

# ジャイロダンパーによる 高層建築物の制振

1100467 村井 玲太

高知工科大学 工学部 社会システム工学科

ジャイロモーメントを利用した制振装置, GD (gyroscopic damper) による地震振動の制御の可能性について検討した. 建築物の変形を曲げ変形として捉えるのではなく, せん断変形として捉え検討した. 10階建ての建築物をモデルとして, 実際の設計において重要となるGDの最適パラメータを導いた. また, 実例のあるTMDと比較検討し, ジャイロ効果によって相対的に小さな付加質量で大きな制振効果が得られることなどを明らかにした.

**Key Words** : ジャイロモーメント, 層間変形角, 最適パラメータ

## 1. はじめに

近年では, 建築物の風振動をパッシブ型のダンパーで抑制している例が多い. その制振方法としては, オイルの粘性で振動を吸収するオイルダンパー, 錘と建築物を同調させ振動を低減する TMD (Tuned Mass Damper), TMD の錘の代わりに液体を用いる TLD (Tuned Liquid Damper) 等が, 多く報告されている. しかし, モーメントを制振力とする GD (gyroscopic damper) を用いた制振方法は, 実例も実験例もまだ少ない. さらに, 地震振動の制振方法として, GD を用いた実験例は, 未だに報告がない.

風振動に対して GD を用いた実験例<sup>1)</sup>では, GD の方が, TMD より比較的小さな付加質量で大きな制振効果を得られるということが明らかにされている. そこで, 本研究では, GD が地震振動に対して有効な制振方法であるかを確認するために, 基盤を水平振動させて GD の制振効果を検討する. また TMD を用いた実例を参考に, その付加質量と制振効果の観点から比較検討する.

## 2. ジャイロダンパーの概略構造

図-1 に示した構造の GD を考える. 鉛直軸(z) 周りに高速で回転するロータをジンバル枠で支持し, このジンバル枠を水平軸(y) 周りに回転できるように支持する. ジンバルの回転軸(y) 周りには, ジンバルの位置を保持するためのねじれバネと, エネルギー吸収用ダンパーを設ける. さらに, このジンバル枠を, (x) 軸に回転できるようにフレームで支持する. フレームは, 層間変形によって(x) 軸周りに回転するように, フレーム側をピン結合, 反対側を剛結合とした支持柱で梁と床から支えるものとする.

建築物に外力が加わると, せん断変形が生じて層間変形角が発生する. それに伴い, フレームが傾きロータも(x) 軸周りに回転するため, (y) 軸周りにジャイロモーメントが生じる.

このモーメントにより, ジンバルが(y) 軸周りに回転し, この(y) 軸周りの回転によって(x) 軸周りのジャイロモーメントがロータ, 従って建築物に作用して制振作用が生じるのである.

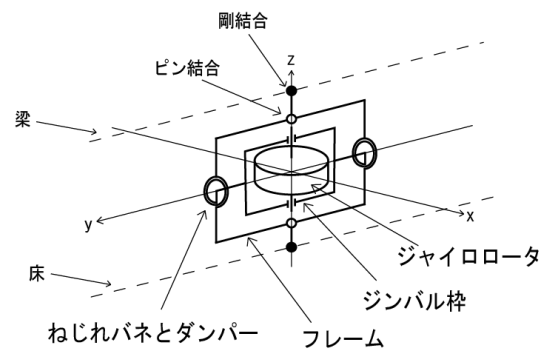


図-1 ジャイロダンパーの構造

## 3. ジャイロダンパーの制振効果

### 3.1 運動方程式

本研究で検討する建築物のモデルを, 図-2 に示す.

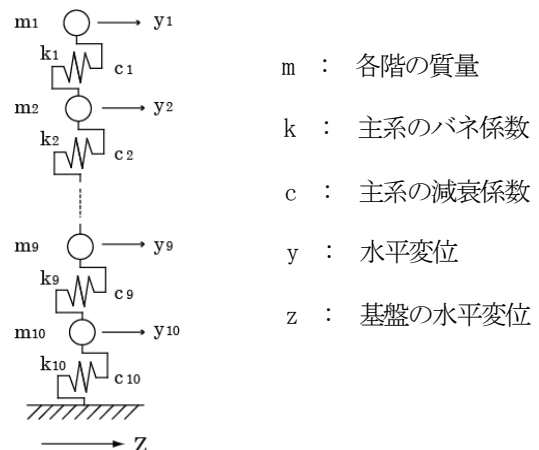


図-2 モデル

本研究では、建築物の変形を曲げ変形ではなく、せん断変形として捉えることとする。したがって、各質点は図のようなバネで繋がっていると考え、建物の諸元を表-1に示す。

表-1 建物の諸元

階数 (階)	10			
各階の重量 (t)	300			
階高 (m)	3.0			
階	1~3	4~6	7~8	9~10
バネ係数 (× 10 <sup>3</sup> t/m)	600	510	360	300
減衰係数 (t/m)	620	527	372	310

図-2 のモデルの運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1(y_1 - y_2) &= 0 \\
 m_2 \ddot{y}_2 + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + k_1(y_2 - y_1) + k_2(y_2 - y_3) &= 0 \\
 &\vdots \\
 m_9 \ddot{y}_9 + c_8(\dot{y}_9 - \dot{y}_8) + c_9(\dot{y}_9 - \dot{y}_{10}) + k_8(y_9 - y_8) + k_9(y_9 - y_{10}) &= 0 \\
 m_{10} \ddot{y}_{10} + c_9(\dot{y}_{10} - \dot{y}_9) + c_{10}(\dot{y}_{10} - \dot{z}) + k_9(y_{10} - y_9) + k_{10}(y_{10} - z) &= 0
 \end{aligned}$$

階高を  $h$  として、ジャイロ項を導入しやすいうように変数を層間変形角に置換する。

$$\frac{(y_1 - y_2)}{h} = \theta_1, \quad \frac{(y_2 - y_3)}{h} = \theta_2, \quad \dots, \quad \frac{(y_9 - y_{10})}{h} = \theta_9, \quad \frac{y_{10}}{h} = \theta_{10}$$

また、 $z = Ze^{i\omega t}$  とし、上の運動方程式に代入する。

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta}_1 + c_1\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)\dot{\theta}_1 - \frac{c_2}{m_2}\dot{\theta}_2 + k_1\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)\theta_1 - \frac{k_2}{m_2}\theta_2 - \frac{\Omega J}{m_1 h^2}\dot{\theta} &= 0 \\
 \ddot{\theta}_2 - \frac{c_1}{m_2}\dot{\theta}_1 + c_2\left(\frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3}\right)\dot{\theta}_2 - \frac{c_3}{m_3}\dot{\theta}_3 - \frac{k_1}{m_2}\theta_1 + k_2\left(\frac{1}{m_2} + \frac{1}{m_3}\right)\theta_2 & \\
 - \frac{k_3}{m_3}\theta_3 = 0 & \\
 &\vdots \\
 \ddot{\theta}_9 - \frac{c_7}{m_8}\dot{\theta}_8 + c_9\left(\frac{1}{m_9} + \frac{1}{m_{10}}\right)\dot{\theta}_9 - \frac{c_{10}}{m_{10}}\dot{\theta}_{10} - \frac{k_8}{m_9}\theta_8 + k_9\left(\frac{1}{m_9} + \frac{1}{m_{10}}\right)\theta_{10} & \\
 - \frac{k_{10}}{m_{10}}\theta_{10} = -\frac{(c_{10} + k_{10})}{m_{10}h}Ze^{i\omega t} & \\
 \ddot{\theta}_{10} - \frac{c_9}{m_{10}}\dot{\theta}_9 + \frac{c_{10}}{m_{10}}\dot{\theta}_{10} - \frac{k_9}{m_{10}}\theta_9 + \frac{k_{10}}{m_{10}}\theta_{10} = \frac{(c_{10} + k_{10})}{m_{10}h}Ze^{i\omega t} &
 \end{aligned}$$

ここに、 $\Omega$  および  $J$  は、ジャイロロータの回転角速度および(z)軸周りの極慣性モーメントである。以上が、主系に関する運動方程式である。次に副系に関して運動方程式を考える。GDの装置を設置する個数によって変わってくるが、基本形は同じであり、以下の通りとなる。

$$\ddot{\theta} + \frac{C}{I}\dot{\theta} + \frac{K}{I}\theta + \frac{\Omega J}{I}\dot{\theta}_n = 0$$

ここに、 $\theta$ 、 $I$ 、 $\theta_n$ 、 $C$  および  $K$  は、副系の(y)軸周りの

回転変位、極慣性モーメント、GDの装置を  $n$  階に設置するとしたときの  $n$  階の層間変形角、ジンバル位置保持用ダンパーおよびバネの減衰係数とバネ係数である。ここで、 $I$  は、ロータ本体の極慣性モーメントだけでなく、ジンバル枠やロータに回転を与えるための機構など、(y)軸周りに回転する全ての副系の要素の極慣性モーメントの総和である。

次に、ダンパーの設計パラメータを考える。ダンパーの設計パラメータは、要求される制振性能と構造的、経済的制約などを考慮して決定することになる。よって本研究では設計パラメータを変数とし、それに伴って得られる応答を調べ、最適パラメータを導き出すことにする。

GDの検討を容易とするために、若干の仮定を行う。ロータとして半径  $R$ 、厚さ  $d$  の等厚円盤を考える。質量密度を  $\gamma$  とすると、ロータの(z)軸周りの極慣性モーメントは、

$$J = \gamma d \frac{\pi R^4}{2}$$

である。半径に比べて厚さが十分に小さいとすれば、この円盤の(y)軸周りの慣性は  $\gamma d \pi R^4/4$  であり、 $J$  の半分となる。前述の通り、副系の慣性  $I$  にはジンバル枠などの慣性が加わるが、ここではこの付加慣性はロータ自身の慣性と同程度と考え、 $I = J$  と仮定する。

次に振動応答を得るためにこれらを行列で表す。解を以下のように仮定する。

$$\theta(t) = Ae^{i\omega t}, \quad \dot{\theta}(t) = i\omega Ae^{i\omega t}, \quad \ddot{\theta}(t) = -\omega^2 Ae^{i\omega t}$$

この解を運動方程式に代入して、行列表示に変換したものを、(1)に示す。(1)は、GDの装置を10階に一つだけ設置した場合の方程式である。装置の個数を増やすときは、副系の運動方程式を増やし、設置する階を  $n$  階に変えるときは、 $n$  行目にジャイロモーメント項を移動させれば良い。この行列を解くと、基盤水平振動  $z$  に対しての振動応答が得られる。

### 3.2 制振効果に及ぼすパラメータの影響

前項で述べたGDの設計パラメータとは、ロータの半径、ロータの回転角速度、減衰係数および固有振動数である。これらの設計パラメータの検討に先だって、GDの装置を設置する個数と場所を検討する。

本研究では、10階建てのモデルを考えているので、高層建築物としては比較的サイズが小さい。したがって、装置が一つでも十分な制振効果が得られると考えられる。また振動モードについては3次まで考えることとして、それぞれの振動モードに対して一つの装置、即ち個数としては3つの装置を設置することにする。

$$\begin{bmatrix}
 -\omega^2 + \frac{c_1(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} i\omega + \frac{k_1(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} & & & & & & & & & & \\
 & -\frac{c_2}{m_2} i\omega - \frac{k_2}{m_2} & & & & & & & & & \\
 & & -\omega^2 + \frac{c_2(m_2 + m_3)}{m_2 m_3} i\omega + \frac{k_2(m_2 + m_3)}{m_2 m_3} & & & & & & & & \\
 & & & \vdots & & & & & & & \\
 & & & & 0 & 0 & & & & & \\
 & & & & & \frac{\Omega J}{I} i\omega & 0 & & & & \\
 & & & & & & 0 & & & & \\
 & & & & & & & -\omega^2 + \frac{c_{10}}{m_{10}} i\omega + \frac{k_{10}}{m_{10}} & & & \\
 & & & & & & & 0 & & & \\
 & & & & & & & & -\omega^2 + \frac{C}{I} i\omega + \frac{K}{I} & & 
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 A_1 \\
 A_2 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 A_{10} \\
 \vdots \\
 A
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 -\frac{(c_{10} + k_{10})}{m_{10}h} Z \\
 \frac{(c_{10} + k_{10})}{m_{10}h} Z \\
 0
 \end{bmatrix}
 \tag{1}$$

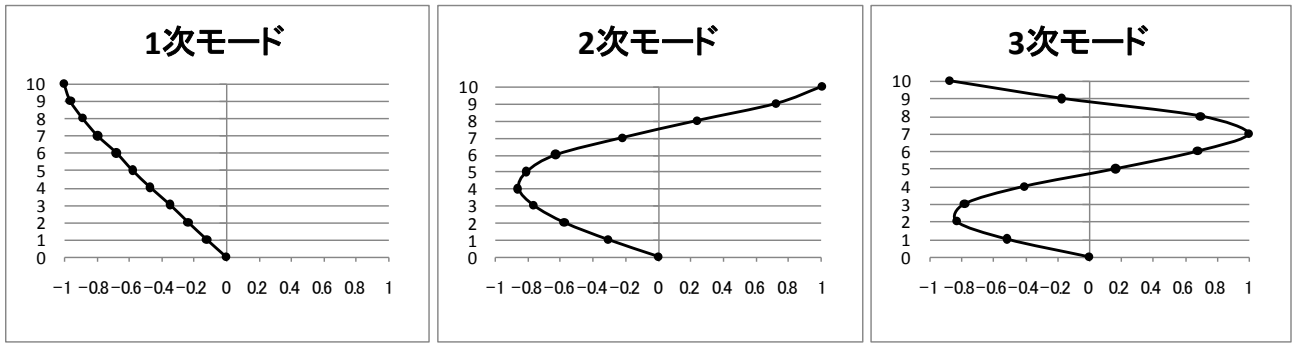


図-3 モデルの振動モード

GD は、ロータの傾きが大きいほど、強いジャイロモーメントが発生し、より大きな制振効果を得る。したがって、振動モードを見たとき、層間変形角が最も大きいところに設置すべきであると考えられる。本研究のモデルの振動モードを、図-3 に示す。

層間変形角とは、 $n$  階と  $n+1$  階との水平変位の差を、階高で除したものである。しかし、本研究のモデルは階高が全て同じであるので、水平変位の差だけを考慮すれば良い。図-3 によれば、1 次については1 階と2 階の差が、2 次と3 次についてはそれぞれ8 階と9 階の差が最大であることが分かる。これらから、1 次に対しては2 階に、2, 3 次に対しては9 階にGD の装置を設置することとした。

次にダンパーの設計パラメータを検討する。本研究では、具体的な実構造物を想定している訳ではないので、装置の設計パラメータを変化させて応答を解析し、最適設計パラメータを検討することにする。

解析結果を、図-4, 5, 6, 7 に示す。図-7 は、半径を変化させた結果であるが、1 次から3 次までほぼ同様な応答であったため、2, 3 次は省略した。なお、全ての図において縦軸は装置設置前と設置後の最大振幅比である。

図-4 から、回転数が大きいほど、より強い制振効果を得ることができると分かる。これは、回転数が大きいほど、ロータが傾いたときに強いジャイロモーメントを発生するからであると考えられる。

図-5 から、減衰係数は、他のパラメータと異なって滑らかなにはならなかったが、最適パラメータがあることは分かる。これは、副系の減衰係数が大きくなりすぎると、ロータの(y) 軸周りの振幅が小さくなり、発生するジャイロモーメントも小さくなるためである。したがって、制振効果が減少している。また、この様に、振幅比が変化した場合としては、最大応答を求める過程で振動数の変化幅が大きすぎて、詳細な変化を把握しきれなかったためであろうと考えられる。

図-6 から、副系の固有振動数は、主系の固有振動数と同じにする方が良いということが分かる。振動数が近いほどより強い共振が起き、制振作用に繋がるからであると考えられる。

図-7 から、当然ながら半径が大きいほど強い制振効果を得ることができる。これは、半径を大きくすることで装置自体の重量を大きくすることができるため、結果的に付加質量の増加に繋がるからである。対象の建築物によってもその値は変わってくるが、ある程度まで大きくすれば、それ以降は半径増加の効果はさほど変わらないと考えることもできよう。

### 3.3 GD を設置した場合の応答

以上の、GD の設計パラメータを変化させた結果から、減衰係数と振動数比については、最適パラメータが存在することが明らかになった。しかし、回転数と半径については、大きくするほどより強い制振効果を得ることができ、最適パラメータは存在しない。また、最適パラメータは、構造的または経済的制約によっても変わると考えられる。本研究ではその制約がないので、振動数と減衰係数については最適パラメータを、回転数と半径についてはそれぞれ振幅比の低減が緩やかになる点でのパラメータを用いることにした。

回転数は、1 次モードに対して1500rpm, 2, 3 次モードに対しては2000rpm とし、半径は全て1.5m とした。

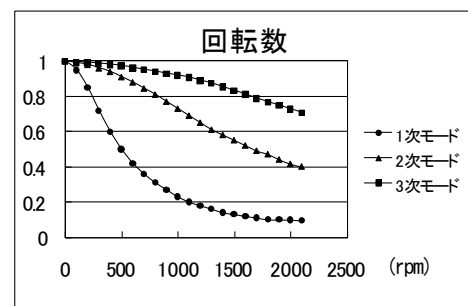


図-4 回転数の変化と応答

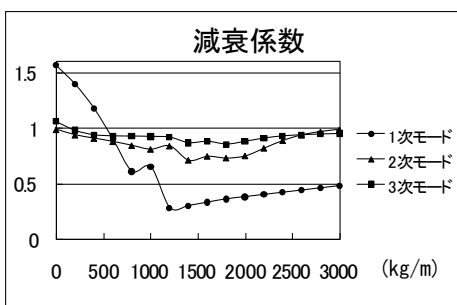


図-5 減衰係数の変化と応答

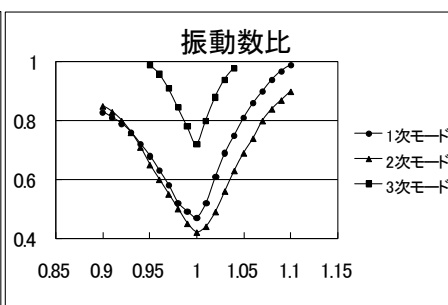


図-6 振動数比の変化と応答

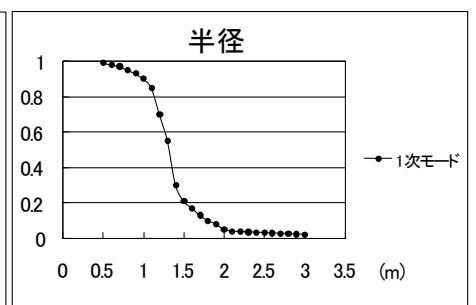


図-7 半径の変化と応答

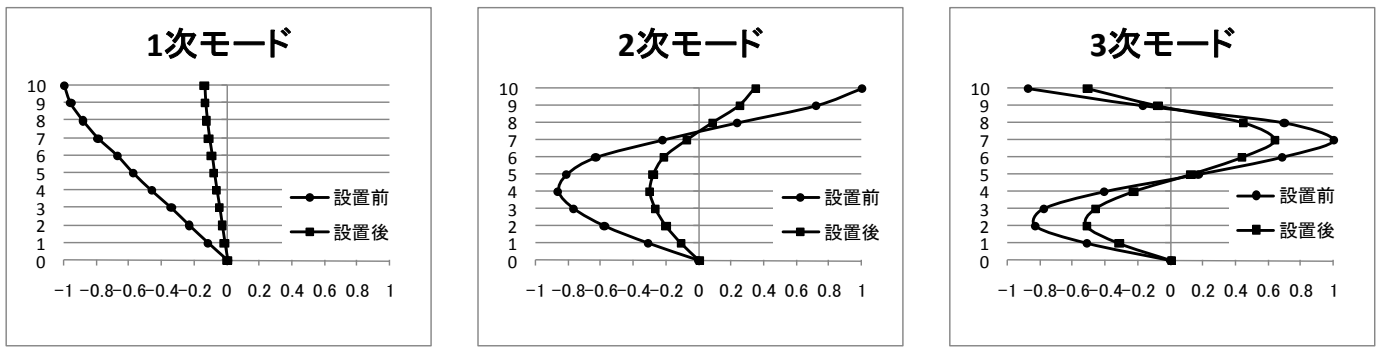


図-8 GD 設置前後の応答

図-8 は、上で決定した最適パラメータで設計した GD を、層間変形角により明らかになった最適階に設置したときの、装置設置前と設置後の振幅比を示したものである。

図を見ると、振幅は、1 次に対して 90%，2 次に対して 70%，3 次に対して 50% 近く低減できるということが分かる。

本研究では、それぞれの振動モードに対して一つの GD を設置した。より高い制振効果を要求される場合は、一つのモードに対して設置する装置の個数を増やすことで、より強い制振効果を得ることができると考えられる。

#### 4. TMD との比較

GD と TMD の比較は、建築物におけるそれぞれの付加質量と振幅の低減率で検討する。前項での検討で、GD の装置の重量には、ロータの半径だけが関わっていた。しかし、実際に設置する GD の装置は、半径だけでなく、厚さおよび素材等によっても変わる。したがって、ここでは、GD の装置自体の重量を変数として、TMD と比較検討することにする。GD の重量を変化させた結果は、図-9 に示した通りである。縦軸は、最大振幅比で、横軸は、GD を設置する建築物の総質量と GD の付加質量の質量比である。

実用されている TMD として、台北 101 を取り上げて比較してみる。台北 101 に設置されている TMD は、重量 660t と巨大なものであるが、構造物全体に対して約 0.1% の質量比となっている。その制振効果は、理論上最大で 40% 振動を抑制できる。

図-9 を見ると、本研究で解析した GD は、1 次モードに対しては、質量比が約 0.05% あれば、台北 101 の TMD と同等の制振効果が得られることが分かる。したがって、GD は、TMD より相対的に小さな付加質量で、大きな制振効果を得ることができると言える。

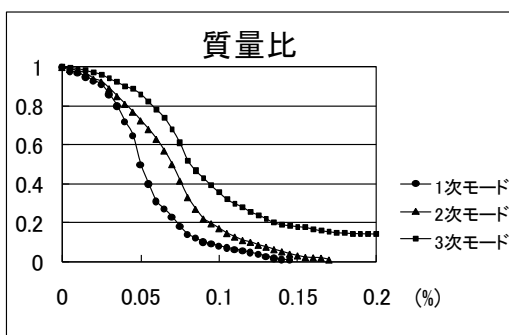


図-9 質量比との変化と応答

しかし、これくらいの質量比の差では、GD の方が効率的であるとは断言できない。このような結果になった原因を考える前に、次のことを述べておく。TMD は、構造物自体の減衰が小さければ、小さいものでも十分な制振効果を得ることができる。逆に、減衰が大きくなるほど、TMD 自体も大きくしなければ、その制振効果は期待できない。

台北 101 は、超高層建築物であるため、他の高層建築物に比べて構造物自体の減衰が小さい。したがって、一般的な高層建築物の方が、相対的に減衰が大きくなるので、TMD を設置する場合は、質量比はさらに大きくなると考えられる。実際に、質量比が 2%~10% となっている TMD の実例も幾つか報告されている。

#### 5. 結論

層間変形角の角変位に着目し、ジャイロモーメントを利用した建築物の制振の可能性を検討した。GD が、TMD に比べて小さな付加質量で大きな制振効果を得ることを示した。また、実際のダンパーの設計において重要となる副系の最適パラメータを明らかにした。得られた主要な結論は次の通りである。

- (1) 基盤を水平振動させたときの建築物の揺れに対して、GD が制振効果を持つことを明らかにした。これにより、GD が、地震振動に対して振動を抑制できる可能性を示した。
- (2) モデルの建築物を振動させて発生した振動モードを見たとき、層間変形角が大きいところに GD を設置した方が、より強い制振効果を得ることができる。
- (3) 確かに、GD は付加質量が大きい方が、より強い制振効果を得た。しかし、TMD と比べると相対的に小さな質量比で大きな制振効果を得ることができる。
- (4) 副系の減衰を大きくしていけば、ある値までは制振効果も大きくなる。しかし、その値を超えると、GD の振幅が小さくなり、ジャイロモーメントも小さくなる。したがって、GD の機能が発揮できず制振効果が得られなくなる。

#### 参考文献

- 1) 山田正明, 坂本成弘, 大橋智樹, 並木正夫, 風尾幸彦: 塔状構造物の風振動制御(ジャイロスタビライザを用いた能動的振動制御), 風工学シンポジウム (1992年)