

プロローグ

北国の人たちを想うとき、厳しい冬の寒さに耐え、寡黙な、深い人生哲学を持った人が頭に浮かぶ。南国の人たちならば、褐色の肌をして、陽気でおらかな人というイメージが浮かぶ。しかし、北国の人すべてが、そのような朴訥な人ではないだろう。反対に、南国にも、ひどく陰気な人もいるだろう。日本人のイメージはどうかと問われれば、真面目で勤勉なサラリーマンを思い浮かべる。だが、平安時代の日本人はと問われれば、十二単を身に着けた華やかで優雅な女官や烏帽子をかぶった貴族が思い浮かぶ。戦国時代には、荒々しい武士を想像する。だが、そこには、虐げられた農民や、夜の空に輝く星を見上げて何かを思う若者もたしかにいたのだ。

このように、人は、そして生物は、場所や時代で大きく変化する。変わりゆくものの姿に、また変わらないものの中に、生き物たちの本質を見るのである。我々は、生態学や水産資源学といわれる研究分野で仕事をしている。我々は、生物の集まりである個体群がどのような特徴を持っており、どのように変化するのか、あるいはどのように変わらないか、を知ることに関心がある。

個体群のことを知るためにとるアプローチにはいくつか考えられる。まず実験をすることである。また、数理モデルを構築し、それによって考察することもできる。しかし、我々はそのようなアプローチをとらない。我々のスタート時点には、データがある。しかし、そのデータは、大抵は、実験によって計画的にとられたものではなく、様々な不確定要素が混入したものである。従って、そのデータからそのまま結論を導くことは困難で、危険です。

ii プロローグ

らある。

結論を導くために、我々もまた数理モデルを必要とする。だが、その数理モデルは、不確定要素を取り入れたものでなければならない。そこで、使われるモデルは、必然的に統計モデルと呼ばれるものになる。これは、昨今話題のデータサイエンスと呼ばれるものである。この本では、データサイエンス的技法を使って個体群動態を推測・評価し、さらにその情報を用いて個体群を上手に管理する方法について紹介する。

0.1 老人と湖（個体数推定）

老人がいる。老人の家のそばには、小さな湖がある。老人は、湖に小舟を漕ぎ出し、湖の中ほどで、釣り糸を垂らす。やがて、老人は魚を釣り上げる。1匹、2匹、…と釣り上げて、老人は満足そうに帰って行く。だが、老人はただの釣り人ではない。彼は記録をするのである。自分が何年の何月何日の何時に、湖のどの場所で、何回釣り糸を垂らし、何尾の魚を釣り上げたのか。そのときの天気はどうだったのか。老人は記録する。小さくなった鉛筆の先を嘗めては、ノートに小さな字を書きつけていく。魚を釣ることではなく、記録することこそが目的のように。夕食に釣ってきた魚を食べたあと、老人は揺り椅子に腰かけて自分が数年前から記録してきたノートを見返す。さまざまな思い出がよみがえってくる。老人は満足そうな笑みを浮かべる。しかし、やがて老人は驚愕の表情を浮かべて、椅子から立ち上がる。そして、言う。「魚が減っている！」

我々が扱うのは、老人が記録してきたノートにあるようなデータである。その情報から、我々は、今、湖の魚が本当に減っているのか、あるいは増えているのか、湖に魚がどのぐらいいるのか、かつてどのぐらいいたのか、老人がこれからも魚を獲り続けるためにどのぐらいの魚を釣れば良いのか、といったことを推測する。年を経るにつれて、老人が何度も釣り糸を垂らす必要があるとき、釣れる魚が目に見えて減ってきているとき、その結果から、湖の中で魚の個体群に起こっている変化を予測するのである。Hilborn and Mangel (1997) は、このような予測をするものたちを生態学探偵 (Ecological Detective) と名付けた。データは、何かを明らかにするために、しっかりと

0.1 老人と湖（個体数推定） iii

した実験計画のもとでとられたものではない。老人が趣味的にとったものである。そのノートから、あっさり結論を出して良いだろうか。そこにある情報をそのまま信じて短絡的な結論を出すのは危険ではないのだろうか。

この本に出てくる探偵は、シャーロック・ホームズのように活動的な探偵ではない。手がかりは、老人のノートだけである。そこから我々は推理しなければならない。立ち上がった老人は、安楽椅子に再び座ることはしなかった。そして、部屋の隅にある小さな机の前の椅子に目を向ける。長く使わなかったその椅子に腰掛け、老人はつぶやく。「事務椅子探偵ってところだな...」小さなデスクの上には、ノートパソコンがある。数年前、孫が使い古しのパソコンを置いて行ったのだ。孫がまだ小さい頃、釣りに連れて行ったこともあった。ノートパソコンを持ってきたとき、「あたし、今、魚の研究をしているのよ」と言っていたっけ。老人は、そう話す孫のキラキラと希望に満ちた瞳を思い出しながら、ノートパソコンの電源ボタンを押す。パソコンが起動され、老人は画面の上に目を走らせる。なにをすればいいんだろう？だが、デスクトップの上にある青いRの字のアイコンが妙に老人の目をひきつけるのだ。老人はゆっくりとRの字のアイコンの上にマウスのポインタを移動させ、しばしの沈黙の後、なにかを決断したかのようにダブルクリックした。

その日から、ノートパソコンと老人の、また、Rと老人の格闘が始まった。老人は、インターネットを通して、Rについてどんどん学んでいくことができることを知った。どうしても分からないことは孫に電話をして訊いた。「珍しく電話をしてきたと思ったら、おじいちゃんがRを使うなんて！」最初は驚いた孫も、老人の本気を知ると親切に教えてくれるようになった。老人は、電子メールで孫に質問するようになった。その方が、Rのコードを知らせるのに便利だったからである。老人の理解は進み、Rを使ってデータを調べることができるようになってきた。「わしはただの老人ではない。"R"ojin だ」と老人は言うのだった。老人の記録はさらに詳細になっていった。そして、とった記録はすぐにパソコンに打ち込まれていく。湖は、老人が子供のころから変わらずそのままであった。いつもそばにあった湖、しかし、その満々たる水の底で今何かが変わっているのだ。老人はそれを知りたかった。そして、自分にできることは何なのかを知りたかった。

iv プロローグ

ここで、老人が湖のある魚のデータをまとめた結果を見てみよう。読者は、次のようにして老人が記録したデータを R に読み込むことができる。

```
lakefish <- read.csv("lakefish.csv")
head(lakefish)
```

```
  Y M D C E
1 2008 7 1 1 1
2 2008 7 2 1 1
3 2008 7 3 2 2
4 2008 7 4 4 4
5 2008 7 5 1 1
6 2008 7 6 4 4
```

これは最初の 6 行を示したものである。一列目の Y は年、M は月、D は日、C は漁獲尾数、E は釣竿を垂らした回数である。データの全体的な内容は、summary を使って確認することができる。

```
summary(lakefish)
```

Y		M		D		C	
Min.	:2008	Min.	:7.000	Min.	: 1.00	Min.	:0.0000
1st Qu.:	2010	1st Qu.:	7.000	1st Qu.:	8.00	1st Qu.:	0.0000
Median	:2013	Median	:8.000	Median	:16.00	Median	:0.0000
Mean	:2012	Mean	:7.981	Mean	:15.89	Mean	:0.1564
3rd Qu.:	2015	3rd Qu.:	9.000	3rd Qu.:	23.00	3rd Qu.:	0.0000
Max.	:2017	Max.	:9.000	Max.	:31.00	Max.	:4.0000
E							

0.1 老人と湖（個体数推定） v

```
Min.   : 1.000
1st Qu.: 2.000
Median : 2.000
Mean    : 2.748
3rd Qu.: 4.000
Max.    :10.000
```

この魚は、2008年から2017年の7月から9月に漁獲されてきた。1日の漁獲尾数は最大でも4尾である。1日に10回も釣竿を垂らし直したことがある。

老人は、静かにRにコマンドを打ち込んでいった。「毎年の漁獲尾数の平均値はどうなっているんじゃないだろう」

```
round(tapply(lakefish$C, lakefish$Y, mean),3)
```

```
2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017
0.819 0.141 0.105 0.122 0.082 0.071 0.045 0.059 0.071 0.062
```

出てきた数値を見て、老人があの日感じた驚きは確信に変わっていく。だが、漁獲尾数だけで良いのだろうか。何度も釣竿を垂らせればそれだけ魚は獲れるのではないだろうか。「あわてるな。CPUEじゃ」。老人は次のようなコマンドを打ち込む。

```
round(tapply(lakefish$C/lakefish$E, lakefish$Y, mean),3)
```

```
2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017
0.339 0.038 0.026 0.024 0.015 0.013 0.008 0.013 0.013 0.012
```

「もっと減っておる…。」（図1）。老人は知っていた。漁獲尾数(C)を努力

vi プロローグ

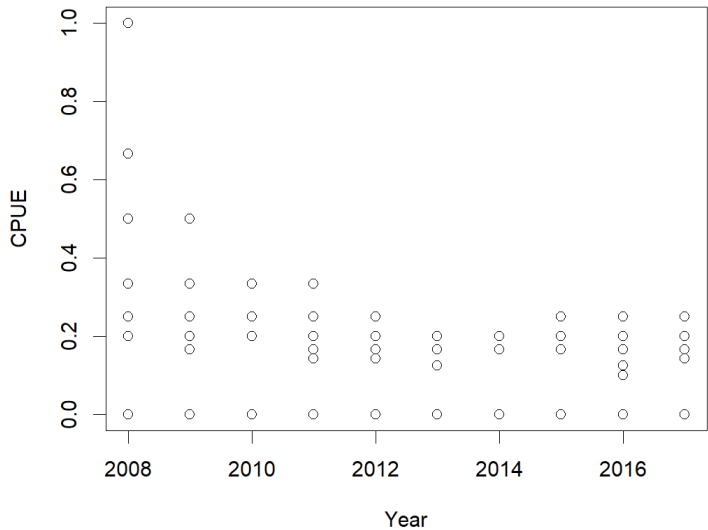


図 1 CPUE の経年変化

量 (E) で割ったものを単位努力量あたり漁獲尾数 (CPUE) といい, それが個体数の指標値としてしばしば使われることを.

実際に湖の中にどれだけの魚がいて, わしはそれをどれだけ獲ったのだろう. 老人は自問する. そして, データに CPUE を加えた.

```
CPUE <- lakefish$C/lakefish$E
lakefish <- cbind(lakefish,CPUE)
```

老人の耳に「除去法のひとつにデルーリー法っていうのがあるのよ」という孫の言葉がよみがえってくる. 「デルーリー法か...」老人はインターネットで検索する. CPUE が個体数に比例しているとすれば, CPUE は漁獲された後に残った個体数に比例定数を掛けたものになるはずである. 時点 t に

0.1 老人と湖（個体数推定） vii

おける累積漁獲尾数を CC_t と書けば、比例定数を q として、

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

という式が成立する。この方法を使ってみよう。老人は思った。だが、それには累積漁獲尾数 CC が必要である。Amazon で注文した R に関する本を本棚から引っ張り出して、しばしの時間のあと、老人はつぶやく。「`cumsum` か…」老人は、データにまたひとつ列を付け加える。累積漁獲尾数の列である。

```
CC <- sapply(2008:2017, function(x) cumsum(subset(lakefish, Y==x)$C))
lakefish <- cbind(lakefish, CC=unlist(CC))
```

「さてと、デルーリー法とやらをやってみようか」老人は掌を擦り合わせると、次のようにタイプした。

```
lm(CPUE~CC, data=subset(lakefish, Y==2008))
```

Call:

```
lm(formula = CPUE ~ CC, data = subset(lakefish, Y == 2008))
```

Coefficients:

(Intercept)	CC
1.18902	-0.01697

「なるほど、比例定数である漁具能率はおよそ 0.017、ということは 2008 年の最初の個体数は $1.19/0.017$ で、およそ 70 尾ということになるな。しかし、いちいちこのコマンドを打ち込むのも面倒くさいのお。それに、結果をとっておきたいし…」老人は、`delury1` という関数を作ることにした。

viii プロローグ

```
delury1 <- function(x,Year=2008, make.plot=FALSE){  
  # 年 (Year) のデータを取り出す  
  dat1 <- subset(x, Y==Year)  
  
  # DeLury の第一モデル  
  dres <- lm(CPUE~CC, data=dat1)  
  
  # プロット  
  if (make.plot) plot(dat1$CC, dat1$CPUE,xlab="CC",ylab="CPUE")  
  
  #  $q$  と  $NO$  を推定  
  q.hat <- -dres$coef[2]  
  NO.hat <- dres$coef[1]/q.hat  
  
  # 結果  
  pars <- c(q.hat,NO.hat)  
  names(pars) <- c("q","NO")  
  
  list(res=dres, pars=pars)  
}
```

そして、老人は次のように打ち込んだ。

```
Res.lake <- lapply(2008:2017, function(x) delury1(lakefish,Y=x))
```

はやる気持ちを落ち着かせて、老人は打ち込んでいく。

0.2 乱獲の先に（個体群モデルによる評価） ix

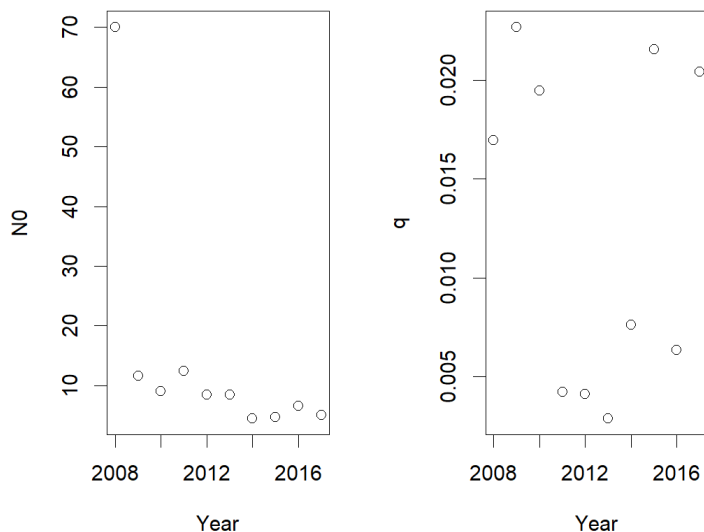


図2 デルーリー法の結果. 左：初期個体数, 右：漁具能率

```
q <- sapply(1:10, function(i) Res.lake[[i]]$pars[1])
N0 <- sapply(1:10, function(i) Res.lake[[i]]$pars[2])
names(q) <- names(N0) <- 2008:2017
```

だが、得られた結果（図2）を見て、老人の顔は曇った。「個体数はすっかり少なくなっておる... わしは獲りすぎていたんじゃないだろうか...」

0.2 乱獲の先に（個体群モデルによる評価）

「わしは獲りすぎていたんじゃないだろうか...」

老人はその夜寝つけなかった。自然の恵みを何より大切にしてきた。わし

x プロローグ

ほどあの湖のことを分かっているものはいない。そのわしが... 眠れないまま朝を迎えた老人は、冷たい水で顔を洗うと、濃いめのお茶を飲み、背筋を伸ばす。まだなにも分かっていないじゃないか。まだ始まったばかりじゃないか。老人は、なにげなく水産資源学のテキストを開く。「余剰生産量モデルというのがあるのか」老人はその式をじっと見つめた。

$$N_{t+1} = N_t + rN_t(1 - N_t/K) - C_t$$

この個体群モデルの増加率 r と環境収容量 K が分かれば、最大持続生産量 $MSY = rK/4$ となる。最適な漁獲率は $F_{MSY} = r/2$ 、最適な個体数は $N_{MSY} = K/2$ となる。もし、最適な漁獲率や最適な個体数が分かれば、わしが獲りすぎていたのか、そしてどのような個体数を維持するべきなのかもわかるはずじゃ。だが、どうして r や K を推定したらいいのだろうか？老人は頭を抱えた。やがて、老人はやれやれという感じで、立ち上がった。「先生に聞くしかないわい」。老人は受話器を持ち上げて、ダイヤルを回した。

「もしもし。おじいちゃん？どうしたの？」

「デルーリー法はできた。しかし、資源状態をどうやって推定すれば良いか見当がつかんのじゃ...」

「そうね。そういえば、おじいちゃんが生態学探偵と言っていた Hilborn さんにそういう論文があったような気がするわ。ちょっと待ってて」

孫が与えた情報は、次のようなものであった。まず、余剰生産量 $SP_t = N_{t+1} - N_t + C_t$ と呼ばれるものを計算する。そして、その余剰生産量に2次曲線を適用するのだ。

「なるほど。だが、 N_t はどうやって手に入れる？」

「おじいちゃんがデルーリー法で推定した初期個体数 N_0 を使えばいいんじゃないかしら？」

「では、2次曲線をどうやって適用する？」

「それはね...」

電話を切ってから、老人はもう一度熱いお茶を入れて飲んだ。「あいつ、なかなかやりおるわい... さて、始めるか」老人は、今やすっかり定位置になった部屋の隅の事務椅子に腰掛ける。ノートパソコンが開かれる。カタカ

0.2 乱獲の先に（個体群モデルによる評価） xi

タと老人がキーボードをたたく音が聞こえる.

```
TC <- tapply(lakefish$C,lakefish$Y,sum)
SP <- NO[2:10]-NO[1:9]+TC[1:9]
Nt <- NO[1:9]
Res.msy <- lm(SP~Nt+I(Nt^2)-1)
r <- Res.msy$coef[1]
K <- 1/(-Res.msy$coef[2]/r)
```

「どうやら、 r と K が求まったようじゃ」老人は、続けてキーボードをたたく。まるで疲れを知らない子供のように。

```
Fmsy <- r/2
Nmsy <- K/2
MSY <- r*K/4
```

これでMSYについては分かった。では、老人のこれまでの漁獲はどうだったのか。老人は、次のようなコードを打った。

```
Fr <- TC/NO
rNO <- NO/Nmsy
rFr <- Fr/Fmsy
plot(rNO,rFr,xlim=c(0,2),ylim=c(0,3),xlab="N/Nmsy",ylab="F/Fmsy")
abline(v=1,lty=2)
abline(h=1,lty=2)
```

老人は思わず声を上げた（図3）。「獲りすぎたんじゃ。乱獲じゃ。乱獲

xii プロローグ

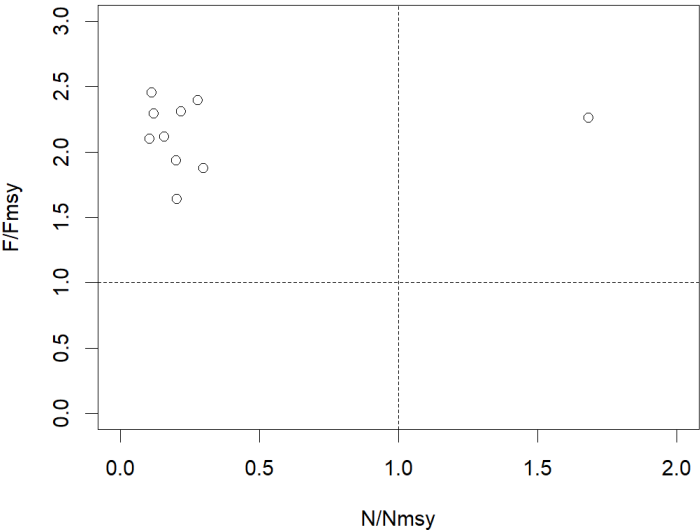


図3 神戸プロット.

0.2 乱獲の先に（個体群モデルによる評価） xiii

じゃ」老人はふたたび頭を抱えた。だが、老人はかぶりを振る。「わしは知ったんじゃ。今、湖の魚がどうなっているのか。わしが何をしてきたのか。推定された増加率 $r = 0.86$ はかなり高い。これは回復力が高いことを意味するに違いない。まだ時間はある。生態系を回復させるんじゃ」

老人は先日の孫との会話を思い出していた。「あたし、はじめて英語で書いた論文が受理されたのよ。最初に投稿したジャーナルにはリジェクトされたの。でも、二度目に出した雑誌は major revision だったわ。タイムリーに論文を出すことが大事だって先輩が言うのよ。また書くわよ。今度はあのリジェクトされた雑誌に絶対載せてみせるから」タイムリーな出版か。まずここまでの成果をまとめることじゃ。老人は、これまでに分かったことをワープロに書いていく。論文などを書くのは、もちろんはじめてである。思いの外時間がかかったが、ようやくできあがった。老人は、孫にメールを書いた。

From: Sanjyuro Konoue <rojin_on_the_lake@jmail.com>

Date: 2017年10月13日(金) 20:27

Subject:わしの論文

To: Sayori Konoue <sayori_konoue@jamil.com>

サヨリへ

添付の論文を見なさい。

湖之上 三十浪

あくる日、すべての報告を読み終えて、孫は老人に電話を掛けた。「あたし、驚いたわ。おじいちゃん、もうすっかり個体群生態学者ね」老人はにやりと笑って言った。「わしはただの老人ではない。Eco“R”ojin だ」

電話を切ると、あたりはもう闇に包まれていた。虫の声だけが聞こえてくる。虫の声の向こう側にあの湖があるのだ。老人は目をつむり、虫の声に耳を傾ける。だが、その目はすぐに開かれた。変わるものがある、変わらないものがある。知らないことがある、知りたいことがある。「まだまだだ」その声は自分でも驚くほど力強かった。「まだまだ若いものには負けんぞ」老

xiv プロローグ

人は、いつもの事務机に座ると、インターネットブラウザを立ち上げ、検索エンジンに Template Model Builder という文字を打ち込んだ。

この物語はフィクションである。老人も孫も実在しない。いや、しかし、老人も孫もたしかに存在する。我々もまた、この老人であり、この孫であった。この本は、孫（我々）から老人（読者）への贈り物である。あるいは、老人（我々）から孫（読者）への手紙である。願わくば、読者が最後のページまで読み進み、湖の秘密を知る鍵を得られんことを。