HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	生態系モデルのデータ同化
Author(s)	岸, 道郎
Citation	水産海洋研究, 66(1), 53-55
Issue Date	2002-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/33949
Type	journal article
File Information	66-53.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

水産海洋研究　66(1)　53–71，2002　　Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.

水産海洋地域研究集会

水産海洋分野におけるモデル研究の最前線

日　　時：2001年8月21日
場　　所：中央水産研究所講堂
コンビーナー：伊藤進一（東北水研），大関芳沖（中央水研），岸　道郎（北大院水産），友定　彰（中央水研）

1．生態系モデルのデータ同化……岸　道郎
2．データ同化の最前線と生態系モデルへのインパクト……石川洋一・淡路敏之・豊田隆寛
3．閉鎖性および開放性沿岸域における海水流動と栄養塩・水質動態の観測と解析—英虞湾および鹿島灘を例として……灘岡和夫・八木　宏・上野成三
4．POM+NEMUROモデル……小松幸生
5．地球フロンテア+NEMUROモデル……山中康裕・岸　道郎
6．サンマ仔稚魚の逆追跡モデル……岩橋雅行・磯田　豊
7．貧酸素水塊の発生とそれに伴う魚の逃避行動のモデル……関根雅彦
8．標識放流データを用いた魚類回遊モデルのデータ同化……伊藤進一
9．ECOPATH+ECOSIMモデルの現状と問題点……袴田高志
10．まとめ……コンビーナー

1．生態系モデルのデータ同化

岸　道郎（北大院水産）

1．はじめに

データ同化は海洋物理ではここ20年ほど急速に使われるようになってきた手法であることはご承知のことと思います．海水の運動を記述する方程式はニュートンの力学にもとづいたものであって，方程式系は「正しい」ものなので，数値計算をしていく過程で結果が観測されたものと異なっていくのは，「解いた式が間違っている」からではなくて，「解いた過程が間違っている」からなのだ，という考えにもとづいてデータ同化手法が利用されているのです．すなわち，数値モデルを解くときには初期条件や境界条件が必要ですが，必ずしもその値が全領域でカンペキに分かっているわけではない．したがって方程式を解いていくうちに実際の現象とは違った答えになっていくので，それを修正するために（すなわち初期値や境界値を作り直すために）データ同化手法が使われるのです．気象学ではずっと昔から数値予報などに利用されてきました．

海水の運動を記述する方程式で求める変数は，流速3方向，水温，塩分，の5つしかありませんが，それを空間格子に区切って計算することを考えると，すべての格子点でこの5つの変数が求まる必要があるので，実際には例えば水平鉛直方向に100×100×10に区切ると50万個の未知数があることになります．この50万個の未知数をすべて初期条件として正確に与えることはできませんから，一般に海洋のデータ同化は未知数の数よりデータの数が少ない場合が多く，そういったときにどのようにするのか？　また，観測値が必ずしも正しい値かどうかも分からないので，その誤差補正はどうするか？　などいろいろなノウハウであるわけです．データ同化夏の学校が毎年むつ市で開かれていますが，物理の分野での講習会や演習が中心になっており，いろいろなノウハウの提供が行われてきています．

しかし，このような「データ同化」は気象や海洋物理の特殊用語であって（例えば，EOF解析（経験的直交関数解析）はPCA（主成分分析）と同じであるように），データ同化で使われるいろいろな手法（カルマンフィルターとか変分法とか）はもっと一般的にはオペレーションズリサーチで使われる手法です．したがって，すごく基礎的なことを知りたい方は，オペレーションズリサーチの教科書をご覧になることをお勧めします．私も教科書に書いてある以

上のことはよく知りません．また，いろいろな勾配法（共役勾配法とか準ニュートン法など）は，例えばNumerical recipes (ISBN=0521576083) などにプログラムとして入っています．最近，遺伝的手法というのが生態系モデルのような非線形系には有効だというのが分かってきています．例えば，教科書として川面他 (2000) は手頃と思います．

2. 生態系モデルにおけるデータ同化

では，生態系モデルにおけるデータ同化はどんなことをするのか？です．物理の場合と同じように，「解くべき方程式系は正しい」ので「解いた過程が間違っている」とする考えがあります．この場合は観測値（例えば*Chl*-a, NO_3など）は誤差はあってもとにかく正しいから，それにモデルの結果を同化させればよいのです．つまり物理の手法とまったく同じですね．一番簡単な方法は（これは「データ同化」とは言わないんだそうですが……）nudging（日本語でも「ナッジング」といいます．英和辞典では「肩をつつく」という意味です）で，計算結果を無理矢理観測結果に近づけるようにします．Pを*Chl*-a濃度を表す変数とすると

dP/dt＝生産，消費項＋流れによる移流や拡散項＋$\alpha(P^*-P)$

P^*は観測値でαは適当な係数です（単位は｛時間｝$^{-1}$）．このようにNudgingすると*Chl*-aだけが「正しい」値に近づきますが，NO_3などは近づきません．そこでNをNO_3濃度を表す変数として

dN/dt＝生産，消費項＋流れによる移流や拡散項＋$\beta(N^*-N)$

のようにして，またまたnudgingします．すると確かにNO_3も観測値に近づきます．でも，物理のように水温，塩分と流れが密接に結びついている場合でさえ，nudgingには細心の注意が必要であるのです（現象の時間空間スケールが異なるので）．もともと，多くの種類の植物プランクトンをひとつの変数Pで置き換えているのですから，上記のように次々と変数をnudgingしたら，いろいろまずいことが起こることが想定されます．物理—生態系結合モデルでは，もし，物理量をデータ同化で計算結果を修正していくようなことをした場合，生態系のコンパートメントを同じ手法で同化するとうまくいかない場合もあるのではないかと思います．それはモデルの物理環境の帰結として計算された生態系の分布と，実際の生態系の分布とが一対一に対応していないからです．したがって両方をデータ同化で修正すると生態系のコンパートメントは新しいモデルの物理場に対応して，同化した時点からまた「変化」します．実際の海では実際の物理場に応じて「変化した後」が観測されているのですから，モデルの初期条件を修正するのとはちょっと違ったことをやっていることになります．ただ，今まで出版された論文（例えば，McGillicuddy *et al.*, 1998）ではうまくいっているようです（うまくいったものしか論文になっていない!?）．

では，データ同化は生態系モデルではどのように使われるか? 最近では，各コンパートメント間の関係式に登場する多くのパラメータの推定に使われることが多くなっています．また，それが「はやり」でもあります．すなわち，簡単に書けば以下のようなことをするわけです．例えば右辺第一項は増殖項で第二項は減衰項とします．κとγは生物パラメータです．

$$\frac{dP}{dt}=\kappa P-\gamma P^2$$

これを差分式になおします．

$$\frac{P_n-P_{n-1}}{\Delta t}=\kappa^* P_{n-1}-\gamma^* P_{n-1}^2$$

$$P_n=P_{n-1}+\Delta t(\kappa^* P_{n-1}-\gamma^* P_{n-1}^2)$$

ここでパラメータに*をつけたのは，これからデータ同化で修正するべき値だからです．

$$f=\sum_n (P_n-P^*)^2$$

P^*は観測値の時系列で例えば毎日のデータが10日分あれば，fは10個の差の和となります．fがなるべく小さくなるようにκ^*, γ^*を決めるわけですね．ここで，この生態系モデルがボックスモデルであれば上記の場合，データセット10個（すなわちn=10）で未知のパラメータは2個です．鉛直1次元モデルで考えると鉛直方向に10層に切った場合，全部の層に観測値が10日分あれば，n=100ですが，未知のパラメータが2個です．ただし，深さ方向に水温や光が変わってそれに伴ってκやγが変化するときは話が変わってきますが…．また上式のfの右辺はPの値によって重みをつける必要もあったりします．それでも，生態系モデルのコンパートメントが1個だと上記の話で分かりやすいかと思いますが，もっとも簡単なモデルでも，NPZモデルといってコンパートメントは3個あります．ですから，一般には行列式での操作となるのです．基礎的な論文としてはLawson et al., (1995,1996) をお勧めします．

例として私と学生が最近行ったNEMURO（PICES CCCC MODEL Task Team 低次生産モデル =North pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography）のパラメータ同定の概念図を図1に，データ同化で厚岸沖の観測値にいくつかのパラメータセットを修正し，Boxモデルを用いて計算した結果を図2に示します．

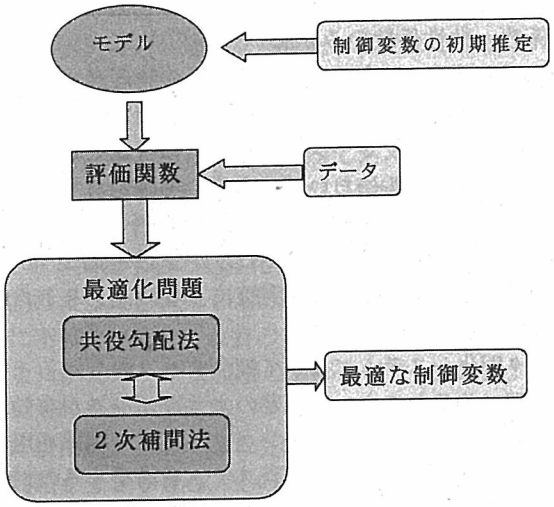

図1. NEMURO（PICES CCCC MODEL Task Team 低次生産モデル=North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography）のパラメータ同定の概念図

3. 水産海洋における展望

水産海洋への応用を考えるとき，魚の資源変動を解明するのが水産海洋学の最終目標である，と勝手に思わせていただきます．そして資源変動は初期減耗の原因を追及すればある程度解明できる，と勝手に思わせていただきます．そしてまた，その初期減耗は物理環境との関係を追求すればある程度解明でき，はたまた初期餌料との関係を追求すればもっとよく解明でき，被食者との関係を解明すればカンペキだ，と勝手に思わせていただきます．この勝手連の上に立って考えますと，数値モデルは上記の仮定のうちどれが大事かを感度解析したりするのに役立つと思うわけです．で，低次生産モデルと物理による拡散モデルと高次捕食者による被食モデルとのそれぞれの未確定パラメータを

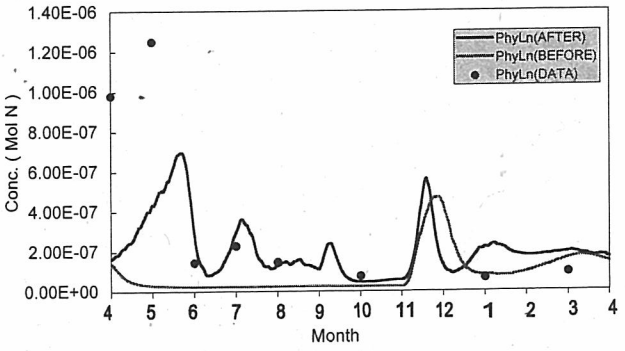

図2. データ同化で厚岸沖の観測値にいくつかのパラメータセットを修正し，Boxモデルを用いて計算した結果

データ同化で求めるためには，もとになるデータが必要であって，どこにどれくらいどんな魚が住んでいるかが分からない（だって漁獲データしかないわけで）現状ではかなり応用は難しいと言わざるを得ません．しかし，それでも全く不可能ではないと思うので，優秀な学生が来たら，はたまたヒマができたら挑戦したいところです．

引用文献

川面恵司・横山正明・長谷川浩志 (2000)「最適化理論の基礎と応用—GAおよびMDOを中心にして—」（コロナ社）

McGillicuddy, D. J., Jr., D. R. Lynch, A. M. Moore, W. C. Gentleman, C. S. Davis and C. J. Meise (1998) An adjoint data assimilation approach to diagnosis of physical and biological controls of Pseudocalanus spp. in the Gulf of Maine-Georges Bank region, Fish. Oceanogr., **7**, 205–218.

Lawson, L. M., Y. H. Spitz, E. E. Hofmann and R. B. Long (1995) Data assimilation applied to a simple predator-prey model, Bull. Math. Biol., **57**, 593–617.

Lawson, L. M., Hofmann, E. E. and Spitz, Y. H. (1996) Time series sampling and data assimilation in a simple marine ecosystem model. Deep-Sea Research II, **43**, 625–651.