

(解説)



『静かに安全にそして効率良くものを動かす』 振動・音・動的特性の制御技術

山口善三^{*1} (博士(工学))・岡田 徹^{*1} (博士(工学))・菅野直紀^{*2} (博士(工学))

Technology to Control Vibration, Noise, and Dynamics Characteristics for Quiet, Safe, and Efficient Machinery

Dr. Zenzo YAMAGUCHI・Dr. Toru OKADA・Dr. Naoki SUGANO

要旨

機械が動くとき必ず振動や騒音が発生するため、高品位な製品やサービスを提供するためには、振動や騒音をある一定以下に抑える必要がある。当社では、操業開始以来、本課題に対して「振動・音・動的特性の制御技術」を発展させながら取り組み続け、当社機械製品だけでなく、自社工場の安定操業、当社素材のお客様の課題解決など、広く安心な社会の実現に対して貢献してきた。本稿では、技術の概要の解説を通して、これまでの社会への貢献や今後のグリーン社会、安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献についての展望を示す。

Abstract

Machinery inevitably generates vibration and noise when in operation, and such vibration and noise must be kept below a certain level to provide high-quality products and services. Since its inauguration, Kobe Steel has been continuously working on developing "technology to control vibration, noise, and dynamics characteristics" to address these challenges. This contribution extends beyond Kobe Steel's machinery products to include stable operation in Kobe Steel's own factories and the resolving of challenges for users of Kobe Steel materials, contributing to the realization of a broader, secure society. This paper provides an overview of the technology, explaining the contributions made to society thus far, and offers a perspective on future contributions to a green society, safety, and security in urban development, and manufacturing.

検索用キーワード

振動, 音, ダイナミクス, 安定稼働, 実験, 数値解析, シミュレーション

まえがき＝機械が動くとき必ず振動や騒音が発生する。振動が異常に大きくなると、最悪の場合には機械が破損しプラント停止や労働災害のリスクが発生する。騒音もまた、現場作業や周囲住民への肉体的、精神的苦痛につながるため、振動や騒音を一定の基準値以下とすることが機械・工場の安定操業の必須条件となる。本稿で解説する「振動・音・動的特性の制御技術」は、安定操業の実現に欠かせない振動・騒音の抑制技術（≒制御技術）であり、メーカーとして高品位な製品・サービスを提供する上で重要な基盤技術の一つである。

図1に機械製品の基本的な構成とともに本技術の概略を示す。機械製品は駆動部分に指令を送り、その駆動力が固体・液体・気体を介して伝達して所望の動作をするものである。そのため、結果として生じる振動や騒音を抑制するためには、振動・騒音の現象が最終的に現れる空間や構造・伝達系の適切な設計はもとより、駆動力の設計やそこに与える制御指令まで時には考慮する必要がある。当社では古くから「振動・音・動的特性の制御技術」の研究開発に力を入れており、運動の制御にまで立ち返り、その技術ポテンシャルの向上に努めてきた。

本稿では、①振動制御技術として、駆動系の制御から構造系への力の伝達を主に扱う範囲と、②騒音制御技術として主に構造の振動から空間への音伝達を取り扱う範囲に大別して、その解析技術や制御・改善技術を解説するとともに、それらを活用した「グリーン社会への貢献」の一例について紹介する。

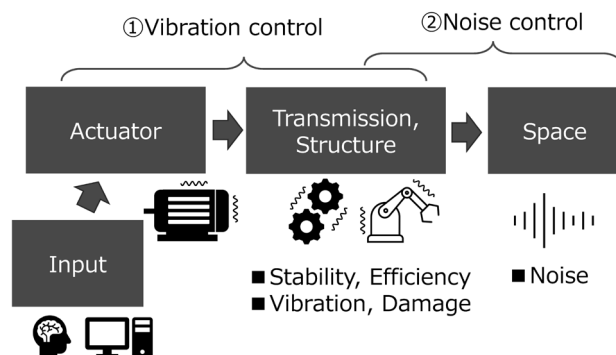


図1 機械の振動・音・動的特性の制御技術
Fig.1 Machine vibration, noise, and dynamics characteristics control technology

*1 技術開発本部 機械研究所 *2 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

1. 振動制御技術

1.1 振動制御技術の概観

振動制御技術は、「振動/動的特性の解析技術」と「計測分析技術」、それらに基づく振動低減技術を指す。当社では古くからこの振動制御技術に力を入れ、当社製品および生産設備の信頼性を確保してきた。コストダウン・生産性向上・省エネ/CO₂削減などの観点から、製品・設備の高性能化や軽量化・高速化が進められる中、振動の課題も時代ごとに変化・複雑化し、これらに対応すべく振動制御技術の高度化を進めてきた。

当社の振動制御技術は、主に、圧縮機などの産業機械(図2(a))、プラントの配管や機器系、建設機械に活用される。また、鉄鋼やアルミなどの生産工場においても、圧延やめっき加工などの機械設備(図2(b))の安定操業や生産性向上のための高速化などで貢献している。

近年では振動情報を機械設備の診断に利用し、当社の製鉄所や発電所の機械設備の保守管理の合理化や、当社機械製品の保守やリプレース提案などのサービス提供に資する技術開発にも積極的に取り組んでいる。

1.2 振動/動的特性の解析技術¹⁾

振動現象の解明に不可欠な有限要素法(FEM)などの数値解析技術も、当社の振動への対応の歴史と深く関連している。代表的な汎用解析ソフトを取りそろえて精緻で大規模なFEM解析にも古くから取り組んでいるが、様々な振動現象の課題に高精度かつ効率的に対応するために、独自のソフト開発も行ってきた。当社製品の設計や振動課題の解決に焦点を絞ることで、汎用ソフトに比べ大幅な解析時間の短縮を可能としている。ここでは、自社開発ソフトや解析技術の一例を紹介する。

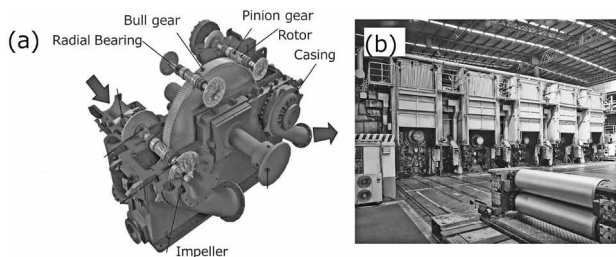


図2 当社における振動制御技術の対象の一例
(a) 増速機内蔵型遠心式圧縮機, (b) 冷間 タンデム圧延機
Fig.2 Targets of our vibration control technology
(a) Integally geared centrifugal compressor
(b) Cold tandem rolling mill

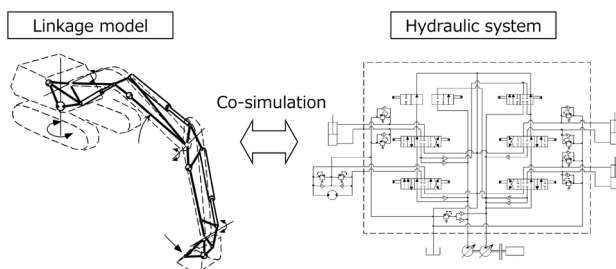


図3 リンクモデル-油圧システムの連成解析³⁾
Fig.3 Co-simulation with linkage model/hydraulic coupling³⁾

1.2.1 動的システム挙動解析(SINDYS)^{2)~5)}

SINDYSは70年代後半に、油圧プレスなどの構造系と油圧流体・制御が連成した複雑な振動挙動を解くための独自技術が起源である。これを汎用動的現象解析システムとして開発を進め、大変位挙動する機構や制御系、熱流体なども包含した解析システムに発展させてきた。²⁾

とくにガタやストップ、大変位などの強い非線形性を含む問題に対して、数値積分の工夫により効率的かつ高精度に解析できる点が特長であり、単に振動現象に留まらずロボットや油圧ショベルの動作解析などダイナミクス全般の現象の解析も可能である。例えば油圧ショベルでは、実掘削動作をシミュレーションすることで、各油圧機器や配管などの損失寄与度を明確化し、業界トップクラスの省エネ性能の実現に貢献した。³⁾(図3)

近年ではHILS(Hardware In the Loop Simulation)と呼ばれるリアルなハードウェアとバーチャルな数学モデルを連成させたシミュレータとしての活用⁴⁾やNASTRAN(構造解析)やSimulink(制御設計)といった他社汎用ソフトとの連携、油圧ショベルにおいて土の掘削性を解析するためにDEM(Discrete Element Method)との連成も可能としている。⁵⁾

1.2.2 圧力脈動解析(PULSAS)¹⁾

レシプロ式に代表される容積形圧縮機は間欠的な気体の吸込/吐出を行うため、その配管内には圧力脈動が発生し、配管などの振動の原因となる。当社では、1915年に国産第1号のレシプロ圧縮機を製造した歴史から、古くから圧力脈動の研究を行ってきた。PULSASは有限要素法によりこの圧力脈動を解析するソフトであり、API618規格(米国石油協会規格)の対応などの改良を加えながら、今日までに数百ケース以上の実プラントの設計と脈動対策に適用してきた。(図4)

1.2.3 回転機械ロータ系振動解析(ROTAS)¹⁾

回転機械は日本の経済成長とともに大型、高速、高出力化してきたが、いっぽうで振動問題との戦いでもあった。この対応として、1970年代後半に設計段階から回転軸の固有振動数や振動応答を机上検討して設計に反映できるソフトとして開発してきた。近年では、さらに合理的な設計を可能とするために、ギヤケーシングとの連成

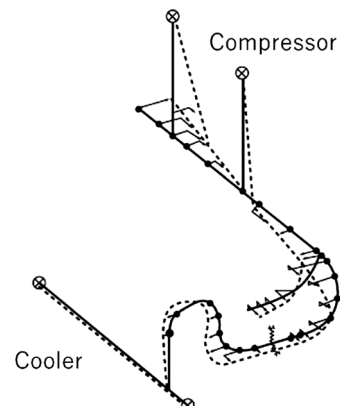


図4 圧力脈動による配管振動応答¹⁾
Fig.4 Piping vibration due to pressure pulsation¹⁾

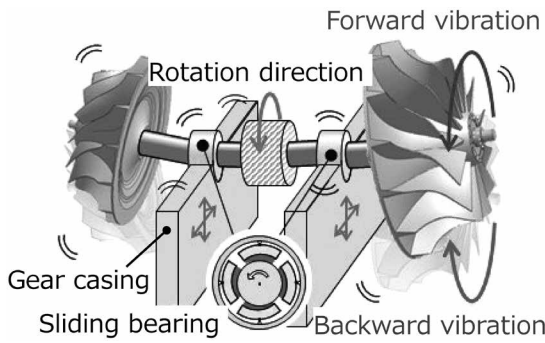


図5 ロータ系安定解析
Fig.5 Rotor stability analysis

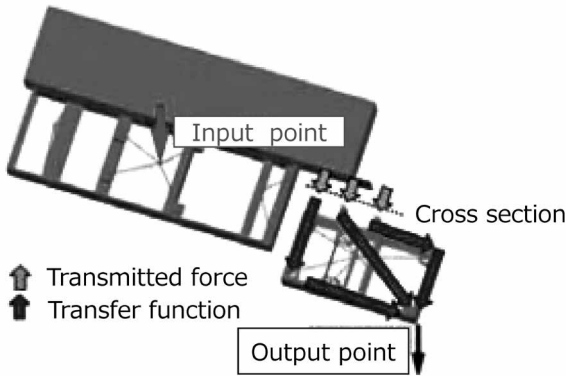


図6 FEM伝達経路解析⁶⁾
Fig.6 Transfer path analysis using FEM⁶⁾

解析技術や、滑り軸受の動特性の高精度予測技術を開発している。(図5)

1.2.4 FEM伝達経路解析 (FE-TPA)⁶⁾

TPA (Transfer Path Analysis) は、加振源から評価点へ伝ばする振動に対し、寄与度の高い伝ば経路を特定する分析技術である。従来実験データに適用される本手法を数値解析 (FEM) 上に展開し、より精緻な寄与度の評価が可能な技術を開発した。効果的な構造変更が可能となり、クレーンの低振動化などに活用している。(図6)

1.3 振動計測分析技術

振動問題を扱う上ではその計測データの分析技術も重要である。代表的な振動分析であるFFTやフィルタ処理、モーダル解析などに対して、当社ではVIVIAN (VIsual VIBration ANalysis) と名付けたソフトを開発している (図7)。直感的な簡単操作や大量データの高速処理が特長であり、当社の振動分野の研究開発に欠かせない存在となっている。VIVIANをプラットフォームとして新しい分析手法を随時取り込み、各種多彩な振動分析を可能としている。本ソフトを通じてグループ会社を含めた社内各部署に分析技術の普及を図り、各事業での機械・設備の振動分析や試験評価などに活用している。

また、機械の状態監視などの設備診断技術に関しても、振動による損傷診断が可能なソフトを開発している。図8にその一例として、産業機械の減速機・軸受向けに開発したソフト画面を示す。当社製品を安心して使用してもらうための信頼性を担保する技術であり、当

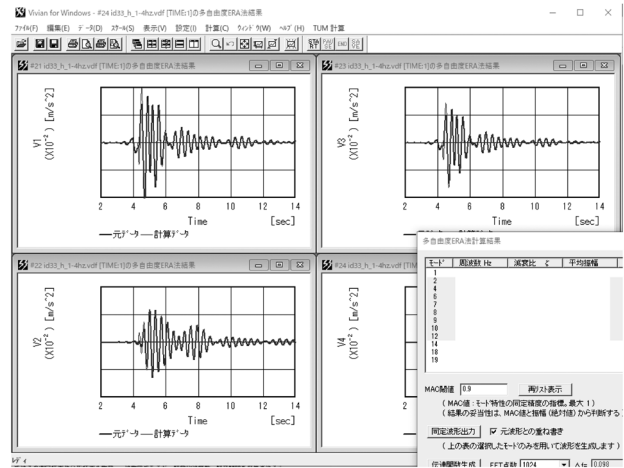


図7 VIVIAN (VIsual VIBration ANalysis)
Fig.7 VIVIAN (VIsual VIBration ANalysis)

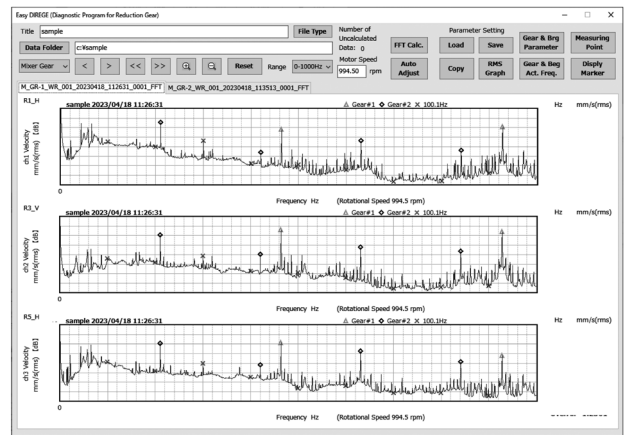


図8 設備診断ソフト
Fig.8 Rolling bearing diagnostic software

社の製鉄所や発電所の安定操業への展開を進めている。

2. 騒音制御技術

2.1 当社における音響技術の発展

巨大な装置を駆使して生産活動を実施する当社は、地域社会との共生のため工場自体の低騒音化を進め、その過程で防音技術は発展してきた。日本経済の成長とともに、生活や職場の質が重視され静粛性がますます重要になり、建設機械や圧縮機では低騒音を特長とした商品を開発してきた。図9 (a) は、静音性・防じん性・メンテナンス性に優れた建設機械用エンジン冷却システムとして開発したiNDr (Integrated Noise&Dust Reduction cooling system) を搭載した極低騒音建設機械であり、お客様から高い評価をいただいている^{7), 8)}。また、輸送機分野の軽量化はCO₂排出低減の観点で重要な社会課題であるが、軽量化は振動・騒音の増大を招く場合が多い。当社では自社製品で培った低騒音設計技術を生かし、500系以降の新幹線に採用されている制振アルミ押し出し形材 (ダンシェープ・市村産業賞受賞)^{9), 10)} の開発など、輸送機分野の低騒音化ソリューションをお客様に提供し、快適な移動とCO₂排出低減の両面で社会に貢献している。(図9 (b))。さらに、後述する微細多孔吸音技術¹¹⁾

を活用したエコキューオン¹²⁾をはじめとする防音製品も数多く開発してきた。

次節より、上記開発を支える音響の数値解析、実験技術、低騒音設計技術について紹介する。

2.2 音響解析技術¹³⁾

数値解析技術が発展しつつあった1970年代、当社においてもFEMによる音場解析技術を開発し、ジェットエンジンの地上消音設備などの低周波音低減の開発に活用した。いっぽう、可聴域の音響現象は、波長が短く解析モデルの要素数が膨大になるため、汎用品の製品開発に対して音場解析技術はまだ実用的ではなかった。当社は、1980年代に境界のみの要素分割で音場が解析できる境界要素法（BEM）をいち早く実用化したことで、数値解析技術を強みとして1990年代から様々な低騒音機械製品、防音製品を世に送り出してきた（図10（a））。また、2010年ごろには高周波における音と光の類似性に着目し、境界型数値解析の発展として音響ラジオシティを開発し、建設機械の低騒音設計⁷⁾に利用してきた（図10（b））。さらに、自社ソフトを保有することを強みに、製品の最適設計にも応用している¹⁴⁾。

2.3 音響実験・評価技術

数値解析技術とともに、実験による音響モデルの構築技術も古くから開発してきた。当社は、日本最大クラスの大規模半無響室（図11（a））を保有しており、建設機械、圧縮機など当社製品以外にも自動車、OA機器、橋りょう、住宅など様々な機械、構造物の音響性能を測定し、お客様へのソリューション提供を行うとともに、音響モデル構築のノウハウを蓄積してきた。

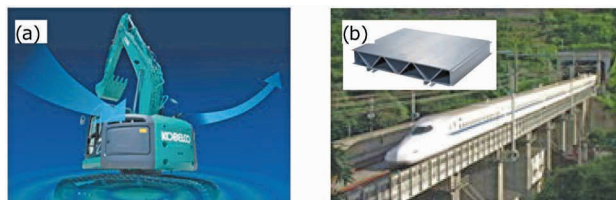


図9 音響技術の適用した製品開発例
(a) iNDRを搭載した油圧ショベル⁸⁾
(b) ダンシェーブ¹⁰⁾

Fig.9 Product development applying acoustic technology
(a) Hydraulic excavator with iNDR⁸⁾
(b) Damp-shape¹⁰⁾

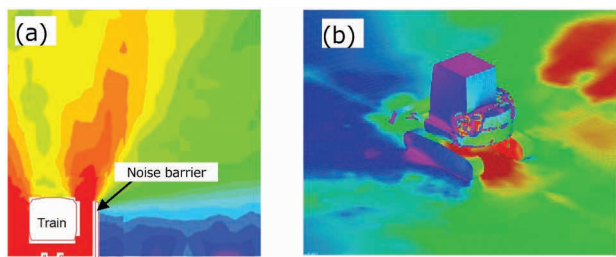


図10 音場解析技術

- (a) 防音壁の回折減衰（境界要素法）
(b) 建設機械の騒音（音響ラジオシティ）

Fig.10 Numerical simulation of sound field
(a) Diffraction attenuation of soundproof walls (BEM)
(b) Noise from construction machinery (Acoustic Radiosity)

実験技術の中で最も重要な技術は、1.2節でも触れた伝搬経路解析（TPA）である。当社は本技術を世の中に先行して開発し、90年代には先に紹介したダンシェーブの開発に活用している。既存の車両の音響モデルを本技術により構築し（図11（b））、それをベースに速度が変化した場合やダンシェーブ採用時の車室内騒音を予測した。さらに予測結果を実際に音として再生する技術も同時に開発することで、車両制作前にお客様にダンシェーブの効果を体感していただき本製品の採用につなげた。

音は、最終的に人間の知覚・感性に関わるため、音の物理的側面だけでなく、心理的・生理的な影響についても長年研究を続け、建設機械のキャビンの居住性改善などに貢献⁷⁾してきた。現在では、音の知覚に関する知見を応用し、ベテラン検査員が知覚する微妙な音の変化を定量化し、労働人口が減少していく環境でも安定稼働を可能にする設備診断技術への応用を進めている。

2.4 静音デバイス設計技術

近年、音響メタマテリアルと呼ばれ、微小な共振・共鳴現象を周期的に配置することで、従来材料の音響性能を凌駕（りょうが）する構造の開発が活発化している。当社がいち早く実用化した微細多孔吸音技術（図12）も、音波が微細かつ周期的に配列された孔を通過する際の抵抗と共鳴を活用した吸音機構であり、音響メタマテリアルの一種である。この応用製品であるエコキューオンはアルミ板に微細な孔をあけて所望の吸音性能を発揮させている。産廃となる従来材（グラスウールなど）とは違いオールアルミでリサイクル可能であることを特長とする。今後も本分野の研究にも積極的に取り組み¹⁵⁾、サステナブルな材料で静かで快適な社会の実現に貢献していく。

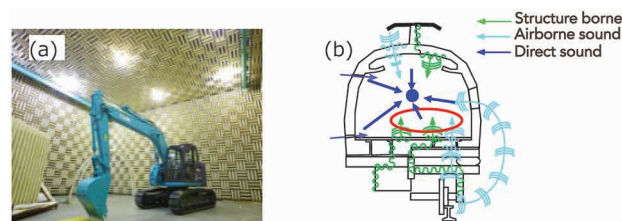


図11 音響実験／評価技術

- (a) 大型半無響室、(b) 伝達経路解析

Fig.11 Acoustic experiment and evaluation technology
(a) Large semi-anechoic room, (b) Transfer path analysis (TPA)

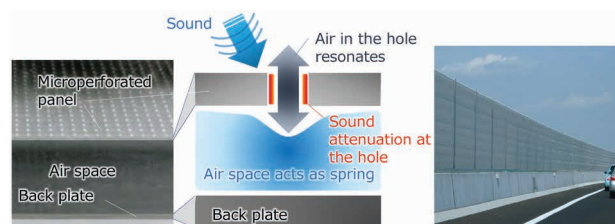


図12 微細多孔吸音技術とエコキューオン¹²⁾

Fig.12 Microperforated sound absorption technology and Eco Kyuon¹²⁾

3. グリーン社会を実現する圧縮機の商品開発への貢献

当社がグリーン社会の実現に貢献するためには、当社の機械製品の省エネ化だけでなく、CCS (Carbon Capture and Storage) やCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) など、CO₂削減に直接貢献することも重要である。本章では、CCSやCCUSに用いられる増速機内蔵型高圧CO₂遠心圧縮機の開発事例(図2(a), 図13)における振動制御技術の適用事例を紹介する^{16), 17)}。

本開発の主な技術課題は①高圧下における構成部品の高強度化, ②高圧状態での空力性能の向上, ③ロータの振動に対する安定性向上, ④高圧ガスのシール性能の向上であり, 課題③が振動制御技術に大きく関係する。

遠心圧縮機はロータ(回転軸)に設けたインペラ(羽根車)を高速回転させ, 遠心力によりガスにエネルギーを与えて増圧する機械である。ロータは滑り軸受で支持され, ケーシングとの隙間には圧縮ガスの漏れを抑える非接触シールが設けられる。

インペラや非接触シール部では, ロータに振動を生じさせる流体力が発生する。ガスの高圧化に伴いその力が増加し, 条件によっては振動が増加し続ける不安定振動が発生するため, ロータの安定性を確保する設計が重要となる。本機械では「スワールブレーカ」と呼ばれるシ

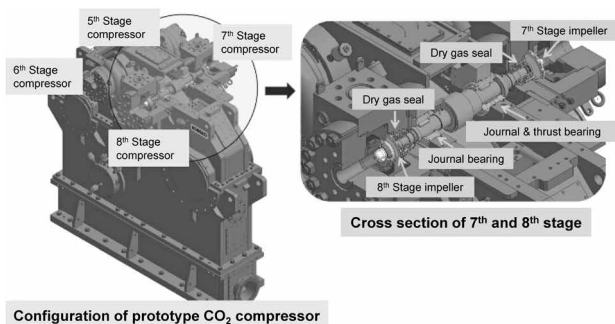


図13 増速機内蔵型高圧CO₂遠心圧縮機¹⁶⁾
Fig.13 Integrally geared turbo compressor for high-pressure CO₂¹⁶⁾

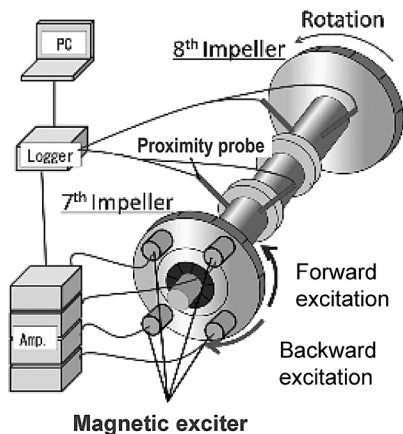


図14 磁気加振システム
Fig.14 Magnetic excitation system

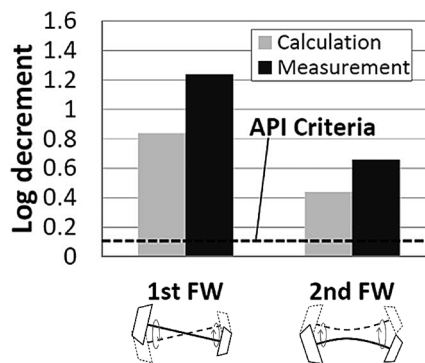


図15 ロータの対数減衰率
Fig.15 Logarithmic decrement of rotor

ール流体力の低減機構や「高減衰軸受」などの振動対策を採用し¹⁷⁾, 前述の振動解析ソフトROTASを用いて評価・設計を行った。

ロータの安定性は, 高圧条件下で回転中のロータに振動外力を与え(加振), そのときに生じるロータの振動振幅を計測し, その値を元に「対数減衰率」と呼ばれる安定性の指標値を算出することで評価できる。

ロータの加振方法として, 外部から圧縮機全体を加振してロータを間接的に加振する従来技術に対して, 図14に示す四つの電磁石の高速切替え動作によりインペラにモーメントを与えてロータを直接加振させる独自技術を開発した。従来技術に比べてロータ加振時の振動振幅が増加することにより対数減衰率の算出精度が大幅に向上し, 信頼性の高い安定性の評価を可能とした。

図15に実験により算出した対数減衰率の結果を解析結果と並べて表示する。この値が大きいほど安定性は高く, 負の場合に不安定振動が発生する不適切な設計となる。解析との若干の差異はあるものの, ロータ安定性の一般的な指標として用いられるAPIの基準値¹⁸⁾を大幅に上回り, 十分な安定性を有することが実証できた。

本プロトタイプ機においてはそのほかの技術課題も克服, 検証され, 長期の運転となる実用化に向けて十分な信頼性を有することを実証できた。今後この高圧CO₂圧縮機がCCSやCCUSなどへ活用されることによりCO₂削減に大きく貢献することが期待される。

むすび=本稿では、「振動・音・動的特性の制御技術」が長く当社製品の安定稼働に貢献してきたことを述べてきた。今後も当社が目指す「グリーン社会への貢献」を, 当社の機械製品の高度化, 新メニューで実現する上では, 安定稼働が絶対条件となるため, 引き続き必要不可欠な技術と考えている。

いっぽう, 本技術は機械の安定稼働のみに有効な技術ではなく, 交通騒音など環境騒音問題などの社会問題の解決や, かつては橋りょう¹⁹⁾などインフラの振動低減や劣化診断などでも貢献してきている。今後も広く未来の「安全・安心なまちづくり・ものづくり」に貢献する技術として本技術を発展させていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 今西悦二郎ほか. R&D神戸製鋼技報, 2001, Vol.51, No.3, p.50-57.
- 2) 頭井 洋ほか. 日本機械学会論文集C編, 1986, Vol.52, No.1, 483, 2814-2821.
- 3) 南條孝夫ほか. R&D神戸製鋼技報, 2007, Vol.57, No.1, p.48-51.
- 4) 森田 啓. R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.68, No.1, p.3-8.
- 5) 上村祥平ほか. 日本機械学会論文集C編, 2018, Vol.84, No.861, 17-00468.
- 6) 森 辰宗ほか. 日本機械学会論文集, 2018, Vol.84, No.865, 18-00168.
- 7) 中島 一ほか. R&D神戸製鋼技報, 2012, Vol.62, No.1, p.27-31.
- 8) KOBELCO Official Site. Corporate Social Responsibility. Sustainability Report.
https://www.kobelco.co.jp/english/about_kobelco/csr/environment/2008/1180572_12553.html, (参照2023-8-29).
- 9) 田中俊光ほか. まてりあ, 1996, 第35巻, 第6号, p.725-727.
- 10) KOBELCO6 オフィシャルサイト. 技術製品情報. 特徴ある技術・製品・サービス. Mobility. 鉄道.
<https://www.kobelco.co.jp/products/>, (参照2023-09-04).
- 11) 次橋一樹ほか. R&D神戸製鋼技報, 2014, Vol.64, No.2, p.90-95.
- 12) 日鉄神鋼建材株式会社. 製品一覧. 防音製品.
<https://www.shinkokenzai.co.jp/products/soundproof/>
(参照2023-8-29).
- 13) 田中俊光ほか. R&D神戸製鋼技報, 2001, Vol.51, No.3, p.58-63.
- 14) 田淵 聡. R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.68, No.1, p.9-14.
- 15) 田淵 聡ほか. 環境工学シンボ講演論文集 2021.31 (0), p.118.
- 16) 馬場利秋ほか. R&D神戸製鋼技報, 2020, Vol.70, No.1, p.75-80.
- 17) Baba.T et al., 48th Turbomachinery & 35th Pump Symposia, 2019.
- 18) API Standard 617 8th ed., American Petroleum Institute, 2014.
- 19) 本家浩一ほか. R&D神戸製鋼技報, 2003, Vol.53, No.1, p.64-68.