

富山湾における水産資源変動のモデル化への試み

角 南 靖 夫*

Attempt for Modeling of the Variability in Fishery Resource in Toyama Bay, in the Southern Japan Sea

Yasuo Sunami*

A simulation model was developed for predicting the variation of fishery resource in Toyama Bay, in the Southern Japan Sea. In formulating the ecosystem model, the photosynthesis model of phytoplankton and the growth model of *Metridia Pacifica* (Copepoda: Calanoida) are used. The models of detritus, nutrient and fish are also used. The seasonal change of biomass of phytoplankton, zooplankton and fish according to an environmental change by using the ecosystem model was examined. The simulated results show that some amounts of the fishery resource increase in this model, when mean water temperature rises by 1°C.

Key Words (キーワード)

Simulation model (シミュレーションモデル), Plankton (プランクトン), Fish (魚), Environmental change (環境変動)

1. は じ め に

地球温暖化されたとき主要水産資源の変動を予測するためには環境変化の要素を加えた生態系モデリングが必要とされている。また、そのとき海洋の低次生産力すなわち魚介類の餌となるプランクトンの現存量がどうなるかを調べることが重要である。そこで本研究ではモデル海域を富山湾として、植物プランクトンの光合成モデルを作り、さらに富山湾でマサバやホタルイカなどの主要な餌料となっている動物プランクトンのカイアシ類の一種 *Metridia Pacifica* の現存量について数理モデルを作り、環境変化に伴う植物プランクトン、動物プランクトンの現存量および魚の資源量の変動を調べる手法開発のために、環境変化の要素を入れた生態系モデルを作成した。

このモデルにおける植物プランクトン、動物プ

ランクトン、デトリタス、栄養塩および魚の循環経路をFig. 1に示す。植物プランクトンは光合成による過程で海域内の栄養塩を摂取し、増殖する。栄養塩の一部は細胞外へ分泌され海域に還元される。植物プランクトンがこの栄養塩を摂取する過程は水温および栄養塩の濃度に依存するものとする。動物プランクトンは植物プランクトンおよびデトリタスを摂食し、成長する。代謝の廃棄物は排泄され栄養塩に還元される。デトリタスは植物プランクトンの枯死や動物プランクトンと魚の排糞、自然死亡によってデトリタスが生成される。デトリタスはバクテリアの分解によって栄養塩へ還元される。栄養塩は動物プランクトンの排泄、デトリタスの分解あるいは植物プランクトンの細胞外分泌によって生成される。栄養塩は光合成の過程において植物プランクトンの体内に摂取される。魚は小型の浮魚を考える。魚は動物プラ

*呉大学社会情報学部 (Faculty of Social Information Science, Kure University)

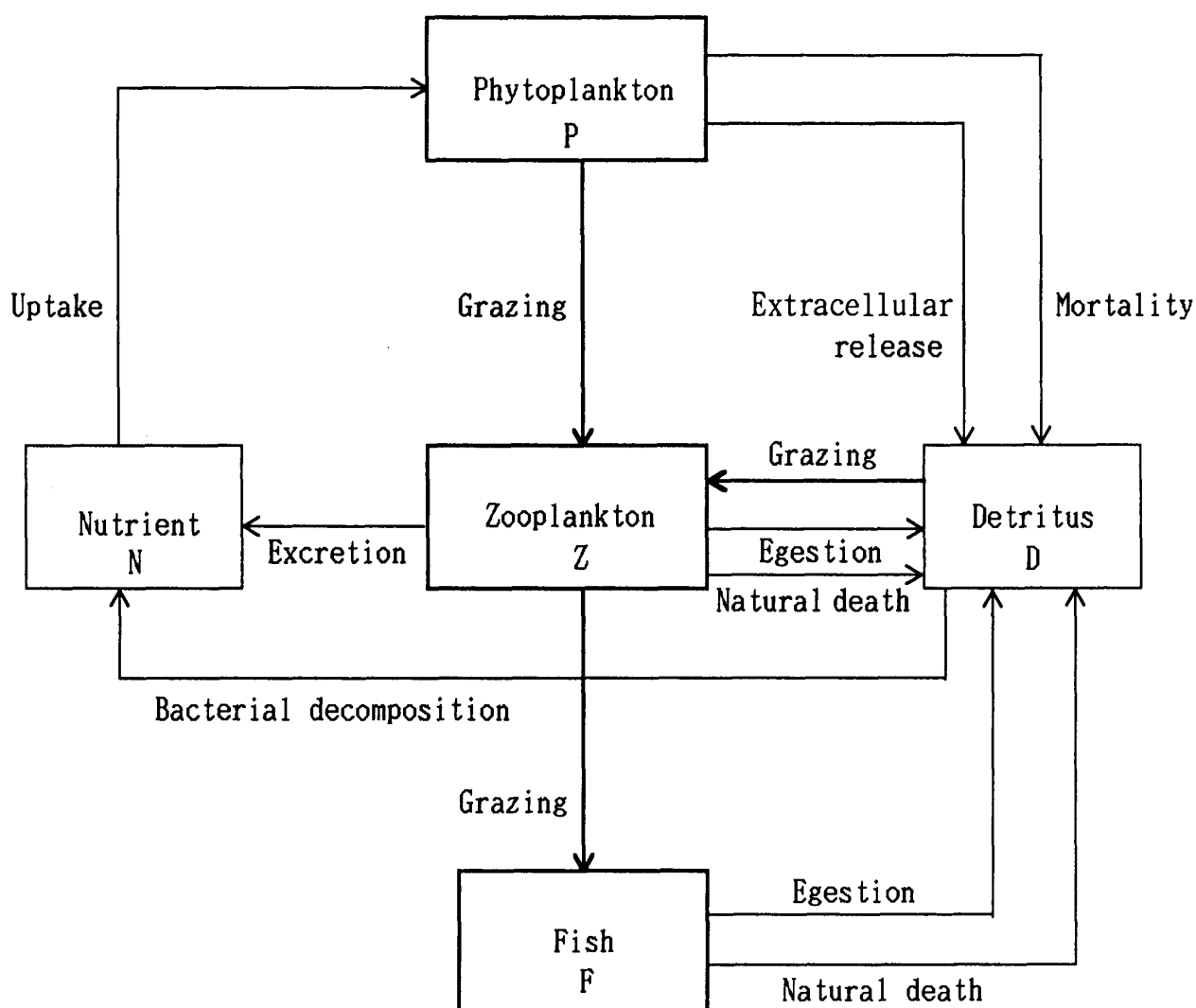


Fig. 1. Schematic view of the ecosystem model.

ンクトンを餌として摂取して、その代謝による廃棄物は尿あるいは排糞として排泄され、デトリタスが生成される。

2. 各生物量の数理モデル

2.1 植物プランクトンの光合成モデル

植物プランクトンの成長には水温が日射量、栄養塩濃度と共に成長に大きな影響をおよぼしている。

(a) 植物プランクトンの成長速度と水温の関係

植物プランクトンの成長は Eppley (1972) によれば、水温の関数として以下のように表される¹⁾。最大比成長速度 μ (1日あたりの細胞分裂回数

(分裂/日)) は

$$\log_{10} \mu = 0.0275T - 0.070 \quad (1)$$

と表され、ここで T は水温を表す。この式を書き換えて

$$\mu = 0.8511 e^{0.0632T} \quad (2)$$

となる。 t 日後の分裂回数は μt であり、最初 n_0 であったものが t 日後には μt 回分裂して n になったとき

$$n = n_0 2^{\mu t} \quad (3)$$

となり、次のように変形して、

$$2^{\mu t} = \frac{n}{n_0} \quad (4)$$

となり、両辺の対数をとって

$$\mu t \ln 2 = \ln \frac{n}{n_0} \quad (5)$$

となる。植物プランクトンの最大成長速度 V_{\max} (1/day) は

$$V_{\max} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \quad (6)$$

と表され、変数分離して、最初 n_0 であったものが t 日後には n になるので、両辺を時間で積分して、(5)式を代入して、

$$V_{\max} = \frac{1}{t} \ln \frac{n}{n_0} = \mu \ln 2 \quad (7)$$

となる。(2)式を代入して、最大成長速度 V_{\max} は

$$V_{\max} = 0.693 \exp(0.0633T - 0.161) \quad (8)$$

と表される。

(b) 植物プランクトンの成長速度と栄養塩濃度の影響

植物プランクトンの成長は栄養塩濃度が低い場合は濃度に比例して促進するが、高い濃度では、この比例関係はくずれ、成長は減速する。この様子を表す次の式を使った。栄養塩濃度が N のときの成長速度 $V(N)$ は

$$V(N) = V_{\max} \frac{N}{N + K_s} \quad (9)$$

と表され、ここで N (mgP/m³) は栄養塩濃度、 K_s (mgP/m³) は半飽和定数を表す。 $N = K_s$ のとき $V(N)$ は $1/2V_{\max}$ となる。この計算で用いた栄養塩と個々の生物量はリン(P) の量で表す。

(c) 光量による成長の遅速

植物プランクトンの成長には日射が不可欠であり、日射の強さによって光合成速度が変化する。

弱い光では光合成速度は光の強さに比例して増加するが、やがて飽和状態に達して、平坦になり、強い光では阻害が起こる。植物プランクトンの成長に対する入射光の強さの効果を Steele (1962) が最適光の強さ I_{opt} を入れ定式化している²⁾。光の強さ I は水深 z と共に減少する。この光の強さによる光合成の律速は DiToro ら (1971) が光の消散係数 k を導入し、日照時間内において入射光が一定としたモデルを作成している³⁾。その光合成速度は次のように表される。

$$V(I) = \frac{0.85 \cdot e \cdot D_L}{kz} \exp\left(-\frac{I}{I_{opt}} \exp(-kz)\right) - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (10)$$

I : 日射量 (cal/cm²)

I_{opt} : 最適光の強さ (cal/cm²)

z : 水深(m)

e : 自然対数の底

D_L : 日照時間

k : 光の消散係数 (1/m)

日照時間は

$$D_L = 0.5 - 0.125 \cos(2\pi(t+10)/365) \quad (11)$$

と表し、春分の日と秋分の日 $D_L = 0.5$ になるように設定した。光の消散係数は次の式で表される⁴⁾。

$$k = 0.04 + 0.00722P + 0.0473P^{2/3} \quad (12)$$

光合成をする水深の範囲は 5 m として取り扱った。

(d) 植物プランクトンの呼吸と有機物排出

植物プランクトン自身の呼吸による有機物の体外排出量は Watt (1966) が得た実験式から同化量に対する割合は

$$\alpha(P) = 0.135 \exp(-1.65 \times 10^{-3}P) \quad (13)$$

で表される⁵⁾。ここで P (mgP/m³) は植物プランクトンの量を表す。この量は海域によって差が

あるが、同化量の15%かあるいはそれ以下である⁶⁾。(13)式から植物プランクトンの量が0.5から4 mgP/m³であるとき、この $\alpha(P)$ の値は13.5%から13.4%になる。

(e) 植物プランクトンの枯死

植物プランクトンの自然死亡すなわち枯死による消失量は植物プランクトンの現存量に比例するものとする。 a_1P で表す。ここで a_1 はパラメータである。

(f) 動物プランクトンによる補食

動物プランクトンは植物プランクトンだけでなく、デトリタスも補食する。植物プランクトンの取り込み量は餌料密度に比例する形、 $GP/(P+D)$ で表す。 G は動物プランクトンの補食量であり、動物プランクトンの同化量と個体数の積で表す。 D (mgP/m³)はデトリタスの量を表す。

(g) 植物プランクトン(P)の現存量の変動モデル

植物プランクトンの同化量は光合成量、異化量は体外有機物排泄、枯死と動物プランクトンによる捕食である。植物プランクトンの現存量に関する変化を次式で表す。

$$\frac{dP}{dt} = (1 - \alpha(P)) V(N) V(I) P - a_1 P - G \frac{P}{P+D} \quad (14)$$

モデルでは表面水温は富山湾の観測値(1991)を使い、日射量は富山湾の近くの輪島の観測値(1991)を使った⁷⁾。輪島の日射量の観測値(1991)をFig. 2に示す。

2.2 動物プランクトンのカイアシ類の *M. pacifica* の現存量の数理モデル

これまでにカイアシ類の成長モデルと個体数変動モデルを作り、*M. pacifica*の現存量の季節変動を計算した⁸⁾。これらのモデルを生態系モデルに使った。

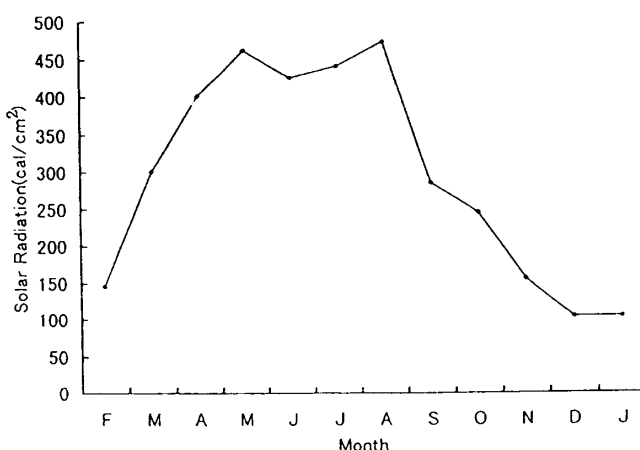


Fig. 2. Seasonal change in solar radiation applied to this model in Wajima.

(a) カイアシ類の成長モデル

*M. pacifica*と同じカラノイダ目の *Calanus sinicus* についての飼育実験から得られた発育時間と水温との関係式⁹⁾及び水温と体長との関係⁹⁾を使ってカイアシ類の成長モデルを作成した。カイアシ類は脱皮を重ねることにより、ノープリウスⅠ～Ⅵ期とコペポタイトⅠ～Ⅴ期を経て成体になる。モデルでは卵から孵化して、ノープリウスⅡ期までを第1ステージとし、ノープリウスⅢ期からⅥ期までを4ステージに、コペポタイトⅠ～Ⅵ期(成体)まで6ステージにそれぞれ分けて取り扱った。カイアシ類の成長を表す式は水温に依存するように次式で表した。この成長モデルの作成方法はマイワシに適用した方法を使った¹⁰⁾。

$$\frac{dw(i)}{dt} = C(a(i)w(i)^{2/3} - bw(i)) \exp\left(\left(\frac{\ln Q_{10}}{10}\right)T\right) \quad (i = 1 \sim 11) \quad (15)$$

ここで i は各ステージを、 $w(i)$ (μ g)は各ステージの体重を、 T は水温を表す。パラメータは $a(i)$ 、 b 、 Q_{10} と C である。 C は餌の充足度を表す。*M. pacifica*が夜間に表層で生活するとき C の値は0.3、昼間に中・深層で生活するとき C の値は0.1とした。水温の係数 Q_{10} は1.9とし、代謝を表す部分の係数 b は5とした。 $a(i)$ の値はTable 1に示す。

Table 1. Values of parameter $a(i)$ applied to eq. (15) for $Q_{10}=1.9$ and $b=5$.

i	1	2	3	4	5
$a(i)$	108.56	67.91	76.34	73.77	61.07

6	7	8	9	10	11
127.87	249.78	286.67	320.69	312.32	69.98

(b) カイアシ類の個体数変動モデル

M. pacifica と同じカラノイダ目の *Acartia clausi* について測定した各ステージでの生残率¹¹⁾を使ってカイアシ類の個体数変動モデルを作成した. カイアシ類の個体数 $N(i)$ の変動を表す式は

$$\frac{dN(i)}{dt} = -k(i) \cdot N(i) \quad (i = 1 \sim 11) \quad (16)$$

と表した. ここでパラメータ $k(i)$ は各ステージでの生残率の測定値を再現するように定めた. $k(i) = 5 \text{ (year}^{-1}\text{)}$ ($i = 1 \sim 5$), $k(i) = 4 \text{ (year}^{-1}\text{)}$ ($i = 9 \sim 11$) と決めた.

(c) 富山湾の *M. pacifica* の現存量の季節変動

このカイアシ類の成長モデルと個体数変動モデルを富山湾のカイアシ類の *M. pacifica* に適用した. *M. pacifica* は1月中旬と6月末に産卵して, その後成長するものとする. *M. pacifica* は昼間は水温の低い ($0.5 \sim 2^\circ\text{C}$) の海面下300mの海底で生活し, 夜間は水温が ($11 \sim 18^\circ\text{C}$) の表層で生活するものとし, また, 夏の表面の水温が高い8月~10月の間は夜も海底で生活しているものとする. 昼と夜とでは鉛直移動を繰り返している. *M. pacifica* の生活領域での水温すなわち富山湾における表層および中・深層の水温の観測値¹²⁾ (1991) をFig. 3に示す. *M. pacifica* の現存量は個体あたりの体重と個体数との積で表し, これらの水温の観測値を用いて, 現存量の季節変動を求めた.

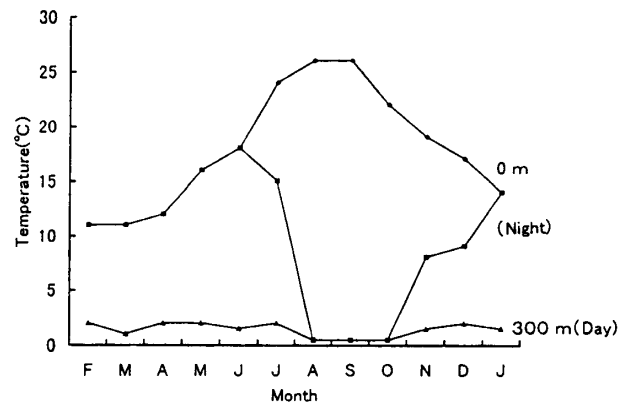


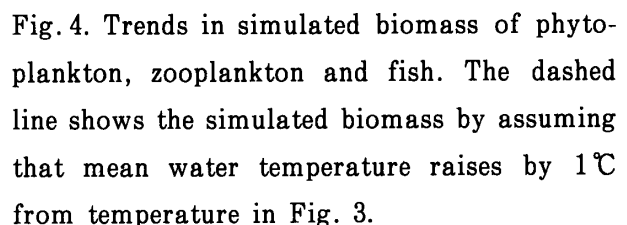
Fig. 3. Seasonal change in water temperature applied to this model in Toyama Bay. *Metridia pacifica* is abundant about 300 m depth during day and also abundant surface layer during night. *M. pacifica* is abundant about 300 m depth during both day and night from August and October.

2.3 デトリタス (D) の数理モデル

デトリタスの加入量は植物プランクトンの細胞外分泌, 枯死, 動物プランクトンの排糞および死亡, 魚の排糞および死亡であり, また損失量は動物プランクトンによる捕食, デトリタスの分解による量である. デトリタスの変動を表す式は次式で表した.

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} = & \alpha(P) V(N) V(I) P + a_1 P + (1 - \beta) G \\ & + a_2 Z + (a_4 + 0.06) F - G \frac{P}{P + D} - a_3 D \end{aligned} \quad (17)$$

ここで β は動物プランクトンの消化効率であり, β の値は0.7 とする⁶⁾. G は動物プランクトンの摂餌量であり, $(1 - \text{消化効率}) \times \text{摂餌量} = \text{排糞量}$ となる. したがって $(1 - \beta) G$ は動物プランクトンの排糞量である. $a_2 Z$ は動物プランクトンの死亡量, $a_4 F$ は魚の死亡量, $a_3 D$ はデトリタスの分解による量である. a_2, a_3, a_4 はそれぞれパラメータである.



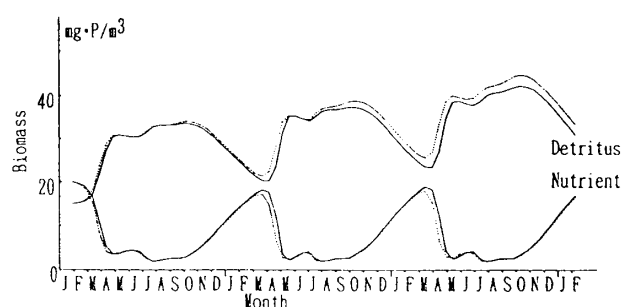


Fig. 5. Trends in simulated biomass of detritus and nutrient. The dashed line shows the simulated biomass by assuming that mean water temperature raises by 1°C from temperature in Fig. 3.

4. 考 察

Fig. 4が示すように、植物プランクトンの現存量は日射量の増加、表層の水温の上昇および栄養塩の増大によって変動し、春にピークを作る。植物プランクトンを餌とする動物プランクトンは10月にピークを作る。このピークは富山湾における *M. pacifica* の個体数の現存量が秋から初冬にかけての増大¹²⁾を再現している。動物プランクトンの現存量が増大後、動物プランクトン食性の魚の資源量は増加する。なお、各生物量の観測データが不足しているので、水温の変動とプランクトンの現存量および魚の資源量との相関をみることは困難であるが、前述の各生物量と栄養塩の初期値で計算した場合に、仮に富山湾の表層および中・深層の水温が1°C上昇したとすれば、Fig. 4およびFig. 5の点線で示した植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスおよび動物プランクトン食性の魚の資源量は若干増加するが、一方栄養塩は減少した。

環境変化による水産資源の変動を予測するより現実的な数理モデルを作るため、魚の餌となる動物プランクトンの *M. pacifica* について、低温での飼育実験のデータが必要である。また東シナ海においてマイワシ資源の変動解析をした同じ方法を使って¹⁰⁾、富山湾においてマサバやホタル

イカなどの具体的な魚種を入れた生態系モデルを作り、さらに検討する必要がある。大気・海洋大循環モデルで予想されている日射量の変動によって植物プランクトンの光合成量がどのように変化するか今後さらに解析を深める必要がある。

この研究は農林水産技術会議の一般別枠研究「地球環境変化」の課題「主要水産資源の変動予測技術の開発」として行った。

5. 文 献

- 1) R.W. Eppley, 1972, Temperature and phytoplankton growth in the sea, Fish. Bull., **70**, 1063-1085.
- 2) J.H. Steele, 1962, Environmental control of photosynthesis in the sea, Limnol. Oceanogr., **7**, 137-150.
- 3) D.M. DiToro, D.J. O'Connor, R.V. Thomann, 1971, A dynamic model of phytoplankton populations in the Sacramento-San Joaquin Delta, Advan. in Chem. Series, **106**, 131-180.
- 4) J.N. Kremer and S.W. Nixon, 1978, A Coastal Marine Ecosystem (Ecological studies, 24), Springer-Verlag.
- 5) W.D. Watt, 1966, Release of dissolved organic material from the cell of phytoplankton populations, Proc. Roy. Soc. B., **164**, 521-551.
- 6) 中田喜三郎, 1983, 生態系モデル, 漁業環境アセスメント, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 47-80.
- 7) 気象庁, 1991, 気象庁年報, 日本気象協会, 東京.
- 8) 角南靖夫, 平川和正, 1996, 富山湾におけるカイアシ類 *Metridia pacifica* (Calanoida) の現存量変動のモデル化への試み, 水産大学校研究報告 **44**, 143-149.
- 9) S. Uye, 1988, Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus*

- (Copepoda: Calanoida) in the laboratory, *Hydrobiologia*, **167/168**, 285-293.
- 10) 角南靖夫, 1993, 餌料密度からみたマイワシ資源の変動モデル, 水産大学校研究報告, **41**, 1-8.
- 11) S. Uye, 1982, Population Dynamics and Production of *Acartia Clausi* Giesbrecht (Copepoda: Calanoida) in Inlet Waters, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **57**, 55-83.
- 12) K. Hirakawa and A. Imamura, 1993, Seasonal Abundance and Life History of *Metridia pacifica* (Copepoda: Calanoida) in Toyama Bay, Southern Japan Sea, *Bull. Plankton Soc. Japan*, **40**, 41-54.
- 13) 北野裕, 梨田一也, 木谷浩三, 広田裕一, 1987, 日本海の生物生産モデルと日本海への適用, 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究成果報告集 第II期, 科学技術庁研究調整局, pp. 197-214.