



Title	海洋におけるエコシステムの勉強 III
Author(s)	岸, 道郎
Citation	水産海洋研究, 54(1), 88-99
Issue Date	1990-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/33946
Type	journal article
File Information	54-88.pdf



海洋におけるエコシステムの勉強 III

岸 道 郎*

4. 単位の換算と係数法

当初の予定では、エコシステムモデルを作成するときに生じる単位の換算についてこの章で触れる予定でおりましたが、話しがあまりにも抽象的に過ぎるという御忠告や、しょうもないことをエンエンと書くな、という御忠告をいただきましたので、「このまま論文にしてもよい」、というような内容の伴ったものを作っていく、その段階で生ずる問題点をその都度考察していく、という方法に切り換えていこうと思います。

そこで、改めの4章

4. 芦ノ湖オオクチバスのエコシスシムモデルの作成

神奈川県淡水魚増殖試験場から、「芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルを作るから…」と2年も前に拝借したデータがそのままになっていますので、これを用いて「エコシステムモデルはこうやって作っていくのだ」という、私のつたないウバウを展開していくことにしたいと思います。

(1) 目的

芦ノ湖では、オオクチバスを毎年放流し、また、漁獲をしています。そこで、放流量の適正值や漁獲量の適正值を定量化することが必要となります。その目安となる値を求める、または、芦ノ湖のエコシステムの特徴を捉えることを目標としたい、と不敵にも考えました。

(2) データの収集

データを収集する前に、頭の中に描いておくことは、図4-1のような簡単なオオクチバスの「増える要因」「減る要因」です。この要因に係わりそうなデータを試験場や漁協からいただいているのですが、もちろん、その際には(1)の目的や私の意図を十分に説明します(そんなことは、当たり前ですが…)。

①オオクチバスの資源生態学的研究(昭和59年)全国湖沼河川養殖研究会、オオクチバス資源生態研究部会編
この本には、(1)体長と年齢 (2)捕食率 (3)空胃率の月

別変化 (4)餌の選択性の飼育実験 (5)産卵期 (6)芦ノ湖の漁獲量(昭和54年)、が載っています。

②神奈川県淡水魚増殖試験場報告12号(昭和50年)

この本には、(1)増肉効果 (2)芦ノ湖のプランクトンの観測値、が載っています。

③神奈川県淡水魚増殖試験場報告16号(昭和54年)

この本には、(1)芦ノ湖のプランクトンの観測値、が載っています。

④神奈川県淡水魚増殖試験場報告17号(昭和56年)

この本には、(1)芦ノ湖の釣りの状況、が載っています。

⑤神奈川県淡水魚増殖試験場報告18号(昭和57年)

この本には、(1)芦ノ湖のプランクトンの観測値 (2)芦ノ湖のワカサギの食性、が載っています。

(3) モデル

そこで、これらの本をよく読みまして、①よりオオクチバスの成魚のエサはワカサギが主体で自分の幼魚も食べるらしいこと、また、幼魚のエサはプランクトンが主体らしいこと、⑤よりワカサギはプランクトンの他にオ

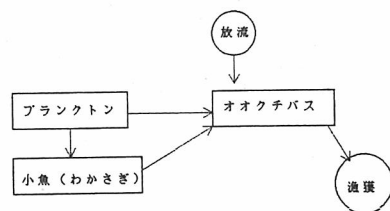


図 4-1 芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルの概念図 —その1—

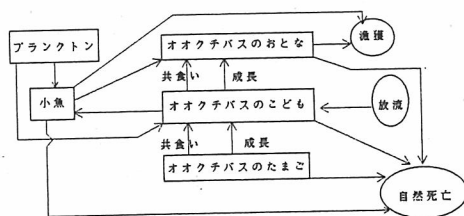


図 4-2 芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルの概念図 —その2—

* 東京大学海洋研究所資源環境部門

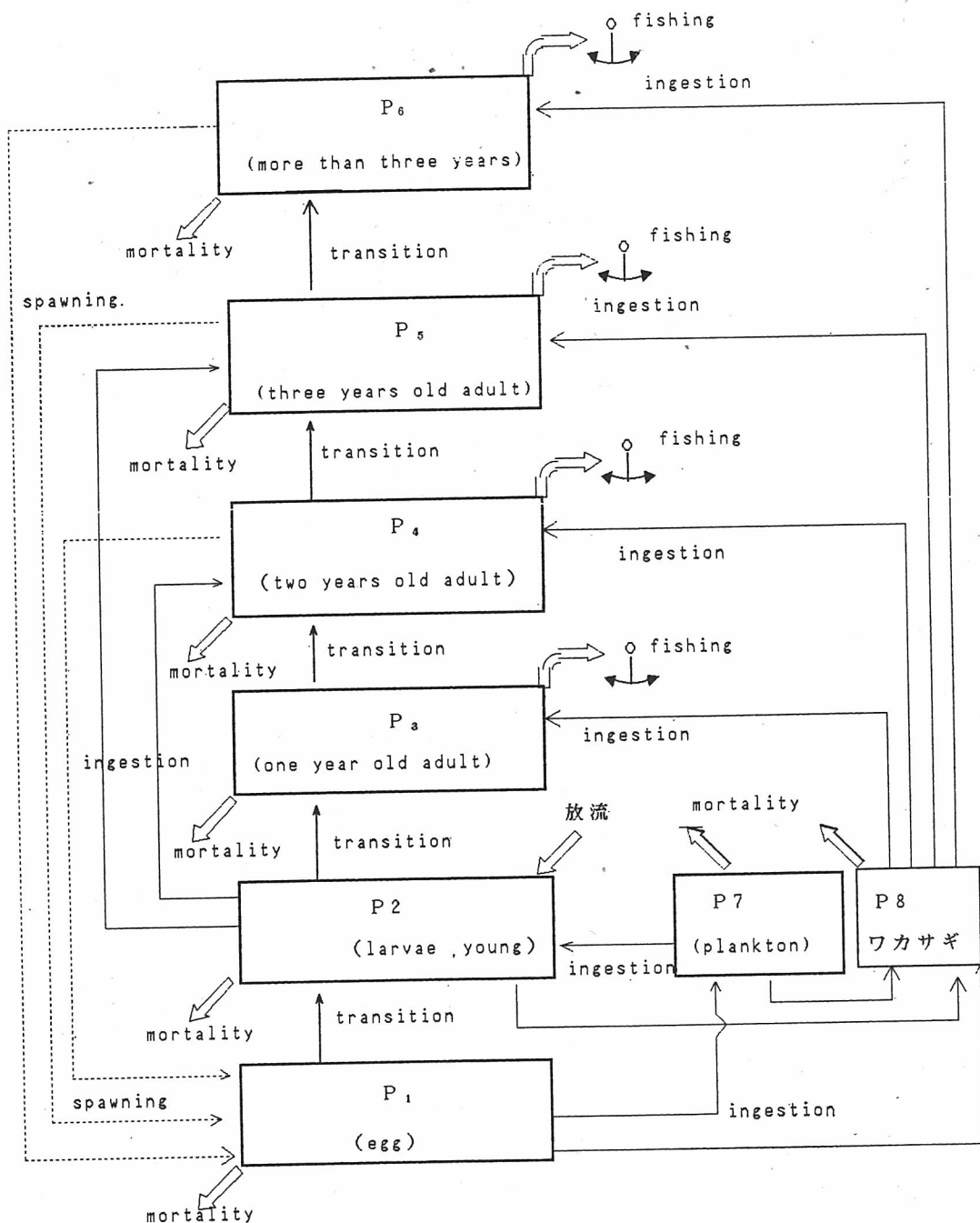


図 4-3 芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルの完成図

オクチバス等の幼魚も食べるらしいこと、が分かりましたので、図4-1を図4-2のように書き改めます。

さて、オクチバスやワカサギ、プランクトンの量をどんな単位で表すかを、次に考えます。上記の資料には、漁獲量は「尾」で載っています。一方、食性は体長の関数として述べられており、体長と重さの関係は調べられています。そこで、ここではオクチバスが芦ノ湖にどれだけいるかを「芦ノ湖全体で何年魚が何グラムいるか」で表します。そうして、オクチバスは4年以上生きるので年令別に分けて、図4-3のようなモデルを最終的に考えることにしましょう。図4-3のモデルの考察は「そのⅣ」で詳細に行う予定です。

(4) 単位の換算と計数法

ここで、単位について当初の目次通り、ちょっと触れておきたいと思います。生物がどれくらいいるかを定量する単位として、現在までのところ次のような方法が考えられてきています。それは、①数による計数（芦ノ湖にオクチバスが何匹いるか）、②バイオマスによる計数（芦ノ湖にオクチバスが何グラムいるか）、③CやN、Pによる計数（芦ノ湖にオクチバスの体内に蓄積された炭素、窒素またはリンが何グラムあるか）、④エネルギーによる計数（芦ノ湖のオクチバスを全部燃やすと何カロリーあるか）、などです。モデルを作るのにこれらの方法のうちどれを選択すればよいかは結構重要な問題です。

例えば、植物プランクトンの現存量（ S とする）を表す方法を考えましょう。植物プランクトンの観測をして単位を $\{mg\ Chl.\ a\ m^{-3}\}$ で測ったとします。ワカサギは数を測定（ W とする）して、単位は $\{匹\ m^{-3}\}$ で測ったとします。かりにワカサギが植物プランクトンを食べて成長するものとする、図4-4のような捕食の関係があるとして、ワカサギが植物プランクトンをいくら食べても体重は増えるけれども数は増えない訳です。数は、卵を生んだときにドッと増えるので、そしてまた、どれくらい親が卵を機嫌よく生むかは、きっと夏の間に食べた餌の量や質によっているのであろうけれども、これは、図4-4の関係からは全く分からない別の次元の問題な訳です。そうすると W と S の間の関数関係を

$$dW/dt = aS$$

というような式で表しても、右辺と左辺の単位が違うので無意味になります。

では、全ての生物を芦ノ湖に「何グラムいるか」というバイオマスで表すと便利なのですが、後で述べますが、今度は魚が産卵してもバイオマスの総和は変化しま

ワカサギ1匹が食べる速度 $(mg\ chl.\ a / indiv./d)$

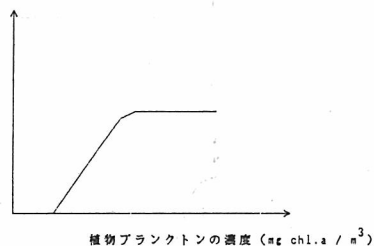


図4-4 たとえば、ワカサギが植物プランクトンを捕食するとき、捕食速度と餌濃度の関係。クロロフィルを1グラム食べるとワカサギはどれくらい増えるのだろうか？

せんから、産卵した後でどのように成長していくかが大変重要になってきます。また、バイオマスで定量した場合に一番困るのは、植物プランクトンが光合成して栄養塩を摂取する際の定量化です。すなわち、栄養塩のバイオマスというのはおかしいですね。なぜなら、芦ノ湖全体で窒素が何グラム、リンが何グラムという表し方はできますが、植物プランクトンが摂取する栄養塩のバイオマスは何グラムという表し方はできません。そもそも、植物プランクトンは二酸化炭素を光合成で同化するので、すなわち、バイオマスを考えるならば、炭素も考慮しなくてはならない訳です。にもかかわらず、本稿ではバイオマスで定量化するモデルを作っていくのですけれど…。

(例えば、LAEVASTU and LARKINS (1981) はベーリング海をいくつかの海域に区切って、各ボックス内の魚（プランクトンも含めて二十数種類ある）のバイオマスの年変化を数値シミュレーションしているのはみなさん周知のことと思います。日本では、多々良 (1981) や、科学技術庁振興調整費による富山湾で作られたモデル、日本海の資源量の変化予測を日本海区水産研究所が委託研究をしたモデルもバイオマスモデルですが、残念ながら「原著論文」にはなっていないようです。)

そこで、その困難を解消する手として、「窒素」とか「リン」という元素の動きだけに注目したモデルを考えることもよく行われます。ただ、その際に困るのは、植物プランクトンを測定する際に「窒素で何グラム」という測定はめったにしませんから、「クロロフィルが1グラムあったら植物プランクトン態の窒素はxグラム」という換算係数を求めておく必要があります。魚に関しても、「ワカサギ1グラム中に窒素yグラム」という値を求める必要がある訳で、この値は栄養状態や季節によって変化するのでまたまたやっかいです。(例えば、WALSH

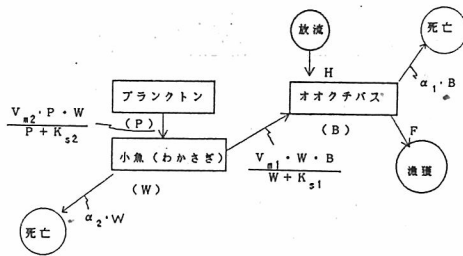


図 4-5 図 4-1 をもとにして, 簡単な演習をし てみよう

and DUGDALE (1971) や WALSH (1975), WROBLEWSKI and O'BRIEN (1976) などは主に窒素の循環に着目したモデルを作成しています。我が国の沿岸域における富栄養化モデルは, 主に「リン」の循環に着目したものが作られていて, KISHI *et al.* (1978), 中田ほか (1983), KISHI and YAGI (1983), MATSUKAWA and SUZUKI (1985) などが三河湾をフィールドにモデルを作っています。また, 瀬戸内海の赤潮モデルを岸ほか (1985), IKEDA and KISHI (1986), KISHI and IKEDA (1989) が作っているのも, 我田引水ながら有名です。魚の資源モデルでは, ANDERSEN and URSIN (1977) は北海におけるリンの物質循環モデルを考え, これに魚の成長, 魚の成長段階による餌の選択の変化などを加えて複雑なリンの物質循環モデルを作成しているのは皆さんよく御存じでしょう。

ついでにエネルギーによる換算というのは, 太陽エネルギーが 1 日に x カロリー/戸ノ湖に放射される。そのうち, y % を植物が同化する。そのうち z % が魚が固定する。というように, 太陽エネルギーの固定率から順次計算する方法で, この方法は計算が簡単になるので昔 (計算機がボロだった頃) はよく用いられたのですが, 固定率がいい加減な値になるので近頃はあまり流行りません。(例えば, KREMER and NIXON (1978) は Narragansett 湾において, BROWDER (1983) は Mexico 湾で, FERGASON and ADAMS (1979) を North Carolina のアマモ場において, それぞれエネルギーフローに基づいたモデルを作成しています。)

(5) 定常解

ここで, 定常解と微分方程式の作り方について学ぶために, 図 4-1 のモデルについて簡単な定式化を試みましょう。オオクチバスのバイオマス B , ワカサギのバイオマス W , 植物プランクトンのバイオマス P , とすると,

$$dB/dt = H - F + \beta_1 \cdot V_{m1} \cdot W \cdot B / (W + K_{s1}) - \alpha_1 \cdot B$$

$$dW/dt = \beta_2 \cdot V_{m2} \cdot P \cdot W / (P + K_{s2}) - \alpha_2 \cdot W - V_{m1} \cdot W \cdot B / (W + K_{s1})$$

$$P = P_0 \quad (4-1)$$

というような式が作れます (というより, 作ります)。上の 3 つの式を図式化すると図 4-5 のような関係があると仮定したことになります。すなわち, 捕食は飽和型の関数形を (増肉係数 β), 死亡はバイオマスに比例した形を (死亡率 α), 放流 (H) と漁獲 (G) とプランクトン量 (P_0) は簡単のため一定としました。

定常解の求め方を思い出してください。 $d \star / dt$ を 0 とおくのです。

$$0 = H - F + \beta_1 \cdot V_{m1} \cdot W \cdot B / (W + K_{s1}) - \alpha_1 \cdot B$$

$$0 = \beta_2 \cdot V_{m2} \cdot P \cdot W / (P + K_{s2}) - \alpha_2 \cdot W - V_{m1} \cdot W \cdot B / (W + K_{s1})$$

$$P = P_0 \quad (4-2)$$

これを, 連立方程式と思って解くと, 定常解が得られます (これも一意ではありません)。

【演習問題 5】 (4-2) の定常解を求めなさい。

【演習問題 6】 (4-1) をパソコンか計算機で解きなさい。ただし,

$$B(0) = 150000g, \quad W(0) = 300000000g,$$

$$P(0) = 3000000000g, \quad H = 5000000g \cdot y^{-1},$$

$$G = 1000000g \cdot y^{-1}, \quad V_{m1} = V_{m2} = 0.2,$$

$$K_{s1} = 150000000g, \quad K_{s2} = 1500000000g,$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.02 d^{-1}, \quad \beta_1 = \beta_2 = 0.3,$$

とします。(理由は次回に説明します, 多分)

【宿題?】 図 4-3 のエコシステムモデルを (4-1) にならって考えなさい。

< 前回の演習の略解 >

【演習問題 3】 $du/dt = -\alpha \cdot u$ について差分方程式を 4 通り作ってみよう。ただし, $\alpha = 0.2, u(0) = 20, \Delta t = 0.1$ とします。作ったら FORTRAN か BASIC でプログラミングしてみよう。ついでにパソコンで計算しよう。

【解答】

① 前方差分

$$P^{(n+1)} = -\Delta t \cdot \alpha \cdot P^{(n)} + P^{(n)}$$

② 後方差分

$$P^{(n+1)} = P^{(n)} / (1 + \Delta t \cdot \alpha)$$

③ 中央差分

$$P^{(n+1)} = -2 \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot P^{(n)} + P^{(n-1)}$$

④ ルンゲクッタ差分 (松野スキーム)

$$P^{(n+1)*} = -\Delta t \cdot \alpha \cdot P^{(n)} + P^{(n)}$$

$$P^{(n+1)} = -\Delta t \cdot \alpha \cdot (F^{(n)} + P^{(n+1)*}) / 2 + P^{(n)}$$

I	ZENPOH	SABUNN	KOHCHOH	SABUNN	CHUUOU	SABUNN	LUNGE	KUTTA	kaiseikikai
1	20.000		20.000		20.000		20.000		19.604
8	17.363		17.411		17.787		17.387		17.043
15	15.073		15.158		15.004		15.116		14.816
22	13.085		13.196		13.573		13.141		12.881
29	11.360		11.488		11.191		11.425		11.198
36	9.862		10.001		10.429		9.932		9.735
43	8.561		8.706		8.262		8.635		8.463
50	7.432		7.579		8.108		7.507		7.358
57	6.452		6.598		5.984		6.526		6.396
64	5.601		5.744		6.428		5.674		5.561
71	4.862		5.001		4.179		4.932		4.834
78	4.221		4.353		5.254		4.288		4.203
85	3.665		3.790		2.703		3.728		3.654
92	3.181		3.299		4.495		3.241		3.176
99	2.762		2.872		1.440		2.818		2.761
106	2.398		2.500		4.090		2.449		2.401
113	2.081		2.177		0.291		2.129		2.087
120	1.807		1.895		4.008		1.851		1.814
127	1.569		1.650		-0.835		1.609		1.577
134	1.362		1.436		4.243		1.399		1.371
141	1.182		1.250		-2.026		1.216		1.192
148	1.026		1.088		4.812		1.058		1.036
155	0.891		0.948		-3.378		0.919		0.901
162	0.773		0.825		5.761		0.799		0.783
169	0.671		0.718		-4.996		0.695		0.681
176	0.583		0.625		7.164		0.604		0.592
183	0.506		0.544		-7.008		0.525		0.515
190	0.439		0.474		9.133		0.457		0.447
197	0.381		0.412		-9.574		0.397		0.389
204	0.331		0.359		11.822		0.345		0.338
211	0.287		0.313		-12.895		0.300		0.294
218	0.250		0.272		15.444		0.261		0.256
225	0.217		0.237		-17.233		0.227		0.222
232	0.188		0.206		20.285		0.197		0.193
239	0.163		0.180		-22.931		0.171		0.168
246	0.142		0.156		26.726		0.149		0.146
253	0.123		0.136		-30.438		0.130		0.127
260	0.107		0.118		35.276		0.113		0.110
267	0.093		0.103		-40.347		0.098		0.096
274	0.080		0.090		46.609		0.085		0.083
281	0.070		0.078		-53.439		0.074		0.072
288	0.061		0.068		61.620		0.064		0.063
295	0.053		0.059		-70.747		0.056		0.055

図 4-6 演習問題【3】の解答 (BASIC)

プログラム並びにその結果は、図 4-6 が BASIC のもので、図 4-7 が FORTRAN のものです。アウトプットについては、それぞれ、少々工夫を凝らしました。中央差分は不安定であることがわかります。(アウトプットは、紙面の都合で 7 ステップごとになっていますが、中央差分では、1 つおきに大小を繰り返す不安定が起きます) また、解析解 $u=20e^{-0.2t}$ の値も記入しておきました。

【演習問題 4】

$$\begin{aligned} dA/dt &= \alpha CA - \beta AB \\ dB/dt &= \beta AB - \gamma BC \\ dC/dt &= \gamma BC - \alpha CA \end{aligned} \quad (1-8)$$

について差分方程式をルンゲクッタと前方差分で作ってみよう。ただし、 $\alpha=0.2$, $\beta=0.1$, $\gamma=0.3$, $A(0)=20$, $B(0)=20$, $C(0)=20$, $\Delta t=0.1$ とします。作ったら FORTRAN か BASIC でプログラミングしてみよう。ついでにパソコンで計算しよう。

【解答】

差分方程式は省略します。FORTRAN で作ったプログラムと計算結果のみ図 4-8 に示します。図 4-8 の (a) はプログラム、(b) は、 $\Delta t=0.1$ のものを毎タイムステップで (b-1 は前方差分、b-2 はルンゲクッタ差分)、(c) は、 $\Delta t=0.025$ のものを 4 タイムステップおきでアウトプットしてあります。本来、(b) と (c) は全く同じ結果になるねばならないのですが、このように違った様子になるのは、微分量 (Δt) を有限の値に置き換えたために生じた誤差が積もり積もっていくためです。ですから、 Δt のとりかたひとつにも慎重を要する訳です。

また、(b)、(c) とともに前方差分は $A=T$, $B=0$, $C=0$ のような解(エコシステムの勉強—Ⅱ—参照)に、ルンゲクッタ差分は $B=\alpha T/(\alpha+\beta+\gamma)=20$, $C=\beta T/(\alpha+\beta+\gamma)=10$, $A=\gamma T/(\alpha+\beta+\gamma)=40$ の解を中心にして振動していますが、いずれの解も不安定のように見受けられます。

海洋におけるエコシステムの勉強—Ⅲ

```

000001      DIMENSION P(500),Q(500),R(500),S(500),ALP(4)
C *** INITIAL DATA AND PARAMETERS*****
000002      DO 101 I=1,4
000003      101 ALP(I) = 0.2
000004      P(1) = 20.
000005      Q(1) = 20.
000006      R(1) = 20.
000007      R(2) = 20.
000008      S(1) = 20.
000009      TS = 0.1
000010      IEND = 300
C *** ZENPOU SABUN *****
000011      DO 10 I = 1,IEND
000012      10 P(I+1) = (1.0 - TS*ALP(1)) * P(I)
C *** KOUHOU SABUN *****
000013      DO 20 I = 1,IEND
000014      20 Q(I+1) = Q(I) / (1.0 + TS *ALP(2))
C *** CHUUDOU SABUN *****
000015      DO 30 I = 2,IEND
000016      30 R(I+1) = (-2.0)*TS*ALP(3) * R(I) + R(I-1)
C *** RUNGE KUTTA SABUN**
000017      DO 40 I = 1,IEND
000018      S(I+1) = (1.0 - TS *ALP(4)) * S(I)
000019      40 S(I+1) = (S(I+1) + S(I)) * 0.5 * TS * ALP(4) * (-1.0) + S(I)
C *** OUTPUT SUBROUTINE WO YOSU *****
000020      CALL OUTPUT(P,Q,R,S,IEND)
000021      STOP
000022      END
000023      SUBROUTINE OUTPUT(P,Q,R,S,IE)
000024      DIMENSION P(500),Q(500),R(500),S(500)
000025      CHARACTER*1 LPOT(132)
000026      WRITE(6,101)
000027      101 FORMAT(1H0,'-10
*      20 I      P      Q      R      S')      10
000028      DO 200 J=1,IE,7
000029      DO 50 I=1,132
000030      50 LPOT(I) = ' '
000031      IPL1 = IFIX(P(J))*2 + 21
000032      IPL2 = IFIX(Q(J))*2 + 21
000033      IPL3 = IFIX(R(J))*2 + 21
000034      IPL4 = IFIX(S(J))*2 + 21
C ALLOCATION OF CHARACTORS
000035      LPOT(1)='P'
000036      LPOT(21)='Q'
000037      LPOT(41)='R'
000038      LPOT(61)='S'
000039      LPOT(IPL1)='P'
000040      LPOT(IPL2)='Q'
000041      LPOT(IPL3)='R'
000042      LPOT(IPL4)='S'
000043      WRITE(6,105) ( LPOT(I),I=1,61),J,P(J),Q(J),R(J),S(J)
000044      105 FORMAT(1H ,1X,61A1,I4,4F9.4)
000045      200 CONTINUE
000046      RETURN
000047      END

```

-10	0	10	20	I	P	Q	R	S
.	.	.	.	1	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
.	.	.	.	8	17.3625	17.4112	17.7871	17.3873
.	.	.	.	15	15.0728	15.1575	15.0036	15.1159
.	.	.	.	22	13.0850	13.1956	13.5726	13.1413
.	.	.	.	29	11.3595	11.4876	11.1911	11.4246
.	.	.	.	36	9.8614	10.0007	10.4291	9.9321
.	.	.	.	43	8.5610	8.7062	8.2616	8.6347
.	.	.	.	50	7.4320	7.5793	8.1084	7.5067
.	.	.	.	57	6.4519	6.5983	5.9840	6.5261
.	.	.	.	64	5.6011	5.7442	6.4275	5.6735
.	.	.	.	71	4.8624	5.0007	4.1785	4.9324
.	.	.	.	78	4.2212	4.3534	5.2538	4.2880
.	.	.	.	85	3.6645	3.7899	2.7027	3.7279
.	.	.	.	92	3.1813	3.2994	4.4946	3.2409
.	.	.	.	99	2.7617	2.8723	1.4402	2.8175
.	.	.	.	106	2.3975	2.5005	4.0901	2.4494
.	.	.	.	113	2.0813	2.1769	0.2913	2.1295
.	.	.	.	120	1.8069	1.8951	4.0082	1.8513
.	.	.	.	127	1.5686	1.6498	-0.8346	1.6094
.	.	.	.	134	1.3617	1.4362	4.2426	1.3992
.	.	.	.	141	1.1821	1.2503	-2.0265	1.2164
.	.	.	.	148	1.0262	1.0885	4.8118	1.0575
.	.	.	.	155	0.8909	0.9476	-5.3779	0.9194
.	.	.	.	162	0.7734	0.8249	5.7607	0.7993
.	.	.	.	169	0.6714	0.7182	-6.9961	0.6948
.	.	.	.	176	0.5829	0.6252	7.1641	0.6041
.	.	.	.	183	0.5060	0.5443	-7.0084	0.5252
.	.	.	.	190	0.4393	0.4738	9.1327	0.4566
.	.	.	.	197	0.3814	0.4125	-9.5738	0.3969
.	.	.	.	204	0.3311	0.3591	11.8219	0.3451
.	.	.	.	211	0.2874	0.3126	-12.8945	0.3000
.	.	.	.	218	0.2495	0.2722	15.4440	0.2608
.	.	.	.	225	0.2166	0.2369	-17.2327	0.2267
.	.	.	.	232	0.1880	0.2063	20.2845	0.1971
.	.	.	.	239	0.1632	0.1796	-22.9305	0.1714
.	.	.	.	246	0.1417	0.1563	26.7255	0.1490
.	.	.	.	253	0.1230	0.1361	-30.4375	0.1295
.	.	.	.	260	0.1068	0.1185	35.2753	0.1126
.	.	.	.	267	0.0927	0.1031	-40.3462	0.0979
.	.	.	.	274	0.0805	0.0898	46.6083	0.0851
.	.	.	.	281	0.0699	0.0782	-53.4382	0.0740
.	.	.	.	288	0.0607	0.0680	61.6189	0.0643
.	.	.	.	295	0.0527	0.0592	-70.7467	0.0559

図 4-7 演習問題【3】の解答 (FORTRAN)

```

000001      DIMENSION A(500),B(500),C(500),AA(500),BB(500),CC(500)
C *** INITIAL DATA AND PARAMETERS*****
000002      ALP = 0.2
000003      BET = 0.1
000004      GAM = 0.3
000005      A(1) = 20.
000006      B(1) = 20.
000007      C(1) = 20.
000008      AA(1) = 20.
000009      BB(1) = 20.
000010      CC(1) = 20.
000011      TS = 0.1
000012      IEND = 85
C *** ZENPOU SABUN *****
000013      DO 10 I = 1,IEND
000014      AA(I+1) = (ALP*CC(I)*AA(I) - BET*AA(I)*BB(I)) * TS + AA(I)
000015      BB(I+1) = (BET*AA(I)*BB(I) - GAM*BB(I)*CC(I)) * TS + BB(I)
000016      CC(I+1) = (GAM*BB(I)*CC(I) - ALP*CC(I)*AA(I)) * TS + CC(I)
000017      10 CONTINUE
C *** RUNGE KUTTA SABUN**
000018      DO 20 I = 1,IEND
000019      A1 = (ALP*C(I)*A(I) - BET*A(I)*B(I)) * TS + A(I)
000020      B1 = (BET*A(I)*B(I) - GAM*B(I)*C(I)) * TS + B(I)
000021      C1 = (GAM*B(I)*C(I) - ALP*C(I)*A(I)) * TS + C(I)
000022      A(I+1) = (ALP*C1 *A1 - BET*A1 *B1) * TS / 2.0 + A(I)
000023      B(I+1) = (BET*A1 *B1 - GAM*B1 *C1) * TS / 2.0 + B(I)
000024      C(I+1) = (GAM*B1 *C1 - ALP*C1 *A1) * TS / 2.0 + C(I)
000025      20 CONTINUE
C *** OUTPUT SUBROUTINE WO YOBU *****
000026      CALL OUTPUT(A,B,C,AA,BB,CC,IEND)
000027      STOP
000028      END
C *** CHOTTO KOTTE SHIMATTA OUTPUT YOUNO SUBROUTINE *****
000029      SUBROUTINE OUTPUT(A,B,C,AA,BB,CC,IE)
C
000030      DIMENSION A(500),B(500),C(500),AA(500),BB(500),CC(500)
000031      CHARACTER*1 LPOT(132)
C
000032      DO 300 JQ=1,2
C *** MIDASI WO KAKU TAMENO PROGRAM *****
000033      GO TO (51,52),JQ
000034      51 CONTINUE
000035      WRITE(6,101)
000036      GO TO 53
000037      52 CONTINUE
000038      WRITE(6,102)
000039      53 CONTINUE
000040      WRITE(6,103)
000041      101 'FORMAT(1H0,'***** ZENPOH SABUN *****')
000042      102 'FORMAT(1H1,'***** RUNGE-KUTTA SABUN *****')
000043      103 'FORMAT(1H0,'-40          0          40
          *      80 I      A      B      C')
C
C *** GRAPH WO KAKU TAMENO PROGRAM *****
000044      DO 200 J=1,IE
000045      DO 50 I=1,132
000046      50 LPOT(I) = ' '
C *** 1.KAIME HA 61 DE ZENPOU SABUN 2 KAOME HA 62 DE RUNGE-KUTTA *****
000047      GO TO (61,62),JQ
000048      61 IPL1 = IFIX(AA(J))*0.5 + 21
000049      IPL2 = IFIX(BB(J))*0.5 + 21
000050      IPL3 = IFIX(CC(J))*0.5 + 21
000051      GO TO 63
000052      62 IPL1 = IFIX(A(J))*0.5 + 21
000053      IPL2 = IFIX(B(J))*0.5 + 21
000054      IPL3 = IFIX(C(J))*0.5 + 21
000055      63 CONTINUE
C *** ALLOCATION OF CHARACTORS *****
000056      LPOT(1) = ' '
000057      LPOT(21) = ' '
000058      LPOT(41) = ' '
000059      LPOT(61) = ' '
000060      LPOT(IPL1) = 'A'
000061      LPOT(IPL2) = 'B'
000062      LPOT(IPL3) = 'C'
000063      GO TO (71,72),JQ
000064      71 CONTINUE
000065      WRITE(6,105) ( LPOT(I),I=1,61),J,AA(J),BB(J),CC(J)
000066      GO TO 73
000067      72 CONTINUE
000068      WRITE(6,105) ( LPOT(I),I=1,61),J,A(J),B(J),C(J)
000069      73 CONTINUE
000070      105 FORMAT(1H ,1X,61A1,I4,3F9.4)
000071      200 CONTINUE
000072      300 CONTINUE
000073      RETURN
000074      END

```

図 4-8 演習問題【3】の解答
(a) FORTRAN のプログラム

海洋におけるエコシステムの勉強Ⅲ

***** ZENPOH SABUN *****

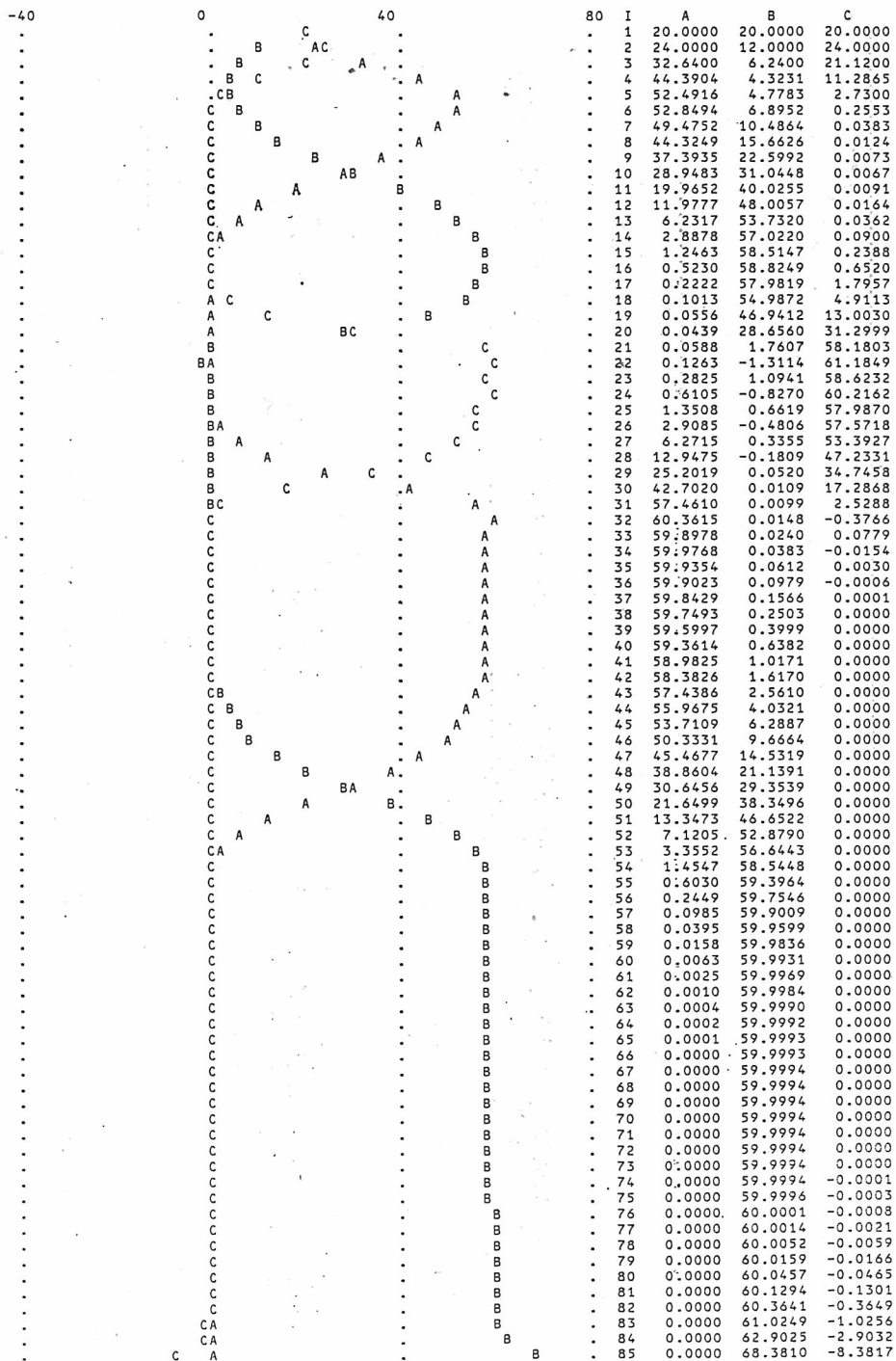


図 4-8 (b) $\Delta t=0.1$ で解いたときの計算結果
b-1: 前分差分

***** RUNGE-KUTTA SABUN *****

-40	0	40	80	I	A	B	C
				1	20.0000	20.0000	20.0000
				2	26.3200	13.1200	20.5600
				3	34.5829	9.9608	15.4562
				4	40.2935	9.9746	9.7319
				5	41.8790	12.1745	5.9465
				6	39.9772	16.0803	3.9425
				7	35.5457	21.2928	3.1615
				8	29.7153	26.9427	3.3419
				9	23.8460	31.4533	4.7006
				10	19.2901	32.6242	8.0856
				11	17.2806	28.3225	14.3967
				12	19.2592	19.6593	21.0814
				13	26.1185	12.4400	21.4413
				14	34.9998	9.2696	15.7304
				15	41.0318	9.3348	9.6332
				16	42.7049	11.5669	5.7280
				17	40.7889	15.5247	3.6862
				18	36.2513	20.8813	2.8673
				19	30.2013	26.8342	2.9643
				20	24.0068	31.8428	4.1501
				21	19.0445	33.6808	7.2744
				22	16.5268	29.9120	13.5609
				23	17.8875	20.8911	21.2211
				24	24.4385	12.7652	22.7960
				25	33.9052	8.9337	17.1608
				26	40.9476	8.5956	10.4565
				27	43.4142	10.5248	6.0606
				28	42.0502	14.2232	3.7263
				29	37.8336	19.4579	2.7081
				30	31.8018	25.6043	2.5935
				31	25.2800	31.2994	3.4203
				32	19.6871	34.4399	5.8726
				33	16.2435	32.3946	11.3615
				34	16.2509	23.9870	19.7616
				35	21.4050	14.4598	24.1348
				36	30.9608	9.2076	19.8311
				37	39.6089	7.9369	12.4538
				38	43.6629	9.2300	7.1067
				39	43.4776	12.3633	4.1586
				40	40.0894	17.1516	2.7585
				41	34.4493	23.2177	2.3326
				42	27.7617	29.5127	2.7251
				43	21.4656	34.2041	4.3297
				44	16.8639	34.7709	8.3646
				45	15.1097	28.7156	16.1741
				46	17.8361	18.1819	23.9814
				47	26.1252	10.6607	23.2136
				48	36.2941	7.7373	15.9680
				49	42.7879	8.0003	9.2112
				50	44.5135	10.2937	5.1922
				51	42.5452	14.3071	3.1471
				52	37.8265	19.8818	2.2911
				53	31.3786	26.3781	2.2427
				54	24.5541	32.3712	3.0740
				55	18.7773	35.6866	5.5355
				56	15.2138	33.5227	11.2628
				57	15.1240	24.4114	20.4639
				58	20.3735	14.1628	25.4630
				59	30.4690	8.6432	20.8870
				60	39.8341	7.2473	12.9179
				61	44.3735	8.4195	7.2062
				62	44.5101	11.4000	4.0891
				63	41.3419	16.0671	2.5902
				64	35.7635	22.1710	2.0647
				65	28.9021	28.8139	2.2832
				66	22.1913	34.2915	3.5165
				67	16.9765	36.1770	6.8457
				68	14.3450	31.5741	14.0801
				69	15.7620	20.7640	23.4732
				70	22.9941	11.6908	25.3143
				71	33.7966	7.6137	18.5888
				72	41.9887	7.1629	10.8476
				73	45.1114	8.9077	5.9800
				74	44.1815	12.3801	3.4375
				75	40.2058	17.5194	2.2739
				76	34.0839	23.9570	1.9583
				77	27.0366	30.5858	2.3767
				78	20.5237	35.5069	3.9635
				79	15.8041	36.1046	8.0904
				80	13.9478	29.5804	16.4709
				81	16.6255	18.1251	25.2485
				82	25.2315	10.1837	24.5839
				83	36.1348	7.0840	16.7802
				84	43.2860	7.2204	9.4927
				85	45.4385	9.3460	5.2145

図 4-8 (b) b-2: ルンゲクッタ差分

海洋におけるエコシステムの勉強—Ⅲ

***** ZENPOH SABUN *****

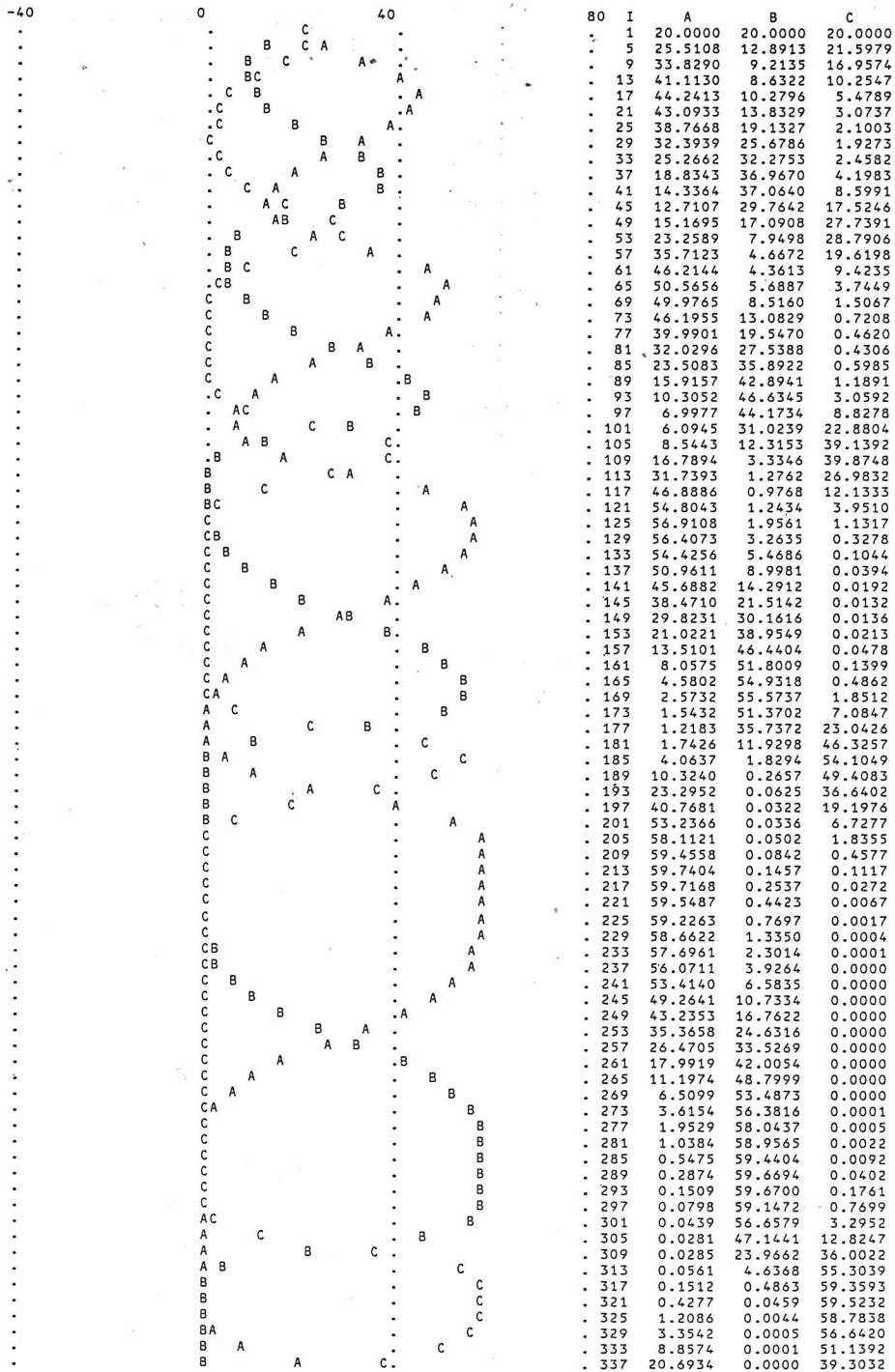
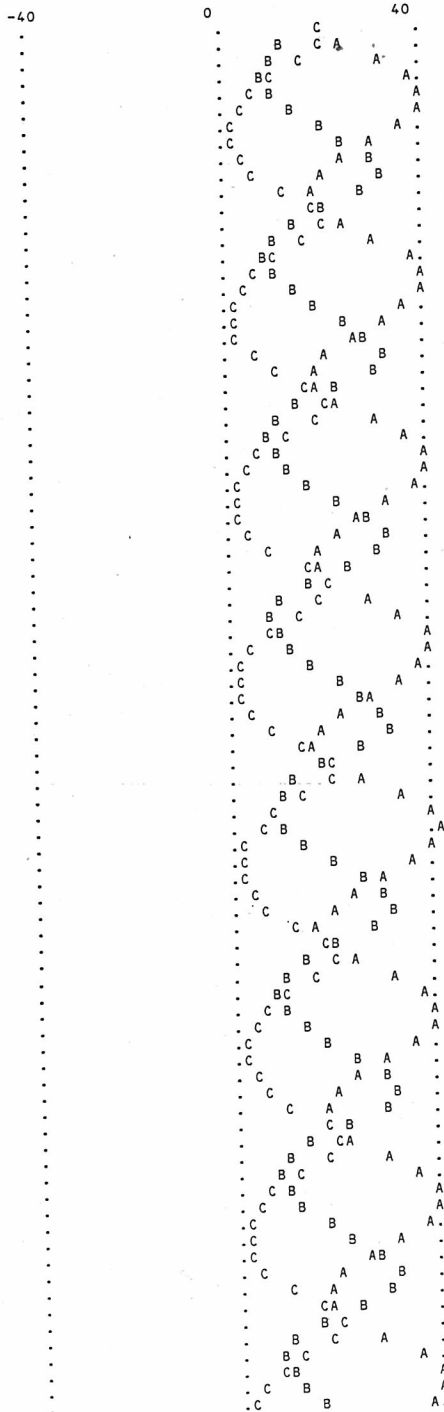


図 4-8 (c) $\Delta t=0.025$ で解いたときの計算結果で (b) との比較が容易なように 4 ステップごとに表示

***** RUNGE-KUTTA SABUN *****



	I	A	B	C
	1	20.0000	20.0000	20.0000
	5	25.8425	13.3566	20.8009
	9	33.5781	10.2160	16.2058
	13	39.6483	9.9325	10.4191
	17	41.9604	11.7351	6.3043
	21	40.6157	15.2843	4.0998
	25	36.5502	20.2437	3.2058
	29	30.9168	25.8306	3.2524
	33	25.0613	30.5838	4.3545
	37	20.3688	32.4213	7.2095
	41	18.0623	29.3063	12.6309
	45	19.1909	21.8158	18.9928
	49	24.2587	14.5312	21.2095
	53	31.8792	10.6182	17.5018
	57	38.6021	9.7840	11.6131
	61	41.8032	11.1625	7.0335
	65	41.2035	14.3451	4.4506
	69	37.6483	19.0397	3.3111
	73	32.2493	24.5936	3.1562
	77	26.3144	29.7026	3.9820
	81	21.2425	32.4004	6.3561
	85	18.2997	30.4988	11.2003
	89	18.5774	23.6779	17.7435
	93	22.7927	15.9081	21.2979
	97	30.1064	11.1808	18.7114
	101	37.3523	9.7429	12.9034
	105	41.4479	10.6736	7.8771
	109	41.6486	13.4725	4.8775
	113	38.6663	17.8665	3.4657
	117	33.5717	23.3200	3.1068
	121	27.6289	28.6871	3.6824
	125	22.2377	32.1364	5.6242
	129	18.7069	31.4316	9.8597
	133	18.1650	25.5185	16.3147
	137	21.4786	17.4811	21.0384
	141	28.3049	11.9226	19.7705
	145	35.9102	9.8208	14.2669
	149	40.8806	10.2745	8.8428
	153	41.9337	12.6729	5.3912
	157	39.5871	16.7360	3.6748
	161	34.8666	22.0278	3.1034
	165	28.9901	27.5592	3.4485
	169	23.3445	31.6471	5.0061
	173	19.2773	32.0822	8.6382
	177	17.9548	27.2640	14.7788
	181	20.3442	19.2284	20.4249
	185	26.5236	12.8623	20.6116
	189	34.2975	10.0318	15.6681
	193	40.0913	9.9718	9.9343
	197	42.0414	11.9526	6.0033
	201	40.3931	15.6591	3.9451
	205	36.1159	20.7346	3.1468
	209	30.3816	26.3414	3.2743
	213	24.5512	30.9540	4.4920
	217	20.0030	32.4421	7.5520
	221	17.9448	28.8425	13.2098
	225	19.4103	21.1099	19.4768
	229	24.8123	14.0153	21.1693
	233	32.5461	10.3924	17.0584
	237	39.0740	9.7736	11.1492
	241	41.9538	11.3173	6.7258
	245	41.0663	14.6455	4.2850
	249	37.3010	19.4569	3.2388
	253	31.7857	25.0559	3.1552
	257	25.8444	30.0806	4.0716
	261	20.8752	32.5149	6.6065
	265	18.1303	30.1914	11.6749
	269	18.6904	23.0667	18.2393
	273	23.2178	15.3906	21.3879
	277	30.6977	10.9219	18.3766
	281	37.8301	9.6896	12.4766
	285	41.6533	10.7728	7.5701
	289	41.5882	13.7037	4.7044
	293	38.4030	18.2101	3.3831
	297	33.1835	23.7245	3.0881
	301	27.2093	29.0521	3.7347
	305	21.8838	32.3136	5.7986
	309	18.5049	31.2630	10.2281
	313	18.1918	25.0241	16.7800
	317	21.7816	16.9855	21.2287
	321	28.8028	11.6416	19.5514
	325	36.3700	9.7320	13.8937
	329	41.1242	10.3253	8.5462
	333	41.9395	12.8412	5.2149
	337	39.4027	17.0079	3.5850

図 4-8 (c) 続き

文 献

- ANDERSEN, K. P. and E. URSIN (1977) A multi-species extension to the Beverton and Holt theory of fishing, with accounts of phosphorus, circulation and primary production. *Meddr Danm. Fisk. -og Havunders. N. S.* **7**, 319-435.
- BROWDER, J. A. (1983) A simulation model of a near-shore marine ecosystem of the north-central Gulf of Mexico. In: TURGEON, K.W. ed. *Marine Ecosystem Modeling, Proceedings from a workshop Apr. 6-8, 1982, Frederick, Md.*, 179-222.
- FERGASON, R.L. and S.M. ADAMS (1979) A mathematical model of trophic dynamics in estuarine seagrass communities. In: DAME R. F. ed. *Marsh-Estuarine Systems Simulation*, Univ. South Carolina Press. 41-70.
- IKEDA, S and M. J. KISHI (1986) Population dynamics of 'red tide' organisms in eutrophicated coastal waters —numerical experiment of phytoplankton bloom in the East Seto Inland Sea, Japan. *Ecol. Modl.* **31**, 145-174.
- KISHI, M. J. and S. IKEDA (1989) Numerical simulation of red tide and sensitivity analysis of biological parameters. in "Red Tides: Biology, Environmental science and Toxicology" ed. by. OKAICHI, ANDERSON, and NEMOTO. Elsevier Sci. Pub., 177-180.
- KISHI, M. J., K. NAKATA and K. ISHIKAWA (1978) Sensitivity analysis of a coastal marine ecosystem. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, **37**, 120-134.
- KISHI, M. J. and A. YAGI (1983) Prediction of monthly mean chlorophyll *a* concentration in Mikawa Bay using GMDH. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, **39**, 289-294.
- 岸 道郎・池田三郎・平野敏行・西村 陽 (1985) 赤潮生態系の数値モデル. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 109-118.
- KREMER, J. N. and S. W. NIXON (1978) An ecological simulation model of Narragansett Bay - the plankton community. in "Recent Advances in Estuarine Research" Academic Press.
- LAEVASTU, T. and H. A. LARKINS (1981) *Marine Fisheries Ecosystem; Its quantitative evaluation and management*. Fishing News Books Ltd., England, 162pp. ISBN=85238-116-6.
- MATSUKAWA, Y. and T. SUZUKI (1985) Box model analysis of hydrography and behaviour of nitrogen and phosphorus in a eutrophic estuary. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 407-426.
- 中田喜三郎・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史 (1983) 沿岸海域の3次元生態-流体力学モデル. 公害資源研究所集報, **13**, 119-134.
- 多々良薫 (1981) 基礎生産と漁獲量の関係—漁業による基礎生産の利用. 南西水研報告, **13**, 111-133.
- WALSH, J. J. (1975) A spatial simulation model of the Peru upwelling ecosystem. *Deep-Sea Res.*, **22**, 201-236.
- WALSH, J. J. and R. D. DUGDALE (1971) A simulation model of the nitrogen flow in the Peruvian upwelling system. *Inv. Pesq.*, **35**, 309-330.
- WROBLEWSKI, J. S. and J. J. O'BRIEN (1976) A spatial model of phytoplankton patchiness. *Mar. Biol.*, **35**, 161-175.