
諏訪湖のヒシを除去することによる 観光および漁業に与える経済効果

～愛される諏訪湖であり続けるために～

慶應義塾大学経済学部 4年

大沼あゆみ研究会 10期

学籍番号:21015830

辻 遥一

2014/01/28

-要旨-

長野県のほぼ中心に位置する諏訪湖。かつては、ワカサギがたくさん釣れる湖、アオコだらけの緑色の湖として広く知られていた諏訪湖が、時代の変化、環境の変化とともにそのあり方を変えつつある。今後諏訪湖はどうなっていくのか、そしてどうあるべきなのか。本論文では、環境経済学的視点から諏訪湖のあるべき状態を考察することを目的にして論ずる。

空澄みて寒きひと日やみづうみの

氷の裂くる音ひびくなり

赤彦

目次

序章.....	3
第1章 諏訪湖について.....	4
1.1 諏訪湖とは.....	4
1.2 諏訪湖の観光.....	5
1.3 諏訪湖の漁業.....	6
第2章 御神渡しについて.....	7
2.1 御神渡しとは.....	7
2.1.1 御神渡りの起生要因.....	8
2.1.2 諏訪にとっての御神渡し.....	10
2.2 御神渡りの過去と現状.....	11
第3章 諏訪湖とワカサギ.....	13
3.1 ワカサギとは.....	13
3.2 諏訪湖に生息するワカサギ.....	14
第4章 問題点と現状政策.....	15
4.1 現在諏訪湖が抱えている問題.....	15
4.2 現在とられている政策.....	17
第5章 関数の導入・モデル分析.....	18
5.1 関数の導入.....	19
5.2 モデル分析.....	23
5.2.1 現状の政策の分析.....	24
5.2.2 御神渡しによる収入を考慮した分析.....	26
5.2.3 最適なヒシの量の考察.....	30
第6章 結論・まとめ.....	31
参考文献.....	32
あとがき.....	34

序章

本論文は、長野県諏訪市に位置する諏訪湖において、2大シンボルともいえるワカサギと御神渡りの特徴をとらえた上で、諏訪湖がどのような水質状態であることが望ましいかを現実的に考察する。

諏訪湖は、長野県の湖の中で最大の面積を誇り、ワカサギという魚が漁業の中心資源となっている。単にワカサギの成魚を漁獲するだけでなく、卵を全国の湖沼に大量に販売しているため、ワカサギが諏訪に与える経済効果は大きい。秋から冬にかけてはワカサギ釣りが非常に人気で、毎年多くのワカサギ釣りファンが訪れ釣りを楽しんでいる。ワカサギは、いわば諏訪湖のシンボルと言える。

また、諏訪湖はその立地や気象条件、形状から、御神渡りと呼ばれる他の湖には見られない自然現象が発生する年がある。御神渡りとは湖表面全体が凍りつき、その中心が盛り上がる現象で、地元では冬の訪れを告げる象徴として古くから観測が続けられている。この御神渡りは観光に大きな影響を与えており、発生すると多くの観光客が見物に訪れる。

戦前の諏訪湖は水が澄んでおり、ほぼ毎年御神渡りが観測されていたが、戦後の高度経済成長に伴い水の富栄養化が進み、その結果 1965～2010 年にかけて御神渡りが観測されることがほとんどなくなってしまった。水の富栄養化が進むと気温が低下しても凍りつきにくくなってしまふのである。その反面、栄養分の増加した水は植物プランクトンの増加を助長し、植物プランクトンを主な食料とするワカサギは数を増やすこととなった。

近年の諏訪湖は、80年代から力が入れられた上下水道の整備や美化活動が実を結び、御神渡りが再び観測される水質を取り戻し、冬場の観光に活気が戻りつつある。しかしその反面、美化された諏訪湖は貧栄養状態となり植物プランクトンが減少し、ワカサギの数が激減してしまった。

以上の背景をふまえたうえで、現在諏訪湖の水質に大きな影響を与えている水草のヒシの量を変数として、ワカサギがもたらす経済効果、御神渡りによる観光収入、およびヒシ除去費用の増減を分析し、最適なヒシの量および水質状態を検証していく。

第1章 諏訪湖について

第1章では諏訪湖がどのような湖で、どのような魅力を持つのかを述べていく。

1.1 諏訪湖とは

諏訪湖は、長野県の諏訪盆地に位置し、県内最大の面積の湖沼である。流域面積は 531.8 km²で、日本の他の湖沼と比較すると中位である。また流入河川が 31 あるのに対し、流出河川が天竜川 1 つのみとなっており、各流入河川の汚染物質が溜まりやすいという特徴をもつ¹。

諏訪湖を題材とした作品で代表的なものは、三島由紀夫の小説『愛の疾走』や、葛飾北斎の絵画『富嶽三十六景 信州諏訪湖』、Dragon Ash の曲『休日』などがある。1963 年発表の小説『愛の疾走』の中では、冬場諏訪湖でスケートを楽しむシーンがあるが、現在は湖の氷が薄く、滑走は危険である。



葛飾北斎 『富嶽三十六景 信州諏訪湖』

出典: ウィキペディアコモンズ

¹ 長野県 web site 信州

(<http://www.pref.nagano.lg.jp/seikatsuhaisui/infra/suido-denki/gesuido/suwako/index>)

1.2 諏訪湖の観光

諏訪湖の周囲は、上諏訪温泉や下諏訪温泉をはじめ、諏訪大社などの名所が点在する観光地となっている。諏訪湖では、毎年8月に打ち上げ数4万発を誇る諏訪湖祭湖上花火大会が開催され日本最大の規模をもつ花火大会として多数の観客を集めているほか、9月には全国新作花火競技大会も開催される²。湖畔が公園として整備されている個所も多く、諏訪湖観光汽船からカメの形をした竜宮丸、白鳥型のスワン、諏訪湖園からは白鳥型の遊覧船が発着する。遊覧船の竜宮丸は日本で二隻しかない珍しい船である。他に、日本水陸観光が水陸両用バスを使用する湖上クルージングや、湖周辺の陸上観光を組み合わせたダックツアーを実施している。湖の東側には1954年に花火の打ち上げ場として作られた人工島・初島があり、近年では冬期にイルミネーションの設置・ライトアップも行われている³。

冬場にはワカサギ釣りが盛んで、毎年多くのワカサギ釣り客が訪れる他、諏訪湖の特徴的な自然現象である御神渡りが観測される年には、御神渡りを鑑賞しに訪れる観光客が増加する。諏訪の年間観光消費額はおよそ200億円となっているが、御神渡りや御柱⁴が開催される年には宿泊客が増加し、それに伴い観光消費額は増加する傾向にある⁵。



2008年度湖上花火大会

出典:ウィキペディアコモンズ

² 諏訪湖祭湖上花火大会 HP
(<http://www.suwako-hanabi.com/kojyou/>)

³ 諏訪市観光ガイド HP
(<http://www.suwakanko.jp/>)

⁴ 諏訪大社で行われる6年に1度のイベント

⁵ 諏訪市住民懇談会資料およびヒアリング調査より
(http://www.city.suwa.lg.jp/web/kikaku/gappei/jyuminkondankai/kondankai_siryou)

1.3 諏訪湖の漁業

諏訪湖で行われる漁業はワカサギが中心である。しかし諏訪湖のワカサギはそもそも1915年(大正4年)に霞ヶ浦から移入されたものである⁶。現在は漁獲量が極端に減少している。その減少の理由は諸説あるが、水質改善による植物プランクトンの減少や水中の溶存酸素の減少が大きいと考えられている。漁獲量のピークは1976年(昭和51年)で、425tだったが、2005年(平成17年)には42.3tにまで減少している⁷。ワカサギの漁期は原則として10月から3月までとなっているが、2007年は2月1日から全面禁漁となっている。ワカサギ以前の諏訪湖の漁業はスジエビやテナガエビというエビ類であった。また、蜆漁もさかんであった。諏訪湖の蜆は琵琶湖の瀬田の蜆を持ち込んだものである。エビも蜆も1960年代には、水質の汚濁のためほとんど絶滅してしまった。このほか諏訪湖にはハゼ、コイ、フナ、ウナギなどが生息している。

また、諏訪湖漁協ではワカサギを水揚げするだけでなく、例年40億粒の採卵をしており、全国の湖沼80ヶ所に18億粒出荷し残りは諏訪湖へ放流している。全国のほとんどのワカサギが諏訪湖産であるといわれている。採卵は2月下旬から5月末に実施する。諏訪湖に流入する8つの河川で、産卵のために遡上する親魚を捕獲し、卵と精子を採取し人工授精させる。2012年に行われた採卵では、前年より1億3000万粒少ない22億2000万粒であった。このうち11億6000万粒を県内外の湖沼に出荷し、残りを諏訪湖に放流した。採卵数の減少はここ7-8年続いているが、近年生じている湖底の低酸素状態が親魚の成育に悪影響を及ぼしていると考えられている。この年の採卵数の減少には、3-4月に気温の低い日が多く、遡上の最盛期も平年より1か月遅い4月下旬にずれ込んだことも原因している⁸。

⁶ 全国ワカサギ釣り場情報館
(<http://www.kanritsuriba.com/wakasagi/whats.html>)

⁷ 諏訪地方統計要覧
(<http://www.town.shimosuwa.lg.jp/town-intro/file>)

⁸ 諏訪湖漁業協同組合 HP
(<http://www.suwakogyokyou.sakura.ne.jp/>)

第2章 御神渡しについて

第2章では、諏訪湖で発生する御神渡りがどのようなものであるかを述べていく。

2.1 御神渡しとは

冬期に諏訪湖の湖面が全面氷結し、氷の厚さが一定に達すると湖面の氷が昼夜の気温差に応じて膨張と収縮する為、昼間の気温上昇で氷がゆるみ、気温が下降する夜中に氷が収縮し、大音響とともに湖面上に亀裂が走り、鞍状隆起が生じる。この自然現象を御神渡し(おみわたり)と呼ぶ。御神渡りが現れた年の冬に無形民俗文化財に指定されている御渡し神事(みわたりしんじ)⁹が八剱神社の神官により諏訪湖畔で執り行われる。御渡し神事では、亀裂の入り方などを御渡帳¹⁰(みわたりちょう)などと照らし、その年の天候、農作物の豊作・凶作を占い、世相を予想する拝観式が行われる。古式により「御渡注進状」¹¹を神前に捧げる注進式を行い、宮内庁と気象庁に結果の報告を恒例とする。また、御神渡しはその年の天候によって観測されないこともあるが注進式は行われ、観測されない状態を「明けの海(あけのうみ)」と呼ぶ。



御神渡しと御神渡し神事の様子

出典:諏訪市博物館 web page¹²

⁹ 御神渡し拝観の神事

¹⁰ 御神渡りの記録を記したもの。1682年から1871年まで記録されている。

¹¹ 御神渡りの最古の公式記録で、諏訪神社の神主が幕府へ報告した文書の控え。室町時代の応永4年(1397年)の記録ということで、気象史における貴重な資料となっている。

¹² <http://www.city.suwa.lg.jp/scm/dat/special/omiwatari/>

2.1.1 御神渡りの起生要因

御神渡りはいくつもの条件が重なってはじめて出現するものであり、その要因はいくつもある。

A 強風の山間湖

標高 760 メートルの諏訪湖は比較的高度の湖であり、かつ四方山に囲まれた山間湖であり、寒冷湖でもある¹³。したがって、鞍状隆起現象出現の条件である昼夜の温度差が大きく現れる。また、湖上を吹きわたる西寄りの強風により亀裂面の水を押し上げ、氷盤を押し横圧力が影響を与えている。

B 中位の面積湖

湖が氷結するには湖面が広すぎると風で波が立ちやすくなり氷結しにくい、あまり小さい湖では氷の縮小、膨張が小さいため、鞍状隆起現象にまで至らない。諏訪湖は面積が 14 平方キロメートルの中位の面積の湖である¹⁴。これは諏訪地方の寒冷な気象である場合、諏訪湖の氷の体積が大きく広がりが増して氷の収縮、膨張の度合いを大きくしている。

C 浅い湖

一般的に浅い湖は水温の冷却を早める効果があり、逆に深い湖は水温が下がるのに時間がかかって氷結しにくい。諏訪湖は面積に比べ最深 7 メートルという浅い湖で氷結しやすく、かつ氷厚も増しやすい¹⁵。湖水の水位が 10 センチ増えただけでも氷結に大きな影響を与え、氷厚が増さないこともあると言われている。

D 円形湖

一般的に見て諏訪湖は周囲 18 キロメートルというほぼ円形状に近い湖である¹⁶。氷の収縮、緊張によって生ずる氷の亀裂は、それが発生するときの押し・引きの力が四方から一様に加わることで生じる。円形に近いということは、表面が持ち上げられ、氷壁ができ鞍状隆起が生じるのに好条件である。

¹³ 国土交通省 HP より

(http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/toukei/birn30p.html)

¹⁴ 同上

¹⁵ 同上

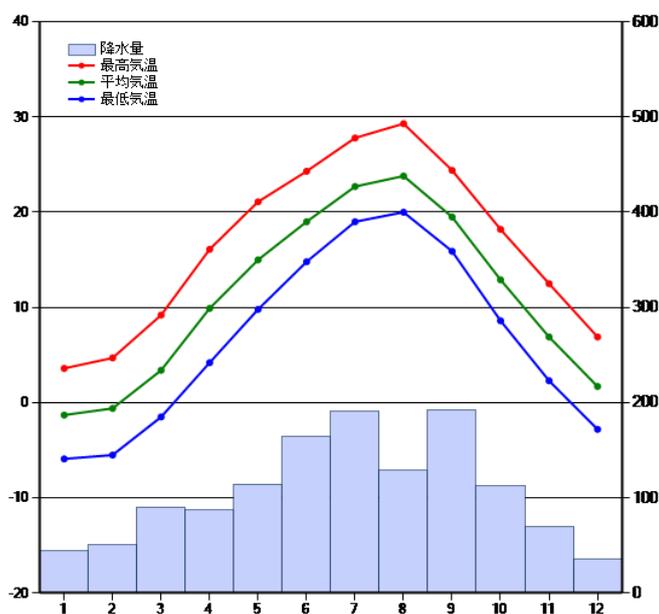
¹⁶ 同上

E 内陸性の盆地気象

諏訪湖は本州のほぼ中央に位置し、内陸性の気象であるとともに、四方が山に囲まれた諏訪盆地にあり、盆地気象も伴っている。このため、冬季は低温が持続しやすく、いわゆる「諏訪のしみ」¹⁷となり、時には氷点下 20 度を超す極めて低温現象となって現れる。

F 積雪が少ない

諏訪地方は一般に表日本型の気象をしているので、季節風の吹き出しによる降雪量は少なく、厳寒期は比較的晴天が多い。積雪が多くなるのは厳寒期から少し季節が進んだ頃からで、本州南岸を低気圧が通過していく場合の南岸低気圧に伴う積雪（カミ雪）である。諏訪湖に積雪があると、冷却が遮られ低温が出現しにくくなる。また積雪は、氷結に変化を与え氷の質を落とし、御神渡り出現に大きく影響を与えてしまう。



諏訪市の雨温図

出典: 気温と雨量の統計¹⁸

¹⁷ 諏訪地方では非常に寒い様を「しみる」と言う

¹⁸ <http://weather.time-j.net/>

H 河川流域に積雪が少ない

諏訪湖の流入河川流域に積雪があると、積雪の融雪水が各河川から諏訪湖に流れ込んで湖水温を高めるとともに、水深が深くなり、流入水の擾動が活発になり氷厚増を停滞させ、解氷を早める結果となっている。したがって、積雪が少ないことは、これらの融雪による流入水量も少なく、流入水の擾動も少ないので解氷しにくくなり、湖面が冷えるのを助長している。

I 温泉群の湖

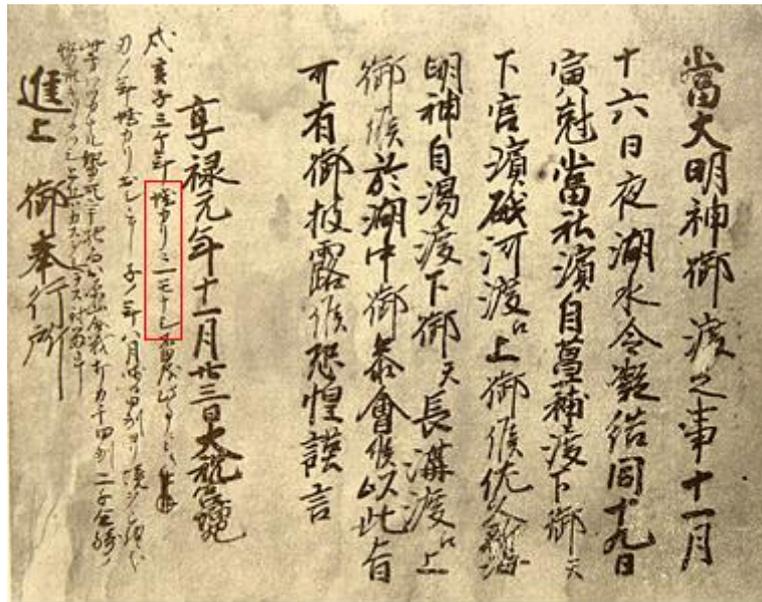
氷の鞍状隆起現象がみられるのは、温泉群の中か、付近に温泉群がある湖である。したがって、御神渡り現象は限られた湖のみに出現することになる。諏訪は日本でも屈指の温泉地であり、諏訪湖からもところどころで温泉が湧出している。この冷暖の水温差により氷厚の差が生じ、これが歪みとなって御神渡り出現に大きく影響を及ぼしているとされている。

こうした様々な諏訪湖特有かつ絶妙な現象および条件が御神渡り出現の要因となっている。しかしまだ謎も多く、出現理由は研究がなされている。

2.1.2 諏訪にとっての御神渡り

御神渡りを連続して記録したものは、古いものは1443年から1681年迄の『当社神幸記（とうしゃしんこうき）』、1682年から1871年迄の『御渡帳（みわたりにちょう）』があり、現在（2013年）まで毎年記録され続けている。一部欠損している年もあるが、2013年迄含めると約568年間のほぼ連続した気象記録であり世界的に貴重な資料である。

以上から分かるように、諏訪にとって御神渡りは古くから観測され諏訪の冬を語るうえで欠かすことのできない大切なシンボルとなっている。諏訪で生活する人々にとって御神渡りは冬の訪れを告げる指標であり、アイデンティティともいえる。また、諏訪の気象条件および諏訪湖の形状、立地などの要因から、この現象は他の地域では見ることのできないもので、それゆえこの現象を見ようと多くの観光客が訪れる。



当社神幸記

出典：八ヶ岳原人 HP ¹⁹

2.2 御神渡りの過去と現状

水質に関しては、かつて非常に水質のよい湖であり、江戸期には琵琶湖や河口湖から蜆が放流され漁業も行われていた。しかし、戦後、生活排水や産業排水のたれ流しにより、諏訪湖の「富栄養化」は一気に進み、1960年代後半には、夏期にアオコが大発生するようになった。これを改善すべく、諏訪地域に流域下水道が敷設され、1979年にその供用が開始された。当初の下水道の普及率は11.7%であったが、長野県の調査によると、1979年の酸素要求量、全リン、全窒素といった水質汚濁指標が前年と比べ軒並み減少した²⁰。リンや全窒素などの水質汚染指標の多くは、生活排水や工場排水、農業排水から流れてくるもので、上下水道が整備されると一般的に改善される。信州大学臨湖実験所の調査では、1981年以降、湖の透明度が、年平均値でそれ以前よりも20cmほど改善している²¹。

¹⁹ <http://yatsu-genjin.jp/suwataisya/index.htm>

²⁰ 長野県 web site 諏訪湖流域下水道のあゆみ より
(<http://www.pref.nagano.lg.jp/suwakoryuiki/jigyo/gesui/ayumi.html>)

²¹ 信州大学山岳科学総合研究所「諏訪湖の定期観測」(宮原祐一) より
(<http://www.water.shinshu-u.ac.jp/~miyabara/AllSuwa2006June.pdf>)

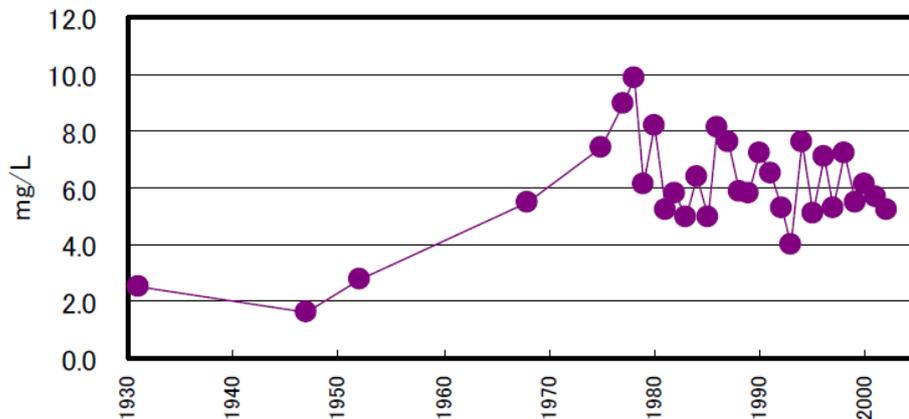


図1 諏訪湖における化学的酸素要求量の変化
「諏訪湖の定期観測」信州大学山岳科学総合研究所（宮原裕一）²²より引用

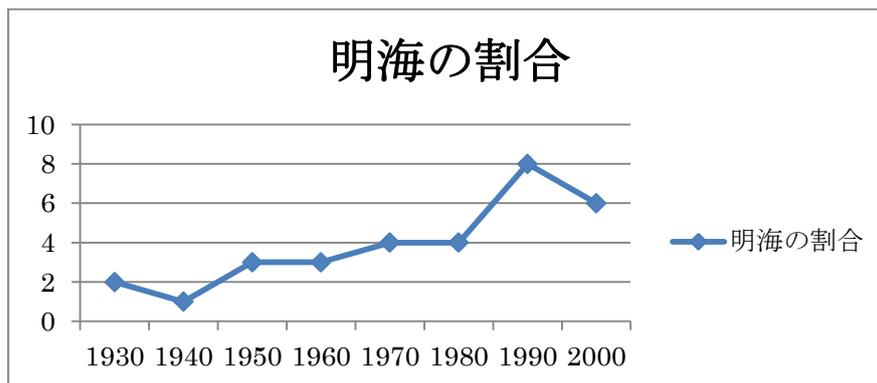


図2 年代別明海の回数と割合
米山啓一『諏訪湖の御神渡り』²³より筆者作成

化学的酸素要求量²⁴は水中の有機量と相関があり、一般的に水中の化学的酸素要求量の増加は水中の有機量の増加（富栄養化）を助長するという関係がある。また、明海（御神渡りが観測されなかった年）の割合を10年ごと分析してみると、有機量の増加にともなって明海も増加していることが分かる。化学的に、水中に有機物や不純物が多く存在すると、水が凍りつく温度である氷点が下げられてしまう。2000年を過ぎると上下水道の整備や、地元の人々の美化活動の結果が御神渡りの頻度に見られるようになってきたが、まだ戦前のレベルまでは至っていないのが現状である。

²² <http://www.water.shinshu-u.ac.jp/~miyabara/AllSuwa2006June.pdf>

²³ http://www.cbr.mlit.go.jp/tenjyo/jimusyo/publication/pbl_tell/pdf/10.pdf

²⁴ 代表的な水質指標のひとつ。水中の非酸化性物質を酸化させるために必要な酸素の量。

第3章 諏訪湖とワカサギ

第3章では、ワカサギがどのような魚であるかと、諏訪湖におけるワカサギの特徴を述べていく。

3.1 ワカサギとは

ワカサギ (学名 *Hypomesus nipponensis*) は、キュウリウオ目キュウリウオ科の魚類の一種である。日本の内湾や湖に生息する硬骨魚で、食用魚でもある。本来の分布域は、太平洋側は千葉県以北、日本海側では島根県以北の北日本で、日本以外ではカリフォルニア州にも分布する。水質が悪い状況や低水温や塩分に対して広い適応力があり、食用魚としての需要も高いことから、日本各地の湖やダムなどでも放流された個体が定着している。東大名誉教授の雨宮育作博士が、霞ヶ浦のワカサギを山中湖や諏訪湖へ移植し、各地の湖沼に普及した経緯がある。現在は、南西諸島と伊豆・小笠原諸島を除く全国に分布域を広げている。鹿児島が南限とされている²⁵。



ワカサギの成魚

出典: ウィキペディアコモンズ

成魚の全長は15cmほどで、体は細長く、それぞれのヒレは小さい。背ビレの後ろには小さなアブラビレがある。また、背ビレは腹ビレより少しだけ後ろについていることで近縁種のチカと区別できる。アブラビレの大きいイシカリワカサギという近縁種もいる。成長期に降海する遡河回遊型（両側回遊型）と生涯を淡水で生活陸封型が存在し、遡河回遊型は孵化後降海するが一定期間汽水域で過ごし海中での生活をする。従って、生息域は内湾（沿岸海域）、汽水域、河川、湖などである。産卵の為に河川を遡上する際は淡水順応を行わず、一気に遡上し、産卵、降海までを2時間程度で行っているとする研究がある²⁶。

²⁵ WEB 魚図鑑 より
(<http://zukan.com/fish/internal138>)

²⁶ 国立環境研究所 侵入生物データベース より
(<http://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/DB/detail/50890.html>)

地域にもよるが産卵期は冬から春にかけてで、この時期になると大群をなして河川を遡り、淡水中の水草や枯れ木などに付着性の卵を産みつける。卵は1mmほどで、1匹の産卵数は1000粒から2万粒にも達する。寿命は1年で、産卵が終わった親魚は死んでしまうが、野尻湖や仁科三湖など寒冷な地域では2年魚、3年魚も見られる。

食性は肉食性で、ケンミジンコやヨコエビなどの動物プランクトンや魚卵や稚魚などを捕食する。一方、魚食性の大型魚類（オコチバス、コクチバス、ニジマス、ヒメマスなど）や水辺を生息域とするサギなど鳥類に捕食されている。

富栄養化などの水質汚濁に対する適応力が高く、そのような湖沼で見られる。水質良好であることを表現する意図で「ワカサギが棲める〇〇湖（沼）」といった解説がなされることがあるが、むしろ「ワカサギしか棲めない」とみる方が妥当な場合もある。

3.2 諏訪湖に生息するワカサギ

上記のように、諏訪湖のワカサギはそもそも1915年（大正4年）に霞ヶ浦から移入されたものである。その後ワカサギは生息数を増やし、冒頭で述べたように諏訪湖の漁業の中心となっていく。漁獲量のピークは1976年（昭和51年）の425tで、この時期の諏訪湖は上下水道もあまり普及されず、アオコが発生していた時期と重なる。その後水質の改善とともにワカサギの量は減り、2011年（平成23年）には18tにまで減少している²⁷。

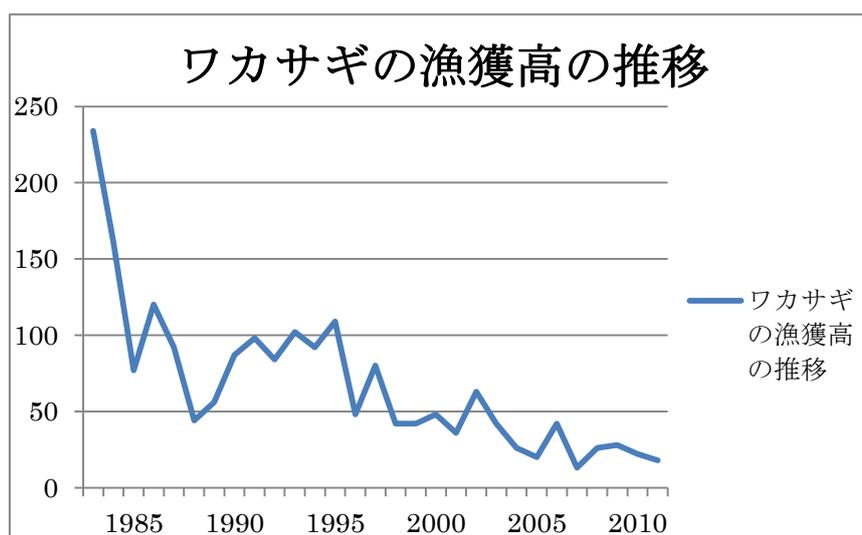


図3 ワカサギの漁獲高の推移
諏訪地方系統要覧より筆者作成

²⁷ 諏訪地方統計要覧(平成25年度) より

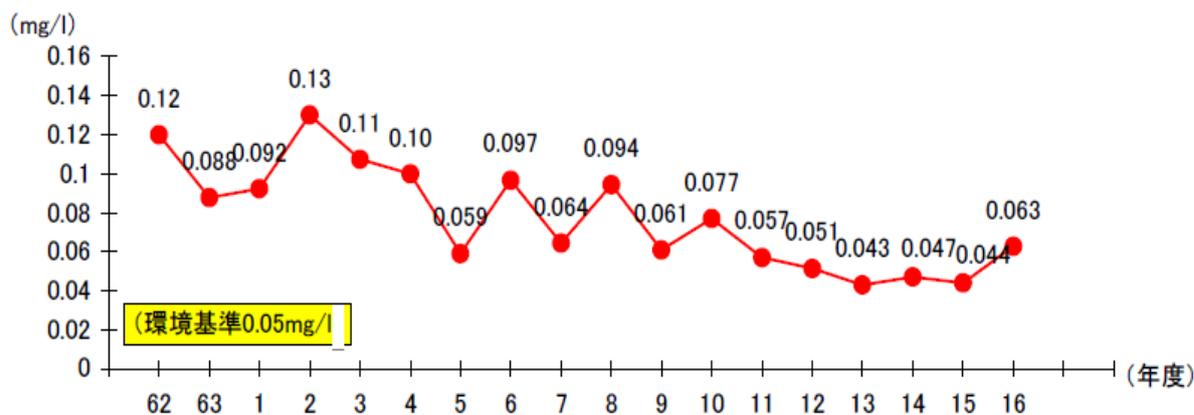


図4 諏訪湖における全リン濃度の年平均値の変動

出典:長野県水環境課 HP²⁸

アオコの発生と全リン濃度²⁹および化学的酸素要求量には相関があり、全リン濃度・化学的酸素要求量の増加は水質の富栄養化につながり、透明度の低下やアオコの発生の原因となっている。アオコは、富栄養化が進んだ湖沼等において微細藻類（主に浮遊性藍藻）が大発生し水面を覆い尽くすほどになった状態、およびその藻類を指し、これらのものはワカサギの餌となるものである。結果的に諏訪湖の富栄養化およびアオコはワカサギの増加を助長していたことが上記の図3,4の相関関係から見てとれる。

第4章 問題点と現状政策

第4章では、現在の諏訪湖が抱えている問題点を考察し、またその問題の対策としてとられている政策を述べていく。

4.1 現在諏訪湖が抱えている問題

水質の改善の反面、諏訪湖漁協は主な収入資源であるワカサギを失いつつある。しかし、ワカサギが減った原因は単純に水中のワカサギの餌となる植物プランクトンが減っただけではない。もうひとつの原因として挙げられているのが諏訪湖底に存在する貧酸素水塊³⁰で

²⁸ http://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/kasumi/reports/20051024/2_2.pdf

²⁹ 代表的な水質指標のひとつ。燐灰石などのような燐酸塩として算出する。

³⁰ 水中溶存酸素量が極めて不足している孤立した水塊、あるいはこのような水塊の占める水域のこと。これらの移動により、海中あるいは海底に生息する生物の大量死が発生し、漁業や養殖業といった水産業において壊滅的な打撃をもたらすことがある。

ある。貧酸素水塊とは、水中溶存酸素量が極めて不足している孤立した水塊、あるいはこのような水塊の占める水域のことであり、これらの移動により、海中あるいは海底に生息する生物の大量死が発生することもある。諏訪湖にこの貧酸素水塊が生じてしまった原因は、諏訪湖の構造と高度経済成長期の汚染物質の沈殿にある³¹。

冒頭で述べたように、諏訪湖は流入河川 31 に対して流出河川が天竜川のみという、水循環の悪い湖である。そえゆえ湖底に沈殿したものはなかなか循環されない。また、水質改善がなされたと述べてきたが、汚染物質である有機物の多くは諏訪湖から完全に除去されたわけではなく、湖底に沈み、現在はヘドロと化している。ヘドロと化した湖底に対応できる水草はヒシのみで、現在夏場の諏訪湖はヒシが多くみられる。

ヒシはヒシ科の一年草の水草で、主に池沼に生える。秋に葉および熟した果実は水底に沈んで冬を越し、春になると発芽して根をおろし茎が水面に向かって伸びる。茎からは節ごとに水中根を出し、水面で葉を叢生する。ヒシは、水中のリンや窒素を吸収する役割があり、水質浄化の効果もあるが、その数が増えすぎると植物プランクトンと競合関係ともなりうる。



水面を覆うヒシ

出典:ウィキペディアコモンズ

諏訪湖の表層部の DO (溶存酸素) は 10~13mg/l あり、湖底部は 0.01mg/l 程となっている。生物が生きていく上で DO は 3mg/l 以上必要なので、現在の諏訪湖の湖底は生物が住める環境ではない。湖底にはヘドロがたまっていて、枯れたヒシや藻が沈んでいる。それらが酸化すれば、分解されてワカサギの餌になるが、酸素がないため酸化が進まない。それでも何とか酸化しようと、少ない酸素を吸収するためますます酸素が少なくなる。現在の諏訪湖はこうした悪循環が発生し、結果漁業に大きな被害をもたらしている。漁協で

³¹ 諏訪湖漁業協同組合ヒアリング調査より

は 2004 年から赤字が続き、2009 年の時点で累積債務は 7600 万円を超している³²。

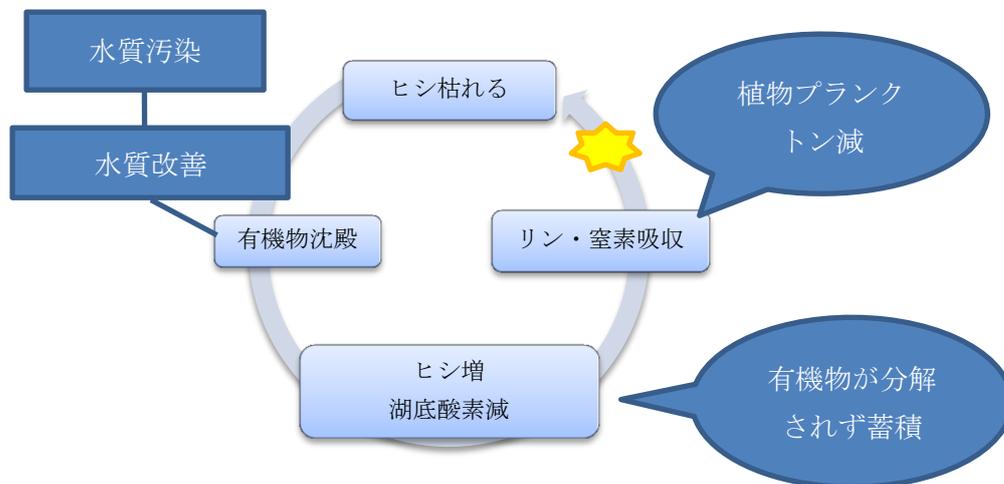


図 5 諏訪湖の悪循環のモデル
筆者作成

4.2 現在とられている政策

こうした現状を受け、諏訪湖では 2011 年からヒシ取り船によるヒシの除去を行い始めている。これは、リンや窒素を吸収したヒシを沈殿する前に回収するもので、有機物が沈殿しヘドロになるのを防ぐ効果がある。

ヒシ取り船によるひしの除去だけではなく、諏訪湖では様々なボランティア団体によって、船の入ることのできない浅瀬のヒシが回収されている。近年では、「TOYOTA AQUA SOCIAL FES」の活動で諏訪湖のヒシの回収がされたことで話題を呼んだ。

³² 産経新聞長野版(2009.6.17) より



ヒシ取りの様子

出典:AQUA SOCIAL FES 公式HP³³

ヒシ取りをする際は、行う時期と取り除く量に注意が必要である。夏前などの早い時期に回収してしまうと、リンや窒素が多く残存してしまい、水質が悪化する恐れがあるが、反対に秋を過ぎるころになると、葉が枯れ始め沈殿し、湖底のヘドロと化してしまう。また、除去する量に関しては、多く除去しすぎてしまうと次の年のヒシが減ってしまい、窒素およびリンが吸収されなくなってしまう。除去量が少なすぎると沈殿量が多くなり、ヘドロ蓄積の悪循環にもどってしまう。

第5章 関数の導入・モデル分析

本論文の主旨は、諏訪湖の水質がどのような状況のときに諏訪湖の経済活動の収入が最大になるかを検証することである。その中で、特に諏訪湖の水質に大きな影響を与えているヒシの量に注目し、ヒシの増減が水質をどのように変えるか、また同時に水質が漁業および観光にどのような影響を与えるかを考察していく。

³³ http://aquafes.jp/projects/69/reports/#article_373

5.1 関数の導入

この分析では、ヒシ除去費用を負担する行政、ワカサギを資源に収入を得る漁協、御神渡りが生じることで観光収入を得る営業団体の3つの主体を想定する。パラメータは以下のように定義する。

まず、 t 期のヒシの量に関して、以下のように定める。

$$j_{t+1} = j_t + rj_t\left(1 - \frac{j_t}{K}\right)$$

j_t	t 期のヒシの量 ($0 \leq j_t \leq K$)
K	ヒシの環境許容量
r	ヒシの自然増加率

これは、ヒシは時間の経過とともに環境許容量に近づいていくという考察に基づく。

次に、ヒシを除去する費用に関して、以下のように定める。

$$C = \gamma D_t$$

C	ヒシを除去するのにかかる費用
γ	1単位当たりヒシを除去するのにかかる費用
D_t	t 期にヒシを除去する量

ここで、ヒシ量を一定に保つためには

$$D_t = rj_t\left(1 - \frac{j_t}{K}\right)$$

を満たさなければならない。この式から、 C を j_t の式にすると

$$C = \gamma rj_t\left(1 - \frac{j_t}{K}\right)$$

と書ける。

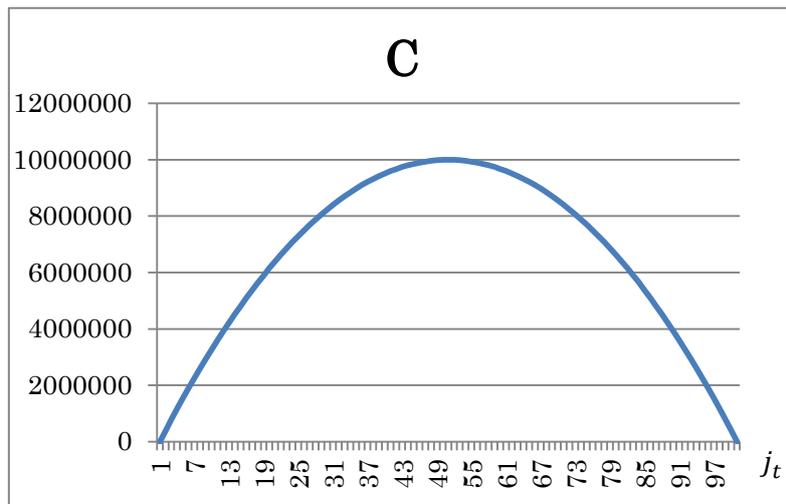


図6 ヒシの量と除去費用の関係

ただし、 $\gamma = 4,000,000$ $K = 100$ $r = 0.05$

続いて、ヒシと有機物の関係に関して以下のように定める。

$$z_t = lj_t + \bar{z}$$

- | | |
|-----------|--------------------------------------|
| z_t | 水中の有機量 ($0 \leq z_t \leq \bar{z}$) |
| l | ヒシの量と水中の有機物量の関係を示すパラメータ (負の定数) |
| \bar{z} | 有機量の最大量 (正の定数) |

これは、ヒシと有機物（藻や植物プランクトン）はともにリンや窒素を主な養分とし、競合関係にあることに基づく。

御神渡りによる観光収入は以下のように定める。

$$E(T) = -\alpha z_t + \alpha z_m$$

- | | |
|----------|---------------------------|
| $E(T)$ | 御神渡りによる観光収入の期待値 |
| α | 御神渡りが生じることにより得られる収入のパラメータ |
| z_m | 御神渡りが生じる有機物の最大量 |

これは、御神渡りは有機量が少ないほど生じやすいが、有機物が少ないだけでは観測されるとは限らない（気象条件なども必要）という考察に基づく。また、 z_m よりも有機物が

増加すると、高度経済成長期のように御神渡りは観測されなくなるという想定をしている。

この式を、 j_t の式に置き換えると、以下のように現せる。

$$E(T) = -\alpha j_t - \alpha(\bar{z} - z_m)$$

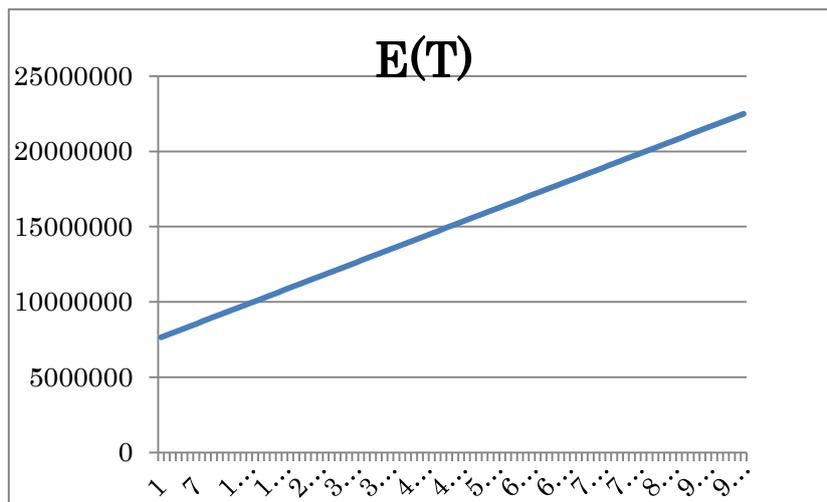


図7 ヒシの量と御神渡りから見込める観光収入の関係

ただし、 $\alpha = 15,000, l = -1, \bar{z} = 100, z_m = 150$

酸素の量は以下のように定める。

$$O_t = m(j_t - j_M)^2 + \bar{O}$$

O_t	湖底の酸素量 ($0 \leq O_t \leq \bar{O}$)
m	ヒシの量と湖底の酸素量の関係を示すパラメータ
j_M	湖底の酸素量を最大にするヒシ量
\bar{O}	湖底の酸素の最大量

これは、水中のヒシの量が多すぎると湖底にヘドロがたまり、有機物を参加するために湖底の酸素が使われてしまい、反対にヒシの量が少なすぎると有機物（藻や植物プランクトン）が増加し、化学的酸素要求量が増加し貧酸素状態になるという想定に基づく。

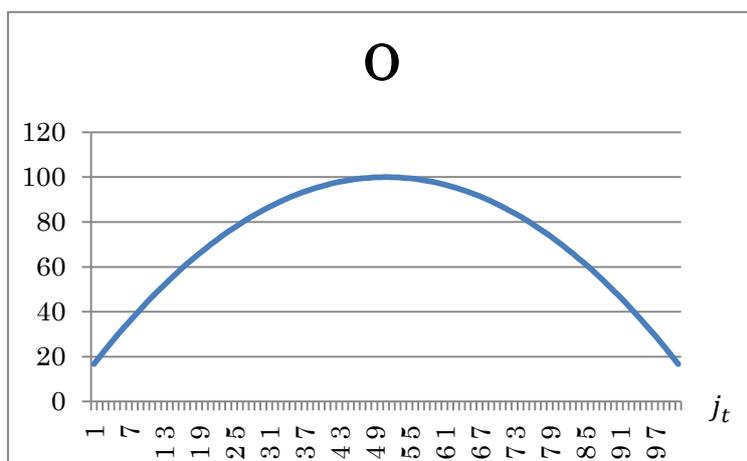


図8 ヒシの量と湖底の酸素量の関係

ただし、 $m = 0.33333, j_M = 50, \bar{O} = 100$

最後に、ワカサギから得られる収入を以下のように定める。

$$S = \beta O_t Z_t$$

S ワカサギから得られる収入
 β ワカサギから得られる収入のパラメータ

これは、ワカサギが生きるためには湖底の酸素および有機物（植物プランクトン）の両方が備わっていることが条件で、その量が多いほど増殖するという想定に基づく。この式を、 j_t の式にすると

$$S = \beta(j_t + \bar{z})\{m(j_t - j_M)^2 + \bar{O}\} = \frac{1}{25}\beta j_t^3 - 8\beta j_t^2 + 400\beta j_t$$

と表せる。

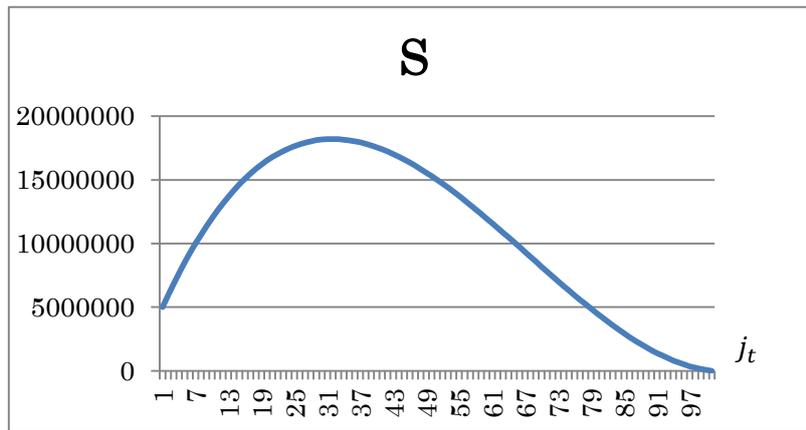


図9 ヒシ量とワカサギからの収入の関係

ただし、 $\beta = 3,000, l = -1, \bar{z} = 100, m = 0.3333, j_M = 50, \bar{O} = 100$

5.2 モデル分析

モデル分析をするにあたり、モデルをより現実的かつシンプルにする目的で、ヒシの量を以下のようにさだめる。

$$0 \leq j_t \leq K = 100$$

こうすることで、環境許容量を100としたときに、ヒシがどのくらいの割合水中に存在するかをシンプルに示すことができる。

同様に、酸素量 O_t および有機量 z_t も最大量を100とする。よって、

$$0 \leq O_t \leq \bar{O} = 100$$

$$0 \leq z_t \leq \bar{z} = 100$$

と定めることができる。

これをもとに、ヒシ量が中位である時に酸素量が最大値になる想定をしているため

$$j_M = 50$$

$j_t = 0, 100$ のとき酸素量は最小値0をとる想定から

$$m(0 - 50)^2 + 100 = 0$$

$$\therefore m = 1/25$$

ヒシ量と有機量の競合関係から

$$l = -1$$

また、現在の諏訪湖では上下水道が整い、御神渡りが出現しないほど有機物が増える環境ではなくなった想定から

$$z_m > \bar{z} = 100$$

とする。これは、現在の諏訪湖では z_m まで有機量が増えることはないということを示す。

以上の想定をふまえた上で、以下分析を進める。

5.2.1 現状の政策の分析

現在の諏訪湖で行われているヒシ除去作業は、ワカサギの減少による漁獲量の不振の改善策として行われている。そこで、ヒシ除去作業にかかる費用と、ヒシ除去によるワカサギの収入の変化を考察する。

ワカサギから得られる収入とヒシ除去費用の差、すなわち $S - C$ の最大化を考える。

$$S - C = \left(\frac{1}{25}j_t^3 - 8j_t^2 + 400j_t\right)\beta - \left(-\frac{\gamma r}{100}j_t^2 + \gamma r j_t\right)$$

この式を j_t で微分して0とおくと

$$\frac{\partial(S - C)}{\partial j_t} = \frac{3\beta}{25}j_t^2 + \left(\frac{\gamma r}{50} - 16\beta\right)j_t + 400\beta - \gamma r = 0$$

この式を解くと

$$j_t = \frac{800\beta - \gamma r \pm \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta}$$

判別式は、

$$160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2 = (400\beta - \gamma r)^2 + 400\beta\gamma r > 0$$

なので、 $S - C$ は、極大値・極小値を持つ。

したがって、 $S - C$ が3次式であることを考慮すると、 $S - C$ を最大にするヒシ量は

$$j_t = 0,100$$

または

$$j_t = \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta}$$

のいずれかであることが分かる。

① $j_t = 0,100$ のとき、

$$S - C = 0 - 0 = 0$$

② $j_t = \frac{600\beta - \gamma r - \sqrt{30000\beta^2 + \gamma^2 r^2}}{12\beta}$ のとき、 $S - C$ の2つの解が0と100であること、および微分した式が下に凸の3次関数であることから、

$$0 < \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta} < 100$$

を満たせば、 $S - C$ を最大にするヒシの量は

$$j_t = \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta}$$

となる。この時のヒシの量を j_t^{*1} とする。

また、極小値のヒシの量が $0 < j_t < 100$ となり、かつ極大値をとるヒシの量が0以下となる場合、すなわち

$$\frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta} < 0$$

$$0 < \frac{800\beta - \gamma r + \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta} < 100$$

となるときは、最適値は $j_t = 0,100$ となるが、上記を満たすにはワカサギのパラメータ β が

非常に小さいとき、またはヒシ除去の費用のパラメータ γ が極めて高い場合が考えられるが、現在の諏訪湖の状況を考えると、満たすことは考えにくい。

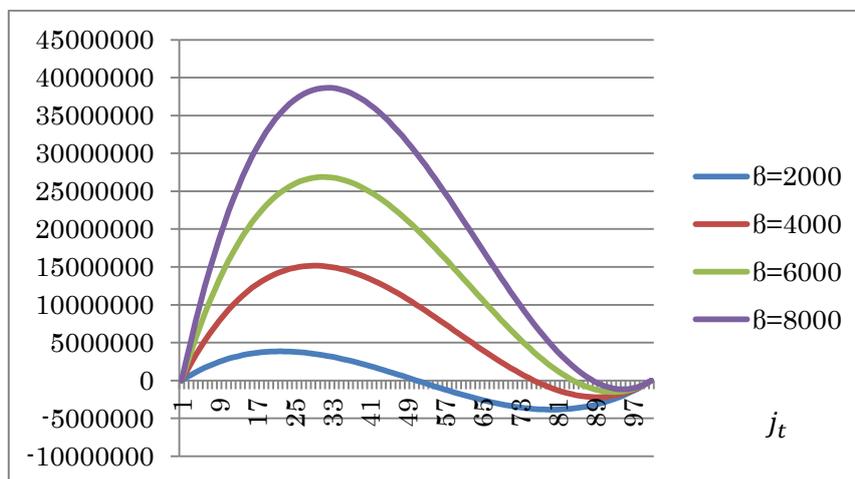


図 10 $0 < \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta} < 100$ のときの参考グラフ

ただし、 $\gamma = 400,000,000, r = 0.1$

5.2.2 御神渡りによる収入を考慮した分析

現在とられている政策では御神渡りが発生することにより得られる収入を考慮せずにヒシの除去が行われている。本論文では、ヒシの除去の量が御神渡りの発生にどのような影響を及ぼすかを加えて考察する。

したがって、ここでは、ヒシの量を変数にして、ワカサギから得られる収入に御神渡りが発生することにより得られる観光収入を加え、そこからヒシを除去するのにかかる費用をマイナスする以下の式の最大化を目的にする。

$$W(j_t) = E(T) + S - C$$

関数設定したものをこの式に代入し、 j_t について整理すると

$$W(j_t) = \frac{1}{25}\beta j_t^3 + \left(\frac{\gamma r}{100} - 8\beta\right)j_t^2 + (\alpha + 400\beta + \gamma r)j_t + (100 - j_m)\alpha$$

これを j_t で微分して、0とおくと、

$$\frac{\partial W(j_t)}{\partial j_t} = \frac{3}{25}\beta j_t^2 + \left(\frac{\gamma r}{50} - 16\beta\right)j_t + \alpha + 400\beta + \gamma r = 0$$

この解は

$$j_t = \frac{800\beta - \gamma r \pm \sqrt{-1200\alpha\beta + 160000\beta^2 - 2800r\beta\gamma + r^2\gamma^2}}{12\beta}$$

となる。この解の小さいほうを j_t^* とし、判別式をDとおく。

この時点で、 $W(j_t)$ を最大にするヒシ量の候補は2つ存在する。

① $D \leq 0$ のとき

$W(j_t)$ は単調に増加するので、 $j_t = 100$ のとき $W(j_t)$ は最大値

$$W(100) = (200 - j_m)\alpha + 200\gamma r$$

をとる。 $D \leq 0$ となるのは、御神渡りにより得られる収入のパラメータ α の値が大きく、御神渡りが諏訪湖に与える経済効果が大きい場合が考えられる。ワカサギにより得られる収入のパラメータ β が小さい場合も以上の不等式が成り立つが、現実的な値とは考えにくい。

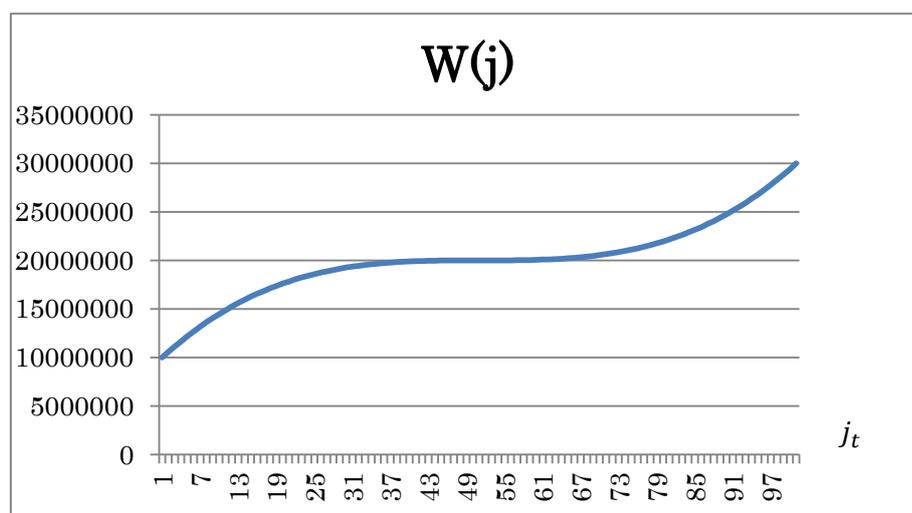


図 11 $D \leq 0$ のときの参考グラフ

ただし、 $\alpha = 200,000$, $\beta = 2,000$, $\gamma = 4,000,000$, $r = 0.1$, $j_m = 150$

② $D > 0$ のとき

この場合、最適値の候補は2つある。ひとつは $j_t = K = 100$ である。 $0 \leq j_t \leq 100 = K$ であるから、極小値を取るヒシの量が 100 以下である場合は、最適値が K になりうる。この場合というのは、御神渡りのパラメータ α の値が高く、かつワカサギのパラメータ β も高いときが考えられる。

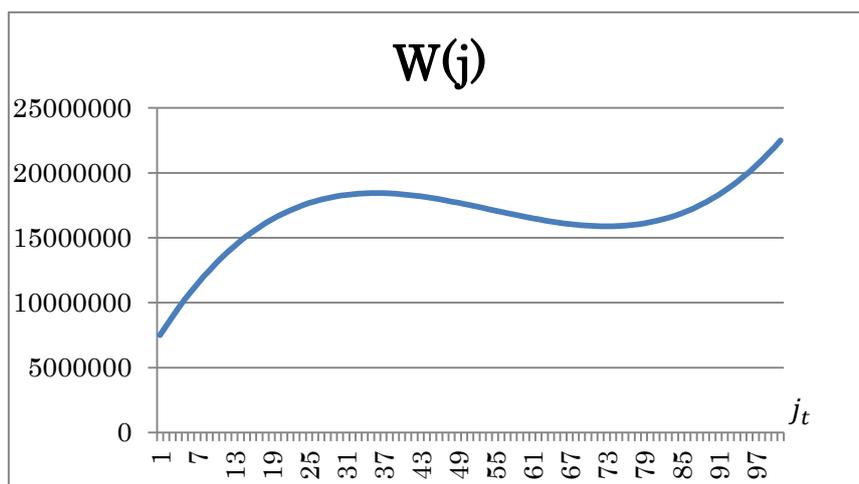


図 12 $D > 0$ かつ $0 < \frac{800\beta - \gamma r + \sqrt{-1200\alpha\beta + 160000\beta^2 - 2800r\beta\gamma + r^2\gamma^2}}{12\beta} < K$ の参考グラフ

ただし、 $\alpha = 150,000$, $\beta = 2,500$, $\gamma = 4,000,000$, $r = 0.1$, $j_m = 150$

もうひとつの最適値として考えられるのが、 $W(j_t)$ が極大値をとるときのヒシの量

$$j_t^{*2} = \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{-1200\alpha\beta + 160000\beta^2 - 2800r\beta\gamma + r^2\gamma^2}}{12\beta}$$

である。これは、極小値を取るヒシの量が K を超える場合や、超えなくても以下の不等式が成り立つときが考えられる。

$$W(j_t^{*2}) > W(K)$$

これが成り立つのは、ワカサギのパラメータ β が高く、ワカサギから得られる収入が大きい場合が考えられる。

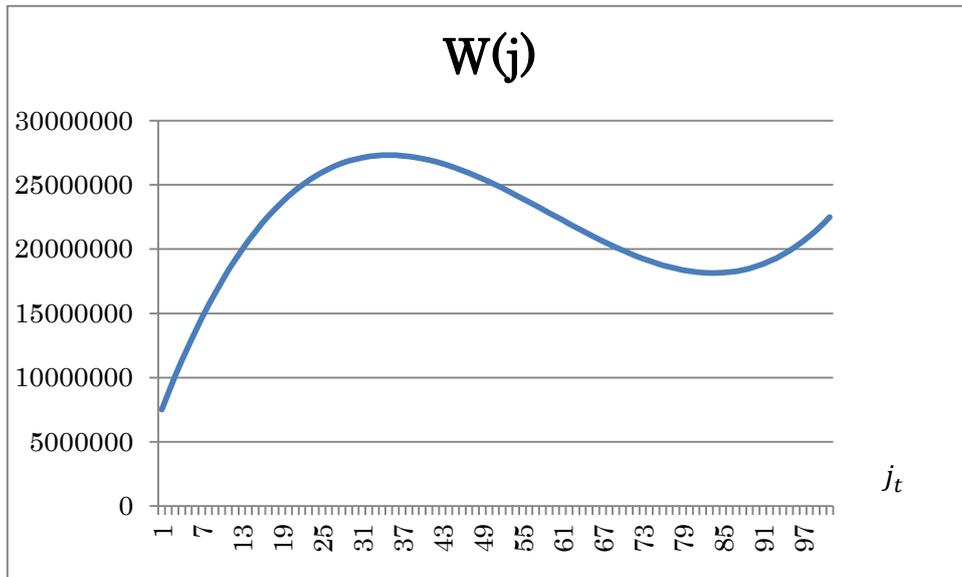


図 13 $D > 0$ かつ $W(j_t^*) > W(K)$ のときの参考グラフ

ただし、 $\alpha = 150,000$, $\beta = 4,000$, $\gamma = 4,000,000$, $r = 0.1$, $j_m = 150$

以上より、 $W(j_t)$ の最適値は、御神渡りにより得られる収入のパラメータ α と、ワカサギから得られる収入のパラメータ β の大きさにより異なることがわかる。以下は、 α を固定し β を変化させたときのグラフである。

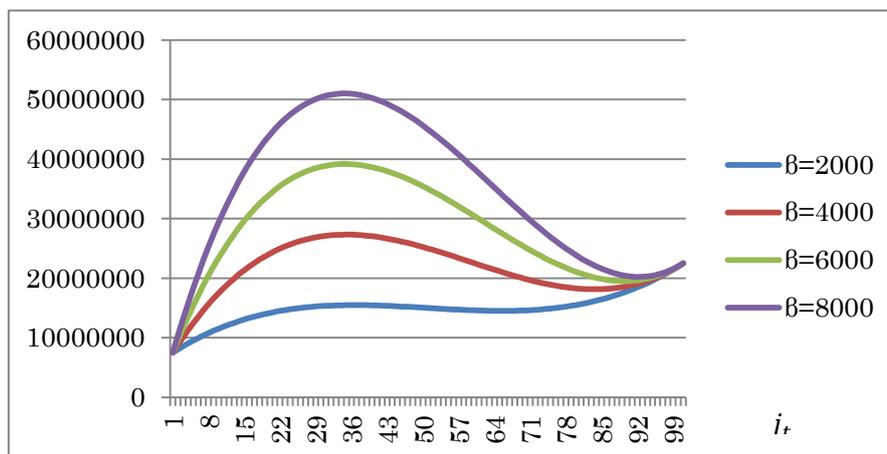


図 14 β を変化させたときの参考グラフ

ただし、 $\alpha = 150,000$, $\gamma = 4,000,000$, $r = 0.1$, $j_m = 150$

5.2.3 最適なヒシの量の考察

以下では、御神渡りが生じることによる収入を考えた場合と考えない場合で、どのようにヒシの量の最適値が異なるかを考察していく。

漁業の収入とヒシ除去費用のみを考えた場合の最適ヒシ量は

$$j_t^{*1} = \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{160000\beta^2 - 400\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta}$$

御神渡りによる収入を考えた場合の最適ヒシ量は

$$j_t^{*2} = \frac{800\beta - \gamma r - \sqrt{-1200\alpha\beta + 160000\beta^2 - 2800\beta\gamma r + \gamma^2 r^2}}{12\beta}$$

または

$$j_t = 100$$

である。 j_t^{*1} と j_t^{*2} を比較すると

$$j_t^{*1} < j_t^{*2}$$

が成り立つ。

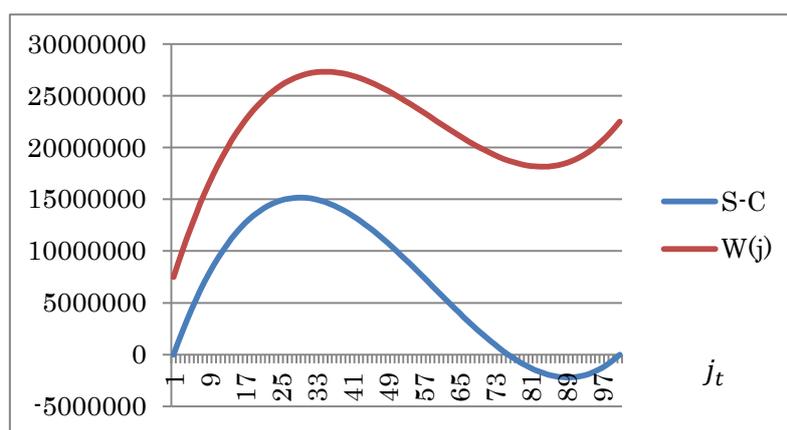


図 15 比較の参考グラフ

ただし、 $\alpha = 150,000$, $\beta = 4,000$, $\gamma = 4,000,000$, $r = 0.1$, $j_m = 150$

第6章 結論・まとめ

以上の分析により以下のことがわかった。

- 1 ヒシ量が多くなりすぎると、水中の有機量を減らす役割から、ワカサギの量を減少させ漁業にダメージを与えるが、御神渡りの出現を助長する役割を果たす。
- 2 現在諏訪湖でとられているヒシ除去の作業はワカサギの漁業収入を増加させる期待がもてる。しかしその除去の量によっては、湖底の酸素量を減少させ、その結果諏訪湖はワカサギが住める環境ではなくなり、逆にワカサギの漁業収入を減少させてしまう可能性がある。ボランティアや民間によるヒシの除去は、除去量を全体で定めることが困難である点から、危険な行為となりうる。
- 3 御神渡りの出現およびそれにより得られる観光収入を考慮すると、ヒシを除去する量を減らし、諏訪湖の有機量を減らす目的でヒシを残すほうが、全体としては多くの収入を得ることができる。しかしこの場合ワカサギの数は最大ではなく、漁業にとっては最適なヒシの量ではない。
- 4 御神渡りが出現することで得られる観光収入が高く見込まれる場合、またはワカサギから得られる収入があまり見込まれない場合は、全くヒシの除去を行わないほうが御神渡りの出現が期待でき、全体の収入が増加する可能性がある。ただし、この場合漁業収入は0である。

ヒシを除去する際は、やみくもに減らせばいいというわけではなく、減らす量に気をつけなければならない。また、御神渡りによる収入を考慮してヒシの除去量を減らす場合、それは漁業にダメージを与えることを意味する。この場合は、観光収入が漁業収入の損益分を補てんする仕組みが必要になる。

参考文献

『諏訪湖の御神渡り』 米山啓一(1987) (2014. 1. 19 最終閲覧)

http://www.cbr.mlit.go.jp/tenjyo/jimusyo/publication/pbl_tell/pdf/10.pdf

第6期諏訪湖水質保全計画素案に関するパブリックコメント(2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.pref.nagano.lg.jp/mizutaiki/kurashi/shizen/suishitsu/6ki/documents/taiou2.pdf>

『諏訪湖定期調査の結果』 宮原祐一(2011) (2014. 1. 27 最終閲覧)

https://soar-ir.shinshu-u.ac.jp/dspace/bitstream/10091/17067/1/report9_1_p1_p7.pdf

長野県 web site 信州 (2014. 1. 27 最終閲覧)

<http://www.pref.nagano.lg.jp/seikatsuhaisui/infra/suido-denki/gesuido/suwako/index.html>

諏訪湖祭湖上花火大会 HP (2014. 1. 27 最終閲覧)

<http://www.suwako-hanabi.com/kojyou/>

諏訪市住民懇談会資料 (2014. 1. 27 最終閲覧)

http://www.city.suwa.lg.jp/web/kikaku/gappei/jyuminkondankai/kondankai_siryou/P1-P4.pdf

全国ワカサギ釣り場情報館 (2014. 1. 27 最終閲覧)

<http://www.kanritsuriba.com/wakasagi/whats.html>

国土交通省 HP (2014. 1. 27 最終閲覧)

http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/toukei/birn30p.html

WEB 魚図鑑 (2014. 1. 27 最終閲覧)

<http://zukan.com/fish/internal138>

『諏訪湖の環境を見る ヒシ取りの評価』 宮原裕一(2007) (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.water.shinshu-u.ac.jp/miyabara/AllSuwa2008Feb.pdf>

諏訪市博物館 Web Page (2014 年 1.19 最終閲覧)

<http://www.city.suwa.lg.jp/scm/dat/special/omiwatari/>

平成 24 年度版諏訪地方系統要覧 (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.town.shimosuwa.lg.jp/town-intro/file/h24%E8%AB%8F%E8%A8%AA%E5%9C%B0%E6%96%B9%E7%B5%B1%E8%A8%88%E8%A6%81%E8%A6%A7%E5%85%A8%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%82%B8.pdf>

諏訪湖漁業協同組合公式サイト (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.suwakogyokyou.sakura.ne.jp/>

諏訪市観光ガイド (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.suwakanko.jp/>

信州とっておき情報 (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.mtlabs.co.jp/shinshu/event/omiwata.htm>

『諏訪湖における低層水塊の挙動について』河川整備基金助成業 (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.kasen.or.jp/seibikikin/h18/pdf/rep2-10.pdf>

騎竜舎 (2014. 1. 19 最終閲覧)

http://www.geocities.jp/rois_77/kiryusya.htm

琵琶湖環境科学研究センターHP (2014. 1. 19 最終閲覧)

<https://www.lberi.jp/root/jp/05seika/omia/38/bkjh0mia38-2.htm>

『諏訪湖における貧酸素水塊の空間特徴の分析』木村昌嗣(2012) (2014. 1. 19 最終閲覧)

<http://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/engineering/department/civil/toyota/toyota/syusoturon/12/kimura.pdf>

『琵琶湖の富栄養化と低酸素化』宗林由樹(2008) (2014. 1. 19 最終閲覧)

http://inter3.kuicr.kyoto-u.ac.jp/data/files/Lake_Biwa.pdf

あとがき

これまでは諏訪湖がきれいになり御神渡りが再び観測されるようになったことを、ただ喜んでいましたが、ワカサギ減少の実態を理解していくうえで、素直に喜ぶことができなくなりました。また、正月に家族と諏訪湖にワカサギ釣りに行った際、誰も1匹も釣ることができなかったことを受け、身をもってその深刻さを感じた。切なかった。

本論文の分析には関係のないことではあるが、諏訪周辺で生活している人たちは心から諏訪湖を愛しており、美化作業などのボランティアに積極的な方々がたくさんいた。その方々の努力の成果ともとれる御神渡りを守ることは、私を含め諏訪湖を愛する人たちみんなの望みである。また、漁協の方々を筆頭に、多くの釣りファンは、諏訪湖に住むワカサギが増えることを切に願っている。今後、ワカサギと御神渡りが共存する諏訪湖を説に願う。

最後になりましたが、本論文を完成させるうえでお話を聞かせて頂いた諏訪漁協の方々、諏訪市観光所の方々、そして分析をするうえでアドバイスをくださった大沼先生、澤田さん、同期の仲間たちには心から感謝したいと思います。