HOKKAIDO UNIVERSITY

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	http://hdl.handle.net/2115/33946
Type	article
File Information	54-88.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

水産海洋研究 第54巻 第1号，1990

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き，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，私のつたないノウハ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，放流量の適正値や漁獲量の適正値を定量化することが必要となりましょう。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くるのですが，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

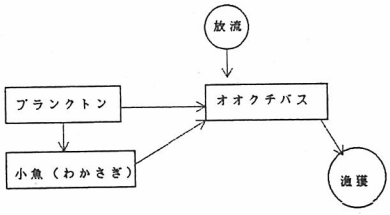


図 4-1　芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルの概念図　―その1―

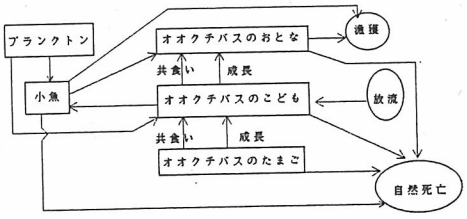


図 4-2　芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルの概念図　―その2―

* 東京大学海洋研究所資源環境部門

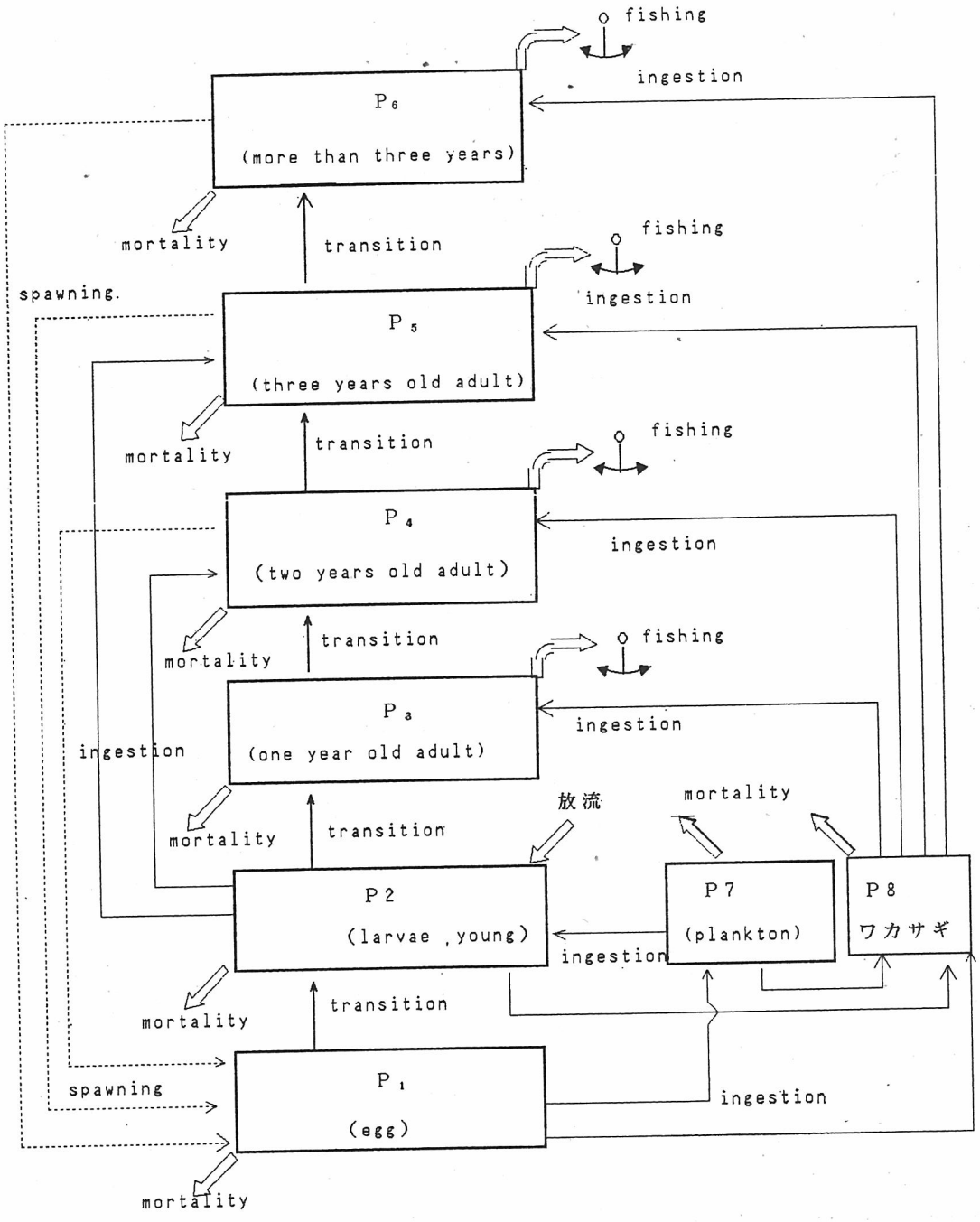


図 4-3　芦ノ湖のオオクチバスのエコシステムモデルの完成図

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，オオクチバスは4年以上生きるような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と，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ようですが，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から，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。）

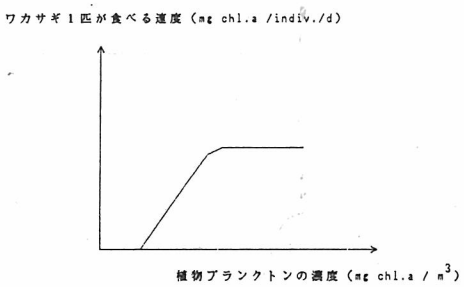


図 4-4 たとえば，ワカサギが植物プランクトンを捕食するときの，捕食速度と餌濃度の関係。クロロフィルを1グラム食べるとワカサギはどれくらい増えるのだろう？

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

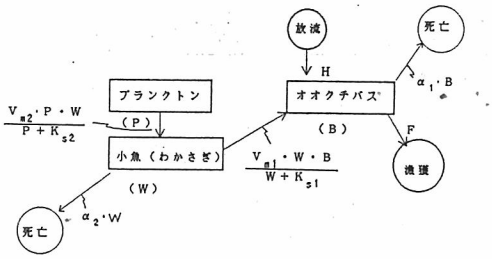


図 4-5　図 4-1 をもとにして，簡単な演習をしてみよう

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 カロリー芦ノ湖に放射される。そのうち，y %を植物が同化する。そのうち z %を魚が固定する。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してみましょう。オオクチバスのバイオマスを B，ワカサギのバイオマスを W，植物プランクトンのバイオマスを P，とすると，

$$dB/dt=H-F+\beta_1 \cdot V_{m1} \cdot W \cdot B/(W+K_{s1})-\alpha_1 \cdot B$$
$$dW/dt=\beta_2 \cdot V_{m2} \cdot P \cdot W/(P+K_{s2})$$
$$-\alpha_2 \cdot W-V_{m1} \cdot W \cdot B/(W+K_{s1})$$
$$P=P_0 \qquad (4\text{-}1)$$

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（増肉系数 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。$d★/dt$ を 0 とおくのでした。

$$0=H-F+\beta_1 \cdot V_{m1} \cdot W \cdot B/(W+K_{s1})-\alpha_1 \cdot B$$
$$0=\beta_2 \cdot V_{m2} \cdot P \cdot W/(P+K_{s2})-\alpha_2 \cdot W$$
$$-V_{m1} \cdot W \cdot B/(W+K_{s1})$$
$$P=P_0 \qquad (4\text{-}2)$$

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，

$B(0)=150000$g,　$W(0)=30000000$g,
$P(0)=300000000$g,　$H=500000$g y^{-1},
$G=100000$g y^{-1},　$V_{m1}=V_{m2}=0.2$,
$K_{s1}=15000000$g,　$K_{s2}=150000000$g,
$\alpha_1=\alpha_2=0.02\,d^{-1}$,　$\beta_1=\beta_2=0.3$,

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）

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

I	ZENPOH SABUNN	KOHHOH SABUN	CHUUOU SABUNN	LUNGE KUTTA	kaisekikai
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BAISIC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】

$$dA/dt=\alpha CA-\beta AB$$
$$dB/dt=\beta AB-\gamma BC \qquad (1\text{-}8)$$
$$dC/dt=\gamma BC-\alpha CA$$

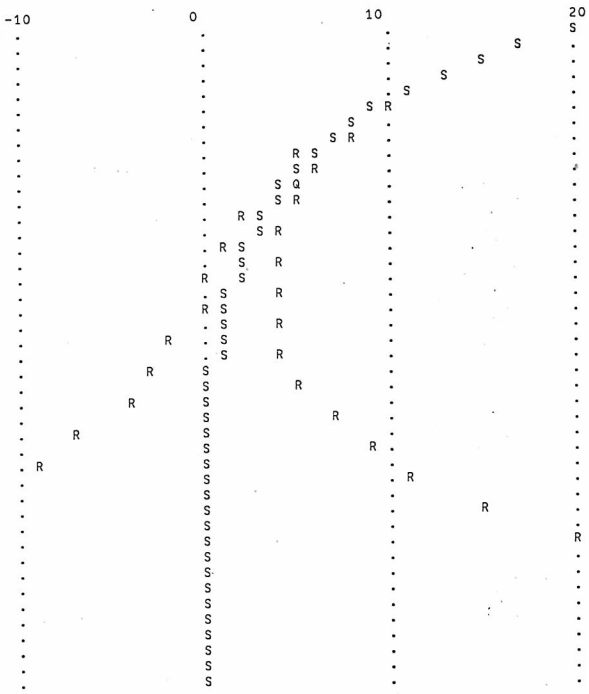
について差分方程式をルンゲクッタと前方差分で作ってみよう。ただし，$\alpha=0.2$，$\beta=0.1$，$\gamma=0.3$，$A(0)=20$，$B(0)=20$，$C(0)=20$，$\Delta t=0.1$ とします。作ったらFORTRANかBASICでプログラミングしてみよう。ついでにパソコンで計算しよう。

【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ら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)とも前方差分は $A=T$，$B=0$，$C=0$ 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。

```
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 *** CHUUOU 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 YOBU ******
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                  0                    10
            *      20  I     P         Q        R        S')
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)= '.'
000036        LPOT(21)='.'
000037        LPOT(41)='.'
000038        LPOT(61)='.'
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
```



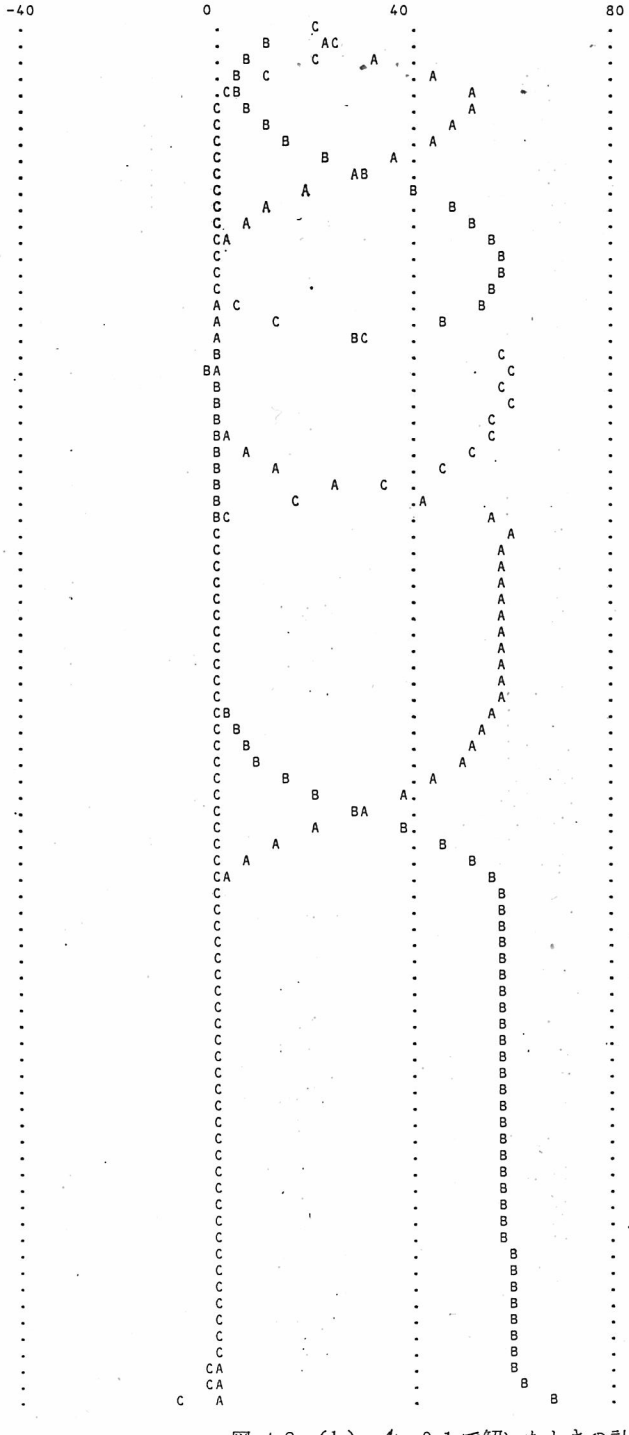
20	I	P	Q	R	S
S	1	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
.	8	17.3625	17.4112	17.7871	17.3873
.	15	15.0728	15.1575	15.0036	15.1159
.	22	13.0850	13.1956	13.5726	13.1413
.	29	11.3595	11.4876	11.1911	11.4246
.	36	9.8614	10.0007	10.4291	9.9321
.	43	8.5610	8.7062	8.2616	8.6347
.	50	7.4320	7.5793	8.1084	7.5067
.	57	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	-2.0263	1.2164
.	148	1.0262	1.0885	4.8118	1.0575
.	155	0.8909	0.9476	-3.3779	0.9194
.	162	0.7734	0.8249	5.7607	0.7993
.	169	0.6714	0.7182	-4.9961	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
R	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
               *          +ALP*C(I)*A(I) -  BET*A(I)*B(I)) * TS / 2.0  +  A(I)
000023          B(I+1) = (BET*A1  *B1   -  GAM*B1  *C1
               *          +BET*A(I)*B(I) -  GAM*B(I)*C(I)) * TS / 2.0  +  B(I)
000024          C(I+1) = (GAM*B1  *C1   -  ALP*C1  *A1
               *          +GAM*B(I)*C(I) -  ALP*C(I)*A(I)) * 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

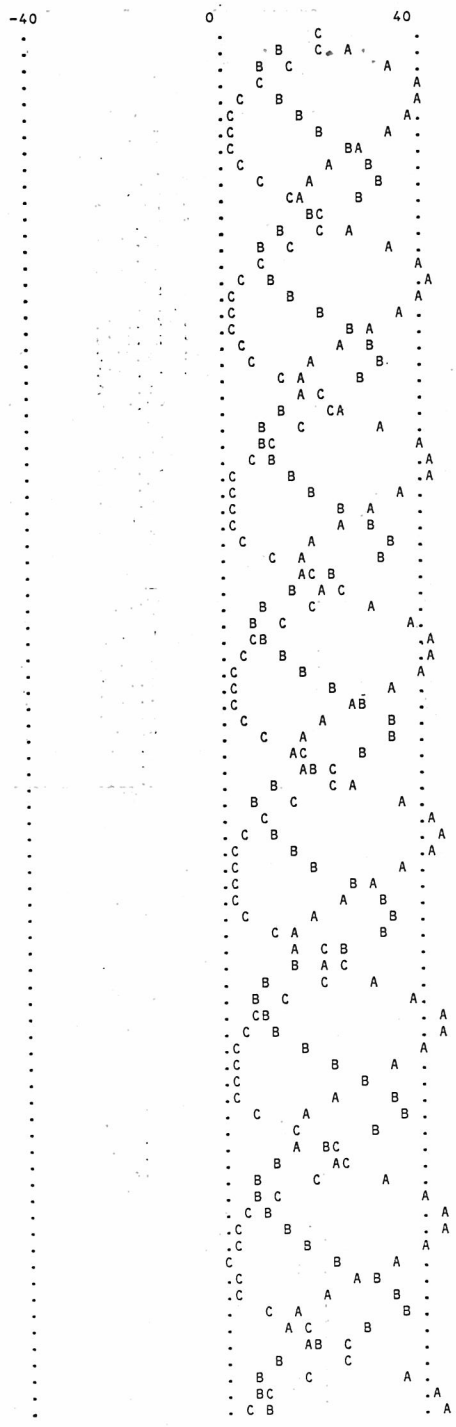
****** ZENPOH SABUN ********



I	A	B	C
1	20.0000	20.0000	20.0000
2	24.0000	12.0000	24.0000
3	32.6400	6.2400	21.1200
4	44.3904	4.3231	11.2865
5	52.4916	4.7783	2.7300
6	52.8494	6.8952	0.2553
7	49.4752	10.4864	0.0383
8	44.3249	15.6626	0.0124
9	37.3935	22.5992	0.0073
10	28.9483	31.0448	0.0067
11	19.9652	40.0255	0.0091
12	11.9777	48.0057	0.0164
13	6.2317	53.7320	0.0362
14	2.8878	57.0220	0.0900
15	1.2463	58.5147	0.2388
16	0.5230	58.8249	0.6520
17	0.2222	57.9819	1.7957
18	0.1013	54.9872	4.9113
19	0.0556	46.9412	13.0030
20	0.0439	28.6560	31.2999
21	0.0588	1.7607	58.1803
22	0.1263	-1.3114	61.1849
23	0.2825	1.0941	58.6232
24	0.6105	-0.8270	60.2162
25	1.3508	0.6619	57.9870
26	2.9085	-0.4806	57.5718
27	6.2715	0.3355	53.3927
28	12.9475	-0.1809	47.2331
29	25.2019	0.0520	34.7458
30	42.7020	0.0109	17.2868
31	57.4610	0.0099	2.5288
32	60.3615	0.0148	-0.3766
33	59.8978	0.0240	0.0779
34	59.9768	0.0383	-0.0154
35	59.9354	0.0612	0.0030
36	59.9023	0.0979	-0.0006
37	59.8429	0.1566	0.0001
38	59.7493	0.2503	0.0000
39	59.5997	0.3999	0.0000
40	59.3614	0.6382	0.0000
41	58.9825	1.0171	0.0000
42	58.3826	1.6170	0.0000
43	57.4386	2.5610	0.0000
44	55.9675	4.0321	0.0000
45	53.7109	6.2887	0.0000
46	50.3331	9.6664	0.0000
47	45.4677	14.5319	0.0000
48	38.8604	21.1391	0.0000
49	30.6456	29.3539	0.0000
50	21.6499	38.3496	0.0000
51	13.3473	46.6522	0.0000
52	7.1205	52.8790	0.0000
53	3.3552	56.6443	0.0000
54	1.4547	58.5448	0.0000
55	0.6030	59.3964	0.0000
56	0.2449	59.7546	0.0000
57	0.0985	59.9009	0.0000
58	0.0395	59.9599	0.0000
59	0.0158	59.9836	0.0000
60	0.0063	59.9931	0.0000
61	0.0025	59.9969	0.0000
62	0.0010	59.9984	0.0000
63	0.0004	59.9990	0.0000
64	0.0002	59.9992	0.0000
65	0.0001	59.9993	0.0000
66	0.0000	59.9993	0.0000
67	0.0000	59.9994	0.0000
68	0.0000	59.9994	0.0000
69	0.0000	59.9994	0.0000
70	0.0000	59.9994	0.0000
71	0.0000	59.9994	0.0000
72	0.0000	59.9994	0.0000
73	0.0000	59.9994	0.0000
74	0.0000	59.9994	-0.0001
75	0.0000	59.9996	-0.0003
76	0.0000	60.0001	-0.0008
77	0.0000	60.0014	-0.0021
78	0.0000	60.0052	-0.0059
79	0.0000	60.0159	-0.0166
80	0.0000	60.0457	-0.0465
81	0.0000	60.1294	-0.1301
82	0.0000	60.3641	-0.3649
83	0.0000	61.0249	-1.0256
84	0.0000	62.9025	-2.9032
85	0.0000	68.3810	-8.3817

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

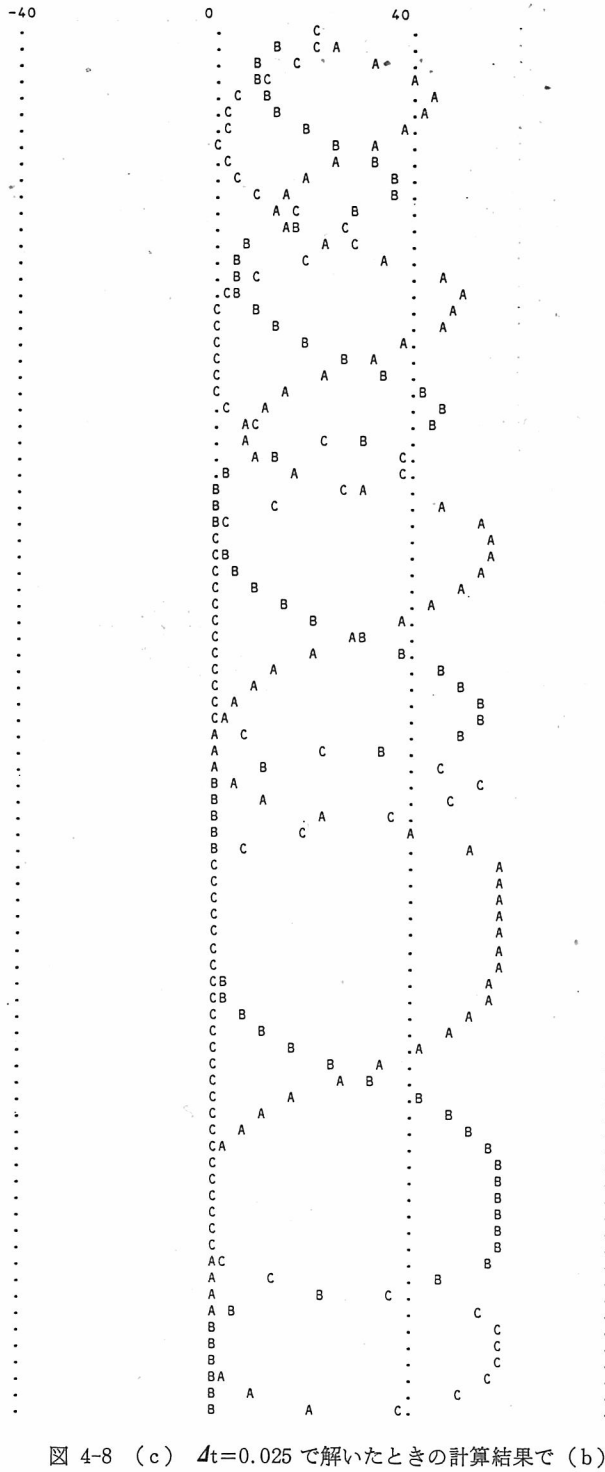
****** RUNGE-KUTTA SABUN *****



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	3.9685
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

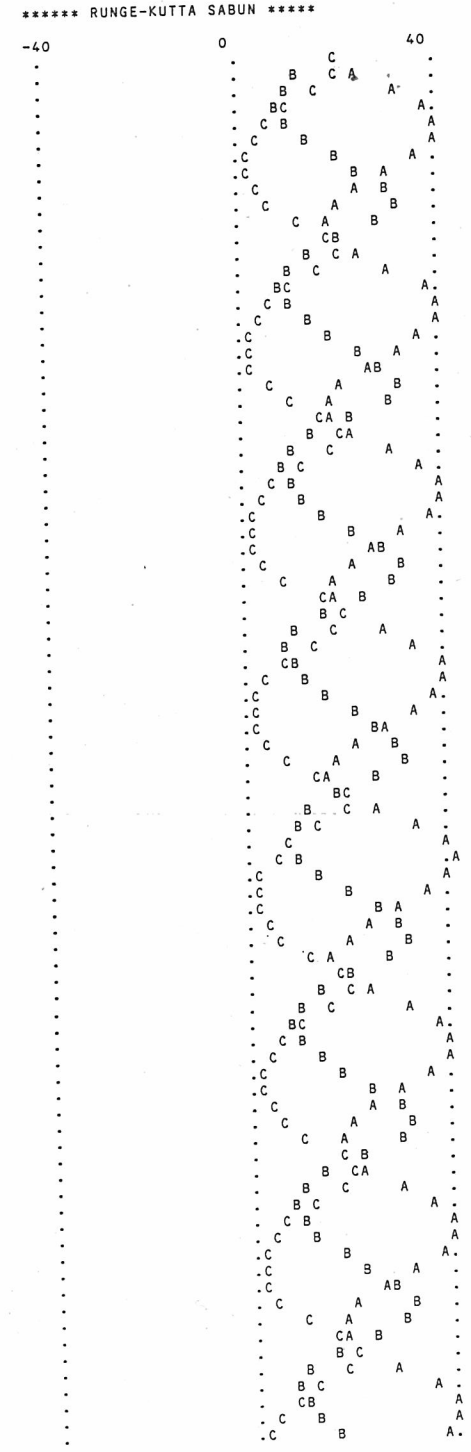
****** ZENPOH SABUN ********



I	A	B	C
1	20.0000	20.0000	20.0000
5	25.5108	12.8913	21.5979
9	33.8290	9.2135	16.9574
13	41.1130	8.6322	10.2547
17	44.2413	10.2796	5.4789
21	43.0933	13.8329	3.0737
25	38.7668	19.1327	2.1003
29	32.3939	25.6786	1.9273
33	25.2662	32.2753	2.4582
37	18.8343	36.9670	4.1983
41	14.3364	37.0640	8.5991
45	12.7107	29.7642	17.5246
49	15.1695	17.0908	27.7391
53	23.2589	7.9498	28.7906
57	35.7123	4.6672	19.6198
61	46.2144	4.3613	9.4235
65	50.5656	5.6887	3.7449
69	49.9765	8.5160	1.5067
73	46.1955	13.0829	0.7208
77	39.9901	19.5470	0.4620
81	32.0296	27.5388	0.4306
85	23.5083	35.8922	0.5985
89	15.9157	42.8941	1.1891
93	10.3052	46.6345	3.0592
97	6.9977	44.1734	8.8278
101	6.0945	31.0239	22.8804
105	8.5443	12.3153	39.1392
109	16.7894	3.3346	39.8748
113	31.7393	1.2762	26.9832
117	46.8886	0.9768	12.1333
121	54.8043	1.2434	3.9510
125	56.9108	1.9561	1.1317
129	56.4073	3.2635	0.3278
133	54.4256	5.4686	0.1044
137	50.9611	8.9981	0.0394
141	45.6882	14.2912	0.0192
145	38.4710	21.5142	0.0132
149	29.8231	30.1616	0.0136
153	21.0221	38.9549	0.0213
157	13.5101	46.4404	0.0478
161	8.0575	51.8009	0.1399
165	4.5802	54.9318	0.4862
169	2.5732	55.5737	1.8512
173	1.5432	51.3702	7.0847
177	1.2183	35.7372	23.0426
181	1.7426	11.9298	46.3257
185	4.0637	1.8294	54.1049
189	10.3240	0.2657	49.4083
193	23.2952	0.0625	36.6402
197	40.7681	0.0322	19.1976
201	53.2366	0.0336	6.7277
205	58.1121	0.0502	1.8355
209	59.4558	0.0842	0.4577
213	59.7404	0.1457	0.1117
217	59.7168	0.2537	0.0272
221	59.5487	0.4423	0.0067
225	59.2263	0.7697	0.0017
229	58.6622	1.3350	0.0004
233	57.6961	2.3014	0.0001
237	56.0711	3.9264	0.0000
241	53.4140	6.5835	0.0000
245	49.2641	10.7334	0.0000
249	43.2353	16.7622	0.0000
253	35.3658	24.6316	0.0000
257	26.4705	33.5269	0.0000
261	17.9919	42.0054	0.0000
265	11.1974	48.7999	0.0000
269	6.5099	53.4873	0.0000
273	3.6154	56.3816	0.0001
277	1.9529	58.0437	0.0005
281	1.0384	58.9565	0.0022
285	0.5475	59.4404	0.0092
289	0.2874	59.6694	0.0402
293	0.1509	59.6700	0.1761
297	0.0798	59.1472	0.7699
301	0.0439	56.6579	3.2952
305	0.0281	47.1441	12.8247
309	0.0285	23.9662	36.0022
313	0.0561	4.6368	55.3039
317	0.1512	0.4863	59.3593
321	0.4277	0.0459	59.5232
325	1.2086	0.0044	58.7838
329	3.3542	0.0005	56.6420
333	8.8574	0.0001	51.1392
337	20.6934	0.0000	39.3032

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 *****



80	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．公害資源研究所彙報，**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 patchness. Mar. Biol., **35**, 161-175.