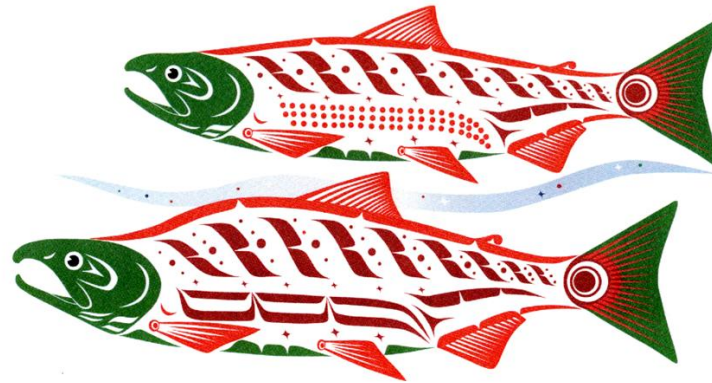


地球温暖化がサケに及ぼす影響



© Clarence Mills

帰山 雅秀

北海道大学北極域研究センター

トピックス

- はじめに：地球温暖化の現状と日本系サケの回遊
- 地球温暖化の危機にさらされている日本のサケ
- 私たちがサケから学ぶこと～次世代に残すために



● 地球温暖化の現状

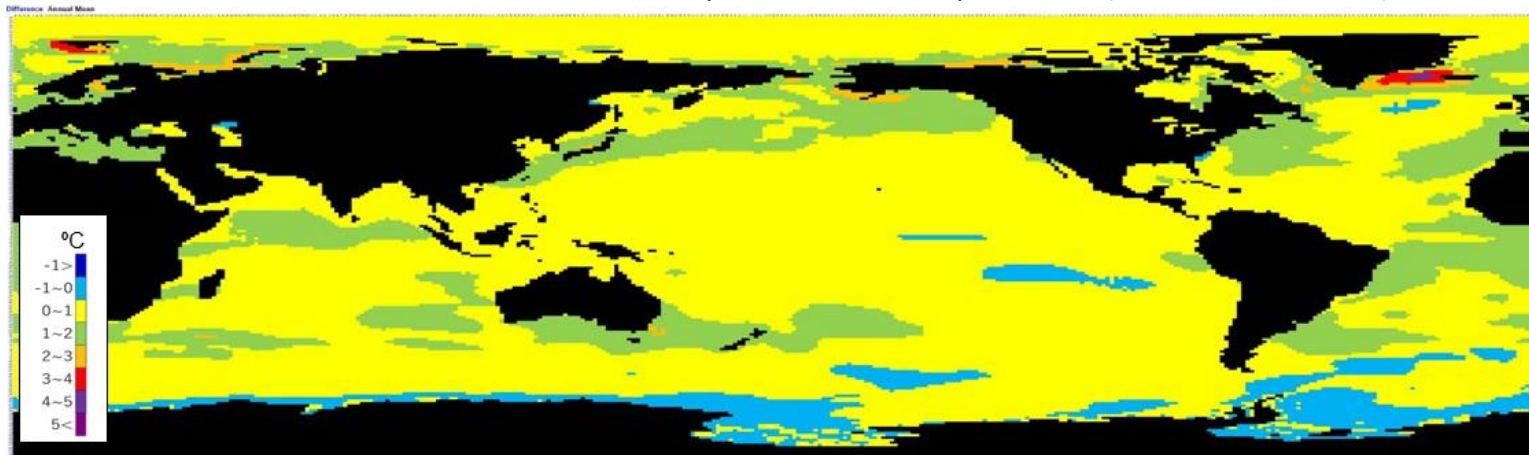
■ IPCC-WG1AR6 (2021)

- 人間の影響が大気、海洋および陸域を温暖化させてきたことに疑いの余地はない

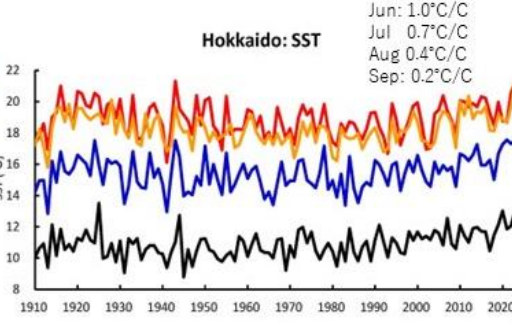
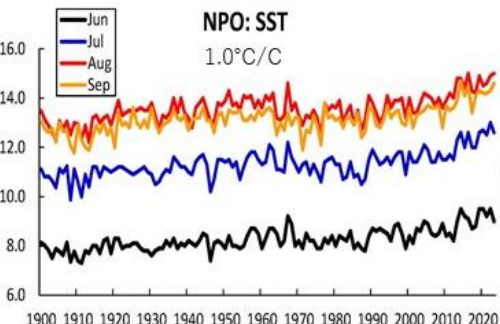
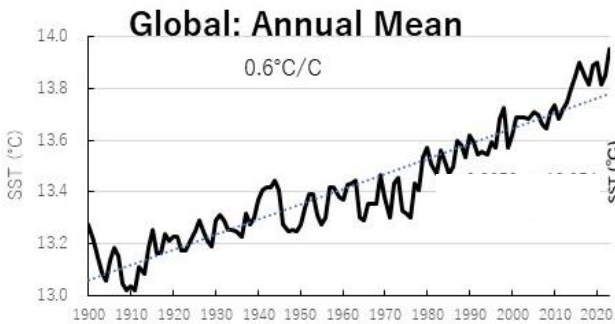
■ IPCC統合報告書(2023)

- 気候変動は人間の幸福と惑星の健康に対する脅威であり、私たちは持続可能な将来を確保する機会の窓を急速に閉ざそうとしている

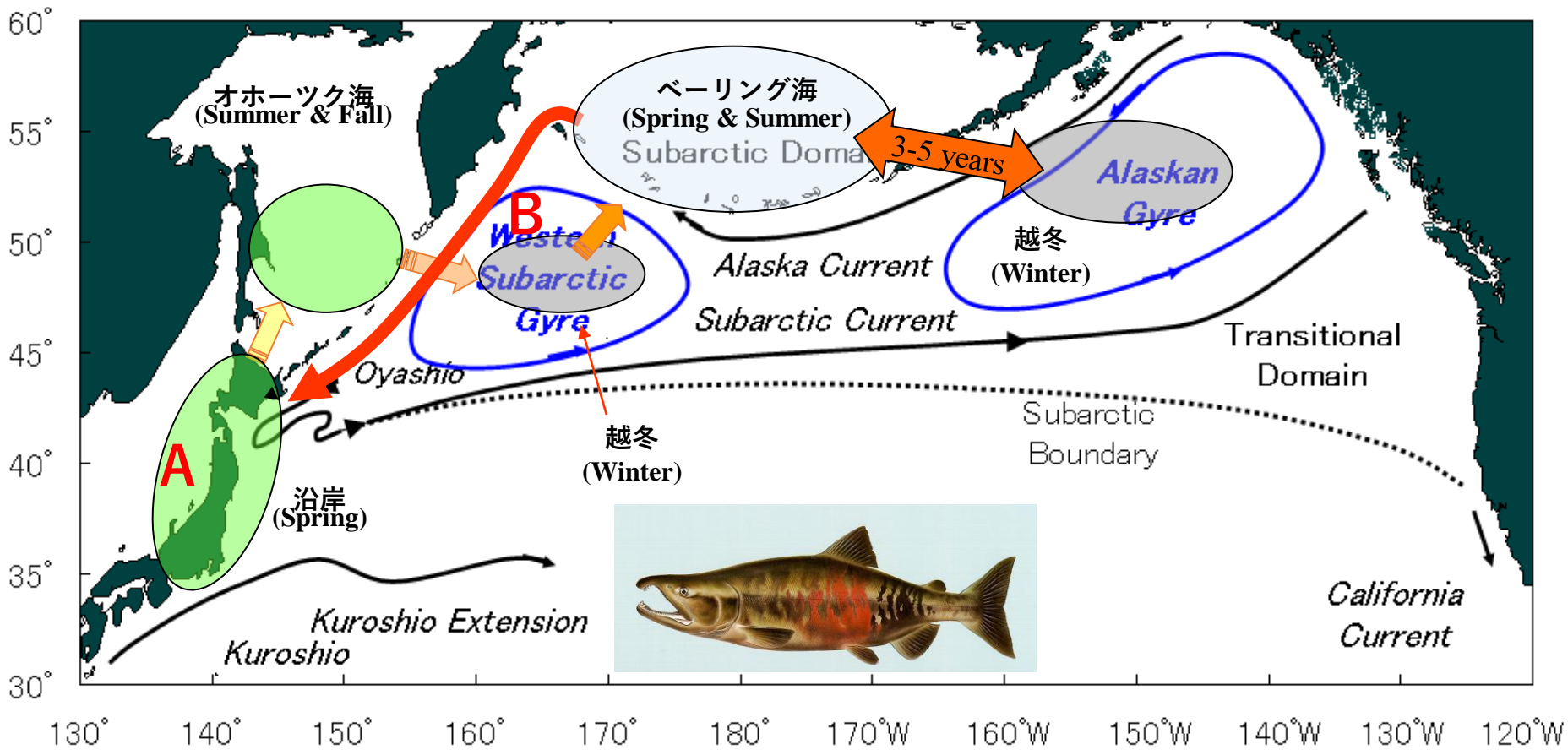
● 全球の10年平均SST：2020年代と1900年代の差 (Data: COBE-SST2)



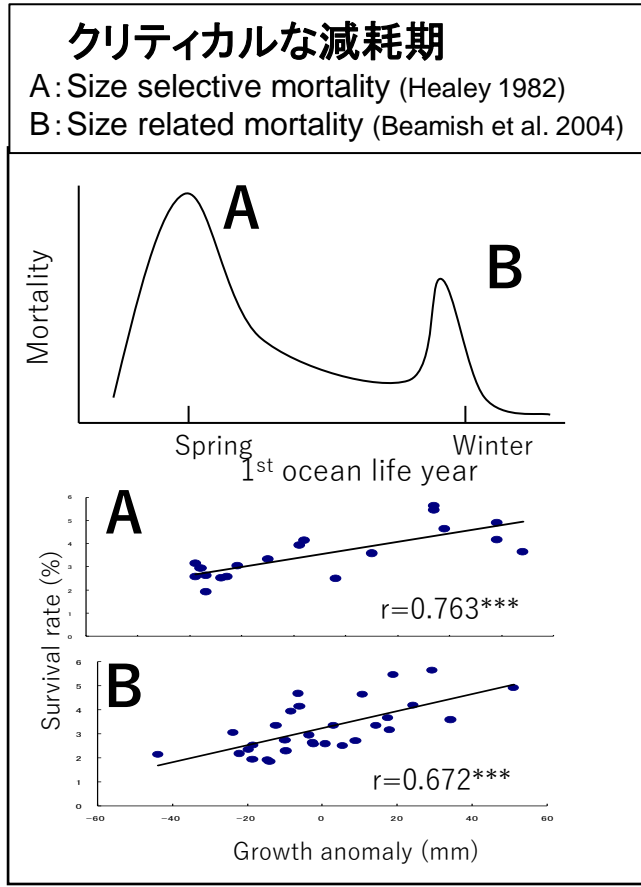
Mendenhall Glacier, Juneau, Alaska



● 日本系サケの回遊ルートと減耗期

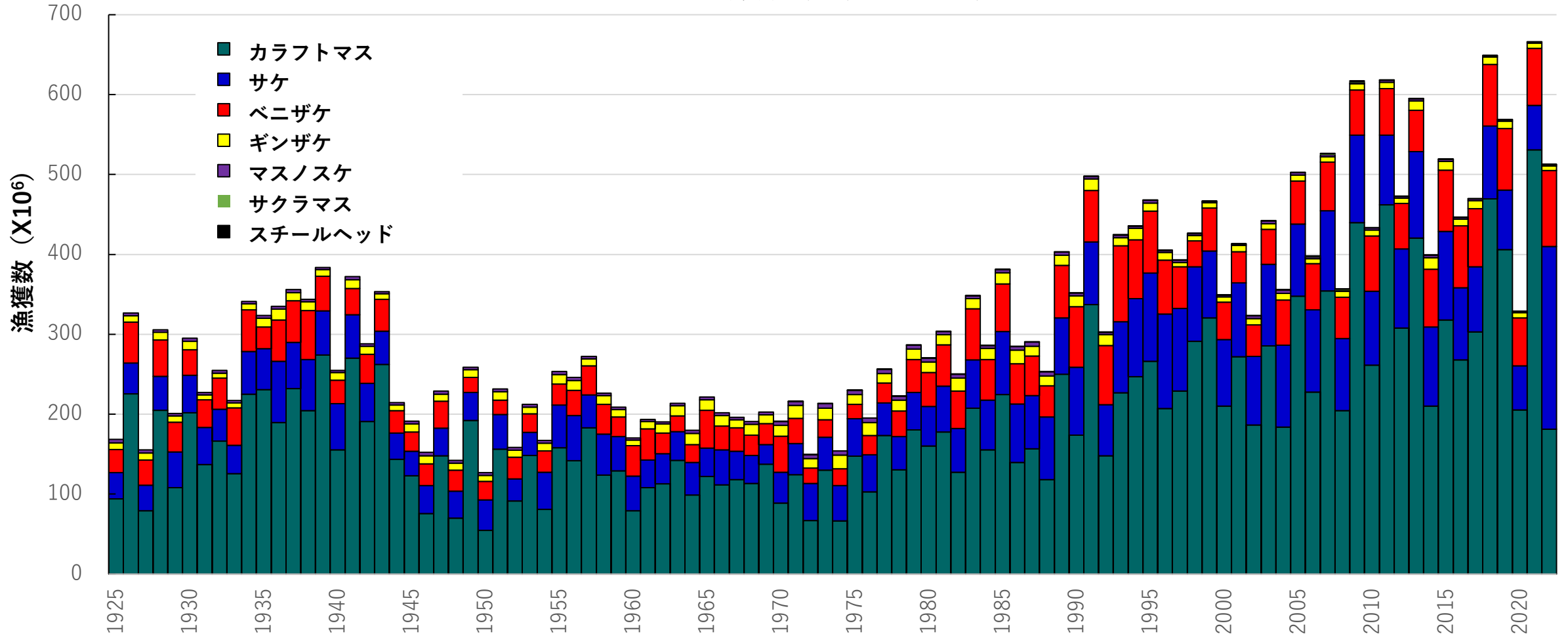


Modified from Urawa (2000)



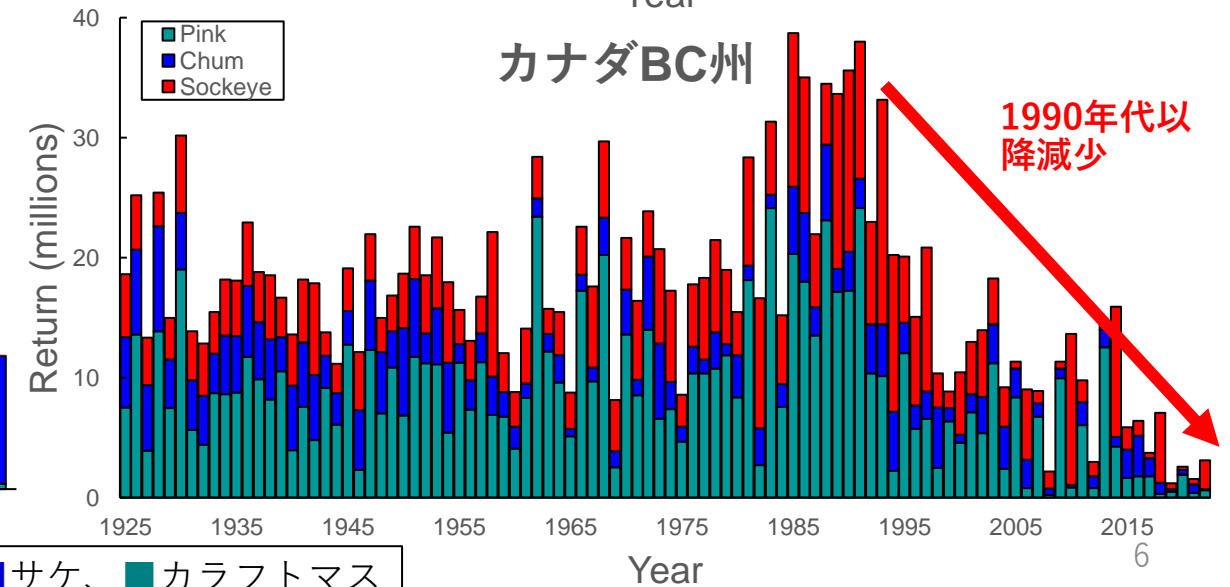
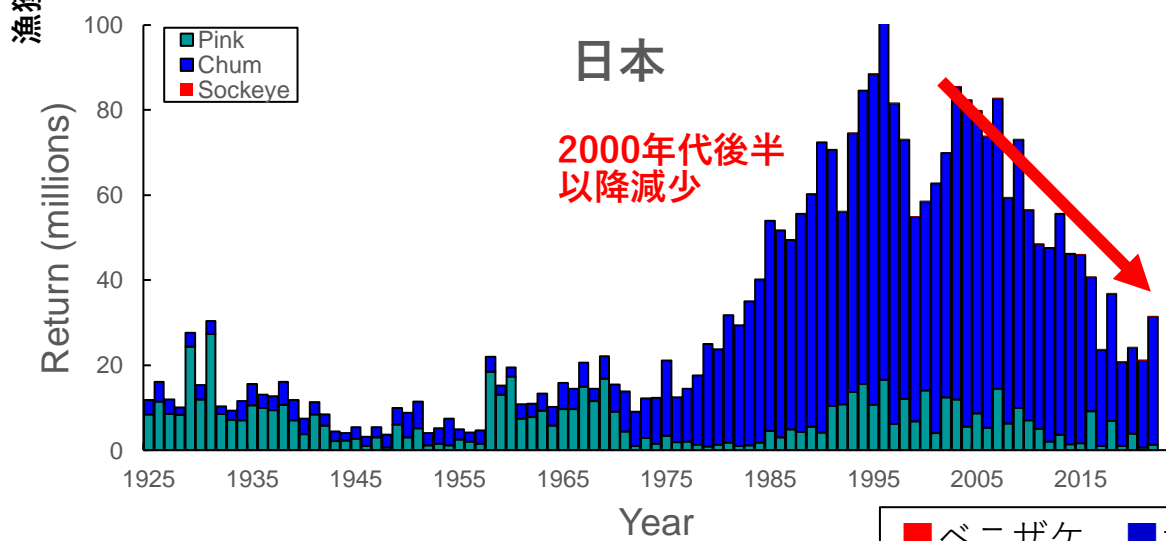
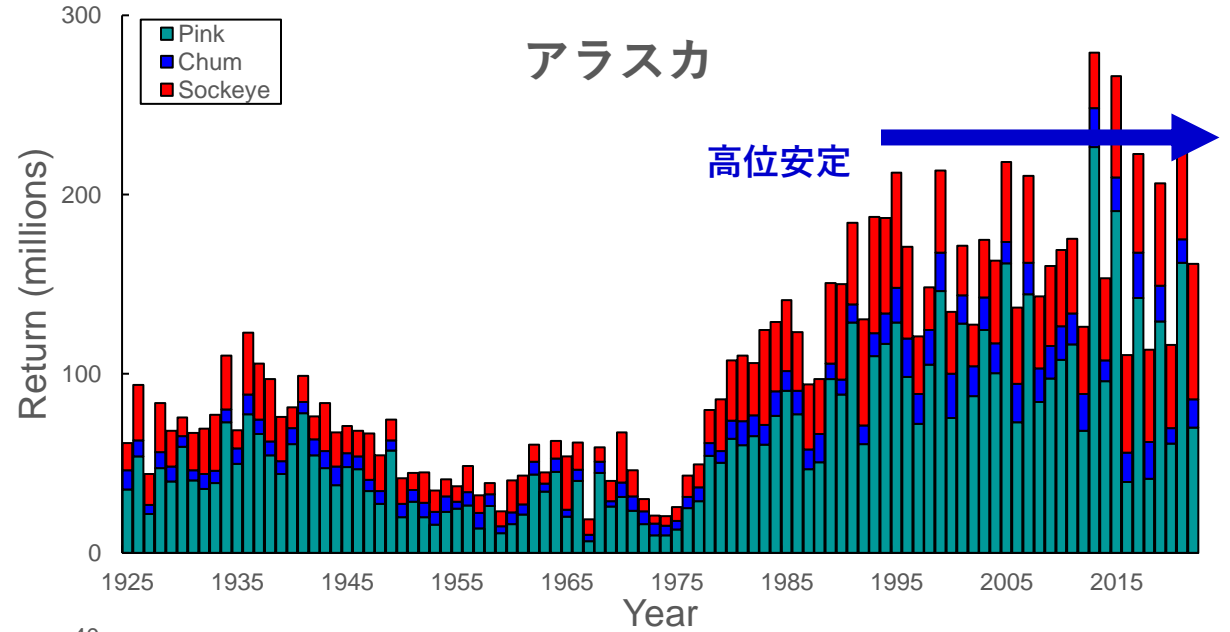
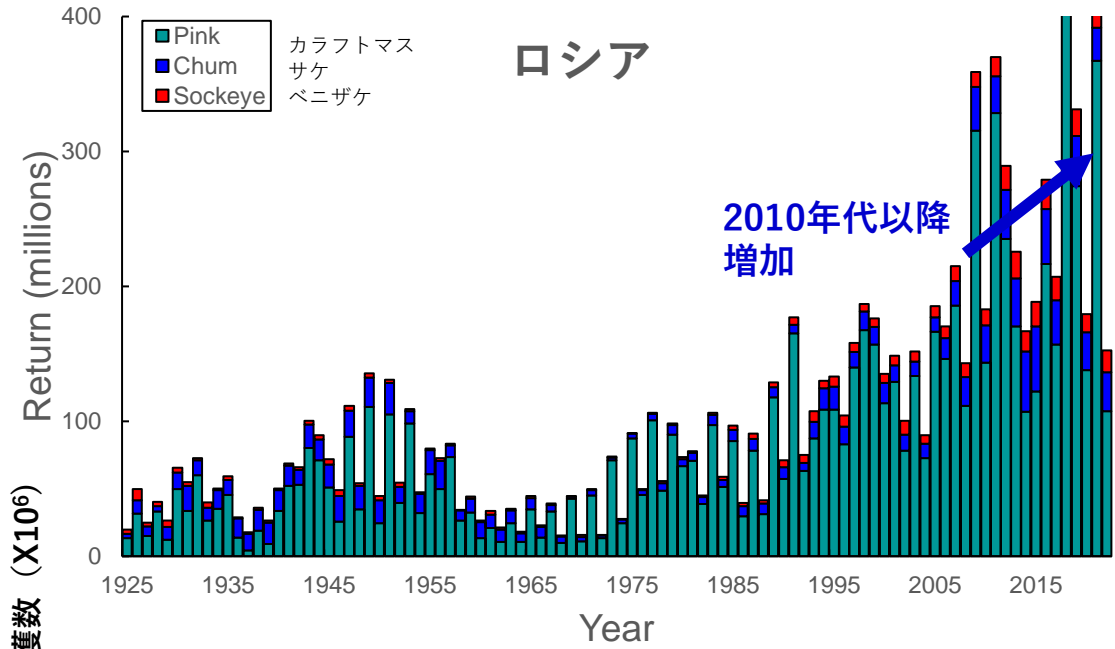
● 地球温暖化の危機にさらされている日本のサケ

■ 北太平洋におけるサケ類漁獲数の経年変化 (Database: NPAFC)



● 北太平洋におけるサケ、カラフトマスおよびベニザケの回帰数の経年変化

Database: NPAFC

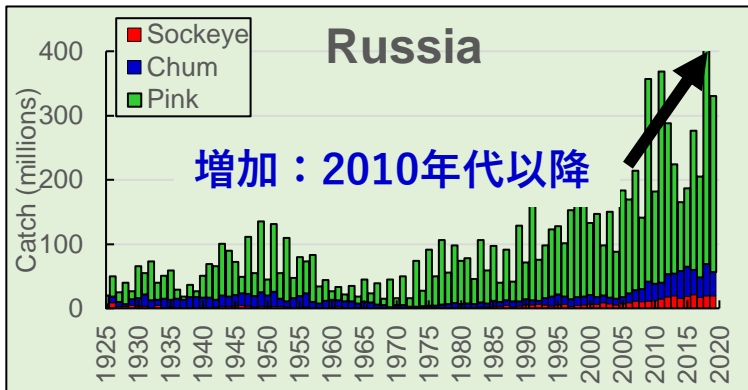


ベニザケ、サケ、カラフトマス

● 1970～2020年代6月&7月，北太平洋におけるサケの適・最適水温エリアの変化

June

July



1970s

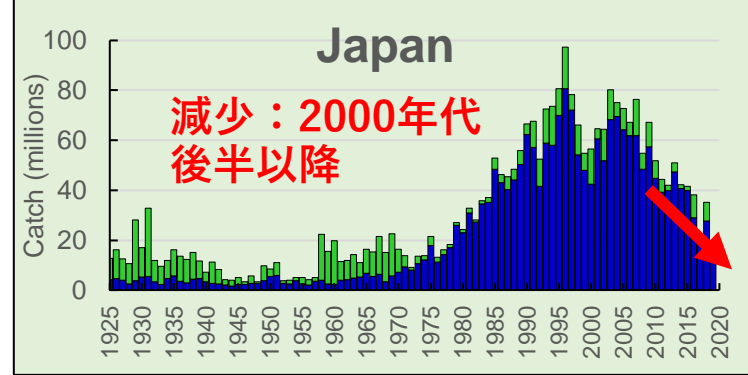
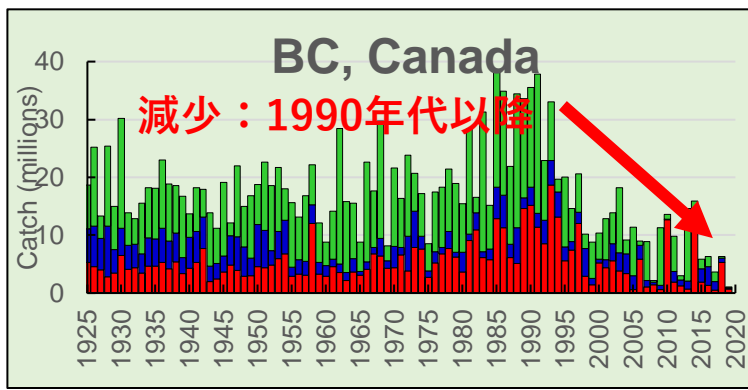
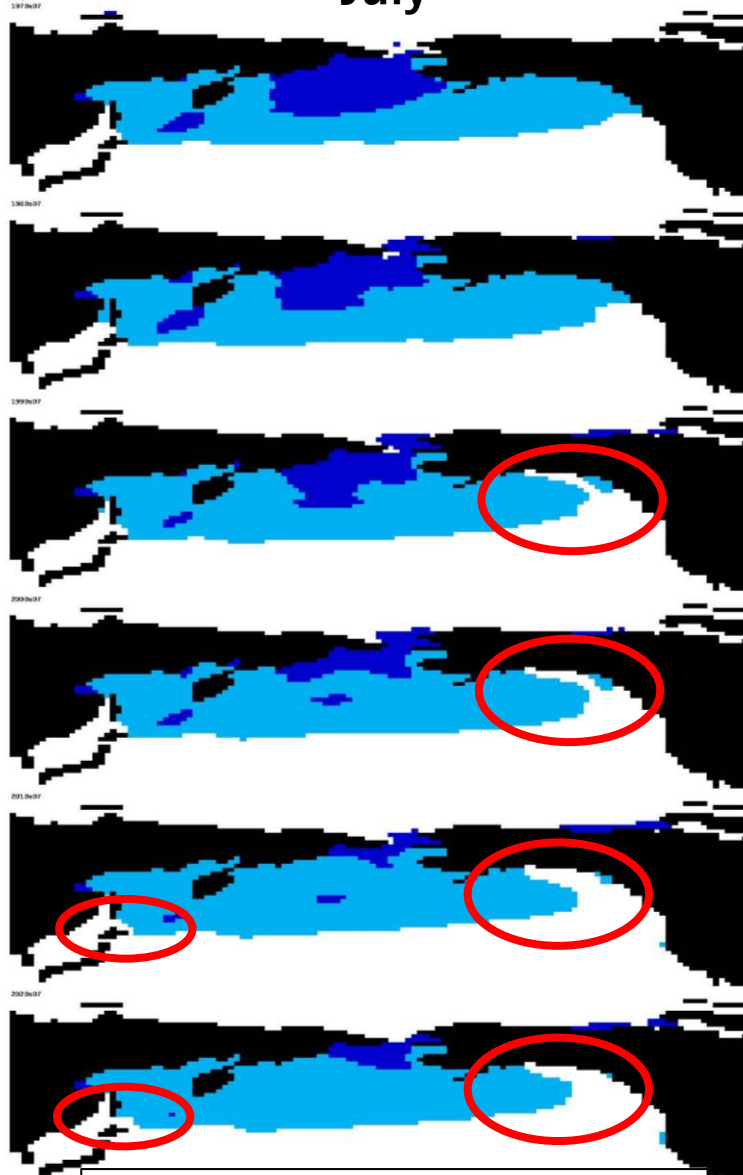
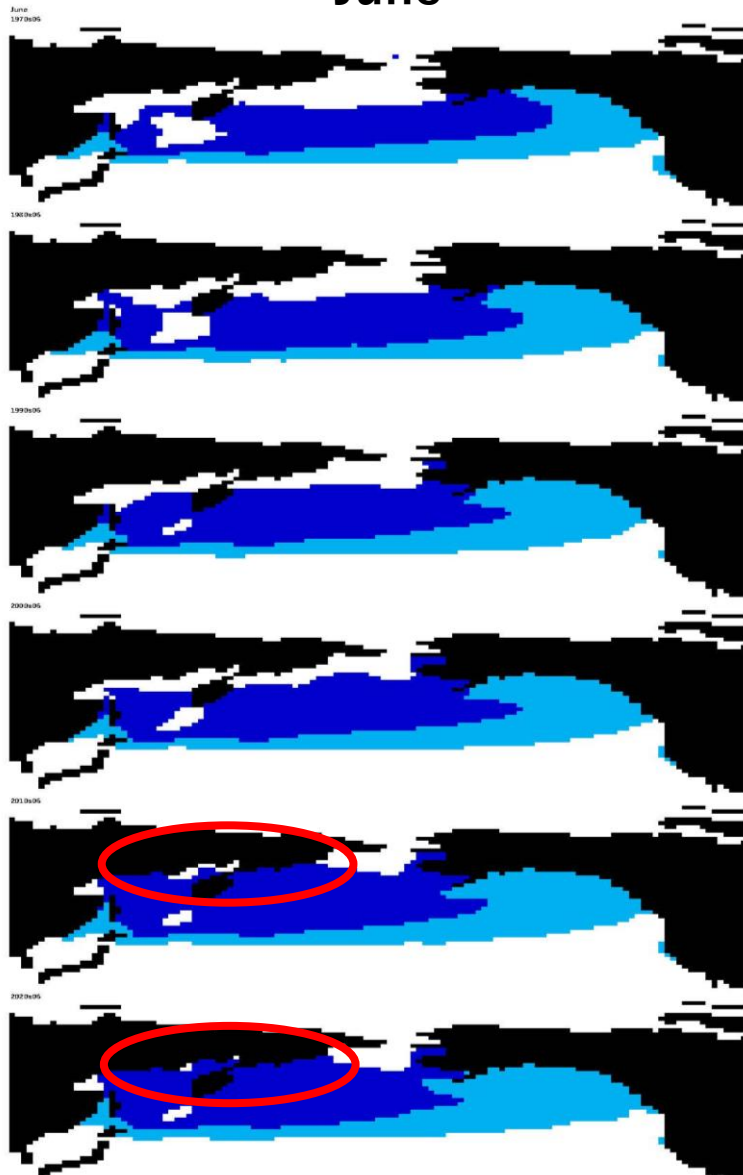
1980s

1990s

2000s

2010s

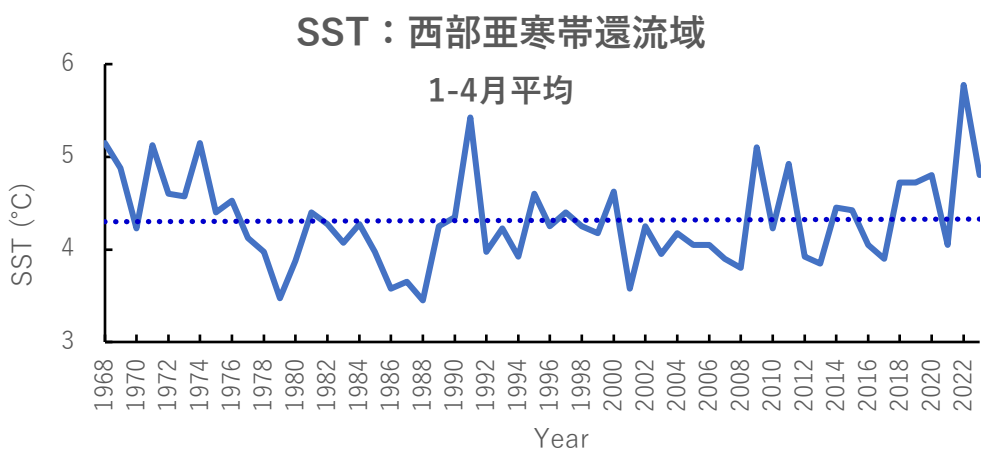
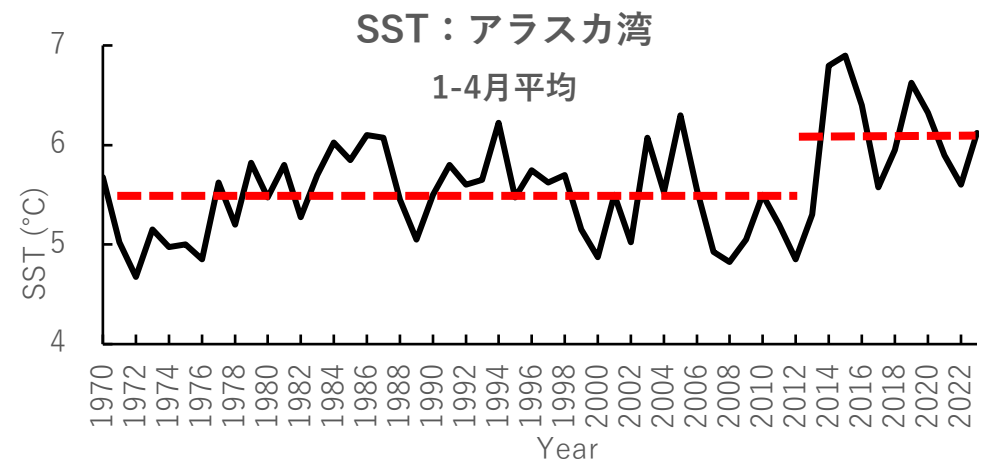
2020s



(Data: COBE-SST2)

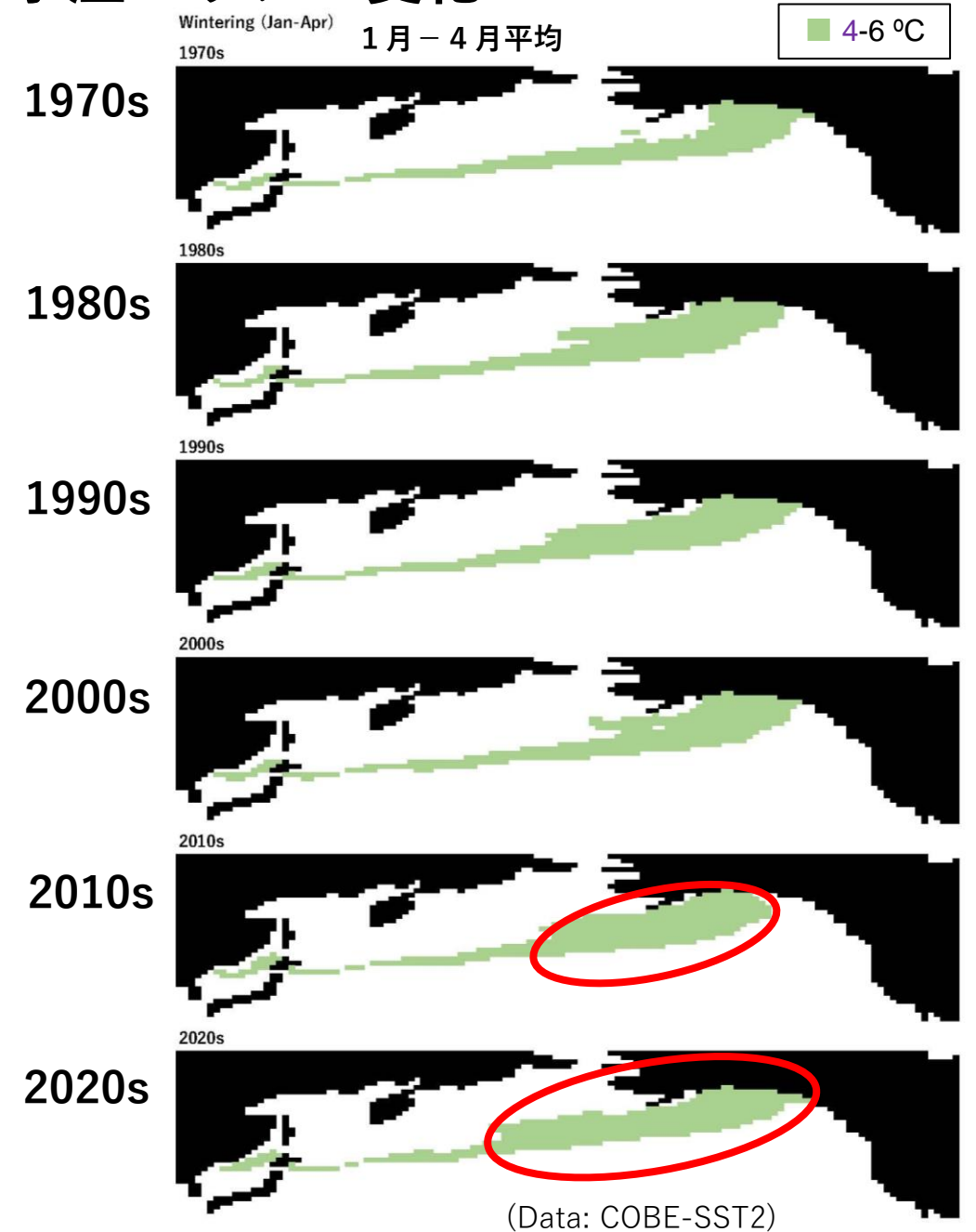
■ 適水温(5-8 °C), ■ 最適水温 (8-12 °C)

● 1970～2020年代北太平洋におけるサケの越冬水温エリアの変化



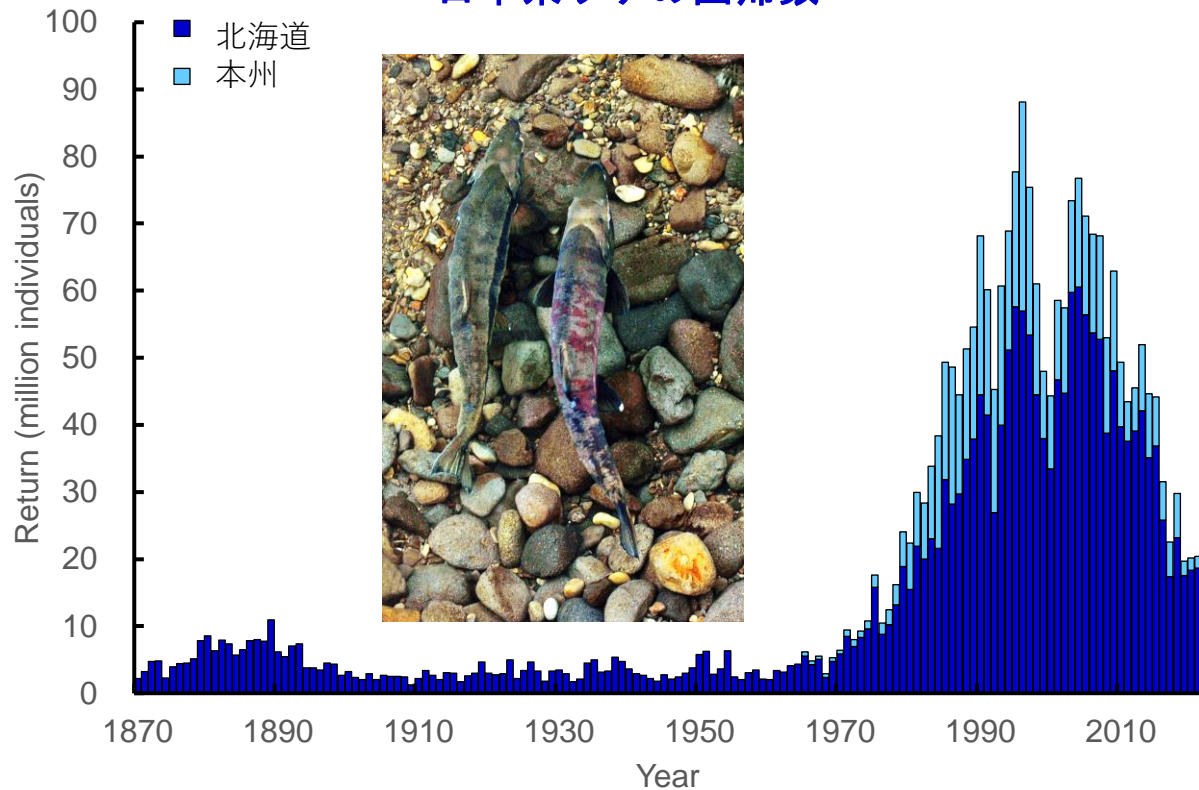
Wintering range: GA 45-61N 139-157W, WSG 43-46N 160-165E
Wintering period: January – April, Wintering SST: 4-6 °C

- **アラスカ湾 GA:** 越冬水温エリアが北西側にシフト、2013年以降SST0.6°C上昇、越冬域7%減少
- **西部亜寒帯環流域 WSG:** 越冬場所の位置・広さに変化なし

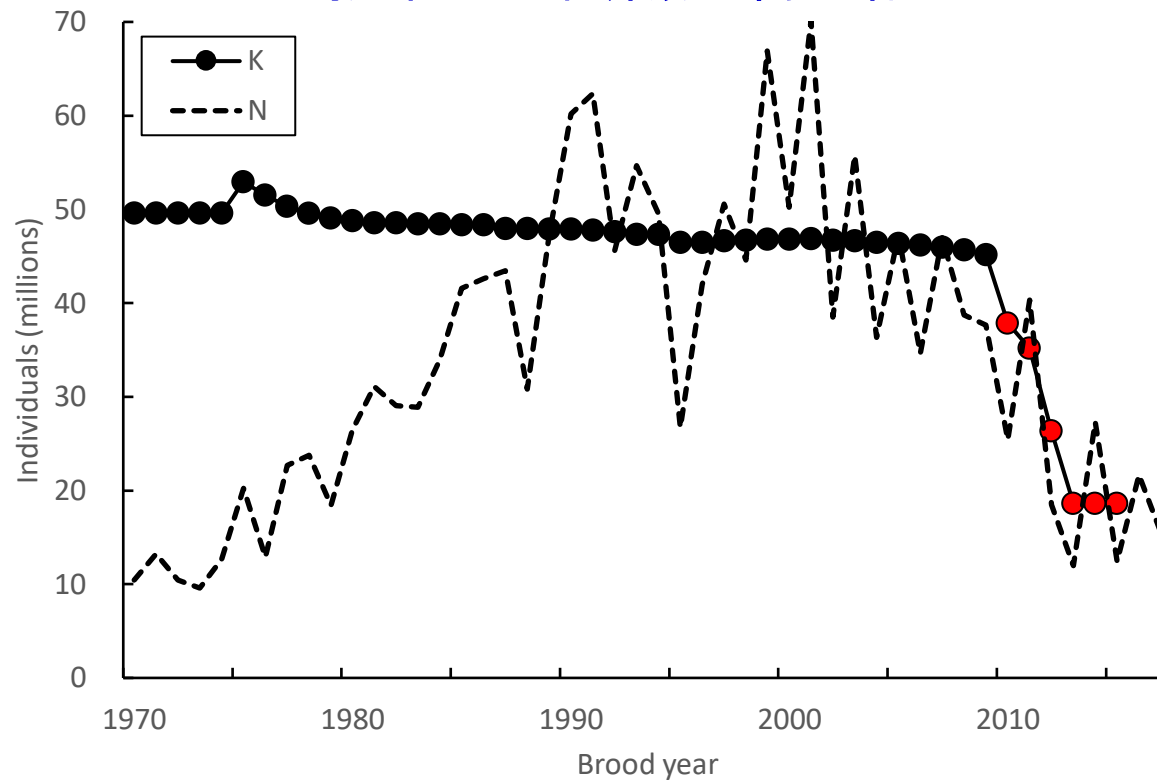


● わが国におけるサケの回帰数 (N) と環境収容力 (K) の時系列変化

日本系サケの回帰数

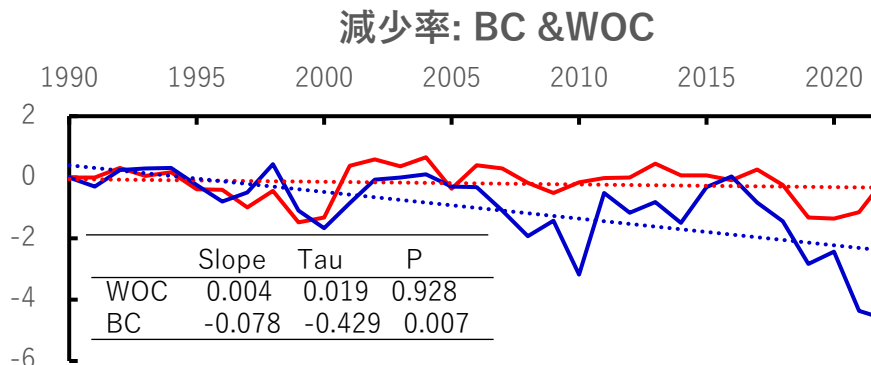
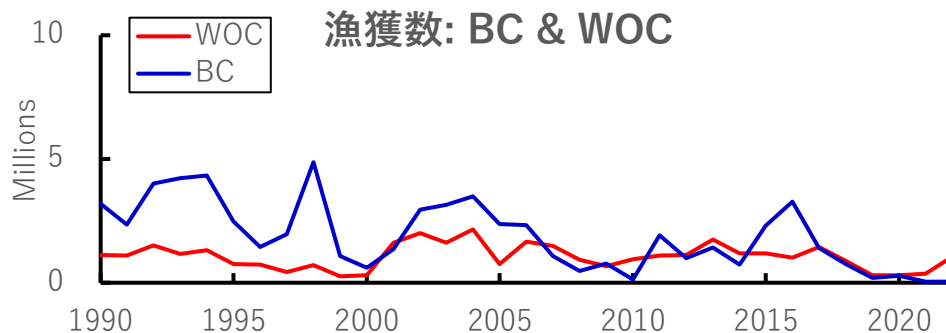
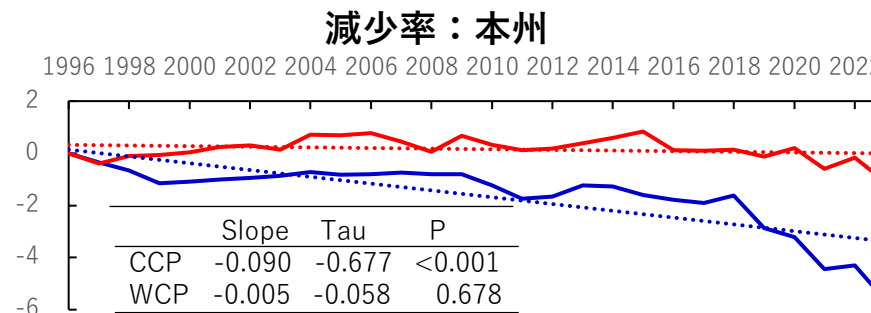
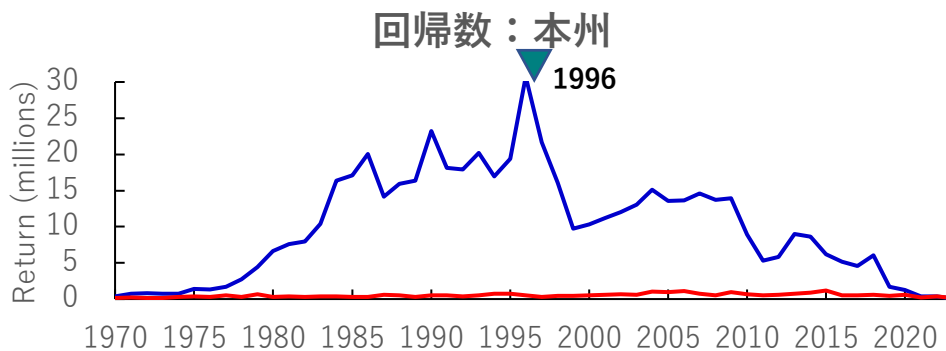
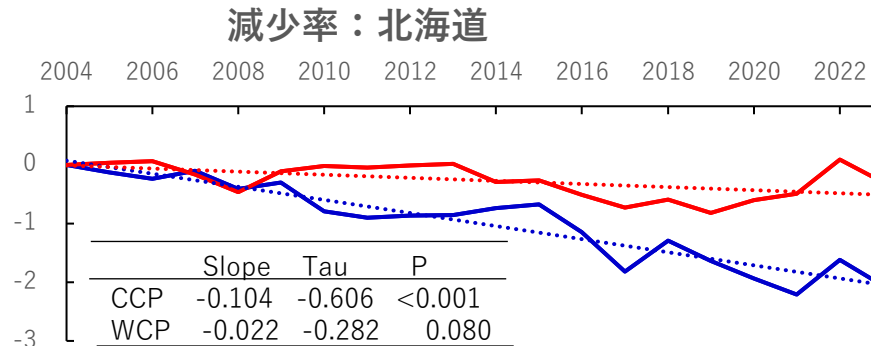
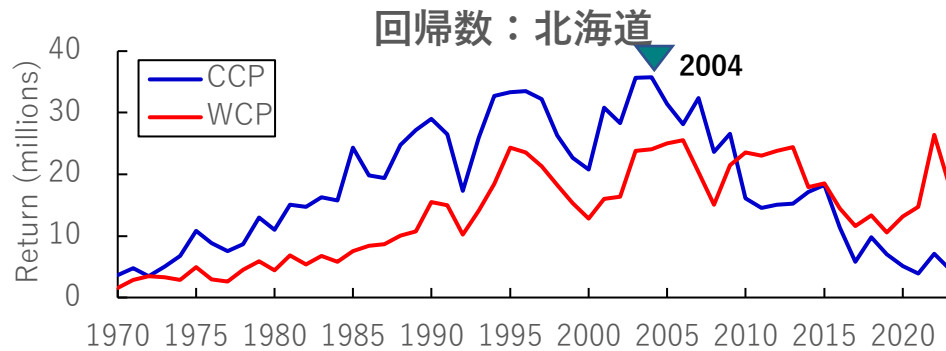


北海道系サケの回帰数と環境収容力



●南方系サケの回帰数と減少率の時系列変化

南方系サケは暖流系WCPsの方が寒流系CCPsに比べて地球温暖化に 適応adaptしている

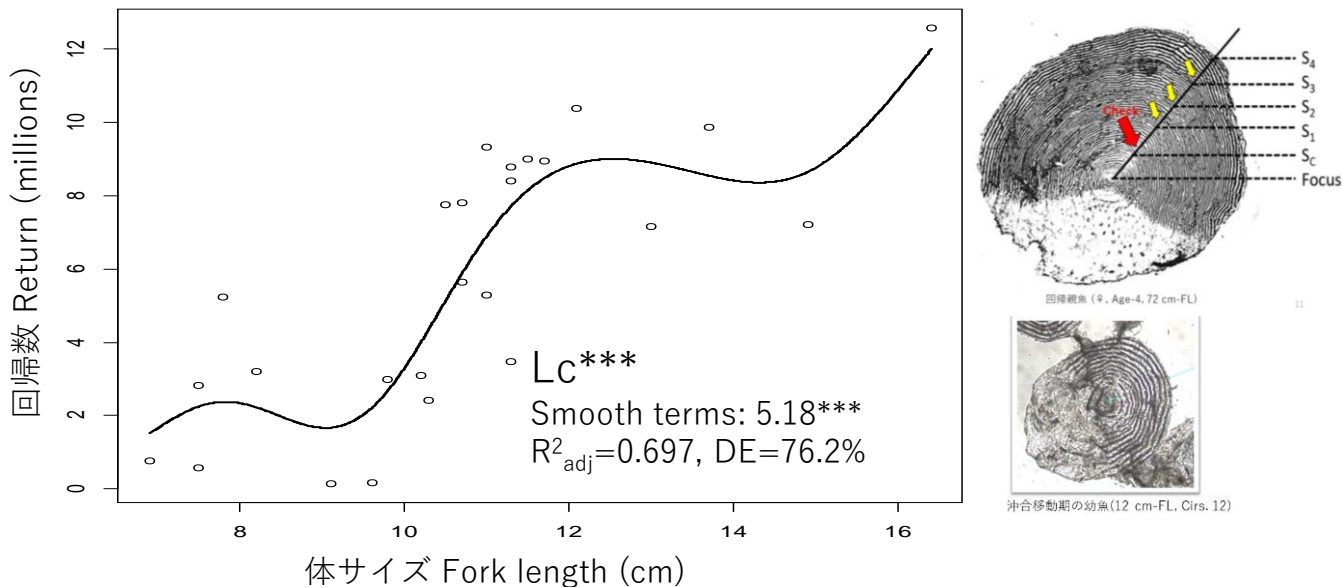


Non-stationary analysis: The Mann-Kendall test and Sen's slope

● 三陸系サケの生残率はどこで決まるか？

(Kaeriyama 2022 FO)

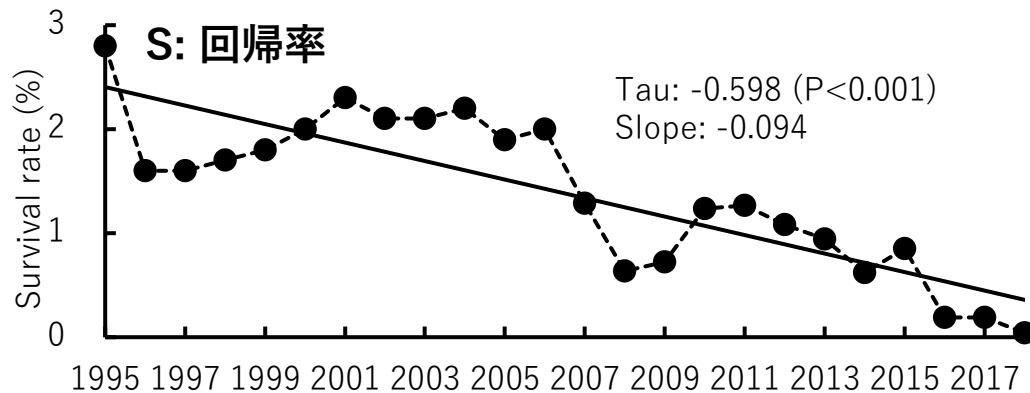
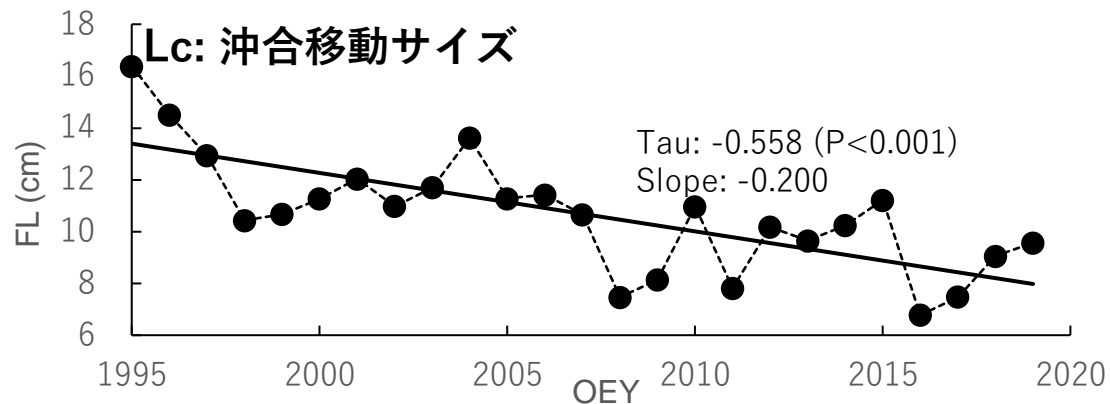
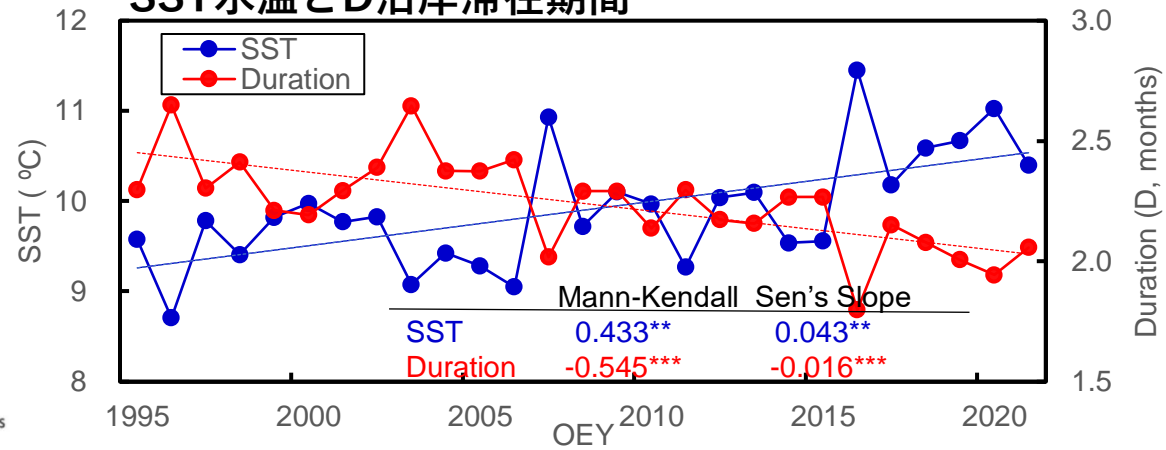
■ 平滑化スプライン：幼魚の沖合移動サイズと回帰数との関係



三陸沿岸のサケ幼魚は沿岸SSTの昇温に伴い沿岸滞在期間が減少し、十分成長できずに沖合移動。その結果、生残率が低下

平滑化スプライン Smoothing Splines: 関数 $f(x_i)$ をノイズを含んで観測した観測値 y_i から、二階微分 ($y''+ay'+by=0$) による平滑度とのバランスを取りスプライン曲線を使用して関数を推定する。

SST水温とD沿岸滞在期間



● 縄文時代にサケ遺存体（骨）が出現した遺跡 (Kaeriyama 2022)



全国遺跡報告総覧から縄文時代のサケ分布
 検索文献136千件中サケ遺存体578件ヒット
 (奈良文化財研究所 <https://sitereports.nabunken.go.jp/ja>)

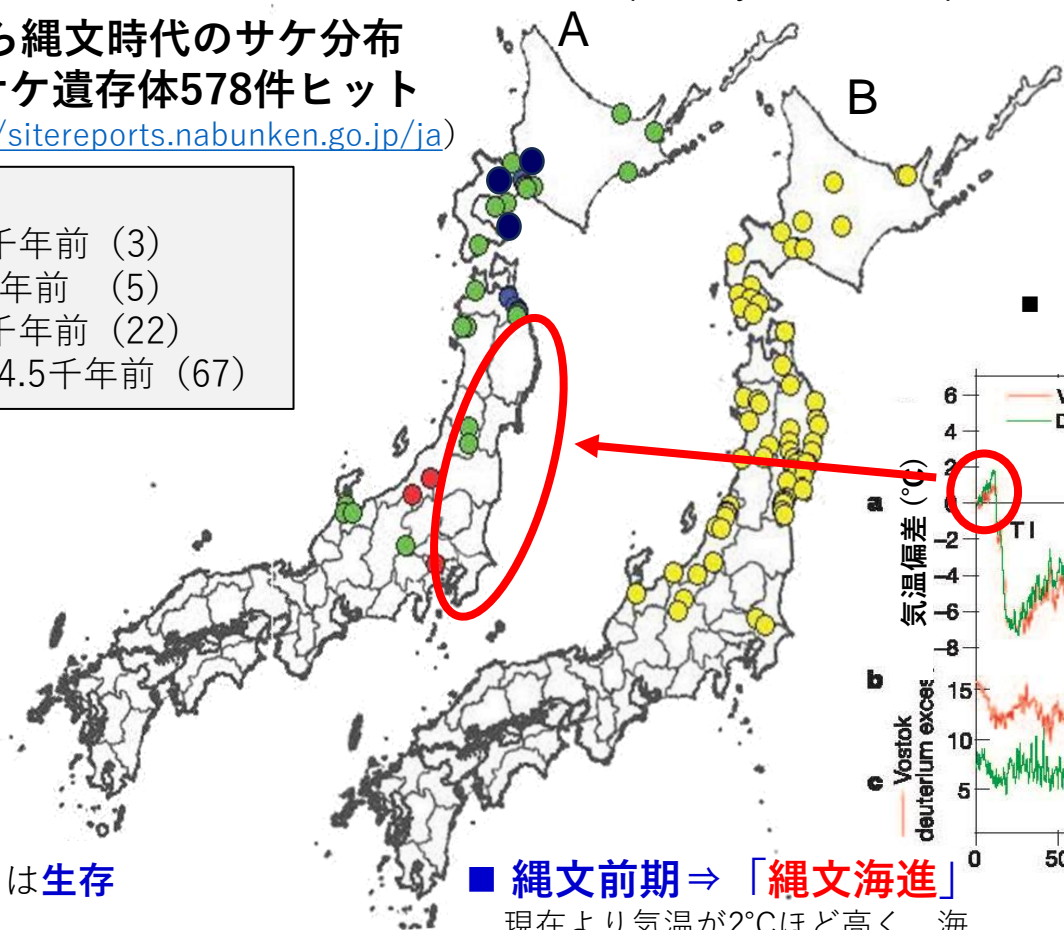
草創期
 前田耕地（東京）、黒姫洞窟（新潟）、本ノ木（新潟）

早期
 ユカンボシ、虎杖浜、三沢川流域、千歳キウス（北海道）、赤御堂、長七谷地、帽子屋敷、山中（青森）

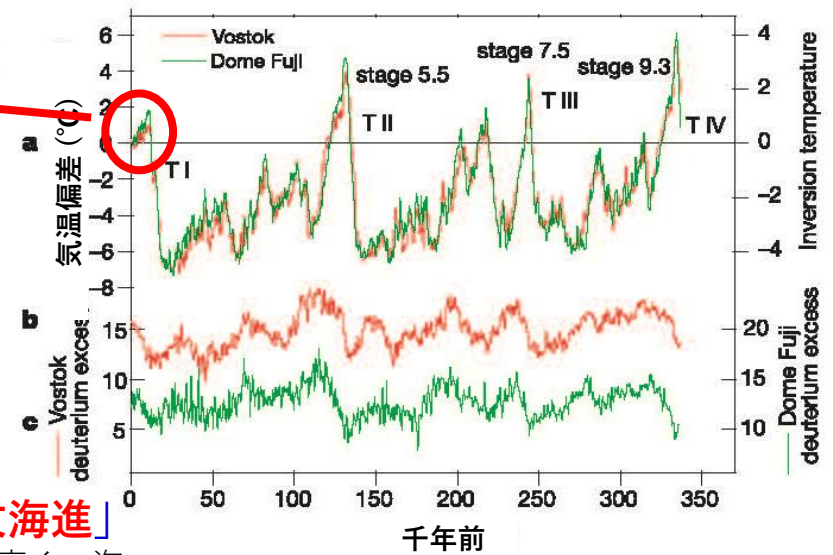
前期
 北海道11（木古内の大平など）、青森3、秋田2、山形2、富山3、長野1（千曲川）

縄文時代

- 草創期 15-12千年前 (3)
- 早期 12-7千年前 (5)
- 前期 7-5.5千年前 (22)
- 中期-晩期 5.5-4.5千年前 (67)



■ 35万年前から現在までの地球気温変化 (Uemura et al. 2018. Nature)



■ 縄文前期⇒「縄文海進」
 現在より気温が2°Cほど高く、海面4~5m上昇

■ 縄文前期：「縄文海進」

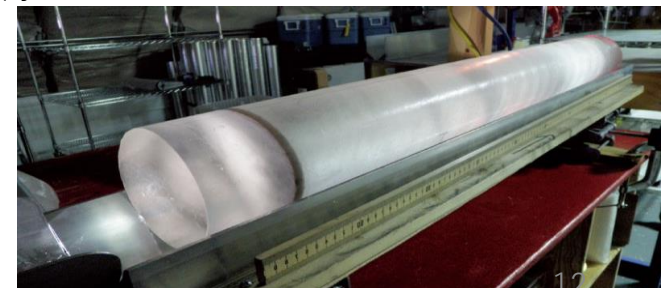
本州サケ：太平洋側から出現せず、日本海側には生存

■ 21世紀：「地球温暖化」

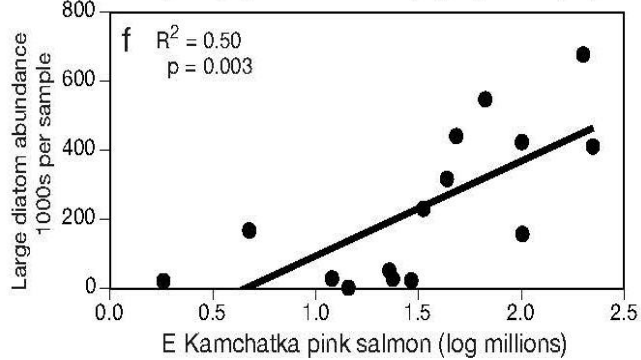
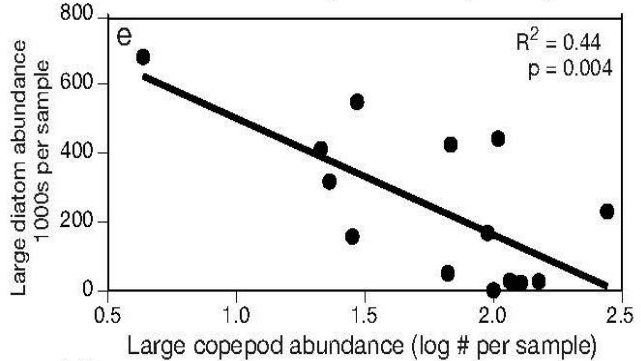
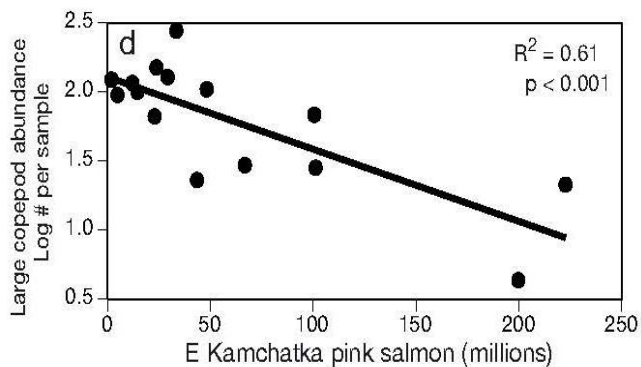
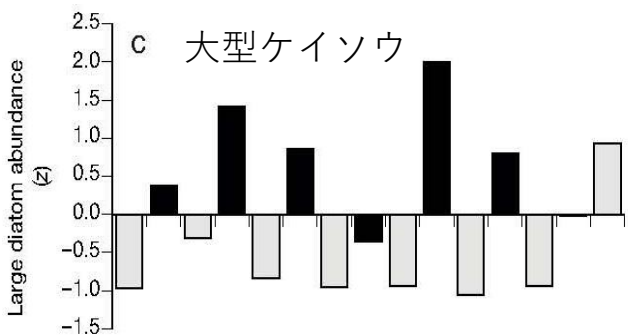
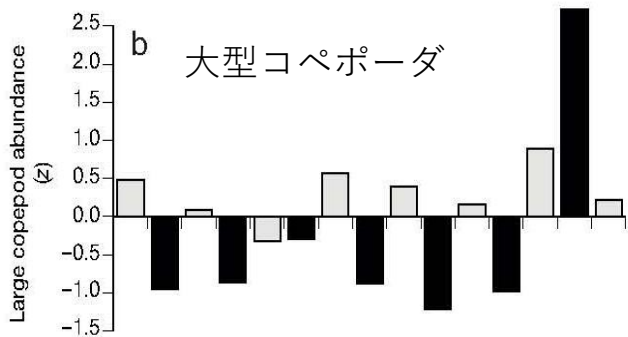
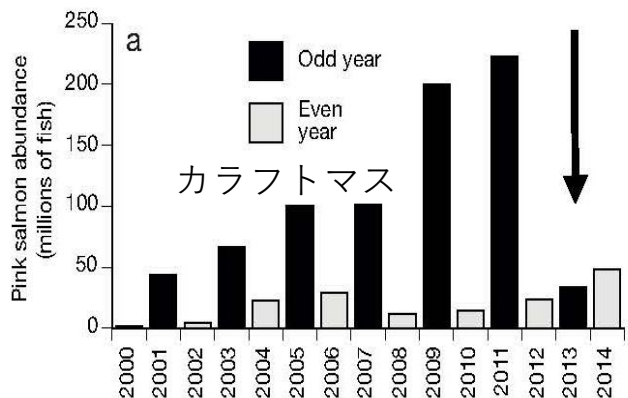
サケの減少率：太平洋系 >> 日本海系

仮説

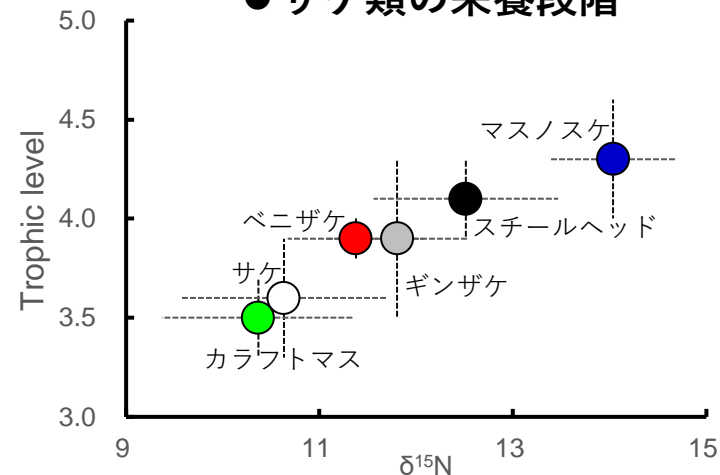
- ・冷水系（太平洋系）：親潮の影響→温暖化に弱い
- ・暖水系（日本海系）：対馬暖流の影響→温暖化に強い
- ・地球温暖化の加速：本州太平洋沿岸からサケ消失！？



■Ruggerone et al. (2023): ベーリング海生態系におけるカラフトマスによる栄養カスケード



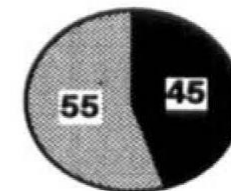
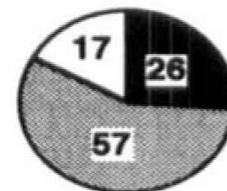
●サケ類の栄養段階



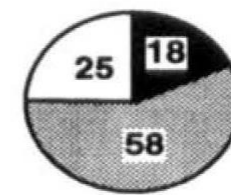
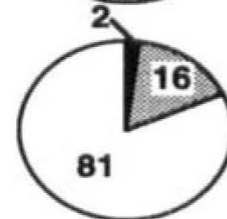
1991年
55百万尾

1992年
7百万尾

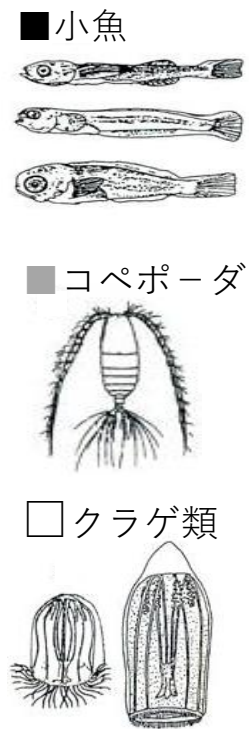
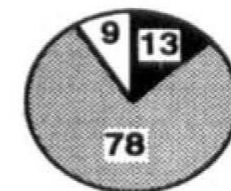
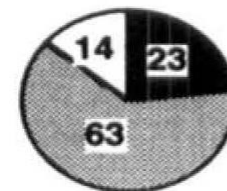
カラフトマス



サケ



動物プランク
トン現存量



(Tadokoro et al. 1996)

● 北海道系サケと他系サケ類との種内相互作用

■ 2000年級群以降

西ベーリング海系カラフトマス： - - - -

アラスカ系カラフトマス： -

オホーツク海系サケ： -

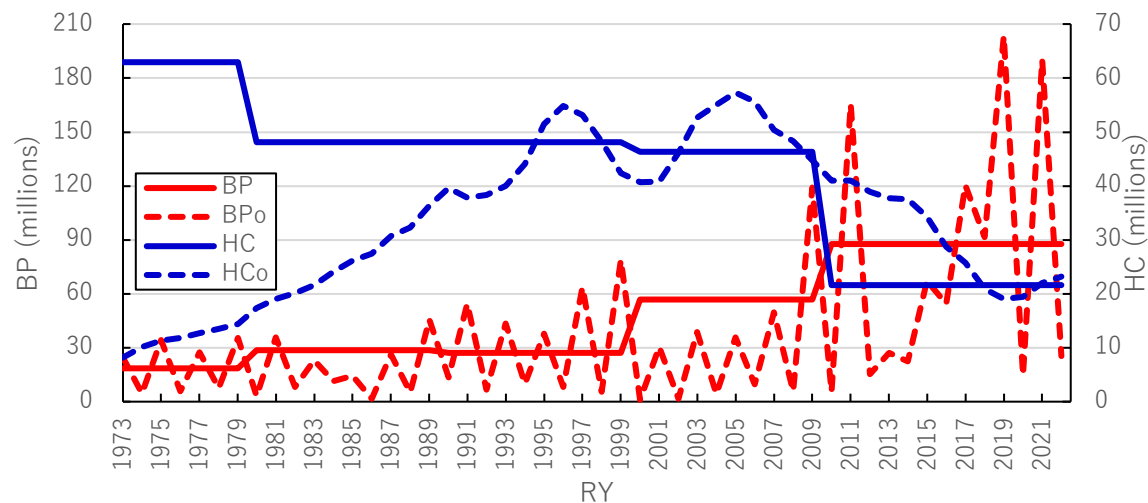
西ベーリング海系サケ： 0

東西ベーリング海系ベニザケ： 0

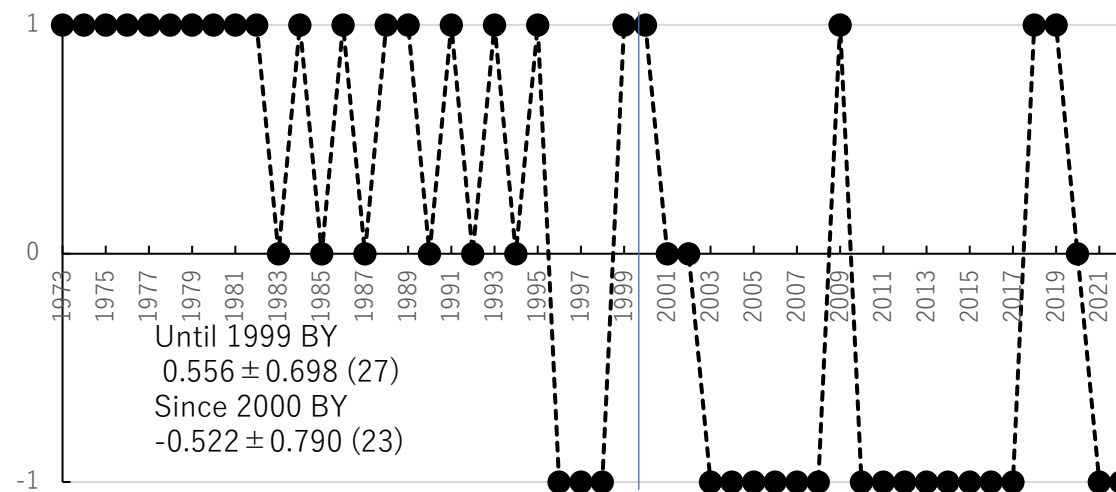
カナダBC州系ベニザケ： ++

オホーツク海系ベニザケ： ?

Western Bering Sea: Carrying capacity & Return



Bering Sea: HC-BP



北海道系サケは、西ベーリング海系カラフトマスに対して1990年代までは勝っていたが、2000年代以降負けるようになってきた

● Lotka-Volterra competition model

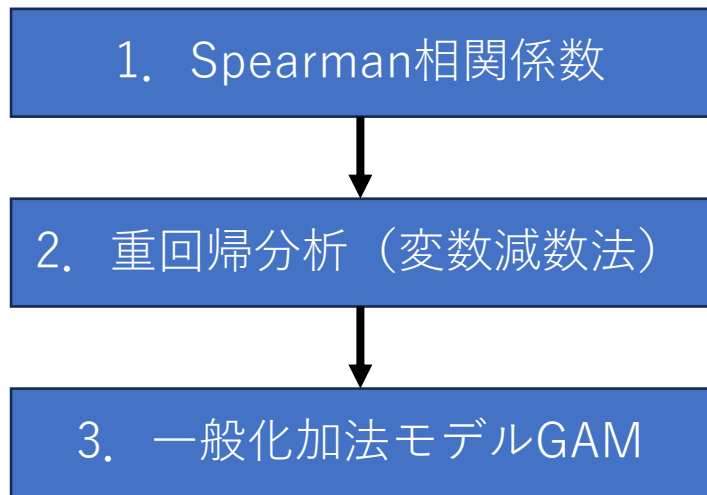
$K_2 < K_1 / \alpha_{12}$ & $K_1 > K_2 / \alpha_{21}$: 勝ち (+1)

$K_2 > K_1 / \alpha_{12}$ & $K_1 > K_2 / \alpha_{21}$: 勝ち (+1)

$K_2 < K_1 / \alpha_{12}$ & $K_1 < K_2 / \alpha_{21}$: 共存 (0)

$K_2 > K_1 / \alpha_{12}$ & $K_1 < K_2 / \alpha_{21}$: 負け (-1)

● 三陸系サケ来遊予測 (1)



1. Spearman相関係数 (候補38件中20件)

SST

沿岸: 冬*, 春, 夏*, 秋*, 離岸時期*

沖合: オホーツク海 (7-10月) *, 西部亜寒帯環流域 (越冬), アラスカ湾 (越冬水温*, 越冬エリア*)

動物プランクトン現存量: 西ベーリング海*

サケ属魚類

オホーツク海: サケ**, ベニザケ**, カラフトマス

西ベーリング海: サケ, ベニザケ**, カラフトマス***

東ベーリング海, アラスカ湾: サケ, カラフトマス, ベニザケ

(*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001)

2. 重回帰分析 (変数減数法)

	B	SE	β	t-value	P	VIF
Model 1 (Interc.)	16.329	8.692		1.879	.076	
M12.5	2.470	1.453	.133	1.700	.105	1.731
Lc	.447	.127	.284	3.520	.002	1.842
GA3W	-1.439	.354	-.253	-4.069	.001	1.096
OS	-1.760	.434	-.271	-4.053	.001	1.270
CPB	-.046	.010	-.427	-4.722	.000	2.317
Model 2 (Interc.)	28.137	5.465		5.148	.000	
Lc	.510	.127	.323	4.004	.001	1.688
GA3W	-1.364	.367	-.240	-3.717	.001	1.080
OS	-1.694	.452	-.261	-3.745	.001	1.260
CPB	-.053	.009	-.489	-5.656	.000	1.937

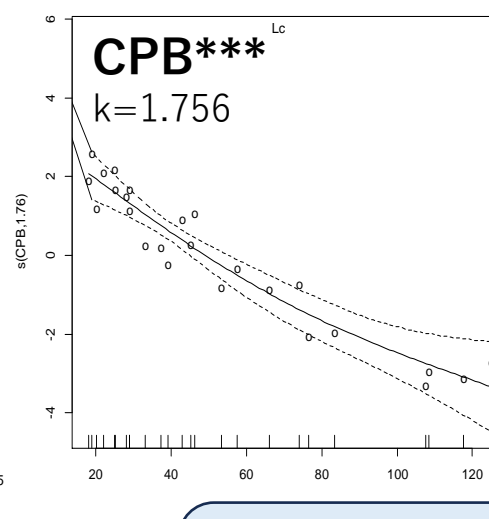
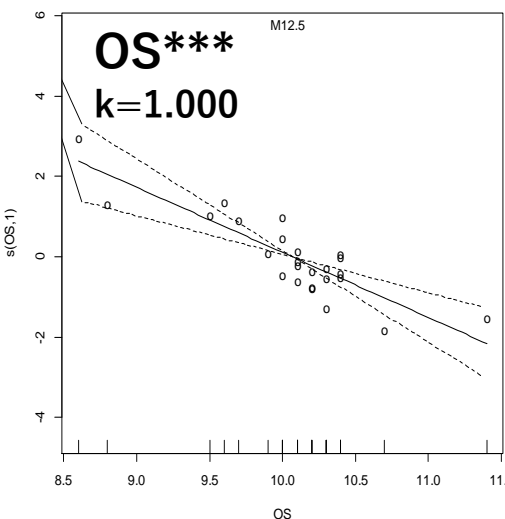
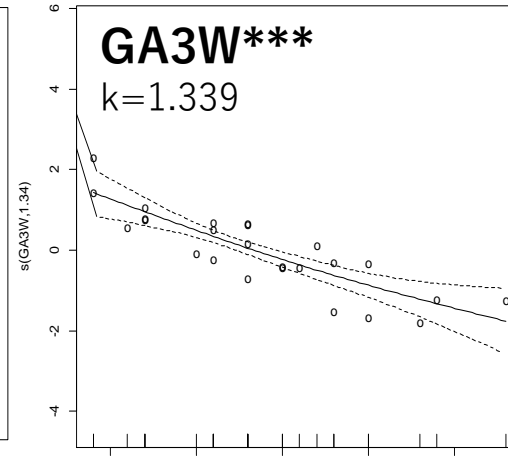
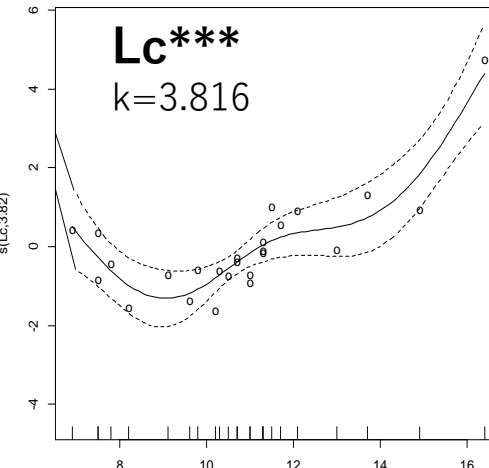
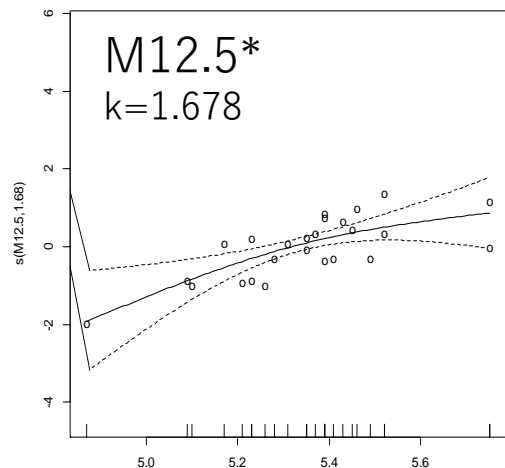
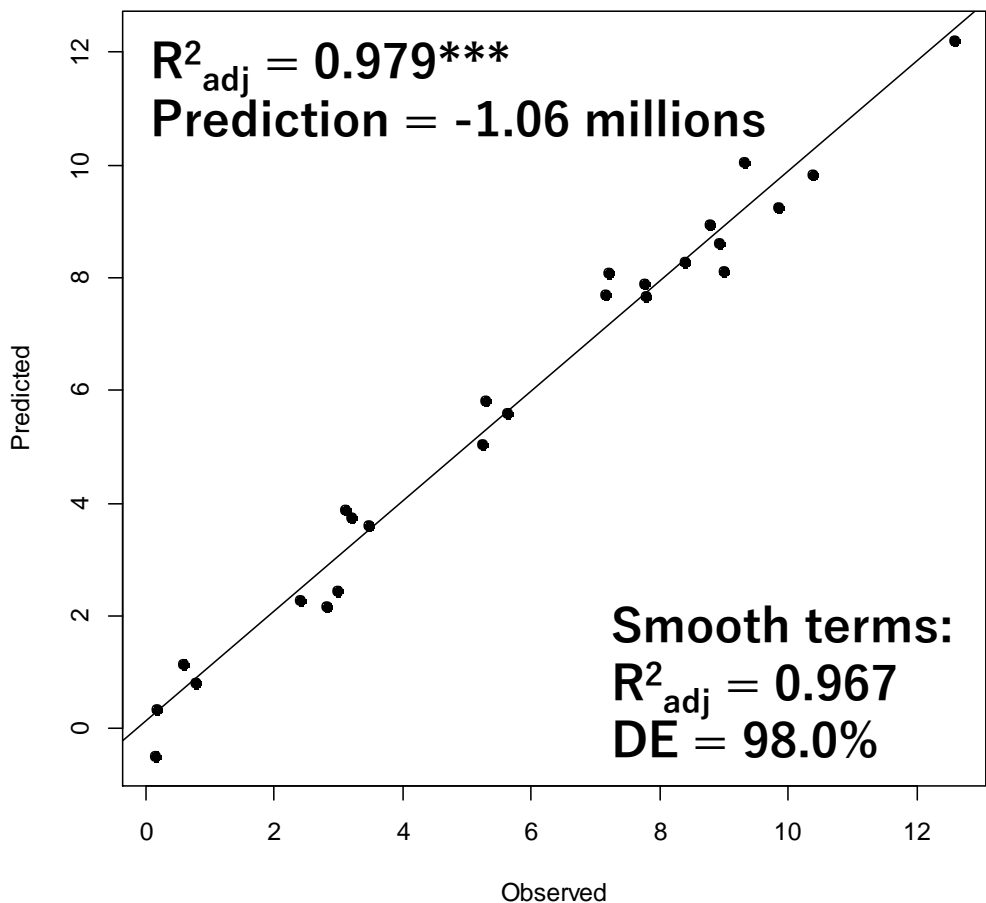
β : 標準偏回帰係数, VIF: 多重共線性

R^2_{adj} : Model 1 = 0.915***, Model 2 = 0.907***
 2023年予測値: Model 1 = -0.103, Model 2 = 0.240

2024年三陸サケ来遊数: 0.053百万尾

● 三陸系サケ来遊予測 (2) : 一般化加法モデル GAM

$$Return \sim s(M12.5) + s(Lc) + s(GA3W) + s(OS) + s(CPB)$$



Parametric coefficients:
 Intercept=5.717
 (SE=0.1299, t-value=43.99,
 $P < 2e-16^{***}$)

Coefficients:

Intercept = 0.131 (SE=0.194, t-value=0.678, $P=0.505$)

Observed = 0.977 (SE=0.029, t-value=33.771, $P < 2e-16^{***}$)

DE: Deviance explained

2024年三陸サケ来遊数：0.053百万尾

- 地球温暖化のネガティブな影響
- ・ 西ベーリング海：カラフトマスの増加 CPB
- ・ アラスカ湾における越冬環境 GA3W
- ・ 幼魚期の成長Lc

● 私たちがサケから学ぶこと～次世代に残すために

● サケ野生魚の重要性：フレーザー川のベニザケ個体群

産卵時期と産卵床環境(水温)の
関係-有効積算温度の法則

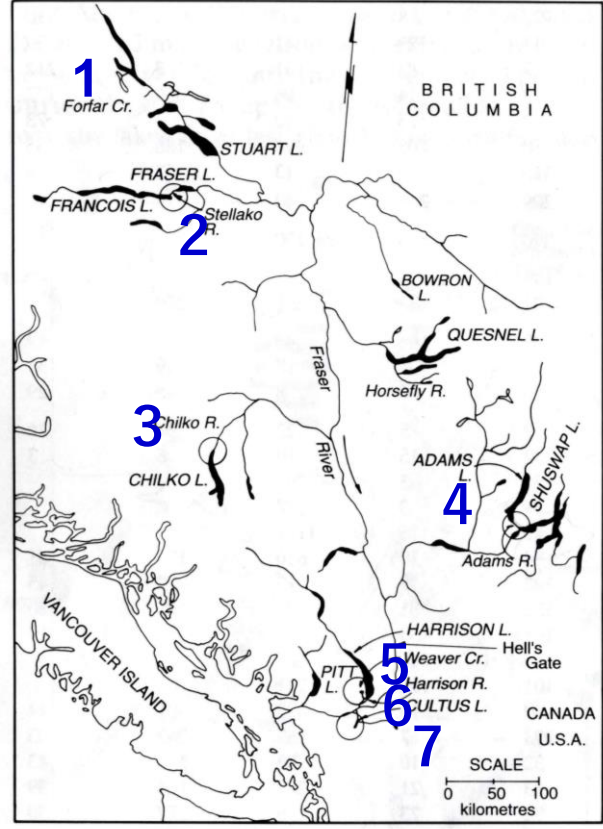
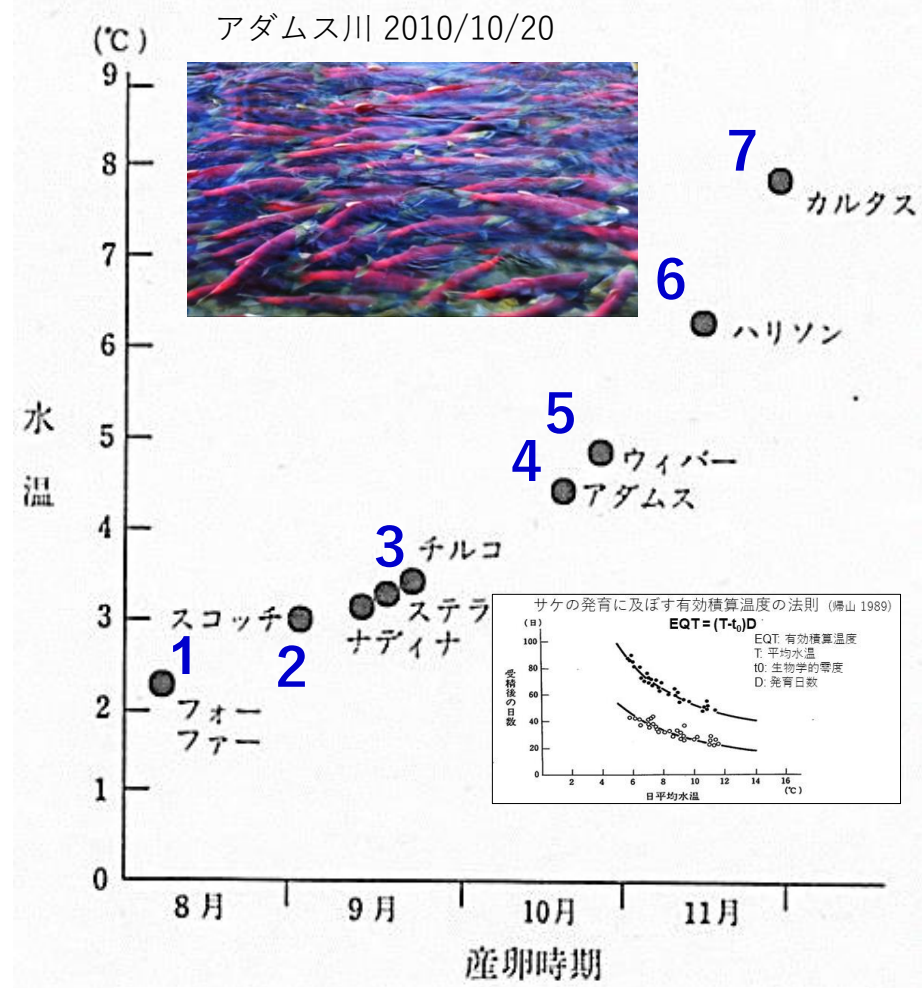
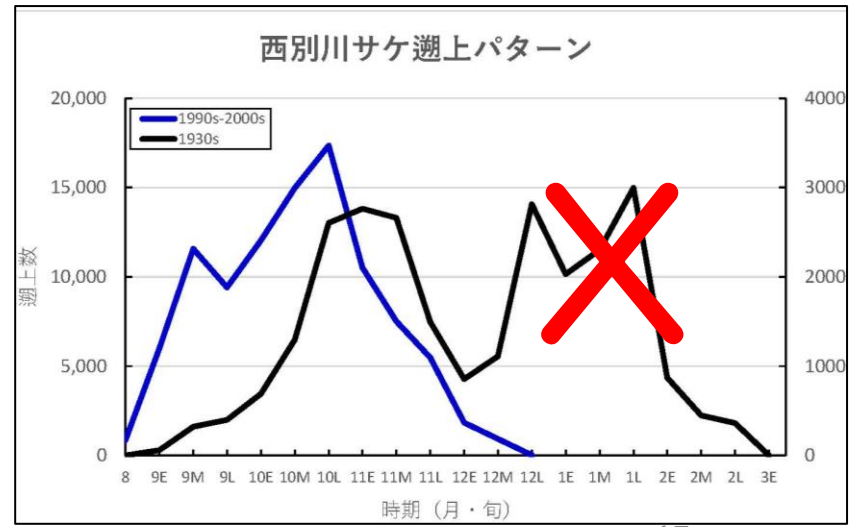
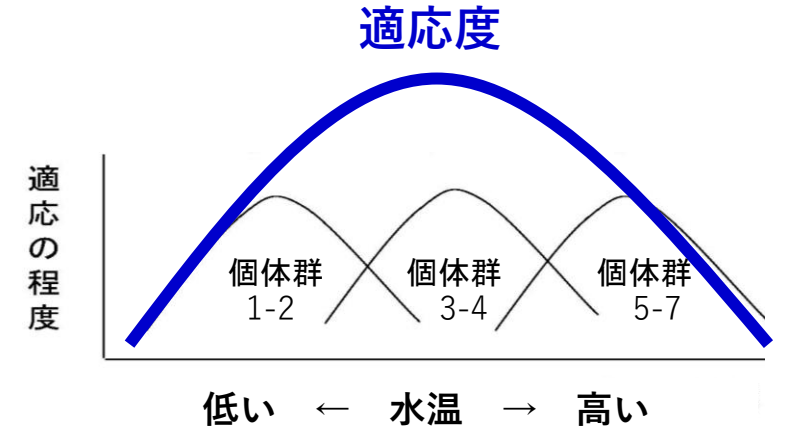


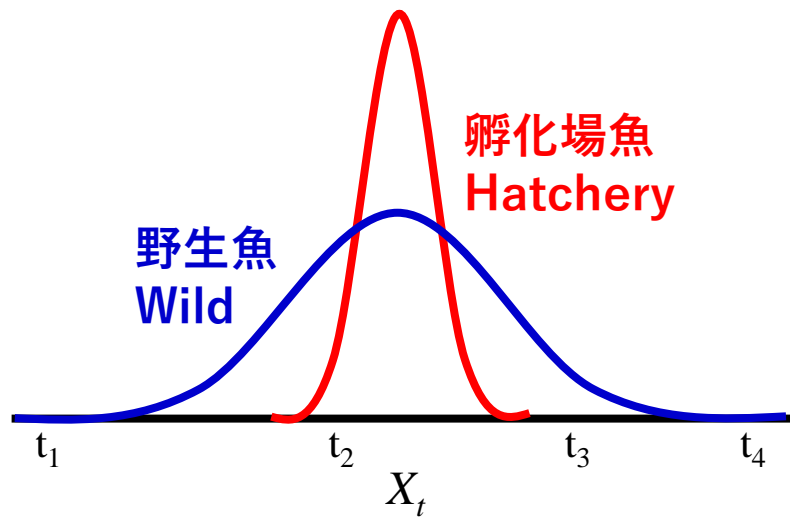
FIGURE 4
Sockeye lakes of the Fraser River watershed,
British Columbia



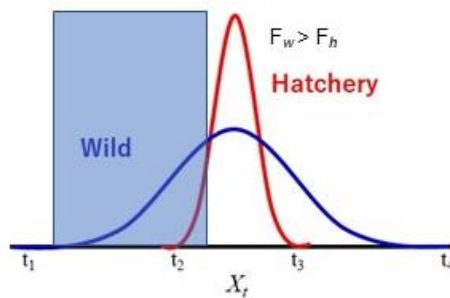
フレーザー川ベニザケ個体群毎の産卵時期と産卵床内の平均水温との関係



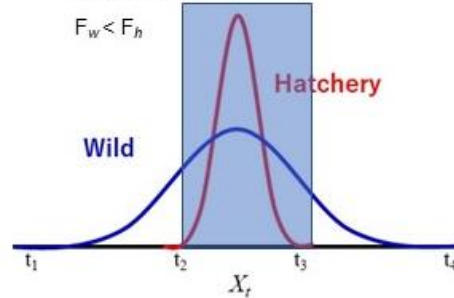
● 適応度の考え方



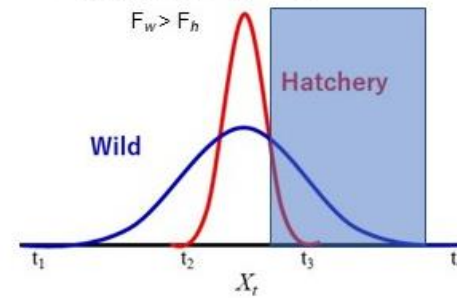
1. 環境範囲 $t_1 \sim t_2$



2. 環境範囲 $t_2 \sim t_3$



3. 環境範囲 $t_3 \sim t_4$



● 適応度 fitness

ある形質を持つ1個体が生涯に残す子供の数の期待値 W :

$$W = \sum_x l_x m_x$$

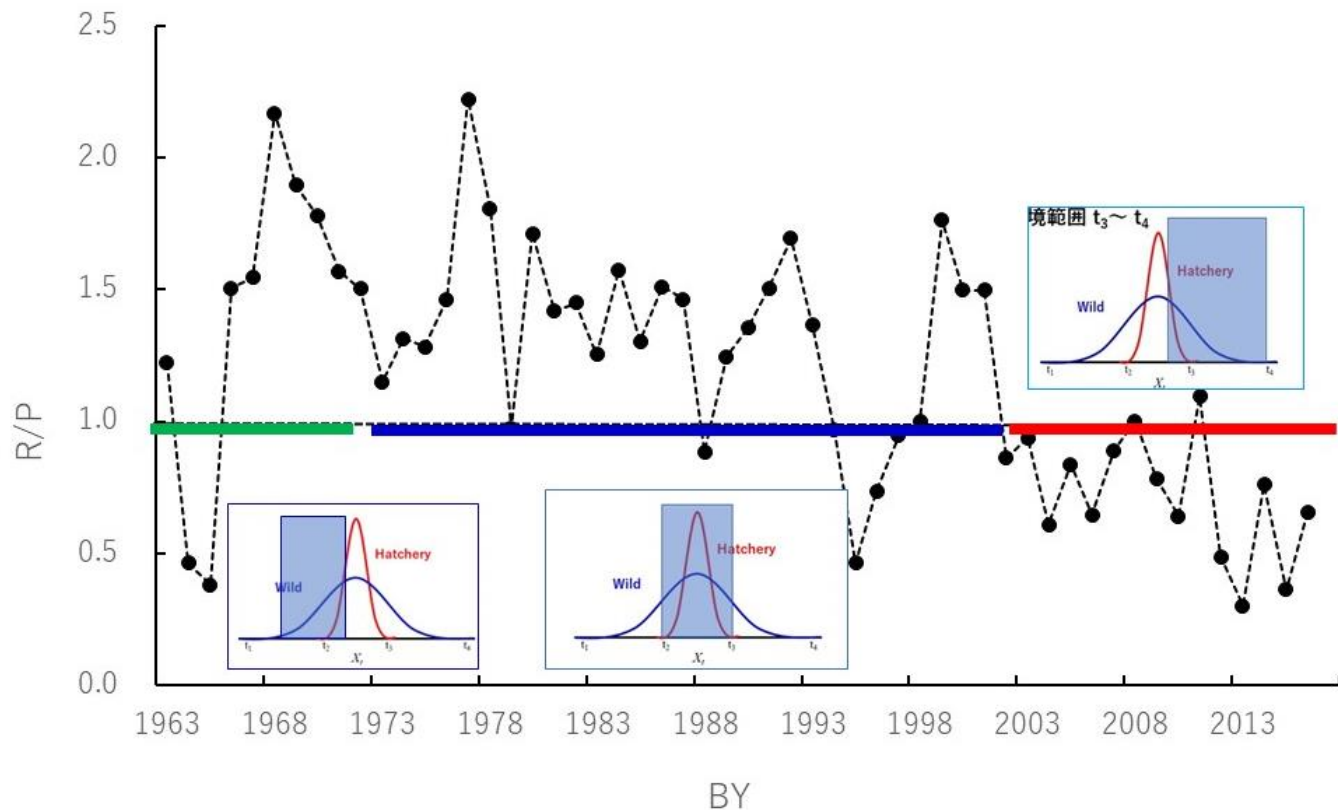
- l_x : x 歳までの生残率、 m_x : x 歳での産卵数
- サケ類は 1 回繁殖型

● サケの適応度: $F = R/P$

P : 親の数, R : 子の数 ($R = \sum_{i=2}^6 r_i$)

[仮定]

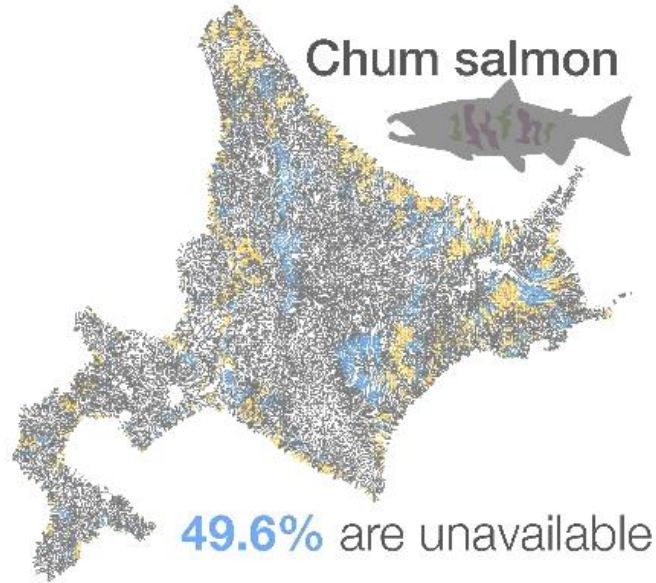
- 適応度: 野生魚 F_w 、孵化場魚 F_h
- 環境 $t_1 \sim t_4$ のとき: 全 $F_w = 全 F_h$



● 北海道における野生サケの再生産河川

サケが産卵に利用できない
河川**50%** (Yamada et al. 2022)

Reduction in
spawning habitats



パラメータ：礫サイズ、降雨量、気温、標高、
勾配、流域面積、都市面積、農地%、沖積層%

野生魚の再生産河川：約50～60河川 (Miyakoshi et al. 2011)

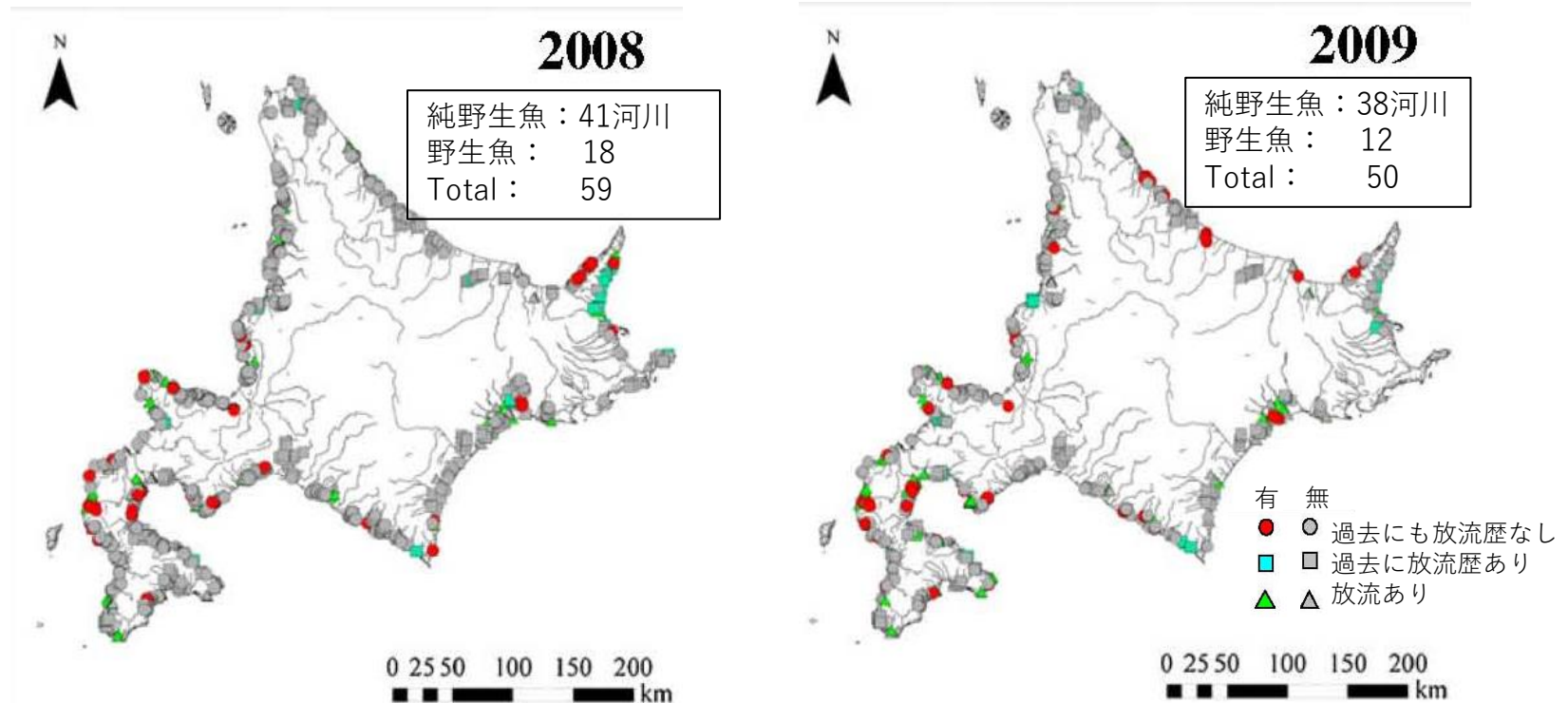


Fig. 4 Locations of survey sites for detecting natural reproduction of chum salmon in Hokkaido in 2008 and 2009. The river categories are identified by marks (circles, squares, and

triangles). The colored marks indicate the locations where naturally spawning chum salmon were observed (Miyakoshi et al. 2011)

● 日本の河川は水路か、生の営みの場か？

- 河川生態系：海洋生態系と陸上生態系のコリドー→両生態系の相互作用
- 陸の物質（砂礫、N, P, Fe）→海岸形成、沿岸生態系を豊かにする
- サケの産卵回遊（生物多様性、MDN運搬）→陸域生態系を豊かにする
- 日本の河川→直線化、河床低下、ダムネーション
→物質の流れ、生物の移動、魚類の生育場および産卵場を阻害
→健全な河川生態系といえるだろうか？
- 生態系における生物多様性の低下：
生物間相互作用ネットワーク内の構成要素の脱落

● 気候変動、過疎化と高齢化社会

- カタストロフィックな豪雨と洪水
- 過疎化
- 高齢化社会

● 今後の河川生態系のあり方— 統合的な流域管理

- 流域：森林・河川生態系のあるべき姿
- ヒトの生命の安全
- 土地利用
- 氾濫原と遊水池
- **ゾーニング**：河川とヒトの生活

- 生態系：複雑、ダイナミック、不確実性の高いシステム
- 構造：非生物環境と生物との相互作用
- 機能：生物多様性（種多様性と遺伝的多様性）と物質循環



アラスカ（河川名不明）

● 四半世紀前から野生サケの重要性-生態系サービスと遺伝的多様性

■ 日高管内：河口のウライ撤去（川幅120m）



ゾーニングによるサケの持続可能な資源管理に向けて

帰山雅秀. 1996. サケ属魚類の再生産と最適放流技術. 月刊海洋, 316: 589-594.

- メタ個体群の保全と適応度の維持
- 河川生態系のレストレーション



サケ属魚類の再生産と
最適放流技術

帰山 雅秀
かよりやま まさひで

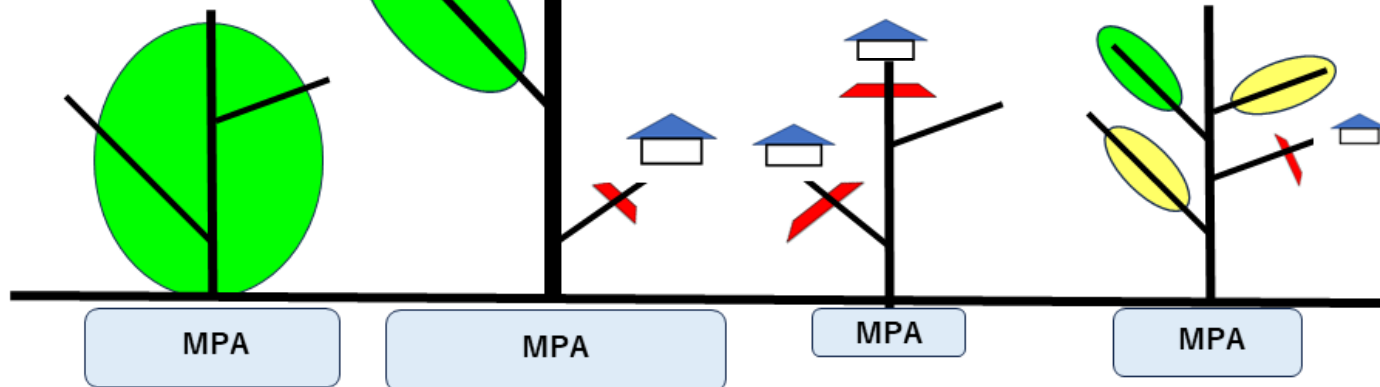
複合資源

- 産卵場 (Green oval)
- 孵化場 (Blue house icon)
- 捕獲場 (Red triangle)
- 教育・伝統行事等・レクリエーション (Yellow oval)
- MPA 海洋保護区 (Blue box)

野生資源

漁業資源

多目的資源



ゾーニングの基本

- 捕獲場→孵化場に隣接（河口×）
- 海洋保護区の設定
- 河川→自然生態系&野生魚のレストレーション

● 環境変動下におけるサケの持続可能な資源保全に向けて

～バックキャストをベースとする生態系アプローチ型持続可能な保全管理～

(Kaeriyama 2012)

生態系アプローチ型資源管理の基礎

- 管理対象種の生態系における位置
- 他種との生物学的相互作用
- 生態系の構造と機能の変化に対する種の応答

[最終ゴール]

1. 野生サケ復元とそのための 河川生態系のレストレーション

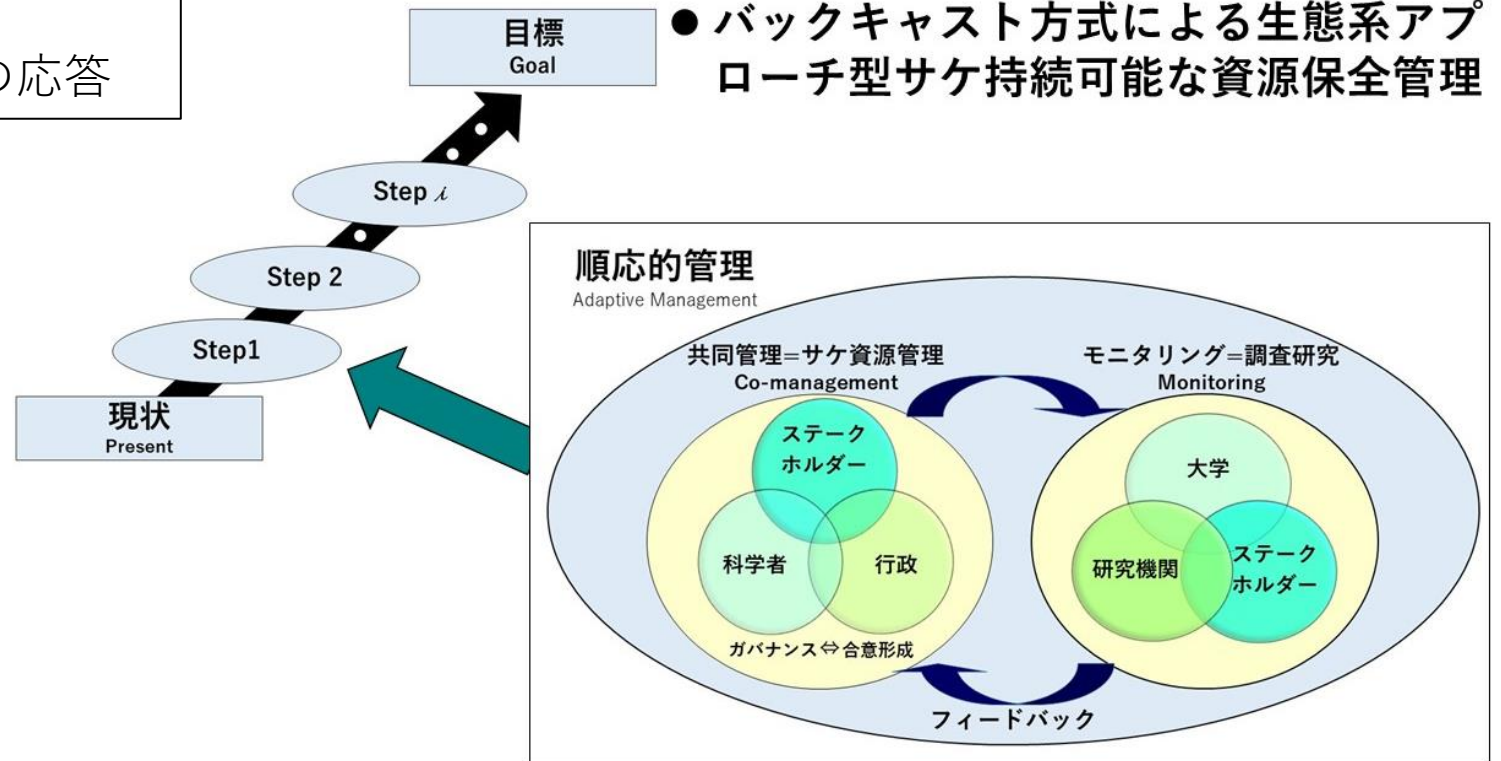
- 疲弊した河川生態系の修復
- 野生サケの復元

2. サケの保全と利用のあり方

- 野生「種」としてのサケをどう**保全**するか
→ 生物多様性の保全
- 産業としてサケをどう**利用**するか
→ 人工孵化放流事業と漁業（イノベーション）
- 野生魚と孵化場魚の**ゾーニング**

3. 水圏生態系とサケとの関係解明

- 環境変動（e.g., 地球温暖化、レジームシフト）
→ **水圏生態系**（海洋、河川）
- 水圏生態系の変化がサケの生活史と
個体群動態に及ぼす影響



Kaeriyama, M. 2023. Warming climate impacts on production dynamics of southern populations of Pacific salmon in the North Pacific Ocean. *Fisheries Oceanography*, 32: 121-132. <https://doi.org/10.1111/fog.12598>.
Kaeriyama, M. & Sakaguchi, I. 2023. Ecosystem-based sustainable management of chum salmon in Japan's warming climate. *Marine Policy* 157: 105842. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105842>.