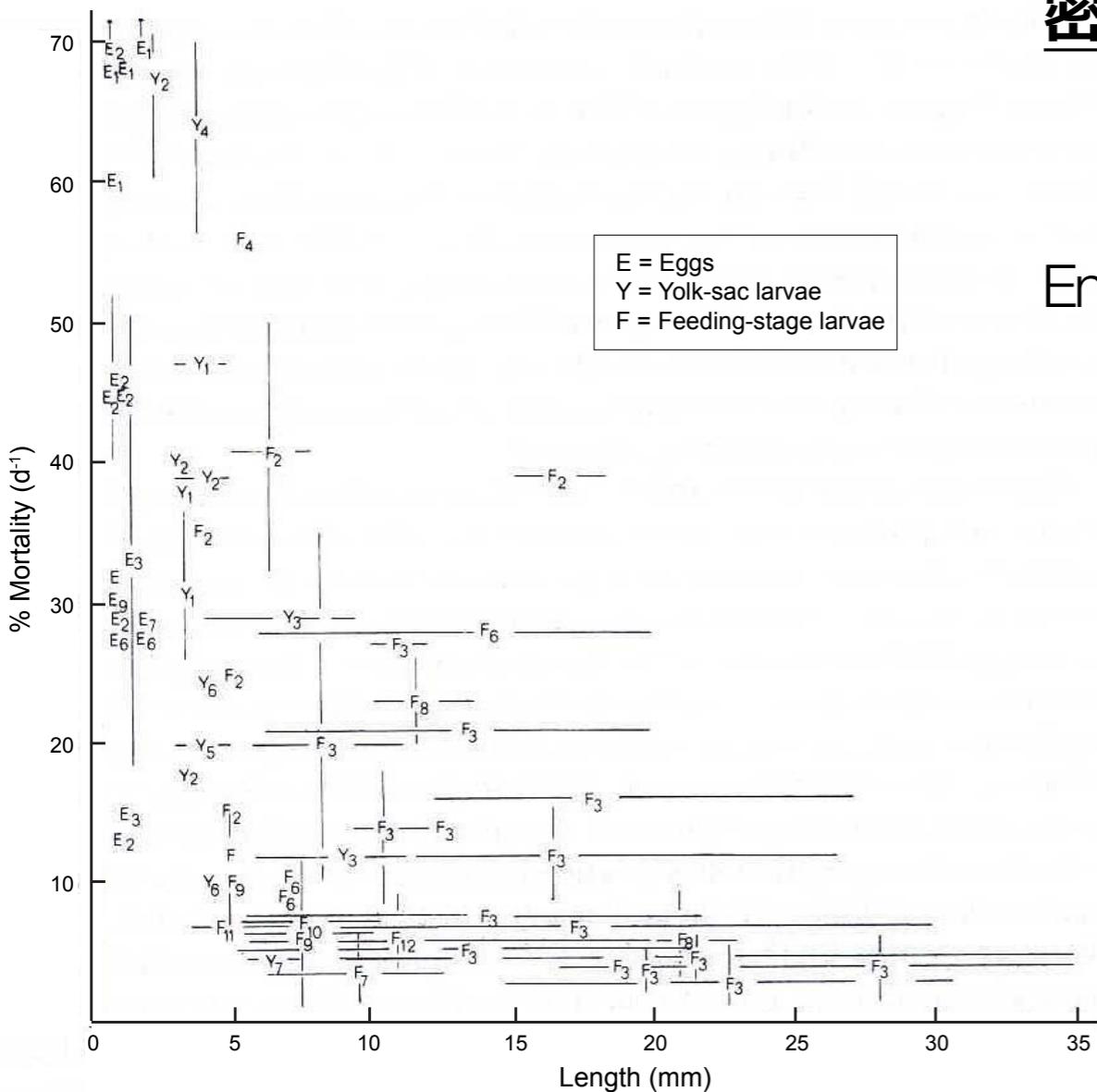


仔魚成長速度と環境履歴

—耳石日輪分析と 粒子追跡実験の組み合わせ—

○伊藤幸彦・猿渡敏郎・西川悠・安田一郎（東大大気海洋研）・小松幸生（東大新領域）
・津田敦（東大大気海洋研）・清水学・瀬藤聰（水産総合セ中央水研）

成長速度と死亡率

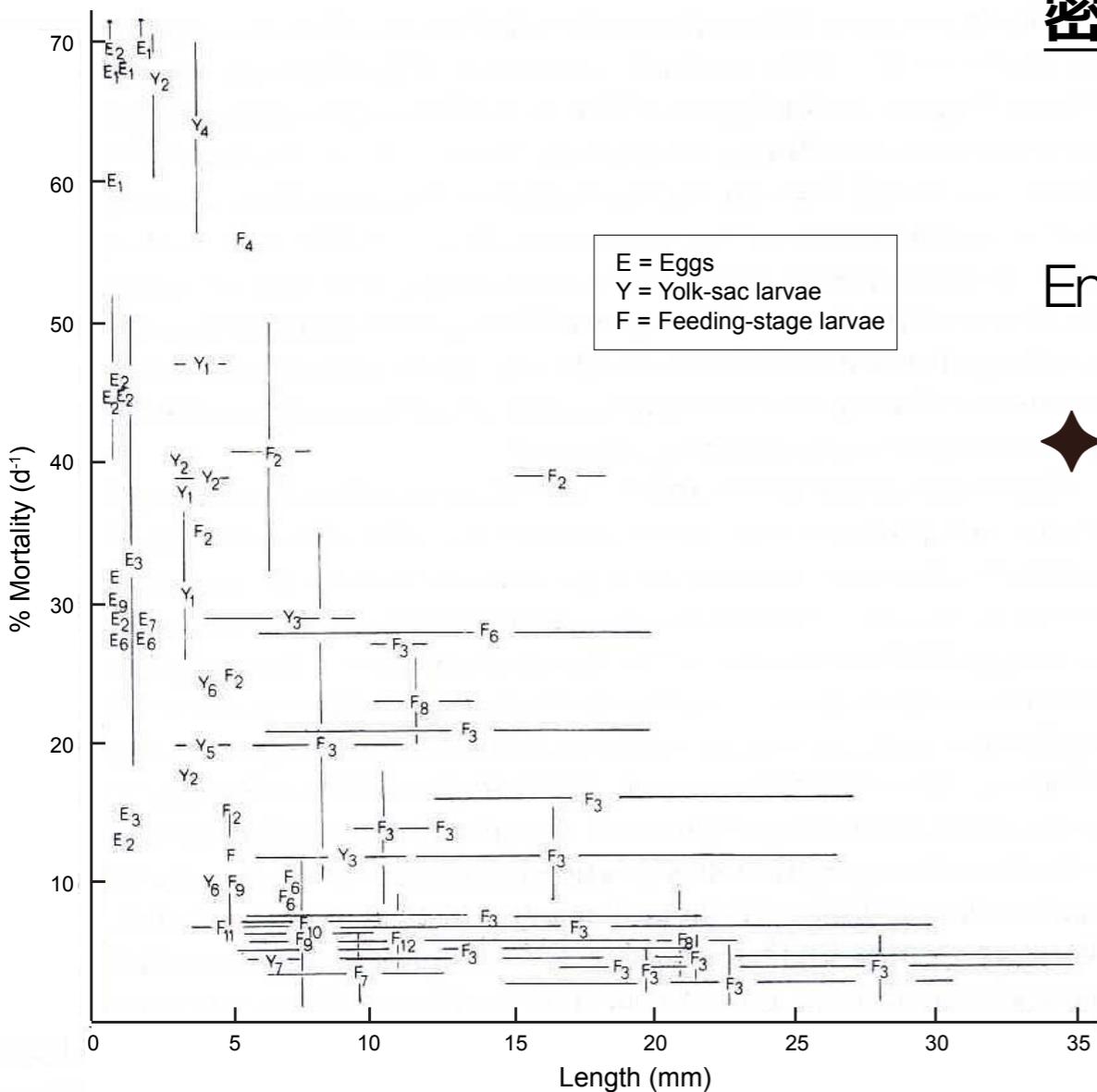


密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている
(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度と死亡率



密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている

(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

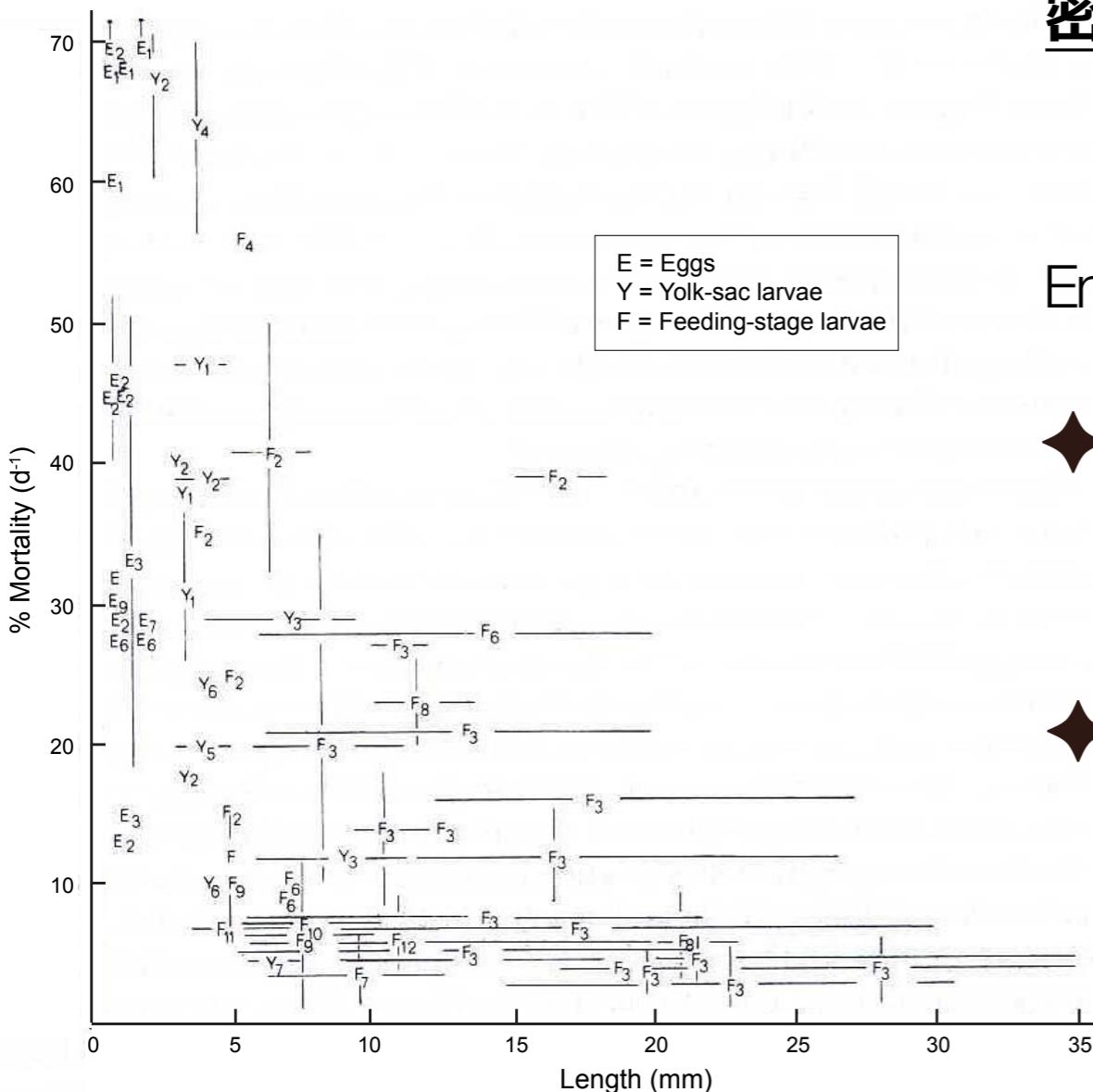
◆ 諸説あるが根源要因の死亡率についてみると

仔魚死亡率は体長と負の関係（左図）

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度と死亡率



密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている

(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

◆ 諸説あるが根源要因の死亡率についてみると

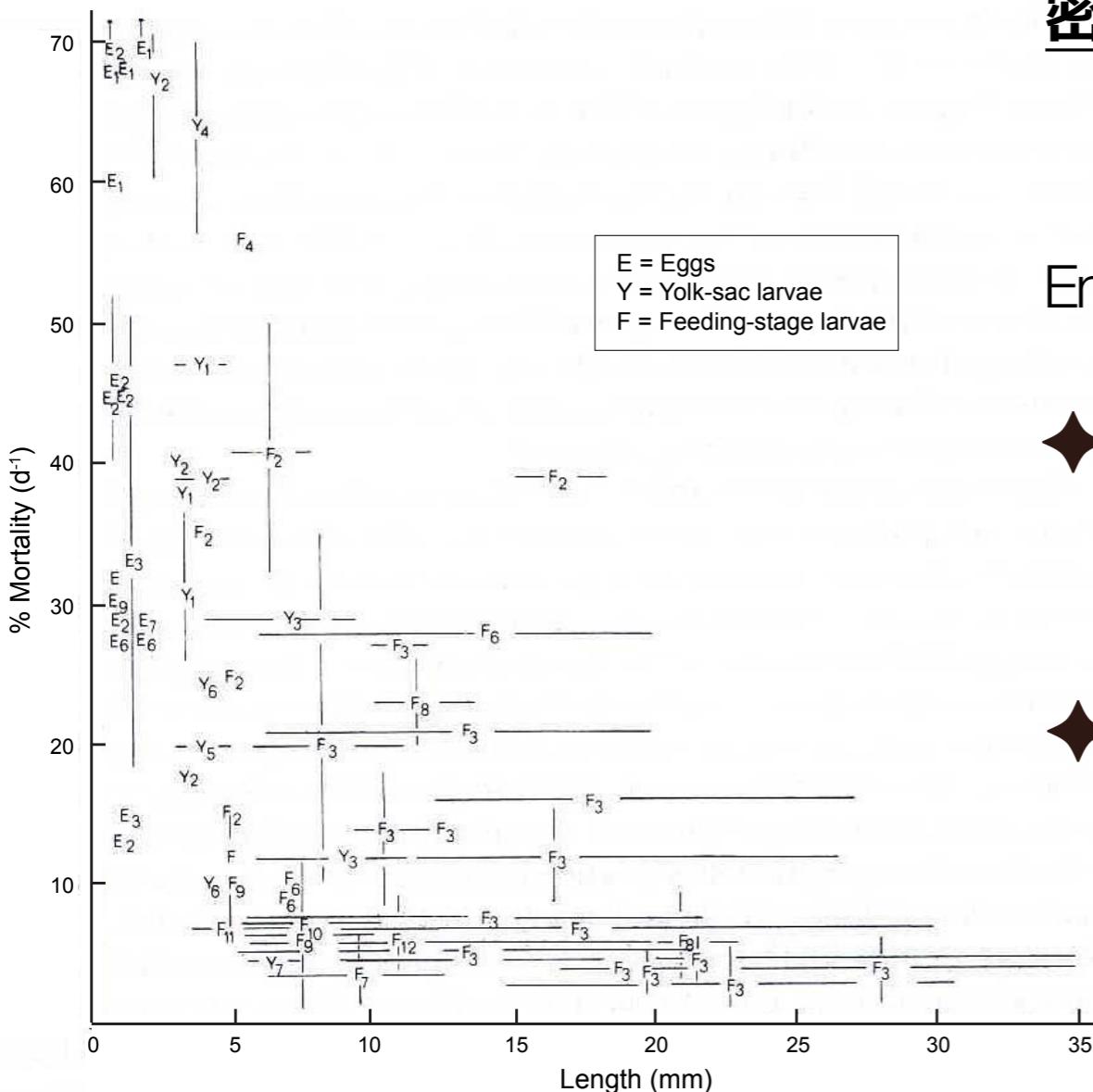
仔魚死亡率は体長と負の関係（左図）

◆ なぜ体長と関係があるのか？

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度と死亡率



密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている

(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

◆ 諸説あるが根源要因の死亡率についてみると

仔魚死亡率は体長と負の関係（左図）

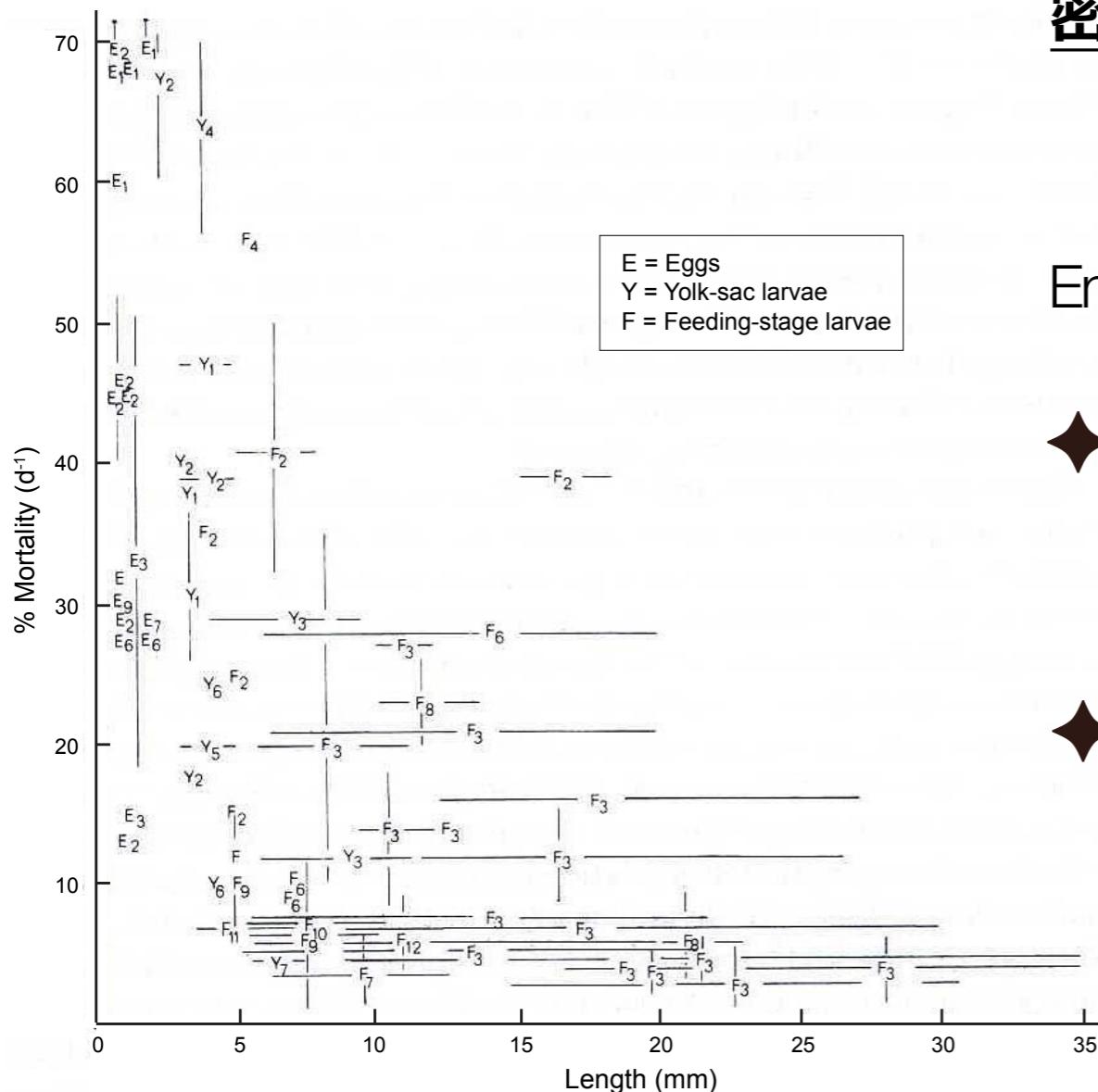
◆ なぜ体長と関係があるのか？

Bigger is better

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度と死亡率



密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている

(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

◆ 諸説あるが根源要因の死亡率についてみると

仔魚死亡率は体長と負の関係（左図）

◆ なぜ体長と関係があるのか？

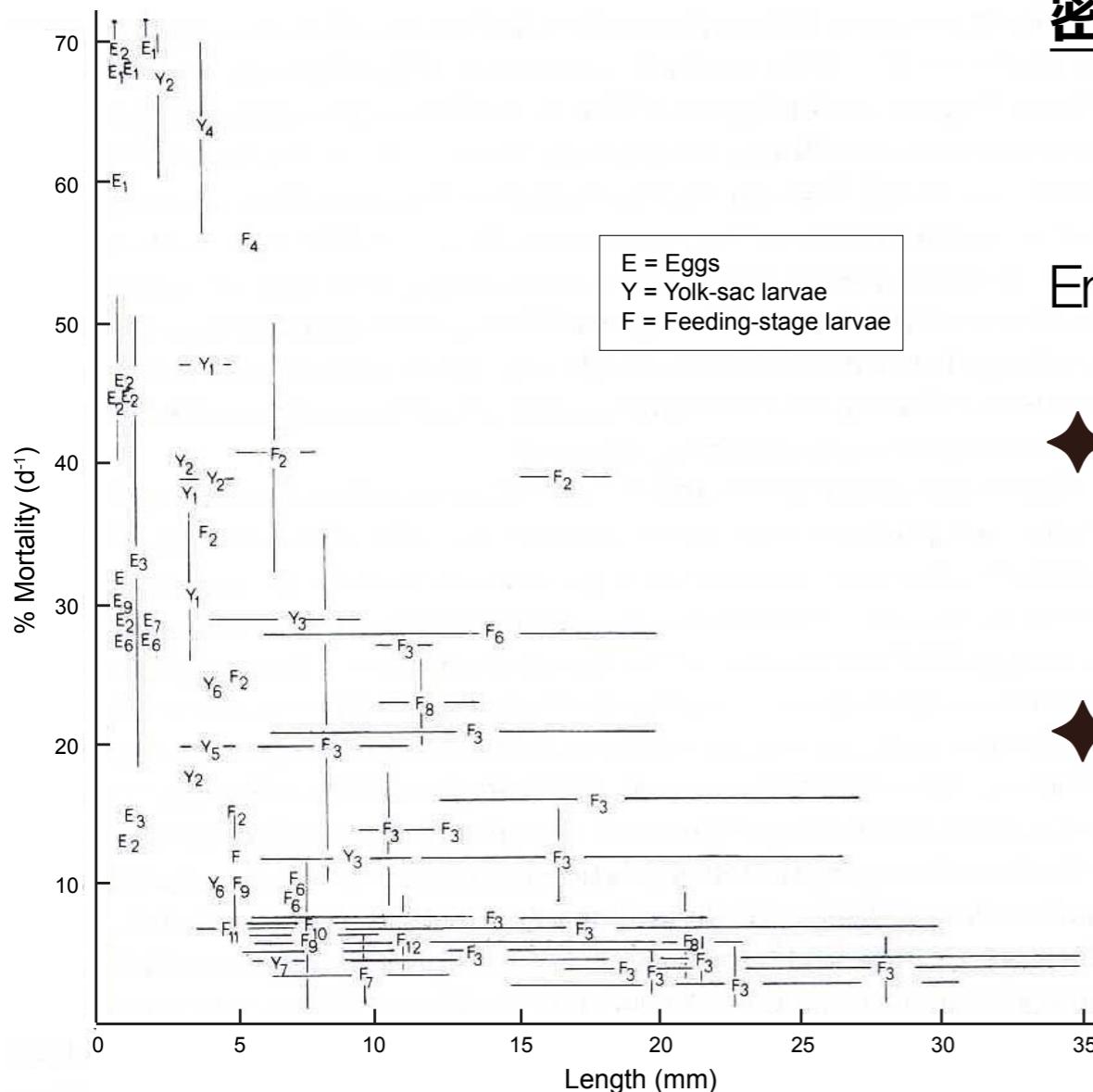
Bigger is better

Stage duration

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度と死亡率



密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている

(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

◆ 諸説あるが根源要因の死亡率についてみると

仔魚死亡率は体長と負の関係（左図）

◆ なぜ体長と関係があるのか？

Bigger is better

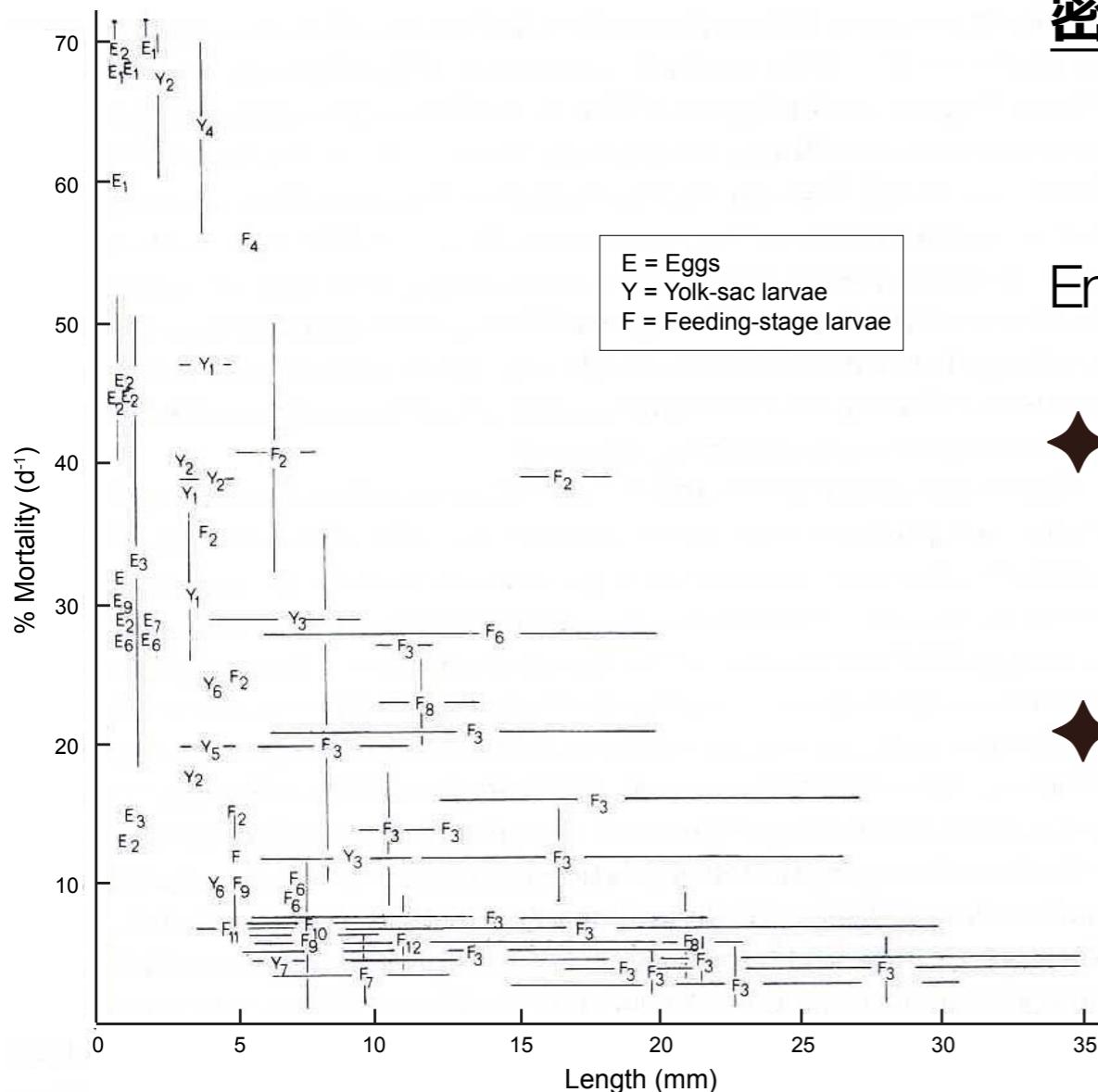
Growth-selective mortality

Stage duration

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度と死亡率



密度独立的な加入率の変動には様々な環境要因と過程が作用し、多くの仮説が提案されている

(例えば、Match/Mismatch, Stable Ocean, Optimal Environmental Window, Growth-mortality, Stage duration)

◆ 諸説あるが根源要因の死亡率についてみると

仔魚死亡率は体長と負の関係（左図）

◆ なぜ体長と関係があるのか？

Bigger is better

Growth-selective mortality

Stage duration

体長一死亡率関係 (Bailey & Houde, 1989)

1. anchovy, 2 mackerel, 3. herring, 4. capelin, 5. flounder, 6. sardine,
7. plaice, 8. shad, 9. haddock, 10. saury, 11. cod, 12. redfish

成長速度が直接的／間接的に寄与

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

餌料

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

餌料

正関係（ただし死亡率が負関係）
(Houde, 1989他)

適水温（ドーム型）
(Takasuka et al., 2007)

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

餌料

正関係（ただし死亡率が負関係）
(Houde, 1989他)

正関係（死亡率も低下；
e.g. Zenitani et al., 2007）

適水温（ドーム型）
(Takasuka et al., 2007)

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

餌料

正関係（ただし死亡率が負関係）
(Houde, 1989他)

正関係（死亡率も低下；
e.g. Zenitani et al., 2007）

適水温（ドーム型）
(Takasuka et al., 2007)

適水温+必要餌密度
(Takahashi et al., 2009)

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

正関係（ただし死亡率が負関係）
(Houde, 1989他)

餌料

正関係（死亡率も低下；
e.g. Zenitani et al., 2007）

乱流

適水温（ドーム型）
(Takasuka et al., 2007)

適水温+必要餌密度
(Takahashi et al., 2009)

最適乱流強度
Rothschild & Osborn (1988)
Kato et al. (2008)

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

正関係（ただし死亡率が負関係）
(Houde, 1989他)

餌料

正関係（死亡率も低下；
e.g. Zenitani et al., 2007）

乱流

適水温（ドーム型）
(Takasuka et al., 2007)

適水温+必要餌密度
(Takahashi et al., 2009)

最適乱流強度
Rothschild & Osborn (1988)
Kato et al. (2008)

現場採集時の成長速度と環境の比較か、飼育実験による検討

環境と成長速度

海洋環境はどのように成長速度に影響しているか？

水温

正関係（ただし死亡率が負関係）
(Houde, 1989他)

餌料

正関係（死亡率も低下；
e.g. Zenitani et al., 2007）

乱流

適水温（ドーム型）
(Takasuka et al., 2007)

適水温+必要餌密度
(Takahashi et al., 2009)

最適乱流強度
Rothschild & Osborn (1988)
Kato et al. (2008)

現場採集時の成長速度と環境の比較か、飼育実験による検討

成長履歴と経験環境の関係を調べることができないか？

耳石日輪分析と粒子追跡実験の組み合わせ

耳石日輪分析

ふ化後数日以降の
日成長速度を推定

耳石日輪分析と粒子追跡実験の組み合わせ

耳石日輪分析

ふ化後数日以降の
日成長速度を推定

粒子追跡実験

個体の受動的輸送を推定し、
経験環境を復元

耳石日輪分析と粒子追跡実験の組み合わせ

耳石日輪分析

ふ化後数日以降の
日成長速度を推定



粒子追跡実験

個体の受動的輸送を推定し、
経験環境を復元

房総沖で採集したマイワシ・カタクチイワシ仔魚を対象に
組み合わせ解析を実施 (Itoh et al., 2010, Fish. Oceanogr.)

耳石日輪分析と粒子追跡実験の組み合わせ

耳石日輪分析

ふ化後数日以降の
日成長速度を推定



粒子追跡実験

個体の受動的輸送を推定し、
経験環境を復元

房総沖で採集したマイワシ・カタクチイワシ仔魚を対象に
組み合わせ解析を実施 (Itoh et al., 2010, Fish. Oceanogr.)

本発表

- ◆ 組み合わせ解析の具体的手順
- ◆ 誤差要因・今後の展開

データ

データ

■ 仔魚採集

- 淡青丸KT-07-6次航海において房総沖の黒潮前線域でMOHT傾斜曳
- マイワシ・カタクチ仔魚の日輪数・日輪間隔
→ Biological intercept法により成長履歴を推定

データ

■ 仔魚採集

- 淡青丸KT-07-6次航海において房総沖の黒潮前線域でMOHT傾斜曳
- マイワシ・カタクチ仔魚の日輪数・日輪間隔
→ Biological intercept法により成長履歴を推定

■ 流動・環境データ

- FRA-JCOPE再解析データ (Komatsu et al., 2005)
- 水平流速・水温

データ

仔魚採集

- 淡青丸KT-07-6次航海において房総沖の黒潮前線域でMOHT傾斜曳
- マイワシ・カタクチ仔魚の日輪数・日輪間隔
→ Biological intercept法により成長履歴を推定

流動・環境データ

- FRA-JCOPE再解析データ (Komatsu et al., 2005)
- 水平流速・水温

産卵場データ

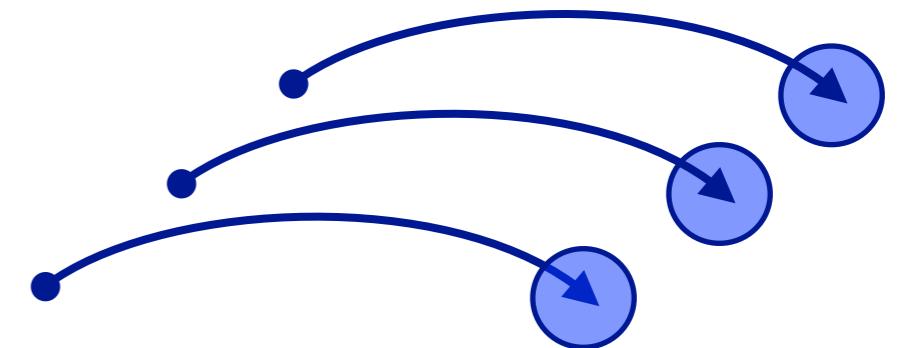
- マイワシ・カタクチイワシ卵分布 (30'升目) (水産総合研究センター)

順追跡と逆追跡

産卵場と輸送先がほぼ 1 対 1 に対応

■ 水平拡散の寄与が小さい場合

- 拡散なしの逆追跡（産卵場推定は決定論的）

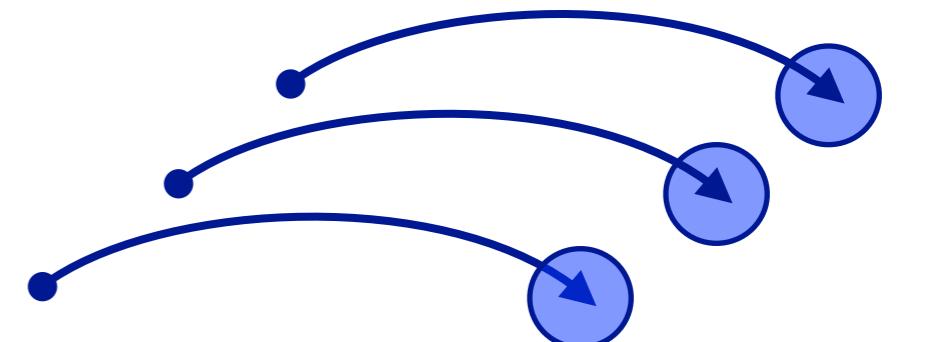


順追跡と逆追跡

産卵場と輸送先がほぼ 1 対 1 に対応

■ 水平拡散の寄与が小さい場合

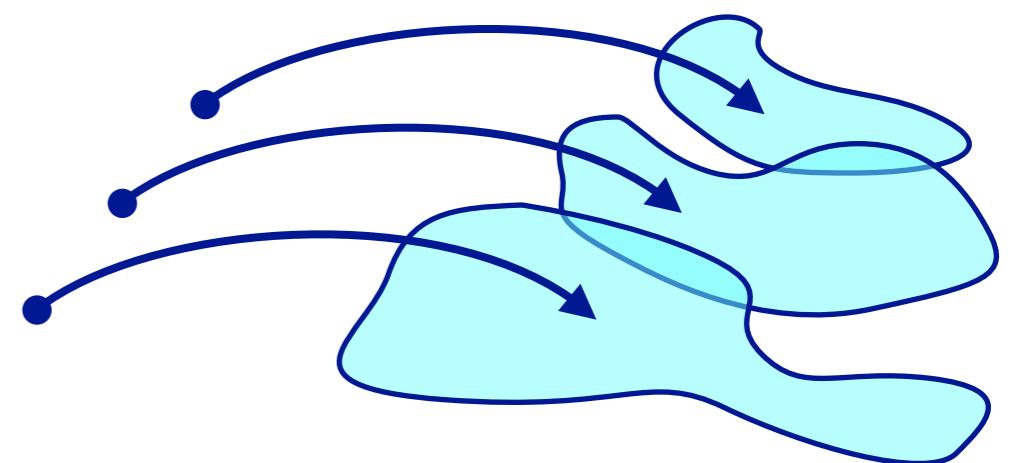
- 拡散なしの逆追跡（産卵場推定は決定論的）



■ 水平拡散の寄与が大きい場合

- (例えば沿岸の産卵場から黒潮への取り込み)

輸送先の分布は非等方的に拡散

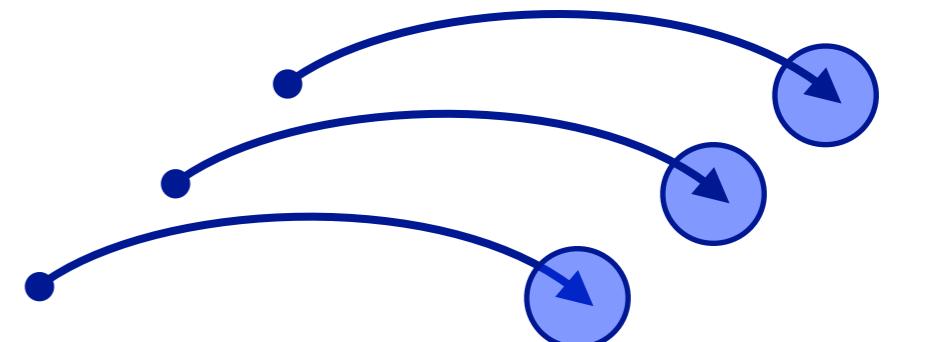


順追跡と逆追跡

産卵場と輸送先がほぼ 1 対 1 に対応

■ 水平拡散の寄与が小さい場合

- 拡散なしの逆追跡（産卵場推定は決定論的）

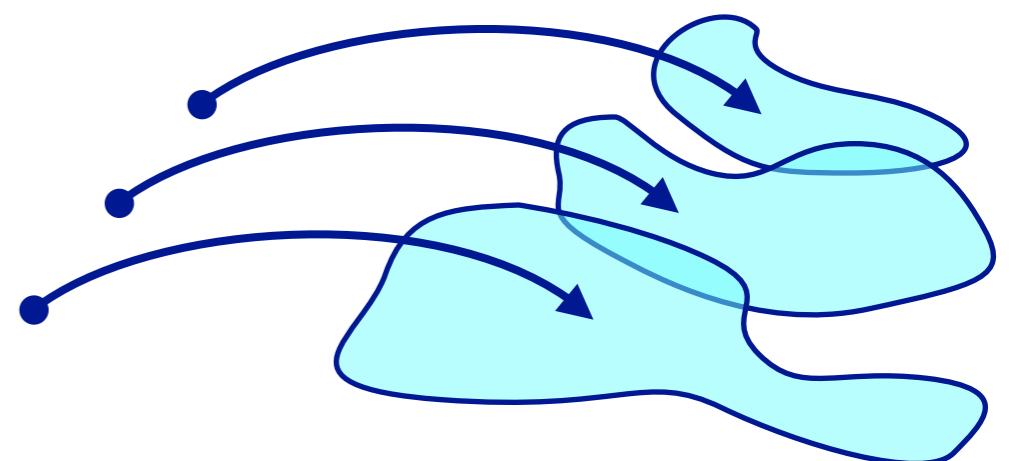


■ 水平拡散の寄与が大きい場合

(例えば沿岸の産卵場から黒潮への取り込み)

- 拡散の考慮が不可欠（産卵場推定は確率論的）

輸送先の分布は非等方的に拡散

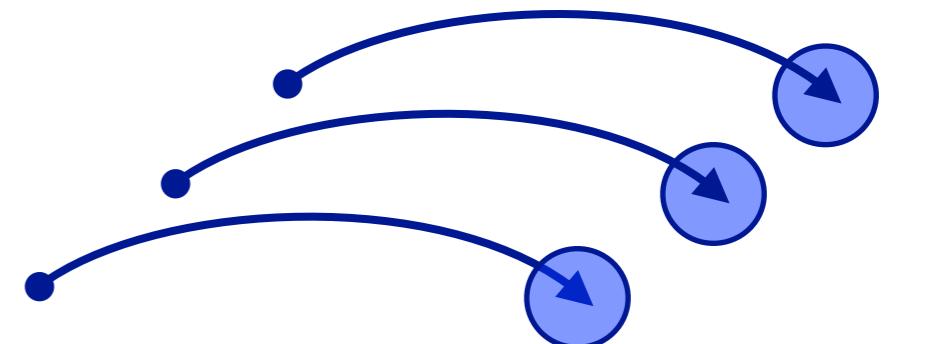


順追跡と逆追跡

産卵場と輸送先がほぼ 1 対 1 に対応

■ 水平拡散の寄与が小さい場合

- 拡散なしの逆追跡（産卵場推定は決定論的）



■ 水平拡散の寄与が大きい場合

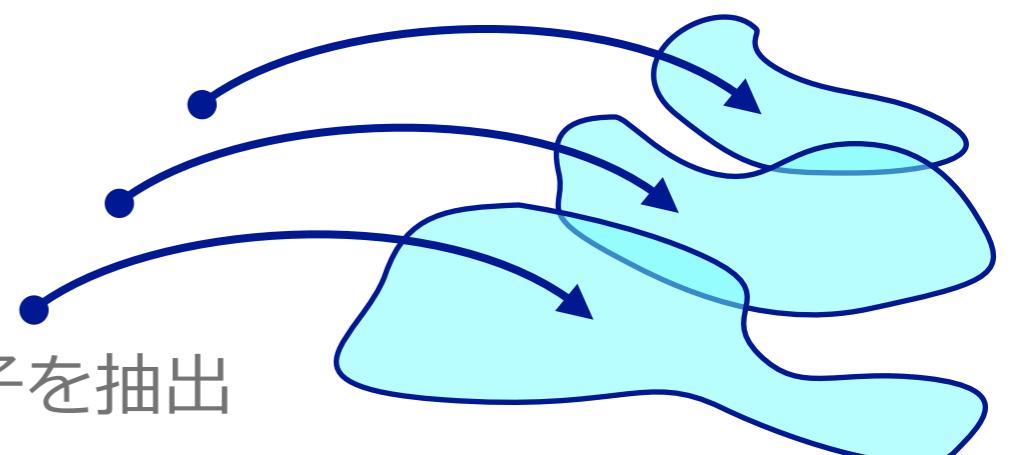
(例えば沿岸の産卵場から黒潮への取り込み)

- 拡散の考慮が不可欠（産卵場推定は確率論的）

● 順追跡：

全産卵場から順輸送、採集地点に到達する粒子を抽出
何を持って「到達」と定義するか？

輸送先の分布は非等方に拡散

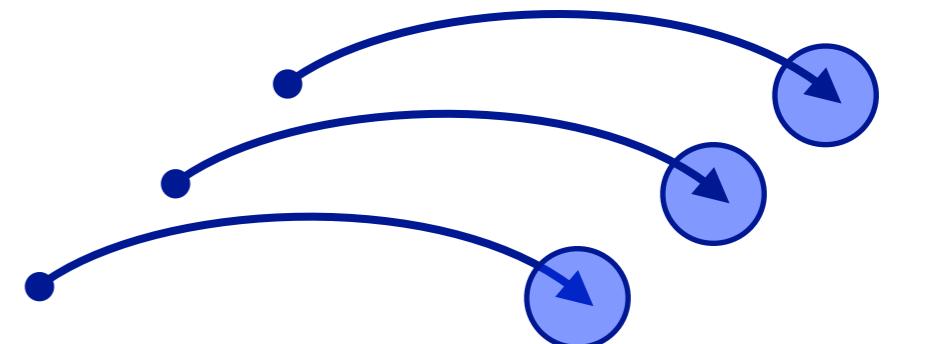


順追跡と逆追跡

産卵場と輸送先がほぼ 1 対 1 に対応

■ 水平拡散の寄与が小さい場合

- 拡散なしの逆追跡（産卵場推定は決定論的）



■ 水平拡散の寄与が大きい場合

(例えば沿岸の産卵場から黒潮への取り込み)

- 拡散の考慮が不可欠（産卵場推定は確率論的）

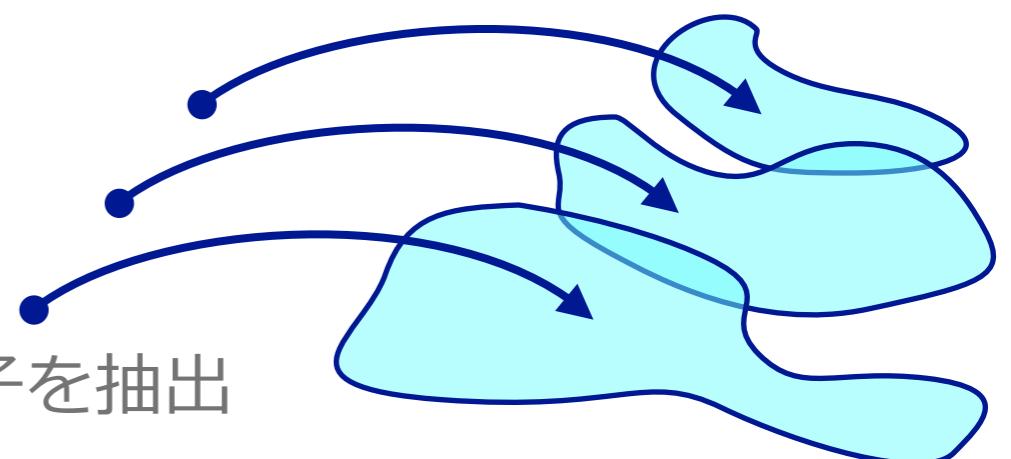
● 順追跡：

全産卵場から順輸送、採集地点に到達する粒子を抽出
何を持って「到達」と定義するか？

● 逆追跡（本研究）：

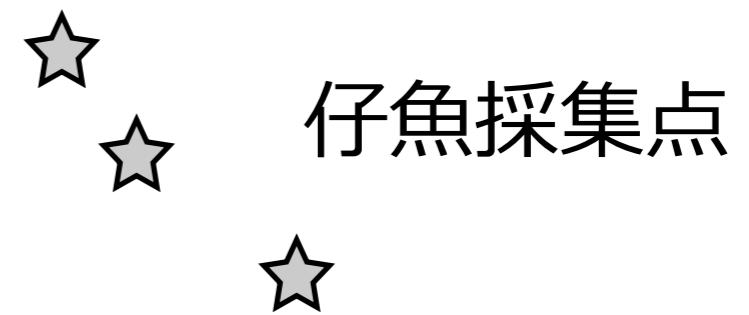
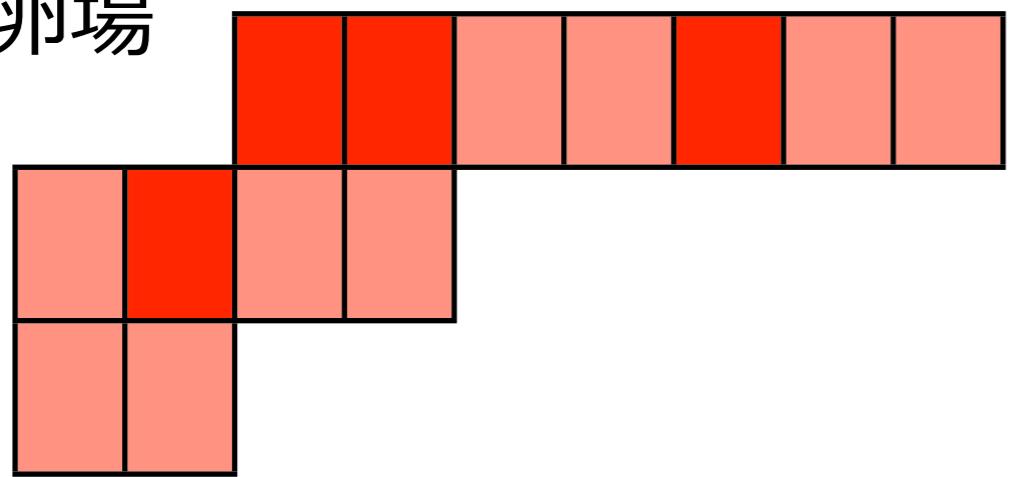
採集地点から逆輸送し、産卵場に到達する粒子を抽出
産卵場と輸送粒子分布の合成が容易／計算量も限定的

輸送先の分布は非等方的に拡散

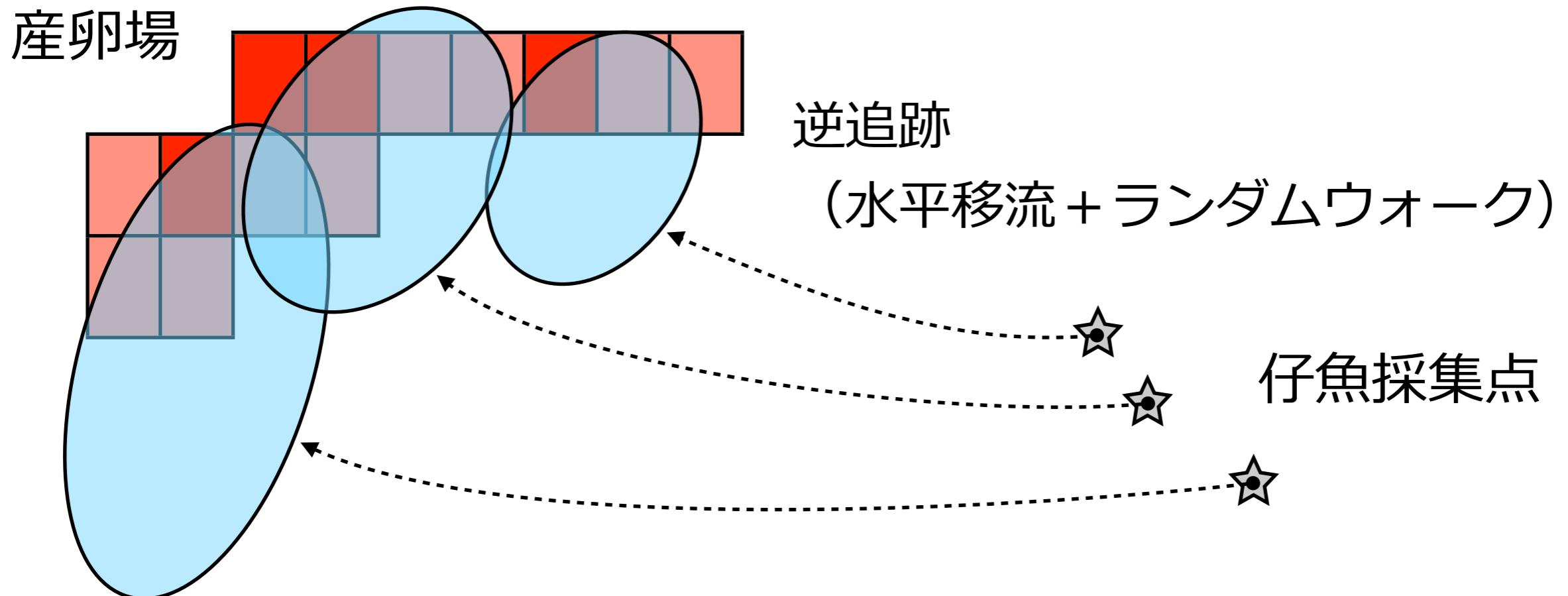


確率密度の合成

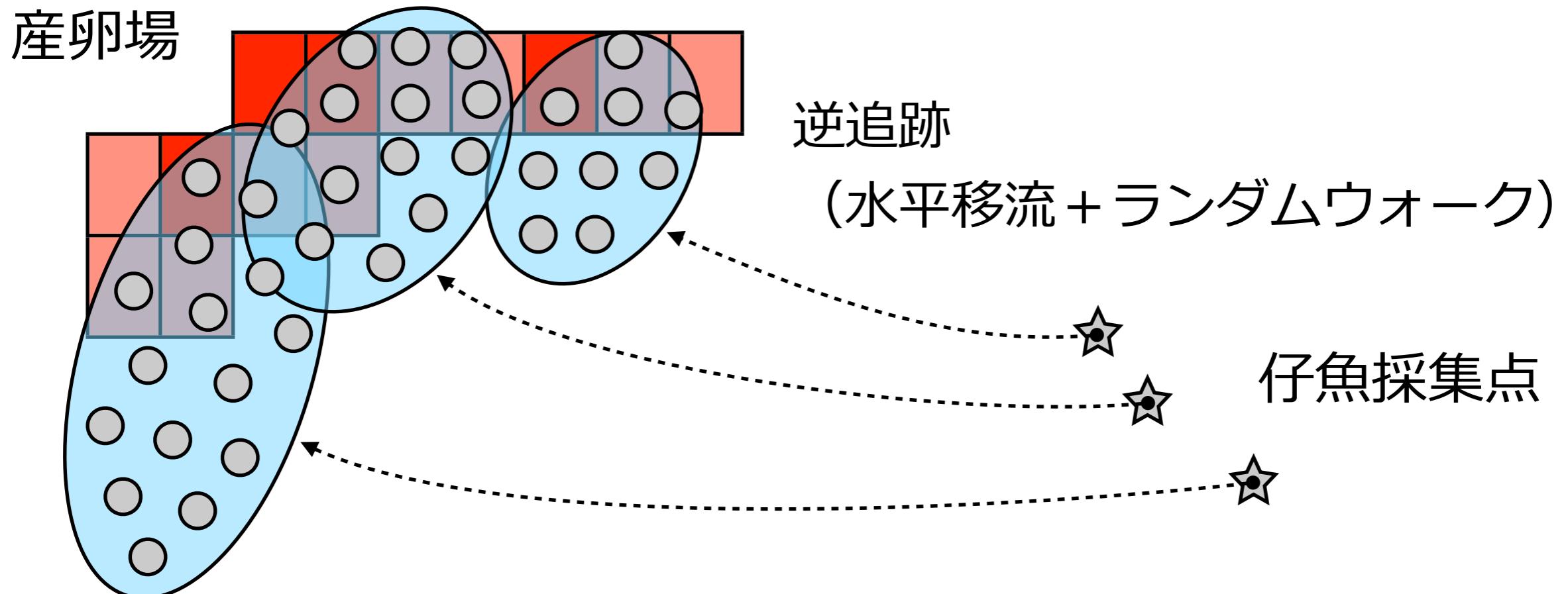
産卵場



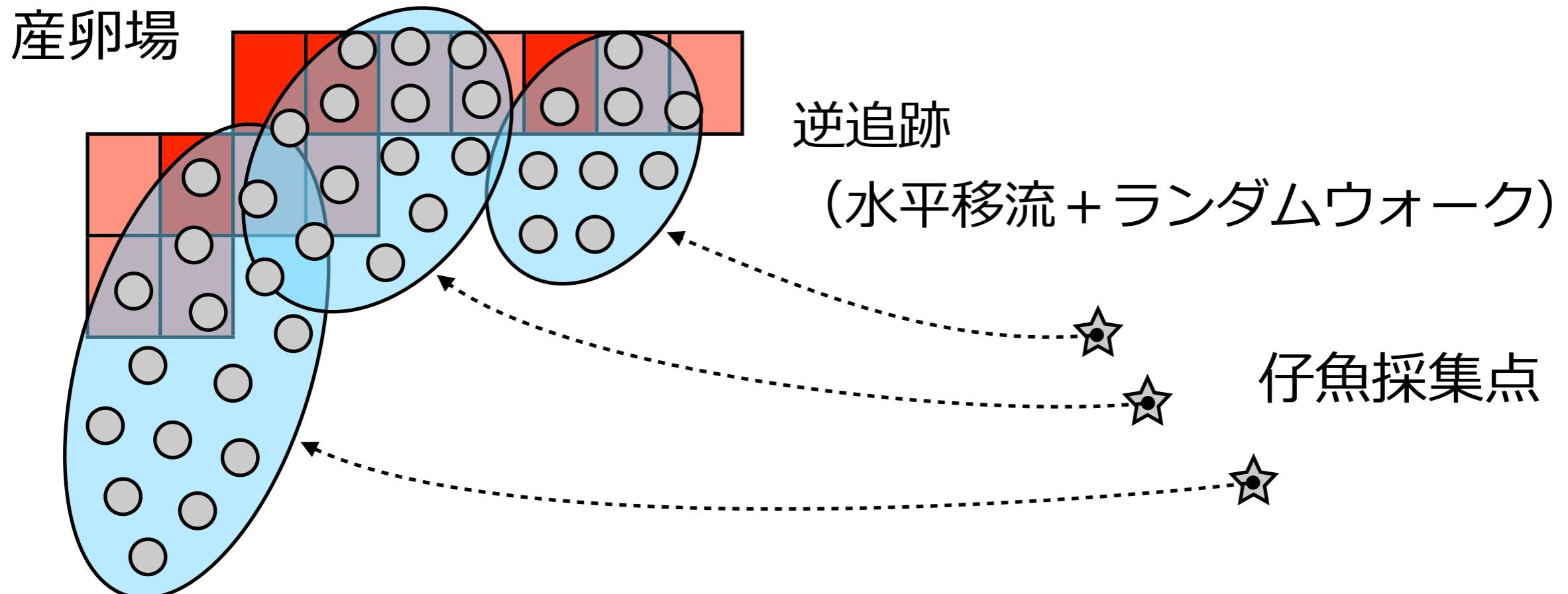
確率密度の合成



確率密度の合成



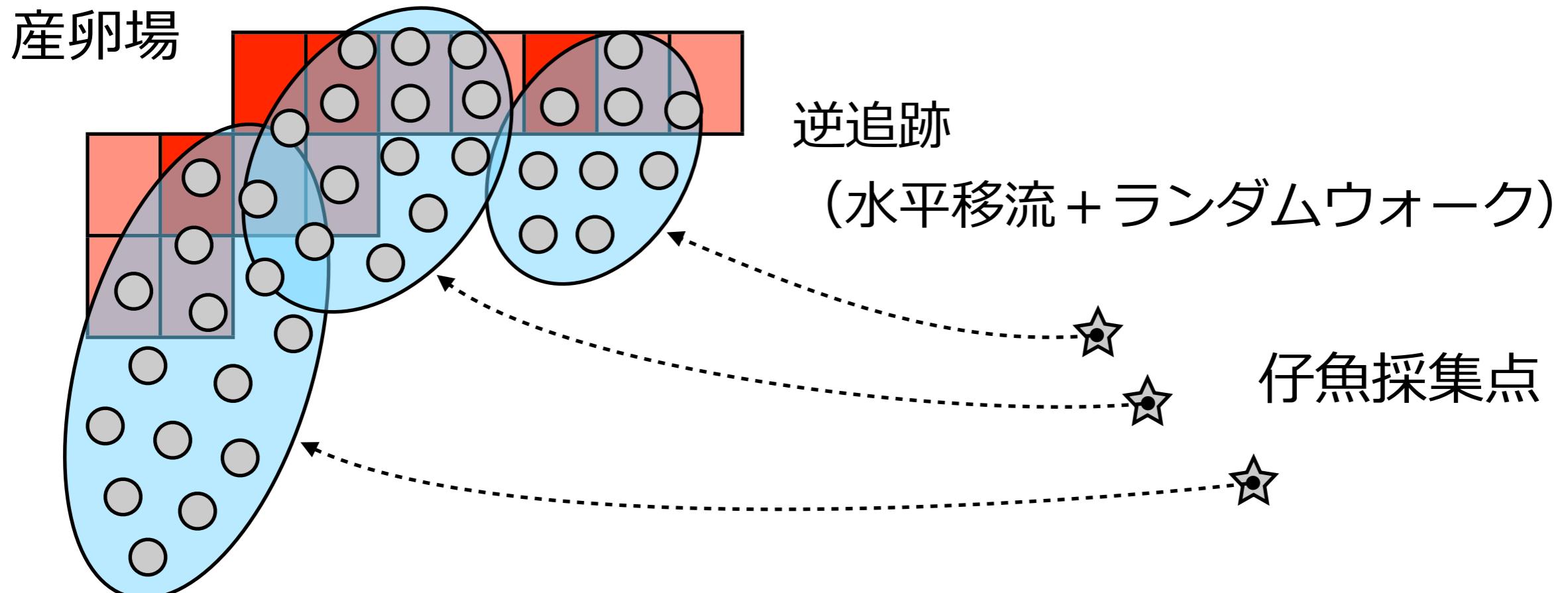
確率密度の合成



(1)

- ◆ i 番目の粒子の位置・水温 : $X_i(t), Y_i(t), T_i(t)$ (各粒子の確率密度 $P_0 = 1/N$)
- ◆ i 番目の粒子が推定産卵日に到達した升目の卵量 : e_i

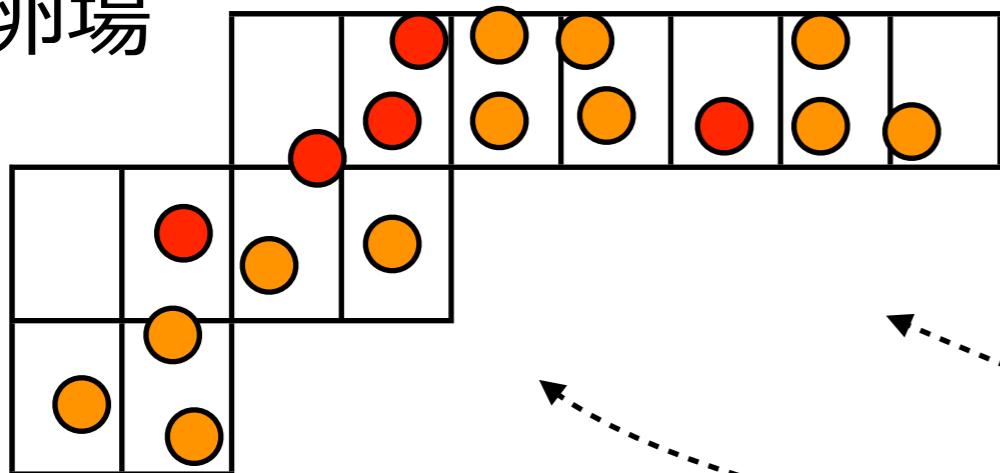
確率密度の合成



(2) 各粒子を推定産卵量で重み付け: $P_i = e_i / \sum e_i$

確率密度の合成

産卵場



逆追跡

(水平移流 + ランダムウォーク)



仔魚採集点

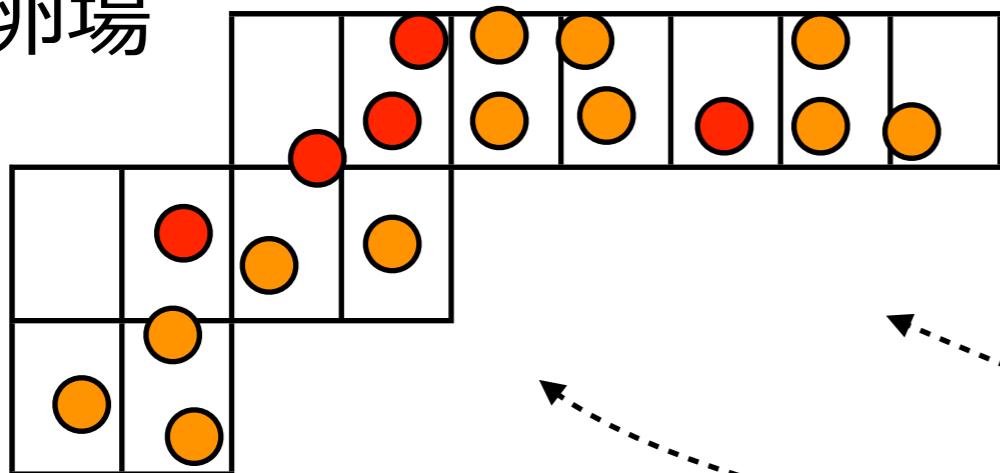
(1)

- ◆ i 番目の粒子の位置・水温 : $X_i(t), Y_i(t), T_i(t)$ (各粒子の確率密度 $P_0 = 1/N$)
- ◆ i 番目の粒子が推定産卵日に到達した升目の卵量 : e_i

(2) 各粒子を推定産卵量で重み付け: $P_i = e_i / \sum e_i$

確率密度の合成

産卵場



逆追跡

(水平移流 + ランダムウォーク)

仔魚採集点



(1)

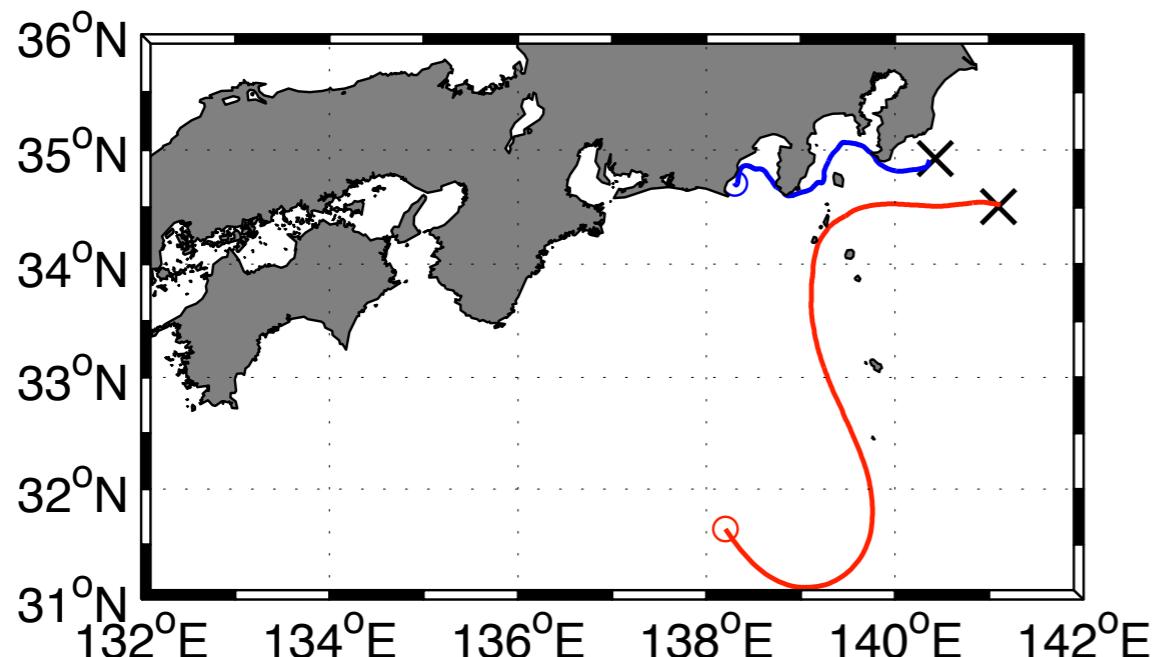
- ◆ i 番目の粒子の位置・水温 : $X_i(t), Y_i(t), T_i(t)$ (各粒子の確率密度 $P_0 = 1/N$)
- ◆ i 番目の粒子が推定産卵日に到達した升目の卵量 : e_i

(2) 各粒子を推定産卵量で重み付け: $P_i = e_i / \sum e_i$

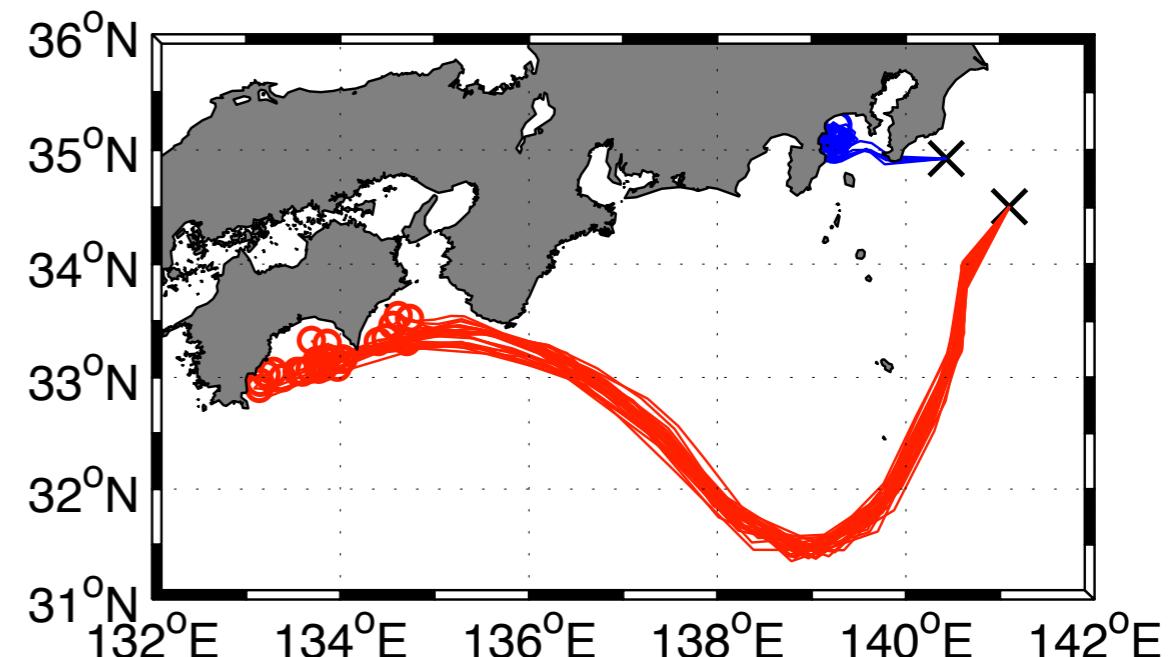
(3) 各採集点に到達する仔魚の経験水温期待値 $= T_e(t) = \sum \{P_i * T_i(t)\}$

マイワシ推定産卵場（特定個体の例）

移流のみの逆追跡（参考）



拡散と産卵場分布を考慮



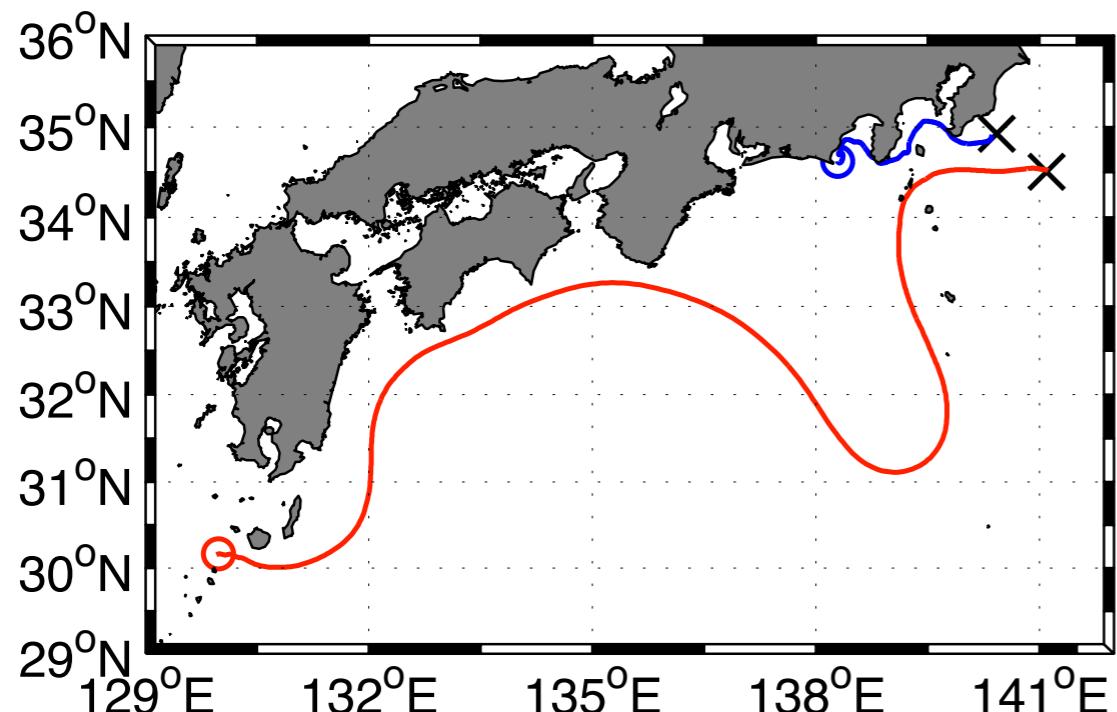
逆追跡による産卵場からの輸送経路推定

（沿岸：17日齢、沖合：15日齢）

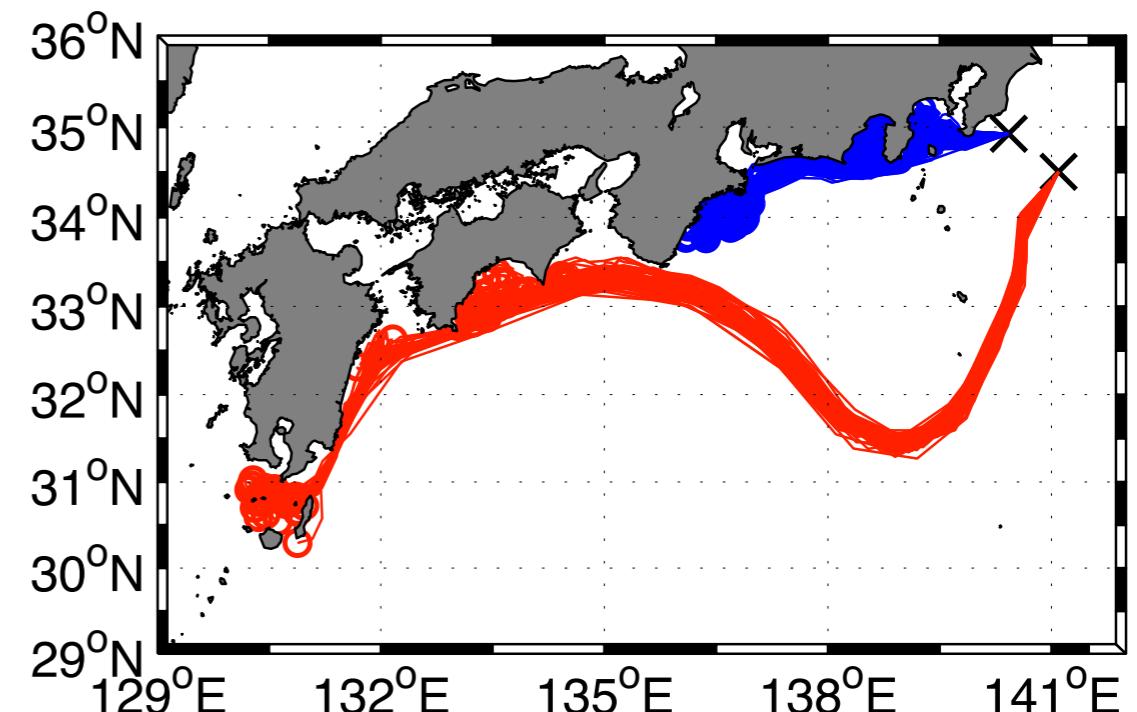
拡散を考慮しない移流のみの逆追跡（左）では
産卵場のない海域を産卵点として推定

カタクチイワシ推定産卵場（特定個体の例）

移流のみの逆追跡（参考）



拡散と産卵場分布を考慮



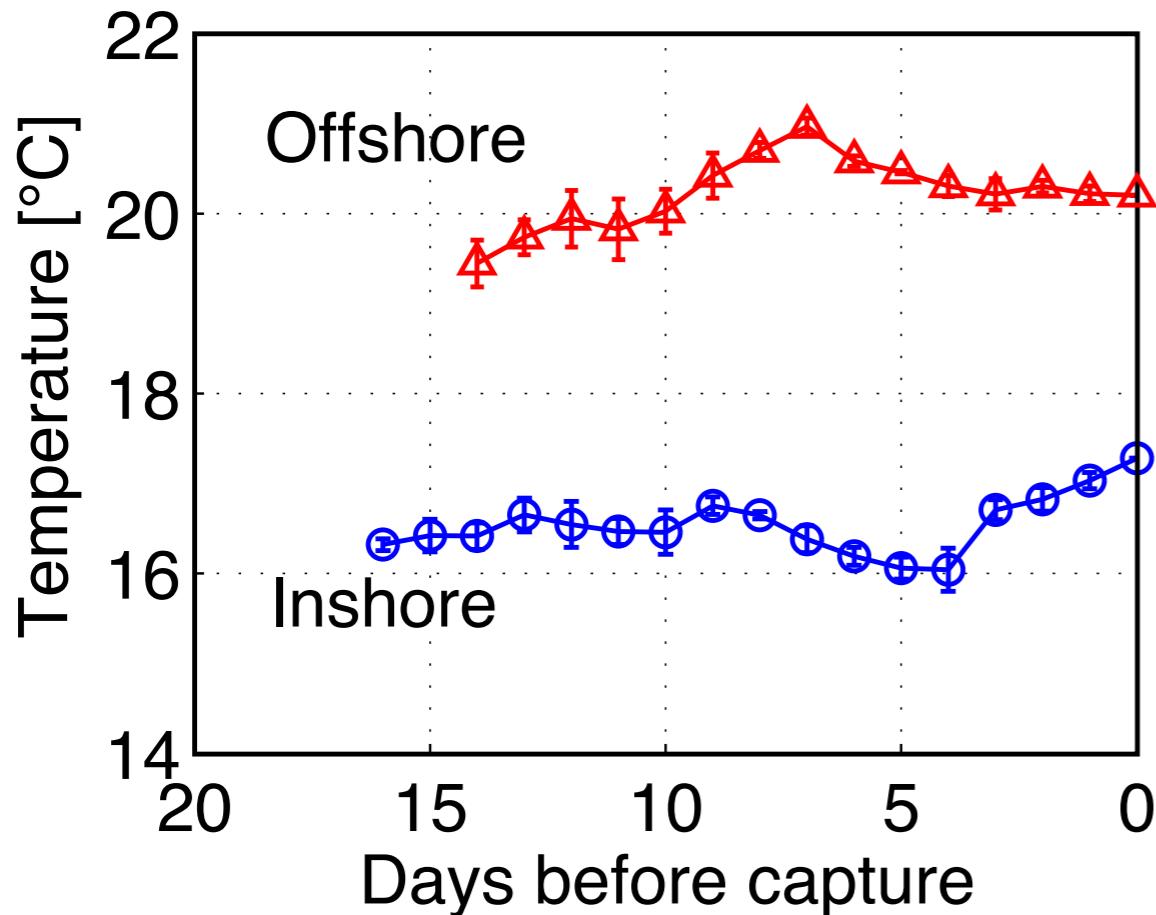
逆追跡による産卵場からの輸送経路推定

（沿岸：20日齢、沖合：25日齢）

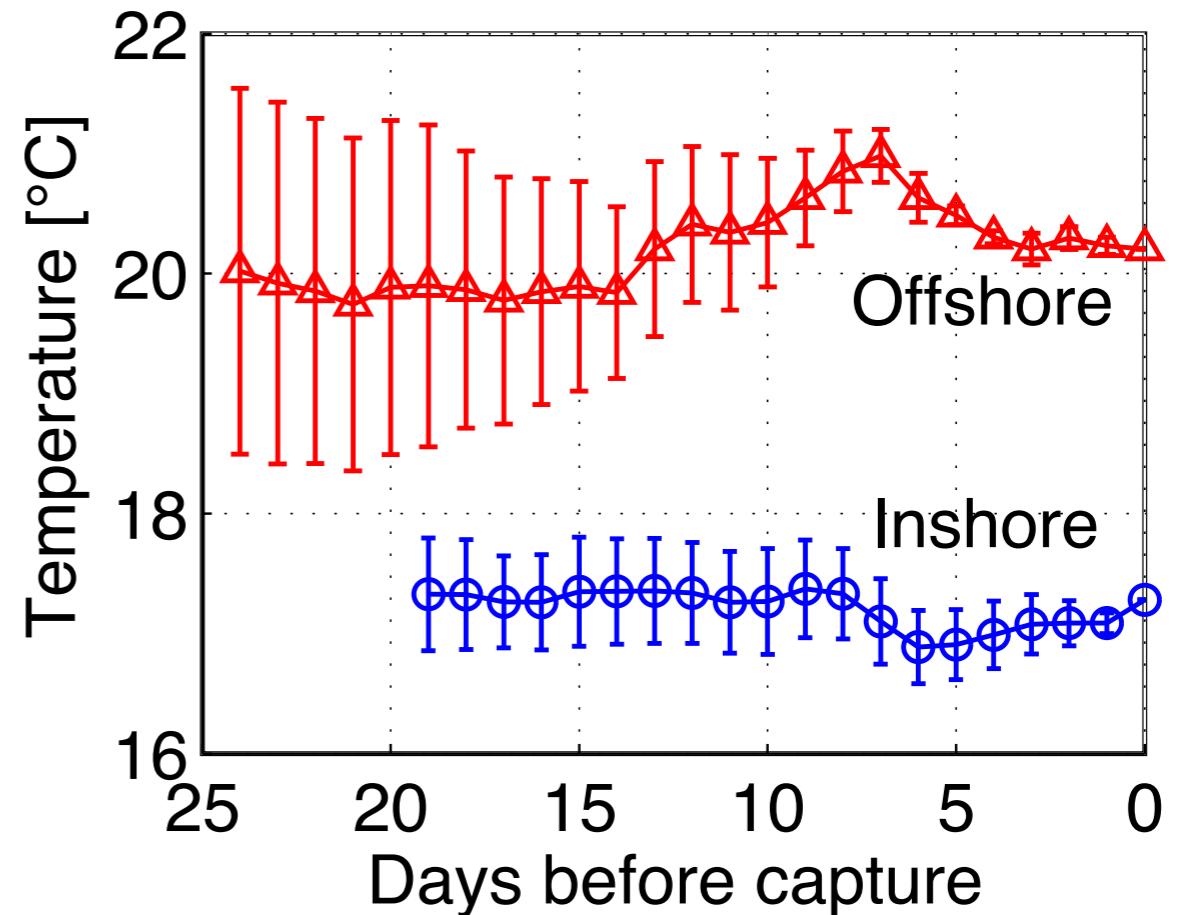
産卵場が広いため推定幅が大きい

復元経験水温

マイワシ



カタクチイワシ

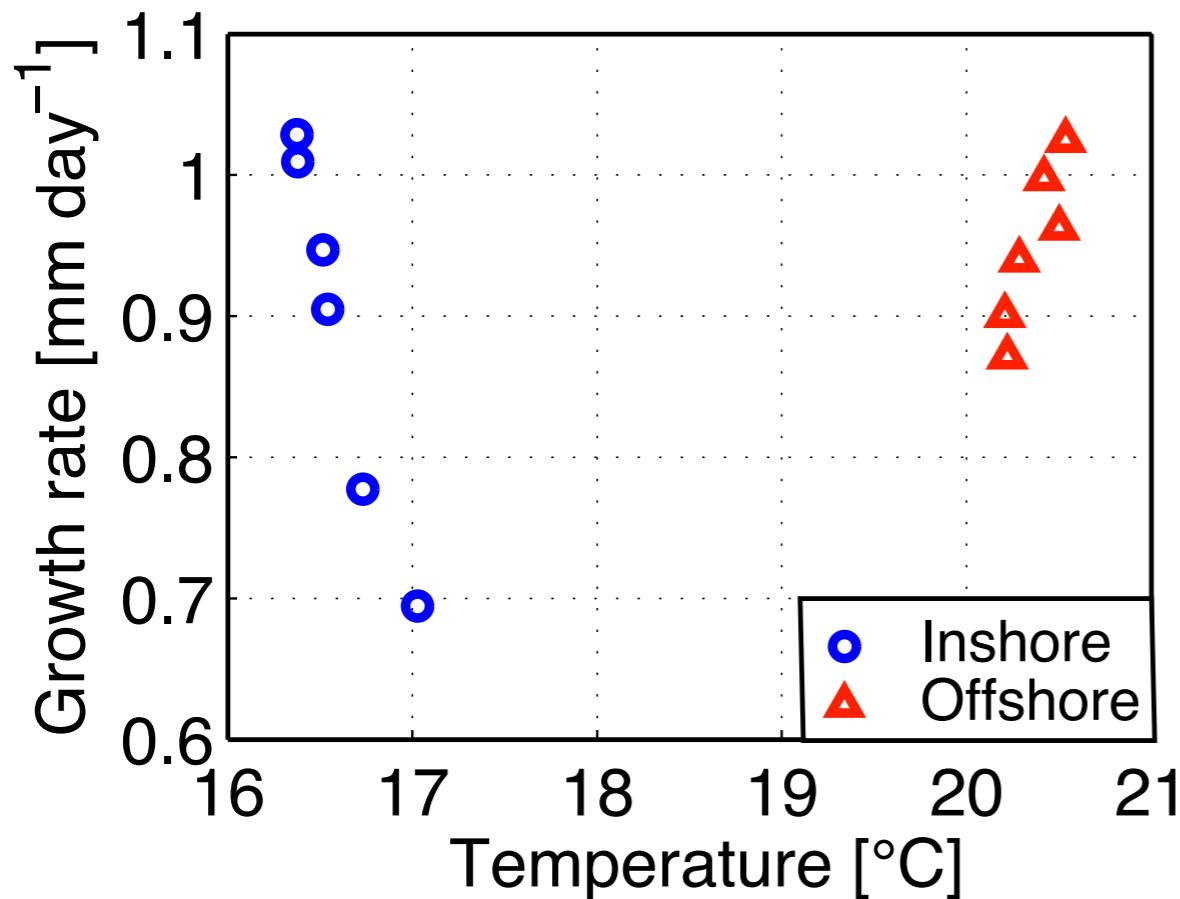


輸送経路とモデル水温から推定した経験水温

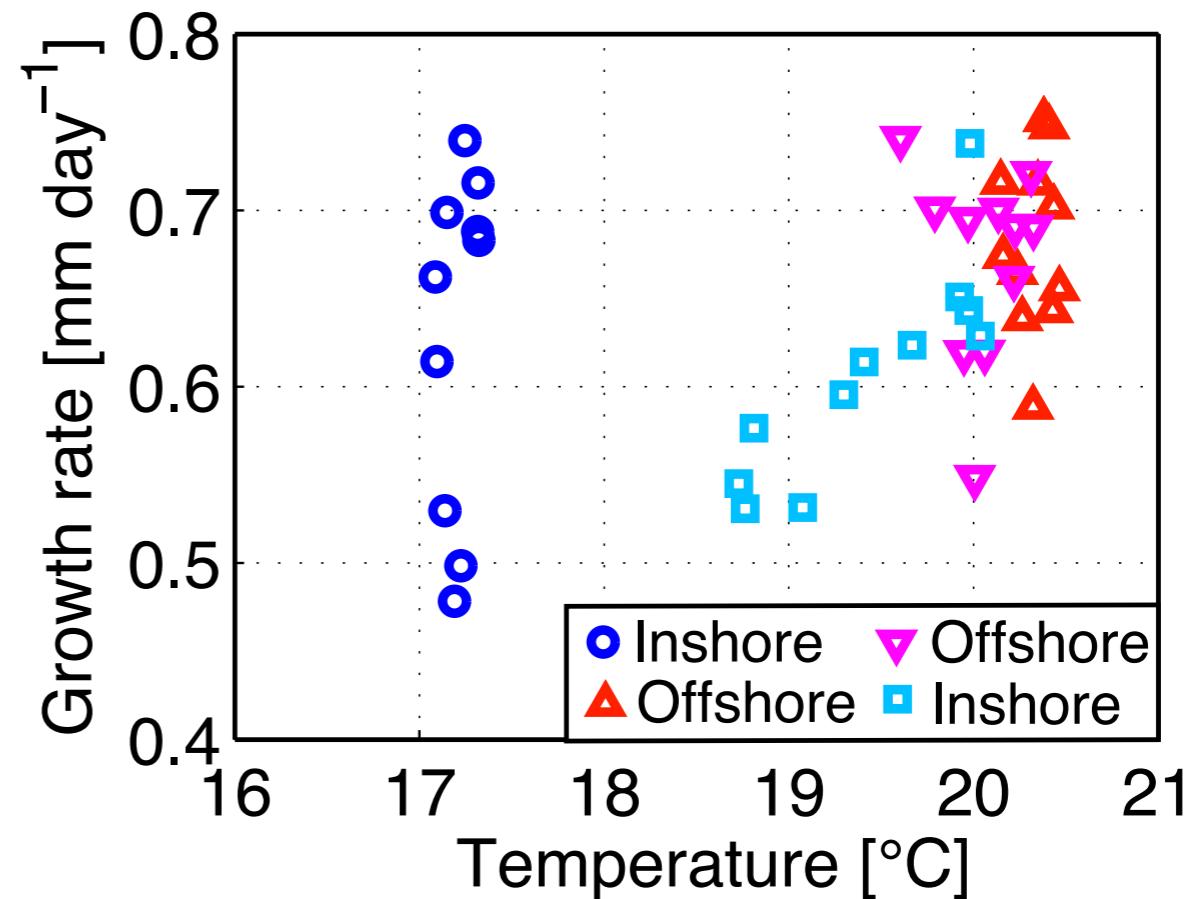
エラーバーは標準偏差 (標準誤差はこのケースでは0.2°C未満)

経験水温 vs 成長履歴

マイワシ



カタクチイワシ



粒子追跡から推定した環境水温と
耳石日輪間隔から推定した成長速度の関係

誤差要因と展望

誤差要因と展望

■ 誤差要因

誤差要因と展望

■ 誤差要因

- 粒子輸送深度（本研究では10 m固定）
→ 0–50 mで輸送経路は大差なし。水温も本質的な差異なし。

誤差要因と展望

■ 誤差要因

- 粒子輸送深度（本研究では10 m固定）
→ 0–50 mで輸送経路は大差なし。水温も本質的な差異なし。
- 流速・水温精度 = FRA-JCOPE精度
→ データが存在する海域では問題なし。一部の沿岸域は？

誤差要因と展望

■ 誤差要因

- 粒子輸送深度（本研究では10 m固定）
→ 0–50 mで輸送経路は大差なし。水温も本質的な差異なし。
- 流速・水温精度 = FRA-JCOPE精度
→ データが存在する海域では問題なし。一部の沿岸域は？
- 流速・水温／産卵量解像度
→ subgrid渦は分解しない／産卵場広いので確率密度で推定
個体ベースの期待値推定精度は<<1°C。同一採集群でも<0.5°C。

誤差要因と展望

■ 誤差要因

- 粒子輸送深度（本研究では10 m固定）
→ 0–50 mで輸送経路は大差なし。水温も本質的な差異なし。
- 流速・水温精度 = FRA-JCOPE精度
→ データが存在する海域では問題なし。一部の沿岸域は？
- 流速・水温／産卵量解像度
→ subgrid渦は分解しない／産卵場広いので確率密度で推定
個体ベースの期待値推定精度は<<1°C。同一採集群でも<0.5°C。

■ 展望

誤差要因と展望

■ 誤差要因

- 粒子輸送深度（本研究では10 m固定）
→ 0–50 mで輸送経路は大差なし。水温も本質的な差異なし。
- 流速・水温精度 = FRA-JCOPE精度
→ データが存在する海域では問題なし。一部の沿岸域は？
- 流速・水温／産卵量解像度
→ subgrid渦は分解しない／産卵場広いので確率密度で推定
個体ベースの期待値推定精度は<<1°C。同一採集群でも<0.5°C。

■ 展望

- 衛星海面高度データの存在する1993年以降なら同様の解析が可能

誤差要因と展望

■ 誤差要因

- 粒子輸送深度（本研究では10 m固定）
→ 0–50 mで輸送経路は大差なし。水温も本質的な差異なし。
- 流速・水温精度 = FRA-JCOPE精度
→ データが存在する海域では問題なし。一部の沿岸域は？
- 流速・水温／産卵量解像度
→ subgrid渦は分解しない／産卵場広いので確率密度で推定
個体ベースの期待値推定精度は<<1°C。同一採集群でも<0.5°C。

■ 展望

- 衛星海面高度データの存在する1993年以降なら同様の解析が可能
- マイワシ、カタクチイワシ以外の魚種については?
(データの特性上ごく沿岸域の分布だと誤差が大きくなってしまう?)