

技術情報

アラスカ州における最先端システムを活用した耳石温度標識調査

いいた まさや
飯田 真也 (日本海区水産研究所 資源管理部)

おかもと やすたか
岡本 康孝 (北海道区水産研究所 天塩さけます事業所)

はじめに

魚類の生態や資源量を把握するため、標識を付けた個体を野外へ放流し、それを再捕することによる調査が実施されています。サケに施す標識としては、長年、稚魚の鰭を切除する「鰭切標識」が行われてきました(坂野 1960; 関・清水 1996)。しかし、鰭切標識は、手作業で行われるため大量に標識するのが困難である上、施標できるパターンも極端に少なく(浦和 2001)、さらには、施標した稚魚の生残に影響を与える可能性も指摘されています(Mears and Hatch 1976)。

1990年代初頭、北米において、サケ属魚類の耳石の成長を水温操作によって人為的にコントロールし、識別可能なマークを付ける「耳石温度標識(以下、温度標識)」が開発されました(Volk et al. 1999)。温度標識は、大量の卵がふ化槽で集約的に管理される卵期に施されることから、労力をほとんど必要とせず、数百万単位の標識魚を生産することが可能です。また、任意に設定した水温変動パターンに応じたマークを付けることができることから、バリエーション豊かで自由度の高い標識であると言えます。しかも、温度標識は稚魚の生残に影響を与えないと考えられているため(Volk et al. 1999; 浦和 2001)、現在、日本から放流するサケに施されている温度標識は46パターンに及んでいます(Okamoto et al. 2012)。

ただし、この温度標識に関しても、いくつかの課題が存在しています。例えば、自然界における水温変動によって温度標識に類似したリングが生じることがあるため、標識の判別精度が100%ではないことが報告されています(Volk et al. 1999)。しかし、日本では、それらを区別する明確な基準が定められていません。また、標識を査定するために顕微鏡で観察するには、魚体から耳石を取り出して、研磨しなければならないなど、複数の緻密なステップを経る必要があり、判別の精度を向上させるとともに、作業の効率化を図ることが望ましいと考えられています。

米国アラスカ州は、温度標識を先進的に活用し、さけます類の漁業管理や調査研究を実施していることで有名です。著者らは、2012年9月3～16日にアラスカ州漁業狩猟局の耳石研究室(Alaska Department of Fish and Games, 以下: ADFG, 図1)を訪れ、温度標識の技術とそれによる漁業管理の



図1. アラスカ州漁業狩猟局の位置と外観。

仕組みに関する研修を受けました。ADFGが温度標識を用いて行う調査は、感嘆するほど洗練された体系で実施されています。本稿では、その温度標識査定工程を中心に研修概要を報告します。

アラスカにおける温度標識の利活用

米国アラスカ州において、さけます漁業は主要な産業の一つです。さけます類の年間放流尾数は約15.6億尾に及び(NPAFC Statistical Yearbook, <http://www.npafc.org/>)、その85%にあたる13.3億尾に温度標識が施されています(Oxman and Josephson 2011)。同州では、野生サケ資源を持続的に維持することを基軸とした漁業管理が実施されており(Hagen et al. 1995)、野生魚の資源量が少ない場合、アラスカ州公安局により漁獲規制が行われます。このため、漁獲物の系群識別を早急に行う必要があります。そのツールとして温度標識が利用されています。同州における温度標識調査には、正確性はもちろん、なにより即時性が求められるという背景が、ADFGの温度標識査定体系の利便性を向上させたと考えられます。日本における温度標識は、現在のところ、それほど即時性が重要視されない調査研究での利活用に留まっていますが、同州の仕組みを導入することによって、用途が広がるのが期待されます。

独自に開発するソフトウェア

ADFGによる温度標識の調査体系を最も特徴づけるのは、専属のシステムエンジニアが開発するソフトウェアです。温度標識を査定する際の手順は、1) 魚から耳石を採取して標本を作製、2) 標本の標識パターンを顕微鏡で観察し、該当すると思われる基準標本と照合して確認し、3) 査定結果を記録することです。ADFGでは上記のソフトウェアを活用することで、1)～3)の作業を迅速かつ確実に処理します。ソフトウェアは、常駐するシステムエンジニアと査定者が日々議論を重ねることで改良され、以下に記述するように、優れた機能を数多く有しています。

1) 耳石採取～標本作製

サンプリング現場では、調査対象となる魚体の頭部に個体識別用のバーコードタグを付し、魚体測定データをバーコードタグ情報とともにデジタルデバイスへ入力します(図2 a)。頭部から耳石を採取する際は、バーコードタグをデジタルデバイスへ認識させつつ行います(図2 b)・c)。この手順により、デジタルデバイスの情報が無線でソフトウェアへ送られ、魚種や採集日・場所などのID情報を含む標本識別用のバーコードシールが自動的に作成されます(図2 d)。

2) 温度標識の査定

1)で作成した標本の耳石を、微細に研磨しながら顕微鏡で観察します。この手順は日本とはほぼ同様です(高橋 2006)、本稿では割愛します。

3) 査定結果の記録

全ての操作はタッチパネルで行います。まず、バーコードリーダーに標本のバーコードシールを読み込ませます(図3 a)。すると、パネル上に魚種・採集場所・日時などのサンプルIDが表示されます。標本が無標識の場合、アイコン【Not Marked】をタッチして査定を完了させます。標識魚の場合は、アイコン【Marked or More Date】をタッチします(図3 b)。

次に、査定結果を①Hatch Code、②Mark ID(ふ化場名)、③淡水・海水年齢の順に入力します。①の候補は、魚種によって限定されたものだけが表示されます。また、②の入力候補も、①の入力結果によって限定され、誤入力の確率を低めます(図3 c)。該当する基準標本を確認する場合は、アイコン【View Image】をタッチします(図3 d)。すると、核から第1バンドまでの距離やバンド幅など、査定の基準となる情報を含む画像が瞬時に表示され、査定精度の向上に寄与します(図3 e)。



図2. 魚体測定から耳石採取までの作業工程。a) デジタルデバイスへの魚体測定データ入力とバーコードタグの装着。b) バーコードリーダーによるバーコードタグ情報の読み取り。c) 魚体頭部からの耳石摘出。d) 標本を識別するバーコードシール。

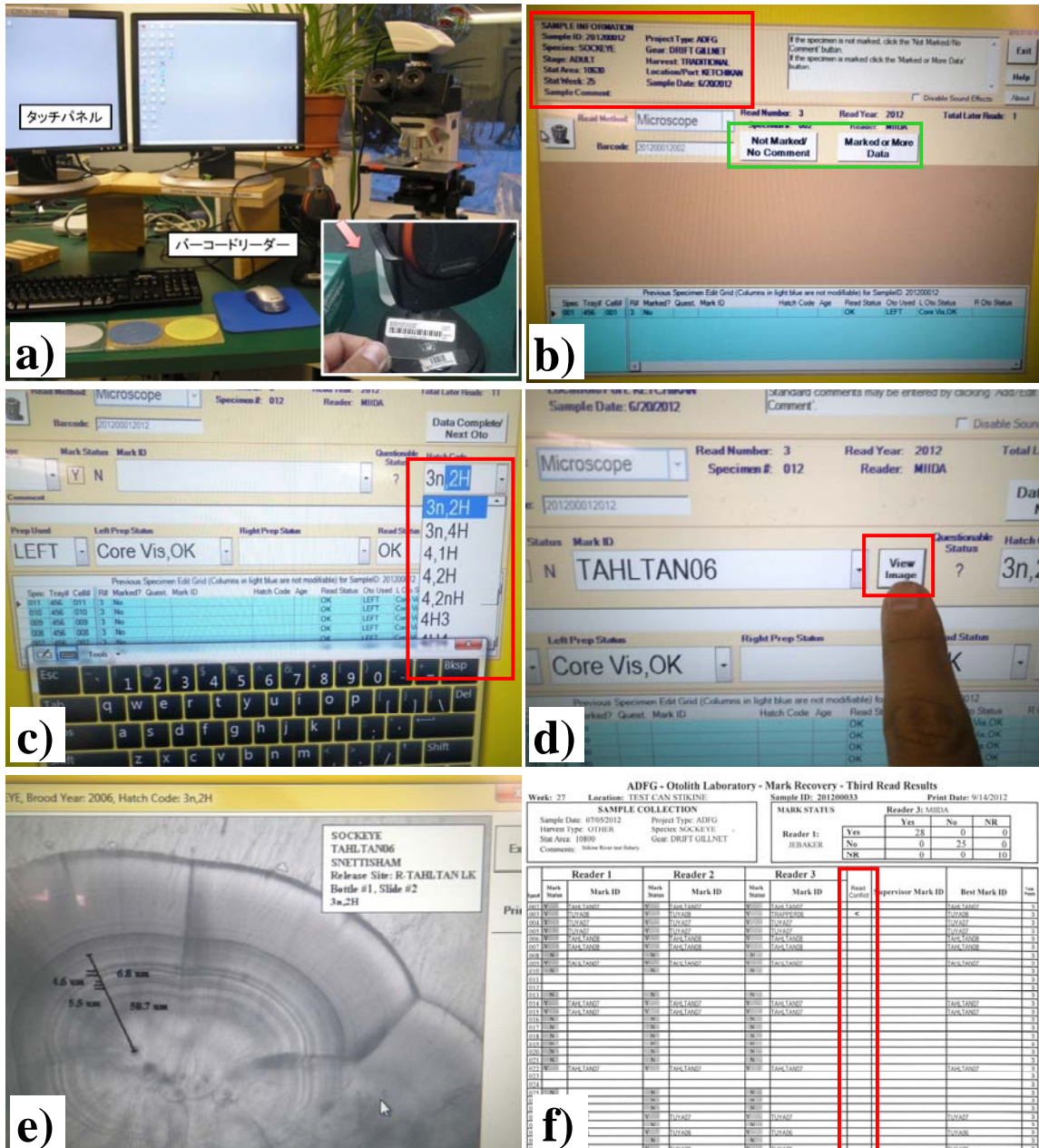


図3. 査定結果をデータベースに入力する作業工程。 a) 査定用機器一式とバーコードシールの読み取り (白枠)。 b) タッチパネルに表示されるID (赤枠)と標識・無標識を入力するアイコン (緑枠)。 c) Hatch Codeを入力するアイコン。 d) 基準標本画像を表示させるアイコン。 e) 基準標本画像。焦点から第一バンドまでの距離やバンド間隔など、マークを特定するために必要な情報も表示される。 f) データベースより出力される査定結果の一覧。事前の査定結果と合わない個体 (Read conflict) にはチェックが入る (赤枠)。

情報公開の即時性

3) による査定結果は、データベースとして管理されます (図3f)。これにより、漁獲物に占める標識魚の割合など、漁業者の関心が高い情報は、入力が完了した段階で自動的にホームページへ公開されます (<http://tagotoweb.adfg.state.ak.us/OTO/reports/MarkSummary.aspx>)。前述のとおり、アラスカ州におけるサケ・マス漁は、野生魚の資源量によって漁獲規制が実施されますので、野生サケ

資源量の指標となる温度標識調査の注目度は高く、そのニーズに沿った情報公開が実施されています。

ノイズと温度標識の見分け方

自然界における偶発的な要因で生じた野生魚のリング (以下、ノイズと記す) は、ときに温度標識に酷似し、その区別は非常に困難です (高橋2006)。日本では、それらを識別する基準が曖昧であり、各自の基準に頼って仕分けされているの

が現状です。今回、ADFGの査定者と議論し、その識別に関する以下の共通認識を得ました。

【ノイズの判断基準】

- ①温度標識に似たリングの配列であっても、その濃淡が通常の日周輪と同程度であった場合。
- ②バンドを構成する各リングの間隔が、一部分であっても等間隔でない場合。
- ③ノイズは各バンドの幅が温度標識より広いことが多く、基準標本のバンド幅と比較して大きく異なった場合。

図4 a) および図5は、著者がそれぞれ Hatch Code: 1,4H および 2,4H の温度標識と判断したものの、ADFGではノイズと識別されたものです。前者は、第2バンド幅が広すぎる(基準③)、第2バンドの第3リングと第4リングの間隔が他のリングの間隔と異なっている(基準②)の2点によりノイズと識別されます。後者の理由は、第2バンドのリング間隔が不均一なこと(基準②)です。

上記の基準があるものの、ADFGの査定者間でも、ノイズに関する見解の相違が生じることがあるそうです。また、魚種によってノイズの出現頻度に違いがあり、ADFGが扱う魚種の中では、ベニザケが最も低く、反面、サケやカラフトマスは高いとの見解が示されました。通常、各サンプルは複数の担当者によって査定されますが、ノイズによる誤査定の確率が低いベニザケに関しては、一次査定のみで完結することもあるとのこと。

査定能力の評価

温度標識を査定する際は、リングの数やその太さ・間隔などから特定のパターンを識別しますが、この作業にはかなりの熟練度を必要とします(高橋 2006)。したがって、各自の経験値により、査定基準にバラツキが生じることが予想されます。

ADFGでは、各自の査定能力を定期的に評価するシステムが構築されており、その手法として、主にカッパ係数(Kappa coefficient)が採用されています(Hagen et al. 1995)。カッパ係数とは、査定者AとBの査定結果がどれだけ一致するかを表す指標です。0~1の範囲をとり、1に近いほど両人の査定結果の関係が強いことを示します。カッパ係数は標識パターン別に解析されることから、査定結果の一致性のみならず、誤査定しやすいパターンを認識することも可能です。

著者は、ADFGによって確認済みのベニザケの耳石標本500個体を査定し、著者とADFGによる査定結果の一致性をカッパ係数によって評価していただきました(図6)。なお、分析に必要と

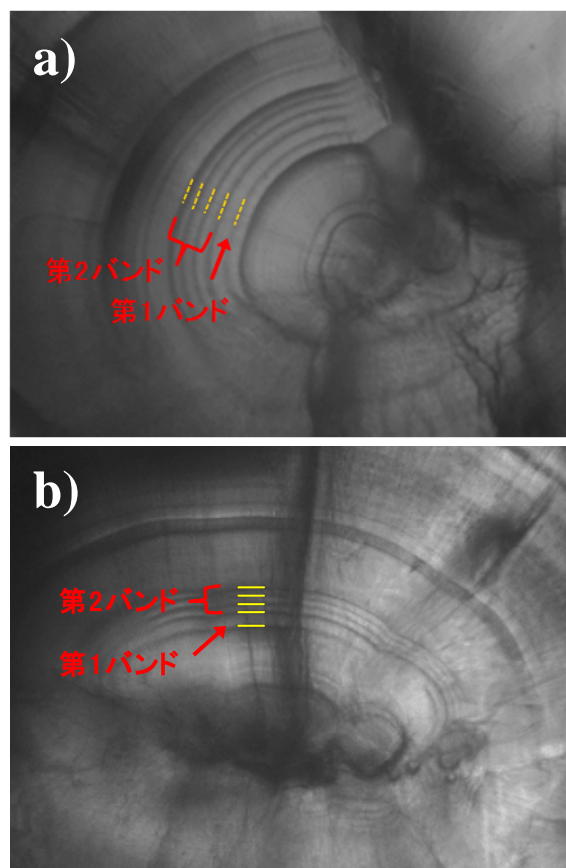


図4. ベニザケ野生魚のノイズとそれに相当する温度標識。a) ベニザケ野生魚のノイズ(オレンジ色の点線)。b) 耳石温度標識(魚種:ベニザケ, Mark ID:TAHLTAN08, Hatch Code:1,4H, ふ化場:DIPC)。

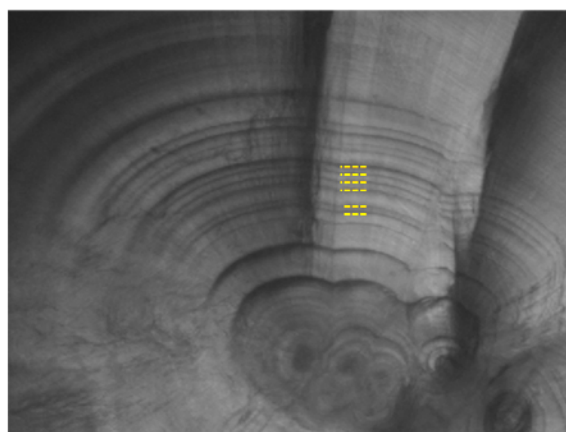


図5. Hatch Code:2,4Hに類似するベニザケ野生魚のノイズ(オレンジ色の点線)。

なるデータセットは前述のデータベースから容易に入手されます。全体(Over all)は0.80と比較的高い値でしたが、Mark ID:MCDONALD07, SPEELARM08A, TUYA05は0(完全に不一致)でした。この原因は、日本では施されないふ化後

Table of 9 x 9 Kappa

DATA

Mark ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	totals
MC DONALD07										4
SPEEL ARM07A		1	3							4
SPEEL ARM08A										0
TAHLTAN07				13						13
TAHLTAN08					4					4
TUYA05						1				1
TUYA06							10			10
TUYA07		3						26		31
IUYA08									8	8
totals	0	4	5	13	6	0	12	36	8	84

RESULTS

	Kappa	S.E.(0)	S.E.(k)	Lower	Upper
Overall	0.80	0.05	0.05	0.7072	0.9018
MC DONALD07	0.00	0.04	0.04	0.7872	-0.787
SPEEL ARM07A	0.23	-0.19	-1.10	2.3859	-1.916
SPEEL ARM08A	0.00	#NUM!	-0.93	1.8311	-1.831
TAHLTAN07	1.00	0.17	0.17	0.6688	1.3314
TAHLTAN08	0.75	-3.29	-0.97	14.445	-12.87
TUYA05	0.00	-0.04	-0.40	0.7872	-0.787
TUYA06	0.81	0.18	0.21	0.4006	1.2142
TUYA07	0.68	0.15	0.08	0.7319	1.04
IUYA08	0.88	0.24	0.32	0.2445	1.5085

図 6. カッパ法による査定結果の一致性の検証。緑枠内は 2 者の査定結果が一致した数を、赤枠内は全体 (Overall) および各 Mark ID のカッパ係数を示す。

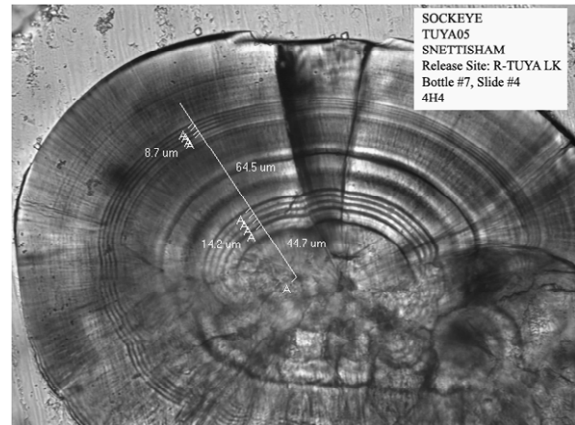


図 7. ふ化後のマークがある耳石温度標識 (魚種: ペニザケ, Mark ID: TUYA05, Hatch Code: 4H4, ふ化場: DIPG)。

のバンド (図 7) を見逃したことで、標識パターンは正確に識別したが、耳石輪紋による年齢査定を誤り、別年級で同一のマークと判断したことによるものでした。このように、カッパ係数は誤査定の要因を認識し、査定者のスキルアップに大変有効な手段となります。

今後の耳石温度標識の扱い方

温度標識は、従来の鰭切標識に比べ、非常に強力なツールです。耳石温度標識を活用した調査によって、回帰親魚に占める自然産卵魚の割合推定 (森田ら 2013) など、今までよく分からなかったことについての報告が次々となされつつあります。今後も耳石標識の活用を前提とした調査計画が組まれることが増えていくことが考えられます。

その場合、査定者にはより複雑化した標識コードを今まで以上に高精度かつ大量に査定することを求められることになり、その労力は飛躍的に増加するでしょう。

今回紹介した ADFG の温度標識解析システムは、査定業務の省力化、迅速性・正確性の向上をもたらすことは間違いありませんが、莫大なコストを要しますので、まずは、査定能力を客観的に評価する体制を構築して、その能力の着実な向上を図ることが肝要であると考えます。

謝辞

ADFG の Bev Agler 女史, Dion Oxman 氏, Lorna Wilson 女史をはじめ、職員の皆様は大変暖かく歓迎くださり、私の拙い英語による質問にも真摯にお答えいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- Hagen, P., K. Munk, B. Van Alen, and B. White. 1995. Thermal mark technology for inseason fisheries management: a case study. *Alaska Fishery Research Bulletin*, 2: 143-155.
- Mears, H. C., and R. W. Hatch. 1976. Overwinter Survival of Fingerling Brook Trout with Single and Multile Fin Clips. *Transactions of the American Fisheries Society*, 105: 669-674.
- 森田健太郎・高橋悟・大熊一正・永沢亨. 2013. 人工ふ化放流河川におけるサケ野生魚の割合推定. *日本水産学会誌*, 79: 206-213.
- Okamoto, Y., T. Ohnuki, S. Sato, N. Watanabe, Y. Miyauchi, T. Arauchi, M. Iida, and S. Urawa. 2012. Releases of Otolith Marked Salmon from Japan in Fall of 2011 and Spring of 2012. *NPAFC Doc. 1418*. 11 pp.
- Oxman, D. S. and R. P. Josephson. 2011. Releases of Otolith Marked Salmon from Alaska in 2010. *NPAFC Doc. 1327*. 5pp.
- 坂野栄市. 1960. 北海道に於ける鮭稚魚の標識放流試験. *北海道さけ・ますふ化場研究報告*, 15: 17-38.
- 関二郎・清水幾太郎. 1996. 広尾川におけるサケ稚魚の放流時期の違いによる回帰率について. *水産海洋研究*, 60: 339-347.
- 高橋昌也. 2006. 耳石温度標識技術を用いたサケ・マス類の標識放流と調査研究. *養殖*, 542: 82-85.
- 浦和茂彦. 2001. さけ・ます類の耳石標識: 技術と応用. *さけ・ます資源管理センターニュース*, 7: 3-11.
- Volk, E. C., S. L. Schroder, and J. J. Grimm. 1999. Otolith thermal marking. *Fisheries Research*, 43: 205-219.