

化学物質の生態リスク分析 - 個体群レベル 影響解析への進展

Ecological Risk Assessment of Chemical
Pollutants - Advances in Population-Level
Effect Analysis

横浜国立大学環境科学研究センター

科学技術振興事業団

田中嘉成

Institute of Environmental Science and Technology

Yokohama National University / JCST

Yoshinari TANAKA

1. 単一個体群に対する絶滅リスク評価
2. 絶滅リスクの不確実性解析
3. 種間関係を組み込んだ群集動態モデルによる絶滅リスク評価

1. Extinction risk estimation for single populations
2. The uncertainty analysis for the extinction risk estimation
3. Extinction risk estimation by a community dynamics model dealing with interspecific interaction

生態リスクの規準 = 絶滅確率 (平均絶滅時間減少分)

Unit of Ecological Risk = Extinction Probability

(Decrement of Mean Extinction Time, MET)

人の健康リスク

Human Health Risk

死亡確率

Mortality

損失余命

Reduced Lifespan

生態リスク

Ecological Risk

絶滅確率

Extinction Probability

絶滅時間減少分

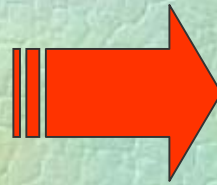
Decrement in Extinction Time

生息地の破壊
destruction of
habitats

乱獲
overhunting

外来種の侵入
invasion by
exotic species

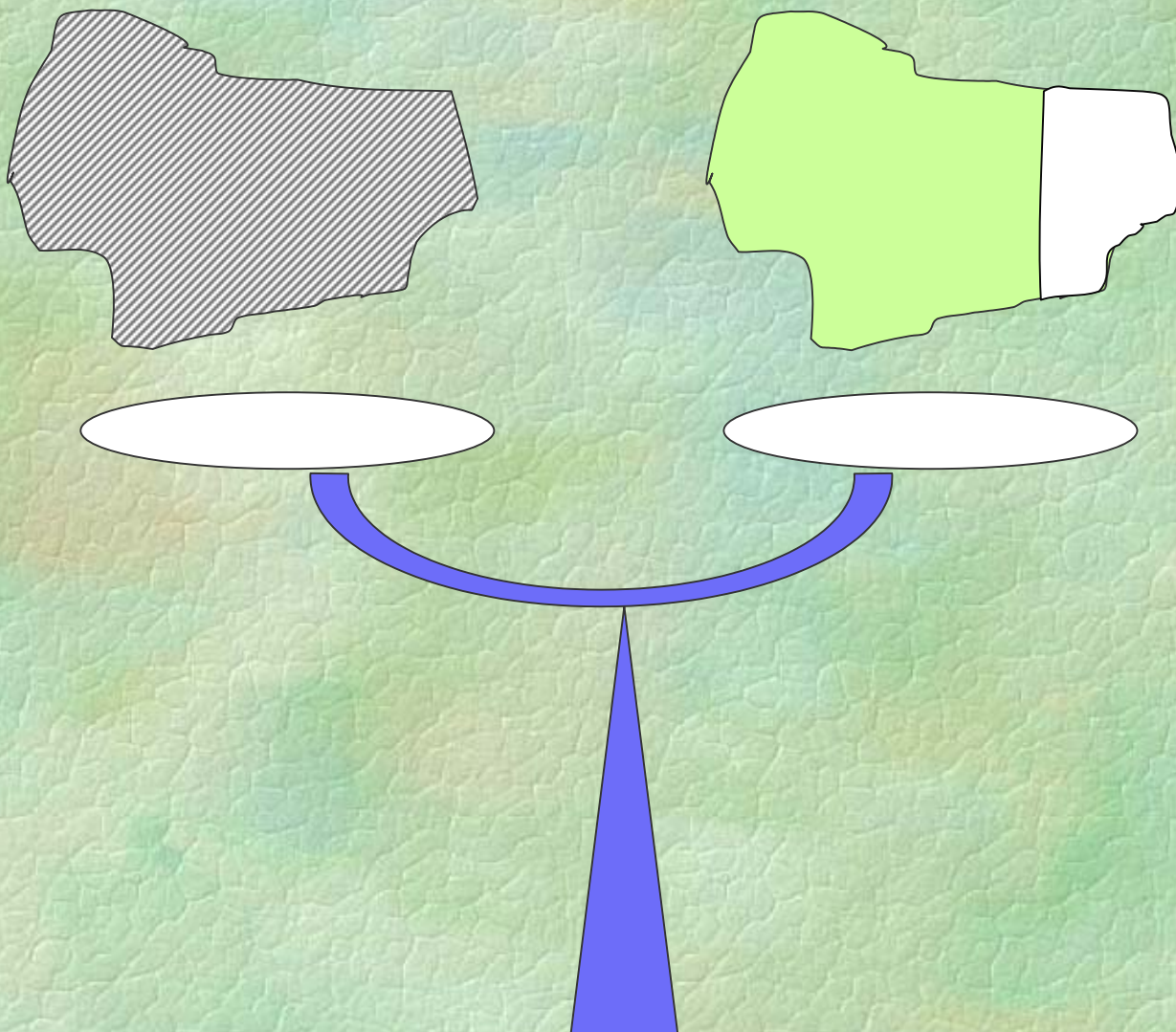
化学物質汚染
pollution by
chemicals



生物種の絶滅
species extinction

化学污染
chemical pollution

生息地破壞
loss of suitable habitat



ベンチマーク法
benchmark

確率法
probabilistic

有害化学物質 pollutant A

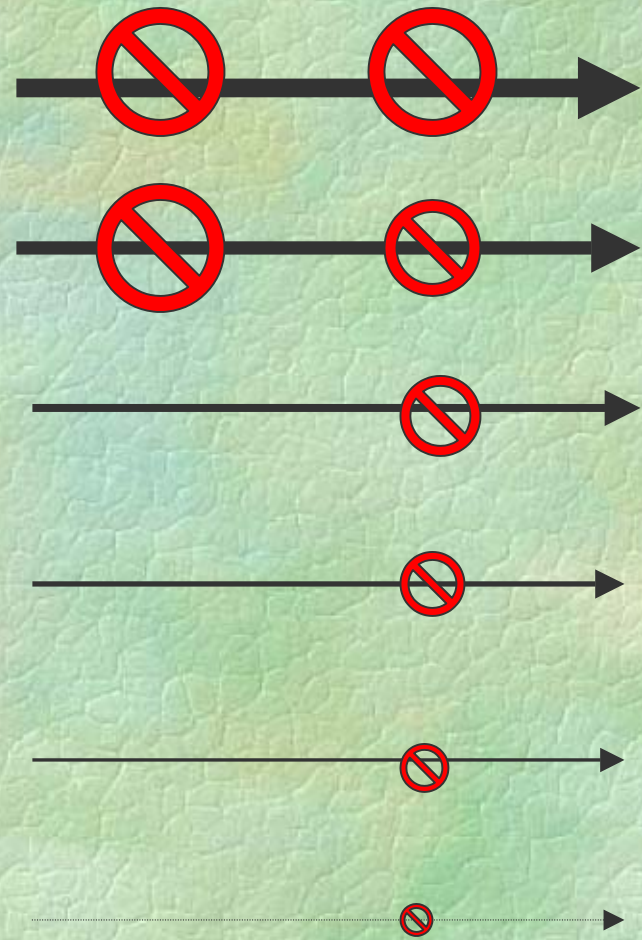
有害化学物質 pollutant B

有害化学物質 pollutant C

有害化学物質 pollutant D

有害化学物質 pollutant E

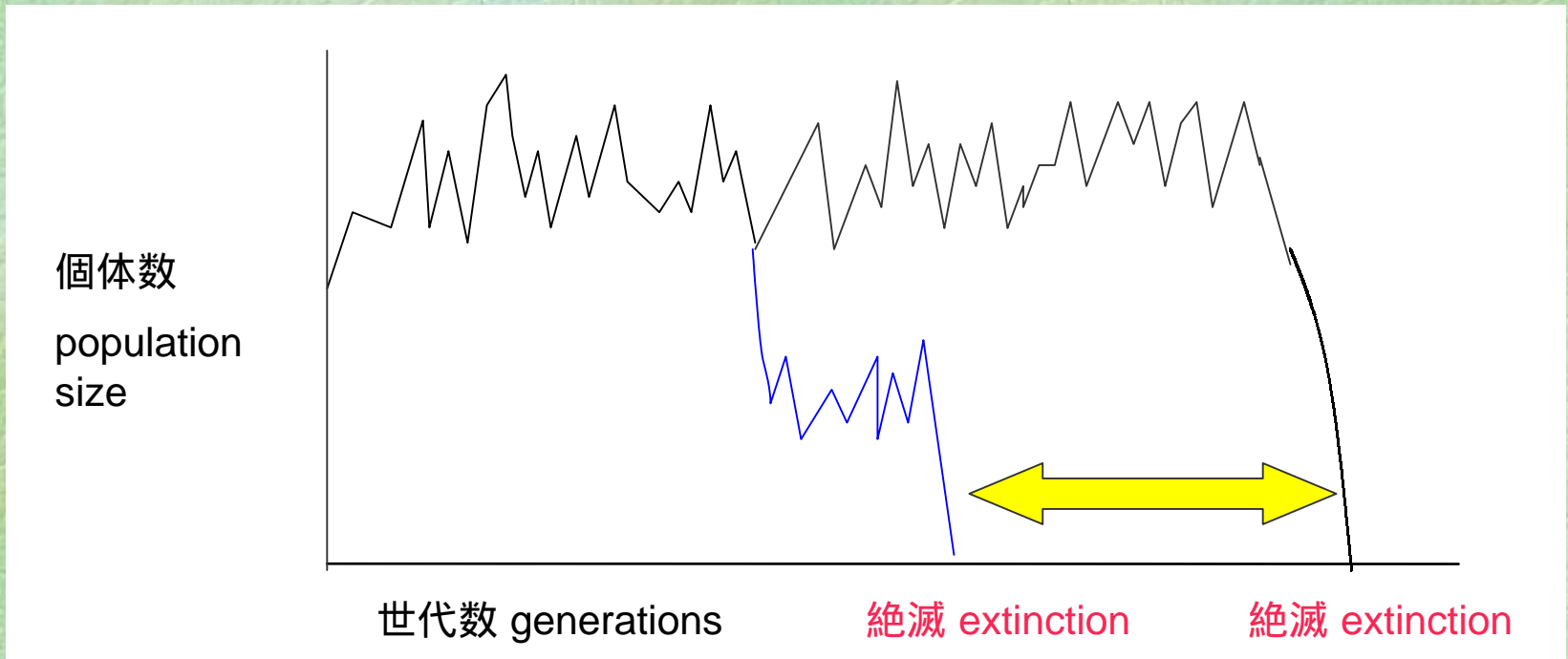
有害化学物質 pollutant F



環境
environ-
ment

個体群の増殖力と絶滅の関係

Relationship between Growth Rate and Extinction of Populations

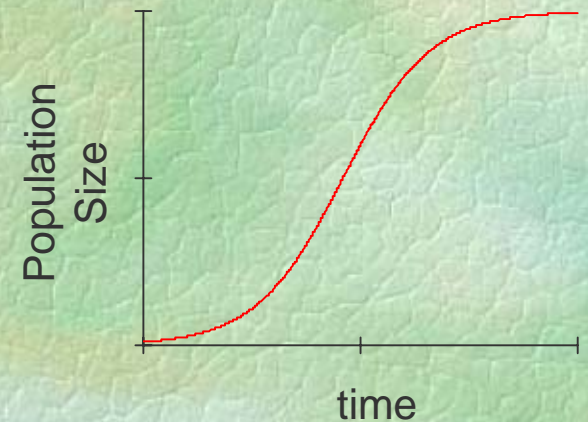


内的自然増加率
intrinsic rate of population growth

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) + \varepsilon$$

環境効果 random
environmental effect

環境収容力 carrying
capacity



平均絶滅時間のスケール則 The Scaling Law of MET

平均絶滅時間 MET

$$T \propto K^{2r/v-1}$$

平均絶滅時間の桁数の変化分

Changes in orders of magnitude of MET

$$\Delta \log T \approx (\Delta r / v) \times \log K$$

r: 内的自然増加率 intrinsic rate of population growth

K: 環境収容力 carrying capacity

v: 環境分散 random environmental variance

カブトミジンコ *Daphnia galeata*



Daphnia galeata に対するLAS12の生命表評価データ

A life table test for LAS12 to *D.galeata*

日齡 age	0mg/L		2.5mg/L	
	生存率 longevity	産仔数 fecundity	生存率 longevity	産仔数 fecundity
0	1.00	0.00	1.00	0.00
2	1.00	0.00	0.90	0.00
5	1.00	0.00	0.70	0.00
8	1.00	0.90	0.60	0.00
12	1.00	11.50	0.60	3.83
14	1.00	7.20	0.60	10.00
16	0.90	1.33	0.60	2.00
19	0.70	9.86	0.60	7.67
r	0.249		0.178	

オイラー・ロトカ方程式 Euler-Lotka Equation

$$1 = \sum_{t=0}^{\infty} \left(e^{-rt} l_t m_t \right)$$

r : 内的自然増加率 Intrinsic rate of natural increase

l_t : 齢 t までの生存率 Longevity until age t

m_t : 齢 t における1匹あたり産仔数 Fecundity at age t

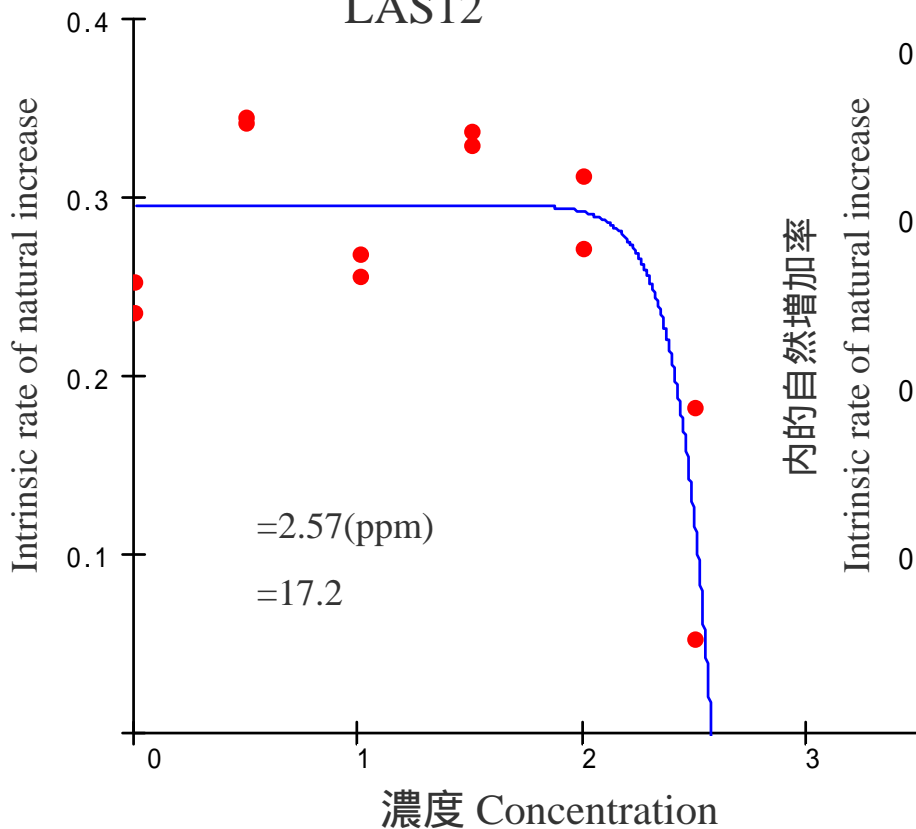
濃度 - 内的自然増加率曲線 (べき関数モデル) :

Concentration-intrinsic rate (r) curve (power function model) :

$$r = r_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right\}$$

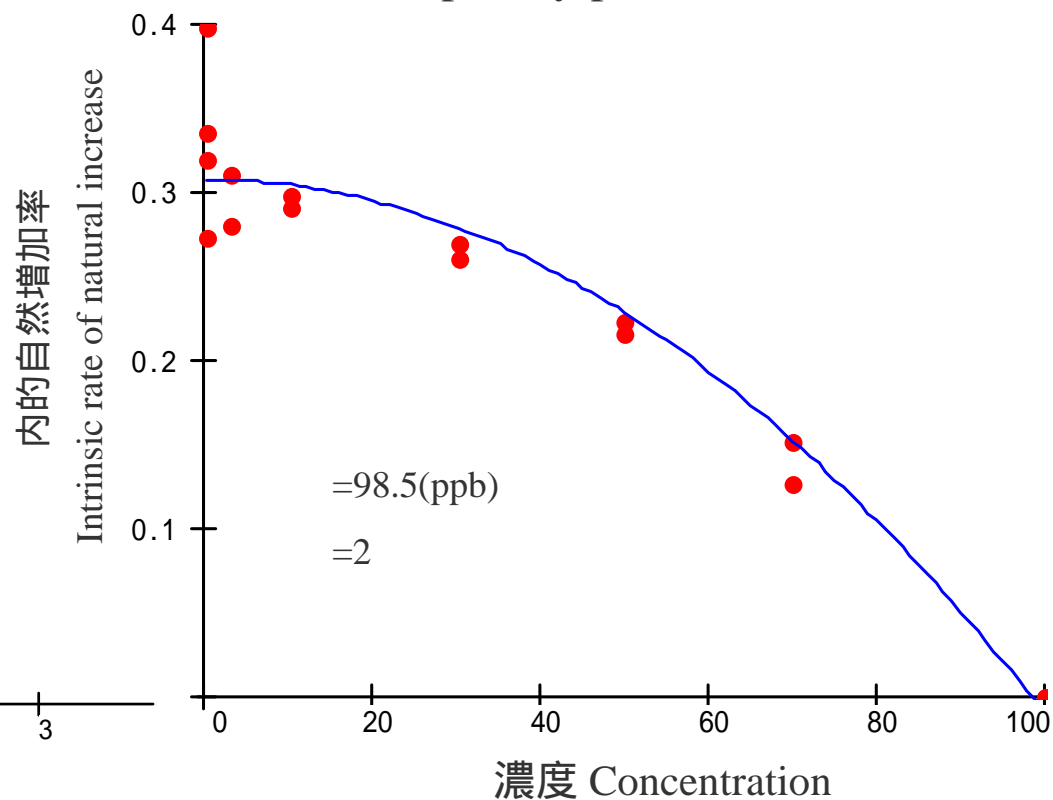
カブトミジンコ *Daphnia galeata*

LAS12



カブトミジンコ *Daphnia galeata*

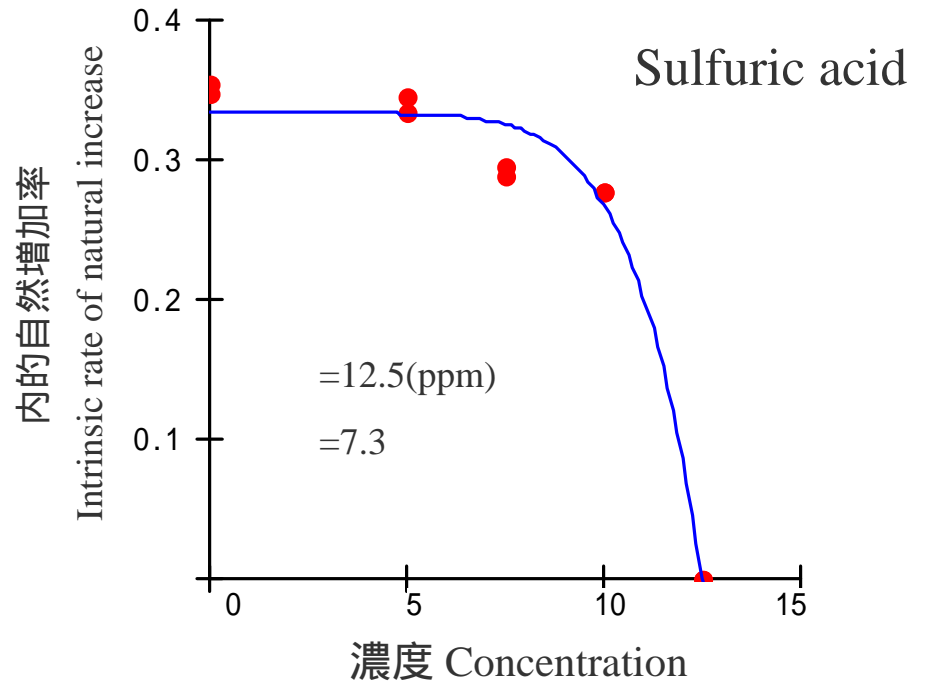
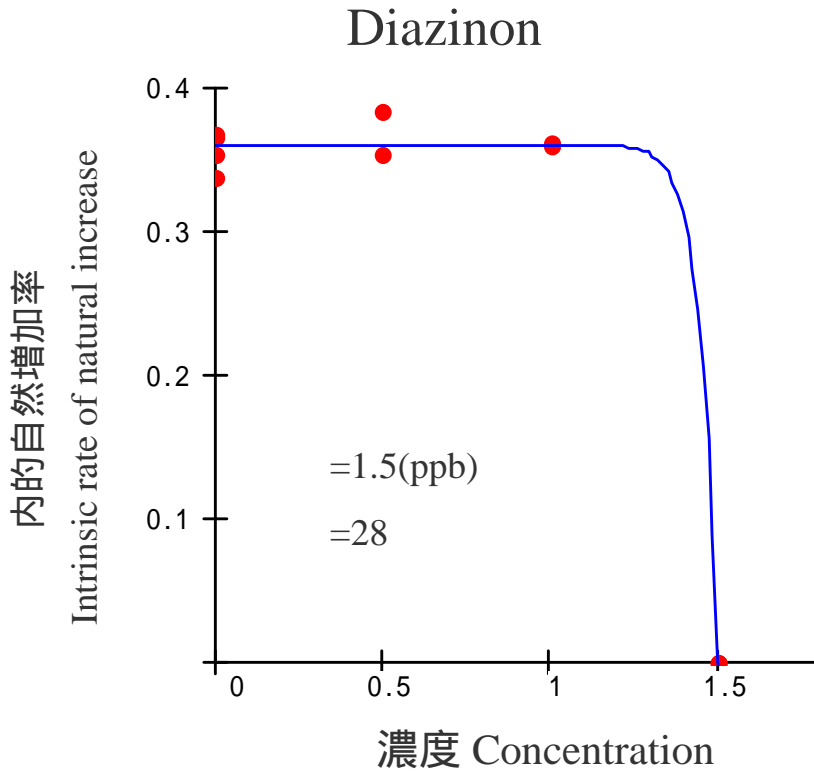
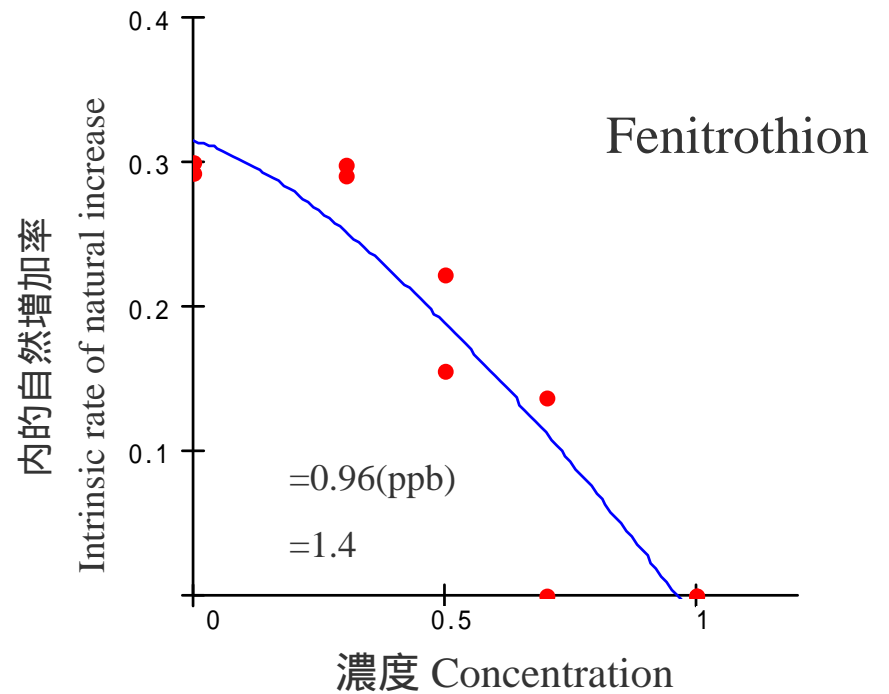
p-nonylphenol



カブトミジンコ (*D. galeata*) を使った その他の生命表評価試験データ

Life table tests with *D. galeata*

フェニトロチオン
ダイアジノン
希硫酸



生命表評価試験
および
個体群増殖試験
のリスト
Life table
evaluation tests
and population
growth
Experiments

authors	journal	year
1 Fernandez -Casalderrey,A., Ferrando, M. D. and E. Andreu -Moliner	Comp.Biochem.Physiol.	1993
2 Coniglio, L., and R. Baudo	Hydrobiologia	1989
3 Gentile, J. H., S. M. Gentile, G. Hoffman, J. F. Heltshe and N. Hairston, Jr	Env.Toxicol.Chem.	1983
4 Marshall, J. S.	J.Fish.Res.Board Can.	1978
5 Winner, R. W. and M. P. Farrell	J.Fish.Res.Board Can.	1976
6 Marshall, J. S.	Ecolog	1962
7 Walton, W. E., S. M. Compton, J.D. Allan and R. E. Daniels	Can.J.Zool.	1982
8 Hummon, W. D.	Amer.Mid.Natur.	1973
9 Daniels, R. E. and J. D. Allan	Can.J.Fish.Aqua.Sci.	1981
10 Gentile, J. H., S. M. Gentile, N. G. Hairston, Jr., and B. K. Sullivan	Hydrobiologia	1982
11 Allan, J. D. and R. E. Daniels	Marine Biology	1982
12 Winner, R. W., T. Keeling, R. Yeager and M. P. Farrell	Freshwater Biology	1977
13 Day, K. and N. K. Kaushik	Environmental Pollution	1987
14 Bertram, P. E. and H. A. Hart	Environmental Pollution	1979
15 Holman, W. F. and K. J. Macek	Transactions of the Amer	1980
16 Maki, A. W.	J.Fish.Res.Board Can.	1979
17 Enserink, E. L., J. L. Maas-Diepeveen, and C. J. Van Leeuwen	Wat.Re	1991
18 Halbach, U., M. Siebert, M. Westermayer and C. Wissel	Ecotoxicol.Env.Saf.	1983
19 Marshall, J. S.	Ecology	1966
20 Francis, P. C., D. W. Grothe and J. C. Scheuring	Bull. Environ. Contam. Tox	1986
21 Klass, E., D. W. Rowe and E. J. Massaro	Bull. Environ. Contam. Tox	1974
22 Winner, R. W.	Environmental Pollution	1981
23 Gray, J. B. and R. J. Ventilla	Ambio	1973
24 Van Leeuwen, C	Aquatic Toxicology	1985
25 Van Leeuwen, C. J., W. J. Luttmer and P. S. Griffioen	Ecotoxicol.Env.Saf.	1985
26 Reish, D. J. and R. S. Carr	Marine Pollution Bulletin	1978
27 Van Leeuwen, C. J., M. Rijkeboer and G. Niebeek	Hydrobiologia	1986
28 Giga, D. P. and J. Canhao	African Entomology	1993
29 Walsh, G. E.	Aquatic Toxicology	1983
30 Chandini, T.	Environmental Pollution	1988
31 Krishnan, M. and S. Chockalingam	Environmental Pollution	1989
32 Weinberger, P. and M. S. Rea	Environmental and Experim	1982
33 Longstaff, B. C. and J. M. Desmarchelier	J.stored Prod.Res.	1983
34 Nimmo, D. R., L. H. Bahner, R. A. Rigby, J. M. Sheppard and A. J. Wilson, Jr	Aquatic Toxicology and H	1977
35 Hatakeyama, S. and H. Shiraishi	Water Res	e 1991
36 Comber, M. H. I., T. D. Williams and K. M. Stewart	Water Res	e 1993
37 Ruzycki, E. M., Axler, R. P., Owen, C. J. and Martin, T. B.	Env.Toxicol.Chem.	1998
38 Hansen, F., V. E. Forbes and T. L. Forbes	Functional Ecology	1999

濃度 - 内的自然増加率モデル

The concentration- r models

3つのモデル Three models

べき関数 power function

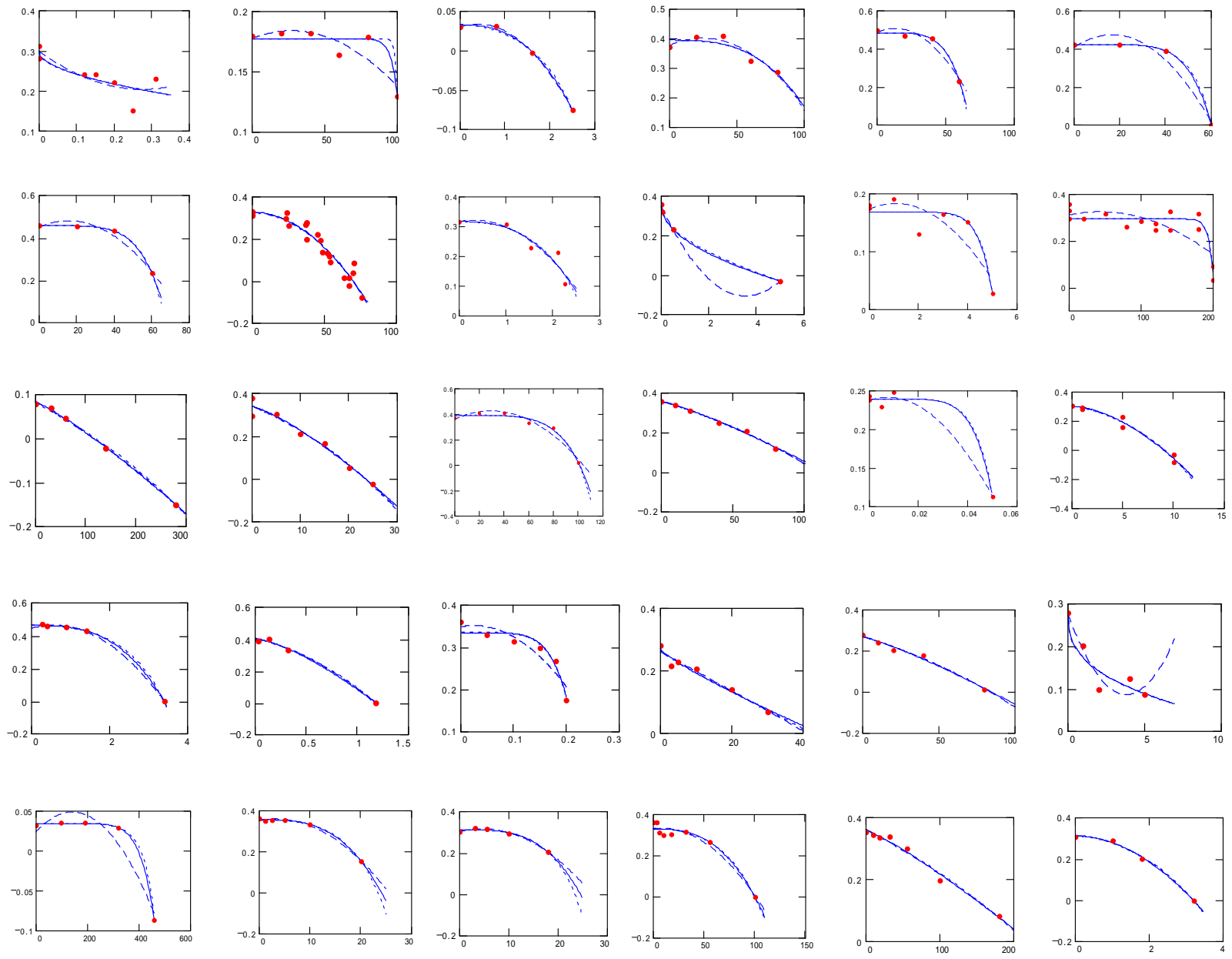
ワイブル・モデル Weibull model

二次関数 quadratic function

MSC (モデル選択基準 model selection criterion):

数学的なモデルがデータに当てはまる程度を表す指標

An index of fitness of mathematical models to data.



MSCのヒストグラム

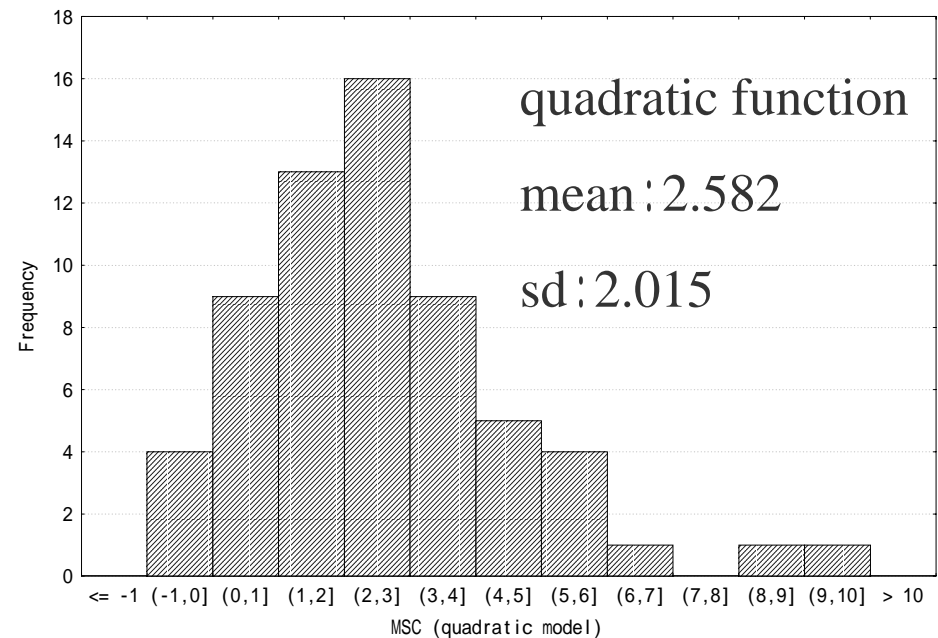
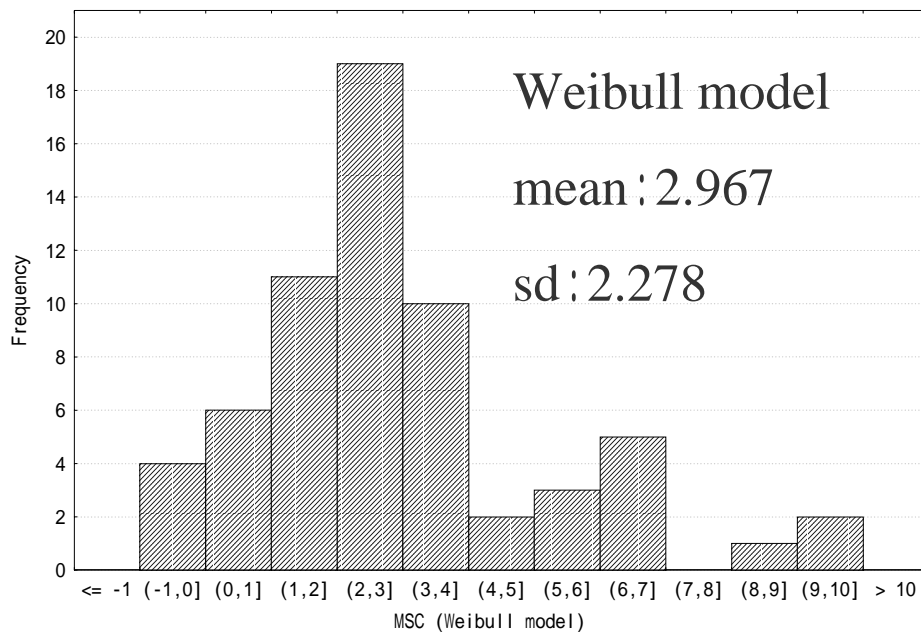
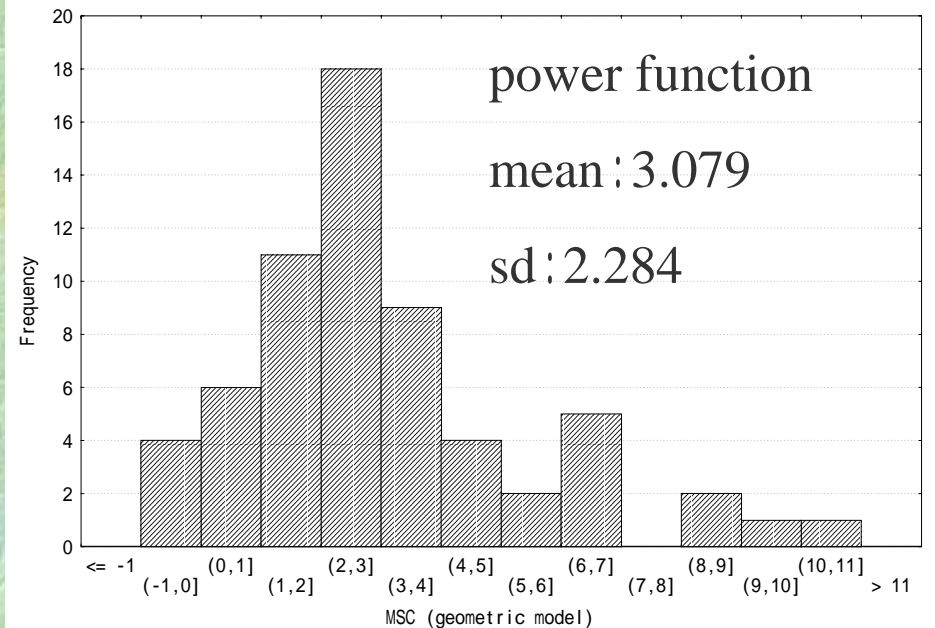
Histograms of MSC

Wilcoxon test

power vs Weibull: $p < 0.05$

power vs quadratic: $p < 0.001$

Weibull vs quadratic: $p < 0.05$

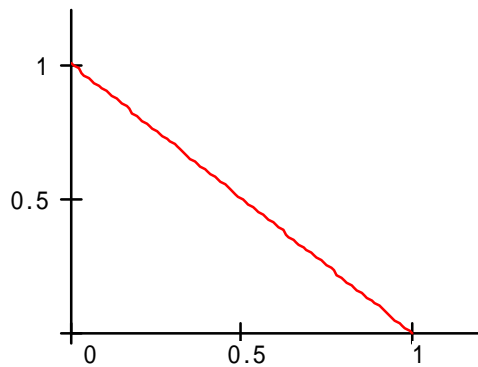


濃度 - 内的自然増加率曲線 (べき関数モデル) :

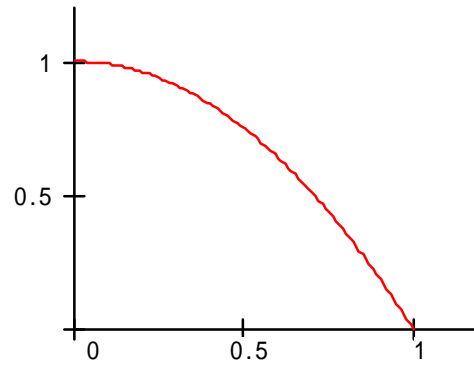
Concentration-intrinsic rate (r) curve (power function model) :

$$r = r_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right\}$$

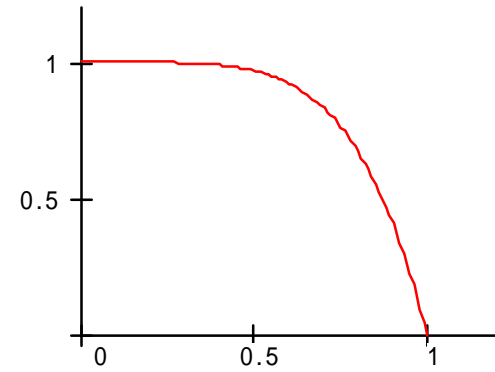
=1



=2



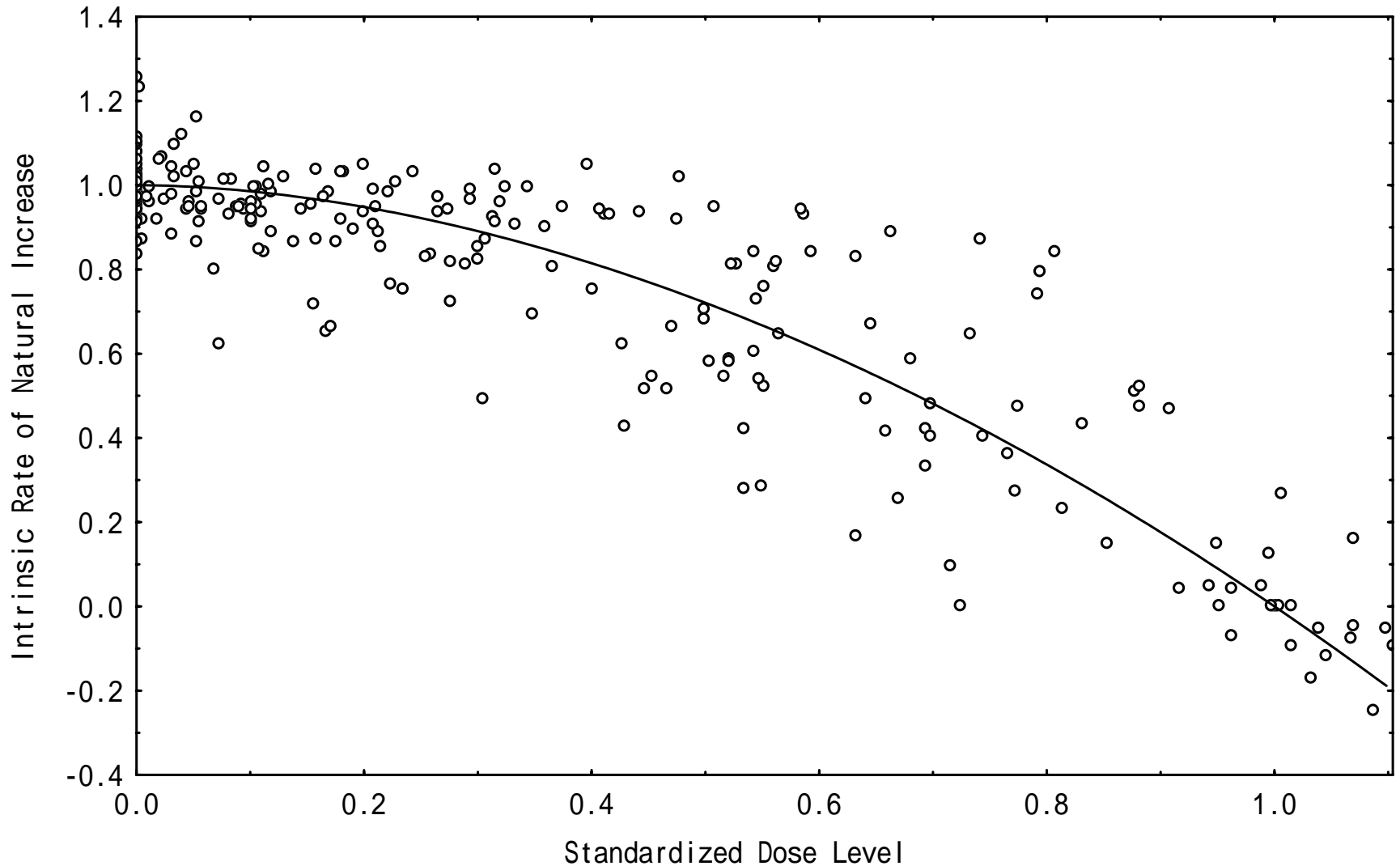
=5



標準化された全データのべき関数モデルへのあてはめ

Curve Fitting of the Standardized Entire Data to the Power Function Model

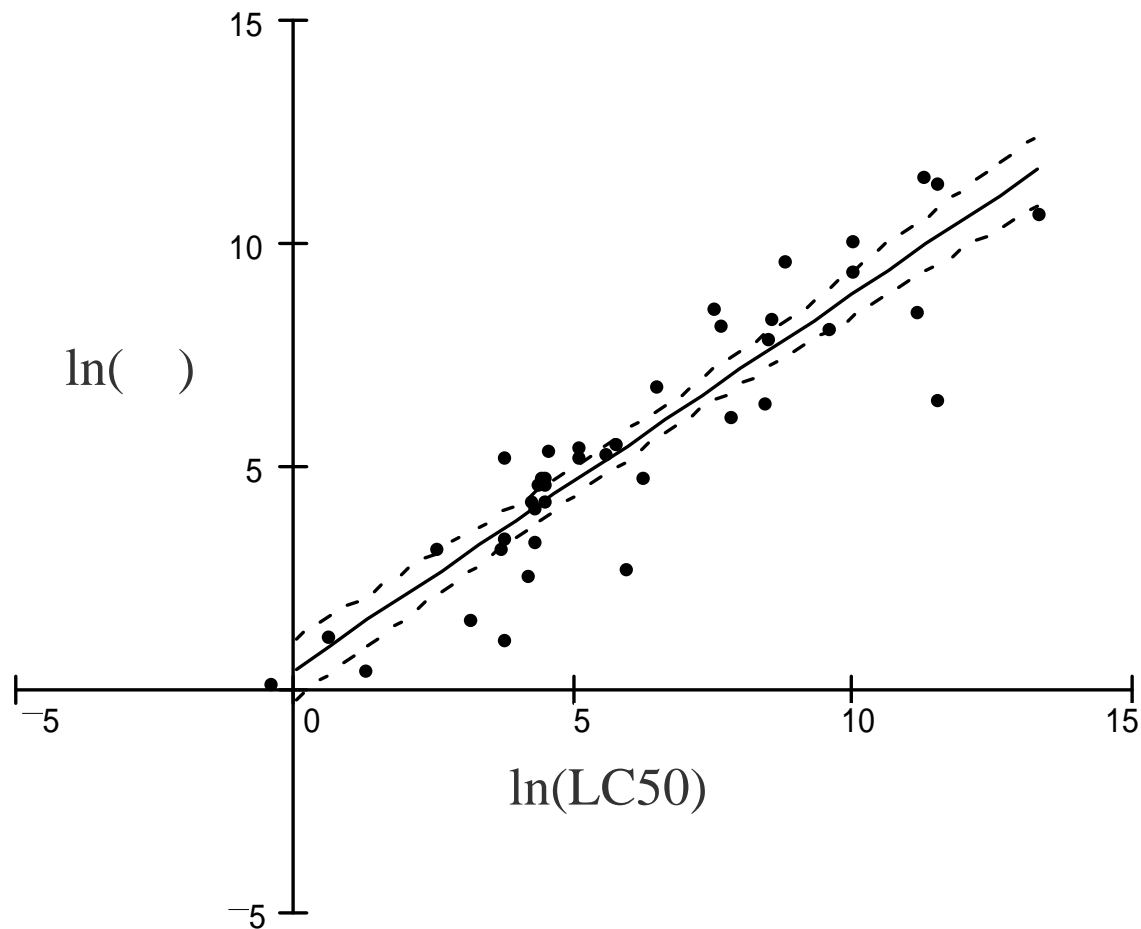
model: $y=1-x^{\alpha}$
 $\alpha=1.8399$



急性 - 慢性外挿による半数致死濃度LC50から 値の推定

Estimation of LD_{50} -values from acute 50 % lethal concentration (LC50) by the acute-chronic extrapolation

$$y = cx^b$$
$$\ln(y) = b \ln(x) + \ln(c)$$
$$b = 0.843$$
$$c = 1.562$$

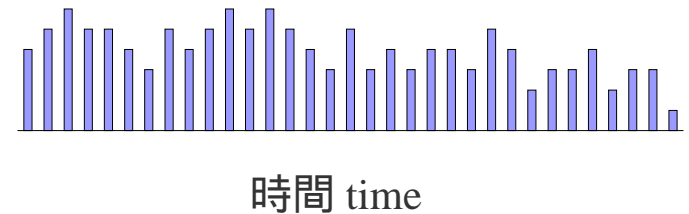
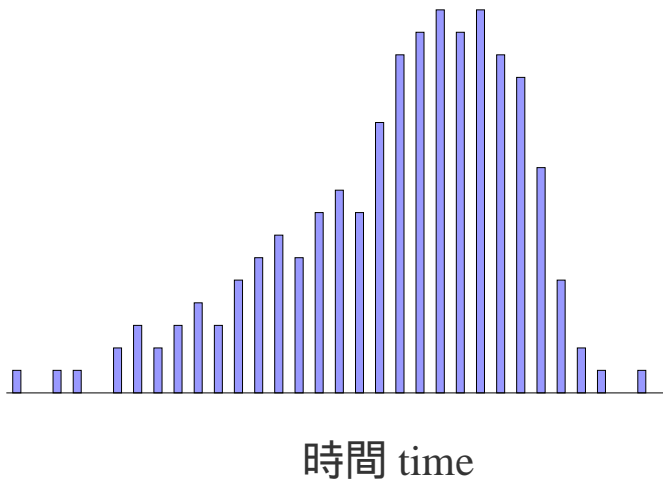


平均絶滅時間と絶滅確率の関係

Relationship between mean extinction time
and extinction probability

絶滅数

Number of
extinctions



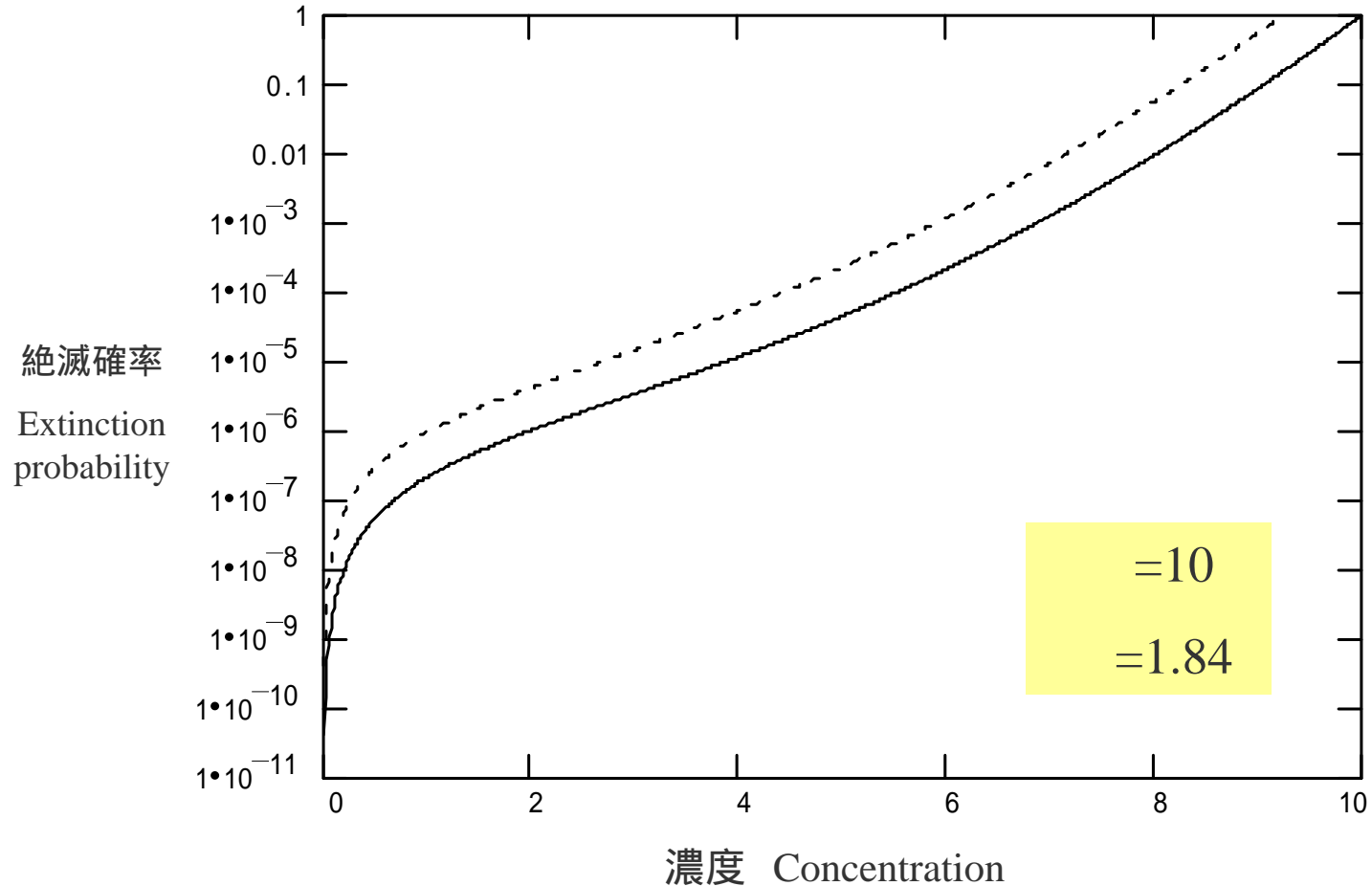
$p(t)$: 時間の関数 function of time



$p=1/T$

化学物質濃度にしたがって増加する絶滅確率

Extinction probability increasing with concentration of chemicals



Daphnia に対する絶滅リスクの算出例 Extinction risks of some pollutants for Daphnia

化学物質	chemicals	MEEC	EEC	LC50	p	p [*]	EHQ
L A S	LAS	3000	1500	5700	4.00×10^{-4}	5.60×10^{-3}	26.3
ピリダフェンチオン	pyridaphenthion	12	6	38	7.35×10^{-7}	3.75×10^{-6}	15.8
馬拉ソン	malathon	4.5	2.24	13	5.91×10^{-7}	3.03×10^{-6}	17.2
ダイアジノン	diazinon	2	1	7.8	2.58×10^{-7}	1.34×10^{-6}	12.8
ノニルフェノール	nonylphenol	7.1	3.5	75	7.59×10^{-8}	4.13×10^{-7}	4.67
フェノカルブ	fenocarb	12	6	320	2.09×10^{-8}	1.30×10^{-7}	1.88
フェニトロチオン	fenitrothion	0.2	0.1	9.2	2.58×10^{-9}	1.99×10^{-8}	1.09
ベンチオカーブ	benthiocarb	7	3.5	750	2.04×10^{-9}	1.60×10^{-8}	0.467
メフェナセット	mefenaset	8	4	1840	6.46×10^{-10}	5.57×10^{-9}	0.217
フェンチオン	fenthion	0.05	0.03	5.5	4.41×10^{-10}	3.95×10^{-9}	0.455
モリネート	molinate	24	12	40000	3.86×10^{-11}	4.13×10^{-10}	0.03
シメトリン	simetryn	9	4.5	27000	1.18×10^{-11}	1.36×10^{-10}	0.017
プレチラクロール	pretyrachlor	6	3	26500	6.33×10^{-12}	7.58×10^{-11}	0.011
ブタクロール	butachlor	2	1	25000	8.38×10^{-13}	1.13×10^{-11}	0.004

MEEC	環境中最大濃度 (ppb)	Maximum environmental concentration (ppb)
EEC	環境中濃度 (最大濃度 * 0.5)	Environmental exposure concentration (maximum*0.5)
LC50	急性毒性値 (ppb)	Acute toxicity
p	絶滅確率	Extinction probability
p [*]	絶滅確率 (上限値)	Extinction probability (upper bound)
EHQ	(EEC/LC50) * 100	

不確実性解析 Uncertainty analysis

平均絶滅時間の推定誤差
Error variance of mean extinction time

=

値の推定誤差

Error variance due to -values

+

値の推定誤差

Error variance due to -values

+

曝露濃度の推定誤差

Error variance due to EEC

+

外挿推定による誤差

Error variance due to extrapolation

log Tの分散成分の暴露濃度に対する変化(外挿なし)

Changes in variance components of log T due to exposure concentration (without extrapolation)



値による分散 Variance due to



値による分散 Variance due to

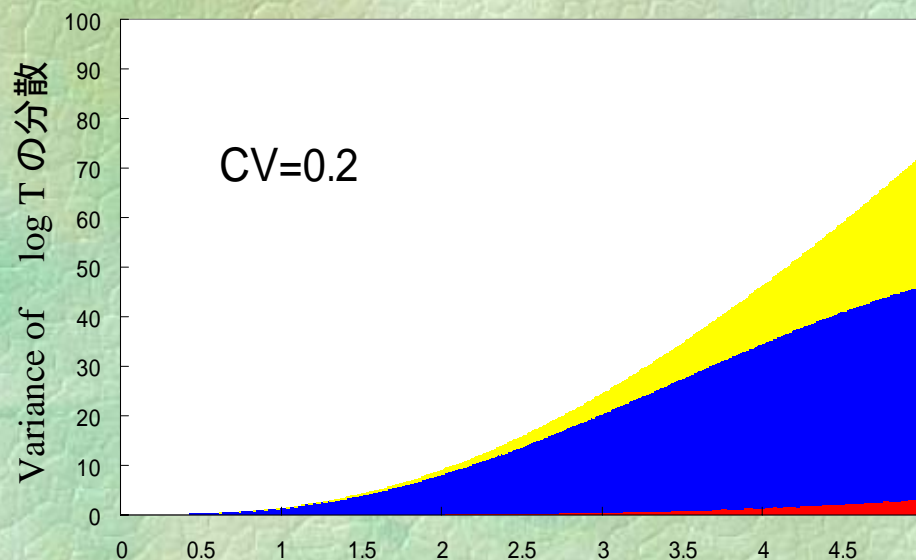


曝露濃度推定誤差による分散

Variance due to estimation error of EEC

環境中濃度推定の変動係数が0.2の場合

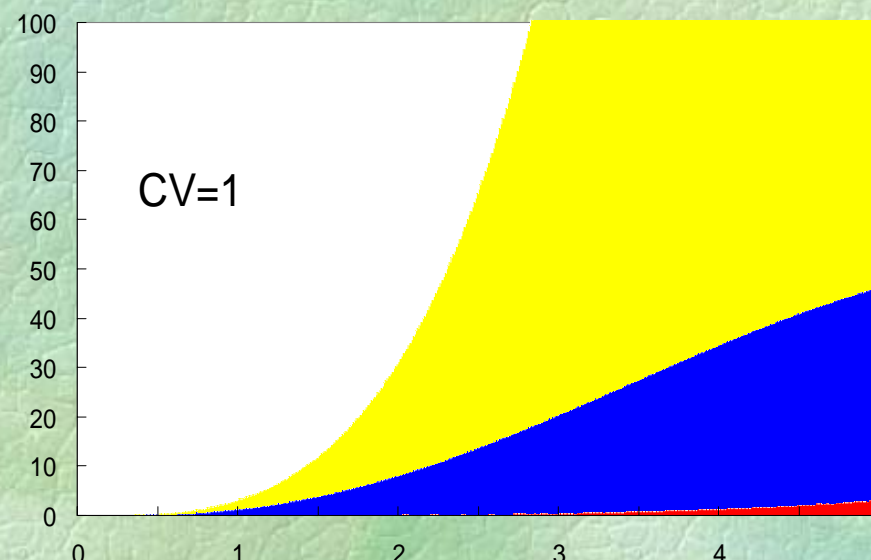
Coefficient of variation in estimation of EEC is 0.2.



環境中曝露濃度 (=10)
Environmental exposure concentration

環境中濃度推定の変動係数が 1 の場合

Coefficient of variation in estimation of EEC is 1.



環境中曝露濃度 (=10)
Environmental exposure concentration

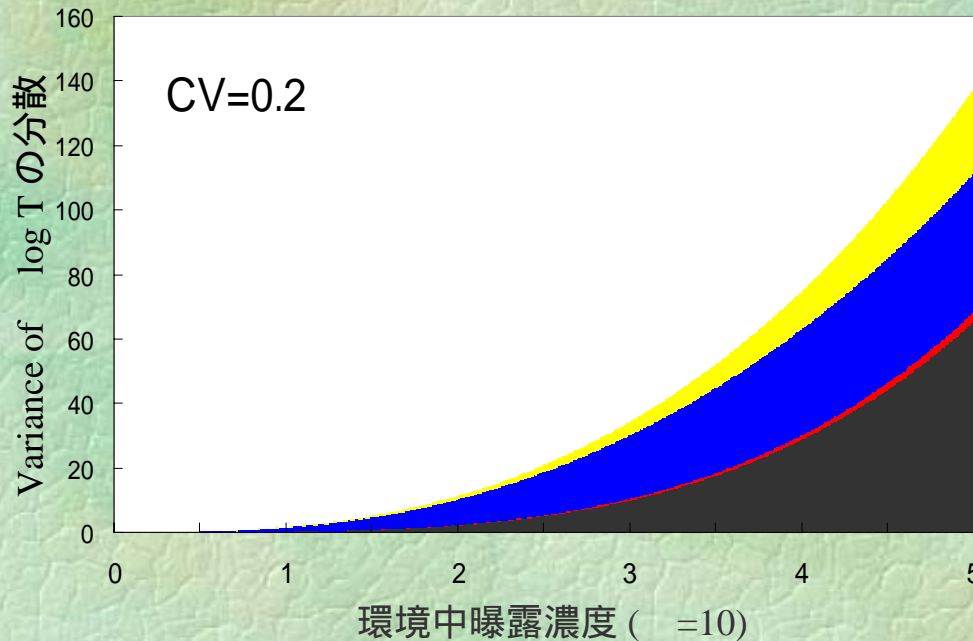
log Tの分散成分の暴露濃度に対する変化(外挿あり)

Changes in variance components of log T due to exposure concentration (with extrapolation)

- 値による分散 Variance due to
- 値による分散 Variance due to
- 曝露濃度推定誤差による分散 Variance due to estimation error of EEC
- 外挿推定による分散 Variance due to extrapolation

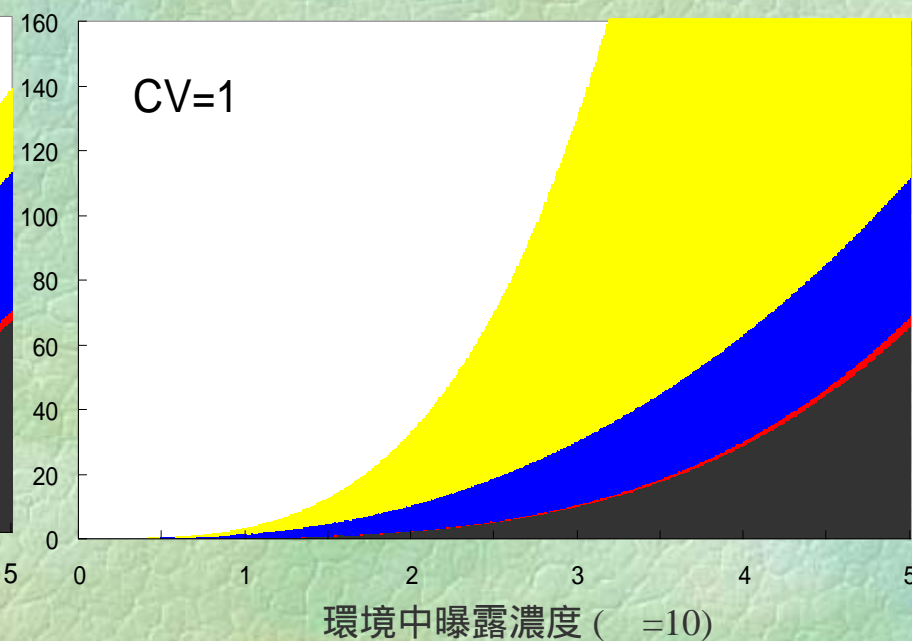
環境中濃度推定の変動係数が0.2の場合

Coefficient of variation in estimation of EEC is 0.2.



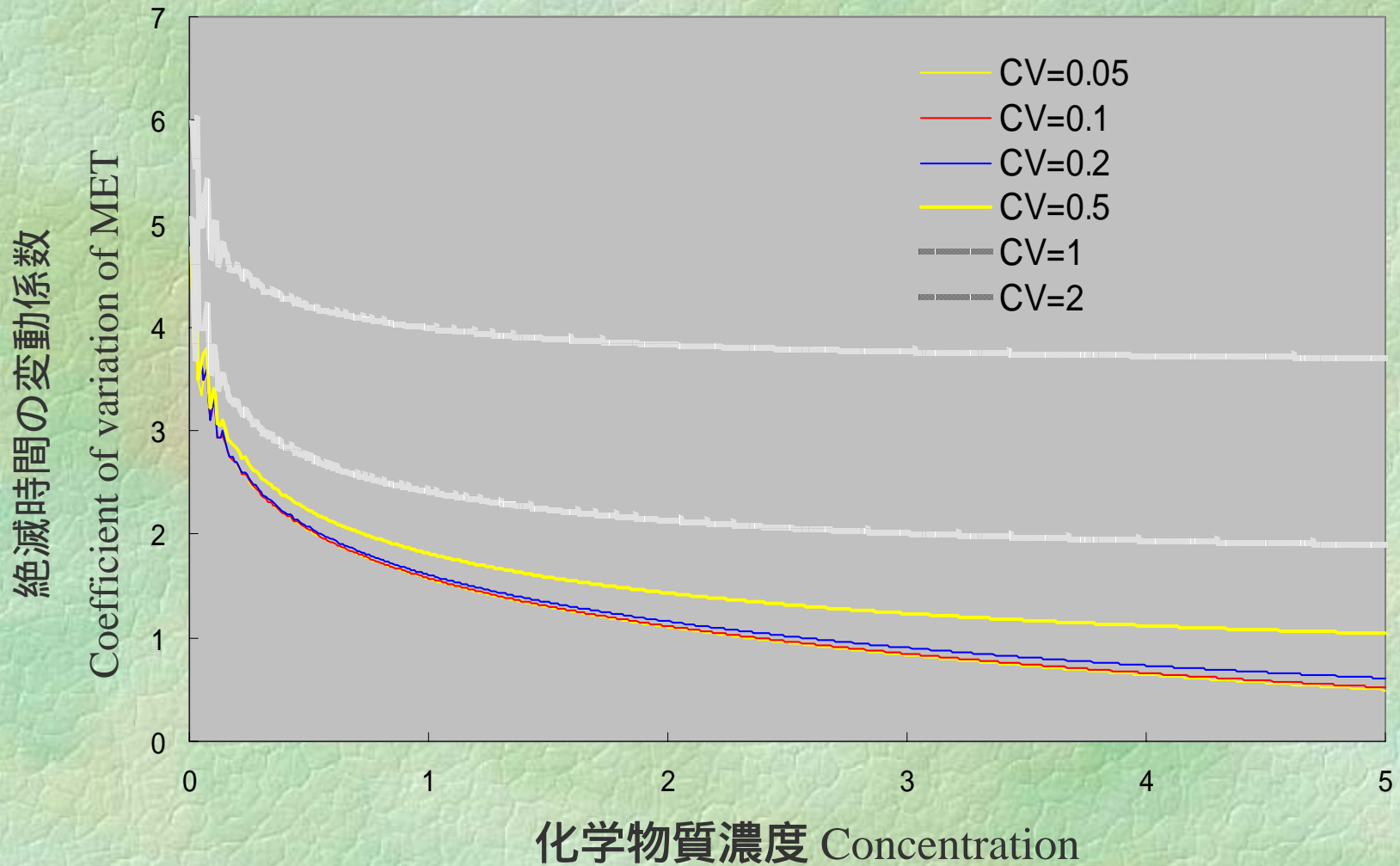
環境中濃度推定の変動係数が1の場合

Coefficient of variation in estimation of EEC is 1.



log T の変動係数 Coefficient of variation of log T

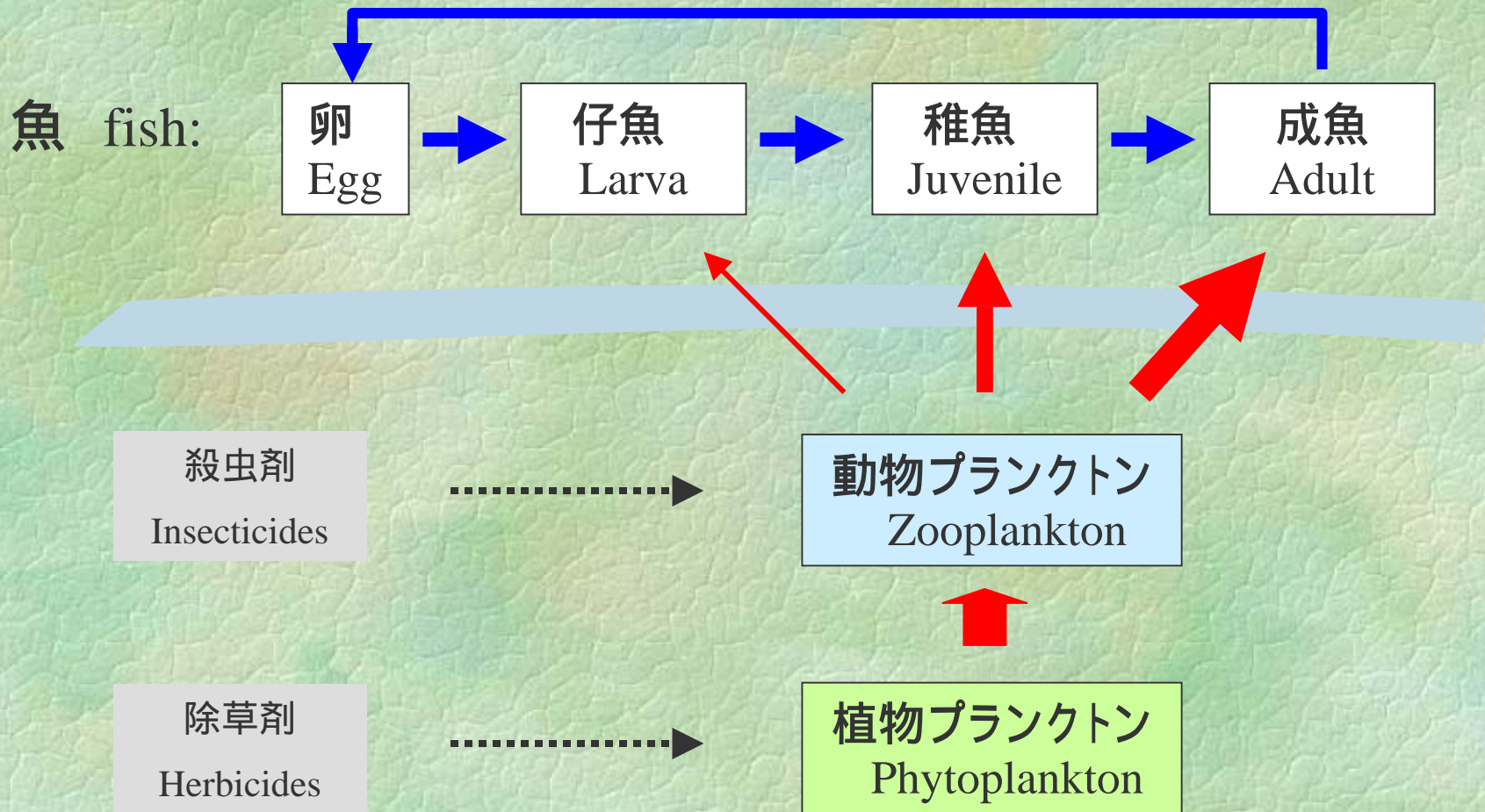
(外挿の無い場合 without extrapolation)



種間相互作用を介する生態リスク - 3種系群集モデル

Ecological risk through interspecific interaction

: 3-species community model



植物プランクトン - 動物プランクトンの捕食被捕食関係

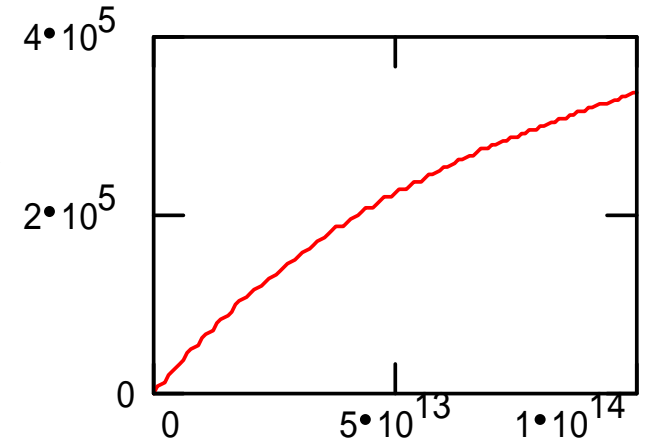
Prey-predator association between phyto- and zooplankton

Holling type II equation

$$\frac{an_p n_z}{1 + hn_p}$$

食べられた植物プランク
トンの数

Number of eaten
phytoplankton

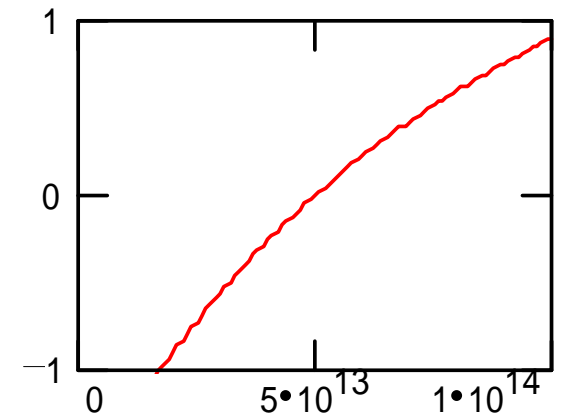


植物プランクトン密度 Density of Phytoplankton

$$\left(\frac{bn_p}{1 + hn_p} - c \right) n_z$$

捕食によって増加した動
物プランクトンの数

Number of zooplankton
that increased by predation



植物プランクトン密度 Density of Phytoplankton





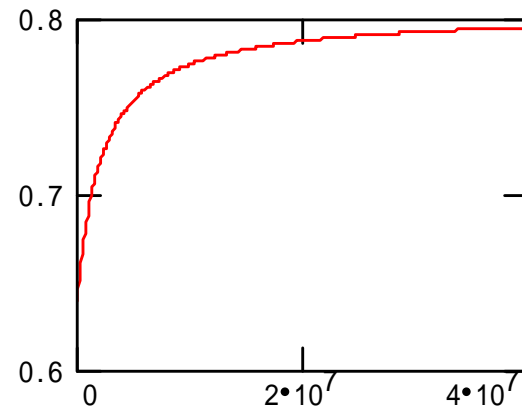
動物プランクトン - 魚の捕食被捕食関係

Prey-predator association between zooplankton and fish

魚の生存率

Survival rate of fish

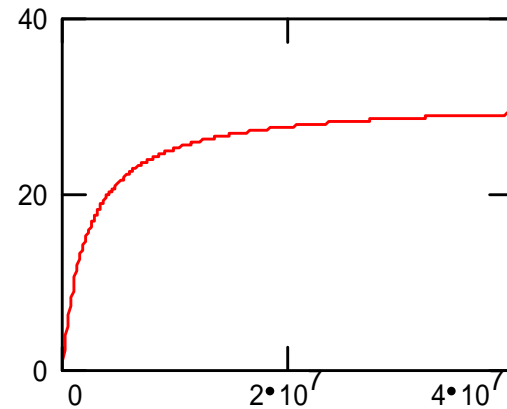
生存率
Survival rate



魚の産卵数

Fecundity of fish

産卵数
Fecundity



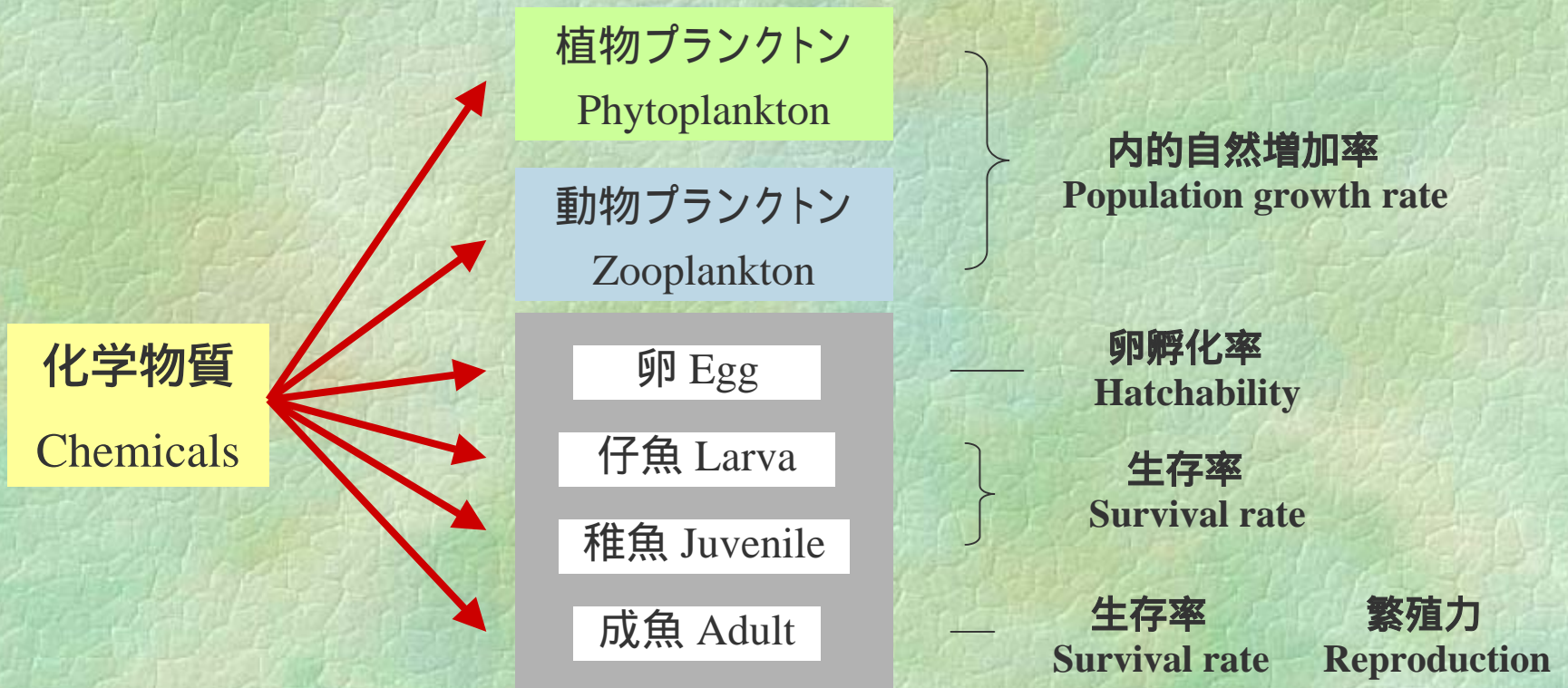
3日単位

Unit time: 3 days

動物プランクトン密度

Density of zooplankton

化学物質の効果 Effect of pollutant chemicals



毒性データ (LC50値)

Toxicity data (LC50)

(μ g/L)

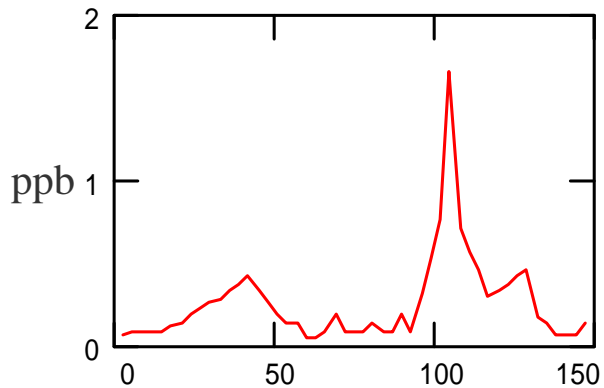
Chemicals	Algae	Daphnia	Egg	Larva	Juvenile	Adult	Reproduction
Diazinon		1.5	9700	5400	2800	5500	
Pyridafenthion		38	9500	9500	4750	9500	
Pretyrachlor	0.94(1)	27000	2000	1400	810	1800	
Butachlor	1.16(1)	25000	1700	1700	850	1700	
L A S 1 2	25000(2)	2500	4600	5000	6500	23000	
p-nonylphenol	750	75					50

任意外挿値 Tentative values

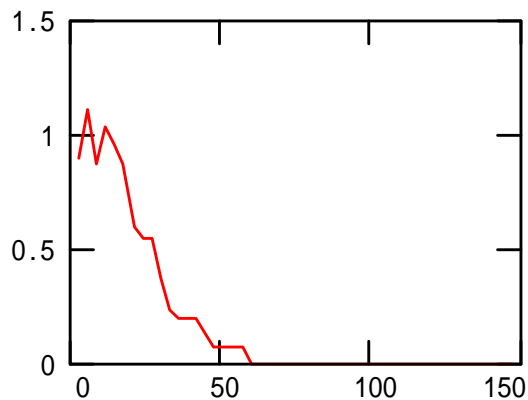
値 -values

環境中曝露データ Environmental Exposure Data

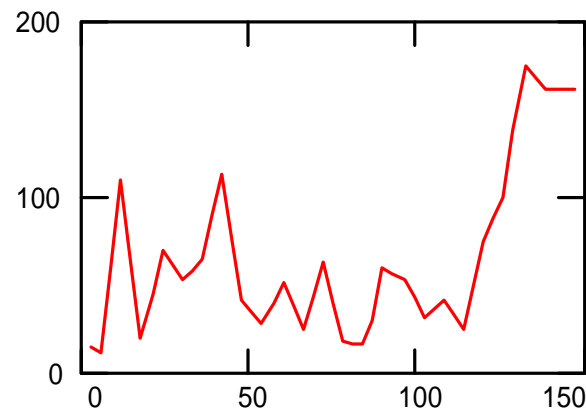
ダイアジノン Diazinon



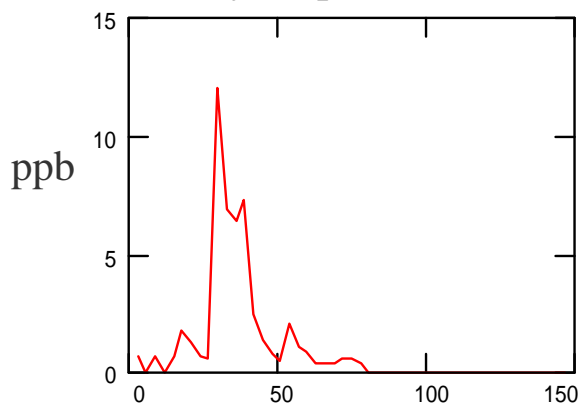
ブタクロール Butachlor



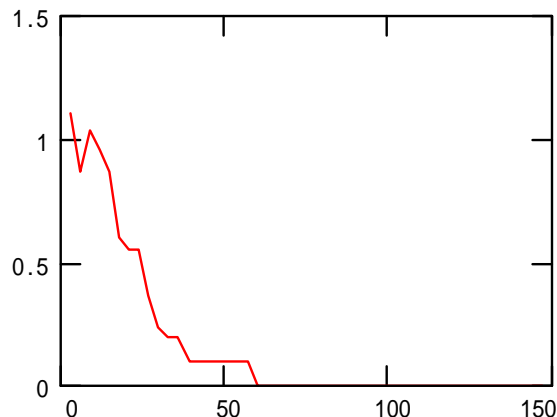
LAS12



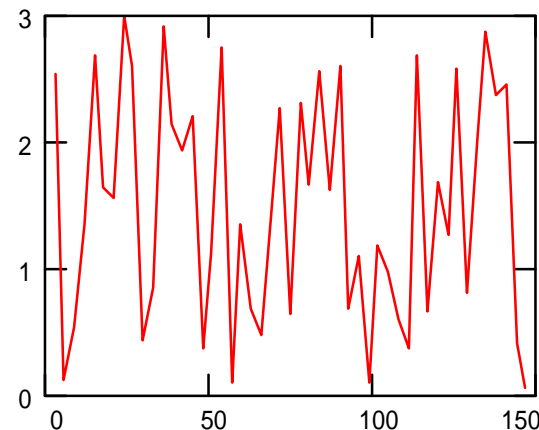
ピリダフェンチオン
Pyridaphenthion



プレチクロール Pretyrachlor



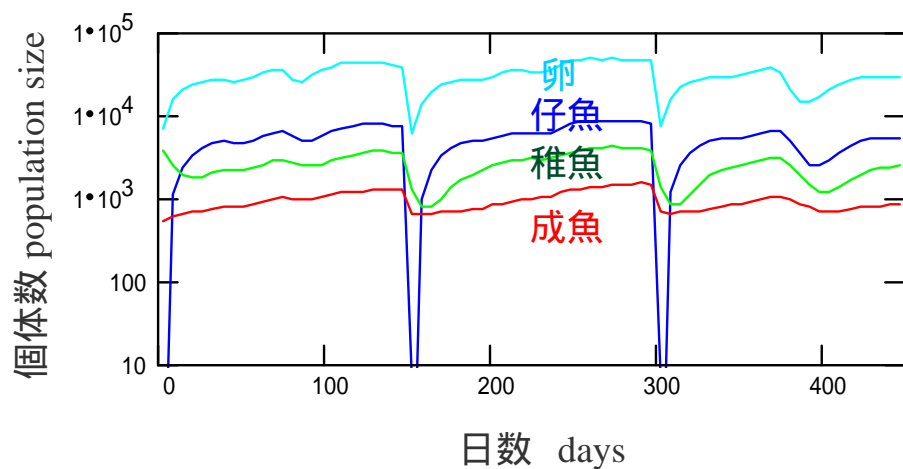
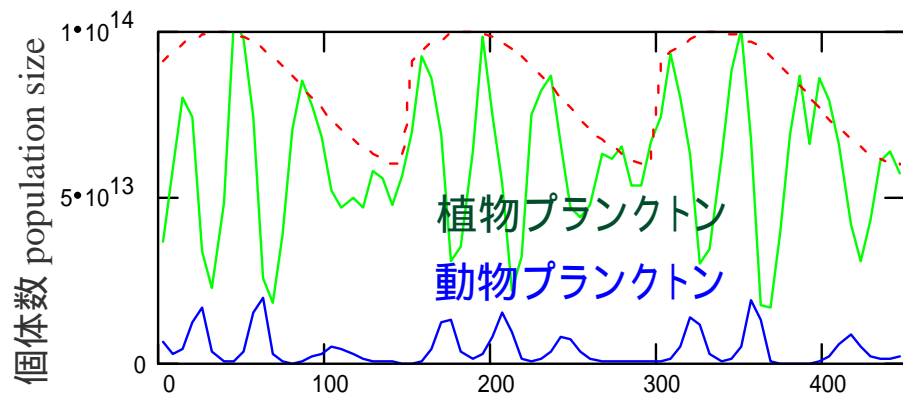
ノニルフェノール p-nonylphenol



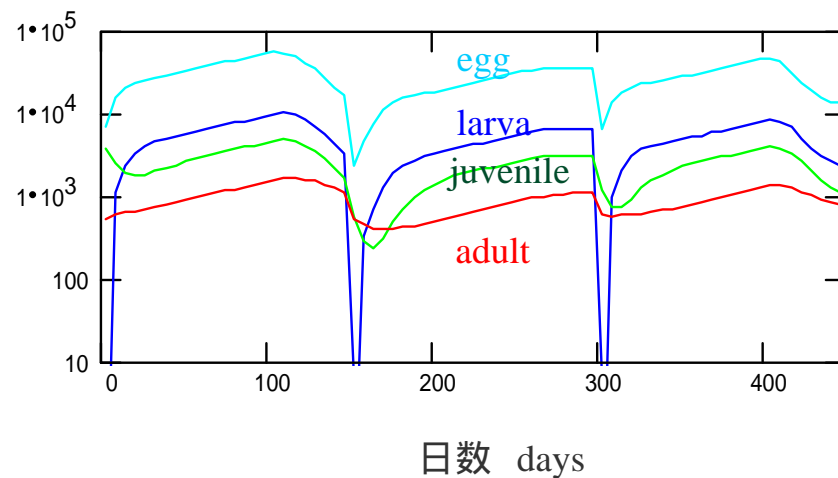
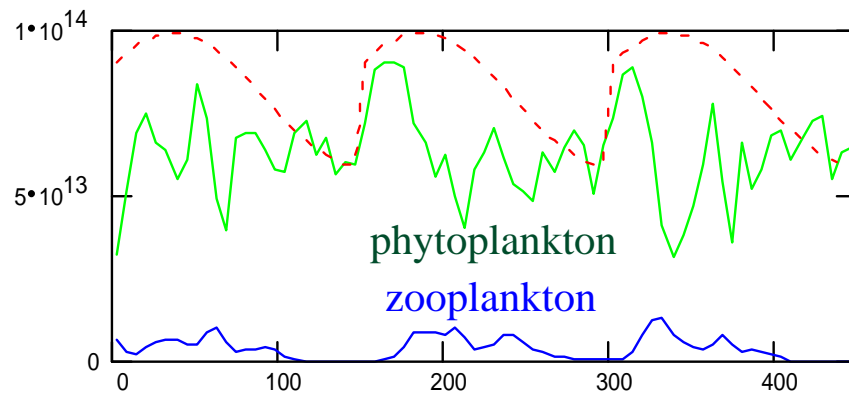
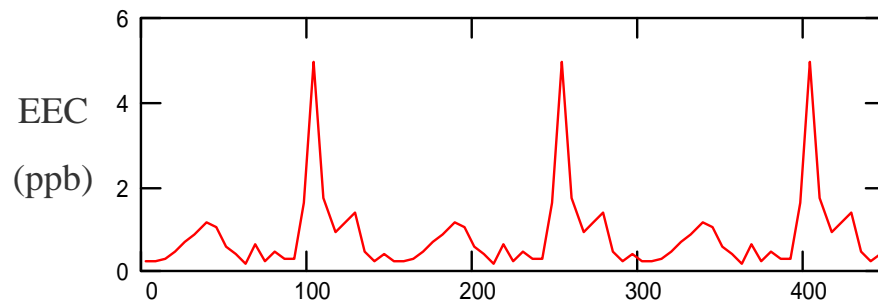
化学物質曝露下におけるポピュレーション・ダイナミクスの予測

Simulated population dynamics under exposure to a chemical

無曝露 No exposure



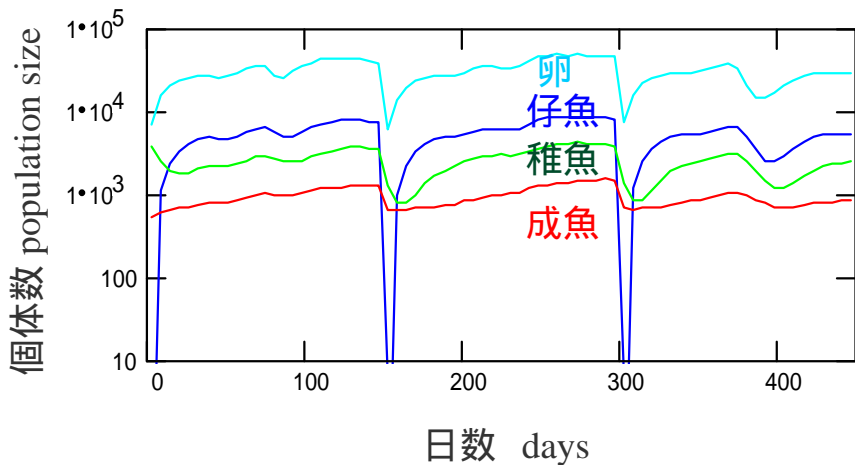
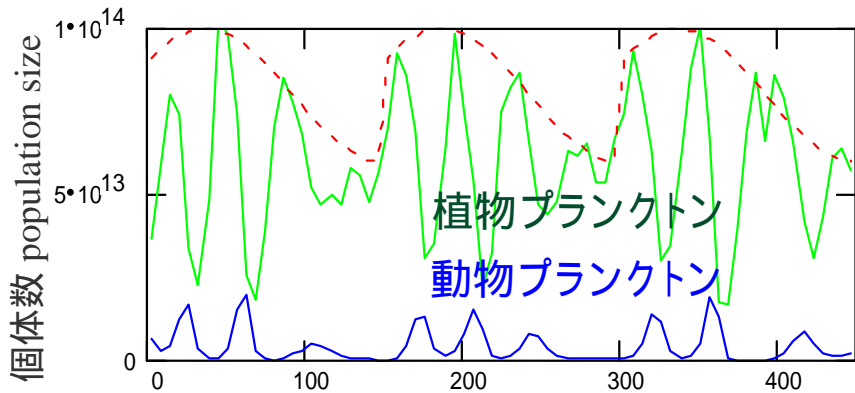
ダイアジノン Diazinon (fraction:3)



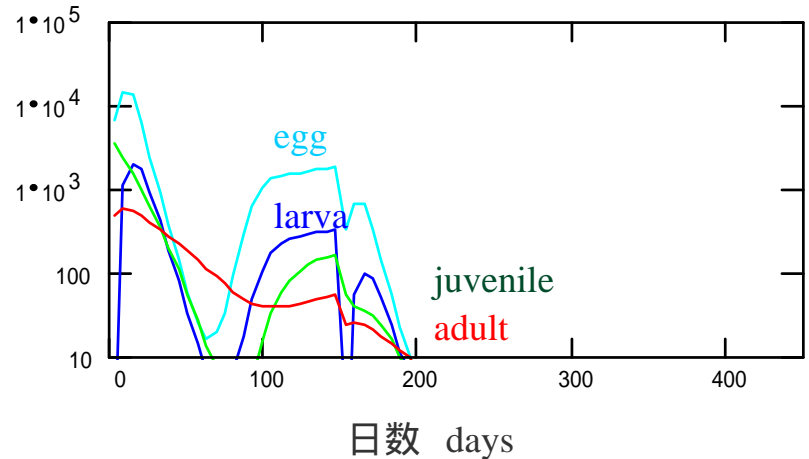
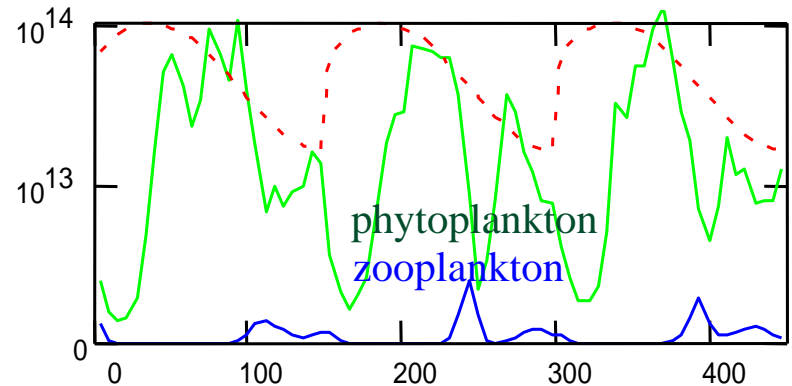
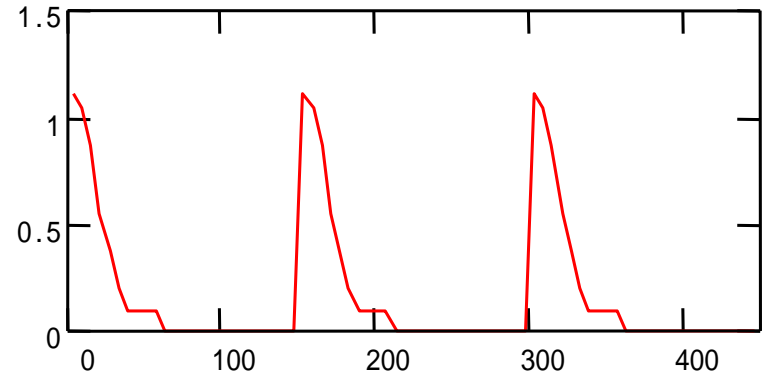
化学物質曝露下におけるポピュレーション・ダイナミクスの予測

Simulated population dynamics under exposure to a chemical

無曝露 No exposure

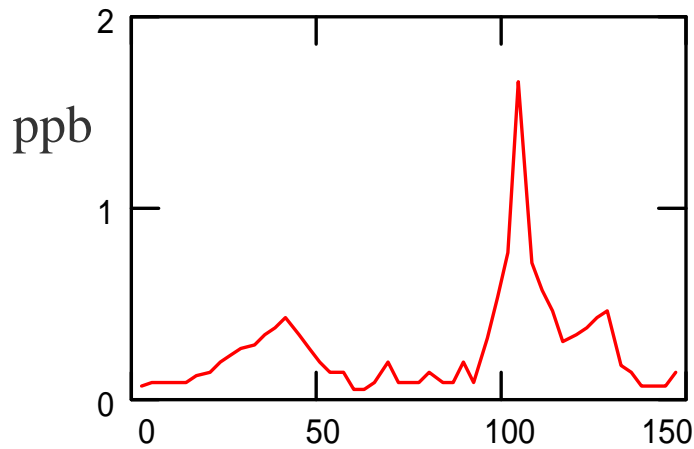


プレチラクロール Pretyrachlor



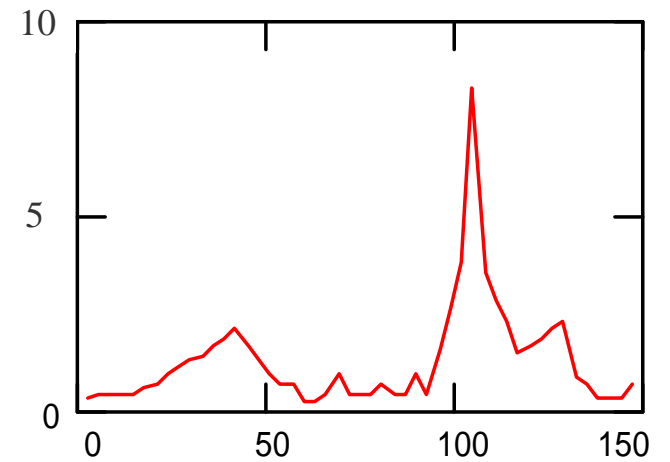
濃度係数 Concentration factor

ダイアジノン Diazinon



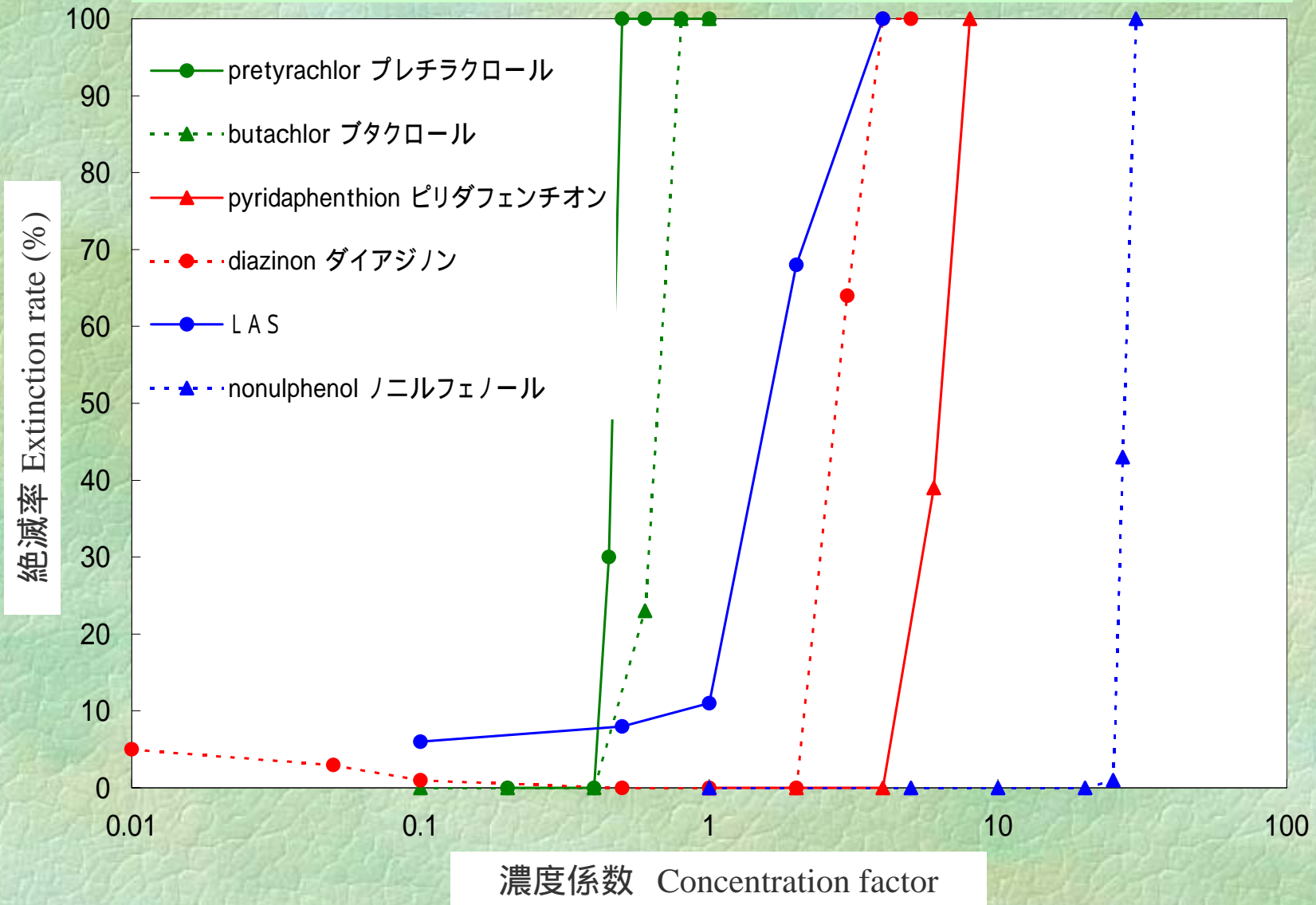
濃度係数 : 5
c.f. = 5

ダイアジノン Diazinon



環境中曝露濃度と絶滅頻度の関係

Relationships between environmental exposure concentration and frequencies of extinction



半数絶滅濃度 50% extinction concentration

XC50: 50%の個体群が100年以内に絶滅する濃度
(測定濃度の倍数)

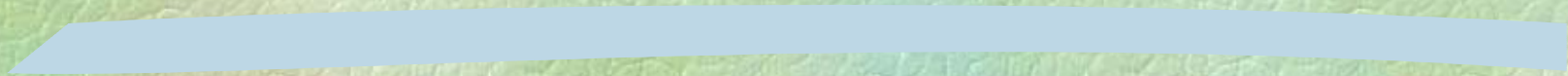
XC50: The concentration at which 50 % populations go extinct within 100 years (denoted as fractions of measured EEC)

chemicals	化学物質	XC50	EEC / LC50
pretyrachlor	プレチラクロール	0.45	1.18
butachlor	ブタクロール	0.61	0.96
LAS	LAS	1.85	0.07
diazinon	ダイアジノン	2.98	1.11
pyridaphenthion	ピリダフェンチロン	6.04	0.32
nonylphenol	ノニルフェノール	27.1	0.06

結論 Conclusion

- ❖ 内的自然増加率(集団の増殖率)に対する化学物質の効果がわかれば、化学物質の絶滅リスクを評価することができる。
Extinction risk estimation is feasible if pollutant effects on the intrinsic rate of natural increase (r , the population growth rate) are evaluated.
- ❖ 内的自然増加率に対する量反応曲線はべき関数で近似できる。
The dose-response curve for r can be approximated by the power function.
- ❖ 曝露濃度の誤差が20%以上になると、絶滅リスクの不確実性は急増する。LC50値からの外挿推定によって不確実性は倍増する。
Estimation errors for the environmental exposure concentration larger than 20 % inflate uncertainty in the extinction risk estimation. The acute-chronic extrapolation based on LC50s doubles the uncertainty.
- ❖ 3種系の群集動態モデルによって、種間相互作用を介する生態影響を推定することができる。
The three-species simplified community model can estimate the ecological risk through interspecific interaction.
- ❖ 高次捕食者にとって、生産者や一次捕食者に対する有害効果のボトムアップ効果が大いことが示唆された。
It was suggested that the bottom-up effects of pollutant chemicals directly affecting producers through interspecific interactions are important for extinction of higher predatory species.

補遺



拡散近似モデルによる平均絶滅時間の解析解 Mean Extinction Time Based on Diffusion Model

☛ P.Foley (1994)

$$T = \frac{1}{2sr} \left[\exp(2s \ln K) (1 - \exp(-2s \ln K)) - 2s \ln K \right]$$

where $s=r/v$ v :環境分散 environmental variance

☛ Lande (1993)

$$T(K) = \frac{2}{vc} \left(\frac{K^c - 1}{c} - \ln K \right) \quad \text{where } c=2r/v-1$$

☛ Hakoyama and Iwasa (personal communication)

$$\log T = \left[\frac{6.370294}{\left[\sqrt{\frac{3}{r}} v \right]^{2.134224}} + \frac{0.0365032\sqrt{v}}{\sqrt{r}} \right] \log \frac{rK}{3} - \frac{2.62794r}{v} + \frac{2.90722\sqrt{r}}{\sqrt{v}} - \log r + 0.0588958$$

濃度 - 内的自然増加率モデル

The concentration- r models

べき関数 power function :

$$r(x) = \gamma \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right\}$$

ワイブル・モデル Weibull model :

$$r(x) = \gamma \left[2 - \exp \left\{ \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right\} \right]$$

二次関数 quadratic function :

$$r(x) = \gamma (1 - \alpha x - \beta x^2)$$

MSC (モデル選択基準 model selection criterion)

$$MSC = \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \tilde{x}_i)^2} \right] - \frac{2p}{n}$$

mean value
↓
↑
expected value

x: data

p: number of parameters

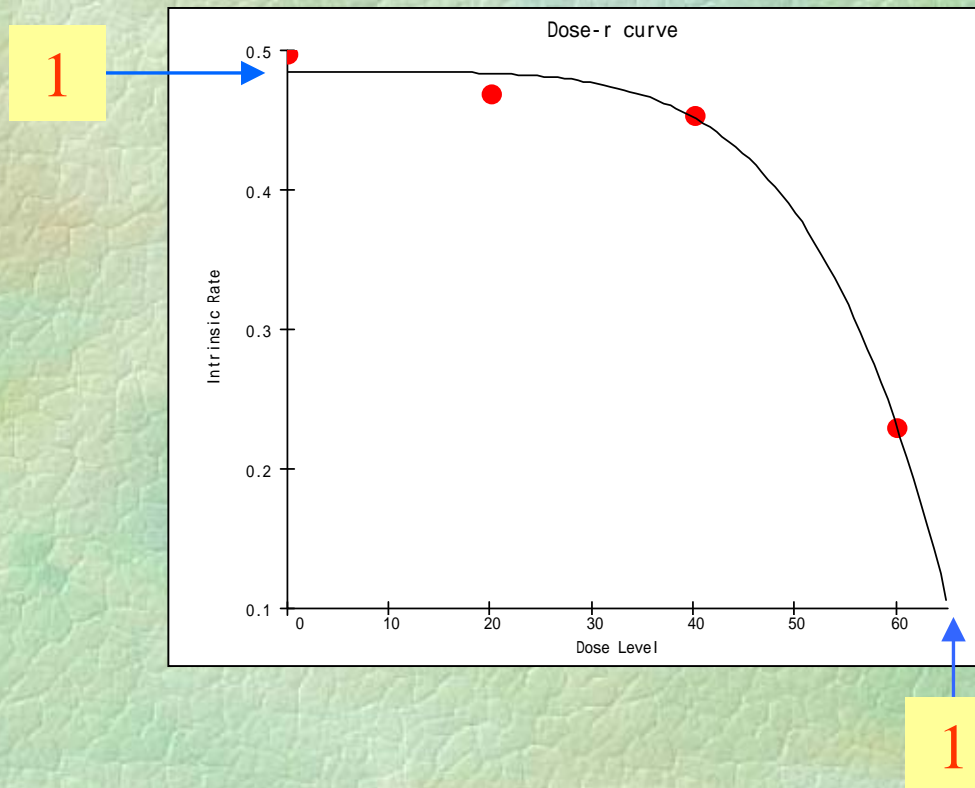
n: number of data

データの基準化

Standardization of all data

x (exposure concentration of chemicals) x/α

r (intrinsic rate of natural increase) r/r_{max}



2つの仮定 Two assumptions

1. 暴露濃度 = (LC50) のとき $p=1$.
Extinction probability is 1 when EEC is equal to (LC50).
2. バックグラウンドリスク: $p_0=10^{-6}$.
The background risk: $p_0=10^{-6}$

$$p_0 = 10^{-\frac{r}{v} \log K}$$

$r = 0.015$ $v = 0.03$ for
D.brachyurum

$K=10^{12}$ *D.galeata* in Kasumigaura

Background risk	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
Population size	10^4	10^6	10^8	10^{10}	10^{12}	10^{14}
[LC50] × 0.1						
logT	2.2×10^{-2}	3.3×10^{-2}	4.3×10^{-2}	5.4×10^{-2}	6.5×10^{-2}	7.6×10^{-2}
p	5.1×10^{-4}	7.8×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.3×10^{-6}	1.6×10^{-7}	1.9×10^{-8}
[LC50] × 0.01						
logT	3.1×10^{-4}	4.7×10^{-4}	6.3×10^{-4}	7.8×10^{-4}	9.4×10^{-4}	1.1×10^{-3}
p	7.2×10^{-6}	1.1×10^{-6}	1.5×10^{-7}	1.8×10^{-8}	2.2×10^{-9}	2.5×10^{-10}

不確実性解析 Uncertainty analysis

$$\text{Var}(T) = \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 V_{\alpha} + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)^2 V_{\beta} + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 V_x$$

$$T = f(\alpha, \beta, x)$$

V : の分散 (毒性データの不確実性 + 外挿による不確実性)

Variance of (Uncertainty due to toxicological data and extrapolation)

V : の分散 (毒性データの不確実性)

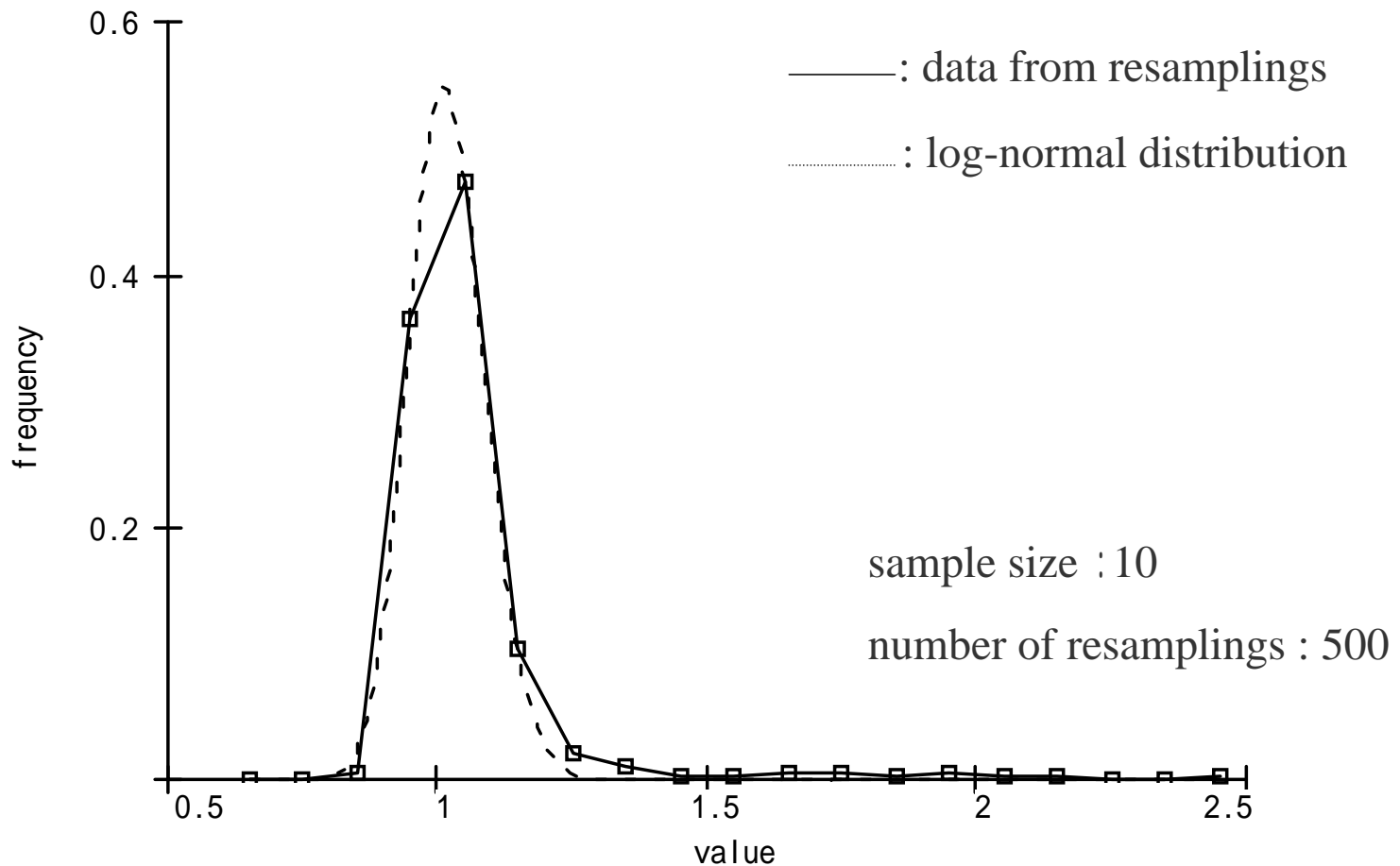
Variance of (Uncertainty due to toxicological data)

V_x : 曝露濃度の分散 (環境濃度推定の不確実性)

Variance of exposure concentration (Uncertainty due to estimation of EEC)

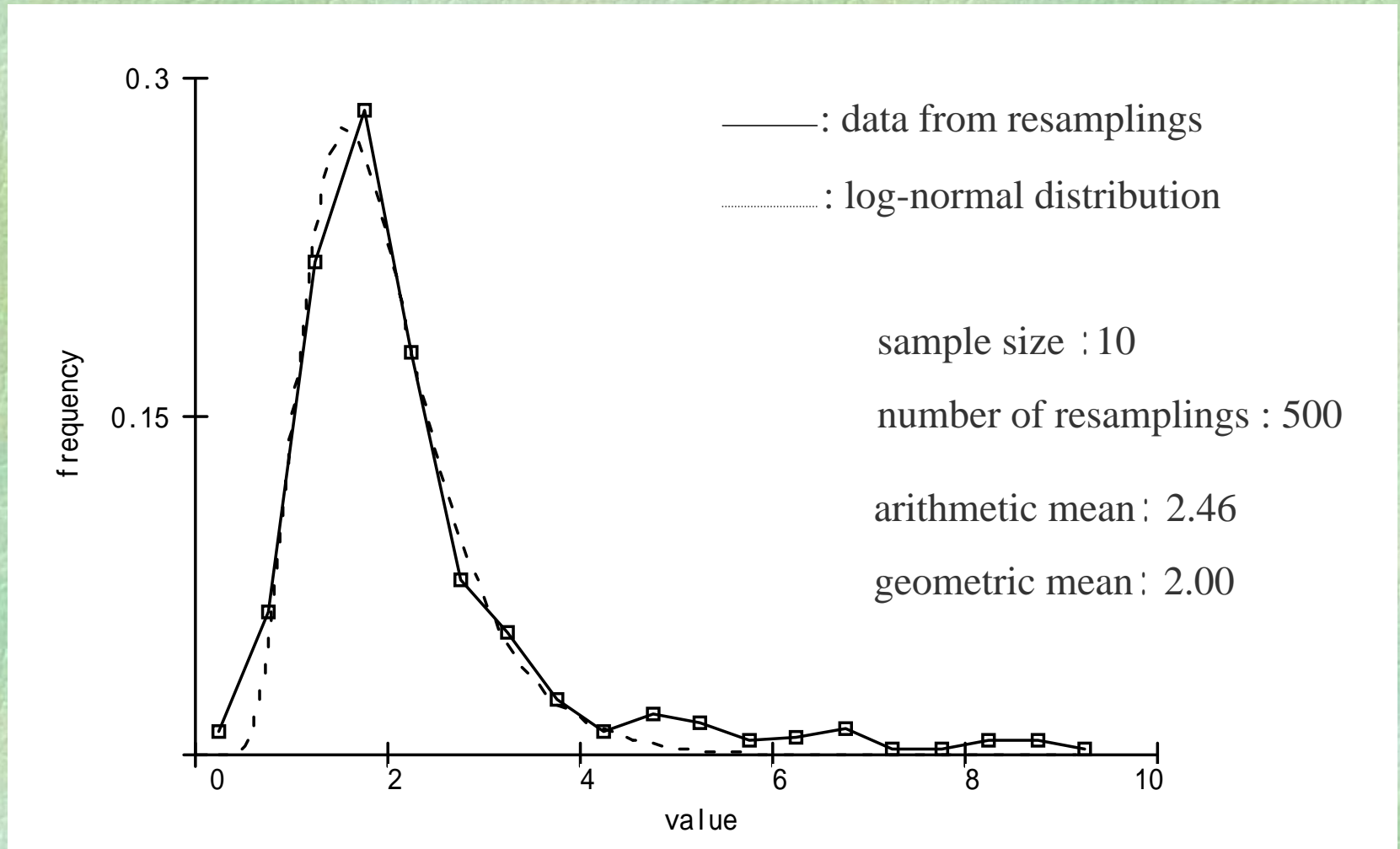
ブートストラップ再抽出法による 値の分布

Distribution of α values estimated from resampled data sets (10 data each) with the bootstrap method



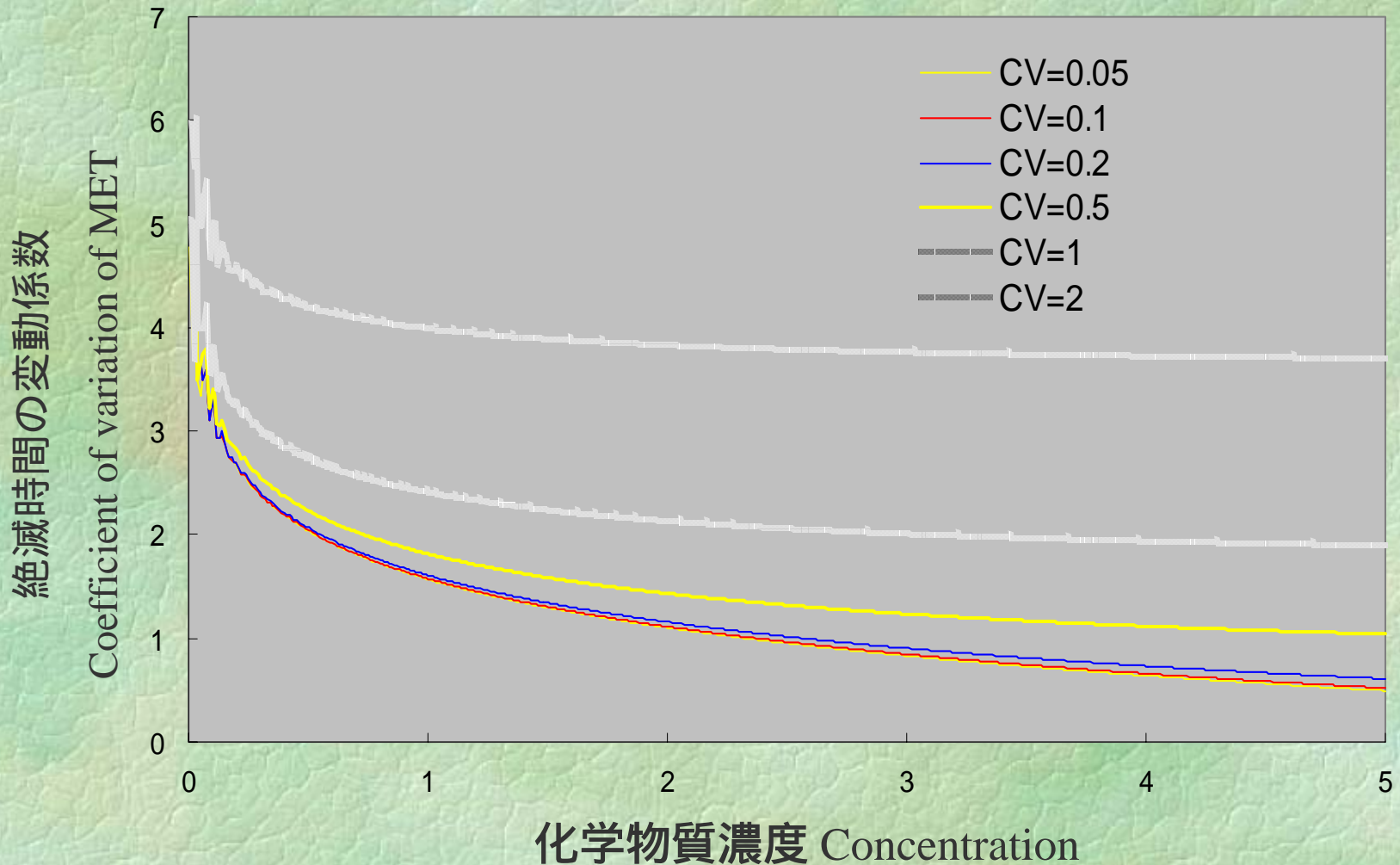
ブートストラップ再抽出法による 値の分布

Distribution of β values estimated from resampled data sets (10 data each) with the bootstrap method



log T の変動係数 Coefficient of variation of log T

(外挿の無い場合 without extrapolation)



log T の変動係数 Coefficient of variation of log T

(外挿をした場合 with extrapolation)

