

時系列理論の船の制御問題への応用

大津 皓平

1. まえがき

交通手段のうちでも、海面上を航行する船舶は、もっとも過酷な外乱にさらされると言えよう。外乱は、風と波の2つに分けられるが、いずれも大きな影響を船舶に与えることは、想像に難くないであろう。

筆者は、航海士としての訓練を受け実際に船の運航にたずさわってきたが、その立場から船の運動時系列や自動操舵装置の制御結果をみる時、これらの運動を理解し制御するにはどうしても時系列理論が必要であると痛感していた。このような時、セメント・キルンの制御や発電所ボイラの制御に関して、統計数理研究所の赤池博士のEPEあるいはAICによる時系列の自己回帰モデルによる同定法とそのモデルによる制御法を学ぶにおよび、この方法を船の問題に応用することを思い立った。

ここでは、筆者らがこれまで行ってきた大洋中を航行する船舶の運動の時系列に自己回帰モデルと呼ばれる時系列モデルをあてはめる解析法と、そのモデルを利用して筆者らが開発した自動操舵システムや、開発研究中の船のエンジンの回転数制御のための新しいガバナーステムについて実例を挙げて解説する。

なお、以下の著述において、船の横揺れ、縦揺れはよく知られているが、上下揺れとは船の上下方向への平行

運動、船首揺れは、船の船首の左右への首振り運動のことである。

2. 船体運動の予測

さて、不規則な海面上を航海する船舶の運動を予測することは、きわめて困難と想像されるが、ここで提案する時系列の自己回帰(Auto-Regressive; AR)モデルを使うと、少なくとも短期的には予測可能であることを実際のデータを使って示す。いま、たとえば、 Δt 時間毎にサンプリングされた N 個のデータ $(x(n), n=1, \dots, N)$ に対して次のようなARモデルをあてはめる。

$$x(n) = \sum_{m=1}^M a(m)x(n-m) + u(n) \quad (1)$$

ここで $x(n)$ は、時刻 $n\Delta t$ における横揺れの値、 $u(n)$ は平均値0、分散 d_M の偶然誤差を表す白色雑音である。このあてはめにおいて、次数 M は赤池による最小AIC法を使って決められる。このとき、定義からAICは、

$$AIC(M) = N \log d_M + 2(M+1) \quad (2)$$

である[3]。また、各次数における回帰係数は、いわゆる Levinson-Durbin 法を用いる[1]。

さてこの方法を、実際の船のデータにあてはめてみる。図1は、サンプリング周期1秒で観測された2000トンクラスの練習船の縦揺れデータ600点の内400点に対して上の方法でARモデルをあてはめ、後の200点に対し1

おおつ こうへい 東京商船大学
〒135 江東区越中島2-1-6

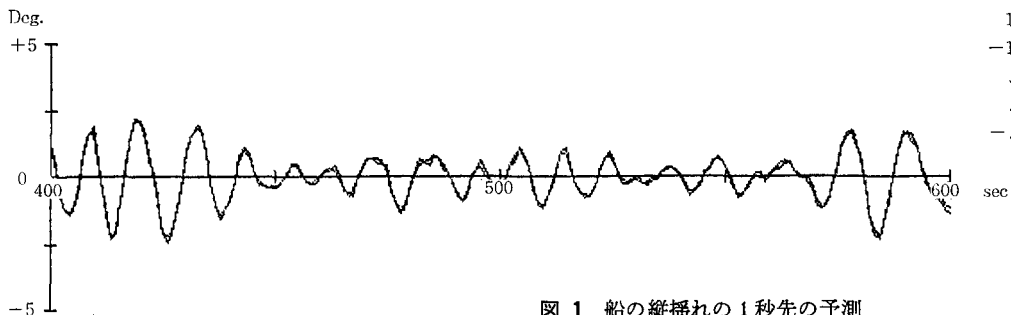


図1 船の縦揺れの1秒先の予測

ステップ（この場合1秒）先を予測した例である。図からわかるように、非常に良い精度で予測している。ステップを伸ばしたり、他の運動についても同様のことを行なってみても、予測の精度はきわめて高いことがわかっている[2]。このような予測ができると制御が可能であるから、たとえばこのモデルを利用して船の動揺を予測し、揺れる船上で人工的に水平を作り、衛星を自動的に追尾する装置への応用等が考えられている。

3. 船体運動時系列の解析

船体運動は、舵を含めると7自由度の運動である。これらの運動は、互いに独立しているのではなく影響しあっている。この影響しあっている運動を、多変量自己回帰モデル (Multi-variate Auto Regressive Model) を使って解析してみる。 r 個の変量からなるベクトルの n 時刻における値を $\mathbf{X}(n)$ とする時、多変量自己回帰モデルは

$$\mathbf{X}(n) = \sum_{m=1}^M A(m)\mathbf{X}(n-m) + \mathbf{W}(n) \quad (3)$$

によって与えられる。このモデルの AIC は、

$$AIC(M) = N \log \|\mathbf{d}_M\| + 2r^2(M+1) \quad (4)$$

である。ここで $\mathbf{W}(n)$ は r 次元白色雑音ベクトルであり \mathbf{d}_M はその共分散行列である。 N 個のデータが与えられた時の、回帰係数 $A(n)$ の計算に関する漸化式も知られている[1]。したがって、ある想定する次数の範囲において、 AR モデルを作り、その中から AIC 最小になるモデルを最適モデルとして採用することになる。

こうして自己回帰モデルが決まると、このモデルからさまざまなシステムの解析に有益な道具が与えられる。次にそれらの関数がどのように用いられているかを要約する。

パワースペクトラム：2. で述べた1変量のモデルから得られる。このスペクトラムは、通常のいわゆる Blackman-Tukey による方法より滑らかで、特にピークをよく表現しており、船舶工学では水槽で起こした不規則波中の船の模型の運動解析や実船試験のデータ解析などに使われる[2]。

インパルス応答関数：たとえば、船が突発的に針路から偏れた時の操舵手の応答の特徴を知りたい時等に用いられる。

周波数応答関数：水槽で起こした海の波に近いスペクトラムをもつ波の時系列と、その波による船舶の模型の運動時系列から船の波浪中での周波数応答関数を求めた

い時等に用いる。

雑音寄与率関数：船舶の自動制御系のようなフィードバック系における各運動スペクトラムが、他のどのような運動要素のループから入り込んできた雑音から影響を受けているかを調べたい時等に用いる。

次に具体的に船のデータを使った解析例を示す。次例は、当時北太平洋に就航中であった大型コンテナ船上で1秒間隔で採られた600点の船首揺れ、舵角、横揺れ等6変量から構成されるデータセットに、6変量自己回帰モデルをあてはめて後、上で示した諸関数により操舵法の解析を行なった例である。図2、図3は、それぞれベテランの操舵手が荒天中に操舵した時の、希望方位からの船首揺れに対する、操舵手の周波数応答と、古典的な比例、微分、積分制御を基本とした自動操舵装置 (Auto-pilot) の周波数応答を推定モデルからナイキスト線図の形で計算したものである。人間は低周波の変化を大きくフィードバックしているのに対して、オートパイロットは、高周波の変化にも対応していること、および、高周波において渦巻いていることから、ガター等の時間遅れ非線形要素 (天候調整と言う) の存在を示している。その他、水槽試験のデータの解析例等のデータの解析例等は、参考文献[2]他に詳しい。雑音寄与率の応用については、後章で触れることにする。

4. 自動操舵装置 (オートパイロット) 設計への応用

自動制御機器の中でも、船の自動操舵装置は概念的に最も理解しやすい装置であろう。ここでは、多変量自己回帰モデルを使って著者らが開発した AR 型オートパイロットについて説明する[4]。

ところで、制御系の場合は時系列ベクトルを、船首揺れのように制御される変数 (被制御変数) と、舵のように操作できる変数 (操作変数) に分けることができる。そこで $\mathbf{X}(n)$ を、一般に r 個の被操作変数 $\mathbf{x}(n)$ と l 個の操作変数 $\mathbf{y}(n)$ に分け、次のような $\mathbf{x}(n)$ の予測モデルを考える。この時

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{m=1}^M \mathbf{a}(m)\mathbf{x}(n-m) + \sum_{m=1}^M \mathbf{b}(m)\mathbf{y}(n-m) + \mathbf{u}(n) \quad (5)$$

は、多変量自己回帰モデル(3)の一種とみなすことができる。ここで、このモデルの情報量基準 AIC は、

$$AIC(M) = N \log \|\mathbf{d}_M\| + 2r(r+l)(M+1) \quad (6)$$

である。

さて、このようにして将来の $\mathbf{x}(n)$ を予測するモデル

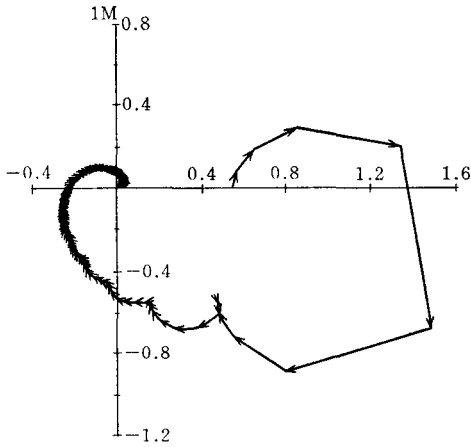


図 2 荒天中での操舵手の周波数応答
(長周期の膨みに注意. ナイキストプロット)

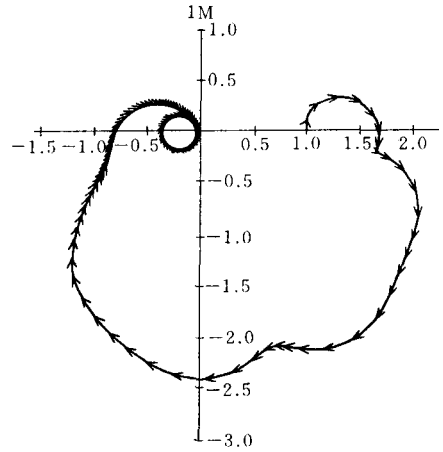


図 3 自動操舵装置の周波数応答

が得られたとして、次にこのシステムの制御問題を考える。制御問題では、(5)のような時系列モデルをそのまま用いるのではなく、状態空間表現と呼ばれるモデルに変換して統一的に取り扱うのが普通である。ただしその変換は一意的ではなく、場合により適切な変換を選ぶ。ここでは、次のような状態空間を用いる[1]。すなわち $x(n)$ から新しく

$$\begin{cases} z_n(1) = x(n) \\ z_n(i) = z_{n-1}(i+1) + a(i)z_{n-1}(i) \quad i=2, \dots, M-1 \\ z_n(M) = a(M)z_{n-1}(1) \end{cases} \quad (7)$$

のような要素からなる状態変数 $Z(n) = (z_n(1)^t, \dots, z_n(M)^t)^t$ を定義し、モデル(5)を状態空間モデル

$$\begin{cases} Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n) \\ X(n) = HZ(n) \end{cases} \quad (8)$$

に変換する。ここで、

$$\Phi = \begin{pmatrix} a(1) & I & & & \\ a(2) & & 0 & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ a(M-1) & & & & I \\ a(M) & 0 & & & 0 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} b(1) \\ b(2) \\ \vdots \\ b(M) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$W(n) = \begin{pmatrix} u(n) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad X(n) = (x(n)^t), \quad Y(n) = y(n),$$

$$H = [I \ 0 \ \dots \ 0]$$

である。

次にこのようなモデルによって動くシステムの、2次

形式の評価関数

$$I = E \left[\sum_{n=1}^J X(n)^t Q X(n) + Y(n-1)^t R(n) Y(n-1) \right] \quad (10)$$

のもとでの最適制御問題を考える。ここで、 Q は状態変数 $X(n)$ への重み係数、 R は舵等の操作変数 $Y(n)$ への重み係数である。この時、最適制御則はリカッチの方程式を解くことにより

$$Y(n) = G(n) Z(n) \quad (11)$$

の形式のフィードバック制御則で与えられる。 J を長くとれば $G(n)$ は、一定値 G になる(固定ゲイン型)。

著者の開発したオートパイロットは、この原理によって動くシステムで、出力として船首の希望針路からの偏差を、入力として舵を用いた最適制御型オートパイロットである。1976年に小型の練習船を使って初めて実験試験に成功した。図4は、3000トンクラスの中型船に適用した例である。この図において右図は、船に搭載された従来型のオートパイロットによる実験成績、左図は、著者らの開発したものの例である。明らかに最適型の方が、少ない舵角量で船首の変動を抑えていることがわかる。舵角量が少ないことは、船首揺れ以外の運動、特に横揺れも軽減することもわかっている。

このオートパイロットはさらに拡張され、現在では外乱適応型(Noise ADaptive CONTroller; NADCON)オートパイロットと呼ばれる適応型システムになっている[5]。このオートパイロットは、もともと局所的に非定常な時系列のあてはめに使われた、AICによるオンラインの最適モデル選択法を利用したシステムである。

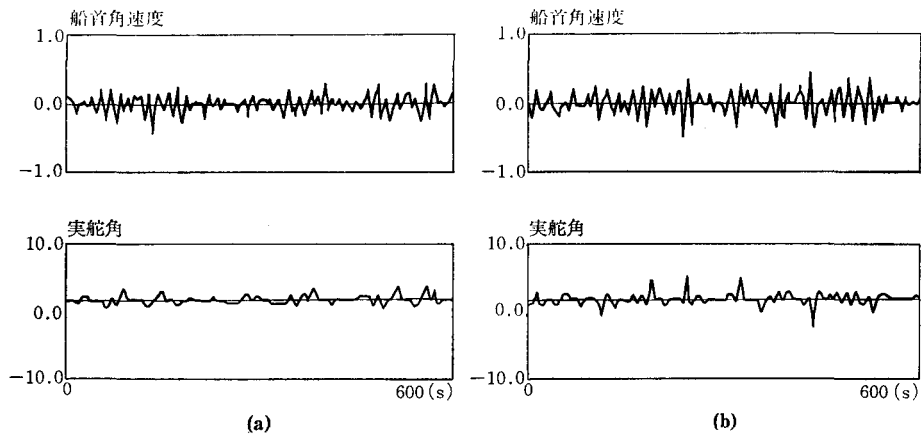


図 4 最適型オートパイロット(a)と従来型オートパイロット(b) (実船実験)

まず、 $N1$ 個のデータにモデル $AR1$ があてはめられ、そのときの AIC は $AIC1$ であったとする。その後 $N2$ 個のデータが入ってきて、このデータに対して $AR2$ があてはめられそのときの AIC は $AIC2$ であったとし、また以前のデータを含む $N1 + N2$ 個のデータに対しては $AR3$ があてはめられ AIC が $AIC3$ であったとする。この時、前半と後半が別々のモデルとして取り扱った方が良いとする場合の AIC は、

$$AIC4 = AIC1 + AIC2 \quad (12)$$

であるから、 $AIC4$ と $AIC3$ を比べ $AIC4$ が小さかった場合、新しく後半の $AR2$ モデルを、逆の場合 $N1 + N2$ 個のデータにあてはめた $AR3$ モデルを採用する。こうして、一定時間毎に最新モデルが採用されるので、状況に適応した制御がかけられることになる。図 5 は、このような方式で制御した結果である。図において制御の途中から突然風力が増加し、上の原理で比較した結果新しいモデルによる新しいゲインが選択された結果、制御成績が向上している状況を示している。

5. 船用主機関の回転数制御への応用

船用ディーゼル機関などの主機関には、必ずガバナー

(調速機)と称するプロペラの回転数制御のための自動制御機構がついている。この機構も、船のオートパイロットと同じ位の歴史をもつ古い制御機構である。そのメカニズムは、いまでもワットが考案したプロペラ回転によるシャフト遠心力を応用した機構が主流である。しかし最近、このガバナーを電子式にした電子ガバナーが登場した。著者らは、この電子式ガバナーを改良し⁴、で示した方法を適用して、新しく制御用電子計算機を用いた最適型ガバナーを設計することにした。

ところで、プロペラの回転数変動は船の場合なぜ起こるかを考えてみよう。その主因は、激しく変動する気象、海象の変化による船体運動の変動にあることは明らかであるので、具体的な設計に入る前に、3. で述べた雑音寄与率による解析によって、プロペラ回転数変動に影響を与える船体運動を探ることとする。この解析によって選択された運動を自己帰帰モデルによる回転数変動の予測のために使えば、回転数の変動のみをフィードバックしている従来のガバナーに比較して、制御効果が向上することが予想される。

図 6 は約 500 トンの小型練習船の計測システムから得られた回転数変動量 (RPM)、ガバナー信号量 (GV)、

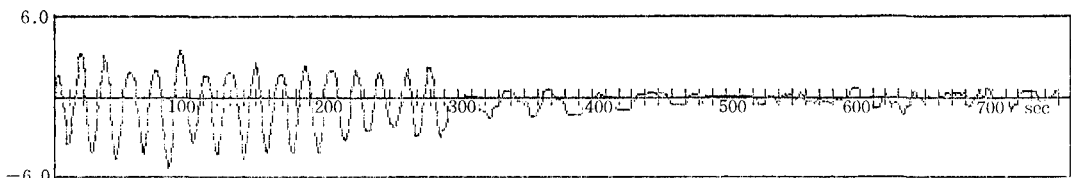


図 5 外乱適応型オートパイロット実船実験例 (船首搖)
(200 秒付近で突然風速が変わっているが、300 秒以降適応している)

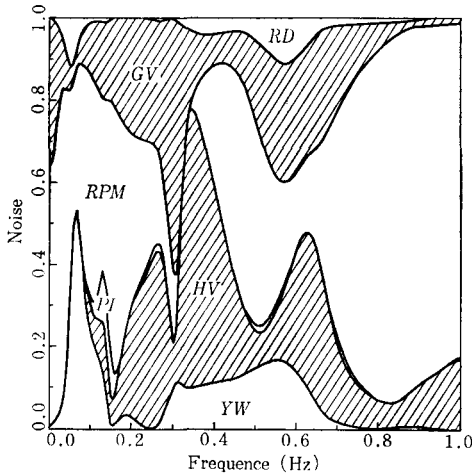


図 6 回転数変動(RPM)への船首揺れ(YW), 上下揺れ(HV), 縦揺れ(PI), ガバナー量(GV), 舵角量(RD)の雑音寄与率

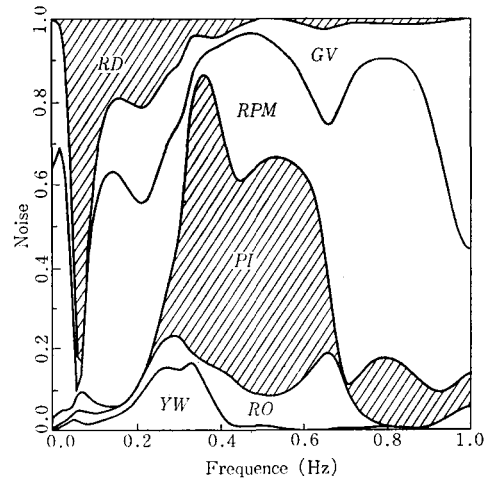


図 7 回転数変動(RPM)への船首揺れ(YW), 横揺れ(RO), 縦揺れ(PI), ガバナー量(GV), 舵角量(RD)の雑音寄与率(大舵角を取った場合)

上下揺れ(HV), 縦揺れ(PI), 船首揺れ(YW), 舵角量(RD)の信号時系列を使って, 回転数変動に対するこれらの変数からの3で述べた雑音寄与率を示したものである。さらに図7は, 舵の影響を調べるため舵を手動によりかなり大きく取った場合の, 回転数変動への寄与率を示したものである。これらの図から, 次のようなことがわかる。

- (1) 上下揺れ, 縦揺れを比べると, 両者とも回転数変動への寄与は大きい, どちらかといえば, 上下揺れの方が回転数変動への寄与が大きい。
- (2) 横揺れからの寄与は少ない。
- (3) 舵角の影響も, かなり大きい。

これらの原因は, 船舶工学的にそれぞれ理由がつけられるが詳しいことは略す[6]。

こうして, プロペラ回転数変動に影響を与える船体運動の第1候補は, 上下揺れであることがわかったので, 次に簡単なシミュレーションでこのことを検証してみる。方法は, まず回転数とガバナーを変数とした自己帰帰モデルを, 実データにあてはめゲインを計算する。そして, モデル(8)の $W(n)$ 項に, 実データと分散を合わせた白色雑音を加える。次に上下揺れを加えた1入力2出力の自己帰帰モデルを作り, 回転数変動とガバナーに対する評価関数の重み比を同じ(1:1)にし上下揺れへの重みを0にした評価関数を最小にするゲインを使って, 前と同じシミュレーションを行ない両者を比較する。このようなシミュレーション結果から, 回転数変動

の予測のために上下揺れを使った方が, ほぼ同じ程度のガバナー量で, プロペラ回転数変動が標準偏差でみて約2/3に抑えられることがわかった[6]。

筆者らは, 現在東京商船大学の小型練習船汐路丸を使って, このような最適ガバナー系を設計中である。図8は最近得られた実船試験の結果の一例で, 上下揺れを入れずにガバナーのみで回転数変動を制御した例である。図において最初の500秒間は, 古典的な比例・積分型制御によるガバナーにより計算機制御した例, それ以後は最適型ガバナーによる結果である。サンプリング周期は, 0.2秒, 海面状況は風力3であった。図から最適型の方が良い成績であることがわかる。

6. あとがき

ここでは, 赤池によって提唱された時系列データの自己帰帰モデルによる統計的同定と最適制御の理論を, 船の実際のデータにあてはめ, その動揺時系列の予測, 操舵系の周波数応答を推定した。また, 著者らが行ってきた自己帰帰モデルによる最適自動操舵系や最適船用ガバナーシステムの開発について, 実際の時系列を示しながら解説した。この設計法の特徴は, 実際のデータを基本としていることと, 多変数制御系の設計が可能であることにあり, その意味で実用的な方法である。拙文が他の不規則なシステムの解析, 制御問題の参考になれば, 望外の幸せである。

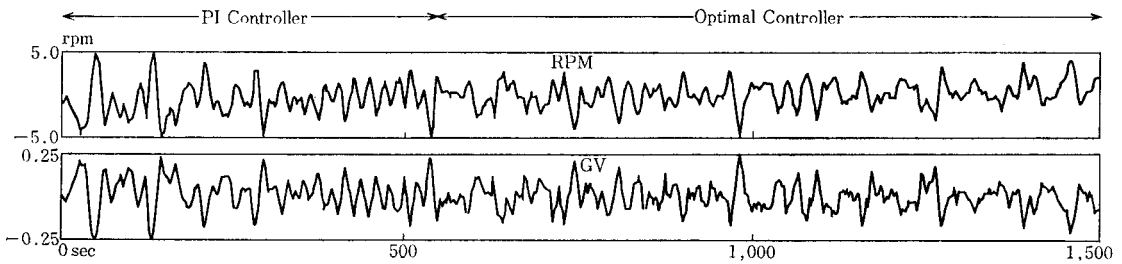


図 8 船用機関の最適ガバナーによる制御 (500秒まで従来型, それ以降最適型)

参 考 文 献

- [1] 赤池弘次, 中川東一郎: ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 1972.
- [2] 山内保文, 大津皓平他: データ解析の動向, (1), (2), 日本造船学会誌, 第589, 591号, 1978.
- [3] H. Akaike: A New Look at the Statistical Identification Model, IEEE, Trans. AC-19, 1974.
- [4] K. Ohtsu, M. Horigome and G. Kitagawa ; A New Auto Pilot Design through a Stochastic Model, Automatica, Vol. 15, 1979.
- [5] K. Ohtsu, M. Horigome and G. Kitagawa ; A Robust Autopilot System against the Various Conditions ; Proceed. of the 3rd ISSOA-79, 1979.
- [6] K. Ohtsu et al.: An Optimal Marine Engine Control Using Multi-variate Auto Regressive Model, Proceed. of IFAC Work Shop SAMS-89, 1989.

「論文・研究レポート」の原稿募集

ORの実践をわかりやすい事例を中心に紹介してほしいという会員からの要望がある一方で、OR理論の展開あるいは手法の開発など学術的な研究報告も忘れないでという注文も根強くあります。

本誌では「論文・研究レポート」という審査論文欄を設けております。この論文・研究レポートでは、特に、経営の実践に役立つ理論研究、手法あるいはシステムの開発、概念フレームおよび方法論等を扱った研究のご寄稿を歓迎いたします。

投稿要領：学会原稿用紙36枚 (25字×12行) 以内 (図表を含む)

投稿先はOR学会事務局OR誌編集委員会宛。

なお原稿のコピーを2部添付してください。

レフリー審査の結果、改訂をお願いしたり、採択されない場合があることをご了解下さい。また、原稿は、採択・不採択にかかわらず、原本、コピーともお返しできません。

(OR誌編集委員会)