デルリー法を用いた
資源量推定手法

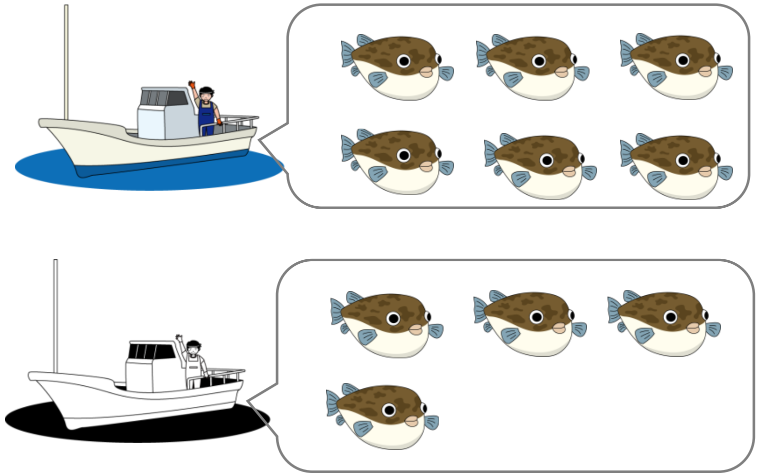
西嶋　翔太
（中央水産研究所 資源管理研究センター
資源管理グループ）

本日の内容

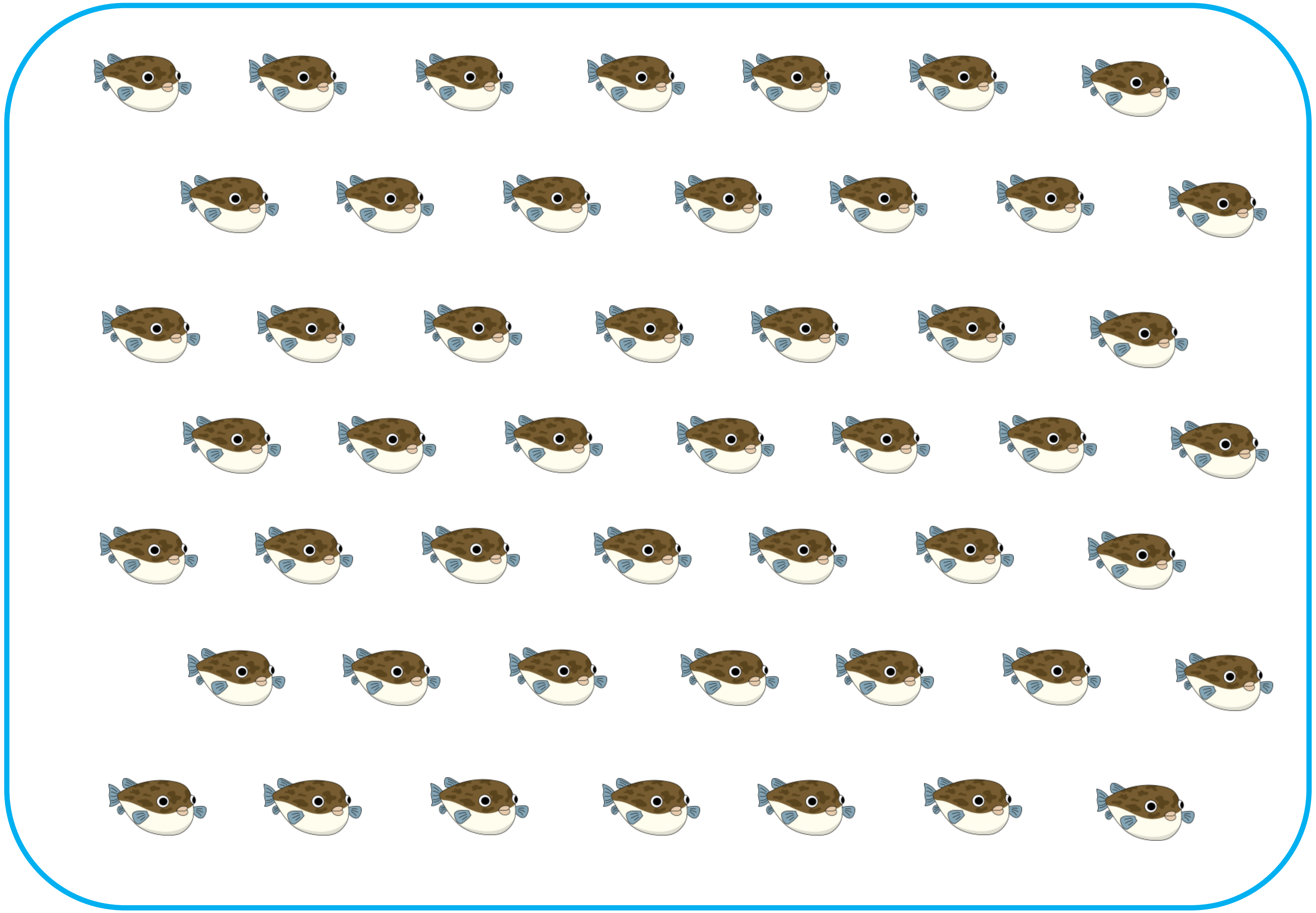
1. DeLury法
   - DeLury法の概要
   - 第一モデル
   - 第二モデル
   - 中間期モデル
   - 二項分布モデル
   - 二項分布の正規近似モデル
   - 漁具能率の変動要因解析

2. VPA
   - チューニングVPA
   - DeLury法によるチューニング

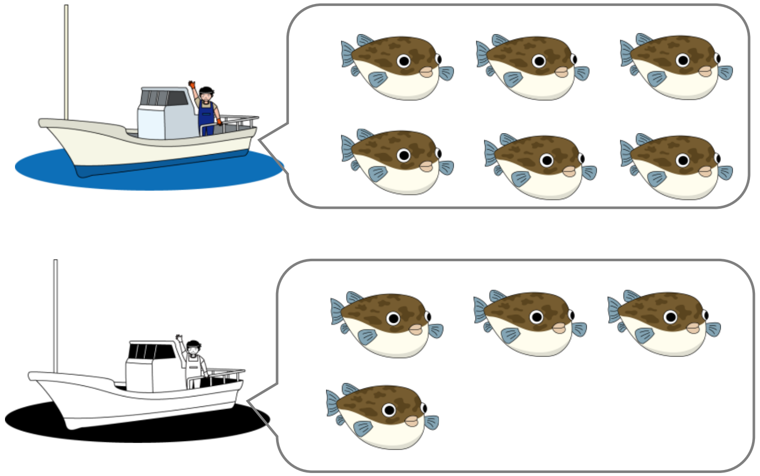
資源量と漁獲量



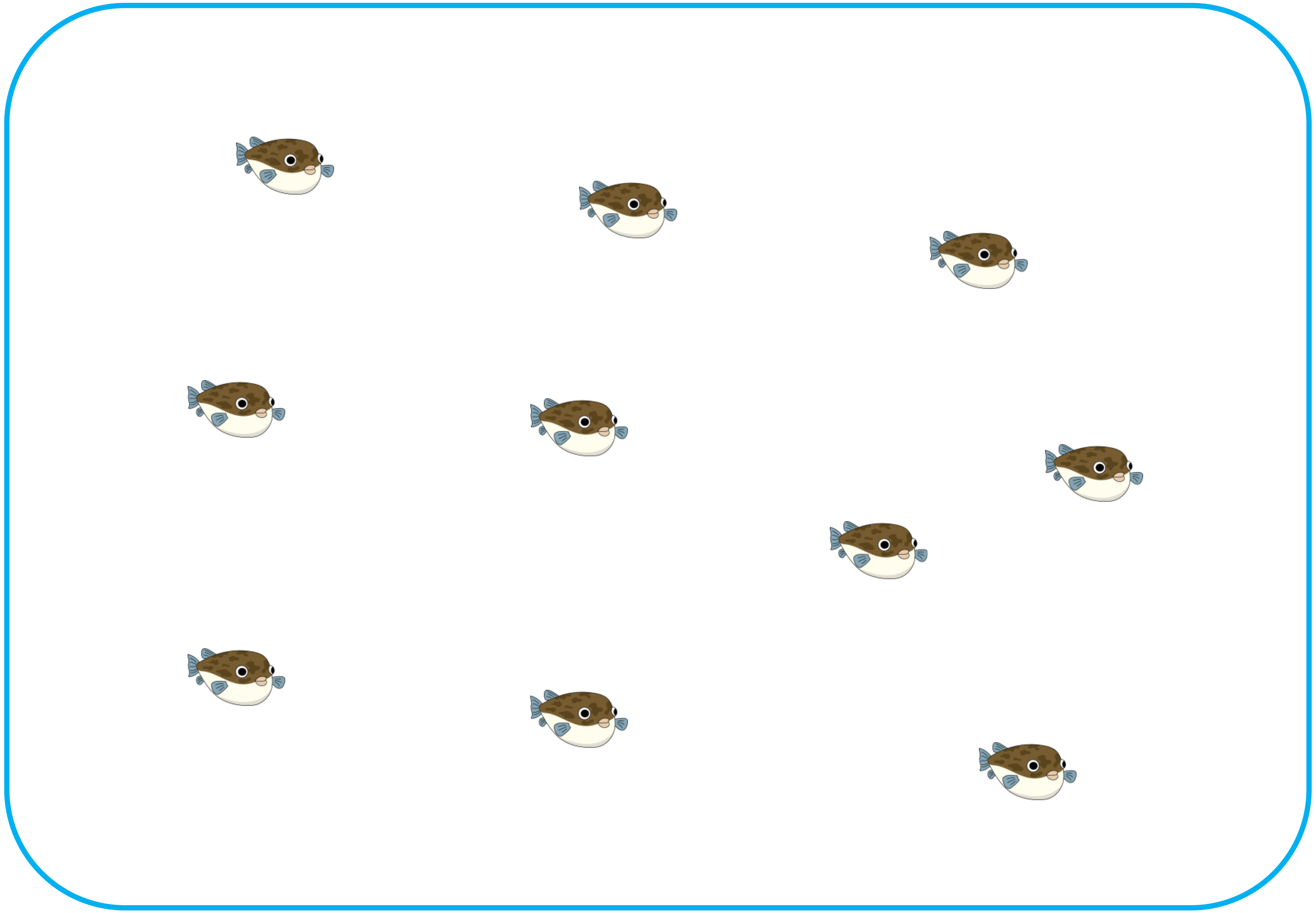
まだ獲っていいだろう



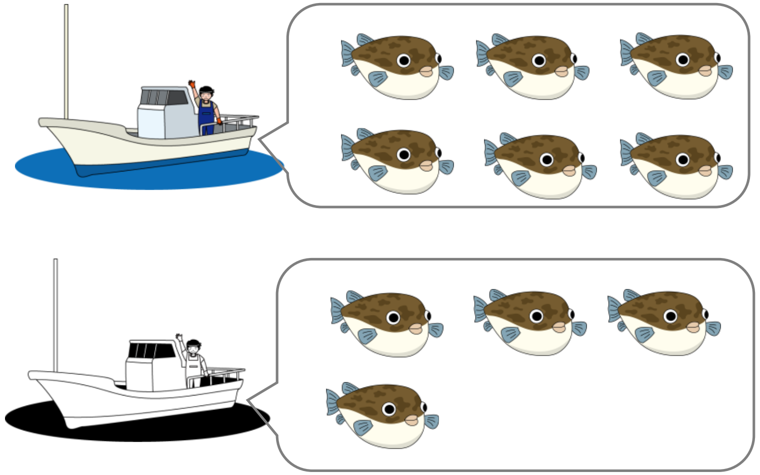
資源量と漁獲量



これ以上獲らない方
が良いだろう

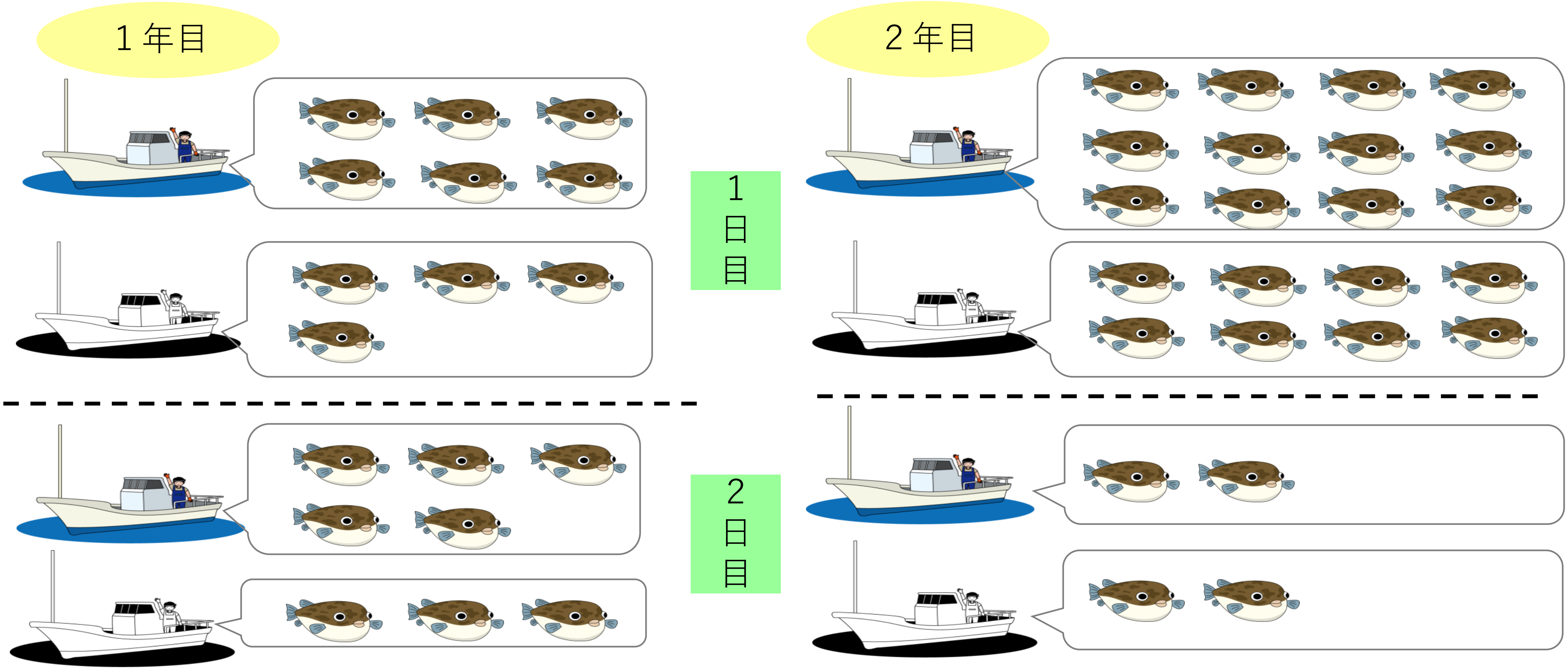


海の中はわからない…



資源量評価は難しい

CPUE (単位努力量当たり漁獲量)に基づく評価

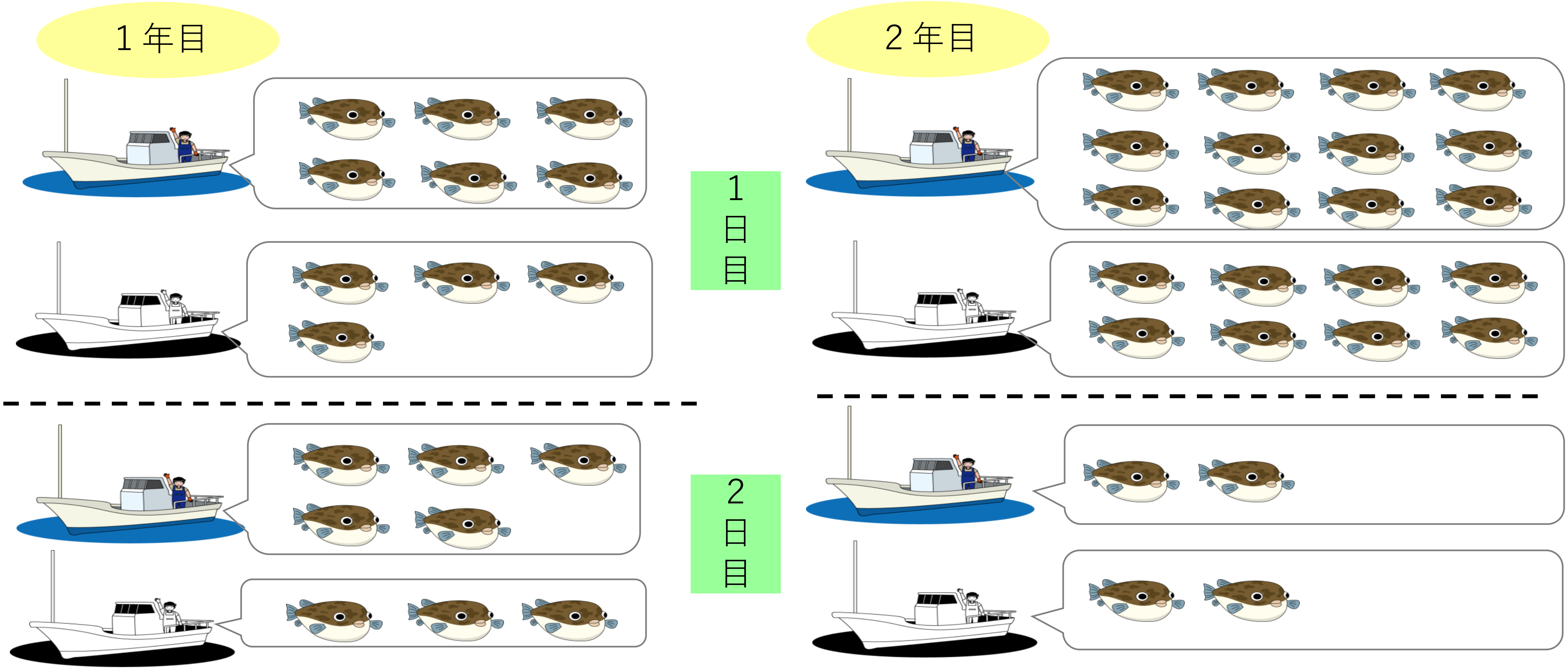


$$CPUE = \frac{6+4+5+3}{2+2} = 4.5$$ [尾/隻・日]

$$CPUE = \frac{12+8+2+2}{2+2} = 6.0$$ [尾/隻・日]

増えた!?

DeLury法による資源量評価



10尾獲ったら、獲れる量が0.8倍に

$N_0 - 10 = 0.8N_0 \quad \Rightarrow \quad N_0 = 50$ [尾]

20尾獲ったら、獲れる量が0.2倍に

$N_0 - 20 = 0.2N_0 \quad \Rightarrow \quad N_0 = 25$ [尾]

減った!?

CPUEとデルリー法における資源量評価の違い

CPUE

一定と仮定

$CPUE = q * N$

資源量推定のバイアスが生じやすい

漁具能率が上がったことによって、資源量が増加したように見える可能性

漁具能率(q)

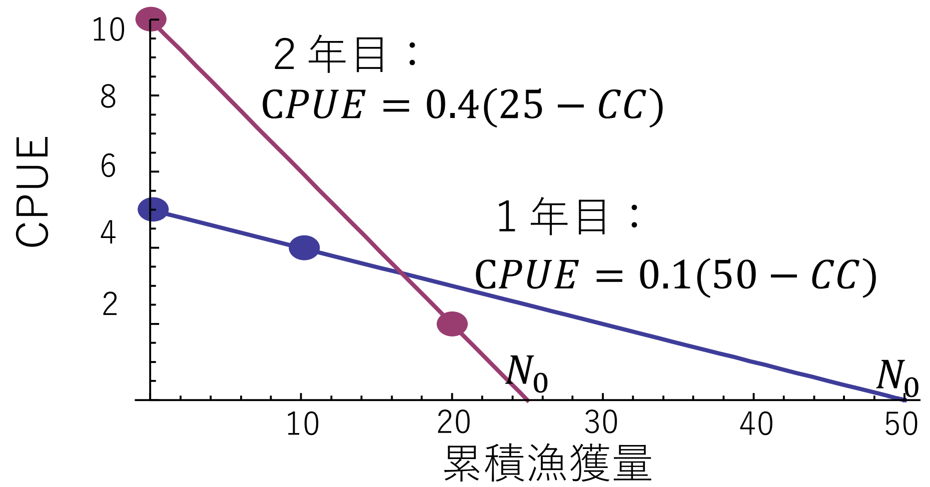
- 単位努力量で捕獲される魚の比率
- 環境条件・漁獲技術などによって変化

デルリー法

推定可能

例：$CPUE = q(N_0 - CC)$

CC…累積漁獲量



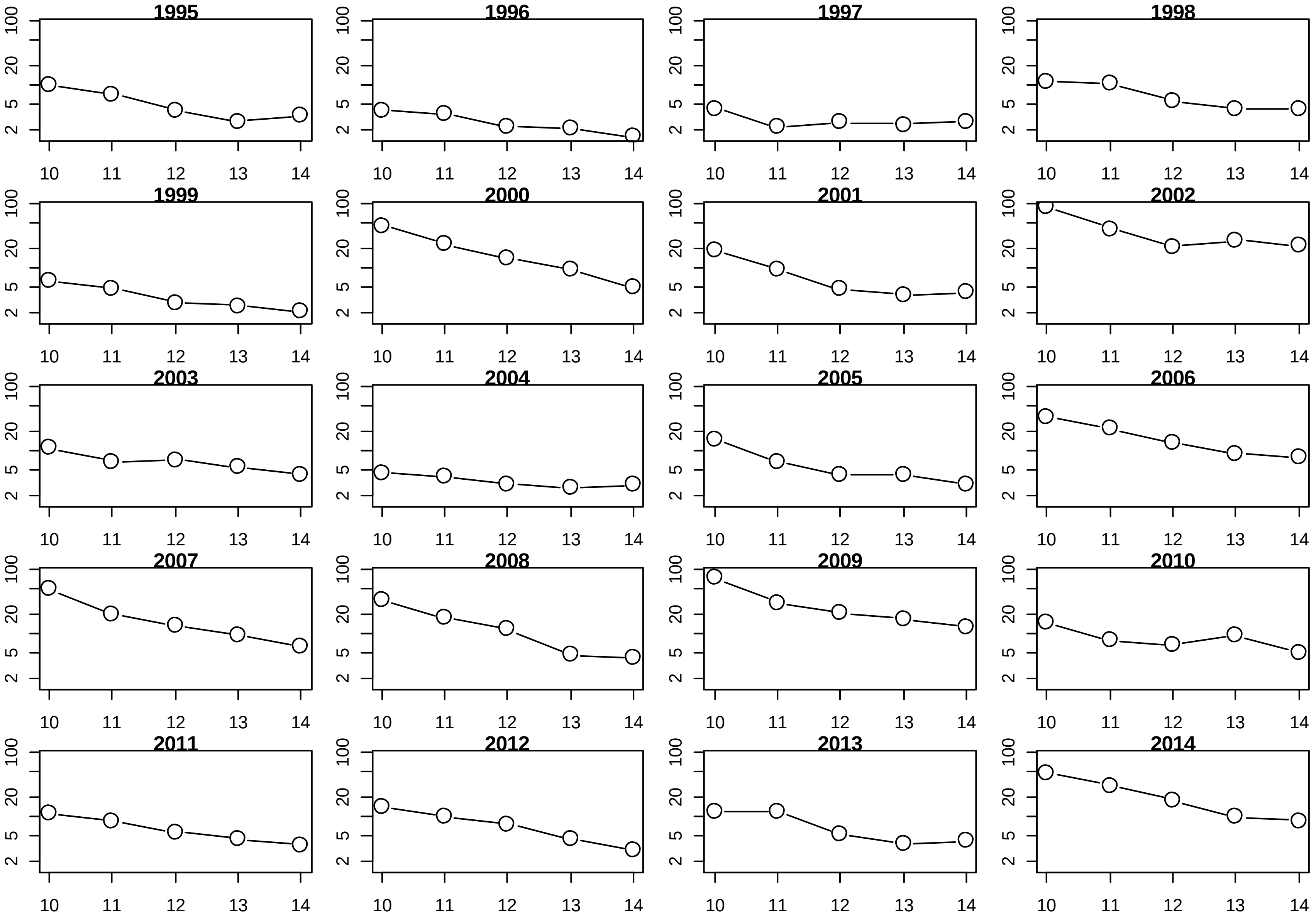
漁獲量と努力量のデータから計算可能

汎用性

精度の高い推定のためには、

- 比較的短期間に強度の漁獲圧によって資源量が顕著に減少し、
- 原則として、加入や移出入のない「閉じた」個体群であることが必要

例：各年のCPUEの変化



DeLury法 第一モデル

資源尾数は初期値から漁獲によって減少

$$N_t = N_0 - \sum_{i=0}^{t-1} C_t = N_0 - CC_t$$

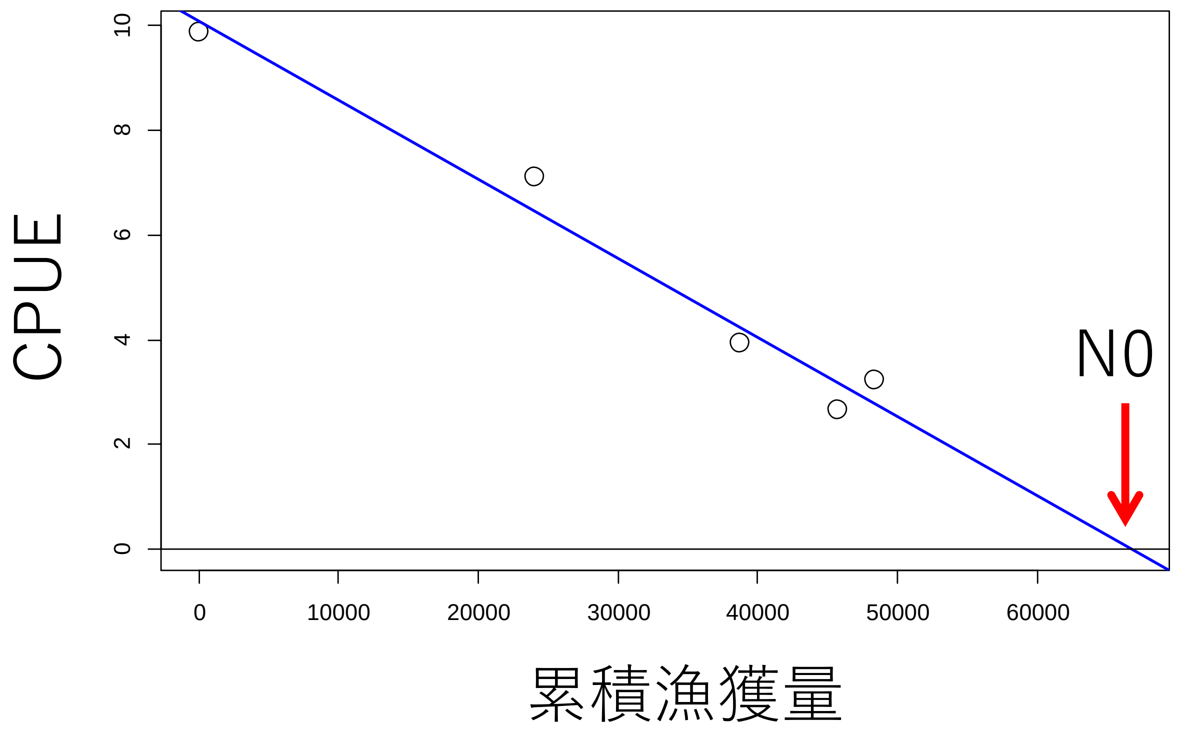
CPUEは個体数Nと漁具能率qの積

$$CPUE_t = qN_t \qquad (C_t = qE_tN_t より)$$

上の式を代入して

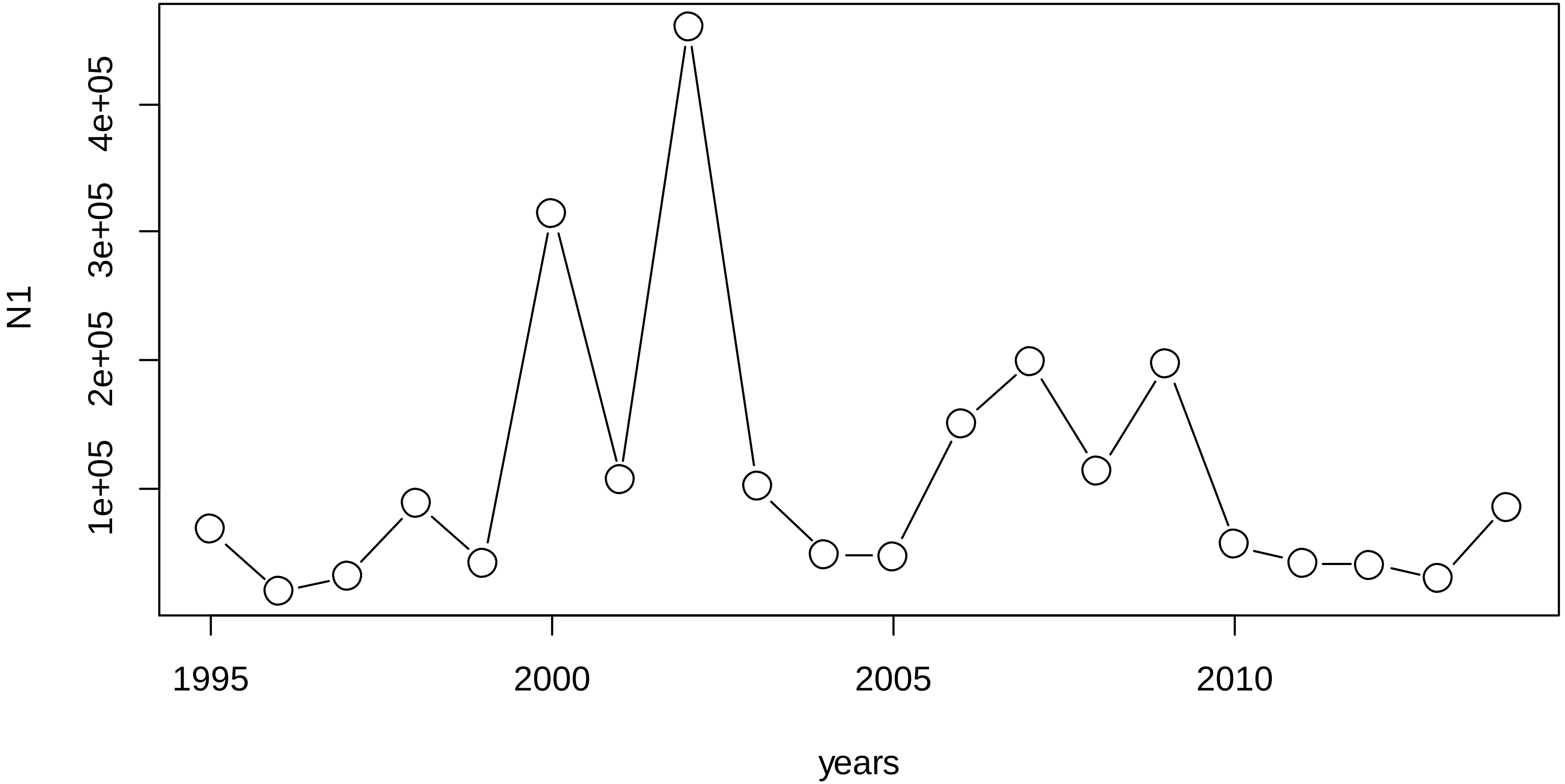
$$CPUE_t = q(N_0 - CC_t)$$

- CPUEを目的変数、CCを説明変数とした単回帰
- X切片が初期資源尾数
  (CPUEがゼロとなる累積漁獲尾数)
- 傾きが大きさが漁具能率

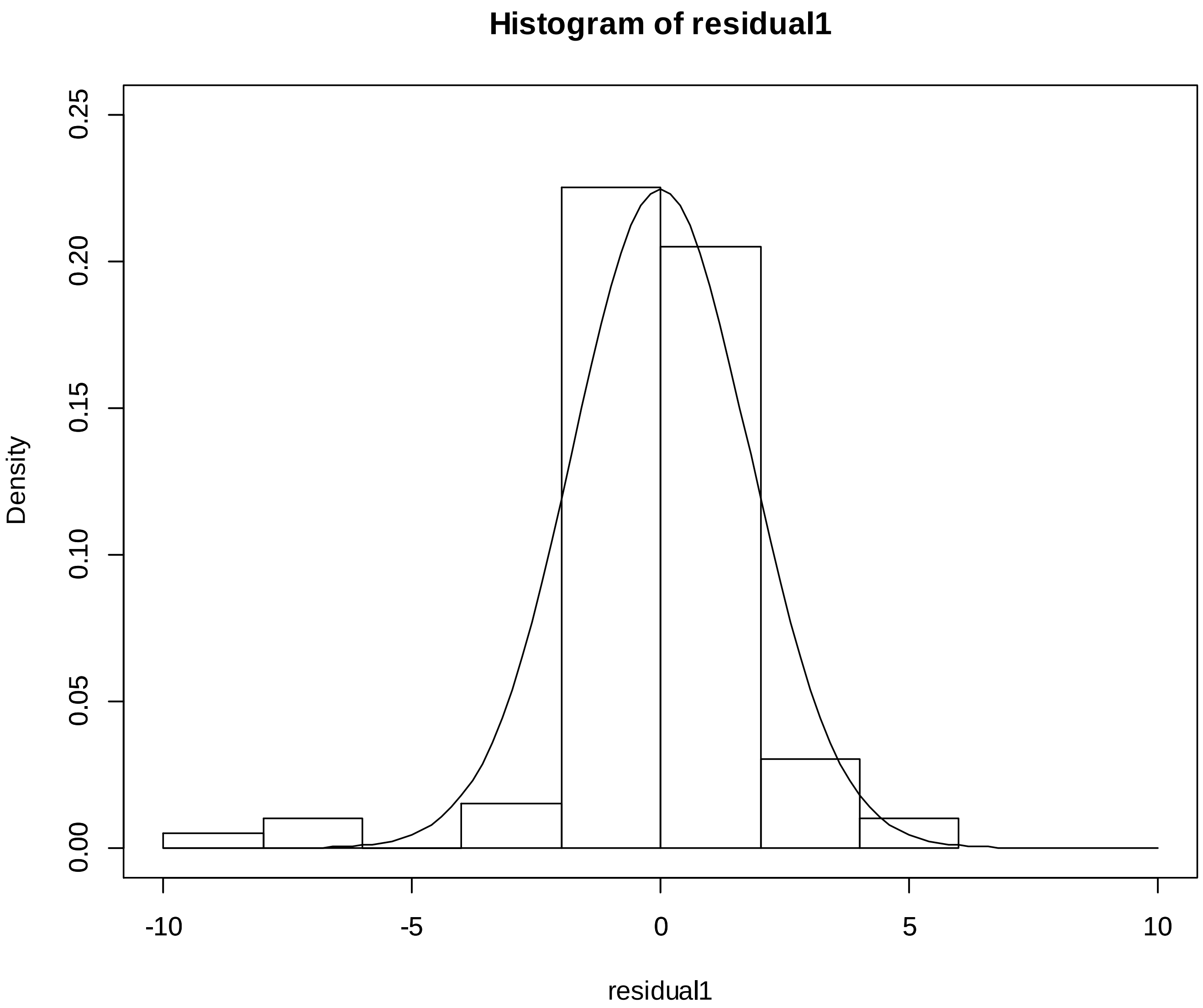


線形回帰でパラメータ推定

```
model <- lm(cpue~cumcatch, subdata) #累積漁獲尾数で線形回帰
q1[i] <- -as.numeric(model$coefficients[2]) #傾きにマイナスをかけたものが漁具能率
N1[i] <- as.numeric(model$coefficients[1])/q1[i] #切片を漁具能率で割ったものが初期資源尾数
```



残差のヒストグラム



- 残差の２乗の合計が最小化するようにパラメータ推定
- 正規分布に従うことを仮定
- この場合、あまりあってない

DeLury法 第二モデル

累積「努力量」で資源尾数の変化を表す

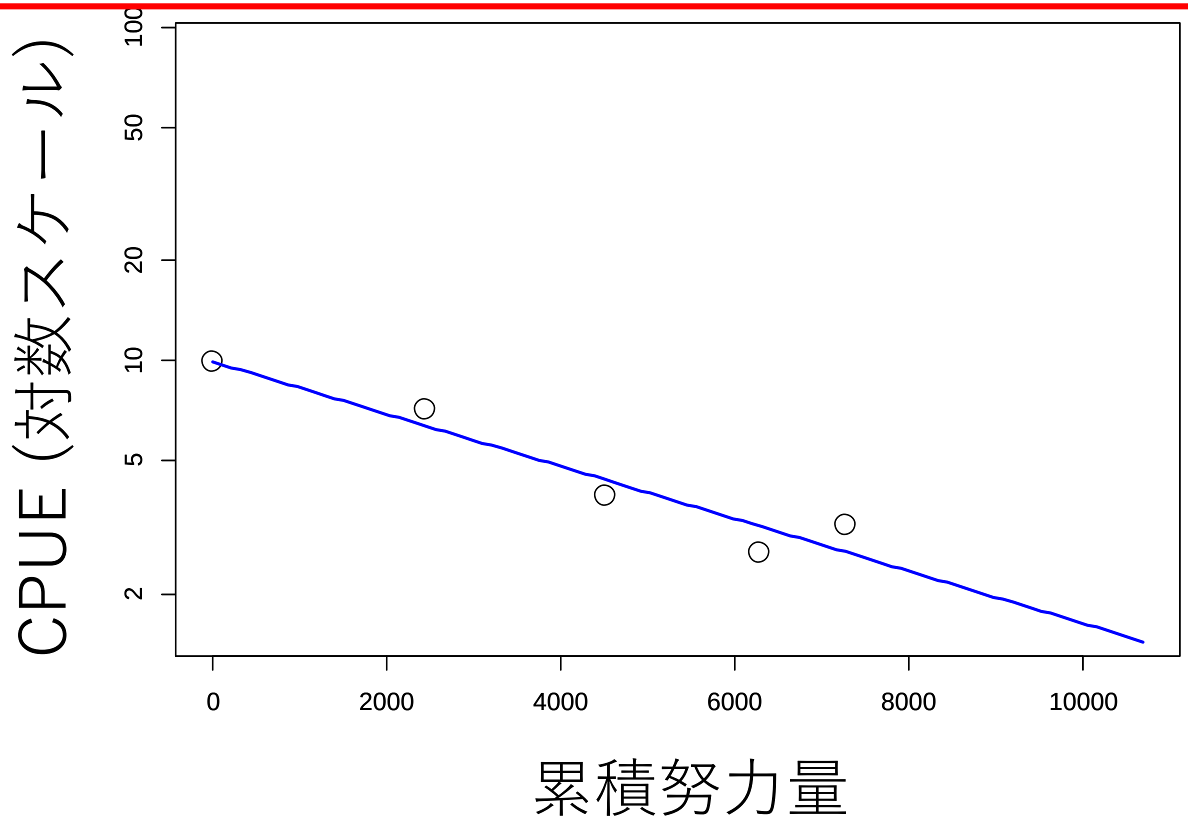
$$N_t = N_{t-1} \exp(-qE_{t-1})$$
$$= N_{t-2} \exp(-qE_{t-1}) \exp(-qE_{t-2})$$
$$= N_0 \exp(-q \sum_{i=0}^{t-1} E_i)$$

$$CPUE_t = qN_t$$

に上の式を代入して対数をとる

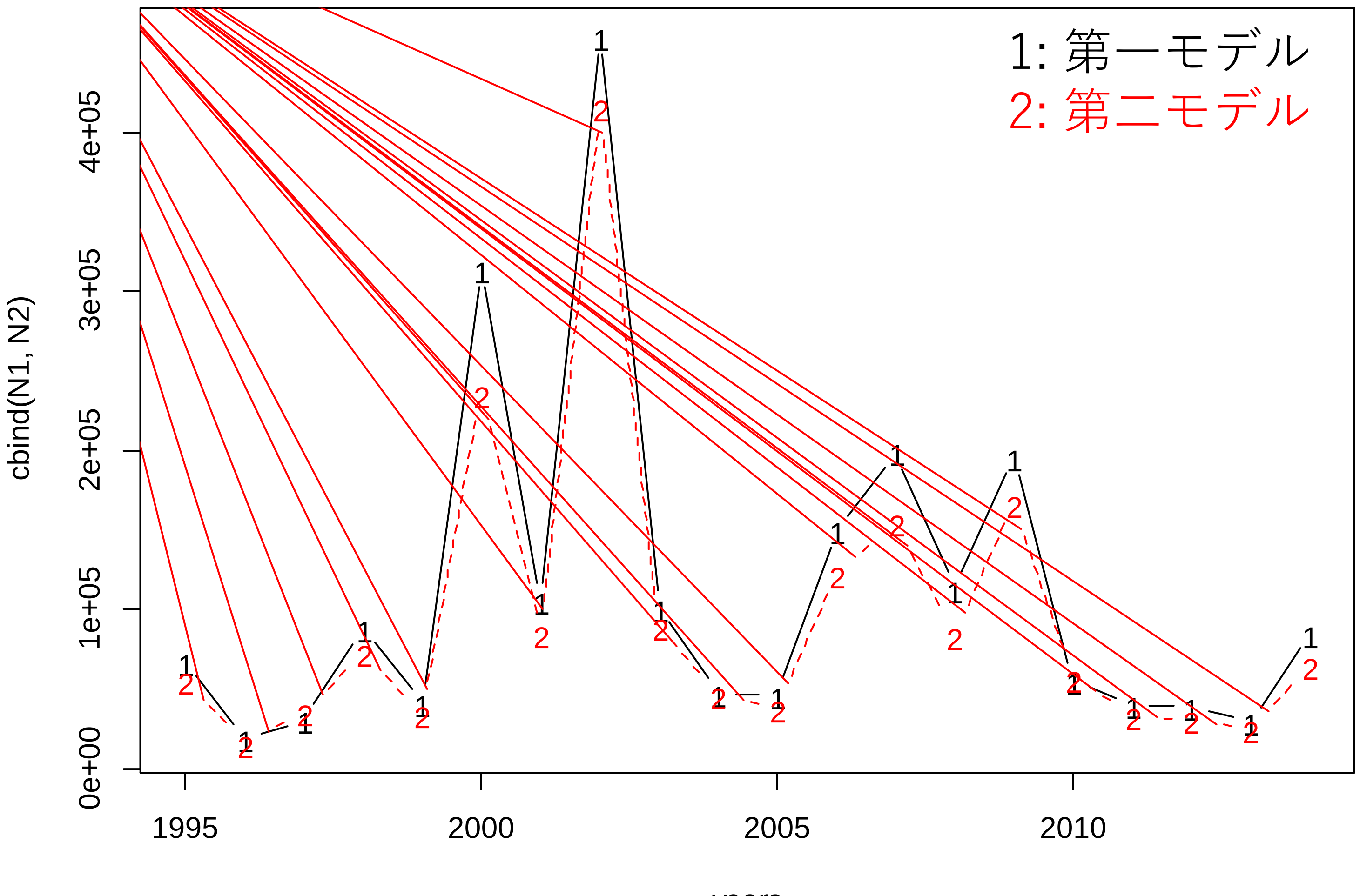
$$\log(CPUE_t) = \log(qN_0) - q * CE_t$$

- Log(CPUE)を目的変数、CEを説明変数とした単回帰
- 傾きが大きさが漁具能率
- 自然死亡を考慮しやすい

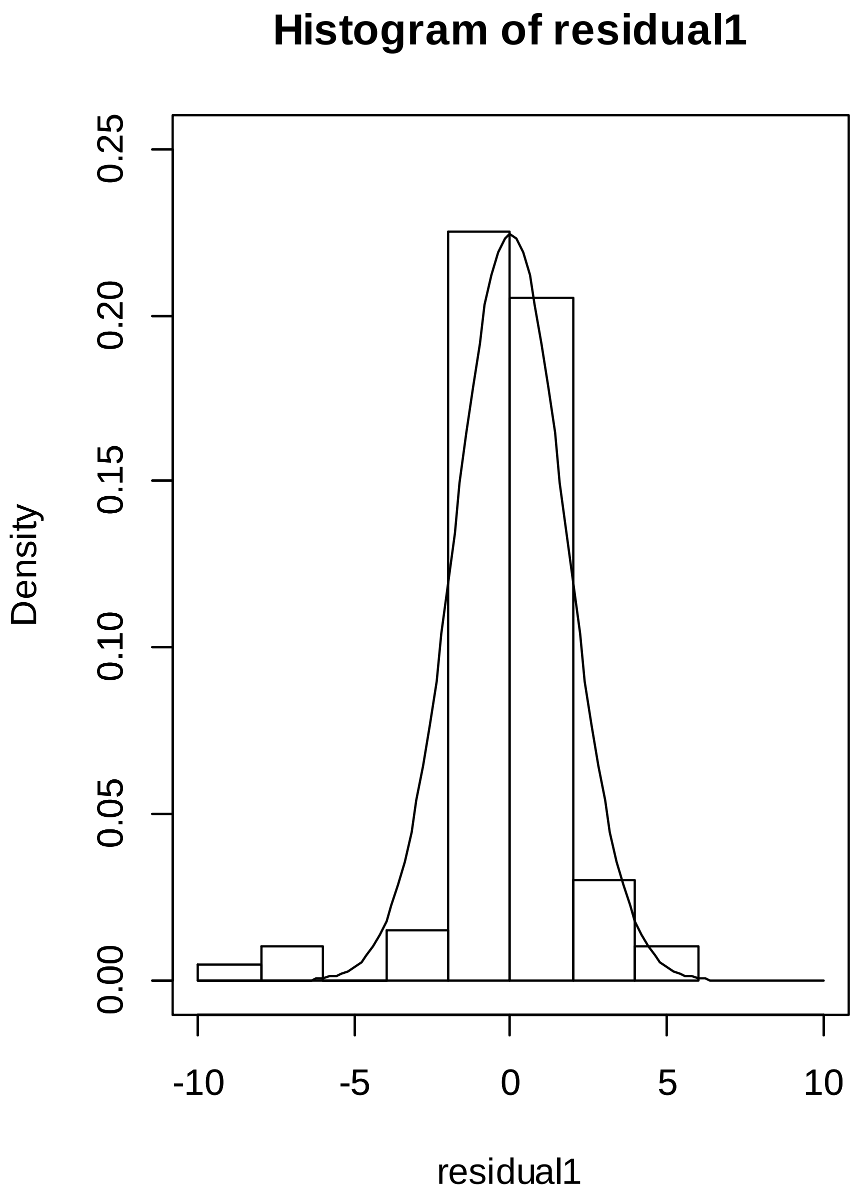


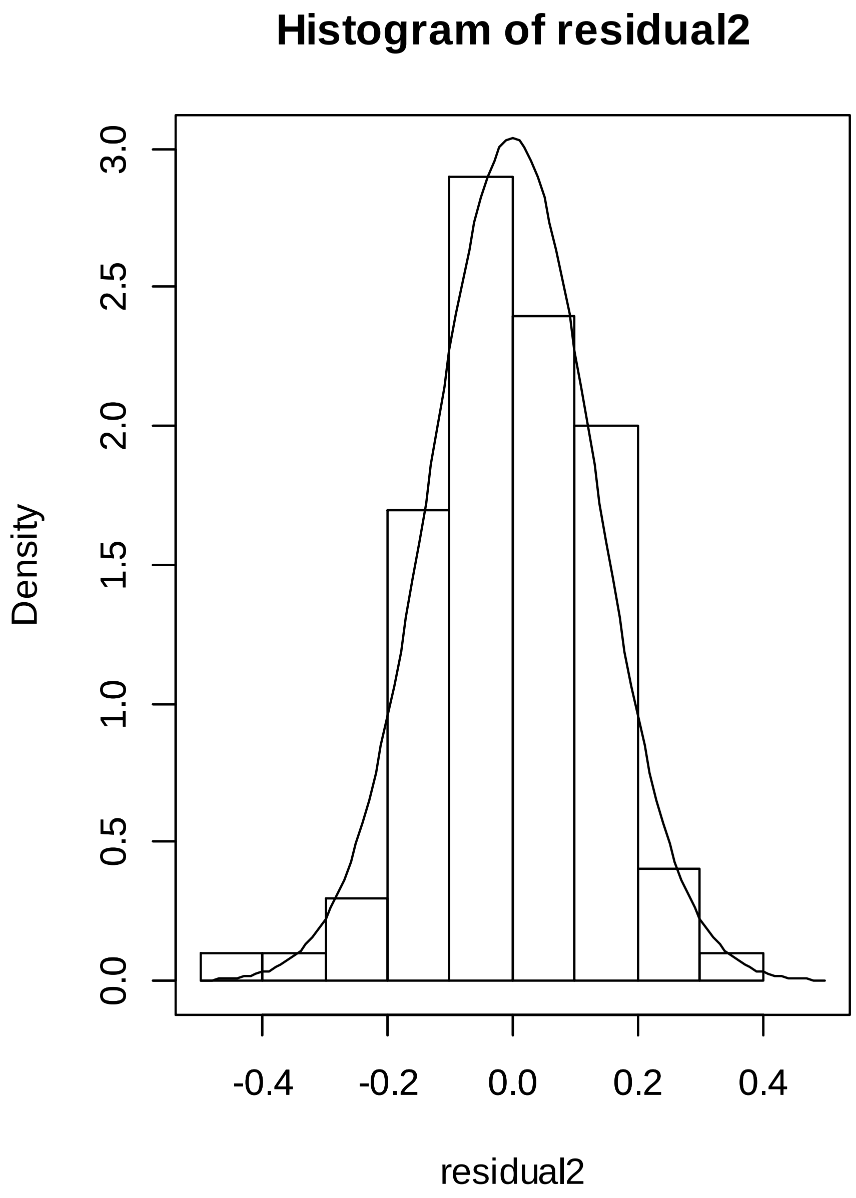
線形回帰でパラメータ推定

```
model <- lm(log(cpue)~cumeffort1, subdata) #累積努力量で線形回帰
 q2[i] <- -as.numeric(model$coefficients[2]) #傾きにマイナスをかけたものが漁具能率
 N2[i] <- exp(as.numeric(model$coefficients[1]))/q2[i] #切片のexpを漁具能率で割ったものが初期資源尾数
```



残差のヒストグラム





対数をとることで改善

CPUEが期の中間の値と考える

累積努力量に当月の努力量の半分を足す

$$N_t = N_{t-1}\exp(-qE_{t-1})$$
$$= N_{t-2}\exp(-qE_{t-1})\exp(-qE_{t-2})$$
$$= N_0 \exp(-q\left[\sum_{i=0}^{t-1} E_i + \boxed{\frac{E_t}{2}}\right])$$

$$\log(CPUE_t) = \log(qN_0) - q * (CE_t + E_t)$$

残差平方和を比較
> sum(residual2^2) #CPUEが初期
[1] 1.722724
> sum(residual3^2) #CPUEが中間
[1] 1.587048

二項分布モデル-漁獲の確率を扱う

あるとき、１００回釣りをして４０回釣れた
別のとき、１０回釣りをしたら１回釣れた
１回の釣れる確率は？

正規分布: 40/100と1/10の幾何平均（=0.2)

```
>exp(as.numeric(lm(log(c(40,1)/c(100,10))~1)$coefficients))
[1] 0.2
```

二項分布: 40/100の方に近い値となる

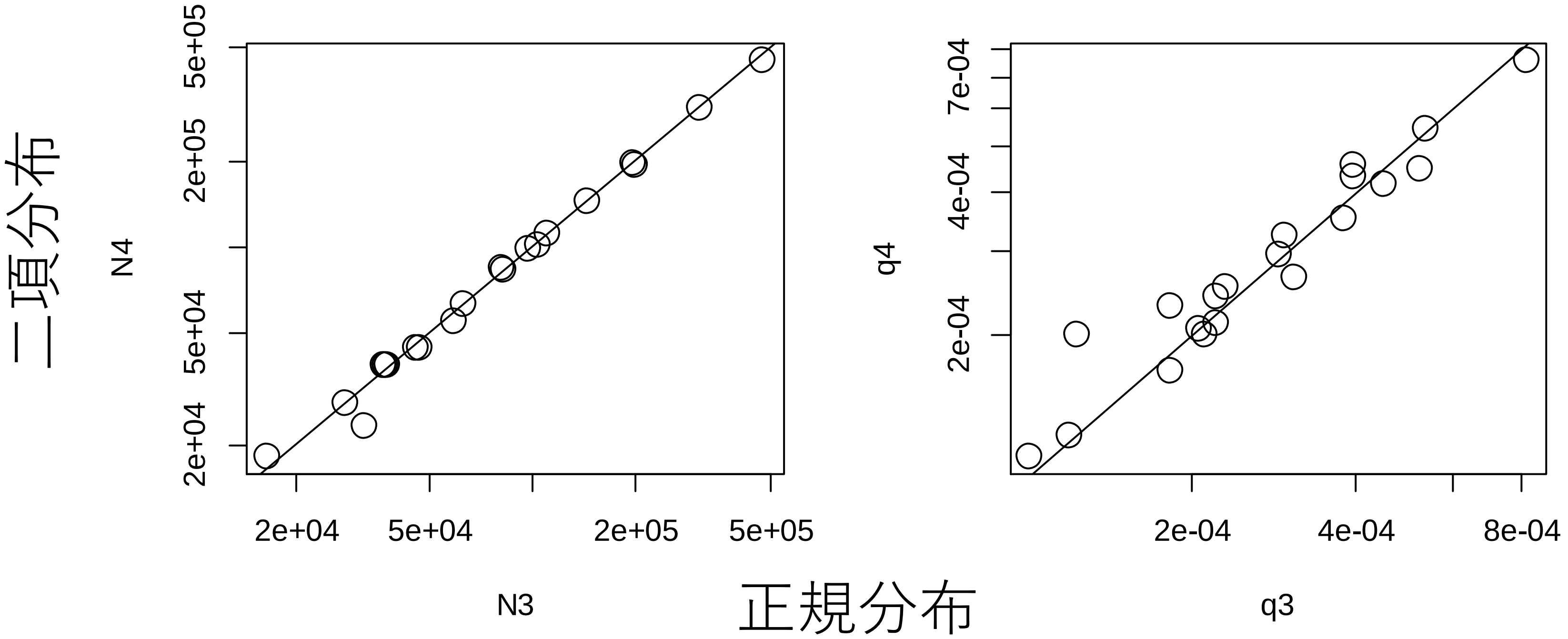
```
> coef <- as.numeric(glm(cbind(c(40,1),c(100,10)-c(40,1))~1,family="binomial")$coefficients)
> exp(coef)/(1+exp(coef))
[1] 0.3727273
```

二項分布モデル-漁獲の確率を扱う

漁獲確率 $p_t = 1 - \exp(-qE_t)$

Ct獲れる確率（=尤度） $\binom{N_t}{C_t} p_t^{C_t} (1 - p_t)^{N_t - C_t}$

対数尤度の合計が最大になる様にN0とqを推定



二項分布モデルの問題点

漁獲確率　$p_t = 1 - \exp(-qE_t)$

漁獲尾数の平均（期待値）　$E(C_t) = N_t p_t$

漁獲尾数の分散　$V(C_t) = N_t p_t (1 - p_t)$

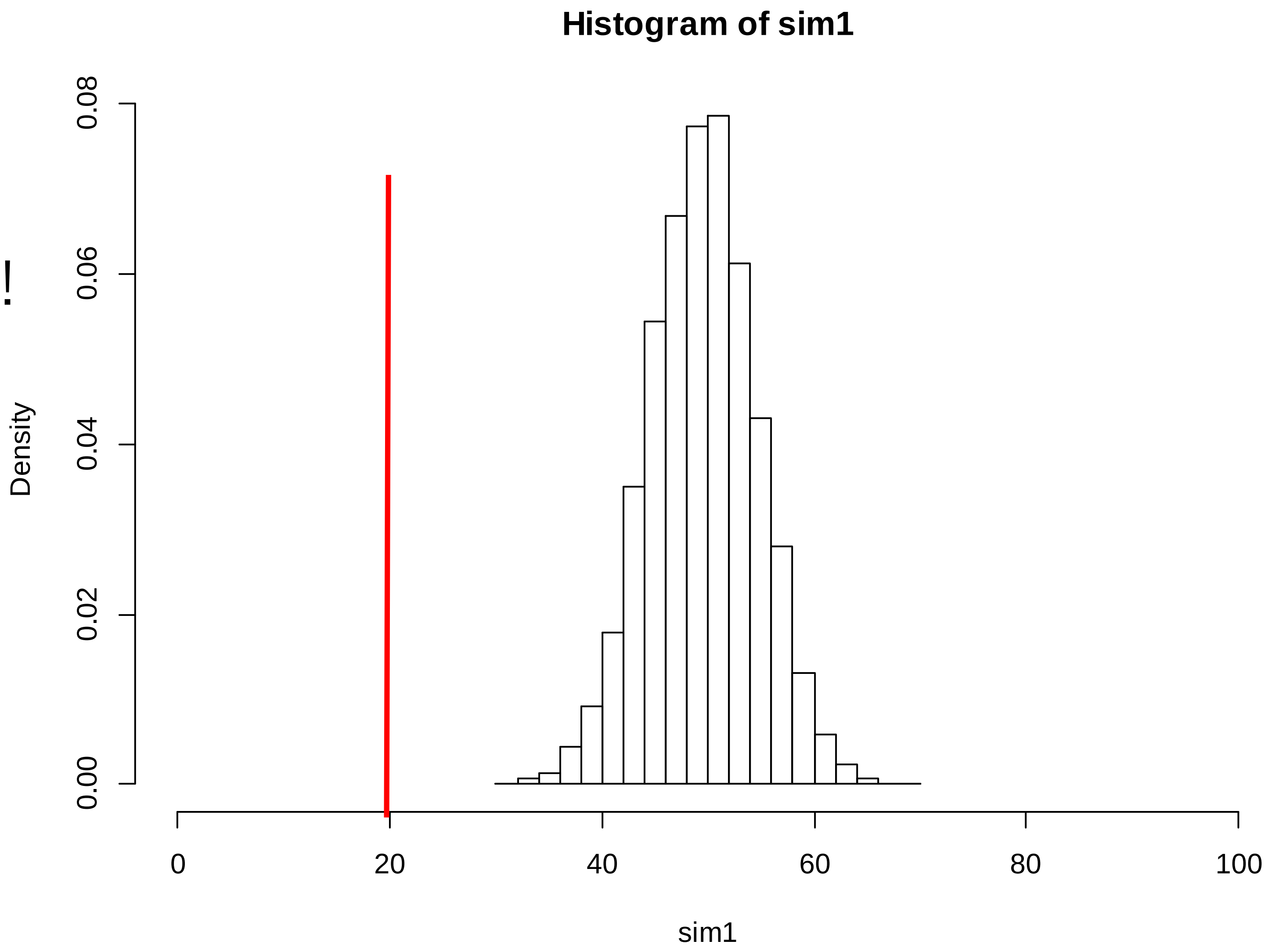
分散に関するパラメータがない！ ⇒ 過分散（二項分布以上の分散）の問題

二項分布の想定

漁獲確率0.5で100匹いるとき…

期待値は50匹

20匹以下になる確率は0.0001以下！



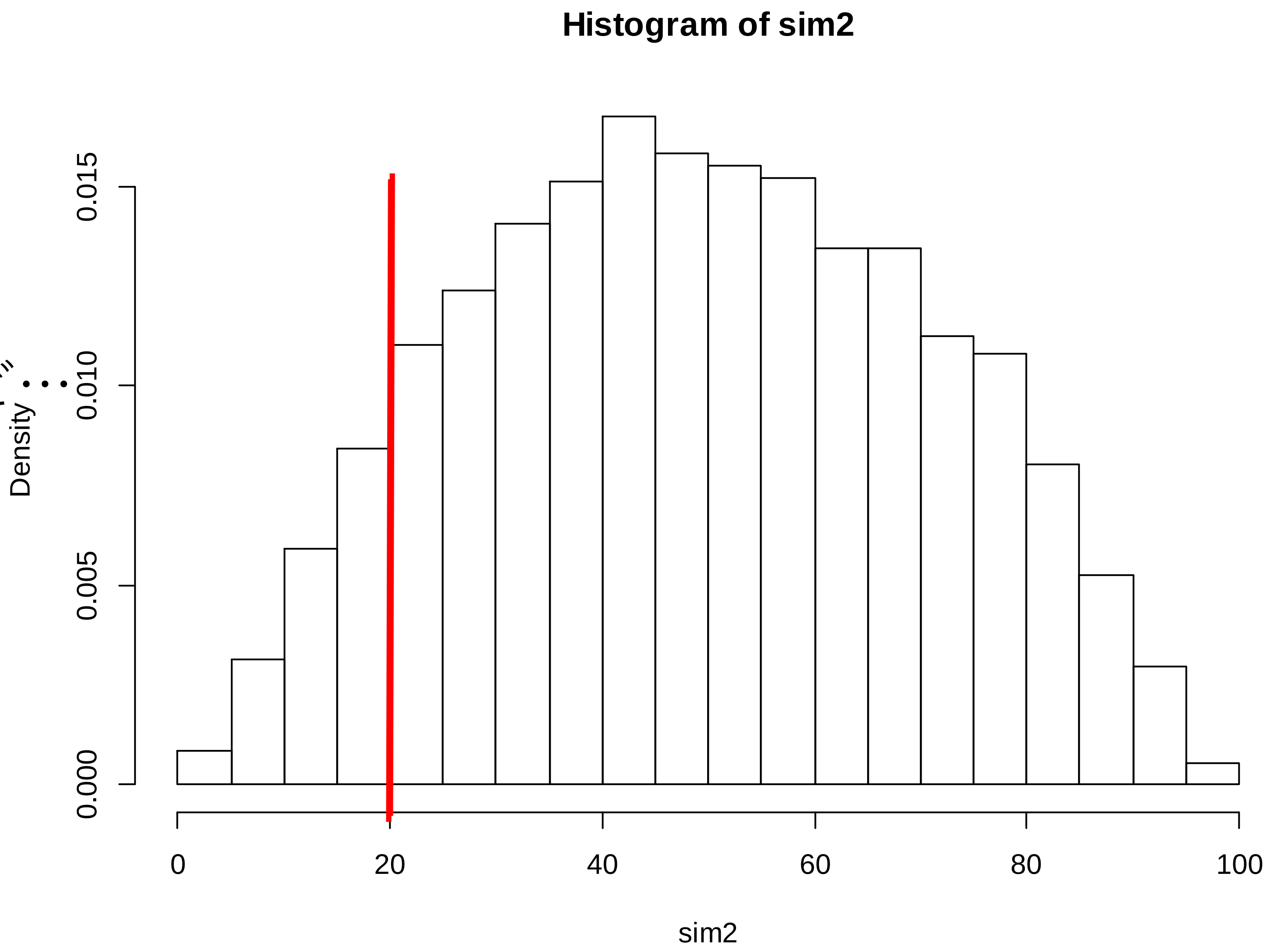
過分散の場合

漁獲確率の平均は0.5だけど

様々な要因で変化する

100匹いるとき期待値は50匹だけど…

20匹以下になる確率は9%！



二項分布モデルの問題点

漁獲確率　$p_t = 1 - \exp(-qE_t)$

漁獲尾数の平均（期待値）　$E(C_t) = N_t p_t$

漁獲尾数の分散　$V(C_t) = N_t p_t (1 - p_t)$

分散に関するパラメータがない！ ⇒ 過分散（二項分布以上の分散）の問題

過分散を無視すると、想定内にすべきことを想定外にしてしまう

計算が複雑・難しい (特にExcelでは)

二項分布の正規近似モデル

漁獲確率 $p_t = 1 - \exp(-qE_t)$

漁獲尾数の平均（期待値） $E(C_t) = N_t p_t$

過分散パラメータ
（1だと二項分布）

漁獲尾数の分散 $V(C_t) = N_t p_t (1 - p_t)\sigma^2$

正規分布の尤度

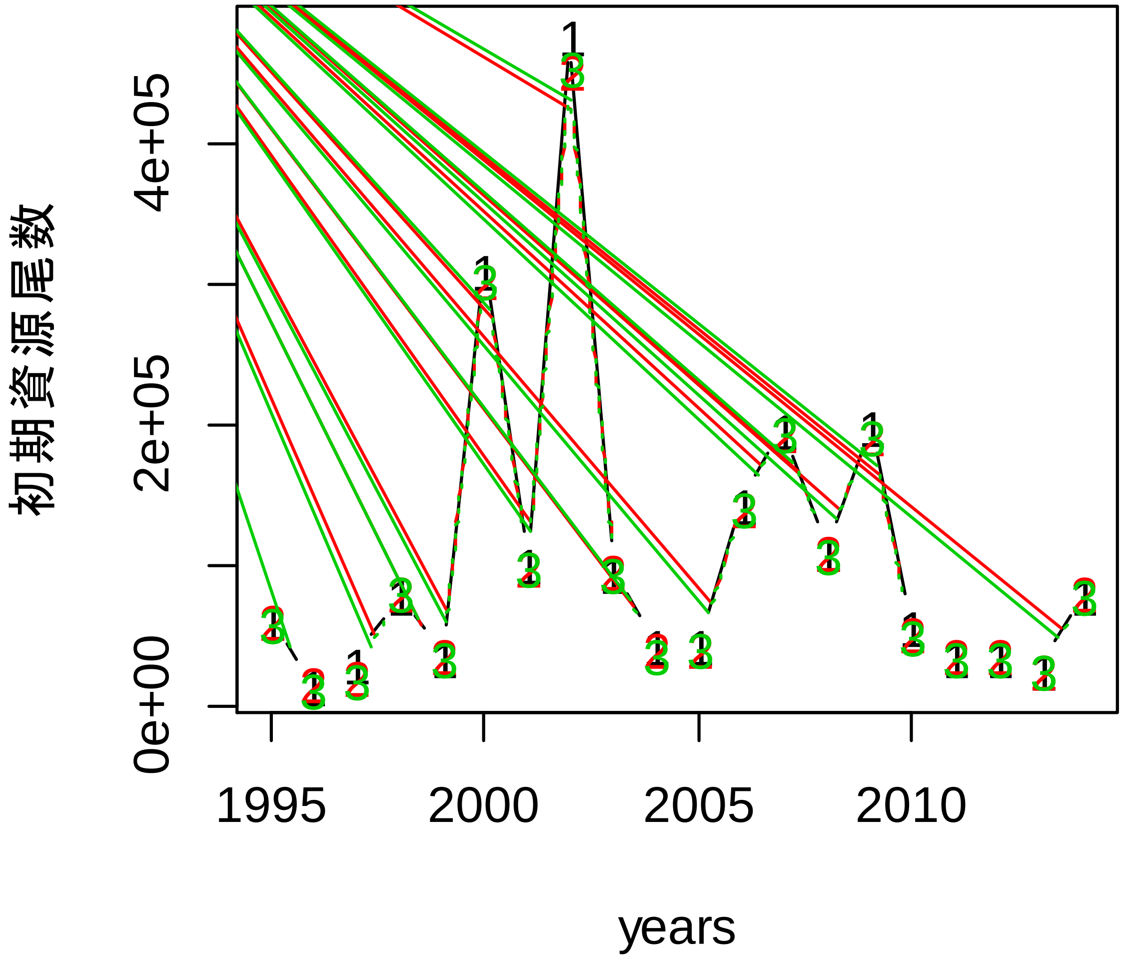
$$L(C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi V(C_t)}} \exp\left[-\frac{\left(C_t - E(C_t)\right)^2}{2V(C_t)}\right]$$

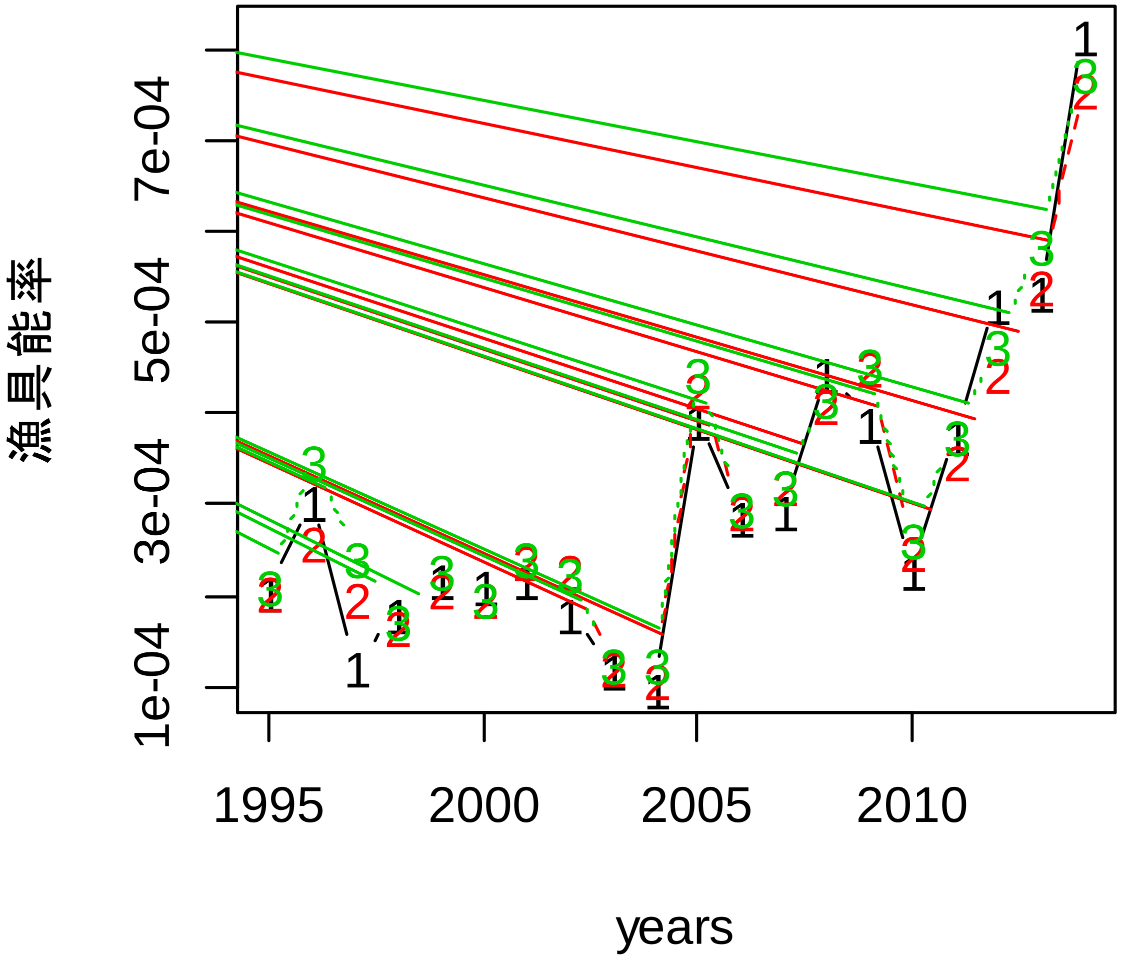
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi N_t p_t (1 - p_t)\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(C_t - N_t p_t)^2}{2N_t p_t (1 - p_t)\sigma^2}\right]$$

対数尤度の総和が最大化するようにN0, qとともにσも推定する

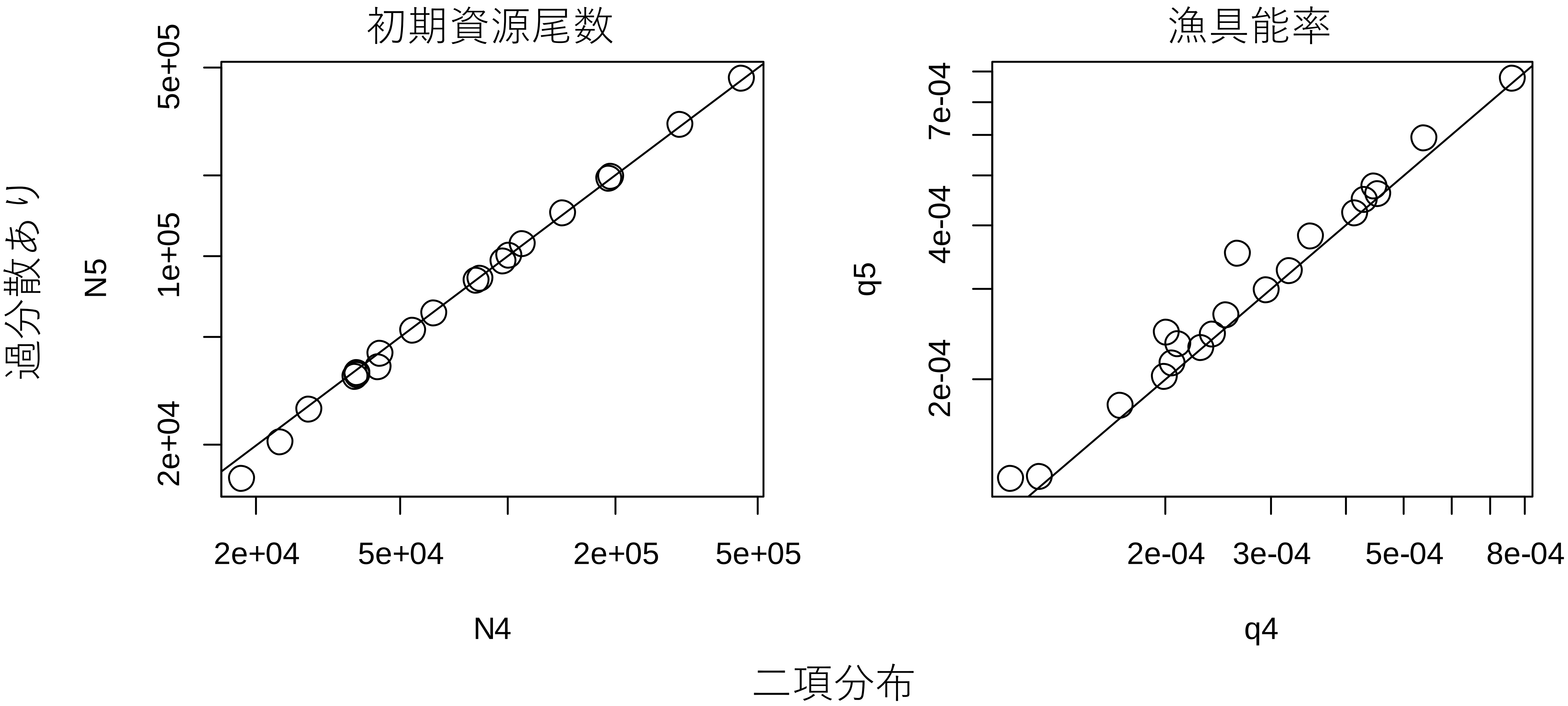
推定値

```
> sigma
[1] 16.53959
```

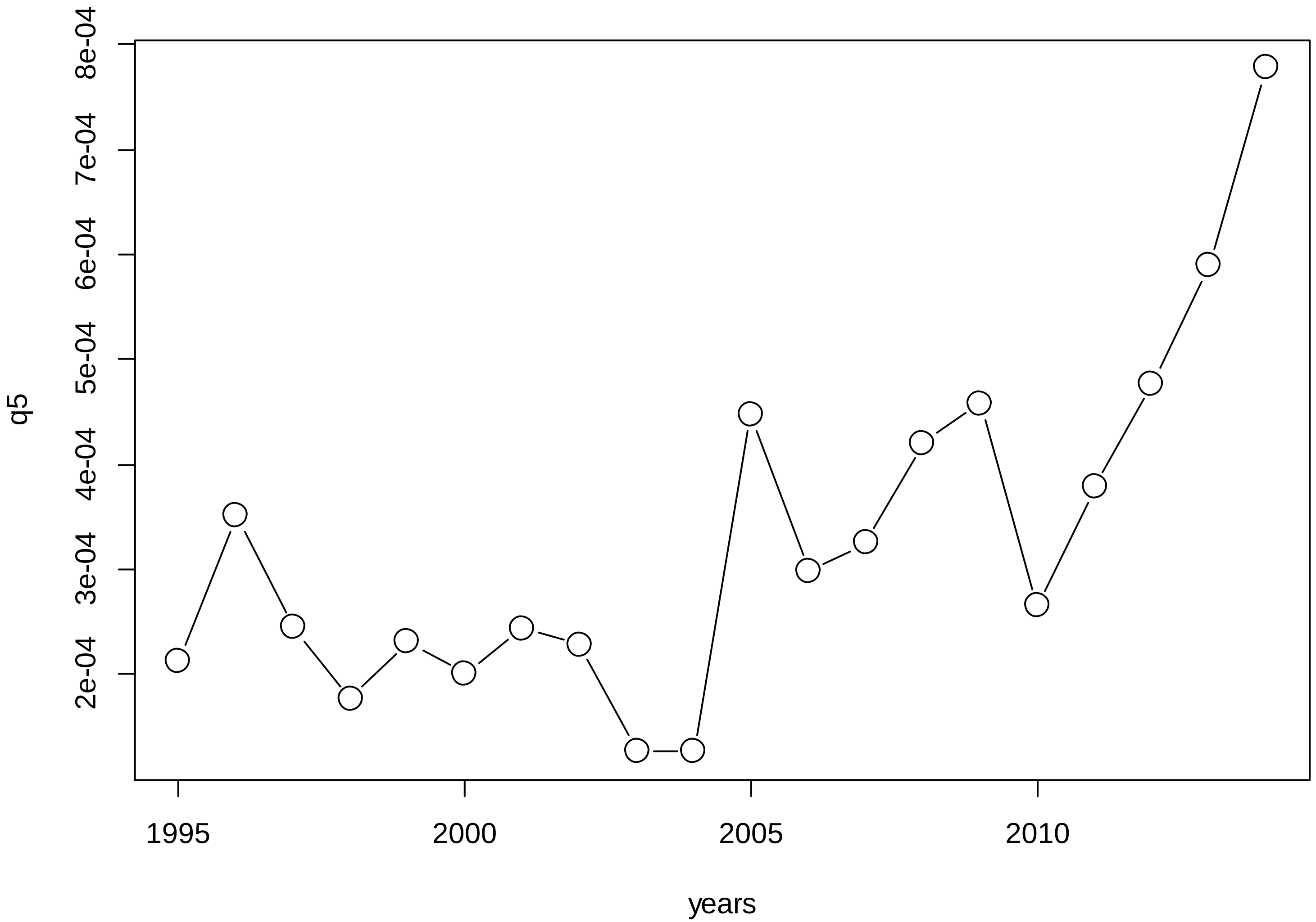




推定値の比較


初期資源尾数
漁具能率
過分散あり
N5
5e+05
1e+05
2e+04
2e+04
5e+04
2e+05
5e+05
N4
q5
7e-04
4e-04
2e-04
2e-04
3e-04
5e-04
8e-04
q4
二項分布

DeLury法からさらにわかること
―漁具能率の変動要因―



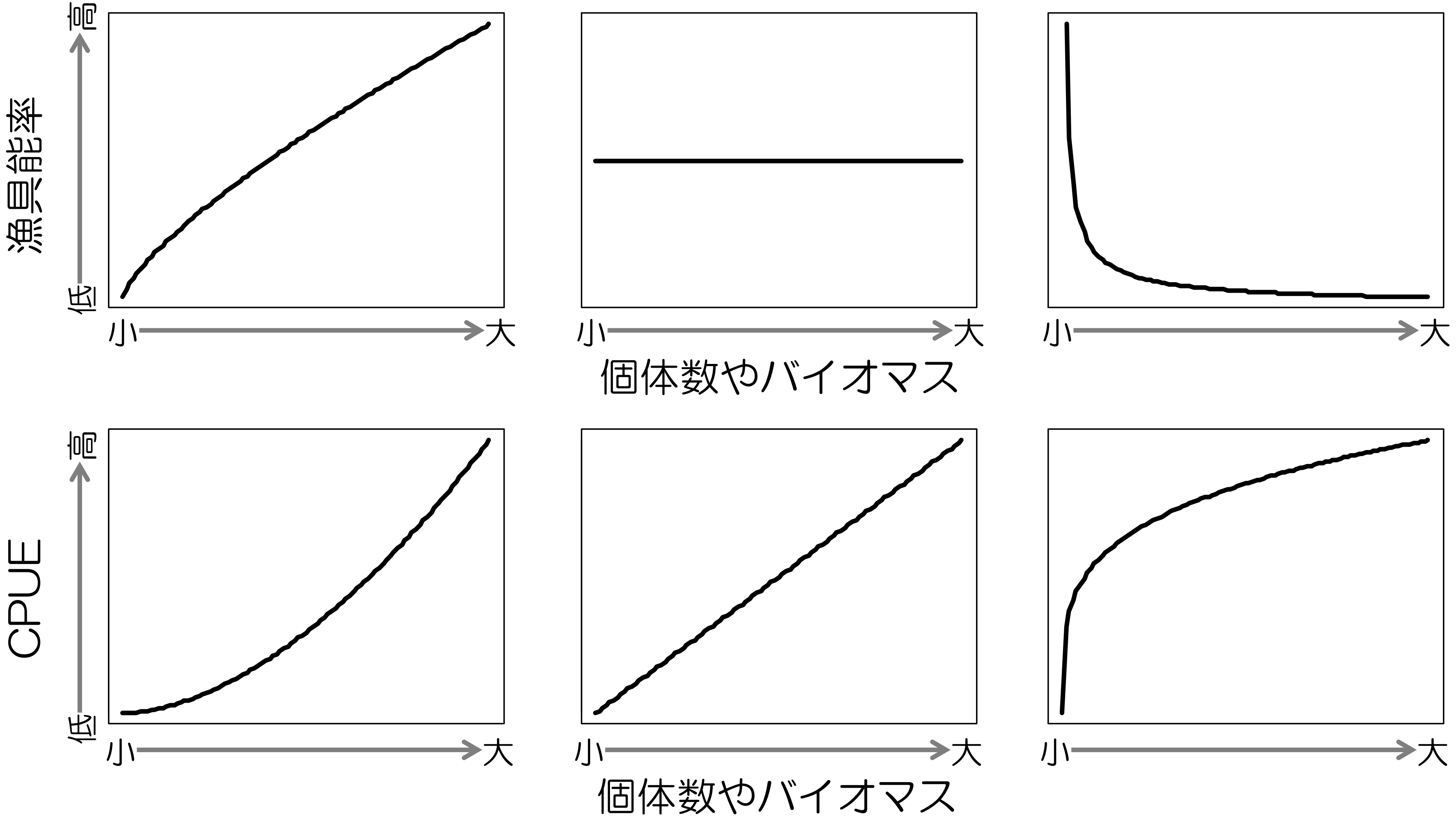
漁具能率はなぜ変動するのか？

漁具能率と個体数の関係

Hyperdepletion　　Hyperstability

$q = aN^{b}$

$b > 0$　　$b = 0$　　$b < 0$

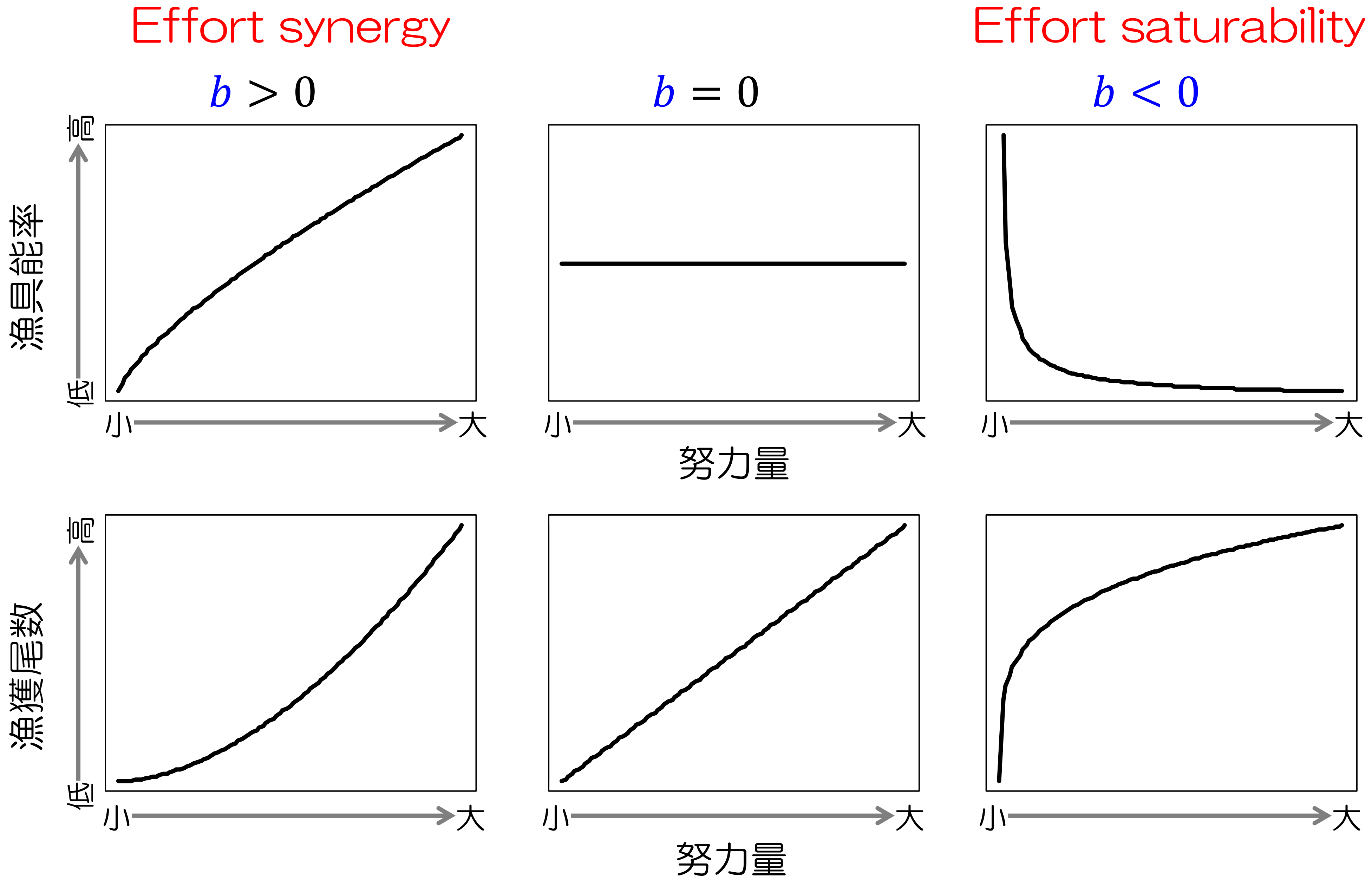


$CPUE = qN$

漁具能率と努力量の関係

$q = aE^{b}$

$Cacth = qNE$



DeLury法の推定値を使った解析

$$\log(q) = \alpha + \beta_1 \log(N_0) + \beta_2 \log(Effort) + \beta_3 \log(SST) + \varepsilon$$

漁具能率（推定値）

個体数（推定値）

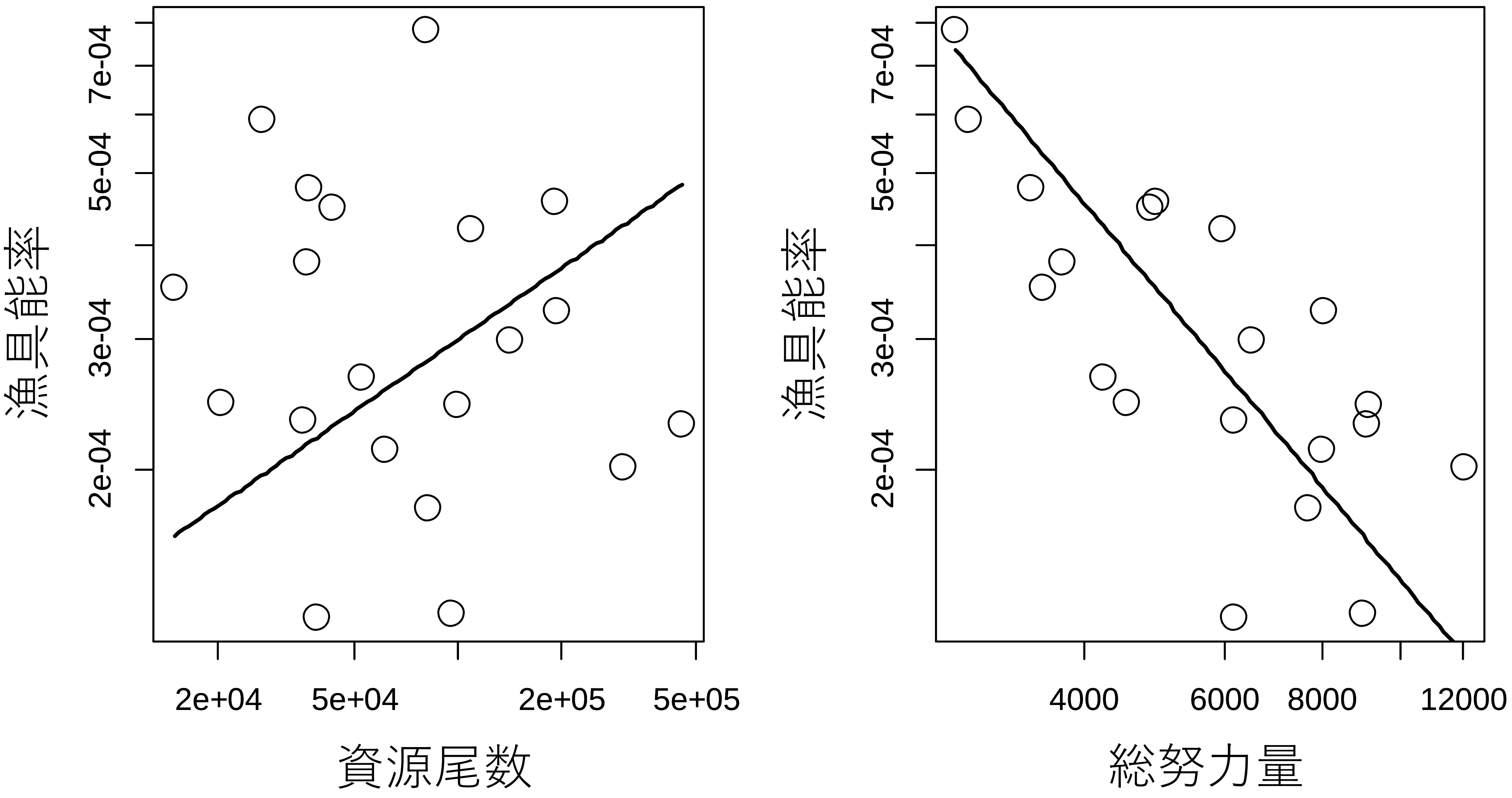
総努力量

表面海水温

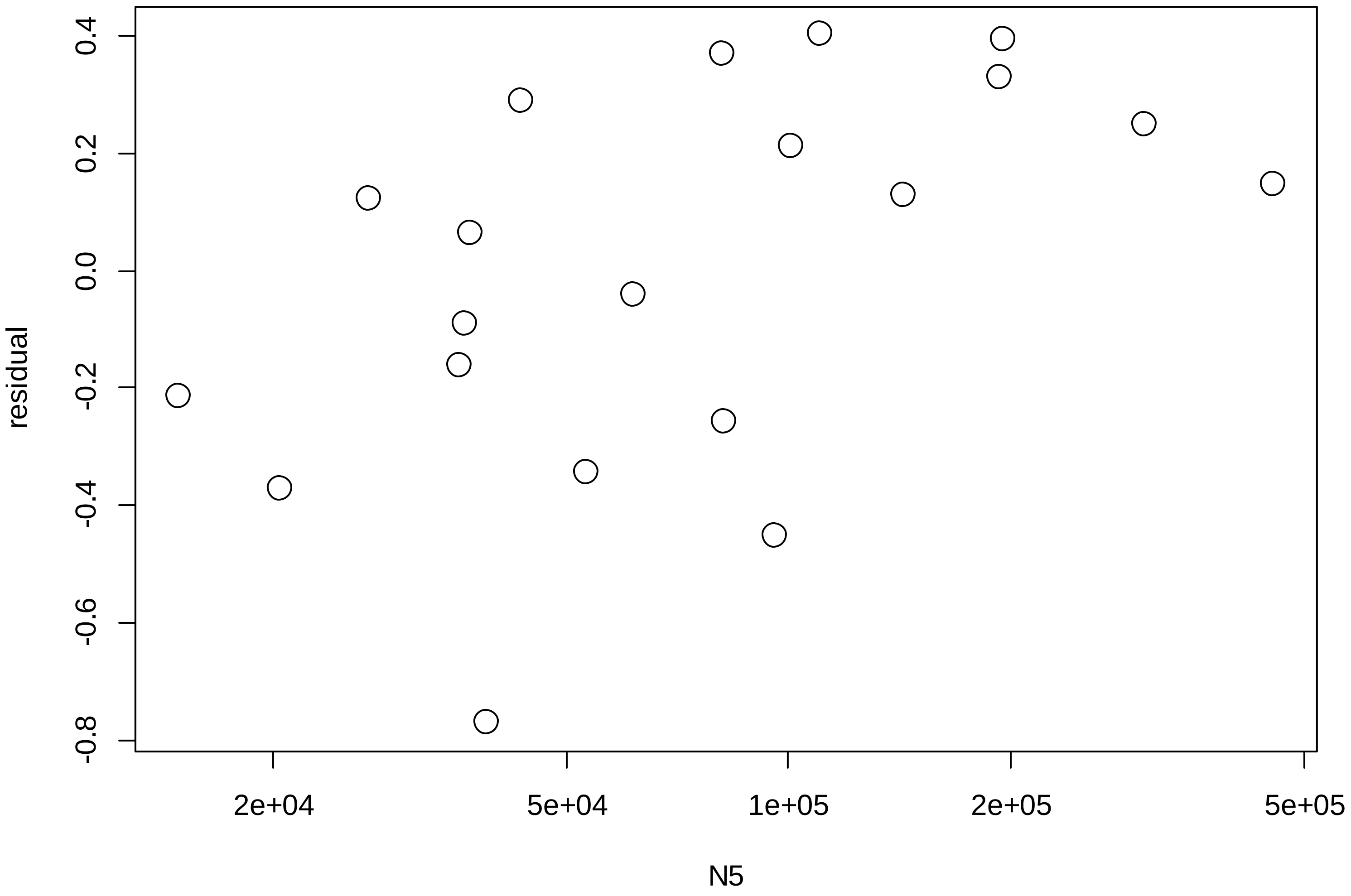
```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    2.61186   12.25093   0.213  0.83387
log(N6)        0.31922    0.09162   3.484  0.00306 **
log(teffort)  -1.27062    0.21316  -5.961 1.99e-05 ***
log(sst)      -1.11362    4.27407  -0.261  0.79776
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.261 on 16 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7519,	Adjusted R-squared:  0.7054
F-statistic: 16.16 on 3 and 16 DF,  p-value: 4.233e-05
```

有意

漁具能率と個体数・努力量との関係



努力量で回帰した残差と個体数の関係



VPA (virtual population analysis)

Age \ Year	2010	2011	2012	2013	2014
0	2983				
1		2241			
2			1229		
3				638	
4					150

コホート

自然死亡+
漁獲

Popeの近似式

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}\exp(M) + C_{a,y}\exp(\frac{M}{2})$$

漁獲死亡係数

$$F_{a,y} = -\ln\left\{1 - \frac{C_{a,y}}{N_{a,y}}\exp(\frac{M}{2})\right\}$$

- 年齢別漁獲尾数と自然死亡係数から後ろ向きに資源尾数を計算
- 資源量指標がないとき、最新年の漁獲死亡係数Fの仮定が必要
(例: 直近3年間の平均)

RVPA

```
> vout1 <- vpa(dat=dat,
+               fc.year = (max(years)-2):max(years),
+               tf.year=(max(years)-3):max(years-1), #最近3年間の平均の選択率
+               alpha=1,
+               term.F="max", #最高齢のterminal Fだけ推定
+               tune=FALSE,
+               stat.tf="mean",   #Terminal Fの仮定
+               plus.group=TRUE,  # plus groupあり
+               plot=FALSE,
+               p.init=1)
>
> vout1$faa[“2014”] #最新年のF at age
       2014
0 0.2498041
1 0.8484579
2 0.6858616
3 0.6858614
> rowMeans(vout1$faa[as.character(2011:2013)]) #2011~13年の平均F
        0         1         2         3
0.2498041 0.8484579 0.6858616 0.6858616
```

チューニングVPA

- 資源量指標値 (CPUEなど) との当てはまりがよくなるように、最新年のFを推定
- F一定の仮定がなくなる（弱まる）

$$\text{minimize} \sum_t [\log(Index_t) - \log(q\,N_t)]^2$$

$$F_{a,y} = -\ln\left\{1 - \frac{C_{a,y}}{N_{a,y}} \exp(\frac{M}{2})\right\}$$

(FはNの関数)

- 選択率更新法：選択率（各年齢のFの相対値）を直近数年から仮定（平均など）
  ー資源量指数が少ないとき

- 全F推定：各年齢のFを個別に推定
  ー資源量指数が多いとき
  ―資源量指数が少なくても、適用可能 (リッジVPA: Okamura et al. 2017)

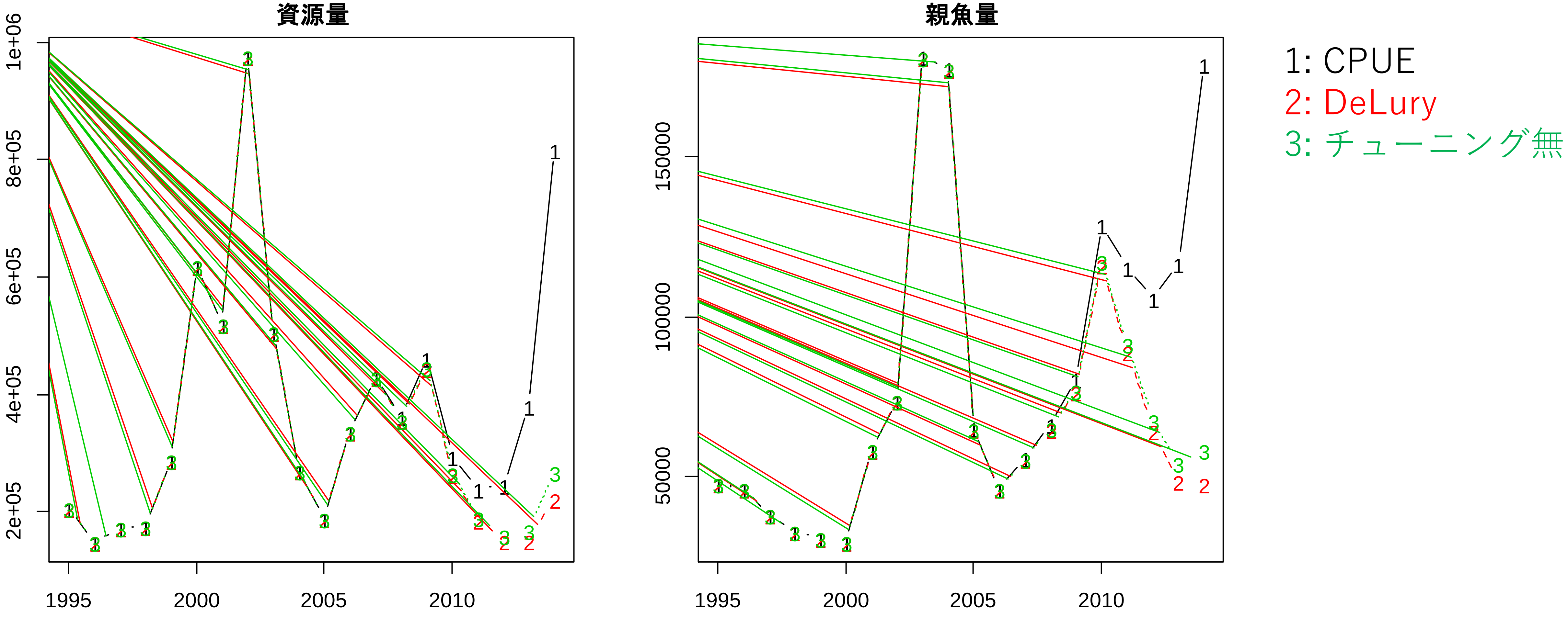
RVPA

- 総漁獲尾数 / 総努力量を指標として使う

```
> vout2 <- vpa(dat=dat,
+             fc.year = (max(years)-2):max(years),
+             tf.year=(max(years)-3):max(years-1), #最近3年間の平均の選択率
+             alpha=1,
+             term.F="max", #最高齢のterminal Fだけ推定
+             tune=TRUE,
+             sel.update=TRUE, #選択率更新法
+             use.index=c(1), #１行目の指標
+             abund="N",#個体数に対する指標
+             min.age=1,#1歳の指標
+             max.age=1,
+             stat.tf="mean",  #選択率の仮定
+             plus.group=TRUE, # plus groupあり
+             p.init=1)
>
> t(vout2$saa["2014"]) #最新年の選択率
             0 1         2         3
2014 0.2800862 1 0.8036366 0.8036366
> rowMeans(vout2$saa[as.character(2011:2013)]) #2011~13年の選択率
        0         1         2         3
0.2800862 1.0000000 0.8036366 0.8036366
```

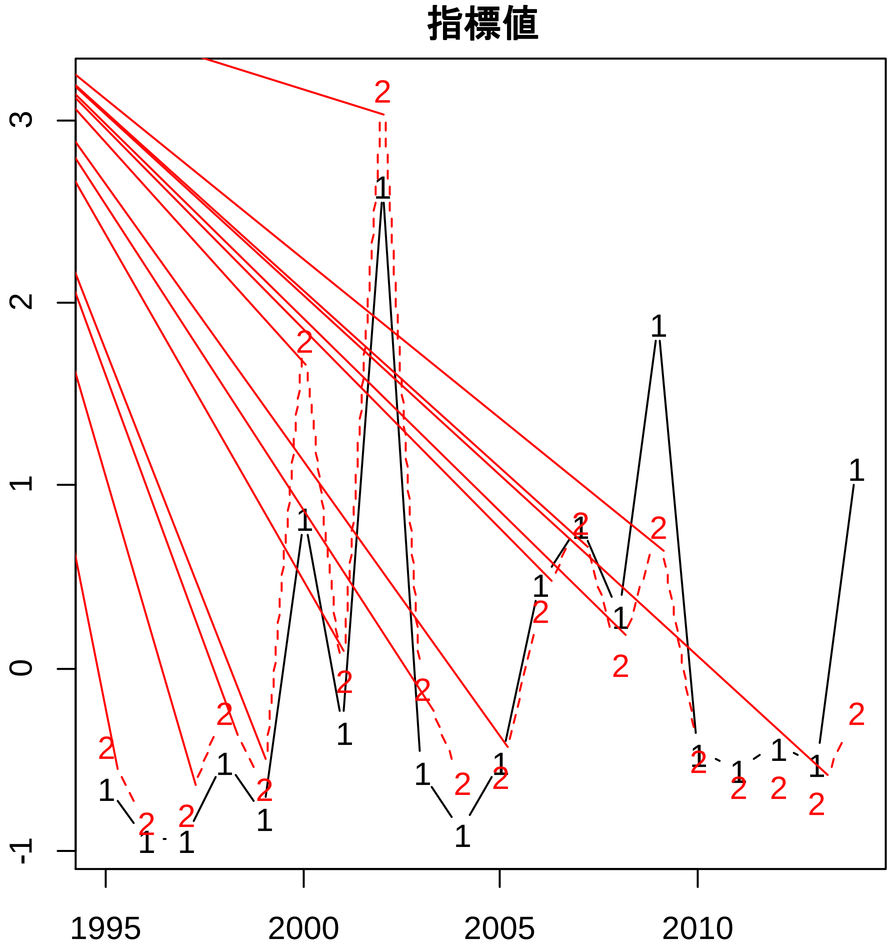
VPAによる推定値

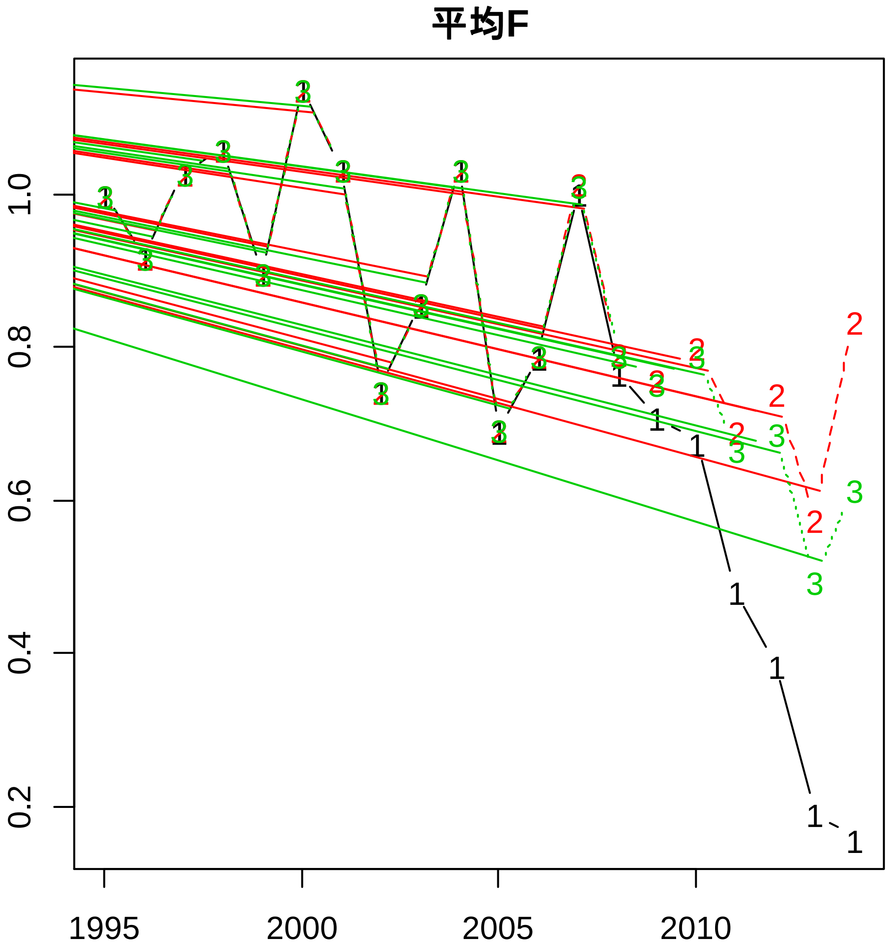
- チューニング無/CPUEでチューニング/DeLury法で得られた資源量でチューニングの3つで比較



VPAによる推定値

- チューニング無/CPUEでチューニング/DeLury法で得られた資源量でチューニングの3つで比較





1: CPUE
2: DeLury
3: チューニング無

まとめ

- DeLury法は漁獲圧の高い閉じた個体群に対して、特に漁具能率の変動下で有効な資源量の推定手法
- 様々な手法があるが、比較的簡単に（Excelでも）できる
  - 正規分布（第1モデル、第2モデル）
  - 二項分布（過分散に注意）
  - 二項分布の正規近似モデル（過分散を考慮可能）
- 推定された漁具能率の変動要因の解析も行える
- VPAの指標としても用いることができる
- 漁業データを細かく（月別・地域別）見ることが大事