

論文

# 電気計測機器の細密読み取りの歴史\*

## —アナログからデジタルへ—

松本 栄寿\*\*

### History of precise reading for electrical measuring instruments —From analog to digital—

Eiju MATSUMOTO

#### Abstract

Having searched for the history of measuring instruments including astrolabes, quadrants, surveying instruments, metrological instruments, electrical instruments and digital instruments, it was found there were several kinds of precision reading scales such as the Nonius scale, the diagonal scale, the vernier scale and the micrometer scale and today's digital scale.

The Nonius scale invented by Pedro Nunez in 16th Century was used as precision readings of circular instruments, however, the diagonal scale invented by Levi ben Gerson in 15th Century spread it's application from linear scale division to circular scale division. After the development of the diagonal scale, the scale has been employed for the precision reading of many kind of measuring instruments such as astronomical instruments, navigational instruments, geodetic instruments, and electrical instruments. It had been used in Europe, in the US and in Japan for long time over 500 year, from the 15th to the 20th century.

This paper analyzes the reason of long time usage of the diagonal scale and explains the two features of diagonal scales used in astronomical instruments and used in electrical instruments. Former application focused on uniform precise divisions for angle measurements which stood for star positions and later application focused on not only linear but non-linear divisions which stood for electrical value indications.

Furthermore, after the study of the analog/digital conversion techniques for electrical measuring instruments, it was proved that the technology of precise reading less than one resolution employs similarly two procedures such as the diagonal scale of analog instruments. The digital employs two time steps for precise conversion and the analog employs two scale divisions for precise reading. It is expected that, sometimes the digital world employs similar technology such as vernier of the analog, the competition pursuing high resolution will last forever in the analog and digital world.

**Key words :** astronomical instruments, surveying instruments, metrological instruments, electrical instruments, Nonius scale, diagonal scale, vernier scale, digital scale, analog/digital conversion.

#### 1. はじめに

アストロラーベ、四分儀、測量器、度量衡器、電気計器、デジタル機器など計量計測機器の歴史研究にあたって、その細密目盛に注目しこれまで何種類かの細密読み取り目盛の存在を明らかにした。それらには、ノニウス目盛、ダイア

ゴナル目盛、バーニア目盛、マイクロメータ目盛と最近のデジタル読みがある。16 世紀にペドロ・ヌネッツが発明した、ノニウスメモリは円形目盛の計器の細密読み取りに使用された。15 世紀にレビ・ベン・ゲルソンが発明したダイアゴナル目盛は、直線目盛から円形目盛計器

\* 受付 2010 年 5 月 18 日 \*\*会員 〒204-0003 東京都清瀬市中里 2-642-22  
E-mail : BZA02056@nifty.ne.jp

まで多岐にわたる計測器に採用された。それらには、天体観測器から電気計器まで、20 世紀まで 500 年の長期間にわたって欧州、米国、日本各地で使われた。

この論文では、ダイアゴナル目盛が長期間にわたって使用された理由について、天文観測機器と電気計器では違いがあることを述べる。前者の場合は天体位置の測定角度を平等な目盛で細かに読めることが必要であるが、後者の電気量測定の場合には、平等目盛以外も非平等目盛にも使用できる融通性のある手法として使われた。

さらに、電気測定に応用されるデジタルでは副尺的な考えがありうるのか。アナログ/デジタル変換器を追求して、最小分解度以下を読む技法として、デジタル技術でもアナログ指示計器に使われる初めに親目を読んで、つぎにダイアゴナルやバーニア目盛と同様細目を読む、副尺的手法もとられていることを明らかにする。アナログでは二種類の物理的に別個な目盛が使われるが、デジタルでは二段階の別な変換ステップが使われる。このように、より細目読みを得ようとするアナログ技術とデジタル技術は互いに競い、利用しあって開発の競争は永遠に続くと思われ。

## 2. 円弧状の目盛と補助尺の歴史

計測器の目盛の原点はどこにあるか。人間の歴史、数千年前をふりかえると日時計の時代には文明国家はすべて北半球にあった。そこに使われたノーモンの影は太陽に動きに伴って左から右へ回った。それが機械時計の時間の動き受け継がれ、時計まわりの用語とともに、1,2,3,...の数字は右回りになった。いまでは、日常目にする自動車のダッシュボードの速度計の指針も数字も右回りになっている。天体観測を目標に作られた象限儀(Quadrant)も例外ではない。その補助尺から説明しよう<sup>1), 2)</sup>(図1)。

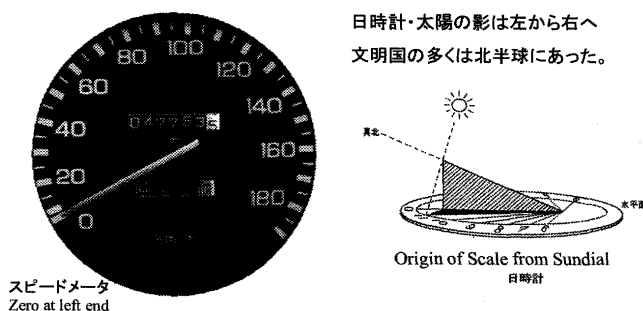


図1 計測器の目盛はなぜ右に？  
ゼロはなぜ左に？

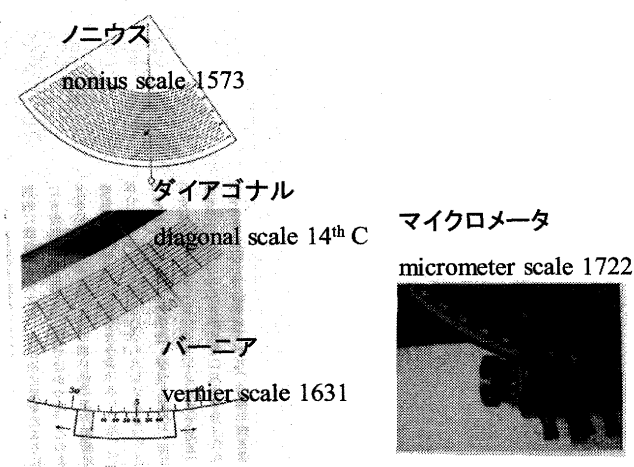


図2 細密読み取りの数々

### 2.1 ノニウス(Nonius) 法(1583年)

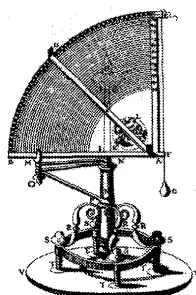
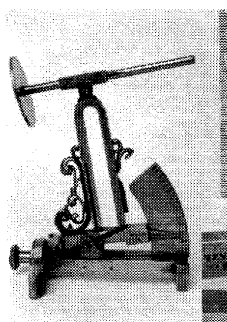
発明者は発明者は、ペドロ・ニュネツ(Pedro Nunez, 1492-1577 ポルトガル)と言われ、すこしづつ異なる等分目盛を同心円状につくって、指針と最も近い目盛をよむ方法である。チコ・ブラーエが1573年に使用した中型四分儀(Quadrant)には、ノニウス目盛が採用されたとされる。理論はよいが使いづらく実物はのこされていない。

### 2.2 ダイアゴナル目盛(14世紀)

ダイアゴナル目盛は、目盛間を5または10区分して読み取るための一種の副尺である。発明者は、レビ・ベン・ゲルソン(Levi ben Gerson, 1288-1344 ヘブライ)とされている。たとえば、主目盛に6本の平行線(図2の例では同心円

with diagonal (ダイアゴナル)

with nonius ノニア目盛



Oxford Museum of History of Science  
オックスフォード科学史博物館蔵

Tycho's Quadrant with Nonius (1573)  
チコブラーエ、象限儀

図3 照準儀、四分儀など

弧)を等間隔に引き、目盛線と最も外側の線との交点と、その隣の目盛線と最も内側の線との交点を直線でむすぶ。その斜線と平行線との交点が、最小目盛の5分の1にあたることになる。14世紀から19世紀まで航海用のヤコブスタッフ(Jacob Staff)、六分儀、日時計、羅針盤、大砲の照準器などにひろく使われた。広く知られているのは、1600年当時デンマークのチコ・ブラーエの使った壁面四分儀である(図2)(図3)。

このダイアゴナル目盛は19世紀の末に、アメリカのエドワード・ウェストンによって、精密電気計器に採用され、以後1980年代にデジタル計測器が広く普及し、標準用計器に置き換わるまで使われた。

## 2.3 バーニア目盛(1631年)

バーニア目盛は、ピエール・ベルニエ(Pierre Vernier 1580-1637 仏)によって1631年に発明された。17世紀から航海用の六分儀などに採用され、現在でも長さを測るノギスなどに広く使用されている。バーニアでは、たとえば主尺の9目盛を10等分した副尺を主尺に沿ってすべらせて測定するから、主尺の目盛間隔が一定であることが前提となる。また電気計器への応用例は見あたらない。

## 2.4 マイクロメータ目盛(1640年頃)

17世紀に正確なネジの切削が可能になり、1640年頃にネジ送り方式の微細読み取り法が出

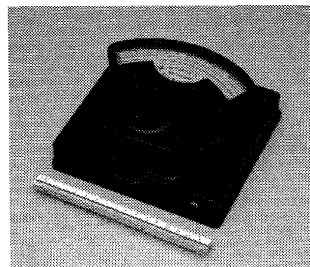
現した。回転運動を直線運動に変換して、回転部に刻んだ目盛を読み取る。まず、天文観測用機器に使用され測長器にも応用されている。直線方向の分解度は1/100mm程度になり、角度10秒程度の分解度が得られるようになった。

## 3. 電気計器へのダイアゴナル目盛の導入<sup>1), 2)</sup>

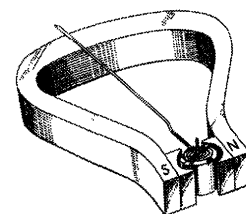
19世紀後半からの電灯照明・配電事業が始まると、研究用ではなく現場でも使える精密電気計器が必要になった。この精密電気計器の技術を集大成したのは、エドワード・ウェストン(Edward Weston, 1850-1936 米)である。

### 3.1 携帯用計器

ウェストンは、1886年に精度0.25% 0.5%の携帯用計器を開発した。指針と目盛で電気量を測定する電気指示計器は、安定な永久磁石・安定なバネ・摩擦の少ない軸受等が必要となる。さらに計器内部の可動コイルが回転する部分は、一様な磁界が求められる(図4)。



ポータブル計器(携帯用)  
目盛130mm 100分割目盛



長い指針 安定な磁石 平等磁界  
軽い可動コイル

図4 ウェストンのポータブル計器

この計器は教育用や研究実験用としてポータブル計器とよばれ、教育機関や研究所などに広く使われた。目盛長は130mmで、多くは100等分の目盛が採用された。ウェストン精密計器はポータブル計器(日本で携帯用)と呼ばれ、アメリカ製品としては、当時の技術先進国ヨーロッパからも高い評価をうけた。

### 3.2 精密標準用計器

また、ウェストンは精度0.1%の精密標準用計

器、直流電気計器を開発してダイアゴナル目盛を採用した。標準用電気計器は目盛長310mmもある大型の計器で、指針のある電気計器としては最も大きく、外形390mm×390mm、重さも13kg以上である。精度0.1%はまたは0.2%を目指したから、500区分または1,000区分を読む必要がある。0.1%とすれば0.3mmを区別して目盛で読まなければならない。二つのものを識別する人間の読み取り限界は0.1-0.2mmであり、比較的容易に読み取れる目盛間隔は1mmまたは0.5mm程度であるとされている。したがって空間的にせまく、主目盛だけで細部をよみとることはできない。副尺による細分読みが必要になった。ここにウェストンはダイアゴナル目盛を採用した(図5)。

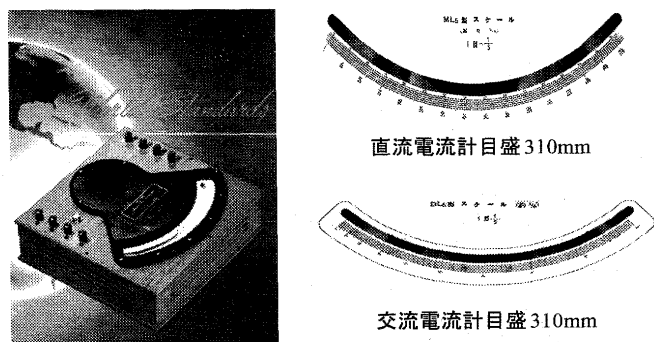


図5 可動コイルの精密標準用計器

1886年世界の標準計器

1962年同じウェストン社からデジタル計器が発明される。

筆者は、ウェストン・コレクション（米国ニュージャージー工科大学）で、ウェストンが1892年に申請した電気計器のダイヤゴナル目盛の特許申請書をみつけ、彼の目盛に対す津執念を感じた。また、残されたノートから、ウェストンが同心円弧を等間隔として斜線で分割したときに生ずる誤差を計算している。円弧半径210mm、円弧間隔1.5mmとして、円弧による誤差は0.05%以下で問題なしとした。計器の精度は0.1%より小さく実用上問題にならないと確認している<sup>3)</sup>。この標準用計器は、やがてはデジタル計器に座をうばわれてゆく。

さらにウェストンは標準用の交流用計器にもダイアゴナル目盛を採用した。可動鉄片の交流計器はゼロ付近は二乗目盛にちかく平等目盛ではない。ウェストンこの目盛ゼロ近くの非平等部分も、親目の間を幾つかに区分し、強引ではあるが細分化した。この部分の精度はあまり問題化しなかったようである。目盛はすべて手書きでおこなった。すなわち、交流の非線形も磁界の分布が不平等のために起こる非線形もすべて、実測目盛を手書きして解決してしまった。手書きの細分目盛はダイアゴナル以外では出来ない。つまり、ダイアゴナル目盛が採用された由縁である。標準用計器の目盛では、すでに特性の分かっている親となる計器とこれから目盛る計器を直列にして同じ電流をながし、双方の親目を（10区分）鉛筆でプロットして目盛づけを一台一台おこなったようである。

なお、携帯用計器ではダイアゴナル目盛は一部の例外をのぞき採用されなかった。これは目盛長130mmではそこまでの細分化はむしろ読みにくかったためと思われる（図6）。

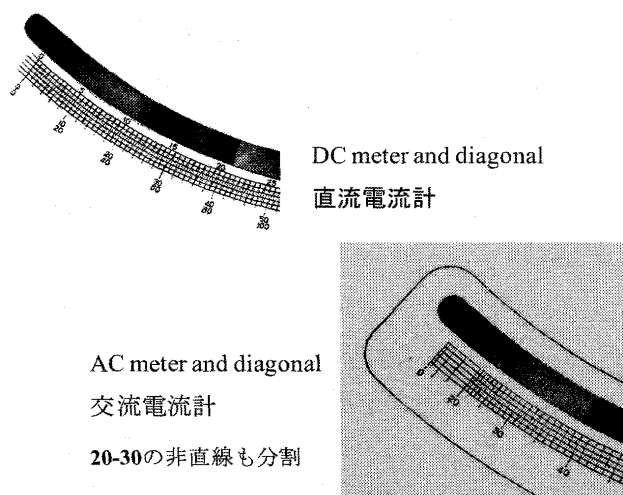


図6 標準用計器

ダイヤゴナル・ゼロ付近目盛拡大  
目盛長310mm

#### 4. ダイヤゴナル目盛の誤差と電気計器

##### 4.1 ダイヤゴナル目盛の理論誤差

ダイヤゴナル目盛もある条件下では細分読

みに誤差が生ずる。それは等間隔の同心円が使われた場合である。つまり一番外側の円弧と一番内側の円弧とはわずかながら長さが異なるので、これで囲まれた部分を方形と見なして直線の対角線をひくと、同心円弧との交点と隣の同様の点と中心を結ぶ角度は、場所によって異なり等しくない。

電気指示計器では「指針の振れ角度」から目盛を読むことになるので、誤差が発生することがある。この誤差を本質的に避けるには、同心円弧の間隔を不平等にして外側ほど間隔を広くする方法がある。あるいは、数本のダイアゴナル円弧を計測器の最も外側に近くおく方法もあるが、限度がある。

## 4.2 ダイアゴナル目盛と目盛の手書き

いずれにせよ、標準用電気指示計器で生ずるダイアゴナル目盛に誤差は、図7に示すような目盛の手書き作業の陰にかくれてしまっていた。すなわち、可動部の回転にしたがって指針が動くが、磁気回路内に磁界の不平等があつて指針に不平等の動きがあつても手書作業のために表面にでない。

言い換えれば、電気計器は目盛の手書きによって、電流を流して確認した実目盛をつくるため、目盛を直読すれば器差をカバーすることが出来た。また、直線からはずれた目盛でもダイアゴナル目盛を造ることができるので、むしろこの手書きが標準用精密電気計器の付加価値を高めることになっていた判断される。のち携帯用計器では印刷目盛が使われた。

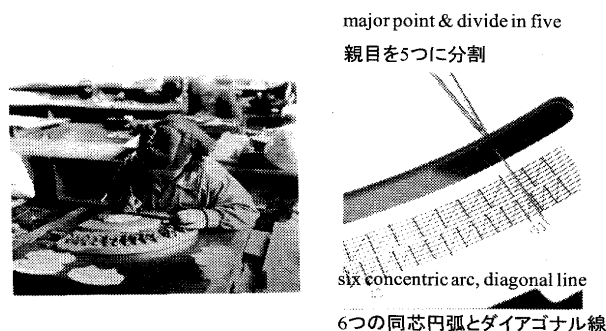


図7 ダイアゴナル目盛と手書き作業  
(墨と烏口使用)

## 5. A/D変換と細分目盛

### 5.1 二重積分型A/D変換

1950年代になると、デジタル電圧計が出現する。この中にはアナログデジタル変換器が内蔵されていて測定結果はデジタルの数字で表示される。特徴は指針型にくらべて読み取り誤差がない。精度は入力信号をデジタル化するアナログ・デジタル変換器によって定まるが、二重積分型A/D変換器が開発されると、周囲のノイズに影響されない測定が可能になった。

1962年にローズウエル・ギルバート(Rosewell Gilvert, 1909-1994)が発明したデュアル・スロープと呼ばれる方式である<sup>4), 5)</sup>(図8)。

これは入力信号を一定期間(電源周期の整数倍だけ)積分回路に加え、次に入力と逆極性の基準電圧を加えて積分器の出力がゼロになる時をつかまえる。その間の時間を内蔵クロック周波数でカウントする方法である。周囲にある電源周波数のノイズなどの影響をうけないし、入力の積分にも基準電圧の逆積分にも同じ積分器を使うから積分器の特性の影響を受けない、回路も簡単で画期的な手法であった。この発明は電気計器の名門ウェストン社から出た。回路図、動作図、外観図を図8に示す。しかし、発明の当時は真空管の時代であったから広く普及するには10年近く経過して、変換回路がテキサスインスツルメンツ社でIC化された時期である。ウェストン社時代には十分に活用するに至らなかった。

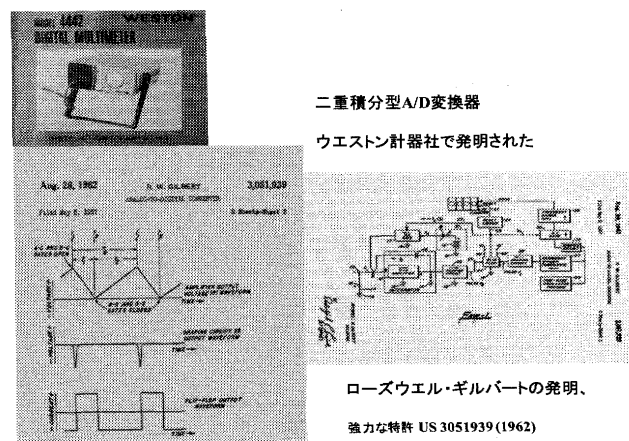
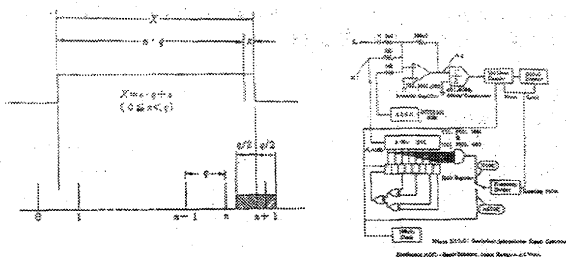


図8 デジタル計器の出現  
(二重積分型 A/D 変換)

A/D変換器で、高い分可能をもたせ、かつ変換速度を上げようとするすると矛盾する。しかし、より早く変換し音響、画像の分野までカバーしようとする努力がつづけられている。幾つかを説明しよう。図に示すブロック図から回路の動作は理解していただろう。

## 5.2 二重積分統計型A/D変換

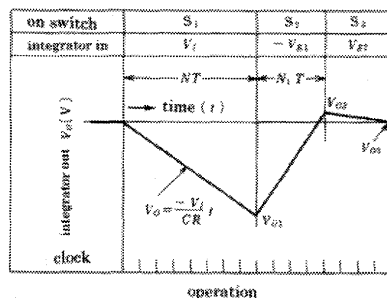
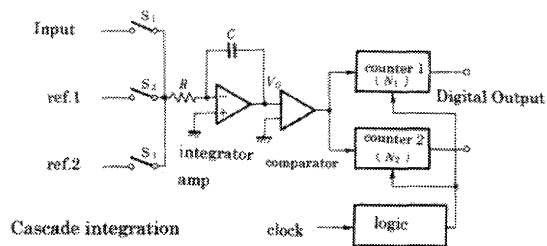
デジタルの分解度1ビット、一目盛の中をはかる目的である。基準電圧にランダムノイズを加えて、1ビット分余分に積分したり、少なく積分したりを繰り返して、比較器の検出する時間比から値を求める方法である（図9）。



increase resolution inside one bit --add random noise to the reference of A/D  
1ビット内の分解度を上げる。基準にランダムノイズ加算。

図9 統計処理型A/D変換器

縦続積分型 A/D 変換器 (Two Step)  
上位ビット積分と下位ビット積分



## 5.3 縦続積分型A/D変換

入力電圧の積分は一度であるが、基準電圧による逆積分を二度に分けて行う。前半は変換時間を短くするために粗く逆積分し上の桁を求める、後半は精度を出すために緩やかに行って下位の桁を算出する（図10 左）。

高分解能、高速度が得られるが、欠点は回路が複雑になることである。

## 5.4 二重積分、10倍増幅法

入力を積分、基準電圧で逆積分して、上位の桁 (MSB)、残り電圧を10倍増幅して逆積分、下位の桁 (LSB) を変換、手数は厄介だが高精度が得られる（図10 右）。

## 5.5 A/D変換と副尺

アナログ・デジタル変換の高速化と同時に、高分解能を追求することは矛盾するが、素子の特性進歩と、新しい発想からでつぎつぎに新規の方式が提案されている<sup>6)</sup>。これらをよく見ると、アナログ指針で親目をまず読んで、ついで親目間の細かい目盛を副尺で読む方法と似た手法がとられていることが分かる。つまり、ア

縦続積分型 A/D 変換器 (Two Step)  
積分、10 倍増幅、再積分

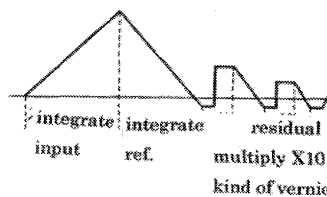
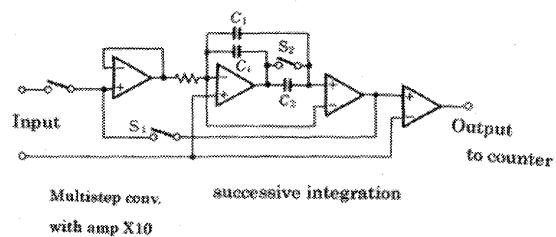
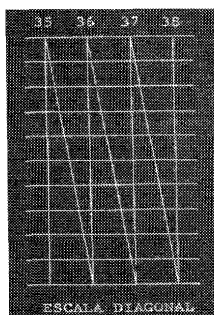


図10 A/D 変換、細分読みは二段ステップで

Read major horizontal, then minor vertical

主目盛は水平が、子目盛は水平が



- ・ 二次元へ拡大から  
タイミング拡張へ
- ・ デジタルの分解能  
限界はまだ
- ・ 真の限界は歴史がきめる  
アナログか？デジタル  
か？ではない。

inside of A/D major  
first, the minor next  
A/DはMSBから、  
最後にLBSへ



図11 細密読みは永遠か

ナログの手法をまねてデジタルでも副尺読みを行っているとも見てよい。アナログの副尺は物理的に異なった位置にある目盛を使うが、デジタルでは異なった時間、タイミングを使っていると言えよう。

デジタルならば、そんな方法を使わずとも変換速度など関係がないだろう。パルスを高速カウンタで数えれば全部数えても同じだろうと考えられるかもしれないが、そうではない。例えば86を数えるときに、[0]から一つずつ数える、[86]数える必要がある。しかし、親目に相当する[8]を数え、別に[6]を数えれば、全体で[14]数えればよくずうっと早い。外からは見えないがA/D変換のプロセスは、アナログの副尺読みと同様な二段ステップの手法である(図11)。

実物の16ビット表示デジタル電圧計では、最初に上位9ビットを変換し、つぎに下位の7ビット変換して高速変換と表示をしている例がある。

## 6. まとめ

計測器の目盛は多様である。その当時の技術で必然性を追求して特有の目盛が出来上がったものであろう。ウエストンがダイアゴナル目盛を採用した精密電気計器には、一般の計測器がバーニア目盛に移行した後も、約100年間に

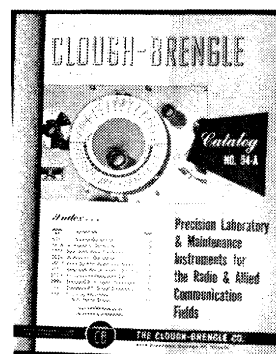
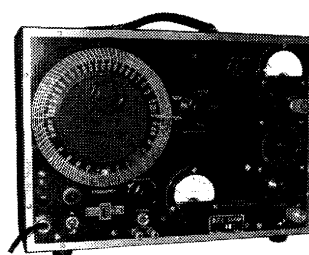


図12 エレクトロニクスとダイアゴナル

わたってダイアゴナル目盛を使いつづけた。ダイアゴナル目盛は細分目盛として構造が単純であり、手作業で造りやすかった。1970年代の真空管発振器のダイヤルにも使用された例がある。この発振器では非線形の日盛を分割するために、フレキシブルのあるダイアゴナル目盛を採用したと考えられる(図12)。

計測器の指針で読むアナログから、1950年代にデジタル計測器が出現して久しい。当初は3桁、4桁の高価なデジタル電圧計しかなかったが、変換スイッチの機構部分がトランジスタ化、IC化されるとともに、どこでもデジタルの時代がやってきた。内蔵されたA/D変換器も高速・高分解能になってオーディオ・ビデオ信号の領域にも拡大されている。

この論文では、アナログ時代には別な空間に用意されたダイアゴナル目盛の副尺を読んだが、デジタル変換では次のタイミングに別な変換プロセスを実施することが多いことを明らかにした。デジタルがアナログに学んだ例であろう。いずれにせよ、主変換ともう一つの細目を読む別な変換(従変換)プロセスを行っている。一つの領域で使用された技術は、他の領域でも形をかえて生き続ける例として説明ができる。A/D変換器、方式の開発は永遠のテーマである。例えばIEEE, Transaction on Instrumentation and Measurement Societyの会誌などは毎号、新しい研究論文を掲載しつづけている。

ティコ・ブラーエの壁面四分儀(1580年頃)、伊能忠敬の象限儀(1800年)、黒信由の象限儀

(1819 年) などのダイアゴナル目盛の説明を  
はぶいたが、これまでの論文を参照されたい。

# 文献と注

- 1) 松本栄寿：精密電気計器における細密読み  
取りの歴史、電気学会論文紙 A,117-A-7,  
(1997)、pp.740-748,
- 2) 松本栄寿：細密読み取りダイアゴナル目盛  
の歴史、計量史研究、28-1 (2006), pp.29-36,  
同英文は; History of the Diagonal Scale for  
Measuring Instruments, Bulletin of the  
Society of Historical Metrology, Japan, 28-1,

(2006), pp.81-89

- 3) Eiju Matsumoto: Edward Weston Made His  
Mark on the History of Instrumentation, IEEE  
Instrumentation & Measurement Magazine,  
(June 2003), pp.46-50
- 4) 米国特許 301939, Analog-Digital Converter
- 5) 松本栄寿：電気の世紀へ 66 ウェストンと  
デジタル、計測技術,37-07(2009)pp.50-51
- 6) 相楽岩男：『A/D・D/A 変換回路』第 2 版、  
日刊工業新聞社(2004)、例えば第 4 章・第 5  
章、日刊工業新聞社(2004)