

日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.42

Feb.2021

特 集：震災に立ち向かう AI・IoT 技術



<https://www.jaee.gr.jp/>

公益社団法人 日本地震工学会

Japan Association for Earthquake Engineering

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

日本地震工学会誌 (第42号 2021年2月)

Bulletin of JAEE (No.42 Feb.2021)

INDEX

巻頭言：

特集「震災に立ち向かうAI・IoT技術」について／肥田 剛典	1
--------------------------------------	---

特集：震災に立ち向かうAI・IoT技術

IoT・AI技術の地震工学への応用／北原 武嗣、宮本 崇	2
機械学習の地震工学への応用の可能性／鈴木 琢也	6
リモートセンシングと深層学習による災害時建物被害把握／三浦 弘之	9
機械学習・深層学習による土砂災害予測と地震時の道路被害予測／丸山 喜久	13
IoT技術による建物の地震被害検知／伊藤 拓海	17
AIによるSNS情報分析を用いた地震被害状況把握／山口 真吾	21
地震予知へのAI技術の活用／井田 喜明	25
人工知能を活用した強震動予測／石井 透	29

追悼文：

ビル・アイワン先生を偲んで／家村 浩和	33
ビル・アイワンを偲ぶ／片山 恒雄	35

学会ニュース：

日本地震工学会・大会－2020開催報告／松島 信一	37
---------------------------------	----

お知らせ：

お知らせ	41
------------	----

本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い／登録メールアドレスご確認のお願い
／JAEE Newsletter 第10巻 第1号(通算第29号)が2021年4月末に発刊されます／問い合わせ先

編集後記

特集「震災に立ち向かうAI・IoT技術」について

肥田 剛典

●東京大学 助教／会誌編集委員 幹事

2006年に発表されたディープラーニングに端を発し、第3次AI (Artificial Intelligence) ブームが到来しました。これ以降、ビッグデータの概念の提唱や、機械による画像認識の飛躍的な高精度化、自然言語処理による人間と機械の対話などが実現されました。また、2016年には囲碁対戦用AIによる人間のプロ囲碁棋士への勝利も大きな話題を呼び、人間の能力を上回る人工知能の開発に期待が高まりました。過去に2回のブームとその衰退を経験した人工知能技術は、今回の3度目のブームにより大きく進展したと言えるでしょう。それに加え、センシング技術の発展により、全てのモノがインターネットに接続されるIoT (Internet of Things) によって、様々な情報の伝達・共有が可能となり、私たちの生活の利便性も向上しています。

このように、近年AI やIoT技術が目覚ましく発展しています。これらの技術は、地震工学分野においても研究開発や実務への応用がなされつつあります。今後の発生が危惧されている巨大地震時の被害を低減するために、これらの技術のさらなる発展が望まれます。そのためには、AI・IoT技術の現状と課題を把握し、今後の研究・技術開発の指針を得ることが必要となります。例えばニューラルネットワークなどに代表されるAI技術は、これまでの物理モデルに基づいたアプローチとは異なり、ブラックボックス的な解析手法に立脚したものが多く見られます。このような技術では、予測・評価結果の導出過程や理論的・物理的根拠が曖昧になるというデメリットがあります。また、機械学習ではこれまでに得られたデータを利用してモデルを構築するため、これまで経験していない事象、すなわちデータの得られていない外挿となる範囲への適用性や信頼性をいかに評価し、予測結果をどのように解釈するか等については、今後の課題であると考えられます。地震大国である我が国の減災・防災にAI・IoT技術を活用するためには、同技術によって何が可能で何が不可能なのかといった現状を把握し、その上でその課題を解決してゆくことが重要となります。

このようなことをふまえて、本特集では「震災に立ち向かうAI・IoT技術」と題した特集を企画いたしました。本特集では、現在地震工学分野でAI・IoT技術を活用した研究を第一線で実施されている方々に、

取り組まれている研究の概要や同技術の可能性等についてご執筆いただきました。

関東学院大学・北原武嗣先生および山梨大学・宮本崇先生には、IoT・AI技術の地震工学への応用についてご執筆いただきました。また、竹中工務店・鈴木琢也氏、広島大学・三浦弘之先生、千葉大学・丸山喜久先生には、機械学習やAI技術の地震工学への応用可能性についてご執筆いただきました。東京理科大学・伊藤拓海先生には、IoT技術による建物の地震被害検知についてご紹介いただきました。情報通信研究機構・山口真吾氏には、AIによるSNS情報分析を用いた地震被害状況把握技術についてご執筆いただきました。また、東京大学名誉教授・井田喜明先生および清水建設・石井透氏には、地震予知や地震動予測へのAI技術の活用についてご執筆いただきました。

本特集の各記事では、様々な技術を利用した研究を通し、地震工学におけるAI・IoT技術の適用事例や展望、技術的課題のみならず、同技術による都市の防災力強化の可能性が述べられています。本特集が、AI・IoT技術を取り入れた地震工学分野における研究の発展のみならず、減災・防災技術のさらなる発展に貢献できれば幸いです。



肥田 剛典 (ひだ たけのり)

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 助教、2010年京都大学大学院博士課程修了、同年京都大学防災研究所研究員、2011年東京理科大学理工学部建築学科助教を経て、2014年より現職、博士(工学)、専門分野は建築振動学、地震防災工学。

IoT・AI技術の地震工学への応用

北原 武嗣

●関東学院大学 教授

／宮本 崇

●山梨大学 准教授

1. はじめに

1. 1 超スマート社会とデジタルツイン

インフラ老朽化と少子高齢化の進む日本では、社会活動維持のためのコストの増加や労働人口の減少、都市の過密化と地方の過疎化など、生活水準の低下へとつながる様々な事象や社会課題が生じている。このような状況の中で、情報技術をキーテクノロジーとして社会コストの効率的負担と個人単位での生活水準の向上を両立させる、超スマート社会の概念が次世代における日本社会の在り方として提唱され、その具体化が進みつつある¹⁾。

超スマート社会が目指す社会ビジョンの中では、人間の体の状態や活動と、都市・環境の状態など、我々が物理的に生活している現実としての空間が、様々なIoT技術を用いて収集されたデータに基づいてサイバー空間上でモデル化される。このモデルの中のデータを、AI技術を用いて多角的に分析することを通して、現実の様々なものの最適制御・自動制御や、インフラの劣化箇所や災害の予兆といった社会の中の異常検知などの形で現実にフィードバックする、デジタルツインの手法が主に用いられる。デジタルツインの実現においては、現実世界のデータ収集のためのIoTと、収集したデータの分析・現実世界へのフィードバックのためのAIという形で、2つの技術が両輪として働くことが期待

されている(図1)。

1. 2 超スマート社会における地震防災

デジタルツインの枠組みを地震防災に適用すると、超スマート社会における地震防災の在り方は次のように述べるができる。すなわち、①地形や地質などの自然環境、インフラや住宅の個々の構造や分布状況などの都市環境、人口動態や交通状況といった現実空間を全域的かつリアルタイムに収集し、②得られたデータをもとに災害前の震災リスク評価・災害時の状況把握・震災後の状況進展予測といった情報を分析・生成し、③実社会における事前対策や震災直後の災害対応、長期的な復興策の最適化へとつなげていくというものである。こうした地震防災の実現によって、大規模な震災に対しても人命や社会の活力が失われることのないレジリエントな都市を構築することが、地震工学の意義といえる。

したがって、地震工学におけるIoTとAIの役割はそれぞれ、震災リスクや災害状況に関連する現実空間のデータをできるだけ網羅的・リアルタイムに収集することと、実社会の最適制御につながる情報の分析・生成と考えられる。このような視点の下で、本稿ではIoT・AIの地震工学への応用に関する事例や展望と技術的課題を順に概観する。

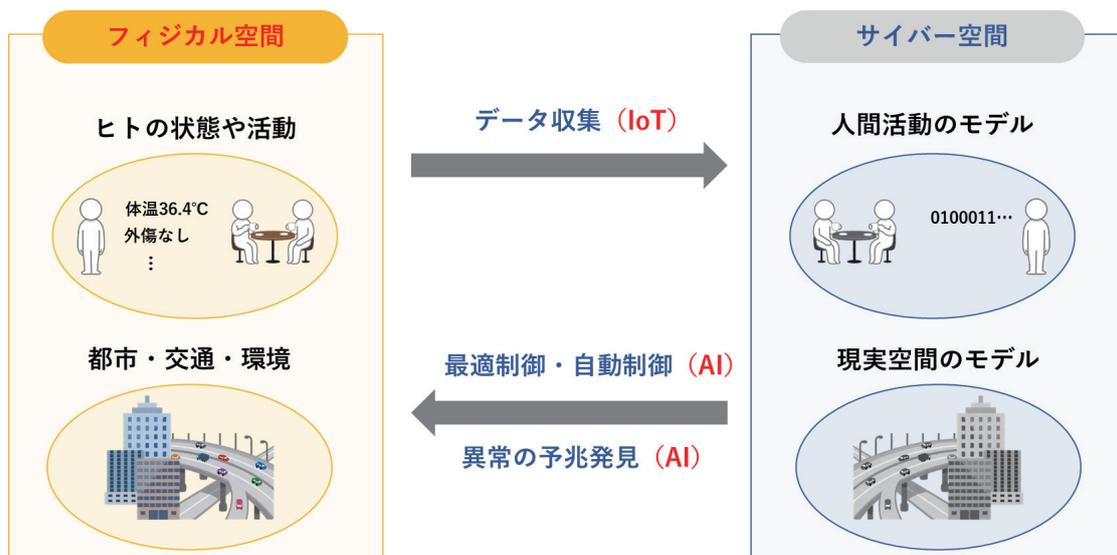


図1 デジタルツインとIoT・AIの役割

2. 地震工学におけるIoT・AI技術の応用

2. 1 事前対策への応用

都市の震災リスクを評価する上で、都市環境を高精度に計測・再現したデータは検討の基盤となり得る重要な情報といえる。UAVなどに搭載されたLiDARによる点群データ計測は、都市の計測と再現のための有力な技術であり、具体的な取り組みも国内外で蓄積されつつある²⁾³⁾。取得された点群データの分析・活用についても、点群深層学習と呼ばれる技術分野が近年発展しており、Parkら⁴⁾は同手法を用いてLiDARデータから詳細な3次元都市モデルを構築する手法を提案している。このような、都市環境の網羅的なデジタル化は防災以外の側面からも重要であるが、地震工学的な観点では例えば表層地盤をより高精度に計測・把握する技術は現在も強く望まれるものであり、より一層の技術発展が期待される。

震災リスクの評価においても、AIの有する柔軟で高精度な予測性能は有用となる。Kuboら⁵⁾は、地震時における地域毎の地震動強度の予測に際して、機械学習モデルによる予測器と物理的な知見に基づいた予測式を併用することによって、様々な地震に対するハザード評価の高精度化に成功している。また、西尾ら⁶⁾は、建造物の確率的な挙動を評価する際に、動的解析のモンテカルロシミュレーション結果をAIに学習させた後に代替させることで、予測精度を失うことなく解析時間を大幅に削減する手法を提案している。このように、観測や数値解析によって十分なデータが得られる場面においては、データに対するAIの柔軟な適合性能を有効に活用することが可能である。

2. 2 災害状況把握への応用

大規模な震災が生じた際の地域ごとの被災状況の把握は、IoT・AI技術が最も有力に機能する場面の1つと

考えられる。衛星やUAVといったプラットフォームからのリモートセンシングデータは災害情報収集のための有力な情報源とされており、その撮影特性に応じて広域の概況から1棟単位の詳細な被害に至るまで、様々なレベルでの情報取得への活用が期待できる。また、普及の進むスマートフォンやウェアラブルデバイスからは、プライバシーの問題を解決する必要があるものの個人の安否や要救助者の所在を確実に把握できる可能性がある。

センシングデータからの災害状況の分析にAIを用いる研究も数多く行われており、例えばMiyamotoら⁷⁾は震災前後の衛星画像の比較や構造物情報の援用といった機能を持たせた深層学習モデルによって、低解像度の衛星画像からの住宅1棟単位での被害検知を実現している(図2)。データからの対象物の識別・分類はAIモデルが高精度に実現するタスクの1つであり、衛星画像といったデータ種別や住宅などの対象物に限定されず、様々な応用が今後も期待される。

2. 3 災害対応への応用

震災直後からの災害対応は、救助隊の派遣や応急復旧の実施などの重要な意思決定を含むものであり、その判断は被害状況の推定や状況推移の予測といった情報に支えられる。したがって、災害対応をより円滑化する上でも、IoTやAIに期待される役割は大きいものといえる。

復旧活動などの災害対応の最適性の分析は、以前より資源配分問題として数理的に捉えられており⁸⁾、そのようなアプローチの自然な延長として、IoTによる被災状況の把握とAIを含む各種の数的手法を用いた最適な災害対応計画の策定という将来像が考えられる。ただし、前述のように災害対応は大きな責任を伴いながら意思決定を行うものであるため、技術的な検討だ

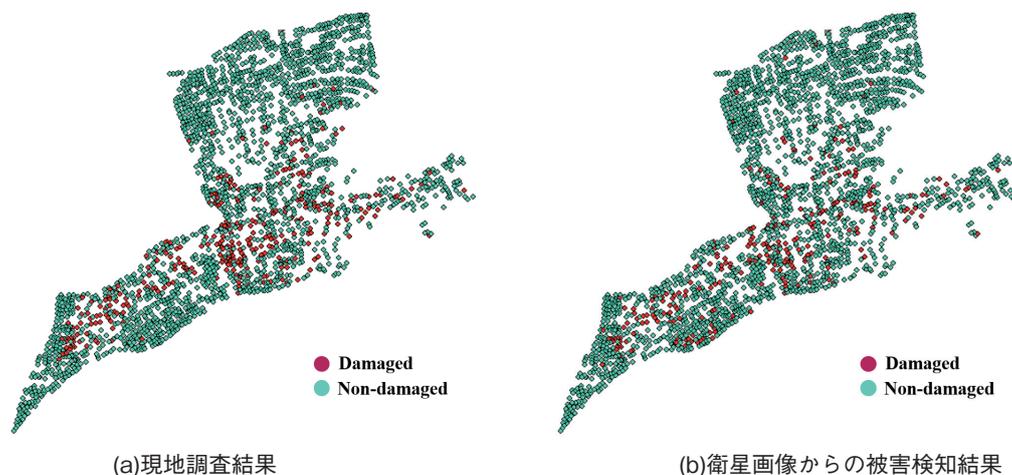


図2 衛星画像からの住宅被害検知事例⁷⁾

けでなく、人間の意思決定を補助・サポートするシステムとしての在り方に加え、法制度などの観点からの検討も重要と考えられる。

3. IoT・AI技術の応用に関する研究課題

3. 1 データ量の不足

震災に関する情報の分析や予測をAIによって行う上で、大地震が稀な事象であるために、特に深層学習モデルの学習に十分なデータが確保できないことが問題となっている。平常時に観測できるイベントの発生頻度と比較し、災害の低頻度性は不可避のものであるため、実用上は何かの対応が必須と考えられる。

データ量の不足に対しては、主に情報学の分野において技術的な解決方法が多く提案されている。平常時のデータと災害時のデータのように、種別間でデータ量に差異があるデータセットを一般に不均衡データと呼び、その対応策が体系的に整理されている⁹⁾。また、数値シミュレーションから得られる仮想的な災害状況をAIの学習データに用いる研究事例¹⁰⁾も近年に見られ、同様の発想は地震工学でも有用と考えられる。より本質的な対応として、現在よりもさらに高密度なセンシングを行うことによってデータ量やデータ種を確保することは今もって重要といえる。

3. 2 AIモデルの説明性

近年のAIモデルは高い性能の下で識別や予測といったタスクを行う一方で、その出力根拠を明示的に示すことを苦手としている。このようなAIモデルのブラックボックス性は、災害リスク評価や災害対応などの大きな責任を伴う場面においてAIの応用を阻む壁となり得る性質である。

これに対して、AIの説明性や解釈性を高めようとする

る、説明可能AI¹¹⁾と呼ばれる技術分野が近年に発展しており、AIの出力根拠や計算過程そのものを可視化・透明化しようとする方法が開発されている。こうした方法を活用することは、地震工学においても今後重要といえる。また、AIのブラックボックス性と高いタスク処理性能を共に受け入れ、AIに任せても良い処理と、物理的解析や人間の判断に任せるべき処理を、業務フローや情報処理フローの中で仕分けることも有効である可能性もある。このような仕組みの実現のためには、業務フローやシステム全体の検討・再設計を行うと共に、AIの適用範囲や学習範囲を明確化し、想定外の事象に対する適用や出力がなされないようにする必要もある。

3. 3 未経験の事象の予測

地震防災においては、これまでにデータの無い地域や規模で地震が生じた際の、ハザードや社会的リスク、被災状況進展の予測が求められる場面も多い。そのような、学習データにない状況に対する外挿的な予測は、深層学習を含む多くのAIモデルが原理的に困難としており、今後の研究開発が重要な課題である。

モデルの持つ誤差に加え、予測の際の前提条件にも不確実性を伴う将来状態の予測に際しては、状態を期待値などの点として推定するのではなく、幅を持たせた確率的予測を行うことが望ましい。そのような予測の手法として、近年ではベイズモデリングを採り入れた確率的機械学習モデル¹²⁾の適用も進んでおり、地震工学上の諸問題においても、何かの予測を行う場合はこうしたアプローチは有力な手段と考えられる。

また、IoT・AIを用いて未経験の事象に対する予測性能を向上させるための方策の一つに、自然現象や社会動態の背後にある本質的なメカニズムをデータ駆動的

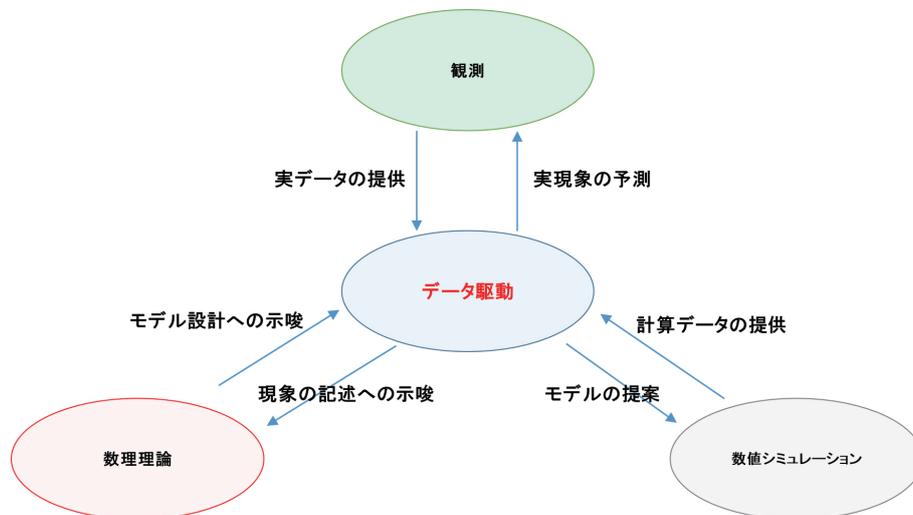


図3 データ駆動的な手法と理論・観測・シミュレーションの連携による予測モデルの構築¹³⁾

に発見し、計算モデルに反映させようとするもの¹³⁾がある。こうしたアプローチは、現象背後のメカニズムに基づいて、データのない領域での予測を演繹的に行おうとする発想に基づいており、地震工学に関する理論や必要な情報の観測、数値シミュレーションなどと連携して、予測の適用対象の拡大や予測性能の向上につながることを期待される(図3)。

4. おわりに

本稿では、日本の目指す超スマート社会の将来像との関わりの中で、地震工学におけるIoT・AIの適用事例や展望、技術的課題を概観した。IoTやAIという発展の著しい技術が現れている中で、社会は大きな変革期を迎えつつあるが、社会技術論では「技術の導入時点ではどのような影響があるか分からない一方で、社会への導入後はその影響をコントロールすることが難しい」というコリングリッジのジレンマが知られている。地震防災という重要な意義を持つ地震工学においても、こうしたジレンマに捉われることなく、IoT・AI技術の応用が部分的な課題解決に留まらず、社会全体の最適な進展につながるように、適切な将来ビジョンを議論しながら技術開発・制度設計を進めていく必要があると著者らは考えている。

謝辞

本稿は、土木学会「AI・IoT技術の地震工学への有効活用検討小委員会」の活動、および2020年度土木学会全国大会・研究討論会「防災・土木分野におけるAI・データサイエンス」¹⁴⁾での議論から有用な示唆・視座を得たため、ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 日立東大ラボ：Society(ソサエティ) 5.0 人間中心の超スマート社会、日本経済新聞出版、2018.
- 2) 静岡県：Shizuoka Point Cloud DB
<https://pointcloud.pref.shizuoka.jp/>
- 3) New York University: 2015 Aerial Laser and Photogrammetry Survey of Dublin City Collection Record
https://geo.nyu.edu/catalog/nyu_2451_38684
- 4) Park, Y. et al.: Creating 3D city models with building footprints and LIDAR point cloud classification: A machine learning approach, Computers, Environment and Urban Systems, Vol.75, pp.76-89, 2019.
- 5) Kubo, H., Kunugi, T., Suzuki, W., Suzuki, S. and Aoi, S.: Hybrid predictor for ground-motion intensity with machine learning and conventional ground motion prediction equation,

Scientific Reports, Vol 10, 11871, 2020.

- 6) 西尾真由子, 三浦正樹, 珠玖隆行: スパースモデリングによる既存橋梁の構造信頼性計算のための代替モデル構築、土木学会論文集A2(応用力学) Vol.74, No.2, pp.I_125-I_136, 2018.
- 7) Miyamoto, T and Yamamoto, Y.: Using multimodal learning model for earthquake damage detection based on optical satellite imagery and structural attributes, Proceedings of 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, in press, 2020.
- 8) 特集: 東日本大震災、OR手法活用への期待、オペレーションズ・リサーチ, Vol.56, No.12, 2011.
- 9) Haixiang, G. et al.: Learning from class-imbalanced data: Review of methods and applications, Expert Systems with Applications, Vol.73, pp.220-239, 2017.
- 10) Araya-Polo, M., Jennings, J., Adler, A. and Dahike, T.: Deep-learning Tomography, The Leading Edge, Vol. 37, No.1, pp.58-66, 2018.
- 11) 原聡: 説明可能AI、人工知能、Vol. 34, No. 4, pp.577-582, 2019.
- 12) Blundell, C. et al.: Weight Uncertainty in Neural Network, Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning, pp.1613-1622, 2015.
- 13) 宮本崇: パターン認識と法則発見のデータサイエンス、AI・データサイエンスシンポジウム論文集、Vol.1, No.J1, pp.270-277, 2020.
- 14) 北原武嗣、宮本崇、梶田幸秀: 研究討論会概要「防災・土木分野におけるAI・データサイエンス」、第11回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集、CD-ROM, 2021.



北原 武嗣(きたはら たけし)

1989年京都大学大学院修士課程修了。竹中工務店技術研究所研究員、群馬工業高等専門学校助教授、関東学院大学助教授を経て2009年より現職。専門は耐震信頼性。博士(工学)。土木学会AI・IoT技術の地震工学への有効活用検討小委員会委員長。



宮本 崇(みやもと たかし)

2012年東京大学大学院修了。Illinois大学客員研究員、山梨大学助教を経て2020年より現職。主にデータ科学手法の防災応用に関する研究を行っている。土木学会AI・IoT技術の地震工学への有効活用検討小委員会幹事長、土木学会構造工学でのAI活用に関する研究小委員会幹事長。

機械学習の地震工学への応用の可能性

鈴木 琢也

●株式会社竹中工務店 技術研究所 主任研究員

1. はじめに

人工知能分野における機械学習技術の近年の発展は著しく、画像認識、音声認識、自然言語理解や自動運転など様々な場面での適用が進められつつある。また、計算機能力も飛躍的に向上するとともに、機械学習を行うための計算ライブラリなども多くが自由に利用可能となっており、機械学習を容易に利用できる環境が整備されつつある。そのため、地震工学分野においても最先端の機械学習技術を適用し、更なる発展・進化を図るための研究も多く行われつつある。

一方で著者は、機械学習を適用する場合には、実用化に向けて未だ多くの課題があるとも感じている。例えば、機械学習においては確率論的なモデリングを行うことが一般的であり、その出力には誤差が含まれるが、この性質は「安全を確実に担保する」必要がある地震工学への適用を困難にしている。機械学習を適用する際の方向性や、適用方法に関する配慮について十分に議論されているとは言いがたいと考えている。

そこで本稿では、第3次人工知能ブーム以降に、著者が実際に行った3つの適用事例を通して、著者が感じた、今後の機械学習の地震工学への応用の可能性と、解決すべき現状の課題について述べる。

2. 地震工学の適用事例

2.1. RNNを用いた履歴モデルの構築

まず、リカレントニューラルネットワーク（以降、RNN）を用いて履歴モデルを構築する試み¹⁾について紹介する。文献1)では、人が理解できない複雑な構成則モデルの構築手法の開発を目的とし、過去の入出力履歴に応じてシステムを変化できるという特徴を有するニューラルネットワーク（以降、NN）であるRNNを用いて、基本的な力学モデルであるバイリニアモデルの構築を行い、その適用性を検討している。このようなモデリング手法が確立されれば、例えば詳細FEMの多くの解析結果を教師データとして、詳細FEMモデルと同等の精度を持ち挙動を追跡できる梁要素などが開発可能になると考えられる（図1）。

図2には長期にわたる記憶を実現できるようにするためのLSTMユニットを用いた3層のRNNモデルを、図3には、理論モデルの入出力結果を教師データ

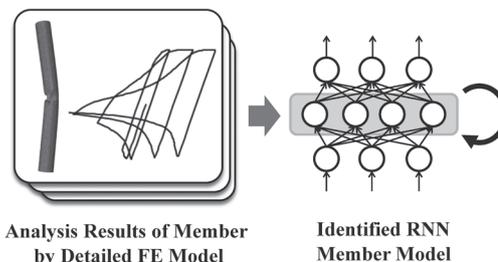


図1 RNNによる材料構成則の構築のイメージ¹⁾

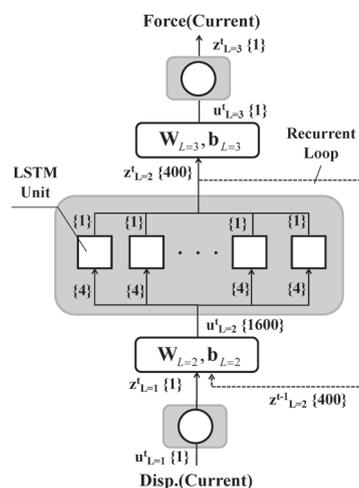


図2 RNNの構成¹⁾

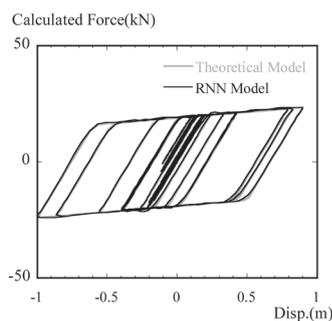


図3 再現された履歴¹⁾

として同定されたRNNモデルの出力を示す。図より、RNNによってバイリニアの理論モデルの挙動を良好な精度で同定できることが確認できる。

この研究の特徴は、過去の出力を再帰的に入力するRNNを用いることで、時系列の過程において材料モデルが記憶すべき項目（例えば、最大応答変位）などもシステムが学習の過程で自動的に獲得すること図つ

た点にある。RNNを利用した場合、履歴モデルへの入出力はそれぞれ変位と力のみ単純化され、構築者が意図的に入力層の数を調整する必要がない。一方で、RNNの学習においては、計算時間の制約から、どれくらいまで過去のステップに遡るかをユーザーが設定する必要があり、無限に記憶できるわけではない。そのため、一度生じたら回復することのない損傷や塑性変形を考慮しなければいけない材料構成則の仕組みとは両立しえないという課題がある。これを解決するためには、RNNの学習方法やネットワークの構成方法などに何らかの改良が必要になると考えている。その他、学習に必要な計算コストや、汎化性能、一定の確率で生じる誤差をどう許容するか、など実用化に向けた課題は多く残っている。

2.2. 強化学習を用いた解析の高速化

つづいて、大規模モデルにおける収束計算時の収束方法の選定に強化学習を用い、計算時間の高速化を図った事例²⁾を紹介する。文献2)では、図4に示すように複数の収束手法を問題や収束状況に応じて適切に組み合わせることで解析の高速化を図ることを目的に、強化学習を用いて収束方法を選択するエージェント(行動価値テーブル)を構築し、高速化の効果を確かめている。

学習には、エージェントが行動する度にその行動価値(Q値)を更新するQ学習を用い、行動価値テーブルの構成は図5に示すものとしている。図に示すように、状態は「前回までに初期剛性法を何回繰り返したか」、すなわち「最後に接線剛性法を選択したのは何回前か」で分け、行動は「初期剛性法」と「接線剛性法」の2択としている。なお、解こうとする解析モデルに応じてこの2つの手法のいずれが適切かは異なるため、実際にどの収束方法を選択するかは、解析実施者の経験に委ねられているのが現状である。図6には構築された行動価値テーブルを用いた場合の解析時間の比較を示す。図に示すように提案法の解析時間は23秒となり、接線剛性法のみを選択した場合の210秒、初期剛性法のみを選択した場合の35秒よりも短縮できていることが確認でき、強化学習によって構築した行動価値テーブルによる解析の高速化が一定の可能性を持っていることが確認できた。

この研究における機械学習の適用方法の優れている点は、推定器の出力に誤差が生じたとしても別のチェック機能によって予め設定した許容残差力の範囲にあることは担保される点にあると考えている。つまり、ある収束計算時に選択する収束方法が適切でなく残差力が残った場合であっても以降の収束計算で許容誤差内に収まるまで収束計算は継続し、収束しなければ

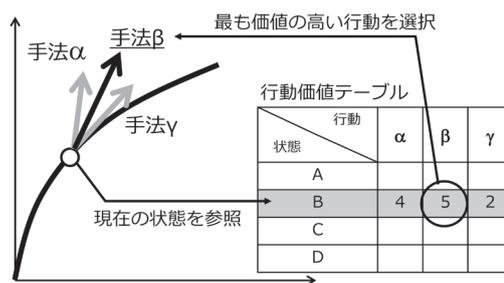


図4 行動価値テーブルによる手法の選択²⁾

State	Action	
	初期剛性法	接線剛性法
Iter. 1回目		
Iter. 2回目		
Iter. 3回目		
Iter. 4回目以降	前回到接線剛性法を選択(before1)	
	前回まで初期剛性法を連続1回選択(before2)	
	前回まで初期剛性法を連続2回選択(before3)	
	...	
	前回まで初期剛性法を連続28回選択(before29)	

図5 行動価値テーブル²⁾

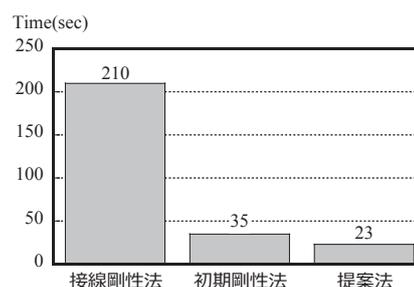


図6 解析時間²⁾

ば解析実施者はそれを知ることができる。解析の高速化に限らず、機械学習を適用する場合には全く別のチェック機能を設け、予期しない誤差が生じた場合にも対応できる仕組みを設けることは重要といえる。

一方で、課題としては、汎化性能を持った行動価値テーブルの構築のためには、非常に膨大な学習時間が必要となる見込であることが挙げられる。また膨大な学習時間を費やしても効果があるかどうかは未知な部分も多いため、現時点では、既設の建物モデルの応答解析を即時に行う場合など、解析モデルが既に確定している場合に限定する必要があると考えられる。

2.3. 強化学習を用いた構造最適化

最後に、強化学習を用いて構造最適化を行うエージェントを作成した事例³⁴⁾を紹介する。文献3)4)では、構造解析を対戦ゲームに見立て、高得点を得るエージェントを強化学習で作成し構造最適化を行うという新しい最適化のアプローチに挑戦している。図7には

ゲーム画面を示す。ボールを支えるのに不要と思われる部分をタッチで消した後、残ったブロックのみで変形解析が行われる。2人のプレイヤーがブロックを交互に消していき、先にボールを規定ラインよりも下に落としたプレイヤーが負けとなる。子どもの遊びである砂山崩しに近いゲームである。このゲームを、与えられた状態 (State) から各行動 (Action) の行動価値Qを算定するNN (図8) に基づいてプレイするエージェントを強化学習によって構築している。図9には学習後のエージェント同士の対戦結果を示す。図に示すように合理的な形が推定できている。得点は別の最適化手法の得点とほぼ同等であり、強化学習による構造最適化に一定の可能性があることが確認できている。

この研究の特徴として、構造解析をゲームとして見立てることで強化学習の枠組みにはめやすくしている点にある。相手に勝利することを目的とする対戦ゲームに対する強化学習の適用性が高いことは、囲碁や将棋の分野でも示されており、これらの分野では人の考えられない方法を編み出しつつある。構造解析の分野でもうまくゲーム形式に置換することができれば、これまでになかった構造最適化が実現する可能性はあると考えている。

一方、課題として、汎化性能が挙げられる。現時点では学習していないステージでも高得点を得るエージェントの作成には至っていない。また、最終的に勝利することを目的に作成されたエージェントであるため、ゲーム途中で現れる図形は合理的なものとはならない。ゲーム途中の形状にも一定の合理性を持たせるためには報酬の調整が必要になると考えられる。

3. まとめ

本稿では、近年発展が著しい機械学習技術の地震工学分野への適用可能性について模索した。現時点では、他の産業分野に比べて、地震工学分野における機械学習技術の実用化が進んでいるとまではいえない。本稿では著者自身の研究という限られた範囲の例を示したに過ぎないが、これをきっかけに、機械学習のよりよい適用方法、適用箇所について、多くの方々が議論、検討して頂き、日本の地震工学技術が世界の最先端となることに繋がってくれば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴木琢也、松岡康友：リカレントニューラルネットワークによる材料構成則の構築に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.82, No.734, pp.543-553, 2017.4

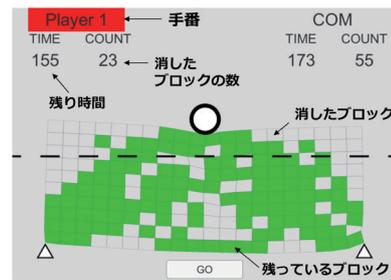


図7 ゲーム画面³⁾

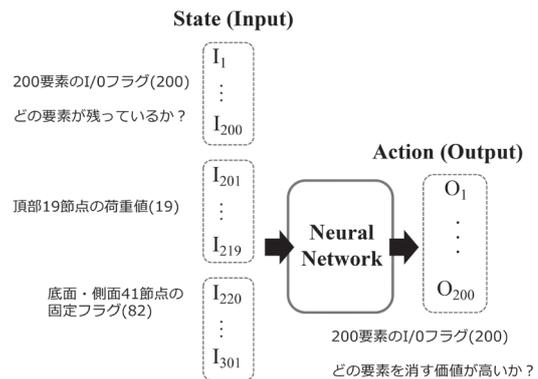


図8 入出力関係³⁾

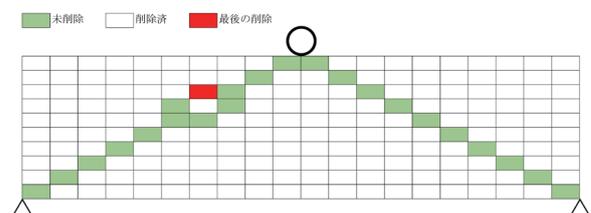


図9 エージェントが作成した構造⁴⁾

- 2) 鈴木琢也、稲葉澄、中村壮志：強化学習を用いた選択的収斂計算手法による非線形構造解析の高速化（その1、その2）、日本建築学会学術講演会梗概集、構造I, pp475-478, 2018.7
- 3) 鈴木琢也、市川亨祐：強化学習による建築構造最適化の適用性検討、第33回人工知能学会全国大会、4Rin1-43, 2019.6
- 4) 中村壮志、鈴木琢也、水島大地：強化学習を用いた建築構造最適化の汎化性能向上に関する検討、第34回人工知能学会全国大会、3Rin4-45, 2020.6



鈴木 琢也 (すずき たくや)

2005年東京工業大学大学院建築学専攻博士課程修了、博士(工学)、株式会社竹中工務店 技術研究所 主任研究員、専門分野：耐震解析、逆解析、鋼構造

リモートセンシングと深層学習による災害時建物被害把握

三浦 弘之

●広島大学 大学院先進理工系科学研究科 准教授

1. はじめに

著者は、本学会の会誌第33号「ここまで見える！リモートセンシングが拓く防災の新たな地平」において、防災リモートセンシングの意義および建物被害把握への応用に関する研究事例を紹介した¹⁾。その中では、主にテクスチャ解析や変化検出など従来の画像処理による被害把握手法を紹介した。一方、近年急速に発達しているAI技術を適用することにより、従来の画像処理手法と比べて格段に高い性能で画像分類・認識が可能となっており、リモートセンシング分野においても広く利用されるようになった。本稿では、画像に対する深層学習技術の概要を説明した上で、著者らによる深層学習を利用したリモートセンシングによる災害時建物被害把握の研究事例を紹介する。

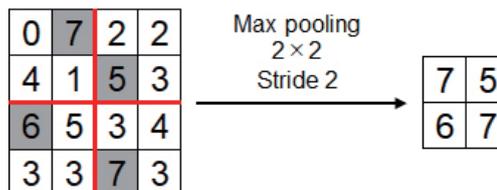
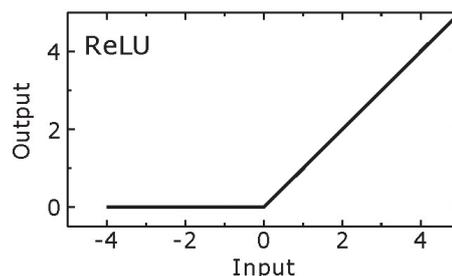
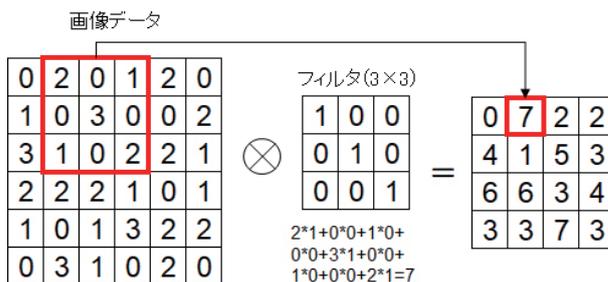
2. 画像に対する深層学習技術

深層学習はディープラーニングとも呼ばれ、機械学習の技術のひとつに分類される。あらかじめ用意した教師データに対して、人の神経細胞を模したニューラルネットワークを多層的に与えたモデルで学習することにより、従来の方法では困難であった複雑な分類問題を解くことを可能にするものである。現在、画像に対する深層学習技術としては、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) が広く利用されている。CNNでは、畳み込み層、活性化層、プーリング層と呼ばれる3種類の層を多層的に組み合わせた構造により画像の情報を集約し、教師データによる正解値との誤差を最小化するように繰り返し学習を行う。以下では、まずCNNの一般的な流れについて述べる。

CNNを構成する層のうち、畳み込み層とは、画像に対して2次元的なフィルタによる畳み込み計算を行うもので、画像のぼかしやエッジの強調などの処理に対応する(図1参照)。フィルタの係数すなわち画像に対する重みを変化させることにより、分類に必要な情報を強調させることができる。活性化層とは非線形関数による処理を行う層であり、分類に不必要な情報に対する重みを低減させることで、ネットワークを強化させる働きをもつ。正規化線形関数 (Rectified Linear Unit: ReLU) と呼ばれる非線形関数が利用されること

が多い(図2参照)。プーリング層とは、画像の情報の一部を捨て、データサイズを小さくすることで、画像内の微小な位置の違いに対する頑健性を高める働きをもつ。あらかじめ与えたウィンドウ内の値の平均値を与える平均プーリング、最大値を与える最大プーリングなどがある(図3参照)。これらの処理により得られたデータを全結合層と呼ばれる層で結合し、ひとつのノードとして出力する。さらに、誤差逆伝播法により、畳み込み層などの重みを変化させて、出力される値と正解値の誤差を最小化するよう繰り返し学習を行うのが、一般的なCNNの方法である。なお、CNNの歴史的背景や詳細については、文献²⁾に記載されているので、興味があれば参照されたい。

また、深層学習では、しばしば過学習が問題となる。



過学習とは、過剰適合とも呼ばれ、教師データに対しては学習されているが、それ以外の未知のデータに対しては適合できていない状態を表す。過学習を防ぐ方法として、Dropout³⁾とBatch Normalization (BN)⁴⁾が使われている。Dropoutは、与えられた学習データを全て使うのではなく、ある一定の割合(例えば、50%)のデータをあえて使用せずに学習させることで、過学習を防ぐものである。また、BNは利用するデータ群を正規化して学習させることで、過学習を抑えるとともに、学習効率を高める働きをもつ。

CNNによる画像解析は、大きく分類と認識(あるいは検出)に分けられる。分類とは、上述した方法によって、画像に写っている物体が何であるかを、あらかじめ用意したクラスに従って判別することである。一方で、認識とは、様々なものが映り込んでいる画像から、特定のクラスに判別された物体の位置や大きさ、範囲を特定するものである。前述の全結合層を畳み込み層に置き換え、逆畳み込み処理を行うことで、物体が画像上のどこにあるのかを判別することが可能となる。代表的な画像認識技術として、U-Net⁹⁾が挙げられる。

画像のみを用いて分析を行う場合、画像認識により対象とする物体の位置や範囲を特定できることが理想的と考えられる。しかし、様々な地物が映り込みリモートセンシング画像の場合、対象とする地物(例えば、建物)のみを精度良く抽出することは困難な場合が多い。また、GISデータが整備されつつある現状を考えると、GISデータも併用して解析することが効率的と考えられる。このため、以降に示す研究事例では、GISによる建物データも併用して、リモートセンシング画像から建物範囲を抽出し、CNNによる画像分類による被害把握を試みている。

3. リモートセンシングによる建物被害把握

本章では著者らによる深層学習を用いたリモートセンシングデータからの災害時の建物被害把握に関する研究を紹介する。

文献⁶⁾では、1995年兵庫県南部地震における西宮市と2016年熊本地震における益城町での航空写真と建物被害データを用いて、CNNにより災害後の航空写真データから建物被害を判別する方法を提案している。CNNによる建物被害把握で問題となるのが、教師データとなる建物被害データの収集である。それまでの研究では、あらかじめ航空写真や衛星画像データなどから建物被害レベルを目視で分類し、それを教師データとして用いたものがほとんどであった。しかし、上空からの画像では建物側面や内部の被害を判読すること



図4 各被害レベルのパッチ画像の例⁶⁾

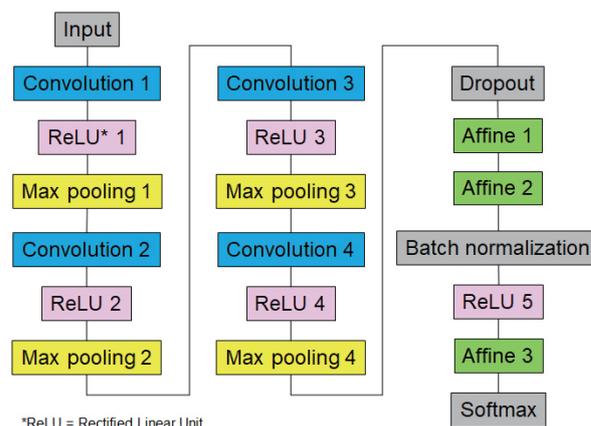


図5 建物被害分類のためのCNNモデル⁶⁾

は困難であり、現地調査による被害判定結果と比較すると、特に中程度の被害で誤分類が非常に多いことが指摘されている⁷⁾。一方で、現地調査による詳細なデータは数に限りがあり、被災地全域で得られるとは限らない。また、データ間で被害の定義が異なり、同一の条件で分析することが難しい場合も多い。

このような背景から、本研究では各地震の被害データから倒壊レベルの建物と無被害の建物を抽出し、学習に利用することとした。また、災害により建物が何らかの被害が生じると、屋根面にブルーシートがかけられることが多い。これは、小～中程度の被害が生じた建物の住民が、雨漏りなどの2次災害を防ぐために使用するものと考えられる。つまり、上空からの画像で全ての中程度の被害を精度良く判別することは困難であるが、ブルーシートに覆われた建物は小～中程度の被害と判別することができる。そこで、倒壊・無被害の建物だけでなく、ブルーシート建物も抽出し、これらを教師データとして学習させることで被害レベルを3クラスに分類するCNNのモデルを構築した。

建物GISデータを利用し、戸建て住宅を対象として、建物ポリゴンと航空写真との重ね合わせから各建物のパッチ画像を作成し、建物被害分類の学習に利用した(図4参照)。構築したCNNモデルを図5に示す。本モデルは、前節で説明したように、畳み込み層、活性化層、プーリング層、Dropout、BNおよび全結合層

からなるモデルである。兵庫県南部地震から約4,500棟、熊本地震から約2,800棟の建物被害データを抽出し、画像反転や回転などの処理によるデータ拡張を行うことで、計約15,000の被害画像データを準備して学習を行った。モデルの構築には、コーディングなしでモデルを作成できるNeural Network Console⁸⁾を用いた。

数100回程度の学習で過学習なく安定した結果となったことから、1,000回での学習結果を用いることとした。学習したモデルにより、学習データとは別に用意した検証データ約3,600棟の建物の分類を行ったところ、災害後の画像のみからでも98%の精度で各被害を正しく分類できることを確認した。従来の画像解析では、災害前データも用いた上で、75～80%程度の分類精度であったことを考慮すると、CNNでは非常に高い精度で分類できていると言える。

学習したモデルにより益城町周辺や西宮市での建物被害を推定した結果を図6に示す。対象地域全体でみ

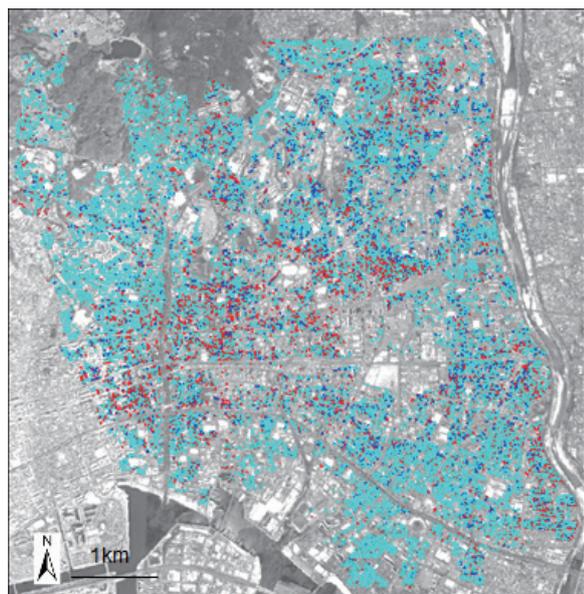
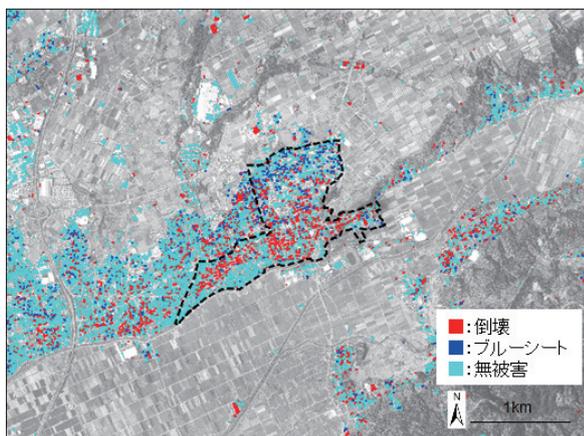


図6 CNNで推定された益城町周辺の建物被害(上段)、西宮市の建物被害(下段)⁶⁾

ると、被害を過大評価した建物もみられるが、被害甚大地域を把握することは可能であり、その周辺にブルーシートの建物が分布する様子も確認できる。精度向上の余地はあるが、本モデルは簡便に建物被害を把握する方法としては有効であると考えられる。

4. その他の災害における建物被害把握への適用

本モデルは、地震による被害データを対象として学習したモデルであるが、その他の災害による建物被害にも適用することができれば、近年増加している豪雨災害や台風による被害把握にも汎用的に利用できると期待される。文献6)では、構築したCNNモデルを台風による建物被害の把握に適用している。2019年9月の台風15号で被災した千葉県鋸南町における航空写真に適用したところ、屋根面に被害を受けたブルーシート建物を90%以上の精度で分類できることを確認している(図7参照)。

本モデルは、オルソ化(正射投影)された画像であれば、航空写真以外のリモートセンシングデータにも適用可能である。2020年7月の豪雨災害で被災した熊本県球磨村周辺では、災害後にパラモーターと呼ばれるエンジン付きパラグライダーからの観測が実施された。文献9)では、パラモーターからの空撮データに対して、オルソ化と深層学習による被害把握を試みている。ドローンなどの発達に伴い、空撮データの3次元解析技術も向上しており、異なる視点から撮影した複数の画像があれば、汎用ソフトウェア^{例えは10)}を用いることで、比較的簡便に画像のオルソ化および高さ情報の抽出を行うことができる。オルソ化した画像に対してCNNにより被害を推定した結果を図8に示す。球磨川沿いの地域で多くの建物が倒壊に分類されており、甚大な被害を受けた地域を把握することが可能であることが確認された。

これらの検討から、構築したCNNモデルは地震による建物被害だけでなく、台風や河川の氾濫によって



図7 2019年9月台風15号で被災した千葉県鋸南町における建物被害推定結果⁶⁾

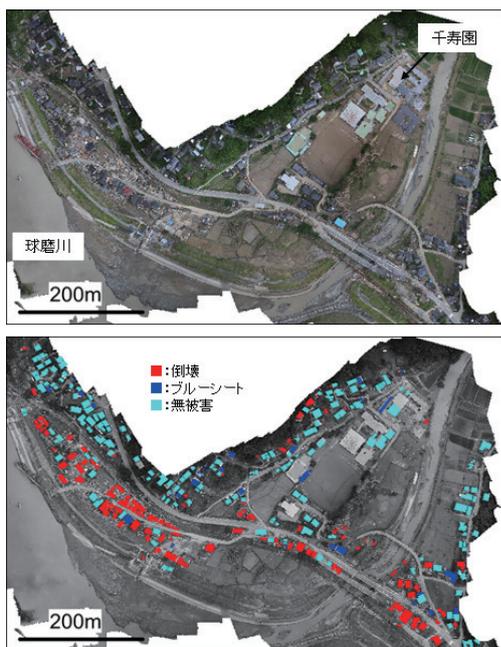


図8 2020年7月豪雨で被災した熊本県球磨村におけるオルソ画像(上段)とCNNによる建物被害結果(下段)⁹⁾

被災した建物の被害の把握にも適用可能であることがわかった。ただし、汎用性の高い推定を行うためには、より多くの様々な災害による被害データを用いて学習させることが必要と考える。

5. まとめと今後の課題

本稿では、CNNの概要を述べるとともに、著者らによるCNNを用いた災害時の建物被害把握に関する検討結果を紹介した。兵庫県南部地震や熊本地震によるデータから構築したモデルによって、その他の災害による建物被害の把握にも利用できることを示した。リモートセンシングと深層学習を利用することで、少ない労力で短時間に広範囲の被害を迅速に把握できるものと期待される。

最後に、筆者がよく質問される項目として、災害発生から被害把握までにどれくらいの時間がかかるのか、について述べる。まず、災害後にオルソ化可能な航空写真が撮影されるまでには、気象条件にもよるが、一般に1日～1週間程度はかかることが多い。人工衛星による緊急撮影を行ったとしても、やはり数日程度を要することが多い。特に光学センサ画像では、悪天候時に画像を取得することはできないという問題もある。現地でドローン撮影等ができれば、より短期間で空撮データを取得できる可能性がある。また、画像を取得してからGIS上で利用するためにはオルソ化が必要である。オルソ化に要する時間は、撮影範囲や解像度にもよるが、少なくとも半日以上は必要と考えられ

る。オルソ化された画像と建物データが入手できれば、数時間程度で被害推定結果が得られるものと考えられる。特にCNNによる被害の分類は1万棟程度でも1分以内で判定することができるため、目視判読に比べると格段に速い。つまり、データ取得までに数日～1週間程度、データ処理・被害推定に1日～数日程度は要すると考えられる。データ取得までの時間を短縮することは容易ではないが、データ処理を自動化するなどの工夫は今後必要であろう。

参考文献

- 1) 三浦弘之：建物被害把握への適用について、日本地震工学会誌, No.33, pp.6-9, 2018.
- 2) 岡谷貴之：画像認識のための深層学習, 人工知能学会誌, Vol. 28, No.6, pp.962-974, 2013.
- 3) Srivastava, N. et al.: Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting, Journal of Machine Learning Research, Vol.15, pp.1929-1958, 2014.
- 4) Ioffe, S. and Szegedy, C.: Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, PMLR, Vol.37, pp.448-456, 2015.
- 5) Ronneberger, O. et al.: U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, MICCAI, Vol.9351, pp.234-241, 2015.
- 6) Miura, H. et al.: Deep learning-based identification of collapsed, non-collapsed and blue tarp-covered buildings from post-disaster aerial image, Remote Sensing, Vol.12, 1924 (19p), 2020.
- 7) Booth E. et al.: Validating assessments of seismic damage made from remote sensing, Earthquake Spectra, Vol.27, pp.S157-S177, 2011.
- 8) SONY：Neural Network Console, <https://dl.sony.com/> (閲覧日 2020年11月25日)
- 9) 三浦弘之：2020年7月豪雨で被災した熊本県球磨村周辺でのパラモーターによる空撮データのオルソ化と深層学習による建物被害推定, 第47回地域安全学会研究発表会, pp.41-44, 2020.
- 10) Agisoft：Metashape, <https://www.agisoft.com/> (閲覧日 2020年11月25日)



三浦 弘之 (みうら ひろゆき)

1999年東京工業大学工学部卒業。同大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻修了。東京工業大学21世紀COE研究員、同大学助教、広島大学大学院工学研究科准教授を経て、2020年現職、博士(工学)。専門分野：地震工学、防災リモートセンシング

機械学習・深層学習による 土砂災害予測と地震時の道路被害予測

丸山 喜久

●千葉大学大学院工学研究院 教授

1. はじめに

今回、会誌編集委員会の方から、AI・IoT技術に関する研究紹介のご依頼をいただきました。私は地震被害予測に関する研究を行っています。そのため、被害あり／なしを分類する問題を扱うことが多く、機械学習や深層学習が適用しやすいと思われるデータに触れることが多い環境にありました。また、私が所属する学科には情報系の教員も複数在籍しており、ビッグデータやAI・IoT技術に関心のある学生が、5年ほど前から卒論生として私のところにも配属されるようになってきました。その頃から、学生と一緒に機械学習や深層学習を勉強するようになりました。

本稿では、私の土砂災害と地震時の道路被害を対象とした機械学習・深層学習の研究事例を紹介させていただきます。当時の論文を今振り返ってみると、モデルの精度も研究の進め方も何か微妙な気がして、課題ばかりが目につきます。本稿は立派な研究成果の紹介では決してありませんので、迂闊に手を出すとこういう落とし穴に嵌まるのだなという視点で読んでいただければと思います。

2. 土砂災害に関する著者らの研究事例の紹介

防災科学技術研究所では、1970年代に撮影された空中写真の実体視による地形判読を通して、地すべり変動によって形成された地形的痕跡（地すべり地形）をマッピングしています¹⁾。著者らの既往研究²⁾では、宮城県仙台市の地すべり地形を対象として、標高、傾斜角、起伏量、微地形等の素因が地すべりの発生確率に与える影響を評価し、機械学習を用いて地すべり発生地点を予測しようと試みました。

この研究では、機械学習手法としてサポートベクターマシン (SVM) とランダムフォレスト (RF) を用いました。このうちSVMは、地すべり発生確率にどの素因が強く影響しているのか、中身を確認することが困難なブラックボックス的な手法の一つです。そこで、機械学習を行う前処理として、小島ら³⁾を参考に、地すべり発生確率に与える素因の影響を共分散構造分析によって定量化することとしました。基本モデルとして6つの素因を用意していましたが、そのうちの4つ（標高、傾斜角、傾斜方向、微地形）の素因だけを考慮す

るモデルの適合度が最も高い結果となりました。

そこで、これらの4つの素因を用いて、地すべり発生あり／なしを分類するための機械学習を行いました。この研究で用いたデータセットは、地すべり発生ありとなしの比が1:4と偏りのある不均衡なデータとなっていました。そのため、そのまま機械学習を行うと、正答率が高くなるように、「地すべりなし」と答えがちな分類モデルが構築されます。本研究のSVMでは、全体精度は82.3%と高かったのですが、地すべり発生地点のうち20.3%しかの申しない、見逃しの多い分類モデルとなりました。

このような不均衡データに対応するには、データ数の偏りを補正するようなサンプリングをする、少数のクラスの誤分類に重いペナルティを課す（学習時にクラスの重みを設ける）、という2通りの方法があります。本研究では、オーバーサンプリングの手法であるSMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique)⁴⁾を適用することとしました。SMOTEでは、まず、少数派のクラス（この研究の場合は地すべりありデータ）のある1つのデータについて、類似度計算により近傍にあるk個の少数派クラスのデータを選びます。このk個のデータの中からランダムに一つ選び、二点を結ぶ直線上に新たな少数派クラスのデータを生成するアルゴリズムです。つまり、人工的に少数派クラス風なデータを生成することになります。初めはそんなことをしてもよいのかと驚きましたが、SMOTEは拡張版アルゴリズムが100以上も提案されるような、この分野では超メジャーなオーバーサンプリング方法の一つです。

SMOTEによるオーバーサンプリングを適用したSVMでは、全体精度は70.2%に低下します。これは、オーバーサンプリングによってデータの不均衡性が解消され、「地すべり発生あり」と分類モデルが答えるようになったためです。そのため、空振り（地すべりなしの地点を地すべりありと答えること）が増加し、全体精度が下がります。一方で、地すべり発生地点的中率は70.9%と大幅に改善されました（図1）。

3. 地震時の道路被害予測に関する著者らの研究事例の紹介

前章で紹介した研究事例では、信頼できる研究機関

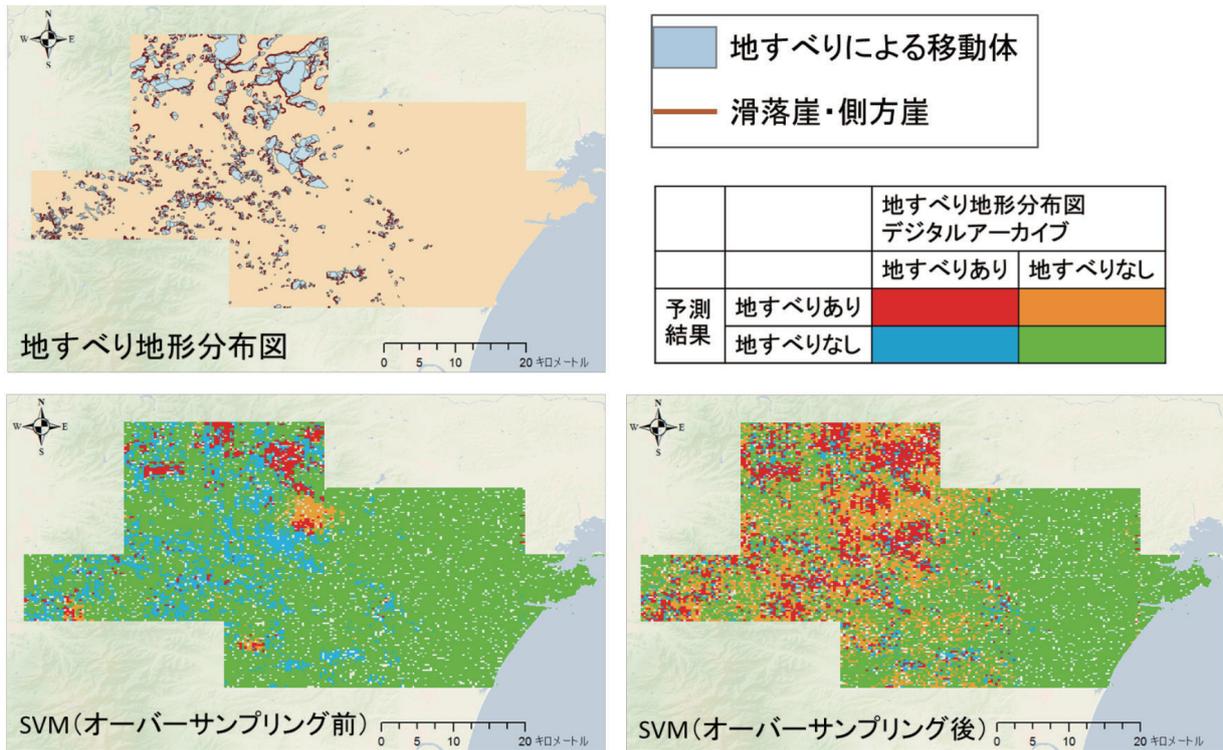


図1 地すべり地形の予測結果²⁾

が公開するデータを正解データとして機械学習を適用しました。本章で紹介する事例は、機械学習や深層学習に適用可能な多量のデータを、自分たちで如何に取得するかというところから検討したものです。

2016年熊本地震は、震源に近い熊本市、西原村、益城町を中心に甚大な被害をもたらしました。道路網にも大きな被害が発生し、熊本市と阿蘇地方を結ぶ国道57号線、国道325号線、県道28号線が通行止めとなり、迂回を強いられるなど多大な影響がありました。道路ネットワークは負傷者の搬送、救援物資及び重機の搬入に非常に重要であるので、発災後できるだけ早く道路状態を把握する必要があります。そこで、著者らの既往研究³⁾では、自動車の正面から撮影した5 m 間隔の連続写真を用いて、深層学習により道路閉塞（建物の倒壊などによって、道路の一部が障害物で覆われ、車の通行に影響を与える場合）、道路被害（地震によるひび割れ、段差など）、無被害の3区分に画像を判別するモデルを構築することを目標としました（図2）。

深層学習にあたり、3区分のラベル付きの画像データセットを構築する必要があります。研究当時、深層学習に必要な画像の枚数をざっと調べてみると、少なくとも1万枚は用意する必要があるようでした。さらに、ラベルの質も重要です。道路閉塞、道路被害、無

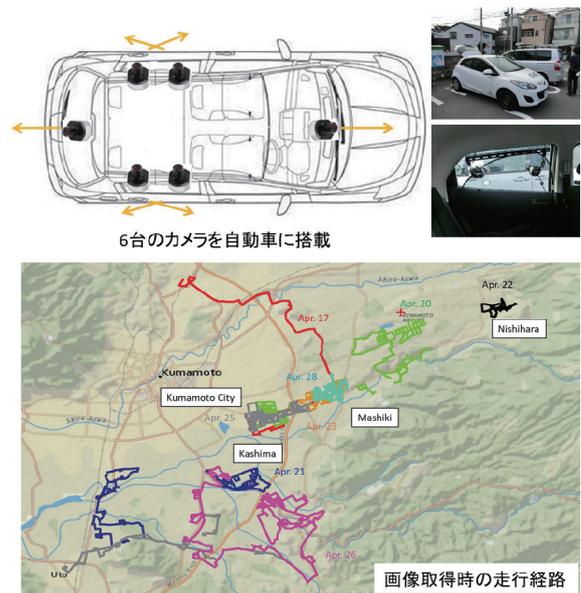


図2 熊本地震後の道路画像の取得⁵⁾

被害の3区分のラベル付けが正しく行われてないといけません。そこで、まず私を含む6人が、31,951枚の画像を目視で道路閉塞、道路被害、無被害に分類しました。次に6人中5人以上が道路閉塞、道路被害と分類した画像を道路閉塞、道路被害としてラベル付けしました。無被害に関しては十分な画像数が得られやすいの

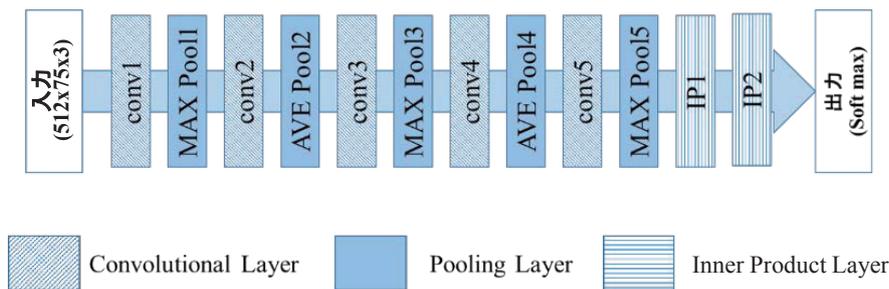


図3 道路被害予測のためのCNNの構成⁵⁾

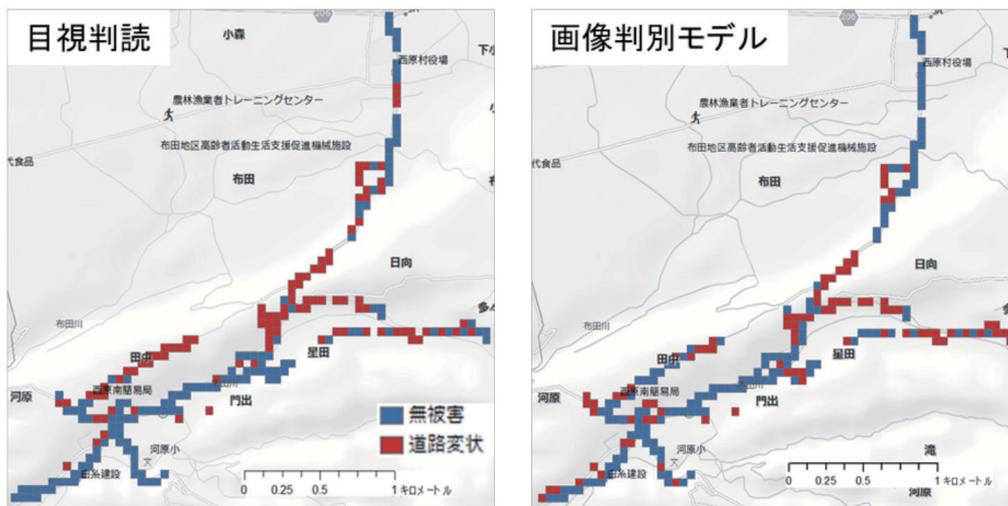


図4 道路被害に関する目視判読結果と画像判別モデルによる抽出結果の比較⁵⁾

で、6人全員が目視で無被害と分類した画像だけを用いることにしました。この結果、道路閉塞と分類された画像は512枚、道路被害は673枚、無被害は14,346枚となりました。このうち各分類100枚ずつを精度評価用画像として予め分離し、残りを深層学習に用いました。

この研究では、深層学習のフレームワークとしてCaffe (Convolutional architecture for fast feature embedding)⁶⁾を用いました。畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) の構成は、入力層が1層、畳み込み層が5層、プーリング層が5層、全結合層が2層、出力層が1層としました (図3)。

未知の画像である各分類100枚ずつの精度評価用画像を用いて画像判別モデルの判別精度を算出すると、無被害、道路閉塞の判別精度はそれぞれ90%、87%と高い結果となりました。一方、道路被害は66%とやや低かったですが、誤判別した34枚の画像のうち15枚は道路閉塞と誤判別されていました。この結果から、路面のひび割れ等の道路被害の判別は難しいものの、誤判別のうちの約半数は道路閉塞と分類されるため、道

路被害と道路閉塞をまとめて地震による道路変状としてしまえば、良好な予測結果を返すのではないかと期待しました。

これらの検討結果に基づき、深層学習に用いていない1483枚の画像に画像判別モデルを適用し、目視判読結果と比較しました (図4)。図中では、結果を50mメッシュごとに表示しています。このくらいのスケールの地図であれば、道路変状の発生位置を概ね抽出できるので、画像判別モデルの精度向上を図ることによって、地震後の迅速な道路状況の把握に有用ではないかと考えております。

一方で、深層学習はブラックボックス的な手法です。正しく分類されている画像であっても、画像判別モデルが人間が期待する注目領域に着目して分類しているのか、結果として偶然的にたまたま正しく分類されたのか、人間は判断できません。Grad-CAM⁷⁾は、画像分類に寄与する画像中の箇所を可視化する手法の一つです。著者らの別の研究⁸⁾でも適用しましたが、深層学習の結果を吟味し、精度向上を図るのに有用な手法の一つと考えられます。

4. おわりに

本稿では、私が携わった2つの研究事例を紹介させていただきました。私の研究成果そのものの評価は別として、機械学習や深層学習などAI技術の防災への利用は今後も数多く試みられることと予想され、その効果も非常に期待できるものと思います。

地震被害を対象とした2クラス分類で考えた場合、再現率と適合率という2つの精度があります。再現率は、地震被害を正しく判定できた割合のことです。適合率は、地震被害と判定したもののうち本当に地震被害であったものの割合です。基本的には両者はトレードオフで、再現率を高くすると適合率は下がり、適合率を高くすると再現率は下がります。地震被害という少数のクラスを抽出しようとする場合、再現率は当然高いほうが望ましいですが、適合率が下がってしまうと、多数の無被害のサンプルから多くの誤抽出がなされることとなります。

このような話は、ウィルス検査の陽性／陰性の精度と同様のことです。再現率（疾患ありの人を正しく陽性とする割合）を高めると、適合率が下がり偽陽性（疾患なしの人が誤って陽性と判断されるケース）が増加します。高い再現率のウィルス検査であっても、無症状の人を片っ端から検査すると、偽陽性者が多数生じてしまいます。つまり、ウィルス検査では事前のスクリーニングは重要なことです。

本稿で紹介した私の2つの研究事例は、得られたデータを片っ端から判別器にかけ、多数のサンプルから少数の被害を抽出しようとしたようなもので、自分で改めて見ても無理があるように感じられます。ウィルス検査の事例を鑑みると、無被害事例と比べて被害事例が少ない地震工学分野では、事前のスクリーニングを充分に行うことによって、機械学習や深層学習の適切な利用へと繋がるのではないかと考えております。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：地すべり地形分布図デジタルアーカイブ、https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/index.html
- 2) 古川昭太、丸山喜久：共分散構造分析と機械学習に基づく地すべりと土砂崩壊地点の地形的特徴の評価、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol. 74, No. 4, pp. I_369-I_380, 2018.
- 3) 小島尚人、大林成行、青木太：共分散構造分析を導入した斜面崩壊危険箇所評価アルゴリズムの構築、土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.79-93, 2002.
- 4) Chawla N.V., Bowyer K.W., Hall L.O. and Kegelmeyer W.P.: SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique, Journal of artificial intelligence research, Vol. 16, pp. 321-357, 2002.
- 5) 瀬崎陸、丸山喜久、永田茂：車載カメラ画像を活用した地震時の道路被害の自動抽出、日本地震工学会論文集、Vol. 19, No. 6, pp. 6_244-6_257, 2019.
- 6) Jia, Y., Shelhamer, E., Donahue, J., Karayev, S., Long, J., Girshick, R., Guadarrama, S. and Darrell, T.: Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding, Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Multimedia, pp. 675-678, 2014.
- 7) Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D. and Batra D.: Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization, Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp. 618-626, 2017.
- 8) 戸澤謙弥、劉ウエン、丸山喜久：現地写真を用いた畳み込みニューラルネットワークによる地震時の建物被災度評価、日本地震工学会第15回年次大会梗概集、Paper No. A-2-7, 2020.



丸山 喜久 (まるやま よしひさ)

2004年東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻博士課程修了、東京工業大学21世紀COE研究員、千葉大学助手・助教、准教授を経て2019年現職、博士(工学)(東京大学)

IoT技術による建物の地震被害検知

伊藤 拓海

●東京理科大学工学部建築学科 教授

1. はじめに

巨大地震発生後、被災地を訪れた方、被害調査をされた方は、たくさんいらっしゃると思います。被災地まで・被災地での移動手段、被災地での生活（活動拠点、宿泊、食事、など）、膨大な調査対象建物数、持ち運びできる計測機器類での計測・調査・診断、など、様々な制約と困難があります。また、調査活動中の調査員の心身の負担は、決して軽いものではありません。被災者の不安や、不便な生活を思うと、いち早く安心な生活を取り戻せるよう、復旧・復興に向けた第1歩としての被害調査・診断は、信頼性を保証したうえで、迅速性・確実性が求められます。

私たち^{注釈}が研究・開発しているのは、このような被災地の状況の中（インフラ・交通・通信などの寸断）で、構造物の状態を検知し、被災度判定が可能なモニタリング・システムです。つまり、膨大な数の調査対象建物（量）、多様な崩壊様態（質）、ライフラインの寸断（力）の条件に対し、迅速・無人・高精度な診断を実現するモニタリング・システムです。

そこで、IoT (Internet of Things) に注目し、システムを確立し、製品化を目指しています。私たちが考えるIoTは、環境発電、計測法、AI解析、省電力無線通信、データセキュリティーを基幹としています¹⁾。

IoTによるモノやサービスが、私たちの身の回りにあふれかえり、もはや当たり前存在になっています。IoTは、インターネット時代、ユビキタス時代を経て、2000年ころにIoTの概念が確立し、急速に普及しはじめました。当初は、トリリオンセンサーとビッグデータに対し、電気の確保＝環境発電、ビッグデータ＝AI解析、大容量通信＝省電力無線通信、により、モノと人がつなげる社会の実現がコンセプトでした。

このIoTコンセプトに対し、できる限り、この範囲で、震災建物のモニタリング・システムの実現を目指しています。これらの要素技術を結集することは、すなわち、各分野の最先端の技術のいいところを、ちよとずつでも取り入れることで、これまでにはない機能を持ったシステムと製品の実現を目指します。

2. IoTによるモニタリング・システムの概要

被災地の状況、すなわち、交通・インフラとライフ

ライン（電気・水道・ガス）の寸断、膨大で多様な調査対象（崩壊状況、損傷度、など）、通信障害の環境下でも作動するシステムの実用化を目指しています。

環境発電、柔軟な計測法、AI解析、省電力無線通信を本IoTシステムの基幹とし、各要素技術の開発とシステム統合化を進めています²⁾。（表1, 図1）

3. 基礎研究～実用化研究～実地研究～製品化

震災建物の建築構造物をプラットフォームとし、IoTの各要素技術の基礎研究から、機器の開発、さらに統合化してシステムを構築し、具体的な製品化まで、幅広い研究フェーズで取り組んでいます。特に、物理、化学、電気、回路、通信、解析、など、各専門分野の研究者との学際研究を進めています²⁾。（表2, 図2）

実験室での基礎研究・研究室での機器開発を行い、建物へ実装することで、実建物の環境下でのデータ取得の有効性と評価法の検討が可能です。さらに、スペース利用や装着性・着脱性、耐久性、各種振動のノイズなど、実証的な検討が可能です。また、具体的に製品を試作することで、各要素技術の機器の連携や、建物実装時の課題を抽出することができます。

表1 震災建物の診断の課題とIoTシステムの関係

課題	方法	専門
電気	環境発電	物理、化学、電気
計測	小型化、高感度	計測、電気回路
解析	AI、機械学習	データサイエンス
通信	省電力、最適化	通信ネットワーク
製品	回路機器の試作	横断

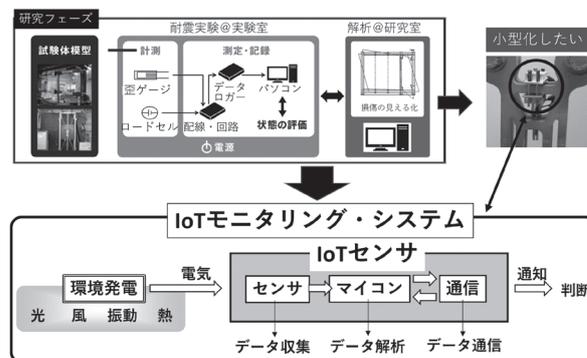


図1 IoTによるモニタリング・システムの概要図

4. 環境発電と計測法

本研究開発では、震災建物の損傷に関し、3つの状態を対象として、環境発電と計測法を検討しています。すなわち、環境発電の材料を利用し、起電と測定を兼ねた方法を検討しています。(表3, 図3)

- 1) 構造部材の塑性化や座屈による圧電(起電)と塑性ひずみ測定(計測)³⁾
- 2) 骨組の常時微動による圧電(起電)と高感度ひずみ測定(計測)⁴⁾
- 3) 鉄骨部材の損傷過程における発熱による熱電変換(起電)と温度測定(計測)⁵⁾

表2 研究フェーズと場所・目的

フェーズ	場所	目的
基礎研究	実験室、研究室	理論・評価法、要素技術、機器開発、他
実用化	現場、実建物	計測、装着性、耐久性、通信環境、他
製品化	研究室、実建物	製品設計・建物実装、装着性、有効性



図2 研究フィールドの関係

表3 損傷過程における環境発電と損傷計測・評価法

事象	環境発電	計測	評価
1) 塑性化	圧電	塑性ひずみ	損傷度
2) 常時微動	圧電	動的応答	振動特性
3) 塑性発熱	熱電	温度	塑性率

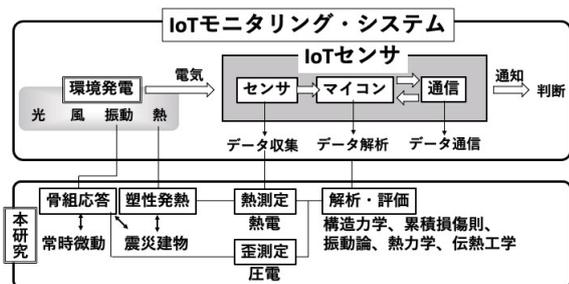


図3 環境発電と計測法

以上の3つの方法に対し、実験室での基礎研究、実建物での実地研究より、以下が明らかとなりました。

1) に関して、圧電材料(PVDF)による起電は極めて微量(塑性率2~3に対し、数 μC 程度)で、システム全体の電気を賄うことは困難です。圧電材料は感度が高く、鉄骨部材の座屈による大変形領域まで追従できます。得られた時刻歴応答データは、ひずみゲージの結果を追従できますが、最大で約2~30%の誤差があります。以上、補助電源として利用し、高感度・大変形対応のセンサー利用が有力と考えています。

2) に関して、常時微動測定・評価の実地研究結果より、1)と同様、高感度のセンサーとしての有効性が確認できました。しかし、起電量はごくわずかなため(数 μV 程度)、常時微動に関しては、補助電源としての利用は困難と考えられます。

3) に関して、鉄骨部材の塑性化による発熱温度は、塑性吸収エネルギーに比例し、数十~数百 $^{\circ}\text{C}$ の発熱が期待されます。熱電材料の熱起電力の理論値から、数Vの起電が期待されます。鋼製ダンパーの動的実験より、100 $^{\circ}\text{C}$ (最大で300 $^{\circ}\text{C}$ 以上)を超える発熱が確認されました。しかし、熱電材料の変形追従性や熱損失などのため、数m~数十mVの起電にとどまっています。このことから、熱損失を減らすための設置方法が重要となります。300 $^{\circ}\text{C}$ 超を記録した実験では、熱電材料が溶解したことから、鋼材の発熱温度の制御や、熱電材料の設置箇所を最適化する必要があると考えられます。

以上より、IoTモニタリング手法における環境発電と測定法として、3)の方法が有力と考えています。これは、振動に起因する骨組の応答ひずみに対し、1), 2)の圧電材料による起電は、応答が小さく、速度依存もあることや、対象部位が広範に分散され、起電量がごくわずかになるためと考えられます。これに対し、犠牲部材としての鋼製ダンパーなどは、骨組に集中的に配置され、地震入力エネルギーを効率的に集約できるため、熱エネルギーにより鋼材が高温となり、熱電材料によって電気を得ることができると考えられます。また、熱電材料には、温度測定器として利用されているものもあり、高い精度と信頼性があります。

5. 損傷評価法と機械学習

環境発電による測定データ(4章)に対し、a)弾塑性力学や熱力学に基づく損傷評価法^{3,4)}、b)振動論による振動特性やスペクトル解析に基づく評価法³⁾、c)機械学習による評価法^{6,7)}が考えられます。(表4, 図4)

a) に関して、1)の圧電による環境発電・測定デー

タに対し、起電量をひずみに換算し、振幅に対して塑性ひずみなどと比較することで、損傷度評価が可能です。また、時刻歴データより累積塑性変形倍率やサイクル数が得られれば、累積損傷則による評価が可能です。いずれも、建築構造分野の評価法を利用できます。

また、3)の熱電による環境発電・測定による温度に対し、熱エネルギーと塑性吸収エネルギーの関係から、振幅や累積値に基づき損傷度を評価できます。個体材料の熱現象より、サイクル数を得ることができるため、累積損傷則による評価が可能です。高速動の実験結果に対し、塑性振幅とサイクル数を求め、線形累積損傷則により約85%の評価精度を実証しています。

b) に関して、2)の圧電による環境発電・測定の常時微動の時刻歴データから、振動特性やスペクトルが得られれば、設計値との比較や、経年データの変動より、構造物の変化をとらえることができます。

c) に関して、b)の振動特性やスペクトルに対して機械学習を適用し、構造体や骨組の状態の変化を捉えます。実地盤上に建設した試験建屋の振動実験データに対し、決定木、サポートベクトルマシン、ロジスティック回帰の機械学習により、それぞれ70～90%程度の精度で、建物の状態を識別できました。なお、機械学習は、教師データが必要となりますが、教師データなしでの損傷評価法も提案され、実験データや実建物での振動データに対し、予測法の検討を進めています。

表4 環境発電・計測法と評価法の関係

発電・測定	評価法	理論・解析法
1) 圧電・塑性ひずみ	塑性率、累積損傷則、他	塑性力学、破壊力学、他
2) 圧電・常時微動	振動特性、スペクトル、他	振動論、スペクトル解析、他
3) 熱電・温度	塑性発熱、熱エネルギー、他	塑性力学、熱力学、伝熱学、他

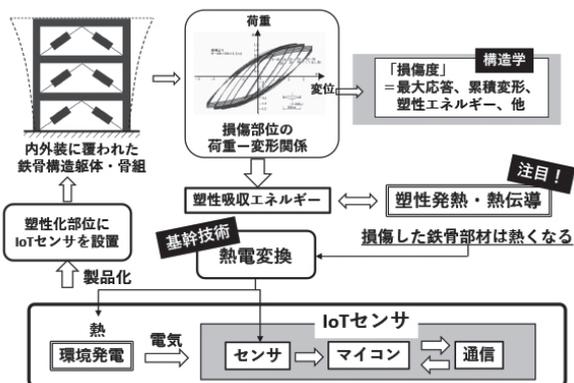


図4 IoTモニタリング・システムと発電・計測・損傷評価法の概要(熱電の場合)

以上より、環境発電材料による測定データに対し、
 ・構造力学や弾塑性力学に基づく評価法、
 ・振動論に基づく評価法、
 ・弾塑性力学と熱力学・伝熱学に基づく評価法、
 を提案し、いずれも有効な評価法と考えられます。

6. 測定データと損傷評価に関する通信ネットワーク

環境発電材料による測定データ(4章)に対し、各種の損傷評価(3章)を、いつ、どこでやるのか。⁸⁾

すなわち、トリリオンセンサーの時刻歴データに基づくビッグデータを評価対象とする場合、1)遠隔地のサーバー等へデータを送信して解析する、2)建物・地域内のサーバーにデータを送信して解析する、3)解析用回路をIoTセンサーに内蔵し、その場で解析して結果のみ送信する、などの方法が考えられます。(図5)

例えば、機械学習は、小型集積回路LSIや拡張性・保守性に優れたプログラミング言語を利用することで、回路に組み込むことは不可能ではありません⁹⁾。

震災時、安否確認や救助要請など、通信量が増大し、通信渋滞が発生します。また、通信基地局が被災することも想定され、平常時の通信ネットワークが利用できないことが考えられます。そこで、長距離通信やデータ中継、被災地域内の通信ネットワークの最適化や、被災地周辺の無被害地域を巻き込んだ広域通信ネットワークを検討する必要があります。

以上より、被災地域の通信ネットワークの強靱化だけでなく、IoTセンサーに測定データの保存・解析・評価の機能を組み込み、その場で損傷度評価まで完結させるシステムが望ましいと考えています。

7. 実用化・製品化と課題

4章の1～3)のモニタリングに対し、環境発電とデータ収録・通信などを組み込んだセンサーを試作し、実建物に実装してモニタリングを進めています。(図6)

熱電変換を利用したIoTモニタリング(熱電モニタリング)に関わる基礎理論、システム構成と製品化、実建物への実装について示します。(図4)

鉄骨構造の損傷過程の塑性吸収エネルギー(弾塑性

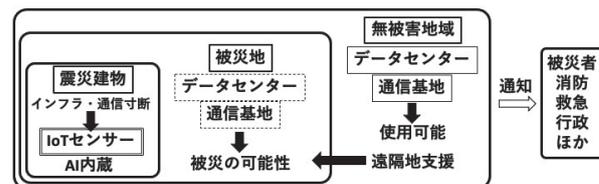


図5 測定データの通信と解析・評価の場所

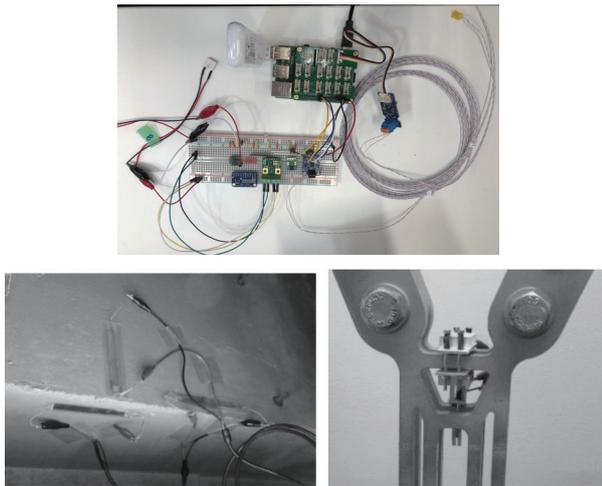


図6 IoTセンサーの試作品と実建物での実装状況
上：IoTセンサーの試作品、左下：RC建物における圧電センサーの設置状況、右下：制振鉄骨住宅における熱電センサーの設置状況

力学)は、熱エネルギーに変換され(熱力学)、損傷部位の温度が上昇し、部材内を熱が移動します(伝熱工学)。熱電材料で熱を収集し、電気を作ります(環境発電)。温度を測定し、発電量と温度の関係から、損傷部位を特定し、損傷度を算出します。

以上より、熱電材料で温度を測定し、環境発電で電気をつくり、センサー・回路を動かします。電気が不足する場合、平常時の環境発電に対する蓄電と、乾電池による補助電源を備えておきます。

鉄骨部材の塑性化部位や温度分布に基づき、熱電材料の耐熱性や耐久性、装着性と着脱性を勘案し、センサーの設置箇所を決定します。また、熱電材料と鉄骨部材の熱移動・熱損失を考慮し、装着方法を検討する必要があります。実験室での動的実験と、実地盤上の建屋の動的実験より、接着力の強いテープと、ばね式のアタッチメントの併用が望ましいと考えています。

8. 結び

本研究開発は、IoTの基本コンセプト、すなわち、損傷現象に対する環境発電、柔軟性のある測定法、ビッグデータに対する機械学習、省電力無線通信に基づくIoTモニタリング手法を検討しています。

モニタリング・システムを設計し、センサーを試作し、実建物へ実装して動的振動実験やモニタリングを進め、有効性と成立性を実証しています。

さらに、官学連携活動で、都市レベルでIoTセンサーをばらまき、データ測定・解析を進めています。都市・建物の防災力強化やハザードマップの作成、非常時の迅速で正確な財政支援・補助金支出・保険料計算などへの適用の可能性を検討しています。

参考文献

- 1) 坂村健：IoTとは何か、角川新書、239ページ、2016
- 2) T. Ito, M. Hasegawa, T. Nakajima: Internet of Things for Buildings that Make Life Safe and Secure, IEEE IoT, News letter, January 10, 2017
- 3) N. Sakiyama, et.al: Damage Detection and Evaluation of Wooden Structural Members Using Piezoelectric Sensors and Autoencoder for Structural Health Monitoring, CIB-WBC2019, 2019.6
- 4) T. Ito, et.al: Development of IoT System for Damage Detection Method of Building Structures and Feasibility Study on Single-story House on Actual Ground, CIB-WBC2019, 2019.6
- 5) E. Iwasaki, et.al: IoT Monitoring System of Steel Passive Vibration Controlled Building with Thermoelectric Conversion Technology, CIB- WBC2019, 2019.6
- 6) 崎山夏彦, 他: IoTによる構造物の状態検知システムの開発と機械学習による試験建屋の状態検知に関する検討, 2019年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.167-168, 2019.9
- 7) T. Kishimoto, et.al: Study on Damaged Position Detection in Buildings using Unsupervised Learning, ISSS2019, 2019.11
- 8) 長谷川聡, 他: IoTデバイス向け強化学習型チャンネル選択手法と建築物モニタリングシステムへの応用, 電子情報通信学会技術研究報告, No.124, p.5-10, 2020.8
- 9) プログラミング言語、Elixir

注釈

本研究は、東京理科大学・山本貴博先生(物理)、中嶋宇史先生(応用物理)、河原尊之先生(電気・回路・解析)、橋爪洋一郎先生(応用物理)、長谷川幹雄先生(通信ネットワーク)、元祐昌廣先生(熱力学)、森健士郎先生(構造力学)との学際研究です。



伊藤 拓海(いとう たくみ)

2004年東京大学大学院卒、東京大学生産技術研究所機関研究員、東京大学助手、同大助教、2009年東京理科大学講師、2013年同大准教授を経て2019年より現職。博士(工学)、専門分野：耐震・制振鉄骨構造物と合成構造物(木・鉄、土・鉄)の耐震システムの開発と設計法、耐震性計測・評価法

AIによるSNS情報分析を用いた地震被害状況把握

山口 真吾

●国立研究開発法人情報通信研究機構イノベーション推進部門連携研究推進室 室長

1. はじめに

災害に強い地域づくりを進めるためには、気象状態や被災状況に関する情報の収集・伝達・分析が不可欠であり、国や地方公共団体は、防災情報システムや各種センサー設備、防災行政無線の整備・運用を行ってきた。また、近年では、ICT（情報通信技術）やAI（人工知能）を用いた災害対策が注目され、SaaS（Software as a Service）型の情報提供サービスやAIによる河川水位予測といった新ビジネスが本格化している。

今後、被災現場での活躍が期待されるのは、「センサー」としての被災者自身である。災害時にSNS（ソーシャルネットワーキングサービス）を通じて個人から発信される情報は、災害現場の状況そのものであり、被災者の視点での被害状況をつぶさに知ることができる貴重な情報源といえる。また、多くの住民が閲覧するSNSを行政の情報発信手段として活用することは、緊急時に情報を効率的に伝達する上で有効といえる。

このように、地震発生時にSNSを有効活用することができれば、被害状況把握や被災者支援を効果的に行える可能性があるとの認識が近年広まりつつある。

2. 1000億円市場に発展する防災情報関連市場

調査コンサルティング企業のシード・プランニング社の最新の市場調査レポートによると、国内の防災情報システム・サービス市場は2025年度には約1,162億円の市場に発展すると予測されている¹⁾。

防災情報システム・サービスの市場セグメントの中でも、情報システムやSaaS型・AI活用型の情報分析サービスを含めた情報サービスに関する市場規模は増加傾向にあり、中長期的な市場発展が期待されている。同レポートによると、防災分野の情報システムの市場規模は、2019年度の約208億円から2025年度には約455億円と2倍以上に成長すると予測されている。

SaaS型・AI活用型の情報分析サービスとしては、自然言語処理技術を活用して事故や自然災害に関するTwitter投稿を分析して提供する企業が出現している。(株)Specteeは、SNSリアルタイム速報サービス「Spectee（スペクティ）」をクラウドサービスとして提供している。同社は、複数のSNS（Twitter、Facebook、Instagram、YouTube）に対応し、SNS情報に基づいて各

地の事故・事件・火事・気象・災害などの情報を配信するSNSリアルタイム速報サービスを国内の報道機関等に提供している。また、(株)JX通信社では、SNSを中心に災害、事故、事件等の情報をAIで検知して配信するサービス（緊急情報サービス FASTALERT）を提供している。

表1 防災情報システム・サービス市場の将来予測

市場セグメント	2025年度の市場規模（億円）
情報システム	455
通信回線	249
防災無線	48
消防指令システム・消防無線	121
センサー設備	217
気象情報	18
インターネットサービス	23
ウェブサイト設計・開発	6
端末	17
電源設備等	8
合計	1,162

（出典）シード・プランニング社の調査レポート

3. AI活用を促す防災基本計画の改定

我が国がAIを活用したSNS情報分析による災害対策を真剣に考え始めることとなったきっかけのひとつは、2016年の「平成28年熊本地震」といえる。

熊本地震は855か所に開設された避難所への避難者の数が最大18万人に及んだほか、九州新幹線の運休や九州自動車道の通行止めに加え、東西の幹線道路や鉄道が分断された状態が発生し、九州全域の地域経済に大きな影響を及ぼした。

熊本県での死者は約270人に達したが、このうち避難生活に起因する疾病により死亡する、いわゆる災害関連死は200名以上に達している²⁾。つまり、災害による「直接死」よりも、その後の災害による負傷の悪化または避難生活における身体的負担による疾病により死亡する「災害関連死」の方が多数を占めており、文明社会として危機感を持って解決すべき問題が顕在化した大規模災害だったといえる。

そのような災害関連死を発生させてしまった反省を

踏まえ、2017年4月に国の防災基本計画が修正されている。

○2017年に防災基本計画に追加された項目

○ 国及び地方公共団体等は、被害情報及び関係機関が実施する応急対策の活動情報等を迅速かつ正確に分析・整理・要約・検索するため、最新の情報通信関連技術の導入に努めるものとする。

わずか数行の国及び地方公共団体の新たな努力義務規定ではあるが、ビッグデータ時代にAIやSNSを活用した災害対策を取り入れるための重要な根拠となるものであり注目される。規定に書かれた国や地方公共団体が導入すべき「最新の情報通信技術」としては、各種の情報システム、ソフトウェアやアプリケーション、コンピュータ・情報処理関連技術、AI関連技術、SNS、通信技術(5G、B5G)、IoT関連技術、宇宙関連技術等が想定される。しかし、技術革新とともに情報通信技術は日々進化するため、防災基本計画では具体的な技術は意図的に特定していない。都道府県や市町村は、この防災基本計画に従って地域防災計画を改定し、AIを含めた最新技術を自らの業務に導入することが求められている。

4. 国における災害時のSNS利用推進政策

国としても、災害時のSNS利用を推進している。高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部の「防災・減災におけるSNS等の民間情報の活用等に関する検討会」では、災害時の被害情報や被災者の要望などを収集するに際し、SNS活用の有効性を踏まえ、「防災・減災におけるSNS等の民間情報等の活用等に関する報告書」を2014年9月に公表している。

本報告書では、人によって感知(見た、聞いた、感じた)された防災関連情報について、「人」の感知機能を「センサー」の一種と見なして、「ソーシャル・センサー」と呼び、そこから得られる情報を「ソーシャル・センサー感知情報」という用語を用いて分類できると説明している³⁾。

この報告書を受け、2017年3月、内閣官房情報通信技術(IT)総合戦略室は、災害対応においてSNSを活用することの有効性を踏まえた、「災害対応におけるSNS活用ガイドブック」を公表している。

また、国土交通省では、2018年10月より「住民自らの行動に結びつく水害・土砂災害ハザード・リスク情報共有プロジェクト」を進めており、洪水被害や土砂災害に対して的確な避難行動をとれるようにするため、

住民一人ひとりに情報が伝わることを目指している。同年の「平成30年7月豪雨」では、西日本を中心とした広域かつ長時間にわたる記録的な大雨となり、各地で甚大な洪水被害や土砂災害が発生したが、浸水想定区域内や土砂災害危険箇所など事前に危険情報が与えられた地域で多くの被災者を生むこととなったため、関係機関が連携して、より良い災害情報の内容や発信の仕方、伝達の手段等を検討する必要があるとの問題意識に基づき開始されたプロジェクトである。

本プロジェクトでは、情報を発信する行政と情報を伝える機能を有するSNSを含めたメディア関係者などが連携し、広範性、即時性、双方向性、高参照性などそれぞれの情報伝達手段が有する特性を活かした対応策を検討し、住民避難行動に結びつく災害情報の提供・共有方法を充実し、速やかにその実施を図ることを目的としている。

表2 国交省プロジェクトの参加団体(抜粋)

<マスメディア>

日本放送協会(NHK)、一般社団法人日本民間放送連盟、一般社団法人日本ケーブルテレビ連盟
NPO法人気象キャスターネットワーク、エフエム東京、全国地方新聞社連合会

<ネットメディア>

LINE株式会社、Twitter Japan株式会社、グーグル合同会社、ヤフー株式会社、NTTドコモ株式会社、KDDI株式会社、ソフトバンク株式会社

<行政関連団体>

一般財団法人マルチメディア振興センター(Lアラート)

<行政>

国土交通省水管理・国土保全局、道路局、気象庁

<オブザーバー>

内閣府(防災担当)

総務省 情報流通行政局 地域通信振興課

総務省 消防庁 防災課

総務省 消防庁 防災課 防災情報室

国土交通省 大臣官房 広報課

国土交通省 大臣官房 技術調査課 電気通信室

国土地理院 応用地理部

国土技術政策総合研究所

5. 情報通信研究機構でのSNS情報分析技術の開発

国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)では自然言語処理技術を活用した災害時のSNS情報分析の技術開発を進めている。これまでに、対災害SNS情報分析システム(DISAANA)と災害状況要約システム

(D-SUMM)が開発され、試験的に一般公開されている。

DISAANAは、Twitterへの災害に関する投稿をリアルタイムに分析し、「大雨が降っているのはどこ？」といった質問を行うと、投稿内容から情報を抽出できるサービスである。2015年4月から試験公開されており、DISAANAを使用することで、災害に関するSNS情報を容易に検索できるようになる。

一方、D-SUMMは、指定されたエリア及び時間の条件のもと、Twitter投稿から自動的に災害関連情報を抽出し、自動的に要約を作成する。2016年10月から試験公開されている⁴⁾。都道府県単位または市区町村単位でエリア指定すると、指定エリア内の被災状況が情報分類され、被災状況が一目でわかるようになる仕組みである。

このD-SUMMは、2018年6月18日大阪府北部の地震の発生時もリアルタイムで稼働し、分析結果を広く提供した。災害が発生した6月18日午前7時58分のわずか1分後には、数十件の関連するTwitter投稿を分析して、要約情報を出力できている(D-SUMMは日本語ツイートの10%ランダムサンプルを対象としている)。SNSへの投稿が行われれば数秒以内に情報処理は完了するため、誰でも短時間で被災状況を把握することができる。この数十件の書き込みの中には停電発生に関する投稿も含まれており、地震発生の数分後には地域での停電発生がネット上で把握できていたことになる。

こうしたDISAANA及びD-SUMMの技術を活用して、NECはTwitter上の災害に関する膨大な情報をリアルタイムで解析・可視化するソリューション「高度自然言語処理プラットフォーム」の商用サービスの販売を2020年7月から開始している。NICTからNECへのビジネスライセンスの供与等による技術移転の成果である⁵⁾。

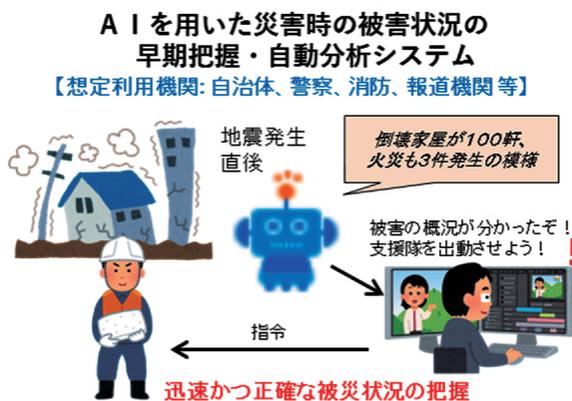


図1 AIによるSNS情報分析のイメージ
(出典：電脳防災コンソーシアムの政策提言より)

6. 電脳防災コンソーシアムの政策提言

災害時のAIを用いたSNS情報分析を推進するため、慶應義塾大学環境情報学部(筆者の当時の研究室)、国立研究開発法人情報通信研究機構(データ駆動知能システム研究センター)、国立研究開発法人防災科学技術研究所(総合防災情報センター)、ヤフー(株)及びLINE(株)は2017年10月、身近なインターネット・メディア・AIを積極的に活用する防災・減災をめざして、「電脳防災コンソーシアム」を共同で設置した。

本コンソーシアムは数回の会合を経て、被災者・避難所の支援につなげるための災害情報に関する課題整理を行い、2018年4月に「インターネット・メディア・AIを活用して被災者に寄り添う防災・減災を実現する55の政策提言 ～電脳AIが内閣総理大臣の情報参謀に任用される時代をめざして～」と題する政策提言を公表した。

本政策提言では、「防災・減災の第一の目標は、人の命を救うことだ。となれば、被災者の誰もが使い慣れていて、親しみのある「ことば」(つぶやき、会話、文字)を使って被災者の状況を把握できるようにすべきだ。被災者の「ことば」は重要な災害情報であり、国・地方公共団体は、被災者達の「ことば」をAIで分析させることによって、被害状況や被災者の困窮状況を全容把握すべきだ」と提言し、AI・SNSを用いた被害状況把握の必要性をアピールした⁶⁾。

電脳防災コンソーシアムの政策提言等を受け、2019年6月18日、LINE、ウェザーニューズ、損害保険ジャパン日本興亜、東京海上ホールディングス、ヤフー、ワークスモバイルジャパンによって「AI防災協議会」が設立されている。本協議会は、産官学が一丸となってAI・SNSをはじめとする先端技術・ITインフラを活用することによって、災害に対するレジリエンスを向上させ、防災・減災にかかる課題解決を目指すことを目的としている。

7. おわりに

今後の防災情報分野における技術革新のキーワードとしては、スマートフォンやSNS、IoT、AI、ビッグデータ、チャットボットが挙げられる。また、将来の官公庁・地方公共団体が用いる防災情報システムの発展形態としては、まずオンプレミス型からクラウドサービス(SaaS型)への移行が本格化するであろう。さらに、新設されるデジタル庁が主導する行政システム全体の一体化・共通化の流れの中で、災害対応機能が行政システムの一部として統合されていくシナリオが考えられる。

しかし、行政組織においては、先進的な新規システムを導入する際の「壁」となる前例主義や横並び意識が引き続き強く存在している。特に、災害対策は失敗が許されないことから、効率は悪くとも旧来から使われてきたシステムが災害対応現場で重視される傾向があり、電話・FAX・ホワイトボードといったレガシーシステムが未だに当たり前のように用いられている。

また、SNS投稿分析で常に課題となるのは、誤情報やデマである。AIによってある程度の情報のふるい分けは可能になるだろうが、現場で実際に起きていることに関してAIが完全に真偽判定することは不可能である。また、人間が用いる微妙な言語表現をAIが完璧に読み解くことは、現状の技術レベルでは困難である。例えば、災害時の「毛布を持っていませんか？」という問いかけは「(不足している)毛布をもらえませんか？」の意味に使われるが、AIは毛布の所持を単純に相手に尋ねる質問と理解する。こうしたAIの限界から、SNS情報分析サービスを提供する企業では、情報分析スペシャリストによる24時間対応のファクトチェック体制を整備している。

さらに、AIが高度化しても、それを取り扱う行政職員の人材問題が横たわっている。災害時には情報洪水に職員が晒されることになるが、AIによってもたらされる膨大な情報によって事態を悪化させるおそれがある。また、職員の一部には、救援を求める情報を受け取ってしまった場合には対応責任が生じることから、「受け取る情報をこれ以上増やしたくない」との本音も一部で存在している。

よって、AIを含めた最新技術を災害対策に活かすためには、利用者が抱える本質的・組織的な課題に十分に配慮する必要がある。防災分野の技術革新に向けた挑戦を躊躇させることのないよう、利用者の負担軽減のためのオートメーション化や判断支援の実用化といった開発が強く求められる。

参考文献

- 1) 株式会社シード・プランニング、「2021年版 防災情報システム・サービス市場の最新動向と市場展望」、pp.90-91、2020年12月4日、<https://www.seedplanning.co.jp/press/2020/2020120401.html>
- 2) 熊本県「平成28年熊本地震等に係る被害状況について【第288報】」
- 3) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部（IT総合戦略本部）新戦略推進専門調査会分科会防災・減災分科会（第6回会合）、「防災・減災におけるSNS等の民間情報の活用等に関する検討会報告書（案）の概要（平成26年9月4日）」、https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/senmon_bunka/bousai/dai6/gijisidai.html
- 4) 国立研究開発法人情報通信研究機構、「大規模災害時の膨大な被災報告を人工知能で瞬時に整理・要約～災害状況要約システム「D-SUMM」を試験公開～」、2016年10月18日、<https://www.nict.go.jp/press/2016/10/18-1.html>
- 5) 日本電気株式会社「NEC、Twitter上の災害に関する情報をリアルタイムで解析・可視化する「高度自然言語処理プラットフォーム」を発売」、2020年6月26日、https://jpn.nec.com/press/202006/20200626_01.html
- 6) 慶應義塾大学環境情報学部山口真吾研究室、「環境情報学部山口研究室らが参加する電腦防災コンソーシアムが政策提言を公表」、2018年4月17日、<https://www.sfc.keio.ac.jp/news/012937.html>



山口 真吾 (やまぐち しんご)

1995年早稲田大学理工学部卒、同年郵政省（総務省）入省。早稲田大学政治経済学術院非常勤講師、慶應義塾大学環境情報学部准教授を経て現職、専門分野：ICT政策、無線通信、災害情報システム論

地震予知へのAI技術の活用

井田 喜明

●東京大学名誉教授、アドバンスソフト株式会社 研究顧問

1. はじめに

プレートの沈み込み帯などの地震多発地域に住んで深刻な地震災害に度々見舞われる人々にとって、地震予知の実用化は悲願であり、その達成に向けて多くの研究がなされてきた¹⁾。日本でも濃尾地震(1891年)を経験して地震予知の検討が始まり、関東大震災(1923年)の発生を受けて東京大学地震研究所が設立された。1965年には地震予知計画が始まった。

世界を見まわすと、ダイラタンシーモデルの提案や海城地震(1975年、中国)の予知の成功で、1970年代には地震予知の実用化は目前であるとみられた²⁾。しかし、予知研究が目指す前兆現象の確実な把握は期待したほど成果があがらなかった。20世紀末に米国パークフィールドで実施された地震予知の実験が失敗に終わると、地震予知に対する悲観的な見方が急速に広がり、地震の発生は確率的にしか評価できないとする見解が定着してきた。日本でも阪神・淡路大震災(1995年)を契機に地震の発生確率が算出されるようになった。

その一方で、21世紀に入って人工知能(AI)に新展開がもたらされると、その技術を地震予知に活用しようとする動きが出現した。IBMやNASAもそれに向けた計画を発表したが、今のところ際立った成果は得られていないようである。しかし、関連する研究は地道に進められており、本稿ではまずそれについて概観する(第2章)。さらに著者が現在進めている研究を紹介する(第3章)。

2. 地震予知とAI技術

2.1 AIと学習

AIが様々な分野に活用されるにつれて、それについて人々がいさぐち描像も多様になってきた。ここではAIは「学習する計算システム」であると理解する³⁾。人間が成長する過程で知識や経験を積んで能力を高めるように、外から与えられる題材を学習して機能を高めるシステムがAIだという理解である。AIにとっては、システムがどう構成されるかとならんで、何をどう学習するかが重要なのである。

AIの学習には「教師あり学習」と「教師なし学習」がある。教師あり学習は、問題と正解の組を多数与えて、

正解にできるだけ近い解答を出すシステムを構築する。教師なし学習は、入力データの集団に分類などの操作を加えて集団の性質を究明する。第2章で以下に紹介する2つの研究事例はともに教師あり学習であり、第3章で扱うのは教師なし学習である。

2.2 翌月の最大地震の予測

まず、その月までの情報を用いて翌月に発生する最大地震を予測するPanakkatらによるシステムを紹介する⁴⁾。予測に用いる入力データは直近の大地震からの経過時間、その間の平均マグニチュード、マグニチュードと頻度の関係式(グーテンベルグ・リヒター則²⁾)の係数の係数(b値)、その地域に特徴的な地震の発生間隔など8つである。AIシステムはニューラルネットワークで、3層の標準型、再起型、出力前の最終段にガウス関数で正規化する型の3種類を試みる。

開発されたシステムは南カリフォルニアとサンフランシスコ湾地域に発生した過去の地震に適用され、地震のリストを用いて入力データと出力データのセットが各月ごとにつくられた。学習には1950～1990年のデータが使われ、システムの性能は1991～2005年のデータを用いてテストされた。

テストの結果によると、再起型ニューラルネットワークが最も好成績を上げ、大きな地震の発生した月の多くで最大マグニチュードを0.5以内の精度で予測できた。ただし、予測した大きな地震が実際には起こらなかった月や、逆に大きな地震が起きたのに予測できなかった月もあった。

2.3 摩擦すべりの発生時刻の予測

もうひとつの事例は岩石の摩擦実験のデータをAI技術で解析するRouet-Leducらによる研究である⁵⁾。摩擦実験とは、実験室で2つの岩石片を接触させ、接触面にせん断応力を加えてすべらせる実験である。自然界の地震は同じ断層で繰り返し発生する。摩擦実験でも接触面が固着とすべりを繰り返す現象(スティックスリップ)があり、それが断層での応力の蓄積と地震による応力の解放に類似な物理現象であるとみなすのである。

岩石の内部では摩擦面が固着しているときも多数の微小破壊が起きており、そのときに発生する音波(AE)は岩石に張り付けた振動子で計測できる。この音波の

記録をAIで解析する。そのために時間を細かく分割して各区間で振幅の平均、分散、高次のモーメントなど100種類の統計量を計算し、それを入力データとする。出力は摩擦面の次のすべりまでの時間で、それを実験で得られる実際の時間と対比する。

音波のデータはランダムフォレスト法で解析された。この方法は、入力データと正しい出力値の組み合わせから多数の組み合わせをランダムに選び出し、学習によって末端の枝に出力値をおく決定木をつくる。組み合わせを変えて森になるような多数の決定木をつくり、それらの予測結果を総合して最適な予測値を得る。

図1は学習に使わなかったデータを用いて予測能力をテストした結果である。AIが音波の計測データから予測する次のすべりまでの時間(太線)は、実際にすべりが発生した時間(細線)とよく一致する。岩石内の微小破壊は摩擦面のすべりの発生を事前知っているようである。自然界でも大きな地震の発生が小さな地震の解析によって予測できるのだろうか。

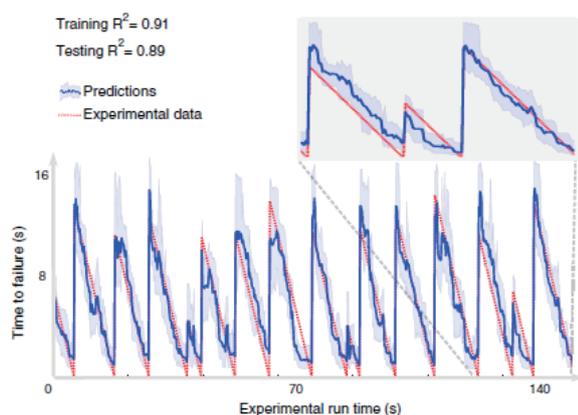


図1 摩擦実験の音波の解析で予測された次のすべりが起こるまでの時間(太線)と実測(細線)⁵⁾

3. 大きな地震の発生を小さな地震で予測

3.1 目的と解析方法

自然界では大小様々な地震が起こり、マグニチュードが1小さくなると、発生数がほぼ10倍にふえる。地震災害の原因は通常マグニチュードが5以上の地震なので、このような大きな地震の予測が地震予知の目的である。前節では大きな地震の予測に小さな地震が役立つと示唆された。それを検証する意図で著者が現在進めている研究を紹介する。

研究には教師なし学習の手法のひとつである自己組織化写像 (self-organizing map, SOM) を用いる。SOMは入力データの集団を低次元の空間に投影して、入力データ同士の関係や集団の性質を見易くする技術である⁶⁾。性質の似た入力データが近くにくるように投影

して、分類などに役立てるのである。投影される空間には解析結果を図示するのに便利な2次元空間(平面)が好まれ、この解析でも投影先に平面を用いる。

3.2 解析するデータ

東北地方と関東地方で発生した過去の地震数の時空間分布を別々に解析する。2地域を図2のように分割して、それぞれの区画で発生したマグニチュード1以上の地震の数を3ヶ月毎(正確には0.25年毎)に数える。各期間には空間の区画の数だけ地震数が計測されるが、それをSOMの入力データとする。入力データは解析する期間の数だけ得られ、各々が東北地域では30成分、関東地域では12成分をもつベクトル(入力ベクトル)になるわけである。

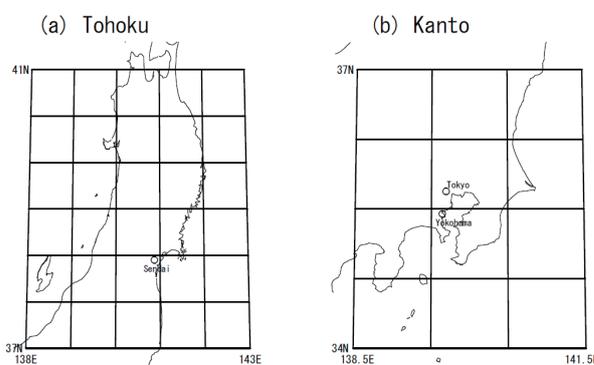


図2 地震数の空間分布を計測するために、東北地域(a)と関東地域(b)を分割する区画

入力データの作成には、Hi-netの観測網⁷⁾で決められた震源リストの中で、観測網がほぼ固まった2003年以降のデータを用いた。入力ベクトルとして東北地方では2018年までの62個、関東地方では2019年までの66個をつくり、時間順に0~61、0~65までの番号をつけた。

入力データは主に小さな地震の時空間分布を表すが、大きな地震の発生と関係づけて、入力ベクトルにラベルをつける。ラベルは大きな地震が起きた期間の入力ベクトルにE、その1つ前の期間にB、2つ前の期間にb、1つ後の期間にaをつける。それ以外の入力ベクトルはラベルをoとする。

どのラベルをつけるかは大きな地震の定義による。大きな地震を判別する下限のマグニチュードは、すべてのラベルができるだけ均等に分布するように決め、東北地域ではマグニチュードが6.8以上、関東地域では5.8以上を大きな地震とみなした。

入力データの一部を東北地域からとって図3に示す。この例は、番号が6番(2004年夏)から11番(2005年冬)まで、時期が連続する6つの入力ベクトルを集

める。空間の区画には、その期間にそこで起きた地震数に応じて濃淡をつける。9番の期間に大きな地震(マグニチュード7.4、2005年8月16日発生、震源は+で示した区画)が起きており、この入力ベクトルにはEのラベルがつけてある。また、前後の入力ベクトルにはB、

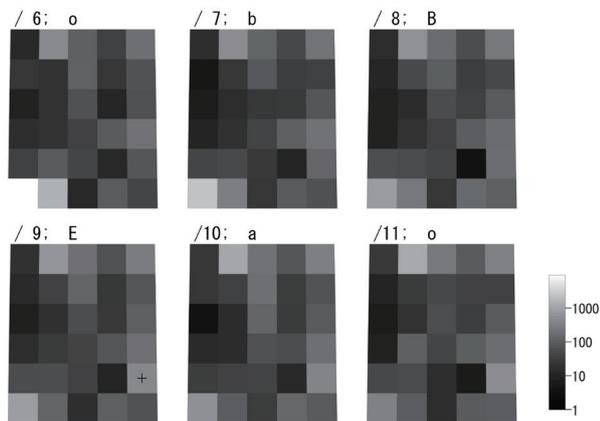


図3 SOMの入力データの例。ラベルのつけ方に注意

b、aのラベルがつけてある。

3.3 解析方法

入力データはSOMで投影して性質を調べる。SOMは投影する空間に有限個の格子点を設け、各々に入力ベクトルと同じ成分をもつ重みベクトルを配置する。入力ベクトルは、格子点の中で最もよく似た(成分の差の2乗和が最小になる)重みベクトルをもつ格子点を探して、そこに投影する。重みベクトルは、よく似た入力ベクトルが近くに投影されるように学習によって調整する。さらに、投影が格子点の境界の影響を受け

ないように、同じ重みベクトルをもつ格子点が外側にも周期的に分布すると想定する。

SOMの学習では、重みベクトルはランダムに初期化してから反復法で調整する。調整の各ステップでは、入力ベクトルをひとつずつ取り出して投影し、投影先の格子点とその周辺で重みベクトルを入力ベクトルにさらに近づけるように修正する。この操作を投影結果が落ち着くまで繰り返して、類似な入力ベクトルが近くに集まるように調整するのである。

3.4 解析結果

東北地域と関東地域の各々に対して、入力データはSOMで2次元平面上の11x11個の格子点に投影した(図4)。学習のための反復計算は、両地域とも100ステップ(入力ベクトル全体を一巡する重みベクトルの修正を1ステップとして)以内に最終的な投影結果に収束した。図4では各格子点の位置に正方形をおき、重みベクトルの成分の大きさに応じて濃淡がつけてある。また、入力ベクトルが投影された格子点には、その入力ベクトルのラベルが書き込まれている。

投影結果は、両地域ともラベルoをもつ格子点が他のラベルの格子点と分かれる傾向を示す。ラベルoは地震活動が静穏な時期、大きな地震を含むそれ以外のラベルは地震活動が活発化した時期を表すと考えられるから、似たもの同士を集めるSOMの投影で地震の活動度の違いが分離できたことになる。なお、投影図はランダムな初期化の仕方などによって分布が変わるが、図4は比較的に見やすい投影図を選択した。

地震の活動期と静穏期の境は図4では点線で区画した。この点線は重みベクトルにつけた濃淡にも考慮して引いた。活動期と静穏期は各々が複数の領域に分か

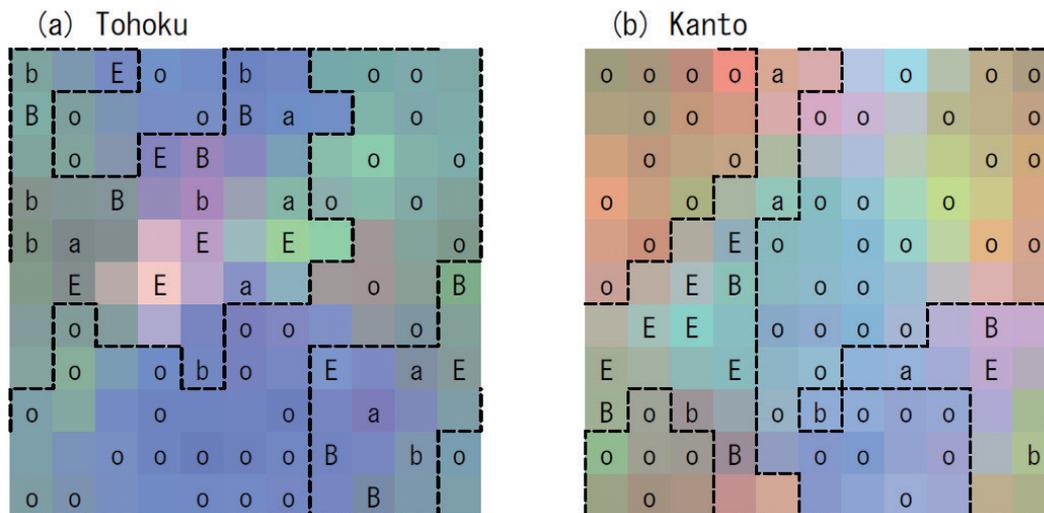


図4 SOMによる入力データの投影。(a) 東北地域、(b) 関東地域。E, B, b, a, oは投影された入力ベクトルのラベル

れるようにみえるが、この図と同じ分布が上下左右に周期的に広がると想定するので、活動期も静穏期も実際にはひとつながりの領域である。

地震予知からみて重要なのは、Bやbのラベルをもつ大きな地震の前の状態が、図4の投影図で活動期の範囲に入ることである。いいかえれば、地震の活動期は大きな地震が起こる前から始まっていて、その始まりはSOMの投影で把握できる。小さな地震は大きな地震の発生を事前に知っており、そのことがSOMの投影で確認されたのである。

そこで、地震の活動期と静穏期を分離する図4のような投影図を作っておけば、現在の状態がどこに投影されるかによって、地震活動が活動期に入ったかどうかを判断できる。現在大きな地震が起きてないのに活動期の範囲に投影されたら、近い将来に大きな地震が発生する可能性が高いと予測される。このようにしてSOMの投影図は地震予知に使うことができる。

4. むすび

現在まで世界で進められてきた地震予知は、地震発生過程の理論的な基盤の上に築くというより、前兆現象を経験的に探して利用するという色彩が濃い。AI技術は様々な情報の学習によってシステムを構築するから、やはり経験的な手法である。しかし、AIは人間よりはるかに膨大なデータを学習でき、人間の抱きがちな主観や偏見を排除できる。この利点を活かせば、AIが地震予知の行き詰まりを打破して実用化をいっきに進める可能性も期待できる。

地震予知へのAIの活用は、現状では研究数が限られており、成果も大きいとはいえない。しかし、多くの研究者が注目している分野なので、何らかのきっかけで急速に進歩する可能性を秘めている。AIの活用で地震予知の実用化が進めば、地震発生過程の物理的な理解にも新たな展望が開けるかもしれない。この分野の今後の発展に目がはなせない。

謝辞

3章の解析に用いた震源リストは石田瑞穂さん(産業技術総合研究所)から提供された。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) Kanamori, H.: Earthquake prediction: An overview. International Handbook of Earthquake Engineering, Vol. 818, pp.1205-1216, 2003.
- 2) 井田喜明: 地震予知と噴火予知, 筑摩書房, pp.1-253, 2012.
- 3) 井田喜明: 予測の科学はどう変わる? 人工知能と地震・噴火・気象現象, 岩波書店, 岩波科学ライブラリー 282, pp.1-117, 2019.
- 4) Panakkat, A., and Adeli, H.: Neural network models for earthquake magnitude prediction using multiple seismicity indicators, International Journal of Neural Systems, Vol.17, No.1, pp.13-33. 2007.
- 5) Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Lubbers, N., Barros, K., Humphreys, C. J., and Johnson, P. A.: Machine learning predicts laboratory earthquakes, Geophysical Research Letters, 10.1002/2017GL074677, 2017.
- 6) Kohonen, T.: The self-organizing map, Proceedings of the IEEE. Vol.78, No.9, pp.1464-1480, 1990.
- 7) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: High Sensitivity Seismograph Network, <http://www.hinet.bosai.go.jp/hypomap/?LANG=ja>, 2019.



井田 喜明 (いだ よしあき)

1965年東京大学理学部卒、1969年理学研究科修了。専門は固体地球物理学。東京大学物性研究所、海洋研究所、地震研究所、兵庫県立大学理学研究科に奉職する間に、火山学会会長、火山噴火予知連絡会会長などをつとめる。

人工知能を活用した強震動予測

石井 透

●清水建設株式会社 上席研究員

1. はじめに

人工知能 (AI: Artificial Intelligence) という言葉を見聞きしない日も珍しい今日この頃である。人の手によって作られたり決められたりする物事ではない自然現象の地震動を評価・予測する研究分野では、現象やその因果関係の物理的説明が困難でブラックボックス的な性格を有するこの新技術に対して懐疑的な目を向ける研究者も多いためか、他分野と比べると研究への活用事例はまだ少ない。しかし、この新技術を強震動予測に活用することが適切かどうかの判断は、その目的やその使い方による (この点については後述する)。実は今こそ、地震や地震動に関する知見を質・量ともに飛躍的に発展させる大きなチャンスである。

1995年兵庫県南部地震を契機として日本全土に整備された強震観測網¹⁾により、高品質で膨大な地震観測記録を誰でも即時に活用出来る時代が到来した。また、コンピュータの性能とアルゴリズムの進化も著しく、大量高速演算処理が可能になった。それ故、地震や地震動に関する研究が発展し、新たな地震動予測手法も次々提案されてきた。このような近年のデータ・情報の急増とその処理能力の急速な発展による環境変化は、地震や地震動に関する知見を質・量ともに今後更に発展させる大きな可能性を含んでいる。

ところで、専門家により開発されてきた実用的な地震動予測式^(例えば²⁾)に目を向けると、式の形を決めているのは検討に用いられたデータ・情報であるため、震源・伝播特性の担保となる地震発生数は地域によって偏り、サイト特性の担保となる地震観測記録数も地点によって異なる等々、式への反映量にはアンバランスが含まれる。近年のデータ・情報の急増はこの問題の改善に大いに役立つと思われるが、そのために専門家が費やせる時間と労力には限界があり、逐次更新される膨大なデータ・情報を十分に活かし切れていない現状がある。加えて、社会のニーズが至るところで多様化・細分化・高速化し、この分野を担う専門家の環境は時間的にも労力的にも厳しさを増している。

この現状を打開するためには、確立された知見と技術に基き、任せられるところは徹底的にコンピュータに任せ、専門家による高度かつ詳細な検討や一般人をも含めた各種判断など人間にこそ担って欲しいところ

に十分にその時間と労力を割けるようになって欲しい。少なくとも長時間労働による疲れを知らない人工知能はその助けとなる可能性がある。その実現に必要な基盤的な環境整備ともなり得る新たな強震動データベースの構築³⁾も実際に始められている。

このような背景と現状認識の下、本稿では、数は少ないものの、人工知能を活用した強震動予測を試みた萌芽的な研究例を紹介した上で、課題および将来への期待を込めた展望についての私見を述べたい。

2. 萌芽的研究例

人工知能を活用した強震動予測を試みた萌芽的な研究例を紹介する。詳細は各原典を参照して頂きたい。

国内に先立ち、まず海外で、人工知能による強震動予測への関心が持たれるようになった。例えばDerras et al. (2012)⁴⁾は、KiK-netの強震記録を用いてニューラルネットワークにより水平最大加速度の予測モデル構築を試み、従来知られている地震の規模・深さへの依存性や大規模地震の震源近傍での頭打ち、地盤挙動の非線形効果の表現の可能性にも触れている。

国内でも、最近2~3年、研究例が発表され始めた。

久保・他 (2018~2020)^{5)~9)}は、K-NETとKiK-netの強震記録を用いてランダムフォレストにより地表地震動最大加速度の予測式構築を試み、震源距離とモーメントマグニチュードの重要度が大きいこと、震源深さの影響は単純ではないこと、学習データの偏りの影響等を指摘すると共に、大振幅地震動の過少予測を回避するための振幅レベルやデータ数の多寡に応じた重みづけや、機械学習と既往の地震動予測式とを組み合わせる手法を提案している。

岡崎・他 (2018)¹⁰⁾は、K-NETとKiK-netの強震記録を機械学習させた上で、長周期地震動シミュレーション結果から広帯域地震動の推定を試みている。一方、岡崎・他 (2019,2020)^{11),12)}は、茨城県内のK-NETの強震記録を用いて最大加速度のニューラルネットワークモデル構築を試み、観測点ラベルによってサイト特性を与えた上で地震発生位置を与えて伝播経路を特定させることにより不確定性の低減を試みている。

Ohno and Tsuruta (2018)¹³⁾は、東北地方のK-NETの強震記録を用い、震源・観測点座標をも説明変数に加え

てディープラーニングにより最大加速度・最大速度・加速度応答スペクトルの予測モデル構築を試み、従来の地震動予測式に比べて予測誤差が小さく、サイト固有のスペクトルピークや深いスラブ内地震による大振幅も表現出来るとしている。更に、松岡・大野(2020)^{14),15)}や大野・松岡(2020)¹⁶⁾は、K-NETとKiK-netの地表での強震記録を用い、震源・観測点位置や基盤深さをも説明変数に加えて擬似速度応答スペクトルの評価を試み、既往の地震動予測式よりも評価精度が高まることや、評価精度はデータ数に大きく依存することを示している。

石井・他(2019)¹⁷⁾は、関東地方のK-NETの強震記録を用い、震央方位や基盤深さをも特徴量に加えて勾配ブースティング木により最大加速度・擬似速度応答スペクトル・速度応答継続時間スペクトルの評価モデル構築や地点固有モデルの検討をも試み、新たな観点からの知見獲得を目指している。データ品質考慮の重要性や、既往の地震動予測式よりも評価精度が高いこと、評価精度がデータ数に依存することにも触れている。このうち、関東地方のモデルについて、小穴・他(2019~2020)^{18)~21)}は、震央方位のほか震源・観測点位置と震源メカニズム解や複数の地下構造層境界等をも含む多数(25種類)の特徴量とその相互依存性の検討、異なる特徴量セットによるモデルの比較、予測対象の特徴量と学習データとのユークリッド距離の分析等を実施し、既往の距離減衰式よりも細かな地域特性を考慮出来る可能性を示している。一方、地点固有モデルについて、石井・他(2019~2020)^{22)~24)}は、震央方位や応答継続時間の考慮により地点・周期毎に変化する地震動特性の定性的・定量的な分析・検討が可能なこと(図²⁴⁾参照)や地震波の三次元伝播特性を簡便な評価モデルに反映出来る可能性に触れた上で、震央方位の様々な与え方も比較検討している。

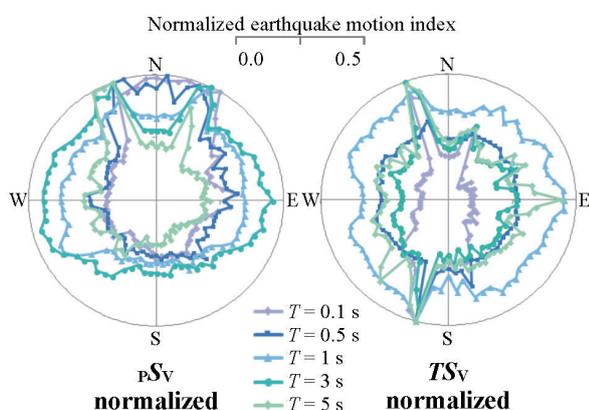


図 地震動の震央方位依存性の検討例²⁴⁾

また、これらの他に、最近では、強震動予測に関連した諸研究にも人工知能の活用が試み始められている。例えば、田中(2020)²⁵⁾は、常総地域の地形データを用い、勾配ブースティング木により工学的基盤深度の推定を試み、従来の多変量回帰分析による統計モデルとの比較も実施している。Miura et al.(2020)²⁶⁾は、K-NETとKiK-netの観測点での微動観測に基づく水平上下スペクトル比を用い、ディープラーニングにより表層30mの平均S波速度に基づくサイト特性分類を試みている。中山・他(2020)²⁷⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が多数発生した千葉県を対象に、表層地盤データ・地震観測記録・計測震度分布のデータを用い、サポートベクターマシンとランダムフォレストにより、地震動の継続時間を考慮した液状化発生地点の予測モデル構築を試みている。

このように、現状は、各研究者が試行錯誤しつつ次々と新たなアイデアに挑戦している段階と言えよう。

3. 課題と将来展望

人工知能を活用した強震動予測を進める上での課題と将来展望について述べておきたい。

膨大なデータを高速かつ安定して処理することによって、データ自らが持つ地域性やサイト固有の特性といった素性を最大限に反映した複雑なモデルを構築出来る可能性があることは、人工知能の魅力である。各研究の統合とそれに基づく新たな知見獲得の可能性が期待され、データベースから地震動評価、更にはハザード・リスク評価や設計・防災への活用に至る一連のモデルにまで発展する可能性さえも秘めている。

しかし、それ故、人工知能を活用した強震動予測の課題の多くはデータの扱いに関わるものである。

一般に、良質なデータ分析結果を得るためには、必ず、それに先立ってデータ品質の丁寧なチェックが欠かせない。従って、膨大なデータから専門家と同様の判断によってノイズ等の悪影響を取り除くための自動取捨選択や自動フィルター処理等といったデータ一次処理方法の開発が必要になる。

特徴量(説明変数)の選定は、モデル構築プロセスの中で人間のセンスが関与し得る部分である。実際にどのような条件の時に観測値と評価値が近くなるのか等について予め十分に分析しておく必要がある。見方を変えると、専門家の既成概念や常識の限界が制約し得る部分とも言える。それを避け、先入観を取り払って膨大なデータと人工知能に委ねた検討の中から新たな気づきが生まれる可能性もあろう。

評価精度がデータ数に大きく依存することは先述の

各研究事例からも明らかである。データ数が少なくモデル上は内挿領域・外挿領域となる場合の評価結果の信頼性は、特に将来の予測問題への展開を考える上では大きな問題で、慎重に取り扱わざるを得ない。

とりわけ、データの粗密・偏りに起因するモデル精度のアンバランスが生じ得るが、特に一般に興味の対象となる大地震・大振幅地震動・長時間地震動などは、稀な現象であるが故にもともとデータが少ない。従って、仮に将来の予測問題への展開を考えるのであれば、断層モデル等を含めた既往手法によるシミュレーション結果の活用等の工夫も考えていく必要があるようである。すなわち、観測された自然現象を適切に一次処理したデータだけでなく、それらに基づいて得られた既往の科学的知見にまでデータ概念を少し拡張して扱うことが考えられるかもしれない。

このように、強震動予測とは言っても、真の予測問題に適用出来るようになるまでには、様々な困難が予想される。

さて、冒頭にも述べたが、人工知能による評価・予測のプロセスの多くがブラックボックスとなっていることは、専門家ならずとも大いに気になることである。しかし、従来の手法も、多様な要因によってもたらされる多様な自然現象を一部の代表的な指標によってモデル化している以上、ブラックボックス的な性格を有していることは否定できない。実用的にも一つの代表的な地震動予測手法である半経験的方法が要素地震の地震動自体に含まれている伝播特性とサイト特性を上手く活用した優れたアイデアであること等からも明らかである。

むしろ、その本質を理解した上で、多面的な分析方法や工夫された可視化手法などを駆使して現象の物理的解釈・理解を進め、人工知能の検討プロセスや検討結果の説明性を向上させ、従来の研究では辿り着けなかった新たな知見に迫っていくことが求められる。

地震工学の歴史は、稀な自然現象によって突きつけられる新たな課題との闘いとも言える。現象の物理的解釈・理解が進んだと思っても、また新たな想定外が発生することの繰り返しである。残念ながら、いつの時点でも、専門家の既成概念や常識には盲点がある。故に、膨大なデータと人工知能を上手く活用し、そのような盲点を突くことによって新たな気づきが得られる可能性があるとするれば、それに期待したい。

4. おわりに

今まで述べてきたように、人工知能を活用した強震動予測の試みを通じて強震動に関する新たな知見が得

られる可能性には魅力がある。そのためにも、大変困難ではあるが、将来的には人工知能自身にモデルの物理的根拠・構築プロセスはもとよりその問題点・改善策などを説明させることが出来れば素晴らしい。

自然界の生物も、人工物とそれを生み出す技術も、少しずつ進化し続けるだけではなく、新たな環境・条件が揃った時には劇的な進化を遂げるものである。強震動に関する研究を進める上で、新たな環境・条件と新たな手法・技術とが互いに触発し合う効果が期待され、それによって、新たな手法・技術と新たな知見とが互いに高め合う効果が期待される。

冒頭にも述べた通り、今こそ、地震や地震動に関する知見を質・量ともに飛躍的に発展させる大きなチャンスと考えたい。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：陸海統合地震津波火山観測網；
<http://www.mowlas.bosai.go.jp/network/>
- 2) Morikawa, N. and Fujiwara, H.: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol.8, No.5, pp.878-888, 2013.
- 3) Morikawa, N. et al.: Toward to Construction of Strong-motion Database for Seismic Hazard Assessment in Japan, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS04-P01*, 2020.7.
- 4) Derras, B. et al.: Adapting the Neural Network Approach to PGA Prediction: An Example Based on the KiK-net Data, *B.S.S.A.*, Vol.102, No.4, pp. 1446-1461, 2012.8.
- 5) 久保久彦・他：ランダムフォレストを用いた地震動予測式の構築、第32回人工知能学会全国大会予稿集、4Pin1-35、2018.6.
- 6) 久保久彦・他：機械学習を用いた地震動予測にデータセットの偏りが与える影響に関する考察、日本地震学会2018年度秋季大会講演予稿集、S14-11、2018.10.
- 7) 久保久彦・他：機械学習を用いた地震動予測において偏ったデータセットが与える影響を軽減するための試み、第33回人工知能学会全国大会予稿集、4K2-J-13-02、2019.6.
- 8) 久保久彦・他：機械学習モデルと予測結果の理解に向けて：地震動指標のランダムフォレスト予測器の例、日本地震学会2019年度秋季大会講演予稿集、S22P-05、2019.9.
- 9) 久保久彦・他：説明可能な地震動指標のランダムフォレスト予測器の構築に向けた取り組み、第34回人工知能学会全国大会予稿集、4Rin1-94、2020.6.

- 10) 岡崎智久・他：機械学習を用いた広帯域地震動合成の試み、日本地震学会2018年度秋季大会講演予稿集、S14-P02、2018.10.
- 11) 岡崎智久・他：site2vec:サイト特性をデータから学習する地震動予測器、日本地震学会2019年度秋季大会講演予稿集、S22P-06、2019.9.
- 12) 岡崎智久・他：伝播経路を特定した地震動予測ニューラル・ネットワーク、日本地震学会2020年度秋季大会講演予稿集、S15P-14、2020.10.
- 13) Ohno, S. and Tsuruta, R.: Ground-motion Prediction by ANN Using Machine Learning for the Tohoku Region, Japan, 11th U.S. N.C.E.E., No.998, 2018.6.
- 14) 松岡恭平・大野 晋：機械学習を活用した地震動スペクトル評価に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.197-198、2020.8.
- 15) 松岡恭平・大野 晋：機械学習を用いた地震動スペクトル評価に関する検討、日本地震工学会第15回年次大会梗概集、B-4-5、2020.12.
- 16) 大野 晋・松岡恭平：深層学習による強震動スペクトル評価、第48回地盤震動シンポジウム、pp.100-103、2020.11.
- 17) 石井 透・他：機械学習を活用した地震動評価による新たな知見獲得への試み、日本地震工学会第14回年次大会梗概集、pp.P1-13、2019.9.
- 18) 小穴温子・他：機械学習を用いた関東地方の地震動評価モデルの検討、日本地震学会2019年度秋季大会講演予稿集、S22-09、2019.9.
- 19) 小穴温子・他：機械学習による地震動評価モデルにおける特徴量の可能性、第34回人工知能学会全国大会予稿集、3Rin4-03、2020.6.
- 20) 小穴温子・他：異なる特徴量セットを用いて機械学習により構築した地震動評価モデルとその予測結果に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.199-200、2020.8.
- 21) Oana, A. et al.: Study on Ground Motion Models for Kanto Region, Japan, Utilizing Machine Learning, Proc. of the 17th W.C.E.E., version 2020, 1d-0037, 2020.9.
- 22) 石井 透・他：震央方位を考慮した機械学習による地点固有の地震動評価モデルの検討、日本地震学会2019年度秋季大会講演予稿集、S22-08、2019.9.
- 23) 石井 透・他：機械学習による地震動評価モデルの特徴量としての震央方位の与え方とその効果の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.195-196、2020.8.
- 24) Ishii, T. et al.: Study on Site-specific Ground Motion Models Utilizing Machine Learning Considering Epicentral Directions, Proc. of the 17th W.C.E.E., version 2020, 1d-0010, 2020.9.
- 25) 田中浩平：機械学習モデルによる地形データからの工学的基盤深度の推定、土木学会全国大会第75回年次学術講演会、CS10-54、2020.9.
- 26) Miura, H. et al.: Deep Learning-based Site Classification by Microtremor H/V Spectral Ratio, Proc. of the 17th W.C.E.E., version 2020, 1g-0005, 2020.9.
- 27) 中山洋斗・他：地震動の継続時間を考慮した機械学習に基づく液化化予測に関する基礎検討、土木学会全国大会第75回年次学術講演会、CS10-65、2020.9.



石井 透 (いしい とおる)

清水建設(株)技術研究所上席研究員。博士(工学)。1986年東京大学大学院修了、清水建設入社。地震動を中心とした地震工学の諸研究・諸業務に携わり現在に至る。日本建築学会、日本地震学会、地震調査研究推進本部などの委員を歴任。

ビル・アイワン先生を偲んで

家村 浩和

●日本地震工学会名誉会員

Bill Iwan先生が2020年10月29日にお亡くなりになった。御家族から南カリフォルニア大学のMasri教授に宛てた連絡の手紙を私宛てに転送して頂いて知った。先生には長年いろいろとご指導頂いたのでこの場を借りて先生を偲びたい。

先生と初めて出会ったのは、1972年10月、私がロータリー財団の奨学金を受けカリフォルニア工科大学の大学院に短期留学した時である。先生には数学の線形代数を教えていただいた。留学直後で英語を十分に聞き取れなかったが、先生の講義ノートは実に明瞭かつ丁寧そのもので、復習すれば、参考書など見なくても、十分に理解できた。各種定理の展開の明快さに、私は初めて数学の美しさに触れた思いだった。

先生の発言は極めて早口で最初はほとんど理解できなかったが、週3回半年の集中講義で、そのうちに耳が慣れ、次第にほとんど理解出来るようになった。以来先生に限っては、どのように早くしゃべられても、ほとんど理解できた。

兵庫県南部地震('95)の後、先生と土岐憲三先生との間で、直下地震による都市災害に関する日米セミナーがハワイで開催され('98)、私もメンバーとして参加したが、セミナーの最後のConcluding Remarksをまとめるにあたって、先生は、実に見事にしかも短時間に皆の意見を踏まえたとりまとめを行われた。このような会を何度も経験されていたこともあるだろうが、先生のシャープな手際のおい才能に驚いた。

先生は十数年前から、ガンが体のあちこちに転移し、その都度、大手術や放射線照射など大変な治療を長年受けられてきたが、研究者としての活動は衰えることがなかった。大変な病気を抱えながら、このように前向きにかつ活発に活動されていることに感動し、「先生はどのような力で、困難を乗り越えておられるのですか?」と、非礼を顧みず思い切って直接聞いてみた。すると先生は直ちに、「私の信仰に対して神が大きな力を与えて下さるのです」と返答され、先生の信仰心の深さに感激した。私ならとくに病魔に押しつぶされているであろうと思われた。

日本で開催されたある会議の折、先生はわざわざ米国より、ハウスナー先生からの預かり物だと言って中国で描かれたと思われる掛け軸を、持参して下さった。恩師

THIS IS TO INFORM THE PASSING OF

Dr. Wilfred (Bill) SwanFROM THIS LIFE INTO ETERNITY
ON OCTOBER 29, 2020.HE IS NOW RESTING
IN THE PRESENCE OF
HIS LORD AND SAVIOR.写真 ビル・アイワン先生ご逝去の連絡より抜粋
(Masri教授提供)

の先生がわざわざ米国からもって来て頂いて、もったいなくも大変ありがたく、感謝感激であった。

また中国で開催されたある会議の折、バスの中で同席したが、先生のお孫さんが、デイズニーランドのミッキーマウスの声優を務めているのだと話され、ご自分の事のように大変喜んでおられた。奥様はじめ家族を大切にしておられる暖かいお心が推し量られた。

以上が先生に関する私の主な直接の思い出であるが、先生のご略歴については、Masri教授からの情報を基に以下に記す。

先生は学部('57)、修士('58)、博士('61)ともカリフォルニア工科大学で修了された、生粋のCaltech Manである。博士論文の指導教授はD.Hadson 博士であり、のちの地震動に関する研究の素地となったと考えられる。博士号取得と同時に、コロラド州に新たに開設されたAir Force Academyの教官となり工学の指導をされた。そこでパイロットの訓練も受け、Captainの資格も取得されている。のちにCivilだけでなくMechanicalの分野でも活躍される基礎になったものと考えられる。

'64には、Caltechに準教授として戻られ、'70には教授となられた。先生が並みはずれた才能の持ち主であること

は、昇進の速さからもうかがえる。

先生は多くの優れた業績により、National Academy of Engineering('99)やASCEのDistinguished Memberになられたほか、数多くのメダルや賞を受賞しておられる。Nathan M. Newmark Medal('97), William H. Wisely Award('06), Theodore von Karman Medal('13), A.E. Alquist Medal ('02)などである。一方、'82よりはカリフォルニア州知事直轄のSeismic Safety Commissionの委員(のちに委員長)を務めて、同州の地震安全対策に大きく貢献された。さらに国際活動としては、世界地震工学会関連のIAEE、WCEE、WSSI、ASCEのEMI、強震地震動観測関連のCOSMOS、構造免震制震モニタリング関連のIASCMなどに献身的な貢献をされた。

そのほか実用面では、日本でも実施されている初期微動の計測から強震動を直前予測して警報を発するEarly Warning Systemを'97に提案されている。

先生の並はずれた才能による優れた研究、地域社会や国際研究組織への献身的貢献、病魔と闘う不屈の精神力、家族や人々に対する深い愛情など、見習うべきことは数多くある。

本稿を読んでいただいた皆さんのこれからの人生のご参考になれば、そこにBill Iwan先生の崇高な精神は生き生きとして生き続けてゆく。



家村 浩和 (いへむら ひろかず)

京都大学工学研究科博士課程修了('74)、助手、講師、助教授を経て教授('94-'08)、国際構造制御学会理事('94-'00)、世界地震工学会事務局長('02-'08)、近畿職業能力開発大学校校長('08-'13)。主な研究テーマは免震・制震構造の提案、実験及び解析。土木学会論文奨励賞('75)、同論文賞('05)、Housner Medal('14)。

ビル・アイワンを偲ぶ

片山 恒雄

●東京大学名誉教授

2020年10月29日、カリフォルニア工科大学(Caltech: California Institute of Technology)の名誉教授、ビル・アイワン(Wilfred D. Iwan)が帰らぬ人となった。享年85歳だった。

ずいぶん昔のことだ。1960年代の後半だったと思う。当時、国際地震工学会(IAEE)の事務局長を務めておられた大沢胖(ゆたか)先生(東大地震研究所)に、「これから米国の地震工学をリードするのは誰ですか」と聞いたことがあった。大沢先生は、即座に、ビル・アイワンとポール・ジェニングスの名前を挙げられた。二人ともCaltechの気鋭の研究者だった。そのころのCaltechには、ジョージ・ハウズナー、ドナルド・E・ハドソンをはじめとし、優れた地震工学の研究者が集い、世界の地震工学研究を引っ張っていた。ポールのほうは、事務能力に長けていたことを買われ、比較的若いときに、研究畑から大学管理のほうに移り、学長職(Provost)についた。一方、ビルは、その一生を研究にささげた。

ビルと最初に口をきいたのは、1977年にニューデリーで開催された第6回世界地震工学会議(6WCEE)のときである。会議中のツアーでタージ・マハールに行ったとき、「カメラを持っていない日本人に初めて会った」と冗談めかして言われた。だいたいあとになって知ったのだが、ビルは大のカメラ好きだった。なんと答えたかはまったく覚えていない。そのころの私にとって、アイワンは雲の上の存在だった。たぶん何も言えなかったのではなかろうか。

1998年に日本で開催された9WCEEのときから14年間、私はIAEEの事務局長となり、続いて会長を務めた。これだけ長い期間にわたってIAEEの役職についていれば、世界中に友人もできるし、結構大きな顔で振舞えるようになる。IAEEのなかに国連の「国際防災の10年(IDNDR)」にかかわる委員会を設置したときには、その準備委員会の委員長に「地震工学の父」ハウズナーを、また、かつては雲の上の存在だったビルには準備委員会と委員会の両方の委員を委嘱する立場になっていた。IDNDRと言ってもピンと来ない人がおられるかもしれない。1990年代を災害のない10年にしようと、国連が決議した10年計画である。

世界中にできた友人にはそれぞれ思い出があるが、ビルとハレシュ・シャー(スタンフォード大学)とは、とくに親しくなった。ビルは私より4歳年上で、ビルと私の間にハレシュがいた。3人は年齢的にも近かった。地震工学の分野でIDNDRをサポートするために、ハレシュと共同でIAEEの下部組織として世界地震安全推進機構(WSSI: World Seismic Safety Initiative)を立ち上げたときは、ビルにも理事の1人として協力してもらった。

地震による犠牲者の大部分は構造物の崩壊によるものだ。安全な明日を保証する唯一の方法は構造物の耐震性を向上させることにある。世界全体でみれば、必要な知識や技術はすでに存在する。WSSIは、これらの知識や技術を有効に使って、技術的・経済的に余裕のない国々を支援することを目的とした。WSSIは、1992年9月1日、ナンヤン工科大学(NTU: Nanyang Technological University)に本部をおく非営利会社としてシンガポールに登録した。発足当初の2年間は私が会長を務め、それ以降はハレシュが会長を務めた。1996年、防災科学技術研究所の所長としてつくば市に赴任してから、私はWSSIと疎遠になってしまった。

設立以来、WSSIは毎年シンガポールで理事会を開いた。ビル、ハレシュと私は、少なくとも年に1回はシンガポールで顔を合わせるようになった。理事会の会期中に、大型ショッピング・センターにあるインドネシア・レストランに行くのも恒例となった。そんなとき、ビルはいつもカメラ屋さんをのぞいて新型のニコンなどを手に取っていた。彼は、ニコンをナイコンと発音していた。

5年ほど前、私が三途の川を渡りかけたとき、ビルは励ましの手紙をくれた。2015年7月22日付で手書きだった。私はまだ入院中だった。どうして私の病気のことを知ったのかわからない。彼自身が脳、肺、肝臓ガンを患った経験から、いま元気でいられるのは神のおかげであること、医師の診断がどんなに悪くても必ず望みがあること、優れた医術に加えて神のご加護が大切だ、長い間キリストを信じてきたが、決して裏切られたことがないと書いてあった。「君は強い人間だしファイターだ。必ず病に打ち勝てる。何か手助けが必要なら教えてほしい」と、締めく



写真 左から、東京大学・青山博之名誉教授、片山恒雄教授、ブリティッシュコロンビア大学・チェリー名誉教授（元IAEE会長）、アイワン教授（1994年、オーストリア・ウィーンにて 東京大学・目黒公郎教授提供）

くってあった。

彼自身がガンのため余命いくばくもないと言われたとき、元気なうちに皆にお別れをしておきたいと、パークレーのホテルに50人ほどの親しい友人、学生などを集めた会を開いた。もう15年くらいも前のことだ。もっと前だったかもしれない。私は、ただ1人の日本からの友人として出席した。薬の副作用でビルは髪の毛がなかった。挨拶をさせられたが、何を話したかは覚えていない。ただ、ビルが早口であること、英語が母国語でない人に対してもまったく気配りをしてくれないと言ったところが留学生に大いに受けた。

2015年7月にビルから届いた励ましの手紙に、私が返事のメールを送ったのは、10月14日にリハビリ病院から帰宅してからだった。10月29日に、自分の状態を長めのメールで返事した。ビルのレスポンスはいつも早い。翌日には返信があった。

「親愛なる恒雄 最新の情報をありがとう。ひどい病気から回復しつつあることを知って喜んでます。完全に回復するまで、君と君の家族のために祈り続けます。リハビリの先生と看護師さんとの作業が最善のものとなりますように。君が完全に回復しようという強い意志を持っていることを信じています。何か私にできることがあったら知らせてください。ビル」

うれしかった。12月3日につぎのメールが来た。「10月の

返事ありがとう。君の完全な回復を祈っていることを知ってください。君の力がよみがえり、じきに歩行補助器なしで歩けるように祈っています。君と君の家族に素晴らしいクリスマスがやってきますように。ビル」。2016年の元旦に、新年の挨拶とともに、少しずつだが快方に向かっていると知らせた。ビルからは、「良くなっていると知ってうれしい。回復を祈り続ける、何かできることがあれば」という返事がすぐに送られてきた。

彼とのやり取りからわかるように、ビルは敬虔なキリスト教徒である。「一番大切なのは家族、2番目が信仰、研究は3番目」と言うのを聞いたことがある。彼ほど真摯に一生を過ごした人間を、私はほかに知らない。何か心の中にぽっかりと穴が開いたような気がする。



片山 恒雄 (かたやま つねお)

1939年東京都生まれ。東京大学工学部卒。同大学院修士課程修了。豪・ニューサウスウェールズ大学大学院土木工学科博士課程修了。東京大学生産技術研究所 教授を経て、東京大学名誉教授。1996年より防災科学技術研究所 所長、理事長を歴任。国際地震工学会 (IAEE) では、事務局長 (1988年～2002年)、会長 (2006～2010年) を務めた。専門は耐震防災工学。

日本地震工学会・大会－2020開催報告

松島 信一

●京都大学防災研究所 教授

1. はじめに

2020年度で第15回を迎えた日本地震工学会の年次大会（以下、大会）は、初めて完全オンラインで実施しました。2019年暮れに中華人民共和国湖北省武漢市で原因不明のウイルス性肺炎が確認されたのを皮切りに、全世界を襲っている新型コロナウイルス感染症がわが国においても2020年初頭より広まり、完全な終息の見込みがたたなかったため、Zoomを活用して実施するという新たな試みとなりました。大会の期間は、2020年12月2日(水)～3日(木)の二日間でした。

大会を完全オンラインで実施することから、例年はポスターセッションとオーラルセッションを併用して一般発表講演を実施しているところを、全てオーラルセッションとしました。また、基調講演1題、招待講演2題を企画しましたが、招待講演のうち1題は大会をオンラインで実施するという利点を最大限活かし、特別企画として海外（トルコ共和国（以下、トルコ））からリアルタイムで実施しました。

大会には、計175名の参加登録（正会員124名、学生会員17名、非会員13名、学生非会員21名）があり、実際の参加者は初日が160名、二日目は139名でした。このうち、基調講演・招待講演者が計3名、功績賞などの受賞者が10名、法人会員が10名、マスコミ関係者が3名でした。

2. 全体プログラムと基調講演・招待講演

今年度の大会は、基調講演1題、招待講演2題および一般発表講演という構成にしました。一般発表講演は89題の投稿がありました。また、中埜良昭会長による開会と閉会のご挨拶および功績賞などの表彰式・記念講演を執り行いました。大会の全体プログラムを表1に示します。基調講演、招待講演、開会・閉会挨拶、はプレナリーセッションとし、一般講演は3つの会場で並行して行いました。一般講演のうち、2セッションは英語セッションとして、英語による発表を行いました。また、例年では5月に開催される社員総会と併せて学会の各賞受賞者の表彰式と受賞記念講演が執り行われますが、今年度は新型コロナウイルス感染症対策のために社員総会のみ執り行われたために、閉会式に先立って、表彰式・記念講演を行いました。

2.1 基調講演・招待講演

基調講演は開会の挨拶に引き続いて実施しました。招待講演のうち1件は初日の午後一番に実施し、2件目はトルコからリアルタイムでのご講演のため、時差を考慮して2日目の午後3時過ぎから実施しました。

2.1.1 基調講演

基調講演は、海洋研究開発機構（JAMSTEC）海域地震火山部門の小平秀一部門長に、「南海トラフ地震に備える－情報創生、活用、発信に向けて－」についてご講演頂きました。来るべき南海トラフ地震の発生に備えて、南海トラフ地震臨時情報の概要と想定される課題およびそれを解決するための方策について解説頂いたのち、2020年度から開始された「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の概要と期待される成果についてご講演頂きました。

2.1.2 招待講演

2件の招待講演のうち1件は、東京大学地震研究所の楠浩一教授に、「非構造部材を有する3階建て鉄筋コンクリート造建物の災害時機能を検証するためのE-ディフェンス実験」についてご講演頂きました。国立研究開発法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）において2019年12月に実施された、災害拠点として使用する建物を想定した3階建て鉄筋コンクリート造建物を対象として、実物に近い状態で実施された実大実験についてご講演頂きました。また、実験結果を予測するブラインド解析の国際コンペについてもご紹介頂きました。

2件目の招待講演は、オンライン大会の利点を最大限活用した特別企画として、トルコの中東工科大学（Middle East Technical University, Ankara）のAyşegül ASKAN（アイシエギュル アシカン）先生に、「The report on the 2020 Elazığ and Izmir (Turkey) earthquakes including seismological aspect, damage investigation, and social issues」と題して、2020年1月と10月にトルコのElazığ（エラズー）とIzmir（イズミル）県沖にてそれぞれ発生した地震について、観測された地震動の特徴と建物被害や設計基準との関係についてご講演頂きました。

表1 日本地震工学会・大会—2020 全体プログラム

時間	A会場	B会場	C会場
2020年12月2日(水) Wednesday December 2 nd , 2020			
9:40 ~ 9:50	開会の挨拶・会長挨拶 Opening Speech/Speech by President of JAEE		
9:50 ~ 10:20	基調講演：海洋研究開発機構 海域地震火山部門 小平 秀一 部門長 Keynote lecture : Dr. Shuichi KODAIRA, JAMSTEC 「南海トラフ地震に備える - 情報創生、活用、発信に向けて -」		
10:30 ~ 12:00	A-1 実大RC造架橋実験 Real-size RC structure experiment	B-1 地下構造 Underground profile	C-1 地震被害調査・被害推定 Earthquake damage investigation, damage estimation
13:00 ~ 13:30	招待講演：東京大学 地震研究所 楠 浩一 教授 Invited lecture : Prof. Koichi KUSUNOKI, ERI, University of Tokyo 「非構造部材を有する3階建て鉄筋コンクリート造建物の災害時機能を検証するためのE-ディフェンス実験」		
13:30 ~ 15:30	A-2 建物応答・建物被害 Building response - Building damage	B-2 震源特性/強震動特性 Source mechanism / Strong motion characteristics	C-2 防災計画・リスクマネジメント および社会・経済問題(1) Disaster mitigation plan / Risk management / Socio-economic issues (1)
15:40 ~ 17:40	A-3 建物応答・免震構造物 Building response - Base isolation structures	B-3 地盤変状 Ground deformation	C-3 防災計画・リスクマネジメント および社会・経済問題(2) Disaster mitigation plan / Risk management / Socio-economic issues (2)
2020年12月3日(木) Thursday December 3 rd , 2020			
10:00 ~ 12:00	A-4 建物応答・耐震性能 Building response - Seismic performance	B-4 地盤震動(1) Ground motion (1)	C-4 English session (1) Ground deformation / Subsurface structure model
13:00 ~ 15:00	A-5 土木構造物/地盤と構造物の相互 作用 Civil structures / Soil-structure interaction	B-5 地盤震動(2) Ground motion (2)	C-5 English session (2) Base isolation / Structural control / Health monitoring
15:10 ~ 16:00	特別企画・招待講演 Special event - Invited lecture : Prof. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN, Middle East Technical University, Ankara "The report on the 2020 Elazig and Izmir (Turkey) earthquakes including seismological aspect, damage investigation, and social issues"		
16:10 ~ 17:20	表彰式・記念講演 Award ceremony / Memorial lecture		
17:20 ~ 17:30	閉会式 Closing ceremony		

た。

3. 一般発表講演

一般発表講演は過去数年の大会とは異なり、完全オンラインで実施したことから、3つの口頭発表セッションを並行して実施する形式とし、ポスター発表は実施しませんでした。一般発表講演には89題の投稿がありましたが、都合により2題の発表がキャンセルとなり、実際には87題が発表され、活発な議論が行われました。一般発表講演15セッションのうち、2セッション(10題)

は英語セッションとして実施し、英語による発表と活発な質疑が行われました。

一般発表講演では、発表論文投稿時に申請のあった若手発表者(開催年度末時点で満35歳以下の方(1985年4月1日以降に生まれた方))に対して優秀発表賞選考委員会を中心となり、各セッションの座長および理事により、優秀発表賞の審査が行われました。優秀発表賞は表2に示す8名(9題)に対して授賞されることが閉会式において発表されました。今年度はオンライン大会となったために、会長からお祝いの言葉ののちに

表2 優秀発表賞受賞者(敬称略)

講演番号	受賞者	発表題目
A-1-3	八木 尚太朗 (東京大学)	非構造部材を有する実大RC造架構の静的荷重実験 その3 LGS壁と鋼製ドアの損傷
A-3-3	毎田 悠承 (東京工業大学)	梁主筋の付着除去を施した座屈拘束ブレース付きヒンジ位置保証型RC骨組の力学挙動
A-3-4		RC造連層耐力壁の脚部に取り付けた鋼製ダンパーの力学挙動および座屈補剛に関する実験研究
A-4-6	杉野 未奈 (京都大学)	プレート境界地震の予測地震動に対する建物応答
B-1-4	西村 武 (鳥取大学)	インドネシア西スマトラ州Tandikatの地震地すべり地域における微動観測による地盤構造推定
B-2-5	長嶋 史明 (京都大学)	海外内陸地震のインバージョン結果データベースを用いたスケーリング則の検討
B-3-3	加藤 一紀 (株式会社大林組)	護岸背後地盤の側方流動を対象とした動的解析における地盤の剛性回復モデルの違いが地盤変位量に与える影響に関する検討
C-3-2	安井 あり紗 (東京大学)	災害対応工程管理システムBOSSとマニュアルによる新型コロナウイルス流行下での避難所運営を事例とした対応行動の比較
C-5-3	Bin WANG (Kyoto University)	Development of novel self-centering seismic base isolators incorporating SMAs for earthquake resilience



写真1 閉会式における優秀発表賞発表時の様子

表彰状については後日対象者に郵送されることが紹介されました(写真1)。

4. 表彰式・記念講演

2日目の午後に行われた表彰式・記念講演では、2019年度各賞表彰式・論文賞記念講演が行われました。授賞されたのは、功績賞、功労賞、論文奨励賞、論文賞で、論文賞の2編について受賞記念講演が行われました。

功績賞は、安田進名誉会員(東京電機大学名誉教授)、翠川三郎正会員(東京工業大学名誉教授)が受賞されました。功労賞は佐藤吉之正会員(株式会社竹中工務店)が受賞されました。論文奨励賞は、松本俊明正会員(株式会社篠塚研究所)、小穴温子正会員(株式会社大崎総合研究所)、論文賞は原田智也正会員(元東京大学地震研究所)ほか、根本信正会員(応用地質株式会社)ほかの論文が受賞されました。受賞理由等は、日本地震工学会の「各賞と受賞者」のWEBページ(<https://www.jaee.gr.jp/jp/members/prize/>)をご覧ください。

5. 地震工学技術フェア

企業・団体参加による「地震工学技術フェア」は、例年と異なりオンライン大会となったことから、新しい形態で実施しました。参加企業・団体には、大会プログラムWEBページへの企業ロゴの掲載または大会プログラムWEBページへの企業ロゴおよび企業動画の掲載のいずれかをして頂きました(図1)。展示を行って頂いた5企業・団体の皆様は、以下の通りです。白山工業(株)、(株)アーク情報システム、配水用ポリエチレンパイプシステム協会、(株)大林組、(株)勝島製作所(申込順)。

6. おわりに

大会にご参加頂いた皆様、地震工学技術フェアにご出展頂いた企業・団体の皆様、理事・事務局の皆様およびオンライン大会のサポートをして頂いた防災ログ様に、深く感謝申し上げます。また、大会実行委員会委員の皆様のご多大なる貢献がなければ大会の開催にこぎ着けることはできませんでした。改めて感謝申し上げます。

今後の日本地震工学会大会の開催方法については未定ですが、参加者の皆様にご回答頂いたアンケートをもとに、より良い大会となるよう努めて参りますので、積極的にご参加頂きますようお願い申し上げます。

【第15回年次大会実行委員会】松島信一(委員長、京都大学)、市村強(東京大学)、小山真紀(岐阜大学)、中嶋唯貴(北海道大学)、野口竜也(鳥取大学)、三上貴仁(東京都市大学)、山田岳峰(鹿島建設)

ホーム > 日本地震工学会・大会 - 2020プログラム

日本地震工学会・大会

日本地震工学会・大会-2020プログラム

企業展示出展社

HAKUSAN

電話 アーク情報システム

Poulec
配水用ポリエチレンパイプシステム協会

大林組
株式会社 勝島製作所

日本地震工学会・大会-2020プログラム

大会プログラム 2020.11.19開設

時間	A会場	B会場	C会場
12月2日(水)			
9:40~9:50	開会の挨拶・会長挨拶		
9:50~10:20	基調講演:海洋研究開発機構 海城地震火山部門 小平 秀一 部門長 「南海トラフ地震に備える - 情報創性、活用、発信に向けて -」		
10:30~12:00	A-1 実大RC造架構実験 Real-size RC structure experiment	B-1 地下構造 Underground profile	C-1 地震被害調査・被害推定 Earthquake damage investigation, damage estimation
13:00~13:30	招待講演:東京大学 地震研究所 楠 浩一 教授 「非構造部材を有する3階建て鉄筋コンクリート造建物の災害時機能を検証するためのE-ディフェンス実験」		
13:30~15:30	A-2 建物応答・建物被害 Building response - Building damage	B-2 震源特性/強震動特性 Source mechanism/Strong motion characteristics	C-2 防災計画・リスクマネジメントおよび社会・経済問題(1) Disaster mitigation plan/risk management/socio-economic issues (1)
15:40~17:40	A-3 建物応答・免震構造物 Building response - Base isolation structures	B-3 地盤変状 Ground deformation	C-3 防災計画・リスクマネジメントおよび社会・経済問題(2) Disaster mitigation plan/risk management/socio-economic issues (2)
12月3日(木)			
10:00~12:00	A-4 建物応答・耐震性能 Building response - Seismic performance	B-4 地盤震動(1) Ground motion (1)	C-4 English session (1) Ground deformation/Subsurface structure model
13:00~15:00	A-5 土木構造物/地盤と構造物の相互作用 Civil structures/Soil-structure interaction	B-5 地盤震動(2) Ground motion (2)	C-5 English session (2) Base isolation/structural control/health monitoring
15:10~16:00	特別企画-招待講演:Prof. Aysegül ASKAN GÜNDOĞAN, Middle East Technical University, Ankara "The report on the 2020 Elazığ and Izmir (Turkey) earthquakes including seismological aspect, damage investigation, and social issues"		
16:10~17:20	表彰式・記念講演		
17:20~17:30	閉会式		

企業展示出展社提供動画

Poulec
配水用ポリエチレンパイプシステム協会

大林組
株式会社

勝島製作所
株式会社

配水用ポリエチレンパイプシステム協会

熊木城を救え...

地震計の勝島...

大会関連PDF 2020.11.24更新

全体プログラムPDFは[こちら](#)。
詳細スケジュールPDFは[こちら](#)。
詳細スケジュール+論文集PDFは[こちら](#)(パスワード必要)。
大会参加マニュアルPDFは[こちら](#)。
資料全体PDFは[こちら](#)。

[このページの上へ](#)

図1 日本地震工学会・大会-2020のプログラムWEBページ

お知らせ

■ 本学会に関する詳細はWeb上で

日本地震工学会とは

日本地震工学会は、建築、土木、地盤、地震、機械等の個別分野ではなく、地震工学としてまとまった活動を行うための学会として2001年1月1日に発足しました。その目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

ぜひ、皆様も会員に

本会では、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象とし、会員(正会員、学生会員、法人会員)を募集しています。本会の会員になることで、各種学会活動、日本地震工学会「JAE NEWS」のメール配信、地震工学論文集への投稿・発表・ホームページ上での閲覧、講習会等の会員割引など、多くの特典があります。ぜひ皆様も会員に、ホームページからお申込みください。

「学会の動き」欄は、下記のホームページでご覧いただくことにしました。

日本地震工学会の会則、学会組織、役員、行事、委員会活動、出版物の在庫案内など最近の活動状況などの詳しい情報はホームページをご覧ください。ホームページには、学会の情報の他に、最新の地震情報、日本地震工学会論文集など多くの情報が掲載されています。ぜひご利用ください。

入会方法や入会後の会員情報変更の詳細は本会ホームページ中の「会員・各賞受賞者」の下の「入会案内」、「変更・退会手続」に記載されています。

日本地震工学会ホームページ <https://www.jaee.gr.jp/jp/>

■ 会誌への原稿投稿のお願い

日本地震工学会会誌では、「地域での地震防災に関する話題」、「地震工学に関連した各種学術会議・国際学会等への参加報告」、「興味深い実験や技術の紹介」、「当学会や会誌への要望や意見」等に関して、皆様からの原稿を募集しております。なお、投稿原稿は原則として未発表のものに限ります。また、「速報性を重視する内容(原則として年3回の発行であるため)」、「ごく限られた会員のみに関係する内容」、「特定の商品等の宣伝色が濃いもの」はご遠慮下さい。

投稿内容、投稿資格、原稿の書き方・提出方法等の詳細は、本会ホームページ中の「投稿・応募ページ」よりご確認頂けます。

日本地震工学会ホームページ 投稿・応募ページ <https://www.jaee.gr.jp/contribution/>

■ 登録メールアドレスご確認のお願い

当学会では、会員の皆様のお役に立つ会員限定のニュースやセミナー情報をメールにて配信させていただいておりますが、メールが届かず戻ってきってしまうケースが散見されます。メールアドレスを変更された方、あるいは、このところ弊学会から1通もメールが届いていないという会員の方は、以下の方法で会員登録情報をご変更いただくか、事務局までご連絡いただきますようお願い申し上げます。

【会員登録情報のご変更方法】

日本地震工学会のWEBサイト (<https://www.jaee.gr.jp/jp/>) の「会員ログイン」より、会員番号とパスワード(7桁 例: 0000001)を入力してログインし、「登録情報の変更」を選択して登録情報をご変更ください。尚、会員番号またはパスワードがご不明な方は事務局までお問い合わせください。

■ JAE Newsletter 第10巻 第1号(通算第29号)が2021年4月下旬に発刊されます。

第10巻 第1号では、「東日本大震災から10年、熊本地震から5年」の特集記事を予定しております。

JAE Newsletter は、日本地震工学会誌を補完し、タイムリーに情報発信する目的で2012年9月に創刊されました。2015年より、会誌と連携した情報発信を行うため、会誌と交互となる4月、8月、12月に学会のWebサイト上で発行しています。地震工学に興味を持つ一般の読者も意識したわかりやすい記事を通じて、地震工学と地震防災の一層の普及・発展を目指しています。

JAE Newsletterについては以下のサイトで掲載しております。

<https://www.jaee.gr.jp/stack/1925-2/>

なお、最新号(第9巻 第3号)では、特集「感染症と避難のしかた」として5名の方にご執筆いただきました。

新しい生活様式における避難について、ご参考になる情報ですので、ぜひご覧ください。

■ 問い合わせ先

不明な点は、氏名・連絡先を明記の上、下記までお問い合わせ下さい。

日本地震工学会 事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

TEL: 03-5730-2831 FAX: 03-5730-2830 電子メールアドレス: office@general.jaee.gr.jp

編集後記：

2006年に発表されたディープラーニングを契機とした第3次AIブームが隆盛し、情報技術やIT産業などの分野で人工知能技術の研究・開発が積極的に行われてきました。これに対し、地震工学分野では同技術が近頃になりようやく取り入れられ始めましたが、他分野に比べ、未だ研究・開発が盛んではないように思われます。その一因としては、「AI・IoT技術とは何か」や「何が出来て何ができないのか」等、この技術に関する知識や知見が十分に浸透していないということが挙げられるように思います。このような状況を打破すべく、今回の特集では、地震工学分野においてAI・IoT技術を取り入れた研究・開発を実施されている皆様に、同技術の現状や課題、今後の展望と可能性についてご執筆いただきました。本特集が、今後のAI・IoT技術を用いた地震工学分野の研究・開発と地震減災・防災技術のさらなる発展のお役に立てますと幸いです。

最後に、お忙しい中本誌の記事をご執筆いただいた著者の皆様に、心より御礼を申し上げます。また、編集・校正作業にご尽力いただきました編集委員の皆様および関係各位にも深く御礼申し上げます。ありがとうございました。

肥田 剛典(東京大学)

本号の特集は「震災に立ち向かうAI・IoT技術」ということで、私自身はAIやIoTは専門ではありませんが、原稿を見させて頂いて非常に勉強になりました。AI・IoT技術に限らず、新しい分野の勉強をするときには、はじめから研究論文を読んでも「方法」に当たる部分の記述が理解できず、かといって教科書・専門書の類を開いても何の役に立つのか分からない基礎理論の説明が延々続いてうんざりしてしまうようなことがあります。その点、本特集の記事は、どのパートを見ても基礎理論・基礎技術的な内容と地震工学における応用についての内容とのバランスが良く、初学者への導入教材として優れていると感じました。会誌No.41にて実施された読者アンケートでも、AI・IoT技術に関する記事を望む声が多くありましたが、そうした要望を挙げて頂いた方々のご期待にも沿う内容だと思います。ぜひご一読下さい。

最後に、年末年始の多忙な時期にも関わらず、本誌記事原稿をご執筆頂いた著者の皆様、ならびに編集・校正作業にご尽力頂いた委員の皆様に心よりお礼申し上げます。

成田 修英(戸田建設)

会誌編集委員会

委員長 永野 正行 東京理科大学

幹事 成田 修英 戸田建設

幹事 肥田 剛典 東京大学

委員 浅野 公之 京都大学防災研究所

委員 入江 さやか NHK放送文化研究所

委員 岩田 直泰 鉄道総合技術研究所

委員 小穴 温子 清水建設

委員 王 欣 東京理科大学

委員 大西 直毅 東京大学

委員 大野 卓志 高圧ガス保安協会

委員 木下 貴博 竹中工務店

委員 鳥澤 一晃 関東学院大学

委員 平井 敬 名古屋大学減災連携研究センター

委員 湯山安由美 電力中央研究所

日本地震工学会誌 第42号 Bulletin of JAEE No.42

2021年2月28日発行(年3回発行)

編集・発行 公益社団法人 日本地震工学会

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830

©Japan Association for Earthquake Engineering 2021

本誌に掲載されたすべての記事内容は、日本地震工学会の許可なく転載・複写することはできません。

Printed in Japan