

# 調和解析器調査会報告書

## 目次

- 1 . はじめに
- 2 . 調査会設置の経過
- 3 . 調和解析器の基礎：積分器の機構と原理
  - 3 . 1 面積計：プラニメータの原理
  - 3 . 2 プラニメータ
  - 3 . 3 調和解析器
- 4 . 基礎的検定と操作方法
  - 4 . 1 テストケース 1 :  $\sin(2x) \cdots \cdots$
  - 4 . 2 テストケース 2 :  $B\sin(x) \cdots \cdots$
- 5 . 例題：不規則波形の周波数解析（フーリエ係数を求める）
- 6 . まとめ

謝辞

付録 A1：ケルビン卿について

付録 A2：(別冊) 調和解析器写真集

付録 A3：(別冊) 調和解析器の機構と原理

調和解析器 積分計算  $\int_a^b f(x) \left( \frac{\sin nx}{\cos nx} \right) dx : n = 1, 2, \dots, k$  の原理

日本船舶海洋工学会関西支部 造船資料保存委員会

## 1. はじめに

(株)クボタ様より、以前作動チェックをした積分器に似たおかしな機器が持ち込まれた。「作動原理を解明したい。」との話が造船資料保存委員会より舞い込んだ。

昔々、「てこ」の原理を用いているのに力の作用点が変わっても支える力が変わらない計測器があって(リング型伴流速度計測器)その原理に驚嘆して以来、アナログ型計測器の作動原理解明は楽しみの一つであった。

今回もフーリエ解析を機構で行うと言う、楽しい企画である。

本報告により、デジタル化とコンピュータによる近似計算法の進んだ今、アナログで解析解を求める機構の面白さを読み取っていただければ幸いです。

## 2. 調査会設置の経過

本調査会は以下の経過の中で組織され活動してきた。

- ・2013年5月24日、日本船舶海洋工学会関西支部に「造船資料保存委員会」宛に以下のメールが機器の写真付きで届いた。メールの一部を以下に示す。

\*\*\*\*\*

会社で倉庫整理の際、出てきた品ですが、これはどのような品か調べて頂けないでしょうか？

製図用具の一種(拡大縮小図を描くパンタグラフの類)と思われそうですが、分る人が誰もおりません。少なくとも30年程度以上は経った品と推定されます。

- ・約60 x90cmの木箱入りでアーム類(アルミダイカスト/スチール?)とギア多数(真鍮)。
- ・長さ約80cmのスライド用レール溝付の長尺。
- ・長さ約120cmのスライド用レール溝付の長尺。

廃棄対象品とされたのですが、年代物で精密な工業製品ですので、貴重な品であれば産業遺産として博物館等に引取って貰う方が良いと思われれます。

貴委員会で蒐集されている様でしたら、寄贈、寄託先として検討します。何か分りましたら、ご連絡いただければ幸いです。

追記：メインのアームにある刻印表示と、以下記載事項の推定

- ・A.OTTO : 会社名
- ・KEMPTEN BAYERN : ドイツの都市, 会社所在地
- ・2449 : 製品品番
- ・GERMANY : 生産国 ドイツ

以上、よろしく申し上げます。

(株)クボタ (堺)エンジン技術部

/

\*\*\*\*\*

上記の(株)クボタ様からの申し入れ品は、取扱書が添付されていなかったが、調査の結果「調和解析器」である事が判明した。同様な依頼が、神戸大学海事博物館にもあり、この二筋の話を保存委員会が纏めて対応することにし受け入れの意向を伝えた。同時に、同社からの話に対して寄付の受け入れの意向がいくつかの機関から同社に伝えられた模様である。結論として保存委員会に寄付をして頂けることになった。

2013年7月26日、堺にある(株)クボタにて寄贈品を受領した。

その後、この機器の調査をすることが保存委員会で決まり、調査委員会を組織することになった。名称を「調和解析器調査会」とし、以下の方々に委員をお願いして組織された。

委員長 鈴木敏夫 (大阪大学名誉教授)

委員 池淵哲朗 (兵庫県立大学産学連携機構コーディネーター)

坪郷 尚 (大阪府立大学准教授)

勝井辰博 (神戸大学准教授)

内藤 林 (保存委員会委員長、大阪大学名誉教授)

委員会開催歴は以下である。場所はいずれも神戸大学深江学舎で行った。

・第1回：2013年9月20日

・第2回：2013年10月28日

・第3回：2014年2月10日

その後、各担当分野の原稿書き、集約、全体の記号等の統一をメール上のやり取りを行いこの報告書ができた。

### 3. 調和解析器の基礎：積分器の機構

調和解析器は、ある関数に正弦、余弦関数を乗じた関数の面積を求めてフーリエ係数を求める装置である。そのためには、次の二つの機構

1) 積分計算を機械的に行う装置 いわゆる積分器

2) ある関数に三角関数を掛ける機構

が必要である。この積分器の機構と原理の理解が、調和解析器の理解に不可欠である。

最初に古くから知られている積分器の原理を簡単に記し、関数に三角関数を掛けた結果を積分する調和解析器の原理については別冊付録A3にて解説する。

#### 3.1 面積計：プランメータの原理

任意の曲線図形面積を機械的に計測する器具を面積計、プランメータ(Planimeter)と称する。ここでは、より単純な機構を持ち、計算の原理が簡明なプランメータについて説明し、調和解析器の理解の一助とする。

プランメータの計算原理は、面積分が線積分に変換される2次元のグリーンの定理である。すなわち2次元のグリーンの定理では、図3.1に示すように、 $x$   $y$  平面において、

単純閉曲線  $C$  と、 $C$  に囲まれた領域  $D$  があり、 $C$  と  $D$  を含む領域で定義された  $C^1$  級（1 階の導関数が連続）の関数  $f(x,y)$ ,  $g(x,y)$  があるとき、次の 2 式が成立する。

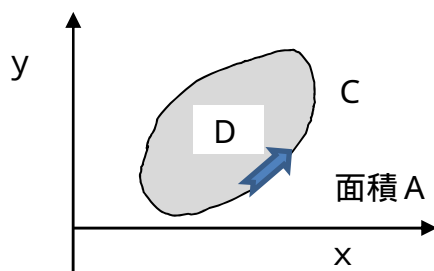


図 3 . 1 閉曲線  $C$  と閉領域  $D$  の定義：閉領域の  $D$  面積を  $A$

$$\iint_D \frac{\partial(f(x,y))}{\partial y} dx dy = - \int_C f(x,y) dx \quad (3.1)$$

$$\iint_D \frac{\partial(g(x,y))}{\partial x} dx dy = \int_C g(x,y) dy \quad (3.2)$$

線積分の向きは反時計回りが正である。正時計回りの場合は符号が正負逆になる。

(3.1) 式と (3.2) 式を加えると次式が求まる。

$$\iint_D \left( -\frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial g}{\partial x} \right) dx dy = \int_C f(x,y) dx + g(x,y) dy \quad (3.3)$$

(3.3) 式において、 $f(x,y) = -y$ ,  $g(x,y) = x$  と置くと、次式を得る。

$$\iint_D dx dy = \frac{1}{2} \int_C (-y dx + x dy) \quad (3.4)$$

左辺の式は、閉曲線  $C$  により囲まれた領域の面積  $A$  に他ならない。(3.4) 式を用いれば、

$$\text{面積} : A = \iint_D dx dy = \frac{1}{2} \int_C (x dy - y dx) \quad (3.5)$$

と表すことができ、面積が線積分によって与えられることが分かる。

ここで、(3.3) 式で、 $f(x,y) = 0$ ,  $g(x,y) = x$  と置くと、次式を得る。

$$\text{面積} : A = \iint_D dx dy = \int_C x dy \quad (3.5a)$$

更に、 $f(x,y) = -y$ ,  $g(x,y) = 0$  と置くと、次式を得る。

$$\text{面積} : A = \iint_D dx dy = - \int_C y dx \quad (3.5b)$$

この式は、ある曲線の経路の一部を x 軸にすれば、その曲線と x 軸が囲む良く知られた面積を求める式である。

この式が付録 A3 の解説で用いられる。

(3.5) 式を極座標(r, θ)を用いた表現を求めておく。座標変換の関係は

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta \quad (3.6)$$

と表すことができ、また、この(3.6)式より、それらの微分は次式となる。

$$dx = \frac{\partial x}{\partial r} dr + \frac{\partial x}{\partial \theta} d\theta = \cos \theta dr - r \sin \theta d\theta \quad (3.7a)$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial r} dr + \frac{\partial y}{\partial \theta} d\theta = \sin \theta dr + r \cos \theta d\theta \quad (3.7b)$$

(3.6) 式と(3.7) 式を、(3.5)式に代入して整理すると次式を得る。

$$\text{面積} : A = \frac{1}{2} \oint_C r^2 d\theta \quad (3.8)$$

### 3.2 プラニメータ

この(3.5) 式を機械的に実行するのがプラニメータである。

以下の説明は、造船技術者の間では良く知られた教科書である大串雅信教授の「理論船舶工学(上巻)」の2.11 面積計(プラニメーター)(p46~51)を参考にした。

図3.2は、代表的な極型面積計であり、スイス人アムスラーにより19世紀中ごろに発明された。

- 1) 極 P の下に突出したピンを図形 ABCD 外の適当な位置に重錘 W をのせて押し込む。
- 2) 極腕 P . A . にピン接手 Q によって連結するとトレース腕 T . A . の先端のトレース点を図形周囲上の任意の一点 A に置く
- 3) 転輪の目盛を読み取り記録する。
- 4) 次に D を囲む閉曲線に沿って、時計の針の回る方向に一巡してまた元の点 A に戻った時に再び転輪の目盛を読み取る。
- 5) この間、転輪 R は紙面に接触しつつ移動する間に何がしの回転を行っている。
- 6) 転輪 R には一周に 100 目盛がしてあり、副尺により 1/1000 回転迄読み取ることが出来る。
- 7) 転輪の回転数はその軸のウォーム歯車によって廻る水平盤 H の目盛に示される。
- 8) 求める面積は、極 P を図形外に置く一般的な使用方法の場合、次式で与えられる。

$$\text{面積} : A = 2\pi r b N \quad (3.9)$$

ここで、 r : 転輪 (R) の半径 (面積計によって与えられている。)

b : トレース腕 TA の長さ (計測者の設定値)

N : 転輪の回転数 (計測値)

転輪の半径  $r$  とトレース腕の長さ  $\overline{TA} = b$  は定数として与えることが出来るので、計測された転輪の回転数  $N$  から面積が求まる。

この式から解るのは、極腕の長さ  $\overline{PA}$  が含まれていないことである。このことから極腕の長さ  $\overline{PA}$  は任意に設定しても良いことになる。

次に述べる積分器は、極腕の長さ  $\overline{PA}$  を無限にとったもので、直線レール（図 3.3 に示されたの部品）の上で  $Q$  を移動させるものである。

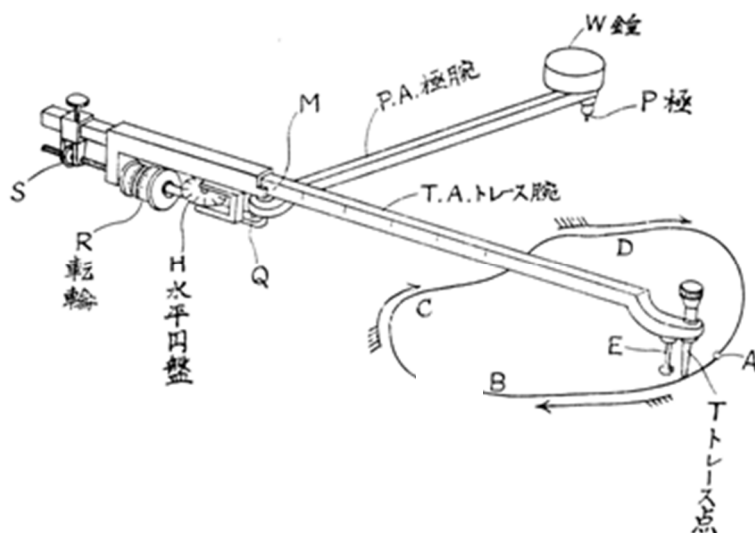


図 3.2 極型面積計（アムスラー型）

更に具体的な操作方法、数値読み取り法などは、付録 A2 調和解析器写真集の 1 を参照してください。

### 3.3 調和解析器

調和解析器がどのような機構から組み立てられているかを図 3.3 に示す。ここではその操作法について記述し、原理の詳細は（別冊）付録 A 3 調和解析器の機構と原理に示す。又、種々の部品については（別冊）付録 A 2 調和解析器写真集を参照にしてください。

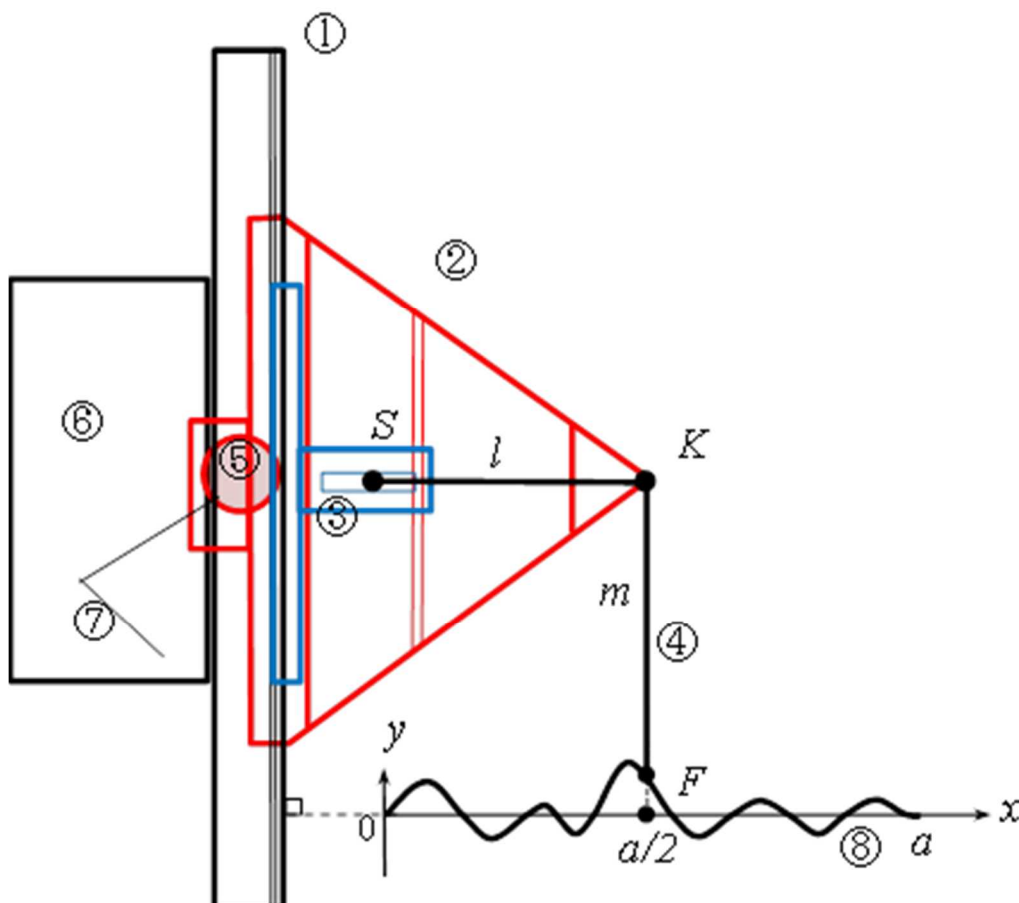


図 3.3 調和解析器概略図：計測波形の長さ  $a$ 、 $x=a/2$  の点で  $\overline{KF} \perp OX$  軸となった時の図。計測波形長さ  $a = \overline{KF} (= m)$  の様に  $m$  を調整した。大きな図の時は、それに対応して  $m$  を大きくして使用。

#### 1) 図面上に付番された部品

黒色で描かれている長方形の物は、空間に固定されている基準レールである。

赤色で描かれている物は台車で、レール上を上下移動が可能な移動系 A。

K 点の上下動に対応して同量上下動する。K の x 座標は常に  $x=a/2$  となるようにセットする。K 点は、この線上を上下動する。計測波形をトレースするポイント F 点

が原点 O にある時の K 座標は、 $\left(a/2, \sqrt{m^2 - (a/2)^2}\right)$  である。  $KFX = \theta_0$  とすると、

$m = a$  の場合は、 $\theta_0 = 60$  度となる。

青色で描かれている物は小台車で、移動系 A に搭載されている。梘子  $\overline{FKS}$  の回転とスコッチヨークの動きにより、移動系 A 上で上下移動可能な 移動系 Aa である。「Aa」の脚注は 移動系 A の上を 移動系 Aa が動くという意味である。

梘子  $\overline{FKS}$  :  $\overline{FKS} = l/2$  (角度固定),  $\overline{FK} = m$  (可変),  $\overline{KS} = l$ . S 点は 移動系 Aa にある溝内を左右移動が可能。K 点は移動系 A の先端にあり上下移動、回転が可能である。その回転で S 点の動きを介して 移動系 Aa が動く。ポインタ F 点変位の x 方向変位成分のみが台車 移動系 Aa を上下させ、歯車を回転させる。

歯車：種々の直径を持った歯車が装着される。台車 移動系 Aa の上下方向の動きがこの歯車の回転に伝達される。歯車の例を図 3.4 に示す。詳細は付録 A2 の写真集を参照。

プランメータが作動する台で空間に固定されている。

プランメータの先端 (図 3.2 のトレース点) が歯車上に刻印された穴  $P_s$ 、或いは  $P_c$  に固定されて動き、正弦関数 (sin)、余弦関数 (cos) が乗じられた面積値を求める。

プランメータの原理については 3.1 を参照。

解析する計測波形  $f(x)$  を示す座標系の  $ox$  軸はレールと直交させる。

## 2) 操作

ポインタ F 点を解析者が計測波形上を追従させる。それによって歯車が回転し、歯車上に連結されたプランメータのトレース点 ( $P_c$  or  $P_s$ ) が動き、 $\Delta x$  毎のプランメータの数値を読み取る。求められた数値に各種の係数を乗じて面積が求められる。

ある一般的な関数  $F(x)$  のある区間における面積を求める原理は、3.1 に記述されている。調和解析器は、その関数に正弦関数、或いは余弦関数が乗じられた  $F(x)\sin(nx)$ 、 $F(x)\cos(nx)$  の面積を求める事である。その原理について、付録 A3 で詳説される。

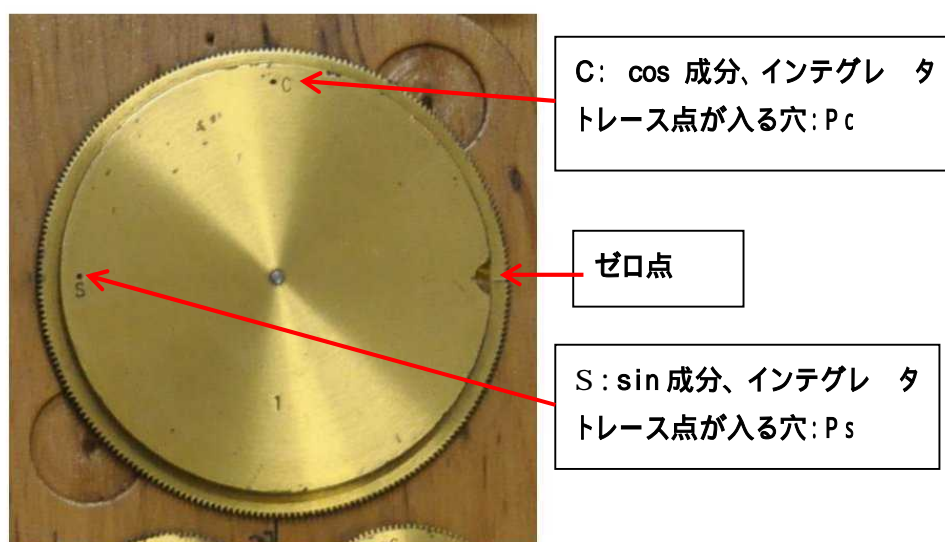


図 3.4 : 歯車 1 (第一成分用歯車)、sin 成分, cos 成分用の穴



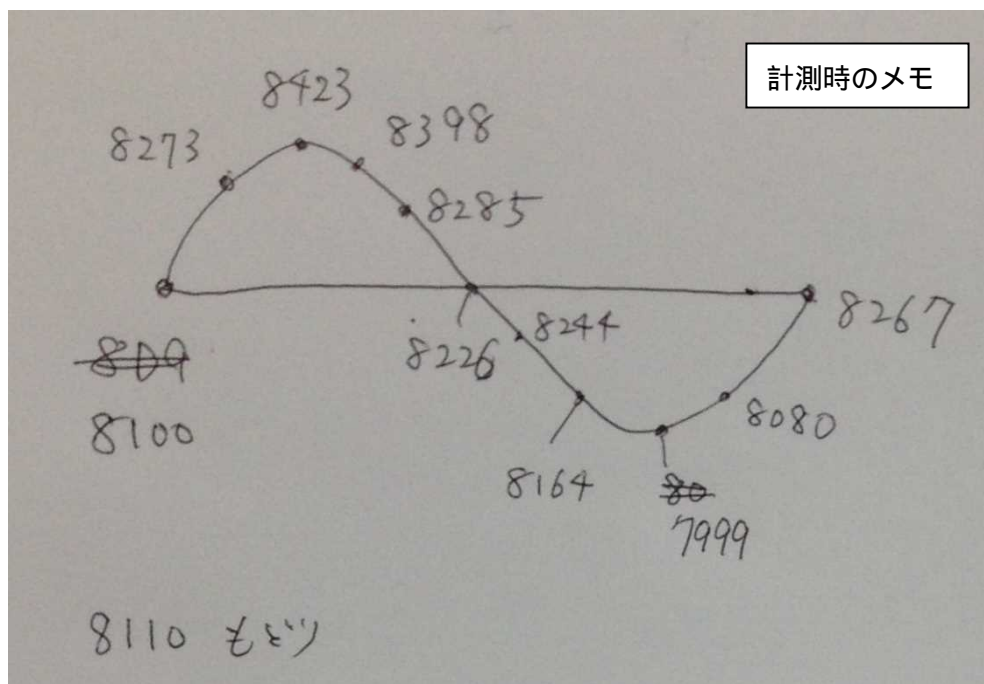
#### 4. 基礎的検定と操作方法

##### 4.1 テストケース1: $\sin(x)$ の積分

与えられた波形  $\sin(x)$  を、1次用歯車を使えば振幅1が解析結果として出るはずである。2次用歯車を使えば  $\sin(x)$  の2次成分を検出するのでその振幅は0になるはずである。

この後者の事を確認するために、歯車は2次用( $r_2=1.6\text{cm}$ )、針の孔は「s」にセットし、下図の一次の波形を解析する。

プラニメータの針の孔は正弦波形だから「s」にセットする。下図は記録用メモであり、計測用のグラフではない。ゼロアップクロス(始点)でのプラニメータの計測値が「8100」で次のゼロアップクロスでの計測値が「8267」、そして  $y=0$  に沿って始点まで戻ったあとの計測値が「8110」、すなわち面積は、 $(8110 - 8100) \times 0.1\text{cm}^2 \cong 0\text{cm}^2$  となる。ここで、 $0.1\text{cm}^2$  は校正係数である。閉曲線内部を右側に見ながら線積分した結果を正としているので、面積が0になり、これから求めると振幅値は0となる。確かに、2次用歯車で解析した  $\sin(x)$  の振幅は0となり、正しく計測解析されている事が解る。



##### 4.2 テストケース2: $B\sin(2x)$ : $B = 1.75\text{cm}$

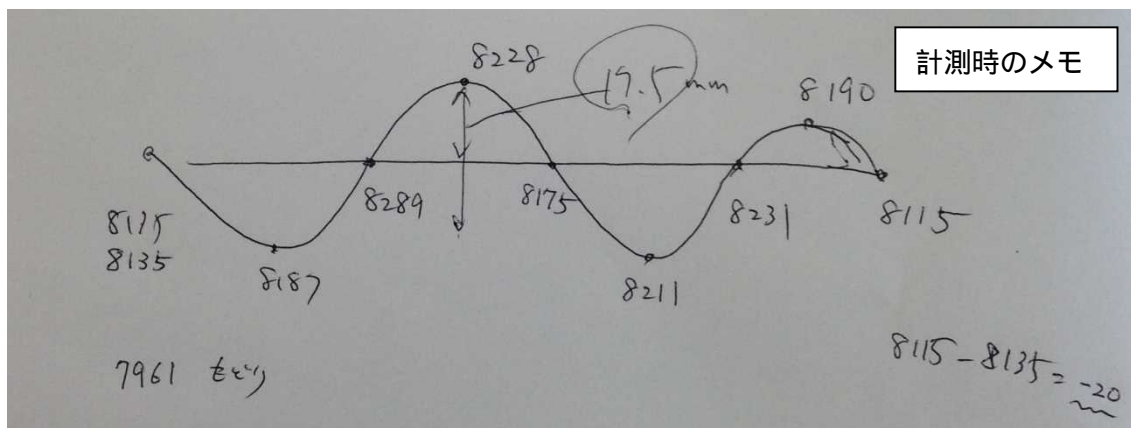
歯車は2次用( $r_2=1.6\text{cm}$ )、針の孔は「s」にセットする。正弦波の2次成分を検出するのでその振幅は  $1.75\text{cm}$  のはずである。下の図は記録用のメモであり、計測用のグラフではない。計測用波形は丁度位相が だけずれた波形で、ゼロダウンクロス(始点)とした。

この点でのプラニメータの計測値が「8135」で、二波長後のゼロダウンクロスでの計測値が「8115」、そして  $y=0$  に沿って始点まで戻ったあとの計測値が「7961」、すなわち面積

は、付録 A3 の公式(17),(18)式から振幅が

$$FL_s = (7986 - 8135) * 0.1 \text{cm}^2 = -17.4 \text{cm}^2 \rightarrow B = FL_s / (2\pi r_2) = -1.73 \text{cm}$$

と求められた。



与えられた振幅 1.75cm に比べて差がある。変動波形を正確に追跡する必要がある事を示している。振幅の負値は、丁度位相が だけずれていることを示しているが、この事も正しく解析されている。

なお、余弦波形については同様な手法で解析できるので、検討を行っていない。

### 5 . 例題 : 不規則波形の周波数解析 (フーリエ係数を求める)

調和解析器による周波数解析がどのように可能なかの検証するために、具体的な不規則波を用意して周波数解析を実施した。即ち与えられた不規則波形のフーリエ係数を求め、与えられた数値と一致するか調べた。用いた不規則波形を構成する要素波形の特性を示す、振幅、周期、位相は表 1 . に示すとおりである。

表 1 . 与えた不規則波形を構成する要素波形の周期、振幅、位相差

	周期 T[sec]	振幅 A[cm]	位相差 $\epsilon$ [rad]
1 周期成分	1	4	-0.3
2 周期成分	0.5	2	-1.3
4 周期成分	0.25	1	-2.3

不規則波形は、表に示すように周期 1 秒の 1 周期成分、周期 0.5 秒の 2 周期成分、周期 0.25 秒の 4 周期成分で構成されており、合成波形は次式で表示される。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^3 A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t + \epsilon_i\right) = \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{A_i \cos \epsilon_i}{s_i} \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t\right) + \frac{A_i \sin \epsilon_i}{c_i} \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} t\right) \right] \quad (1)$$

この不規則波形を図 5.1 に示す。縦軸(波高)は実寸で、横軸(時間)は 1sec を 20cm で作成

した。位相は進みを正とし、与えた位相は負、即ち位相遅れとして与えた。

下線部が  $\sin$  項、 $\cos$  項の係数  $S_i : C_i$  として計測される数値と対応する値である。図 5.1 のオレンジの線が不規則波形、その他はそれを構成する基本波形である。

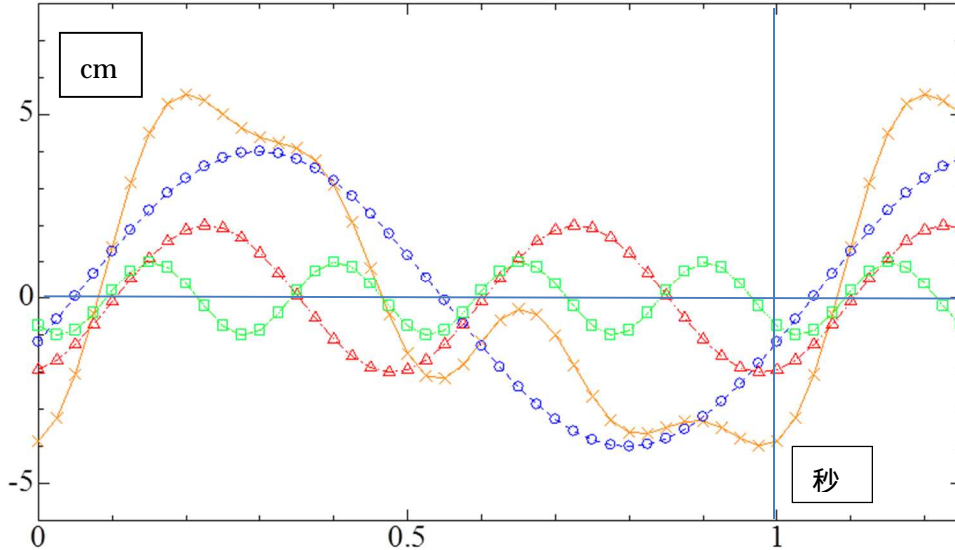


図 5 . 1 三つの規則波（○、△、□印）とそれから合成された不規則波形（×印）

周波数解析の手順は以下に示す通りである。なお、下記は 1 周期成分に対する解析手順とその結果を示している。2 周期成分以降の結果は表 2 に纏めてあるが、操作方法は同じで図 3 . 3 の 歯車を変えるだけで済む。なお、実際の「周期(単位は時間)」と言う場合と「 $n$  周期成分」と言う場合の違いに留意が必要である。「 $k$  周期成分」と言った場合は不規則波形内に基本波周期の  $(1/k)$  周期の波が  $k$  波長分存在するという意味である。

### 5 . 1 初期設定

1. 写真 5 . 2 のように、解析する計測波形の用紙と機器をセットする。
2. 赤丸のポインタ F 点の位置をスライドさせ目盛りが 1 周期の長さ(この場合は 20cm)になるように調整する。この時、 $n$  周期成分はこの長さの中に  $n$  周期分含まれている。
3. ポインタ F の位置が最も左になるところまで移動させ、F 点がグラフの原点になるように、グラフ位置を調整する。なお、グラフの横軸は機器が設置されているレールに垂直になるように設置する。これは付属の T 定規を用いれば容易である。
4. ポインタ F 点を右一杯まで移動させると、丁度グラフの 1 周期のところまで止まるように設定する。これらの設定の結果、グラフの midpoint (図 5.1 では 0.5 秒の点) と K 点を結ぶ直線はこの時間軸と直交する。
5. 写真中の青矢印のところには求めたい成分の歯車を設置する。写真は 1 周期成分の歯車である。Cos 成分ならプランメータの針先を歯車の「C」の穴に、Sin 成分なら「S」

の穴に入れる。(写真 5.2 青矢印)。 図 3.4 も参照してください。

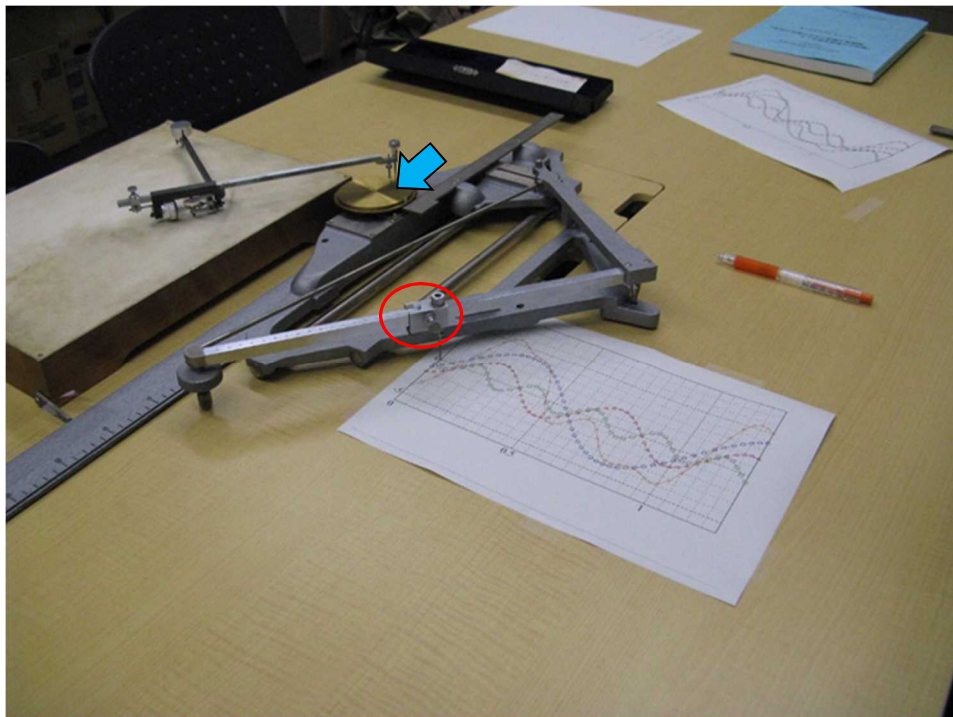


写真 5 . 2 調和解析器の設定 . 図 5.1 , 図 5.3 はこの写真中の解析用波形図である。

## 5 . 2 測定

1. 次頁、図 5 . 3 に示すように の順で解析器のポインタ F 点を解  
析する不規則波形に沿って移動させ、図中記号点でその都度プラニメータの目盛を読む。この時、  
の時、K 点は上下するが歯車 は一緒に上下し回転はし  
ない  
なお、プラニメータの設定は 1/10 のため計測された値を 1/10 倍すると平方センチメ  
ートルの単位で面積を算出できる。

2. 計測は 2 回行ったが結果は以下の通り

### ■ 1 回目

Cos 成分： 1 回目 8,642 8,709 8,520 となり差は-122

故に、 $C_1 = -12.2 / (1 r_1) = -1.214$

Sin 成分： 1 回目 9,445 0,151 9,826 となり差は+381

故に、 $S_1 = 38.1 / (1 r_1) = 3.792$

### ■ 2 回目

Cos 成分： 2 回目 8,523 8,595 8,406 となり差は-117

故に、 $C_2 = -11.7 / (1 r_1) = -1.164$

Sin 成分： 2 回目 8,774 9,480 9,147 となり差は+373

故に、 $S_2 = 37.3 / (1 r_1) = 3.712$

となった。分母の 1 は、1 周期成分だからである。n 周期成分を求める時は n を使う。  
 なお、この時は 1 周期成分の解析なので、n=1 で、その時は歯車 の半径は  $r_1=3.2\text{cm}$  で  
 ある。

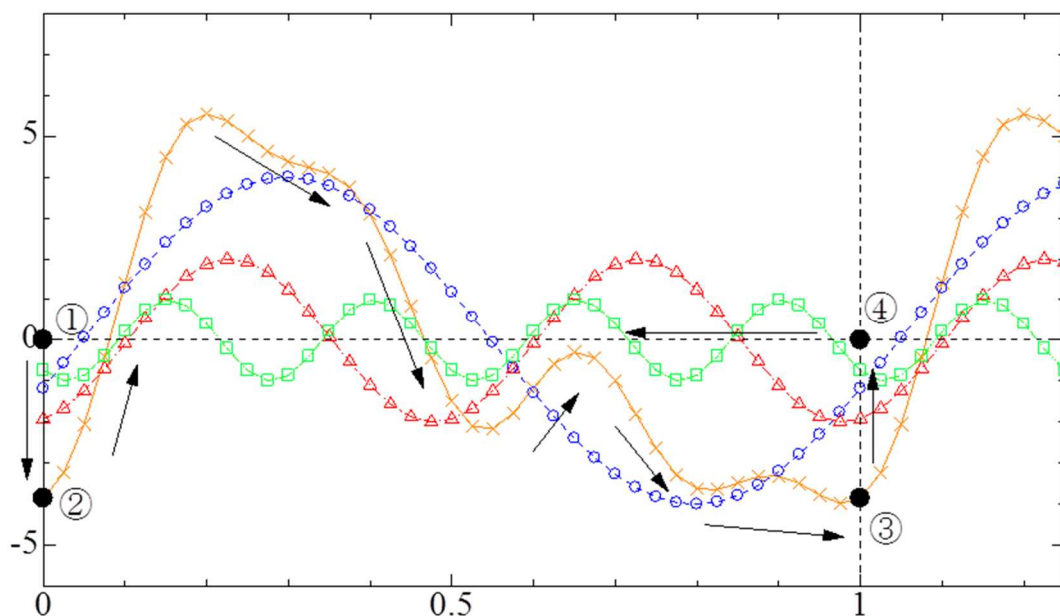


図 5 . 3 . 調和解析器による周波数解析の操作手順：矢印はポイント F 点の動き

1 周期成分波の振幅は、正弦成分、余弦成分の二乗和の平方

$$A_1 = \sqrt{C_1^2 + S_1^2} \quad (2)$$

で求められる。その結果、

1 回目の計測結果は  $A_1=3.98\text{cm}$ 、2 回目の計測結果は  $A_1=3.89\text{cm}$

となる。その平均値は、3.94 cm である。

計測の位相差は(1)式のように sin 波形で表現すると

$$\varepsilon_1 = \tan^{-1}(C_1/S_1) \quad (3)$$

で求められる。その結果、

1 回目の計測結果は  $-0.310 \text{ rad}$ . : 2 回目の計測結果は  $-0.304 \text{ rad}$ .

となる。その平均値は、-0.307 rad である。

即ち、計測結果は以下である。

$$\text{振幅}=3.94\text{cm} \quad :: \quad \text{位相} = -0.307\text{rad}(\text{遅れ}) \quad (4)$$

この計測結果は、与えた不規則波の 1 周期成分

$$\text{振幅}=4.0\text{cm} \quad : \quad \text{位相}=-0.3 \text{ rad} (\text{遅れ}) \quad (5)$$

と比較しても概ねよい一致が得られている。

2 周期成分、3 周期成分、.....を求めるために、図 3.3 に示した半径の違う 歯車を使用して計測する。ここで、歯車の中心点から Pc、Ps 穴までの距離は以下である。

1 次用  $r_1=3.20\text{cm}$  : 2 次用  $r_2=1.60\text{cm}$  : 3 次用  $r_3=1.07\text{cm}$  : 4 次用  $r_4=0.80\text{cm}$

なお、歯車の詳細は、報告書付録 A2 調和解析器写真集を参照してください。

同様な解析法で高周期成分を求めた結果を表 2 .に示す。概ね良好な結果が得られている。なお、与えられた不規則波形には含まれていない 1/3、1/8 周期( 3 周期成分、8 周期成分) の解析も実施した。

周期成分	成分	プラニメータ目盛り		差	cos 係数	sin 係数	解析振幅 [cm]	解析位相差[rad]
		始点	終点					
2	sin	1211	1261	50	0.497	-1.940	2.002	-1.320
	cos	1466	1271	-195				
× 3	sin	1307	1303	-4	-0.040	-0.060	0.072	-0.983
	cos	1350	1344	-6				
4	sin	1225	1159	-66	-0.657	-0.756	1.001	-2.43
	cos	1326	1250	-76				
× 8	sin	1187	1190	3	0.030	0.000	0.030	0.000
	cos	1091	1091	0				

表 2 . 短い周期の成分解析結果

表 1 . に示されている与えた値と計測解析された数値を下記に示す。

2 周期成分：振幅 2cm に対して、 2.002 cm : 位相-1.3rad.に対して -1.32rad.

× 3 周期成分：振幅 0 cmに対して、 (0.072 cm) : 位相 × (-0.983rad.)

4 周期成分：振幅 1 cmに対して、 1.001 cm : 位相-2.3rad.に対して、 -2.43rad.

位相は、(3)式で求められた値より、 $-\pi(= -3.14\text{rad})$ だけシフトした値である。

× 8 周期成分：振幅 0 cmに対して、 (0.030 cm) : 位相 × に対して、 (0.00rad.)

なお、与えた不規則波形には 3、8 周期成分は含まれていないので、この周期成分の欄には × 印を記してある。

本来 0 であるべき 3、8 周期成分の振幅値が求められているが、計測に習熟していないための計測誤差であると考えている。

## 6. まとめ

調和解析機の原理を調べたところ、次の事柄が分かった。

1. 解析機は大きく分けて二つの部分からなる。一つは被解析関数に正弦・余弦関数を乗じて被積分関数を発生する部分であり、もう一つがその被積分関数を積分する部分である。
2. 積分部分は一般的なプランメータを使用している。
3. 被積分関数を発生する部分に工夫がみられる。通常のように被解析関数に正弦・余弦関数を乗じるのではなく、微小積分区分に正弦・余弦関数を乗じている。これにより機構がコンパクトになっている。
4. 例題として、第1周期(基本周波数)、第2、第4周期成分(2倍、4倍周波数)の波を合成し解析した結果、第1,2,4周期成分の波以外に第3,8周期成分の波が検出された。全ての振幅の誤差は第1周期の振幅の2%以下であり、位相差は2度以下であった。
5. 以上の結果より、本調和解析機は熟達した技師が扱えば誤差0.5%以下の精度を出し得る解析機と思われる。

## 謝辞

本解析器は、(株)クボタから造船資料保存委員会に寄付されたものである。

この貴重な機器の保存に関して格別のご理解を示された(株)クボタ様に心よりお礼を申し上げます。

又、造船資料保存委員会からは、この調査の機会を与えて頂き、かつ各種ご支援やケルビン卿に関する各種の情報を寄せて頂いた。報告書がそれらに応えられるものであることを願いながらお礼を申し上げます。



## 付録 A1：ケルビン卿について

図 3.3、或いは写真に示した調和解析機器は、Kelvin 卿の方式と違うものであるが、調和解析器を最初に開発した人は Kelvin 卿である。<sup>1)</sup>

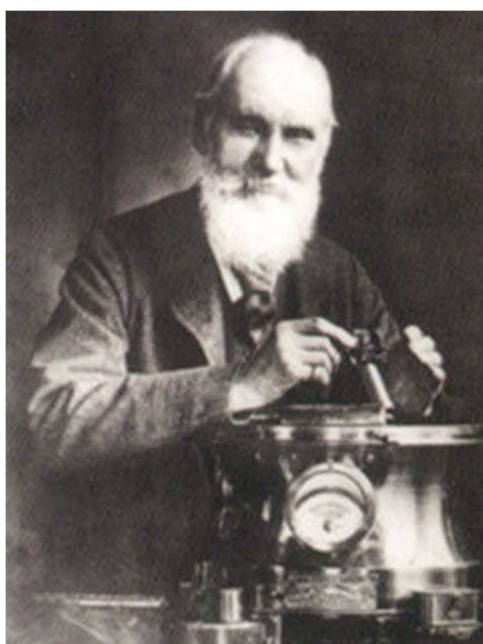
William Thompson が名前であるが、爵位を授けられてケルビン卿と名乗るようになった。グラスゴー大学の近くを流れているケルビン川からとった名前と言われている。

彼の名前は造船工学に関わっている人間にとっては良く知られている。船が静水中を航走した時に船の後方にできる波紋を素成波の重ね合わせで表現し、その波紋を計算する理論を示した人である。その波を「ケルビン波」として歴史にその名を刻印した英国の物理学者である。この考え方は船の造波抵抗の推定に大きな影響を及ぼした。

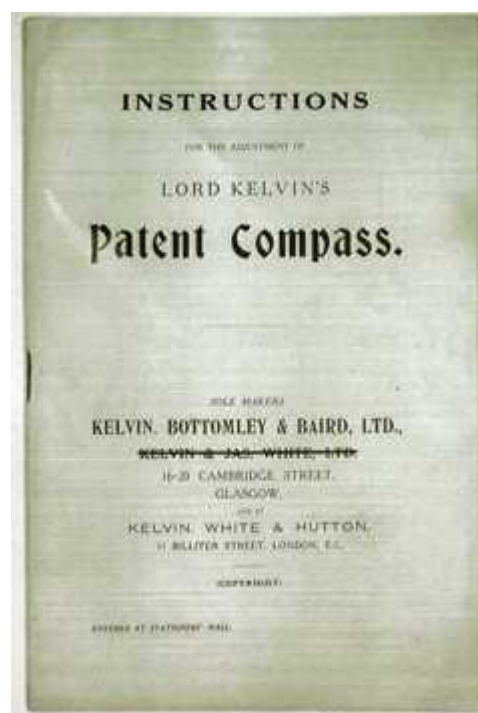
彼は、多くの工学的な機器を発明した人で、船に関する機器開発にも大きく貢献した人でもある。例えば、ケルビン卿は磁気コンパスで有名で、明治時代の日本の商船のほとんどにケルビン卿の磁気コンパスが搭載されていた。Thomson 式の通名で製品が出ており、神戸大学深江の海事博物館に入って左側に Thomson 式のコンパスが展示されている。

ケルビン式測深儀も大正から昭和にかけて使用されていた。ガラス管の内部に重クロム酸カリを塗り、海中におろし、ガラス管の中に海水が入ると変色するのでそれにより水深を計測する方式である。更に、気圧計も開発した等、多くの海事関係の特許を有していた。

ケルビンの名前が付いた「Kelvin Hughes Limited」という会社があり、戦後はレーダなどを手掛けていた。最近では、ECDIS（電子チャート）や、IBIS(Integrated Bridge Information System 総合ブリッジ・システム)などを手掛けている。即ち今でも彼の名前が付いた会社が健在である。



ケルビンの写真



Lord KELVINS の名前が見える。



この会社の歴史を調べると、以下のような記述がある。

「Kelvin Hughes 社は、英国の通信技術者 Kelvin 卿が 19 世紀半ばに設立した通信機器ビジネスと、18 世紀初頭から続く時計職人 Hughes 家が、1942 年に設立したジョイント・ベンチャー Marine Instruments Ltd. が基礎となっている。」

更に、Kelvin Hughes 社の歴史を見ると、上記の写真とともに以下の文章がある。

The other half of the Kelvin Hughes history was founded by **William Thomson, who is recognised as one of Scotland's greatest scientists**. As an example, his original compass card design remains in use virtually unchanged today. Of his many other inventions, his depth sounder put Britain decades ahead of other countries in underwater sound technology.

In 1858, he became one of the Directors of the Atlantic Telegraph Company, and as such, he was the chief instigator in the laying of the first trans-Atlantic cable. In Glasgow in 1850, he founded his first company and worked with the optical engineer, James White, to make scientific and navigational instruments.

- 1) “Harmonic Analyzer”, William Thomson, Proceedings of the Royal Society of London, Vol.27(1878), pp371~373

この論文中に次のような文章がある。

*“ On the Instrument for Calculating  $\int \phi(x)\psi(x)dx$  ,  
the Integral of the Product of two given Functions ”*

即ち、 $\phi(x)$ として計測波形、 $\psi(x)$ として正弦関数、余弦関数を使えばフーリエ積分が可能になり、フーリエ係数が求められる解析器になる事を語っている。

## 付録 A2 : 別冊

調和解析器写真集

## 付録 A3 : 別冊

調和解析器の調和解析器の機構と原理

調和解析器 積分計算  $\int_a^b f(x) \begin{pmatrix} \sin nx \\ \cos nx \end{pmatrix} dx : n = 1, 2, \dots, k$  の原理