

## 西湖におけるクニマスの産卵環境—Ⅶ

### ～令和3年度の水중ビデオカメラシステムの映像解析～

加地弘一・藤原 亮・馬籠 純\*

水産技術センターでは、クニマス *Oncorhynchus kawamurae* の産卵生態解明を目的に、2017年度からクニマスの産卵場である西の越沖合の水深30m付近にある湖底礫地に定点カメラを設置して、産卵期のクニマス親魚の来遊状況や産卵行動、クニマス卵を食害しているウナギの出現状況などについて調査を行ってきた<sup>1-6,8)</sup>。定点カメラによる調査は、市販のタイムラプスカメラを特注ハウジングに入れて使用するため、システムが単純でコストが抑えられる一方、電池容量や記憶媒体の容量などにより撮影可能日数や画質などに制限があること、コマ撮り画像のため情報量が少ない等の問題があった。また、情報の取得には毎回カメラを設置し回収する必要があった。これらの問題を解決するため、2020年にインターネット経由で産卵場礫地の映像をパソコン上でリアルタイムに確認できる「水中ビデオカメラシステム」を構築した<sup>7)</sup>。本報では、2021年度に同システムで撮影した映像を解析し、クニマスの来遊状況、ヨーロッパウナギ *Anguilla anguilla* (以下、ウナギ) によるクニマス卵の食害状況やカワウの出現状況を調査した結果を報告する。また、過去のタイムラプスカメラでの撮影画像からクニマスとウナギを自動集計するための画像解析ツールを開発するとともに、開発したツールを用いたクニマスおよびウナギの出現状況のデータ化を行ったので報告する。

なお、本研究は山梨県総合理工学研究機構の「クニマスの保全及び養殖技術に関する研究」として実施した。

#### 材料及び方法

2021年11月5日から2022年3月6日までの122日間、毎日8時30分から15時30分までの7時間、水中ビデオカメラシステム<sup>7)</sup>で撮影し録画用ネットワーク接続型ストレージ(Qnap, TBS453-DX, 以下NASという)に記録された映像についてパソコンの画面上で目視確認し、次の各項目について調査日ごとに計数した。なお、出現尾数などの解析は、画像が比較的確認しやすい時間帯(10時から11時)の画像を用いた。

#### クニマスの出現状況

(最多確認尾数) 10時から11時の映像のうち1画面中に確認出来るクニマスの最多尾数

(最多確認ペア数) 10時から11時の映像のうち1画面中に確認出来るクニマスの最多確認ペア数

(定位方向) 無作為に選択した9シーンを静止画にして、クニマスが頭を向けている方向を東西南北別に集計

#### ウナギの出現状況

(最多確認尾数) 10時から11時の映像のうち1画面中に確認出来るウナギの最多尾数

(延べ確認尾数) 10時から11時に確認されたウナギの延べ数

(時間帯別の確認尾数) ウナギが確認された任意の5日間について、ウナギの出現数を1時間毎に集計

(出現と退出方向) 無作為に選択した32シーンについて、ウナギの出現と退出方向を東西南北別に集計

## カワウの出現状況

(最多確認羽数) 10時から11時の映像のうち1画面中に確認出来るカワウの最多羽数

(延べ確認羽数) 10時から11時に確認されたカワウの延べ数

(出現間隔) カワウが頻繁に確認された任意の2日間の映像について、カワウが出現してから次に出現するまでの時間を計測

(出現と退出方向) 無作為に選択した37シーンについて、カワウの出現と退出方向を東西南北別に集計

## 画像解析ツールの開発と自動集計

機械学習の適用により、産卵場で撮影した画像からクニマスとウナギの数を自動集計するための画像解析ツールの開発を行った。

画像解析ツールの開発には、2018年10月16日から2019年2月26日にクニマス産卵場礫地でタイムラプスカメラにより撮影した画像を用いた。画像解析ツールの開発に用いた画像の情報を表1の左欄に示す。なお、2018年10月16日から12月17日をモデル作成期間、2018年12月18日から2019年2月25日をモデル検証期間とした。

画像解析ツールの主な開発プロセスは①～⑤とおりである。なお、開発実行環境(OS,プログラミング言語,ライブラリ管理,ソースコード管理・実行,ライブラリ)については表2に示したとおりである。

- ① (画像処理) 次のプロセスで動体検出(差分検出)を容易にするための画像処理を実施
- ② (動体検出) フレーム間差分(2時期の画像の差)の計算し差分の検出を行う
- ③ (分類器の作成) クニマス, ヨーロッパウナギ, それ以外(砂礫や湖水等)の3種類を分けるための分類器を作成(手動により抽出した画像による学習を実施)
- ④ (分類器による検出) 作成した分類器により, 解析対象画像からクニマスとヨーロッパウナギを検出(ディープラーニングによる学習を導入)
- ⑤ (目視データとの検証) 目視によるデータ化の結果との比較し精度を検証

開発した画像解析ツールを用いて、2020年12月13日から2021年3月11日に水中ビデオカメラシステムで撮影された映像(表1右欄)からクニマスの最多確認尾数の自動集計を行った。また、同映像を目視により集計した結果との比較検証を行った。

表1 画像解析ツールの開発に用いた画像と解析対象とした画像の情報

項目	解析ツール作成 [5秒間隔タイムラプス動画]	解析対象データ [30FPSカラー動画]
期間	2018/10/16～2019/02/26	2020/12/09～2021/3/11
撮影時間帯	9:00～15:00(6時間)	時期によって異なる (日中:7時～18時の間)
観測データ種別	タイムラプス動画	動画(カラー)
1フレーム当たりの実時間 (フレームレート)	1フレーム=5秒 (10フレーム/秒)	1フレーム=1/30秒 (30フレーム/秒)
画像幅(ピクセル)	1,280	1,920
画像高(ピクセル)	720	1,080
ファイル形式	AVI	AVI
1ファイル当たり記録期間	1日	15分

表2 画像解析ツールの開発実行環境

項目	名称等
OS	Windows 10
プログラミング言語	Python3
ライブラリ管理	Pip, Conda
ソースコード編集・実行	Jupyter Notebook
ライブラリ (カッコ内は用途)	OpenCV (画像処理)
	Scikit-learn (機械学習)
	Keras (深層学習)
	Numpy (科学計算)
	Pandas (時系列データ操作)
	Matplotlib (グラフ描画)
	Openpyxl (Excel 出力)
	Pyclustering (クラスタリング)

## 結果

### クニマスの出現状況

調査日ごとのクニマスの最多確認尾数と最多確認ペア数を図1に示す。映像の記録を開始した令和3年11月5日にはすでにクニマスが出現しており、最多確認尾数は28尾、最多確認ペア数は8ペアであった。最多確認尾数の最長は11月13日の33尾、最多確認ペア数の最長は11月中旬から下旬の10ペアだった。その後、最多確認尾数、ペア数とも12月下旬にかけて減少していき、12月下旬から1月下旬までは8尾前後、3ペア前後で推移した。クニマスは1月下旬に急減し、2月になると1~2尾が散見されるのみになり、2月28日以降は確認されなかった。ペア数も1月下旬に急減し、1月28日に1ペア確認されて以降は確認されなかった。

令和3年度のクニマスの産卵は11月上旬には既に始まっており、産卵ペアの出現盛期は11月中旬から下旬で、1月下旬にはほぼ終了したと考えられた。

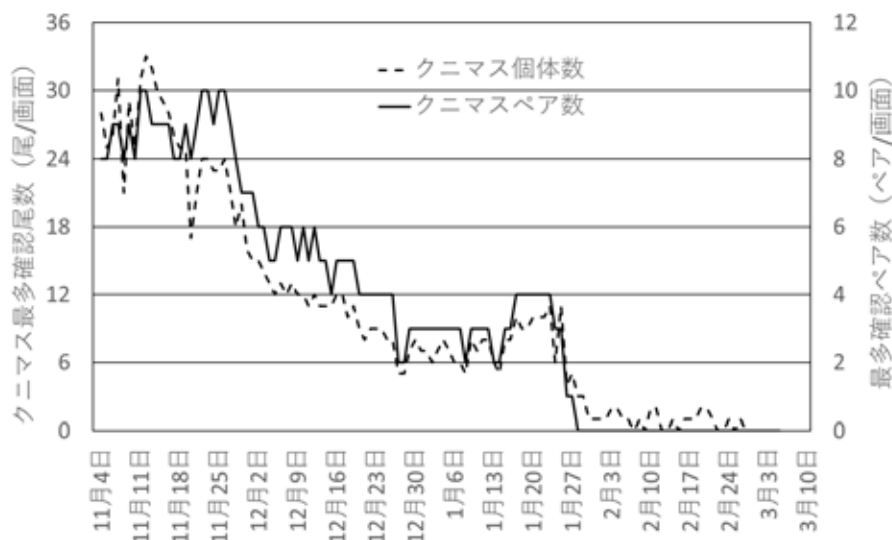


図1 調査日毎のクニマス最多確認尾数と最多確認ペア数

クニマスが画面の東西南北どちらに頭を向けているかを集計した結果を図2に示す。合計95尾のクニマスの定位方向を集計したところ、頭を北側に向けた個体が64尾(66.7%)、東側が10尾(10.5%)、南側が11尾(11.4%)、西側が11尾(11.4%)であった。

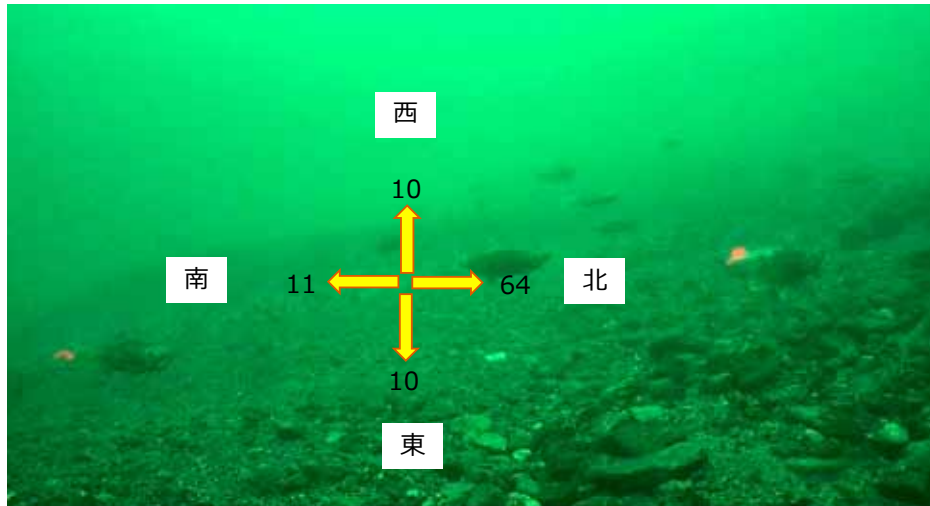


図2 方角別のクニマス定位数

### ウナギの出現状況

調査日ごとのウナギの最多確認尾数を図3に示す。ウナギは11月10日から12月16日までの間に11日確認され、いずれも1画面中1尾のみで、複数個体が確認されることはなかった。

調査日ごとのウナギの延べ確認数を図4に示す。延べ確認尾数は12月2日に2尾、12月5日に3尾が確認されたが、その他の日は1尾のみであった。なお、令和3年度は過去の調査で見られたウナギによるクニマス卵の食卵行動はほとんど確認されなかった。

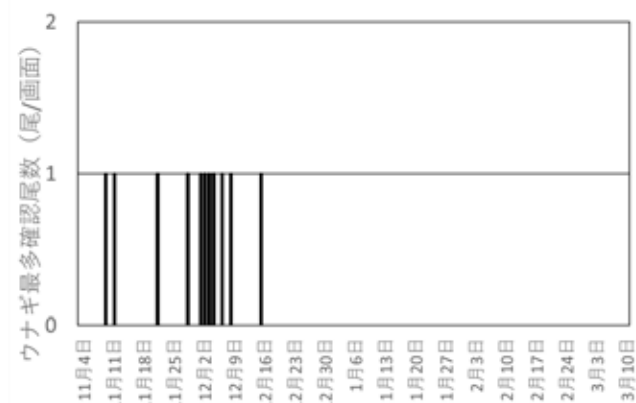


図3 調査日毎のウナギ最多確認尾数

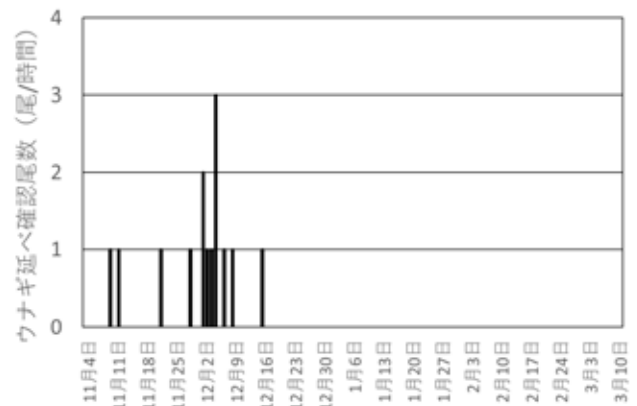


図4 調査日毎のウナギ延べ確認尾数

時間帯別のウナギ確認尾数を図5に示す。64尾のウナギを出現時間帯別に集計した結果、最も多くのウナギが確認されたのは10時台の6尾で、次いで12時台5尾、11時台4尾で、8時台、13時台、15時台は1尾あった。ウナギは10時から12時にかけて多く確認され、朝方と13時以降は少なかった。

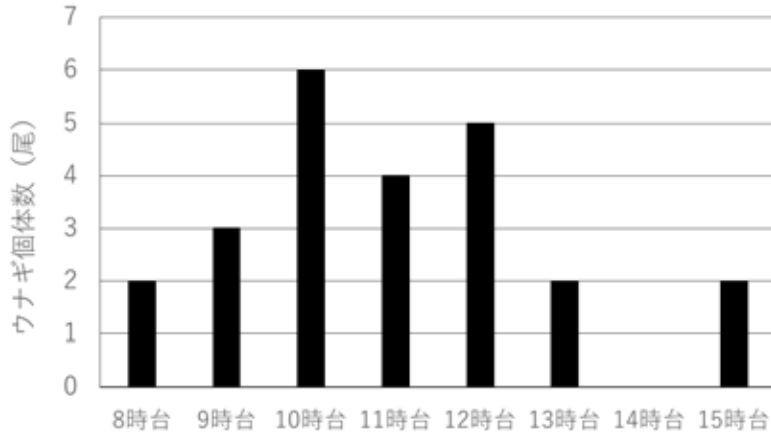


図5 時間帯別のウナギ確認尾数

ウナギの出現方向と退出方向の集計結果を表3と図6に示す。出現方向で最も多かったのは北側の14尾で、次に西側が9尾、南側が6尾、東側が3尾であった。退出方向は北側が最も多く18尾で、次に西側9尾、南側5尾で、東側は0尾であった。前出のとおり、礫地は南北に傾斜し北側が浅くなっており、ウナギは主に陸域側から出現し、陸域側に退出することが多かった。

表3 ウナギの出現方向と退出方向の集計結果

	出現	退出	合計
北	14	18	32
東	3	0	3
南	6	5	11
西	9	9	18



図6 ウナギの出現方向と退出方向

### カワウの出現状況

調査日ごとのカワウの最多確認羽数を図7に示す。カワウは1月5日から3月5日までの間に17日確認され、いずれも1画面中1羽のみで、複数個体が確認されることはなかった。

調査日ごとのカワウの延べ確認羽数を図8に示す。延べ確認羽数は1月27日に6羽と最も多く、次いで1月10日と1月27日に4羽であった。

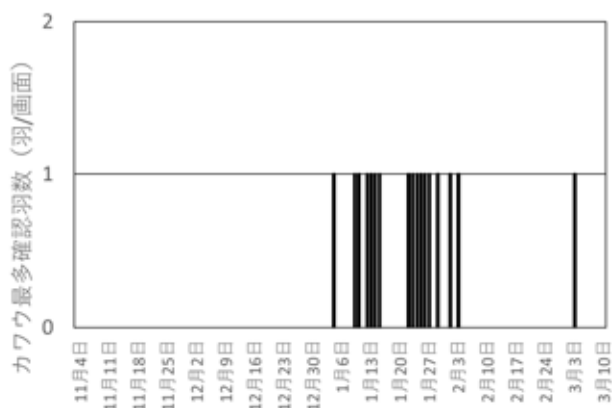


図7 調査日毎のカワウ最多確認羽数

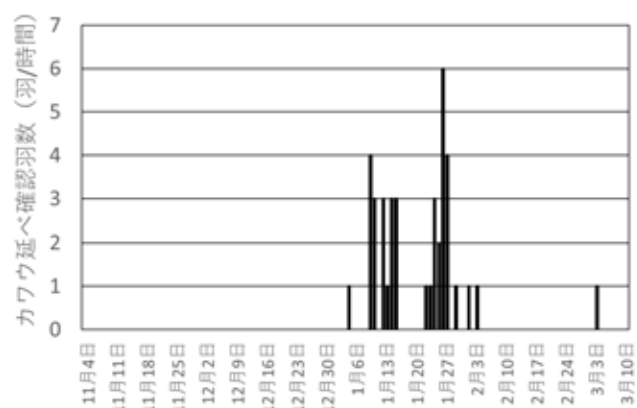


図8 調査日毎のカワウ延べ確認羽数

カワウの出現間隔の集計結果を表4に示す。1月25日は8:48から15:19までに26回カワウが確認され、カワウが確認されてから次に確認されるまでの平均間隔は15分38秒、最短16秒、最長70分50秒だった。1月28日は8:16から14:59までに17回確認され、出現間隔は平均19分34秒、最短4分05秒、最長99分11秒だった。1月25日の最短の確認間隔は16秒と短く、同一個体が1回の潜水で2回撮影されたか、複数個体が同時に潜水し別々に撮影された可能性が考えられた。

表4 カワウの出現回数と出現間隔

	1月25日	1月28日
出現時間帯	8:48 - 15:19	9:16 - 14:59
出現回数	26回	17回
出現間隔	平均	15分38秒
	最小	16秒
	最大	70分50秒
		19分34秒
		4分05秒
		99分11秒

カワウの出現方向と退出方向の集計結果を表5と図9に示す。出現方向は南側が20羽と最も多く、次に西側14羽、北側4羽であった。退出方向は西側が21羽と最も多く、次に南側12羽、北側5羽であった。カワウの礫地への侵入と退出は西側と南側が全体の88.2%を占めていた。クニマス産卵場の湖面にはクニマス産卵場保護区を示すブイとロープが湖面に広く張り巡らされている。また、ブイが波浪などで動かないようにするために、ブイの数か所は湖底に沈めた錘とアンカーロープで連結されている。カワウの侵入が多くみられる礫地南側にもアンカーロープがあることから、カワウはこのアンカーロープに沿って潜行している可能性が考えられた。

表5 カワウの出現方向と退出方向の集計結果

	侵入	退出	合計
北	4	5	9
東	0	0	0
南	20	12	32
西	14	21	35



図9 カワウの出現方向と退出方向

### 画像解析ツールの精度

タイムラプスカメラで撮影した画像データを用いて、画像解析ツールを開発した。開発した画像解析ツールによるクニマス最多確認尾数の集計結果と、同データを目視で集計した結果を図10に示す。観測開始から1月中旬ごろまでは、両者の集計結果は増減傾向がよく一致していた。また、11月上旬ごろまでは、真値との値の差はあるもののグラフの形はほぼ同じといえる。11月上旬ごろから12月上旬までは真値とほぼ同じ値をとっており、12月上旬に値の開きがあるものの、その後1月中旬までグラフの傾向が同じ個所が多い。特に上り幅(下がり幅)に着目すると同じような幅になっている個所が何カ所も存在している。しかし、1月中旬以降は画像解析ツールによる計数結果は真値よりも多い値が検出されており、違う傾向となった。

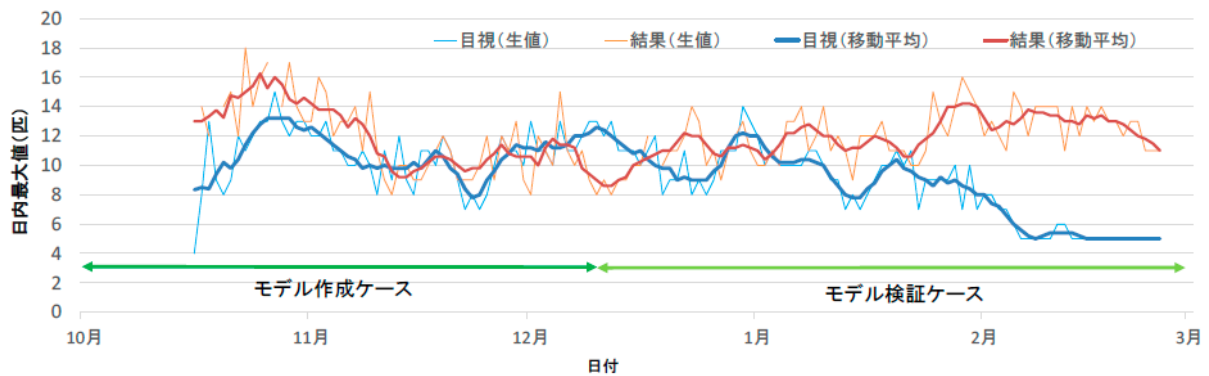


図10 タイムラプスカメラ画像のクニマス最多確認尾数の集計結果  
(橙色：画像解析ツールによる計数，青色：目視による計数)

## 画像解析ツールによるクニマスの集計

開発した画像解析ツールを用いて、2020年12月9日から2021年3月11日に水中ビデオカメラシステムで撮影した映像から、調査日ごとのクニマス最多確認尾数の計数を行った。また、同じデータを目視によりクニマスの最多確認尾数の計数を行った。両者の計数結果を図11に示す。濁りがあまりなく明るい時は、目視による集計結果は画像解析ツールによる集計結果の標準誤差の範囲に収まっており、増減傾向も概ね一致した。一方、映像が暗く鮮明ではない時期は、画像解析ツールによる集計結果は目視による集計結果に比べ大幅に高い数値であり、過大評価となった。

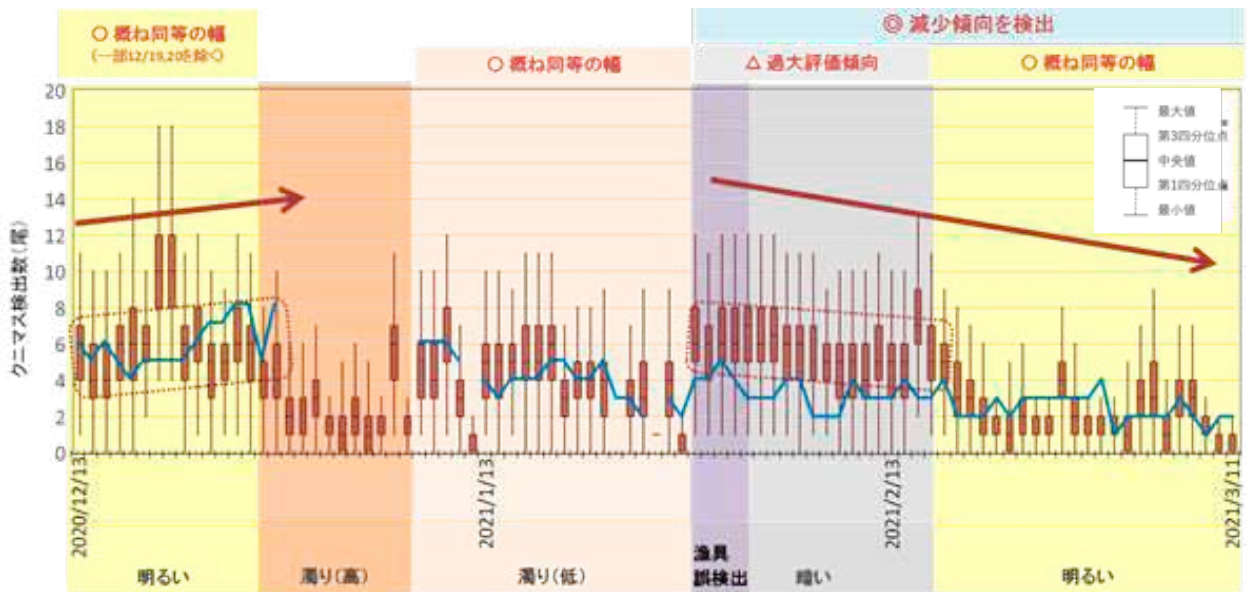


図11 水中ビデオカメラシステム撮影画像の集計結果  
(橙色の箱ひげ図：画像解析ツールによる計数，青色：目視による計数)



## 考 察

これまでの調査におけるクニマスの最多確認尾数と最多確認ペア数の集計結果を図 12 に示す。なお、2017 年から 2019 年はタイムラプスカメラの撮影画像の集計結果、2020 年から 2021 年は水中ビデオカメラシステムによる撮影画像の集計結果である<sup>1-6)</sup>。今年度（2021 年度）は、11 月 5 日から観察を開始した。クニマス个体数は 11 月中旬に最も多く、ペア数は 11 月中旬から下旬に最も多く、いずれも 12 月以降は減少し 2 月下旬にはほとんど確認されなくなった。このことから、2021 年度の産卵最盛期は 11 月中旬から下旬と考えられた。前報<sup>9)</sup>では、2017 年度から 2020 年度までの調査結果をとりまとめ、西湖におけるクニマス産卵最盛期は 12 月下旬で 2 月下旬頃にはほぼ終了すると考察しているが、今年度は産卵最盛期、終了時期ともにそれより 1 か月以上早かった。また、2021 年は確認尾数とペア数ともに 2017 年度の調査開始以降で最高数であった。これらの要因として、産卵場付近で継続して食卵ウナギを駆除したことでクニマス産卵環境が改善し、資源量が回復している可能性も考えられるが、詳細は不明である。また、青柳<sup>7)</sup>は産卵場礫地で 10 月と 11 月に成熟したヒメマスが捕獲されると報告していることから、今回の観察個体にヒメマスが含まれている可能性も考えられる。ただ、青柳<sup>7)</sup>は 11 月以降に捕獲されるのはクニマスのみであると報告している。また、過去の遺伝子調査で、西湖のクニマスはヒメマスとの交雑は起こっていないことが報告<sup>10)</sup>されており、両種の間には生殖的隔離が存在すると考えられる。今後、産卵場礫地でのクニマスの捕獲や、湖内での釣獲個体などを用いて遺伝子解析を行い、遺伝的な交雑が起きていないことを再確認する必要があると考えられた。

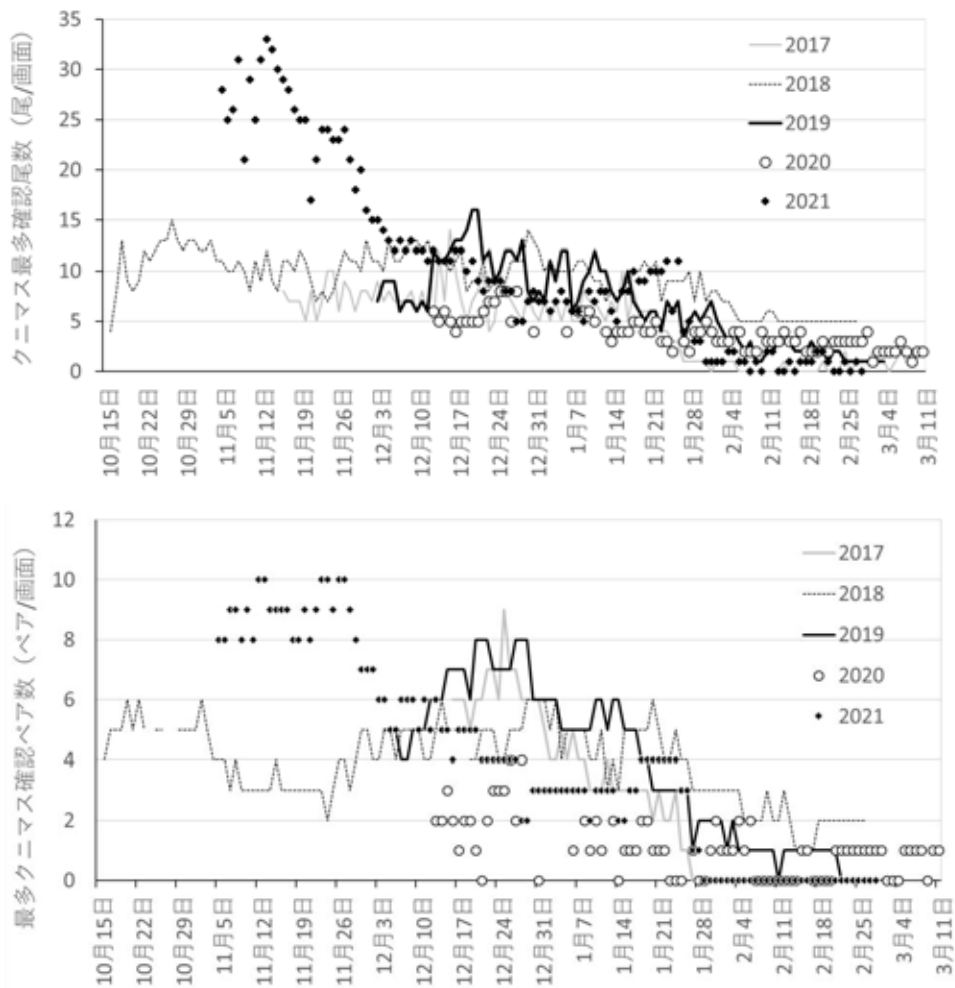


図 12 クニマス最多確認尾数（上）と最多確認ペア数（下）の集計結果

これまで、クニマス資源への最長の危害要因として、産卵場礫地の湧水量の減少のほか産卵場礫地におけるヨーロッパウナギによる産着卵の食害が懸念されてきた。ヨーロッパウナギについては、水産技術センターで効率的な捕獲方法を検討するとともに、西湖漁協により産卵場礫地を中心とした延縄による捕獲が行われており、捕獲数は年々減少している<sup>11-14)</sup>。また、今年度水中ビデオカメラシステムで確認された1画面当たりのウナギ最多尾数は1尾のみで、確認日数も11日と過去最少であった(図13)。このことから、ヨーロッパウナギによるクニマス資源への影響は軽減されつつあると考えられる。なお、今回の画像解析の結果ウナギは主に礫地北側から出入りしていることが多く、今後の駆除場所を決定する際に参考になると考えられる。一方、昨年度これまで確認されていなかったカワウが礫地でクニマスを追尾する様子が撮影されるようになった。カワウは1月以降に確認されていることから、産卵盛期を過ぎた衰弱個体を狙っていると考えられる。カワウによる食害はクニマス資源への新たな危害要因であり、今後カワウの捕獲や来遊防除などの対策方法の検討が必要である。なお、カワウは礫地の南側にある産卵場保護区用のアンカーロープに沿って潜行している可能性も考えられることから、産卵場保護区のアンカーロープの移動についても検討すべきである。

産卵場でのクニマスやウナギの出現状況の把握は、タイムラプスカメラや水中ビデオカメラシステムで撮影した画像を職員が目視で観察し、直接データ化する方法で行っている。この方法は、多少暗い画像や不鮮明な場合でも調査員の経験によりある程度データ化することが可能であり、カワウやクニマスふ化仔魚など新たな有用情報が取得できる等のメリットがある。しかし、目視による集計には膨大な時間と労力を要することや、調査員により判断基準等が異なるため客観性に乏しい等の課題がある。そこで、今年度新たに機械学習技術を用いた画像解析ツールを開発し、計数に要する労力の省力化と判断基準の統一化を試みた。開発した画像解析ツールを用いて1画面中のクニマス最多個体数を集計したところ、濁りの影響がなく鮮明な映像が得られた場合は、目視観察による数値と大きな解離は見られず増減傾向も概ね等しく、データ集計の省力化につながる可能性が示唆された。しかし、濁りが強い日や曇って暗い日などは目視データと乖離する事が多く、実用化にはまだ多くの課題が残っている。今後の実用化に向けては、暗い画像の処理方法や差分検出方法の改良や、ウナギやカワウなどの検出方法の検討、誤判定の低減などの改善が必要である。また、将来的には保存画像ではなくリアルタイム画像での検出方法についても検討する必要がある。

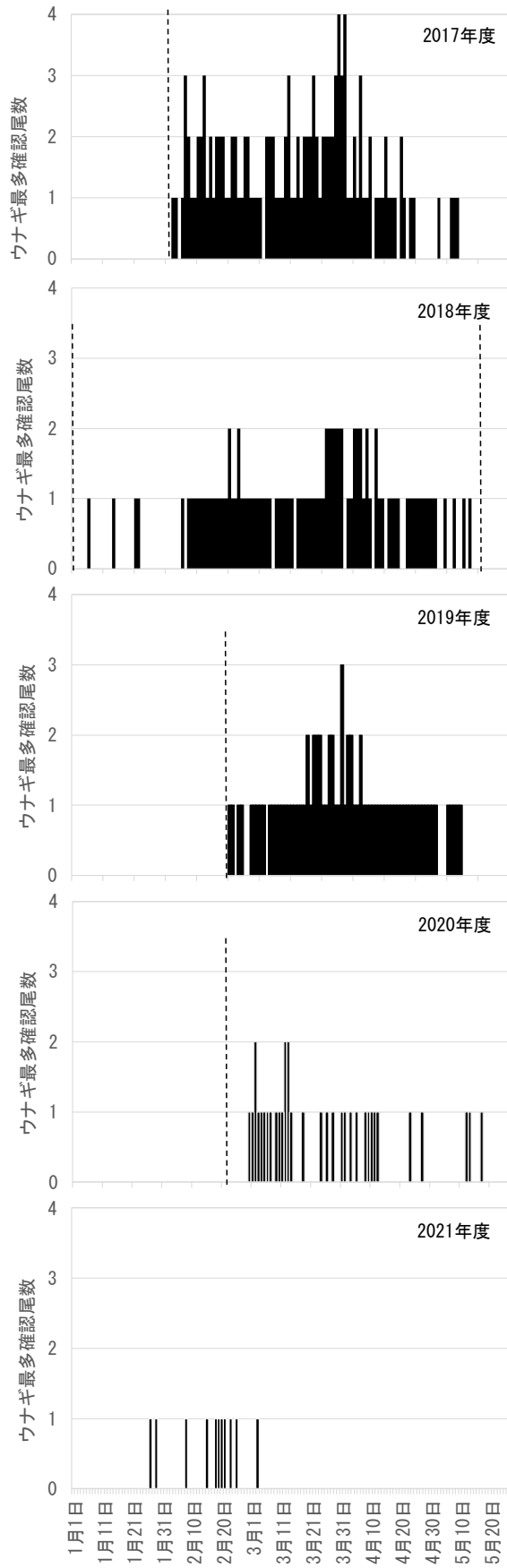


図13 調査年度毎の10時～11時のウナギ最多確認数

## 謝 辞

カメラ類の設置と調整は本栖湖ダイブリゾートの古屋永輔氏，村蕃貴一氏に依頼した。調査が順調に行えたのは，標高 900m，水深約 30m，水温 5～6℃，低照度下，加えて厳冬期という過酷な条件下での潜水作業を高い技術力で滞りなく行っていただいたおかげである。両名に心から感謝申し上げる。

## 要 約

1. 水中ビデオカメラシステムで撮影した画像を解析して，2021 年度の産卵場礫地でのクニマスの出現状況，ウナギの出現状況，カワウの出現状況を調査した。
2. また，水中ビデオカメラシステムの画像からクニマスの出現状況等を自動で集計するための画像解析ツールを開発し，データ化を試みた。
3. クニマス確認数のピークは 11 月中旬で，確認ペア数のピークは 11 月中下旬で，いずれも過去 4 年間の調査と比べ 1 か月以上早かった。また，確認尾数，ペア数はこれまでの調査で最多であった。
4. 今後，捕獲調査などにより遺伝子解析を行い，クニマスとヒメマスの生殖的隔離を再確認する必要があると考えられた。
5. ウナギの確認数と確認期間は過去最少だった。ウナギは主に礫地北側から出入りしていた。
6. カワウは 1 月 5 日から 3 月 5 日までの間に 17 日間確認され，1 月中旬から下旬に頻繁に出現していた。カワウは産卵で衰弱したクニマス親魚を捕食するため礫地に出現していると考えられた。
7. 撮影画像からクニマス個体数等を自動でデータ化する画像解析ツールを開発した。画像解析ツールは明るく澄んだ日には目視観察結果とよく一致したが，暗く濁った日の計数方法の検討等，実用化にはまだ多くの課題があった。

## 文 献

- 1) 大浜秀規・青柳敏裕・谷沢弘将・長谷川裕弥 (2017)：西湖におけるクニマスの産卵環境。山梨県水産技術センター事業報告書，44，45-53.
- 2) 大浜秀規・青柳敏裕・芦澤晃彦・長谷川裕弥 (2018)：西湖におけるクニマスの産卵環境—II。山梨県水産技術センター事業報告書，45，13-22.
- 3) 加地弘一・青柳敏裕・大浜秀規・塚本勝巳 (2019)：西湖におけるクニマスの産卵環境—III。山梨県水産技術センター事業報告書，46，46-59.
- 4) 加地弘一・青柳敏裕・大浜秀規 (2020)：西湖におけるクニマスの産卵環境—IV。山梨県水産技術センター事業報告書，47，41-47.
- 5) 加地弘一・青柳敏裕 (2021)：西湖におけるクニマスの産卵環境—V。山梨県水産技術センター事業報告書，48，59-66.
- 6) 加地弘一・青柳敏裕 (2022)：西湖におけるクニマスの産卵環境—VI。山梨県水産技術センター事業報告書，49，19-25.
- 7) 青柳敏裕・加地弘一・馬籠 純・森 一博・名倉 盾・上田広樹・望月孝一・大浜秀規 (2022)：産卵期のクニマス観察のための水中ビデオカメラシステムの構築。山梨県水産技術センター事業報告書，49，12-18.
- 8) 大浜秀規・加地弘一・青柳敏裕・塚本勝巳 (2020)：西湖におけるクニマス *Oncorhynchus kawamurae* の再生産 II.産卵と阻害要因。水生生物，2020 巻，1-11.
- 9) 青柳敏裕・加地奈々・長谷川裕弥 (2013)：クニマスの生態解明及び増養殖に関する研究。山梨県理工学研究機構研究報告書，8，89-102.

- 10) Muto N.,K. Nakayama,T. Nakabo (2013) : Distinct genetic isolation between ‘‘Kunimasu’’ (Oncorhynchus kawamurae) and ‘‘Himemasu’’ (O. nerka) in Lake Saiko,Yamanashi Prefecture, Japan, inferred from microsatellite analysis. Ichthyol Res, 69, 189-194.
- 11) 加地弘一・青柳敏裕・大浜秀規・塚本勝巳 (2020) : ヨーロッパウナギによるクニマス卵の捕食実態調査. 山梨県水産技術センター事業報告書, 47, 48-54.
- 12) 加地弘一・青柳敏裕 (2021) : 西湖における効率的なヨーロッパウナギ捕獲方法の検討. 山梨県水産技術センター事業報告書, 48, 67-75.
- 13) 加地弘一・青柳敏弘 (2022) : 西湖における効率的なヨーロッパウナギ捕獲方法の検討―II. 山梨県水産技術センター事業報告書, 49, 26-33.
- 14) 加地弘一・青柳敏弘 (2022) : 西湖における効率的なヨーロッパウナギ捕獲方法の検討―III. 山梨県水産技術センター事業報告書, 49, 34-38.