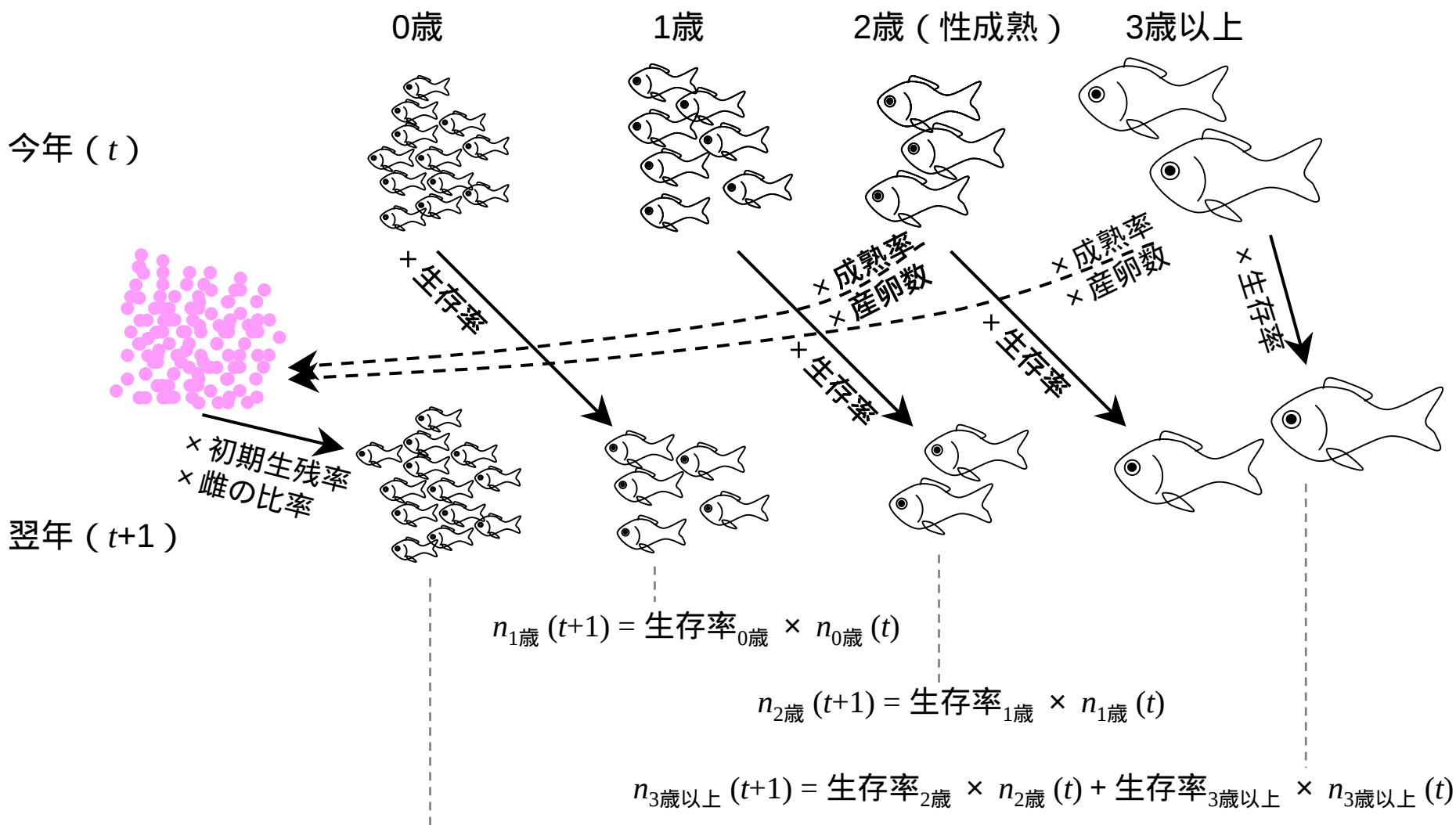


個体群レベルの生態リスク評価

様々な魚種に対する評価
～ パラメーターの推算方法 ～

独立行政法人 産業技術総合研究所
化学物質リスク管理研究センター
宮本 健一

年齢構成のある個体群（繁殖期直前に雌個体数を計数する場合）



$$n_{0\text{歳}}(t+1) = \{ \text{成熟率}_{2\text{歳}} \times \text{産卵数}_{2\text{歳}} \times n_{2\text{歳}}(t) + \text{成熟率}_{3\text{歳}} \times \text{産卵数}_{3\text{歳}} \times n_{3\text{歳}}(t) \} \times \text{初期生残率} \times \text{雌の比率}$$

$$= \text{繁殖率}_{2\text{歳}} \times n_{2\text{歳}}(t) + \text{繁殖率}_{3\text{歳}} \times n_{3\text{歳}}(t)$$

繁殖率 = 成熟率 × 産卵数 × 初期生残率 × 雌の比率

$$n_{1\text{歳}}(t+1) = \text{生存率}_{0\text{歳}} \times n_{0\text{歳}}(t)$$

$$n_{2\text{歳}}(t+1) = \text{生存率}_{1\text{歳}} \times n_{1\text{歳}}(t)$$

$$n_{3\text{歳以上}}(t+1) = \text{生存率}_{2\text{歳}} \times n_{2\text{歳}}(t) + \text{生存率}_{3\text{歳以上}} \times n_{3\text{歳以上}}(t)$$

添字の「0歳」→ 添字の「1」
 添字の「1歳」→ 添字の「2」
 添字の「2歳」→ 添字の「3」
 添字の「3歳以上」→ 添字の「4」
 繁殖率 → F
 生存率 → P

$$n_1(t+1) = 0 \cdot n_1(t) + 0 \cdot n_2(t) + F_3 \cdot n_3(t) + F_4 \cdot n_4(t)$$

$$n_2(t+1) = P_1 \cdot n_1(t) + 0 \cdot n_2(t) + 0 \cdot n_3(t) + 0 \cdot n_4(t)$$

$$n_3(t+1) = 0 \cdot n_1(t) + P_2 \cdot n_2(t) + 0 \cdot n_3(t) + 0 \cdot n_4(t)$$

$$n_4(t+1) = 0 \cdot n_1(t) + 0 \cdot n_2(t) + P_3 \cdot n_3(t) + P_4 \cdot n_4(t)$$

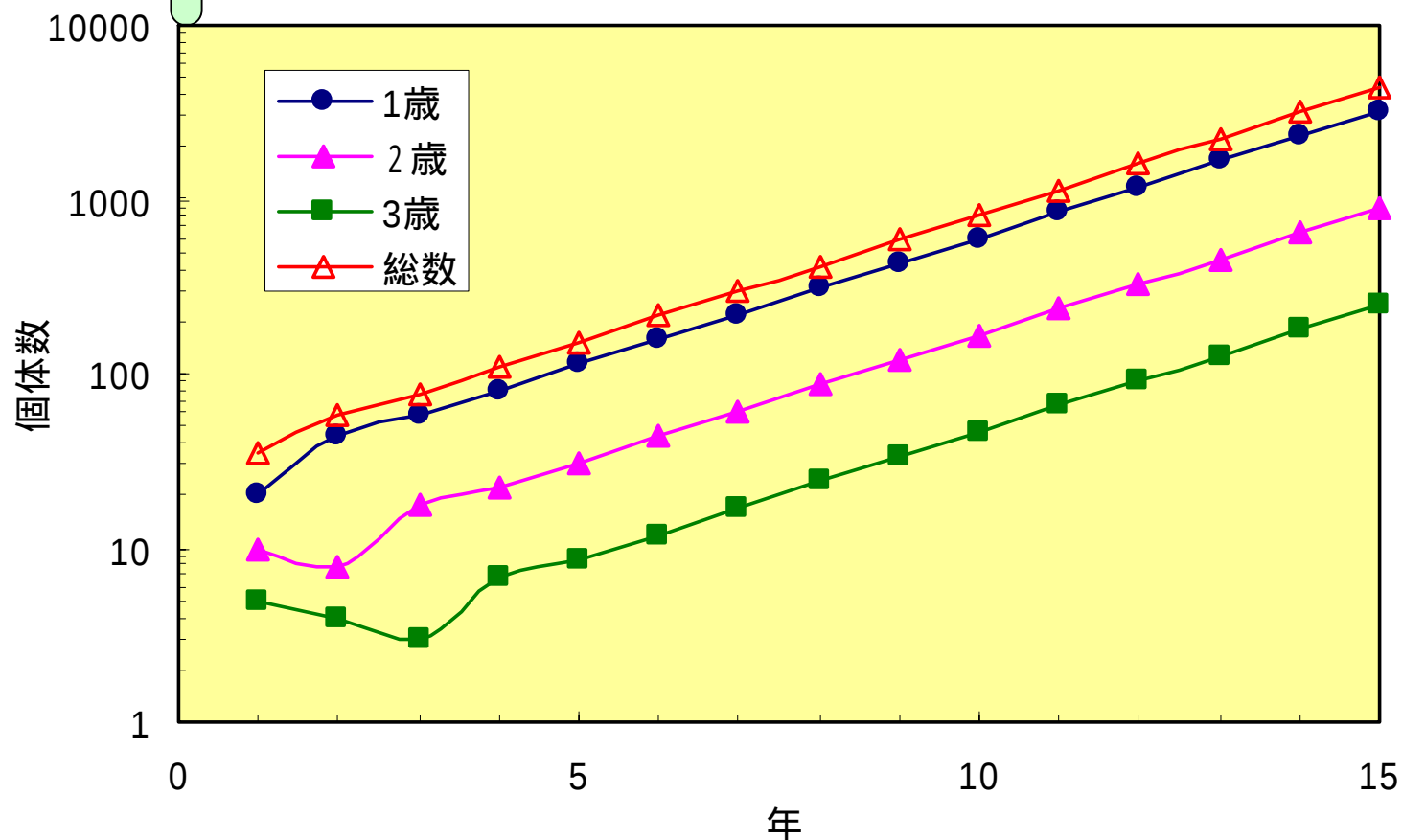
行列で記述する

$$\begin{pmatrix} n_1(t+1) \\ n_2(t+1) \\ n_3(t+1) \\ n_4(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_3 & F_4 \\ P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & P_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ n_3(t) \\ n_4(t) \end{pmatrix}$$

遷移行列 (レスリー行列)

遷移行列が決まると、最大固有値 λ が決まる。 λ が分かると・・・

(例) 遷移行列 = $\begin{pmatrix} 0.75 & 1.5 & 3 \\ 0.39 & 0 & 0 \\ 0 & 0.39 & 0 \end{pmatrix}$ のとき、最大固有値 λ は1.4



初期値: 1歳 = 20個体, 2歳 = 10個体, 3歳 = 5個体のとき

5年後以降の個体数は、いずれの年齢階級においても、1.4倍ずつ増えていく

遷移行列の最大固有値 λ 内的自然増加率 $r (= \ln \lambda)$

$\lambda > 1$ つまり $r > 0$ のときに個体数は増加

$\lambda = 1$ つまり $r = 0$ のときに個体数は変化なし

$\lambda < 1$ つまり $r < 0$ のときに個体数は減少

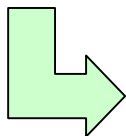
遷移行列の最大固有値は、パソコン等で計算する。
(資料A: エクセルで最大固有値を求める方法)

内的自然増加率 r は、密度効果が働いていないときのパラメータ
密度効果が働いているときの遷移行列の最大固有値を λ
その自然対数を増加率 r と定義する。

このとき、以下の関係が成り立つ。

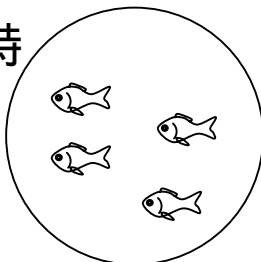
$r > r$

すなわち、 $r > 0$ $r > 0$ であるので、
 r が0以下にならないように管理すれば、個体群は減退しない。



「 $r > 0$ 」が生態リスクの管理目標の一つになり得る

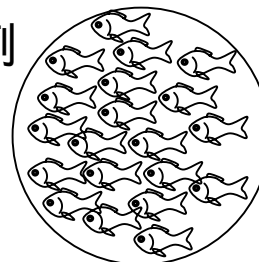
個体密度が低い時



r

生存率，繁殖率→最大値

密度効果の例



r

生存率，繁殖率→最大値よりも低くなる
(理由) 十分な餌や快適な生息場所が得られない

$$\begin{pmatrix} n_1(t+1) \\ n_2(t+1) \\ n_3(t+1) \\ n_4(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_3 & F_4 \\ P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & P_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ n_3(t) \\ n_4(t) \end{pmatrix}$$

繁殖率
生存率

遷移行列を決めるためには、以下の3つのパラメータを知る必要がある。

- ・最大齢
- ・齢別繁殖率 (F_i)
- ・齢別生存率 (P_i)

汚染物質が F_i と P_i に与える影響を評価することでリスクを評価できる。

最大齢，齢別生存率，齢別繁殖率の推算方法(汚染物質の影響がない時)

$$\log(L_{\infty}) = 0.044 + 0.9841 \cdot \log(L_{\max}) \quad (\text{Froese \& Binohlan 2000}) \quad \dots$$

$$\log(k) = 0.567 - 0.658 \cdot \log(L_{\infty}) \quad (\text{勝川ら 2004}) \quad \dots$$

$$\log(-t_0) = -0.3922 - 0.2752 \cdot \log(L_{\infty}) + 1.038 \cdot \log(k) \quad (\text{Pauly 1980}) \quad \dots$$

$$L(t) = L_{\infty} \left(1 - e^{-k(t-t_0)}\right) \quad (\text{ベルタランフィの成長式}) \quad \dots$$

$$\log(L_m) = 0.9469 \cdot \log(L_{\infty}) - 0.1162 \quad (\text{Froese \& Binohlan 2000}) \quad \dots$$

$$t_m = t_0 - \frac{1}{k} \ln \left(1 - \frac{L_m}{L_{\infty}}\right) \quad (\text{ベルタランフィの成長式より}) \quad \dots$$

$$\log(t_{\max}) = 0.5496 + 0.957 \cdot \log(t_m) \quad (\text{Froese \& Binohlan 2000}) \quad \dots$$

$$E(t) = aL^3(t) \quad (\text{アロメトリー式より}) \quad \dots$$

$$\log(M) = 0.219 + 0.95 \cdot \log(k) \quad (\text{勝川ら 2004}) \quad \dots$$

$$F(t) = \text{成熟率} \cdot E(t) \cdot P_0 \cdot \text{雌の比率} \quad (\text{定義式}) \quad \dots$$

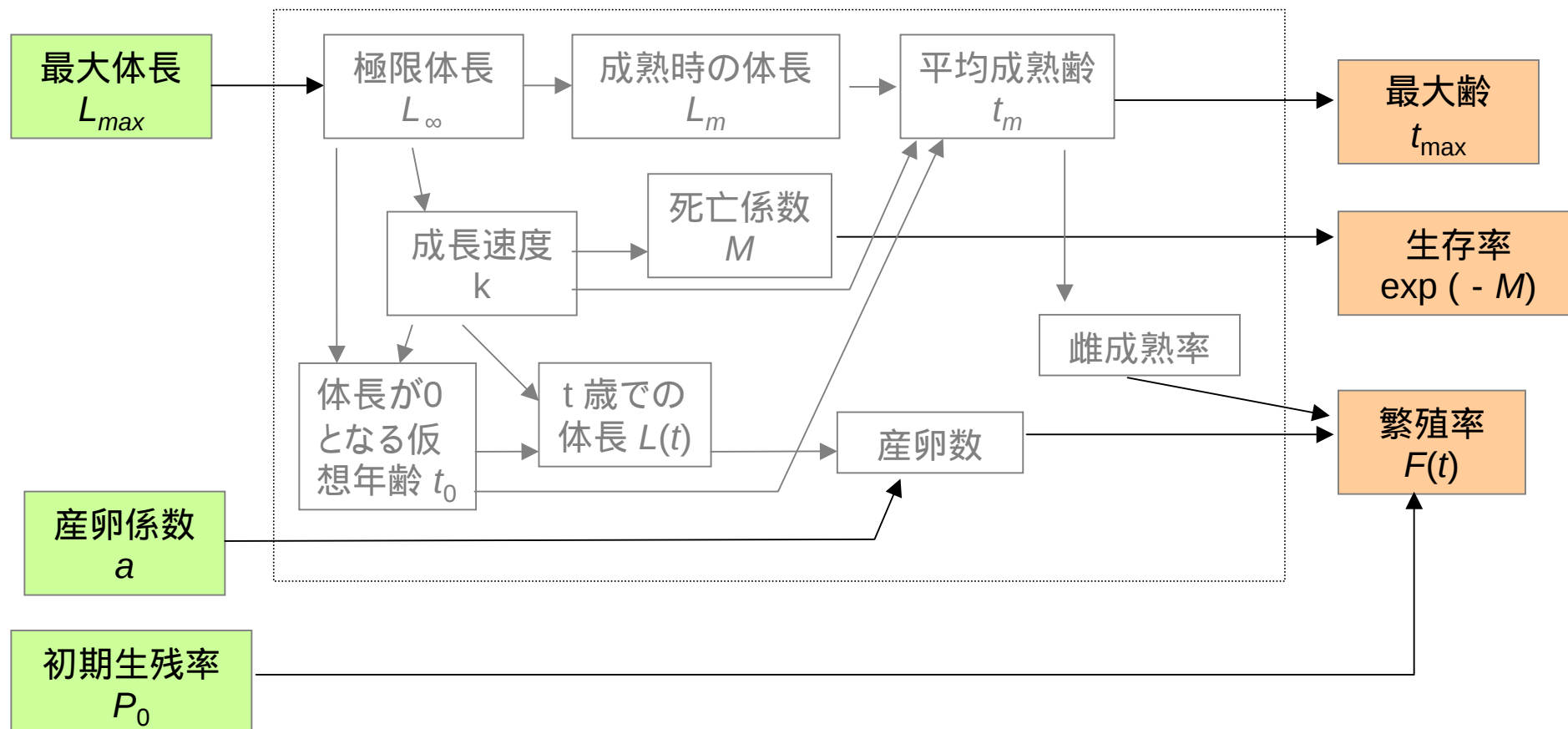
(t_m 以上の齢では成熟率 = 1, t_m 未満の齢では成熟率 = 0とする。雌の比率は特異的でなければ0.5)

$L(t)$: t 歳での体長 [cm]	M : 死亡係数 [yr ⁻¹] (生存率はexp(- M))	$E(t)$: t 歳での年間産卵数 [-]
L_{∞} : 極限体長 [cm]	t_0 : 体長が0となる仮想年齢 [yr]	$F(t)$: t 歳での繁殖率 [-]
L_m : 成熟時の体長 [cm]	$t_{\max}$: 最大齢 [yr]	a : 産卵係数 [cm ⁻³]
k : 成長速度 [yr ⁻¹]	t_m : 平均成熟齢 [yr]	P_0 : 初期生残率 [-]

最大齢，齢別生存率，齢別繁殖率の推算方法(汚染物質の影響がない時)

インプット

アウトプット



(実測値が得られない場合には， 魚類の中でも低い魚種のデータを用いる)

初期生残率 P_0 の実測データが得られない場合

$r = 0.28/t_m$ となるように P_0 を逆算する。ただし、 t_m は成熟齢

(根拠)

57種246個体群の最大年間繁殖率 $F_{\max}$ を調べた結果

$$\ln F_{\max} = 0.28 \sim 2.6 \quad (\text{Myers et al. 1999})$$

内的自然増加率 r と最大年間繁殖率 $F_{\max}$ の関係式 (Myers & Mertz 1997) は、

$$r = (1/t_m) \ln F_{\max}, \quad \text{ただし、} t_m \text{は成熟齢}$$

以上より、多くの種において、 $r = 0.28/t_m$ であると予想される。

最大年間繁殖率 (maximum annual reproductive rate)

密度効果がない状況下で、雌成魚1個体が1年間に生産する雌個体のうち、 t_m 年後まで生き延びて成魚となる個体の数。すなわち、雌成魚1個体あたりの年間産卵数と雌の比率と成熟するまでの生存率の積である。

イワナの生活史パラメータの実測値と推算値の比較（汚染物質の影響がない時）

年齢階級		1	2	3	4	5	6
体長(cm)	実測	7.5	14.1	17.8	20.6	22.4	23.2
	推算	9.4	14.9	18.5	20.7	22.2	23.1
産卵数	実測	0	129	201	264	307	330
	推算	0	93	176	249	305	345
雌成熟率	実測	0.00	0.09	0.84	0.96	1.00	1.00
	推算	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
繁殖率	実測	0	0.229	3.33	4.99	6.05	6.50
	推算	0	0	3.47	4.91	6.03	6.80
生存率	実測	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	推算	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46

実測値：Morita & Yokota (2002)

推算値： $L_{max} = 23.5\text{cm}$, $a = 0.056$

オイカワの生活史パラメータの実測値と推算値の比較（汚染物質の影響がない時）

年齢階級		1	2	3	4
体長(cm)	実測	8.4	10.6	11.9	13.3
	推算	7.5	10.9	12.7	13.7
産卵数	実測	0	258	523	1,030
	推算	0	408	651	814
雌成熟率	実測	0	1	1	1
	推算	0	1	1	1
生存率	実測	0.35	0.35	0.35	0.35

実測値： 中村（1952）

推算値：

$$L_{max} = 14 \text{ cm}$$

$$a = 0.63$$

ウグイの生活史パラメータの実測値と推算値の比較（汚染物質の影響がない時）

年齢階級		1	2	3	4	5
体長(cm)	実測	4.1	11.7	15.9	18.3	19.7
	推算	9.0	14.1	17.3	19.2	20.5
産卵数	実測	0	0	1,489	2,110	2,519
	推算	0	0	1,520	2,100	2,525
雌成熟率	実測	0	0	1	1	1
	推算	0	0	1	1	1
生存率	実測	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44

実測値：

川尻（1956）

推算値：

$$L_{max} = 21.3 \text{ cm}$$

$$a = 0.59$$

生活史パラメータに対する汚染物質の影響（例：ビスフェノールA）

	メダカフルライフサイクル試験（環境省 2004）	ファッドヘッドミノー3世代試験（Sumpter 2001）
仔魚生存率	4410 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし	640 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし
成魚生存率	<u>1179 $\mu\text{g/L}$で16%減少</u> 247 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし	1280 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし
産卵数	1179 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし	<u>1280 $\mu\text{g/L}$で95%減少</u> 640 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし
受精率	1179 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし	報告されていない
孵化率	1179 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし	<u>1280 $\mu\text{g/L}$で100%減少</u> <u>640 $\mu\text{g/L}$で81%減少</u> <u>160 $\mu\text{g/L}$で21%減少</u> 16 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし
体重	明確な傾向なし	1280 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし
体長	明確な傾向なし	1280 $\mu\text{g/L}$ 以下で影響なし

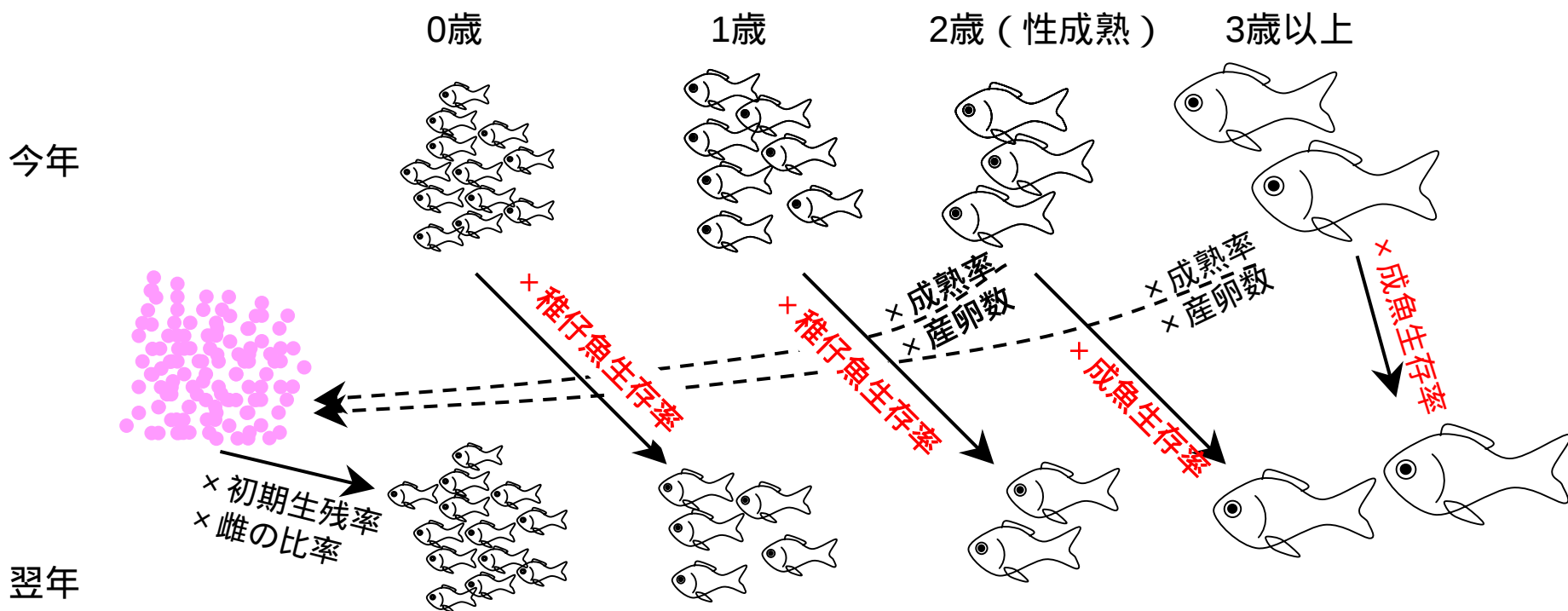
評価対象魚種に対するデータが無い場合

最も感受性の高い魚種のデータを使用

	ビスフェノールA濃度（ $\mu\text{g/L}$ ）			
	16	160	640	1180
成魚生存率	影響なし	影響なし	影響なし	16%減少
産卵数	影響なし	影響なし	影響なし	95%減少
孵化率	影響なし	21%減少	81%減少	100%減少

仔魚生存率, 受精率, 体重, 体長は1180 $\mu\text{g/L}$ まで影響なしとする。

毒性試験で観察された汚染物質の影響を生活史パラメータに反映させる



$$\text{繁殖率} = \text{成熟率} \times \text{産卵数} \times \text{初期生存率} \times \text{雌の比率}$$

受精率の低下
 孵化率の低下
 仔魚生存率の低下
 体長の減少

初期生存率の低下
 成熟率, 産卵数の低下

繁殖率の低下

イワナの遷移行列

最大固有値 λ r ビスフェノールA
の濃度

$$0 \mu\text{g/L} \quad \mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0.229 & 3.33 & 4.99 & 6.05 & 6.50 \\ 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.41 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.41 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.41 & 0.41 \end{pmatrix}$$

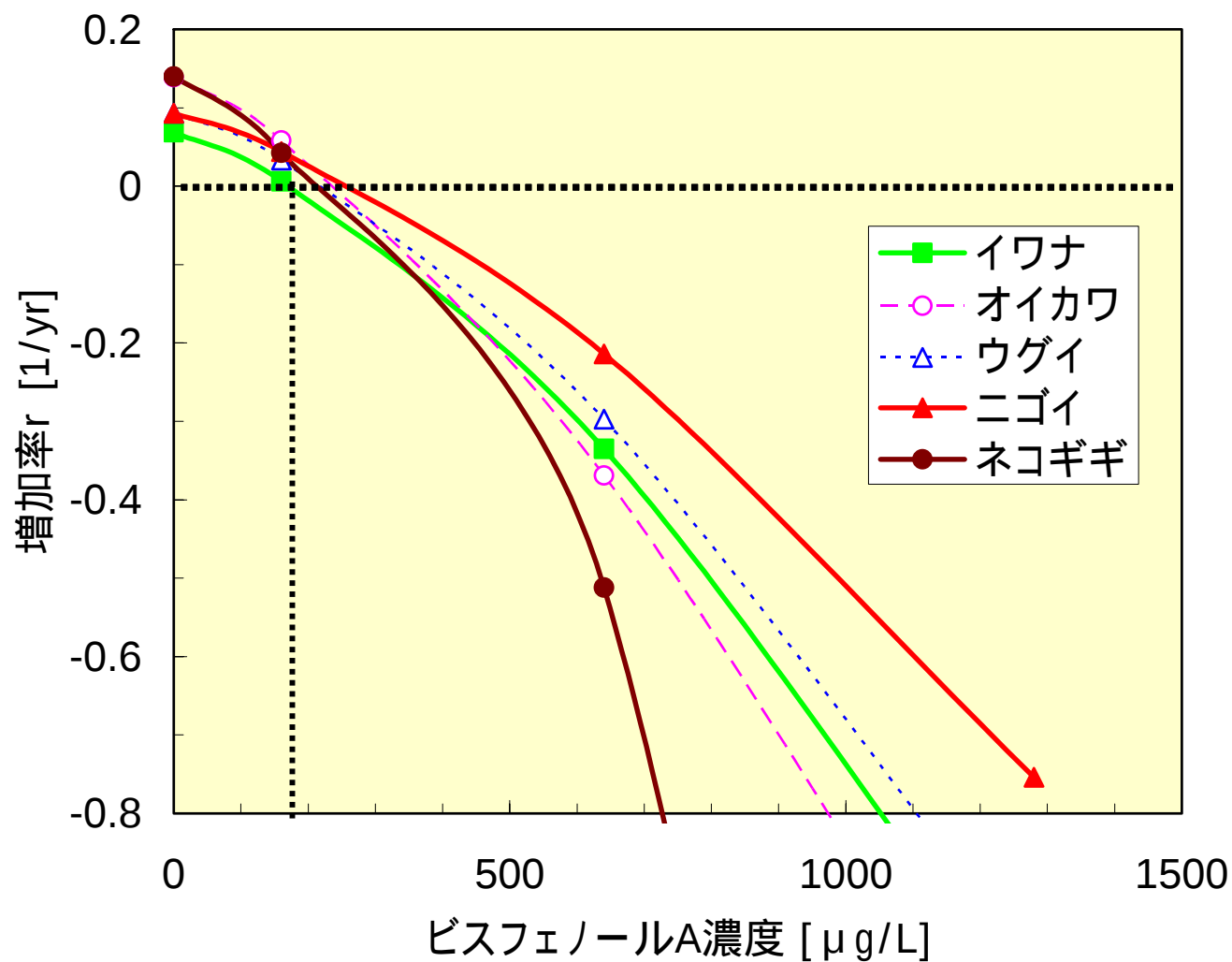
1.071 0.0689

$$640 \mu\text{g/L} \quad \mathbf{A}_{640} = \begin{pmatrix} 0 & 0.229 \cdot 0.19 & 3.33 \cdot 0.19 & 4.99 \cdot 0.19 & 6.05 \cdot 0.19 & 6.50 \cdot 0.19 \\ 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.41 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.41 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.41 & 0.41 \end{pmatrix}$$

0.715 - 0.335

$$1280 \mu\text{g/L} \quad \mathbf{A}_{1280} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.41 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.41 \cdot 0.84 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.41 \cdot 0.84 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.41 \cdot 0.84 & 0.41 \cdot 0.84 \end{pmatrix}$$

0.345 - 1.07



ビスフェノールAへの暴露濃度と個体群の増加率との関係

まとめ

- 個体群の増加率 r は、生態リスクの評価・管理の指標の一つとして利用できる。
- r は齢別の生存率と繁殖率から求められる。
- 図鑑に載っているレベルの情報から生存率と繁殖率を推算する方法を開発した。
- 生存率と繁殖率に対する汚染物質の影響を組み込む方法の一つを提案した。

資料A: エクセルによる遷移行列の最大固有値の求め方(1)

	A	B	C	D	E	F	G
1	イワナ				最大固有値 λ : 2		
2					増加率 r : =LN(G1)		
3		レスリー行列					
4		0	0.229	3.33	4.99	6.05	6.5
5		0.41		0	0	0	0
6		0	0.41	0	0	0	0
7		0	0	0.41	0	0	0
8		0	0	0	0.41	0	0
9		0	0	0	0	0.41	0.41
10							
11	行列式	固有方程式					
12	=MDETERM(B12:G17)	=B4-\$G\$1	=C4	=D4	=E4	=F4	=G4
13		=B5	=C5-\$G\$1	=D5	=E5	=F5	=G5
14		=B6	=C6	=D6-\$G\$1	=E6	=F6	=G6
15		=B7	=C7	=D7	=E7-\$G\$1	=F7	=G7
16		=B8	=C8	=D8	=E8	=F8-\$G\$1	=G8
17		=B9	=C9	=D9	=E9	=F9	=G9-\$G\$1

レスリー行列(B4:G9)に数値を入れ, 最大固有値 λ (G1)に適当な数値を入れる。

固有方程式(B12:G17)に数式を入れる。対角線上の要素は, 対応するレスリー行列の要素から λ を引いた値であり, それ以外の要素は対応するレスリー行列の要素と同じ値である。

行列式(A12)に固有方程式の行列式を求める関数を, 増加率 r (G2)に λ の自然対数を求める関数を入力する。

資料A: エクセルによる遷移行列の最大固有値の求め方(2)

	A	B	C	D	E	F	G
1	イワナ				最大固有値 λ :		2
2						増加率 r :	0.6931
3		レスリー行列					
4		0	0.229	3.33	4.99	6.05	6.5
5		0.41		0	0	0	0
6		0	0.41	0	0	0	0
7		0	0	0.41	0	0	0
8		0	0	0	0.41	0	0
9		0	0	0	0	0.41	0.41
10							
11	行列式	固有方程式					
12	4.47E+01	-2.0000	0.229	3.33	4.99	6.05	6.5
13		0.41	-2	0	0	0	0
14		0	0.41	-2	0	0	0
15		0	0	0.41	-2	0	0
16		0	0	0	0.41	-2	0
17		0	0	0	0	0.41	-1.59

～ までの入力が終わると, 上記のような表示になる。

資料A: エクセルによる遷移行列の最大固有値の求め方(3)

Excelの「ツール」メニューが開かれた状態のスクリーンショット。メニュー内の「ソルバー(V)...」が選択されている。

ワークシート「I21」のデータ:

	A	B	C	D
1	イワナ			
2				
3		レスリー行列		
4		0	0.229	3.3
5		0.41		
6		0	0.41	
7		0	0	0.4
8		0	0	
9		0	0	
10				
11	行列式	固有方程式		
12	4.47E+01	-2.0000	0.229	3.3
13		0.41	-2	
14		0	0.41	
15		0	0	0.4
16		0	0	
17		0	0	
18				
19				
20				

「ツール」メニューの項目:

- スペル チェック(S)... F7
- リサーチ(R)... Alt+クリック
- エラー チェック(K)...
- 音声(H) ▶
- 共有ワークスペース(D)...
- ブックの共有(B)...
- 変更履歴の記録(T) ▶
- ブックの比較と反映(W)...
- 保護(P) ▶
- オンライン グループ作業(N) ▶
- ゴール シーク(G)...
- シナリオ(E)...
- ワークシート分析(U) ▶
- ソルバー(V)...**
- マクロ(M) ▶
- アドイン...
- オートコレクトのオプション(O)...
- ユーザー設定(C)...
- オプション(O)...
- 分析ツール(D)...

「ツール」メニューから「ソルバー (V) ...」を選ぶ。

資料A: エクセルによる遷移行列の最大固有値の求め方(4)

	A	B	C	D	E	F	G
1	イワナ					最大固有値λ:	2
2						増加率r:	0.6931
3		レスリー行列					
4		0	0.220	2.23	4.00	6.05	6.5
5		ソルバー: パラメータ設定 目的セル(E): \$A\$12 目標値: ☐ 最大値(M) ☐ 最小値(N) ☒ 値(V): 0.000001 変化させるセル(E): \$G\$1 制約条件(C): 自動(G) 追加(A) 変更(C) 削除(D) 実行(S) 閉じる オプション(O) リセット(R) ヘルプ(H)					
6							
7							
8							
9							
10							
11	行列式						
12	4.47E+01						
13							
14							
15							
16		0	0	0	0.41	-2	0
17		0	0	0	0	0.41	-1.59

0に近い値(例: 1×10^{-6})を入力

「目的セル」に行列式のセル, 「目標値」の「値」に0に近い値, 「変化させるセル」に最大固有値のセルを入力し, 「実行」のボタンを押す。

資料A: エクセルによる遷移行列の最大固有値の求め方(5)

	A	B	C	D	E	F	G
1	イワナ				最大固有値 λ :		1.0713
2					増加率 r :		0.0689
3		レスリー行列					
4		0	0.229	3.33	4.99	6.05	6.5
5		0.41		0	0	0	0
6		0	0.41	0	0	0	0
7		0	0	0.41	0	0	0
8		0	0	0	0.41	0	0
9		0	0	0	0	0.41	0.41
10							
11	行列式	固有方程式					
12	3.92E-07	-1.0713	0.229	3.33	4.99	6.05	6.5
13		0.41	-1.071313	0	0	0	0
14		0	0.41	-1.071313	0	0	0
15		0	0	0.41	-1.071313	0	0
16		0	0	0	0.41	-1.071313	0
17		0	0	0	0	0.41	-0.661313

最大固有値 λ の解が求まる。

資料B: 引用文献

- Froese R, Binohlan C (2000). Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data. *Journal of Fish Biology* 56:759-773.
- Morita K, Yokota A (2002). Population viability of stream-resident salmonids after habitat fragmentation: a case study with white-spotted charr (*Salvelinus leucomaenis*) by an individual based model. *Ecological modeling* 155:85-94.
- Myers RA, Mertz G (1997). Maximum population growth rates and recovery times for Atlantic cod, *Gadus morhua*. *Fishery Bulletin* 95:762-772.
- Myers RA, Bowen KG, Barrowman NJ (1999). Maximum reproductive rate of fish at low population sizes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 56:2404-2419.
- Pauly D(1980). On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks, *Journal du conseil - Conseil international pour l'exploration de la mer* 39:175-192.
- 勝川木綿, 宮本健一, 松田裕之, 中西準子(2004). 魚類個体群の生態リスクの簡易評価手法. 保全生態学研究9:83 - 92.
- 川尻稔(1956). 千曲川におけるウグイ漁業特にツケバ漁業とウグイの増殖について. 淡水区水産研究所研究報告 5:1-41.
- 中村一雄(1952). 千曲川産オイカワ (*Zacco platypus*) の生活史(環境, 食性, 産卵, 発生, 成長其他) 並にその漁業. 淡水区水産研究所研究報告 1:2-25.

資料C: 有用なデータベースや参考文献

1. 魚類の生活史パラメータのデータベース・図鑑

- FishBase (WorldFish Center による魚類の様々な情報のDB)
<http://www.fishbase.org/search.php>
- 宮地傳三郎, 川那部浩哉, 水野信彦, 原色日本淡水魚類図鑑, 保育社, 1976
- 川那部浩哉, 水野信彦, 細谷和海, 日本の淡水魚, 山と溪谷社, 2001

2. 魚類の生活史パラメータが記載された学術論文・図書の検索

- CiNii (国立情報学研究所の学術雑誌記事のDB)
<http://ci.nii.ac.jp/cinii/servlet/CiNiiTop>
- GeNii (国立情報学研究所のDB。図書の情報も検索可)
<http://ge.nii.ac.jp/genii/jsp/index.jsp>
- JDreamII (科学技術振興機構の文献DB)
<http://pr.jst.go.jp/jdream2/>

3. 個体群動態について解説が詳しい教科書

- H・レシット・アクチャカヤ他, コンピュータで学ぶ応用個体群生態学, 文一総合出版, 2002
- 松田裕之, ゼロからわかる生態学, 共立出版, 2004
- 伊藤嘉昭, 山村則男, 嶋田正和, 動物生態学, 蒼樹書房, 1992
- Hal Caswell, Matrix population models: construction, analysis, and interpretation, Sinauer Associates, Inc., 2001

4. ここで用いた生態リスク評価手法に関連した教科書

- 中西準子, 宮本健一, 川崎一, 詳細リスク評価書シリーズ6 ビスフェノールA, 丸善, 2005
- 中西準子, 蒲生昌志, 岸本充生, 宮本健一, 環境リスクマネジメントハンドブック, 朝倉書店, 2003