分散系 ER 流体を用いた復元力可変ウエイト
ジャイロスタビライザの開発*高嶋 聡志^{*1}, 堀江 淳^{*2}, 福田 武人^{*3}Restoring Force Controllable Weight Gyrostabilizer
Using Electro-Rheological FluidSatoshi TAKASHIMA, Jun HORIE and Takehito FUKUDA^{*4}^{*4} Department of Intelligent Materials Engineering, Osaka City University
3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka, Osaka, 558-8585 Japan

In the present paper, it is described to apply electro-rheological fluid (ERF) to a weight gyrostabilizer (WGS). By using ERF to control the motion of weights on WGS rotor and imposing the electric field on them, it is expected to decrease the restoring force of the WGS instantaneously with no change of rotational speed of the gyro. Therefore this gyrostabilizer (ER-WGS) can protect the structure from its fracture due to the excessive impulsive forces acting on it. The restoring force of the ER-WGS for the impulsive external forces is investigated experimentally and theoretically when the electric field is imposed or not, and those results are compared.

Key Words: Vibration of Rotating Body, Vibration Control, Actuator, Weight Gyrostabilizer, ER Fluid, Restoring Force Control, Impulsive External Forces, Imposing Electric Field

1. 緒 言

現在、電界の印加により見かけの粘性が変化する (Bingham 流体の挙動を示す) 分散系 ER 流体⁽¹⁾ (Electro-Rheological fluid: ERF) を用いたさまざまな応用技術について研究が行われている。ERF を用いた応用技術として、これまでは主としてクラッチ⁽²⁾, ダンパ⁽³⁾⁽⁴⁾, アクチュエータ⁽⁵⁾ 等について、機構の改良および制御に関する研究がなされてきた。ERF の電界印加に対する ER 効果の応答速度は速く (数 ms), また、電気的入力を機械的出力に直接変換できることにより、上記の ER デバイスは簡単な機構で、かつ良好な制御性を示す。

以上のような特徴を有する分散系 ERF を著者らは、以前自立形の姿勢安定化装置である流体ジャイロスタビライザに应用することを提案した⁽⁶⁾。今回、流体ジャイロと同様の復元特性原理により自立姿勢安定化を

得るウエイトを用いたジャイロスタビライザ⁽⁷⁾ に ERF を適用した ERF ジャイロスタビライザ (ERF Weight Gyrostabilizer: ER-WGS) の製作を行い、ER-WGS 中の ERF への電界印加によるジャイロ復元力特性の変化について実験的検証を行った。また、復元エネルギーに関する解析を行い、実験値との比較を行った。その結果、ERF の特徴を利用して、従来の流体ジャイロでは得ることができない高速かつ細かな復元力の制御が可能となった。

2. ERF ジャイロスタビライザの構造

まず、図 1 に本研究において開発・製作した ER-WGS ロータの構造を示す。図 1(a) は運動制御形 ER ウェイトユニットを、図 1(b) は ER-WGS ロータの上面図および側面図をそれぞれ示している。

ER ウェイトユニットは、銅製半円形ウェイト① (質量 $m=250$ g/1 個, 半径 $r_1=34$ mm), ウェイト回転軸② (M8 ステンレスボルト), 円筒形ケーシング③ (円筒部: 塩化ビニル製, 側面: アクリル樹脂製, 円筒内半径 $r_2=35$ mm), 分散系 ERF ④ (体積 30 cc), 固定軸⑤および、耐高電圧リード線⑥, ⑦から構成される。半円形ウェイトは回転軸を中心に図中矢印の方向に自由に回転できる。ケーシングの円筒内表面には電極と

* 原稿受付 2000 年 6 月 19 日。

^{*1} 三菱重工業(株) (☎ 652-8585 神戸市兵庫区和田崎 1-1-1) (元: 大阪市立大学大学院生)。^{*2} 光洋精工(株) (☎ 634-8555 橿原市十市町 333) (元: 大阪市立大学学生)。^{*3} 正員, 大阪市立大学工学部 (☎ 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)。

E-mail: takehito@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

(a) Motion controllable ER weight unit

(b) ER-WGS rotor

Fig. 1 Controllable ER weight unit and ER-WGS rotor

Table 1 Component of ER fluid (TX-ER 2155)⁽⁸⁾

Dispersed particles	Substance	Sulfonation (styrene di vinyl benzene copolymer) sodium salt
	Particle diameter	Average of particle diameter 10 μ m
Dispersing medium	Substance	Chlorotrifluoroethylene oligomer
	Density	1.87g/cm ³ (25°C)
Mixture ratio	Weight percentage of particle	40.0%
	Volume fraction of particle	43.8%

部よりリード線⑥がはんだ接続されている。さらに、回転軸にはリード線⑦が接続されており、回転軸に接触して回転運動する半円形ウェイトはリード軸⑦と導電している。また、これらリード線⑦と導電している部分と固定軸は、図 1(a)の拡大部 A に示すようにシリコン樹脂製のリングおよびワッシャにより絶縁されている。リード線⑦側に電圧を入力し、リード線⑥側にアースを取ると、図 1(a)の拡大部 B に示すようにケーシング円筒内壁面と半円形ウェイトの外周壁面により電極(間げき $d=1$ mm)を構成し、ケーシング内 ERF に電界を印加することができる。今回製作した ER ウェイトユニットにおいては、交流電圧で最大 1250 V まで印加することが可能であった。

ER-WGS ロータは、図 1(b)に示すように、ジュラルミン製の回転円板⑧上に 8 個の ER ウェイトユニットを放射状に等間隔で設置した構造を有する。回転円板とは電氣的に絶縁された銅箔⑨、⑩(銅箔⑨と⑩も互いに絶縁されている)はそれぞれ、リード線⑥、⑦と接続されており、8 個すべての ER ウェイトユニット内に同時に電圧を供給しユニット内の ERF に電界を印加することが可能である。

ここで、図 1 で示した ER-WGS ロータの運動制御形 ER ウェイトユニット内に封入する ERF として使用した分散系 ERFTX-ER 2155(株式会社日本触媒製)の組成を表 1 に示す。

3. ER-WGS 実験装置

図 2 に ER-WGS の抗力および振動応答測定実験装置の概略を示す。DC モータ①の回転数および ER-WGS ロータに印加する電界の強さは、DC モータドライバ②および高電圧電源③によりそれぞれマニュアル操作で変化させる。高電圧が高電圧電源よりカーボンブラシ・スリップリング④を介して ER-WGS ロータへ供給され、ER ウェイトユニット⑤内に電界が印加される。ユニット内 ERF の ER 効果により半円形ウェイトの動きが抑制され、ER-WGS の復元特性が変化する。インパルス外力 F_1 (振動加振台により強制

Fig. 2 Pendulum structure of ER-WGS experimental system

振動 F_2 も与えることができる)が加えられると, ER-WGS 振り子実験装置のアンギュラ玉軸受け部 A 点を支点に ER-WGS は振り子運動をする。このとき, ER-WGS の姿勢の変化(垂直軸からの傾き ψ deg)は, レーザ変位計⑥により測定する。また, インパルス外力 F_1 の大きさおよび印加時間は, ばね変位計の変位をひずみゲージで検出し動ひずみ計⑦により測定し, それより, ER-WGS に印加された力積を算出することができる。

4. 振動応答による復元特性評価

4・1 インパルス外力に対する自由振動応答 図 2 に示した ER-WGS 実験装置を用いたインパルス外力による復元特性を以下の手順で調べた。

(1) ばね変位計の変化と印加される力に関してキャリブレーションを行う。

(2) DC モータドライバのボリュームを回し DC モータを駆動させ ER-WGS ロータを任意の回転数となるよう調節する。ER-WGS ロータに電界を印加する場合は, 高電圧電源のスイッチを ON にし, ボリュームを回し任意の電圧値に調節する。

(3) ロータの回転数が一定となった状態で, ばね変位計に図 2 に示すようにインパルス外力 F_1 を作用

(a) Rotational speed of ER-WGS: 100 rpm

(b) Rotational speed of ER-WGS: 300 rpm

Fig. 3 Effect of imposing electric field on free vibration response of ER-WGS

させる。その際, FFT アナライザのレーザ変位計の表示画面で, あらかじめ設定しておいた任意の ER-WGS の初期傾き角 ψ_0 となるように外力を印加する。

レーザ変位計により測定されるインパルス外力印加後における ER-WGS 振り子の傾き角 ψ に関する自由振動応答波形および, ばね変位計により得られるインパルス外力の大きさ・印加時間を A/D コンバータを介して PC に取込みデータファイルを作成する。

以上の手順により得られたロータ回転数 100 rpm および 300 rpm におけるインパルス外力印加後の ER-WGS 振り子装置の自由振動応答を図 3(a), (b) に示す。各回転数における印加電界 0 V/mm の自由振動応答波形を比較すると, 100 rpm から 300 rpm と回転数が増加するのに伴い, 速く減衰する傾向が見られる。これは, 印加電界値が 0 V/mm の場合においては, ER-WGS は従来のウェイトジャイロ(および流体ジャイロ)と同様, その復元力の大きさは, ロータ回転数に依存し, 回転数の増加に伴い, より大きな復元力を発生させることができることを示している。

次に, 印加電界値の違いによる応答波形を比較すると, 各回転数においても, 電界印加により ER-WGS 振り子の減衰特性が変化しているのがわかる。

は,

$$J = 2 \cdot F_c \cdot l_8 \sum_{k=1}^{k=\frac{n}{4}} \frac{1}{k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる⁽⁷⁾. ここでウエイトの数は8個であるので, $n=8$ としてこの際に必要なエネルギー $E_w \text{ N}\cdot\text{m}$ は,

$$E_w = 3 \cdot F_c \cdot l_8 \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる. これが ER-WGS 振り子実験装置を傾ける際の抗力となる. 最後に, ウエイトの慣性の法則による運動を ERF への電界印加により制御することで生ずる復元力抑制効果について考える. 図6に示すように, ウエイトの回転軸には, 力 F_a により, 次式で表されるモーメント $M_w \text{ N}\cdot\text{m}$ が作用している.

$$M_w = F_w \cdot l_5 \quad \dots\dots\dots (5)$$

また, 電界印加による ER 効果によりせん断応力 τ_{ER} が発生した場合, これによりウエイトに与え得るモーメント $M_{ER} \text{ N}\cdot\text{m}$ は次のようになる.

$$M_{ER} = \tau_{ER} \cdot t \cdot \pi \cdot r^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, t : ウエイトの肉厚 m, r : ウエイト半径 m である.

以上の式より, $M_w \leq M_{ER}$ のとき, ウエイトの運動は完全に拘束され, ER-WGS の復元力は零となる. また, $M_w \geq M_{ER}$ の場合, 次式の $E_{ER} \text{ N}\cdot\text{m}$ で表されるエネルギーが, 復元エネルギーの損失となり, その結果, ER-WGS の復元力を変化させることができる. n 個のウエイトユニット内の ER 流体がウエイトになす仕事の総和 E_{ER} は式(3)と類似の関係をここでも用いると,

$$E_{ER} = 3 \cdot M_{ER} \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

を得る. ER-WGS 振り子実験装置を $\psi \text{ rad}$ 傾けるために必要なエネルギー $E_{total} \text{ N}\cdot\text{m}$ は, 以上で求めた式(1), (4), (7)より,

$$E_{total} = E_G + E_w - E_{ER} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる.

Fig. 6 Weight motion controlled by ERF

6. ER-WGS の復元エネルギー

図7(a), (b)に, ER-WGS の復元エネルギーと印加電界値との関係を示す. 実験では図2に示す F_1 にインパルス外力を与え, その大きさと印加時間を測定し,

$$E_{total} = \frac{\int F(t) dt}{\Delta t} \cdot l_9 \cdot \psi \quad \dots\dots\dots (9)$$

より算出した. ここで, インパルス外力はロードセルで測定し, そのデータより式(9)の $F(t)$ を求め, 数値積分することにより ER-WGS に与えられた力積を計算した. そののち, 式(9)を用いて E_{total} を求めた. 前節の式(8)より求めた解析値を実線で示し, 実験により得られた値をプロットしている. 解析で用いた各種パラメータを表2に示す. 図7と表2において (a)は, ロータ回転数が 100 rpm, (b)は 300 rpm における結果である. いずれの場合も解析値と実験値がほぼ良好な一致を示している. 100 rpm においては, ER-WGS を傾けるために作用させた外力の印加加速度により, 慣性の法則に従いウエイトが大きく運動し, その結果, 印加電界値 0 V/mm の場合には, 約 0.35 N·m と大きな復元エネルギーを発生させている. そこで, 電界を 500, 1000 V/mm と印加するのに伴い, ER 効果により, ウエイトの運動を抑制し, 慣性の法

(a) Rotational speed of ER-WGS: 100 rpm

(b) Rotational speed of ER-WGS: 300 rpm

Fig. 7 Comparison of experiment and theory in terms of ER-WGS stability energy

Table 2 Parameter of analysis

(a) Rotational speed of ER-WGS: 100 rpm

l_1 [m]	0.055	l_9 [m]	0.168	β [rad]	0.714
l_2 [m]	0.108	F_a [N]	1.336	γ [rad]	0.631
l_3 [m]	0.125	F_c [N]	3.823	θ [rad]	1.019
l_4 [m]	0.165	F_w [N]	1.283	m [kg]	0.250
l_5 [m]	0.014	F_g [N]	2.450	M [kg]	6.400
l_6 [m]	0.179	ψ [rad]	0.388	ω [rad/s]	10.472
l_7 [m]	0.014	$d^2\psi/dt^2$ [m/s ²]	5.342	r [m]	0.034
l_8 [m]	0.007	α [rad]	0.281	t [m]	0.015

(b) Rotational speed of ER-WGS: 300 rpm

l_1 [m]	0.055	l_9 [m]	0.168	β [rad]	0.714
l_2 [m]	0.108	F_a [N]	1.340	γ [rad]	-0.286
l_3 [m]	0.125	F_c [N]	34.403	θ [rad]	0.101
l_4 [m]	0.165	F_w [N]	1.131	m [kg]	0.250
l_5 [m]	0.014	F_g [N]	2.450	M [kg]	6.400
l_6 [m]	0.177	ψ [rad]	0.388	ω [rad/s]	31.416
l_7 [m]	0.001	$d^2\psi/dt^2$ [m/s ²]	5.359	r [m]	0.034
l_8 [m]	0.000	α [rad]	0.565	t [m]	0.015

則によるウエイトの運動エネルギーを打ち消す作用を与えることが可能となり、印加電界値を変化させることで、ER-WGS の復元エネルギーを制御することができる。

7. 結 言

ウエイトジャイロスタビライザ(WGS)のウエイト運動を制御するために分散系 ERF を用いた復元力可変形の ERF ジャイロスタビライザ(ER-WGS)を製作し、得られた実験結果と解析結果から、以下のような結論が得られた。

(1) ER-WGS にインパルス外力を作用させた場合の自由振動応答ならびに、定常加振を与えた場合の強制振動応答実験において、電界印加による同一回転数下での ER-WGS の復元特性制御が可能である。

(2) 電界印加による ER-WGS の復元特性の変化は、印加電界値の大きさに応じたものであり、復元力

の細かな制御が可能である。

(3) ER-WGS 振り子実験装置に関して、エネルギーの式を用いた復元特性の解析を行い、インパルス外力印加実験において、ER-WGS をある一定の傾きまで姿勢を変化させた場合に必要とするエネルギーの測定値との比較を行った。その結果、解析値と実験値とはほぼ良好な一致を示した。

ER-WGS の以上に示すような特徴により、ER-WGS を搭載したシステムは、電界無印加時においては WGS としての大きな復元特性により外乱に対して常に大きな抗力をもち姿勢の安定化が図られる。また、システムを破壊するような過剰な外乱を受けるような場合は ER-WGS に電界を印加することにより復元特性を低下させ外乱に対する抗力を瞬時に抑え、破壊を防ぐことができると考えられる。なお、本報告における実験より得た ER-WGS の ER 効果が発揮できる回転数はおおむね 100~200 rpm であった。

ER 流体を提供していただいた(株)日本触媒に謝意を表する。

文 献

- (1) 小山清人(監修), ER 流体の開発と応用, (1994), 39-46, シーエムシー.
- (2) ER 流体をクラッチに—簡単・高精度・外乱に強い位置決めを実現, 日経メカニカル, 529(1998), 24-27.
- (3) 小林博栄・ほか 4 名, ER 流体を用いた減衰力可変ダンパの基本特性, 機論, 59-566, C(1993), 102-106.
- (4) 大島信生・松阪泰之・福田武人, ER 流体を可変ダンパとして内蔵した CFRP 積層はりの振動応答, 機論, 64-169, C(1998), 760-766.
- (5) 佐野明人, ER 流体のマイクロシステム, 計測と制御, 9-34 (1995), 729.
- (6) 福田武人・大島信生・高嶋聡志, ER 流体を用いた流体ジャイロスタビライザー, No. 99-1 日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集, Vol. I (1999), 341-342.
- (7) 肥沼真一・増田良介, 日本ロボット学会第 6 回学術講演会予稿集, (1988), 595-598.
- (8) 浅子佳延・河上敏浩, 分散電気粘性流体=TX-ER シリーズ=, 油空圧技術, 37-2 (1998), 24-28.