

# コントロールモーメントジャイロ を用いた減揺装置

Stabilizer by Control Moment Gyro

名古屋誘導推進システム製作所 星尾光紀\*<sup>1</sup> 梅村克哉\*<sup>2</sup>  
技術本部 神吉博\*<sup>3</sup>

ゴンドラキャビンの横揺れ低減を目的として、コントロールモーメントジャイロ (CMG) を用いた減揺装置が注目され、各方面で研究されている。本研究では、6人乗りゴンドラ用の減揺システムについて、受動型 CMG の採用及び駅舎内給電方法の開発により、成立の見通しを得た。試作品の製作・試験の結果、ゴンドラの横揺れ減衰比が 0.005 から 0.28 へ増加し、大きな減衰効果を得た。また、シミュレーションと試験が一致したことにより、解析モデルの妥当性を確認した。その他の交通・物流機関への適用例として、小型ボート、ヘリコプタ吊荷の揺れ止めも検討し、小型舟艇用減揺装置としての有効性を確認して実用化の見通しを得た。

This paper describes a new stabilizer by Control Moment Gyro (CMG). The stabilization concept, engineering characteristics, component description, simulation models and test results are reported. The operational concept of the Control Moment Gyro applied to the stabilization system of a gondola is studied and demonstrated. Other applications are boats, danglers, etc.

## 1. ま え が き

ジャイロトルクを用いた船舶用の減揺装置としてシリックの受動型ジャイロ装置が実用化され、その後宇宙ステーションや大型プラットホームの姿勢制御用角運動量交換型アクチュエータとして、コントロールモーメントジャイロ (CMG) が、開発研究されている<sup>(1)~(3)</sup>。

近年、索道搬器の横揺れ防止や高層建築物の揺れ防止に CMG を用いた減揺装置が研究されており、ジャイロトルクをセンサ信号により能動的に制御する方式と、ジンバル軸にばねや粘性抵抗を付与し受動的に制御する方式について報告されている<sup>(4)~(7)</sup>。

本報では、CMG 減揺装置を 6人乗ゴンドラに適用した減揺システムを試作開発し、試験した結果を報告する。また、小型ボート、ヘリコプタ等の吊荷の揺れ止めへの適用可能性についても紹介する。

## 2. 減揺システムの概要

### 2.1 CMG 減揺装置の減揺原理と他方式との比較

CMG は、高速回転するフライホイールをジンバルで支持し、そのジンバルを揺動させることにより、発生するジャイロトルクを利用したアクチュエータである。受動型 CMG 減揺装置の原理図及び基礎式を図 1 に示す。横風によるゴンドラの揺れを、ジャイロ効果によりジンバル軸の揺動に換え、発電ブレーキでジンバル軸の回転角速度を適切に制御する。このとき発生するジャイロトルクをゴンドラの横揺れに対してカウンタトルクとして働かせ、横揺れを抑える。

ゴンドラ減揺方式について、ダイナミックマスダンパ方式等との比較を表 1 に示す。CMG 方式は、エネルギー供給上の問題があるが、他方式に比べて小型・軽量でありジャイロ効果を利用しているため減揺効果が優れている。

### 2.2 解析モデル

ゴンドラを単振子にモデル化すると、ゴンドラの運動及びジン

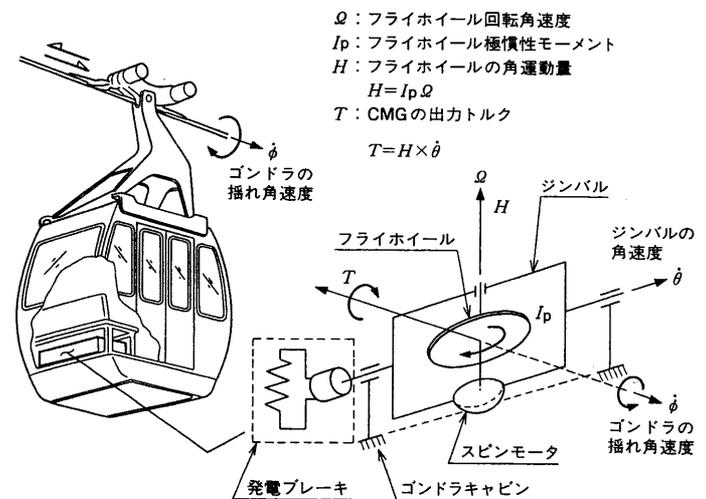


図 1 CMG 減揺装置の概念図 CMG のジャイロトルクを用いてゴンドラを減揺させる原理。  
CMG stabilizer concept

バルの運動は下式で表される。

$$\left. \begin{aligned} I\ddot{\phi} + C_s\dot{\phi} + Mgl\sin\phi &= -H\dot{\theta}\cos\theta + T_{out} \\ I_0\ddot{\theta} + C_0\dot{\theta} + mge\sin\theta &= T + H\dot{\phi}\cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

φ: ゴンドラのローリング揺れ角度

θ: CMG のジンバル回転角度

I: ゴンドラのロープ回りの慣性モーメント

I<sub>0</sub>: CMG のジンバル軸回りの慣性モーメント

C<sub>s</sub>: ゴンドラの固有減衰係数

C<sub>0</sub>: CMG のジンバルの固有減衰係数

M: ゴンドラの質量

g: 重力加速度

l: ゴンドラの重心距離

m: CMG のジンバル偏心質量

\*1 エンジン・機器部機器設計課主務

\*2 エンジン・機器部機器設計課

\*3 高砂研究所振動・騒音研究室長 工博

表1 ゴンドラ減揺方式の比較  
Comparison of gondla stabilization method

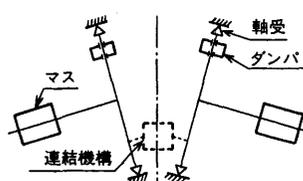
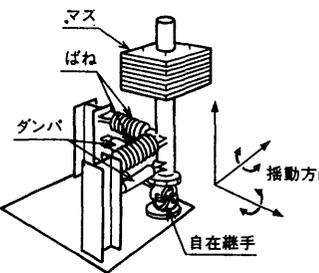
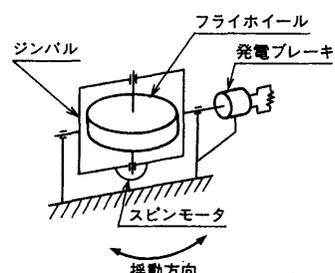
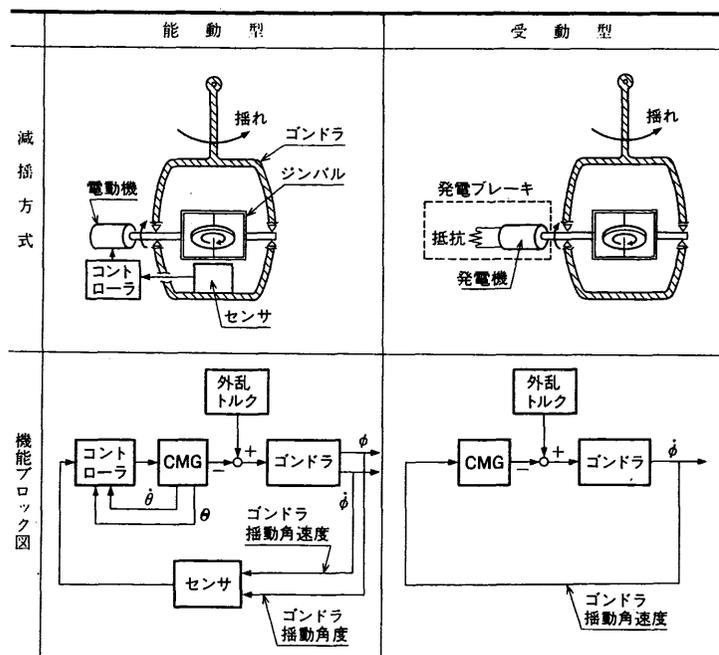
方式	ダイナミック マスダンパ方式		CMG方式
	傾斜復振子型	逆振子型	
原理	●二つの傾斜振子の慣性反力で揺動を減衰させる。  揺動方向：図に直角方向	●逆振子の慣性反力で揺動を減衰させる。  揺動方向	●ジャイロトルクで揺動を減衰させる。  揺動方向
寸度	○	△	○
重量	△	△	○
減揺効果	△ (乗客数で効果が変動)	△ (乗客数で効果が変動)	○
エネルギー供給	○ (不要)	○ (不要)	△ (スピニングモータ用に要)
コスト	○	○	△

表2 制御方式及び機能ブロック図  
Control method stabilization block diagram



$$\frac{\phi}{T_{out}} = \frac{1}{I_s^2 + \frac{RH^2}{K_t K_b} s + Mgl} \quad (2)$$

となる。

ここで、

- R : 発電ブレーキの抵抗値
- $K_t$  : 発電ブレーキのトルク定数
- $K_b$  : 発電ブレーキの逆起電圧定数

したがって、式(2)の分母の第2項から、CMGの減衰比  $h$  を定義すると、下式で表すことができる。

$$h = \frac{RH^2}{2MI^2\omega_n K_t K_b} \quad (3)$$

ここで、

$\omega_n$  : ゴンドラの固有振動数

### 2.3 ゴンドラ減揺システム

ゴンドラ減揺システムとして、供給エネルギーが少なく、コスト、重量の面からも有利で、性能も能動型と等しい受動型CMGを採用した。

また、常用バッテリーを用いず、フライホイールを一定の回転角速度以上に保持するため、図2に示すように、上下の駅舎で急速給電し、索道ではフライホイールをフリーランさせる方式とした。駅舎間距離は一般的な1500m(移動時間5min)とし、試作品による試験の結果、システムの成立性を確認した。

非常時の対策として、ゴンドラキャビン内に備えた非常用バッテリーにて、フライホイールを作動し、減揺機能を保持することができる。

### 3. ランダム風応答シミュレーション

ゴンドラの真横から、定常風に変動風を重ね合わせたランダム風を外乱として与え、風によるゴンドラの揺れ応答をシミュレーションした。ただし、ロープの揺れは無視した。風による外乱力及び変動風のパワースペクトラム密度は、Davenportの式を用いて次式で表される。

$H$  : CMGの角運動量

$e$  : CMGのジンバル偏心量

$T_{out}$  : ゴンドラに働く外乱トルク

$T$  : CMGのジンバルモータトルク

制御方式として、表2に示す能動型と受動型の減揺方式がある。能動型減揺では、センサ信号によりジンバルモータトルク[式(1)の  $T$ ] を能動的に制御する方式であり、ダンパ増強型や剛性増強型等の様々な制御が可能である。

一方受動型減揺は、発電ブレーキで粘性抵抗を与え、ジンバル回転角速度を受動的に制御するため、ダンパ増強型となる。この場合の外乱に対するゴンドラの揺れの伝達関数は線形化し、微小項を省略すると、

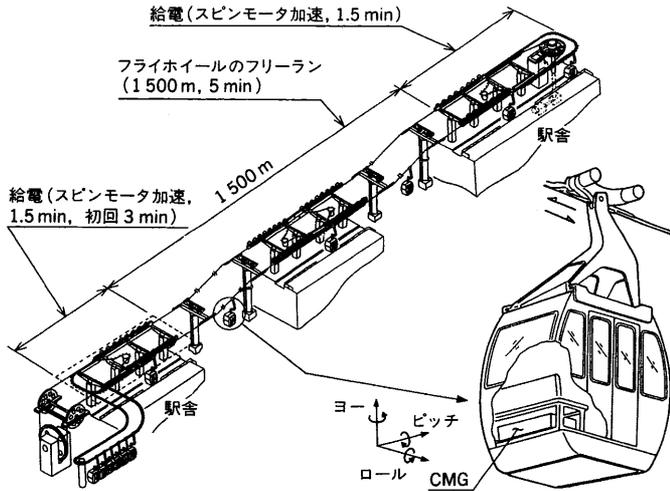


図2 ゴンドラ減揺システム概念図  
フライホイールを駅舎で急速給電し、索道でフリーランさせるシステム。  
Plan of CMG stabilizer operational concept for gondla

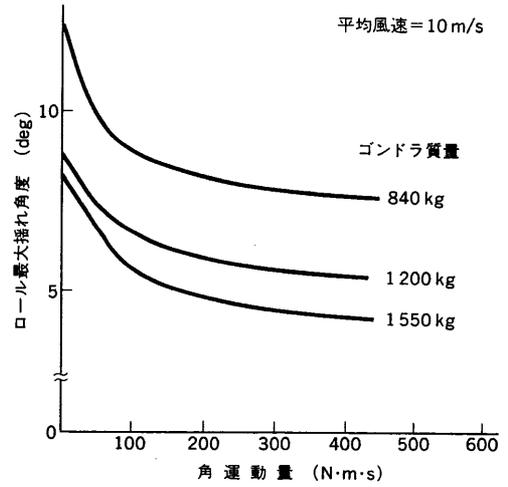


図4 ランダム風応答シミュレーションのゴンドラの最大揺れ  
ゴンドラの最大揺れ角度と角運動量をパラメータにまとめた図。  
Maximum roll angle by random winds

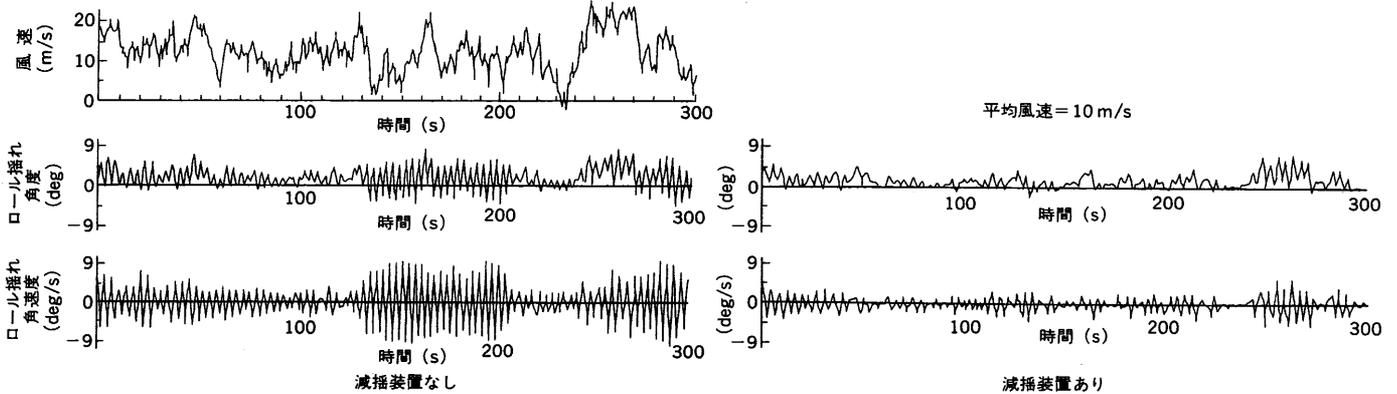


図3 ランダム風応答シミュレーション結果  
ランダム風によるゴンドラの横揺れ応答シミュレーション結果。CMGにより揺れが低減している。  
Simulation results by random winds

$$\left. \begin{aligned}
 F_e &= \frac{\rho}{2} C_D A (U + u - l\dot{\phi} \cos \phi) |U + u - l\dot{\phi} \cos \phi| \\
 u &= \int_0^\infty \sqrt{S_u(f)} \sin(2\pi f t + R_{nd}) df \\
 S_u(f) &= \frac{4kU^2 X^2}{f(1+X^2)^{4/3}} \\
 X &= \frac{f D_L}{U}
 \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、

- $F_e$ : ゴンドラに働く風の外力
- $A$ : ゴンドラの空力基準面積
- $C_D$ : ゴンドラの空気抵抗係数
- $S_u(f)$ : 変動風のパワースペクトラム密度
- $D_L$ : Davenport のスケール長
- $\rho$ : 空気密度
- $R_{nd}$ : 乱数
- $k$ : 表面摩擦係数
- $f$ : 変動風の周波数
- $U$ : 平均風速
- $u$ : 変動風速
- $X$ : 無次元周波数

平均風速 10 m/s 時のランダム風応答シミュレーション結果を

図3に示す。これから、CMG減揺装置により揺れ角度、角速度とも大きく低減することが分かる。また、ゴンドラの最大揺れ角度を平均+3 $\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差)で表し、最大揺れ角度と角運動量の関係を図4に示す。CMG減揺装置の能力はCMGの角運動量で表され、約200 N·m·s以下では角運動量が大いほど減揺効果は大きくなるが、それ以上では効果の増加量が小さい。

#### 4. 試作試験

##### 4.1 試作品概要

6人乗りゴンドラ(最大全質量1000 kg)用に試作したCMG減揺装置の概略図を図5に示す。本試作品は、ゴンドラ内の椅子(いす)下に装着できるように小型化したものである。フライホイールはスポーク型とし、バンケーキ型スピンモータで3000 rpm定格で回転する。全角運動量は200 N·m·sである。また、ジンバルはインラインツインジンバルを採用し、二つのジンバルは、ギヤを介し発電ブレーキに接続されている。ツインジンバルは、ジンバルの回転時に発生するヨー方向分力をフライホイールとジンバルを各々逆回転させることで相殺させるためである。また、ジンバルは360°自由回転できる構造とした。

##### 4.2 ゴンドラの自由振動試験結果

ゴンドラを5°の角度から自由振動させ、そのときのゴンドラの揺れ角度を計測した結果、表3に示すように、CMG減揺装置

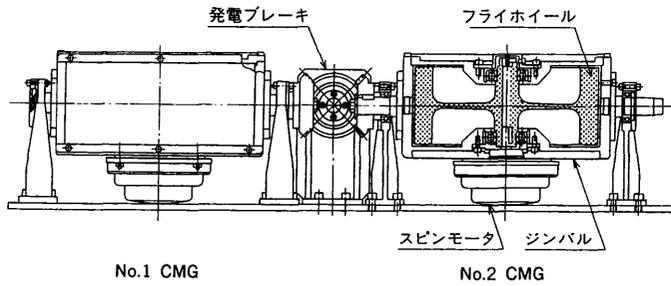
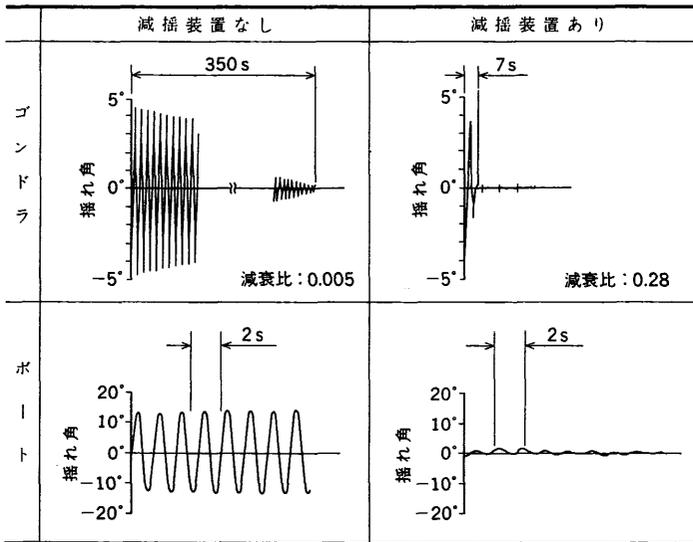


図5 CMG 試作品概略図 6人乗り Gondラ用に試作した CMG 減揺装置を示す。  
CMG stabilizer configuration

表3 試験結果  
Test results



を装着することで減衰比は、0.005 から 0.28 と大きく増加した。ただし、CMG 減揺装置を装着しても  $\pm 0.1^\circ$  程度の微小揺れが残る。これは、ジンバル系のクーロン摩擦により、ジンバルがゴンドラの揺れに応答できないためと考えられる。またマセマティカルシミュレーションとの比較の結果、試験結果とほぼ一致しており、解析モデルの妥当性を確認した。

次に低温環境下で減揺性能を確認するため、CMG 減揺装置を  $-20^\circ\text{C}$  に保ち同様の試験を行った。低温にすることで、減衰比は 0.17 へ低下するが、減揺効果に大きな変化のないことを確認した。

### 5. CMG 減揺装置の他への応用

他の交通・物流機関への応用例として、小型ボートの減揺やヘリコプタ吊荷の減揺等が考えられる。

船の減揺装置は現在、フィンスタビライザが主流となっているが、翼の揚力を利用しているため、船の高速航走時しか効果がない。マリレジャーや釣船等の小型舟艇において、横波による揺れは乗り心地を悪くし、船酔いの原因となる。これらを改善するために CMG 装置が有効であると考え、ゴンドラ用に試作した CMG

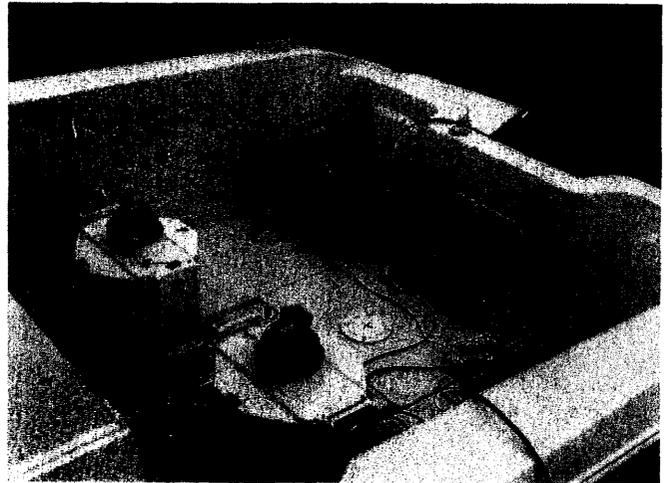


図6 レジャーボート用 CMG 減揺装置 レジャーボート用に試作した CMG 減揺装置の搭載状況を示す。  
CMG stabilizer configuration for pleasure boat

減揺装置を小型ボートに搭載し原理確認試験を行った。その結果、ボートの揺れは 1/10 に低減し大きな効果を得た。表 3 に正弦波状の横波を与えたときのボートの揺れを示す。また、図 6 に実用品として試作した 10 人乗レジャーボート用 CMG 減揺装置の搭載状況を示す。

また、ヘリコプタによる吊荷運搬において、風による横揺れ、移動時の揺れ等は作業性を著しく低下させる原因になっている。吊荷運搬用パレットに 2 軸（ロール、ピッチ）用 CMG 減揺装置を適用することが、作業性改善に有効であると考えられる。

### 6. むすび

6 人乗ゴンドラ用 CMG 減揺装置を試作し、ベンチ試験で低温環境も含めた減揺効果を確認した。ゴンドラ減揺システムについて、受動型 CMG の採用とゴンドラ駅舎での急速給電により、システムの成立性を見通しを得た。

CMG 減揺装置の他分野への応用として、小型ボートに適用し、簡単な試験とシミュレーションでその有効性を確認した。また、今後ヘリコプタ吊荷運搬等への応用についても、検討を進めていく。

### 参考文献

- (1) Blondin, Joseph, et al., 12 th Annual AAS Guidance & Control Conference, AAS 89-006 (1989)
- (2) Kito, Katsumi, et al., 12 th Annual AAS Guidance & Control Conference, AAS 89-002 (1989)
- (3) Branets, V. N., et al., 38 th IAF-87-04 (1987)
- (4) 西原ほか, 機械論文, 57-534, C (1991) p.497
- (5) 風尾ほか 4 名, 機械力学・計測制御講演論文集 Vol.B (1992) p.382
- (6) Kanki, Hiroshi, et al., Processing of 1 st MOVIC, Yokohama (1992.9) p.310
- (7) 梅村ほか, 第 2 回交通・物流部門大会講演論文集 (1992-12) p.123