



DYNAMICS



機械力学・計測制御部門ニュースNo.69

Mar 1, 2022

二次定数の解析性に基づく波動解析・波動制御 ～一般繰り返し構造系への展開を目指して～

和歌山大学 システム工学部 長瀬 賢二



1. はじめに

波動解析・波動制御法は、システムの繰り返し構造を利用した解析・制御手法であり、大型構造物や宇宙構造物などの繰り返し構造系に対する振動解析法や制御系設計法として、また、音響・光学分野における導波管や複合材料などの解析・設計法としてなど、様々な分野で研究が進められている[1].

柔軟構造物の振動制御を例にとると、そこでは、モード解析に基づくモード制御法が広く利用されている[2]. モード解析法はシステムの構造に依存せず幅広く利用可能であるが、振動モードを制御系設計のモデルとして見た場合、モードの特性はパラメータ変化に敏感であるためモデル化誤差の影響を受けやすく、また、制振モードの増加に伴い制御系設計の労力が飛躍的に増大するなどの懸念がある[3]. 一方、波動解析を利用した波動制御法では、二次定数が制御系設計のモデルとなり、境界で波を吸収するインピーダンスマッチングコントローラは、二次定数の一つである特性アドミッタンスにより与えられる。二次定数は、構造物の長さや繰り返しの数に依存せず、また、パラメータの変動に対して一般にロバストである[4]. そのため、波動制御法は、モード制御手法の適用が難しい、低減衰の振動モードが広帯域に密に存在するような大規模システムに対し、解析・設計の省力化や性能のロバスト化を実現するもう一つの枠組みとして期待されている[4,5].

従来の波動解析・制御法の適用は、梁や平板など、その解析手法が確立されている単純な一様システムに対するものが多い。一方、それらを一般の繰り返し構造系へ展開するためには、離散化や有限要素法などから得られる集中定数系モデルを想定した定式化も重要と考えられる。著者らはそのような観点から、マス・ばね・ダンパ系を中心とした集中定数系において、二次定数の解析性に基づく議論の枠組みの構築を目指した研究を行ってきた。本稿では、その議論の概要を紹介する。

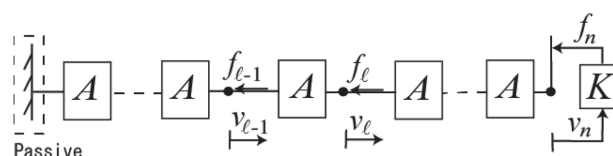


図1 繰り返し構造系

2. 波動解析・波動制御の概要

議論の一般化の前段階として、本章では、まず、波動解析・制御手法の基本的な解析手順について説明する。

2.1 システムの漸化式

波動解析においては、図1に示すような繰り返し構造を想定する。システムは、サブシステム A が、隣り合う層と速度 v_ℓ 、および、力 f_ℓ を共有する形で連鎖している。 A の構成要素は、線形時不変な集中定数系として表される受動要素とする（質量、ばね、ダンパ、など）。図では、便宜的に左側が固定端で、右側にコントローラを設置する状況を示しているが、左右端は交換可能であり、固定端側は受動要素で終端されていれば良い。

システムの動特性をラプラス変換上で表現すると、 ℓ と $\ell-1$ 番目の変数の関係は、漸化式の形で表すことができる。

$$X_\ell = AX_{\ell-1} \quad (X_\ell = [v_\ell \ f_\ell]^\top) \quad (1)$$

サブシステム A の特性を表す複素行列 $A(s)$ は伝達行列、もしくは、縦続行列と呼ばれる。次に、 A の固有ベクトルを各列とする行列 T を用いた変数変換、

$$X_\ell = TF_\ell^\pm \quad (F_\ell^\pm = [v_\ell^- \ f_\ell^+]^\top) \quad (2)$$

を考える。 A の固有値が全て異なるとすれば、固有ベクトルは一次独立であり、漸化式は対角化され、

$$F_\ell^\pm = \Lambda F_{\ell-1}^\pm \quad (\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)) \quad (3)$$

となる。 A の固有値 λ_1, λ_2 は、伝搬定数と呼ばれる。伝搬定数は、後述の特性アドミッタンス（特性インピーダンス）と合わせて、二次定数と呼ぶ。

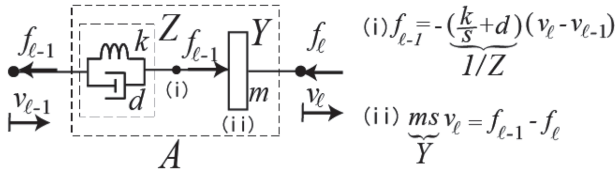


図2 単純マス・ばね・ダンパ系

例として、サブシステム A が図2に示す、ばね・ダンパの並列接続と質点の縦続結合からなる場合を考える。この場合、図右側に示す、(i)点での力のつり合い式、および、(ii)の質点の運動方程式を整理すると、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ -Y & 1 + ZY \end{bmatrix} \quad \begin{cases} Y = ms \\ Z = s/(ds + k) \end{cases} \quad (4)$$

が得られる。 A の特性方程式は、

$$\lambda^2 - (2 + ZY)\lambda + 1 = 0 \quad (5)$$

であり、したがって、伝搬定数は、

$$\lambda_{1,2} = \left(1 + \frac{ms^2}{2(ds + k)}\right) \pm \sqrt{\left(1 + \frac{ms^2}{2(ds + k)}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

と求まる。上式から分かるように、伝搬定数は一般に s の無理関数となる。また、式(5)より、

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1 \quad (7)$$

を満たす。一般的には、伝搬定数は、特性方程式より定まる代数関数の枝として定義される。

2.2 波動解析

変換後の変数の進行波としての解釈には調和解析が用いられる。システムが調和加振されており、定常状態にあるとする。また、式(7)が成立し、 $|\lambda_1| > 1$ を満たすとする。

式(3)より、定常状態においては、

$$f_l^- = \lambda_1(j\omega)f_{l-1}^-, \quad f_l^+ = \lambda_2(j\omega)f_{l-1}^+ \quad (8)$$

が成立する。したがって、 f_l^-, f_l^+ は、 l の増加に伴い一定比 λ_1, λ_2 で変化する。また、仮定より、 $\arg(\lambda_1) = -\arg(\lambda_2)$ 、および、 $|\lambda_2| < 1 < |\lambda_1|$ である。したがって、 f_l^-, f_l^+ は、 l に関し、同じ速度で逆方向に減衰しながら伝搬する進行波と解釈できる。

進行波による議論は形式的には上記で可能であるが、上記の議論が正当化されるためには、伝搬定数に重複がないこと(対角化行列の構成条件)に加え、それらが複素右開半面 \mathbb{C}_+ 内で解析的な関数として定義できなくてはならない(そうでない場合、定常状態は存在せず調和解析は無効である)。加えて、それらが、その領域で必要な性質($\arg(\lambda_1) = -\arg(\lambda_2), |\lambda_2| < 1 < |\lambda_1|$)を満たし続けている必要もある(性質に入れ替わりが生じる場合、進行波の性質は周波数により入れ替わることになり、任意の外力に対する時間応答を進行波として解釈することは難しい)。また、元の物理変数と進行波との対応にも、変換行列とその逆行列の解析性が必要である。

2.3 波動制御

コントローラが右端もしくは左端に設置され、その入出力関係が、 $f_n = K_n v_n$ 、もしくは、 $f_0 = -K_0 v_0$ で与えられるとする(K_0 の負号は、力の方向が左右端で異なることによる)。境界での波の反射を0とするインピーダンスマッチングコンコントローラは、式(2)において、 $f_n^- = 0$ 、もしくは、 $f_0^+ = 0$ とすることで求まる。 $|T_{12}|, |T_{11}| \neq 0$ と仮定すれば、それらは、

$$K_n = K^+ = T_{22}T_{12}^{-1}, \quad -K_0 = -K^- = T_{21}T_{11}^{-1} \quad (9)$$

で与えられる。 K^+, K^- は類推回路においてアドミッタンスの次元をもち、特性アドミッタンスと呼ばれる。システムが受動的であることを考慮すると、 K^+, K^- が正実関数であれば、閉ループ系の安定性が保証される。

上記から分かるように、変換行列については、 T と T^{-1} が \mathbb{C}_+ 内で解析的であること(元の物理変数と進行波との対応に必要な)に加え、その要素が、 $|T_{12}|, |T_{11}| \neq 0$ を満たし、かつ、 $T_{22}T_{12}^{-1}, -T_{21}T_{11}^{-1}$ が正実関数となる必要がある。

なお、特性アドミッタンスは、先の伝搬定数と同様、一般に s の無理関数(無限次元系)となるため、そのままでは計算機などに実装することはできない。そのため、各周波数での値を数値的に計算し、カーブフィッティング法などにより有理関数近似を求めることがしばしば行われている[6]

3. 一般繰り返し系への展開

これまでに見たように、波動解析・制御の議論が成立するためには、伝搬定数や変換行列が解析性などのいくつかの性質を満たす必要がある。逆に言えば、それらを上記の性質を満足するように定義できることを示せば、従来から考えられている図2のような単純なシステムだけでなく、より複雑なシステムに対してもその議論が展開可能であることを保証できる。本章では、まず一様系に対する筆者らのこれまでの結果を紹介する。

3.1 単結合系

前述のように、図1で表される最も基本的なシステムは、図2のような、ばね・ダンパと質点が繰り返し結合されているシステムである。システムは、両端の速度差より左右に同じ反力を伝達する要素 Z と、両端からの力の差から左右に同じ速度を伝達する要素 Y の縦続結合で構成されている。モビリティ類推(速度 \leftrightarrow 電圧、力 \leftrightarrow 電流)によれば、この構造は Z と Y の梯子型回路である。 Z と Y の構成は、上記の伝達構造の範囲内で任意の受動素子の組み合わせに選べることを示すことができる[7](例えば、図3(a)のような構成)。さらに、梯子型回路構造によらない、より一般構造の伝達行列の多くでも、上記の性質が成立することを示すことができる[8]。それにより、図3(b)の左側および右上のような構成や、右下に示すような、(a)や(b)の構成要素の縦続接続も考えることができる。

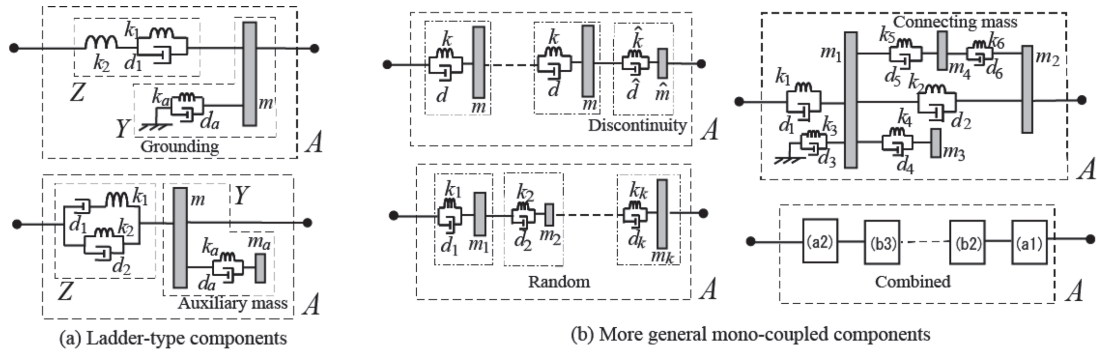


図3 単結合系における一般化した構成要素

3.2 多重結合系

これまでの議論は、 v_ℓ, f_ℓ をベクトルと考えれば、そのまま多重結合系にも展開できる。

多重結合系としてモデル化されるシステムの一つに、図4のような、多段結合系がある（図は二段結合の場合）。システムは、図2で与えられる従来の単純なマス・ばね・ダンパの縦続結合（黒色部）に、隣り合う層を超えて結合するばね・ダンパ（赤色部）を追加したものとなっている。この場合、図の破線部をサブシステム A とし、隣の層との共有変数を $V_\ell = [v_{\ell-1} \ v_\ell]^T$ 、および、 $F_\ell = [f'_{\ell-1} \ f_\ell]^T$ とれば、この場合のシステムの動特性も式(1)の漸化式の形で表せ、二次定数が必要な性質を満たすことを示すことができる[9]。

多重結合系で表されるもう一つの重要なクラスは、二次元場を想定した、図5のようなシステムである。質点は平面内の格子に配置され、それらがばね・ダンパで縦横両方向に結合されている。この場合も、サブシステム A を図の破線部のように取ることで漸化式(1)が得られ、必要な性質を満たすことを示すことができる[6]。

なお、上記のいずれの場合も、単結合系の場合と同様、質点とばね・ダンパ部 Z, Y を、図3(a)のようにとることも可能である。

4. 非一様系への展開

前章までの議論は全てのサブシステム A が等しい場合であったが、波動解析の議論は伝搬定数に基づいて行われるため、システムが一様であるという条件も必ずしも必要ない。この場合に必要と考えられる条件は、伝搬定数が層の位置 ℓ によらず一定であるということである（そうでない場合、変換後の変数の性質は層ごとに変化するため、それらを波として解釈するのは難しい）。この性質は、ある種の非一様系でも成立し、それらに対し

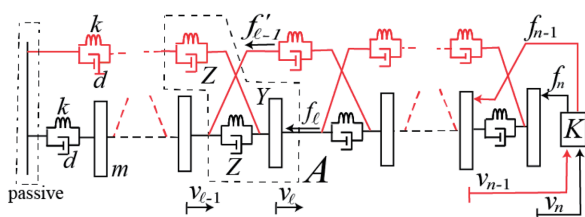


図4 多重結合系 1（多段結合系）

ても、波動解析・制御の議論を展開することができる。

伝達行列が位置に依存して A_ℓ と表されるとする。その場合、対応する変換行列も位置に依存した T_ℓ となる。変換行列 T_ℓ は、 A_ℓ の対角化を行うとともに、進行波と元の物理変数との対応を与える役割があるため、位置の任意関数とするのは好ましくない。そこで、変換行列が、一定比 $T_{\ell-1} = QT_\ell$ の形で表される状況を考える。変換後の漸化式に、この関係を適用すれば、

$$F_\ell^\pm = T_\ell^{-1} A_\ell Q T_\ell F_{\ell-1}^\pm \quad (10)$$

を得る。したがって、 T_ℓ の各列を $A_\ell Q$ の固有ベクトルに選べば漸化式は対角化される。

伝搬定数が ℓ に依存しないとき、式(10)の係数行列は、 $\ell \rightarrow \ell-1$ とした場合の係数行列と等しい。その条件を $T_{\ell-1} = QT_\ell$ を用いて整理すると、

$$QA_\ell = A_{\ell-1}Q \quad (11)$$

を得る[8]。言い換えれば、伝搬定数が一定である条件は、係数行列 A_ℓ に対し、式(11)を満たす Q が存在することである。

現在までのところ Q に関する一般的な条件は得られていないが、例えば、 $Q = \text{block diag}(aI, I)$ ($a \in R_+$) とれば、式(11)は、次式に書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} aA_{\ell,11} & aA_{\ell,12} \\ A_{\ell,21} & A_{\ell,22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aA_{\ell-1,11} & A_{\ell-1,12} \\ aA_{\ell-1,21} & A_{\ell-1,22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

係数行列が式(4)で与えられる単純なマス・ばね・ダンパ系の場合、上記を満たす条件は、

$$m_\ell = am_{\ell-1}, \ d_\ell = ad_{\ell-1}, \ k_\ell = ak_{\ell-1} \quad (13)$$

すなわち、システムの物理パラメータが一定比で変化することである。これまでに見た図2~5のシステムの伝達行列 A_ℓ は、物理パラメータが一定比で変化するとき式(12)を満足し、二次定数が必要な性質を満たすことができる。

5. 制御効果

本章では、インピーダンスマッチングコントローラの振動制御への効果を数値例で確認する。システムの構造は、図5の二次元結合マス・ばね・ダンパ系において、

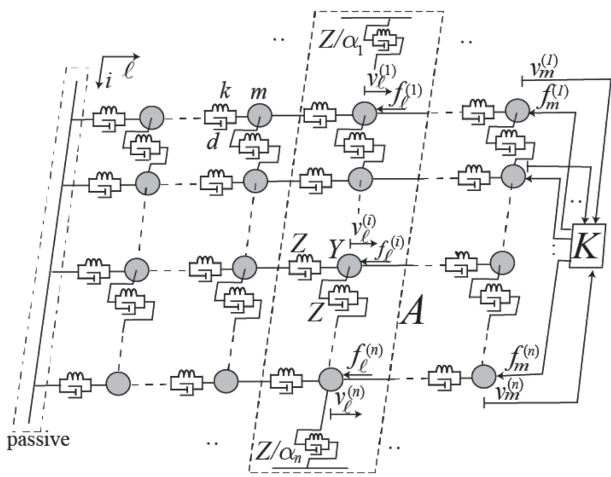


図5 多重結合系2 (二次元結合系)

質点Yを図3(a)下の補助質点を付加した場合に変更したのとする。格子上の主質点の数は縦横方向に4×8とし、各物理パラメータは横方向に一定比 $a = 0.9$ で変化するとする。左右の境界条件は、図5と同様で、上下方向は自由端($\alpha_{1,n} = 0$)とする。コントローラは、前述の手法により求めた有理関数近似を用いた。

図6に、左上の質点を調和加振した時の主質点の定常応答を示す。上側が無制御時、下側が制御時の応答であり、左側が5次モード、右側が1~3次モードの外力を加えて与えた場合の応答である。図より、無制御時には定在波が発生し、その結果非常に大きな振幅で振動している。一方、制御時には、複数の周波数の外力を同時に加えた場合においても、それらは進行波となり、その結果、振動は領域全体で小さく抑えられている。図7は、左上の質点における、力から変位までのゲイン特性である。左側が主質点、右側が補助質点のゲイン線図である。図より、制御により振動モードのピークが平滑化されており、高い振動抑制効果が確認できる。

6. おわりに

本稿では、マス・ばね・ダンパ系を中心とした集中定数系における波動解析・制御の議論の枠組みについて、筆者らのこれまでの研究内容を中心に紹介した。現在もこれらの議論の拡大を検討しており、特に、三次元場や一般の多重結合系への展開が興味深いと考えている。

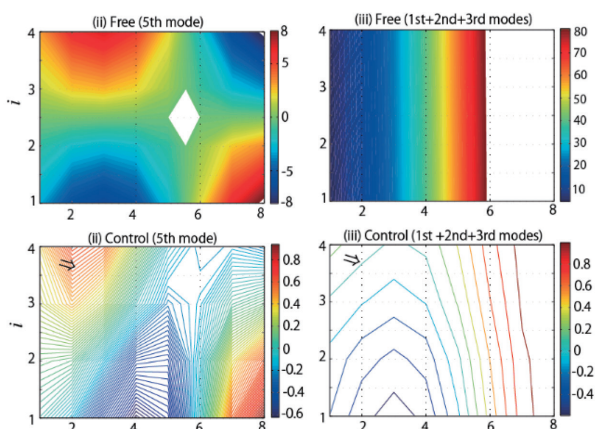


図6 モード形状

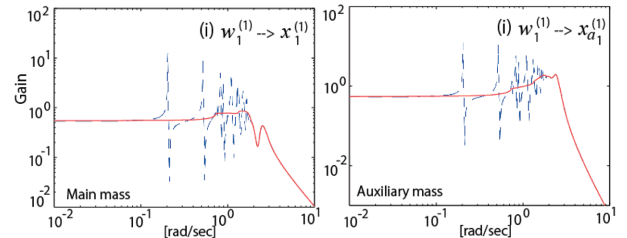


図7 周波数応答

また、制御系設計という観点からみると、現状では単純に変数変換の式に反射波0の条件を適用し、その代数解を有理関数近似して利用していることが多い。より現実的な設計問題に対応するためには、他の設計要求も同時に考慮するとともに、 $\|f_l^-\|_\infty < \gamma$ などの評価関数に基づき、直接有理関数コントローラを導出する枠組みの構築も重要と考えられる。

波動解析・制御の議論は、単純な一様部材だけでなく、ビルや橋などの大型構造物、工場などの送電設備や配管設備、航空機などのタービン翼やシェル構造、宇宙構造物などのパネルやトラス構造など、繰り返し構造が想定される様々なタイプの工学構造物へ展開しようと考えている。また、音響素子や複合材料、メタマテリアルなどの解析・設計にも重要な役割を果たしている。本稿が、これらの分野に興味をもっていただくきっかけとなれば幸いである。

参考文献

- [1] Hussein, M.I., Leamy, M.J. and Ruzzene, M., Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 66, No. 4 (2014), 040802.
- [2] 背戸一登, 分布定数系構造物のモデリングとアクティブ振動制御, *計測と制御*, Vol. 37, No. 8 (1998), pp. 546-552.
- [3] 吉田和夫, 柔軟構造物のモデリングと制御理論, *計測と制御*, Vol. 32, No. 4 (1993), pp. 276-283.
- [4] 長瀬賢二, 早川義一, 柔軟構造物のアクティブ振動制御における最近の動向—マス・バネ・ダンパ系にみるモード制御法と波動制御法, *システム/制御/情報*, Vol. 44, No. 5 (2000), pp. 253-258.
- [5] 田中信雄, 波動制御によるアクティブ・コントロールと制御理論, *計測と制御*, Vol. 32, No. 4 (1993), pp. 326-333.
- [6] 長瀬賢二, 谷内邦夫, 二次元結合マス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御 (二次定数の解析関数としての性質に基づく解析), *日本機械学会論文集*, Vol. 87, No. 902 (2021), 21-00228.
- [7] Nagase, K., Ojima, H. and Hayakawa, Y., Wave-based analysis and impedance matching for ladder networks, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 41, No. 11 (2005), pp. 886-893.
- [8] Nagase, K., Doshita, A. and Midoro, T., Analytical properties of secondary constants of uniform and uniformly varying mono-coupled periodic structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 146 (2021), 106974.
- [9] 箕土路拓也, 長瀬賢二, 多段結合マス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御, *日本機械学会論文集*, Vol. 85, No. 873 (2019), 19-00054.

物理現象を意識した機械振動の研究と医療分野への展開



井上喜雄
(高知工科大学名誉教授)

1. まえがき

筆者は、1972年に京都大学大学院修士課程を修了後神戸製鋼に入社し、振動音響研究室（何度か名称が変わりましたが振動音響研究室と表現）に配属され、25年間、機械振動の研究に従事しました。その後、新設された高知工科大学に移り、21年間、機械振動分野に加え医療分野の研究を進めました。「後輩へのメッセージ」の執筆依頼をいただき、何を書こうか迷いましたが、46年間の研究生活を振り返り、役に立ったこと、おもしろいと感じたことなどについて研究内容をまじえながら紹介させていただくことにしました。

神戸製鋼では、柔軟マルチボディシステムの動的解析などの数値解析プログラムの開発に注力し、学位論文も数値シミュレーション関連でまとめましたが、多くの振動問題を経験するなかで、数値解析に頼るだけではなく現象の物理的な意味を理解して研究を進めることが、的確、かつ効率的に課題を解決することに有効であり、また機械力学研究者としての感覚を磨くことに役立ったように思います。2章では、それらについて紹介します。

高知工科大学では、引き続き機械振動の研究に専念する予定でしたが、学長主導で設置された歩行訓練ロボットのプロジェクトのリーダーに指名されたことにより、医療分野に参入することになりました。しばらくは、あまり経験のない医療ロボット関連の研究を続けましたが、時間経過とともに、同じ医療分野でも機械力学研究者としての経験を生かした基盤技術開発を進める方向にシフトしていったことが功を奏して期待以上の成果が得られました。医療分野でも機械振動の研究で磨いた物理現象を意識した研究スタイルが役立ったように思います。そこで、3章では、想定外で参入することになった医療分野での研究がどのように展開していったかを研究内容をまじえながら紹介します。最後に、4章で複数の分野を経験しておもしろいと感じたことなどを話題にさせていただきます。

2. 神戸製鋼での物理現象を意識した取り組み

筆者の研究スタイルに大きく影響した神戸製鋼での物理現象を意識した取り組みのなかから、「現象のメカニズムを把握すること」、「物理の基本原則から現象を考える習慣」、「大自由度系の解析で見通しを得る方法」を取り上げ、具体例を参照しながら有用性を紹介します。

2.1 現象のメカニズムの把握

減衰を例に現象のメカニズム把握の有用性を説明します。消散エネルギーは減衰定数と速度の2乗の積で決まりますから、減衰定数を大きくしても速度が減少すれ

ばモード減衰比は下がる場合があることに注意が必要です。例えば、空気圧ダンパのようにオリフィスによる減衰と空気の弾性が直列の系では、減衰を大きくしすぎるとその複素剛性が空気弾性よりも大きくなりオリフィスを通る空気の量（速度に相当）が大幅に減少してしまいます。その結果エネルギー消散が減少し減衰比は低下します。並列的な系ならこのような現象は生じませんので、減衰にとって直列的な系か並列的な系かを把握しておくことも重要だと思います。

減衰の小さい金属板の減衰性能を向上させるために粘弾性体のシートを貼り付ける方法がよく用いられます。「リブを有する金属板の全面に粘弾性体を貼ったのに、ほとんど効果がないモードがあって理由がよくわからない」という質問を受けたことがありましたが、2つのメカニズムで説明することができました。

一つは、粘弾性体は金属に比べて剛性が非常に小さく積層構造の中立面が金属板側に存在することになり、面外振動では中立面から距離のある粘弾性体の歪が金属板の歪よりも大きくなるため消散エネルギーが増加し減衰性能が向上しますが、面内振動では両者の歪は等しいので面外のような減衰性能は得られないことです。



図1 2層型制振構造

もう一つは、リブを有する板構造の振動モードの中にはリブの効果で曲げ歪よりも面内歪が支配的なモードが存在することです。曲げ歪主体であれば減衰性能は向上しますが、面内歪主体のモードでは粘弾性体の効果があまり得られません。それらを説明して納得していただきました。

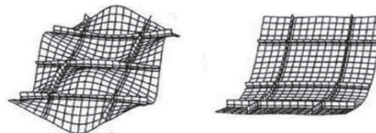


図2 曲げ歪主体モードと面内歪主体モード

非対称剛性を有する系の自励振動において、非対称剛性部分で系にエネルギーが流入し、減衰部分でエネルギーが消散することは自明のことですが、エネルギー流入、消散の働きがない対称剛性を変更しても安定性（減衰比）が大きく変化する場合があります。当初はその理由がよく理解できませんでしたが、非対称剛性による振動系へのエネルギー流入量は非対称の大きさだけでなく2点間の位相のずれの影響を受けること、対称剛性の変

更が位相のずれに働くことを理解した後は、納得することができました。以上のようにメカニズムを理解することは、対策を考える上で非常に有効でした。

2.2 物理の基本原則から現象を考える習慣

振動分野では、古くから多くの研究が行われ、定説になっている現象が多数ありますが、定説の結論のみを利用するのではなく、必ず物理の基本原則である運動方程式などから定説を導き、その現象の本質を理解した上で定説を利用するようにしていました。

一見定説で判断できそうな現象に出会った時に、定説を鵜呑みにせず原点に立ち戻って基礎式から考えた結果、新しいメカニズムの発見につながったことがありました。

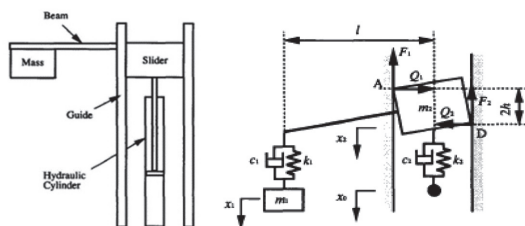


図3 縦型の油圧機械および2自由度モデル

油圧シリンダでは摺動部摩擦によるスティックスリップが発生することを何度も経験していましたし、定説にもなっていました。顧客に納入した油圧シリンダ駆動の縦型の油圧機械で自励振動が発生したという連絡を受け、スティックスリップである可能性を考え潤滑材を携帯して現地に赴き計測を行った結果、スティックスリップの原因である摺動部摩擦が関連する振動であることは確認できました。しかし、振動の成長のしかたや下方方向の動作でしか振動が生じないことに疑問を抱きました。定説を鵜呑みにせず、原点に戻って運動方程式を導出して検討した結果、スティックスリップではなく摺動部摩擦により生じる剛性行列の非対称項に起因する2自由度系の自励振動であることが判明し、潤滑の改善以外にも効果的な対策があることがわかりました。新たに考えたメカニズムで計測結果のすべてが説明できた時には、爽快感な達成感がありました。

2.3 大自由度系解析での見通しを得る方法

複雑な機械や構造物では、大自由度での振動解析をよく用いましたが、強制振動でも過渡的な振動でも、いきなり周波数応答や時刻歴応答計算を行い、良好な結果が得られるまで、試行錯誤を繰り返すことは効率的ではありません。実固有値解析や複素固有値解析を行い、モードごとの1自由度系としての現象に落とし込むことが現象を理解するためのスタートであると思います。それだけでは不十分でモードの特性である固有振動数や減衰率を支配しているのはどの部材かを知って対策の見通しを得ることが有効です。

実固有値解析なら感度解析かそれと等価なエネルギー分担率を用いることが効果的でした。複数の固有振動数が共振点付近に存在するような系での共振回避問題では、感度解析により各部材が各固有振動数にどのように

影響するかを把握することによって、無駄な試行錯誤を繰り返すことなく容易に最適な対策を見つけることができました。

2.1で示したリブを有する板構造に粘弾性体のシートを貼る場合でも、粘弾性体を貼る前の板構造で実固有値解析を行い、曲げ変形、面内変形による歪エネルギー分担率を別々に計算することが有効でした。その結果を用いれば、粘弾性を貼る効果があるモードかどうか、貼るとすればどの部分に貼るのが有効かなどを容易に把握することができました。

複雑な系での自励振動対策では大自由度での複素固有値解析をよく用いました。問題となるモードについて、どの部分を変更するのが効果的かを見つけるには、感度解析が有効でした。非対称剛性を有する系では、流入エネルギー、消散エネルギーの分布と感度が等価ではないので、左固有ベクトルを用いて感度を計算するプログラムを開発して対応しました。感度を用いれば、2.1で示したエネルギーの流入、消散を行わない対称剛性部分の減衰比に与える影響も容易に把握できました。

2.1から2.3に示したような経験を積んでいった結果、力学的な直感力が働くようになり、初めての現象に直面した場合でも現象の本質を短時間で把握できるようになりました。直感力は、振動問題の解決だけではなく、新しいアイデアを生み出す際にも役に立ったように思います。また、このような経験を通して物理現象を意識した研究スタイルが筆者に身についたように思います。

3. 高知工科大学での医療分野への参入と展開

想定外であった歩行訓練ロボットの開発プロジェクトへの参加をきっかけに医療分野に参入し、しばらくは総合技術で医療ロボットを製作する研究を進めましたが、徐々に機械振動分野での経験で身についた物理現象を意識した研究により核となる基盤技術を開発するスタイルへシフトしていきました。それが功を奏し、医療分野の研究は非常にうまく展開していきました。ここでは想定外の医療分野への参入から、うまく展開するようになるまでの経過について研究内容をまじえながら紹介します。

3.1 想定外であった医療分野への参入



図4 歩行訓練ロボット

大学に移った当初は、神戸製鋼での研究の延長で機械振動に関する研究を深堀するつもりでした。しかし、高知医科大学との共同研究として「歩行訓練ロボットの開発プロジェクト」が学長の主導で設定され、学科長からそのリーダーに指名されたことにより、機械振動に関する研究の枠を削り、約3年間プロジェクトを推進しました。その中には動力的な課題もありましたが、基本的

には総合技術での医療ロボット製作を目的とするプロジェクトで、医療分野、ロボット制御技術のいずれも経験のない分野で苦勞しましたが、潤沢なプロジェクト予算に助けられなんとか高性能の歩行訓練ロボットを製作することができました。このような想定外のことから、医療分野に参入することになりました。

プロジェクトリーダーに指名されたことは科研費の申請にも影響しました。初めての科研費は、長年研究してきた機械振動分野で申請するつもりでしたが、ここで再び学科長からの依頼によりプロジェクト関連テーマで申請することになりました。自信はありませんでしたが動力的な内容も加味して申請した結果、運よく採択されました。

プロジェクト終了後は、また機械振動に専念することも頭にありましたが、プロジェクトの関連で科研費が採択されたこととリハビリテーションを専門とする医療福祉系大学の教員が筆者の研究室に博士課程学生として入ってきたことに後押しされ、プロジェクトの延長上である移乗介助の支援を取り上げ医療ロボット関連の研究を継続しました。2匹目のどじょうをねらって、そのテーマで科研費を申請したところ、また運よく採択されました。このような展開により、経験の少ない医療ロボット関連の研究でしたが医療分野に徐々に深入りしていくことになりました。

3.2 神戸製鋼での経験を生かした研究の開始

前述のような医療ロボット関連の研究は、工学側で創造性を追求するよりも既存のメカトロ技術を組み合わせた総合技術で医療側の重要課題を解決することを目的とする研究でした。科研費にも採択され、やりがいのある研究ではありましたが、工学側での創造的な研究にこだわりたい気持ちが強くなり、神戸製鋼での機械力学研究の経験を生かした基盤技術研究の可能性を探るようになりました。

プロジェクト期間中に歩行に関する研究動向を調べた結果、歩行能力は人間にとって非常に重要な能力の一つで研究が活発に進められていることがわかりました。歩行に関する研究では逆力学によるアプローチが多く、非常に広いスペースに設置された複数台のカメラと床面に固定された床反力計からなる設置式の計測分析システムが長年使用され、そのようなシステムを使用することが常識となっていました。もし、ウェアラブル化ができれば、広い場所も不要で使用条件が大幅に向上するのですが、床反力計のウェアラブル化が極めて困難とされていたため研究は進んでいませんでした。そこで、もし床反力計のウェアラブル化に成功すれば工学側での創造的な基盤技術につながると考え、困難は覚悟の上で研究に取り組むことにしました。

静力学ではありましたが2.2で示した例のように原点に戻って力のつり合いから考え、従来にはない新しいメカニズムの開発を目指しました。予想通り簡単には進まず、何度か壁にぶち当たりましたが、粘り強く研究を継続した結果、約5年経過した時点で姿勢センサ内蔵の超薄型、超軽量のセンサプレートの開発に成功し、それを

2枚履物に装着したウェアラブル床反力センサシステムを構築することができました(1)。医療関係者からも良い評価が得られ、米国、カナダ、ポルトガルの大学から共同研究の申し入れがありました。それ以前にはリジェクトされることもあった海外ジャーナルへの投稿論文は、この頃からは、掲載される数が急増するなど一気に流れが変わり、科研費も関連研究を含め4回連続で採択され予算額も大きくなっていきました。その結果、研究設備も充実させることができ、学外の方々の協力も得て関連研究を大きく展開していくことができました。

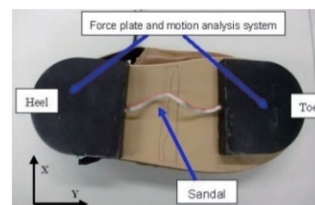


図5 ウェアラブル床反力センサシステム

医療ロボット関連の研究でも、総合技術によるロボット製作ではなく工学側での創造的な基盤技術開発をねらって、機構・電気制御系での物理的な現象を意識した基礎的な研究を進めることにしました。

機構系の動作で発電して生じる電圧でそのまま別の機構系を駆動すれば面白いメカニズムになるのではないかと考え、機構・電気連成系での物理の基本原則に基づいて理論検討した結果、「センサなしでも力覚を有し、省エネルギーで遠隔での駆動ができ、減速機なしで力の拡大も可能な双方向のマスタースレーブ」が発見されました(2)。簡単なシステムであるにもかかわらず多くの機能を有していたので応用範囲も多岐にわたりました。まず、双方向、力覚、遠隔の機能を活用して「自身の健常部の力で障害部のリハビリを行う装置」を開発し、続いて力覚、遠隔、拡大機構、省エネの機能を活用して「バッテリーが長持ちし力覚を有する電動義手」を開発しました。

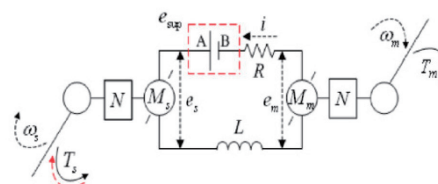


図6 マスタースレーブの基本概念

その後、マスタースレーブのメカニズムに興味を持った海外の工学研究者や国内の医療関係者が実験装置の見学に訪れるようになりました。工学研究者とはマスタースレーブの基本機能を高度化する研究を進め、医療関係者とは、マスタースレーブの考え方を拡張し「力覚を有する手術ロボットのための基礎技術」に関する共同研究を開始し、興味深い結果が得られました。

以上のように、神戸製鋼時代に培った物理現象を意識した研究スタイルは、医療分野でも大いに役に立ったように思います。また、医療分野は機械力学研究者が取り組める重要課題が多数存在する非常に魅力的な分野であるように感じました。

3.3 医療分野の研究を支えた機械振動の研究

医療分野での研究は運にもめぐまれ予想以上にうまく展開できましたが、リスクのある医療分野の研究で思い切った決断ができたのは、機械振動分野でコンスタントに成果を出せていたことに支えられていたからだと思います。

機械の振動に関する研究としては、医療分野へ参入したことにより研究の範囲を絞り、ダンピング関連を中心に研究を進めました。鈴木浩平先生から引き継いだダンピングに関する研究分科会で主査として活動するとともに、制振構造や動吸振器のエネルギー消散メカニズムなどに着目した基礎的な研究を続けました。コンスタントに論文投稿を行い、「加振周波数の変動範囲を考慮した動吸振器の設計法」では、日本機械学会論文賞をいただきました。以上のように機械振動分野で安定した研究活動を継続できていたからこそ、リスクのある医療分野でも焦ることなく研究に注力することができたように思います。新たにリスクのある研究に参入する場合には、それとは別に安定して成果を出せる研究分野を有していることが新たな研究を思い切って進めることを支えてくれるように思います。

4. 複数分野での研究を経験して感じたこと

筆者は、機械、医療分野の研究に加えてスポーツ工学の研究にも携わりました。複数の分野で研究を進めるなかで、見た目は全く違う別の分野での現象のなかに意外と同じようなメカニズムで発生している現象があることに気づき、興味を持ちました。

その一例が、剛体のロッキングと人間の歩行や走行、およびその中間に位置する受動歩行ロボットでのエネルギー消散メカニズムです。

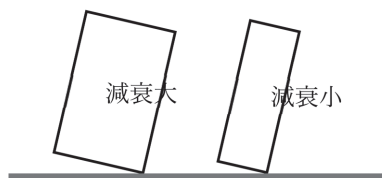


図7 剛体のロッキング

剛体のロッキングとは底面が浮き上がりカタカタと振動する現象で、地震加速度を受けた場合などに発生しますが、その減衰メカニズムは、ダンパや制振材料の減衰メカニズムとは大きく異なります。浮き上がっていた剛体の一端が接地する時に跳ね返らない、すなわち塑性衝突であると仮定し、角運動量保存則を用いれば減衰比が簡単に得られます。材料減衰に関係なく剛体の縦と横の比のみで減衰性能が決まり、幅が広いほど減衰は大きくなります。塑性衝突と言っても端部が塑性変形するわけではないので、おそらく、衝突時に発生した波動が周辺に伝播することによるエネルギーの逸散ではないかと推察しています。

これとほぼ同様のメカニズムでエネルギーが消散されるのが、受動歩行ロボットの足が着地する時の現象です。受動歩行ロボットで歩幅が大きくなれば、エネルギー効率が低下することは剛体のロッキングの結果から容易に

想像できました。

人間の歩行、走行は、受動歩行ロボットよりも複雑で、力学的なエネルギー消費は波動による逸散だけでなく人体内部にも存在すると考えられますが、歩幅やストライドが大きいほど力学エネルギー消費が大きくなることが推察されます。

剛体のロッキングに関して筆者が実施した実験で思いがけない結果が得られました。滑りを防止するために幅広い剛体の下に粘弾性体のシートを敷いてロッキングさせた時に、床材よりも減衰が大きい粘弾性体であるにもかかわらず、その弾性部分が効いてロッキングの減衰比が低下するを経験しました。このことに着目し、受動歩行ロボットの脚部に弾性の要素を加える効果について数値シミュレーションにより検討した結果、塑性衝突によるエネルギー逸散を減少させ、エネルギー効率を大幅に改善できることを確認しました。また、具体的な検討は行っていませんが、人間の歩行、走行での着地時の衝突によるエネルギー消散に弾性がどのように影響するかを考えてみるのもおもしろいと思いました。このように異分野での現象との共通点を見つけることにより現象の理解が深まり、面白さも感じました。

上述の例とは少し異なりますが、機械分野での研究が医療分野の研究の発想につながり、その成果がまた機械分野の別のジャンルの研究につながったことがありました。

最初は、機械分野のセミアクティブダンパやエネルギー回生型動吸振器の考え方をヒントに医療分野でエネルギー回生の短下肢装具を開発しその有用性を確認しました。次にその研究で開発したエネルギー回生メカニズムにヒントを得て、機械分野での油圧系の省エネルギー化の研究を始め良好な結果が得られました。

以上のように、異なった分野での研究を経験することによって発想が豊かになったような気がします。

5. おわりに

46年間の研究生活では、物理現象を意識した研究の面白さを体感することができ、またそのことにより医療分野でも予想以上に研究が進みました。そのようにうまく推移したことについては、運に恵まれたこともありましたが、多くの人と出会い信頼関係を構築することができたことが大きかったように思います。神戸製鋼および高知工科大学で研究を進める中で、多くの方にいろいろな形で大変お世話になりました。深く感謝致します。

参考文献

- (1) Liu, T., Inoue, Y., Shibata, K., Shiojima, K., A mobile force plate and three-dimensional motion analysis system for three-dimensional gait assessment, IEEE Sensors Journal, Vol.12-5, 2012, 1461-1467.
- (2) Liu, T., Li, C., Inoue, Y., Shibata, K., Bilateral reaction force/torque sensing in a master-slave robot system without mechanical sensors, Sensors, Vol.10-8, 2010, 7134-7145.

No. 22-9

Dynamics and Design Conference 2022

総合テーマ：「再会、そして再開。～対話で拓くダイナミクスの地平～」

URL <https://www.jsme.or.jp/conference/dmconf22>

企画 機械力学・計測制御部門
開催日 2022年9月5日(月)～8日(木)
会場 秋田県立大学 本荘キャンパス
協賛 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 自動車技術会, 情報処理学会, 人工知能学会, 精密工学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 土木学会, 日本音響学会, 日本原子力学会, 日本建築学会, 日本工学教育協会, 日本航空宇宙学会, 日本神経回路学会, 日本スポーツ産業学会, 日本設計工学会, 日本船舶海洋工学会, 日本鉄鋼協会, 日本トライボロジー学会, 日本知能情報フェジ学会, 日本フルードパワーシステム学会, 日本ロボット学会, 農業食料工学会, バイオメカニズム学会, 日刊工業新聞社, 日本地震工学会 (予定含む)

要旨 Dynamics and Design Conference 2022 (D&D2022) は, 「再会、そして再開。～対話で拓くダイナミクスの地平～」を総合テーマとして, 秋田県由利本荘市で開催されます。例年のように, 機械力学・計測制御分野に関連したオーガナイズド・セッションの各テーマのほか, 日本機械学会分野連携企画として, 交通・物流部門との合同セッションにおける研究発表を募集いたします。また特別講演, 懇親会, 機器展示, フォーラム, 特別

企画などの付随行事も予定しております。優秀な講演発表者は, 学会(若手優秀講演フェロー賞)および当部門(オーディエンス表彰)の規定に従って表彰されます。今回は3年ぶりとなる対面での開催を前提に準備を進めております。雄大な鳥海山の麓に集い, 再開し, 大いに語り合い, 新たな出会いやアイデアを得て, 未来に向けた創造の活力を得ようではありませんか。この秋田の地でのD&D2022が機械力学・計測制御分野の活動の地平を拓き, 日本の工学の活性化につながることを期待し, 多くの皆様のご参加をお待ちしております。

* Covid-19感染症の流行状況によりやむを得ずオンライン開催に変更することもあります。

講演申込締切 2022年3月18日(金)

申込方法・募集分野

上記のホームページにてご確認ください。

論文提出締切 2022年8月5日(金)

問合せ先

D&D2022 実行委員会 (dd2022@jsme.or.jp)

D&D2022 実行委員長 富岡 隆弘 (秋田県立大学)

副委員長 井上 剛志 (名古屋大学)

幹事 瀧上 唯夫 (鉄道総研)

年間カレンダー

機械力学・計測制御部門講演会等行事予定一覧

- 2022年度の開催予定行事について -

前年度より引き続き, 新型コロナウイルス感染症の拡大の影響に応じて, 各行事のスケジュールや開催形態に大きな変更が予想されます。詳細につきましては, 部門ホームページまたは学会ホームページにて最新情報をご確認ください。

開催行事予定 (講演会)

開催日	名称	開催地※
2022年 5月11日～13日	第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD34)	仙台市宮城野区 文化センター
2022年 9月 5日～ 8日	Dynamics and Design Conference 2022	秋田県立大学 本荘キャンパス
2022年 9月11日～14日	2022年度年次大会	富山大学 五福キャンパス
2022年11月頃	第20回評価・診断に関するシンポジウム	調整中

開催行事予定 (講習会)

開催日	名称	開催地※
2022年 9月頃	講習会 振動モード解析実用入門-実習付き-	調整中
2022年10月頃	振動分野の有限要素解析講習会(計算力学技術者2級認定試験対策講習会)(関西地区会場)	調整中
2022年10月頃	振動分野の有限要素解析講習会(計算力学技術者2級認定試験対策講習会)(関東地区会場)	調整中
2022年12月頃	講習会 納得のロータ振動解析:講義+HIL実験	調整中
2023年 1月頃	講習会 回転機械の振動	調整中
日程調整中	講習会 マルチボディシステム運動学の基礎	調整中
日程調整中	講習会 マルチボディシステム動力学の基礎	調整中

※情勢にあわせてオンライン開催となる可能性もございます。

部門主催講習会情報

総務委員会 委員長 瀧上 唯夫 (鉄道総研)

企画委員会 委員長 井上 剛志 (名古屋大学)

今年度は、本部門の主催講習会を以下の通り開催してまいりました。

- 「振動モード解析実用入門」
(2021年9月3日, オンライン開催, 受講55名)
- 「振動分野の有限要素解析講習会」
(計算力学技術者2級認定試験対策講習会)
(2021年10月30日, オンライン開催, 受講35名)
- 「納得のロータ振動解析」
(2021年12月20日, オンライン開催, 受講14名)
- 「回転機械の振動」
(2022年1月18-19日, オンライン開催, 受講31名)

●「マルチボディシステム運動学の基礎」
(2022年1月27日, オンライン開催, 受講28名)

●「マルチボディシステム動力学の基礎」
(2022年1月28日, オンライン開催, 受講24名)

今年度は全てオンライン開催となりましたが、来年度は対面での開催も視野に各種講習会の開催を企画しております。詳細決定後にインフォメーションメール等でご案内いたしますので、積極的なご参加をお願い申し上げます。

また、ご希望の講習会テーマや、講習を聞きたい講師の方などがございましたら、総務委員会または企画委員会までお知らせ下さい。

表彰委員会からのお知らせ

委員長 大浦 靖典 (滋賀県立大)

副委員長 長瀬 賢二 (和歌山大)

－ 2020年度部門表彰式の報告 －

ご報告が大変遅くなり、誠に申し訳ございません。2019年度の部門賞と一般表彰の受賞者の紹介が、2020年9月、オンラインで開催されたD&D Conference 2020にて、神谷 恵輔2019年度部門長兼D&D Conference 2020実行委員長により、行われました。オンライン開催のため、残念ながら表彰式は行われませんでした。3名の部門賞受賞者と6名の部門一般表彰受賞者に表彰状が贈呈されました。受賞者は下記の通りですが、受賞者の紹介と業績等の詳細は、D&D2020のWEBページ、日本機械学会の当部門のWEBページの部門賞に掲載されておりますのでご参照ください。

受賞者の栄誉をたたえるとともに今後のますますのご活躍を祈念いたします。

(所属等は受賞決定当時のもの)

1. 部門賞受賞者
部門功績賞 渡辺 亨 (日本大学 教授)
学術業績賞 成田 吉弘 (北海道大学 名誉教授)
パイオニア賞 道辻 洋平 (茨城大学 准教授)
2. 部門一般表彰受賞者
部門貢献表彰 佐々木 卓実 (北九州市立大学 准教授)
オーディエンス表彰
(D&D Conference 2019 優秀発表者)
住川 大樹 (九州大学)
富田 直 (豊田中央研究所)
新竹 純 (電気通信大学)
(LIFE 2019 優秀発表者)
廣瀬 圭 (テック技販)
(第16回「運動と振動の制御」シンポジウム 優秀発表者)
土方 亘 (東工大)

－ 2021年度部門表彰式の報告 －

2020年度の部門賞と一般表彰の受賞者の紹介が、2021年9月オンラインで開催されたD&D Conference 2021にて、中野 公彦2020年度部門長兼D&D Conference 2021実行委員長により、行われました。オンライン開催のため、残念ながら表彰式は行われませんでした。6名の部門賞受賞者と3名の部門一般表彰受賞者に表彰状が贈呈されました。受賞者は下記の通りですが、受賞者の紹介と業績等の詳細は、D&D2021のWEBページ、日本機械学会の当部門のWEBページの部門賞に掲載されておりますのでご参照ください。

受賞者の栄誉をたたえるとともに今後のますますのご活躍を祈念いたします。

(所属等は受賞決定当時のもの)

1. 部門賞受賞者
部門功績賞 河村 庄造 (豊橋技術科学大学 教授)
部門国際賞 渡辺 亨 (日本大学 教授)
学術業績賞 辻内 伸好 (同志社大学 教授)
技術業績賞 本家 浩一 (株式会社神戸製鋼所)
パイオニア賞 長瀬 賢二 (和歌山大学 教授)
パイオニア賞 佐伯 暢人 (芝浦工業大学 教授)
2. 部門一般表彰受賞者
部門貢献表彰 高木 賢太郎 (豊橋技術科学大学 教授)
オーディエンス表彰
(D&D Conference 2020 優秀発表者)
浅沼 春彦 (金沢大学)
米沢 平成 (北海道大学)

企画委員会からのお知らせ

委員長 井上 剛志 (名古屋大)
幹事 星野 洋平 (北見工業大)

企画委員会は、次期以降の当部門の活動について広く扱う委員会で、今年度は部門活性化のための「部門運営に関わる立案と学術交流活動に関わる企画立案」に注力いたしました。まず、運営委員会内で調査を実施し、現在も「機械学会への期待は変わらず大きい」ことが確認できました。つぎに、機械力学・計測制御部門における産学交流を深めるための企業ニーズアンケートを、運営委員会内で試行的に実施しました。

アンケート目的は、下記の3点としました。

- ・部門における技術者・研究者どうしの出会いと交流の深化の機会を増やす。
- ・企業や企業会員のニーズを大会会員（特に若手）が知り、学術的意義と工学的価値の双方を意識した研究テーマの検討を深めることに資する。
- ・企業会員（特に若手）が大会会員と気軽に新たな接点をもつ機会を得る。

アンケート結果をまとめると、現在、当部門では下記の項目に企業からの要望・興味があることが得られました。

- ・状態監視
- ・AIの導入
- ・新しい原理のセンサーの開発
- ・自動運転関連

今回は、まずは試行として実施したアンケート結果を本ニュースレターにて部門登録会員の皆様にお知らせします。このようなアンケートは、分野を横断して企業で求められている新鮮な情報を収集して部門登録会員の皆様に提供できる良い機会となると考えております。このアンケート結果が部門登録会員の皆様の念頭におかれ、産業界と学会の連携を深める新たな研究テーマの創出による産学交流の深化のきっかけとなることを期待します。また、企画委員会としては、成果がすぐに現れなくても、このアンケートを当面は何らかの形で毎年継続して実施し、情報を追加しつつ情報を発信することを考えています。これらの調査と情報発信が将来的に部門の良い循環につながると期待しています。

資格認定委員会からのお知らせ

委員長 山崎 徹 (神奈川大)

日本機械学会「計算力学技術者」認定事業「振動分野の有限要素法解析技術者」の認定試験（初級・2級・1級）は、2020年度は中止となりましたが、2021年度はCBT（Computer Based Testing）式にて実施されました。

振動分野では、1級試験に92名、2級に178名の申し込みがあり、2021年12月9日(木)に2級、12月16日(木)に1級の試験が実施されました。初のCBT式での試験となりましたが、無事に終了することができました。合否発表は3月上中旬となります。

また、計算力学技術者資格2級の受験をサポートするために、機械力学・計測制御部門が開催しております講習会につきましても、2021年度は10月30日(土)にオンラインにて開催いたしました。2022年度の開催形態については今後のCovid-19によるところがあり、現時点では未定です。講習会の開催が決定されましたら、機械力学・計測制御部門 ホームページ内のイベントカレンダー (<https://www.jsme.or.jp/dmc/Lecture/index.html>) で案内いたしますので、ご確認ください。