



Photo Yasuhiro Kirano

Index

Safety-II 概念とレジリエンス・エンジニアリング

～基本原則と実装……………	北村 正晴	1
眼の水晶体の線量限度引き下げと被ばく防護について……	稲木 杏吏	7
〔コラム〕 15th Column 【小児甲状腺がん】……………	中川 恵一	12
画像診断AIについて ……………	中田 典生	13
〔放射線道場の喫茶室〕		
第2回 保健物理とその魅力……………	鴻 知己	18
〔サービス部門からのお願い〕		
ご使用者の変更連絡はお早めに……………		19

Safety-II 概念とレジリエンス・エンジニアリング～基本原則と実装



北村 正晴*

1. はじめに

表題に示すSafety-II という安全概念とレジリエンス・エンジニアリングという安全探求方法論が筆者の最近の主な活動領域である。筆者は原子力発電所に代表される複雑・大規模な社会技術システム¹を対象として、運転員を支援するための技術の開発と、関連する基礎分野の教育と研究に従事していたが最近に至り、レジリエンス・エンジニアリングという方法論^{1,2)}が世界の安全研究者の間で2000年代初頭から関心を集めていることを知り、その考え方の有用性に気付かされた。一方、Safety-II という安全概念^{3,4)}は、レジリエンス・エンジニアリングが目指す安全概念に対応しているのであるが、この概念はレジリエンス・エンジニアリングが専門家社会の中である程度認知された後の段階で提唱されている。この前後関係が、話をややわかりにくくしているのであるが、要は従来までの安全概念を、対比の都合上Safety-I という表現で表示し、これに対してレジリエンス・エンジニアリングが実現しようとする安全をSafety-IIとして定義しているのである。

本稿では以下、まず2.でこれまで受け入れられてきた安全の定義では、現実にくいつかの不都合が生じることを述べ、3.で、新しい安全概念Safety-IIを導入する。次いで、4.にお

いて、Safety-IIを実現する方法論であるレジリエンス・エンジニアリングについて概要を紹介する。さらに、この方法論を現実の場で応用するための実装方策に関して具体的事例を参照して紹介して、6.の結言につなげる。

2. 「安全」の定義の再吟味

「安全」を求める声は、現代社会に満ちている。分野を問わず「安全」が重視され、様々な安全性向上活動が実施されている。しかしこれらの活動において「安全」とはそもそも何を意味するのか、という根本的な追求がなされることは稀である。国際基本安全規格第1版 (ISO/IEC GUIDE 51:1990)ではSafety is freedom from unacceptable risk. であり、(ISO/IEC GUIDE 51:2014)では、Safety is freedom from risk which is not tolerable. であるが、いずれにしても、「何かがないこと」を通じて「安全」が実現されたと認識されるわけである。このような「安全」の定義は、感覚的には納得できるものかもしれない。しかしこの定義を実際の局面で適用しようとすると、次のような困難が顕在化する。

困難1: 「何かがないこと」を証明することは原理的に無理

困難2: 「安全」が向上すると、「安全」向上のためのフィードバック情報が獲得

1 社会技術システムとは、機械やモノを中心とした技術的システムと、組織やヒトを中心とした社会的システムが密に結合したシステムを意味する。この密結合が、システムの機能実現の上で主要な役割を果たすので、技術的システムや社会的システムを単独に取り上げて分析するようなやり方では、「安全」や「動作の継続」に関して有用な知見は得られない。現代社会の存立基盤を構成するシステム（エネルギー供給、情報通信、旅客やモノの輸送、生産工場、金融サービス、医療、消防、等）はいずれも、社会技術システムと見做すことができる。

* Masaharu KITAMURA 株式会社テムス研究所 代表取締役・所長

困難

困難 3 : 「安全」が高いシステムでの、発見し修正する (find and fix) 方式の実効性喪失

困難 4 : 「安全」と、事故や災害に遭遇した状況での「望ましい対応」との意味不一致

困難 1 は本質的難点と言える。「何かがないこと」という欠性語 (privative) 形式の定義を採用する限り、それが成立していることを証明することは不可能である。この問題点について、研究対象となる状態(ここでは「安全」)を欠性語によって定義することは、他の科学領域で稀なのに、安全学の分野でだけこのような定義が用いられているとの指摘⁴⁾もある。

困難 2 は困難 1 から派生する現実的問題点である。毎週のように事故が起きるような安全レベルの低い現場で、なんらかの安全性向上方策を導入したとする。この方策が実効性を持つならば、事故発生頻度は毎週一回から例えば毎月一回、さらに四半期に一回のように低下するであろう。つまり安全性向上の実態は、事故発生頻度の低下を通じて観測可能である。仮に安全性向上の現実に満足して、安全対策予算の削減、安全講習の廃止などの措置を行えば、その影響は逆に事故発生頻度の増大を通じて観測されよう。要するに、安全上の措置の適否に関して、事故の発生頻度が、フィードバック情報として機能しているのである。しかし安全レベルがより大幅に向上した場合には、この方式は機能しなくなる。例えば我が国の大手航空会社JALやANAは30年以上にわたり死亡事故を起こしていない。このような状況で、「何かがないこと」という視点に立って安全をマネジメントするためのフィードバック情報を導くことは困難である。

困難 3 は、安全レベルの高いシステムでは、事故が起きるとしたら、これまでに想定がなされることがなく、対策も講じられていない事象が原因であろうという認識に対応している。原子力界で経験されたTMI-2事故(1979.3)、チェルノブイリ事故(1986.4)、福島第一原子力発電所事故(2011.3)がいずれも互いに異なる原因によって生じていることは容易に理解され

よう。他の産業界でも事情は同様である。ある程度、高い安全レベルに到達した産業領域においては、深刻な事故は過去には全く経験されていない想定外メカニズムで生起しており、発見し修正するという従来方式ではその未然抑止は現実に難しいことは明らかである。

困難 4 は、我々が欲しているのは、本当に「何かがないこと」型の「安全」なのであるのか、という問いと等価である。東日本大震災直後の混乱期 (aftermath) に、多くの組織での対応行為には、優れた実践が様々な形で含まれていた^{5,6)}。大きな被害を蒙った三陸沿岸地域の道路交通網を迅速に復旧させた国土交通省東北地方整備局、東北地方東側の発電能力をほとんど失った状態から3日で80%の世帯への電力供給を再開した東北電力、通常の来院者数をはるかに超える多数の津波被災者を受け入れながら診療を継続した石巻日赤病院、JR仙石線野蒜駅近くで、内規に盲従しない柔軟な対応で乗客の安全を確保したJR東日本の乗務員と乗客の連携など、今後の防災の指針にも繋がる優れた実践の本質は「何かがないこと」型の定型的定義の範囲を大きく超えた「動作維持のための動的な対処」を含む内容となっている。

3. Safety- I とSafety- II

以上の認識を踏まえて、ヒューマンファクター研究分野のパイオニアであるErik Hollnagelは、従来の「安全」をSafety- I と名付けるとともに、困難 4 との関連で例示した「動作の維持のための動的な対処」も含む望ましい安全特性をSafety- II と名付けることを提案した^{3,4)}。

Safety- I の立場では、望ましい状況は、「変動などが何も起きずに現状が平穏に維持されること」になるし、対象とするシステムの装置や機器などの構造やその特性は確定しているという見方が取られる。この見方に立てば、社会技術システムにおいては、期待される人間の行動も事前に明確に定めうるとして、手順書の厳格な遵守が要請される。システムの動作がうまく行かない場合には、理由として装置や機器などの故障か、ヒューマンエラー

が原因として想定される。

他方、Safety-IIの立場では、社会技術システム及びその環境は時間的に不変ではなく変化を続けていて、変化こそが本来の姿であるとする。そして、それらの変化への対応、すなわち人間による適切な調整行為が、社会技術システムが動作を継続できるための本質的役割を担っているという捉え方がなされる。その適切な調整行為を重視する立場からは、人間こそシステムの動作がうまく行くための重要な鍵である。そしてシステムの動作がうまく行っている状況をよく理解して、安全の一層の向上を図るべきである、というのがSafety-IIの基本的な考え方である。

要するに、Safety-Iの視点では、うまく行かなかったこと (things that went wrong) が安全向上のための関心の対象となるのに対して、Safety-IIの視点では、うまく行ったこと (things that went well) が関心の対象となる。さらに、Safety-Iの視点では、想像される業務遂行のあり方 (Work-As-Imagined: WAI) が対象となるのに対して、Safety-IIの背景には、実際になされる業務のあり方 (Work-As-Done: WAD) が対象となる。WAIは設計者、管理者、規制担当者などが認識する業務のあり方であり、WADは現場第一線の実務者が認識し、実際に実行する業務のあり方である。WAIは手順書的、理論的な業務遂行のあり方に対応しているが、WADは現場での実務に対応しており、その重要な構成要素として、人間による調整 (adjustment) の寄与があることが指摘されている。

システム動作がうまく行った際には、その背後に、様々な外乱や変動に適切に調整する努力があることは、例えば、航空機の運航を見直してみれば明らかであろう。駐機状態からのトーイングカーによるプッシュバック、地上滑走、離陸待機と離陸、上昇、水平飛行、目的地接近と降下、着陸、滑走、駐機まで、各段階で多種多様な調整がなされている。その調整に際しては、航空管制官とパイロットの通信が主要な役割を担うが、さらに航空機コックピット内、管制官チーム内などでも調整が間断なくなされている。

他にも、医療施設での緊急手術、鉄道の運転 (運輸) 指令、中央給電指令所での系統運用、コンビニの物流マネジメント、などのあり方をご想像いただければ、調整行為の重要性は明白であろう。

この事情を2つの観点から説明しておこう。ある社会技術システムで、着目する期間内に経験された、うまく行った事象、うまく行かなかった事象を円グラフ形式に要約すると、図1のような結果が得られる。うまく行かなかった事象の発生数は、通常、うまく行った事象の発生数より格段に小さいから、図1の円グラフでは、うまく行かなかった事象群は、扇型ではなく一本の線分に縮退している。Safety-Iの視点では、この線分に含まれるうまく行かなかった事象 (事故) が詳細に調査分析され、教訓が導出される。しかしその教訓だけでは、困難3で述べた問題点の解決には寄与しないのである。逆に言えば、線分に含まれない、圧倒的多数のうまく行った事象群には教訓は含まれていないのであろうか。この点について考察するため、円グラフの事象を、うまく行ったこと、行かなかったことの2分法ではなく、パフォーマンスの変動に着目して図2のようにもう少し詳細な度数分布に要約したとする。事象数が多数であれば、結果は、近似的に標準正規分布形式に整理できよう。

図2の標準正規分布で、左端のテール部分 (例えば横軸で-3.5以下に対応する領域) は、パフォーマンスが著しく低い、すなわちうまく

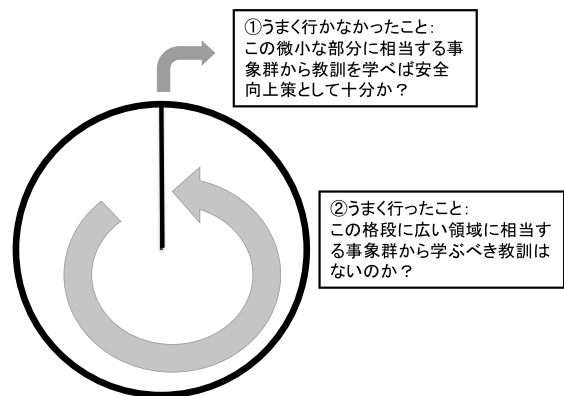


図1 経験された事象の要約

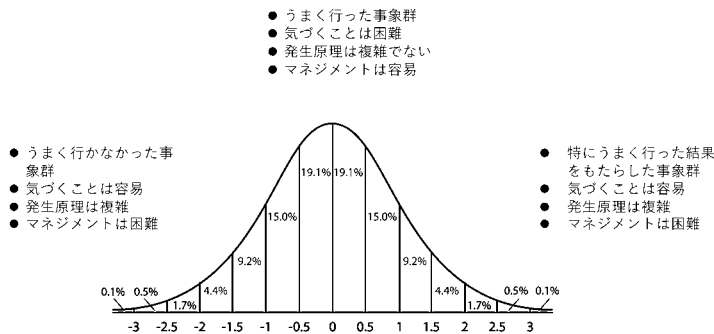


図2 経験された事象の詳細な要約

く行かなかった事象群に対応している。また右側のテール部分（例えば横軸で+3.5以上に対応する領域）は、特にうまく行った事象群に相当している。Safety-Iの視点では、左側のテール部分に相当する事象群が調査・分析と教訓獲得の対象になる。一方、Safety-IIの視点では、全ての事象が対象なのであるが、特に分布の中央部（例えば-2.0～+2.0の範囲）に対応する事象群について、程度の差こそあれうまく行っている要因群を明らかにして、それらの継続的活用を考えることが基本となる。

この事象群の分析手法としては、参与観察やインタビューが中心となるが、その効果的な実施のためにはそれなりのインタビュースキルが必要であり、技術者にとっては必ずしも容易ではない。代替方法論として、次に紹介するレジリエンス・エンジニアリングが有望と考えられる。

4. レジリエンス・エンジニアリング

レジリエンス・エンジニアリングは、Safety-IIを実現するための方法論として位置付けられる。「レジリエンスとはどのような性質を意味するのか」については定義の変遷があったが、現在では本稿で説明する内容で認識が共有されている。

一部繰り返しになるが、レジリエンス・エンジニアリングでは、社会技術システムは以下のような特性を持つという立場を取っている。

a. 対象システムもそのシステムを囲む環境も変化を続けている。

b. そのため対象システムの状態に関して、システム分析者が完全な情報を獲得することはできない。

c. システムにとって重要な課題は、変化する条件下でも動作を継続することである。動作の継続が最優先課題であり安全最優先が目的ではない。ただし安全は動作継続のための重要な要件である。当該シ

ステム運用関係者や公衆に安全上の問題が生じた場合には、動作が継続できなくなる。

現代社会の社会技術システムは、以上のような性質で特徴付けられている。この社会技術システムがレジリエントに機能できるためには、システムが以下の4種類のポテンシャルを有していることが必要であると、レジリエンス・エンジニアリングでは主張する⁴⁾。

①対処するポテンシャル(potential to respond)
：今直ちに何をすべきか知っていて、それを実行できるポテンシャル

②監視するポテンシャル(potential to monitor)
：事態の進行を実効性のある監視指標に注意を払って監視できるポテンシャル

③学習するポテンシャル(potential to learn)
：過去の成功と失敗からどんな教訓を引きだすべきか知って学習し、その教訓を習得できるポテンシャル

④予見するポテンシャル (potential to anticipate)：より長期的にどのような脅威と好機が出現しうるかを予見できるポテンシャル
「ポテンシャル」という表記を「能力 (ability)」と置き換えても大きな間違いではない。事実、レジリエンス・エンジニアリング分野の論文や書籍^{1,3,5,6)}でさえ、「能力」という表記を採用していた。しかし、2018年にこの表記が提唱⁴⁾されると、その採用が急速に進んでいる。「○○する能力」と表記すると、「○○ができる/できない」のように、決定論的な意味合いで理解されることが懸念される。「○○するポテンシャル」には、「○○する可能性を持つ」という意味合いがあることから、創発的に発現するレジリエンス性を表現するには、決定

論的な「できる/できない」より適切な表記なのである。

これらの4つのポテンシャルの必要性は、演繹的に導出されたわけではなく、常識的な意味で、以下のように説明されている。

- 1) なんらかの原因によってシステムに外乱や変動が生じた時、それらに適切に対処することができない社会技術システムは存続が困難になる。それゆえ①の対処できるポテンシャルは当然必要である。
- 2) 変化が生じる都度、それに気付いて対処するという方式では、毎回、事前の備えがないままに、受動的な対処しかできず、システムは消耗・疲弊する。それゆえ、変化が実際に観測される以前に、その兆候を先行的に監視するポテンシャルも必要である。
- 3) 社会技術システムの動作環境や社会的制約などは、時間の経過につれて変化する。それゆえ、過去に利用した対処や監視の方策しか持たないシステムはいずれ不適合を起こす。変化を的確に捉えて対処や監視の方策を柔軟に適合させていく、学習するポテンシャルも不可欠である。
- 4) 未来は常に不確実さに満ちている。それゆえ、変化に対して学習するだけでは不十分であり、未来に起こりうる様々な脅威や好機を予見するポテンシャルも重要である。

以上のように考えれば、上記4つのポテンシャルの必要性は明らかであろう。

なお、これらのポテンシャルが的確に機能を発現するためには、当然ながら種々の補完的要件が充足される必要がある。対処するポテンシャルが効果的に機能を発現するためには、適切なリソース（資機材、人員、エネルギー源など）が適切に配備されていて、状況に応じて柔軟な運用が可能であることが必要である。監視するポテンシャルが機能を発現するためには、微妙な変化への気付き（noticing）能力や適切なセンシング手段が必要である。学習するポテンシャルが適切に機能を発現するためには、なんらかの意味で適切な「学習すべき事例」、特に良好な実践例に着目でき

る能力と、その事例から適切な教訓を導出できる能力が必要である。さらに予見するポテンシャルが機能を発現するためには、なんらかの原理に基づいた「未来のモデル」が必要になる。これらの条件を充足させることが、レジリエンス・エンジニアリングを現場に実装するための重要な要件なのである。

5. 実装の事例

Safety-II 概念とレジリエンス・エンジニアリングの考え方の実践的応用例（実装例）について以下に紹介する。ただし紙数の制約から骨子だけを述べるので、具体的な内容については参考文献^{5~8)}を参照いただきたい。

5.1 事故からの教訓導出

事故調査に際して一般には、「何がうまく行かなかったのか」に関する調査に重点がおかれ、事態収束過程に含まれている良好実践からの教訓導出はほとんどなされていない。東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、1F事故）についても、状況は同様である。筆者は事故当時、現場での対応を行った当該発電所の幹部と協働して1F事故の収束に寄与した良好実践の同定と教訓導出を行ってきた^{7,8)}。その結果、良好実践同定に際しては、4つのポテンシャルや補完的要件に対応する重要な語彙（対処する、監視する、予見する、リソース、気付き、能動的など）をガイドワードとして、事故記録（1F事故について言えば、東京電力による1F事故調査報告書や関連インタビュー記録など）を分析することが効果的であることを明らかにしている。また、教訓としては、レジリエンス・エンジニアリングの原則をそれぞれに現場の状況に適合させて活用することで、事態の深刻度を低減できることが（半ば予想されたことだが）確認されている。

5.2 組織のレジリエンス評価

対象システムのレジリエンス（言い換えれば前述の4つのポテンシャル）がどのような状態にあるか、がアセスメント（客観的評価）できれば、それを向上させるための方策についても示唆が得られるはずである。4つのポテン

シャルのそれぞれが、高いレベルにあれば、そのシステムのレジリエンスも高いレベルにあると判断できるからである。このアセスメントを行うためのインタビュー用質問群の基本形と、それを特定の産業現場向けに適合化した例が公開⁴⁾されている。このレジリエンス評価方式は、レジリエンス・アセスメント・グリッド (resilience assessment grid : RAG) として知られている。筆者はこのRAGを複数の産業現場に適用して有用性を確認している。

5.3 メタ知識としての活用

4つのポテンシャルは、社会技術システムのレジリエンスを向上させる以外にも広範な応用性を有している。一般的な作業現場においても、4つのポテンシャルは業務の質的向上に重要な役割を果たすことができる。

緊急時の対応に際して、様々な専門的知識や能力 (technical skill ; TS) が必要なことは当然であるが、それらのTSが、4つのポテンシャルの発現を促す形で統合活用されると、現場の緊急時対応能力の向上に結びつく。また最近では、TSの発揮を効果的に支援するノンテクニカルスキル (non-technical skill ; NTS) の重要性が認識され始めている。具体的なNTSとしては、状況認識、意思決定、コミュニケーション、チームワーク、リーダーシップ、などが知られているが、状況認識と意思決定は認知的スキルと呼ばれ、特に重要性が高い。これらの認知的スキルも、4つのポテンシャルの発現を促す形で活用されることが重要である。見方を変えれば、TSとNTSとが4つのポテンシャルを高める方向で集約された力量が、いわゆる「現場力」を高めると考えられる。つまり、4つのポテンシャルは、「現場力」を高めるためのメタ知識 (知識の使い方に関する知識) と位置付けられるのである。

6. 結言

現代社会が機能を継続できる背景には、多数の社会技術システムが動作を継続している実態がある。この動作継続を可能にしているのは、人間による適切な調整行為である。この認識を踏まえた新しい安全探求方法論がレ

ジリエンス・エンジニアリングであり、その結果として実現される「安全」がSafety-IIである。このアプローチによって、社会技術システム、ひいては現代社会の動作継続、健全性の維持に有用な知見が得られている。多様な科学技術分野での応用を期待したい。

参考文献

- 1) E.Hollnagel, D.D.Woods, and N.Leveson, (Eds.); Resilience Engineering - Concepts and Precepts, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot, England, 2006.(邦訳) 北村正晴(監訳); レジリエンスエンジニアリング-概念と指針, 日科技連, 2012.
- 2) Hollnagel, E., Paries, J., Woods, D.D. and Wreathal, J (Eds.); Resilience Engineering in Practice- A Guidebook, Ashgate Publishing Ltd., Surrey, England 2011. (北村正晴, 小松原明哲(監訳), 実践レジリエンスエンジニアリング, 日科技連, 2014.
- 3) E.Hollnagel; Safety-I and Safety-II- The Past and Future of Safety Management, Ashgate Publishing Ltd., Surrey, England, 2014. (邦訳) 北村正晴, 小松原明哲(監訳), Safety-I & Safety-II- 安全マネジメントの過去と未来, 海文堂, 2015.
- 4) E.Hollnagel; Safety-II in Practice - Developing the Resilience Potentials, Routledge, NY, 2018. (邦訳) 北村正晴, 小松原明哲(監訳), Safety-II の実践 - レジリエンスポテンシャルを強化する, 海文堂, 2019.
- 5) 北村正晴; レジリエンスエンジニアリングが目指す安全Safety-II とその実現法, 電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ Fundamentals Review, 8巻, 2号, pp.84-95, 2014. https://www.jstage.jst.go.jp/article/essfr/8/2/8_84/_article/-char/ja
- 6) 北村正晴; レジリエンス・エンジニアリング - 複雑化する世界の安全探求方法論, 医療の質・安全学会誌, Vol.11, No.4, pp.142-151, 2016.
- 7) 吉澤厚文, 古濱 寛, 武藤 敬子, 大場 恭子, 北村 正晴; 福島第一原子力発電所事故をふまえた組織レジリエンスの向上 (I) -Responding の構造分析について-, 日本機械学会 2014 年度年次大会予稿G2010102, 2014.
- 8) 大場恭子, 吉澤厚文, 北村正晴; 福島第一原子力発電所事故をふまえた組織レジリエンスの向上 (II) -Attitude の構成要因とその醸成-, 日本機械学会2014年度年次大会予稿G2010103, 2014.

著者プロフィール

1942年岩手県生まれ、1964年東北大学工学部通信工学科卒、1970年東北大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学 (1971年工学博士)、1970年東北大学工学部原子核工学科助手、1978年～1980年米国テネシー大学およびオークリッジ国立研究所ポストドクトラルリサーチフェロー、1992年東北大学工学部教授、2004年東北大学工学部未来科学技術共同研究センター長を経て2005年3月、東北大学定年退職、東北大学名誉教授。2005年4月から東北大学工学部未来科学技術共同研究センター客員教授、2012年株式会社テムス研究所を設立、代表取締役・所長。日本原子力学会、日本人間工学会、計測自動制御学会、ヒューマンインタフェース学会、日本保全学会、American Nuclear Societyなどの会員。

眼の水晶体の線量限度引き下げと 被ばく防護について



稲木 杏吏*

眼の水晶体の線量限度に関する国際的な議論

眼の水晶体の線量限度の設定は、国際放射線防護委員会 (the International Commission on Radiological Protection : ICRP) の1954年勧告に遡る^[1]。これは、加速器の作業員及び広島・長崎の原爆被爆者において白内障が報告されたことを踏まえたもので、この時、眼の水晶体の線量については皮膚表面からの深さを3mmで概算することとし、300mR (ミリレントゲン) /週 (≒2.85mGy/週 (水晶体を水とした場合)、1年=52週とすれば148.2≒150mGy/年となる。) が放射線作業従事者及び公衆の最大許容線量 (しきい値なし) として規定された。その後、Publication 1 (1958年) で30mSv/13週 (120mSv/年)、Publication 6 (1959年、一部1962年修正) で150mSv/年 (高LET線を除く)。また、水晶体を個別に線量限度を設定する対象臓器から除外。)、Publication 9 (1965年、一部1969年に修正) で150mSv/年 (LETの高低を問わず。水晶体を「最も放射線感受性の高い組織」に改めて包含。)、Publication 26 (1977年) で300mSv/年、ブライトン声明 (1980年) で150mSv/年と変化している^[2-5]。これは、線量限度を設定する新たな科学的根拠が積み重ねられたことに加え、しきい線量という概念の登場及びしきい線量の考え方の変化、被ばくによって生じる水晶体混濁・白内障は通常の変齢性変化でも生じるものであるため評価が困難であることに起因すると思われる。

眼の水晶体の線量限度引き下げに関して近

年国内で行われている議論の発端となったのは、2011年4月21日にソウルで開催されたICRP主委員会会合の最終日に発表された「組織反応に関するICRP声明」いわゆる「ソウル声明」である。声明の内容はPublication 118に掲載されており、そこでは最近の疫学的証拠を元に眼の水晶体の吸収線量のしきい値が0.5Gyであるとしたうえで、「計画被ばく状況での職業被ばくについて、定められた5年間の平均で20mSv/年、かついずれの1年においても50mSvを超えないとする眼の水晶体等価線量限度」が勧告された^[6]。これを受け、欧州においてはEU指令^Iにおいて線量限度の引き下げが行われた。また、カナダにおいても原子力発電所作業員の線量限度について今後引き下げが行われる予定である (原子力発電所作業員以外の線量限度は従来から15mSv/年^{II})。

国際的な議論を踏まえた国内の対応

(1) 放射線審議会における議論

放射線を使用するに際しての職業被ばくの線量限度の法的根拠は、労働者の安全衛生についての基準を定めた法律である労働安全衛生法 (昭和47年法律第57号) が基本である。しかし、放射性同位元素・放射線発生装置に

I Council Directive 2013/59/Euratom. Article 12.3.(a). (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>)

II <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-203/FullText.html>

* Anri INAKI 金沢大学附属病院 核医学診療科 助教

よる放射線障害を防止するための法律である放射性同位元素等の規制に関する法律（昭和32年法律第167号。以下「RI法」という。）、適切な医療提供体制を確保するための法律である医療法（昭和23年法律第205号）等においても、その委任法令において線量限度が定められているうえ、それぞれの所管官庁・部局が異なるという状況にある。放射線審議会はこのような状況において放射線障害防止の技術的基準の斉一化を図ることを目的に設置されており^Ⅲ、放射線審議会及びその部会である「眼の水晶体の放射線防護検討部会」において、ソウル声明に基づいた眼の水晶体の線量限度を国内法令に取り入れることの是非や取り入れに当たっての留意点について、関係団体からのヒアリングを行いつつ議論された。その結果、眼の水晶体の被ばく線量が多い医療分野において適切な防護策及び測定が実施されることを前提に、ソウル声明の規制への取り入れは可能であるとの結論が出たことから、放射線審議会から関係行政機関に対し、眼の水晶体の線量限度引き下げの意見具申がなされた^[7]。

(2) 厚生労働省における議論

上記意見具申に対し、労働安全衛生法の委任省令である電離放射線障害防止規則（昭和47年労働省令第41号）への取り入れを議論するため、厚生労働省において「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」が開催された。検討会の報告書^[8]では、

- ①線量限度引き下げの周知や放射線防護用品開発のため、一定期間（約3年）の移行期間を設けたうえで、線量限度引き下げを取り入れること。
- ②等価線量を1年、5年ブロック管理するときの始期は、実効線量のブロック管理での始期と合わせること。
- ③線量限度引き下げのための法令の施行時期は、関連法令の間で整合を図ること。とされている。

また、労働基準監督署や各保健所設置自治

体の衛生主管部局（主として保健所が当該業務を管轄する。）が、ある医療機関において線量限度を超える被ばく労働者の存在を把握した場合は、相互に情報提供を行うなどの連携を図ることにより、当該医療機関に対して適切な指導・助言を行えるような体制を整えることが望ましいとされている。したがって、例えば、医療法第25条第1項に基づく医療機関への立入検査において医療従事者の被ばく管理に問題があることが発覚し、衛生主管部局の再三の助言にも関わらず当該医療機関が適切な対応を怠った場合等において、より強力な権限（捜査権、逮捕権等）を有する労働基準監督官に対して情報提供がなされることも想定される。

(3) 国内法令への取り入れ

医療法及びRI法における実効線量のブロック管理は、1年ブロックでは4月1日、5年ブロックでは平成13年4月1日を始期としているため、令和3年（2021年）4月1日からブロック管理ができるようなスケジュール感で関係法令が施行されると思われる。

また、約3年の移行期間が適当とされているため、2024年4月頃までは移行措置が設けられることが想定される。（これは、医師の時間外労働規制の適用時期と一致する^[9]。）

線量限度引き下げに向けての現状の課題

(1) 医療従事者が受ける被ばく線量の増加

医療従事者（一般医療）の水晶体の被ばく線量は、他職種と比較して突出して高い（表1）^[10]。放射線を用いる代表的な手技における医療従事者の被ばくについての既知の文献を参照すると、特に循環器領域（血管造影、冠動脈疾患に対する経皮的冠動脈形成術：PCI）、消化器領域（内視鏡的逆行性胆管膵管造影：ERCP）の手技において、適切な防護措置を取らなければ術者の水晶体の等価線量が20mSv/年を超える恐れがあると推定される^[11-15]。いずれも、患者の生命に関わる状況で行われる可能性がある手技だけに、適切な被ばく防護を行うことは医療提供体制を維持するうえで極

Ⅲ 根拠法令：放射線障害防止の技術的基準に関する法律（昭和33年法律第162号）

表 1 業種別 眼の水晶体の等価線量(平成29年度分)

年間線量(mSv)	一般医療	歯科医療	獣医療	一般工業	非破壊検査	教育研究
20以下	362,519	2,982	15,679	63,638	413	64,032
20超～50以下	1,852	0	0	5	0	6
50超～100以下	335	0	0	1	0	2
100超～150以下	28	0	0	0	0	0
150超	6	0	0	1	0	0
合計	364,740	2,982	15,679	63,645	413	64,040
20超	2,221(0.61%)	0(0.00%)	0(0.00%)	7(0.01%)	0(0.00%)	8(0.01%)

出典：第2回眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 資料3

表 2 医療従事者の電離放射線に係る皮膚がんの労災認定

職種	主な業務内容	電離放射線業務 従事通算年数
准 看 護 師	エックス線透視を使用した大腸内視鏡検査時における患者補助等	19年
整 形 外 科 医	エックス線透視を使用した脊椎造影、神経根ブロック、椎間板ブロック等	16年
診療放射線技師	胃・腸エックス線透視撮影等	30年
整 形 外 科 医	エックス線透視を使用した脊椎造影、神経根ブロック、骨折整復固定、矯正骨切り術等	26年

いずれも慢性放射線皮膚障害の認定要件である25,000mSv以上の被ばくをしていた。

出典：第4回医療放射線の適正管理に関する検討会 資料4

めて重要である。

さらに、従来から放射線診療を行っていた診療科に加え、医療技術の進歩に伴って新たに放射線を多用する診療を行う診療科が増えつつあることにも留意しなければならない。水晶体被ばくではないが、エックス線透視の際に適切な防護措置を取ることなく医療従事者が照射野に体の一部を入れていた結果、皮膚がんが生じ労働災害として認定された事例も存在する(表2)^[16]。

(2) 水晶体の等価線量の適切な測定と算定

医療従事者の水晶体の線量限度は、特定の手技については適切な個人用防護具を身につけなければ担保することはできない。したがって、防護具の内側に術者の視野を遮らず違和感なく装着できるような放射線測定器の開発が望まれる。また、水晶体の等価線量の算定においては、1cm線量当量、3mm線量当量、70μm線量当量いずれか適切なものによって行われるのが適当とされていることか

ら、現在行われていない3mm線量当量を算定するための対応が必要である。

線量限度引き下げを契機とした被ばく低減のための対応

医療機関における放射線の使用において工業、非破壊検査、原子力等の他業種と大きく異なる点として、事業者(医療機関)の事業形態と各従事者の作業内容が一对一に対応しないことが挙げられる。すなわち、放射線を用いた作業(＝診療行為)の内容が診療科ごとに千差万別であることに加え、患者の状態に応じて診療内容が現場の判断で柔軟に変更されがち(これは、医療領域においてはやむを得ないものである。)であることから、事業者が放射線業務の詳細な作業内容を事前に、又は逐一把握することや、その診療行為が生命に直接関わる状況である場合、作業者の被ばく低減のための「仕切り直し」、すなわち

作業の中断・中止等ができないことも多い。

そのような状況において眼の水晶体を含む放射線業務従事者の被ばくを低減するためには、以下の三者が連携して対応する必要があると考える。

(1) 関係団体（職能団体、学術団体）

各診療科の医師等が所属している学術団体あるいは専門医会等の職能団体は、それぞれの診療科で普及している、あるいは現時点では研究段階だが今後普及が見込まれる放射線を用いた新規医療技術に関する見識がある。これらの団体は、所属する医師等が患者に対して当該技術を用いた医療行為を安全に提供できるよう、これらの医師等に対して、被ばく防護の方法、例えば術者の防護衣や遮へい眼鏡の装着、放射線診療機器に対する遮へいカーテンの装着、個人線量計の適切な使用・着用等の普及啓発を行うことができる。加えて、必要に応じて放射線防護の専門家と連携し、診療行為ごとに想定される様々な条件下での被ばく線量を可能な限り検証し、被ばく低減が期待される作業手順の提案、診療ガイドラインへの取り入れ等を進める必要がある。

さらに、特に医師においては複数の医療機関にまたがって放射線診療を行っていることがしばしばあることに留意する必要がある。原子力施設における放射線作業従事者の被ばく線量が放射線影響協会において一元管理されているように、放射線診療従事者等においても被ばく線量の一元管理ができる何らかの仕組みが今後必要と思われる。

(2) 事業者（医療機関）

放射線業務従事者（医療法施行規則では放射線診療従事者等）の被ばく防護は、一義的には事業者及び作業者の責務である。しかしながら、本項の冒頭で述べた通り、事業者たる医療機関がすべての診療行為に最適な放射線防護の方法を個別に検討・提案することは困難である。したがって、各医療機関は放射線関連団体や自施設の医師が所属している関係団体が提案する被ばく防護に関する知見を収集し、適切な研修の実施や必要な防護装備・個人線量計等を揃えることにより、自施設の

医師が患者に対して放射線診療を安全に提供できるような措置を図るべきである。

(3) 放射線業務従事者（放射線診療従事者等）

しばしば忘れがちであるが、医師等を含む労働者の被ばく防護のため事業者等と協力して最適な措置を取る努力は、電離放射線障害防止規則の根拠法である労働安全衛生法において、労働者自身に対して明確に義務付けられている^{IV}。また、「目の前の患者に対し、自身の持てる技術・知識を総動員して最適な医療を提供する。」という信条は（筆者も含めて）医療従事者の誰しもが持ちうるものであるが、その信条を持つことの矜持と（自身のみならず、所属する医療機関が不利益を被ることを含めた）自己犠牲的精神を混同すべきではない。

放射線診療従事者等が日常診療において最も被ばくする診療行為の1つがエックス線透視である。エックス線透視はERCPを含む消化管造影、血管造影、整形外科領域での透視下整復など幅広く用いられている。診療内容によって被ばく線量や被ばく低減のための個別の留意点はあるが、遵守すべき一般的事項を極めて簡潔に示したものとしてIAEAが作成したポスターの邦訳版があり、医療放射線防護連絡協議会のウェブサイトにてPDF版が公開され利用可能である^V。これは、エックス線透視以外の放射線診療においても基本的に適用できる。

また、個人線量計の不適切な着用により見かけの被ばく線量が高くなる可能性も指摘されていることから明白であるが^[17]、線量計の適切な使用が線量管理の大前提であることは言うまでもない。

放射線を用いた診療行為の個別の被ばく防護の手法については、所属する関係団体のガ

IV 第4条「労働者は、労働災害を防止するため必要な事項を守るほか、事業者その他の関係者が実施する労働災害の防止に関する措置に協力するように努めなければならない。」

V <http://jarpm.kenkyuukai.jp/images/sys/information/20170119195239-C9A09A289D2B7B69D23D619B17884538EB29E32C49C1642E3039EE59A585BA07.pdf>

イドライン等をご参照いただきたい。また、現在、平成31年度放射線安全規制研究推進事業「円滑な規制運用のための水晶体の放射線防護に係るガイドラインの作成」において、放射線診療を行っている領域の関係学術団体等が共同して医療分野の被ばく防護のためのガイドライン策定が進んでおり、今後利用可能になると思われるので、適宜参照されたい。

おわりに

関係学術団体・職能団体、医療機関、医療従事者等、医療における放射線診療に携わるすべての者は、今後実施される眼の水晶体の線量限度引き下げを契機に、これまでの放射線診療における労働者の安全性について改めて確認し、必要な対応を取ることで、適切な医療提供体制が維持されるよう努める必要がある。

参考文献

- 1) International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Br J Radiol, 1954. 28: p. 1-92.
- 2) International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. (Now known as ICRP Publication 1.). 1959.
- 3) International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 6. 1964.
- 4) International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 9. 1966.
- 5) International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 26. Ann ICRP, 1977. 1(3).
- 6) International Commission on Radiological Protection, *ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context*. ICRP Publication 118. Ann ICRP, 2012. 41(1/2).
- 7) 放射線審議会, 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について(意見具申), 平成30年3月2日付け原規放発第18030211号原子力規制委員会決定. 2018.
- 8) 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課電離放射線労働者健康対策室, 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会報告書. 2019.
- 9) 医政局医療経営支援課医療勤務環境改善推進室, 医師の働き方改革に関する検討会報告書. 2019.
- 10) 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課電離放射線労働者健康対策室, 第2回眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 資料3. 2019.
- 11) Morishima, Y., K. Chida, and T. Meguro, *Effectiveness of additional lead shielding to protect staff from scattering radiation during endoscopic retrograde cholangiopancreatography procedures*. J Radiat Res, 2018. 59(2): p. 225-232.
- 12) 原子力規制委員会原子力規制庁, 平成29年度原子力規制庁放射線安全規制研究戦略的推進事業「水晶体の等価線量限度の国内規制取入れ・運用のための研究」.
- 13) Minami, T., et al., *Occupational Radiation Exposure during Endoscopic Retrograde Cholangiopancreatography and Usefulness of Radiation Protective Curtains*. Gastroenterol Res Pract, 2014. 2014: p. 926876.
- 14) O'Connor, U., et al., *Occupational radiation dose to eyes from endoscopic retrograde cholangiopancreatography procedures in light of the revised eye lens dose limit from the International Commission on Radiological Protection*. Br J Radiol, 2013. 86(1022): p. 20120289.
- 15) Kim, K.P., et al., *Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures*. Health Phys, 2008. 94(3): p. 211-27.
- 16) 厚生労働省医政局地域医療計画課, 第4回医療放射線の適正管理に関する検討会 資料4. 2018.
- 17) 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課電離放射線労働者健康対策室, 第2回眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 資料7. 2019.

著者プロフィール

2005年3月	金沢大学医学部医学科卒業
2013年3月	金沢大学大学院医学系研究科修士
2015年4月	金沢大学医薬保健研究域医学系・核医学助教
2017年4月	厚生労働省医政局地域医療計画課課長補佐 (併)医療安全専門官 (併)医療放射線管理専門官
2019年4月～	現職(金沢大学附属病院核医学診療科助教)



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

小児甲状腺がん

福島第一原子力発電所の事故から9年が経過しようとしています。幸い、チェルノブイリの事故とは違い、住民の被ばく量は非常に少なく、実効線量が年間5ミリシーベルトを超える一般住民はほぼ皆無と言えます。CT検査による被ばくは1回あたり7ミリシーベルトですから、いかに被ばく量が少ないか分かります。

とくに、流通する食品の放射能については徹底した管理がなされました。米や肉などの一般食品の放射能の基準値は、EUや米国の1/12程度のキログラムあたり100ベクレルと設定されました。そして、事故翌年の2012年から米の「全量全袋検査」が開始され、2014年以降、厳しい基準を超える米袋はありません。まさに「福島の勝利」です。

その一方、福島では、甲状腺がんが診断される子供が増えています。原子力発電所事故当時18歳以下だったすべての県民に甲状腺検査を行っており、これまでに200人を超える小児甲状腺がんが発見されています。

この検査は、チェルノブイリ原子力発電所の事故後に、約7千名の子供に甲状腺がんが見つかったことから始められたものです。な

お、チェルノブイリでは、小児甲状腺がん以外には、小児、成人を問わず、いかなるがんの増加も確認されていません。

福島でもチェルノブイリと同じことが起きているといった報道も見られますが、これは誤解です。県民健康調査検討委員会の評価部会も6月、「小児甲状腺がんの多発と放射線被ばくとの関連は認められない」とする中間報告を公表しています。国際原子力機関や国連科学委員会といった国際機関も同様の報告を行っています。

牧草に付着した放射性ヨウ素は牛乳に含まれます。チェルノブイリの場合、旧ソ連政府は事故を数日間、公表もしませんでしたし、食品の規制も遅れました。また、甲状腺ホルモンの材料となるヨウ素は主に海草から摂取しますから、内陸にあるチェルノブイリの子供たちは、慢性的なヨウ素不足でした。その子供たちの目の前に、原子力発電所から放出された放射性ヨウ素が突然出現したのです。放射性であろうとなかろうと物質としての性質は変わりませんから、子供たちの甲状腺に莫大な放射性ヨウ素が取り込まれてしまいました。

就学前の子供の5%近くが5,000ミリシーベルトを超える甲状腺被ばくを受けた一方、被ばく量が50ミリシーベルト以下はわずか0.2%にすぎません。

福島の子供では99%が30ミリシーベルト以下ですから、チェルノブイリと福島では、甲状腺の被ばく量が桁違いに違います。

福島では、もともと子供たちが持っていた「無害な」甲状腺がんを、精密な検査によって発見しているにすぎません。がんが「増加」しているのではなく、「発見」が増えているのです。

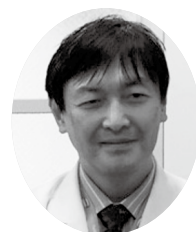
小児甲状腺がんの検査は東京で行っても、福島と同じ割合で患者が見つかります。福島での甲状腺検査を中止することが医学的には望ましいと言えるでしょう。

食品の規制値の比較

	日本 基準値 (2012.4 ～)	コーデック ス委員会	EU(域内の 流通品)	アメリカ
飲料水	10	1000	1000	10
牛乳	50	1000	1000	1200
一般食品	100	1000	1250	1200
乳児用食品	50	1000	400	1200

単位はベクレル/キログラム

画像診断AIについて



中田 典生*

はじめに

現在のAIブームは第三次AIブームと呼ばれており、その核になっている技術はディープラーニング（Deep Learning）と呼ばれる手法である。ディープラーニング（以下DL）を初めて知ったのは、TEDという欧米の教育ネット動画サイトのひとつでジェレミー・ハワードの“自ら学習するコンピュータの素晴らしい可能性”¹⁾ という2014年12月に記録されたスピーチである。筆者はこれを公開後すぐに視聴して、その衝撃的内容にショックを受けたことを鮮明に記憶している。早速2015年初頭よりDLについて調べ、この分野の日本での新進気鋭の研究者の一人である電気通信大学情報学の庄野逸教授に面会しに東京都下調布市に行ったことを記憶している。DLについてある程度知識を蓄積した後、小生のメインの学会である北米放射線学会（RSNA）で、2014年までDLの研究発表がないことに気がついた。これまでRSNAでは、DLの元になっているニューラルネットワークについては、数多くの研究発表がなされており、特にシカゴ大学放射線科カートロスマン放射線研究所所長の土井邦雄教授（当時）のコンピュータ支援診断の研究は、RSNAでも大変有名であった。しかしDeep Learningという名称が入った研究発表がそれまでなかったので、筆者はRSNAにDLに関するコンピュータ教育展示

（Deep learning and artificial intelligence [AI] user interface for future radiology: What radiologists should know about AI and conversational computing?）を提出し2015年のRSNAで発表した。これが、RSNAにおけるDeep Learningの名称をつけた初めての研究発表となった。以後、画像診断における機械学習特にDLの近年の進歩はめざましいものがある。現在も時々刻々と技術革新が進みつつある。

ディープラーニングとは

DLは、人工知能（AI）の研究分野のうち機械学習に分類されている（図1）。機械学習の定義とは、「明示的にプログラムしなくても学習する能力をコンピュータに与える研究分野」であると1959年にIBMの研究者アーサー・サミュエルにより定義された²⁾。サミュエルは当時、チェスをコンピュータにさせる研究をしていた。しかしチェスの棋譜を全部プログラムとして記述するには膨大な手間と時間がかかるため、棋譜をプログラムなしに学習させた方が効率がよいとして機械に学習させる、すなわち機械学習の研究を行っていた。この逸話から、機械学習とは全くプログラム不要であるというわけではなく、プログラムの一部に機械学習を組み込むというイメージで使われる。

* Norio NAKATA 東京慈恵会医科大学 ICT戦略室／放射線医学講座 准教授

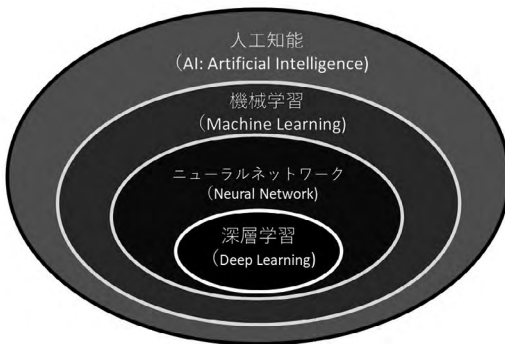


図1 人工知能の分類

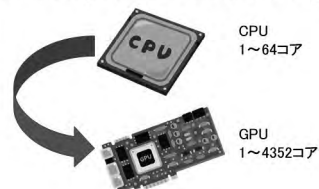
またDLとは、多層構造のニューラルネットワーク(ディープニューラルネットワーク、英: deep neural network)を用いた機械学習である。ニューラルネットワークは、人間の神経回路(ニューロン)をシミュレーションしたモデルである。画像診断では、マンモグラフィ(MMG)のコンピュータ支援診断(CAD)において一定の成果をあげており、現在までに製品化されているMMGのCADはニューラルネットワークを利用したものである。しかしニューラルネットワークは、画像の特徴抽出を開発者が考えなければならないので、アルゴリズム作成に開発者の職人的技術、コスト、時間を要する。これに対してDLは、ニューラルネットワークを多層化し、かつ機械学習による元となるデータをコンピュータ自ら学習してアルゴリズムを作成するという機械学習としての特徴がある。DLは単なるニューラルネットワークに比べると開発者の職人的技術は必要ない。AIの専門家以外にDLの進歩が注目されるようになったのは2012年にカナダ・トロントのジェフリー・ヒントンの研究成果によって、世間に広く知られるようになったからである³⁾。しかしDLの研究は1980年代から動物(人間)の視覚のシミュレーションから始まり、様々な研究者による地味な仕事の積み重ねの上に成り立っている。前述のヒントンは2012年に画像認識にDLを活用した。これによりDLは画像認識(Computer Vision)の技

術革新から始まり、現在のように広く知られるようになった。

ディープラーニングに必要なもの

DLには、GPGPUなどの高速な計算が可能なハードウェア、それをコントロールするソフトウェア、そして学習用の膨大なデータが必要である。DLが考案された時期よりやや早い2006年ころより、GPU(Graphics Processing Unitの略)を活用してCPUよりも高速に計算するGPGPU(General-purpose computing on graphics processing units; GPUによる汎用計算)の仕組みが考案された(図2)。GPUはコンピュータグラフィックの高精細化に伴い、急速に進歩した。これに伴い、GPGPUを用いた計算能力も飛躍的な進歩が認められ、多方面への応用が広がっていった。DLは、このGPGPUが最も活用可能である分野となり今日に至っている。また画像認識のDLの性能向上には、膨大なDL学習用データセットが必要であった。この教師学習用画像データセットとして有名なのが、スタンフォード大学のフェイフェイ・リーらが構築したImageNetである。ImageNetには、インターネット上の1,400万枚以上の画像に教師学習用の答えをつけて公開されている。このImageNetによりDLを用いた画像認識の性能が飛躍的に向上し、DLが人工知能における革新的技術

GPGPU: General-Purpose computing on Graphics Processing Units



グラフィックス処理以外の演算をGPU行わせるようにしたのが“GPGPU”

図2 GPGPUとは

であることを証明した。現在、DLに使われている大部分の画像認識用AIアルゴリズムは、ImageNetでの学習済みアルゴリズムである。

放射線科画像診断におけるディープラーニング研究の現状

現在放射線科医にとってDLをはじめとするAIの技術革新が問題なのは、この技術があまりに秀逸で絶対的技術であるため、AIの専門家が将来の放射線科医の教育のあり方に対して警告を発していることにある。また現在の予測では、2022年ころまでにはマンモグラフィと胸部単純X線写真の診断支援からDLを用いた技術が応用されてAIを用いた読影が可能になると予測する研究者もいる。その一方で、この予測のようにではなく、そう簡単に放射線科医の読影がAIに置き換わることはないとする意見もある⁴⁾。

2019年12月にシカゴで開催されたRSNA年次総会では、AIの企業・団体展示が約120もあり、盛況であった(図3)。米国をはじめ、英国、フランス、ドイツ、スペイン、中国、韓国、日本、シンガポールなど世界各国からAI医療機器を開発しているベンチャー企業が集まった。従来からある胸部単純X線写真やマンモグラフィの読影支援や、胸部CT結節検出診断支援のAIの他に、放射線治療計画の支援

をするAI、頭部MRI/CT、全身CTの骨折検出、乳腺・甲状腺超音波などの診断支援AIも多く展示されるようになってきた。

欧米では2019年11月現在、FDA¹⁾(米国)、CE²⁾(欧州)合わせて119ものAI医療機器が認可されている。日本でもようやく内視鏡分野でのAI診断支援ソフトウェアが認可されたが、まだ欧米に比べて圧倒的に認可された件数が少ない。一方でAIを用いた3Dカメラを備えたCTやMRIなど診断支援ソフトウェアではない分野でAIを活用した画像診断機器は、日本でも市販されるようになった。またCTやMRIの画質改善にAIが活用されるようになってきた。CTのraw dataであるsinogramやMRIのraw dataであるk-spaceの画像を用いたAIにより低線量被曝CTやMRIの画質改善や検査時間の短縮などの技術が開発されつつある。さらに、AIカメラの病院内設置による外科手術の定量的評価や病院内の院内感染の防止システムの研究も進められている。放射線治療については、CTリニアック装置やMRIリニアック装置にAIが活用されることにより、CTやMRIによる放射線治療計画がより短時間かつ正確に行われるようになる。これらの研究開発により、AIの医療分野への活用のノウハウが蓄積されており、開発されたソフトウェアや医療機器の性能評価の手法とともに様々な創意工夫をみられてきている。

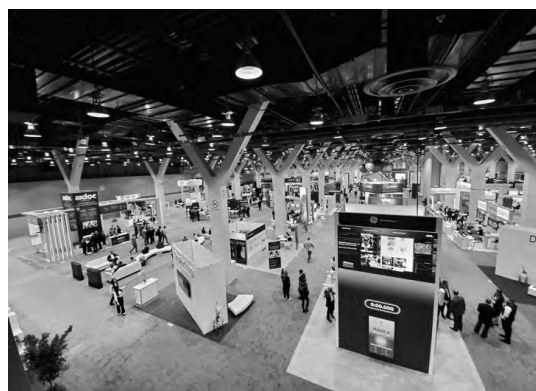


図3 RSNA2019のAI医療機器展示会場
“AI Showcase”

畳み込みニューラルネットワークの画像認識(病変検出)技術について

DL、特に画像認識に用いられる畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network以下CNN)は以下にあげる理由により、その画像認識の精度がこれまでのニューラルネットワークなどと比較して飛躍的に向上したことが特徴である。

- 1 アメリカ食品医薬品局
- 2 EU加盟国の基準を満たした製品であることを示す



図4 ネオコグニトロンの発案者である
福島邦彦先生(右)と筆者(左)。

- 1) CNNの原型であるネオコグニトロンは人の後頭葉の第一視覚野にある単純型細胞と複雑型細胞の機械によるシミュレーションを改良したものである(図4)⁵⁾。
- 2) 2010年から始まった大規模画像認識の競技会ILSVRC(ImageNet Large Scale Visual Recognition Competition)では、2012年にDLを用いたチームが優勝して以来、年々画像認識のエラー率が低下して飛躍的技術向上がみられ、2015年には人間の画像認識能力を超えたこと。
- 3) インターネットが進歩したため、大量の画像データの収集、転送、処理が可能となり、AIの学習が効率よく行えるようになったこと。
- 4) 大量の画像を学習するには、ある程度の時間(日単位)を要するが、学習が終わって完成されたアルゴリズムを使って行う、実際の画像認識はほぼリアルタイムに実行可能である。
- 5) 乗用車の自動運転や監視カメラシステムにおける人物認識技術の進歩など、DLが実用化されつつある産業分野があること。

このようにCNNは、DLを用いた画像認識の世界では定番となっており、今後も改良が加えられていくものの基本的構造は同じものを継承して使われていくと考えられている。放射線科領域の画像認識の研究開発においてもCNNは欠かせないDLのひとつである。

ディープラーニングによる読影レポート作成の可能性について

AIによる画像認識の技術がほぼ完成に近づいてきたことから、現在のAI研究の最前線の研究分野は自然言語処理に移りつつある。自然言語処理で最も進んでいるのは、画像をCNNなどで認識した結果から説明文(キャプション)を作成する画像キャプションの分野である。医用画像のキャプションはすなわち読影レポートである。DL技術の中でも最近注目度上昇中なのが、再帰型ニューラルネットワーク(Recurrent neural network以下RNN)である。RNNは文書解析に適しており、自然言語処理で成果をあげている⁶⁾。画像キャプションの分野は、画像認識ほど技術が完成されてはいないが、RNNを用いた研究が前述のCNNと組み合わせて用いられており、特に画像キャプション作成の研究は着実に進歩している。

ディープラーニングに関する最新技術

従来、DLには最低1,000枚を超える大量の教師画像を用いた学習が必要であるため、稀な症例の画像診断は不可能ではないかとされていたが、近年、転移学習(Transfer Learning)と画像生成技術のひとつである敵対的生成ネットワーク(Generative Adversarial Networks、以下GAN)が注目されている。転移学習は、すでに作成されたAIアルゴリズムを元に新しい別のアルゴリズム作成を始めると、元のAIアルゴリズムがない状態より、教師画像が大幅に少なくて済むという現象で、今後AI開発が進むにつれて、教師付き画像が大幅に少なくとも、AIアルゴリズムが作成可能になる可能性がでてきた⁷⁾。しかし研究はまだ始まったばかりであり、現在のところ医用画像においてその有用性が完全に確認されたわけではない。転移学習が今後進歩すると、現在進行中の大規模な教師付き画像データ

ベースを構築するプロジェクトが途中で必要なくなる可能性もある。2012年にDLを用いたグーグルの猫実験（AIに猫という画像概念を作成させた実験）を主導したAndrew Ngによると、2016年からは転移学習が劇的に進歩するのではないかと予想している。またGANを用いることにより、AIが直接学習したことがない画像であっても、キーワードから類推して生成された画像により未知の画像診断を類推する技術が現在研究されている⁸⁾。これらの新しいDLの技術を用いて稀な疾患の画像診断が可能になる可能性がでてきた。またGANを用いてMRIとCTなど異なるモダリティの画像の比較や、同じモダリティでも低画質を高画質に変換することなどに臨床応用されつつある。

まとめ

20-30年単位の長い年月の将来を考慮すると、AIによる医用画像の読影は可能であるかもしれない。しかし、膨大な画像データと時間をかけて画像診断学で得られた知見も活かして、これから長い間研究開発が必要であることは間違いない。AI研究に従事する者としては、目の前に広がる大海を前にして研究意欲が掻き立てられるし、すでに世界中で多くの研究開発が進みつつある。ハーバード大マサチューセッツ総合病院の放射線科副主任のKeith Dreyer准教授によると、放射線科画像診断は、人間が行う画像認識のうち最も高度な技術を要するものであり、そう簡単にAIが置き換わるとは考えられないと主張している。しかし同時に急激に進歩しつつあるDLの各種技術については、放射線科医はもっと理解を深める必要があるとも述べている。これからはAI対人間の戦いがおきるのではなく、AIを使わない人間とAIを使う人間の競争が始まるのである。

参考文献

- 1) 日本語TED: ジェレミー・ハワード: 自ら学習するコンピュータの素晴らしい可能性
<http://www.ted-jp.com/2015/01/jeremy-howard-the-wonderful-and-terrifying-implications-of-computers-that-can-learn.html>
- 2) 機械学習の定義, Fookie Monster, note
<https://note.com/fookiemonster/n/ncd9c0b79d799>
- 3) ImageNet Large Scale Visual Recognition Competition 2012 (ILSVRC2012)
<http://image-net.org/challenges/LSVRC/2012/results.html>
- 4) How will AI affect radiology over the next 20 years?
<http://www.auntminnie.com/index.aspx?sec=ser&sub=def&pag=dis&ItemID=117460>
- 5) Kunihiro Fukushima, and Sei Miyake.
"Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of visual pattern recognition." Competition and cooperation in neural nets. Springer Berlin Heidelberg: 267-285, 1982
- 6) Recurrent Neural Networks Tutorial, Part 1 - Introduction to RNNs - WildML
<http://www.wildml.com/2015/09/recurrent-neural-networks-tutorial-part-1-introduction-to-rnns/>
- 7) Transfer Learning - Machine Learning's Next Frontier
<http://sebastianruder.com/transfer-learning/>
- 8) Goodfellow, Ian, Pouget-Abadie, Jean, Mirza, Mehdi, Xu, Bing, Warde-Farley, David, Ozair, Sherjil, Courville, Aaron, and Bengio, Yoshua.
Generative adversarial nets. In Advances in neural information processing systems, pp. 2672-2680, 2014

著者プロフィール

東京慈恵会医科大学
放射線医学講座 准教授
総合医科学研究センター超音波応用開発研究部 部長、
附属病院超音波診断センター センター長、情報通信
技術 (ICT) 戦略室 室長

【略歴】

1988年 東京慈恵会医科大学医学部卒業
1993年 日本医学放射線学会放射線科専門医取得
2011年から東京慈恵会医科大学医学部准教授
2017年 厚生労働省 保健医療分野におけるAI活用推進懇談会構成員
2019年 国立山形大学 工学部機械システム工学科 非常勤講師

【学会】

日本メディカルAI学会 顧問
日本医用画像工学会 常任幹事
RSNA RadioGraphics誌 (Informatics担当) Reviewer
RSNA Radiology: Artificial Intelligence誌 編集委員 (Associate Editor)
RSNA2017~RSNA Scientific Session (口頭発表) Program Committee委員

放射線道場の喫茶室
第2回

保健物理とその魅力
鴻 知己



60年程前、当時「保健物理学の父」と呼ばれていたK.Z.Morgan博士が来日した時、若気の至りで「保健物理の定義は何か」と質問した。即座に返された答えは「放射線防護の科学」であった。

この学問は、19世紀の末に人類が放射線の存在を知り、文明推進の手段として利用を始めたときに誕生したものであるが、先の世界大戦が終焉を見た頃から大きく発展し、今日では、社会の維持・発展に必要な科学・技術の一分野として自他ともに認める存在となっている。放射線防護（RP）は先の世界大戦のさなか「マンハッタン計画」（原爆開発の秘密プロジェクト）の中で大きな役割を担うことになったが、“計画”の性格から、一見しただけでは“体の正体”把握が困難なHealth Physics（保健物理）という“表現”が使われたものと思われる。米国以外でも広く使われてきたが、今も使い続けているのは本家米国と日本ぐらいのminorityである。

RPは典型的な実学であり基礎（研究）と応用（実務）の二面を持つ。人は、生まれつき、“知る喜び”と“作る喜び”を持ち合わせているが、その持ち合わせの度合いには個人差がある。その個人的傾向がどうであれ、自分に合った“喜び”の素が容易に見いだせるのがこの分野の最大の特質である。基盤を支える関連学問は実に広域で、好奇心の強い人は“選択の迷い”に悩む。

生き甲斐とは“感動すること”というのが、長年探し求めた末、還暦を過ぎて漸く悟った筆者の答えであるが、感動は、目的を設定しそれを達成したときにだけ得られるものではない。ゲーテが説いたように、人生は“生きること”自体に価値があるのであって、その過程にこそ様々な“感動の素”が潜んでいるのである。

ルネ・デカルトは人間とそれ以外の自然の間に峻別の楔を打ち、これまでの伝統的な科学・技術は人間を離れた自然の理の^{コトワリ}解明とその結果を利用する形で発展してきたものといえるが、RPでは“人間の自然との関り”も大変に重要なものとなっているので、これまでの伝統的な科学・技術とは“極めて異なる”味わいもあることを強調しておきたい。“人様の役に立つこと”を生き甲斐に挙げる人達にも魅力のある“生業候補”なのである。



サービス部門からのお願い

ご使用者の変更連絡はお早めに

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして誠にありがとうございます。
年度替わりは、他の時期に比べて、ガラスバッジご使用者の変更手続きを多く受付けて
おります。そのため、手続き完了までにお時間をいただく場合がございます。

ガラスバッジご使用者に変更がございましたら、お早めにご連絡くださいますようお願い
申し上げます。

なお、ガラスバッジご使用者の変更は、「[ガラスバッジWebサービス](http://www.c-technol.co.jp/)」からお手続きが
可能です。(http://www.c-technol.co.jp/)「ガラスバッジWebサービス」の入力操作
に関するお問合せは、弊社 線量計測事業本部 TEL 03-3816-5210までお願いいたします。

ご使用者変更の連絡はこちらまで…

測定センター フリーダイヤルFAX：0120-995-204
(2020年1月6日よりFAX番号を変更いたしました)

編集後記

- 「Safety-II 概念とレジリエンス・エンジニアリング」
では、「従来までの安全概念 Safety-I の視点では、期
待される人間の行動は事前に明確に定めうとして、
手順書の厳密な順守が要請され、うまくいかなか
ったことが安全向上のための対象となり、想像される
業務遂行の在り方が課題となる。一方、Safety-II の
視点では、うまくいったことが関心の対象となり、実
際になされる業務の在り方が課題となる。」と記され
ている。この対比は非常に理解しやすかった。
- 「眼の水晶体の線量限度引き下げと被ばく防護につ
いて」では、特に、医療従事者（一般医療）の水
晶体の被ばく線量は他職種と比較して突出して高く、
適切な被ばく防護を行うことは医療提供体制を維持
する上でも極めて重要であると指摘している。また、
関係学術団体・職能団体、医療機関、医療従事者等、
医療における放射線診断に携わるすべての者が、必
要な対応を取るにより適切な医療提供体制が維持
されるように努める必要があるとの指摘もその通り
だと感じた。
- 「画像診断AIについて」は、人工頭脳（AI）の研究
分野における、機械学習（ディープラーニング；DL）
を中心に述べられている。DLとは、多層構造のニュー
ラルネットワークを用いた機械学習である。医療分野
への適用は最近のことであるが、今後、DLは急速に
進歩し、適応範囲が広がっていくことは容易に想像
される。著者が、最後に書かれている、「これからは
AI対人間の戦いがおきるのではなく、AIを使わない
人間とAIを使う人間の競争が始まる。」は非常に印象
深かった。
- 「コラム15」では、小児甲状腺がんが取り上げられて
いる。東京電力福島第一原子力発電所事故の影響に
関しては、がんが「増加」しているのではなく、精
密な検査により「発見」が増えているとの興味深い
情報が示されている。また、「放射線道場の喫茶室」
では、社会の維持発展への保健物理（放射線防護の
科学）の重要性を指摘した上で、その分野での活動
を通じて得た「生きがい」論が述べられている。
(河村 弘)

FBNews No.519

発行日／2020年3月1日

発行人／細田敏和

編集委員／新田浩 小口靖弘 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 河村弘

谷口和史 岩井淳 高橋英典 中本由季 廣田盛一 四方田章裕

発行所／株式会社千代田テクノ

所在地／〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話／03-3816-5210 FAX／03-5803-4890

http://www.c-technol.co.jp/

印刷／株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円（本体364円）