

高解像度海洋大循環モデルを用いた 太平洋海域における マイワシ・カタクチイワシの 輸送生残過程の解析

伊藤幸彦・安田一郎・西川悠・佐々木英治・笹井義一
(東大海洋研) (JAMSTEC/ESC) (JAMSTEC/RIGC)

マイワシ・カタクチイワシ

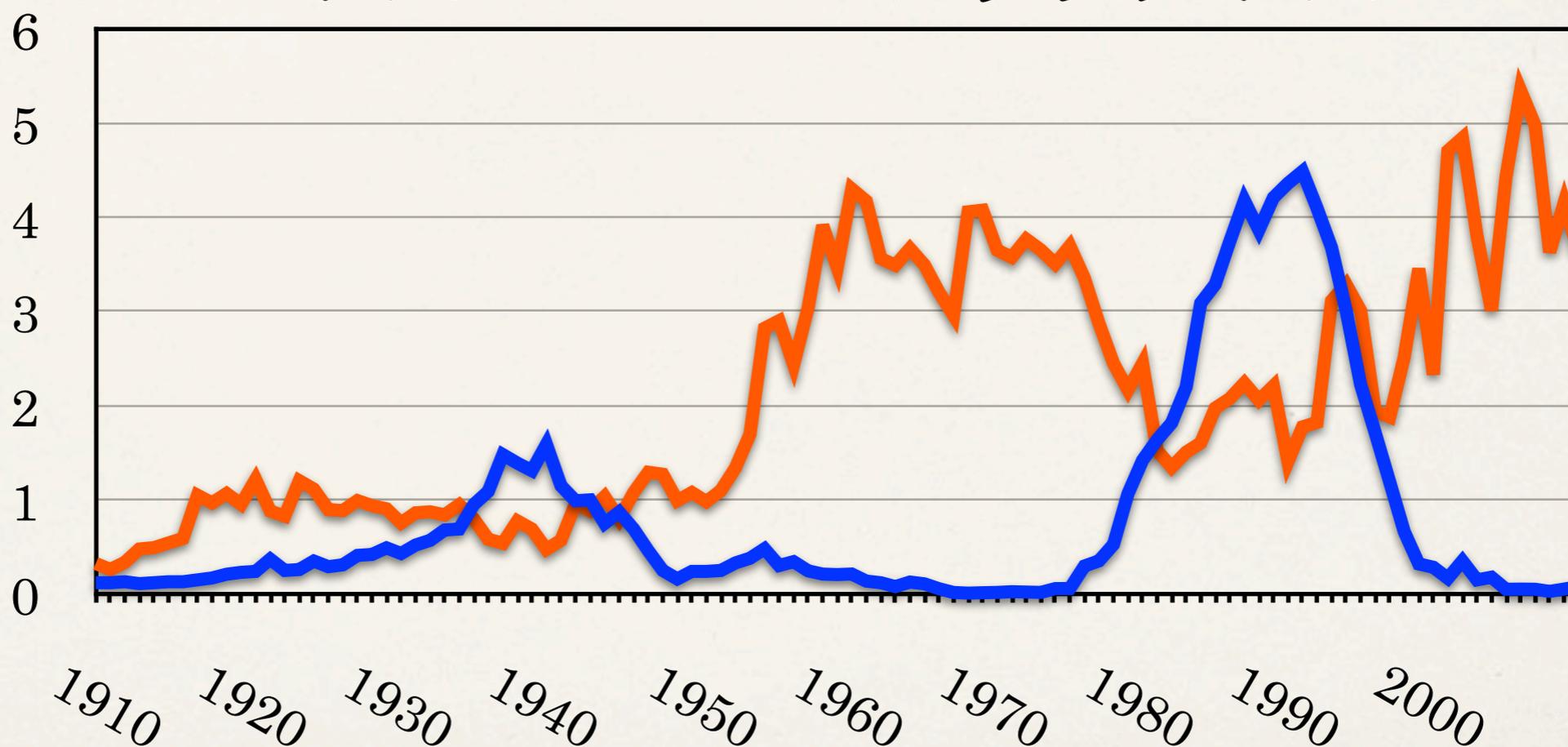
漁獲量の変動



— マイワシ

— カタクチイワシ × 10

漁獲量
(Mt)

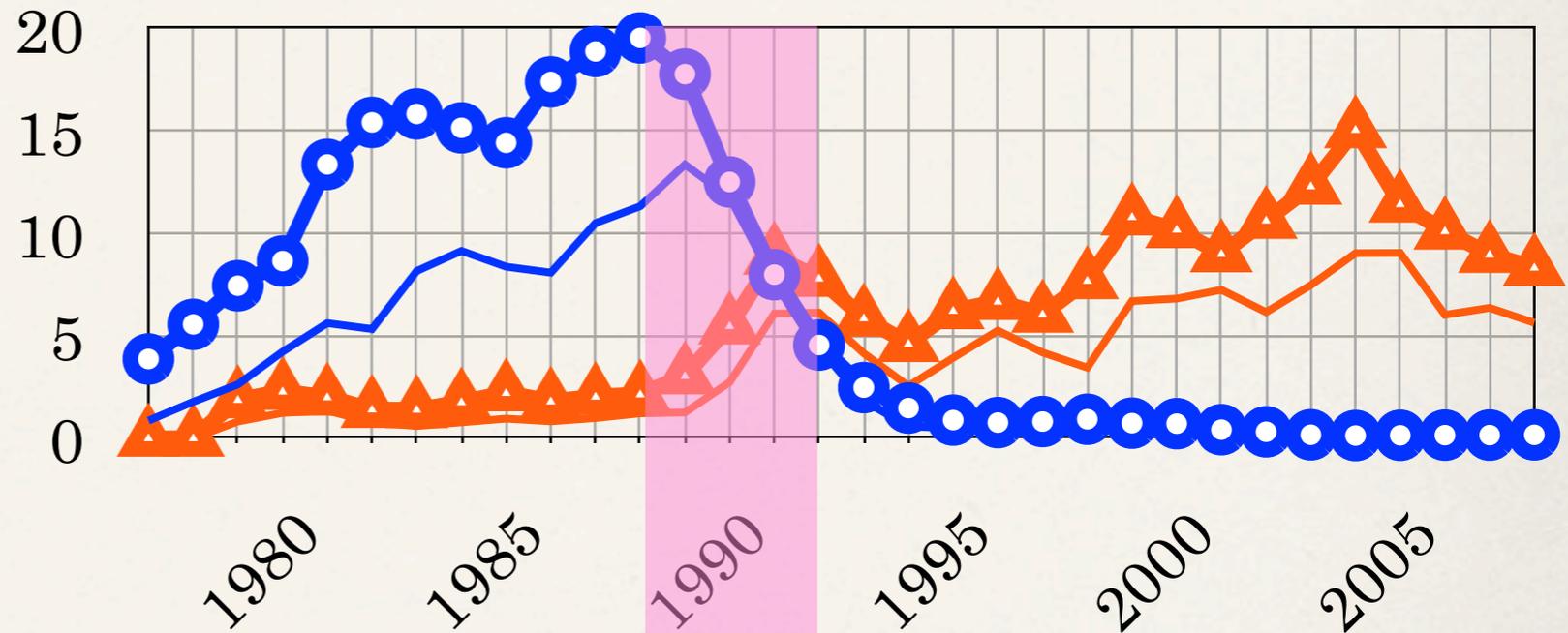
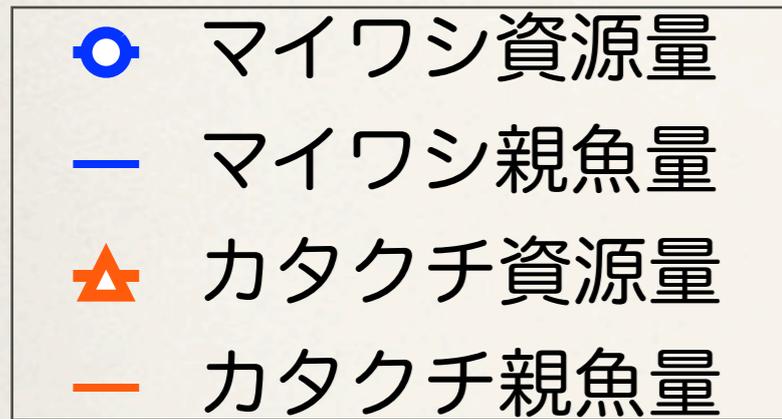


マイワシ・カタクチイワシ全国漁獲量

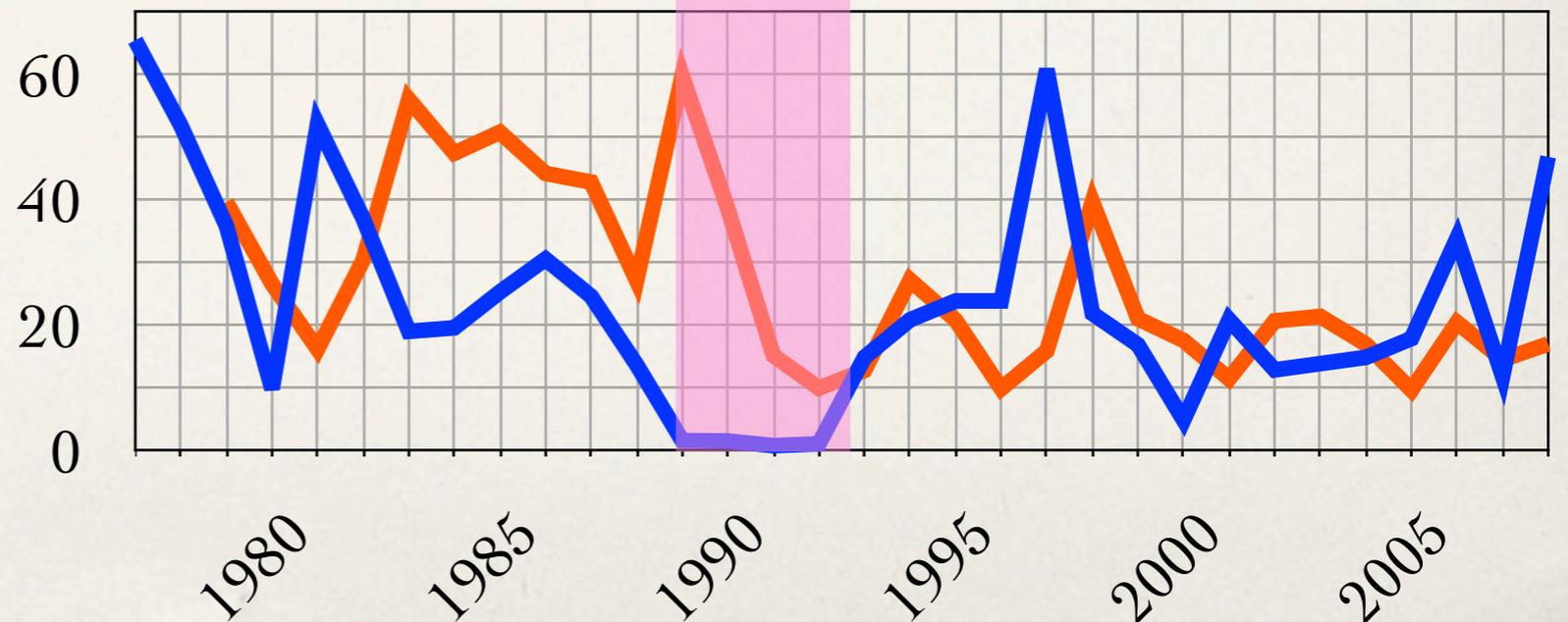
(Courtesy of Dr. Yatsu)

資源量と加入量変動 (太平洋系群)

資源量・産卵親魚量 [Mt]



加入量指数 (RPS) [no./kg]



何がRPSを変動させるのか？

加入数

卵数

死亡係数

*Yatsu et al. (2005)

$$N = N_0 \exp(-M)$$

$$\ln(N/N_0) = -M$$

$$= \ln(\text{RPS}) + \text{定数}$$

$$\text{LNRPS}^* \equiv \ln(\text{RPS})$$

~ 卵から加入までの死亡係数

⇒ 因果関係の検討に有用

LNRPS変動要因

- 密度依存的要因
(親魚／卵が多いとLNRPSが低下)
- 密度非依存的要因
 - ❖ 物理・餌環境
 - ❖ 捕食者

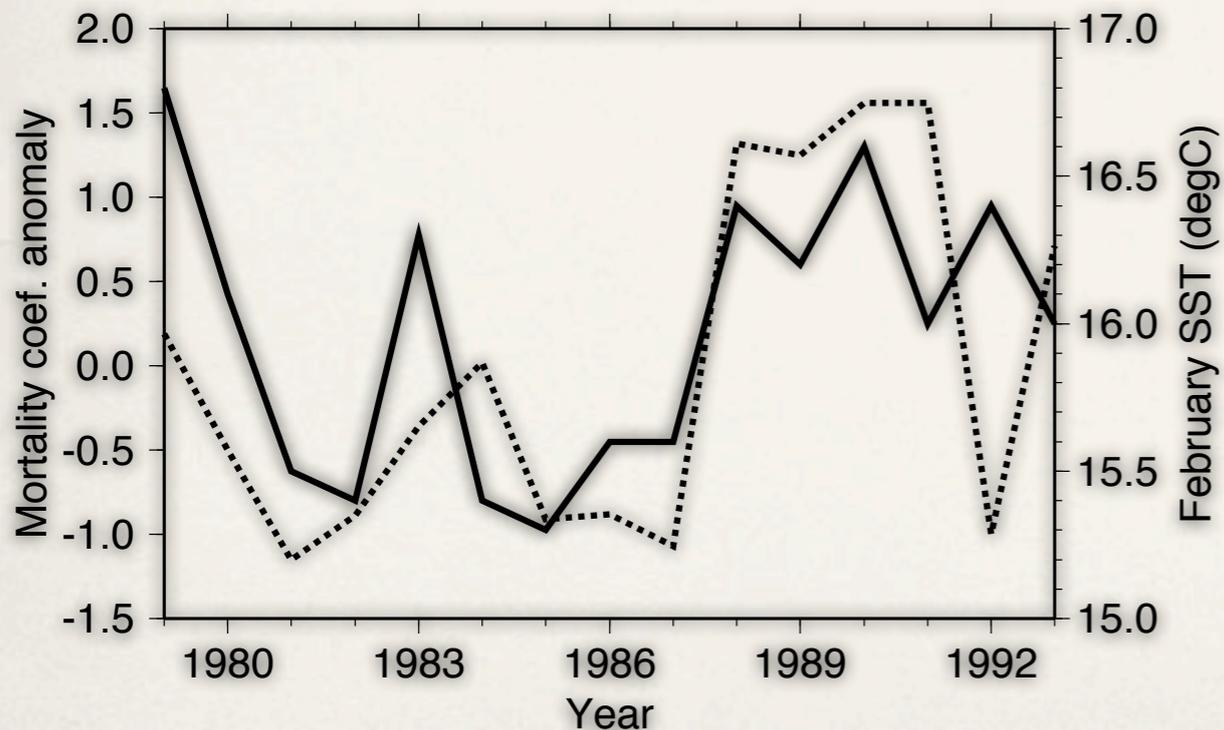
なぜ環境要因に着目？

- ❖ マイワシのRPS変動が既往の親子関係式 (Ricker型等) **のみ**では十分に説明できない
- ❖ マイワシ/カタクチイワシ魚種交替が**気候・環境指数と対応**
(Kawasaki & Omori, 1988; Noto and Yasuda, 1999; Chavez *et al.*, 2003; Yatsu *et al.*, 2005)
- ❖ マイワシ・カタクチイワシ仔魚の**成長に適した環境が異なり**、また仔魚**成長率が高ければ生残率は高い**
(Takasuka *et al.*, 2003; Takasuka *et al.*, 2007; Takahashi *et al.*, 2009)

環境 (水温)の影響

❖ 環境指標と仔稚魚死亡係数

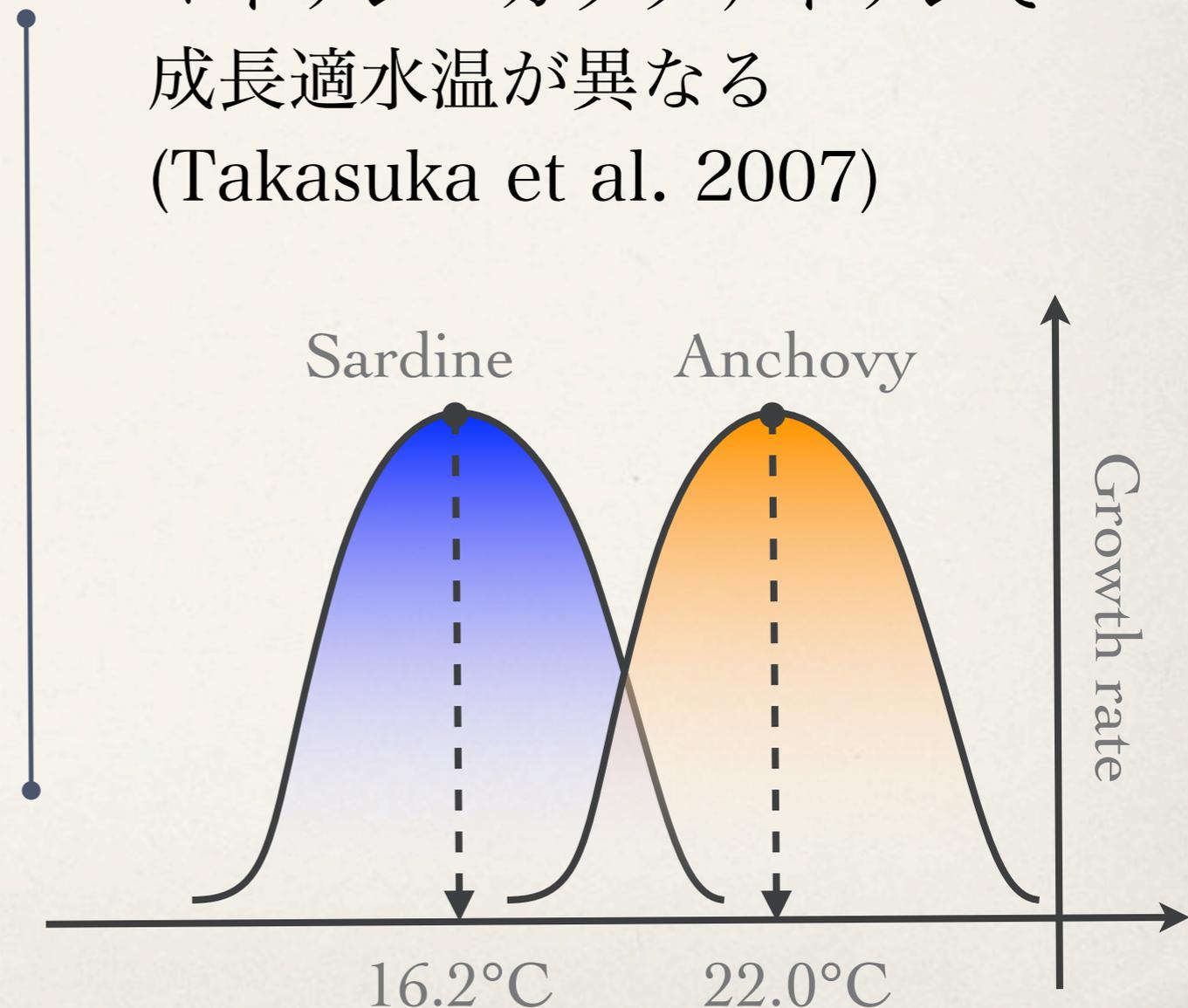
マイワシ仔稚魚期死亡係数が
黒潮続流域冬季SSTと正相関
(Noto and Yasuda 1999)



死亡係数 (破線) とSST (実線)

❖ 水温と仔魚成長率

マイワシ・カタクチイワシで
成長適水温が異なる
(Takasuka et al. 2007)



環境影響評価の方法論

- ❖ これまでの方法

- ❖ **気候指標** (PDO, SOI, MOI等) や **固定海域水温** (黒潮続流南側等) と死亡係数/LNRPSの関係を分析
- ❖ 指標とRPSの関係性が得られれば、実況・予報への**実用性は高い**
- ❖ 指標が仔稚魚のどの環境を代表しているのかが不明であり、**生残過程の検証には不適**
(e.g., 2月の黒潮続流南側海域にマイワシの仔魚はいない??)
- ❖ RPSとの因果関係検証には仔魚が実際に経験した環境情報が必要

本研究のアプローチとゴール

● アプローチ

- ❖ 産卵場から数値的に個体を輸送し、**経験水温**を推定
- ❖ 高解像度海洋大循環**OFES**の出力（水温・流速）を使用

● ゴール

- ❖ マイワシ・カタクチイワシ仔魚の**輸送と経験水温の経年変動**
- ❖ **経験水温とRPSの関係**

データ

● 流動・水温場データ

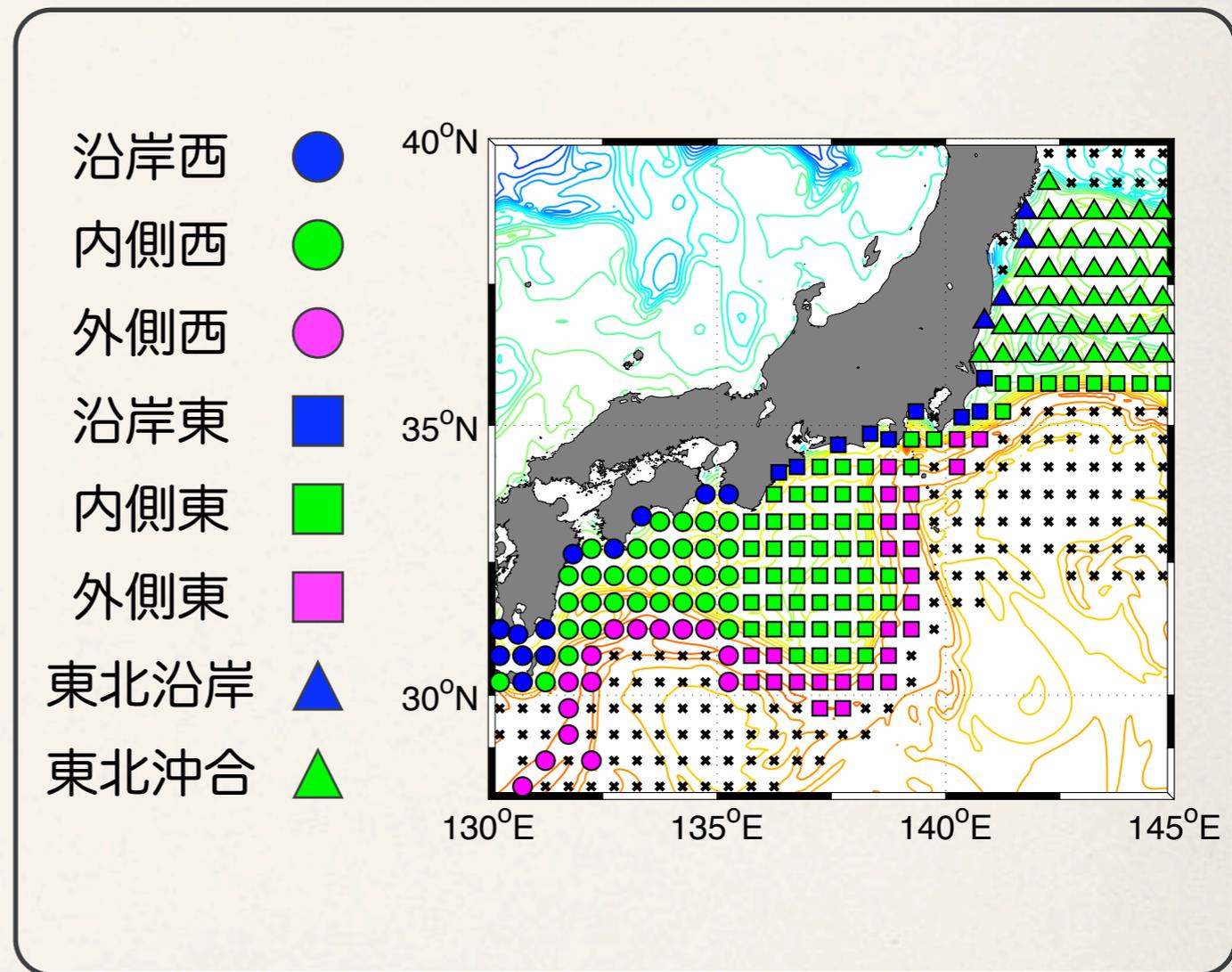
- ❖ OGCM For Earth Simulator (OFES)
3日毎スナップショット（水平解像度 $1/10^\circ$ ）
- ❖ 個体（粒子）の輸送と環境水温推定に使用

● 産卵場データ

- ❖ 30'升目産卵量分布
(日本の太平洋岸におけるマイワシ・カタクチイワシ、サバ類の月別・海域別産卵状況, 1978-2004)
(電子データ提供：水産総合研究センター高須賀さん、大関さん)
- ❖ 粒子（卵）の初期位置決定に使用

OFESデータ補正

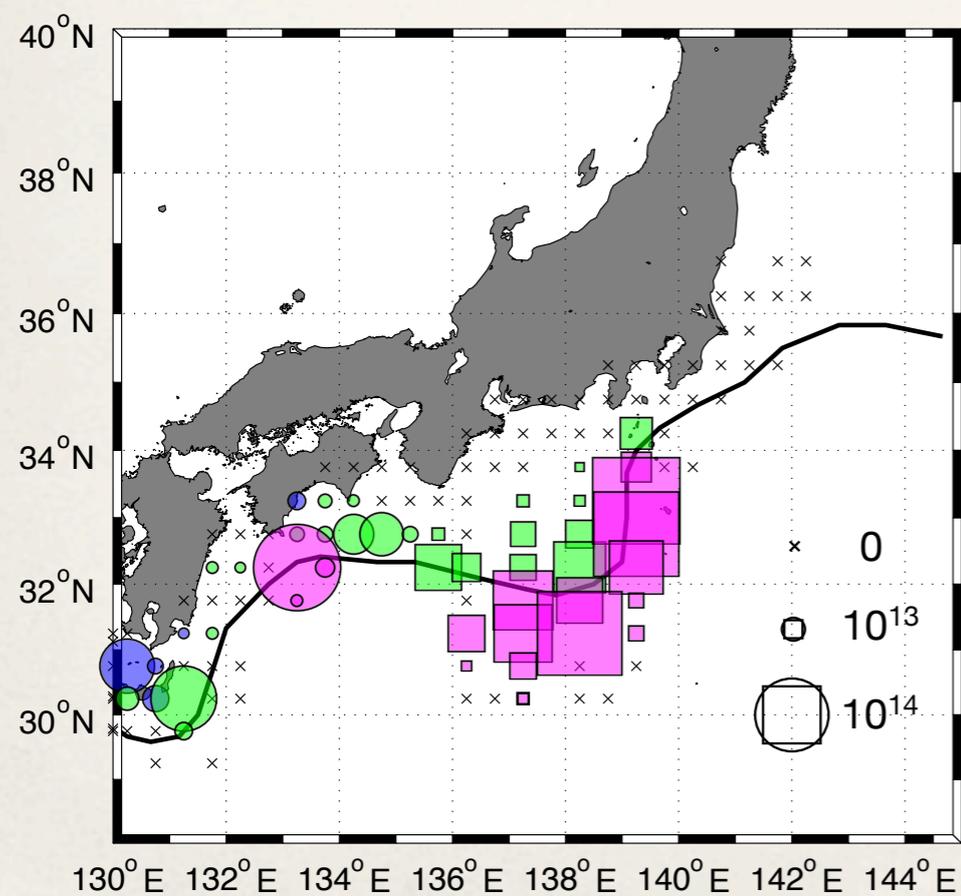
- ❖ OFESは総観的には現実を再現しているが黒潮の蛇行や渦の分布等は**現実と不一致**
- ➔ 産卵量分布をそのまま適用すると輸送や環境の推定値に重大な過誤が生じる可能性
- ➔ 黒潮流路（200 m 水温で判別）に**相対的に8つの産卵場区**を設定し粒子を配置し、実際の**産卵量で重み付け**



1990年2月のモデル粒子投入点

産卵場分布と重み付け

● 沿岸西	■ 沿岸東
● 内側西	■ 内側東
● 外側西	■ 外側東
▲ 東北沿岸	▲ 東北沖合



- ❖ 実際の産卵場もモデルと同様に **8産卵場区**に分け、各海区の粒子を**産卵量で重み付け**
- ❖ **輸送先・経験水温**も重み付けして平均値を推定

1990年2月のマイワシ産卵量
(黒潮流路：MIRC黒潮流軸データセット)

粒子追跡

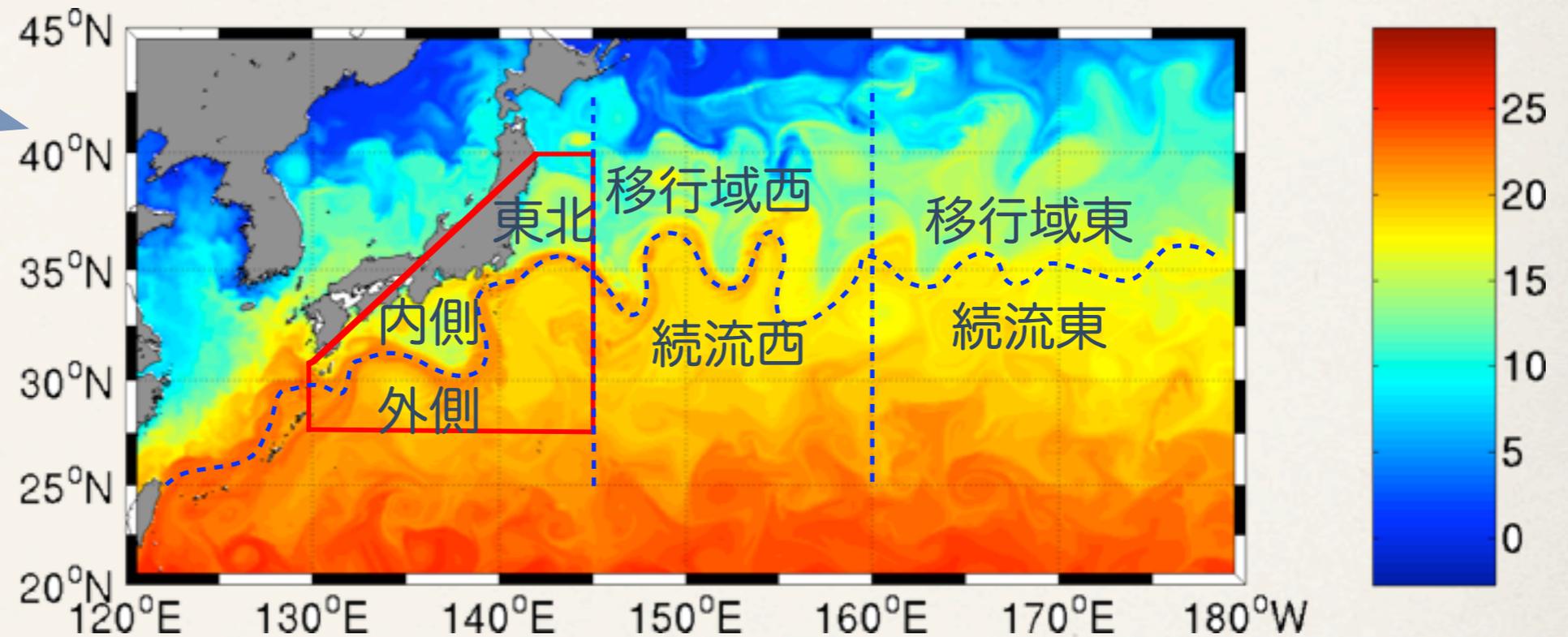
モデル海域

(1990 2/15 SST)

赤実線：産卵場海域

青点線：目的海域

区分け



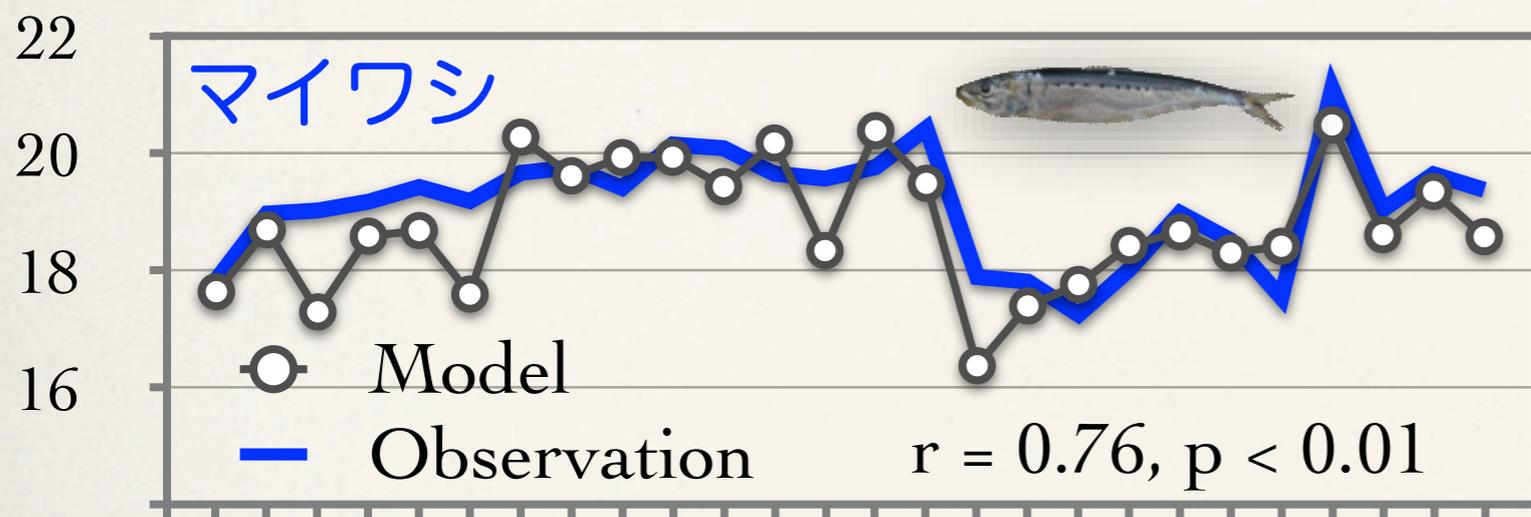
❖ OFESの流速場で粒子を輸送
(水平移流+ランダムウォーク)

❖ 鉛直位置は混合層の中心

❖ 1978~2004年毎月スタート
(321ラン) ・ 90日間追跡

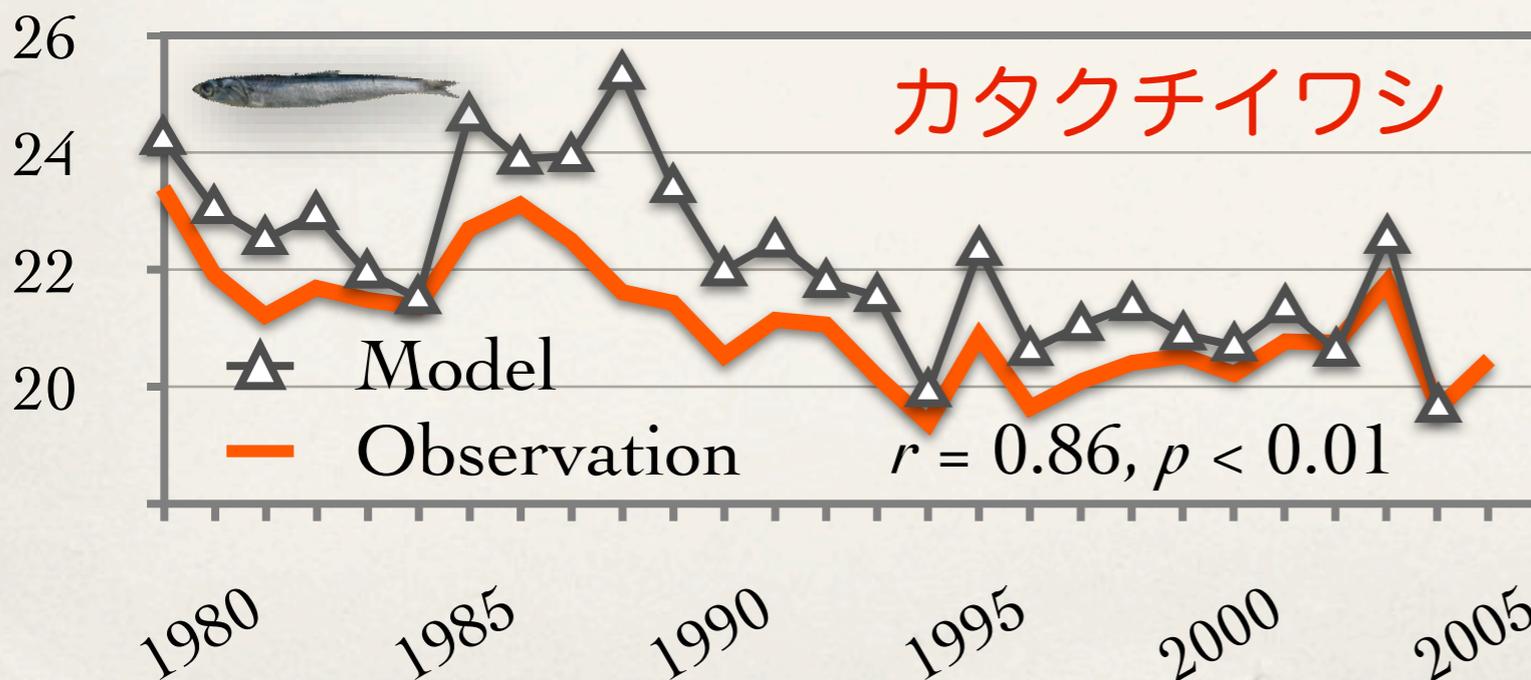
❖ 各産卵場区・季節の卵数で重み
付けし輸送先・経験水温を計算

モデルの再現性 (初期水温)



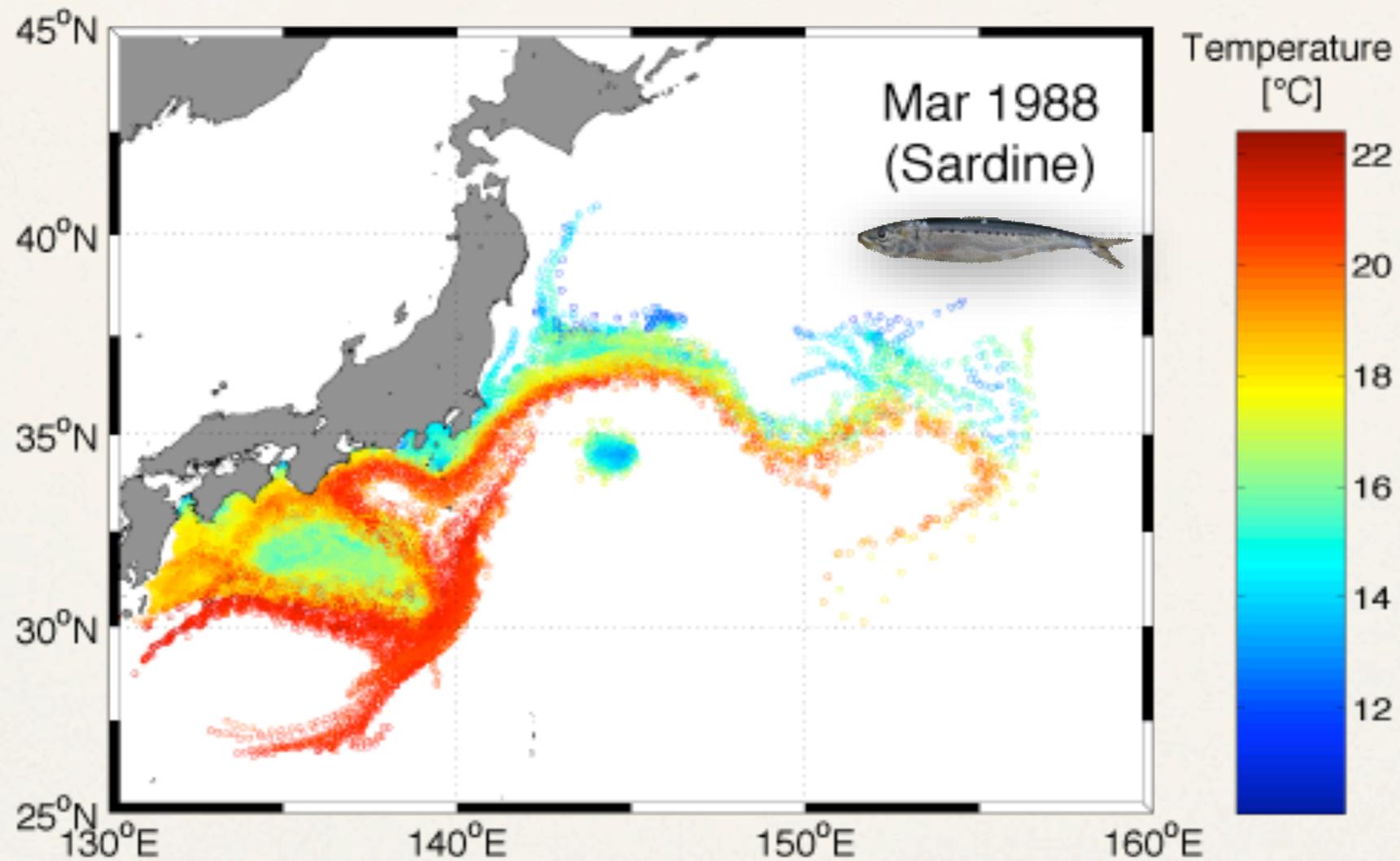
- * モデルの初期水温は実際の産卵場水温をよく再現

- * 初期水温の差で全データを補正



モデルおよび観測の産卵量加重平均水温

追跡例

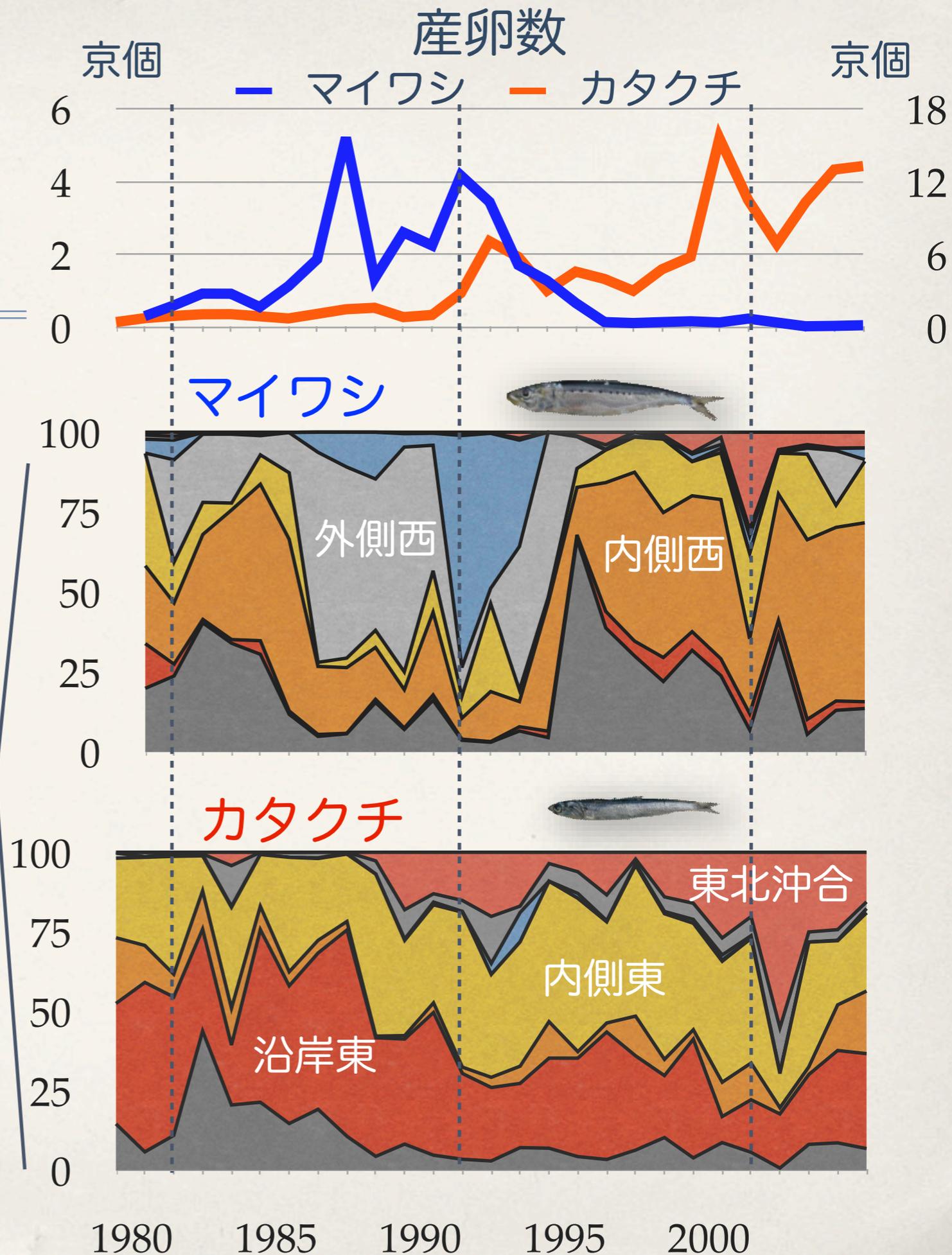


1988年3月のマイワシ産卵場からの輸送
された粒子の30日後の分布と環境水温

産卵量および産卵場の変動

- * マイワシは資源高水準期に外側域、減少後は内側域西部が主産卵場
- * カタクチは沿岸・内側の東部、近年は東北沖合

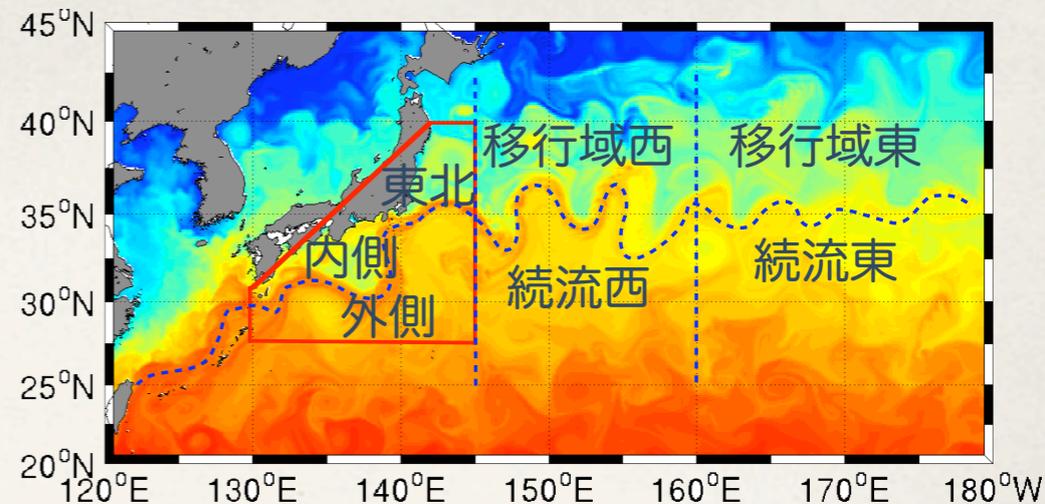
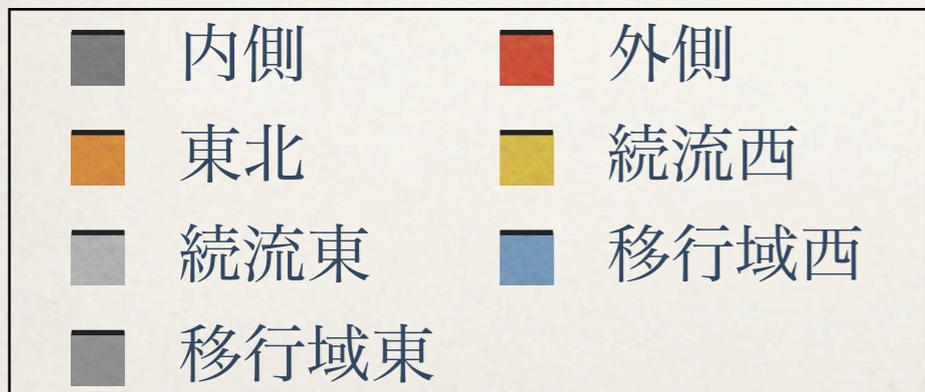
産卵量
割合 [%]



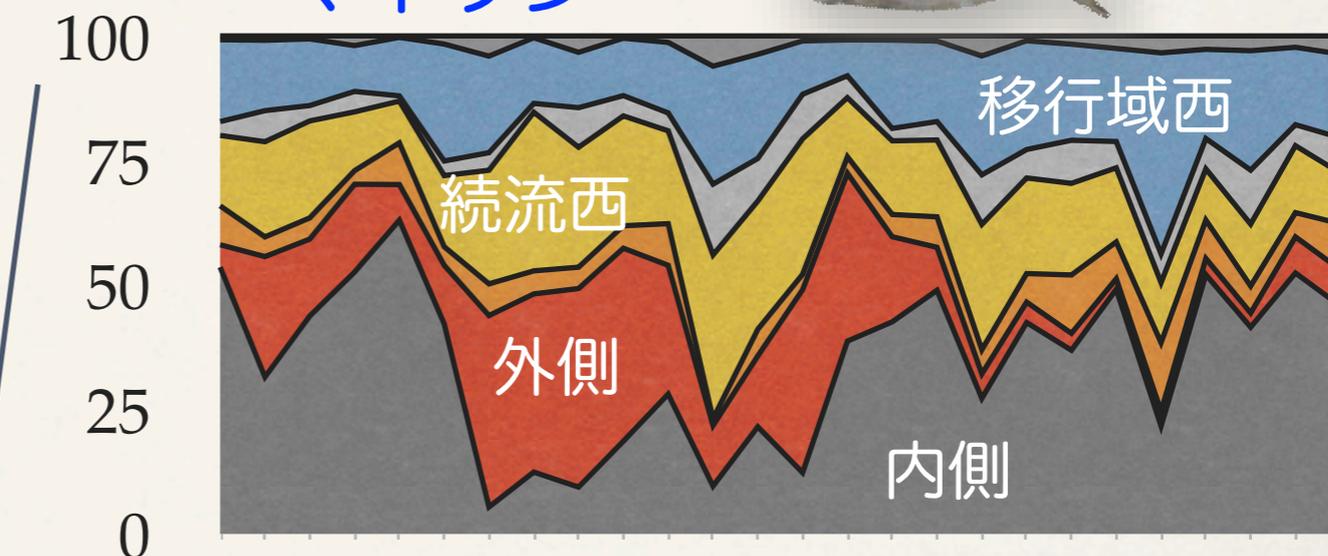
卵・仔魚の 輸送先

- ❖ マイワシは資源高水準期に
続流域、低水準期は内側に
多く輸送
- ❖ カタクチは内側と
移行域への輸送傾向

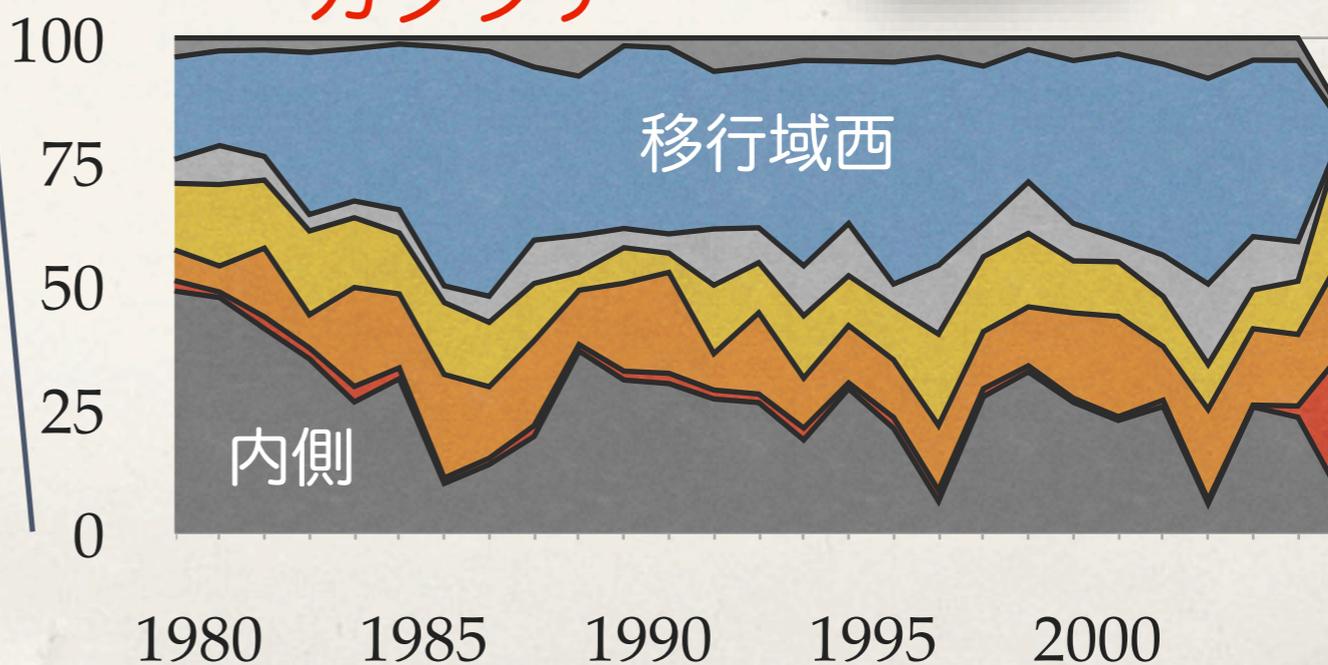
輸送先
(60日後)
割合 [%]



マイワシ



カタクチ



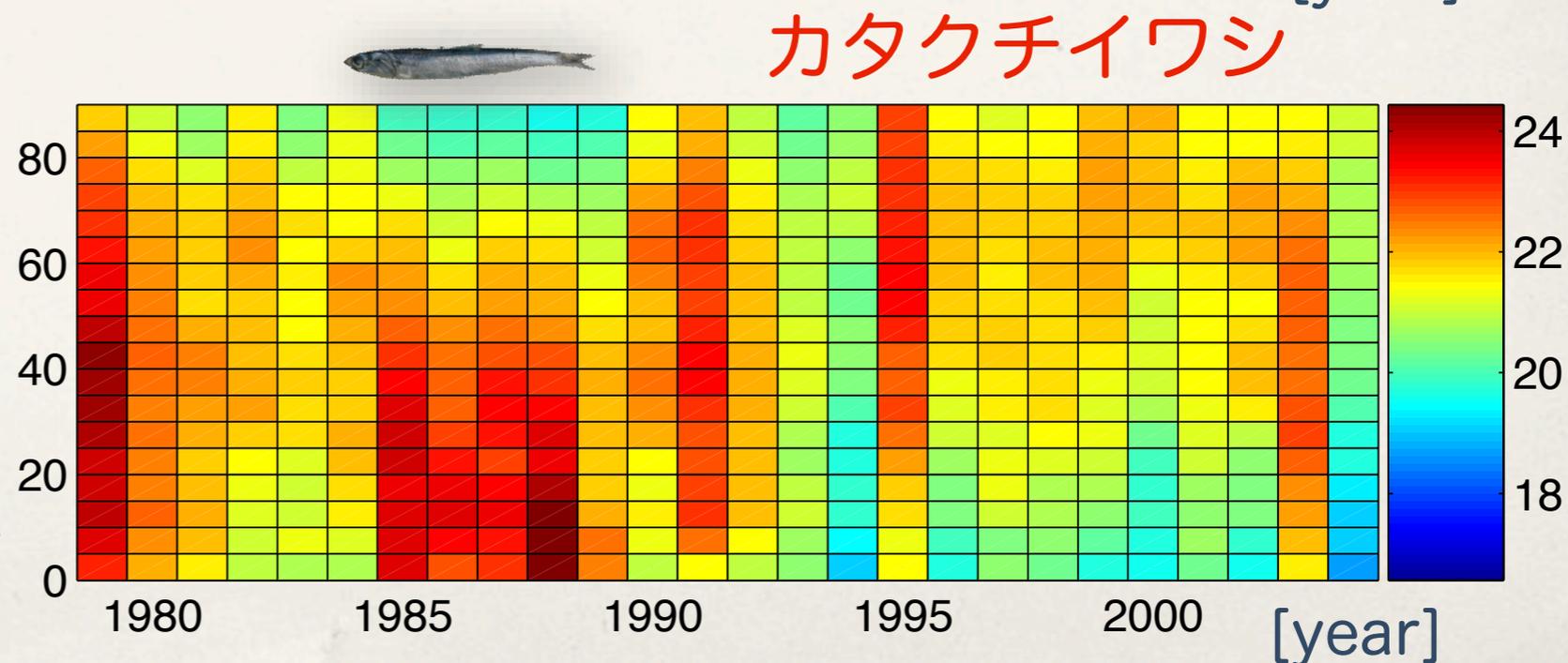
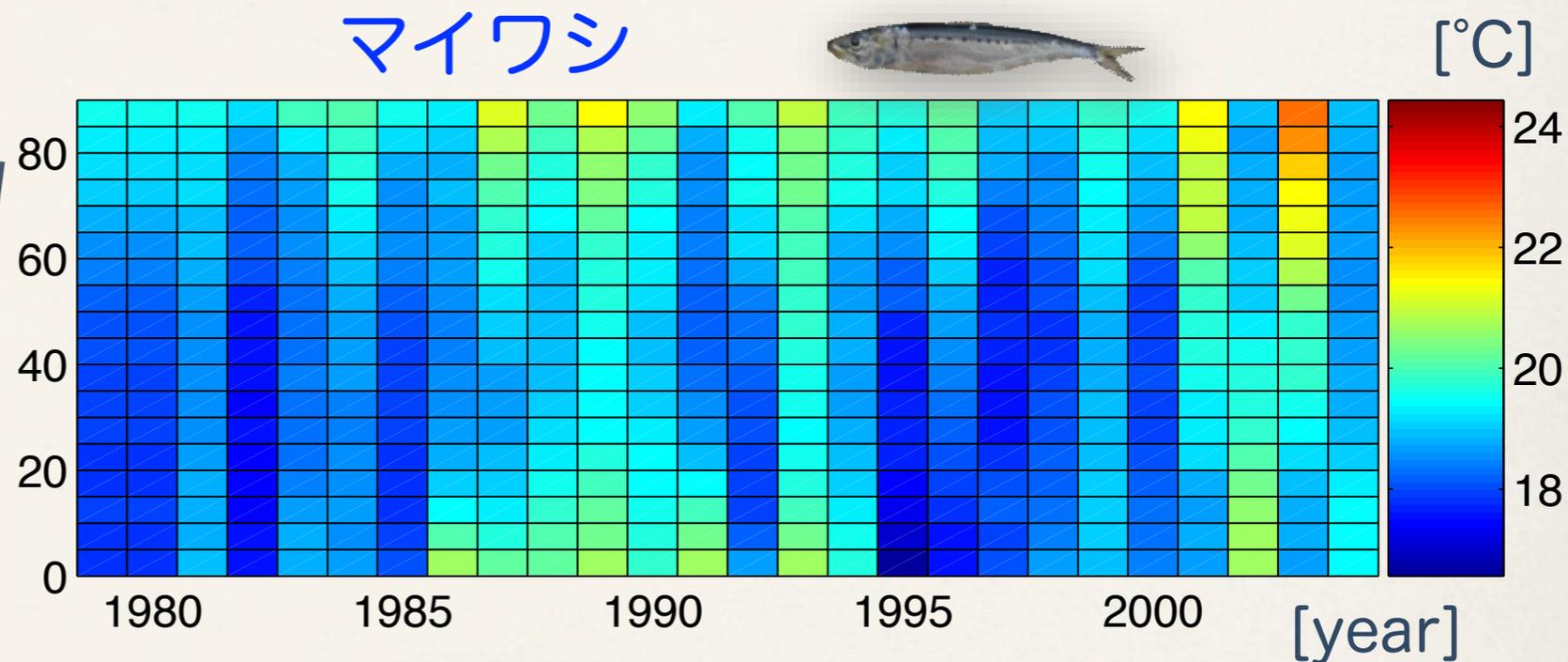
1980 1985 1990 1995 2000

卵・仔魚の経験水温

マイワシは80年代後半から90年代前半に
高水温を経験

経過日
(日齢)

カタクチイワシは80年代に高水温、近年の初期経験水温は寒冷化



LN

RPSは経験水温で説明できるか？

- I. 経験水温（全卵加重平均）のみ
- II. 経験水温 + 産卵親魚量
- III. 経験水温（産卵場別） + 産卵親魚量

LNRPSは経験水温で説明できるか？

1. 経験水温（全卵加重平均）のみ

有意 (90%)な回帰関係

経過時間（日齢）

→ → → → →

回帰関数

0日

マイワシ

1次



0-10日

負相関 ($R^2 = 0.12, p = 0.08$)



2次

有意な回帰関係なし

カタクチ

1次



0-10日

正相関 ($R^2 = 0.20, p = 0.02$)

イワシ

2次



5-15日

最適水温 ($R^2 = 0.40, p < 0.01$)
22.4°C



LNRPSは経験水温で説明できるか？

II. 経験水温 + 産卵親魚量

水温の1次/2次式

産卵親魚量

$$\text{LNRPS} = f(T) + \alpha \times \text{SSB}$$

$$\text{LNRPS} - \alpha \times \text{SSB} = \text{LNRR}$$

(Yatsu et al. 2005)

ところが、

SSBと水温に相関があり、両者を独立変数として扱えない
(資源量の増減で産卵場が拡大・縮小/移動するため)

SSBのみだと

マイワシ：有意な相関なし

カタクチ： $r = -0.73$ ($p < 0.01$)

LNRPSは経験水温で説明できるか？

III. 経験水温（産卵場別） + 産卵親魚量

最適な回帰関係（毎年産卵のある海区のみ）

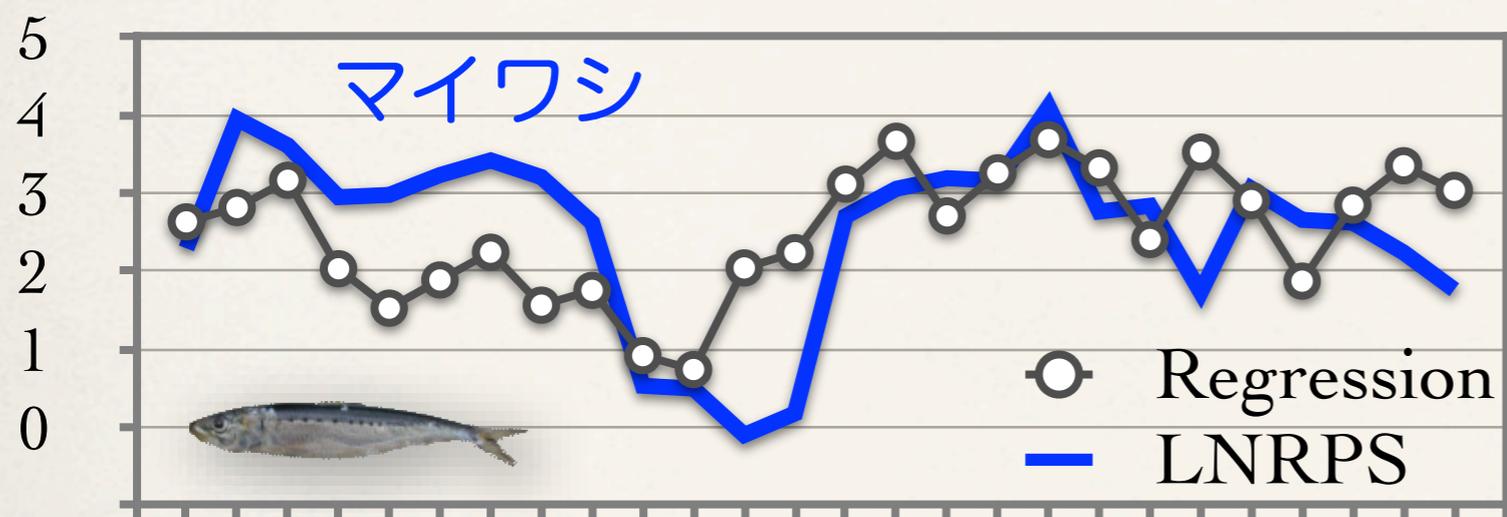
	関数	産卵場	0日齢	→ → → → → → → → →
マイワシ	1次	内側西	 25-35日	負相関 ($R^2 = 0.18, p = 0.03$) (SSB寄与はYatsu et al. 2005を参照)
カタクチ イワシ	2次	沿岸東	 5-15日	最適水温 21.2°C ($R^2 = 0.66, p < 0.01$)

毎年産卵がない海区も含むと

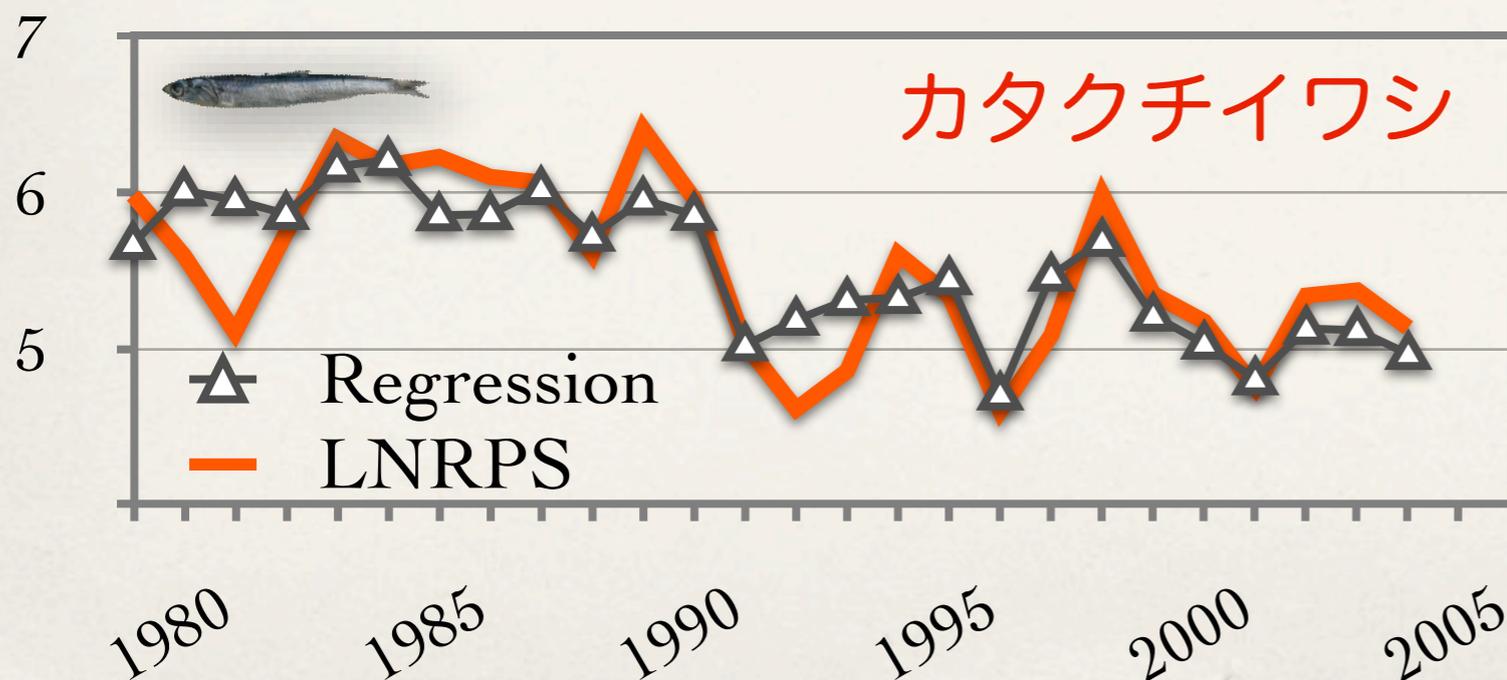
マイワシ外側西産卵群 が20-30日に強い負相関 ($R^2 = 0.28, p < 0.01$)

最適回帰関数

(SSB考慮・p値最小)



$$\begin{aligned} & \text{LNRPS (マイワシ)} \\ & = -0.72 T_{\text{内側西}} \\ & \quad - 0.0017 \text{SSB} + 16 \\ & (R^2 = 0.18, p = 0.03) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & \text{LNRPS (カタクチ)} \\ & = -0.057 (T_{\text{沿岸東}} - 21.2) \\ & \quad - 0.0015 \text{SSB} + 6.7 \\ & (R^2 = 0.66, p < 0.01) \end{aligned}$$

回帰関数による
LNRPS再現値と実測値

輸送実験まとめ

❖ 輸送と経験水温の経年変動

- ❖ 資源量の増加（現象）による産卵場が拡大（縮小） ・ 移動に対応して輸送先・経験水温は**経年的に大きく変化**
- ❖ 高水準期のマイワシは**続流域**、**カタクチは内側と移行域**へ輸送傾向

❖ 経験水温とRPSの関係

- ❖ **マイワシは負相関**、**カタクチは最適水温21-22°C**の2次関数
- ❖ 初期（おおむね0-15日）の経験水温と強い相関

既往研究との比較

既往研究	概要		比較
Kasai <i>et al.</i> 1992	マイワシ 加入率	仔魚が沿岸に 滞留するほど高	不一致 ($r = 0.29, p = 0.19$)
Noto & Yasuda 1999 Yatsu <i>et al.</i> 2005	マイワシ 加入率	冬季黒潮続流が 低いほど高	一部整合 黒潮本流の水温と対応
Takasuka <i>et al.</i> 2007	仔魚 成長率	マイワシ適水温16.2°C カタクチイワシ 適水温22.0°C	一部整合 カタクチイワシ RPS適水温
Takahashi <i>et al.</i> 2009	仔魚 成長率	マイワシ適水温16.4–18.9°C カタクチイワシ適水温 > 17.3°C	一部整合 カタクチイワシRPS 水温との正相関

マイワシとカタクチイワシの差異

経験水温とRPSの回帰関係がマイワシ・カタクチイワシ仔魚の
生残に関する水温環境の好適性に関係しているとするれば、

- ❖ マイワシ仔魚の分布水温は好適水温より高い（負相関なので）
- 高水温帯（黒潮等）での高密度パッチが荷重平均を高めている？
（荷重無しだと分布水温~好適水温: Takasuka et al. 2008）
- しかし、産卵場を区分しても有意な好適水温は得られない（本研究）
- 高水準期に集中的な産卵で外洋域へ拡散するマイワシと、
沿岸近くで断続的に産卵するカタクチイワシでは
そもそも水温への応答様式が異なる可能性

本研究手法の限界

❖ 経験水温推定方法

- ❖ 卵稚仔が死亡しない
 - 本来なら死亡するはずの個体の環境まで含んでしまう
- ❖ 産卵場の時間・空間解像度（毎月、30'グリッド）
- ❖ 循環モデルの精度：1993年以降なら同化モデルの方が高精度

❖ RPSとの関係推定方法

- ❖ 産卵場・産卵季・輸送先は多岐に渡るが、目的変数のRPSは各年毎のみ（各群の死亡率が異なる場合、推定には過程が必要）。

～ 加入量予測に向けて ～

環境因子解析の展望

- ❖ 経験水温と産卵親魚量を用いた回帰関係
マイワシで約20%, カタクチイワシは約70%の変動を説明
 - カタクチイワシは実用化可能？ マイワシは改良の必要性あり
- ❖ 環境を用いた回帰関係の問題点（特にマイワシ）
1988-1991のような極端の年を必ずしも十分に再現できない
 - ❖ 実際には、密度効果により資源維持機構が脆弱になっている所に環境が打撃を与えた？
 - 環境と密度効果の複合的評価が必要
(線形結合ではなく非線形に)