

3. 調査・研究結果

3.1 非破壊検査 DX

3.1.1 NDE4.0 とは

Industry 4.0(第4次産業革命)という用語は、製造業のデジタル化を促進するためにドイツ連邦政府のハイテク戦略のプロジェクトに由来する。当初は製造業におけるスマートファクトリーおよびスマートマニュファクチャリングの実現を主要な目的としていたが、製造業にとどまらず、あらゆる産業分野および国々に波及した。わが国も、第5期科学技術基本計画(2016年～2020年)において社会変革を視野に入れた戦略として Society 5.0 が掲げられたが、これは Industry4.0 の概念に強く影響を受けている。このような潮流の中で生まれたのが、NDE 4.0(Nondestructive Evaluation 4.0)である。NDE 4.0 とは、ドイツの Fraunhofer 研究所(当時)の Meyendorf らが、2017年のアジア太平洋非破壊検査会議(APCNDT, シンガポール)で提唱したもので、非破壊検査の効率化や生産性向上等を目指した新しい概念である。NDE 4.0 は、Industry4.0 の理念や技術を基盤にしており、昨今では NDE 4.0 は非破壊検査の Digital Transformation(DX)を象徴するキーワードとしても認知されている。Industry 4.0 との関係では、NDE 4.0 には2つの側面があるとされ、NDE 4.0 の主導者である Singh と Vrana は次のように述べている(3.1.1)。「Industry 4.0 for NDE 4.0」は、Industry 4.0 によって生み出される新しい技術や考え方を非破壊検査に取り込んで高度化させようとする。こと。「NDE 4.0 for Industry 4.0」は、逆に、NDE 4.0 が生み出す安全・安心が Industry 4.0 が実現する社会に貢献すること、である。

図-3.1.1 に、Industry1.0～4.0 と NDE1.0～4.0 を対比させたものを示す。Industry 1.0～4.0 のように、NDE 1.0～4.0 も段階的発展モデルを示し、「4.0」は Artificial Intelligence (AI), Internet of Things(IoT), デジタルツインなどを含む最先端段階と位置付ける。上述のように、NDE 4.0 という名称は、Industry 4.0 と意図的に対比・連動させたものであるが、これは単なるキャッチーなネーミングではなく、非破壊検査というニッチな領域に、より大きな産業変革の文脈を重ねた巧妙な戦略であると言える。Industry 4.0 が象徴するスマート化・自動化・デジタル連携の潮流に、非破壊検査も歩調を合わせる必要があるという主張を明確に示している。また、Industry 4.0 との類似性により、民間団体の支援や投資も得やすくなる一方で、ルールを決定する公的な団体の耳にも入りやすい。つまり、国際的議論の場でも共感・認識を得やすくなり、標準化をうまく推し進めることもできよう。NDE 4.0 という名称は、現場技術にデジタル革新の橋渡しをする上で非常に有効なキーワードである。以下に、NDE4.0 に関連する国内外の動向を、誕生から現在まで広く見渡し、さらにその課題についても言及する。

産業革命	NDE	導入される技術
1次(18世紀)	1.0	
機械化 蒸気機関, 水力	人間の五感	目視検査 打音検査
2次(19世紀半ば～ 20世紀初頭)	2.0	
大量生産 電力	五感の拡張, 化学的検出	浸透試験 磁粉試験
3次(1960年代～ 2010年代初頭)	3.0	
コンピュータ 自動化	物理計測装置 (音響, 電磁気・電磁波, ひずみ, 熱)	放射線試験 超音波試験 電磁気試験
4次(現在～未来)	4.0	
実空間とサイバー空間 人工知能 個別生産	ICT・IoT 人工知能 (AI) ロボティクス デジタルツイン	多点計測(フェーズドアレイUT等) レーザー・テラヘルツ波 遠隔・非接触計測

図-3.1.1: 産業革命と NDE 革命の対比

3.1.2 NDE4.0 に対する国際的な動き

表-3.1.1 に示すように、Meyendorf らが NDE4.0 を提唱された 2017 年には、ドイツ非破壊検査協会 (DGZfP)において、早速「NDE 4.0」技術委員会が設立された。2018 年には非破壊検査に関する国際団体(ICNDT)において、NDE 4.0 に特化した国際的議論の場として SIG (Specialist International Group) on NDE 4.0 が設立され、世界的な取り組みがスタートしている^(3.1.2)。このあたりの動きは非常に速く、提唱国のドイツがイニチアチブを取ろうとする意欲がみてとれる。その後、米国において、特に重工業や社会インフラの非破壊検査などで NDE4.0 の必要性が提起され、2019 年にはアメリカ非破壊検査協会 (ASNT)においても「NDE 4.0」委員会が設置された。さらに、2020 年には、イギリスの非破壊検査協会 (BINDT)において、NDE 4.0 SIG が発足している。また、ヨーロッパ非破壊試験連盟(EFNDT)や、アジア・太平洋非破壊試験連盟(APFNDT)で、NDE4.0 のワーキングが立ち上がっている。後に示すが、日本非破壊検査協会(JSNDI)の対応 WG もこの時期に設立されている。2020 年 4 月には、ドイツ、米国、英国、日本、フランス、カナダ、インド、ポルトガル、メキシコ、中国などが参加する国際的枠組みとして「Global Ambassadors of NDE 4.0」が ASNT で設置され、やがて ICNDT の SIG(NDE4.0)へとマージされ、これが、現在の国際的な議論の場となっている。

国際会議やワークショップとしては、表-3.1.2 に示すように、2017 年の第 44 回定量的非破壊評価会議 (QNDE)以降、NDE 4.0 をテーマとしたセッションが設けられ、学術的・技術的な情報交流が行われている。SPIE (International Society for Optics and Photonics) では、その一つの部門 (Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring) が、Industry4.0 や NDE 4.0 をテーマとした会議を、2018 年から毎年 3 月から 4 月の時期に開催しており、その会議録 (SPIE Conference Proceedings) によって、総論的な講演や論文に加えて、NDE 4.0 に関する具体的な研究事例を多数確認することができる。

NDE4.0 を冠した国際会議は、2021 年 4 月に「1st International Conference on NDE 4.0」として DGZfP と ICNDT が主催で、COVID-19 のため完全オンラインで実施された。その後、2022 年 10 月に「2nd International Conference on NDE 4.0」が対面で開催された。近年では、2025 年 3 月に「3rd International Conference & Exhibition on NDE 4.0」が、インド非破壊検査協会(ISNT)と ICNDT が共催でインドにて開催された。2027 年には北米において「4th International Conference & Exhibition on NDE 4.0」の開催が予定されている。また、ASNT では 2018 年の年次大会で特別セッションとパネルディスカッションが行われた。APFNDT が主催した国際会議 The Asia Pacific Conference on NDT(APCNDT)2023 や、ICNDT と韓国非破壊検査協会(KSNT)が主催した 20th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT2024)では、それぞれ、特別セッションが企画された。

表-3.1.1: 海外における NDE4.0 に関連した委員会

年月	専門委員会名
2017 年 6 月	(ドイツ) DGZfP Fachausschuss ZfP 4.0, Chair: Bernd Valeske, deputy: Johannes Vrana
2018 年	(国際団体) ICNDT SIG(Specialist International Group) NDE 4.0, Chair: Johannes Vrana
2019 年 4 月	(アメリカ) ASNT NDE4.0 committe, Chair: Ripi Singh
2019 年 11 月	(アメリカ) ASNT NDE4.0 Ambassadors Group, Leadership: Ripi Singh and Johannes Vrana → 2020 年 4 月 Global Ambassadors of NDE4.0 が発足
2020 年	(イギリス) BINDT NDE4.0 SIG, Chair: Nick Brierley
2021 年 1 月	(ヨーロッパ) EFNDT WG10 on NDE 4.0, Chair: Johannes Vrana
2021 年 7 月	(アジア・太平洋) APFNDT-TG7 on NDE4.0, Chair: Pranay Wadyalkar

表-3.1.2: NDE4.0 に関連した国際会議とワークショップ

年月	国際会議・ワークショップ
2017 年 7 月	44th QNDE / First special session about NDE 4.0, chaired by Norbert Neuendorf
2018 年 3 月	SPIE conference (10602) Smart Structures and NDE for Industry 4.0
2018 年 10 月	ASNT Annual Conference / Special session about NDE 4.0 and panel discussion
2019 年 3 月	SPIE conference (10973) Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0
2020 年 4 月	SPIE conference (11382) Smart Structures and NDE for Industry 4.0, Smart Cities, and Energy Systems
2021 年 3 月	SPIE conference (11594) NDE 4.0 and Smart Structures for Industry, Smart Cities, Communication, and Energy
2021 年 4 月	1st International Conference on NDE 4.0 (virtual) / chaired by Johannes Vrana and Ripi Singh
2022 年 3 月	SPIE conference (12049) NDE 4.0, Predictive Maintenance, and Communication and Energy Systems in a Globally Networked World
2022 年 10 月	2nd International Conference on NDE 4.0
2023 年 2 月	The Asia Pacific Conference on NDT 2023 (APCNDT2023) / Session on NDE4.0
2023 年 3 月	SPIE conference (12489) NDE 4.0, Predictive Maintenance, Communication, and Energy Systems: The Digital Transformation of NDE
2023 年 7 月	13th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2023), Session on NDT Industry 4.0
2023 年 9 月	The 39th Non-Destructive Testing and Inspection Conference and Exhibition (CONAENDI & IEV 2023), Session on NDE 4.0
2024 年 5 月	SPIE conference (12952) NDE 4.0, Predictive Maintenance, and Communication and Energy Systems: The Digital Transformation of NDE II
2024 年 5 月	20th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT2024), Session on NDE 4.0 - Past, Present, and Future
2025 年 3 月	3rd International Conference on NDE 4.0

3.1.3 NDE4.0 に関連する会議、および技術研究発表

表-3.1.3 に示すように、ASNT が発刊している協会誌 *Materials Evaluation* と論文誌 *Research in Nondestructive Evaluation* においては、2020 年から特集号が組まれている。また、学術雑誌 *Journal of Nondestructive Evaluation* では、雑誌に投稿された論文の中から NDE4.0 に関する論文を選んで、Topical Collection として、これまで 3 つのコレクションを紹介している。その他、*Journal of Non Destructive Testing and Evaluation* や *Applied Science* でも、それぞれ、NDE4.0 に関する特集号を発行している。

また、NDE4.0 がタイトルに含まれる主要な論文やプロシーディングを表-4 に纏めてみた。具体的な研究や技術については、それらの中の文献をあたって頂きたい。表-3 や 4 から分かるように、NDE 4.0 の提唱から、その啓発まで主導してきたのは、3 人の人物 (Meyendorf, Singh, Vrana) である。流行の言い方をすれば、エバンジェリストである。2022 年 2 月には、その 3 人を主編集者とするハンドブック (*Handbook of NDE 4.0*) が出版されている。この書籍を通じて、NDE 4.0 の全体像を俯瞰することが可能である。

表-3.1.3: NDE4.0 に関連する学術誌や論文集の特集号, または書籍

年月	学術誌／論文集特集, 書籍
2020 年 7 月	Materials Evaluation, Vol.78, No.7, Technical Focus Issue: NDE 4.0, edited by Ripi Singh
2020 年 11 月	Research in Nondestructive Evaluation, Vol.31, No.5-6, Special Issue of Research in NDE focused on NDE 4.0, edited by Roman Gr. Maev
2021 年～	Journal of Nondestructive Evaluation (1) Trends in NDE 4.0: purpose, technology, and application (2) T.C.: NDE 4.0: technical basics, applications and role of societies (3) NDE 4.0 creating success stories, building the eco-system and continuing research
2022 年 2 月	Handbook of NDE 4.0 (published from Springer), edited by Norbert Meyendorf, Nathan Ida, Ripi Singh and Johannes Vrana
2022 年 8 月	NDE 4.0: How to Embrace To Thrive Now (independently published) written by Ripi Singh and Ramon Salvador Fernandez
2023 年 12 月	Journal of Non Destructive Testing and Evaluation (JNDE), Vol.20, No.4, Special issue on Future NDE 4.0 edited by Shyamsunder Mandayam
～2025 年 3 月	Applied Science, Applied Artificial Intelligence for Industrial Nondestructive Evaluation NDE4.0, edited by Ahmad Osman and Valérie Kaftandjian

表-3.1.4: 国際会議における講演や NDE4.0 を冠する論文リスト

年月	講演, 論文
2017 年 3 月	NDE for the 21st century: industry 4.0 requires NDE 4.0, N. Meyendorf: / SPIE conference (10171) Smart materials and nondestructive evaluation for energy systems
2017 年 11 月	NDE 4.0 - NDE for the 21st century – the internet of things and cyber physical systems will revolutionize NDE, N. Meyendorf et. al.: / 15th APCNDT
2018 年 3 月	Creating a trend-setting vision for NDE technology and driving the change, R. Singh: / 27th ASNT Research Symposium
2018 年 6 月	NDT 4.0 - significance and implications to NDT –automated magnetic particle testing as an example, R. Link and N. Riess: / 12th ECNDT
2019 年 1 月	NDE 4.0 the next revolution in nondestructive testing and evaluation: what and how?, R. Singh: / Materials Evaluation, Vol.77, No.1, pp.45-50
2019 年 6 月	NDE 4.0: smart NDE, Chakraborty, D., McGovern, M.E / In: Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM) (2019)
2019 年 7 月	ZfP 4.0: Die vierte Revolution der Zerstörungsfreien Prüfung: Schnittstellen, Vernetzung, Feedback, neue Märkte und Einbindung in die Digitale Fabrik, J. Vrana: / ZfP Zeitung, Vol.165, pp. 51-59

2021 年 1 月	NDE 4.0 – A Design Thinking Perspective, J. Vrana and R. Singh: / Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.40, No.8
2023 年 6 月	State of Artificial Intelligence (AI) in Thermographic Non-Destructive Evaluation (NDE) and its role in NDE 4.0, Sai Kalyan Evani: / Journal of Non Destructive Testing and Evaluation (JNDE), Vol. 20 No. 2
2023 年 12 月	NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0, N. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, J. Vrana: / NDT&E International, Vol.140, 102957
2025 年 6 月	Integrating AI in NDE: Techniques, trends, and further directions, Eduardo Pérez et al.: / NDT&E International, in press

3.1.4 日本における NDE4.0 の対応^(3.1.3)

表-5 に示すように、2020 年 4 月に ASNT の Global Ambassadors of NDE4.0 に、当時の JSNDI の落合誠副会長が参加して以来、JSNDI としての対応が始まった。その年の 8 月には NDE 4.0 対応 WG が立ち上がり、学術部門主査をメンバーとする懇談会も開催され、NDE 4.0 に関する国際的動向を JSNDI の会員に周知したり、日本の意見や状況を集約したりする活動が始まっている。2020-21 年度の「先進超音波計測に関する萌芽技術研究会」（主査：小原良和）では、International online workshop on NDE 4.0 in Japan と題して、エバンジェリストの J. Vrana と R. Singh 両名を講師としてオンラインで招へいた。その際、日本における NDE4.0 の研究や開発事例が紹介され、活発な議論が行われた。

表には出ていないが、JSNDI 超音波部門において「ICT を活用した超音波による非破壊評価技術研究委員会」（2018-19 年度、委員長：中畑和之）と、その前身である「超音波計測に関する萌芽技術研究会」（2016-17 年度、主査：林高弘）では、AI や機械学習、IoT を活用した計測技術、先進的シミュレーション技法やデータ同化に関する研究など、NDE4.0 に資する技術や研究について議論が既に行われていた。その後、2022-23 年「先進センシング技術とデータ処理に関する萌芽研究会」（主査：中畑和之）が、国内で第 1 回 NDE 4.0 シンポジウムを 2023 年 10 月に開催した。翌年の 2024 年 12 月には第 2 回を開催し、さらに 2025 年 10 月には第 3 回を開催予定であり、日本における NDE 4.0 に関する議論の場として重要な役割を果たしている。

表-6 に示すように、JSNDI が発行する機関誌「非破壊検査」では、NDE4.0 に関連した特集が 4 回組まれている。また、日本保全学会の機関誌「保全学」においても、NDE4.0 に関連した特集や記事が見られる。

NDE 4.0 推進にあたっては、あらゆる分野で、技術、組織(人)、ルール(規格)が一体となって連動することが求められる。そのため、他学協会や産業界との連携も重視され、日本機械学会、日本非破壊検査工業会、土木学会等で、NDE4.0 に関連するイベントが JSNDI と共催・協賛で実施されている(表-3.1.7)。

表-3.1.5: 日本非破壊検査協会(JSNDI)における取り組み

年月日	会議名やワーキング
2020年4月29日	Global Ambassadors of NDE4.0 に出席 (日本代表:落合 誠)
2020年8月	NDE4.0 対応 WG 設立 (運営委員会傘下に設置/主査:緒方隆昌)
2020年11月18日	International online workshop on NDE4.0 in Japan
2018年6月	2020年度 第1回「先進超音波計測に関する萌芽技術研究会」
2021年12月16日	NDE 4.0 懇談会 (第1回)
2022年6月22日	2022年度非破壊検査総合シンポジウム: OS「NDE4.0における超音波非破壊検査」
2023年1月20日	NDE 4.0 懇談会 (第2回)
2023年6月7日	2023年度非破壊検査総合シンポジウム: OS「NDE4.0の動向と協会としての取り組み」
2023年10月30日	第1回 NDE 4.0 シンポジウム (国内/主催:JSNDI)
2023年12月7日	NDE 4.0 対応 WG (2023年度第1回会議)
2024年12月20日	第2回 NDE 4.0 シンポジウム (国内/主催:JSNDI)
2025年10月28日	第3回 NDE 4.0 シンポジウム (国内/主催:JSNDI) *開催予定

表-3.1.6: 国内の学術誌等の特集

年月日	学術誌等の特集
2021年2月	非破壊検査, 70 巻 2 号: 特集「非破壊検査分野での ICT および AI の活用」 解説:中畑和之「NDE4.0 の概念と動向ーデジタルイノベーションのための DICONDEー」
2022年12月	非破壊検査, 71 巻 12 号: 特集「先進超音波非破壊評価の萌芽技術」 解説: J. Vrana and R. Singh: Welcome to the World of NDE 4.0: Basics and Early Success Stories
2023年10月	保全学, 22 巻 3 号: 特集記事 中畑和之 「非破壊検査の DX ～NDE4.0 とデータ利活用～」
2024年7月	非破壊検査, 73 巻 7 号: 特集「第1回 NDE 4.0 シンポジウム」
2025年9月	非破壊検査, 74 巻 9 号: 特集「第2回 NDE 4.0 シンポジウム」 ※発行予定

表-3.1.7: 国内の学協会のイベント

年月日	イベント名
2023年2月23日	日本保全学会 第22回保全セミナー 「DXを活用して原子力保全に変革を！」
2023年3月6,7日	日本機械学会 情報・知能・精密機器部門 講演会 2023 「DX時代の非破壊検査センシングとデータ活用ーNDE4.0の実現に向けてー」
2023年8月30日	日本非破壊検査工業会: 第19回技術討論会 「非破壊検査業界における DX の推進と今後の展望」
2024年3月4,5日	日本機械学会 情報・知能・精密機器部門 講演会 2024 「DX時代の非破壊検査センシングとデータ活用ーNDE4.0の実現に向けてー」
2024年9月3日	土木学会: 令和6年度全国大会 研究討論会 鋼構造委員会 「DX時代における鋼構造物の非破壊検査ー現状, 課題, 展望」
2025年3月3,4日	日本機械学会 情報・知能・精密機器部門 講演会 2025 「スマートマニファクチャリング/スマート IoT システムと非破壊センシング」

3.1.5 NDE4.0 の設計思想

NDE4.0 は具体的には何を指し、どのようなゴールを想定しているのか。その前に、お手本となった Industry 4.0 について、その 4 つの設計原則^(3.1.5)を示す。ちなみに、原則という言葉は、Industry 4.0 を実現するための基盤となる考え方や設計思想という意味である。

- ・ Interoperability(相互運用性)
機械、人、システム、IoT が共通言語で通信できること。
- ・ Information Transparency(情報の透明性)
センサーや IoT から得たデータを可視化・理解可能にすること。
- ・ Technical Assistance(技術支援)
人を支援する意思決定サポートや物理的支援。
- ・ Decentralized Decisions(分散型意思決定)
システムが独立して意思決定し、人の介入を最小化する。

Industry 4.0 の 4 原則は、NDE 4.0 では、表-3.1.8 のように解釈される^(3.1.6)。NDE 4.0 では、ICT、Industrial IoT (IIoT)、ロボティクスを駆使して多点計測や遠隔計測が可能となり、異なるモダリティでのデータ交換など、スマートな非破壊検査が実現する。さらに、クラウドコンピューティングを駆使して、AI や機械学習による大規模なデータ処理を行ったり、エッジコンピューティングによって再構成した欠陥イメージングを VR/AR/MR を用いて現場で投影したりなど、次世代の非破壊検査技術の創発も期待されている。これらの普及によって、ヒューマンエラーのリスクを低減し、検査効率を向上させる。また、AI を活用して欠陥検出確率 (Probability of Detection: POD) に則った欠陥の自律評価も行ったりすることが期待されている。また、センシングデータを蓄積し、AI の学習モデルを高度化することで検査結果の信頼性を高め、さらにその自律的改善も可能になる。

以上からわかるように、NDE 4.0 とは Industry 4.0 を検査という領域に置き換えたものであり、根底にある目標は同じである。Industry 4.0 の目標は、一言で言えば「データをつなぐ、サイバー空間で最適化する、自律的に意思決定する、価値創出を高める」ことであるが、NDE4.0 は、「検査データをつなぐ、設計・製造・保守と連携する、自律的にリスクを評価・意思決定する、安全保証を超えて価値を生む」ことであり、目指している方向は同じである。冒頭で述べたように、「Industry 4.0 for NDE 4.0」と「NDE 4.0 for Industry 4.0」は相補関係にあり、それぞれが創出した技術や考え方は、お互いに取り込んで高度化させようとする「相互進化による価値創造」が核心である。

表-3.1.8: NDE4.0 における設計原則 (Industry 4.0 を基にした解釈)

Industry4.0 の原則	NDE4.0 における設計原則	技術領域
Interoperability (相互運用性)	NDE 機器が他のモダリティと通信し、データの交換や処理が可能であること。	IIoT, エッジコンピューティング, クラウドコンピューティング
情報の透明性 (Information Transparency)	データを解析・蓄積し、ライフサイクル全体を通じたデータの可視化。	データトレーサビリティ, ブロックチェーン, デジタルツイン
技術支援 (Technical Assistance)	AI による自動欠陥検出, 可視化技術を用いた検査員の支援, 機械による危険作業の代替	VR/AR/MR, ロボティクス, 遠隔センシング, デジタル信号処理・画像処理,
分散型意思決定 (Decentralized Decisions)	検査結果の自律的判断や、システムが検査計画を立案すること	人工知能 (AI), 機械学習, POD

3.1.6 NDE4.0 の課題

NDE4.0 は単なる検査技術の DX に留まらず、Industry 4.0 が志向するサイバー・フィジカル・システム (CPS) の構築と歩調を合わせ、検査データを資産管理のための経営戦略に盛り込み、維持管理に資する情報資産として価値を持たせることへと昇華させることを目指している。しかし、その実現には多くの課題が存在しており、単独の企業努力のみでは克服困難な、業界で共有すべき問題が散在している。

第一の課題は、データ連携の壁である。非破壊検査装置やソフトウェアはメーカーごとに独自フォーマットを有しており、異なるモダリティ間でのデータ互換性がほとんどない。そこで、国際標準である DICONDE というデータフォーマット^(3.1.4)を利用する動きが見られる。すでに、ドイツでは、DICONDE がドイツ工業規格(DIN)の Technische Regel(技術規則)として制定されている^(3.1.7)。しかし、実際、装置への実装や現場での使用は限定的であり、多くの国では、検査結果が孤立した「データのサイロ」に留まっている。これにより、デジタルツインへのデータ統合や高度解析への活用が妨げられている。ちなみに、非破壊検査が規範とする医療分野では、このデータ共有の仕組みが整備されている。医療機器は、検査毎にメーカーが異なる場合が多く、それぞれのモダリティで得られる情報を異なるシステム・場所でも使用できるように、国際的な通信プロトコルのもとで運用されている。患者や検査のテキストや数値データを交換する機能が HL7(Health Level 7)である。また、医療画像については Digital Imaging and Communications in Medicine(DICOM)に従って、モダリティ同士でデータの交換が行われる。DICOM は、動画を含む医用画像・検査情報データの規格および、それを通信・印刷・保存・検索するための国際標準規格(ISO12052:2017)である。これを、非破壊検査に当てはめたのが図-3.1.2 である。通信を担っているのが OPC-UA であり、これは、Industry4.0 のネットワークにおける自動適応型センサーシステムの接続と通信を行うために標準化されたインターフェースである。OPC-UA はプラットフォームに依存しないデータ交換のための構造を提供し、マシン・システム同士の接続を想定している。

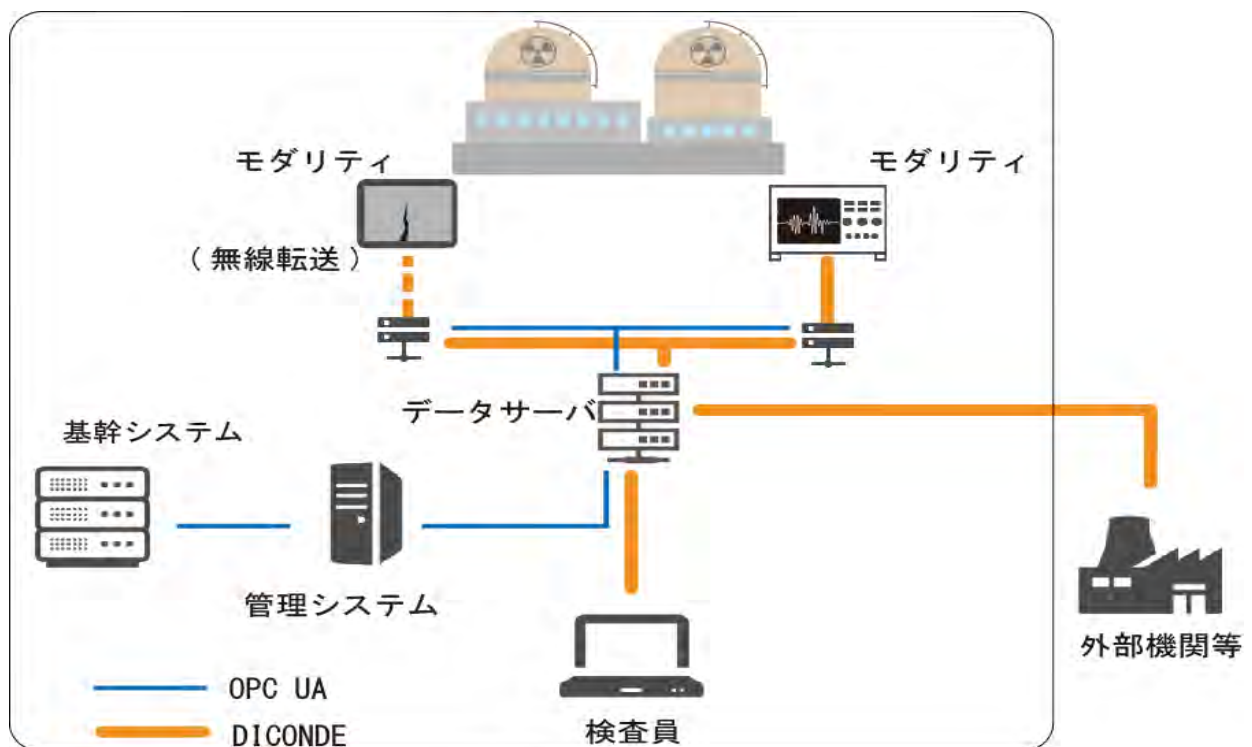


図-3.1.2: 非破壊検査のためのデータの通信とデータ共有

第二に、検査データの「価値化」の遅れである。多くの現場では検査データが、その時点での安全を確認するためだけに用いられる。管理者や発注者は、それをライフサイクルマネジメントへ活用することを考えていない。NDE データを有効に連携できれば、アセットの効率的な供用、寿命予測、補修・補強計画の最適化など、資産管理や投資といった観点で検査データの価値が生まれ、新しいビジネスモデルも構築できる。

第三の課題は、人材および文化的側面である。現場には「資格を持った熟練者が直接検査することが一番信頼できる」という風土があり、新技術導入への心理的抵抗が存在する。これは、NDE と IT・データサイエンスの双方に精通する人材は極めて限られているためであり、AI 技術のブラックボックス化を懸念する声も根強い。NDE4.0 時代は、これらの技術を持つ融合人材（従来の技術に加え、データ解析や AI を活用できる）の育成が急務である。資格／認証制度ではデジタルリテラシーを評価軸に加え、デジタルを活用できる力を検査のスキルセットに含めるべきだと考える。さらに、AI による自動判定結果の法的効力や責任所在の不明確さも深刻な問題である。AI による診断が誤った場合、その責任を誰が負うのか、また AI 判定が公式記録として認められるのかといった論点は、技術を現場に普及させる上で避けて通れない課題である。我が国の文化的側面を踏まえれば、これらは国際的動向を見据えつつ、日本独自の制度設計が不可欠である。

3.1.7 土木分野における NDE4.0

近年、社会インフラの老朽化対策や維持管理の高度化に伴い、土木分野においても非破壊検査の重要性が高まっている。海外では土木分野における NDE4.0 の取り組みが徐々に進展しており、特に欧米では橋梁やトンネルなどインフラのデジタルツイン構築を目指し、NDE データの統合活用が進められている。例えば、ドイツの DGZfP では 21 の技術委員会の一つに「NDE4.0」があり、その中に「ZfPBau4.0」なるワーキングがある。ここで、土木建設分野における NDE4.0 の推進について議論している。

一方、我が国に目を向けると、目視点検の効率化を目的とした AI 解析や遠隔検査の研究開発は活発であるが、内部を評価する非破壊検査の普及は限定的である。このような状況に鑑みると、我が国の土木分野における NDE4.0 の実装は、製造業やプラント業界に比して相当に遅れていると言わざるを得ない。しかしながら、これは標準化やデータフォーマット整備の観点から見れば、一種のポテンシャルともなり得る。すなわち、既存のレガシーシステムや独自フォーマットの制約が少ないため、白紙の状態から最適なデータ標準や連携基盤を設計できる可能性が高い。また、社会インフラが公共財であることから、省庁や自治体による統一的な指針策定が進めやすく、国土交通省が推進する i-Construction（インフラ分野の ICT 活用施策）や BIM/CIM（Building/Construction Information Modeling）の潮流とも親和性が高い。

ただし、整備が容易かといえば、それは言い難い。第一に、土木分野が扱う構造物は道路、橋梁、トンネル、ダムなど多岐にわたり、対象とする材料もコンクリート、鋼、土構造物など多様であり、これらを包含する共通フォーマットの策定は技術的に複雑である。第二に、地方自治体ごとにインフラ管理の体制が大きく異なり、全国的な標準化には膨大な調整が必要となる。第三に、地方自治体や中小規模の事業者では予算や専門人材が不足しており、上述のように標準化以前に非破壊検査自体が十分に普及していない現実もある。以上のような課題が存在することから、土木分野における NDE4.0 の導入は現状ではハードルが高い。しかしながら、ドイツの「ZfPBau4.0」のように、問題意識を持つ人たちが集まり、技術、制度整備、コスト、人材育成、文化的転換を含む多面的な問題を一つ一つ丁寧に議論していくことが不可欠であると考えられる。

3.1.8 まとめ

NDE4.0 に関する国内外の動向や課題について述べた。NDE4.0 の本質は、「NDE データの真の価値を、産業や社会の意思決定にいかに統合するか」という点にある。つまり、NDE データを単なるその場の安全確認や報告書の記載にとどめず、アセットの設計・製造・保守・管理にどう活用するか、また、社会インフラのような公共財を対象とする場合には、社会全体の安全管理を考えた政策決定（意思決定）にいかに活かすかを議論することが重要である。データに価値を持たせることが、結果として業界や検査員のステータス向上を促すことになるし、NDE をデータビジネスとして再定義し、知的価値産業へと転換することもできる。これらは、業界にとってまさに「変革」と呼ぶべきものであり、この共通理解とビジョンの確立こそが今後の最大の課題である。その成否が NDE4.0 の真価を決定づけるであろう。

3.1.9 参考文献

(3.1.1) J. Vrana and R. Singh, Cyber-physical loops as drivers of value creation in NDE 4.0, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.40, No.2, 61 (2021)

- (3.1.2) The international committee for non-destructive testing, The ICNDT Journal, Vol.9, No.8, 2021.
- (3.1.3) 塚田和彦, 国内外における NDE 4.0 に関する活動-第 1 回 NDE 4.0 シンポジウムの報告として-, 非破壊検査, Vol.73, No.7, pp.262-266, 2024.
- (3.1.4) 中畑和之, 非破壊検査の DX ～NDE4.0 とデータ利活用～, 保全学, 22 巻, P.5-12, 2023.
- (3.1.5) M. Hermann, T. Pentek, B. Otto, Design principles for industrie 4.0 scenarios. In 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, pp. 3928–3937, 2016, doi:10.1109/HICSS.2016.488
- (3.1.6) R. Singh, The next revolution in nondestructive testing and evaluation: what and how?, Materials Evaluation, Vol.77, No.1, pp.45-50, 2019.
- (3.1.7) ドイツ規格協会(Deutsches Institut für Normung: DIN), Technische Regel, DGZfP-ZfP-4.0 01:2023-06, DICONDE in der ZfP, <https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:372477312> (accessed 2025-6-17)