が100nm以下の物質」を「ナノ物体」とする（柴田、7頁；ナノテクノロジー戦略ワーキンググループ、112頁）。

ただ、ナノのオーダーは「ナノテク」という用語が用いられるようになる以前から（潜在的に）含まれていたものである。「大気環境領域」において従来から「超微小粒子」と呼ばれていたものは直径100nm以下の「ナノ粒子」である（平野、37）。「物質は原子や分子でできているので、純粋なバルク物質でない限り、ほとんどの物質はナノ構造を持っているといっても過言ではない」という見方もある（同上、40）。特にライフサイエンスの分野ではナノサイズのもの自体は新しいわけではもちろんない。例えば、DNA鎖は直径が2nmであり、脂質2重膜の厚さは5-10nmである。（無論、原子を一つずつ積み上げたわけではないが)1957年に全合成に成功した抗生物質ペニシリンの分子のサイズは1nm強である。しかしながら、これまでにも存在したものをただ小さくするというだけで、単なる量的変化にとどまるのかといえば、ナノのスケールになることで質的な変化がもたらせることもある。100nm以下の流路では、粘性のために液体を送り込むこと自体が困難であるし（産業技術総合研究所、102頁）、ブレーン･マシーン･インターフェースでは小型化が実用に大きく影響する。例えば、直径100nm以下のファイバーを使用することができれば、個々のニューロンに接続できるとされる（Stix、58頁以下）。ナノサイズにすることではじめて可能になるテクノロジーを指して第3期科学技術基本計画以降「トゥルー・ナノ」という用語も用いられるようになってきている。ただし留意しておくべきことは、用語の定義が国や分野ごとに揺らいでいる可能性があることである。例えば、「日米におけるナノテクノロジーの解釈と研究開発の相違－カーボンナノチューブを事例にして－」（五島・竹中・柳下）は、こうした点に注意を喚起している。

３　「ナノ倫理」は存在するのか

ナノテク特有の問題（「ナノ倫理」）があるとする見解と、全く新しい問題があるわけではないとする見解との間の論争が存在するが、“Outlining Ethical Issues in Nanotechnologies”のアントニオ・スパニョロ（Antonio G. Spagnolo）らは、短期・中期的には、ナノテクの応用に特有の倫理的懸念はほとんどないが、新興の分野であるため、今後生じてくる諸問題を調査するための研究を促す必要があり、長期的（20年後）にはプ

ライバシーを含む個人の自由が重要な問題となるという見解を引用している[8]。「新興の分野」であることから将来実際にどのような形で実用化されるか、またそれによりどのような倫理的問題を生じさせるか現時点でその全貌が把握できないという点は首肯できる。

上述の定義に拠るなら、ナノテク、ナノメディシンが適用される場面、領域ごとに分かれていない。UNESCOの報告のタイトルにあるNanotechnologiesという複数形が如実に示しているように、その適用される分野によって複数のナノテクが存在することになる。倫理的懸念の検討の対象となっているものは、多くの場合、その適用場面、領域ごとに、すなわち、臓器移植、遺伝子治療などでくくられているが、スパニョロらも「ナノ倫理」について、「ただ一つのナノテクノロジーがあるのではなく、複数ある」ことから、「それぞれについて、それぞれの倫理的問題があると考えるべき」であるとしている（2頁）。ただし、そのように「それぞれ」を見ていくとナノというくくりに対して関連性が低くなり、もはやそれは「ナノ倫理」とは呼べないのではないかという疑念が生じる。一例を挙げれば、ナノテクによるエンハンスメントの問題は、基本的にエンハンスメントの倫理的問題として取り扱われるのが自然であるように見える。ナノテクというくくりが倫理的諸問題を検討する上でそもそも有効、あるいは適切かという問題は確かに存在するが、このくくりで膨大な予算が割り当てられ、学際的な取り組みがなされ各分野が相互作用しながら研究され、想定される将来的なインパクトが巨大であることは事実である。結論的には、ナノテクに特有の「ナノ倫理」を探求することより、「ナノ倫理」をナノテクに関連する倫理的問題の総体として理解し、それがナノテクに関連する倫理的諸問題のプラットフォームとして機能することを目指すべきであると考える。必ずしも「ナノ倫理」という用語を用いる必要はないが、以下では、バイオテクノロジー、情報技術などの他の技術、ナノテクがおかれた状況との連関の中で、ナノテクに関連して検討・監視されるべき倫理的懸念を包括的かつ網羅的に含んだものを便宜的に「ナノ倫理」とし、含まれるべき諸問題を可能な限り列挙することを試みる。ナノテクが初期的な段階にある現時点では、研究・開発の進め方における倫理的諸問題が中心的な課題になるであろう。

４　ナノ倫理において問題にされてきたこと

以下では、ナノ倫理において問題にされてきたことを若干の検討を加えながら俯瞰し、次節ではさらに付け加えられるべき諸問題を指摘することにする。今後ナノテクとその医療への応用が進展するに従い定期的かつ長期的に倫理的諸問題をモニターしていくためには、倫理的課題を書き出してリスト化することでポートフォリオ全体が考慮されるようにすることが重要であると考えるからである。新たな倫理的問題を生み出す場合と従来の技術にも指摘されていた倫理的問題を助長、悪化させる場合とがあると考えられるが、以下で触れられているもので現在の問題であるものはほぼすべて後者である。短期・中期・長期的な諸問題、主体について研究者、メディア、政策立案者、市民、国際的な調整を行う機関、研究段階と臨床応用での諸問題等、多数の切り口があるが、これらを雑然とした形で列挙することをあらかじめ断っておく。

シュマーは、ナノテクの倫理的問題の類型として6つの（網羅的でない）グループから成る具体的な諸問題と、より一般的な諸問題を挙げている（84頁以下）ので、これらを軸

として記述を進めたい。その6つとは、新素材の健康・環境に対する問題、新しいデバイスのコントロールに関する問題、ナノテクの軍事利用から生じる問題、ナノテクの生物医学的応用から生じる問題、ナノテクの資源の問題、ナノテクの知的財産権の問題である。これらは互いに排他的であると考えるべきではない。

まず、「新素材の健康･環境に対する問題」についてであるが、これはナノテクの惹き起こす倫理的問題として最も中心的に議論されている安全性・リスクの問題を中核としている。歴史的には、公害、環境ホルモン、アスベスト等の健康被害の系列に連なっている。ただし、ナノサイズの粒子は既に現在の生活環境にばら撒かれているし、あらゆるものはナノレベルの構造を内包しているので完全に新しい倫理的問題であるとはいえない。リスク評価を主要な目的として国際的な標準化も進められている。ナノ粒子の安全性の問題は、当然のことながらナノテクに先行して存在した問題であると言える。一例としては、ディーゼル車は大気中にナノ粒子を放出している。また、「マンガン電池作業者においてパーキンソン様の症状が多いことは労働衛生分野でよく知られているが、その発症機序として吸入したマンガンが嗅神経を介して脳に達するのではないかと考えられてきた」とナノサイズの粒子による健康被害の可能性が言及されている（広瀬・平野、740頁）。ニュージーランド･オタゴ大学ダニーデン･スクール･オブ･メディスンのドナルド･エヴァンス（Donald Evans）はUNESCO報告書所収の“Ethics, nanotechnology and health”において、ナノテクの医学的治療への応用については、新薬の開発と同様のプロセスを経るのが最も適切であると考えている（145頁）。

次に「新しいデバイスのコントロールに関する問題」であるが、不正な使用に対して、それを探知し、無力化する方法や道具の開発も平行して進めるべきであるとシュマーは主張する（87頁）。マルホールも「中未来」におけるプライバシーをめぐる攻防について書いている（マルホール、128頁以下）。これらのカテゴリーが互いに排他的なものであるとみなされるべきでないと上述したように、これは医療への応用と無関係ではなく、例えばイタリアのThe Italian National Committee of BioethicsによるOpinion on Nanotechnology（2006年）では、バイオ・サーベイランス（bio surveillance）とプライバシーの問題として、「病気の予防に用いるナノチップが、生活のモニターや個人のプライバシーを知るために用いられるという危惧」が表明されている（スパニョロら、6頁以下）。

「軍事利用」については、とりわけ、生物化学兵器、兵器の小型化を中心とした新たな軍備拡張競争の可能性が指摘される。これは機密であるため、推測に基づくしかなく、また機密とされることで公衆によるコントロールを免れることが特徴的であるとシュマーは指摘する（87頁）。

続いて、「ナノテクの生物医学的応用から生じる問題」として、エンハンスメント（増強）、ここでは特にマン・マシン・インターフェース、ブレーン・マシン・インターフェースの問題をシュマーは主に取り上げている（88 頁）。より詳細に見るために、オランダ・ラドボウド大学ナイメーヘン・メディカル・センター（Department of Ethics）のベルト・ホダイン（Bert Gordjin）[9] による UNESCO 報告書所収の“Ethical Issues in Nanomedicine” を参照すると、ナノメディシンにおける短期的な倫理的諸問題として、リスク、「治療なき診断」、中期的な倫理的諸問題として、「身体という概念に関する混乱」、「身体に対する態度が変化すること」、「プライバシーと自律」、「個人のアイデンティ

ティ」、「医療化」、「社会的不正」、「人間存在に対する見方が変化すること」、長期的な倫理的諸問題としては、「自己の知覚が不明瞭になること」、「ポスト・ヒューマン」（post-humanity）を挙げている（110 頁以下）。これらのうちのいくつかは、エンハンスメントと強く関連する。それぞれについて簡単に説明すると、ナノテクとナノメディシンのリスクは未知であるが、主にナノ粒子の健康への影響であるが、最終的な結論に至っていない [10]。「治療なき診断」とは、診断と治療の乖離であり、例えばハンチントン病のように予防できず、根本的な治療法もない疾病の診断の方針に関する問題である。中期的な倫理的問題として挙げられているのは、移植医療、プロテーゼ等により引き起こされている「身体という概念に関する混乱」という問題、生体電子工学（バイオエレクトロニクス）によるエンハンスメントの問題、身体が多数の部品から構成されているという見方が強まり、身体はより制御可能で可変的とみなされ、身体がテクノロジーの産物とみなされる、身体の商業化、商品化が進むという身体に対する態度の変化をナノテクは加速させうるという問題である。「プライバシーと自律」の問題とされているのは、生体電子工学的な介入により、人の脳が互いに結び付けられ、また脳の活動が記録されるようになり、そのような脳のネットワークから意識下において影響され、プライバシーと自律が損なわれるのではないかという問題である。さらに、個人を特徴づけるものと考えられてきた身体的・精神的能力がより可変的なものとなり、人の脳が相互に接続されるようになれば、個人のアイデンティティを維持することがより困難となるという問題が指摘される。「医療化」とは、一定数の人がエンハンスメントを選択するようになれば、他の人々も人生において成功するためにはエンハンスメントを選択せざるを得ない傾向が強まるという問題である。「社会的不正」とは、すべての人がエンハンスメントへのアクセスを持つということは考えにくいため、アクセス可能性の差により不平等を拡大させることが懸念されている。「人間存在に対する見方が変化すること」としては、人間が複雑な分子機械であるという還元主義的な見方が強まることが問題とされる。長期的には、人間がよりテクノロジーの産物となるという人間の「人工化」と、同時に、テクノロジーはより「人間化」する状況が共に進行することにより、何が人間性なのかという問題に回答することがより困難になるとされている。長期的には、ナノメディシンは人類という種を根本的に変容させ、人類について従来の仕方では語ることが不適切になる。人類がそのような「ポスト・ヒューマン」の段階に入ることが倫理的に望ましいのかという問題もある。診断に関してはスパニョロらがこれとは別の問題を指摘している（4 頁）。それは彼らが「コンピテンスの脱中心化（decentralization of competence）」と呼んでいるものであるが、ナノテクにより診断が飛躍的に簡便になることでホーム・ケア・テクノロジーへのシフトが起こり、患者がより自律的になると共に、責任もより患者の側へ移る可能性を指摘しているものである。

「ナノテクの資源の問題」とは、ナノテクが新たな希少な資源を必要とする可能と、それをめぐる資源獲得競争の可能性を指摘するものである。

他の論考に比べてUNESCOが重視しているのが、特許権との関連でナノテクが国際的な格差を拡大するのではないか、という懸念が「ナノテクの知的財産権の問題」である。そもそも特許権の保護は先進国に有利だといってよいと思われるが、例えば、先進国や多国籍企業が重要なナノテク関連の特許、基本特許を多数取得する可能性である。発展途上国が自国の必要に即応したナノテクの分野を研究することをシュマーは推奨する。ナノテク

関連の研究に世界各国で相当な投資がされていることから重複研究、重複投資が膨大であると考えて間違いないと思われる。この点でも、各国が自国のニーズを反映した研究に力を入れることは推奨されるだろう。また、ナノテク研究が先進国と発展途上国の間の格差を広げることになるとしても、それだけを理由に研究者、研究機関、企業等が研究を放棄するというのは考えにくい。研究倫理のレベルでは解決不可能であり、各国の研究開発能力の差を考えると格差に対してどのような態度をとるべきか国際的な取り組みが必要であろう。トリクルダウン理論をそのまま全肯定することはできないとしても、ゼロサムゲームでなければ、格差が広がることがあるにしても、途上国にも恩恵をもたらすことが予想される（むしろ、双方の満足度が上昇するために現実に存在している問題が覆い隠されてしまう可能性に注意すべきかもしれない）。先進国の多国籍企業が、発展途上国で雇用を創出することも現代においては十分ありうる。また、典型的にはエジソンの電球の発明のように、とりわけ特許消滅後は各国が自由に利用できる。とはいえ、「TRIPS協定は各国が公衆衛生上の必要な措置を取ることを妨げるものではない」というドーハ閣僚宣言（2001年）以後も特許権と公衆衛生の関係にいまだ課題は多い。

さらに、シュマーは他に一般的な諸問題、すなわち、自然科学系学生に対する倫理教育、技術統治、国際的な公正を挙げている（92頁以下）。技術統治については、単数形のナノテクに多額の資金が投入されている現状に対して、ナノテクのどの分野に対して資金が投入されるべきか問題にせずに一律に資金を投入する姿勢を批判（92頁）している。また、政府のプログラムがナノテクに関する誇大広告を生み出すことに手を貸してきたこと（92頁）も批判の対象となる。これは、「ナノハイプ」的な言説は各国政府がナノテク関連予算の正当性を示すために有益であったということである。国際的な公正の問題については、グローバリゼーションが進展している時代に現われてきたため、ナノテクの各分野について、発展途上国の経済状況に対して、有益であるにせよ有害であるにせよ、どのような影響を持つか評価されることが不可欠であるとシュマーは述べている（92頁以下）。

倫理的問題を生じる方向性だけではなく、従来の倫理的問題を解決する方向性についても若干触れておきたい。倫理的諸問題としてよりは各国政府の政治的な問題としてではあるが、UNESCOの報告書ではかなりの紙幅が割かれている。UNESCO報告書の“Nanotechnology and the developing world”においてエリン・コート（Erin B. Court）らは、「国連ミレニアム開発目標」（United Nations Millennium Development Goals: MDGs）、即ち、極度の貧困と飢餓の撲滅、普遍的初等教育の達成、ジェンダーの平等の推進と女性の地位向上、幼児死亡率の削減、妊産婦の健康の改善、HIV／エイズ、マラリア、その他の疾病の蔓延防止、環境の持続可能性の確保、開発のためのグローバル・パートナーシップの推進にとって、ナノテクが大きく寄与しうることに触れている[11]。こうした諸目標に対してナノテクからのアプローチが最も有効であるとは限らないが、リスクとベネフィットを秤量しなければならない場面で参照される必要があるだろう。

５　おわりに：今後さらに論じられるべき諸問題

ナノテクの臨床応用が進んでいない段階では研究における倫理性が現在の中心的な問いの一つであろう。ナノハイプについては、それが懸念を不当に覆い隠してしまう可能性を

もつだけでなく、実質的に他の分野（研究だけでなく政府などの支出が必要な他の分野）から資金を事実上奪っていることは既に述べたが、ナノハイプを離れたとしても、ナノテク関連の研究が限られたパイの中で他分野から資金を奪っているという現実がある。莫大な投資に見合うアウトカムが得られていないという現在までの研究･開発の進捗状況を考えると、公的資金を投入するとすればそれが適切だということが示されるようにしなければならないだろう。さらに、ナノテクとの関連が薄い、あるいは研究の進展がナノのスケールに程遠いにもかかわらず、ナノテク関連の資金を獲得することは、日本では既に現実的な問題となっている。

各当事者が研究･開発において、倫理的に適切な判断を重ねられるように支援、また規制するための体制を整備していくことも必要と考える。莫大な利益は、ある主体が倫理的にまっとうな判断を下すのを困難にするかもしれない。その一方で、今後ナノテク、ナノメディシンがより発展し、産業構造、例えば医療業、医療機器、医薬品業界などにドラスティックな変動があったときには倫理的判断が困難になる当事者も現れると予想される。

医療への臨床応用の場面で言えば、DDSやナノデバイスの使用など、医療がより低侵襲になっていくと、「無危害原理」は、より「身体の完全性」（bodily integrity）という観点から検討され、また理解される必要があるであろう。また、医療の発展は医療費を増大させる主要な原因とされてきたが、高齢者も適応となる低侵襲の治療法が開発されると、高齢化の進展は医療費を増大させないという医療経済学の常識が覆る可能性がある [12]。

続いて日本における「ナノ倫理」の論じられ方に目を向けると、日本では、産業技術総合研究所の取り組みなど､研究･開発に携わる研究機関等における倫理的課題に対する取り組みが突出していることが新しく、また特徴的である（産業技術総合研究所の日本の特許庁に対するナノテク関連特許出願数は、公的研究機関の中でトップクラスである）。このような状況が出来してきた背景としては、一つには、2008年時点では日本ではナノテクが社会にとって脅威であるという認識が一般的でないことを指摘できるだろう。「ナノテク」を謳った製品が既に多数上市されており､「ナノテク」に言及することで売り上げが伸びると企業側が考えていることが見て取れる。これは、小説などの影響で公衆の耳目を集めたアメリカなどとの大きな相違点である [13]。スティーヴン･スピルバーグ監督の映画『ジュラシック･パーク』などその作品の多くが映画化されているSF作家マイケル・クライトンの『プレイ』にはホダイン（110頁）も言及しているが、この小説が映画化されなかったのは日本にとって「幸運」と言えるかもしれない。加えて､「ナノ倫理」には理論として新しいことは何もないと思われがちであるために､研究･開発に携わる研究機関以外では倫理研究者の注目をほとんど集めていない。これが問題的であると考えられるのは、一つには問題設定がより限定される蓋然性が高く、また、ナノテクとナノ倫理の広範で複合的な性格に対応しきれるか疑問であるからである。問題設定の一面性について言えば、日本でこれまでナノ倫理について語られてきたことは、あまりに「社会的受容」の問題に集中していると思われる。これに関して、「遺伝子組み換え作物の二の舞を避ける」という言い方が散見される。ナノ倫理は「社会的受容」を唯一の目的としているとは言い切れないし、場合によってはある種の材料やデバイスの実用化を断念するという決断が必要になる場合もあるだろう（そもそもシーズが実用化にこぎつけるのは一握りではあるが）。また、「社会的受容」自体は、単に市民の注目を集めないことによっても達成されうる。社会がます

ます高度かつ複雑になっていく中で市民はあらゆる問題に関心を向ける余裕がますますなくなっていくとすれば、「運悪く」メディア等で取り上げられて注目を集めたもの以外の「社会的受容」は比較的容易であるかもしれない。ナノテクとナノ倫理の複合的性格については、ナノテクは複数形であり、応用される場面などは広範であることは既に指摘した。このことから、関連する技術の倫理的諸問題を扱う研究者との連携、そして各分野での研究の蓄積を十分効果的に利用できる体制の構築が重要であると考える。エンハンスメントのように、ナノテクが飛躍的に発展させる可能性を持つ各分野についてもその倫理的諸問題に関する研究の蓄積が相当あると思われるが、研究・開発に携わる研究機関以外で倫理的諸問題に関する研究がおろそかであることは、そのような蓄積を生かせるような体制になっているか疑問である。さらに、この例で言えば、ナノテクがそうした技術に持ち込まれることによって生じうるインパクトについてエンハンスメントなどの研究者が知らされていることも重要になってくるであろう。

エヴァンス（149頁）、関谷（337頁）は共に、ナノテクが初期段階にあることから個別の倫理的懸念に対処する時間的な猶予があるとしているが、国際レベルで包括的なアプローチが採られない限りは、必ずしもそうと言い切れない。これまでに言及したいくつかの事情が重なり、事前の対処が困難な場合が少なくないと予測される。その要因としては、ナノテクにおいては研究者人口が多いということからだけで他のテクノロジーなどと比べて急速な発展の可能性があり（現在までのところそうなってはいないが）、広範な分野に多数の研究者がいて一部でのブレークスルーが急激に他分野に広まる可能性があること[14]、ナノメディシンにはナノテクという広大な外部が存在すること、日本ではナノテクの倫理的諸問題についての取り組みがやや一面的であること、（棲み分け、得手不得手などによる）国際的分業などが挙げられる。国際的分業についても既に言及したが、ナノテクの医療応用は、少なくとも特許出願の段階では海外から日本に入ってくるケースが少なくないようである[15]。これは、すべての分野で見ると日本の特許庁に対する海外からの出願は全体の2割程度である（特許庁、17頁）ことと対照的である。さらに、ナノテクのポテンシャルを考慮すると、非常に長期間にわたり息の長い定期的な取り組みが必要になるであろう。

「ナノ倫理」の展開が他分野での問題の存在に気づかせることもある。既出の事例では、「ナノテクノロジーにおける懸念と同調するように大気環境中のナノ粒子・ナノ材料に対する問題意識が高まってきた」という指摘もある（平野、37）。

また、ナノテクの外側に出て行く方向性にも留意しなければならないと考える。ナノレベルで開発された技術、アイデアなどが、ミクロンあるいはそれより大きなレベルで用いられるということもありうる。例えば、フレイタスの1998年の論文で言及される医療用ナノマシンをホダイン（106頁）が紹介しているが、挙げられているものは500nmを超えているため、一般的な定義によれば「ナノテク」の範疇に入らないことになるのではあるが、ナノテクの場合と同様の倫理的懸念を惹起する可能性がある。

以上、本稿はナノテク、特にその医療への応用における倫理的諸問題を列挙することに終始した。スペースの都合で割愛せざるを得なかった事項、より詳細な検討については後の機会に譲ることとしたい。

〈参考資料・文献〉（ウェブサイトの確認は 2008 年 12 月末日）

産業技術総合研究所『きちんとわかる　ナノバイオ』産総研ブックス、白日社、2008年

産業技術総合研究所ナノテクノロジー戦略ワーキンググループ編『産業展開のためのナノテクノロジー戦略－社会受容の動向と課題－』工業調査会、2008年

関谷瑞木「ナノテクノロジーの倫理的･法的･社会的影響－課題と情報発信について」阿多誠文編『ナノテクノロジーの実用化に向けて－その社会的課題への取り組み－』技報堂出版、2008年

柴田清「「ナノテクノロジー」編集にあたって」、『ナノテクノロジー』科学技術社会論研究6、科学技術社会論学会、玉川大学出版部、2008年

五島綾子、竹中厚雄、柳下皓男「日米におけるナノテクノロジーの解釈と研究開発の相違－カーボンナノチューブを事例にして－」、『ナノテクノロジー』科学技術社会論研究6、科学技術社会論学会、玉川大学出版部、2008年

特許庁編『産業財産権の現状と課題　グローバル化に対応したイノベーションの促進』発明協会、2008年

平野靖史郎「ナノ粒子･ナノ材料の健康問題－その1－ナノ粒子健康影響の動向」、『日本衛生学雑誌』第63巻第1号、2008年

広瀬明彦、平野靖史郎「ナノ粒子･ナノ材料の健康問題－その3－ナノ粒子の毒性・健康問題」、『日本衛生学雑誌』第63巻第4号、2008年

廣田亮平「特集1　ナノバイオ医療革命」、『東京大学テクノロジー&サイエンス―シーズとニーズをつなぐ技術・科学の研究動向』第1号、日経BPムック、2007年

ダグラス・マルホール（Douglas Mulhall）、長尾力訳『ナノテクノロジー・ルネッサンスーナノテクノロジー･ロボット工学･遺伝子工学･人工知能が開く輝ける人類の未来』アスペクト、2003年

NEDO 海外レポート　No.932、2004 年 6 月 2 日
http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/932/932-02.pdf

Freitas, Robert, “What is nanomedicine,” *Nanomedicine,* Volume 51, Issue 6, June 2005, Pages 325-341

Spagnolo, Antonio G. and Daloiso, Viviana, “Outlining Ethical Issues in Nanotechnologies,” *Bioethics*, Blackwell Publishing,（2007）
http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/120173940/HTMLSTART

Gary, Stix, “Jacking into the Brain,”*Scientific American*, November (2008)

ten Have, Henk A. M. J. (ed.), “Nanotechnologies, Ethics and Politics” Ethics Series, UNESCO Publishing (2008)

〈注〉

1　The National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution (http://clinton4.nara.gov/WH/New/html/20000121_4.html)

2　Table1 “A partial nanomedicine technologies taxonomy”による。フレイタスはこの表をあくまで「部分的な」分類であるとしている。

3　後述するクライトンの『プレイ』においても、ナノ粒子の複製は大腸菌が担っている。

4　ただし、当然のことながら DDS という考え方自体はナノテク以前から存在する。

5　これについて、「健康への影響を懸念した CNT の製造企業である Hyperion Catalysis

では、製品である CNT を粉末状ではなく、プラスチックに埋め込んだ形で出荷し顧客に渡している」という例もある（ナノテクノロジー戦略ワーキンググループ、236 頁）。

[6] 「ハイプ」（hype）とは、「誇大広告」を表す英語の俗語である。

[7] National Nanotechnology Initiative, What is Nanotechnology? http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html

[8] 7 頁。引用されている見解は主に人体への ICT インプラント（Information and Communication Technology Implant)を念頭に置いている。

[9] カタカナ表記は、オランダ語の標準的な読み方に従った。

[10] ナノメディシンにおけるリスクとしてスパニョロらの指摘を要約的に示すと、主にナノサイズの粒子を扱うというナノテクの特質から、ナノパーティクルは細胞に入り込み、自然免疫をすり抜けうる、臓器や組織に入り込んだナノパーティクルが不確定の期間そこにとどまる、自然の構造で毒性を持たない物質もナノレベルで用いれば毒性を示しうる、反応性が高い（ナノ粒子は当然のことながら質量に対する表面積の割合が高く、またほとんどの化学反応は表面で起こるため)、といった可能性が指摘される（4 頁)。

[11] 155 頁以下。MDGs の訳語については、外務省によるものを利用した。（http://www.mofa.go.jp/Mofaj/gaiko/oda/doukou/mdgs/handbook.html）

[12] 例えば、大阪大学医学部附属病院では通常心臓移植手術の適応とされない 60 歳以上の高齢者に対して埋め込み形補助人工心臓の永久的な使用を行い、2008 年 11 月に 74 歳の患者が退院した。http://www.asahi.com/health/news/OSK200811260015.html（2008 年 11 月 26 日）

[13] 2004 年の NNI 会議では、「大衆は誤報に影響されやすく、ナノテクノロジーに関する恐怖に身をやつしがち」（George Allen 上院議員）である、また（必ずしもナノテクノロジーではないが）アメリカの「国民の 29%が、究極的にはテクノロジーが地球を破壊すると信じている」（商務省技術局上級政策アナリスト John Sargent）という発言がなされている。（NEDO 海外レポートより）

[14] 「2015 年までに、世界全体で 200 万人（米国で 80-90 万人、日本で 50-60 万人）のナノテク研究者・技術者が必要と予測されている」（産業技術総合研究所、102 頁)。ナノテク関連の研究に携わる者の数は今後さらに増加する可能性がある。

[15] 「特許電子図書館」（http://www.ipdl.inpit.go.jp/Tokujitu/tokujitu.htm）の「公報テキスト検索」において「公開特許公報（公開、公表、再公表)」の要約及び請求の範囲（クレーム）について「ナノ」と「医療」を検索語として検索した。例えば 2008 年についてみると、公開特許公報は 15 件、公表特許公報は 68 件、再公表特許は 0 件あるが、国際出願を外国語で行った場合になされる公表特許公報がほぼ外国からの出願と同一視できる。単に「医療」という言葉を用いているに過ぎない場合もあるが、外国からの出願が 8 割に上り、現時点においても大多数が外国から入ってきている傾向が見て取れる。