

十字バネを用いた微小トルク測定装置

野村民也・二宮敬虔・風間三郎*
道野敏雄*・熊坂武雄*

A Torquemeter Utilizing Cross-Spring Flexural Pivots

By

Tamiya NOMURA, Keiken NINOMIYA, Saburo KAZAMA,
Toshio MICHINO and Takeo KUMASAKA

Abstract: In order to measure the magnetic torques on spinning spacecrafts (such as the spin damping torque due to eddy current and magnetic hysteresis losses or the spin-rate control torque), a torque-measuring instrument has been developed which utilizes cross-spring flexural pivots as the restoring torque element for the angular deflection. The measurement is performed by fixing the body to be tested (e. g. the spacecraft) upon the pedestal which is supported by the pivots, and by recording the angular deflection of the pivots detected by an auto-collimator. The coil assemblies for impressing a rotating magnetic field of variable frequency and amplitude around the test-body are provided and enable one to magnify the magnetic torques with respect to the in-orbit values if necessary. The whole instrument is mounted on a seismic protection table and is also protected against the air-flow disturbance by using a screen.

Calibration of the instrument is performed either with the known torques generated by standard magnetic moment or by means of free oscillation-frequency measurement on a standard body of known moment of inertia. The instrument can also be used for measuring non-magnetic torques and also for measuring the moment of inertia of a test body. Under favorable conditions, torques down to nearly 10 dyne-cm have been measured.

The principle of operation, design and construction, and obtained characteristics are described in this report.

概 要

スピン安定型の人工衛星で地球に近い軌道を周回するものについて、その姿勢変化を解明しまた制御するためには、衛星の磁気的な諸特性を打上げ以前に把握する必要がある。

* 日立製作所

これに関連して今般、科学衛星の磁気的なスピンドアンピングトルクを飛ばす前に予知すること、およびスピン速度制御装置の動作試験を行なうことを主目的とする微小トルク測定装置を開発し、今後打上げを予定されている科学衛星に対して実用に供することになった。そこで本報告では、スピンドアンピングトルクの測定の観点から本装置を説明する。

本装置は微小トルクを微小回転角に変換して測定する方式を採用している。即ち、被測定物をベンディクス社製の十字バネ (cross-spring flexural pivots) で保持し、スピンを模擬するための回転磁界をこれに印加し、発生する (渦電流および磁気ヒステリシス損による) トルクにより生ずるバネの微小回転角を、ヒルガーワット社製のオートコリメータを用いて遠隔計測する。軌道上で衛星に発生するスピンドアンピングトルクは極めて小さいため、本装置では回転磁界強度およびその回転速度を実際条件より増大することによって、発生トルクを拡大した上で0.1秒角分解能のオートコリメータにて計測できるようになっている。本装置全体はエアライドにより支えられた除震台上に乗せられ、また遮風ついたてにより空気流動の影響を排除されている。

バネ定数の較正は空心コイルまたは永久磁石による標準磁気モーメントにより得られる標準トルクによるか、標準慣性モーメントを持つ物体を装着したときの自由振動周期測定によるかのいずれかの方法で行なわれる。本装置はまた、磁気的トルク以外のトルク測定や慣性モーメントの測定にも使用できる。テストモデルを使用した試験の結果、望ましい条件下では、10 dyne-cm に近い微小トルクまで測定可能であることがわかった。

以下では、本装置の動作原理、構成、得られた特性等について説明する。

1. 概 説

1.1 方式の選定

まず本装置に十字バネテストスタンドを採用するにあたっては、微小なるトルクを地上で計測する場合の障碍と、それを排除して被測定物 (衛星) を保持する方式との相互関係の検討が行なわれた。代表的な方式の特徴を比較すると表 1.1 の通りとなる。表 1.1 のうち液

表 1.1 衛星保持方式と障碍トルクの関係

保持方式	障碍トルク	被測定物の質量的アンバランスの影響	大地、建物からくる外乱トルクに対し	装置自身の発生する不要トルク
バネ保持方式	十字バネスタンド方式	比較的小さい	装置が小規模となるので影響をうけにくい	装置が小規模となるので磁気的不要トルクは小さい
	ピアノ線による吊り下げ方式	小さい	装置が大規模となるので影響をうけ易い	装置が大規模となるので、磁気的不要トルク等が大きくなりやすい
流体保持方式	エアベアリング保持方式	大きい	影響をうけにくい	擾乱トルクが大きい
	液体フロート保持方式	大きい	影響をうけやすい	装置が大規模となるので磁気的不要トルク等が大きくなりやすい

体フロート保持方法はかつて米国 NASA において採用されたこともあるが、現在は十字バネスタンド方式が採用されている[1][2]。本装置の方式決定に当たっても主として外乱トルク耐力の観点から十字バネテストスタンド方式が選択されたが、実験の結果、十字バネテストスタンドは偏心荷重しない限り予想以上に外乱トルクに鈍感であり、不要発生トルクとしては装置自身の発生する磁氣的トルクがむしろ支配的であることが判明した。

1.2 測定法の原理的説明

本装置では十字バネスタンド上に載せられた被測定物（衛星）に回転磁場を印加して、衛星内に発生するトルクによって十字バネを回転偏位させ、その量によって衛星内に発生したトルクを計測する方式が採用されているが、この場合に衛星の運動について次の式が成立する。

$$I \frac{d\Omega}{dt} = T_{ae}(\omega - \Omega, H) + T_{dh}(H) - T_f(\Omega) - k \cdot \theta \quad (1)$$

ここに

I : 被測定物の回転軸まわりの慣性モーメント

T_{ae} : 渦電流によるダンピングトルク

T_{dh} : 磁気ヒステレシスによるダンピングトルク

T_f : フリクショントルク（被測定物の空気力学的フリクション及び液槽ダンパフリクション）

k : 十字バネスタンドのバネ定数

Ω : 被測定物の回転振動角速度, $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$

ω : 回転磁場の回転角速度

θ : 被測定物の回転変位角

H : 回転磁場強度

この式に基づいて測定法をさらに具体的に検討するために、 T_{ae} は衛星と回転磁界の回転速度の差の値があまり大きくないときにはこの差に比例することに注意して

$$T_{ae} = C_e(\omega - \Omega) = C_e\omega - C_e \frac{d\theta}{dt} = T_{ae}' - C_e \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

$$T_f = C_f \Omega \quad (3)$$

C_e, C_f : 比例定数

として(1)式を書き直すと

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{I}(C_e + C_f) \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{I}k\theta = \frac{1}{I}(T_{ae}' + T_{dh}) \quad (4)$$

この式において

$$4 \cdot \frac{k}{I} > \left\{ \frac{1}{I}(C_e + C_f) \right\}^2 \quad (5)$$

としてこの方程式の解を求めると

$$\theta = \frac{T_{ae}' + T_{dh}}{k} \left\{ 1 - e^{-\frac{C_e + C_f}{2I}t} \cos \sqrt{\frac{k}{I}} \cdot t \right\} \quad (6)$$

が得られ、減衰振動の静定後において

$$\theta = \frac{1}{k}(T_{de'} + T_{dh}) \quad (7)$$

また

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{k} T_{dh} \quad (8)$$

これらの関係から、回転変位角 θ とバネ定数 k によってダンピングトルクを求めることが出来る。

1.3 実用条件の検討

3号科学衛星程度の低中高度軌道をとる衛星について、本装置を使用して計測する場合の諸条件について検討する。

1.3.1 トルク値と回転変位角の試算

本装置では、回転磁場強度 H と回転角速度 ω を実際の衛星の条件より大きい値を選ん で、発生するトルクを拡大して測定するが、今、渦電流トルク及び磁気ヒステリシストルクの磁界依存性を次の通りと仮定して考えていく。

$$\left. \begin{aligned} T_{de'} &\propto \omega \cdot H^2 \\ T_{dh} &\propto H^{1.6} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

また軌道上の衛星において発生するトルク値等として次の値を仮定してみる。

$$\left. \begin{aligned} I(\text{衛星慣性モーメント}) &= 0.673 \quad (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2) \\ T_{de} &= 9.4 \quad (\text{dyne} \cdot \text{cm}) \\ T_{dh} &= 1.0 \quad (\text{dyne} \cdot \text{cm}) \\ H &= 0.3 \quad (\text{エルステッド}) \\ \Omega &= 10 \quad (\text{rpm}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

このとき、本装置に衛星を装着した場合の発生トルク最大値と、それに対応する回転変位角は表1.2のとおりとなる。このような試算をもとにして、本装置の角度変位測定器（オー

表 1.2 本装置に要求される測定可能トルクの検討

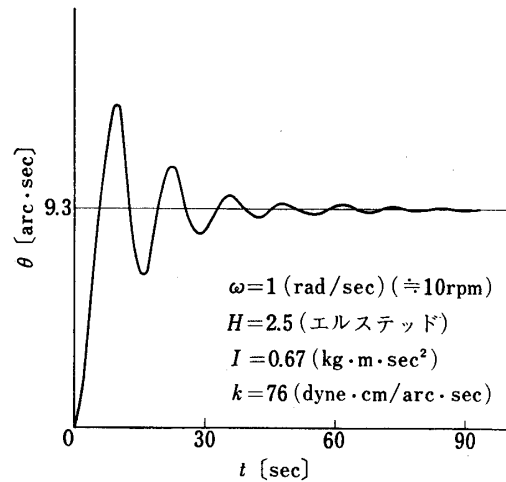
磁場条件		衛星軌道上の条件 (仮定)	本装置でトルク拡大した ときの条件の1例		備 考
			$\Omega=1(\text{rad/sec})$ $H=0.3$ (エルステッド)	$\omega=10$ $H=2.5$	
発生する トルク	渦電流によるトルク $T_{de'}$	9.4	6,550	9,400	トルク単位 dyne·cm
	ヒステレシスによる トルク T_{dh}	1.0	30	1	
	合計トルク $T_{de'} + T_{dh}$	10.4	6,580	9,401	
衛星の回転変位角 θ バネ定数 $k=76$ (dyne·cm/arcsecond)		(arc·sec) 0.14	86	123	十字バネ 5032·800 (2個)

トコリメータ) は測定レンジ 0.1~300 arcsecond のものが採用された。

なお (9) 式において $T_{ae'}$ のトルク拡大は ω に完全に比例するのではなく、回転磁界の周波数が高くなるとむしろ ω に逆比例的に減少するようになる。したがって ω によるトルク拡大には限界があることを付記しておく。

次にステップ状に回転磁場が印加されたときの減衰振動静定時間を概算するため、(6)式に次の値を入れて計算すると、その結果は図 1.1 に示すとおりとなる。

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 1 \text{ (rad/sec) (10 rpm)} \\ H &= 2.5 \text{ (エルステッド)} \\ I &= 0.67 \text{ (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2) \\ T_{ae'} &= 655 \text{ (dyne} \cdot \text{cm)} \\ T_{ah} &= 30 \text{ (dyne} \cdot \text{cm)} \\ k &= 76 \text{ (dyne} \cdot \text{cm/arcsecond)} \\ C_e &= 655 \text{ (dyne} \cdot \text{cm/rad/sec)} \\ C_f &= 45.4 \text{ (dyne} \cdot \text{cm/rad/sec)} \text{注1} \end{aligned} \right\} (16)$$



第 1.1 図 過渡応答特性の計算結果例

1.3.2 トルク測定限界の推定

本装置では、被測定物内に発生するトルクによる十字バネの角度変位を、オートコリメータを使用して読み取る方式が採用されている。従って本装置のトルク測定機能の限界はこの角度変位検出能力と外乱および不要発生トルクによって制約される。(本装置の機能系統は図 2.1 参照)

(1) 角度変位検出感度

角度変位の検出感度は十字バネのバネ定数 (単位角度あたりのトルク値) とオートコリメータの検出感度から決まるが、本装置のオートコリメータは検出感度 0.1 arcsecond であるから、使用する十字バネに対するトルク測定限界は雑音のないとき表 1.3 の通りとなる。

(2) 外乱および不要発生トルク

本装置の測定値に影響する雑音トルク T_N は、外乱雑音トルク T_{ND} と本装置ペDESTAL 自身が回転磁場内で発生する不要トルク T_{NO} との合成と考えられる。

$$T_N = T_{ND}(\omega_N) + T_{NO}(H^2 \cdot \omega) \dots\dots\dots (14)$$

表 1.3 トルク検出感度

0.1 秒角のオートコリメータ使用時のトルク検出感度

十字バネ名	公称バネ定数 dyne·cm/arcsecond	トルク検出感度 dyne·cm	備考
5012-800	3.7	0.37	公称バネ定数値は 2個1組で使用し たときのもの
5020-800	19.0	1.90	
5032-800	76.4	7.64	

注1 ミニモデル実験による

ここに ω_N : 外乱雑音の角周波数

ω : 回転磁場の角周波数

H : 回転磁場強度

このうち、外乱雑音 T_{ND} については、本装置の設置場所の外乱雑音トルクに除振台及びテストスタンドのトルク伝達率を掛けたものとなる。

$$T_{ND}(\omega_N) = (\text{外乱雑音}) \times (\text{除振台の伝達率}) \times (\text{テストスタンドの伝達率})$$

これら伝達率は量的推定がやっかいなため、モデルセットの予備実験によって可成り小さい値に留め得る見通しを持ち、被測定物のトルクの拡大が可能な場合には次に述べるペDESTAL自身の不要発生トルク T_{ND} に比し同程度以下となる見通しを得た。

次に、本装置のペDESTAL部分（被測定物を載せる台の部分）には若干の非磁性金属材料を使用しているため、回転磁場が加わるとエディカレントに起因する不要トルク T_{ND} が発生する。このトルクは（9）式で示される通り回転磁場によって拡大されるので、トルク測定限界に影響するものと考えられる。従って同一磁場条件において被測定物体に発生するであろうトルク値（表 1.2 参照）の 1/10 以下程度とすることを設計目標とした。なおこのトルクはあらかじめ測定しておけば、被測定物に対するトルク実測後これを補正することも原理的には可能である。

本装置の設置後における不要トルク量については第 3.2 項を参照されたい。

1.3.3 バネ定数較正法

(1) 標準磁気モーメントによる較正法

本装置の回転磁場発生用コイルは均一磁場を発生するので、この磁場内に標準磁気モーメント（永久磁石）を置いたときに発生する磁氣的トルクをトルク標準として較正に使用する。

即ち、ペDESTAL上に標準磁気モーメントを置き、それに回転磁場発生用コイルを利用して固定磁場を加えたとき、発生するトルクとペDESTAL回転角の関係は次のとおりである。

$$T = MH \sin \phi = k\theta \dots\dots\dots (15)$$

ここに

M : 標準磁気モーメント値

H : 磁場の強さ

ϕ : 磁場と磁気モーメントのなす角

k : バネ定数

θ : 回転角

この式から、 M 、 H 、 θ および ϕ によってバネ定数 k の較正が出来る。

標準磁気モーメントとしては、アルニコ磁石 (TMK-1B) を転用し、その磁気モーメント値は測定により 1% 以内で求められる。また磁場強度 H はコイルの形状および捲数と電流値から同じく 1% 以内で求められる。よって、 $\sin \theta = 1$ なるよう ϕ の値を選び、回転角 θ を 1% 以下で測定することにより、バネ定数 k を 3% 以内の精度で較正することが出来る。

(2) 標準慣性モーメントによる較正法

慣性モーメント値が既知の標準器を本装置の十字バネスタンドに載せて自由振動させた場合の振動周期から、ばね定数 k を求めることが出来る。

いま、無負荷時について

バネ定数	k_0
慣性モーメント	I_0
振動周期	T_0

標準器を載せた場合について

バネ定数	k_s
慣性モーメント	$I_0 + I_s$
振動周期	T_s

とすれば

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= 4\pi^2 \frac{I_0}{T_0^2} \\ k_s &= 4\pi^2 \frac{I_0 + I_s}{T_s^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

これらの式から I_0 を消去して

$$k_s = k_0 \frac{T_0^2}{T_s^2} + 4\pi^2 \frac{I_s}{T_s^2} \dots\dots\dots (17)$$

いま $k_s = k_0 = k$ の関係が成り立つとすれば

$$k = 4\pi^2 \frac{I_s}{T_s^2 - T_0^2} \dots\dots\dots (18)$$

この式から、標準器の慣性モーメント値 I_s と、自由振動周期 T_0 , T_s を求めてバネ定数 k を導くことが出来る。

I_s , T_s および T_0 の値は各 0.1% 程度で計算又は測定が可能であるので、(18) 式からバネ定数 k を 1% 程度で校正出来るはずであるが、実際は $k_s = k_0 = k$ の関係を仮定したことと起因する誤差が混入するものと推定される。

2. 装置の概説

2.1 構成および構造

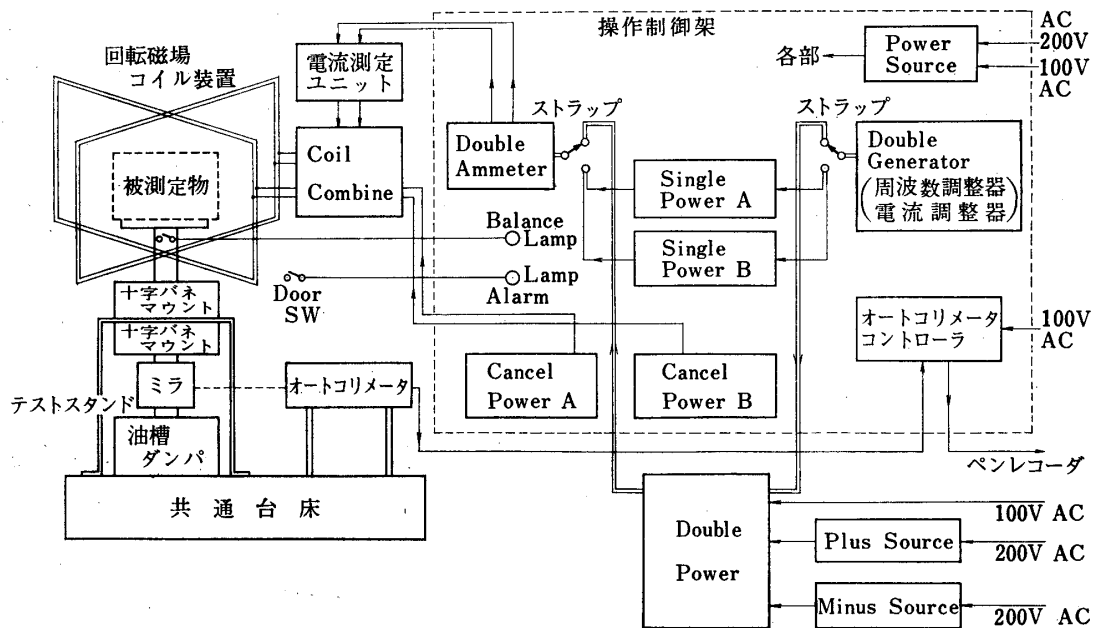
本装置は、共通台床（除振台）上に十字バネテストスタンド部、回転磁場コイル装置部、ならびにオートコリメータを設置し、これ等装置全体をアクリル樹脂製の遮風装置でカバーしている。これと別に回転磁場コイル装置に給電するための操作制御架および付属する電源装置があり、本装置の主要部を構成している。

本装置の系統図を図 2.1 に、また外観写真を写真 2.1 にそれぞれ示す。

2.1.1 テストスタンド部

テストスタンド部には BENDIX 社製の円筒形十字バネ 2 個を鉛直同軸状に配置してペダスタルを保持している。十字バネ及びそのホルダ（マウント）は交換可能となっていて、被測定物の重量に応じて 3 種のバネのうちから選定することが出来る。表 2.1 に十字バネの諸元を、また写真 2.2 にその写真をそれぞれ示す。

このほか、被測定物の重心とテストスタンドの回転軸（即ち十字バネの中心軸）とを一致



第2.1図 装置の構成

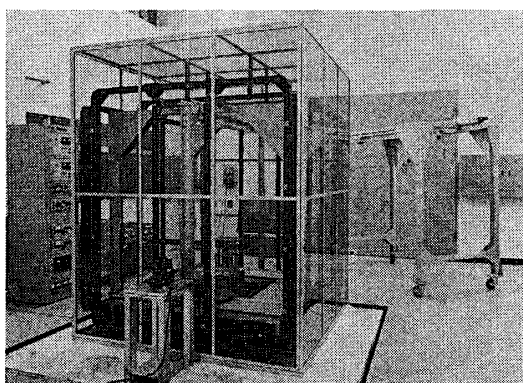


写真 2.1 全 景

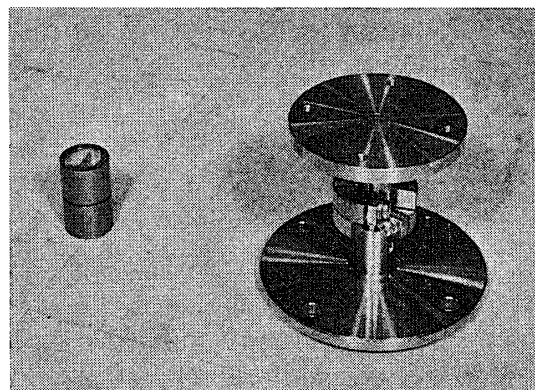


写真 2.2 十字バネとそのマウント

第2.1表

BENDIX FLEXUAL PIVOT				
TYPE	TORSIONAL SPRING RATE	LOAD CAPACITY	DIMENSIONS	
	k dyne-cm/arc-sec	v kg	l mm	d mm
5012-800	1.85	4.46	15.2	9.5
5020-800	9.5	12.4	25.4	15.9
5032-800	38.2	31.8	40.6	25.4

せしめるための重心調整機構，ペDESTALを固定するためのクランプ機構，および回転振動をダンピングするための液槽ダンパ機構が付属している．写真2.3にテストスタンド部を示す．

2.1.2 回転磁場コイル装置

回転磁場コイル装置は2軸（水平）直交式4コイルよりなる変形ヘルムホルツコイルで形成されている．各コイルは1辺約2mの正方形で19層巻き（うち1層は地磁気水平成分消去用）とし，電流値約2.5 Aでコイル中心部に2.5エルステッドの均一磁場を発生し，直交コイルに正弦波，余弦波状に変化する電流を流して回転磁場を得ている．回転角周波数の低い域では最大5エルステッドまで発生可能である．回転磁場の回転速度は0.05~1,000 Hzの範囲となっているが，周波数の高い域でインダクタンスによる電流の減少を防ぐため「コイルコンバイン」部でコイルの直並列接続の切替えが出来るようになっている．

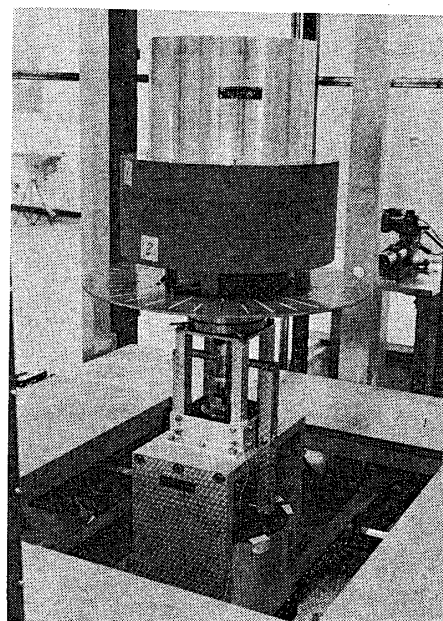


写真 2.3 テストスタンド

2.1.3 操作制御架およびオートコリメータ

操作制御架には，主として回転磁場発生用の電源回路が収容されている．即ち二相交流発生器（DOUBLE GENERATOR）から出る正弦波，余弦波信号を高周波域アンプ又は低周波域アンプで増巾して，電流測定ユニットを経由して回転磁場コイル装置へ給電している．二相交流発生器の二つの出力はその振巾と位相を調整出来るようになっており，電流測定ユニットにおいて直列抵抗0.2Ωのドロップを用いてコイル電流の振巾と位相を測定している．（図2.1系統図参照）．

オートコリメータはHILGER & WATTS社の0.1秒角読みのものを使用し，テストスタンドのペDESTALに取付けられたミラーと組合わせてその微小回転角度を自動追従し直流電気信号として出力する．オートコリメータの光学装置部分はテストスタンドと共通の台床に固定されていて外乱振動の影響を除去している．

2.1.4 除振台

本装置のテストスタンド部オートコリメータ等の主要部は共通台床に組込まれて除振台上に設置され，外乱振動の影響を軽減出来るよう考慮されている．除振台はコンクリートブロック（3000×3000×300 mm）とエアライド4基の組合わせで構成されている．

2.2 性能諸元

本装置の性能は，十字バネの選択により変わるが，いま最も硬いバネ（5032-800）を使用する場合，即ち科学衛星のトルクを測定する場合について記述すると次のとおりになる．

トルク測定範囲	約 10~2000 dyne·cm
トルク測定精度	約 10 dyne·cm（最良条件時）
被測定物重量	120 kg 以下

被測定物容積	1,000φ×1,000 mm 以下
被測定物重心調整範囲	50 kg・cm
回転磁場回転面	水平面内
回転磁場強度	5 エルステッド MAX. (0.05~16.7 Hz の範囲内)
回転磁場回転速度	0.05~1,000 Hz
回転磁場均一度	コイル系の中心から直径約 600 mm の範囲内で ±2% 以内 (0.17~16.7 Hz, 2.5 エルステッドにおいて)
地磁気消去	地磁気の水平成分のみ消去
角度計測方式	オートコリメータによる光学非接触計測. 自動追従.
角度読取精度	0.1 秒角.
角度出力方式	0~30 VDC. の電圧信号として.
トルク較正方式	標準磁気モーメント方式又は標準慣性モーメント方式.
テストスタンド方式	十字バネ (2 個同軸) によるスラスト保持ペDESTAL.
回転ダンピング方式	油槽式.
外乱除去方式	エアライド保持コンクリートブロック, 及びアクリル製遮風装置.

3. 試験結果と検討

3.1 標準磁気モーメントによるバネ定数較正試験

(1) 標準磁気モーメント

材 料	アルニコ磁石 (TMK-1B)
形 状	丸棒 5φ×96 mm
磁気特性	$B_r=10.5$ kG $H_c=760$ エルステッド
磁気モーメント値	(BH カーブより計算) 1.575 Am ²

(2) 測定結果

十字バネ型式	公称バネ定数 dyne・cm/arcsecond	バネ定数実測値 dyne・cm/arcsecond	備 考
5032-800	3.7	4.66*	*1 ポイントのみしか測定していない
5020-800	19.0	19.0~19.7	
5012-800	76.5	67.0~77.6	

注 公称バネ定数は2個使用時の値

(3) 考 察

バネ定数値のバラツキの原因は取付け具合のバラツキ, 製品のバラツキ, 及びスラスト荷重の状況に起因するものと推定される. 従って測定の実施に先立ってなるべく測定と同一の条件下で較正試験を行なう必要がある.

3.2 不要発生トルク測定

3.2.1 外乱雑音量の測定

(1) 測定法

テストスタンドを無負荷状態としたとき、外乱雑音振動に基づくペDESTALの振れ角を測定してトルクに換算した。

除振台のエアライドにはコンプレッサからの空気を注入しない状態とした。

(2) 測定結果

十字バネ型式	公称バネ定数 dyne·cm/arcsecond	雑音トルク平均値 dyne·cm	備 考
5012-800	3.7	2	昼 間
5025-800	19.3	1	昼 間
5032-800	76.5	13	昼 間

(3) 考 察

外乱振動（水平振動）がペDESTALの回転トルクに変換されるメカニズムは、十字バネの構造上の非対称性とそれに対する偏心荷重とが考えられるから、雑音トルクを減少せしめるためには偏心荷重の補正が重要であり、実験でもこの傾向がうかがわれた。また、除振台のエアライドに適量の空気を注入することにより外乱を数分の1程度にまで低減できることもわかった。

3.2.2 無負荷トルク測定

(1) 測定法

テストスタンドを無負荷状態として回転磁場を印加したとき、ペDESTAL部がエディカレント等によって発生するトルク、即ち風袋トルク量を測定した。

(2) 測定結果

十字バネ形式	公称バネ定数 dyne·cm/arcsecond	0.167 Hz, 0.261 ω 換算トルク dyne·cm	備 考
5020-800	19.3	5.0×10^{-3}	10 Hz, 2.61 エル ステッドにて測 定実施
5032-800	76.5	7.6×10^{-3}	

(3) 考 察

表 1.2 にも示した通り、衛星に軌道上で発生するダンピングトルク量は 10 dyne·cm 程度と仮定すれば本装置の同条件下における雑音（風袋）トルク量は 1% 程度の測定誤差を与えることとなる。

なお、この風袋トルクはあらかじめ測定しておけば原理的には補正できるはずであり、この補正実験を計画中である。

3.3 テストモデルによるトルク測定試験

3.3.1 エディカレントトルク測定試験

(1) 測定法

テストモデル:

アルミ筒 $360\phi \times 250$ mm 厚さ 3 mm

ダミーウエイト ベークライト円板 70 kg

(2) 測定結果

図 3.1 に測定結果を示す。

(3) 考察

図 3.1 の測定結果によれば、実測値が理論値より大きく出る傾向が示される。その原因の1つとして、バネ定数値が実際の値より大きく与えられている疑いがあり、これは較正試験時における標準磁気モーメント（永久磁石）とペダスタルとの結合がルーズであったことが考えられる。米国の例[1]によれば、理論値と実測値はほとんど一致したことが報告されている。

3.3.2 ヒステレシストルク測定試験

(1) 測定法

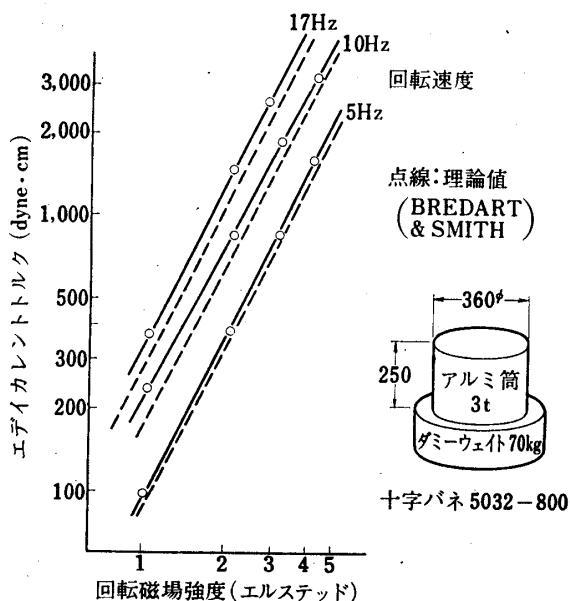
テストモデル:

純鉄棒 $7\phi \times 550$ mm

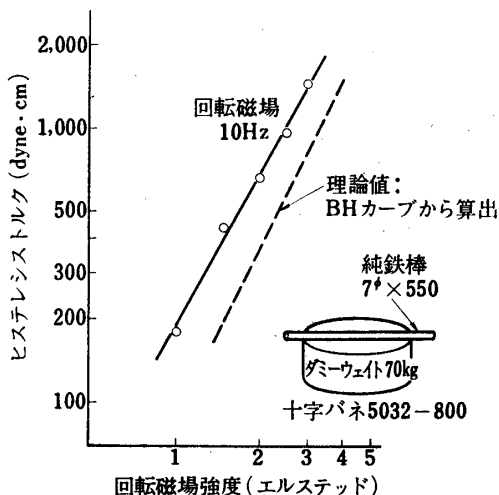
ダミーウエイト ベークライト円板 70 kg

(2) 測定結果

図 3.2 に示す。



第 3.1 図



第 3.2 図

表 3.1 トルク測定精度の考察

項 目	誤 差 の 内 容	誤差トルク値 (dyne·cm)	備 考
理論的分解能	オートコリメータ分解能 0.1 arcsecond 十字バネ定数 76.5 dyne·cm/arcsecond	7.65	
較正試験精度	標準磁気モーメントを用いて較正試験 を行なう場合の精度	$0.3 \times \alpha$	衛星内に発生するトルク を 10 dyne·cm と仮 定 (1.3.3. 項参港)
外 乱 雑 音 T_{ND}	外乱振動に起因する雑音トルク	13.0	エアライドに空気を入 れない状態
無負荷トルク T_{NO}	本装置のペDESTAL自身の発生するト ルク	$0.008 \times \alpha$	

注 1 α : トルク拡大率 $\alpha = \frac{\omega}{0.167} \times \left(\frac{H}{0.261} \right)^2$

ω : 磁場回転角周波 (Hz)

注 2 十字バネは 5032-800 を使用

H : 磁場強度 (エルステッド)

(3) 考 察

図 3.2 によれば、理論値より実測値が大きく出ているが、その原因は前項でも述べた通りバネ定数値が実際より大きく与えられている疑いがあることと、被測定物の純鉄棒中にエディカレントトルクが発生することによるものとの両方が考えられる。

3.4 トルク測定精度について

本装置の測定精度を左右する要因をまとめたものを表 3.1 に示す。但しこの表は科学衛星の磁気ダンピングトルク (0.167 Hz, 0.26 エルステッドで 10 dyne·cm と仮定) 測定時についてまとめたものである。

表 3.1 に示される通り、本装置で科学衛星の磁気ダンピングトルクを測定する場合の拡大率 $\alpha = 100 \sim 1,000$ を考慮するとき、測定精度を支配するものは較正試験精度 (1.3.3 項参照) であり、標準慣性モーメントの併用等による較正試験精度の改善が望まれる。

なお、表 3.1 より、数 10 dyne·cm のトルクを測定するときには外乱雑音その他の要因が無視出来なくなることも判る。

3.5 トルク測定精度の維持

本装置においては、既に 1.2 項で述べた前提条件、即ち

$$\omega \gg \Omega \quad (\text{被測定体を含むペDESTALの周有振動数が回転磁場角周波数より小さい。})$$

$$T_{de} \gg T_f \quad (\text{摩擦トルクがエディカレントトルクより小さい。})$$

なる関係が成立する条件下で測定を実施することが望ましい。この点は小さい十字バネを用いて小さい磁気ダンピングトルクを測定する際の制約条件となることに注意を要する。本装置ではテストスタンドのペDESTAL部の無負荷固有振動数が十字バネ 5012-800 の場合、約 3.5 Hz であるので、負荷の慣性モーメント値が小さい場合には、負荷の慣性モーメント値を増加させるかまたは回転磁場の角周波数を 30 Hz 以上に選ぶか、等の考慮が必要である。この場合、30 Hz 程度の周波数になると渦電流トルクはもはや周波数に比例しなくなる

ことに注意しなければならない。また一般に微小トルクの測定に際してはテストスタンドの油槽ダンパの油を減らしてその粘性摩擦抵抗を極力減らして測定する必要がある。

5. 結 言

スピン安定型の科学衛星で、低中高度軌道を周回するものについて、その姿勢変化を解明し、制御するために、打上げ以前においてその衛星の持つ磁氣的性質を把握する必要があるが、本装置もその目的に添った設備の一環として、科学衛星のスピンダンピングトルクの計測を主目的として開発されたものである。しかし本装置は単に科学衛星のスピンダンピングトルク測定のみならず、十字バネを利用する科学衛星慣性モーメント測定、SRATS 衛星や CORSA 衛星のスピン速度の磁氣的コントロール装置のシミュレーションテストに使用されるほか、一般の微小トルクを扱う実験、回転磁場を用いる実験等に活用し得るものである。現在、各種の被測定体に対する測定試験や各種の標準導体の構体に生ずるエディカレントトルクを用いたバネ定数較正試験などを継続中であり、究極の精度なども順次明らかになるものと思われる。

最後に、本装置のシステムデザインにあたり御指導いただいた曾田範宗名誉教授をはじめ齋藤成文教授、林友直教授、設計製作に協力された日立製作所の各位、ならびに特性測定に協力された千葉工大学生相沢・関川両君に謝意を表する次第である。

1974年5月30日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] Boyle, Mosher, Greyerbiehl, "Experimental Determination of Eddy-Current Torques on Bodies Rotating Relative to a Uniform Magnetic Field", NASA TN D-5086, 1968
- [2] Boyle "The MARK-VI Torquemeter, an Instrument for Measuring Magnetic Torques on Spacecraft", NASA TN D-6387, 1971
- [3] Yu, "Spin Decay, Spin-Precession Damping and Spin-Axis Drift of the Telster Satellite", BSTJ Vol. 42, No. 5~6, 1963
- [4] 伊藤富造「人工衛星のローテーションナルダンピングのモデル実験」科学衛星将来計画シンポジウム(東京大学宇宙航空研究所), 1969年
- [5] Smith, "A Theoretical Study of the Torques Induced by a Magnetic Field on Rotating Cylinders and Spinning Thin-Wall Cones, Cone Frustums, and General Body of Revolution," NASA Technical Report R-129, 1962