

機械システムの状態監視と診断の動向

Recent Situation of Condition Monitoring and Diagnosis of Machine Systems



井上 剛志 Tsuyoshi INOUE

名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授

最近、機械システムの状態監視と診断技術が急速に注目を集め、発展している。本稿ではまず、著者が長年関わってきた ISO/TC 108/SC 5 の規格化活動に触れつつ、機械システムの状態監視と診断技術の最近の動向を概観する。つぎに、近年の話題として、アセットマネジメントと状態監視、風力発電の状態監視と診断、予知保全の IoT 化、1DCAE を活用した状態監視と診断について、最近の動向を紹介する。そして最後に、ここ数年の国内の学会講演会の発表から本稿（機械システムと軸受の状態監視と診断）に沿ったものを紹介する。

Recently, condition monitoring and diagnosis technologies for machine systems have been rapidly attracting attention and developing. This paper first reviews the recent trends in condition monitoring and diagnosis of mechanical systems, referring to the standardization activities of ISO/TC 108/SC 5, in which the author has been involved for many years. Subsequently, this paper introduces the recent trends in asset management and condition monitoring, condition monitoring and diagnosis of wind power generation, IoT for predictive maintenance, and condition monitoring and diagnosis using 1DCAE as the latest topics. Finally, some topics regarding condition monitoring and diagnosis of machine systems and bearings at domestic conferences in the past few years are introduced.

1. はじめに

私は 2004 年以来、ISO/TC 108/SC 5 機械システムの状態監視と診断で ISO 規格化活動に携わっている。本寄稿文では、まず最初に ISO/TC 108/SC 5 の規格化活動に簡単に触れつつ、機械システムの状態監視と診断技術の最近の動向を概観する。なお、この前半部分（第 2 章、第 3 章）は主に 2020 年に雑誌「非破壊検査」に執筆し掲載された解説記事¹⁾から引用しつつ、ここ 2 年分の情報を更新したものである。

後半（第 4 章から第 7 章）では、アセットマネジメントと状態監視、風力発電の状態監視と診断、予知保全の IoT 化、1DCAE を活用した状態監視と診断について、最近の動向を紹介する。そして最後に、ここ数年の国内の学会講演会の発表内容で、軸受の状態監視と診断に関連する内容について紹介する。

2. 機械システムの状態監視と診断の国際動向¹⁾

2.1 ISO TC 108/SC 5 のスコープ

改めて、ISO/TC 108/SC 5 機械システムの状態監視と診断を紹介すると、正式な英語名称は Condition monitoring and diagnostics of machine systems である。まず、本 SC 5 の目的・適用範囲 (Scope) を Web サイト²⁾から次に示す。

Standardization of the procedures, processes and equipment requirements uniquely related to the technical activity of condition monitoring

and diagnostics of machines systems in which selected physical parameters associated with an operating machine system are periodically or continuously sensed, measured and recorded for the interim purpose of reducing, analyzing, comparing and displaying the data and information so obtained and for the ultimate purpose of using this interim result to support decisions related to the operation and maintenance of the machine system.

この目的 (Scope) を和訳して示すと次のようになる¹⁾。機械システムの状態監視と診断技術に関する手法と手順、装置要件の標準化を目的とする。すなわち、まず稼働中の機械システムに関連する選択された物理的パラメータを定期的又は継続的に感知・測定及び記録すること、次に中間目的として、得られたデータ及び情報を変換（縮減）、分析、比較及び表示すること、さらに最終目的として、中間結果から機械システムの運転及び保守に関する決定（判断）を支援することのそれぞれの標準化を目的とする。

2.2 ISO TC 108/SC 5 の作業 WG

2022 年 9 月時点で、ISO/TC 108/SC 5 に設置されている作業グループ（ワーキンググループ、WG）を表 1 に示し、以下で個別に紹介する。

AG E : SC 5 全体の戦略的計画が検討される WG である。ここでは、SC 5 全体の国際標準化の方向性や各 WG

での作業の進め方、WG の設置・解散等が精査・検討されている。また、将来的に新規 WG を設置しての作業に移行することを前提とした予備業務項目（PWI）の初期段階のドラフトもここで考察されている。

表1 ISO/TC 108/SC 5 の作業グループ²⁾ (2022 年 9 月時点)

WG	技術分野	
AG E	Strategic planning	戦略的計画
WG 7	Training and accreditation in the field of condition monitoring and diagnostics	状態監視と診断分野での訓練及び認証
WG 11	Thermal imaging	熱画像
WG 16	Condition monitoring and diagnostics of wind turbines	風車の状態監視と診断
WG 17	Condition monitoring and diagnostics applications	状態監視と診断のアプリケーション
WG 18	Condition monitoring management	状態監視マネジメント

WG 7：状態監視技術者の訓練及び認証にかかる WG であり、訓練及び認証に係わる一連の規格が整備されている。全体を覆う ISO 18436-1:2021 に加え、個別技術の状態監視技術者を対象とする規格として、ISO 18436-2:2014 振動の状態監視と診断、ISO 18436-4:2014 現場での潤滑油分析、ISO 18436-5:2012 分析室での潤滑油分析、ISO 18436-6:2021 アコースティック・エミッション、ISO 18436-7:2014 サーモグラフィ、ISO 18436-8:2013 超音波が発行されている。日本では早期からこの 18436 シリーズに基づく機械の状態監視技術者認証を実施しており、その詳細は第 3 章で述べる。

WG 11 熱画像：熱画像を用いた状態監視と診断技術に係る WG である。ISO 18434-1:2008 の一般手順と ISO 18434-2:2019 の画像の解釈について ISO 規格を発行しており、ここでは軸受の異常検出の画像も示されている。現在は Optical Gas Imaging に関する規格化が検討されている。以前はこの熱画像の WG11 以外にも多数の状態監視と診断技術に係る WG（WG3 性能診断、WG4 トライボロジー、WG10 電流兆候診断、WG14 アコースティック・エミッション、WG15 超音波診断など）が設置されていたが、それぞれ現状で必要とされる ISO 規格の発行を終え、現在は解散している。これらの解散し

た WG の情報を表 2 に示す。もし同分野の新規 ISO 規格化の必要性が生じたり、現行の ISO の大幅な修正が必要となった場合には再度活動を開始する予定である。

WG 16 風車、WG 17 アプリケーション（応用技術）：これらは個別機械における状態監視と診断に係る WG である。WG 16 は ISO 16079-1:2017 一般指針と ISO 16079-2:2020 ドライブトレインの状態監視の規格化を終えている。この後者では風車の軸受やギヤに関する監視と診断について述べられている。WG 17 はアプリケーションと名のつく通り広く対象をカバーしている。これまでに ISO 19283:2020 水力発電装置の ISO 規格を発行しており、現在はレシプロ圧縮機（Reciprocating compressors）の規格化が開始された。

WG 18 アセットマネジメント（資産管理）：2019 年から実働に入った新しい WG であり、2022 年 9 月時点で最も活発に活動をしている WG である。機械システムの状態監視と診断は、従来、機械を直接扱う技術者に対するものがメインであったが、SC 5 国際会議（2.3 節参照）においては約 10 年前からアセットマネジメントシステムの観点も取り入れた規格化の必要性が示されてきた。そして、現在は、現 SC 5 チェアマンの強いリーダーシップの下で、対象を機械システムに特化したアセットマネジメントの規格化の検討が開始され、精力的に進められている。具体的に検討を始めた規格は、(1) 状態監視管理者の認証、(2) 状態監視監査者の認証、そして (3) 物理的（physical）アセットマネジメントの 3 規格である。

2.3 ISO TC 108/SC 5 の国際会議の動向

ISO の規格化では、規格化文案の投票コメントの検討と反映、次の規格の検討などを行う場として国際会議が重要な役割を果たす。SC 5 では 1994 年に第 1 回国際会議が開催され、それ以降 2019 年までで第 23 回を数える。開催年度と開催地を表 3 に示す。第 24 回の国際会議は当初は 2020 年 9 月にニューヨークで開催予定であったが、同年 3 月以降の全世界的な新型コロナウイルスの影響で相互の海外渡航が禁止されたため初めて延期（その後中止）となり、約 1.5 年後の 2022 年 5 月に初のオンライン会議として開催された。そして、2023 年度は、新型コロナウイルス感染症が収束しつつあることから 4 年ぶりに対面開催で、日本が開催国となり京都で開催予定である。

表2 SC 5 に設置されていた作業グループ¹⁾²⁾

WG	技術分野	
AG A	Vibration condition monitoring procedures and instrumentation used for the purposes of diagnostics	診断のための振動状態監視手順と装置
WG 1	Terminology	用語
WG 2	Data interpretation and diagnostics techniques	データの解釈と診断技術
WG 3	Performance monitoring and diagnostics	パフォーマンス(性能)の監視と診断
WG 4	Tribology-based monitoring and diagnostics	トライボロジーに基づく監視と診断
WG 5	Prognostics	予測
JWG 6	Formats and methods for communicating, presenting and displaying relevant information and data	関連する情報及びデータの通信, 提示, 表示のためのフォーマットと方法
WG 8	Condition monitoring and diagnostics of machines	機械の状態監視と診断
WG 10	Condition monitoring and diagnostics of electrical equipment	電気機器の状態監視・診断
WG 14	Acoustic techniques	音響技術 (アコースティック・エミッション)
WG 15	Ultrasound	超音波
これらのWG に関しては, 将来のプロジェクトや新しい作業分野の検討を意図した討議を行うための項目は各年の会議に含まれ, 活動の再開も含めて継続的に検討される。		

表3 SC 5 国際会議の一覧表¹⁾

第1回	1994年	Swansea	UK
第2回	1995年	London	UK
第3回	1996年	Sydney	AU
第4回	1997年	Berlin	DE
第5回	1998年	Tasmania	AU
第6回	1999年	Copenhagen	DK
第7回	2000年	Nanjing	CN
第8回	2001年	Vienna	AS
第9回	2002年	Minden,NV	USA
第10回	2003年	Paris	FR
第11回	2004年	London	UK
第12回	2005年	Dania Beach,FL	USA
第13回	2007年	Prague	CZ
第14回	2008年	Kyoto	JP
第15回	2009年	Copenhagen	DK
第16回	2010年	London	UK
第17回	2011年	Sydney	AU
第18回	2013年	Berlin	DE
第19回	2014年	Paris	FR
第20回	2016年	Sydney	AU
第21回	2017年	London	UK
第22回	2018年	Helsinki	FI
第23回	2019年	Copenhagen	DK
第24回	2022年	オンライン	
第25回	2023年	Kyoto(開催予定)	JP

2.4 ISO TC 108/SC 5 の活動状況と展望

最新の SC 5 活動は ISO Web サイト²⁾ で見ることができ。現議長は第 4 代目で L. Hitchcock 氏 (SA) であり, 幹事は A. Rashid 氏 (SA) である。また, 2022 年 9 月時点では P メンバー (Participation member) は 23 か国・地域で, O メンバー (Observer member) は 12 か国・地域である。

2022 年 9 月時点の SC 5 規格の検討状況を図 1 に示す。SC 5 では現時点で 28 件の国際規格を発行しており, 制定・改定中のものは 5 件である。

発行規格: 37		うちSC5: 28制定		・開発, 改定中: 5		ISO/TC108/SC5国内委員会 2022-9-26	
概観		診断技術		適用詳細		データ管理	
ISO 17359:2018 熱画像	ISO 13371:2012 再 査	ISO 13371-1:2002 振動診断(一般手法)	ISO 14830-1:2019 潤滑油(一般指針)	ISO 16887:2004 構造物の診断	ISO 19960:2005 ガス欠・エア漏れ漏洩	ISO 13374-1:2003 処理表示 - 一般指針	ISO 13374-2:2007 処理表示 - データ管理
状態監視技術者(CME)訓練および認証		ISO 13372:2019 振動診断(熱画像表示)	ISO 18995:2018 超音波診断技術	ISO 19283:2020 水素脆化試験(一般指針)	ISO 13374-3:2012 処理表示 - データ管理	ISO 13374-4:2015 処理表示 - データ管理	
ISO 18156-1:2021 認証機関への要求事項	ISO 18436-7:2014 CME認証(熱画像)	ISO 13373-3:2013 振動診断(超音波技術)	ISO 18128:2013 音響診断(音波)	ISO 19283:2020 水素脆化試験(一般指針)	ISO 13374-5:2012 処理表示 - データ管理		
ISO 18436-2:2014 CME認証(振動)	ISO 18436-8:2013 CME認証(超音波)	ISO 13374-4:2021 熱画像診断(一般指針)	ISO 18434-1:2008 熱画像診断(一般指針)	ISO 19283:2020 水素脆化試験(一般指針)	ISO 13374-6:2012 処理表示 - データ管理		
ISO 18436-3:2012 潤滑油分析の要求事項	PWI 18436-9 CME認証(光学顕微鏡)	ISO 13373-5:2020 超音波診断(超音波)	ISO 18434-2:2019 熱画像診断(超音波)		ISO 13374-7:2012 処理表示 - データ管理		
ISO 18156-4:2014 CME認証(熱画像)	PWI 18156-10 状態監視管理	ISO 13373-7:2017 超音波診断(超音波)	ISO 20958:2012 超音波診断(超音波)		ISO 13374-8:2015 処理表示 - データ管理		
ISO 18436-5:2012 CME認証(超音波)	PWI 18436-11 状態監視管理	ISO 13373-9:2017 振動診断(モーダル)	ISO 22096:2007 A E 診断(一般指針)				
ISO 18156-6:2021 CME認証(AE)	ISO 13379-2:2015 診断技術(一般指針)	ISO 13373-10:2018 超音波診断(超音波)	PWI 13385-1 六ヶヶヶヶヶヶ				
	ISO 13381-1:2015 予測技術(一般指針)	ISO 13379-1:2015 診断技術(一般指針)	ISO 13379-3:2015 診断技術(一般指針)				
		状態監視 マネジメント	PWI 18255 機械システムの 状態監視マネジメント				

図 1 2022 年 9 月現在の規格化活動状況

SC 5 は「状態監視と診断」というキーワードで始まり、1994 年から 2011 年ころまではその背景・ニーズ・目的として認識するものを欧米各国と日本とでほぼ共有しながら規格化作業が進められてきた。しかし、2012 年ころから欧米各国の SC 5 委員が認識し主張する「状態監視と診断」の背景・ニーズ・目的は、従来のものを残しつつ少しずつ広がりを見せていた。彼らはかなり以前から、技術者と経営者の中間において資産管理的な観点から活用されるべき「状態監視と診断」規格の必要性和価値を見出していたようである。そして、SC 5 の基礎技術に関する規格化が一巡したのを受け、それらの新しい「状態監視と診断」規格への動きが SC 5 の活動に現れ始めたということである。

2022 年 9 月時点の SC 5 では、表 1 に示したように訓練及び認証 WG 7、熱画像 WG 11、風車 WG 16 と応用技術 WG 17、そして資産管理 WG 18 が活動中である。前節でも述べたが基礎技術に関する WG (現状では WG11) は基本的に規格化を終えて解散していく方向であり、今後の SC 5 の活動は大きく 2 つの方向、すなわち応用技術 (WG 16,17) と資産管理 (WG 18) に向いている。特に現 SC 5 議長は前述の背景から後者への方向性を強く示しており、現在、SC 5 は IEC TC 56 Dependability, ISO/TC 251 Asset management と相方向でリエンジニアリングを持つなど、その傾向が過去 3 回の国際会議でははっきりと現れている。今後 WG18 が当面の SC 5 活動の中心となるであろう。しかし、アセットマネジメントの大元 ISO 規格である 55000 シリーズに対しては、TC 108/SC 5 の提案している機械システムのアセットマネジメントはまだまだ相互理解・認識まで至っておらず、TC 108/SC 5 としても機械システムの状態監視マネジメントのあり方をまだ定めきれていない感も否めない状況である。

国内においても機械システムのアセットマネジメントへのニーズ、期待はすでに高まりつつあり、この SC 5/WG 18 の活動への興味が急速に増していることを実感している。しかし一方で、ISO/TC 108/SC 5 国内委員会ではそ

のような資産管理的な観点の「状態監視と診断」の背景・ニーズ・目的の広がりについての認識はまだ十分に共有できていない。資産管理 (WG 18) における複数の ISO 規格の検討開始が第 23 回国際会議 (コペンハーゲン) で承認され、第 25 回の京都会議でも検討がなされるであろう。しかし、上記の理由から現在の ISO/TC 108/SC 5 国内委員会ではこれらの規格化に対して十分に対応できないことが想定される。その対応として ISO/TC 108/SC 5 国内委員会は最近、日本アセットマネジメント協会と交流を開始しつつあり、まずは委員会活動の相互参加を始めようとしている。また、必要であれば資産管理の専門家をメンバーに加えるか、あるいは ISO/TC 108/SC 5 国内委員会の体制の再構築を行うことを検討している。国内の関連企業の専門家で機械システムの状態監視アセットマネジメントに興味を持たれる方々が ISO/TC 108/SC 5 国内委員会あるいは国際会議に参加し、ぜひ意見をを出していただくことを期待したい。

3. 技術者認証事業と講習会¹⁾

3.1 機械状態監視資格認証事業

世界的に共通でかつ客観的な個人の技術力評価のために、ISO/TC 108/SC 5/WG 7 で作成した ISO 18436 シリーズ (機械の状態監視と診断技術者の認証) に基づいて機械の状態監視診断技術者の認証が行われている¹⁾。日本では現在までに、振動、トライボロジーとサーモグラフィの認証が実施されている。

まず最初に ISO 18436-2 (振動) が 2003 年に発行された。その後、ISO 18436 規格シリーズは順調に、ISO 18436-4 (現場での潤滑油分析), ISO 18436-6 (アコースティック・エミッション) と ISO 18436-7 (サーモグラフィ) が発行され、2012 年に ISO 18436-5 (分析室での潤滑油分析), 2013 年に ISO 18436-8 (超音波) が発行されている。特筆すべき点としては、ISO 18436-2 (振動) は全体をカテゴリ I から IV (カテゴリ IV は技術士、工学博士相当レベルと認識されている) に分けたのに対し、その他の全分野では全体をカテゴリ I から III に分けたことである。なお、全体のカテゴリの見やすさ、わかりやすさの点から振動をカテゴリ I から III に再定義することが SC 5 国際会議にて時折提案され検討されているが、すでに 20 年近く実施している実績を持つ国が反対し、当初のカテゴリ制が維持されている。

機械状態監視診断技術者 (振動) 資格認証制度は日本機械学会 (JSME³⁾) により 2004 年 6 月から実施されており、2022 年 8 月の第 37 回試験までに合計 5 472 人もの資格認証者を輩出している。カテゴリ I~III はそれぞれ、819 人、4 557 人と 434 人であり、平均して毎回ほぼ 10 人、100 人、20-30 人が認証を受けている。また、

工学博士・技術士レベルと同等の実力を示すものと位置づけられているカテゴリⅣに対してもこれまで41人が認証を受けており、日本の振動技術に携わっている技術者のレベルの高さが示されている。グローバルに活躍する技術者を目指す方はぜひカテゴリⅢ、Ⅳにチャレンジされたい。

機械状態監視診断技術者（トライボロジー）資格認証制度は2009年度からJSME³⁾と日本トライボロジー学会（JAST）の両学会による共同認証でカテゴリⅠ～Ⅲについて実施され、2022年9月時点で合計1421名（カテゴリⅠ～Ⅲはそれぞれ1176人、234人と11人）が認証を受けている。

機械状態監視診断技術者（サーモグラフィ）資格試験は、2016年度から日本非破壊検査協会（JSNDI）によりカテゴリⅠが、2018年度よりカテゴリⅢについて実施され、2022年9月時点で合計206名（カテゴリ別ではⅠ、Ⅱで173名と33名）が合格している。

なお、JSNDI（CM技術者認証事業本部）とJSME（機械状態監視資格認証事業委員会）は状態監視の認証事業において協力関係を構築している⁴⁾。例えば、JSMEは「状態監視振動診断技術者コミュニティ」のミーティングを主催し、状態監視に関する情報発信及び資格者の交流の場をJSNDIのCM技術者資格者・関係者も含めて設けるなど、相互の連携が図られている⁴⁾。

3.2 状態監視と診断技術に関する講習会

ISO/TC 108/SC 5 国内委員会として、機械システムの状態監視と診断の啓蒙と活動の紹介のために、「講習会：グローバル技術者必須!!機械の状態監視と診断技術，基礎・実践ノウハウと応用例・規格」を企画し、開催している（JSME主催）。内容としては、SC5規格の紹介と状態監視に関する技術者認証の紹介、振動を用いた診断、潤滑油分析、熱画像解析、アコースティック・エミッション（AE）の基礎技術に関する紹介、大型回転機械の診断、風車の診断（主に軸受）、電流兆候診断（2019年から追加）、総合診断（2021年から追加）である。第1回が2007年10月東京開催（30名参加）、第2回が2007年10月大阪開催（15名参加）であった。上記の2回から少し期間をおき、第3回を2016年9月（29名参加）、第4回を2018年9月（44名参加）、第5回を2019年9月（53名参加）にそれぞれ東京で開催した。

この第5回の際の内容を基に図書「機械システムの状態監視と診断技術」（井上・兵藤編著、日本機械学会編、コロナ社）⁵⁾を執筆し、2021年6月に出版している。そして、同図書をテキストとして第6回講習会を2021年11月（150名参加）オンラインで開催した。2022年度は同講習会を拡張し、11月に初心者向けと初中級者向けに分けて2週にかけて実施している。同講習会は直近の

3回は満席・満員であり、IoT時代の到来とともに同分野技術へのニーズ・関心の高まりが確認された。今後も継続的に講習会や図書の執筆を通して、同分野の啓蒙とISO/TC 108/SC 5 国内委員会の活動紹介を行っていくので、講習会や書籍・出版物を通して同分野の技術の基礎を習得いただければ幸いである。

4. 状態監視とアセットマネジメント⁶⁾⁻¹⁴⁾

4.1 欧州：IoTとアセットマネジメントの動向

2010年代にIoTやIndustry 4.0が提唱されて10年が経過し、これらの言葉や概念は広く普及した。そして、欧米では同技術は設備診断、アセットマネジメントと深く融合し、進化を遂げている。川合は今年、欧州における設備診断とIoTについて下記のように日本と対比しつつまとめている⁶⁾。すなわち、日本では設備から得られるデータを1工場、1企業内で利用することに主眼を置いた議論が先行しがちであるが、欧州では、欧州統合データ基盤プロジェクト「GAIA-X（ガイア・エックス）」を代表として、データの戦略的有用性を認識して企業のさまざまなクラウドサービスを単一のシステム上で統合し、業界をまたぐデータ交換を容易に行える標準的な認証の仕組みを通じてインターオペラビリティ（相互運用性）を実現すること（データ経済圏）に主眼があると説明している。

今後のメーカーは顧客へのサービス提供（サービタイゼーション）モデルへと進化していき、顧客の利用環境は自社製品だけではなく他社製品を交えた複雑なシステム環境となるのがグローバルに進んでいくと予想される⁸⁾。このような流れは日本も例外ではないであろう。その結果としては、メーカーがユーザーの利用環境のライフサイクル全体をマネジメントしてサービスを提供することが要求されていき、そのために競合他社を含むユーザーの利用環境全体から発生するデータを収集する必要性が生じると予想している。特にこれまで可視化されていなかった運用・保守フェーズのデータを共有し活用することは、新たなそして重要な研究開発分野となり、ユーザーを巻き込んだデータ連携が今後重要となることは明らかであると述べている⁸⁾。

シーメンスが産業現場から大量の機械データを収集して一元化するインダストリアルIoT（IIoT）についてまとめたレポート「製造業へのIoT（モノのインターネット）導入」⁶⁾⁹⁾にも少し触れてみる。図2に、メーカーが事業への付加価値とROI（投資利益率）を最大限に高めるために実装できる主要なユースケースを示す。IIoTの成熟度について6つに分けてモデル化しており、比較的手をつけやすい基本的な部分から導入し、その後少しずつ拡張を重ねながらより大きな価値を実現していくことを推奨している。その最初のアセットマネジメントとアセットメンテナンスとして、具体的に、状態監視、資産パフォーマンス管理、そして予知保全が挙げら

れていることが興味深い。ここでは、それらについて概観する。

アセットマネジメントの状態監視では集中型のIoTシステムで特定パラメータ（温度、振動、圧力など）と重要業績評価指標（KPI）を監視し、接続されたすべてのアセットの運転状態を追跡し、問題発生時にそのアセットに障害が発生する前に是正措置を講じて、重要なアセットのアップタイムを最大化する。このように、状態監視により世界各地の拠点のアセットの健全性とパフォーマンスの透明性を確保する。

資産パフォーマンス管理では、KPIを使って機械の状態やステータスを監視・追跡し、効率性と生産性を十分に発揮していない機械を特定する。またIoTを利用した資産パフォーマンス管理アプリケーションが、最適な運転状態から逸脱した生産ラインに変更を加えてパフォーマンスを向上させる。このようにして生産を加速し、リソース割当て、市場投入期間、顧客満足度の面でもプラスの波及効果が現れる。また、KPIを都度微調整して機械のパフォーマンスをより正確に見きわめ、リアルタイム・データに基づいて機械を継続的に調整し、パフォーマンスの改善を図る。このようにして資産パフォーマンス管理により総合設備効率や企業収益の改善を図る。

アセットメンテナンスの予知保全では、機械の健全性データとパフォーマンス・データを動的に収集して分析する。そして、主要なしきい値に達したパーツを見極め、保守や交換が必要な時期を判断し、必要なタイミングでのみ保守作業を行うことで定期保全を不要とし、予定外の保守を従来から大幅に削減する。結果として予知保全により予定外のダウンタイムを削減でき、保守コストの低下、品質および生産性、資産のアップタイム、稼働率、生産量の向上、機械の長寿命化を達成できる。その他の項目を含め、興味がある方、詳しく知りたい方は同レポートを参照されたい。



図2 シエメンズ・デジタル成熟度モデル⁶⁾⁹⁾

川合は、状態監視と診断分野の伝統的な国際会議COMADEM（Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management）¹⁰⁾に参加した際の印象として、アジア系の研究者は個別の診断技術に関する発表が多いのに対し、欧米系の研究者はアセットマネジメントに関する発表が多かったと述べている⁶⁾。これは、欧米では、異常を診断しての設備管理と併せて、そのために必要とな

る診断機器の導入や診断実施のコストを考慮し、それらのデータに基づいて経営的にいかにコストダウンを実現するかについて研究対象がすでに広がっていることを示している。この指摘は著者自身がISO/TC 108/SC 5の規格化活動で経験し実感している欧米エキスパートの思考の傾向と一致している。このグローバルな流れを日本の技術者・研究者も早期に意識し、適切に対応していく必要がある。

4.2 日本における動向：経営に資する戦略的保全マネジメントシステム MOSMS¹¹⁾⁻¹⁴⁾

日本においては、日本プラントメンテナンス協会が設備管理に継続的・積極的に取り組んできている。図3に同協会紹介資料¹¹⁾から日本における設備管理の歴史を示す。設備管理技術は拡大する一途であり、それらを統合してアセットマネジメントも組み込んだMOSMSが始まった背景・経緯が窺える。

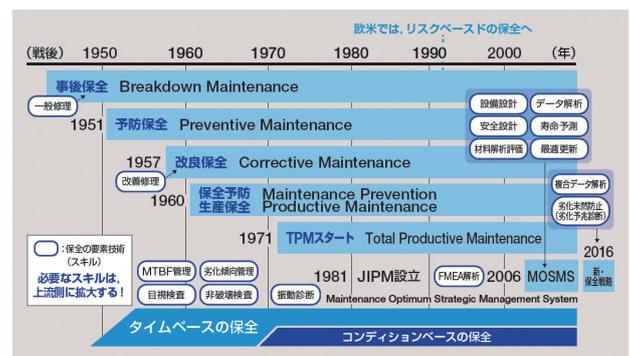


図3 日本における設備管理の歴史¹¹⁾

■ 推計従業員数の推移（製造部門・保全部門、千人）



図4 製造部門と保全部門の従業員数の推移¹¹⁾

図4に製造部門と保全部門の従業員数の推移¹¹⁾を示す。最近では新規設備の導入が減少し、代わりに既存設備をいかに保全して運用するかという方向性が強まっていることがこの結果からも窺え、保全の時代と言える。

そのような傾向の中、同協会が2006年に、ロス（発生している現象）とリスク（今後発生するかもしれない可

能性)への対処を一貫した概念としてとらえ、経営論と技術論をマッチングさせた保全体制を構築するために提唱され開始したものが「経営に資する戦略的保全マネジメントシステム」(Maintenance Optimum Strategic Management System, MOSMS)である¹²⁾¹³⁾。本システムは望ましい経営のPDCAサイクルと保全のPDCAサイクルの関係を明らかにしており(図5)、とくに保全が経営と一体化するためには経営的に合理性のある計画が作られ、その計画主導で保全が実行されること(保全マネジメント)が重要であることが強調されている¹³⁾。そのためには、経営と保全が同じ土俵に立ち、保全ブランドデザイン(経営的視点での全体最適のメリットがある保全計画を作る仕組み)が必要である。MOSMSはまさにこの仕組みとして“日本発”で構築されたものである。

MOSMSではロス・リスク分類としてP(生産性)、Q(品質)、C(コスト)、D(納期)、S(安全)、M(モチベーション)、E(環境)を挙げており、設備管理の結果としてこれらのロス・リスクの最小化を目指している。ターゲットはミドルクラス(マネージャー層)であり、前節で述べたISO/TC 108/SC 5/WG 18のアセットマネジメントのターゲット層と同一である。そして、経営と保全の連動を図るために、図5に示すように経営PDCAサイクルのP(プラン)にロス・リスクマネジメントと設備保全戦略を組み込み、経営PDCAサイクルのD(実行)とMOSMSのPDCAサイクルのP(プラン)を相互に連携させ、さらに両者のPDCAサイクルのC(チェック)とA(改善)を相互評価で連携させている¹⁴⁾。そのようにして、リスクとコストのバランスを目指す「保全経営」と継続的に向上する技術を用いた「計画保全」の連携を目指している。

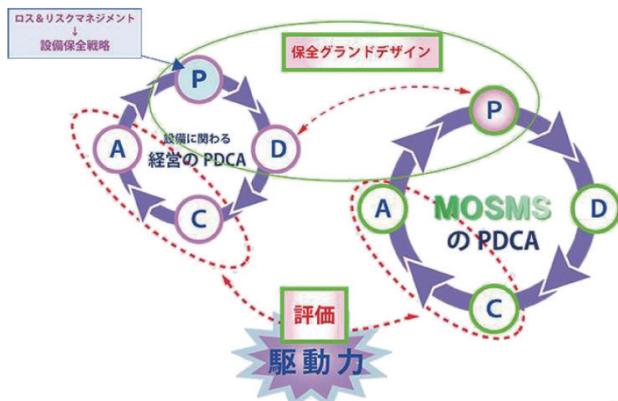


図5 MOSMSによる経営と保全の連動¹⁴⁾

5. 風力発電の現状と状態監視と診断の動向¹⁵⁾⁻²¹⁾

状態監視と診断の対象として主要なシステムの1つである風力発電システムを取り上げ、その動向を概観する。

5.1 風力発電事業の動向¹⁵⁾¹⁶⁾

アクセンチュアが今年度まとめて報告している資料¹⁵⁾¹⁶⁾から紹介する。この10年間で、陸上および洋上風力発電の均等化発電原価(Levelised Cost of Electricity, LCOE)を低減するための取り組みが拡大、活発化し、風力発電業界にデジタル革命をもたらした。世界全体の陸上風力発電の発電容量は2010年の178GWが2019年には594GWとなり、この10年間で大幅に増加した。洋上風力発電も急速に成長しており、2019年には世界全体の発電容量が29GWに達した。世界の洋上風力発電容量と短期成長率予測を図6に示す。電力市場では洋上風力発電への投資が活発化しており、現在はまだ世界の風力発電容量の5%程度だが、プロジェクト規模も成長率も大きい洋上風力発電の発電容量は今後5年間で3倍近く増加するとの予測もある。

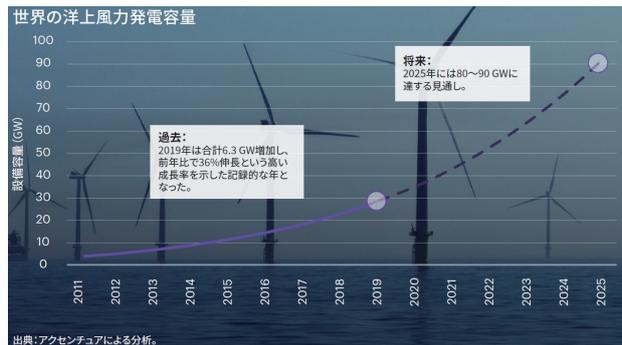


図6 世界の洋上風力発電容量と短期成長率予測¹⁵⁾

5.2 風力発電の状態監視と診断¹⁵⁾¹⁶⁾

風力発電事業では、これまではタービンの大型化(英国では10年で2MWから12MWへ¹⁶⁾)、MW当たりの設備投資の削減、そして設備利用率の向上(英国では30%から40%超へ¹⁶⁾)によってLCOE改善がなされてきた。それに伴い、風力発電所のLCOEに占める運転保守(Operation & Maintenance, O&M)費用の割合が相対的に徐々に増加し、現在はライフサイクルコストの3分の1を超えている。そのため、最近ではO&Mプロセスに対する生産性の向上とコスト削減を実現することへの関心が高まっており、その成功を左右する主要な決定要因のひとつがデジタル技術であると認識されている。アクセンチュアは、陸上および洋上風力発電の主要企業11社を対象とした調査を実施し、6つの主要なO&Mユースケースを特定している。これらの6つの主要なO&Mユースケースのプロセス改善に、高度なデジタルツールがどれくらい影響を与えるかの調査結果を図7に示す。

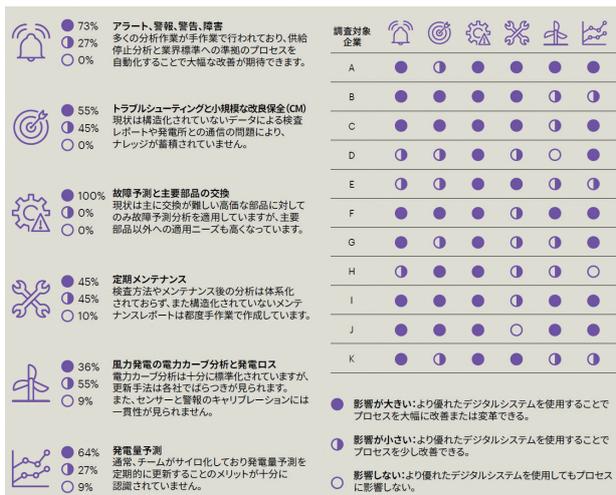


図 7 高度なデジタル技術が主要な O&M ユースケースに与える影響度合いと調査対象企業の評価の内訳¹⁵⁾

この 6 つの主要な O&M ユースケースのうち 3 つが状態監視と関係している。そして、これらの 3 つに対する高度なデジタルツール適用による改善への期待は非常に高いとしている。以下では、これらのうちの 3 つについて個別に概要を述べてみる。

- ・アラート、警報、警告、障害：警報や障害のタイプを分析して、機器の状態分析、作業の優先順位付けなどのトレンドとパターンを把握し、応答時間に関するガイドラインに反映して発電量とコストの損失を最小限に抑える。制御室は警報や警告を監視し対応を決定、性能技術チームは警報と障害の原因と関連性を掌握、そしてアセット管理チームと O&M チームはフォローアップアクションを特定して対応の優先順位を決定する。
- ・トラブルシューティングと小規模な改良保全 (CM)：ダウンタイム低減と発電量の増加のため、インシデントをリモートまたはオンサイトで調査し、修理を行うプロセス。運用チームが、発電所の性能を監視して通知されたインシデントをリモートで調査し、作業指示に基づきフィールド検査の調整とその後のアクティビティを処理。
- ・故障予測と主要部品の交換：状態監視ツールとアルゴリズムを使用し、事前に指定した期間内の主要部品の故障リスクを把握。最適なタイミングの主要部品交換プロセスを確立し、ダウンタイムとメンテナンス活動を減らし、結果としてコスト削減と発電量増加を達成。

さらに本調査では上記を改めて総合的に分析し、O&M におけるデジタル技術の現在の役割、可能性、課題に関連する下記の重要な所見を明らかにしている¹⁵⁾¹⁶⁾。

- ・ほとんどの調査対象企業は、故障予測、アラートや警報、トラブルシューティングにおいてデジタル技術が重要な役割を果たすと考えている。すべての企業が適切な力

スタムビルドソリューションを導入しており、その多くがさらなる機能を開発したいと考えている。その点で、サードパーティ企業には、発電事業者が現在の環境でも実践可能な O&M のインサイトのサービス提供というビジネスチャンスが生まれている。

- ・O&M プロセス全体において、あらゆるデータを統合することで分析に豊富なコンテキストが加わって付加価値を生み出すことができる。しかし現状は、データの品質が低く、データエンジニアリングスキルも不足しているため、実現している企業はほとんどない。
- ・多くの企業が O&M プロセス改善のために、警報応答やサービス記録などの過去の活動と情報を活用した学習に意欲はある。しかし、現実にはそのための時間と簡単に扱えるデジタルツールの両方の不足により実践が難しい。
- ・データについては、オーナー、発電事業者、OEM (あるいは O&M サービス事業者) などのデータ所有者は、データとそこから導き出されるインサイトの共有に消極的である。そのため、サードパーティ企業はデータの所有権を明確に定義してソフトウェアやツールを共同で開発するためのパートナーシップモデルを検討し提供する必要がある。

今後は、上記の認識を元に高度なデジタル技術を活用し、データをうまく共有する仕組みが工夫して構築され、風力発電の O&M プロセスに対する生産性の向上とコスト削減の実現が急速かつグローバルに進められていく。その点において、状態監視と診断は重要な役割をもつ。

5.3 日本における風力発電の状態監視と診断の動向 (NEDO 報告書より)¹⁷⁾

日本においては、NEDO が数年前に風車の状態監視と診断について「風力等自然エネルギー技術研究開発、風力発電高度実用化研究開発、スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予測等)」¹⁷⁾ として研究成果をまとめて報告している。ここでは、その概要を簡単に紹介する。

図 8 に基本的な風車の機器構成例を示す。本報告書では、高効率な回転系 (ドライブトレイン、制御機器) と非回転系 (タワー等) に係るメンテナンス手法の開発に資するために、既設風車の故障事故データの収集、発生状況・要因等の分析及びメンテナンス手法の分析を行うとともに、国内外の既設風車のメンテナンス手法及び故障事故の対応策等を整理し、まとめている。

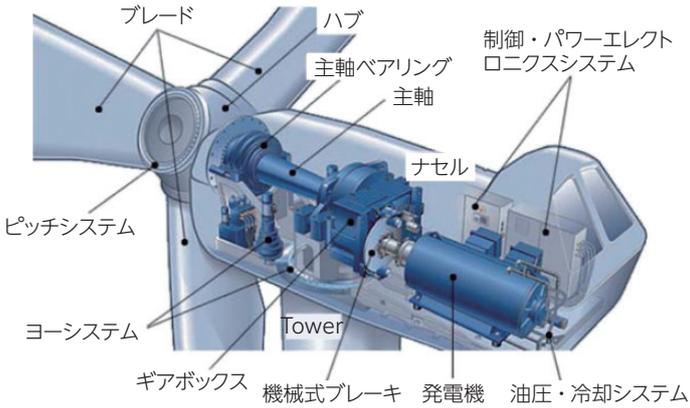


図8 風車の機器構成例¹⁷⁾

図9に調査協力風車に関する故障・事故発生率の推移(平成24年頃から調査方法が落ち着き、ほぼ一定値で推移)を示す¹⁷⁾。この結果のうちの平成28年度における故障・事故発生要因内訳を表4に示す。状態監視と診断関係の要因としては、「人的要因」の「メンテ不備」(6.1%)が比較的多い。同表を過去の調査と比べると、状態監視と診断関係「原因不明・その他」の「その他」の増加が著しい。この「その他」は主に経年劣化と報告されたものが多く、近年は同様の傾向が続いており、一定年数を経た風車の劣化による故障・事故の増加を示している。

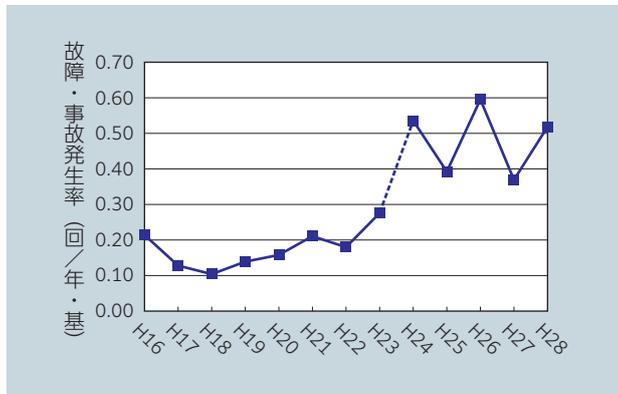


図9 風車の故障・事故発生率の推移¹⁷⁾

表4 故障・事故発生要因内訳(平成28年度)¹⁷⁾

故障事故要因	要因内訳	発生回数	構成率
自然現象	暴風	0	0.0%
	落雷	34	9.1%
	乱流	19	5.1%
	低温・凍結	0	0.0%
	浸水	7	1.9%
	その他	12	3.2%
風車内故障	設計不良	3	0.8%
	製造不良	17	4.5%
	施工不良	13	3.5%
人的要因	メンテ不備	23	6.1%
系統故障	系統故障	17	4.5%
原因不明 その他	調査中	6	1.6%
	特定できず	108	28.9%
	その他*	115	30.7%
計		374	100%

*「原因不明・その他」の「その他」はおもに「経年劣化」と報告されたもの

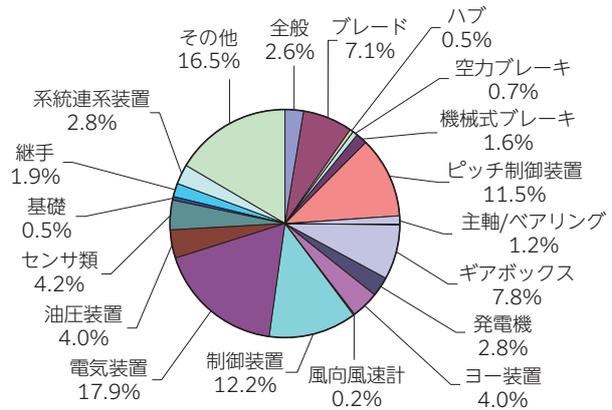


図10 風車の故障・事故発生部位別集計(平成28年度)¹⁷⁾

図10に風車の故障・事故発生部位別集計(平成28年度)を示す。「電気装置」(17.9%)、「その他」(16.5%)、「制御装置」(12.2%)、「ピッチ制御装置」(11.5%)が多い。運転期間別の評価では、「10年以上」の風車では「ブレード」「ピッチ制御装置」「ギアボックス」「制御装置」「電気装置」の故障件数の比率が相対的に高い。そして、運転期間が長いほど故障が多くなる傾向を示す部位がほとんどであった。なお、過去の調査結果では、「ピッチ制御装置」「ギアボックス」「ヨー装置」等の機械的な駆動機構を有する部位は運転期間が長いと発生件数が多くなる傾向があるのに対して、「ブレード」「発電機」「電気装置」「制御装置」では運転期間によらず故障・事故が発生する傾向があった。この理由として、前者は機械的な疲労(乱流による影響含む)

が主要因、後者は落雷に起因するものが多いことが一因と考察している。なお、この NEDO 報告書においてもデータ所有者がデータの共有に積極的ではないことについて記載されており、このような傾向は前節で述べた欧州における状況と同じである。また、世界的に風車の O&M に従事可能な技術者の深刻な不足が報告されている。

5.4 風車の状態監視技術¹⁷⁾

5.4.1 SCADA と風車 CMS

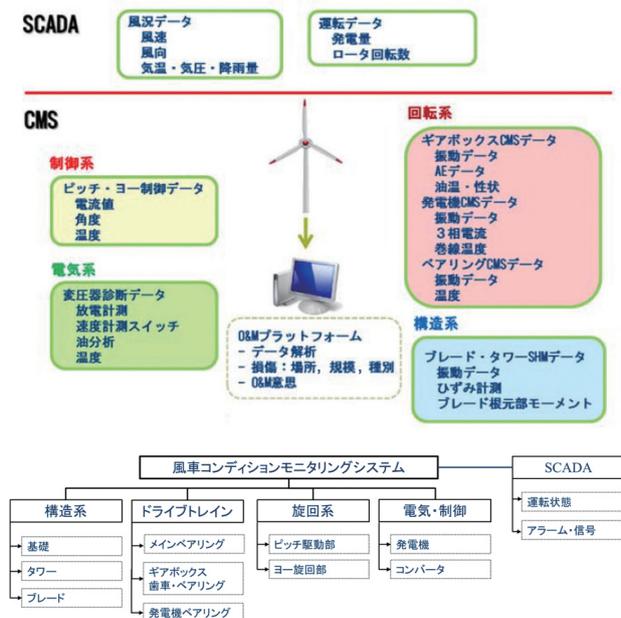


図 11 風車の SCADA と状態監視 (CMS) システム¹⁷⁾

図 11 に風車の運転・制御に関する根幹システムである SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) と状態監視 (CMS) システムを示す。実際の CMS と SCADA の関係は統合化したイメージで整理され、SCADA で得られる運転諸データは CMS で収集する各装置の動作状況のデータとともに風車コンポーネント・装置の状態の評価には欠かせない。風車の CMS の必要性として、風車の主要コンポーネントであるギアボックス、発電機及びコンバータの故障率は他産業で使用される同種・同容量のものと比較して明らかに高いと報告されている。風車では風況により出力が変動するとともに、乱流やブレードの位置・変形等の影響から荷重が常に変動する。高出力化・大型化傾向にある風車では、これら荷重変動に加え、設備コンポーネントの軽量化によって故障の発生確率の上昇や疲労を加速しうる環境にある。そのため、設備の状態 (負荷及び応答値) を常時監視して異常を早期に見出し、対応すること (状態基準保全: Condition Based Maintenance の適用)、またデジタル技術を併用して負荷変動による設備への影響を評価・予測し、運転・保守に事前の対策を講じる (余寿命評価) ことが重要である。

5.4.2 風車の CMS 技術

風車の故障モードと診断技術の対応を図 12 に示す。このように風車の CMS に適用される監視技術は既存の状態監視技術を踏襲し、展開したものであるのがほとんどである。風車 CMS の特徴は、遠方でかつ多数の風車の運転・保守管理をしなければならない点から、オンラインモニタリングの必要性が高い点である。オンラインモニタリングと診断有効性の観点から現状の風車 CMS における検知技術の対応を調査した結果を表 5 に示す。このように風車用として特殊に新たな CMS 技術の開発・適用は必要ではないが、事例が少ない中、オンラインモニタリングで適格な故障診断をすることに風車 CMS のハードルの高さがある。

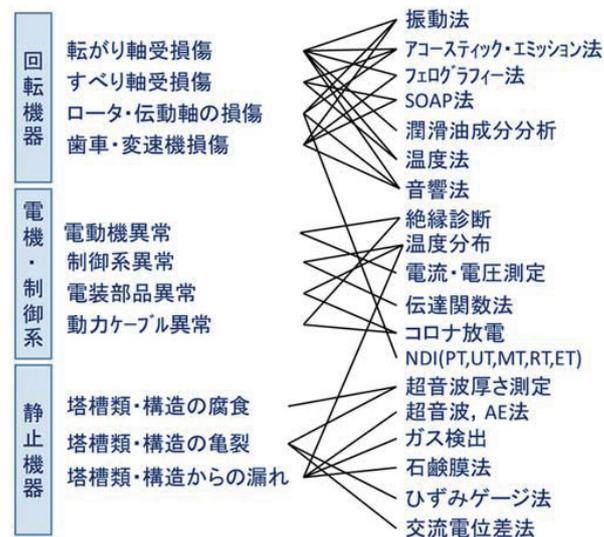


図 12 風車の CMS に用いられた一般プラントにおける故障モードと適用される状態監視技術¹⁷⁾

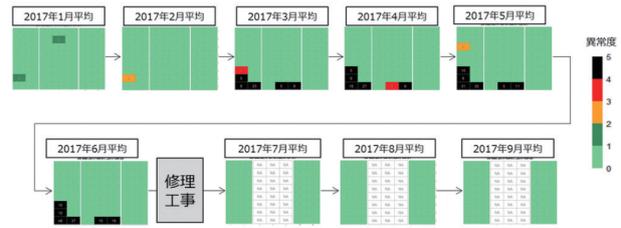
5.4.3 風車用主軸受の状態監視と予測

風車の主軸受は低速条件下で使用され、損傷に起因する振動自体が小さい。室内試験であれば極初期の損傷であっても振動レベルの変化を捉えることは可能であるが、実機風車では主軸受の重度損傷に相当するレベルの振動が周辺機器で生じており、周辺から伝達されるこの振動が主軸受の損傷検知を困難にさせている。この外乱振動を抑えることによる SN 比の向上が、主軸受の損傷検知における課題である。この課題に対して、本報告書¹⁷⁾では物理的手法である周波数帯域分割と統計的手法である機械学習アルゴリズムを高度に融合させた検出法を開発している。そして、図 13 に示すように、同手法を用いて主軸受の初期損傷を適正に検出・診断できることを実証している。

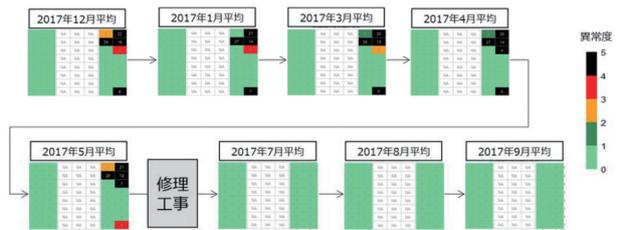
表 5 風車の異常検知技術と対象部位, 特徴¹⁷⁾

No	CM技術	コスト	オンラインCM	故障診断	実績	風車コンポーネント
1	熱電対	低	○	×	使用中	ベアリング 発電機 コンバータ ナセル 変圧器
2	パーティクルカウンタ法	低	○	×	使用中	ギアボックス ベアリング
3	振動解析	低	○	○	使用中	主軸 主軸ベアリング ギアボックス 発電機 ナセル タワー 基礎
4	超音波探査	低 to 中	○	×	試験中	タワー ブレード
5	電氣的信号 (例:放電測定)	低	○	×	使用中	発電機
6	振動音響解析	中	○	×	×	ブレード 主軸ベアリング ギアボックス 発電機
7	潤滑油成分分析法	中~高	×	○	×	ギアボックス ベアリング
8	アコースティックエミッション	高	○	×	×	ブレード 主軸ベアリング ギアボックス 発電機 タワー
9	捻り振動 (エンコーダベース)	低	○	×	試験中	主軸 ギアボックス
10	光ファイバーひずみゲージ	極高	○	×	使用中	ブレード
11	サーモグラフィー	極高	○	×	×	ブレード 主軸 主軸ベアリング ギアボックス 発電機 コンバータ ナセル 変圧器
12	軸トルク計測	極高	○	×	試験中	ブレード 主軸 主軸ベアリング
13	ショックパルス手法	低	○	×	×	ベアリング ギアボックス

同報告書¹⁷⁾ではさらに風車主軸受の余寿命予測方法の構築も試みている。そして、ウェイク（流れの中におかれた物体の下流に生じる主流よりも速度の小さな領域）の影響を反映する等価風車間距離と荷重係数との関係式を提案することにより、表 6 に示すように定格寿命を評価することが可能であることを示している。



(a) 20号機のモデルで5号機を診断した結果



(b) 5号機のモデルで4号機を診断した結果

図 13 風車の主軸受の損傷検知¹⁷⁾

表 6 定格寿命の予測と実績比較¹⁷⁾

風車	定格寿命実績(年)	等価風車間距離(km)	荷重係数	定格寿命予測値(年)
4号機	16	0.3	1.55	14
5号機	17	0.3	1.51	16
19号機	10	0.2	1.72	9
20号機	8	0.2	1.75	8

5.4.4 風車タワーの異常検知

2013年3月12日、太鼓山風力発電所3号機の風車支持物タワー頂上において、フランジ直下のタワー筒身の疲労破壊による風車ナセル落下事故が発生した。事故調査により、疲労破壊の原因は、タワー頂上フランジに設置されているタワートップボルトの損傷によるタワー筒身への応力集中であることが明らかになった。類似の事故として、2009年のスウェーデン Falkenberg で発生したブレード脱落事故、2015年12月に発生したスウェーデンの Vetlanda 市南の Lemnhult 風力発電所の事故、そして2016年10月の米国ハワイ州マウイ島南岸 Ulupalakua Ranch にある Auwahi 風力発電所における倒壊事故が挙げられており、風車における特徴的な異常発生である。なお、太鼓山風力発電所における落下事故において、事故前の定期点検では異常が検出されておらず、短期で疲労破壊に至った。この事故を受けて、早期のタワートップボルトの異常検出及び軸力評価方法が開発された¹⁷⁾。異常ボルト検出手法には多変量解析手法の一種である MT システム (Maharonobis-Taguchi) T 法 (3) が用いられた。ひずみの変化量の 2 階微分量を用いた解析結果を図 14

に示す。トルクが 680 N・m の時は閾値以上となりボルトの異常・正常を判断することができたこと、またロータ方位変化（-45°から 45°）に対しても判断の精度が確保できることが示された。

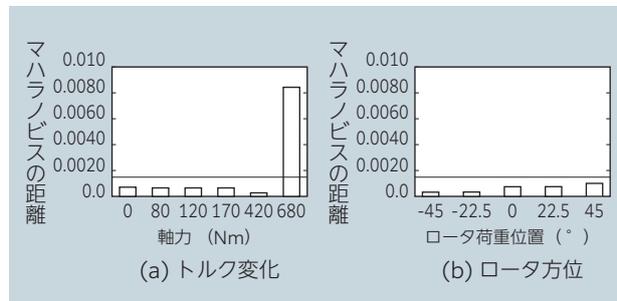


図 14 マハラノビス距離による風車タワートップボルトの早期異常検出法¹⁷⁾

5.4.5 風車 CMS の規格例¹⁷⁾¹⁸⁾

風車 CMS の規格を、GL (Germanischer Lloyd) が発行した Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines Edition 2013¹⁸⁾ を例として紹介する。風車 CMS の適用範囲・対象として、まずは主にドライブトレイン、主軸受、ギアボックス、発電機を挙げており、これに加えて、タワー、ブレード、主軸受、ギアボックスの潤滑油、基礎部等も対象としている。風力発電設備の監視データとしては、荷重（発電量またはトルク）、軸の回転数、ナセル内温度、軸受温度、発電機の巻線温度、油温および油圧等を挙げている。他に環境データとして、風速、風向、外気温等を入手可能な場合には計測することも要求している。

文献¹⁸⁾の Table4.1 では、風車 CMS のための必要センサ数が示されている。ギアボックスを備える風力発電設備のドライブトレインの振動状態監視には最低 6 つのセンサを搭載する必要があるとしている。また、要求される周波数帯域はかなり低速から広範囲であることが示されている。文献¹⁸⁾の Table4.2 には、風車 CMS で各センサより取得された信号を利用する手法一覧が示されている。周波数や振動様式、対応する異常モードに対応するために、部位ごとに様々な分析手法の適用を要求している。

6. 予知保全と IoT¹⁹⁾

ISO/TC 108/SC 5 国内委員会の委員を長年努められた迫氏が 2020 年にまとめた解説記事「予知保全の IoT 化について」から引用しつつ述べる¹⁹⁾。

6.1 予知保全 IoT システム構築のポイント

予知保全 (Predictive Maintenance) は、状態基準保全 (Condition Based Maintenance) あるいは状態監視保全 (Condition Monitoring Maintenance) とも呼ばれるものであり、診断技術を活用して設備・機器の状態を計測・監視し、その劣化程度を把握または予知し、適切なメンテナンス対応を取る保全方法である。この IoT 化のポイントとしては、

- ・異常検出を行うセンサの選定
- ・最適な信号処理方法、解析手法の選定
- ・情報収集方法の決定
- ・モニタリング方法の決定
- ・解析・診断の自動化

がある。

予知保全の IoT 化の推進のためには必要となるいくつかの開発項目がある。ここでは、その中で「設備状態の（定量値としての）見える化」を例にとって説明する。設備状態の（定量値としての）見える化を図る技術開発には、異常検出の対象設備の拡大、検出精度の向上、検出の効率化や容易化などがある。このためにはまず、監視対象の設備と異常モード、要求される予知レベル（リードタイム）、設備停止の困難さ、停止可能時期の明確化が重要となる。同時に、計測に関しても、計測位置や利用可能なセンサタイプを明確化する必要がある。

手順として、ラボテストによる異常検出が可能なセンシング方法の見極めと、同方法を用いたフィールドテストによる評価指標や良否判定のためのしきい値決定が示されている。迫らがこれまで開発した診断技術の回転機器への適用状況を表 7 に示す¹⁹⁾。広範な対象に対して網羅的に診断技術が示されている。

迫は文献¹⁹⁾でさらに、予知保全の IoT 化に向けての転がり軸受の診断技術、すべり軸受の診断技術、そして電動機電流兆候解析 (MCSA) について詳細に解説している。ここではそのうち、「転がり軸受の診断技術」を取り上げて触れてみる。

6.2 予知保全のための転がり軸受の診断技術

転がり軸受の異常からは、図 15 に示すように様々な周波数領域の振動と音響が発生する¹⁹⁾。それは、振動や AE のような構造伝搬するものと音響として空中伝搬するものに大別され、音響はさらに、可聴域音と 20 kHz を超える非可聴域音に分けられる。

6.2.1 振動法による診断¹⁹⁾

転がり軸受の異常診断に用いられる信号の 1 つは振動加速度である。これはさらに、10 k ~ 30 kHz の高周波数域と 1 k ~ 10 kHz の低周波数域の加速度に大別される。

現場における軸受の診断結果例を図 16 に示す。これは、深溝玉軸受 6310 の内輪部に隣接設備からの伝搬振動でフォールスプリネリングが発生した時の加速度スペクトルである。図 15 で高周波域加速度と示したゾーンの 14 KHz の周波数が発生しており、小さな傷でも高周波域の加速度で検出できた例である。

図 17 は軸受異常に至った 6 事例について高周波数域加速度値のトレンドを比較した結果である。正常状態の平均値を 1.0 とし、縦軸に正常値に対する倍率、横軸に状態が変化し始めた時期からの経過時間を示している。各軸受とも指数的な上昇カーブを示している。相対基準の注意 (4.0 倍) に至るまでに 3 ~ 6 カ月かかっており、異常 (8.0 倍) に至るまでには約 6 カ月を要している。各軸受ともほぼ 6 カ月以降で軸受交換を実施したところ小さなきずの発生を確認している。なお、各軸受の劣化スピードがばらついているのは、潤滑条件や軸受荷重の差異が関係していると説明されている。

この状態から劣化が進行すると、高周波域加速度の他に 2 k ~ 3 kHz の低周波域加速度スペクトルも発生するようになる。これは軸受外輪の固有振動数であり、進行した劣化に起因して起振力も大きくなり、軸受全体が加振されて固有振動数が発生すると説明されている。この低周波数域の加速度値トレンドも 4 事例について調べられており¹⁹⁾、図 17 の高周波数域と同様に指数的な上昇カーブを描き、変化を示してから約 1 ~ 3 カ月で軸受交換に至った。

さらに軸受の劣化が進むと、振動速度にまで変化が現れる。この速度値上昇が発生し軸受異常に至った 7 事例における速度値トレンドの比較も調べられており、高周波数域と同様に指数的な上昇カーブを示すがその変化は急激であると示されている。振動速度域が上昇し始めたらその約 1, 2 週間後には軸受交換を要するほどの末期的な劣化状態と言える¹⁹⁾。

このように軸受の余寿命予測は複数の周波数領域で行えるが、連続運転の停止が許されないような重要な設備では高周波数領域の加速度を用いたモニタリングが必須であろうとまとめられている。

表 7 回転機器への診断技術適用状況¹⁹⁾

機械要素	異常の種類 (例)	振動		潤滑油分析	温度	AE	音響		電流 (MCSA)	該当設備
		振動速度	振動加速度				可聴域	超音波		
中高速回転	疲労剥離	×	○	○	△	○	○	○	○	送風機、ポンプ、コンプレッサー、モーター etc.
	潤滑不良	×	○	○	○	○	○	○	○	
	摩耗	×	○	○	○	○	○	○	○	
	ゆるみ・ガタ	×	○	○	×	○	○	○	○	
	焼付き	×	○	○	○	○	○	○	○	
低速回転 (数100 rpm 以下)	疲労はく離	×	×	○	×	○	×	○		攪拌機、押出機、ロール、抄紙機 etc.
	潤滑不良	×	×	○	△	○	×	○		
	摩耗	×	×	○	×	○	×	○		
	ゆるみ・ガタ	×	×	×	×	○	×	○		
すべり軸受	焼付き	×	○:ケプストラム	○	○	△				タービン、コンプレッサー、ディーゼル機関 etc.
	ラビング	×	○:ケプストラム	○	○	△				
	疲労	×	○:ケプストラム	○	×	△				
	異物混入	×	○:ケプストラム	○	×	△				
	オイルホウール	○	×	×	×	×	×	×	×	
	オイルウィップ	○	×	×	×	×	×	×	×	
歯車	ピッチング	△	○	○	○	○	○	○	○	減速機、増速機 etc.
	スポーリング	△	○	○	○	○	○	○	○	
	スクラッチング	△	○	○	○	○	○	○	○	
	噛み合い異常	△	○	×	×	○	○	○	○	
カップリング	ミスアライメント	○	×	×	×	×	×	×	○	
ベルト	弛み	○	×	×	×	×	×	×	○	
	張り過ぎ	×	×	×	△	×	×	×	○	
羽根	アンバランス	○	×	×	×	×	×	×	○	送風機、ポンプ etc.
	旋回失速	○	×	×	×	×	×	×		送風機
	サージング	○	×	×	×	×	×	×		送風機
	キャビテーション	×	○	×	×	○	○		○	ポンプ
	接触	×	○:ケプストラム	×	×	○	○	○	×	スクリーコンプレッサー
軸	曲がり	○	×	×	×	×	×	×		
	偏心	○	×	×	×	×	×	×		
備考		・AMD 速度判定基準	・AMD 転がり軸受判定基準	・インパクターモータのノイズ除去方法	・SOAP 法、フェログラフィ法	・サーモグラフィ	・非接触計測・動点装置 (LM ガイド etc.) の適用	・振動が計測しづらい機器 (キャンドポンプ、乾流ファン etc.) の適用・電源騒音での計測		

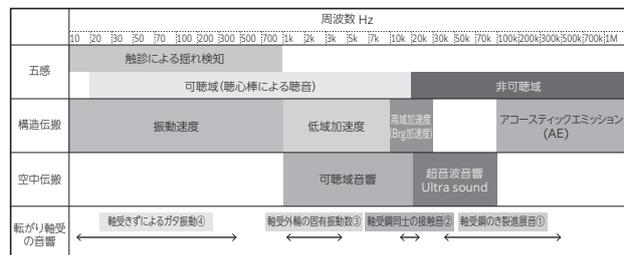


図 15 転がり軸受から発生する振動と音響¹⁹⁾

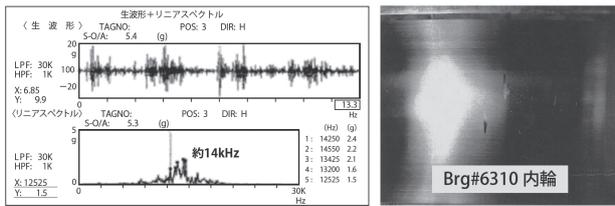


図 16 フォールスプリネリング時の加速度スペクトル¹⁹⁾

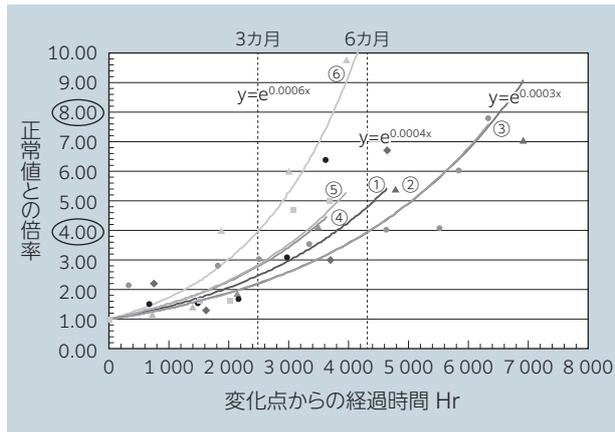


図 17 高周波数域加速度における軸受劣化カーブ¹⁹⁾

6.2.2 AE 法による診断¹⁹⁾

転がり軸受の異常早期検出としては AE 法が最も早い時期から異常を捉えることができる。回転数 750 rpm にて加速寿命試験を行ったときの結果を図 18 に示す。横軸は試験時間、縦軸は AE、振動加速度 (ACC) とともに事象率を示す。AE の方が図 17 で示した高周波数域の加速度よりも早期に転がり軸受の異常を捉えている。これは、疲労により軸受鋼の内部起点剥離から進展して軌道面の表面に剥離として現れていく中で、AE はき裂発生時期で発生するのに対し、加速度は軌道面に発生した剥離と転動体の衝突が始まってから発生しているためと説明している¹⁹⁾。油膜破断や圧痕による表面起点剥離の場合は、両者はほぼ同時に発生する。

図 19 に、剥離進展時とスリットきず時の AE スペクトルの比較を示す。剥離進展時の AE は 100 k ~ 500 kHz の周波数成分が顕著に現れているが、スリットきずでは 100 kHz 以上の成分はほとんど現れない。このように AE では早期の転がり軸受の異常モードの違いも捉えることができる。

また、AE 法は低速回転数領域でも優位性をもつ。軸受内径 d (mm) と回転数 N (rpm) の積 (dN 値) が 2.0×10^4 以下のような低速回転数領域では振動加速度の衝撃信号レベルは低下しノイズレベルに埋もれてしまうため、正常と異常の判別が一般的には困難となる。それに対し、AE 法は回転数には無関係であるため有効な計測手法である。

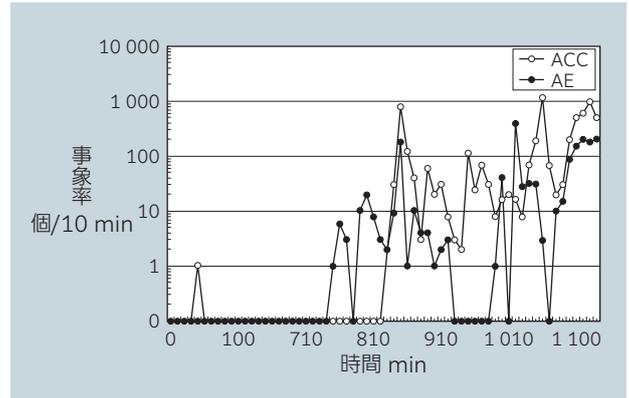


図 18 加速寿命試験結果と AE による診断¹⁹⁾

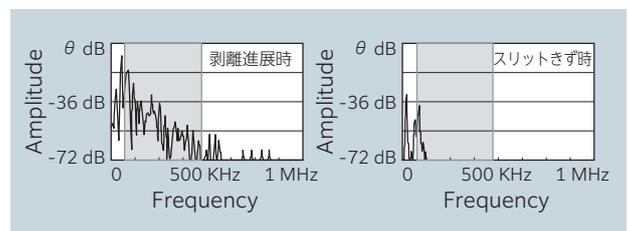


図 19 剥離進展時とスリットきず時の AE スペクトル¹⁹⁾

6.2.3 その他¹⁹⁾

AE 法では設備面とセンサ面の間接触媒質を塗布する必要があり、設置面の凹凸や曲率の影響が大きいと安定した信号が得られにくいという難点があることを指摘している。迫らは、そのような難点から従来は診断が困難であった設備への適用を目的として、超音波マイクロフォンによる非接触検出方法を開発している。そして、20 k ~ 100 kHz 超音波音響を用いることにより、回転数 65 rpm の低速回転状態においても AE 法と同様に、軸受の剥離異常を検出できることを示した。この超音波音響法の適用状況として、溶剤ガス環境であることから接触媒質が流出するため AE が使用できない状況にあるロール支持軸受の転がり疲労剥離を検出している。また、その他にも、押出機本体の接触や減速機歯車のピッチング、攪拌機の軸受ガタなど低速回転機器の異常診断にも活用されていると述べている¹⁹⁾。

7. 1DCAE を活用した状態監視と診断の動向

日本国内で長年機械の状態監視と診断に取り組んできた国内第一人者である川合が、2022 年の日本機械学会機械力学・計測制御部門ニューズレターの巻頭記事で「物理モデルを用いた設備の診断手法について—デジタルツインへの展開」²¹⁾を紹介している。ここでは同氏がこれまでに長年取り組んできた設備診断に最近 1DCAE ソフトウェアを組み込んで取り組んできた経過をまとめている。ここで、1DCAE は近年急速に普及・発展している CAE 手法・ツールおよびその設計支援の考え方の総称である²²⁾。対象の

本質を的確に捉え、見通しの良い形式でシンプルに表現でき、その評価・解析ができるため、製品開発の上流段階から適用が可能である。同資料では 1DCAE ソフトウェア（同資料では Modelica を用いている）で対象のシステムをモデル化することが設備診断にどのように役立つかを中心に説明されており、例として同氏がこれまで取り組んできたシステムおよび異常のモデル化事例（表 8）が示されている。

また、具体例として電磁ブレーキのモデルを示し、動力学、磁気回路、電気回路からなる複合的な物理現象が組み合わさった電磁ブレーキのような系でも 1DCAE ソフトウェアでは容易にモデル化できることが紹介されている（図 20）。ここでは、アーマチャの摩耗でプレートとのすきまが増加すること、その結果として現れる他の物理量への影響を多様かつ簡単にシミュレーションできることを解説している。図 21 は、同例においてすきま量が通電開始時の電流値の時間変化に与える影響を示したものであり、シミュレーションと実験結果は非常に良く一致していると述べている。このように、同氏は 1DCAE ソフトウェアでシステムおよび異常をモデル化することにより、システムに異常が起きた場合のシステムの挙動を容易に解析できると述べている。同資料は部門 Web サイトからフリーで入手可能であるので、興味がある方は見ていただきたい。

1DCAE ソフトウェアを用いた機械システムのモデリング例をいくつか示す。柏瀬ら²³⁾はコンデンサモータを対象に磁気回路法でモデル化して 1DCAE ソフトウェア（Modelica）による解析を実施している。電動機モデルと回転軸モデルを接続した連成系（図 22）によって回転軸の振動や電源の電流を関係づけた連成シミュレーションを実施し（図 23）、より詳細な電動機の診断が可能となる見込みを得ている。

さらに柏瀬らは、プラント内で多く利用されている三相誘導電動機を対象に、磁気回路法を基に固定子や回転子、エアギャップなどを構成する基本モデルを構築し、さらに回転軸との連成可能なモデルを構築している²⁴⁾。そして、電磁氣的挙動を FEM 解析と比較した検証により 1DCAE ソフトウェアを用いたモデルの妥当性を確認し、電動機診断へのシミュレーション適用に対する見込みを得たとしている。図 24 は各相の巻線電流であり、1DCAE モデル（Modelica）の脈動が大きくなっているが、全体の挙動が再現できていることが確認できたと報告している。

表 8 システムおよび異常のモデル化事例²¹⁾

対象システム	異常例
コントロールバルブ	かじり、センサーのオフセット
コンプレッサー	漏れ
コジェネシステム	効率低下、目詰まり、デブリによる熱伝達率の低下
クランクシャフト	軸受のガタ
回転軸系	ロータの不釣り合い、軸受さず、軸受のガタ
カップリング	ミスアライメント、ミスカップリング
ジャーナル軸受	摩耗およびその進展(余寿命推定)
スクリーコンプレッサー	軸受のガタ、漏れ
電磁ブレーキ	摩耗
歯車機構	歯車摩耗
3Dプリンター	冷却用のファンの故障(異常時の制御)

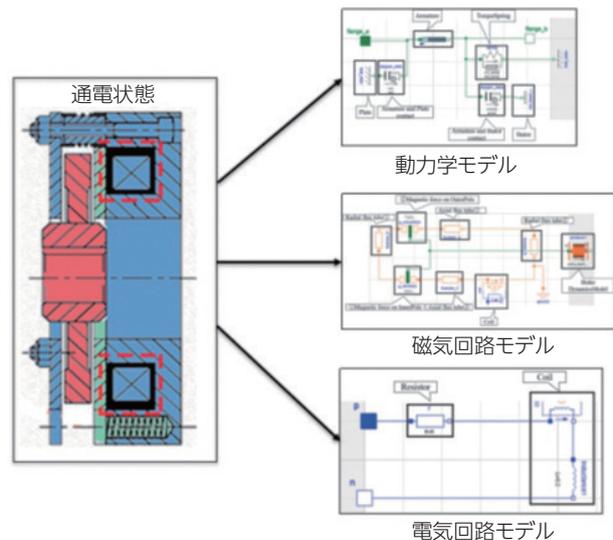


図 20 電磁ブレーキのモデル²¹⁾

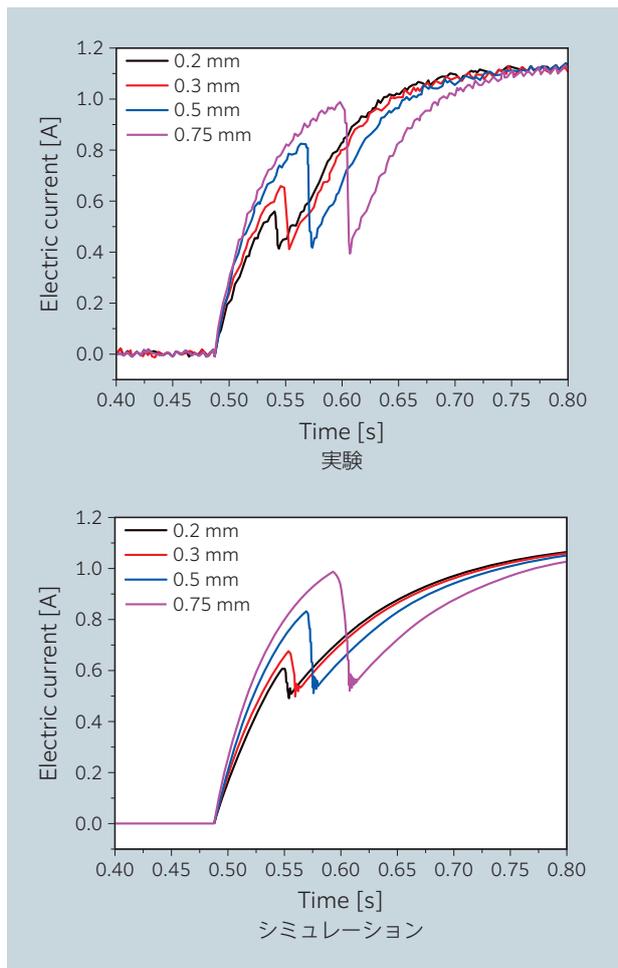


図 21 通電開始時の電流変化 (すきまの影響)²¹⁾

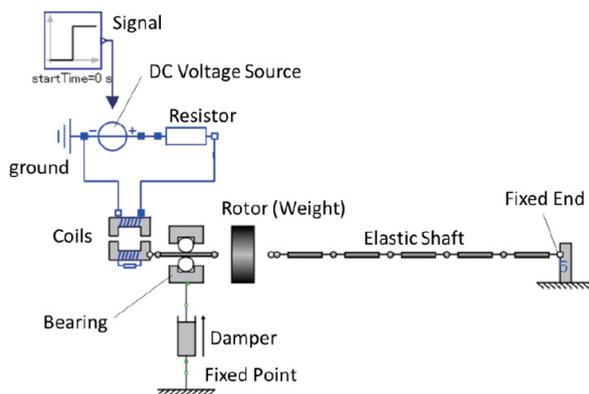


図 22 モータ・軸系の Modelica モデル²³⁾

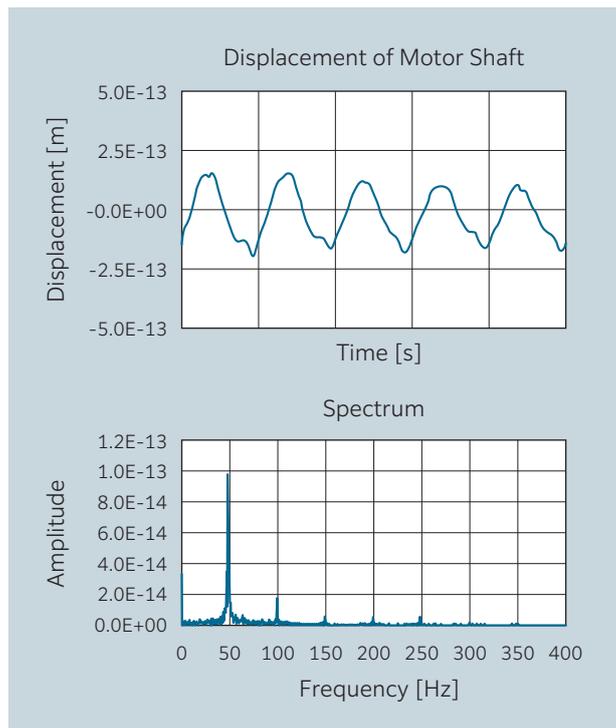


図 23 モータ・軸系の振動解析結果²³⁾

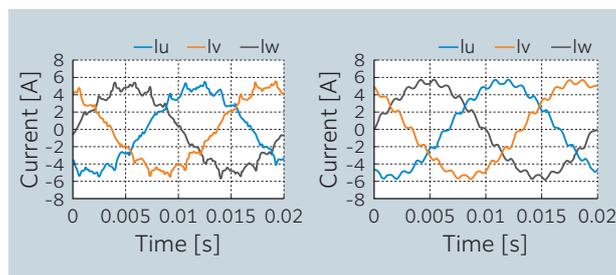


図 24 ステータ電流 (非正常) (1DCAE と FEM)²⁴⁾

他にも、代表的な動力伝達機構である歯車対および歯車の歯面摩擦を 1DCAE ソフトウェア (Modelica) でモデル化し、歯面の摩擦によって歯車対の振動特性がどのように変化するかモデルを用いて推測するとともに実機による検証を行ったもの²⁵⁾もある。

このような観点も含め、1DCAE ソフトウェアを用いた機械システムのモデリングは昨今非常に盛んに実施されている。2022 年度機械学会年次大会においても部門横断 OS が生まれ、様々な機械システムの 1DCAE モデリング成果が発表されるなど、近年盛んに活用されている。ここで挙げたように機械システムの状態監視と診断におけるモデリング手法として 1DCAE ソフトウェアの活用はさらに一層進むことが予想される。

8. 国内の軸受の状態監視と診断に関する研究動向

8.1 状態監視と診断に関する国内学術講演会

最後に、日本における同分野の研究動向を概観したい。日本においては、日本機械学会、日本非破壊検査協会、日本設備管理学会、日本トライボロジー学会などがこの分野が関係する代表的な学協会である。そして、これらの学協会が中心となって開催している学術講演会には、日本機械学会 機械力学・計測制御部門²⁰⁾の部門講演会 Dynamics and Design Conference と、日本機械学会 機械力学・計測制御部門、日本設備管理学会・日本トライボロジー学会が共催で実施している評価・診断に関するシンポジウムなどがあり、毎年多数の状態監視と診断に関する研究成果が発表されている。

以下では、これらの学会における過去 1-2 年の記事・発表論文のうち、軸受に関するものを中心に紹介する。

8.2 AI を用いた診断技術の例

軸受の異常診断に関しては、最近 AI 技術を用いた知的・自動診断技術の研究が行われ、特に高い特徴抽出能力を備えたディープラーニング（深層学習）は設備診断分野でも注目されている。日本では前田らが AI を用いた軸受診断に取り組んでおり、最近、軸受診断のために測定した振動信号から統計情報フィルタによりノイズを除去した後、振動信号のスペクトルを 2 次配列（画像情報に相当）に変換して、深層学習の 1 種である畳み込みニューラルネットワーク（CNN）により特徴抽出と状態分類を自動的に行う方法を提案している²⁶⁾。そして、様々な検証の結果、提案手法はノイズの多い環境下でも高い精度で軸受の自動診断が実現できると示している。

8.3 潤滑油膜の評価技術の例

竹田らは、潤滑油構成成分の違いが軸受寿命に与える影響について、スラスト玉軸受寿命試験機を用い、実際に試験片となるスラスト玉軸受が破損するまでの寿命時間を観測することで検証してきた。また、潤滑油膜可視化装置を用いた油膜観察では、新油と寿命試験において軸受損傷を起こした後の潤滑油の膜厚を観測することで、潤滑油の劣化が軸受の寿命に与える影響についても検証を進めてきた。そして最近、新たな油膜の評価方法の一つとして、ECR 観測回路を潤滑油膜可視化装置に取付け（図 25）、油膜状態の電気的評価・観測を行い、その観測原理と結果を報告している²⁷⁾。

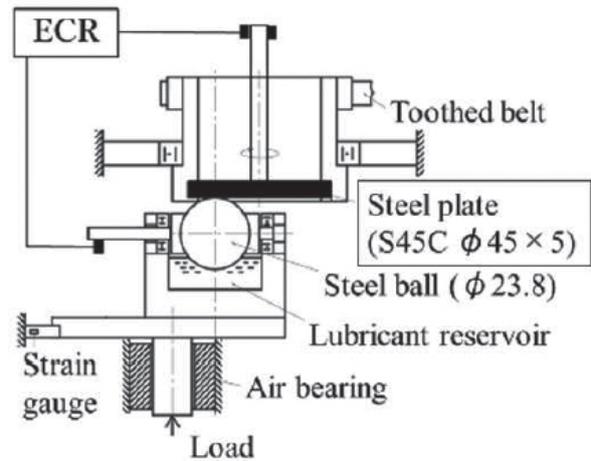


図 25 軸受の油膜状態の電気的評価・観測装置²⁷⁾

8.4 超音波・音響を用いた診断技術の例

軸受の状態監視に対する超音波エコー法について、若林らは油潤滑軸受を対象にして、超音波反射強度（Ultrasonic Reflection Intensity, URI）の時間変化に自己相関性による解析を適用した早期異常検出の検討を行い、その有用性を報告している。ここで、URI の波形が高い周期性をもつほど、軸受の転がり挙動は良好との判断になる。そして最近、グリース潤滑軸受（深溝玉軸受 6210）に対する超音波エコー法の適用性も調べ、URI の時間変化に対して自己相関性による解析を 2 回行うことで、運転中の軸受内部での転がり挙動や、実働状態における軌道面上でのグリースの排除や再補給といった挙動も検知できる可能性を示した。また、超音波エコー法によるグリース潤滑軸受の異常診断の場合にしばしば得られる信号とノイズの比（S/N 比）の低い URI における転がり挙動の周期性の抽出手法を検討し、自己相関性による複数回解析の改善手法として包括法と簡便法を考案し、それらが有効であることを明らかにしている（図 26）²⁸⁾。

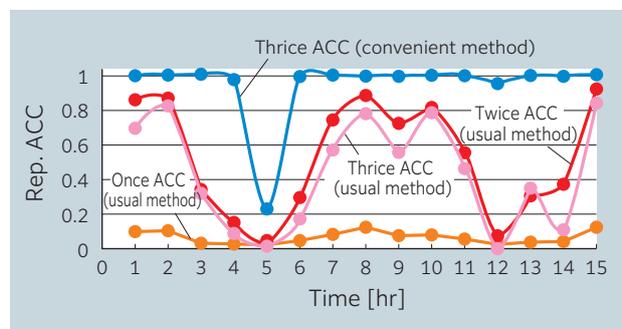


図 26 簡便法を用いた低 S/N 比の URI の解析による転がり挙動の周期性抽出の改善²⁸⁾

軸受の高精度な音響診断法のために、高田は、新しい S/N 比向上手法を提案している。そして最近、本手法を転がり軸受の損傷検知に適用してその有効性を確認した²⁹⁾。とくに一般的に診断困難とされている dN 値が低い運転条件に本手法を適用してその有効性を示している (図 27)。さらに、比較対象として適応信号処理法の一つである適応線スペクトル強調器 (Adaptive Line Enhancer) を用いた S/N 比向上手法を挙げ、比較して提案手法の有効性を示している。

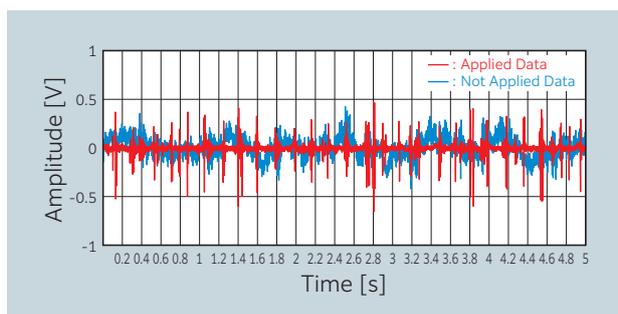


図 27 外輪損傷軸受の回転音測定値に提案手法とアンチエリアジングフィルタ (カットオフ周波数 40[kHz] のローパスフィルタ) を適用した時系列データ²⁹⁾

8.5 初期損傷過程のデータ収集技術の例

従来の軸受の診断に関する研究では予め内輪や外輪に傷をつけて行われる場合が多い。一方で実際の軸受の状態診断では、やがては故障につながるごく初期の予兆段階で異常を発見することが求められる。井上らは、この点に着目し、正常状態から損傷が発生するまでの軸受データを時間効率よく集めることを目的とし、任意の周波数の変位を回転軸に与えることができる加振機構を加えた回転装置を作成し、深溝玉軸受を故障促進の対象として加振実験を行った³⁰⁾。そして正常状態から初期欠陥が発生するまでの加速度データにより故障進展の評価を行い (図 28)、その後、切断分解検査により実際の軸受の損傷度合いを確認している。

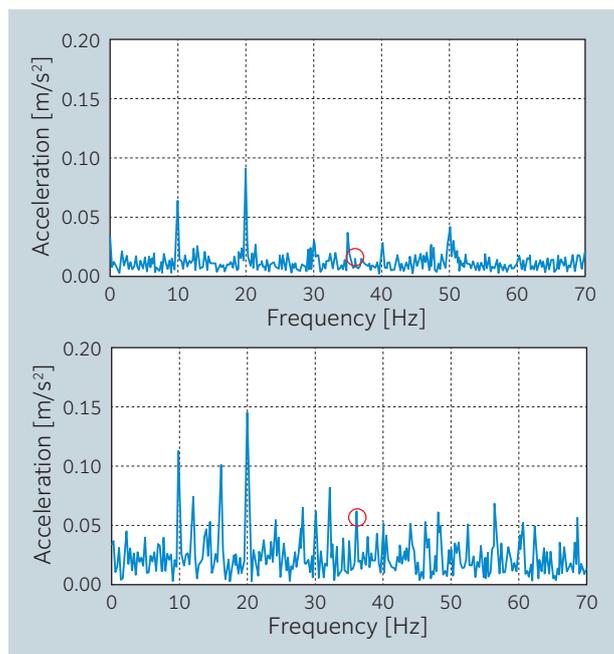


図 28 加速度信号のエンベロップスペクトル (上) 加振前、(下) 加振後³⁰⁾

9. おわりに

今回、機械システムの状態監視と診断の動向と題して、まず著者が関係している ISO/TC 108/SC 5 機械システムの状態監視と診断の最近の活動状況と動向について述べた¹⁾。もしこの内容について歴史的にさらに詳しく知りたい場合は、その時々々の TC 108/SC 5 国内委員会委員長がまとめてきた一連の文献³¹⁾⁻³⁴⁾も参照されたい。軸受の状態監視と診断に関する国際標準化は、今後も個別機械における標準化に関連して、状態監視アセットマネジメントの標準化とともに継続的・発展的に進むと予想される。今後も関係者各位のご協力をお願いしたい。

つぎに、状態監視とアセットマネジメントについて IoT とも絡めつつ国内外の状況について述べた。この分野は状態監視と診断分野で今後最もグローバルな発展が予想される分野である。そして、風力発電事業における状態監視と診断と、予知保全の IoT 化について述べた。風力発電事業は国内でも大型の浮体式洋上風車の設置が開始されるなどいよいよ本格的に発展が始まっており、その状態監視技術はデジタルツインと絡んで進められつつある。これらの分野の国内における発展を期待したい。

さらに、著者が注目する点として、上記デジタルツインを用いた状態監視技術に絡み、1DCAE による対象機械のモデル化を用いた状態監視と診断の動向を述べた。この分野も国内で盛んに研究が進められており、今後の動向に注目したい。

最後に、国内同分野の軸受の状態監視と診断に関する研究発表動向を述べた。最近の学会講演会の予稿集は極

端に短くなる傾向にあり、実際に学会に足を運んで生の発表を聞く必要がでてきている。新型コロナウイルス感染症の対策・対応により学会のオンライン化・対面とのハイブリッド化が進んでいるので、ぜひ皆様にも学会に足を運び、最新の動向調査や様々な分野の研究者・技術者との活発な交流が再開されることを願っている。

以上、著者の興味・関心がある方向で機械システムの状態監視と診断の動向を紹介したが、参考になれば幸いである。なお、本稿作成に際し、前半部分¹⁾について転載許可を頂いた日本非破壊検査協会、後半部分について情報を提供頂いた ISO/TC 108/SC 5 委員会メンバーで元(株)東芝の榎田均氏、(株)JERA の石光桂太氏、元旭化成(株)の迫孝司氏、(公社)日本プラントメンテナンス協会、そして大阪公立大の川合忠雄教授に謝意を表する。

参考文献

- 1) 井上剛志, 兵藤行志, 機械状態監視診断の ISO 規格に関する ISO/TC 108/SC 5 の経緯と現状 (状態監視診断技術の動向 特集号), 非破壊検査, Vol.69, No.9 Sep, (2020) 442-448.
- 2) ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems Web サイト, <https://www.iso.org/committee/51538.html>
- 3) 一般社団法人日本機械学会 機械状態監視資格認証事業 (振動, トライボロジー) <https://www.jsme.or.jp/jotaiweb/>
- 4) 一般社団法人日本非破壊検査協会 機械状態監視診断技術者 (サーモグラフィ) 認証制度 <http://www.jsndi.jp/qualification/index12n.html>
- 5) 井上剛志・兵藤行志編著, 日本機械学会編, 機械システムの状態監視と診断技術, コロナ社, 2021
- 6) 川合忠雄, 続々 IoT 時代における設備診断, 潤滑経済, 685 号, (2022) 26-29.
- 7) GAIA-X とは何か, GAFAM も巻き込む欧州のクラウド・データインフラ構想, Fintech Journal, SB Creative, 2021/04 <https://www.sbbt.jp/article/cont1/56622>
- 8) 「GAIA-X(ガイア-エックス)とカテナ-X の衝撃 データ連携による巨大なエコシステムの台頭」～製造業の DX: サービタイゼーション推進のために～, 野村総合研究所 コラム, 2022/07 https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727_1
- 9) Applying the Internet of Things to manufacturing 8 IoT use cases to boost ROI (製造業への IoT (モノのインターネット) 導入, ROI を向上させる 8 つの IoT ユースケース), シーメンス Web サイト <https://resources.sw.siemens.com/ja-JP/e-book-8-industrial-iiot-use-cases-for-manufacturing-2>
- 10) COMADEM (Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management) <http://www.comadem.com/>
- 11) 日本プラントメンテナンス協会 協会案内資料
- 12) 戦略的保全マネジメントシステム (MOSMS), 日本プラントメンテナンス協会 <https://www.jipm.or.jp/report/?ca=1>
- 13) 経営のための保全学, 日本プラントメンテナンス協会
- 14) 「現場力」と「保全経営力」のハイブリッド, MOSMS [MOSMS] の活用, 日本プラントメンテナンス協会, 2008
- 15) 風力発電事業におけるデジタル技術活用調査, 英国 The Offshore Renewable Energy(ORE) との共同調査, アクセンチュア and ORE カタパルト https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-151/Accenture-210164-ORE-WindCatapult-POV-LCS-JP.pdf
- 16) 海外事例に学ぶ風力発電でのデジタル技術活用, 風力発電/地域産業育成とデジタル技術の活用 (オンラインセミナー), アクセンチュア, 2022 年 5 月 13 日
- 17) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書, 風力等自然エネルギー技術研究開発, 風力発電高度実用化研究開発, スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予測等), 平成 30 年 2 月
- 18) Serice Specification DNVGL-SE-0439, Certification of Condition Monitoring, DNV・GL (2016), GL (Germanischer Lloyd)
- 19) 迫孝司, 予知保全の IoT 化について, プラントエンジニア = Plant engineer : 新世代エンジニアのための技術 & 情報マガジン, 日本プラントメンテナンス協会, 52-4, (2020) 32-45.
- 20) 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Web ページ <https://www.jsme.or.jp/dmc/>
- 21) 川合忠雄, 物理モデルを用いた設備の診断手法について—デジタルツインへの展開, 一般社団法人日本機械学会機械力学・計測制御部門ニュースレター No.70 (2022 年 7 月) (部門 Web サイトから入手可能)
- 22) 大富浩一, 羽藤武宏, 1DCAE によるものづくりの革新, 東芝レビュー Vol67. No.7, (2012)
- 23) 柏瀬翔一, 尾崎健司, 「電動機のモデルベース診断手法の開発」, Dynamics and Design Conference 2021, 2021 年 9 月, 442

-
- 24) 柏瀬翔一, 尾崎健司, 牧野宏明, 電動機のモデルベース診断手法の開発, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 208, 2021
 - 25) 川合忠雄, 山本佳弘, 石橋達朗, 物理モデルを用いた歯車の状態推定, Dynamics and Design Conference 2022, 2022 年 9 月, 239
 - 26) 前田凌河, 唐海紅, 陳山鵬, 森圭史, 米倉雄治, 統計情報フィルタおよびディープラーニングによる軸受の知的状態診断法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 106, 2021
 - 27) 竹田雄祐, 里永憲昭, 狩野将矢, 渡邊孝司, 園田智之, 電氣的接触抵抗法を用いた油膜状態の評価観測手法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 210, 2021
 - 28) 若林利明, 中津貴裕, 山崎英樹, グリース潤滑軸受の異常診断に対する超音波エコー法の適用—転がり挙動の周期性の検出手法—, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 211, 2021
 - 29) 高田寛大, 太田博光, 宮崎修治, 松尾大輔, 大森未来, 清水慧, 低速回転転がり軸受の高精度音響診断法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 202, 2021
 - 30) 井上祐人, 井上剛志, 転がり軸受の故障促進制御, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 203, 2021
 - 31) 榊田均, 岩壺卓三, 機械の状態監視と診断に関する国際規格の動向, 第 1 回 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, (2002) 32-36.
 - 32) 榊田均, 機械の状態監視と診断に関する国際規格の現状と動向, 第 5 回 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, (2006) 7-11.
 - 33) 榊田均, 機械の状態監視と診断に関する ISO 国際規格の現状と動向, 日本機械学会機械力学部門ニューズレター, (2007) 1.
 - 34) 井上剛志, 機械の状態監視と診断に関する ISO/TC 108/SC 5 国際規格の現状と動向, ターボ機械 39(5), (2011) 304-312.

< 著者紹介 >

井上 剛志 (いのうえ つよし)

名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授

学歴, 職歴

1993 年	名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻 修士課程 修了
1993 年～ 1995 年	オークマ株式会社
1995 年～ 2001 年	名古屋大学工学部 助手
2000 年	博士 (工学) (名古屋大学)
2001 年～ 2005 年	名古屋大学大学院工学研究科 講師
2004 年～ 2012 年	ISO / TC108 / SC5 国内委員会 幹事
2005 年～ 2012 年	名古屋大学大学院工学研究科 助教授 (2007 年より 准教授に呼称換え)
2012 年～現在	名古屋大学大学院工学研究科 教授
2012 年～現在	ISO / TC108 / SC5 国内委員会 委員長
2013 年～現在	マルチボディダイナミクス協議会 会長
2017 年～現在	ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics Associate Editor
2018 年～現在	名古屋大学工学部・工学研究科 創造工学センター長
2018 年～現在	ターボ機械協会 代議員
2021 年～現在	日本機械学会 標準事業委員会 副委員長
2022 年	日本機械学会 機械力学・計測制御部門 部門長

【専門分野】

- ・ 機械力学, 振動工学, 非線形力学, 制振
- ・ 特に非線形性に起因する振動現象の説明とその利用

【所属学会】

日本機械学会, ターボ機械協会, 日本設計工学会,
日本トライボロジー学会, ASME

【主な受賞・表彰】

2000 年度	日本機械学会 日本機械学会賞 研究奨励賞
2006 年度	日本機械学会 機械力学・計測制御部門 部門貢献賞
平成 25 (2013) 年度	ターボ機械協会賞 (技術賞)
平成 28 (2016) 年度	ターボ機械協会賞 (論文賞)
平成 30 (2018) 年度	日本機械学会東海支部 プロジェクト賞
令和元 (2019) 年度	ターボ機械協会賞 (論文賞)
令和 2 (2020) 年度	日本機械学会東海支部功労賞
令和 2 (2020) 年度	日本工学教育協会 第 25 回工学教育賞
令和 3 (2021) 年度	ターボ機械協会賞 (論文賞)
令和 4 (2022) 年度	日本機械学会賞 (論文) 2 件
令和 4 (2022) 年度	日本機械学会標準事業表彰貢献賞