

2022年資源管理研修会

1. プロダクションモデルによる資源量推定ならびに管理について

(30分程度 市野川)

2. Rを用いたプロダクションモデルの資源量推定の実践

(1日目午後～2日目午前 濱邊・平尾)

3. 2系資源管理について

(2日目最後 福井)

1. プロダクションモデルによる資源量推定 ならびに管理について

- プロダクションモデルとは？
- 我が国資源評価での利用

資源評価高度化作業部会 市野川

プロダクションモデルとは？

- Biomass-dynamics model
- 個体群動態において、「年齢構造」を考えず、「資源量全体の」増減の動態を記述したモデル
- 理論的には、「漁獲量」と「資源量指数」のデータさえあれば、資源量の推定が可能
 - ただし、推定の不確実性は非常に高いため、推定結果の慎重な診断と、取り扱いが必要
- 我が国資源では、令和4年度資源評価より、一部魚種(年齢別漁獲尾数が利用できない)で試算&適用開始

今回の研修では、Rを使って、実際にプロダクションモデルの推定がどのようにおこなわれているのか、実習します

※2022年5月11日

プロダクションモデル説明会資料から抜粋

プロダクションモデルの概要

① プロダクションモデルの式とパラメータのおさらい

$$B_{t+1} = \left[B_t + \frac{r}{n-1} B_t \left(1 - \left[\frac{B_t}{K} \right]^{n-1} \right) - F_t B_t \right] \exp(\varepsilon_t), \quad \varepsilon_t \sim N(-0.5\sigma_B, \sigma_B^2)$$
$$I_{t,i} = q_i B_t \exp(e_{t,i}), \quad e_{t,i} \sim N(0, \sigma_{I,i}^2)$$

余剰生産量とは？

内的自然増加率/環境収容力とは？

資源量指数とは？

形状パラメータとは？

プロセス誤差・観測誤差とは？

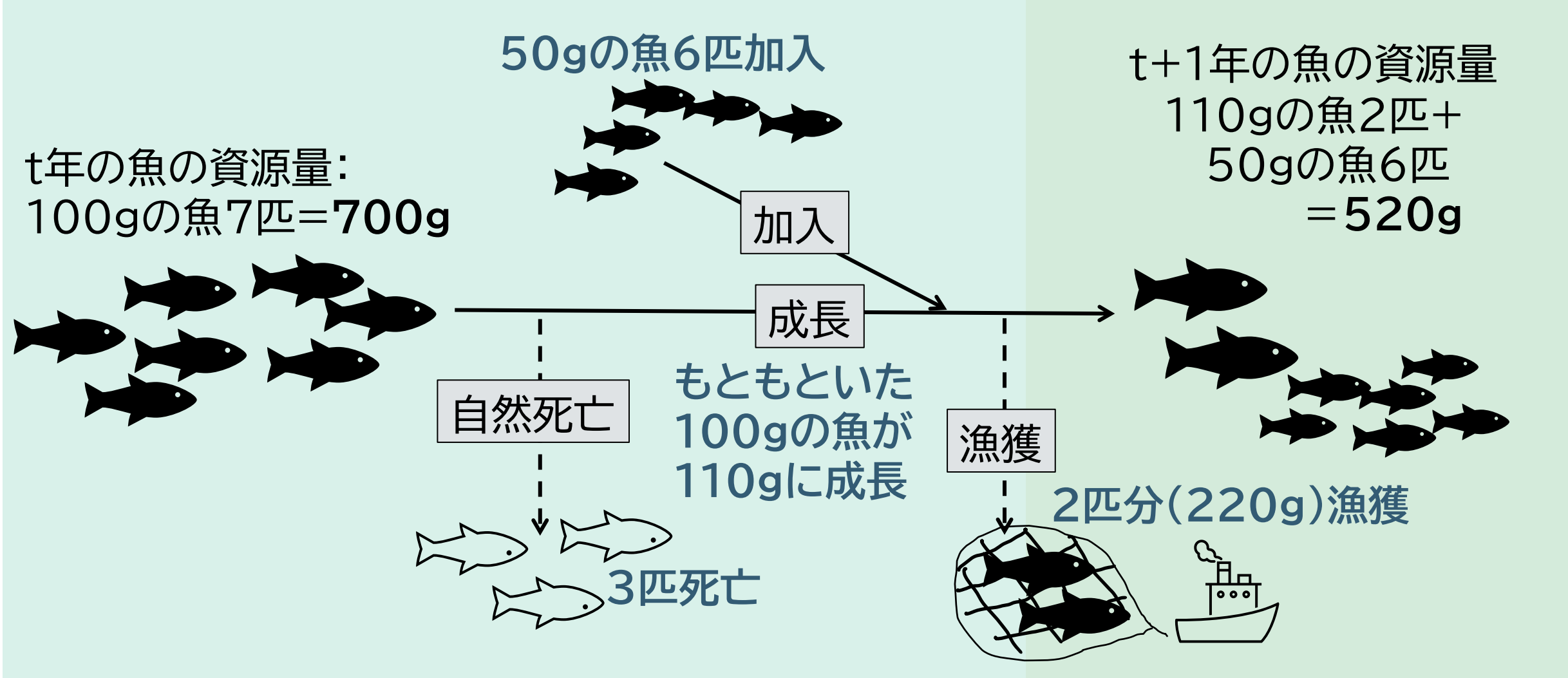
② パラメータの推定方法

最尤推定法と ~~ベイズ推定~~ 罰則付き最尤推定

プロダクションモデル説明会
のときからちょっと変更

① プロダクションモデルの式とパラメータのおさらい

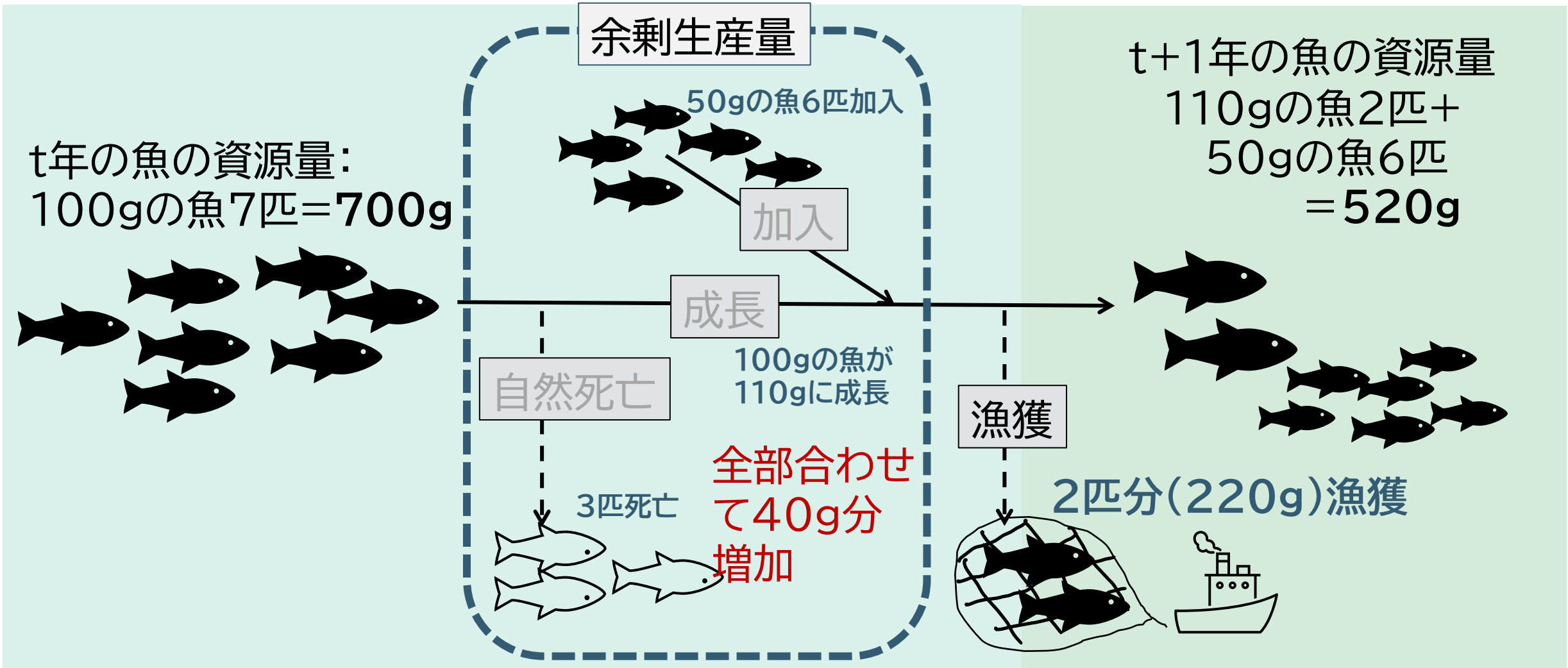
魚の一般的な個体群動態



※年齢別の資源評価モデル(例:VPA)ではこれらのプロセスをすべてモデル内で記述

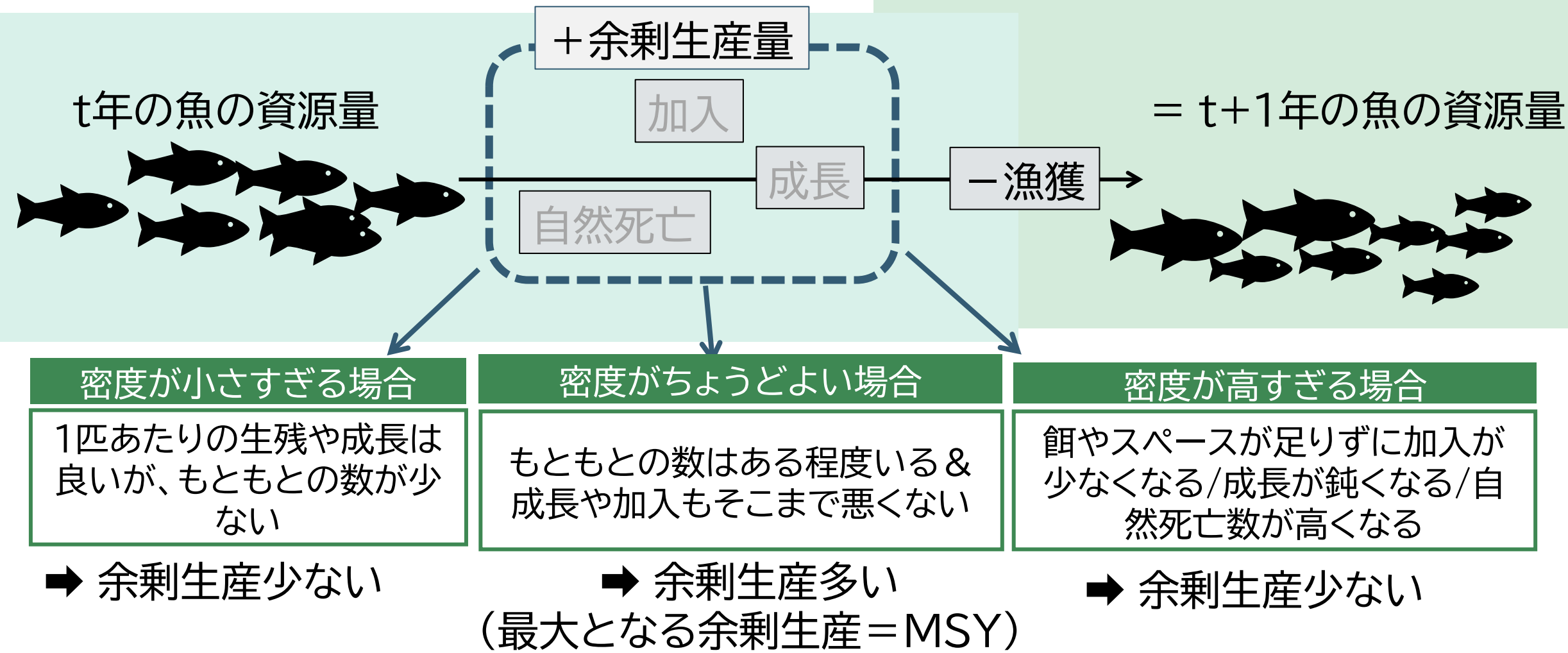
① プロダクションモデルの式とパラメータのおさらい

PMは自然死亡・加入・成長をあわせて「**余剰生産量**」とする



① プロダクションモデルの式とパラメータのおさらい

余剰生産量は密度に応じて変化し、
中間的な密度で最大になると考える

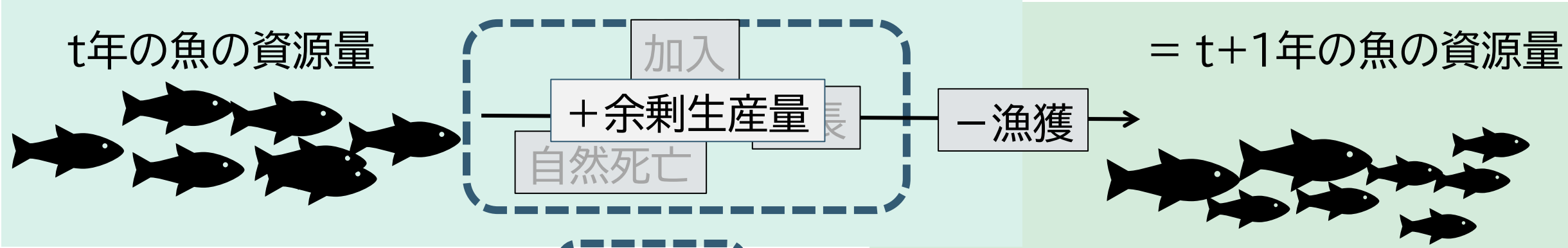


※VPAをもとにした1系では(基本的には)加入プロセスのみが密度依存と考えている

最も単純な形のプロダクションモデル

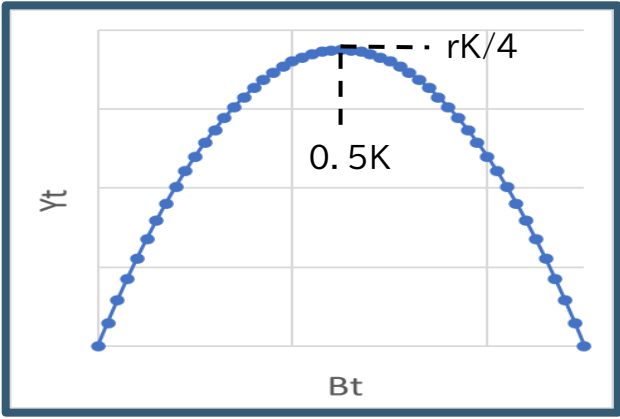
シェーファー（Shaefer）型PM

※自動的にBmsy, Fmsyなど、MSYに関する管理基準値も計算される



$$B_t \quad \boxed{+ Y_t} \quad - F_t B_t = B_{t+1}$$

$$Y_t = r B_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right)$$



密度が増えると大きくなる

密度が増えると小さくなる

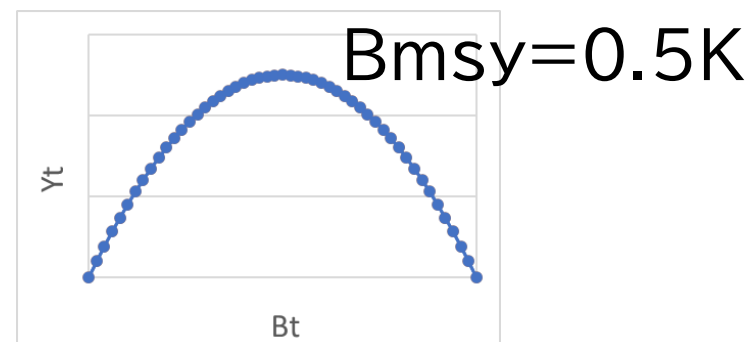
→ 掛け算すると中間地点で余剰生産が最大になる関数になる

シエーファー型とフォックス型の比較

$$B_{t+1} = B_t \boxed{+Y_t} - F_t B_t$$

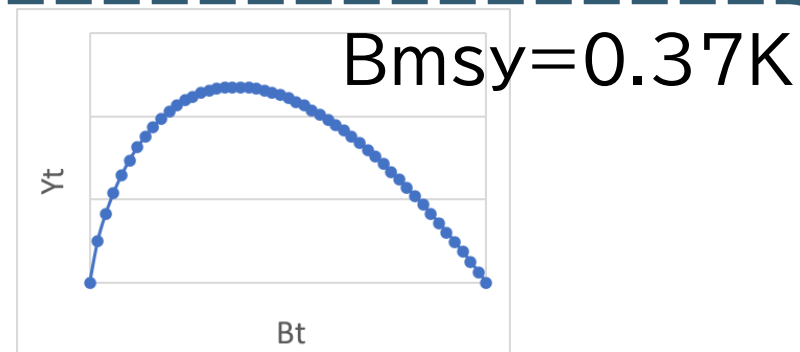
(シエーファー型)

$$Y_t = rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right)$$



(フォックス型)

$$Y_t = rB_t \left(1 - \frac{\log(B_t)}{\log(K)} \right)$$



密度が増えると大きくなる

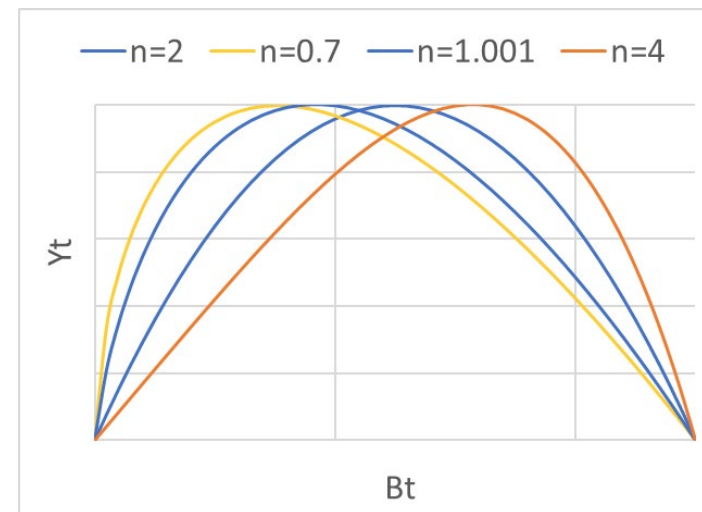
密度が増えると小さくなる

一般系としてのペラ・トムリンソン型

$$B_{t+1} = B_t \boxed{+Y_t} - F_t B_t \quad B_{msy} = \text{係数} \times K$$

(ペラ・トムリンソン型)

$$Y_t = \frac{r}{n-1} B_t \left(1 - \left[\frac{B_t}{K} \right]^{n-1} \right)$$



※パラメータを一つ増やす(n , 形状パラメータ)ことによって B_{MSY}/K の位置を調整できるようになる → 基本的に、この形を使っていく

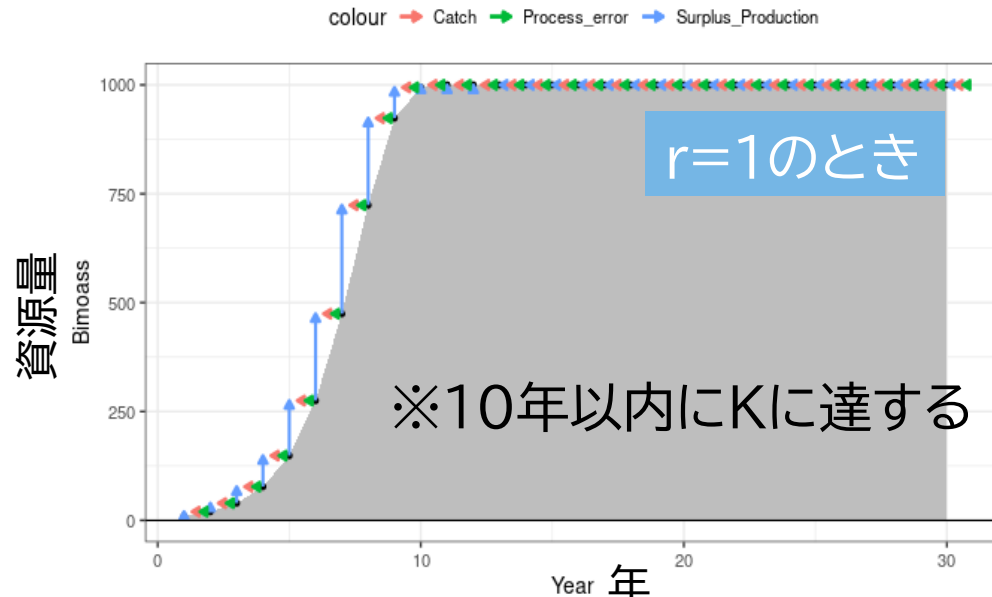
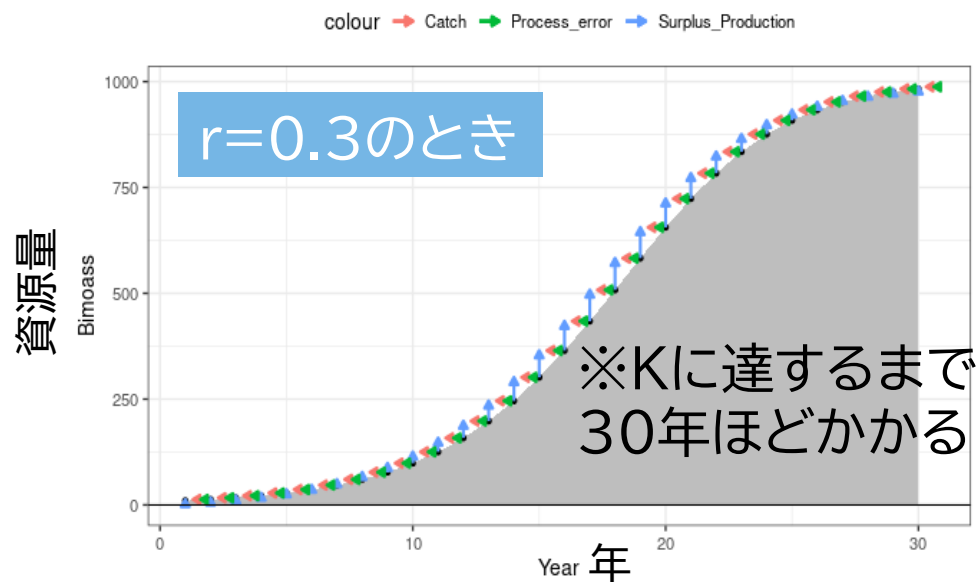
パラメータ説明

r (内的自然増加率)とは？

- 個体群全体が増加するスピード
- B_t がほぼ0のとき、1年で個体群が $1 + r$ 倍になる。シエーファ型の場合には、 B_{msy} のとき $1 + 2/r$ 倍
- 成熟が早い・成長が速い魚種ほど高い値になる

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right) - F_t B_t$$

※初期資源量がすごく小さい($0.01K$)ところから、漁獲なし・自然変動なし・ $K=1000$ でシミュレーションしてみる → r の違いによって、資源の回復のスピードが異なる



パラメータ説明

K (環境収容力)とは？

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right) - F_t B_t$$

- 個体群全体が増えられる上限
→ Kが大きいほど、資源量の絶対値そのものが大きくなる
- 生息域や餌の量など、利用できる資源が多いような魚種ほど大きい
- $MSY = \text{比例定数} \times r \times K$ となる(シエーファ型の場合には $rK/4$)ため、
rが大きくてKが小さい資源(=r戦略)も、rが小さくてKが大きい資源(=K戦略)でも、同じMSYが得られる → パラメータ推定の際に、rとKが相関してしまう問題

パラメータ説明

n (形状パラメータ) ~ Bmsy/K

- n をモデル内で信頼できる推定値を得ることはほぼ不可能。
ただし、データに合うような値で調整したほうが良い
(Maunder 2003)
- 多くの水産資源においてBmsy/Kの位置がどの程度になるかの知見は蓄積→ 0.5よりは小さめ

世界の資源におけるBmsy/K(Thorson et al, 2012)
(プロダクションモデルからの推定)

Table 2. Proposed priors for SB_{MSY}/SB₀.

	SB _{MSY} /SB ₀ (estimated average value)
Pooled	
All	0.404
Taxonomic groupings	
Pleuronectiformes	0.395
Gadiformes	0.439
Perciformes	0.353
Clupeiformes	0.261
Scorpaeniformes	0.463
Other	0.405

Note: “Pooled” results are from process-error model configuration
SD, standard deviation; SE, standard error.

現実的な値になるように調整し、感度分析などを実施していく(4. ガイドラインで詳しく)

我が国資源におけるBmsy/K
(年齢構造モデルからの推定)

系群	SBmsy/ SB0(%)
スケトウダラ太平洋系群	19
マアジ対馬暖流系群	20
マサバ対馬暖流系群	20
ゴマサバ東シナ海系群	26
マアジ太平洋系群	29
マイワシ太平洋系群(通常)	39
マイワシ対馬暖流系群(通常)	39
ゴマサバ太平洋系群	39
スルメイカ冬季発生系群	40
マサバ太平洋系群	46
ズワイガニ日本海A海域	50
スルメイカ秋季発生系群	52
スケトウダラ日本海系群	53

観測データとは？

CPUE(I_t)と漁獲量(C_t)

$$B_t + Y_t - F_t B_t = B_{t+1}$$

直接観測できない

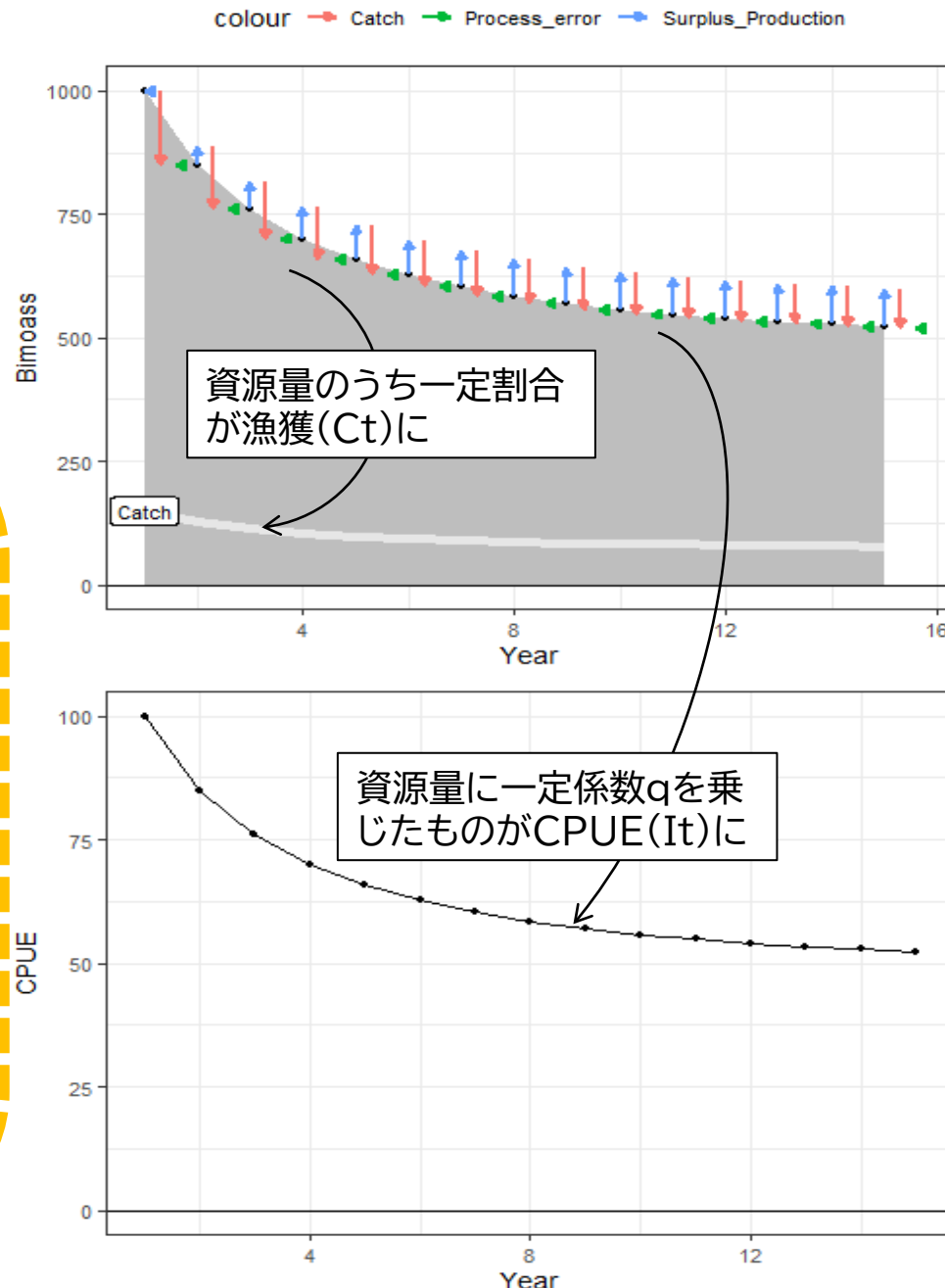
$$\text{漁獲量: } C_t = F_t B_t$$

漁獲量は資源量 B_t に漁獲割合(F_t)を乗じたものとして表現

$$\text{資源量指数: } I_t = q B_t$$

資源量指数 I_t が B_t に比例する
(比例定数 q =漁獲効率)

我々が直接観測できる範囲



2つの誤差の導入

プロセス誤差・過程誤差・process error

(個体群動態そのものが何らかの要因によってランダムに変動する)

- 卓越年級群の発生、自然死亡のゆらぎ、成長の変化、etc...

観察誤差 (資源量指数を観察する際の誤差)

- サンプルング誤差(※)だけでなく、年によって q (漁獲効率)がランダムに変化するような効果も包含する(今年はたまたま調査海域に魚が寄らなかったので資源量指数が小さくなった etc.)
- 標準化CPUEで計算される標準誤差は、サンプルング誤差のみ考慮されているため、必ず標準化CPUEの標準誤差 \ll 観察誤差

※標本誤差ともいう。母集団のすべてを調査しないで、一部の標本を無作為抽出して調査した結果にともなう**誤差**

過程誤差(プロセス誤差): 環境のランダム誤差

$$B_{t+1} = [B_t + Y_t - F_t B_t] \exp(\varepsilon_t)$$

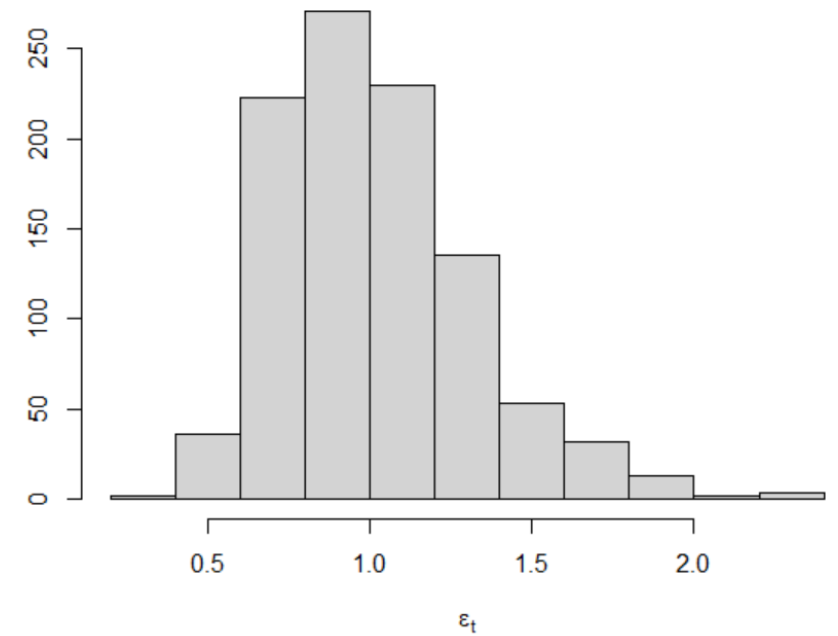
$$\varepsilon_t \sim N(-0.5\sigma_B^2, \sigma_B^2)$$

ε_t : 毎年の過程誤差

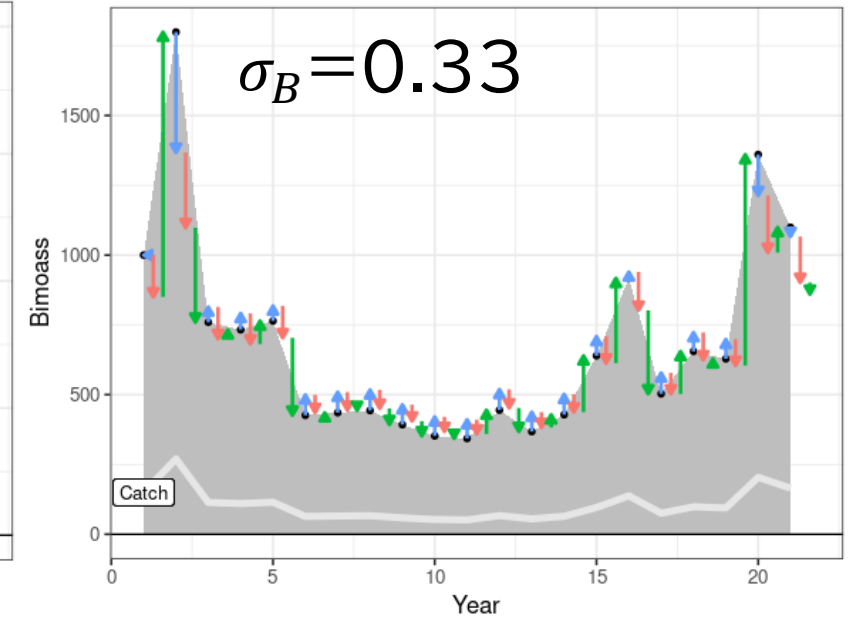
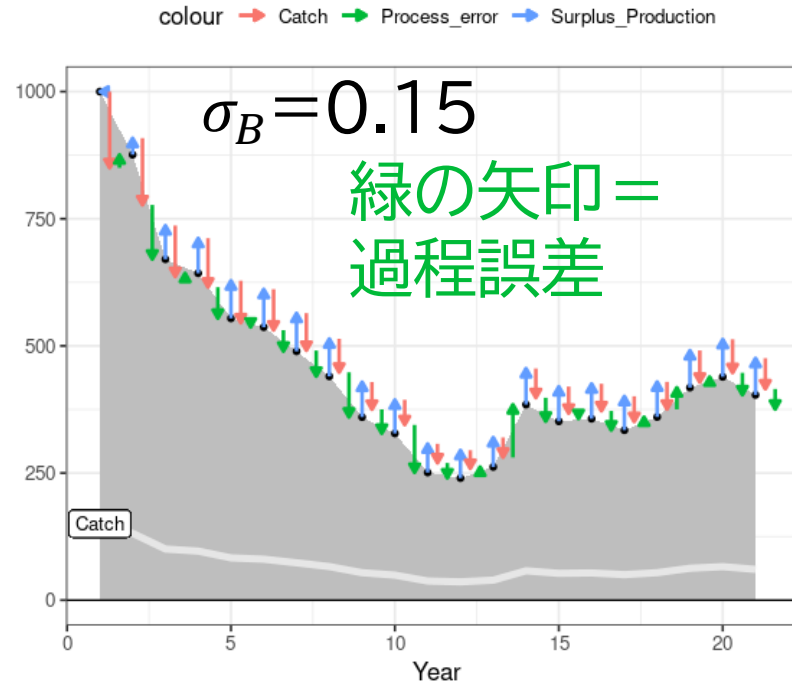
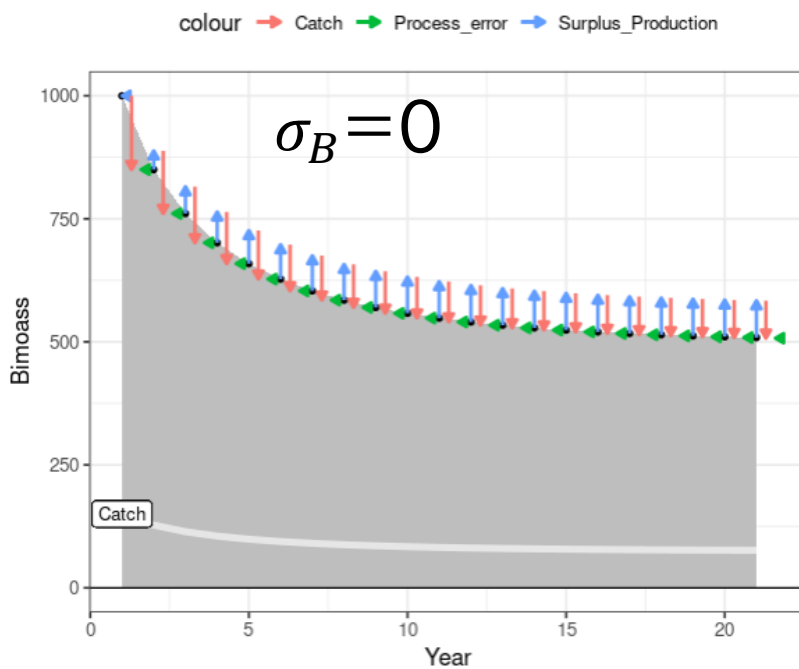
σ_B : 過程誤差の大きさ

- t年からt+1年にシフトする際、ランダムに資源が変動すると仮定

$\exp(\varepsilon_t)$ の分布($\sigma_B = 0.3$ のとき)



$r = 0.3, K = 1000, n = 2$ のとき



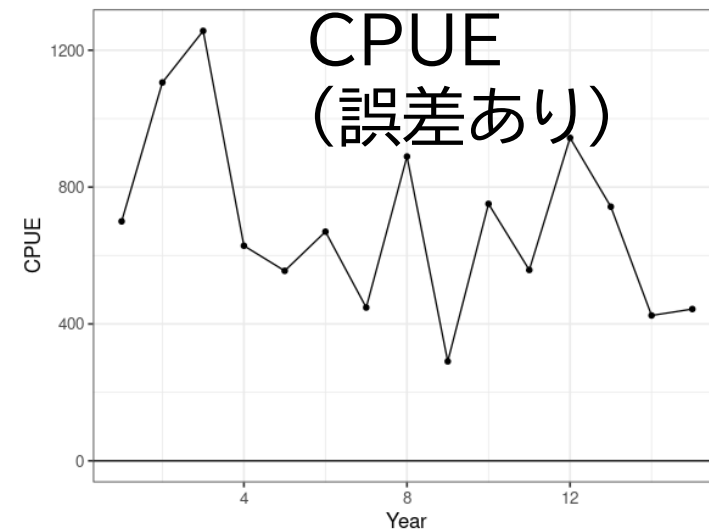
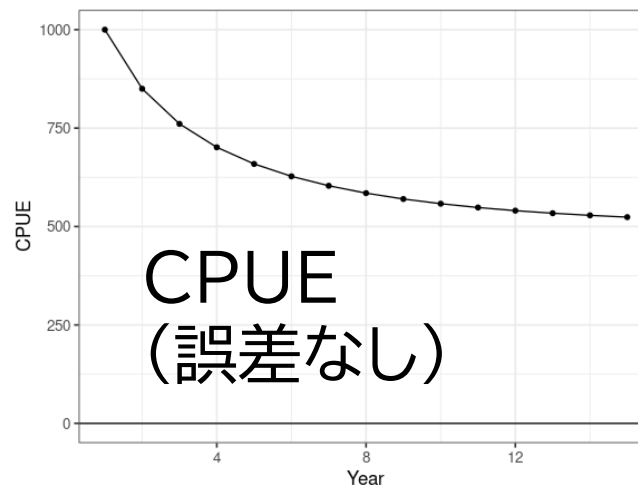
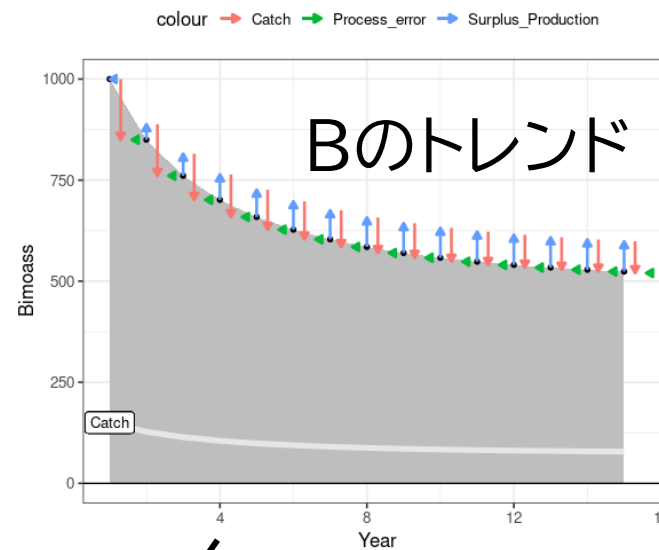
- 過程誤差を加えると、個体群動態がより「それらしく」見える
- 変動の要因を「余剰生産」「漁獲」「プロセス誤差」に分解することで、過去の個体群動態の変動が何に起因するものであるかを見ることができる

観測誤差の導入

$$I_{t,i} = q_i B_{t,i} \exp(e_{t,i})$$
$$e_{t,i} \sim N(0, \sigma_{I,i}^2)$$

※資源量指数は1つとは限らない

- 漁業&調査の2種類の指数
- 異なる漁業種(巻き網と延縄)のため、添え字*i*をつける



プロダクションモデル用語整理

余剰生産曲線の形の違い

- シェーファー(Shaefer)型 $n=2$ ($B_{msy}/K=0.5$)
- フォックス(Fox)型 $n \approx 1$ ($B_{msy}/K=0.37$)
- ペラ・トムリンソン型 $n=\text{自由}$ ($B_{msy}/K=0 \sim 1$)

誤差の仮定の違い

- 誤差なしモデル(非現実的) $\sigma_B = 0, \sigma_{I,i} = 0$
- 観測誤差モデル $\sigma_B = 0, \sigma_{I,i} > 0$
- 状態空間モデル $\sigma_B > 0, \sigma_{I,i} > 0$

観測誤差モデルと状態空間モデルでは、パラメータの推定方法が変わってきます(次のプレゼン)

時間の取り扱いの違い

- 差分型 $B_{t+1} = f(B_t)$
- 微分型 $dB = f(B_t)dt$

差分型が今まで説明してきた式、微分型は時間を連続的に捉えるときの式です(VPAと言うとPopeが差分型、Baranovが微分型というイメージ)

① プロダクションモデルの式とパラメータのおさらい: まとめ

$$B_{t+1} = \left[B_t + \frac{r}{n-1} B_t \left(1 - \left[\frac{B_t}{K} \right]^{n-1} \right) - F_t B_t \right] \exp(\varepsilon_t)$$
$$\varepsilon_t \sim N(-0.5\sigma_B^2, \sigma_B^2)$$

$$I_{t,i} = q_i B_t \exp(e_{t,i})$$
$$e_{t,i} \sim N(0, \sigma_{I,i}^2)$$

- 実習や我が国資源評価で用いるSPiCTは、上記のような「差分型」の式でなく「連続型」の式になっていますが、パラメータの定義と考え方は同じです
- SPiCTでは $\sigma_B = \text{sdb}$, $\sigma_I = \text{sdi}$ と表記
- SPiCTでは、 F_t についても $\log(F_t/F_{t-1}) \sim N(0, \sigma_F)$ となるような制約をおいており (Fはあんまり急激に変化しない)、 $\sigma_F = \text{sdf}$ と表記されます

※2022年5月11日

プロダクションモデル説明会資料から抜粋

プロダクションモデルの概要

① プロダクションモデルの式とパラメータのおさらい

② パラメータの推定方法

最尤推定法と ~~ベイズ推定~~ 罰則付き最尤推定

プロダクションモデル説明会
のときからちょっと変更

最尤推定/ベイズ推定/罰則付き最尤推定法のイメージ

- 得られたデータを一番うまく説明できるパラメータを探す
- 最も尤もらしくデータを説明するパラメータを得る

事前分布なし
& 最尤推定値

最尤推定法: (最尤推定値)を得る

- 事前分布を仮定した上で、データを与えて事後分布を得た
- 無情報事前分布のもとで事後分布を推定した

事前分布&
事後分布

ベイズ推定: 事前分布を与えて事後分布を得る

SPICTでやってること

- 事前分布を罰則とした、罰則付き尤度関数を最大にするような(罰則付き, *peneralized*)最尤推定値を得る

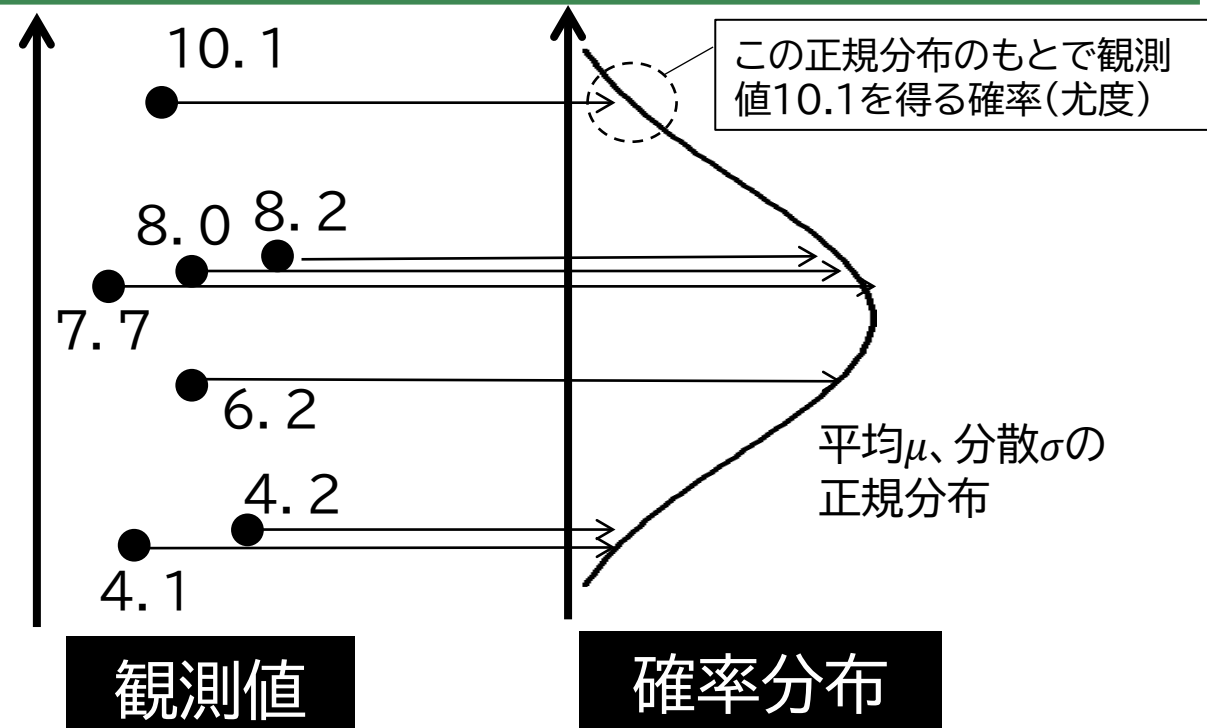
事前分布&
最尤推定値

罰則付き最尤推定法: 事前分布のもとで最尤推定値を得る

最尤推定法によるパラメータ推定とは？

最尤推定値: 仮定した確率分布のもとで、与えられた観測値を得るような確率(尤もらしさ)を最大にするようなパラメータ

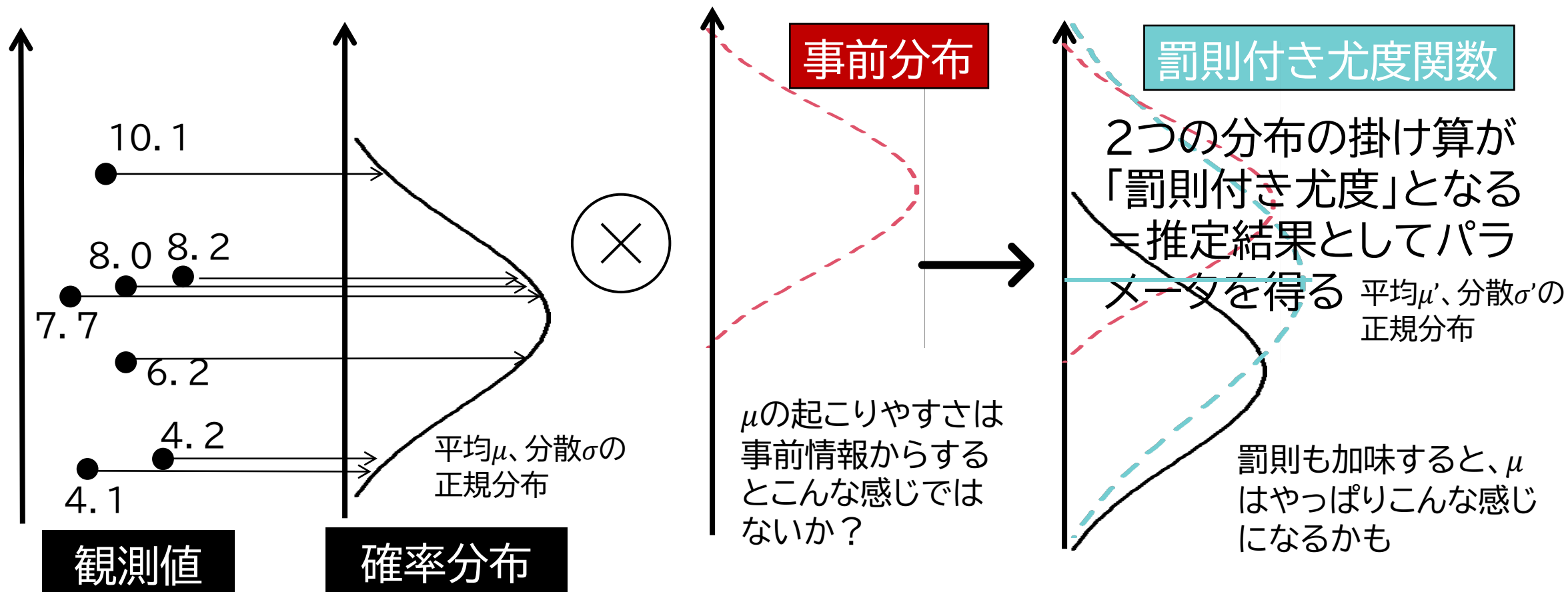
観測値はとある確率分布を持つ集団からランダムにサンプリングされたと考える



今得られている観測値を得る確率(尤度)が最大になるような確率分布のパラメータ($\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$)が最尤推定値(最も尤もらしい値)である

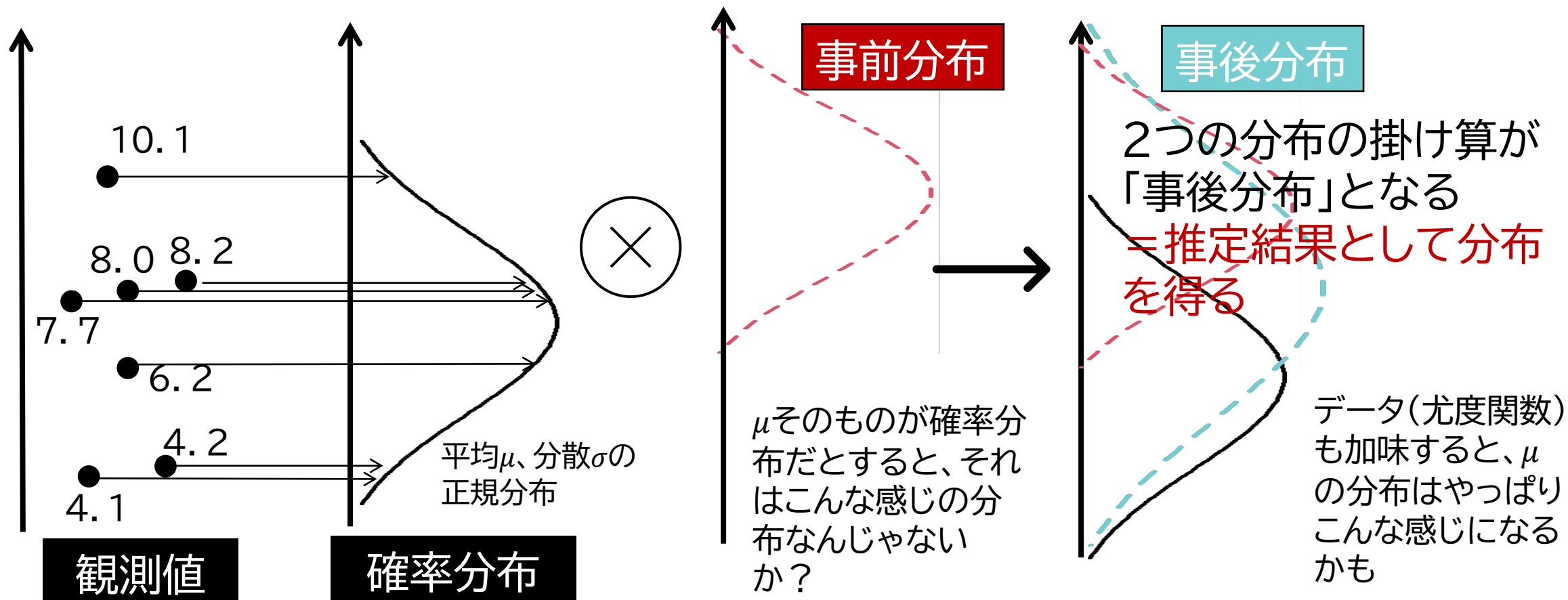
罰則付き最尤推定とは？

- 観測値から計算される尤度に、対象とするパラメータに関する事前情報をもとにした尤度関数を乗じたもの (penalized likelihood) を最大化して、(罰則付き) 最尤推定値を求める



(ベイズ推定とは？)

- 観測値に加えて、対象とするパラメータがどんな分布か？という**事前情報(事前分布)**を持っている → 尤度関数に乗じて事後分布を得る



事前分布の利用によって

利点

- データが少なく推定が困難な場合でも、事前分布を与えることでパラメータの推定が可能となる
 - データからの情報が多い場合にはデータからの情報のほうを利用できる
- 状況に応じた使い分けが自動的に可能

欠点

- 事前分布の選択の方法が難しい
- 事前分布の仮定がモデルの結果に大きく影響する場合

なぜPMで「事前分布」？

VPAとか1系ではそんな用語聞いたことなかったのに...

- PMでは、データが少ないのに対し、推定するパラメータは多い
→多くの場合、データのみから推定する(最尤推定値を得る)のは難しい
- そのため、パラメータに「事前分布」を仮定し、パラメータを緩く束縛する
- 「仮定値」として一つに固定しないことで、そのパラメータの不確実性が資源量推定値に与える不確実性も同時に考慮できる

※ 今後のプレゼン(あてはめガイドライン)では、モデルの推定において事前分布をどのように仮定するか、という話が多く出てきます！

まとめ

- プロダクションモデルにおけるパラメータ推定は、最尤推定をするには十分な情報が得られないことが多いため、事前分布を仮定して、罰則付き最尤推定法によりパラメータを求めていきます
- 「事前分布」(パラメータの仮定)が妥当なものであるか、そのうえで推定されたパラメータが妥当なものであるか、という視点で推定結果を見ていくことになります

休憩:プロダクションモデル用語整理

余剰生産曲線の形の違い

- シェーファー(Shaefer)型 $n=2$ ($B_{msy}/K=0.5$)
- フォックス(Fox)型 $n \approx 1$ ($B_{msy}/K=0.37$)
- ペラ・トムリンソン型 $n=\text{自由}$ ($B_{msy}/K=0 \sim 1$)

誤差の仮定の違い

- 誤差なしモデル(非現実的) $\sigma_B = 0, \sigma_{I,i} = 0$
- 観測誤差モデル $\sigma_B = 0, \sigma_{I,i} > 0$
- 状態空間モデル $\sigma_B > 0, \sigma_{I,i} > 0$

時間の取り扱いの違い

- 差分型 $B_{t+1} = f(B_t)$
- 微分型 $dB = f(B_t)dt$

推定方法の違い

- ベイズ推定(Bayesian surplus production model)
- 最尤推定
- 罰則付き最尤推定

いろいろな組み合わせが考えられますが、今後使っていくのは

・ペラ・トムリンソン型・状態空間・ベイズ推定モデルになります。

そもそものきっかけ: 2系資源でも資源評価したい！

- 2系資源は漁獲量と資源量指標値が得られている資源であるため、理論的には、プロダクションモデル(PM)によって資源量推定は可能
- ただし
 - 時系列が短かったり、データに十分なコントラストがない場合、プロダクションモデルの推定は非常に不安定になる
 - そういう場合でも事前分布をおいたり、不確実性の範囲を同時に示したりすることで、PMを運用している例がある
 - MSEの中で利用するという方法もある

令和4年度に新ルールに移行する2系資源について、



PMの適用可能性を検討



導入できそうであれば導入

令和4年度

令和4年度では、各資源の不確実性の特徴にあわせて、様々なオプションを選ぶように改善されました。

(*)複数オプションを追加(算定指針補遺,2022年8月24日)

2系資源

資源量指数

2系漁獲管理規則(*)
 $ABC = \alpha \times \text{過去漁獲量}$

1系資源

VPA

再生産関係

MSY管理基準値

1A

%SPR, YPRなどをもとにした管理基準値

1B

1系漁獲管理規則(*)
 $ABC = \beta \gamma F_{msy} \times \text{資源量}$

プロダクションモデル

1C

MSY管理基準値

神戸プロット

1C22

1C1

(*)漁獲量変動緩和オプションを追加

1C21

我が国資源(令和4年度)におけるPMの活用プロセス

資源評価

- PMガイドラインの整備(FRA-SA2022-ABCWG02-07)
- ガイドラインに沿った統一的なあてはめ

↓ 絶対資源量で特に広い信頼区間

絶対資源量についての
事前情報の重要性

評価から管理へ

PMを用いた1系風のHCRについてのMSE
(FRA-SA2022-ABCWG02-08)

絶対資源量について、ある程度正しい事前情報がない場合、PMベースのHCRは2系よりも劣る

絶対資源量に信頼できる事前情報がある場合には1系のHCR

1C1

そうでない場合は2系のHCRを適用

我が国資源(令和4年度)におけるPMの活用プロセス

資源評価

- PMガイドラインの整備(FRA-SA2022-ABCWG02-07)
- ガイドラインに沿った統一的なあてはめ

↓ 絶対資源量で特に広い信頼区間

絶対資源量についての
事前情報の重要性

相対資源量や B/B_{msy} , F/F_{msy}
では頑健な結果が得られることも

PMから得られる頑健な結果は、
積極的に活用していく

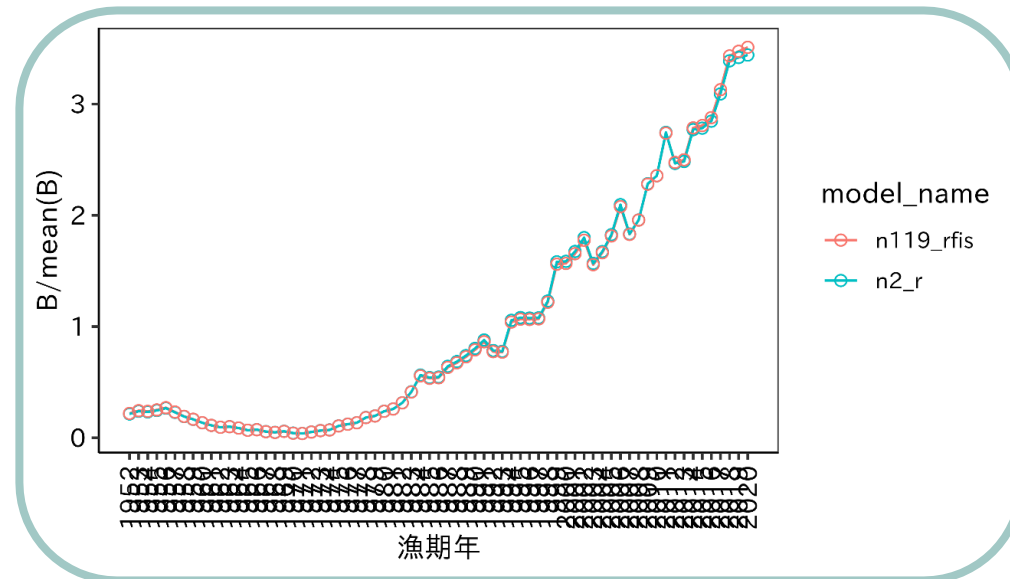
1C2

相対的な資源量の傾向
($B/\text{mean}(B)$)が頑健

1C21

2系のHCRを適用

※現実的に考えられる範囲でモデルの
仮定を変えてもトレンドは頑健である例



資源量指数として

詳細は算定指針(FRA2022-ABCWG02-01), プロダクションモデルガイドライン(FRA2022-ABCWG02-01)へ

我が国資源(令和4年度)におけるPMの活用プロセス

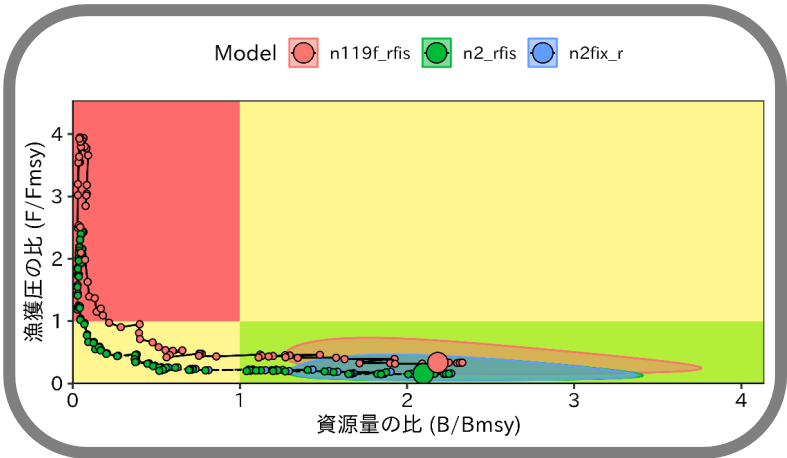
資源評価

- PMガイドラインの整備(FRA-SA2022-ABCWG02-07)
- ガイドラインに沿った統一的なあてはめ

絶対資源量で特に広い信頼区間

絶対資源量についての
事前情報の重要性

相対資源量や B/B_{msy} , F/F_{msy}
では頑健な結果が得られることも



※最新年の資源
状態は信頼区間
も含めて同じ象
限に入る例

資源状態についての補足情報として

最近年の資源状態・Fについての
判断(神戸プロット)が頑健

1C22

神戸プロットを
補足資料へ

資源量指数として

相対的な資源量の傾向
($B/\text{mean}(B)$)が頑健

1C21

2系のHCRを適用

PMから得られる頑健な結果は、
積極的に活用していく

1C2

詳細は算定指針(FRA2022-ABCWG02-01), プロダクションモデルガイドライン(FRA2022-ABCWG02-01)へ

C21, C22のその他の適用条件・注意点

- モデルで仮定される事前分布やパラメータの現実性の十分な検討
- 結果のもととなるモデルの診断結果について, 大きな問題がない
- JV機関全体の合意

※ 載せなければいけないというわけではなく, 載せてもよいという扱い

※※ C21 (資源量指数として利用) については, 複数の資源量指数がある場合に, 指数を統合できるという点で有用

※※※ C22 (神戸プロット) については, 資源状態に合意を得ることで, 2系のHCR適用のさいの議論に生かすことができる

令和4年度とりまとめ

タイプ	系群	概要
1C1	北海道ブロック ソウハチ・マガレイ	道総研VPAによる資源量推定値からqに事前分布導入. HCRはこれから検討
1C21	北海道ブロック マダラ日本海・マダラ北海道	マダラ日本海についてはPMの推定結果をMSEにして、2系の係数をデフォルトから変更
1C22	マルアジ・ムロアジ	神戸プロットの結果を補足資料に掲載
試算のみ	ニギス日本海・ベニズワイガニ・ウルメイワシ太平洋・イカナゴ瀬戸内など..	