

# ダイナミック・マスダンパーを用いた建築物応答制御

EHS&S 研究センター上級研究員 兼 建築構造技術本部長 齊藤 賢二

Keyword : 応答制御, ダイナミック・マス, inerter, 定点理論, 同調粘性マスダンパー, 慣性こま

## 1. はじめに

ダイナミック・マスダンパー（慣性質量ダンパー）は今までにない、まったく新しいタイプのダンパーで、比較的コンパクトかつ簡単な仕組みで建物の「重さ」の調整を可能にした。従来、建築構造設計者は建物の「剛さ」は制御できたが、慣性力の大きさという意味での「重さ」を制御することはできなかった。そこで、柱や梁のサイズ変更、あるいは耐震壁、ブレース、またはダンパーを付加することにより建物の「剛さ」や「減衰（揺れの収まりやすさ）」を調整してきた。ダイナミック・マスダンパーの登場は、構造設計に新たな可能性をもたらした。

本稿では、国内外のダイナミック・マスダンパーに関連する現在に至るまでの研究開発を概観すると共に、建築物への適用例を紹介する。

## 2. ダイナミック・マス（DM）とは

ダイナミック・マスダンパーは、重さを発生するダイナミック・マス（dynamic mass, 以下DM）と呼ばれる要素を組込んだダンパーのことである。DMダンパーも建物の動きに応じて伸び縮みすることで反力を発生するという点では、他のダンパーと変わらない。ただ、非常にユニークな特徴は、その反力はあたかも建物に「重さ」を追加するような慣性質量効果があることである。一方、付加質量（錘）を適切な剛性のばねで接続して、制御対象構造物の固有振動数に同調する2次的な振動系を構成し、主構造物の振動により励起された2次振動系の運動に減衰を介在させることで振動エネルギーを消費、減衰させる機構は動吸振器と呼ばれる<sup>1)</sup>。建築物のような質量の大きい構造物にも、風揺れの制御等を目的として適用される場合があり、同調質量ダンパー（tuned mass damper, 以下TMD）と呼ばれることもある。前者が見掛けの質量を用いているのに対し、後者は実質量（錘）を用いている点で両者はまったく異なるダンパーである。

運動の第2法則（ニュートンの法則）では、物体に作用する力と運動状態の時間変化が下式のように結び付

けられる。

$$F = \frac{d}{dt}(mv) = ma \quad \dots(1)$$

ここで、 $v$ は基準座標系における物体の速度、 $t$ は時間である。物体の質量 $m$ は力と絶対加速度 $a = dv/dt$ の関係を結びつける比例係数となっている。

(1)式からわかるように、通常の質量要素における力は絶対加速度に比例するのに対し、DMにおいては、抵抗力は2節点間の相対加速度に比例する。図1にも示すように、DMに作用する力と相対加速度を結びつける比例係数（inertance）を $b$ で表すと、次の関係式となる。

$$F = b \frac{d(v_1 - v_2)}{dt} \quad \dots(2)$$

ここで、 $v_1, v_2$ はDMの2つの端部における速度である。

通常の質量と異なり、(2)式に従うような力学要素DMを物理的に実現する方法については、比較的古くから提案がある。Goodwinは流体の質量を用いた振動遮断装置を提案している<sup>2)</sup>。Flannellyは梘子を用いた振動遮断装置を提案している<sup>3)</sup>。国内では川股が同じく流体の質量を用いた「慣性ポンプ」を提案している<sup>4)</sup>。DMの実現方法としては、この他にラック・ピニオンを用いる方法や、振り子と梘子の組み合わせなど多数の提案があるが、構造物制御に必要な大きな質量効果を得ることは装置が大掛かりになるなどして難しいため、いずれも実用化には至っていない<sup>5, 6)</sup>。

黒田らは減衰こま（Rotary Damping Tube, 以下RDT）と呼ばれる粘性減衰装置を開発し、すでに多くの建物に採用されている<sup>7)</sup>（図2）。この装置は、軸方向運動をボールネジにより内筒の回転運動に変換し、固定された外筒の間に充填された粘性体のせん断抵抗力を得るものである。この際、内筒の接線方向の変位は軸方向変位の5～40倍程度に増幅されており、内筒の質量が回転することにより生じる慣性質量効果は実際の質量の千倍以上にもなっている。RDTは粘性ダンパーとして設計され



図1 ダイナミック・マス（DM）

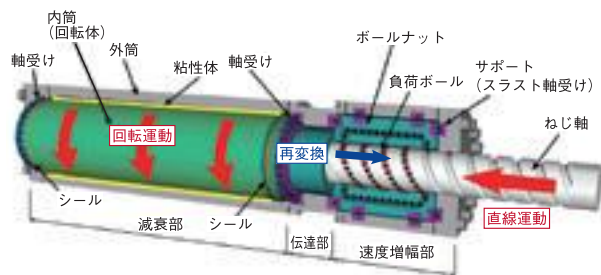


図2 減衰こま (RDT)

たものなので、慣性質量効果は副次的なものであり積極的な利用はされていないが、DMによる応答制御実用化の可能性を示していた。

ボールねじ機構によるDM効果を耐震機構として用いた初期の例の一つは、1970年代半ばから供用された原子力発電施設機器・配管系支持装置としてのメカニカル防振器である<sup>8)</sup>。

### 3. 電気回路と力学系のアナロジー

アナロジー (Analogy) とは、特定の事物に基づく情報を、他の特定の事物へ、それらの間の何らかの類似に基づいて適用する認知過程である。電気現象の詳細な機械的アナロジーを最初に提案したのはMaxwellである。Maxwellは、力を電圧に関連付けた力-電圧アナロジー (Force - Voltage Analogy) を提案した<sup>9)</sup>。しかし、力-電圧アナロジーでは、電気回路の並列接続が力学系では直列接続となってしまう、直列とか並列とかいう素子のつながり方がうまく合わなかった。それに対しFirestoneは、力を電流に関連付けた力-電流アナロジー (Force - Current Analogy) を提案した<sup>10)</sup>。素子を支配する物理的関係に即して、2端子間の電位差に速度差を対応させ、2端子間を流れる電流に2端子間を引張ったり押し込んだりする張力、圧縮力などの力を対応させると、直列とか並列とかいう素子のつながり方が実現できる。図3に力-電流アナロジーに基づく1質点振動系と対応する電気回路の例を示す。ここで、 $F$ : 加振力または加電流、 $S$ : ばねまたはコイル、 $M$ : 質量 (錘) またはコンデンサ、 $R_m$ : 粘性減衰または抵抗、 $u(t)$ : 応答速

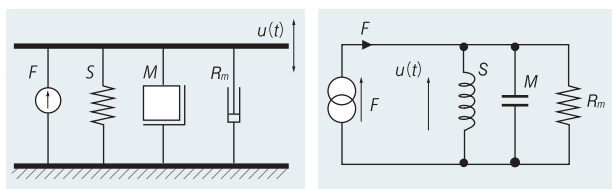


図3 1質点振動系と対応する電気回路<sup>9)</sup>

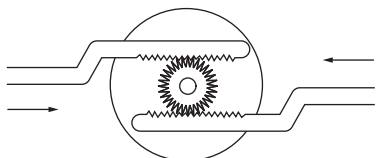


図4 2端子を持つ質量要素<sup>14)</sup>

度または応答電流を表す。

直列接続と並列接続の2通りの接続方法があるのは2端子要素だからである。しかし絶対加速度に比例する慣性抵抗力を生じる質量要素は1端子であり、力学系と電気回路の回路図はどうしても同じにできない。電気回路では必ず閉じた回路ができるが、1質点系では質量要素が枝となってしまう閉路を形成できないためである<sup>9,12)</sup>。

電気回路論が豊富な内容を持っているので、その一層の活用を図るために質量に相当する2端子要素がつかれないかと考えた研究者がいた<sup>13)</sup>。任意の電気回路を、力学系で類比しようとすれば、電荷に対して電位差を生ずる。すなわち、力に対して変位差 (加速度差) を生じるといった慣性の要素を考える必要がある。高橋らは、このような素子は、簡単にいえばフライホイールに加える偶力を一直線上に配置すれば実現できることを世界に先駆けて提案した<sup>14)</sup> (図4)。これによって、直列および並列の質量要素が実現可能となる。

ケンブリッジ大学のSmithは、2002年発表の論文で2端子を持つ質量に相当する要素を定義した<sup>15)</sup>。彼はこれを「inertor」と名付けたが、その基本概念は高橋らのそれと同じである。このinertorを並列接続すると加える力とそれにより発生する加速度との比であるinertanceが和になり、直列接続すると各inertanceの逆数の和の逆数になり値が減る。ただし質量はどちらも和になる。Inertor (DM) と質量は本質的に別物である。Chenらは、2節点間の相対加速度に比例して慣性抵抗力を生む要素をmissing mechanical elementと呼び、この欠けている要素を埋めるのがinertorであると説明している<sup>11)</sup>。Inertorの定義により、力-電流アナロジーにおける個々の要素は図5の対応関係で示すことができる。

このinertorという呼称は、前述のとおりSmithが発表した論文で初めて定義されたものであるが、これより少し前に石丸が動的な運動により誘導される質量という意味でダイナミック・マスという呼称を定義している<sup>16)</sup>。これらの呼称が定義されるまで、国内では慣性接続要素、補助質量というような呼称が使われることもあった。研

力学系 力: $F$ , 速度: $v$	電気回路 電流: $i$ , 電圧: $v$
ばね バネ定数 $k$ $\frac{dF}{dt} = k(v_1 - v_2)$	コイル インダクタンス $L$ $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(v_1 - v_2)$
Inertor inertance $b$ $F = b \frac{d(v_1 - v_2)}{dt}$	コンデンサ キャパシタンス $c$ $i = c \frac{d(v_1 - v_2)}{dt}$
粘性減衰要素 粘性減衰係数 $c$ $F = c(v_1 - v_2)$	抵抗 抵抗値 $R$ $i = \frac{1}{R}(v_1 - v_2)$

図5 力学系と電気回路の相似性<sup>11)</sup>

研究者によって用いられる呼称が異なることによる混乱を避けるため、日本建築学会ではダイナミック・マスという呼称を用いることで用語の統一を図っている<sup>17)</sup>。国際的にはSmithが定義したinertterという呼称が広く認知されているが、本稿ではダイナミック・マス (DM) という呼称を用いることにする。

#### 4. 運動方程式によるDM質量効果の考察

粘性減衰を有する地上構造物を想定した1質点振動系(以下、原振動系)と、原振動系にDMとして等価質量 $m_d$ を付与した振動系(以下、慣性質量系)をそれぞれ図6に示す。ここで、 $m$ と $k$ はそれぞれ主系の質量と剛性を、 $c_d$ はオイルダンパーなどの粘性ダンパーの粘性減衰係数を示す。 $x_0$ および $x$ はそれぞれ入力変位と応答変位を表す。ここで、DMの運動は、応答変位 $x$ のみに影響を受けるのであって、地動変位 $x_0$ の影響は受けない。

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_d\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_0 & \dots(3) \\ m\ddot{x} + c_d\dot{x} + kx + m_d\ddot{x} = -m\ddot{x}_0 & \dots(4) \end{cases}$$

式(3)、式(4)の両辺をそれぞれ $m$ と $m + m_d$ で除して、式(5)に示す無次元化量を用いて式を整理すると、それぞれ式(6)、式(7)となる。ここで、 $\tilde{h}_d$ は主系に対する減衰定数を表している。

$$\tilde{h}_d = \frac{c_d}{2\sqrt{mk}}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \dots(5)$$

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\tilde{h}_d\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{x}_0 & \dots(6) \\ \ddot{x} + \frac{c_d}{m+m_d}\dot{x} + \frac{k}{m+m_d}x = -\frac{m}{m+m_d}\ddot{x}_0 & \dots(7) \end{cases}$$

式(6)と式(7)の各項の比較により、DMを付与することにより原振動系に対して、①周期伸張効果：構造物の動的質量を増大させることによる効果、②入力低減効果：地盤に対する相対運動に関して、見掛けの地動入力振幅を低減する効果、③モード制御効果：多自由度構造物において、質量行列を改変することにより、2次以上の高次モードの刺激関数を消去するなど、DMは粘性減衰や履歴減衰では得られない振動系の特性変動を誘導する<sup>18)</sup>。また、DMを構造物と剛で接合するため、DMを介して直接、地動加速度が上層階へ伝達されるという負の特性を有する。齊藤らは、免震建物のダンパーとしてDMを用いた場合の検討を行っている<sup>19)</sup>。大亦らは、DMの免

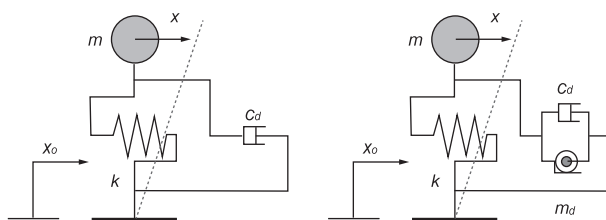


図6 粘性減衰を有する振動系(左)とDMを付与した振動系(右)

震ダンパーへの適用性について粘性ダンパーとの比較で論じている<sup>20)</sup>。いずれの研究も、DMがもたらす付加質量効果が小さい範囲であれば上部構造の加速度応答も大きくならず免震層変位応答抑制に効果があるとしている。

DMを付与することにより得られる最も重要な効果は、④同調効果：制御対象の構造物とDMの間に剛性を調整したばね部材を配置することにより得られる付加振動系に減衰を介在させて動吸振器に類する機構を構築するものである。齊藤らは、DM、ばね、粘性減衰からなるダンパーについて、ばねと粘性減衰を適切に調整することでDMだけでは得られない高い応答抑制効果が得られることを示している<sup>21)</sup>。

本稿では④同調効果に着目し、以降これを利用した振動制御について解説する。

#### 5. DMダンパーに関する研究動向

##### 5.1 Smithの研究業績

Smithは、inertterの定義とそれを実現するための実際の機構を提案している。さらに電気回路と力学系のアナロジーから電気回路合成論を力学系に応用することで、それまでのばねと粘性減衰要素だけは実現不可能な優れた特徴を持つダンパーが実現できることを理論的に明らかにすると共に、多くのDMダンパーを開発している<sup>15)</sup>。Smithは、1997年にinertterを用いたF1マシン用サスペンション「J-Damper」を発明した<sup>11,22)</sup>。「J-Damper」を搭載したF1マシンは多くのレースで優勝を取めている。

##### 5.2 DMを用いた主なダンパー

構造物応答制御分野で研究対象となっている主なDMダンパーを以下にまとめて示す。図7の左からInertial damper (DM, 慣性ダンパー)<sup>23)</sup>、TVMD (Tuned Viscous Mass Damper, 同調粘性マスダンパー)<sup>24)</sup>、TID (Tuned Inertter Damper)<sup>25)</sup>、TMDI (Tuned Mass Damper Inertter)<sup>26)</sup>と呼ばれ、TVMDとTDIについてそれぞれSVID (Serial Viscous Inertter Damper)ならびにPVID (Parallel Viscous Inertter Damper)と呼ばれることもある<sup>27)</sup>。TVMDとTIDとはダンパー構成要素は同じであるが、TVMDは低次モードに同調させるとTIDと異なり高次モードの減衰は増えない。高次モードの減衰を増大させたい場合にはTIDが有利であるが、高次モードの減衰を抑えたい場合にはTVMDに優位性がある<sup>24,25)</sup>。

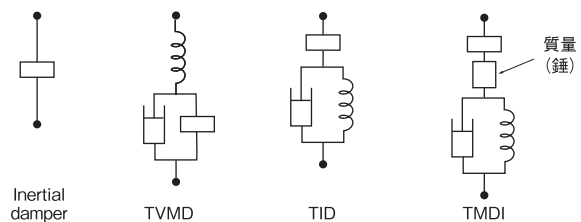


図7 DMを用いた主なダンパー



TVMDは主に日本国内で研究開発の対象となっている。一方、TIDとTMDIは主に英国を中心とする研究機関での研究対象となっている。日本国内でTVMDが主な研究対象となっているのは、慣性質量効果と粘性減衰効果を1つのダンパーで同時に発揮できるRDTが研究スタート時点ですでに開発実用化されていたことが主な理由である。

### 5.3 DMダンパーに関する最近の研究

DMを用いたダンパー設計法については、構成する各要素数と配列をいくつか仮定し試行錯誤しながら目的とするダンパーを決定する方法が一般的であるが、この方法では多大な労力を必要とする。現時点で構造物の応答制御に用いられているダンパーは5.2節に示したものが主であるが、機械分野では多くの要素を用いてより複雑な応答制御が試みられている。このため、目的とするダンパーを構築できる合理的な設計法が研究されている<sup>28~30)</sup>。さらに、これらの研究はすでに実プロジェクトに適用されている<sup>31~33)</sup>。

DMを用いた応答制御法に関連する研究は、基本的にダンパーを構成するDM要素、粘性減衰要素、ばね要素をすべて線形としている。これに対し、いずれかの要素あるいはすべての要素を非線形とすることで線形要素のみでは実現できない優れた応答抑制が可能であるとする研究がある。Zhaoらは、TVMDのダンパー要素を変位依存履歴型減衰要素に置き換えたシステムを新たに提案し、DMの効果で大きな応答低減効果が得られること、特に履歴減衰は応答変位に比例して減衰力を発揮するため応答のピークを下げるうえで有効であることを示した<sup>34)</sup>。Deastraらは、粘性ダンパー要素の代わりに線形履歴減衰 (linear hysteretic damping) 要素を用いたTIhD (tuned inerter hysteretic damper) およびTMhDI (tuned mass hysteretic damper inerter) を提案し、粘性減衰要素を持つTID、TMDIを設けた構造物との地震応答の比較を行っている<sup>35)</sup>。池永らは、DMが応答変位に応じて性能変化する可変質量ダンパーについて、性能変化のタイミングとダンパー性能を適切に設計することで、性能変化しない場合と比較して床応答加速度と免震層変位を同時に抑制できることを示した<sup>36)</sup>。

その他の研究として、YeらはTIDのDM要素と並列にパッシブ型で負剛性をもつNSD (negative stiffness device) 要素を組み合わせたTID\_NSDダンパーシステムを新たに提案し、TIDと比較して床応答加速度と層間変位を同時に抑制できることを示した<sup>37)</sup>。Quinoneroらは、TMDIならびにTIDを用いた連結制振構造について検討し、TMDIの方が床加速度応答、層間変位共にTIDよりも応答抑制効果が高いことを示した<sup>38)</sup>。

DMダンパーの各要素を可変とする、あるいは他の制

御機構を付加することによりさらなる優れた応答抑制効果が生まれることが期待できる。

## 6. 同調型 DM 制振システム

### 6.1 DMダンパーの最適設計法

徐らは、不規則振動論の視点から、評価関数としてシステム伝達関数のノルムの概念を導入することにより、外力により異なる最適設計を統一的に実現している<sup>39)</sup>。 $H_{\infty}$ ノルムはDen Hartogの方法<sup>1)</sup>に対応し、あらゆる外力に対する最悪の応答を評価していると考えられ、周波数応答関数の最大値によって評価される。 $H_2$ ノルムはWarburtonの方法<sup>40)</sup>に対応し、白色雑音を入力とする系の応答の標準偏差として計算できる。なお、解析的な最適解が求められるのは基本的に制御対象の構造物が無減衰の1質点系で、ダンパーを構成する要素が粘性要素、ばね、それにDMの各1つずつの系のみである。構造物の減衰を考慮、多自由度系、外力の周波数特性を考慮する場合等においては、数値解析による最適設計手法が必要となる。また、解析的手法により閉形式 (closed-form) の最適解が得られる条件は限られているため、多くの研究では数値計算による最適化手法が用いられている。DMダンパーの最適設計において $H_2$ と $H_{\infty}$ ノルムによる解析解の比較については文献<sup>41,42)</sup>などに示されている。

### 6.2 定点理論によるTVMDの最適制御設計

TMDでは、建物質量の1~3%程度あるいはそれ以上の付加質量 (錘) が必要となるので、これをDMで置き換えることにより、骨組や基礎構造への負担を軽減しながら、さらに質量比を高めることで高い制御効果を得る方法が提案されている<sup>24,43~45)</sup>。

TVMDの設計においては、伝達関数がダンパーの減衰定数の値にかかわらず必ず通る点、即ち定点を利用して伝達関数のピークを最小化する解を用いる。この時、減衰増幅効果のある柔ばね解を用いると良い<sup>43,46,52)</sup>。

図8に示したTVMD付き1質点系において、調和地動の変位振幅に対する主質量の応答変位振幅の比を描くと図9のようになる。

この図で、粘性部の減衰係数を0から無限大に変化させても、伝達率の曲線が必ず通る定点が2つ存在することがわかる (図9に示すP、Q点)。

伝達率はこの定点高さより小さくなることはないので、伝達率を最小にするためには定点において最大伝達率となるようにすることと、定点の高さを最小を同時に達成すれば良い。このようにして伝達率の最大値を最小化する方法はDen Hartogにより提案されたもので定点理論と呼ばれている<sup>1)</sup>。

まず、図中の2つの定点P、Qは互いに一方を下げる

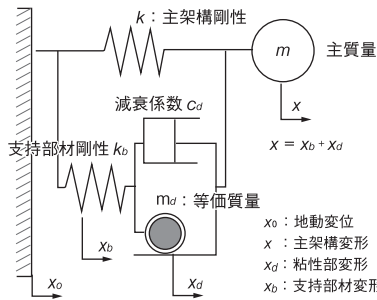


図8 同調粘性マスダンパー (TVMD) の力学モデル

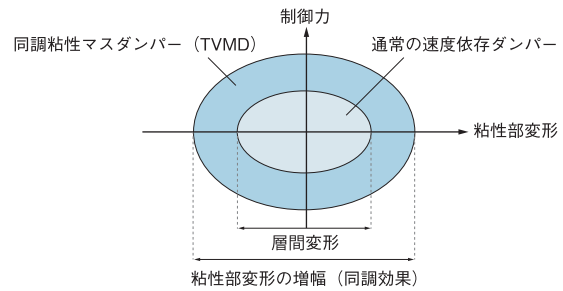


図10 同調粘性マスダンパー (TVMD) の効果

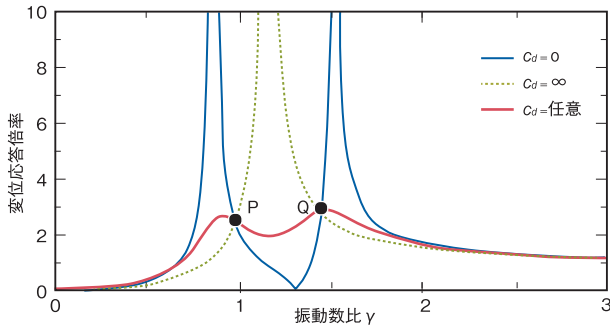


図9 変位伝達関数

と他方が上がる関係にあるので、両者の高さを揃えると定点高さ最大値が最小となる。この条件は、TVMDの支持ばね剛性 $k_b$ の調整により達成される。支持ばねとDMで構成される2次振動系の固有円振動数 $\omega_d = \sqrt{k_b/m_d}$ と被制御系固有円振動数 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ の比を $\beta$ で表すと、定点高さが揃う条件は次式となる<sup>43,46)</sup>。

$$\beta = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\mu}}{2\mu} \quad \dots(8)$$

ここで、

$$\mu = \frac{m_d}{m}, \quad \eta = \frac{k_b}{k}, \quad \beta = \frac{\omega_d}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\eta}{\mu}} \quad \dots(9)$$

である。

次に、TVMD内の減衰要素について、その減衰係数 $c_d$ の2次振動系臨界減衰係数(=  $2\sqrt{m_d k_b}$ )に対する比を $h_d$ で表すと、伝達率が定点において最大となる条件は次式のように得られる<sup>43,46)</sup>。

$$h_d = \frac{\sqrt{3(1 - \sqrt{1 - 4\mu})}}{4} \quad \dots(10)$$

以上より、最適なTVMDの支持ばね剛性 $k_b$ および減衰係数 $c_d$ は次式から得られる。

$$k_b = \mu \beta^2 \omega_0^2 m, \quad c_d = 2h_d \sqrt{m_d k_b} \quad \dots(11)$$

DMが最適な支持ばねと減衰要素に接続されると、付加振動系の運動振幅が主振動系との共振効果により増幅し、効率的なエネルギー消費につながる。このことを説明するのが図10である。

定点理論は基本的に被制御系が1自由度の場合にしか適用できない。多自由度系制御への拡張については、被制御系を等価な一自由度に縮約するなどの方法が提案さ

れている。特に、TVMDの付加質量分布が被制御系建物の剛性分布に比例するような特別な配置とする場合については(8)~(11)式の最適解を利用できることが明らかにされている。この詳細については文献<sup>46)</sup>等々に示されている。

## 7. 建築物制御可能なDMの実現

中南らは慣性質量効果の実建物応答制御への適用を目的として、RDTの内筒の質量を大きくし最大1,000tonの等価質量を持つ装置を開発した<sup>47)</sup>。しかし、この装置はRDTと比較して重量とサイズが大きく本格的実用化にはさらなる改良を必要とした。

回転慣性質量ダンパー「慣性こま (inertial Rotary Damping Tube, 以下 iRDT)」は、従来のRDTの回転慣性質量効果を飛躍的に高めるために、最外周部に付加錘として回転体を設置し、1台で数千トンに見掛け質量効果と大きな粘性減衰効果を同時に発揮することができる装置であり、同調ばねをつなげば粘性ダンパーを別置きしなくてもTVMDを実現できる。iRDTの開発実用化より、これまで配管設備や自動車などの比較的質量が小さいものを対象としていたDMの適用範囲が建築物のような質量の大きい構造物にまで広がった。

同調効果による過大な制御力や、それに伴う地震時入力エネルギー増大を防ぐため、ダンパー回転部に設けられた滑り機構による軸力制限を行うことは設計上の必須事項である。iRDTには、DM要素と粘性要素の回転方向抵抗力の合力を回転滑りで頭打ちにする滑りクラッチ(軸力制限機構)が設けられている(図11)。この制限力は回転する外筒側から固定された内筒に押し付けられる

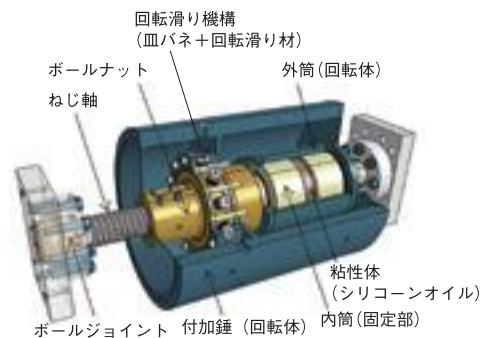


図11 慣性こま (iRDT) の構造



写真1 慣性こま (iRDT) の実機

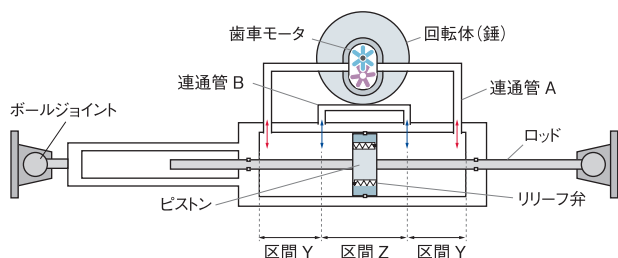


図12 回転慣性質量ダンパー (iHGD) の機構模式図<sup>50)</sup>

滑り摩擦剤の押付力を皿ばね機構で調整できるようになっている<sup>48)</sup>。制限力の大きさについては、頭打ち機構がない場合の最大ダンパー力の半分程度の大きさに設定しても被制御系の応答はほとんど劣化しないことが解析により確認されている<sup>49)</sup>。制震用として見掛けの質量が1,000~6,000 ton、軸力制限荷重が1,000~2,000 kNの装置がすでに実用化されている (写真1)。

iRDTよりさらに大きな慣性質量効果を得るため、木田らは図12に示すように作動油の液圧で駆動するパッシブタイプの歯車モータを利用した回転慣性質量ダンパー (inertial Hydraulic Gerotor Damper, 以下 iHGD) を提案すると共に、等価質量10,000ton 級 (質量増幅率で約150万倍) の試作機を作製し実大レベルの基礎的な検証実験を行っている<sup>50)</sup>。iHGDは、大きな等価質量を発生できるだけでなく、リリース弁の効果でダンパー力を容易に頭打ちにすることができる。また、複数の連通管を設けることで変位レベルに応じ慣性質量効果を調整することも可能である。iHGDを用いることにより特に超高層建物の場合には、①ダンパー数の削減によるコストメリット、②制振システムのロバスト性向上、③RC造のような変形が小さい建築物への適用の可能性拡大、④剛性調整用のゴム部材が不要になる、等のメリットが考えられる。

## 8. 建築物への TVMD 適用事例

新築建物への TVMD 最初の適用例は仙台市内に建つ建物である<sup>51,52)</sup> (写真2, 3)。建物は、延床面積約30,000㎡、地上14階建て、軒高さ63.2m、直接基礎、鉄骨造 (柱CFT造) である。本建物では、桁行方向5階から上の全層の TVMD を建物の1次モードに同調させ、1構面当たりダンパー2基、ダンパー1基当たりの DM

質量は5,400ton (錘部の実質量は560kg) と設定した。設計同調周期2秒程度に対し、取付部材の剛性を調整することによりダンパー全体で2秒という周期をいかにして実現するかが設計上の大きな課題であった。最終的な解決策としては、ゴム部材をダンパー周期調整用部材とし、鉄骨ブレースを介して接続している (図13)。

TMDは地盤からの相対変位が大きくなる建物頂部に近い位置に設置されることが多いのに対して、TVMDは建物の層間に設置される。このため、TVMDにおいては制御に利用できる変形がTMDより小さくなる。そこでより効果を高めるため、TVMDを3層に跨って設置し、それにより得られる3層分の相対変形を利用したり<sup>53)</sup> (図14 (a))、建物の下層部分に設けられたソフトストーリーの変形を利用する<sup>54)</sup> (図14 (b)) などの工夫がなされている。

また、建物のせん断変形よりも曲げ変形が卓越する場合にも層間に設置するダンパーの効果が低減してしまう。建物の曲げ変形は柱の軸方向伸縮に起因するので、図15のようにダンパーをアウトリガー型に縦使いとする工夫もなされている<sup>55,56)</sup>。

アウトリガー型配置で正負同一剛性の鋼材を用いた場合には支持部材の伸び縮みを十分許容できる座屈止めが多数必要となる。これに対し、堀らは、引張側は適切な低剛性、圧縮側は座屈対策に有効な高剛性となる正負非



写真2 TVMD最初の適用建物



写真3 TVMD設置状況

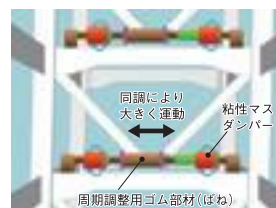
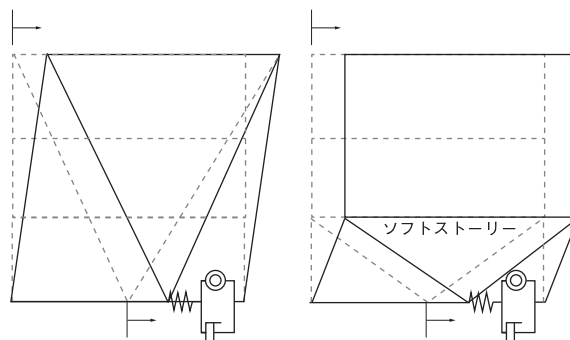


図13 ダンパーの動き



(a) 複数の層間変形を集約する方法 (b) ソフトストーリーの活用  
図14 大きなダンパー変形を確保する工夫<sup>58)</sup>



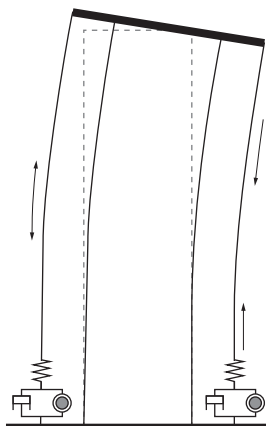


図15 アウトリガー型配置による曲げ変形の制御<sup>58)</sup>

対称剛性の支持部材を提案すると共に、正負対象の場合と比較して同等の制御効果があることを明らかにしている<sup>57)</sup>。さらに、ダンパーを左右片側のみに配置した場合や支持部材を1階と中間階というように短くした場合についても検討し、いずれも正負同一剛性の場合と同等の効果があることを解析で明らかにしている。堀らの研究は、アウトリガー型配置制振システムのコスト低減、工期短縮に寄与するものである。

## 9. 結び

本稿では、振動制御分野において比較的新しい力学要素として登場したダイナミック・マス (DM, inerter) について解説すると共に、それに関連した現在までの研究開発を概観し、最後に近年実用化されたTVMDの建物への適用事例について紹介した。我国では、1970年頃から質量効果の増幅と、相対加速度に比例する抵抗力を利用した振動制御技術が提案され、実用化されていた。DMダンパーに関する理論的研究では英国の大学が世界をリードしている面もあるが、建築物のような規模の大きい構造物の制御を可能とするような大型の装置が実現されたことを受けて、日本国内では建築物の応答制御への応用が世界に先駆けて進んでいる。

実施可能な装置が実用に供され、また建築物を対象とした設計法についても確立していることから、応答制御技術における可能性がさらに広がった。建築構造設計者の創意工夫次第で、耐震性能とコスト面で優れた応答制御構造の設計がまた一つ可能となったといえよう。

### 〔謝辞〕

東北大学の五十子幸樹教授には、英国ロンドン大学シティ校 Giaralis 上級講師、シェフィールド大学 Wagg 教授、ブリストル大学 Nield 教授らとの研究交流会へお誘い頂いた (写真4)。そこで触れたDMに関連する最新の研究内容は、本稿執筆にあたり大変参考になった。また本稿執筆にあたって、同教授から貴重な助言と資料提供を賜った。ここに深く感謝の意を表す。



写真4 シェフィールド大学での研究交流会 (左) と研究交流会参加メンバー (シェフィールド大学 Laboratory of Verification and Validation: LVV にて) (右)

### 〔参考文献〕

- 1) Den Hartog : Mechanical Vibrations, 1985, Dover New York
- 2) Goodwin, A. : Vibration isolators, p.3, 322, 379 A. US Patent, 1967
- 3) Flannely : Dynamic anti-resonant vibration isolator, p.3, 445, 080.US Patent, 1969
- 4) 川股ほか : 制振機構に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造系, pp.857~858, 1973.10
- 5) 奥村敦史 : 振動遮断接続機構, 早稲田大学技術シリーズ, NO.TLO 2000-02, 2000.3
- 6) 藤波健剛, 山本鎮男 : 振り子とてこ機構を付与した動吸振器による制振 (機構の原理と最適調整, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.57, No.538, pp.1842~1847, 1991.6
- 7) 黒田ほか : ボールネジを用いた制振装置の開発 (その1), 日本建築学会技術報告集第8号, 日本建築学会, pp.239~244, 1994.2
- 8) 川口ほか : メカニカル防振器の研究開発, (I), 日本原子力学会誌, 33 (1), pp.76~89, 1991
- 9) [https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical-electrical\\_analogies](https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical-electrical_analogies), 2021.4.2
- 10) Firestone : A new analogy between mechanical and electrical systems, Acoustical Society of America, 4, pp.249~267, 1933
- 11) Chen et al. : The missing mechanical circuit element, Circuits and Systems Magazine, IEEE, 9(1), pp.10 ~ 26, 2009
- 12) [https://en.wikipedia.org/wiki/Impedance\\_analogy](https://en.wikipedia.org/wiki/Impedance_analogy), 2021.3.22
- 13) 北森俊行 : 電気回路論とアナロジー, 応用科学学会誌, Vol.24, No.1, 2011.5
- 14) 高橋, 藤村 : 物理学汎論 (VII), 日本物理学会誌, 第12巻, 第4号, pp.144~152, 1957
- 15) Smith : Synthesis of mechanical networks : The inerter, IEEE Transactions of Automatic Control, 47(10), pp.1648 ~1662, 2002
- 16) 石丸 : 耐震設計の方法 ダイナミックデザインへの誘い, 建築技術, 2008
- 17) 日本建築学会 : やさしくわかる建築振動制御, 2014.6
- 18) 古橋, 石丸 : 慣性接続要素によるモード分離 : 慣性接続要素による応答制御に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, (576), pp.55~62, 2004.2

- 19) Saito, Yogo, Sugimura, Nakaminami, Park : Application of rotary inertia to displacement reduction for vibration control system, 13th WCEE, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.1764, 2004.8
- 20) 大亦, 近藤, 安井 : 磁気減衰器付ボールねじ式防振器を用いた免震装置の研究, 日本機械学会論文集 (C編), 57巻535号, 1991.3
- 21) 齊藤ほか : 慣性質量要素を利用した粘性ダンパーによる構造骨組の応答制御 その7~8, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2006.9
- 22) [http:// https://fl-motorsports-gp.com/car-design/j-damper-inerter](http://https://fl-motorsports-gp.com/car-design/j-damper-inerter), 2021.4.9
- 23) Takewaki I, Murakami S, Yoshitomi S, Tsuji M. Fundamental mechanism of earthquake response reduction in building structures with inertial dampers. Structural Control and Health Monitoring 2012, 19, pp.590~608
- 24) Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single degree of freedom structure using tuned viscous mass damper. Earthquake Engineering and Structure Dynamics 2012, 41, pp.453~474
- 25) Lazar IF, Neild SA, Wagg DJ : Using an inerter based device for structural vibration suppression, Earthquake Engineering and Structure Dynamics 2014, 43, pp.1129~1147
- 26) Marian L, Giaralis A. : Optimal design of a novel tuned mass damper inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support excited structural systems. Probabilistic Engineering Mechanics 2014, 38, pp.156~164
- 27) C.Pan et al. : Demand-based optimal design of oscillator with parallel-layout viscous inerter damper, Struct Control Health Monit.2018, 25, e2051
- 28) Zhang SY, Jiang JZ, Neild S : Optimal configurations for a linear vibration suppression device in a multi-storey building, Struct. Control Health Monit 2016, 24, e1887
- 29) Zhang Y, Jiang Z, Neild S : Passive vibration control : a structure-immittance approach, Proceedings of the Royal Society, 473(2201), 2017
- 30) Zhang SY, Li Y-Y, Jiang JZ, Neild SA, Macdonald JHG : A methodology for identifying optimum vibration absorbers with a reaction mass, Proc. R. Soc, A 475, 2019
- 31) Li Y, Jiang JZ, Neild S : Inerter-based configurations for main landing gear shimmy suppression, J. Aircr, 54, pp.684~693, 2016
- 32) Wang et al. : Stability and performance analysis of a full-train system with inerters, Veh. Syst. Dyn, 50, pp.545~571, 2012
- 33) Li, Y-Y. et al. : Vibration suppression for monopile and spar-buoy offshore wind turbines using the structure-immittance approach, Wind Energy, 23, pp.1966~1985, 2020
- 34) Z. Zhao et al. : Displacement-Dependent Damping Inerter System for Seismic Response Control, Appl. Sci., 10, 257, 2020
- 35) P. Deastra et al. : Tuned inerter dampers with linear hysteretic damping, Earthquake Engng Struct Dyn., pp.1~20, 2020
- 36) 田中, 甫木元, 池永 : 可変質量要素を有するマスダンパーの免震建物への適用性 その1~2, 日本建築学会大会学術梗概集 (北陸), pp.199~202, 2019.9
- 37) K. Ye, P. Nyangi :  $H^\infty$  Optimization of Tuned Inerter Damper with Negative Stiffness Device Subjected to Support Excitation, Shock and Vibration vol.2020, Article ID 7608078
- 38) F. P. Quinonero et al. : Advanced computational design of shared tuned mass-inerter dampers for vibration control of adjacent multi-story structures, Preprints of the 20th IFAC world congress, Toulouse, France, July 9-14, 2017
- 39) 徐, 岡林, 林 : 不規則振動論による動吸振器の最適設計, 土木学会論文集, No.598, I-44, pp.371~379, 1998.7
- 40) Warburton, G.B. : Optimum Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters, Earthquake eng. Struct. Dyn, Vol.10, pp.381~401, 1982
- 41) A. Javidialesaadi, N. Wierschem : Mitigation of Structural Response Due to Near-Field Seismic Ground Motion Using an Optimized Innovative Rotational Inertia Damping Device, 2016 Student Paper Competition of ASCE EMI SHMC Committee
- 42) Yinlong Hu a, Michael Z.Q.Chen : Performance evaluation for inerter-based dynamic vibration absorbers : International Journal of Mechanical Sciences 99, pp.297~307, 2015
- 43) 齊藤, 栗田, 井上 : 慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御とKelvinモデル化手法に関する考察, 53B, pp.53~66, 2007.3
- 44) Lazar, Neild, Wagg : Using an inerter-based device for structural vibration suppression, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 43, pp.1129~1147, 2014
- 45) 石丸, 三上, 秦, 古橋 : D.M.同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集, 75 (652), pp.1105~1112, 2010
- 46) 井上, 五十子 : 建築物の変位制御設計, 2012, 丸善出版
- 47) 中南ほか : 慣性質量要素を有する粘性減衰装置の開発, 三井住友建設技術研究所報告, pp.157~164, 2005.9
- 48) Y. Watanabe, K. Ikago, N. Inoue, H. Kida, S. Nakaminami, H. Tanaka, Y. Sugimura, K. Saito : Full-Scale Dynamic Tests and Analytical Verification of a Force-Restricted Tuned Viscous Mass Damper, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Paper ID 1206, 2012
- 49) Kida, Ikago, Inoue : Applicability of Force-restricted tuned viscous mass dampers to high-rise buildings



- subjected to long-period ground motions, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 64, 2012
- 50) 木田, 中南, 五十子, 井上: 液圧で駆動する歯車モータを利用した回転慣性質量ダンパーの開発 その1. 提案装置の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造系, pp.631~632, 2017.8
- 51) 斎藤ほか:(仮称) Aビル 高効率な制振システムを採用した複合通信ビル, 日本建築センター, ビルディングレター, 2011.7
- 52) 杉村ほか: 同調粘性マスダンパーを適用した超高層鉄骨造建物の応答制御効果, 日本建築学会技術報告集, 18 (39), pp.441~446, 2012.6
- 53) 萩野ほか: 同調粘性マスダンパーを3層にわたって配置した超高層建築部の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造, pp.771~776, 2014
- 54) 宮崎, 村上: 同調粘性マスダンパーを用いたソフトファーストストーリー集中制振建物の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造系, pp.627~628, 2017
- 55) 吉江, 宇田川, ジロン: 超高層ビルの新しい制振改修システム, 建築技術, pp.32~34, 2021.2
- 56) 吉江, 宇田川, ジロン: 鉄骨建築の制振・免震, 鉄鋼技術, pp.36~37, 2021.4
- 57) 堀ほか: 正負非対称剛性部材で鉛直方向設置した同調粘性マスダンパーによる高層建物の全体曲げ変形制御 その1~4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2020.9
- 58) 五十子: ダイナミック・マスダンパーを用いた建築物振動制御, 振動技術, 第43号, 防振・除振, 2021



さいとう けんじ  
齊藤 賢二

EHS&S 研究センター上級研究員 兼 建築構造技術  
本部長 兼 構造設計システム部長  
建築構造計算プログラム「SEINファミリー」の開  
発, 販売, サポートに従事  
博士(工学), 一級建築士, 構造設計一級建築士,  
技術士(建設部門), APEC Engineer  
構造計算適合性判定資格者  
日本建築学会, 日本建築構造技術者協会会員

## Synopsis

### Response Control of Buildings using Dynamic Mass Dampers

Kenji SAITO

The dynamic mass damper (inertial mass damper) is a novel damper that has never existed before. Dynamic mass dampers described in this paper have made it possible to adjust the weight of buildings with a relatively compact and simple mechanism. In the past, structural engineers could control the rigidity of a building, but not the weight in terms of the magnitude of inertial force. Traditionally, engineers have adjusted the rigidity and/or damping (absorption ability of shaking energy) of buildings by resizing columns and beams, or by adding shear walls, braces, or dampers. The advent of dynamic mass dampers has opened up new possibilities for structural seismic design.

This paper provides an overview of research and development up to the present related to dynamic mass dampers in Japan and overseas, and also introduces some design examples of application to buildings in Japan.