

# 角度標準の動向

益田 正

## Movement of the Angle Standard

Tadashi MASUDA

The dimension of an angle has the peculiarity of the dimensionless. Therefore, in the field of the angle calibration, the characteristic method (self-checking method), which was different from the method such as length, has been developed. The characteristics of these self-checking methods are shown. And, the calibration systems for the polygon mirrors, the autocollimators and the rotary encoders, which adopted these self-checking methods, are introduced. Moreover, it is described about the comparison of the Japanese national standard and the German national standard of the rotary encoders, the round robin calibration in some Japanese organization, the movement of the traceability system establishment in Japan.

**Key words:** angle calibration, self-checking method, polygon mirror, autocollimator, rotary encoder

### 1. 角度の特殊性

角度は長さと同様、重要かつ基本的な量である。SI 単位の中で、1995 年まで補助単位として、特別の扱いを受けてきた。長さや質量、時間などの 7 つの基本単位は光速、キログラム原器、原子の放射光の周波数などから定義され、また組立単位はこれらの基本単位から組み立てられている。すなわち、ほとんどの単位は現実に存在するものから定義されており、曖昧さをもつ。これに比し、角度の単位ラジアンは半径と同じ長さの弧を挟む角と定義され、長さから誘導された単位として、現在は組立単位に分類されている。しかし、長さの比で表され、長さから誘導された単位であるにもかかわらず、長さの定義の影響を受けない。次元が 1 であり、物理量ではないので、具現的な標準を設定することもおかしい。また、見方を変えると 1 点からみた全角が  $2\pi$  ラジアンであり、全角が理想的な標準として、どこにでも存在するという特殊性がある。

### 2. 角度の実用標準

前述のように、角度には標準器はない。しかし、実用的な標準器として、古くから、角度ゲージやサインバー、精密円周目盛板、ポリゴン鏡、精密割出盤などが使われてきた。特にポリゴン鏡はオートコリメーターとともに用いられ、角度測定における主な誤差原因である偏心誤差の影響を受けないため、非常に使いやすい角度標準器として使われている。その角度目盛は一般に、5~36 個の面角度からなり、各面の精度は ±5 秒以下でできている。また、精密割出盤、たとえば米国ムーア社製の 1440 スモールアングルデバイダーは 1440 分割でき、その分割精度は ±0.1 秒という。また近年、機械や計測機器の自動化に伴い、各種のデジタル式角度検出器（通称はロータリーエンコーダー、以降、単にエンコーダーと記述する）が開発され、その需要は飛躍的に伸び高精度化も図られてきた。現在では 1 回転数万の角度目盛をもち、その精度も 1 秒以下、さらに電気的な内挿技術を使って分解能も 0.1 秒以下に達し、従来の機械的な標準器と遜色のない精度をもつに至っている。

表1 角度の各種の校正法とその特徴

校正法	標準器との比較測定	自己校正法（一段高精度な標準器を必要としない）			
		デバイダー法	同時校正法	マルチ再生ヘッド法	等分割平均法
長 所	高精度な校正が容易	校正が容易	高精度	高精度な校正が短時間に可能	高精度、一般的エンコーダーに適用可
短 所	高精度な標準器が必要	目盛数大で高精度不可	目盛数大で作業量極端に増加	校正できるエンコーダーに制限あり	高精度割出機構が必要
校正作業量	$N$	$2N$	$N^2$	$N$	$5 \sim 30N$
校正值の標準偏差	$\sigma$	$\sqrt{N/2} \cdot \sigma$	$\sqrt{2/N} \cdot \sigma$	$0.7 \cdot \sigma$	$\sigma/\sqrt{5} \sim 30$

$\sigma$ : 角度測定の標準偏差,  $N$ : 校正目盛数.

### 3. 角度標準器の校正法

一般に計測器を校正する場合、校正対象の計測器より一段高精度な計測器が必要となり、最高精度の標準器を校正する場合にはその定義により近い計測方式が必要となる。しかし、角度の場合は 360 度という理想的な基準がどこにでも存在するため、標準器の校正にはこの 360 度を基準とした校正法が採用される。ほかの基準を用いて校正を行う方法なので、これを一般に自己校正法 (self-calibration method) とよんでおり、角度特有の校正法である。

表1に各種の自己校正法の特徴をあげる。校正方法の詳細は各文献を参照されたい。自己校正法としては、従来から表中のデバイダー法<sup>1)</sup>と同時校正法があり、ポリゴン鏡や精密割出盤など標準器の校正に使われてきた。前者は簡易な方法で比較的短時間に校正值が得られる。後者は高精度な校正值を得ることが可能である。ただ、校正目盛数が多くなると、デバイダー法は高精度な校正が望めず、同時校正法は校正作業量が極端に増えるため数百以上の目盛の校正には適用できない。これに比し、マルチ再生ヘッド法と等分割平均法は、多数の目盛をもつエンコーダーの高精度な校正を可能とする実用的な方法である。

### 4. 角度標準の動向

#### 4.1 ポリゴン鏡

ポリゴン鏡は金属膜を蒸着させた面角度をもつガラスまたは金属の角柱で、安定した実用標準として使われている。また、前述のように、機械的な偏心誤差の影響を受けないことも標準器として選ばれる大きな理由のひとつである。

ポリゴン鏡は 1980～1986 年にかけて、11か国間で国際比較が行われ、ほぼ  $\pm 0.1$  秒の精度で一致している。また、現在も国際比較が進行中である。産業技術総合研究所で開発中のポリゴン鏡自動校正装置を図1に示す。これは自己校正法の同時校正法を自動化しようとするもので、高精度な 720 分割の割出装置が 2 台組み込まれており、コンピュ

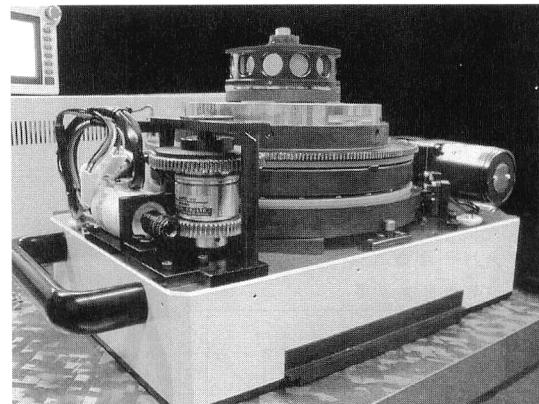


図1 ポリゴン鏡の自動校正装置（産業技術総合研究所で開発中）。

ーターによって相互に任意の位置への割り出しが可能である。上部には校正用のポリゴン鏡が取り付けられ、角度の測定には分解能 0.005 秒のオートコリメーター (Moller 社製) が使われている。割出装置の割り出しとポリゴン鏡の角度読み取りの再現性が不確かさの重要な要因であるが、国際比較を実施した結果、不確かさは 0.036 秒を確認している。

#### 4.2 オートコリメーター

微小角の測定にはオートコリメーターが広く使われており、高精度なものは数分の測定範囲内を分解能 0.1 秒程度で測定する。ところが、日本にはこの精度を保証する標準がなかった。産業技術総合研究所ではオートコリメーターの精度保証（依頼試験）を行うため、図2のような校正装置を開発した。この装置は、図3に示すような割出装置と角度干渉計からなる。割出装置は直動ステージとピエゾアクチュエーターを使って、割出装置のレバーを押し、任意の微小角の割り出しを行う。割出角は、インバー合金の腕の両端にある反射鏡を干渉計で読み取る。この方法で任意の微小角の基準をつくる。この測定において、腕の長さとその安定性が重要である。そのためには低熱膨張材のインバー合金を使い、温度管理を行っている。角度干渉計の校正

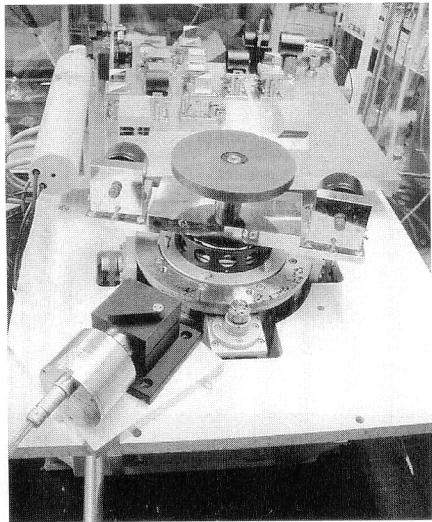


図2 オートコリメーターの校正装置（産業技術総合研究所開発）。

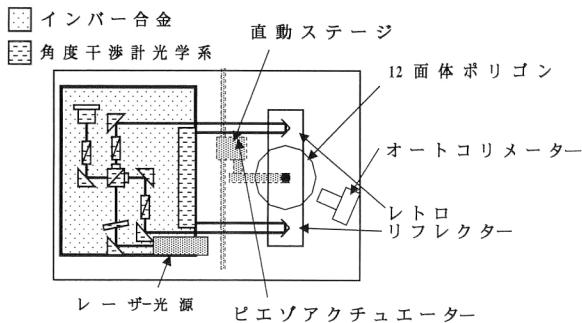


図3 オートコリメーターの校正装置の構成。

は腕を正確に360度回転させて行う。ただし、角度干渉計は全周連続して測定できないため、干渉計には30度以上の測定範囲をもたせ、内蔵の12面ポリゴン鏡を使って30度ごとに角度干渉計の測定値を連結して行われる。この装置で、2002年4月から、1000秒の測定範囲を不確かさ0.1秒で依頼試験を開始している。

#### 4.3 ロータリーエンコーダー

20年以上前から、数万の角度目盛をもち、ポリゴン鏡に匹敵する精度をもつエンコーダーが市販され、精密な自動計測や自動制御に使われてきた。しかし、角度標準としてポリゴン鏡や精密割出盤などしかなく、校正できる目盛数は少なかった。このため数万目盛のうちの、たとえば12点の測定でメーカーが精度保証を行い、ユーザーもそれを受け入れざるを得ない状況であった。この一番の問題は、数万点に及ぶ角度目盛を校正できる方法がないために、エンコーダーに適した角度標準もなかったことである。一方、ドイツ国立研究所PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt) では古くからエンコーダーの国家標準を設備

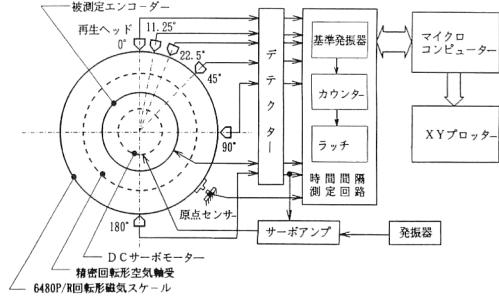


図4 マルチ再生ヘッド法を採用した校正装置。

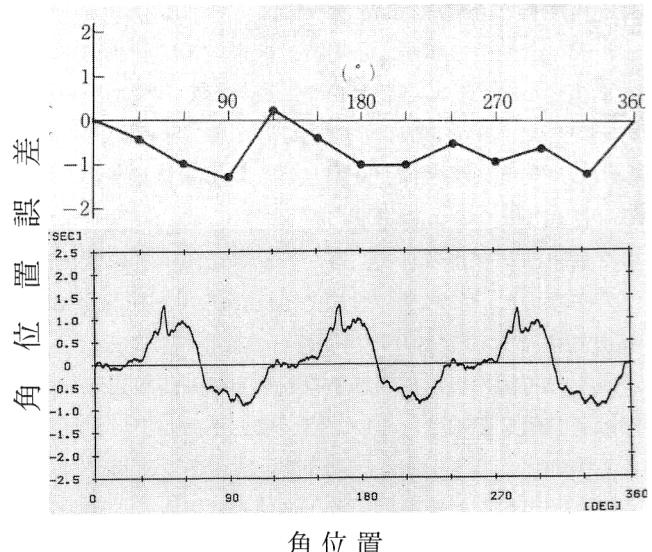


図5 30000目盛をもつエンコーダーの校正例。上図：ポリゴン鏡基準の12点の校正值、下図：エンコーダー校正装置を使った4050点の校正值。

して、精度±0.15秒を実現し、エンコーダーの数百目盛の精度評価を行っていた。しかし、内蔵する基準エンコーダーの校正には従来の自己校正法が使われており、エンコーダーのもつ162000目盛のうちの72点についての校正しか厳密には行われていない。

このような状況の中、エンコーダーに適した校正法が開発された。マルチ再生ヘッド法<sup>2)</sup>と等分割平均法<sup>3)</sup>である。いずれも標準を必要としない自己校正法で、多数の目盛の校正値を曲線に見立て、そのフーリエ成分を検出し合成して校正値を求める方法である。

##### 4.3.1 エンコーダーに適した校正法

マルチ再生ヘッド法は図4に示すように、エンコーダーの周りに大半のフーリエ成分が検出できるよう複数の検出ヘッドを配置し、1回転で基準ヘッドとの相対誤差を取り込み、コンピューターによる演算で大半の校正値のフーリエ成分を求めて合成する方法である。図5に、同一機種の30000目盛をもつエンコーダーの、ポリゴン鏡基準による

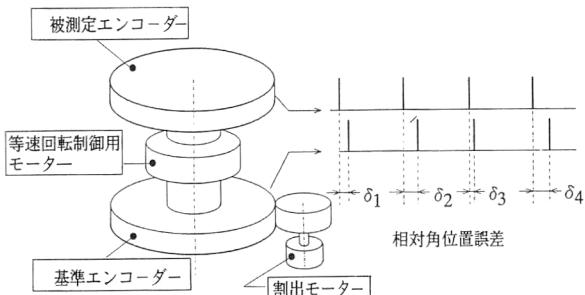


図6 等分割平均法を採用した校正装置の構成。

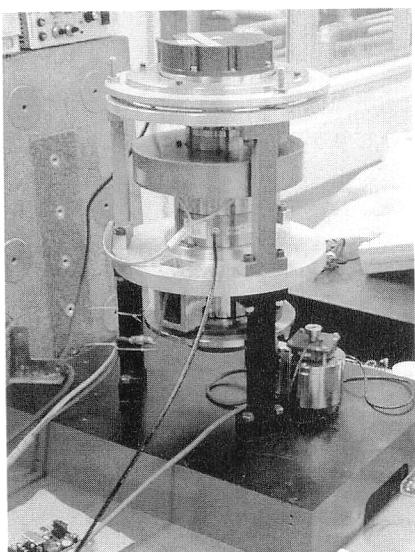


図7 等分割平均法を採用した校正装置。

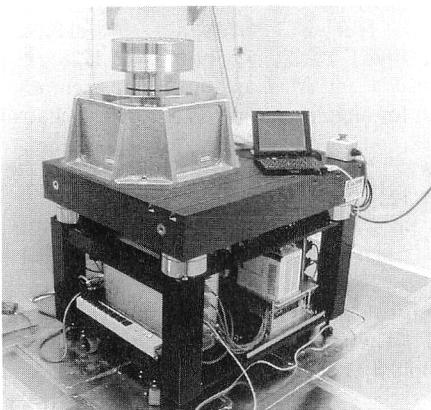


図8 ロータリーエンコーダーの校正装置  
(産業技術総合研究所設置)。

校正値<sup>4)</sup>とマルチ再生ヘッド法による校正値の比較を示す。情報量の差が明確である。図4の装置では、基準エンコーダーである回転型磁気スケールの6480目盛を精度±0.3秒で校正できることを確認している。

一方、等分割平均法は図6のように、2つのエンコーダ



図9 ドイツロータリーエンコーダー校正装置(国家標準:PTB開発)。

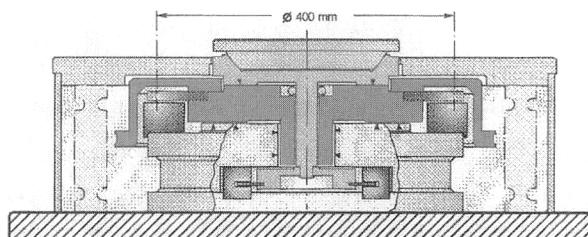


図10 ドイツロータリーエンコーダー校正装置の構成。

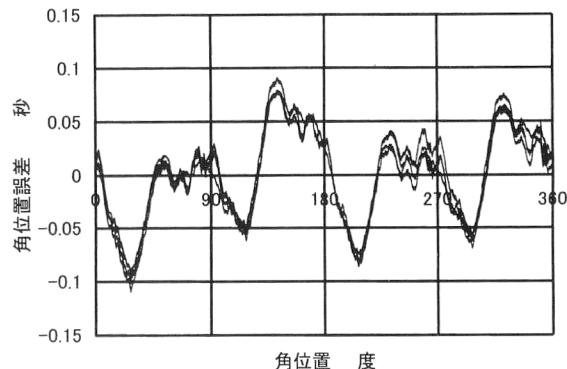


図11 国内持ち回り測定の結果。

ーと割出機構を用い、一方のエンコーダーを任意の位置に割り出すことによってエンコーダーの校正值のフーリエ成分を求める方法である。マルチ再生ヘッド法の複数のヘッドを1つのエンコーダーと割出動作で実現したとも考えられる。この方法を採用した校正装置を図7に示す。225000目盛以下を精度±0.05秒程度で校正できることを確認している。

#### 4.3.2 国家標準<sup>5)</sup>

等分割平均法を採用した校正装置が1999年、産業技術総合研究所に設置された。この装置は、精密等速回転機構と精密割出機構からなる。精密回転機構は、回転型空気軸受上に225000目盛をもつレーザーエンコーダーを2つ取り付け、内蔵のダイレクトドライブモーターにより等速回

転制御されている。一方のエンコーダーの検出ユニットはもう1つの空気軸受上に取り付けられており、ダイレクトドライブモーターと割出専用のエンコーダーにより、割出分解能0.0012秒で任意の位置に割出制御される。外観を図8に示す。設置以来、その評価が行われ、内蔵の基準エンコーダーを精度±0.02秒で校正できることを確認した。2002年4月に正式に日本の国家標準となり、225000目盛までを、不確かさ0.06秒で依頼試験を開始することとなった。ようやく日本にもエンコーダー用の角度標準が確立されるに至った。

#### 4.3.3 ドイツの国家標準

ドイツを除いて、海外ではエンコーダー用の角度標準はまだ設置されていないようである。ようやく日本のみがドイツに比肩しうるレベルまで到達したような状況である。最近、PTBは図9、10に示すように一段と高精度な校正装置を開発した。基準エンコーダーは直径400mmで $2^{17}$ (=131072パルス)の目盛をもち、角度信号は $2^{18}$ 、さらに4096倍の電気内挿により分解能0.0012秒を得ている。基準エンコーダーには45度間隔に8個の検出ヘッドが取り付けられており、校正值のフーリエ成分を検出するためにさらに8個の検出ヘッドが設置されている。また、同時校正法が適用できるように別のエンコーダーも同軸に取り付けられており、相対的に0.002秒の精度で割り出しが可能である。装置は温度 $20\pm0.01^{\circ}\text{C}$ のクリーンルーム内に設置されている。この2つの自己校正法で1年近く測定を繰り返した結果、拡張不確かさ( $k=2$ )0.005秒の結果を得たという。ただし、独自のフーリエ成分検出法<sup>6)</sup>であり、校正点数は128点である。

#### 4.3.4 国内持ち回り測定

1998年、精密工学会内に「ロータリエンコーダの角度標準とトレーサビリティに関する研究会」(エンコーダーメーカー、ユーザー15社、4大学、産業技術総合研究所の委員、計35名)が設置され、エンコーダーの角度標準とトレーサビリティ体系の確立へ向けた検討がなされてきた。この中で2000~2002年にかけて、ドイツハイデンハイン社の協力を得て、高精度エンコーダーの国内持ち回り測定を実施した。等分割平均法を採用した国内の3機関の校正結果4つを図11に示す。カップリングや取付誤差を含めて

も±0.03秒で一致しており、この3機関の校正装置の性能がドイツ側の校正装置と遜色ないレベルまでに達していることが確認された。

#### 4.3.5 トレーサビリティ一体系

国際競争が激しくなる中、日本におけるエンコーダーの精度保証体制の早期確立を望む声もあり、前述の研究会でトレーサビリティ体系のあり方について議論を重ねてきた。国家標準と同レベルの校正装置が開発される中、特定二次標準にも国家標準と同様な自己校正装置を望む声も多かった。しかし、実施にあたっての問題もあり、早急に確立することを優先して、特定二次標準をエンコーダーとすることで合意した。これを踏まえて、現在、経済産業省、製品評価技術基盤機構、産業技術総合研究所の協力のもとに、トレーサビリティ体系確立へ向けて協議が進められている。

本稿を執筆するにあたって、ポリゴン鏡に関して豊田幸司氏、オートコリメーターに関して藤本弘之氏、エンコーダーに関して渡部司氏(それぞれ産業技術総合研究所)から貴重な情報を提供いただいたことに謝意を表します。また、前述の研究会において、国家標準、トレーサビリティ体系の確立に尽力いただいた、委員各位と副委員長である産業技術総合研究所中山貫氏とに感謝を申し上げます。

#### 文 献

- 1) 豊山 晃：“角度の標準器とその校正法”，精密機械，44 (1978) 539-544.
- 2) 益田 正、梶谷 誠：“角度検出器の精密自動校正システムの開発”，精密工学会誌，52 (1986) 1732-1738.
- 3) T. Masuda and M. Kajitani: “High accuracy calibration system for angular encoders,” J. Rob. Mechatron., 5 (1993) 448-452.
- 4) 松永輝雄：“高精密測定用光学式エンコーダ”，精密機械，51 (1985) 722-729.
- 5) 渡部 司、益田 正、梶谷 誠、藤本弘之、中山 貫：“ロータリーエンコーダの高精度度校正装置の開発(第1報)一校正システムと基礎実験一”，67 (2001) 1091-1095.
- 6) R. Probst, R. Wittekopf, M. Krause, H. Dangschat and A. Ernst: “The new PTB angle comparator,” Meas. Sci. Technol., 9 (1998) 1059-1066.

(2002年10月3日受理)