ISSN 1340-6698

Dynamics, Measurement and Control Division Newsletter

DYNAMICS

機械力学・計測制御部門ニュースNo.74 July 16,2024

非線形波動現象の集中系モデルおよび非圧縮性流れのモード解析

九州大学大学院　工学研究院　機械工学部門　石川　諭

1．はじめに

2022年度日本機械学会機械力学・計測制御部門パイオニア賞を賜り，大変光栄に存じます．それに伴いニュースレターの執筆という貴重な機会を頂きましたので，受賞理由となった集中系モデルに関する研究の他に，最近始めた非圧縮性流体流れのモード解析を紹介いたします．

2．集中系モデル

配管内の圧力波，音響現象，血管内脈波現象，貯蔵容器内のスロッシング現象などのような流体を媒体とする波動現象は，工学的見地から解決すべき課題の多い重要な問題であるものの，非線形性の影響が大きく現れるため解析の難しい現象である．このような現象に対しては，連続の式，ナビエ・ストークス方程式などの流体の基礎式に差分法，有限要素法などを適用して解析する手法が多い．これに対して筆者らは，流体を質量，減衰および非線形ばねからなる集中系で表現するモデル化手法を提案している．本手法は，従来の手法のように波動現象を偏微分方程式で表すのではなく，流体粒子を集中系でモデル化した微小要素間の非線形相互作用を直接モデルに組み込む手法であり，従来の手法と比較して支配方程式の導出方法や取り扱いが容易になるだけでなく，自由度の縮小が可能になるなどの特長を有している．これまでに，筆者らは本モデル化手法を用いて配管内非線形圧力波現象[1]，弾性管内非線形圧力波[2]，血管内脈波[3]，気液二相流中圧力波現象[4]，２次元音響と構造物振動の連成解析[5]，スロッシング現象[6-7]などの非線形波動現象を取り扱ってきた．次章では，容器内のスロッシング現象に対する集中系モデルを紹介する．

3．スロッシング現象の集中系モデル[7]

図１左図に示すような容器を水平方向加振したときのスロッシング（液面の揺動）現象を考える．液体は非圧縮性流体と仮定する．図１右図のように $N_x \times N_z$ 個の要素に分割し，要素の左右に質点を置く（図２）．各質点は図２に示すように水平方向変位 $\delta x_{i,j}$ をもち，質点の質量mは要素の質量を考慮して次式のようになる．

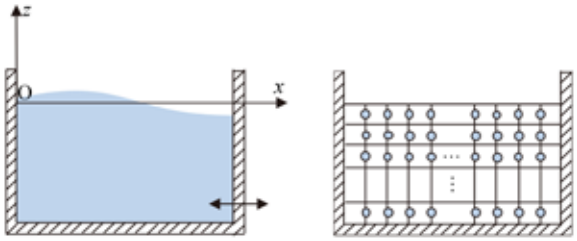


図１　容器内のスロッシング，要素分割

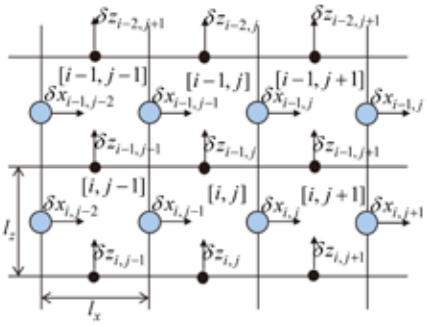
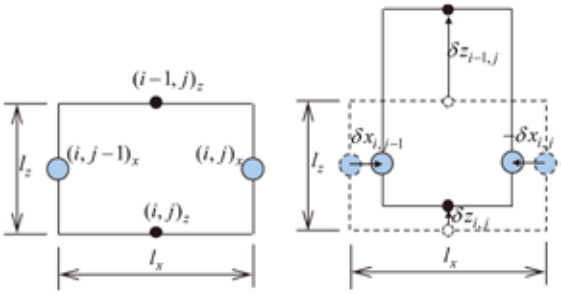


図２　x 方向質点と z 方向節点



(a) 変形前　(b) 変形後

図３　要素変形

$$m = \rho l_x l_z \tag{1}$$

ここで，ρは液体の密度，l_x は要素のx方向長さ，l_z は要素の z 方向長さである．さらに，図2の各要素の上下の節点では，z 方向変位 $\delta z_{i,j}$ をもつ．

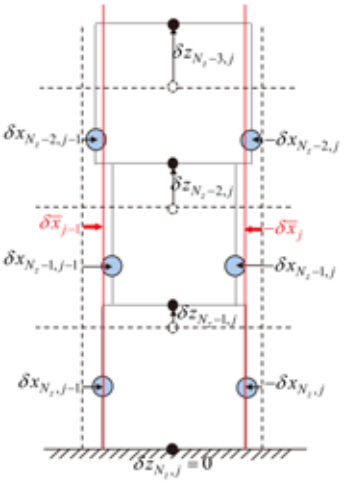
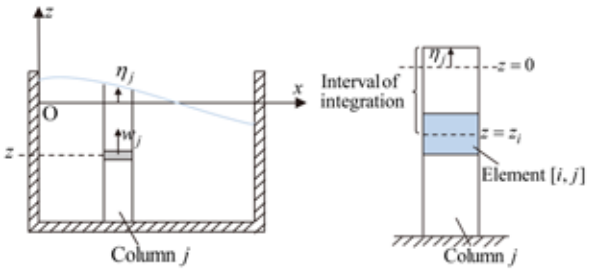


図 4　底面からの変形



(a) 検査体積　　(b) 積分範囲

図 5　j 列内の検査体積と積分範囲

3.1 要素の変形

図 3 に示すように，各要素は質点変位 $\delta x_{i,j}$ と z 方向変位 $\delta z_{i,j}$ とともに変形する．非圧縮性流体の仮定より，要素面積が変化しないことを考慮すると，質点変位と z 方向変位の間には次式の関係がある．

$$\delta z_{i-1,j} - \delta z_{i,j} = -\frac{l_z\left(\delta x_{i,j} - \delta x_{i,j-1}\right)}{l_x + \delta x_{i,j} - \delta x_{i,j-1}} \tag{2}$$

図 4 のように質点の変位 $\delta x_{i,j}$ が与えられたときの鉛直方向の要素変化を考える．底面では，$\delta z_{N_z,j} = 0$ となるため，底面からの式(2)の総和を考慮して，

$$\delta z_{i,j} = -\sum_{k=i+1}^{N_z} \frac{l_z\left(\delta x_{k,j} - \delta x_{k,j-1}\right)}{l_x + \delta x_{k,j} - \delta x_{k,j-1}} \tag{3}$$

となる．ただし，分母の質点変位 $\delta x_{k,j}$，$\delta x_{k,j-1}$ には，横に存在する要素とのオーバーラップやギャップを避けるため，質点変位の鉛直方向の平均値（図 4 の赤線）を次式のように定義する．

$$\delta \overline{x}_j = \frac{1}{N_z}\sum_{i=1}^{N_z} \delta x_{i,j} \tag{4}$$

式(4)を用いて，式(3)を次式に変更すると，

$$\delta z_{i,j} = -\sum_{k=i+1}^{N_z} \frac{l_z\left(\delta x_{k,j} - \delta x_{k,j-1}\right)}{l_x + \delta \overline{x}_j - \delta \overline{x}_{j-1}} \tag{5}$$

液面変位 η_j は，水面（上端）の z 方向変位 $\delta z_{0,j}$ とする．

3.2 復元力

液面の変位があるときの各質点にかかる復元力を導出する．図 5 (a)の j 列中にある微小要素の鉛直方向の流体の運動方程式は，

$$\frac{\partial w_j(z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_j(z,t)}{\partial z} - g \tag{6}$$

ここで，w_j は鉛直方向速度，p_j は j 列内の圧力，g は重力加速度である．図 5 (b)の要素 $[i,j]$ の中心点の鉛直方向座標は $z_i = -(i-1/2)l_z$ であるので，図 5 (b)に示すように式(6)を z_i から η_j まで積分すると（上端の要素 $[i=1]$ に関しては，$(\eta_j - l_z)/2$ から η_j まで積分），要素 $[i,j]$ 内の圧力は次式のようになる．

$$\left.\begin{aligned} p_{1,j} &= \rho\int_{(\eta_j - l_z)/2}^{\eta_j} \frac{\partial w_j}{\partial t}dz + \frac{1}{2}\rho g\left(\eta_j + l_z\right) \quad (i=1) \\ p_{i,j} &= \rho\int_{z_i}^{\eta_j} \frac{\partial w_j}{\partial t}dz + \rho g\left\{\eta_j + (i-1)l_z + \frac{l_z}{2}\right\} \quad (i \ge 2) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

各圧力の右辺第 2 項は液面からの静水圧を表し，第 1 項は動水圧を表す．式(7)の右辺第 1 項を考慮するために，z 方向変位 $\delta z_{i-1,j}$，$\delta z_{i,j}$ の時間 2 階微分の平均を用いて，要素 $[i,j]$ 中央の加速度を次式のように定義する．

$$\delta \ddot{z}_{i,j} = \frac{\delta \ddot{z}_{i-1,j} + \delta \ddot{z}_{i,j}}{2} \tag{8}$$

式(7)の右辺第 1 項の積分を式(8)の加速度と鉛直方向長さの積として，次式のように取り扱う．

$$\left.\begin{aligned} \int_{(\eta_j - l_z)/2}^{\eta_j} \frac{\partial w_j}{\partial t}dz &= \frac{\delta \ddot{z}_{1,j}\left(\eta_j + l_z\right)}{2} \\ \int_{z_i}^{\eta_j} \frac{\partial w_j}{\partial t}dz &= \delta \ddot{z}_{1,j}\left(l_z + \eta_j\right) + \sum_{k=2}^{i-1} \delta \ddot{z}_{k,j} l_z + \delta \ddot{z}_{i,j}\frac{l_z}{2} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

要素 $[i,j]$ 内の圧力 $p_{i,j}$ から質点 (i,j) にかかる力を考慮し，平衡状態における力を差し引くと，復元力は以下のようになる．

$$\delta f_{i,j}^k = \alpha_{i,j} + \beta_{i,j} \tag{10}$$

ここで，$\alpha_{i,j}$ は静水圧による復元力であり，

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{1,j} &= \rho g l_z \eta_j + \frac{1}{2}\rho g \eta_j^2 \quad (i=1) \\ \alpha_{i,j} &= \rho g l_z \eta_j \quad (i \ge 2) \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

$\beta_{i,j}$ は動水圧による復元力であり，次式となる．

$$\left.\begin{aligned} \beta_{1,j} &= \frac{1}{2}\rho \delta \ddot{z}_{1,j}\left(\eta_j + l_z\right)^2 \\ \beta_{i,j} &= \rho\left\{\delta \ddot{z}_{1,j} l_z\left(\eta_j + l_z\right) + \sum_{k=2}^{i-1} \delta \ddot{z}_{k,j} l_z^2 + \frac{1}{2}\delta \ddot{z}_{i,j} l_z^2\right\} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

このモデルの非線形性として，以下の4つがある．

(i) 式(11)中に液面変位 η_j があり，これは式(5)の $i=0$ の場合に相当する．式(5)の分母の平均変位 $\delta \overline{x}_j$ に由来する要素変形による静水圧の非線形性．

(ii) 式(11)第 1 式の右辺第 2 項による，水面変位による静水圧の非線形性．

(iii) 式(12)の中に要素中央の加速度 $\delta \ddot{z}_{i,j}$ が存在し，これは式(5)の 2 階微分となる．式(5)の 2 階微分に由来する要素変形による動水圧の非線形性．

(iv) 式(12)第 2 式の右辺第 1 項による，水面変位 η_j による動水圧の非線形性．

3.3 運動方程式と自由度の縮小

質点 (i,j) に要素 $[i,j]$ と $[i,j+1]$ からかかる復元力を考慮して，質点 (i,j) の運動方程式は

$$m\delta \ddot{x}_{i,j} = \alpha_{i,j} + \beta_{i,j} - \alpha_{i,j+1} - \beta_{i,j+1} + f_{i,j}^c - f_{i,j+1}^c + f_{i,j}^e \tag{13}$$

ここで，$f_{i,j}^c$ は要素 $[i,j]$ からかかる減衰力，$f_{i,j}^e$ は質点

にかかる外力である．この運動方程式を並べて行列表示すると，

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{G}+\boldsymbol{f} \tag{14}$$

ここで，$\boldsymbol{f}$は外力を並べたベクトル，$\boldsymbol{G}$は式(11)第１式の右辺第２項であり，次式で定義される．

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{G}&=\frac{1}{2}\rho g\left[\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{T}}\ \ \boldsymbol{0}\ \cdots\ \boldsymbol{0}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\sigma}&=\left[\eta_1^2-\eta_2^2\ \ \eta_2^2-\eta_3^2\ \cdots\ \eta_{N_x-1}^2-\eta_{N_x}^2\right]^{\mathrm{T}}\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

$\boldsymbol{x}$は質点の変位ベクトルであり，次式のようになる．

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}&=\left[\boldsymbol{x}_1^{\mathrm{T}}\ \ \boldsymbol{x}_2^{\mathrm{T}}\ \cdots\ \boldsymbol{x}_{N_z}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{x}_i&=\left[\delta x_{i,1}\ \ \delta x_{i,2}\ \cdots\ \delta x_{i,N_x-1}\right]^{\mathrm{T}}\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

$\boldsymbol{x}_i$はi行目の質点の変位を並べたベクトルである．式(12)の$\beta_{i,j}$は加速度の関数であるため，質量行列$\boldsymbol{M}$は$\beta_{i,j}$と質点の質量mが含まれる（行列の中身は文献[7]を参照）．式(11)の$\alpha_{i,j}$は変位の関数であるため剛性行列$\boldsymbol{K}$の中に含まれ，剛性行列は次式のようになる．

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{K}}&\hat{\boldsymbol{K}}&\cdots&\hat{\boldsymbol{K}}\\ \hat{\boldsymbol{K}}&\hat{\boldsymbol{K}}&\cdots&\hat{\boldsymbol{K}}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \hat{\boldsymbol{K}}&\hat{\boldsymbol{K}}&\cdots&\hat{\boldsymbol{K}}\end{bmatrix},\ k_j=\frac{\rho g l_z^2}{l_x+\delta\overline{x}_j-\delta\overline{x}_{j-1}}\\ &\hat{\boldsymbol{K}}=\begin{bmatrix}k_1+k_2&-k_2&0&\cdots&0\\ -k_2&k_2+k_3&-k_3&\ddots&\vdots\\ 0&\ddots&\ddots&\ddots&0\\ \vdots&\ddots&-k_{N-2}&k_{N-2}+k_{N-1}&-k_{N-1}\\ 0&\cdots&0&-k_{N-1}&k_{N-1}+k_N\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \tag{17}$$

剛性行列$\boldsymbol{K}$の中には同じ行列$\hat{\boldsymbol{K}}$が並んでいるが，水面の変位η_jにより，j列内の要素に含まれるすべて質点に同様に復元力がかかるためである．この特性を利用して，自由度を縮小する．

図6のように，$(N_x-1)\times N_z$個の質点を(N_x-1)個の質点に縮小する．比例粘性減衰を仮定すると式(14)の運動方程式は次式のように書くことができる．

$$\left.\begin{aligned}&\begin{bmatrix}\mathbf{M}_{11}&\mathbf{M}_{12}&\cdots&\mathbf{M}_{1N_z}\\ \mathbf{M}_{21}&\mathbf{M}_{22}&\cdots&\mathbf{M}_{2N_z}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \mathbf{M}_{N_z1}&\mathbf{M}_{N_z2}&\cdots&\mathbf{M}_{N_zN_z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{x}}_1\\ \ddot{\mathbf{x}}_2\\ \vdots\\ \ddot{\mathbf{x}}_{N_z}\end{bmatrix}+\gamma\begin{bmatrix}\tilde{\mathbf{K}}&\tilde{\mathbf{K}}&\cdots&\tilde{\mathbf{K}}\\ \tilde{\mathbf{K}}&\tilde{\mathbf{K}}&\cdots&\tilde{\mathbf{K}}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \tilde{\mathbf{K}}&\tilde{\mathbf{K}}&\cdots&\tilde{\mathbf{K}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{x}}_1\\ \dot{\mathbf{x}}_2\\ \vdots\\ \dot{\mathbf{x}}_{N_z}\end{bmatrix}\\ &+\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{K}}&\hat{\mathbf{K}}&\cdots&\hat{\mathbf{K}}\\ \hat{\mathbf{K}}&\hat{\mathbf{K}}&\cdots&\hat{\mathbf{K}}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \hat{\mathbf{K}}&\hat{\mathbf{K}}&\cdots&\hat{\mathbf{K}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{x}_1\\ \mathbf{x}_2\\ \vdots\\ \mathbf{x}_{N_z}\end{bmatrix}=\frac{1}{2}\rho g\begin{bmatrix}\boldsymbol{\sigma}\\ \mathbf{0}\\ \vdots\\ \mathbf{0}\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

ここで，γは比例粘性減衰の係数である．式(18)の２行目以降から１行目を引くと，

$$\left.\begin{aligned}&\begin{bmatrix}\mathbf{M}_{11}&\mathbf{M}_{12}&\cdots&\mathbf{M}_{1N_z}\\ \tilde{\mathbf{M}}_{21}&\tilde{\mathbf{M}}_{22}&\cdots&\tilde{\mathbf{M}}_{2N_z}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \tilde{\mathbf{M}}_{N_z1}&\tilde{\mathbf{M}}_{N_z2}&\cdots&\tilde{\mathbf{M}}_{N_zN_z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\mathbf{x}}_1\\ \ddot{\mathbf{x}}_2\\ \vdots\\ \ddot{\mathbf{x}}_{N_z}\end{bmatrix}+\gamma\begin{bmatrix}\tilde{\mathbf{K}}&\tilde{\mathbf{K}}&\cdots&\tilde{\mathbf{K}}\\ \mathbf{0}&\mathbf{0}&\cdots&\mathbf{0}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \mathbf{0}&\mathbf{0}&\cdots&\mathbf{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{x}}_1\\ \dot{\mathbf{x}}_2\\ \vdots\\ \dot{\mathbf{x}}_{N_z}\end{bmatrix}\\ &+\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{K}}&\hat{\mathbf{K}}&\cdots&\hat{\mathbf{K}}\\ \mathbf{0}&\mathbf{0}&\cdots&\mathbf{0}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \mathbf{0}&\mathbf{0}&\cdots&\mathbf{0}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{x}_1\\ \mathbf{x}_2\\ \vdots\\ \mathbf{x}_{N_z}\end{bmatrix}=\frac{1}{2}\rho g\begin{bmatrix}\boldsymbol{\sigma}\\ -\boldsymbol{\sigma}\\ \vdots\\ -\boldsymbol{\sigma}\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

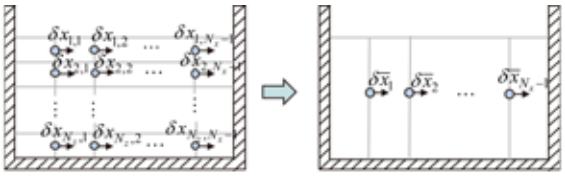


図６　自由度の縮小

ここで，$\tilde{\boldsymbol{M}}_{i,j}$は，

$$\tilde{\boldsymbol{M}}_{i,j}=\boldsymbol{M}_{i,j}-\boldsymbol{M}_{1,j} \tag{20}$$

$\delta\overline{x}_j$をj列内の質点変位の平均とし，平均変位ベクトルを次式のように定義する．

$$\overline{\boldsymbol{x}}=\begin{bmatrix}\overline{x}_1\\ \overline{x}_2\\ \vdots\\ \overline{x}_{N_x-1}\end{bmatrix}=\frac{1}{N_z}\left[\boldsymbol{I}_{N_x-1}\ \ \boldsymbol{I}_{N_x-1}\ \cdots\ \boldsymbol{I}_{N_x-1}\right]\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_1\\ \boldsymbol{x}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{x}_{N_z}\end{bmatrix} \tag{21}$$

ここで，$\boldsymbol{I}$は単位ベクトルである．式(19)の１行目を式(21)と入れ替えると，

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{A}_1\ddot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}_2\ddot{\overline{\boldsymbol{x}}}-\tilde{\boldsymbol{S}}\\ &\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{N_x-1}&\boldsymbol{I}_{N_x-1}&\cdots&\boldsymbol{I}_{N_x-1}\\ \tilde{\boldsymbol{M}}_{21}&\tilde{\boldsymbol{M}}_{22}&\cdots&\tilde{\boldsymbol{M}}_{2N_z}\\ \vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\ \tilde{\boldsymbol{M}}_{N_z1}&\tilde{\boldsymbol{M}}_{N_z2}&\cdots&\tilde{\boldsymbol{M}}_{N_zN_z}\end{bmatrix},\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{N_x-1}\\ \mathbf{0}\\ \vdots\\ \mathbf{0}\end{bmatrix},\tilde{\boldsymbol{S}}=\frac{\rho g}{2}\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \boldsymbol{\sigma}\\ \vdots\\ \boldsymbol{\sigma}\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \tag{22}$$

この式の左から$\boldsymbol{A}_1^{-1}$をかけると，

$$\left.\begin{aligned}&\ddot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{T}\ddot{\overline{\boldsymbol{x}}}-\boldsymbol{S}\\ &\boldsymbol{T}=\boldsymbol{A}_1^{-1}\boldsymbol{A}_2,\ \boldsymbol{S}=\boldsymbol{A}_1^{-1}\tilde{\boldsymbol{S}}\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

ここで，$\boldsymbol{T}$は加速度ベクトル$\ddot{\boldsymbol{x}}$と平均加速度ベクトル$\ddot{\overline{\boldsymbol{x}}}$の変換行列となる．変位ベクトル，速度ベクトルにおいてもこの$\boldsymbol{T}$による変換が成り立つものとする．

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}&=\boldsymbol{T}\overline{\boldsymbol{x}}\\ \dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{T}\dot{\overline{\boldsymbol{x}}}\end{aligned}\right\} \tag{24}$$

式(23), (24)を式(14)に代入し左から$\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}$をかけると，自由度を縮小した運動方程式が得られる．

$$\overline{\boldsymbol{M}}\ddot{\overline{\boldsymbol{x}}}+\overline{\boldsymbol{C}}\dot{\overline{\boldsymbol{x}}}+\overline{\boldsymbol{K}}\overline{\boldsymbol{x}}=\overline{\boldsymbol{G}}+\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{T}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f} \tag{25}$$

これにより，変数の数は$N_z\times(N_x-1)$からN_x-1に縮小される（図6）．式(23)で示される変換行列$\boldsymbol{T}$は非線形解析の場合，$\boldsymbol{M}_{i,j}$に変数が入るため，時間ステップごとに異なる行列となる．ここでは，モデルを線形化したときの変換行列$\boldsymbol{T}^{\mathrm{L}}$（定数行列）を用いて非線形解析を行う．

３.４ 実験結果との比較

モデルの妥当性を確認するため，実験結果と解析結果を比較する．図７に示すように，長方形容器に水を入れて加振機で容器を加振し，水位計で水位を計測する．表１に実験条件を示す．Case１は水深が浅い場合(L_z= 50 mm)，Case２は水深が深い場合である(L_z= 250 mm)．Δは容器の加振振幅である．解析は自由度を縮小した式(25)を用い，調和バランス法を用いて周波数応答を解析する．

図8に周波数応答の結果を示す．(a)は１次固有振動数(0.35 Hz)付近のCase１の結果，(b)は１次固有振動数(1.20 Hz)付近のCase２の結果である．水深が浅いCase１では青線で示す４つの振動数にピークがあり，それぞれの振

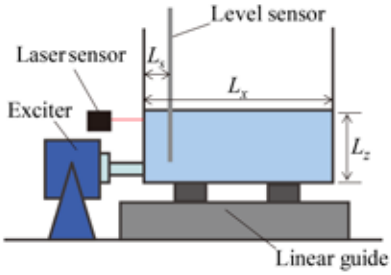


図 7　実験装置

表 1　実験条件，解析条件

	L_x [mm]	L_z [mm]	L_s [mm]	Δ [mm]	γ
Case 1	1000	50	30	2.25	0.05
Case 2	500	250	30	0.3	0.25

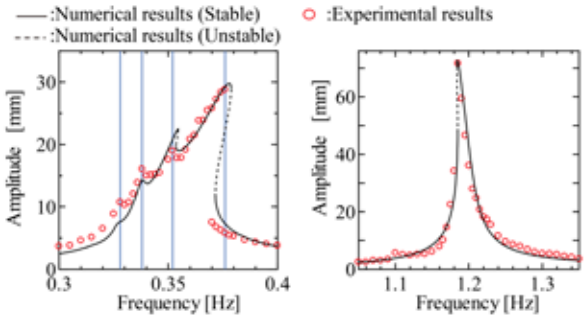


図 8　周波数応答

動数で孤立波が水槽内を往復している．周波数応答は右に傾いており，前述の(i), (ii)の非線形性の影響が大きい．一方，水深が深いCase 2 ではピークは 1 つであり，(iii)の非線形性の影響が大きい．実験結果と解析結果はよく一致しており，提案モデルが妥当であることが分かる．

4．非圧縮性流れのモード解析

流体関連振動では，流体中の渦に起因する振動や音響現象が多く存在する．集中系モデルでは定常流を取り扱えないため，渦に関する現象を再現することはできない．そのため，著者らは非圧縮性流体の流れを解くためのモード解析を開発した[8]．本章では，その手法を紹介する．

4.1 既存の非圧縮性流れの解析手法

非圧縮性流体の基礎方程式として，連続の式とナビエ・ストークスの式は次式のようになる．

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{26}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{u}\boldsymbol{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}_b \tag{27}$$

ここで，$\boldsymbol{u}$は流速ベクトル，pは圧力，νは動粘性係数，$\boldsymbol{f}_b$は体積力である．

式(27)を時間差分すれば，次の時間ステップの流速$\boldsymbol{u}$を求めることができるが，式(26)は時間発展の式になっていないため，圧力pを容易に求めることができない．有限差分法でよく用いられるMAC法系統の手法では，式(26), (27)から導かれるポアソン方程式を用いて，圧力に関する連立方程式を解くことになる．しかし，この連立方程式の反復計算で計算時間の大半を費やすことになる[9]．

一方，疑似圧縮性法という手法では，式(26)に疑似的な圧縮性の項を加えた次式を考える．

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c^2 \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{28}$$

ここで，cは疑似的な音速を表し，実際の流体の音速よりも小さい値を用いる．式(27), (28)を時間差分して各時間ステップのp, $\boldsymbol{u}$を求めることができる．ただし，cは疑似的な音速であるため，過渡状態における解は正しい解ではなく，疑似圧縮性法は基本的に定常解を求める方法である[10]．

4.2 モード解析

疑似圧縮性法の基礎式を用いたモード解析を提案する．そのため，式(27), (28)を空間に関して離散化したうえで，次式のように行列表示する．

$$\frac{d\boldsymbol{z}}{dt} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{z} + \nu \boldsymbol{B}\boldsymbol{z} + \boldsymbol{b} + \boldsymbol{c} \tag{29}$$

ここで，変数ベクトル$\boldsymbol{z}$は

$$\boldsymbol{z} = \left[\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \ \ \boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} = \left[u_1 \ \cdots \ u_{N_u} \ \ v_1 \ \cdots \ v_{N_v} \ \ p_1 \ \cdots \ p_{N_p}\right]^{\mathrm{T}} \tag{30}$$

$\boldsymbol{U}$はx方向流速u_iとy方向流速v_iを並べたベクトル，$\boldsymbol{P}$は圧力p_iを並べたベクトルである．N_uは流速u_iの数，N_vは流速v_iの数，N_pは圧力p_iの数であり，全変数の数を$N(=N_u+N_v+N_p)$とする．$\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{c}$は次式のようになり，

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A}_1 \\ c^2\boldsymbol{A}_2 & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}, \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_1 & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}, \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{b}} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}, \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{c}} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{31}$$

$\boldsymbol{A}_1$は圧力勾配項，$\boldsymbol{A}_2$は流速のダイバージェンス，$\boldsymbol{B}_1$は粘性項である．$\tilde{\boldsymbol{b}}$には境界条件，$\tilde{\boldsymbol{c}}$には対流項が入る．

式(29)の行列$\boldsymbol{A}$はフルランクにはならないため，$\boldsymbol{A}$の固有値を求めるとm個の値が 0 の固有値が求まり，その 0 固有値に対応する固有ベクトルを$\boldsymbol{\phi}_1 \cdots \boldsymbol{\phi}_k \cdots \boldsymbol{\phi}_m$とする．ここで，変数ベクトル$\boldsymbol{z}$を固有ベクトル$\boldsymbol{\phi}_k$の線形結合で表せるものと仮定して，

$$\boldsymbol{z} = \xi_1\boldsymbol{\phi}_1 + \xi_2\boldsymbol{\phi}_2 + \cdots + \xi_m\boldsymbol{\phi}_m \tag{32}$$

ここで，ξ_kはモード座標である．このとき，固有ベクトル$\boldsymbol{\phi}_k$の圧力に対応する要素はすべて 0 となり，

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{0} \tag{33}$$

となる．固有ベクトル$\boldsymbol{\phi}_k$の流速に対応する要素のみを抜き出したベクトルを$\tilde{\boldsymbol{\phi}}_k$とすると，流速ベクトルは，

$$\boldsymbol{U} = \xi_1\tilde{\boldsymbol{\phi}}_1 + \xi_2\tilde{\boldsymbol{\phi}}_2 + \cdots + \xi_m\tilde{\boldsymbol{\phi}}_m = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\xi} \tag{34}$$

ここで，$\boldsymbol{\Phi}$はモード行列，$\boldsymbol{\xi}$はモード座標ベクトルであり，次式のようになる．

$$\boldsymbol{\Phi} = \left[\tilde{\boldsymbol{\phi}}_1 \ \ \tilde{\boldsymbol{\phi}}_2 \ \cdots \ \tilde{\boldsymbol{\phi}}_m\right], \boldsymbol{\xi} = \left[\xi_1 \ \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_m\right]^{\mathrm{T}} \tag{35}$$

式(33)より圧力は 0 であるので，式(29)の下部の連続の式は無視し，式(29)上部のナビエ・ストークスの式のみを考慮し，式(34)を代入すると，

$$\boldsymbol{\Phi}\frac{d\boldsymbol{\xi}}{dt} = \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{P} + \nu \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\xi} + \tilde{\boldsymbol{b}} + \tilde{\boldsymbol{c}} \tag{36}$$

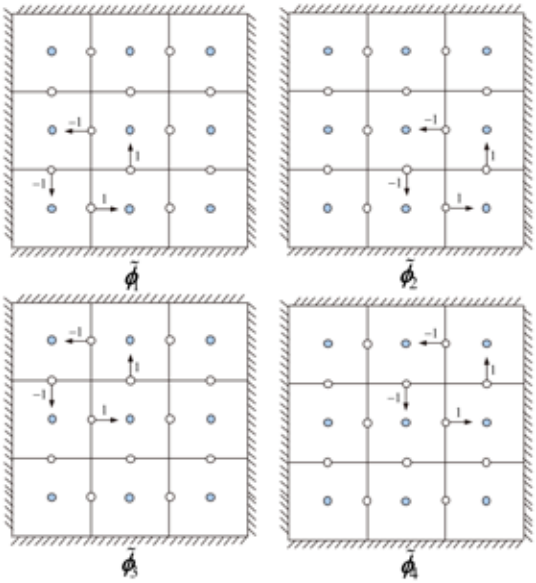


図 9　0 固有値の固有モード

式(33)より，右辺第 1 項は無視し，さらに式(36)の左から $\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}$ をかけると，

$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}\frac{d\boldsymbol{\xi}}{dt}=\nu\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\left(\tilde{\boldsymbol{b}}+\tilde{\boldsymbol{c}}\right) \tag{37}$$

さらに，両辺の左から $(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi})^{-1}$ をかけると，

$$\frac{d\boldsymbol{\xi}}{dt}=\nu(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi})^{-1}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\xi}+(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi})^{-1}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\left(\tilde{\boldsymbol{b}}+\tilde{\boldsymbol{c}}\right) \tag{38}$$

以上より，モード座標 $\boldsymbol{\xi}$ に関する微分方程式が得られた．式(38)を数値積分することにより $\boldsymbol{\xi}$ を得た後，式(34)を用いて流速を算出することができる．ただし，対流項のベクトル $\tilde{\boldsymbol{c}}$ の中には流速に関する非線形項があるため，数値積分の時間ステップごとに式(34)を用いて流速を計算しなければならない．

モード座標の数 m は，解析領域が壁で囲まれているときは $m=N-2N_p+1$，囲まれていない（流入部，流出部がある）場合は $m=N-2N_p$ となる．また，式(29)下部の連続の式は無視しており，疑似音速 c が消えているため，疑似圧縮性法では取扱いが難しい過渡応答解析が式(38)を用いて可能になる．さらに，このモード解析では式(33)のように圧力を無視して計算している．そのため，MAC法系統の手法のように，ポアソン方程式を用いた圧力の収束計算は必要ない．

行列 $\boldsymbol{A}$ の 0 固有値の固有ベクトル $\tilde{\boldsymbol{\phi}}_k$ を算出する必要はなく，解析領域が壁で囲まれている場合，図9のように（スタガート格子の場合），格子の各交点を囲むような渦の流れが固有ベクトルとなる．この場合，変数の数は $N=21$ から $m=4$ となる．

4.3 キャビティ流れへの適用

図10のような正方形キャビティ流れ[11]にモード解析を適用し，SMAC法による結果と比較する．図10の計算領域は 1 辺の長さが L の正方形であり，左右と下の壁は固定壁で上の壁は一定速度 U_0 で移動している．レイノルズ数 $Re=U_0L/\nu$ を100に設定し，要素を 60×60 に分割して計算を実施する．

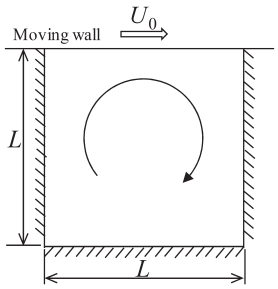
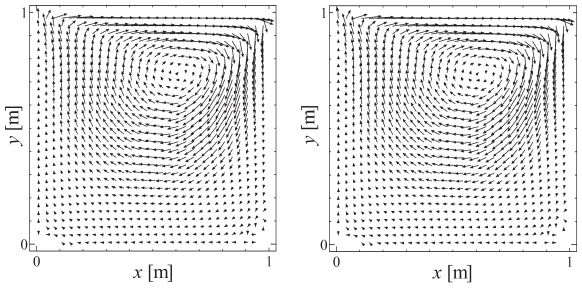


図 10　キャビティ流れ



(a) SMAC 法　　(b) モード解析

図 11　キャビティ内速度分布（$t=25.0$ s）

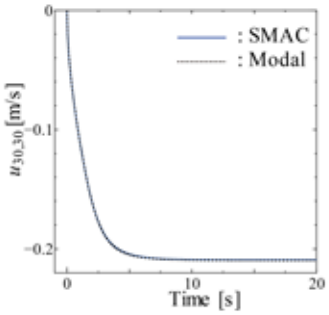


図 12　キャビティ中央 x 方向速度の過渡応答

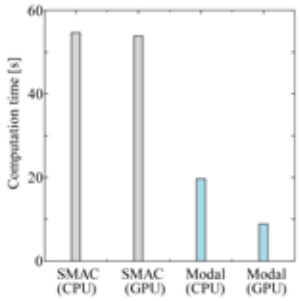


図 13　SMAC 法とモード解析の計算時間比較

図11に定常状態になった後 $(t=25.0\,\mathrm{s})$ のキャビティ内の速度分布を示す．$x=0.65, y=0.75$ あたりを中心に渦を巻く流れとなっているが，SMAC法による解析結果とモード解析による結果がよく一致していることが分かる．図12はキャビティ中央の x 方向速度 $u_{30,30}$ の時刻歴の過渡応答を示している．過渡応答もSMAC法とモード解析の結果がよく一致していることが分かる．

図13に計算時間の比較（5000ステップ）を示す．計算機はワークステーションMousePro-W995DG8T22を用い，MATLAB R2024aを用いて数値計算を行った．SMAC法もモード解析と同様にマトリクス表示して計算し，ポアソン方程式の収束計算にはBi-CGSTAB法[9]を

用いる．GPUの計算にはMATLAB関数“gpuArray”を用いて計算する．

図13より，SMAC法はGPUを使用しても行列がスパース行列であること，ポアソン方程式の収束計算に時間がかかることによりCPUとGPUで計算時間は同程度である．モード解析のCPUでは，式(38)の $(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi})^{-1}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{I}}\boldsymbol{\Phi}$ と $(\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi})^{-1}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}$ が密行列であるため，計算時間はSMAC法の0.36倍であるが，モード解析でGPUを使用すれば計算速度が速くなり，計算時間はSMAC法の約0.16倍となる．モード解析はSMAC法と比較して，変数の数が1/3になっていること，圧力の収束計算が必要無いこと，GPUの並列計算による計算速度の向上が図れることにより計算速度が速くなっている．

以上より，提案した非圧縮性流れのモード解析の過渡応答計算は妥当であり，計算速度もSMAC法より早く，非圧縮性流れ解析手法として可能性があることが示された．ちなみに，流体解析の商用ソフトで一般的に使用される有限体積法のSIMPLE法はSMAC法よりも計算時間が長いことが知られている[12].

5．おわりに

本稿では，質量・非線形ばね・減衰を用いてスロッシング現象をモデル化した集中系モデルと非圧縮性流れのモード解析を紹介いたしました．今後は提案したモード解析の様々な流体解析への展開と定常流や渦に起因する波動，音響，振動現象等を解析できればと考えています．

今回のパイオニア賞の受賞は，これまでご指導頂きました先生方，同僚の先生方，FIV研究会の方々，学会や共同研究でご指導・討論をして頂いた方々，私の研究テーマを担当してくれた学生など，お世話になった多くの方々といつも支えてくれる家族のおかげと感じております．この場をお借りして深く感謝申し上げます．

参 考 文 献

[1] 石川諭，近藤孝広，松崎健一郎，集中系モデルによる非線形圧力波の解析（第１報，解析モデルの提案とその妥当性の検証）,日本機械学会論文集，C編，Vol. 75, No. 753 (2009), pp. 1436-1443.

[2] 石川諭，近藤孝広，松崎健一郎, 長野翔太，集中系モデルによる非線形圧力波の解析（第４報，弾性管内要素のモデル化）,日本機械学会論文集，C編，Vol. 77, No. 777 (2011), pp. 306-317.

[3] 石川諭，近藤孝広，松崎健一郎，集中系モデルによる血管内脈波の解析,日本機械学会論文集，C編，Vol. 79, No. 804 (2013), pp. 2731-2741.

[4] 石川諭，近藤孝広，松崎健一郎，榎元啓允，気液二相流中圧力波の解析，日本機械学会論文集，C編，Vol. 80, No. 814 (2014), DR0166.

[5] Ishikawa, S., Matsuo, A., Akayama, Y., Kijimoto, S., Coupled analysis of two-dimensional acoustic and membrane vibration by concentrated mass model: Proposal of spurious mode elimination model, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 12 (2017), pp. 1-13.

[6] Ishikawa, S. Kondou, T., Matsuzaki, K., Yamamura, S., Analysis of nonlinear shallow water waves in a tank by concentrated mass model, Journal of Sound and Vibration, Vol. 371 (2016), pp. 171-182.

[7] Yoshitake, T., Ishikawa, S., Kondou, T., Analysis of two-dimensional nonlinear sloshing in a rectangular tank by using a concentrated mass model, Journal of Vibration and Control, Vol. 41, No. 15-16, (2022) pp. 3418–3434.

[8] Ishikawa, S., Yamaoka, T. Kijimoto, S., Modal analysis for incompressible flow, European Journal of Mechanics / B Fluids, Vol. 105 (2024), pp. 295-305.

[9] 梶島岳夫，“乱流の数値シミュレーション”，(2014), 養賢堂.

[10] 河村哲也，川原睦人，平野廣和，登坂宜好，池川昌弘，“非圧縮性流体力学”，(1995)，東京大学出版会.

[11] 肖鋒，長﨑孝夫，“数値流体解析の基礎”，(2020)，コロナ社.

[12] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., “An Introduction to Computational fluid dynamics”, (2007), Second edition, Pearson.

部門長就任に際して

慶應義塾大学　髙橋　正樹

2024年度（第102期）の日本機械学会 機械力学・計測制御部門の部門長を仰せつかりました髙橋正樹です。指導教員の吉田和夫先生に連れて行っていただいた初学会発表からお世話になっている部門ですので大変光栄に存じます。副部門長の松村雄一先生(岐阜大学)、部門幹事の萬礼応先生(筑波大学)、部門運営委員の皆様、本部門担当の上野晃太氏のご協力をいただきながら、これまでの経験と知識を生かし、当部門の発展に全力を尽くしてまいりますので何卒宜しくお願い致します。

はじめに、前期運営委員会の皆様のご尽力に深く感謝申し上げます。第101期の部門運営により、当部門は多くの成果を挙げ、研究と教育の両面で大きな前進を遂げました。この流れを受け継ぎ、更なる発展を目指してまいります。特に、国内外の学会活動を通じて、研究者間の連携と交流を一層強化し、機械力学・計測制御分野の発展に貢献していく所存です。

第102期の活動方針として、研究交流の場としての活性化、最新研究動向の情報収集、学会活動を通じた個々の成果への還元を柱としています。具体的には、以下の点に注力してまいります。

1. 研究交流の促進 : Dynamics and Design Conference (D&D) やその他のシンポジウム、国際会議を通じて、国内外の研究者との交流を深め、協力関係を築いていくことが重要です。特に、MoViC や ACMD などの国際会議を統合した Joint International Conference の実現に向けた取り組みを推進します。これにより、世界中の研究者が集まり、最先端の研究成果を共有し、新たな協力関係を構築する機会を提供します。さらに、他部門との連携と強化し、各種シンポジウムやワークショップを開催し、専門分野の枠を超えた知見の交流を促進してまいります。

2. 国際化の推進 : 当部門の国際的なプレゼンスを高めるため、国際会議への参加や開催を推進します。特に、MoViC (Motion and Vibration Control)、ACMD (Asian Conference on Multibody Dynamics)、APVC (Asia-Pacific Vibration Conference)、ISMB (International Symposium on Magnetic Bearings)、J-K Symposium などの国際会議を統合し、Joint International Conference on Dynamics, Measurement and Control を毎年開催する体制に変更することを目指し、議論を進めてまいります。実現までには数年かかると思いますが、これにより、国内外の研究者が一堂に会し、最新の研究成果を共有する場を提供し、当部門の国際的な影響力を強化します。国際化の方針に基づき、海外の研究者との共同研究や情報交換を積極的に行い、グローバルな視点での研究推進を図ります。

3. 情報発信と共有 : 国内、国際の学術誌や学術講演会を通じて、最新の研究成果やトピックスを広く共有し、研究者同士の情報交換の場を提供します。また、企業からの社会人博士の参加を奨励し、実践的な研究成果の応用を促進します。国内学術誌や講演会を通じて得られる情報は、研究の方向性を決定する重要な要素となります。これを活用し、研究者間の連携を一層強化してまいります。その一環として、広報委員のご協力の下、昨年度より当部門のホームページのリニューアルを行ってまいりました。まもなく、一新されたホームページから皆様の研究活動、最新の研究成果が発信されていきます。さらに、インフォメーションメールや技術ロードマップの作成・配布を通じて、部門内外への情報発信を強化し、研究コミュニティ全体の活性化を図ります。

4. 次世代への支援 : 若手研究者や学生への支援を強化し、彼らが自身の研究成果を発表する機会を増やします。修士課程や学部卒業生が卒業研究をさらに深めて発表する場を設けることで、彼らの研究意欲を高めることを目指します。具体的には、学術講演会やシンポジウムを活用し、学生が自身の研究を発表し、フィードバックを受ける機会を提供します。また、経験豊富な研究者による指導やメンタリングを通じて、次世代の研究者の育成に努めてまいります。機械力学・計測制御部門において大型予算を獲得している研究者のセミナーの開催を通じて、若手研究者の成長を支援します。

5. 企画委員会の活性化 : 部門が活性化するための企画を立て、それを遂行するための準備を進めます。これにより、部門の活動が一層充実し、研究者同士の交流や情報交換が活発化することを目指します。また、前年度の企画を踏襲しつつ、新たな企画を積極的に導入し、部門の活動に新しい風を取り入れてまいります。皆さまから部門の活動に関するご意見を伺う場を設け、部門の活性化を図るための具体的な企画を立案・実施します。

6. 部門内外の連携強化 : 他の部門や関連学会との連携を強化し、幅広い分野の研究者と交流する機会を提供します。これにより、異なる分野の知見を取り入れた新しい研究の展開が期待できます。また、企業や社会との連携を深め、研究成果の実社会への応用を促進します。産学連携の推進により、研究成果を社会に還元し、社会的課題の解決に寄与することを目指します。

以上の活動を通じて、当部門が更なる飛躍を遂げ、国内外の研究コミュニティにおいて一層の存在感を発揮できるよう尽力してまいります。共に力を合わせ、機械力学・計測制御分野の未来を切り開いていくため、皆様のご協力とご支援を賜りますよう、どうぞよろしくお願い申し上げます。

部門長退任のご挨拶

第 101 期部門長　山崎　徹（神奈川大学）

第 101 期機械力学・計測制御部門の部門長退任に際し、ご挨拶申し上げます。

任期中、日本自動車研究所（JARI）の中村弘毅氏には、部門幹事として部門活動の全ての面で大変にご尽力いただきました。副部門長（第 102 期部門長）の慶応大学の高橋正樹先生、次期幹事（第 102 期幹事）の筑波大学の萬礼応先生をはじめとする部門運営委員の皆様には、部門運営のために多大なご尽力をいただき、深く御礼申し上げます。また、日本機械学会の上野晃太氏には、様々な面でご協力・ご尽力をいただき、何度も助けていただきました。心より感謝申し上げます。

1 年前の部門ニュースレター（No.72）では、第 101 期部門長として、本部門の課題と今後について記載しました。部門所属の研究会の主査、幹事の皆様方と六度ほど会合を重ね、部門の歴史や機械力学，社会との関わりなどについて考えました。そもそも結論などはないものであるかもしれませんが，部門運営に関わる各人がそれぞれ考え、共有していくことの大切さを共通認識として得ました。

その一環として、部門から社会・企業・学会へ向けたキャッチフレーズを部門構成員から広く募るコンテストを開催しています（https://pub.confit.atlas.jp/ja/event/dmcconf24/content/catchphrase）。現在も募集中で、D&D2024 の会場（神奈川大学みなとみらいキャンパス）で最終投票が行われます。ぜひご投稿をお寄せください。このメッセージは固定されたものではなく、継続的に社会に発信していくことが重要です。

現在は D&D2024 実行委員長として、多くの実行委員の方々と共に準備を進めております。この場を借りて、改めて感謝申し上げます。D&D2024 では、第 67 回理論応用力学講演会（NCTAM67）を併催し、約 800 名の参加を見込んでいます。横浜みなとみらいで、皆様と共に、当部門と社会の関わりについて一層の連携を深める機会となることを期待しています。

本部門は基盤部門であり、その応用分野も増えている現在、社会に対して存在感をアピールすることが重要です。今後のさらなる発展を祈念し、私の退任の挨拶とさせていただきます。1 年間どうもありがとうございました。

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

－ 2024 年度の開催予定行事について－

新型コロナウィルス感染症への対応は終了しましたが，各行事の実行委員会や関係者判断によってスケジュールや開催形態が変更される場合がございます．それぞれ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 ※1
2024年 8月 5日～ 8日	第 17 回「運動と振動の制御」国際会議 (MoViC2024) 第 20 回アジア太平洋振動会議 (APVC2024)	日本大学 駿河台キャンパス
2024年 9月 3日～ 6日	Dynamics and Design Conference 2024/ 第 67 回理論応用力学講演会 (併催)	神奈川大学 みなとみらいキャンパス
2024年 9月 8日～11日	2024 年度年次大会	愛媛大学 城北キャンパス
2024年12月2日～12月 3日	第 22 回 評価・診断に関するシンポジウム	北海道大学 札幌キャンパス

開催行事予定（講習会等）

開　催　日	名　　称	開　催　地 ※1
2024年 7月16日	講習会　モータ駆動およびその電動システムの騒音・振動低減化技術	ハイブリッド開催※ 2
2024年 9月頃	講習会　振動モード解析実用入門 －実習付き－	ハイブリッド開催※ 2
2024年10月頃	講習会　回転機械（ターボ＋モータ）の振動：基礎および事例研究ならびにデモ実習	ハイブリッド開催※ 2
2024年10月26日	講習会　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)	オンライン開催
2024年11月頃	講習会　マルチボディダイナミクス入門	オンライン開催
2024年12月頃	講習会　納得のロータ振動解析：講義 +HIL 実験	ハイブリッド開催※2
2025年 1月頃	講習会　回転機械の振動	ハイブリッド開催※2

※ 1 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．
※ 2 日本機械学会 会議室と Zoom でのオンライン併催

主催：一般社団法人日本機械学会　機械力学・計測制御部門

併催：第 67 回理論応用力学講演会

https://pub.confit.atlas.jp/ja/event/dmcconf24

共　　催　神奈川大学工学部
神奈川大学大学院工学研究科

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，日本知能情報ファジィ学会，
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，
日本非破壊検査協会

開 催 日　2024年9月3日（火）～6日（金）

会　　場　神奈川大学　みなとみらいキャンパス
（横浜市西区みなとみらい）

開催主旨　Dynamics and Design Conference 2024（D&D2024）は，「ダイナミクスを礎に全体俯瞰・共創・共育し未来を拓く」を総合テーマとして，神奈川県横浜市で，発表は対面を基本とするハイブリッドで開催（予定）いたします．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，第67回理論応用力学講演会（NCTAM67）が併催され，また，日本機械学会分野連携企画として，4部門（交通・物流部門，ロボティクス・メカトロニクス部門，バイオエンジニアリング部門，環境工学部門）との合同セッションも企画いたします．さらに，特別講演，懇親会，機器展示，フォーラム，チュートリアル，パネルディスカッション，特別企画などの付随行事も予定しております．

研究発表は，1頁から12頁までの予稿で発表いただけますので，企業などの皆様もお気軽にお申し込みをいただき，活発な議論にご参加ください（機械学会投稿規定参照）．また，優秀な講演発表者は，学会本部（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．さらに，部門連携に係るセッションでの発表については，新たな分野融合研究表彰も適用されます．

JSTの人材求人サイトJREC-INの研究分野において，当該部門に関する分野が「ものづくり技術」から「情報通信」に移行されました．当該部門の社会に対する貢献は多岐に渡るためわかりにくさがあります．そのため，当該部門のメッセージを配信する必要があります．D&D2024においては，部門の社会に対する貢献を表すキャッチフレーズを募集し，コンテストを実施いたします．募集は開催前から開始いたしますので，別途ご案内をご覧ください．

多くの皆様のご参加を心よりお待ちしております．

ー付随行事・関連行事案内ー

[*v_BASE*フォーラム]
9月3日（火）～4日（水）

[特別講演]
特別講演１　　2024年9月5日（木）　14:00～15:00
「自励振動・係数励振の非線形分岐特性と計測・制御への応用」
藪野 浩司 教授（筑波大学）
特別講演２　　2024年9月5日（木）　15:00～16:00
「共育（ともいく）の考え方にエンジニアの魂を重ね合わせ、新しいワクワク基盤を創ることに挑戦する」
羽山 信宏 氏（元マツダ株式会社）

[機器・カタログ・書籍展示]
9月3日（火）～6日（金）

[特別企画]
SS1 環境工学部門連携企画
カーボンニュートラルへの挑戦 -音響・振動技術の活用-
9月4日(水) 13:50～17:30
SS2 理論応用力学講演会企画
NCTAM パネルディスカッション
9月5日(木) 10:00～12:00
SS3 交通物流部門連携企画
分野連携企画の連続ショートレクチャー
9月5日(木)　9:00～11:00

SS4 交通物流部門連携企画
パネルディスカッション「交通・物流システムにおける接触・抵抗問題とその関連技術」
9月5日(木)　11:20～12:50
SS5 一般社団法人次世代音振基盤技術研究会企画
音振を中心とした産学連携INVITEの取り組み
9月6日(金)　14:00～16:00

［部門表彰式・懇親会］

9月5日（水）

［若手活性化委員会企画］

「人脈づくり交流会」　9月4日（水）　夕方

ー各種費用案内ー

○参加登録費（予稿集代込み，ダウンロード方式）

<一般・正員>
早期登録期間：14,000円　通常登録期間：16,000円
<一般・会員外>
早期登録期間：23,000円　通常登録期間：25,000円
<学生員*1・シニア*2>
早期登録期間：4,000円　通常登録期間：5,000円
<一般学生*1>
早期登録期間：6,000円　通常登録期間：7,000円

*1　博士後期課程の正員には学生員価格，博士後期課程の一般学生には一般学生価格が適用されます．
*2　シニアは，非常勤で60歳以上の正員に限ります．（自己申請，後日の返金はできません）

※会員外でも，協賛学会の会員の方には，相当する会員料金（正員）を適用いたします．
※D&D2024では事前登録を行います．決済をされると講演論文集を事前にダウンロードすることができます．
※詳細はホームページ
(https://pub.confit.atlas.jp/ja/event/dmcconf24/content/registration)
でご確認ください．
※当日受付も可能ですが，現金による参加登録はできません．事前のお申込みを強くお勧めいたします．

○フォーラム，その他資料集

参加者に実費販売の予定です．

ープログラム・講演会の詳細ー

https://pub.confit.atlas.jp/ja/event/dmcconf24
セッション一覧およびタイムテーブルをご覧ください．

連絡先・問い合わせ先

D&D2024実行委員会 dd2024@jsme.or.jp
実行委員長　山崎　徹　（神奈川大学）
副委員長　髙橋　正樹（慶應義塾大学）
幹　事　中村　弘毅（日本自動車研究所）

D&D2024領域・OS一覧

領域1 解析・設計の高度化と新展開
※OS1-1～1-3，NCTAM67OS15との合同セッションを企画
OS1-1 機械・構造物における非線形振動とその応用
OS1-2 振動基礎
OS1-3 板・シェル構造の解析・設計の高度化
領域2 耐震・免震・制振・ダンピング
OS2-1 耐震・免震・制振
OS2-2 ダンピング
領域3 振動・騒音
OS3-1 音響・振動
OS3-2 サイレント工学
OS3-3 モード解析とその応用関連技術
OS3-4 自動車の制振・防音
OS3-5 ソフトセンサ／アクチュエータおよびソフトメカニクス
領域4 流体関連振動・ロータダイナミクス
OS4-1 流体関連振動・音響のメカニズムと計測制御
OS4-2 ロータダイナミクス
OS4-3 複合領域にまたがるダイナミクスの実験，解析，設計
領域5 ヒューマン・スポーツ・バイオ工学
OS5-1 健康・福祉機器，感性計測，感覚計測，感性設計
OS5-2 細胞，組織，臓器のダイナミクスとその応用
領域6 スマート構造・評価診断・動的計測
OS6-1 システムのモニタリングと診断
OS6-2 スマート構造システム
OS6-3 折紙，生物模倣とその関連技術
領域7 ダイナミクスと制御
OS7-1 アクチュエータとダイナミクス・計測・制御
OS7-2 マルチボディダイナミクス
OS7-3 運動と振動の制御
OS7-4 磁気浮上と磁気軸受と関連技術
領域8 モデリングとダイナミクス・デザイン教育
OS8-1 大学・企業におけるダイナミクス・デザイン教育
領域9 他分野・他部門との連携企画、その他・新領域
OS9-1 交通・物流機械のダイナミクス
OS9-2 機械力学的アプローチによる生体の物性評価
OS9-3 自律ロボットのダイナミクス・計測制御とその応用

NCTAM67 OS一覧

OS1 せん断流のダイナミクス
OS2 逆問題と制御の応用数理
OS3 形態と機能の材料力学
OS4 構造物と地盤の減衰
OS5 構造物への衝撃作用の評価と対策
OS6 混相流のダイナミクス
OS7 材料製造プロセスにおけるマルチフィジックス
OS8 数理設計と関連トピックス
OS9 地盤力学における数値解析
OS10 地盤力学の新展開：地球から惑星表層まで
OS11 能動的流体制御
OS12 波動現象の数理・数値解析とその応用
OS13 複雑流体・ソフトマターのダイナミクス
OS14 乱流のダイナミクス
OS15 機械および構造物のダイナミクス・振動・制御
※D&D2024領域1合同セッション

総務委員会からのお知らせ

委 員 長　萬　　礼応（筑波大学）
副委員長　園部　元康（高知工科大学）

総務委員会は，部門長のもとで部門運営をサポートするとともに，部門の発展と活性化を目指し，講習会や講演会などの各種行事や，国内学術交流事業，部門登録会員への情報提供など有益な情報の提供を行ってまいります．今年度は，運営委員会と部門所属の研究会との情報交換を積極的に行い，各研究会の活性化と分野連携の強化を図り、部門全体の活性化へつなげていきたいと考えております．さらに，他部門・他学協会との交流を積極的に進め，学術・産業界への貢献を意識した活動を進めていく所存です．

今年度も，対面での会議に加えて，引き続きオンラインとのハイブリッド形式の行事も予定しており，会員の皆様におかれましては，当部門主催行事へのご参加，ならびに部門運営へのご協力を賜りますよう，よろしくお願い申し上げます．ご意見，ご要望がございましたら，ぜひお寄せください．

広報委員会からのお知らせ

委 員 長　貝塚　勉　（工学院大学）
副委員長　齊藤亜由子（工学院大学）

第102期広報委員会では，年2回のニュースレターの発行，部門ホームページの更新（WordPressへの移行も含む），機械工学年鑑の執筆依頼，インフォメーションメールの配信依頼への対応を中心に活動し，引き続き部門登録者への有益な情報提供に努めます．

ニュースレターでは特集記事，後輩へのメッセージ，在外研究報告などを継続して紹介したく考えています．取り上げるべきトピックなど，部門登録者の皆様からのご意見がございましたら広報委員会までご連絡いただければ幸いです．引き続きご協力のほどよろしくお願い申し上げます．

表彰委員会からのお知らせ　－令和6年度の公募について－

委 員 長　小松崎俊彦（金沢大学）
副委員長　末木　健之（鉄道総合技術研究所）

機械力学・計測制御部門に関連する現在募集中・募集予定の各賞についてお知らせいたします．当部門では，下記日程（予定）でフェロー候補者の部門推薦対象者および，部門関連各賞の受賞候補者を募集しております．募集の詳細は機械学会インフォメーションメールにて随時ご案内申し上げております．多数のご応募をお待ちしております．

●日本機械学会フェロー
（選考委員会への部門推薦対象者）
部門の公募締切：2024年8月2日（金）

●部門賞・部門一般表彰
部門賞
部門功績賞，部門国際賞，学術業績賞，
技術業績賞，パイオニア賞
部門一般表彰
部門貢献表彰
募集予定期間：2024年10月中旬～12月中旬
表彰時期・場所：D&D2025会期中を予定

企画委員会からのお知らせ

委員長　松村　雄一（岐阜大学）
幹　事　園部　元康（高知工科大学）

企画委員会は，当部門の次期以降の活動について広く扱う委員会で，委員長は次期部門長（現副部門長），幹事は次期部門幹事候補が務めています．この委員会では，高橋部門長，萬部門幹事のご協力の下，以下の活動を進めてまいります．

1) 次期予算編成
2) 講習会の計画・企画
3) 次期以降の部門運営に関わる企画立案
4) 次期以降の学術交流活動に関わる企画立案

今期の企画委員会では，特に，当部門が保有するデータを掘り起こし，かつ，新視点でのアンケート調査なども行い，これらデータのマイニングを行うことを通して，新たな知見や気づきを見いだし，施策立案につなげることに取り組みたいと考えています．従来，企画委員会の主な存在意義は，当部門の活動を絶えず改善し，良質な情報・サービス・場を提供し続ける体制を模索，維持することにあったと考えています．しかしながら，歴代の部門長が長年の経験に基づいて様々な施策を熟考され，実施されてきた歴史があり，普通に思いつく範囲での施策はやり尽くされた感もあります．そこで今期は，

○ 若手と先輩の意見交換
○ 部門運営委員会と部門研究会との橋渡し
○ 他部門との連携促進

など，最近の良好な施策を引き継ぎつつ，

○ これからの学術学会に求められている機能などをデータドリブンで明確化すること

にも取り組む所存です．そして，当部門としての情報・サービス・場の提供の仕方を再考し，部門活動の活性化を実現しうる施策立案につなげたいと考えています．

この調査では，顕在化しにくい意見をあぶり出せるように，当部門の活動に関連する技術者・研究者の皆様へ，実務経験年数や研究分野などで分けた層別のインタビューやアンケートを行い，適切な分析を可能とするだけの十分なデータを集めたいと考えています．この作業は，皆様のご協力なしに成しえないと考えますので，そのようなインタビューやアンケートへの協力依頼がございましたら，ご多用のこととは存じますが，なにとぞ，ご回答くださいますようお願い申し上げます．また，このようなインタビュー，アンケート以外にも，皆様のお声を聞かせていただきたく，企画委員会までご要望，アイデア等をお寄せいただければ幸いです．機械力学・計測制御部門の活動を活力あるものにしていくため，皆様のご協力を賜りますようお願い申し上げます．

国際交流委員会からのお知らせ

委 員 長　齋藤　彰　（明治大学）
副委員長　山田　啓介（関西大学）

本会機械力学・計測制御部門は，韓国機械学会機械力学・制御部門との間に部門交流協定を締結しており，二年に一度，部門講演会に併催する形でジョイントシンポジウムを開催し，両国の研究者・学生の学術的・人的交流を行うことを定めています．日本で開催される場合にはJapan-Korea Joint Symposium，韓国で開催される場合にはKorea-Japan Joint Symposiumとしております．これまでに，第1回を2009年8月（札幌市）に，第2回2011年5月（韓国・釜山）に，第3回2013年8月（福岡）に，第4回2015年5月（韓国・釜山）に，第5回2017年8月（豊橋）に，第6回2019年5月（韓国・ソウル）で開催しました．新型コロナウイルス感染症の影響により2020~2022年の間は開催を見合わせて参りましたが，2023年8月に，名古屋大学で開催されたD&D2023に併せて，第7回シンポジウム（The 7th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control）が開催されました．本年は開催年ではありませんが，第8回は2025年4月中旬～下旬に韓国で開催の予定となります．詳細につきましては，決定次第周知致します．国際会議での貴重な発表・議論の場となりますので，多くの研究者・大学院生の皆様のご参加を検討ください

資格認定委員会からのお知らせ

委員長　齋藤　彰（明治大学）

今年度も日本機械学会「計算力学技術者」認定事業において「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・上級アナリスト）が実施されます.

https://www.jsme.or.jp/cee/news/2024/06/2395

振動分野の解析に携わっていらっしゃる方，あるいはこの分野に興味をお持ちの方をはじめ，多くの方にぜひ受験をご検討くださいますようお願い申し上げます.

★初級

公認CAE技能講習会を受講し，必要な書類を提出すれば認定されます.

★1級および2級

初級の資格に依らず受験できます. 振動分野のCAE技術を確かなものにしたい方，これから始めてみようという方にお勧めいたします.

１級試験実施日：2024年11月29日（金）
２級試験実施日：2024年12月05日（木）
受験申込期間：2024年7月23日（火）～
8月8日（木）23:59まで
試験会場：各自で予約したプロメトリック株式会社の
試験会場（詳細は上記ホームページ）

★上級アナリスト試験

すでに1級の資格をお持ちの方，あるいは今年度1級の資格取得を目指していらっしゃる方は，上級アナリスト試験の受験をご検討くださいますようお願い申し上げます.

試験Web申込期間：2024年8月27日（火）～9月13日（金）
書類受付期間：Web申込後～9月20日（金）23:59まで
一次試験（書類審査）：10月初旬～中旬（予定）
二次試験（面接審査）（日時指定不可）：
2024年11月17日（日）または11月24日（日）

★対策講習会

振動分野の計算力学技術者2級認定試験対策講習会を，10月26日（土）にオンラインにて開催いたします. 本レターでもご案内しておりますので，こちらもぜひご参加下さい.

No.24-74　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）
（オンライン開催）

〔機械力学・計測制御部門　企画〕

協　賛：
(一社)日本音響学会, (一社)火力原子力発電技術協会,
(公社)日本技術士会, (一社)日本計算工学会,
日本計算力学連合, (公社)計測自動制御学会,
(一社)日本原子力学会, (一社)日本建築学会,
(一社)日本航空宇宙学会, (公社)日本材料学会,
特定非営利活動法人CAE懇話会, (一社)日本地震工学会,
(公社)自動車技術会, (一社)日本シミュレーション学会,
(公社)精密工学会, (公社)日本船舶海洋工学会,
(公社)日本マリンエンジニアリング学会,
(一社)日本流体力学会, (一社)日本ロボット学会

趣　旨：
開発, 設計の高効率化のためにＣＡＥの果たす役割はますます大きくなっています. この講習会では日本機械学会「計算力学技術者」認定事業において実施される計算力学技術者２級（振動分野の有限要素法解析技術者）認定試験受験者を主たる対象に, 振動工学の基礎知識および有限要素法の基礎知識を解説し, 演習問題を通して理解を深めます. 計算力学を業務とされている方, あるいはこれから計算力学技術者を目指す方の中で, 特に振動解析にも携わられる方におかれましては, 奮ってご参加くださいますようご案内申し上げます.

開催日：2024年10月26日（土）

会　場：オンライン開催（Zoomを使用）
※ミーティングURL, 電子ファイル教材についてのご連絡は, 開催3日前を予定しています.

定　員：定員100名程度, 申込先着順で定員になり次第締切ります.

題目・講師：
9:30～11:20／振動・音響工学の基礎
吉村 卓也（東京都立大学 教授）
11:30～12:20／数値計算法の基礎
吉村 卓也（東京都立大学 教授）
13:20～14:10／有限要素法および要素の選択・メッシングの基礎
山本 崇史（工学院大学 教授）
14:10～15:00／モデリングの基礎
山本 崇史（工学院大学 教授）
15:10～16:00／境界条件および荷重条件
山本 崇史（工学院大学 教授）
16:00～17:00／ポスト処理の基礎および結果検証の基礎
山本 崇史（工学院大学 教授）

聴講料：
会員11,000 円, 会員外15,000 円, 学生員5,000円, 一般学生6,000 円. いずれも教材1 冊分の代金を含みます.

申込方法：Payventより受付
https://app.payvent.net/embedded_forms/show/665d0ef70cd704269674f355

申込み締切：2024年10月18日(金) まで
○いずれも教材1 冊分の代金を含みます.
※教材を事前に郵送いたしますので, 必ず期日までにお申込み下さい.

【参加費の支払いについて】
■聴講料は, 10月18日（金）までにご入金をお願いします.
■聴講料のお支払いには, クレジットカード（Apple pay, Google pay含む）・銀行振込のいずれかがお使いいただけます.
■銀行振込の際の振込手数料は各自でご負担いただきます. 予めご了承ください. また, 振込先の口座は申し込みごとに異なり, 他の申し込みとまとめてのお支払いは出来かねます.
■銀行振込でのお支払期限は, 原則としてお申し込みから3日以内です. ご入金が確認出来ない場合, こちらでキャンセル処理をさせていただきますのでご了承ください.
■お申込内容は, Payventより配信されるお申し込み完了メールからご確認いただけます. メールが届かない場合は「payvent.net」からのメールを許可するように受信設定をお願いします.
■原則として, 決済後はキャンセルのお申し出がありましても返金できませんのでご注意願います. 本ページからのお申し込みについては, 集会事業申込規約にご同意いただいたものとみなします.

【領収書】
■領収書のお宛名には参加者の氏名が自動で記載されます. ご所属先を宛名に追加する場合は申込フォームの”領収書のお宛名”欄に記載をお願い致します.（こちらに氏名を入力しますと, 宛名に氏名が重複しますのでご注意ください）
■領収書はPayventからのお支払い完了メールに記載されているURLよりダウンロードいただけます.

教　材：教材は受講者へ事前に郵送いたします.

【講習会に参加せず教材のみご希望の方】
1冊につき会員2,000円, 会員外3,000円にて販売いたします.（講習会終了後 発送いたします）
下記ウェブサイトで紹介しているオンラインショップにて9月9日より予約を受付致します。
https://www.jsme.or.jp/publication/event-pub/

問合せ先：一般社団法人日本機械学会
（担当職員：上野晃太）／
電話(03)4335-7616／E-mail: ueno@jsme.or.jp

部門主催講習会情報

総務委員会　委員長　萬　礼応　（筑波大学）
企画委員会　委員長　松村　雄一（岐阜大学）

今年度は以下の部門主催講習会を開催いたします.

・「モータ駆動およびその電動システムの騒音・振動低減化技術」（2024年7月16日）
・「振動モード解析実用入門－実習付き－」（2024年9月頃）
・「回転機械（ターボ+モータ）の振動：基礎および事例研究ならびにデモ実習」（2024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）」（2024年10月26日）
・「マルチボディダイナミクス入門」（2024年11月頃）
・「納得のロータ振動解析:講義+HIL実験」（2024年12月頃）
・「回転機械の振動」（2025年1月頃）

開催日については8ページの「年間カレンダー」をご参照ください（ただし，一部については現時点で調整中となっております）．申込方法等の詳細は，決まり次第インフォメーションメールにて配信いたします.

今年度の講習会はオンライン形式の他，オンラインと対面のハイブリッド形式を予定しており，地域に関係なくお申込みいただけるものと考えております.

また，機械学会では，若手会員のための資格継続キャンペーン（https://www.jsme.or.jp/member/member-service/wakatecp2023/）を実施しております. 条件を満たした場合に翌年度の会費が免除されますので，講習会への参加をご検討の際は併せてご確認ください.

会員の皆様におかれましては，積極的なご参加ならびにまわりの方への呼びかけ等，ご協力をよろしくお願い申し上げます. また，ご意見やご要望がございましたらお知らせください.

2024年度（第102期）機械力学・計測制御部門　運営委員

部門長	髙橋 正樹
副部門長	松村 雄一
幹事	萬 礼応
運営委員会委員	伊東 圭昌
	大田 慎一郎
	大塚 啓介
	奥川 雅之
	貝塚 勉
	呉 志強
	小松崎 俊彦
	齋藤 彰
	齊藤 亜由子
	白石 俊彦
	末木 健之
	菅原 佳城
	園部 元康
	高木 賢太郎
	中川 智皓
	中島 明
	中野 幸人
	林 慈朗
	原 謙介
	原田 晃
	深沢 剛司
	藤田 活秀
	本白水 博文
	森田 英之
	森中 俊輔
	山田 啓介
	米沢 平成
	ラクシンチャ ポンサトーン
	李 根浩
	和田 悠佑
	渡邉 勝信

常設委員会	
総務委員会	
委員長	萬 礼応
副委員長	園部 元康
企画委員会	
委員長	松村 雄一
幹事	園部 元康
広報委員会	
委員長	貝塚 勉
副委員長	齊藤 亜由子
表彰委員会	
委員長	小松崎 俊彦
副委員長	末木 健之
国際交流委員会	
委員長	齋藤 彰
副委員長	山田 啓介
資格認定委員会	
委員長	齋藤 彰

DYNAMICS 編集室
日本機械学会機械力学･計測制御部門
〒162-0814 東京都新宿区新小川町4番1号
KDX飯田橋スクエア2階
電話 03-4335-7610
FAX 03-4335-7618

編集責任者　貝塚　勉　（工学院大学）
編 集 委 員　齊藤亜由子（工学院大学）

部門ホームページ：https://www.jsme.or.jp/dmc/
発　行　日　2024年7月16日