

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 186 June 1974

作業船の動揺動特性の推定に用いる学習的同定法

東海林 秀 幸
藤 井 喜一郎

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1 ま え が き	5
2 横揺れの基礎方程式	5
3 動特性の同定法	6
3.1 学習的同定法とその変形	6
3.2 シミュレーション	7
4 結 果 と 考 察	8
5 結 果	13
6 あ と が き	13
7 謝 辞	13
8 参 考 文 献	13
9 記 号 表	14
10 付 録	14

作業船の動揺動特性の推定に用いる学習的同定法

東海林 秀 幸*

藤 井 喜 一 郎**

要

旨

作業船の能率向上に関して船体動揺が作業に与える影響を調べる第一段階として船体の動特性を求める方法について検討を試みた。

縦揺れ、横揺れを各々独立した線型の運動とすれば、その動特性は入出力データより直接求めることが可能であり、一つの方法として学習的同定法がある。その基本法では各ステップの計算中に近似解による出力を一定としているが、筆者等は各ステップで新しく求めた近似解を用いて計算する方法を試みた。修正手続きは次のようになる。

$$G_{j+1} = G_j + \beta (\theta_j - Z_j') \frac{F_j}{|F_j|^2}$$
$$Z_j' = \left(\sum_{i=1}^{k-1} g_i^{(j+1)} f_{j-i} + \sum_{i=k}^n g_i^{(j)} f_{j-i} \right) dt$$

ここで G_{j+1} は第 j ステップの近似解、 $g_i^{(j+1)}$ はその成分、 β は誤差修正係数、 θ_j は出力、 Z_j' は近似解の出力、 F_j は入力である。シミュレーションの結果、誤差修正係数を 3 ~ 5 の範囲に選択すれば基本法よりも少くない繰り返し数で十分な解が得られた。

さらに誤差修正係数をステップ毎に変える方法を試みたが、収束は早くならず効果的な方法ではなかった。

* 機材部 作業船研究室

** 機材部 作業船研究室長

A Learning Method for Identification of Impulse Response of Motion of Working Crafts

Hideyuki SHOJI *

Kiichiro FUJII **

Synopsis

Authors tried to analyse the dynamic characteristics of ship motion in connection with a study on influence of ship motion upon working condition. The dynamic characteristics could be calculated from input and output on the assumption that rolling and pitching would be mutual independent and they would be 2nd order damped vibration motion. One of the methods is the learning method for the system identification in which output obtained from approximate solution is constant at each iteration step. Authors tried the modified method with varying output by approximate solution. Iteration procedure is as follows,

$$g_k^{(j+1)} = g_k^{(j)} + \beta (\theta_j - Z'_j) \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2}$$
$$Z'_j = \left(\sum_{i=1}^{k-1} g_i^{(j+1)} \cdot f_{j-i} + \sum_{i=k}^n g_i^{(j)} \cdot f_{j-i} \right) dt$$

where $g_i^{(j+1)}$ is approximate solution at the j th step, β is coefficient of error compensation, Z_j is output by $g^{(j+1)}$ and $g^{(j)}$, F_j is input. Results with simulation by digital computer showed that the number of iteration to approach to the accurate solution was minimum with chosen between 3 and 5.

Another modified method, in which varies with iteration, was tried. But this method was not effective in comparison with the above mentioned one.

* Member of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

** Chief of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

1 ま え が き

近年港湾工事において新しい作業が登場し、従来とは趣きを変えた新形式の小型作業船が開発されつつある。例えば海面及び海底の清掃作業、海面に拡散した油の回収作業が挙げられる。これ等の作業船は従来の作業船に比較して小型であるが故に船体動揺が作業に大きな影響を与えることは十分に考えられる。現在稼動している比較的小型の作業船としては監督測量船がある。それに於いては動揺による測量誤差を最少にする努力がなされている。船体動揺を線型の運動と考えれば不規則波による動揺を求めるには動特性と波の強制モーメントのたたみ込み積分が有効と思われる。しかし現在まで作業船の動揺に関してこれを試みた例はないようである。当研究室において実施した監督測量船の実船試験^{1),2)}でも日程と実験条件の制約により試験船の特性が未知のままであるが故に、測定データをもとにして他の波浪での挙動を検討するにはいくつかの問題点がある。仮に動特性が何らかの方法で得られておれば、作業海域での波のデータを入力すれば、前述のように動揺の様子を求めることが出来、それに起因する作業条件を事前に検討できる。監督測量船を例にとれば、測深誤差や船位測定誤差の推定、搭載機器へ影響、さらに船体の安全性、居住性に関する人間工学的考察も可能となる。

以上の観点から船体の動特性を求めることは作業能率向上に関する重要な要素の一つと考えられる。動特性を求めるには船体を一つのブラックボックスとし、その入出力データ（動揺では波のデータと揺れ角）より求めることができる。計算手法を大別すると周波数領域と時間領域の2つになる。周波数領域では有限な範囲での変換をするため幾つかの修正が必要であり得られた動特性⁴⁾は十分なものでない。一方時間領域では相関々数を用いて解いた例が発表⁴⁾されているが、その結果も周波数領域での結果と同様に十分でなく、相関々数に含まれる誤差が未解決のままである。このように現在までなされた方法から判断すれば、入出力データに何の変換もせず直接動特性を求める方法が有利と思われた。野田等が発表した学習的同定法³⁾がその一つである。学習的同定法では適当な近似解を決めて入出力データを次々と与え繰り返し計算により近似解を真の解に近づけてゆく。筆者等は繰り返しの各ステップで近似解による出力に新しく求めた近似解を導入して計算する方法を検討し、誤差修正係数、収束の様子、系との関連を電子計算機によるシミュレーションで調べた。

2 横揺れの基礎方程式

船体動揺の影響を受ける作業の一つに海上測量がある。監督測量船の実船試験結果^{1),2)}によると測量誤差（主として測深誤差）は横揺れによって発生すると報告されている。本報告では横揺れについて検討を進めるが、船体動揺の計算で横揺れ、縦揺れ共に独立で線型の運動として考える限りいずれも全く同型式で表示されるので改めて一方のみに限定する必要はなく定数を変えるだけで両者を検討できる。

重心を原点とする座標系を用い横揺れを独立な運動とし、その回転軸は重心を通るとすれば次式で表わせる。⁵⁾

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_1 \frac{d\theta}{dt} + f_2(\theta) = f_3(t) \quad (2-1)$$

ここで I は慣性モーメント、 f_1 は運動による抵抗、 f_2 は復元モーメント、 $f_3(t)$ は波による強制モーメントである。横揺れ角度 θ が小さいと復元モーメント $f_2(\theta)$ は角度 θ に比例し、その係数は浮力 W とメタセンター高さ GM の積になる。角速度が小さければ $f_1 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)$ は角速度に比例するとみなせる。これ等の仮定を考慮すれば (2-1) 式は2次おくれ系の振動の式と同型式で表われ、次のようになる。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \alpha \frac{d\theta}{dt} + W \cdot GM \cdot \theta = W \cdot GM \cdot f_4(t) \quad (2-2)$$

両辺を I で割れば、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\alpha\omega_n \frac{d\theta}{dt} + \omega_n^2\theta = \omega_n^2 f(t) \quad (2-3)$$

係数 α と ω_n は次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{a'}{2\sqrt{I \cdot GM \cdot W}} \\ \omega_n^2 &= \frac{GM \cdot W}{I} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

横揺れを一つの振動系と考えるので以後船体を系、横揺れ角を出力、波の強制モーメントを入力と呼ぶ。初期条件を全て零として (2-3) 式をラプラス変換し、系の伝達関数を $R(s)$ とすれば、

$$R(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\alpha\omega_n S + \omega_n^2} \quad (2-5)$$

となり、系のみの性質で表わせる。ここで入力 $f(t)$ とし

てデルタ関数 $\delta(t)$ を用いるとそのラプラス変換が 1 となるので出力 $\theta(s)$ は伝達関数 $R(s)$ に等しくなり、系によって決まる。

$$\theta(s) = R(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\alpha\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-6)$$

逆変換すれば時間関数として出力 $\theta(t)$ が求まる。この出力は特別な入力に対するものであり、かつ系の動的性質を表わしているので動特性（インパルス応答）と呼ばれ、以後 $h(t)$ で表わす。

$$h(t) = \omega_n e^{-\alpha\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\alpha^2} t) \quad (\alpha < 1) \quad (2-7)$$

(2-3) 式で表わされる横揺れ角 $\theta(t)$ は動特性 $h(t)$ が既知であれば微分方程式を直接解かず、波による強制モーメント $f(t)$ とのたたみ込み積分で計算できる。

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (2-8)$$

(2-8) 式で $f(t)$ は周期関数でなくランダムな値をとる不規則波による強制モーメントであっても時間を適当に分割して数値計算できる。

$h(t)$ が未知の線型系であっても入出力間の関係は (2-8) 式のように出力は入力に系によって決まる $h(t)$ の重みを付けて積分した結果であるから、入出力の同時データより動特性は求められることを示す。

学習的同定法は時間領域で動特性を求める方法の一つである。この方法では第零近似に適当な値を決め、一組の入出力データで第一近似を求め、引き続き一組の入出力データで近似を繰り返し、近似解が必要な精度に達するまで計算を繰り返す。フーリエ変換、相関々数を用いないのでそれ等に付随する誤差がなく、演算速度の早い計算機を用いれば稼動中の系をオンラインで処理できる利点がある。

3 動特性の同定法

3.1 学習的同定法とその変形

前節 (2-8) 式で示されるように線型系の入出力の同時データから系の動特性は推定可能である。定数未知の船体が不規則波によって横揺れしており、この時波の強制モーメントと横揺れ角の同時データが得られたとする。不規則波は適当な関数で表わせないで動特性の数値解を求めることを考える。入出力データを適当な時間間隔 Δt 毎に分割すれば出力は次のように表わせる。

$$\theta_j = (h_1 f_{j-1} + h_2 f_{j-2} + \dots + h_n f_{j-n}) \Delta t$$

$$= \sum_{i=1}^n h_i f_{j-i} \Delta t \quad (j \geq n+1) \quad (3-1)$$

(2-7) 式で明らかかなように $h(t)$ は無限大の時間経過後に零になるが、近似的に求める数値計算では必要な精度に応じて積分範囲と時間々隔 Δt を決めればよい。学習的同定法は適当な近似解から出発して入出力データで修正を繰り返して $h(t)$ に近づけるのでその近似解を $g(t)$ とし、それによる出力を $Z(t)$ とすれば、第 j ステップで

$$Z_j = \sum_{i=1}^n g_i^{(j)} f_{j-i} \Delta t \quad (j \geq n+1) \quad (3-2)$$

となる。連続した n 個の入力に対して一つの出力が得られるので入力データを n 個のブロック毎にまとめ、一つのブロックを n 次元ベクトルとし F_j で表わす。動特性 $h(t)$ を同じく H 、その近似解 $g(t)$ を G_j で表わす。出力 θ 、 Z_j は 2 つのベクトルの内積となる。

$$H = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix}, \quad G_j = \begin{pmatrix} g_1^{(j)} \\ g_2^{(j)} \\ \vdots \\ g_n^{(j)} \end{pmatrix}, \quad F_j = \begin{pmatrix} f_{j-1} \\ f_{j-2} \\ \vdots \\ f_{j-n} \end{pmatrix} \quad (j \geq n+1) \quad (3-3)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_j &= (G_j \cdot F_j) \Delta t \quad (j \geq n+1) \\ \theta_j &= (H \cdot F_j) \Delta t \quad (j \geq n+1) \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

次に近似解 G_j を H に近づける手続きを述べる。第 j ステップの近似解 G_{j+1} の各成分に対応する入力ベクトル F_j の多成分の大きさに比例し、出力誤差 $(\theta_j - Z_j)$ に比例した大きさの修正値を G_j に加える操作を繰り返す。この際、比例定数を β とすれば修正手続きは次式で表わされる。

$$g_k^{(j+1)} = g_k^{(j)} + \beta (\theta_j - Z_j) \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2} \quad (j \geq n+1) \quad (3-5)$$

第 j ステップで修正が完了すれば (3-5) 式で出力差は零に近づき、 G_{j+1} は F_{j+1} に対して正しい出力を与える。

比例定数 β は誤差の修正量に関するものであるから以後 β を誤差修正係数と呼ぶ。

(3-5)式で誤差修正係数を2未満とし、 Z_j を1ステップの計算中に一定としたのが野田等³⁾が発表した学習の基本法である。

ここで筆者等は第 j ステップで G_{j+1} の各成分が求まり次等出力 Z_j 中の G_j と置き換えて計算し直し、 G_{j+1} の次の成分の修正に用いる方法を試みた。この修正方法は次のようになる。

$$Z_j' = \left(\sum_{i=1}^{k-1} g_i^{(j+1)} f_{j-i} + \sum_{i=k}^n g_i^{(j)} f_{j-i} \right) \Delta t \quad (j \geq n+1) \quad (3-6)$$

$$g_k^{(j+1)} = g_k^{(j)} + \beta (\theta_j - Z_j') \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2} \quad (j \geq n+1) \quad (3-7)$$

(3-5)式では誤差修正係数を2以上とすれば発散しやすい³⁾のに対して(3-7)式では比較的安定で、適当な値を選ぶと収束が早くなることがデジタル計算機によるシミュレーションで得られた。収束の様子は系の性質に依存し、各系に関して適切な誤差修正係数があることも得られた。

シミュレーションの結果から(3-5)式と(3-7)式では誤差修正係数のとり得る範囲が異なると思われる。筆者等は(3-7)式の十分な収束条件を与えられないが、各ステップで2つの方法で得られる近似解を比較して概略の収束条件を求めた。第 j ステップにおける(3-7)式を変形する。

$$g_k^{(j+1)} = g_k^{(j)} + \beta \left(\theta_j - \sum_{i=1}^n g_i^{(j)} f_{j-i} \right) \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2} - \beta \sum_{i=1}^{k-1} (g_i^{(j+1)} - g_i^{(j)}) f_{j-i} \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2} \quad (3-8)$$

(3-5)式と比較すると右辺第3項が補正項として入っていることになる。この項の大きさは(3-5)式と殆んど等しいとすれば、 D_{jk} を次のように定義して

$$D_{jk} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(f_{j-i})^2}{|F_j|^2} \quad (3-9)$$

(3-5)式と(3-9)式より次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} g_k^{(j+1)} &= g_k^{(j)} + \beta' (\theta_j - Z_j) \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2} \\ \beta' &= \beta - \beta^2 D_{jk} \end{aligned} \right\} (3-10)$$

(3-7)式は形式的に(3-5)式と同じになり誤差修正係数中に補正項 $\beta^2 D_{jk}$ を含んだ見掛けの誤差修正係数で計算していることになる。補正項の値は G_{j+1} の各成分毎に異なる。 D_{jk} は定義上1を超えない正の値である。ここで次のように仮定する。見掛けの誤差修正係数は G_{j+1} の各成分について一定で、 D_{jk} は0.5とする。

(3-5)式の収束条件(付録参照)から誤差修正係数の範囲は以下のようになる。

$$0 < \beta < 3.36 \quad (3-11)$$

(3-7)式では誤差修正係数をこの範囲にすれば収束すると思われる、(3-5)式よりは大きい値をとり得る。学習の同定法は多少拡張できる。(3-5)式、(3-7)式の修正過程では誤差修正係数は一定であるが、各ステップ毎に変えてもよい。繰り返し数の関数とすれば、修正手続きは、

$$g_k^{(j+1)} = g_k^{(j)} + \beta^{(j)} (\theta_j - Z_j') \frac{f_{j-k}}{|F_j|^2} \quad (3-12)$$

となる。問題なのは $\beta^{(j)}$ の関数形であるが、現在まで特定のものはい出しされていない。一つの系について誤差修正係数を数段階に変えて(3-5)式か(3-7)式で計算し、各ステップで最少の規順化同定誤差を与える誤差修正係数を求めて用いる他になく、全くの試行錯誤による。

3.2 シミュレーション

シミュレーションに用いる系は $\omega_n = 1.0$ で $\alpha = 0.5$ 、 $\alpha = 0.2$ の2つに関して誤差修正係数を幾通りかに変えて収束の様子を調べた。収束に必要な最少の繰り返し数を与える誤差修正係数を求めるため $\omega_n = 1.0$ で $\alpha = 0.5$ 、0.2, 0.1, 0.05, 0.02, の5種類、 $\alpha = 0.2$ として $\omega_n = 1.0$ 、2.0, 3.0, 4.0の4種類について計算した。シミュレーションに用いる入力は次のように決めた。

系の入力となるのは不規則波による強制モーメントであるからシミュレーションの入力にはそれと統計的性質の等しい一連の数値を用いれば十分と考えられる。海洋波の統計的性質(強制モーメントは水面変動による)は定

常カウス過程で近似できることが知られている⁵⁾ので計算機で正規乱数信号を発生させて用いた。適当な初期値で乱数を発生させ、ゼロアップクロスによって平均値を中心とする変動量に変換して入力とした。この際入力中に有効波傾斜係数 σ は入力中に含まれているとする。出力は同定する系の性質を支えて(3-1)式で計算した。入出力同時データを得た後、第零近似 G_0 として零ベクトルを用いて前章に示した手順に従って計算を繰り返す。計算終了は次式で定義する規準化同定誤差 ϵ_N が適当な値以下になるまでとし、今回は0.01とした。誤差修正係数が大き過ぎて収束しにくいケースでは途中で計算を打ち切った。繰り返し回数 N を次のように定議する。

$$N = \frac{j+1}{n} - 1 \quad (3-13)$$

$$\epsilon_N = \frac{|H - G_j|}{|H|} \quad (3-14)$$

4 結果と考察

(3-5)式による近似解の収束の様子を繰り返し数 $N=1, 5, 10$, について図4-1に示す。 $N=10$ においてもまだ十分に収束せず2周期以降では零点がずれ周期は短かめになっている。出力のみを計算するには十分と思われるが、対数減衰率から α を求めたり、零点の位置より周期を算出するにはさらに収束させる必要がある。特に減衰の強い系では動特性の周期に減衰係数が

関係するため十分収束した結果が必要と思われる。(3-5)式では $N=16$ まで計算せねばならない。(3-7)式で誤差修正係数を3.0とした例を図4-2, 5.0の例を図4-3に示す。図4-1と比較すれば明らかなように収束は早く, $N=10$ で十分な解が得られ, α や ω_0 を精度よく計算できる。(3-7)式では誤差修正係数を適当な範囲に選ぶと(3-5)式よりも少くない繰り返し数で十分に収束した解が求まる。これについて規準化同定誤差で収束過程を調べてみる。図4-4, 4-5は各系について数種類の誤差修正係数で計算した結果である。同一の系では $\epsilon_N=0.01$ となる N は誤差修正係数に依存し、誤差修正係数を一定とした場合は系によって変る。このように各系に関して最少の繰り返し数を与える誤差修正係数が存在する。他に幾つかの計算結果から判断すると誤差修正係数を3~5の範囲に選ぶと収束は早いようである。(3-11)式は幾つかの仮定のもとに得た概略の条件であるが、 $\epsilon_N=0.01$ で収束したと考えるとこの範囲よりも大きめとなる。

収束過程は大むね3段階に分類される。第1段階は $N=3\sim 5$ 附近まで、第2段階は $N=10\sim 12$ 附近まで、それより第3段階に入る。段階が進むにつれて誤差の減少勾配は大きくなる。一方(3-7)式による収束は誤差修正係数が大きくなるに従い第1段階の緩い勾配の範囲が徐々に消滅し、誤差修正係数が10以上では全範囲で殆んど一定の小さい勾配となる。 ϵ_N の大きさは適当な誤差修正係数で最少となるが、過大な値では繰り返しの途中から ϵ_N を振動させ、 N と共にその振幅は増大し収

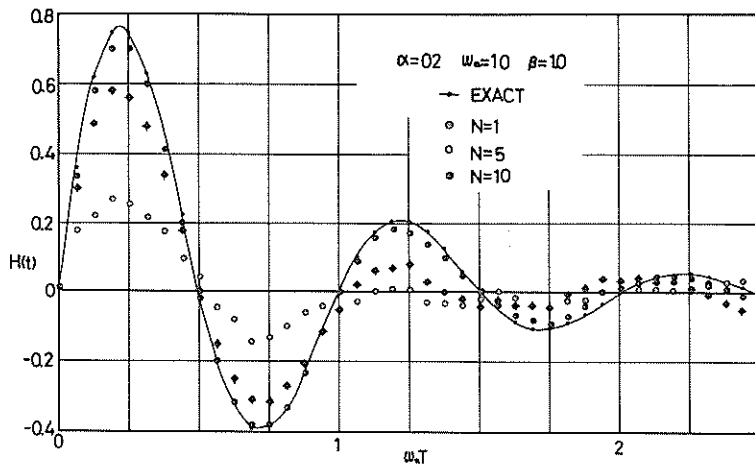


図4-1 G_{j+1} の収束状態

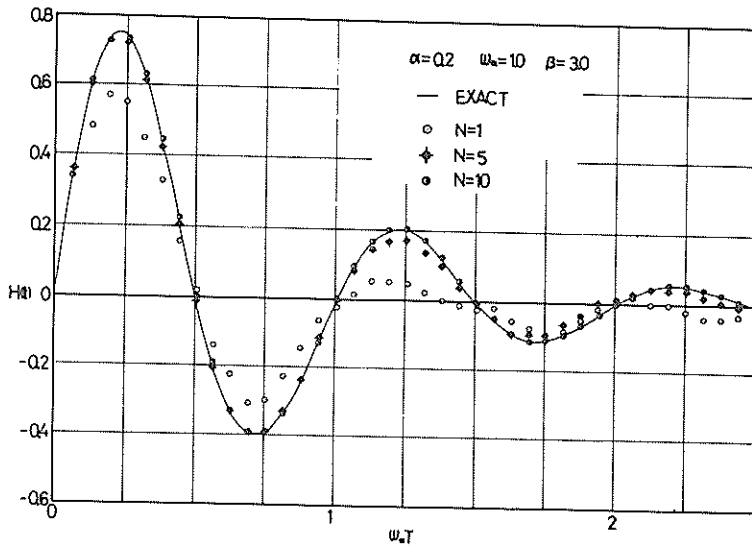


図 4-2 G_{j+1} の収束状態

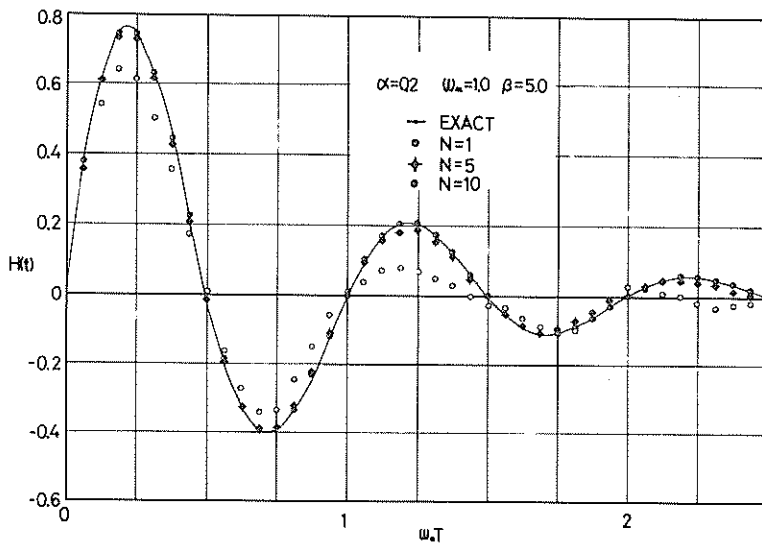


図 4-3 G_{j+1} の収束状態

束は極めて悪くなる。 $\alpha=0.02, \omega_n=1.0$ で $\beta \geq 15$ の結果では $N=2$ より振動し、 ϵ_N は 1.0 を飛び越し解は全く収束しなかった。

誤差修正係数の効果は ϵ_N を小さくし、収束の第 1 段階の範囲を縮めて収束を早めると考えられる。(3-5) 式では誤差修正係数を多少大きめに取ると発散しやすく解が求まりにくいのにに対して、(3-7) 式はかなり大きな値でも収束するのでより安定な同定法であると言える。

収束に関して H と G ; のなす角度から考察を進めることができる。 H と G ; のなす角度を ϕ_N とすれば、その値は各々のベクトルの絶対値と内積から求められる。 $\alpha=0.5, \omega_n=1.0$ の系の例を図 4-6 に示す。過大な誤差修正係数により ϵ_N が振動し始めると ϕ_N も振動し共に値は減少していく。誤差修正係数が大きいのであるから同一の入力ベクトルに対して大きい修正ベクトルによって近似解は修正されている。 ϵ_N と ϕ_N が変わらないので近似解は H の周囲の定位置に存在すると考えやすいが、

修正ベクトルが大きいので、 H の周囲を回転していると考えた方が妥当と思われる。誤差修正係数が過大であると解は H の周囲を回転するため収束しにくいと言えよう。解の収束が同定する系の性質に依存するため、減衰係数、固有周波数を変えて $\epsilon_N=0.01$ に達する繰り返し数を調べた。 $\epsilon_N=0.01$ としたのは図 4-2, 4-3 で示されるように解は十分収束したと考えられるためである。図 4-7 は減衰係数を一定とし固有周波数を変えた結果である。 $\omega_n=1.0$ で $\beta=4$ 程度で最少となるが、固有周波数が高くなるにつれて最少の N を与える誤差修正係数は大きくなる。固有周波数の高い系ほど大きな誤差修正係数が有利ということになるが、次に示す減衰係数を変えた結果によってその範囲は決められる。図 4-8 は $\omega_n=1.0$ とし、5 種類の減衰係数について求めた結果である。減衰の強い系ほど少くない繰り返しで収束し、最少の N に対応する誤差修正係数は大きくなる。弱い系では N は増加し、最少の N を与える誤差修正係数は小さくなる。この結果から判断すれば、誤差修正係数を 3~5 の範囲

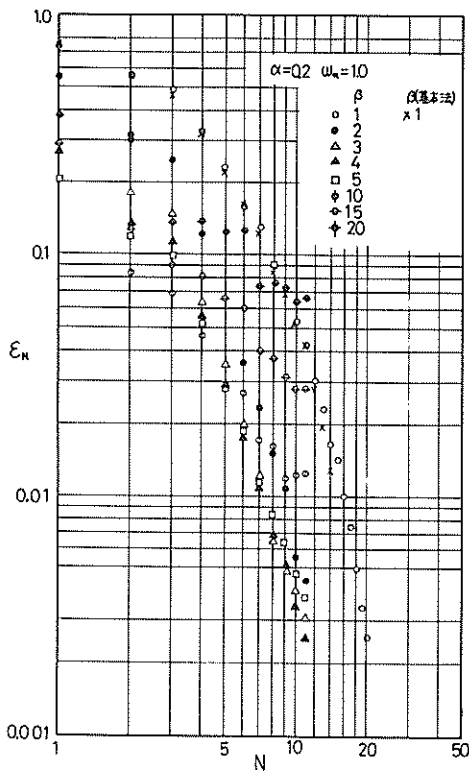


図 4-4 規準化同定誤差

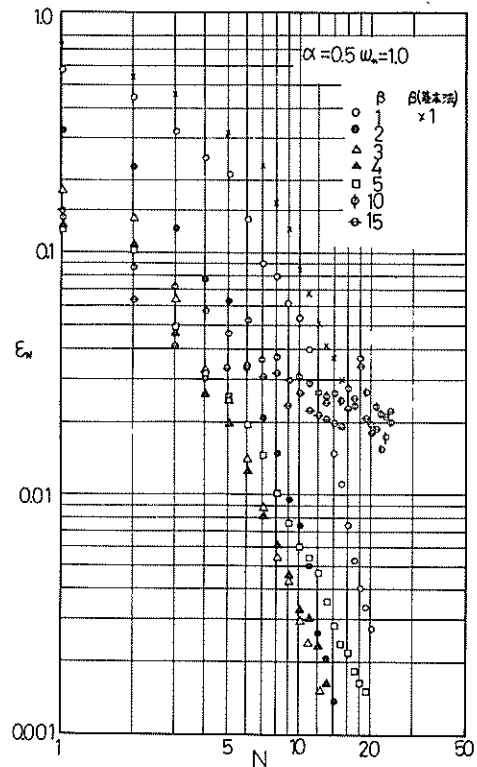


図 4-5 規準化同定誤差

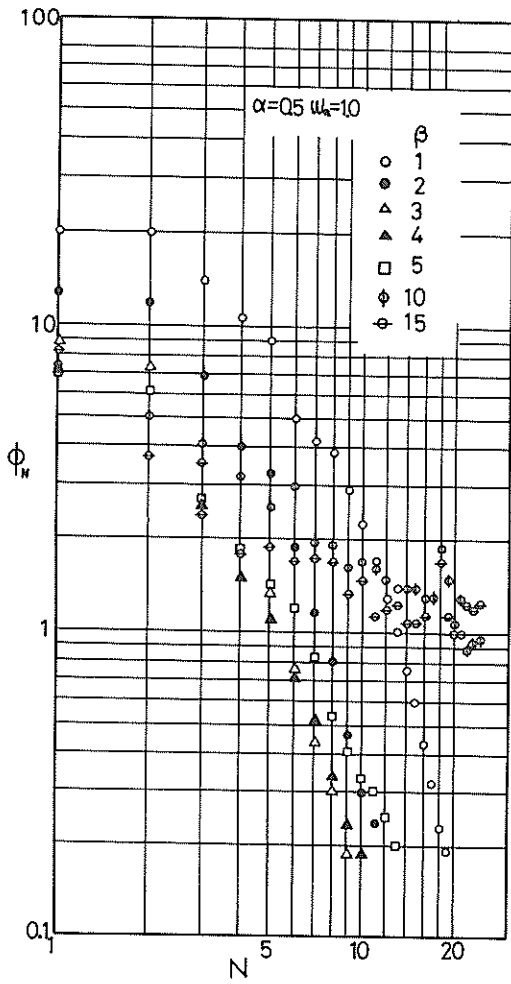


図4-6 H と G_{j+1} のなす角度

に選べば、より少ない繰り返して解を得られると言えよう。この収束は実用上の精度に達したということで、厳密には収束していないので(3-11)式とは範囲がずれるのであろう。

次に(3-12)式の方法について考えてみる。収束の第1段階では ϵ_N の減少率は小さいため、 ϵ_1 をできるだけ小さめにした方がよい。系によって変わるので数例について図4-9、4-10に示す。固有周波数一定で減衰係数を変えた結果では減衰の強い系ほど最少の ϵ_1 を与える誤差修正係数は大きくなり同時に ϵ_1 の値も小さくなる。一方固有周波数を変えてみると前者の結果と同じく最少の ϵ_1

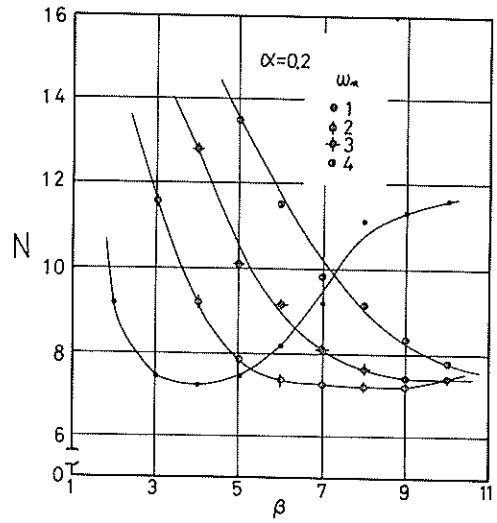


図4-7 系による収束の変化(α —一定)

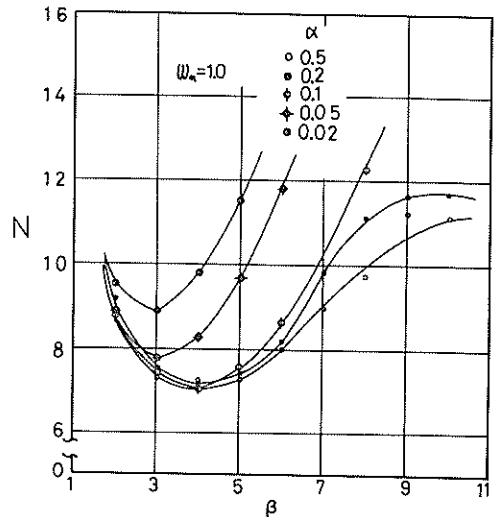


図4-8 系による収束の変化(ω_n —一定)

を与える誤差修正係数は固有周波数と共に増加する。

(3-12)式の説明で述べたように、 $\beta(j)$ の適当な関数形を得られないので、同定前に系を想定して幾つかの誤差修正係数で計算し、各ステップで最少の ϵ_N を与える数

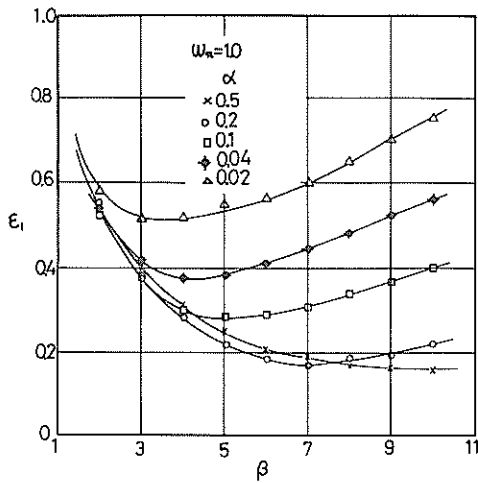


図4-9 ϵ_1 の変化 ($\omega_n = \text{一定}$)

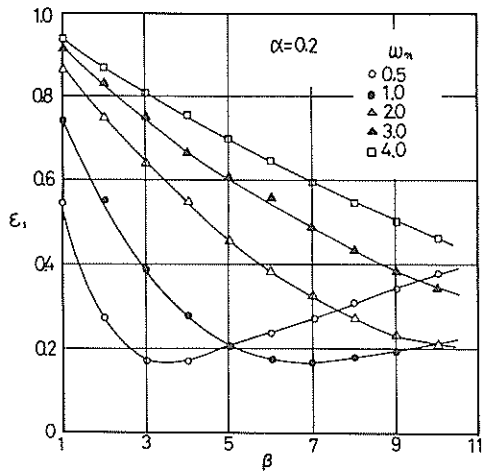


図4-10 ϵ_1 の変化 ($\alpha = \text{一定}$)

値を求めておくという文字通り試行錯誤による他はない。
 図4-4, 4-5に示した例について $\beta(j)$ を決めて計算すると図4-11, 4-12となる。いずれの場合も収束過程は2段階に分けられる。図4-12で $\beta = 1.5$ ($n \leq 4$), $\beta = 3$ ($n > 4$) のケースを除くとどの結果も殆んど差がない。誤差修正係数を一定の結果より格別早いと

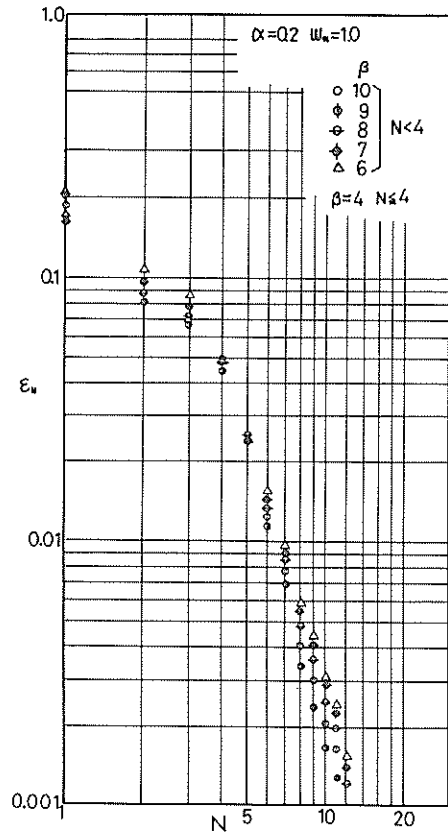


図4-11 誤差修正係数可変とした方法, 収束状態

は言えない。これから考えれば誤差修正係数を可変としても効果的とは考えられない。

数例のシミュレーションの結果を示したにすぎぬが、これ等の系では誤差修正係数を3~5の範囲に選ぶと収束の早さ ($\epsilon_N = 0.01$ に達する繰り返し数) はほぼ限界に達していると思われる。

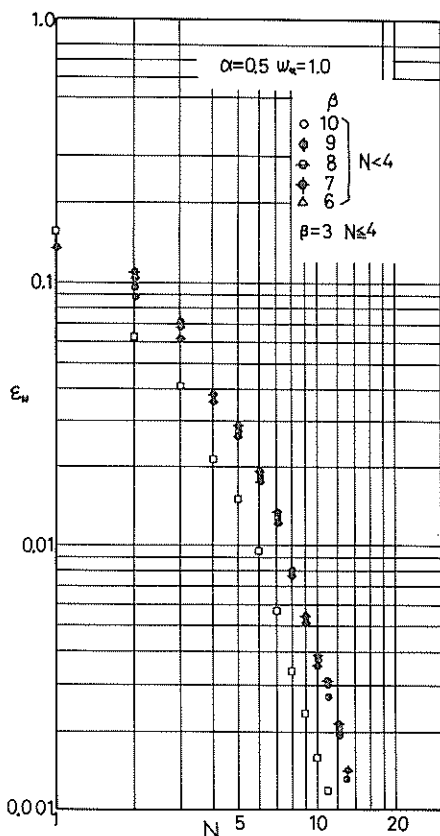


図4-12 誤差修正係数可変とした方法の収束状態

5 結 果

船体動揺を線型の振動系と仮定し、その動特性を求め方法に入出力より直接計算する学習的同定法を用いた。基本法に若干の修正を加えた方法を提案し、数例についてシミュレーションを行ない考察を進めて来たが、まとめると次のようになる。

- (1) 各ステップで得られる新しい近似解により出力を計算し直す方法でも十分収束する。
- (2) この方法では基本法より範囲の広い誤差修正係数を用いられる。
- (3) この方法で誤差修正係数を3~5の範囲で選ぶと収束は早くなる。
- (4) 収束は3段階に分類され、段階が進むにつれて誤差の減少する勾配は大きくなる。

(5) ステップ毎に誤差修正係数を変えても収束は特に早くならない。

6 あとがき

筆者等がこの報告を書く動機となったのは、監督測量船の実船試験結果をより有効に生かす方向は何かという問題であった。限られた時間内に特定の条件で得られた結果をもとに他の条件での挙動を検討するには幾つかの問題点がある。船体動揺のみに焦点を絞れば動特性が浮んで来る。仮に動特性が既知であり、作業海域での波のデータを手に入れたとすれば、動揺の予測が可能で、それに起因する作業条件について事前に検討できる。このような観点のもとに第1段階として入出力データより動特性を計算する方法の一つとして学習的同定法を取り上げ、検討を進めて来た。しかし、この報告は理想的条件のもとでは十分に計算できることを示したに過ぎず、実際の運動は仮定をどの程度満足するか未知のままである。さらにこの方法で理論的に説明し切れぬ部分もあり、それ等の検討を合せて今後模型実験、あるいはもう一步進んで実船試験等まで試みたい。

7 謝 辞

筆者等が動特性に関する文献を調べている際、学習的同定法が適していると示唆し、貴重な文献を送付してくれたのが東京都立大学の望月真澄氏であった。他の方法についても同氏より貴重な御意見を拝聴しており、ここに厚く感謝の意を表わす。

(1974年4月1日受付)

8 参 考 文 献

- 1) 麻山和正, 他: 監督測量船“くろしお”動揺試験報告 港湾技研資料№153 Mar. 1973.
- 2) 藤井 喜一郎, 他: 監督測量船“おおし”動揺試験報告 港湾技研資料№167 Sept. 1973.
- 3) 野田淳彦, 南雲仁一: システムの学習的同定法 計測と制御 vol 7 第9号 Sept. 1968
- 4) 磯部 孝編: 相関々教およびスペクトル 東大出版
- 5) 元良誠三: 船体運動力学訂正版 共立出版
- 6) 高橋智晴, 他: 超音波式波高計について 港湾技術研究報告 vol 12 Mar. 1973

9 記号表

I	慣性モーメント
f_1	運動による抵抗
f_2	復元モーメント
f_3, f_4, f	波の強制モーメント
θ	回転角度
W	船体重量
GM	メタセンター高さ
α'	減衰係数
α	無次元減衰係数
ω_n	固有周波数
R	伝達関数
h	動特性 (インパルス応答)
δ	デルタ関数
H	動特性 n 次元ベクトル
G_j	動特性の近似解ベクトル
F_j	入力ベクトル
β	誤差修正係数
β'	見掛けの誤差修正係数
ϵ_N	規準化同定誤差
D_{jk}	
σ	有効波傾斜係数
ϕ_N	H と G_j のなす角度
N	繰り返し数

10 付録

学習的同定法の基本法は次のような手順で収束が証明されている。

(3-5) 式を書き直すと、

$$G_{j+1} = G_j + \beta \frac{F_j}{|F_j|^2} (H - G_j \cdot F_j) \quad (A-1)$$

ここで右辺第2項の k 成分は、

$$\begin{aligned} \beta \frac{(H - G_j \cdot F_j)}{|F_j|^2} f_{j-k} &= \frac{\beta}{|F_j|^2} f_{j-k} \sum_{i=1}^n (H_i \\ &\quad - g_i^{(j+1)}) \cdot f_{j-i} \\ &= \frac{\beta}{|F_j|^2} \sum_{i=1}^n H_i - g_i^{(j+1)} \cdot f_{j-i} f_{j-k} \end{aligned}$$

これは $f_{j-i} \cdot f_{j-k}$ を要素とする n 行 n 列の行列と (H_i

$-g_i^{(j+1)})$ の列ベクトルの積を表わすので (A-1) 式は、

$$G_{j+1} = G_j + \beta \frac{F_j F_j'}{|F_j|^2} (H - G_j) \quad (A-2)$$

と表わせる。次に u_j を下のように定義する。

$$u_j = H - G_j$$

すると u_{j+1} は

$$u_{j+1} = X_j u_j \quad (A-3)$$

$$X_j = I - \beta \frac{F_j F_j'}{|F_j|^2} \quad (A-4)$$

I は n 行 n 列の単位行列である。 u_{j+1} の内積を求め、その絶対値の2乗を u_j の絶対値の2乗で割ると、

$$\frac{|u_{j+1}|^2}{|u_j|^2} = \frac{(X_j u_j \cdot X_j u_j)}{|u_j|^2} = 1 - \xi_j \quad (A-5)$$

$$\xi_j = \beta (2 - \beta) \frac{(u_j \cdot F_j)^2}{|u_j| |F_j|} \quad (A-6)$$

(A-6) 式で2乗項は u_j と F_j のなす角度を表わすので、1より小さいので β が2より小さい限り ξ_j は1より小となる。 u_{j+1} は次のようになる。

$$|u_{j+1}|^2 = |u_{N+1}|^2 \prod_{\gamma=N+1}^j (1 - \xi_\gamma) \quad (A-7)$$

無限乗積が零に収束する時は、 ξ_j が1より小さいので、

$$\sum_{j=N+1}^{\infty} \xi_j = \infty \quad (A-8)$$

入力データがランダムであれば ξ_j もランダムであり、それが (A-8) 式を満足すれば $|u_{j+1}| \rightarrow 0$ ($j \rightarrow \infty$) となり収束する。

港湾技研資料 No.186

1974・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.