

# 液水／液酸ターボポンプ回転計測

加勇田清勇・秋葉鎌二郎

(1983年2月10日受理)

**Abstract:** Rotational speed of turbopumps has been measured by a magnetic flux method in which a pick up coil senses magnetic flux of a permanent magnet embedded on the shaft of turbopump. This report presents experiences on the problems aroused in the developmental phase of this instrumentation system and solutions to them.

Satisfactory performance has been achieved after several improvements such as an adoption of rms proportional slice level to the input pulse reformation CIRCUIT which brings noise insensitive characteristics to the system.

## 概 要

液水／液酸ターボポンプの開発研究において、ポンプの回転数を計測する技術を確立した。ポンプの回転する部分は極低温(20 K)で、圧力も  $10 \text{ kg/cm}^2$  A 程度になっており、特に液水ポンプは 50000 rpm の高速で回転している。また、ポンプ流体は水素と酸素でどちらも危険性が高いため、回転数の検出には十分な注意を払う必要がある。宇宙研では、永久磁石を回転に伴う磁界の変化をコイルで検出する方法を採用した。この方法は供試体に対して通電する必要がなく安全であるが、検出コイルの出力波形の歪によって  $F/V$  変換器が誤動作するため、この波形整形に苦心した。この論文では宇宙研で開発した回転計測の方法と計測器の改良の推移を報告する。

## 1. 序 論

宇宙研では昭和52年から液水／液酸ターボポンプの開発試験を行ってきた。ターボポンプの回転計測は性能を評価する上から最も重要な計測の一つであると共に、ターボポンプを安全に運転する上からも信頼性が要求される計測項目である。回転数を検出する方法として次の3つが考えられる。

- (1) 光電方式
- (2) 永久磁石方式
- (3) 渦電流方式

宇宙研では次の2つの理由から(2)の永久磁石を用いる方式を採用した。

- (1)最も馴れた検出方法であり、光電式のように透明度が要求されず検出確度が高い。
- (2)供試体周辺は水素雰囲気であるため外部から電流を供給する方式を避ける必要がある。

この論文では、宇宙研で開発した回転計測の方法、これを用いた計測の結果、および改良の経過について報告する。

### 2. 計測方法

回転信号を発生する永久磁石はターボポンプの回転軸の周上に1個固定されており、回転によって生ずる磁束変化をターボポンプケースに取付けたコイルによって検出する。従って、ポンプが1回転すると1つのパルスが発生する。この部分の配置を図1に示す。計

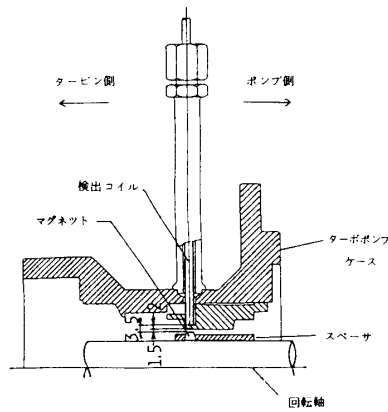
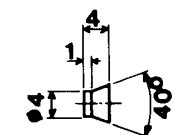
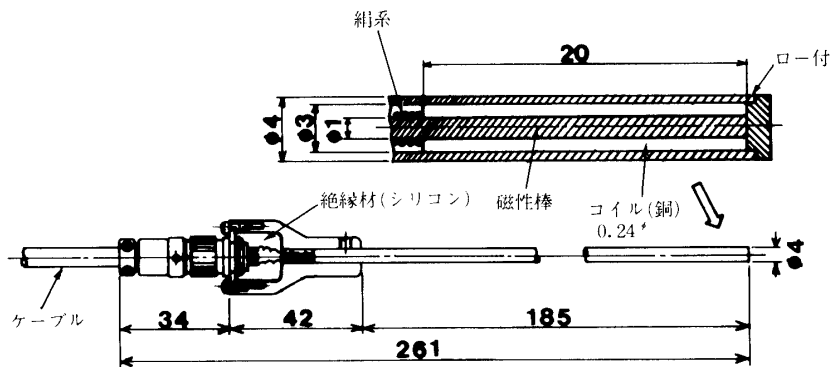


図1 センサー取付部の断面図



永久磁石(REC-16)

図2 ターボポンプ回転センサー

測の  $S/N$  比を良くするため磁束密度の大きいサマリウムコバルト (TDK 製 REC-16, 磁束密度: 2500~3000 gauss) 永久磁石を用いた。検出コイルはポンプの圧力と極低温度 (20 K) に耐え、またできるだけ小型化する設計とした。(図2)コイルの出力は約  $1.7 \mu\text{V}/\text{rpm}$  で 60000 rpm の回転数が計測できるよう考慮した。

### 計測回路

$S/N$  比を良くするため検出コイルの近くにプリアンプを設けることが望ましいが、水素に対する安全を考慮し直流分を分離する目的でニッケルコアの小型低周波トランス (ラックス社製 6421 S 型) を用いた。この計測系統図を図3に示す。ここに用いた  $F/V$  変換

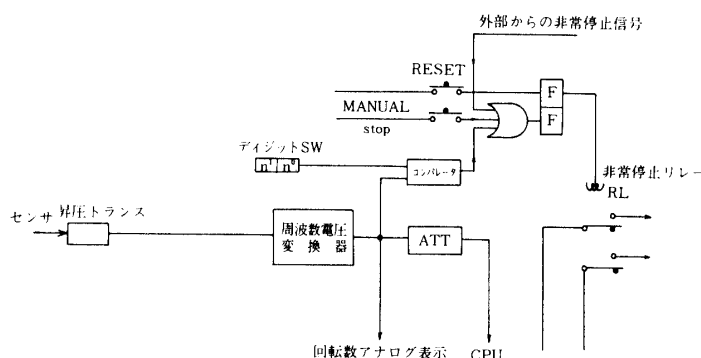


図3 回転センサーの取付断面図

器 (小野測器社製) は一般に用いられている積分型と異なり、入力パルスの周期を 24 MHz の基準クロックで測り、入力パルス毎にその逆数を  $D/A$  変換して出力する方式となっており、変換に要する時間は数  $\mu\text{s}$  の速さである。

この回転計測回路は予め設定した回転数を越えた時ターボポンプの運転を停止するためのリレーが作動する機能を持っている。液水ポンプの非常停止回転数は 0~60000 rpm の間で 1000 rpm ごとにデジタルスイッチによって設定でき、液酸ポンプでは 0~30000 rpm の範囲で同様に設定できる。 $F/V$  変換器に非常停止回転数以上の信号が入力されてからリレーが作動するまでの時間は約 10 ms 以下である。

### 校正装置

計測器の校正を行うため3種類の校正装置を試作した。これらの校正装置は計測回路の改良と共に順次製作した。

**校正装置 I** 回転磁石による検出コイルの出力波形が実際にポンプが 60000 rpm 回転した時と同じにするため、磁石を取付けている回転軸の周速度と同じ周速度を出す校正装置を製作した。この校正装置では、回転ディスクの径をポンプ軸径の6倍にし、10000 rpm で同じ周速度が得られるようにした。このディスクは 24 V の直流電源の電動モーターによって駆動される。

**校正装置 II** この校正装置は 100 V の交流電源によって作動する電動モーターを用いたものであり、できるだけ実際と同じ条件を作るため周速度だけでなく回転軸の材質とその径、回転磁石の材質と形状を実際のものと同じにした。この装置は 37000 rpm まで回転でき、この回転数までの加速時間は 1.5~2.0 秒であり、実際のポンプの起動状態が模擬

できる。

校正装置Ⅲ この校正装置は自動車に用いられているターボチャージャーを改造したもので、これも校正装置Ⅱと同様に実際に近い状態で校正でき、60000 rpm まで回転できるが、窒素ガスによって運転するため電動モーターを用いたものより手間がかかる。

### 3. 計測の結果と改良の推移

1 回目のターボポンプ試験では良好に計測できたが、2 回目の試験において液水ポンプの回転数が 28000 rpm から急に 0 rpm を示し測計不能になった。この現象は  $F/V$  変換器の増幅器の遮断周波数がノズル除去のため 2 kHz に設定していたことによるもので、回転数が大きくなると共に  $F/V$  変換器への入力信号の波形幅が狭くなり、増幅器が応答できなくなったためである。応急処置として、 $F/V$  変換器と昇圧トランス間に単安定マルチバイブレーター回路を入れ、入力波形を回転数に関係ない一定の波形幅に整形した後  $F/V$  変換器に入力するように変更した。しかし、この単安定マルチ回路の入力部に用いた増幅器も 10000 rpm 以上の回転数を計測するだけの周波数帯域がなく、次の試験において 45000 rpm に設定した非常停止回路が作動せず、ターボポンプの回転数は 56000 rpm まで上昇しタービンディスクが破損する事故となった。しかしこの事故の第一の原因は、緊急停止系を構成している別の計測系が正常に動作しなかったことによるものである。事前にこの様な不具合を予測できなかった理由は、入力波形の形状把握が不十分であったことによる。

この不具合に対処するため、応急処置で用いた単安定域を 2 kHz から 20 kHz に上げ、センサーの出力を直接  $F/V$  変換器に入力するよう変更した。この場合、センサーと  $F/V$  変換器間の距離は約 200 m になり、ノイズが入り易い状態になったため、 $F/V$  変換器の入力側および AC 電源側にそれぞれ 100  $\mu F$  と 0.2  $\mu F$  のコンデンサーを入れた。この変更の後、3 回試験を行ったがノイズによって非常停止回路が作動する試験が 1 回あった。このノイズはターボポンプの運転制御盤から試験設備のバルブを操作する信号が回転計測器の非常停止回路と干渉して発生したものと考えられた。以上の試験の後、次のような基本的な改善策を施した。(1) プリアンプを含むシュミット波形整形回路を設ける。

- (2)  $F/V$  変換器の増幅器の周波数帯域を 100 kHz まで広げる。ノイズ除去のためのスライスレベルを +5 V に設定する。
- (3) 回転軸に取付ける永久磁石を水素脆性から保護するため銅メッキする。(TP-703-1 試験からはマンガン・アルミ永久磁石に変更し銅メッキは行っていない)
- (4) 校正装置Ⅰを製作する。

以上の処置を行った後試験に用いたところ、約 32000 rpm 以上の回転数でスパイク状の波形(図 4)が見られた。図 5 にこの時の検出コイルの波形を示す。この波形を分析してみると、プラス側からマイナス側に変化し、次にマイナス側からゼロに戻る時わずかにプラス側にゆらぐ現象が認められる。このゆらぎの振幅は回転数が増大するのに従って大きくなる。検出コイルの出力をシュミット回路の増幅部で約 100 倍程度に増幅し、これをシュミット回路で整形する際、その作動電圧を適当な値に設定するがその値(スライスレベル)

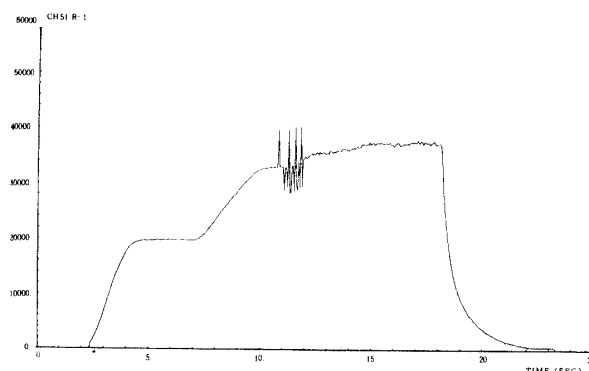


図4 計測結果 (その1)

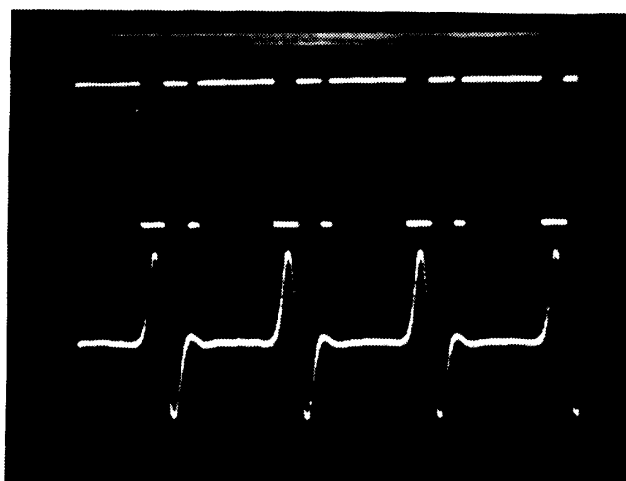


図5 回転センサーの出力波形

上の波形

シュミット回路  
の出力, ゆらぎ  
波形によるシュ  
ミット出力が分  
る。

下の波形

センサの出力波形

水平:

0.5 ms/Div

垂直:

約 38 mV/Div

は低回転数で波高値が下がることを考慮すると余り高くできない。従って、高速回転時には、前述のゆらぎがこのスライスレベルを越えシュミット波形等の誤信号を出す原因になったものと考えられる。

次にこのゆらぎ波形を除去するため、真の信号波形のプラス側の振動値とゆらぎ波形の振幅値の比率を求めてみると約10%である。このゆらぎ波形の影響を除去する最も容易な方法として、予め予想される回転数からシュミット回路のスライスレベルを決めることである。しかし、この方法では低い回転数における真の信号波形の振幅がこのレベル以下になりシュミット回路の出力が出なくなるため、新しいゆらぎ除去回路を作った。また、この現象を再現するため、校正装置もより実際に近い条件が出せるものにした。(校正装置II, III)

ゆらぎ波形の除去回路としては、アンチログアンプ8048 (INTERS) を用いて試作した。満足な回路ができるまで可成の時間を要したが、最終的に図6に示す回路によって除去することができた。この回路は TRUE RMS TO DC CONVERTER 4341 (BURR-BROWN)

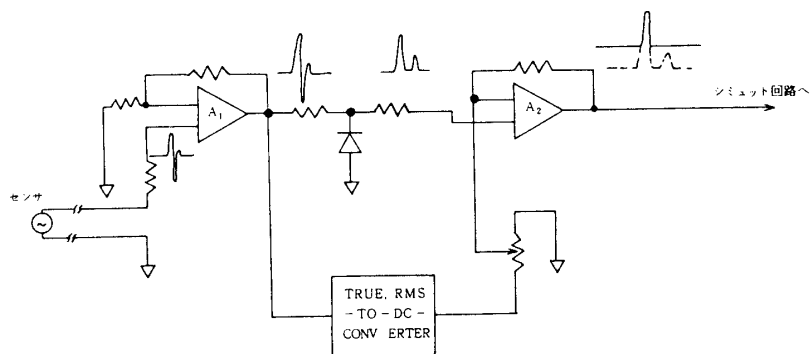
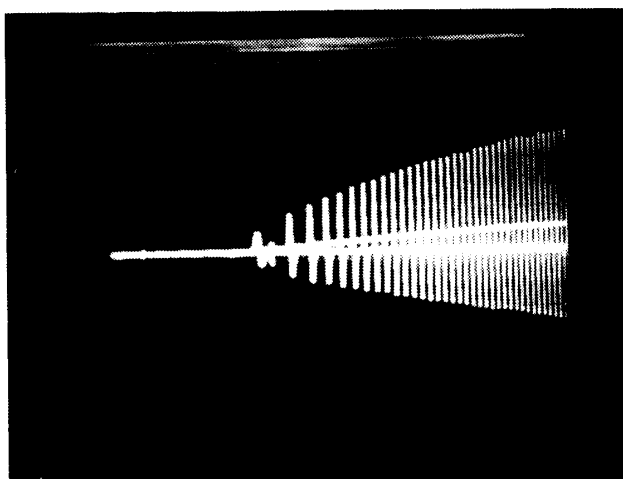


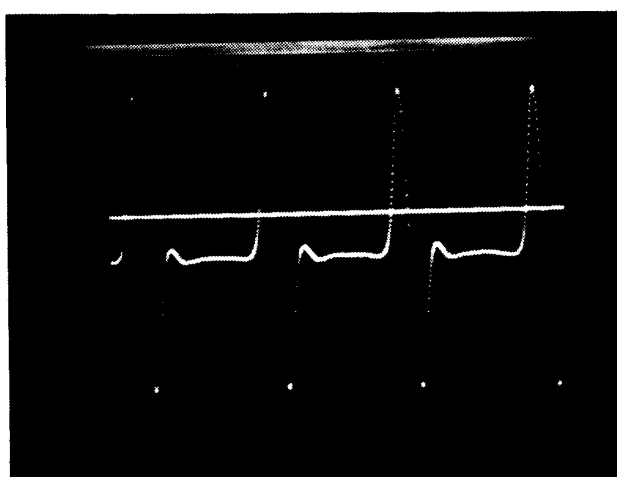
図6 ノイズ除去回路



増速されていく回転数と  
rms 値レベル

水平：50 mS/DiV

垂直：25 mV/DiV



定格回転付近での  
rms 値レベル

水平：0.5 mS/DiV

垂直：25 mV/DiV

図7 rms 値レベルの回転加速への追従性

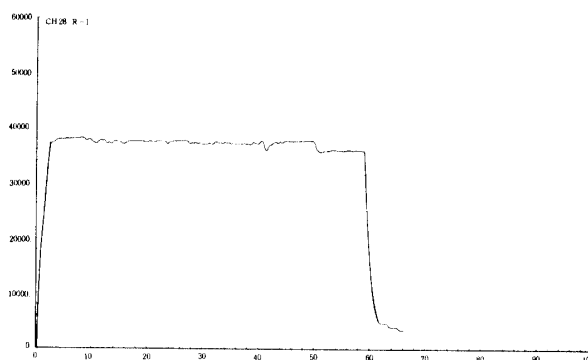


図8 計測結果(その2)

製)で直流から 24 kHz までの波形に対して 450 kHz までの成分を 2 乗平均でき、その値および範囲は rms で 10 mV~7 V であり、精度は  $\pm 0.5\%$  である。この回路で 2 乗平均した値をプリアンプのバイアス、すなわちスライスレベルに用いることによってゆらぎ波形の影響は除去できる。この一連の試験における平均レベルの設定はピーク値の約 30% である。この値に設定した理由はこれまでの試験における信号波形の波高値対ゆらぎ波形の振幅値が約 12% であり、この比率は周波数の変化に対してほぼ一定であると推定されたことによる。図 7 に回転が上昇する時の平均値回路の追従性を示す。ゆらぎ波形の振幅値は完全にスライスされていることが判る。この計測系を用いた計測結果を図 8 に示す。

ゆらぎ波形の影響を除去する計測系が確立できるまで約 1 年近くの時間を費したが、ステージ試験の成功によって回転計測も一応の完成をみた。

### 謝辞

回転計測を完成するにあたり、永久磁石を提供して下さった東京電気化学研究所の山下氏、この磁石の水素脆性に関する材料の分析をして下さった宇宙科学研究所堀内研究室の斎藤技官、回転信号の原波形の収録に御協力下さった宇宙科学研究所森研究室の今沢助手、平田技官の両氏に又除去回路の製作に御協力下さったユニゾン電子の清水氏に心から感謝を表します。