

## VPA勉強会

**Virtual population analysis – a practical  
manual for stock assessment**

**(FAO fisheries technical paper 400)**

1-3章, 5章

担当： 資源管理グループ 市野川

# 1. INTRODUCTION

## (はじめに)

## 1.1 Overview

- 資源評価において、VPA式のやり方は非常に強力なツールであるが、多彩な手法と難解なネーミングは新たなユーザーを遠ざける一因となっている

### 単純な共通の構造＝ 年齢構成モデル

- 年級群が漁業によって数が減っていく様子を最も単純に表現したもの

### 手法の多様性

- 用いるデータ
- データにモデルをフィットさせる際の手法の違い

# 本マニュアルの構成

1. 個体群動態モデルの紹介(4章)
  - VPAで共通の構造
  - コホート; 年齢が同じ魚の集まり(途中から加入が起こるようなことはない)
  - コホートが、漁業や自然死亡によって徐々に減少するプロセスを表現
2. リンクモデル(5章)
  - 知りたいことを直接観察できることはほとんどない → 間接的な観察モデル(CPUEとか)を、直接知りたいパラメータ(個体群動態のFとか)に関連付けるためのモデル
  - 観測誤差を考慮するようなモデルとなる

# 本マニュアルの構成

## 3. 誤差モデル(6章)

- 観察データにフィットさせる際のモデル
- 誤差モデルの客観的な記述によって、客観的に最良のモデルを選択することができる
- VPAでは、重み付けされた最小二乗法がよく使われている(これを拡張すると、最尤法による推定となるが、本マニュアルでは扱わない)

なぜ1～3を別々に紹介するのか？

- 決まった手順はない
- 個々の要素を適切に組み合わせることによって、自分の対象種に合う方法を作ることができる
- 本マニュアルで紹介する手法は単なる一例であり、データはICESのデータを持ってくる場合もあるが、それが資源評価データ&結果と一致するというわけではないので注意

## 1.2 背景

### はじまり

- Gulland (1965) based on older work (e.g. Fry 1949)
  - 古典的VPA: 統計的な解析ではないが、ADAPTの基礎となる
  - exploratory data analysisのツールとして非常に重要
  - Mに比べてFが高いような種では、かなり精度よく加入量を推定することができる

# 資源とコホート

## 「資源 (unit)」

- 一つの再生産単位を形成する同種からなる魚の集団
- 同じ生活史、成長パターンを持つと仮定
- 移入・移出はない

## 「コホート(cohort)」

- 資源は「コホート」に分解される
  - 同じ年齢の魚のグループ
  - 成長・成熟・生態などは同じと仮定される
- 
- たいていは、単一資源を扱うが、multispecies VPAでは、複数種を扱うこともできる

## VPAの分類

- **ADAPT**: 最終年のFを推定パラメータとする
- **XSA**: 個々の年齢グループの生き残り数を推定する。  
資源量の指標をチューニングに含まない
- **ICA, GAGEAN method**: Fは年齢と年の効果に分割
- **VPA**: Baranovの漁獲方程式を数値的に解くもの
- **Cohort analysis**: Popeの近似式を用いるもの
- 結果はあまり変わらないものの、利用できるデータによって、どの手法が使われるか変わってくる



## VPAはどこで使われているか？

- 北大西洋
- 北太平洋
- オーストラリア・ニュージーランド
- 南アフリカ
- アルゼンチン・チリ、ペルー
- CCAMLR, CECAF

## 参考文献

- 古典的文献; Beverton and Holt (1957), Ricker (1975), Jones (1984)
- 近年のもの; Gallucci et al 1996, Hilborn and Walters 1992, King 1995, Sparre and Venemima 1998
- 多種モデル; Magnusson 1995, Sparre 1991
- 1980's, 1990's 年の発展のレビュー; Conser 1993
- さらなる近年の動向
  - catch and effort データを導入した統合的なもの
  - ベイズ手法の導入 (→ 複雑なので、この本では扱わない)

## VPA以外のアプローチ

- 動的なバイオマスモデル (Punt and Hilborn 1996)
- 体長ベースモデル (Sparre and Venema 1998, King 1995)
- 漁獲量とCPUEの発見的(？、heuristic)モデル
- Ecopath model (Christensen and Pauly 1992)

## **2. OBJECTIVES**

### **(目的)**

# 資源評価の目的

- 資源の状態を推定すること
- 「資源の状態」=死亡や成長を考慮した場合の、とある時点における個体数
- 生態系の理解、資源管理などのため
- 特に後者の場合
  - 資源評価結果が管理を通して対象資源に影響を与えることについて、特に注意する必要がある
  - 総死亡率は、「漁獲」と「それ以外(捕食・病気)」に分けて推定される

# 資源評価の流れ

1. 現状の資源状態を推定
  - 特定の時点における年齢ごとの魚の数
  - 加入・総死亡率等の推定
2. Fに関するシナリオのもとで、将来の漁獲量・総資源量・産卵親魚量の予測をする
  - 短期、～2年；中期5～10年；長期（平衡状態）の将来予測
3. 管理基準値

資源が安全な状態（＝漁獲によって再生産または成長・加入が妨げられない状態）にあるか？

→ 科学的勧告 → 管理

## 3 WHEN TO USE VPA (VPAを使うとき)

# どんなときにVPAを使うか？

- 年齢別漁獲尾数データが利用できるとき
  - 体長組成データの広範囲にわたるサンプリング
  - 体長と年齢の関係
    - 年齢組成データを用いたage-length key
    - 成長式
    - ダイレク的な年齢査定データ
  - 漁獲尾数データ: 総漁獲量 ÷ 平均重量
- 1年で1コホートの加入(基本的には)
  - 1年に複数コホートの加入を仮定することもできるが、どの魚がどのコホートに属しているかを知ることは難しい
  - コホートなし(=1年中産卵)という例もあるが、ここでは扱わない



# 必要なデータ①

## 漁獲の情報

- 年齢別の漁獲尾数(必須)
  - 7.4: 年齢別漁獲尾数に欠損が合った場合
- 漁獲に対応する年別・年齢別の平均重量(資源評価で直接的には使わないが、将来予測で用いる)

## 相対的な資源量のトレンドを示すデータ

- 年齢別・または年齢込みの資源量推定値(abundance estimates)
- 年齢別または年齢込みの資源量指数 (abundance index)
- 総資源量や親魚資源量を示すための指数
- 努力量指数

## 必要なデータ②

### 親魚資源量の推定

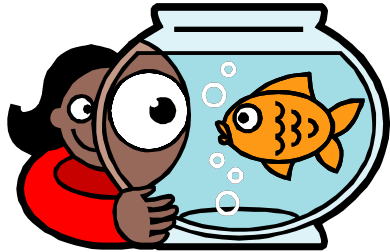
- 親魚資源量に対応する年齢別・年別の平均重量
- 年齢別・年別の成熟率
- 産卵の前に死亡する割合

### その他の生物学的パラメータ

- 自然死亡係数
  - VPAの中で推定できないこともないが、一般には、その推定値の信頼区間は非常に広く、使えない
  - 捕食による死亡の推定を行える多種モデルの結果から、自然死亡に関数情報を得ることもできる

## 5. LINK MODELS (リンクモデル)

# リンクモデルとは？



資源量を直接観察できる場合、  
資源量 = 観察値



資源量を直接観察できない場合  
資源量 = **リンクモデル**(観察値)  
(例えば、 $CPUE = q \times \text{abundance}$ )

- 資源評価モデルとリンクを分ける利点
  - 複数の指標(年齢別・年齢込み)を入れることができる
  - 個々の指標は、それぞれ適切なやりかたで標準化できる
  - 非線形な個体群動態とは切り離して、それぞれの指標を単純な線形モデルで推定できる → フィットの時間を短縮
- (分けない例) Multifan-CL

# リンクモデルにおけるパラメータ

- リンクモデルにおけるパラメータの数は少なければ少ないほど、有用な情報を提供できる
  - ex. 総資源量に対する直接観測(=求めるパラメータは少なくとも1)
- リンクモデル内にあんまりたくさんのパラメータがある場合、データの価値を損ねてしまうので注意が必要

## 5.1 ABUNDANCE INDICES

(資源量指数)

## 5.1.1 資源量指数の標準化

- CPUEは相対的な資源のトレンドを表すが、同時に、漁期・漁場・漁具・船の大きさ・乗組員の数等の影響も受けてしまう → 標準化によってこれらの影響を取り除きたい
- 標準化CPUEの良し悪しの判断
  - 説明変数によって全体の分散がどのくらい説明できるか？がひとつの指標
  - だいたい50-60%くらいが適当？
- 本テキストでは、CPUEと資源量は線形関係にあるものと仮定
  - 非線形の場合、資源量を過大推定してしまう恐れがあるので注意

# GLMを用いた標準化

- 漁具(船)、海域、季節間のCPUEの変動をGLMによって説明する

$$\ln(\text{CPUE}) = \text{Constant} + \text{Vessel} + \text{Area} + \text{Year} + \text{Season} + \text{Area}.\text{Season}$$

- Year = 相対的な資源量
- Vessel = 相対的な漁獲圧
- Area.Season = 海域と季節の相互作用。
  - availabilityや季節回遊の考慮
  - 季節回遊の場合は、seasonとareaの相互作用が有意となる



## 5.1.2 年齢別資源量指数

- CPUE～年齢別漁獲尾数/単位努力量
- 単位努力量＝操業日数・掃海時間・探索時間等
- 調査データの特徴
  - － デザインされた調査プログラム
  - － 装備や漁具はコントロールされている
  - － 短期間でカバー率は低い
- 商業データの特徴
  - － 努力量の分布も知ることができる
  - － 長期間にわたるデータが得られることが多い
  - － 異なる装備の船が混在

## 5.1.2.1 漁業によるCPUEデータ

漁業データが、1年のうちの特定の時期のCPUEの反映だとする場合、

- $CPUE = q_a * P_{ay}$

→  $\ln CPUE_{ay} = \ln q_a + \ln \tilde{P}_{ay}$

$$\ln \tilde{P}_{ay} = \ln P_{ay} - \alpha Z_{ay} + \ln \frac{1 - \exp(-(\beta - \alpha) Z_{ay})}{(\beta - \alpha) Z_{ay}}$$

with

$$Z_{ay} = F_{ay} + M_a$$

## 5.1.2.1 漁業によるCPUEデータ

- 誤差構造 = 普通は対数正規分布で与える
- しかし、年齢別CPUEの場合は、multinomialのほうが適切かもしれない(Methot 1990)
  - 全漁獲を年齢別に配分しているのでは
- 努力量の経年変化の問題
  - たいてい、漁法や漁具は年代を追って変化するため、漁業データからのCPUEは、短期間でしか使えないかもしれない

## 別のアプローチ

- 努力量  $\sim F$  というリンク構造

$$\ln C_{ay}^{\text{mod}} = \ln P_{ay} + \ln \left( \frac{1 - e^{-q_a E_y - M_a}}{q_a E_y + M_a} \right) + \ln(q_a E_y)$$

- 非線形
- 1年でFが1以上変動するような場合、CPUEを使うよりも良いパフォーマンスを示す
- または、VPAから計算されたFとeffortをフィットさせる方法も (section 5.2)

## 5.1.2.2 調査データ

- デザインされたデータなので、非常に有用である場合が多い
- 調査時期によって、漁業CPUEデータ (eq. 37) と同様の調整が必要
- たいてい、調査の時期は非常に短いので、 $\beta - \alpha = 0$  となって、式37の最後の項はゼロになる場合が多い

### 5.1.3. 資源量の指標

– 年齢分解できない漁業データ

$$\ln I_y^{\text{mod}} = \ln \left( q \sum_a W_a \tilde{P}_{a,y} \right)$$

– 卵稚仔調査による親魚資源量

$$\ln I_y^{\text{mod}} = \ln \left( q \sum_a W_a \text{mat}_{ay} P_{ay} e^{-\alpha F_{ay} - \beta M_a} \right)$$

- 対数正規分布か正規分布の誤差が仮定される

## 5.2 漁獲死亡の指数

- 努力量を直接フィットさせる
- たいていは、努力量とFの線形関係を仮定
- $\bar{F}_y$ はFの平均

$$\bar{F}_y = q E_y^{obs}$$

or in logarithmic form :

$$\ln \bar{F}_y = \ln q + \ln E_y^{obs}$$

- 年齢別Fを考える場合

$$F_{ay} = q_a E_y^{obs}$$

# 注意点

- 単純な努力量は、 $F$ と単純な線形関係にないかもしれない
  - 常に漁業者は漁獲効率が高い場所を選んで漁獲しているので
- 漁獲効率の年による上昇も問題
  - $q$ が年に依存するようなリンクモデルも考えられる
- (式38)とどちらを使うか？
  - 漁獲量よりも努力量に誤差が多い、と考える場合は、 $F$ に関するリンクモデルを使うほうが良い
  - 線形モデルなので、より扱いやすい利点もある
- データの二重使い(CPUEと努力量)は避けるように



## 5.3 体長組成データの利用

- 体長組成から年齢組成へ → 非常に複雑
  - VPAからは切り離して行われるプロセス
- 甲殻類や熱帯の種など、年齢査定ができない場合 → 体長組成のみを使ってコホートを計算する方法がある
  - 産卵時期にピークがある場合、体長組成にもピークが現れることによって、コホート分解が可能

# 体長ベースの資源評価

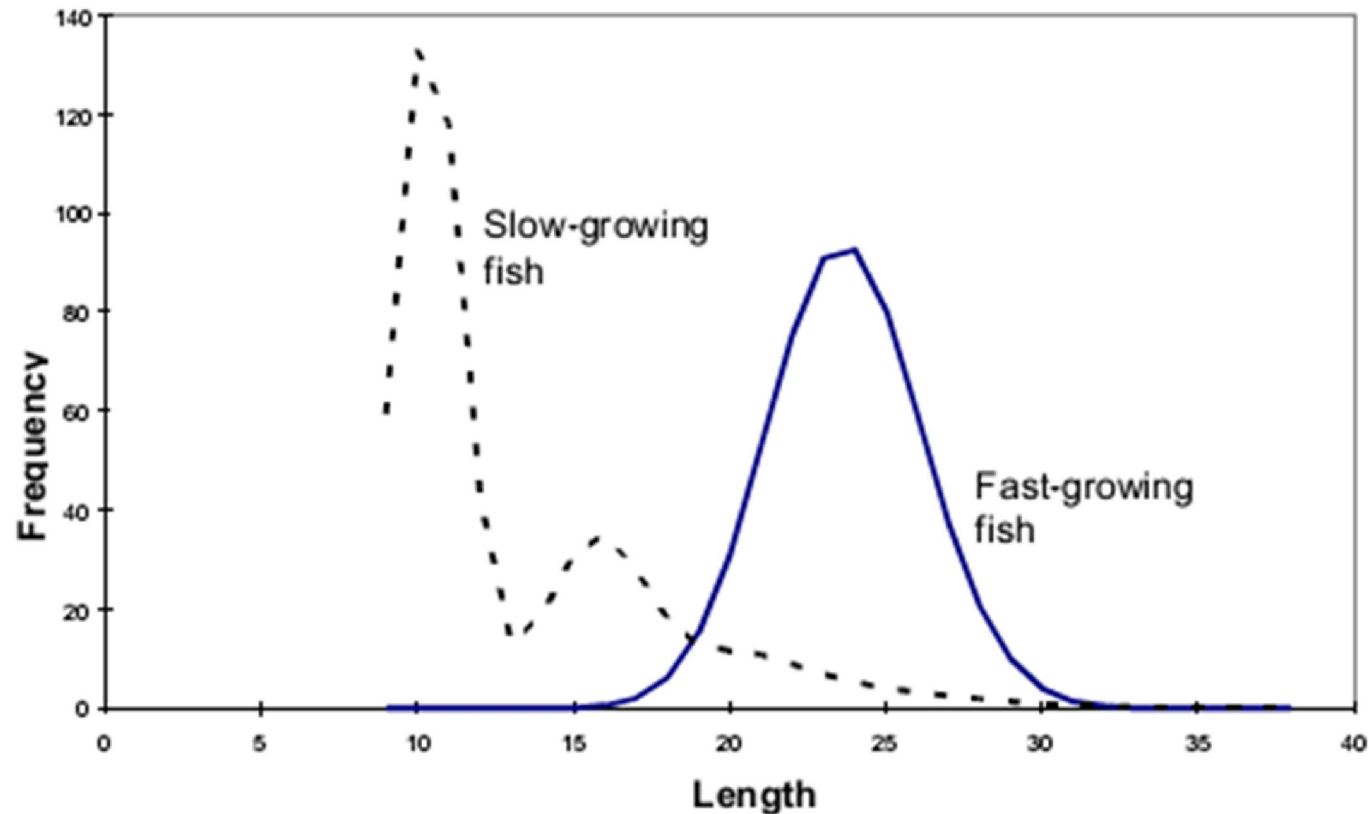
- 体長組成から年齢組成を推定 → コホートスライシング
  - ある体長範囲を特定の年齢に振り分ける方法
  - ALKのやり方に似ているが、ALKは同じ体長の魚を別の年齢に振り分けられるのに対し、コホートスライシングではそれができない
  - 追加的な生物情報も利用できる； 性別や漁獲場所など
  - ここでは、Lassen (1988)による方法の拡張を紹介する

## 5.3.1 体長組成に影響する要因

- 相対的な年級群の大きさ
- トータルの死亡率
- 平均的な成長
- 成長の分散

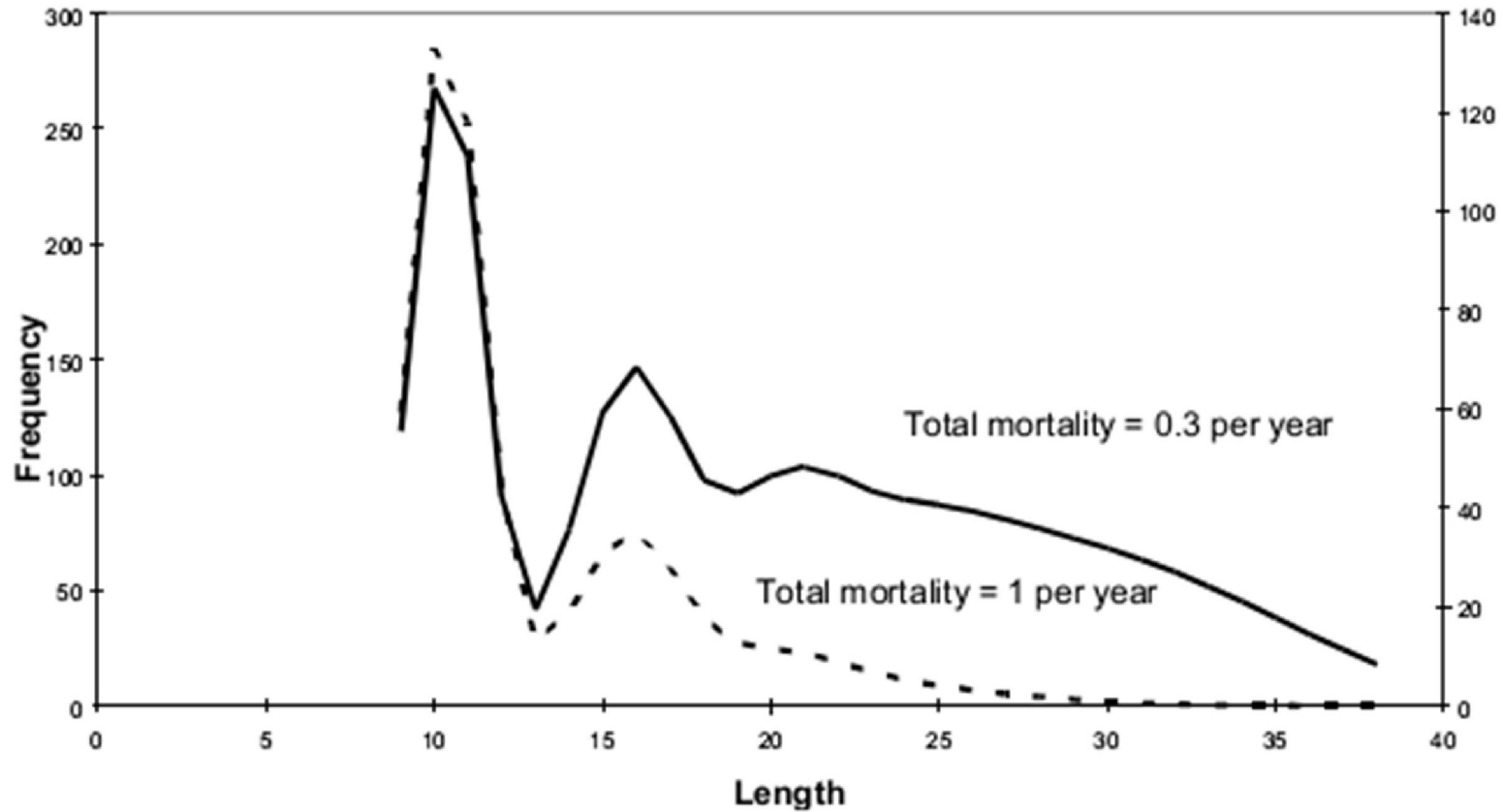
→ 要因の違いが、体長組成の形の違いとなる

# 東バルト海のタラの例



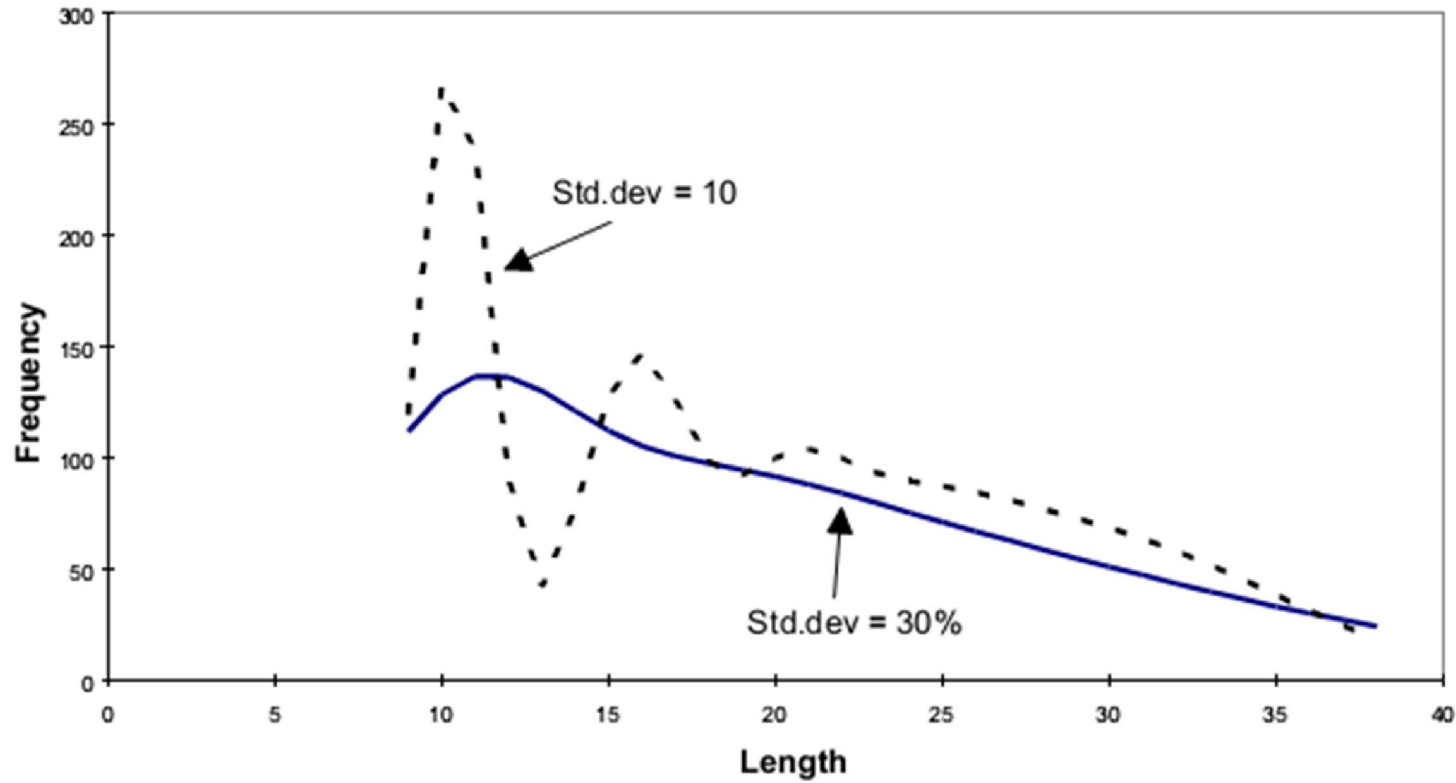
- 成長が早い・遅い集団のうち、成長が遅い集団でのみコホートの違いが確認できる

# Fの体長組成への影響



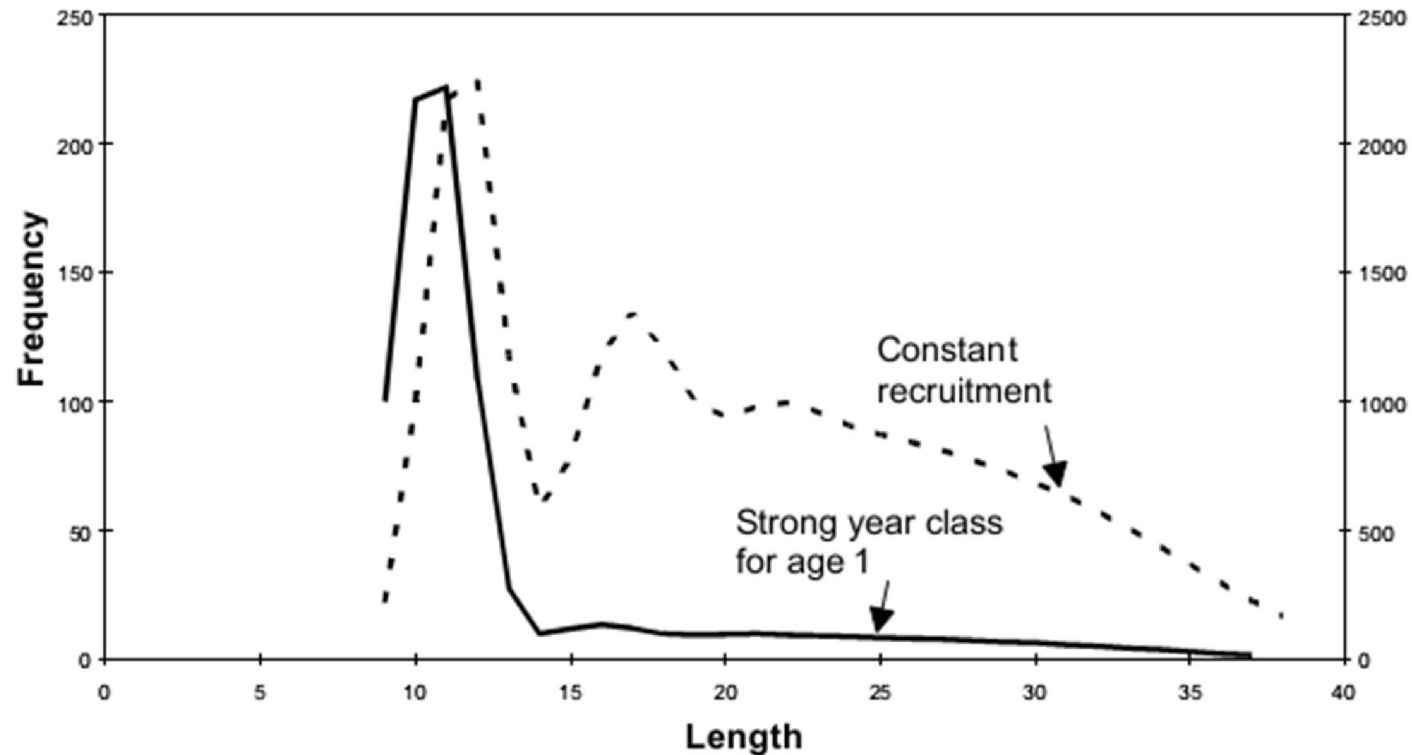
- 総死亡率が高いほど、高齢魚のコホートは見えにくくなる

# 成長の分散の違い



- growth variationが大きいほど、モードは見えづらくなる

# 加入パターンの違い



- 加入変動は、コホートのモードを隠す傾向があるが、卓越年級群を追うことで成長率を知ることができる

## 上記の例からの結論

- 体長組成におけるモードの抽出はかなり難しい
  - 成長が低く(?)、加入変動が高い場合にのみ可能である
  - 成長式がわかっているような場合は、非常に助けになる (成長式の仮定が非常に大切)



## 5.3.2 体長から年齢への変換

- (体長・年齢組成) → (年齢別漁獲尾数)
  1. Age length key (おすすめ)
  2. 成長式を使う方法
  3. 成長式を使わない方法
- 体長組成のみを用いて、体長を年齢に変換する場合、年齢査定データを使うよりも誤差が大きくなる
- しかし、その誤差の定量化は難しく、結果として、資源評価の不確実性を過小評価することとなる
- → 年齢査定データが使える場合は、あまりやるべきではない

## 5.3.2.1 ALKを使う方法

- 年齢査定 + 体長組成 の組み合わせは非常に望ましい
  - 年齢査定 = 精度が高い
  - 体長測定 = 数が稼げる
- 特に、高齢魚については、コホート分解で年齢がわからないので、年齢査定が非常に重要となる
  - サンプルングは、サイズで層化して行うべき
  - 層内のサンプルングはランダムで

# リンクモデル

$$C_{ay} = \sum_l p_{la} C_{ly} .$$

- $p_{la}$  = 体長幅  $l$  が  $a$  歳である割合
- $p_{la}$  は、多項分布モデルにより、体調別年齢データから推定できる

## 5.3.2.2 成長式を必要としない方法

- 体長組成のモードのみから年齢分解する場合
- 例えば、Bhattacharya (1967)
  - 最初のモードに正規分布をあてはめる → そのモードを消す → 次のモードを見つける → 正規分布をあてはめる → 繰り返し。。
- 他にも
  - Tanaka (1956), MacDonald and Pitcher (1979), Hasselblad and Tomlinson (1971)

### 5.3.2.3 成長式を使う方法

- 単純な手法の紹介 ( Jones and Van Zalinge (1981)
  - 成長は決定論的に決まっています、von Bertalanffy の成長式から、コホートをスライスする
  - $l_1$  &  $l_2$  はサイズクラスの下限と上限

$$\Delta t = \frac{-\ln\left(\frac{L_\infty - l_1}{L_\infty - l_2}\right)}{k} \text{ for each size class} \quad N_{l+\Delta t} = N_l e^{-Z \Delta t}$$

- $\Delta t$  が与えられれば、個々のサイズクラスの個体数が、VPAと同じように推定できる
- 成長のパラメータが必要
- 平衡状態でのサイズ組成と言える平均的な体長組成を与えれば、体長グループに関するVPAもback calculationできる

## この方法についての議論

- 平衡状態にある個体群における1つの体長組成には適用可能
- 異なるタイミングでの複数の体長組成データへの応用には、verifyが必要
- $F \gg M$ の場合、直近年のFの誤差には影響されない
- Mに対する感度が非常に高い
- データが適切にスムーズになる体長幅を使うべきである
- 成長データが貧弱、または個体による成長の差が大きい場合、使用に注意を要する
- plus groupの体長は、Linfの70%にすべき(それにより、LinfとKの誤差の影響を小さくできる) → Fはそれより小さいサイズのものしか推定できない
- 推定される個体数は、絶対数でなく、相対的なもの

# 別の方法

- 平均体長 = 成長式による予測
- 分散 = 正規分布 (または対数正規分布)

$$l_{age} = L_{\infty} \left( 1 - e^{-k(a-a_0)} \right)$$

and

$$\varphi(l; age) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-l_{age})^2}{2\sigma^2}}$$

- 方法は複雑だが、いくつかの汎用ソフトがある
  - ELEFAN (Pauly 1987) SCLR (Sheperd 1987), MULTIFAN (Fournier et al. 1990)