

湖岸植生の繁茂状況と来襲波浪の関係

浅野敏之*・西村規宏**・原口征士***

湖岸に植生群落を復元するためには、生物・生態学的な知見のみならず、波浪などの物理環境を調べた上で適地を決定する必要がある。本研究は、波浪の作用下における湖岸植生の繁茂限界をその季節変動を含めて考察したものである。植生の繁茂域は、主に現地の卓越風向に対する風上側にあり、風下側では湖岸地形に遮蔽される領域と一致した。来襲波浪と植生の現存量との関係については、植生の季節的な活性度の変動を考慮する必要がある。波浪の来襲を直接受ける地点では、波浪が極大となる月の直後に現存量の低下が見られることがわかった。

1. はじめに

近年の環境問題への関心の高まりから、湖岸の植生群落が有する水質浄化、生物の棲息場の提供、自然景観の形成といった多様な価値に注目が集まっている。沿岸植生群落は波を減衰させ、底泥を堆積させるので、この水理機能を利用すれば護岸などの人工構造物を用いなくとも背後地の保全に役立たせることができる。このような抽水植物群落を利用した自然な形の湖岸の保全工法は、琵琶湖（宇多ら，1994）、諏訪湖（林ら，1999）などで試みられている。

一方で、湖岸植生は波浪による流体力が大きい場所、底質移動が顕著な場所では生育できない。したがって、湖岸に抽水植物群落を復元するためには、生態学的な知見のみならず、波浪や土砂移動などの物理環境条件を考慮し、植生繁茂の適地であることを調査しておく必要がある。

Morris ら (2002) は、湖畔植生の密度や多様性と、外力としての湖面の貯水位や波の作用との関係を調べ、この結果から河岸の稀少植生の長期的な保全管理について議論した。Keddy (1982) は、季節変動する風波の特性と湖岸の植生繁茂状況や群落場の底質特性との関係を調査した。湖岸植生は、幼生時に受ける風浪によって植生の生存が決定されること、植生種間の競合と風浪に対する耐性の違いによって繁茂状況が支配されることを報告した。

本研究は、上述の環境水理学的な視点に立って、湖岸植生の繁茂と来襲波浪との関係をその季節変動を含めて考察したものである。本研究では、湖岸の人工化が著しいためにヨシの苗を移植して再自然化を進めている穴道湖と、同様な自然・気象条件であるが、自然湖岸が多く残されている神西湖を調査地点として取り上げ、来襲波浪と植生の繁茂状況との関係を調べた。

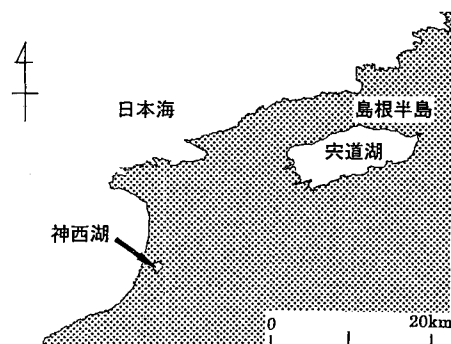


図-1 穴道湖と神西湖の位置

2. 穴道湖における調査・検討

(1) 穴道湖の現況

穴道湖はシジミやコノシロ・ワカサギなど漁業資源に恵まれた汽水湖である（図-1）。面積79.2 km²、湖岸延長約45 km を持ち、水深は平均4.5 m で最深部でも6 m 程度と浅い。古くから湖岸の改変がなされたため、湖岸総延長に占める人工湖岸の比率は74.2%となっている。これは琵琶湖(32.0%)、霞ヶ浦(54.0%)と比べても高い数値である。湖岸の人工化のために植生湖岸は減少しており、ヨシを卓越種とする延長3.1 km(平成8年度時点)の植生湖岸は、斐伊川河口部に位置する西岸と南岸部分に位置している（図-2）。ヨシ群落はヤマトシジミの稚貝の生息地として重要な役割を果たしており（坂本，1992）、水質保全や景観保全の面でもその貢献は大きい。現在、湖沼環境改善に向けての取り組みの一環として、湖岸に沿った水際部に竹や間伐材を用いた基盤構造物を作り、その中にヨシのポット苗を移植する湖岸再自然化プロジェクトが進行している。

穴道湖の底質は、東岸の大橋川河口や西岸の斐伊川河口付近では粒径0.063 mm 以下のシルト分であり、南岸と北岸で粒径0.1~0.2 mm の細砂が卓越する。

(2) 来襲波浪の推算

松江市における1988年~1997年の10年間の月平均風

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

** 学生会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科

*** 工修 朝日開発コンサルティング

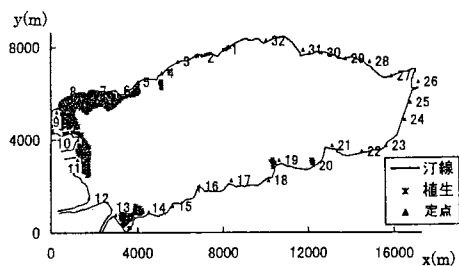


図-2 宍道湖における植生の繁茂状況

速・風向をアメダスデータから抽出した。10年間の平均月別風向を図-3に、月別平均風速を図-4に示す。図からわかるように冬季の卓越風向は西であり、風速も冬季が大きい。8月から10月にかけて風向は東に偏るが風速は減少する。卓越風向に対応する宍道湖の最大吹送距離を読みとり、浅海域の有義波を推算する方法として現在も広く用いられている Bretschneider - 井島法で波浪推算を行った。図-5は西風の場合に図-2のNo.25地点で推算された有義波高を示したものである。推算有義波高 $H_{1/3}$ は最大でも約20 cm 程度であり、また推算有義波周期 $T_{1/3}$ は1.4 s ~ 1.7 s となった。

(3) 湖岸への来襲波浪の特性

海岸侵食が問題となるような外洋に面した海岸と比較すれば宍道湖上に発生する風浪は小さく、そのために水深測量データも密な間隔では測定されていない。入手できる宍道湖の水深データは市販されている1万分の1湖沼図だけであった。この湖沼図から125 m 格子で水深を読みとり、湖岸各点に来襲する波高分布の計算に用いた。代表地点の横断面図を図-6に示すが、宍道湖は盆状の湖底地形となっていることがわかる。

前節で述べたように推算された波は有義波高 $H_{1/3}$ で高々20 cm、有義波周期が $T_{1/3} = 1.7$ s (深海波長 $L_0 = 2.34$ m) である。こうした来襲波条件と図-6に示した盆状の湖底地形から、波浪変形計算については有限振幅性や碎波変形を考慮する必要はないと判断できるので、本解析では屈折と浅水変形を計算対象として湖岸に来襲する波高分布を求めた。波の屈折計算は、波向き線間隔方程式に基づいて行った。

(4) 来襲波浪とヨシの繁茂状況との関係

冬季、夏期それぞれについて、湖岸上の各点に来襲する波の波高分布を求め、植生の繁茂状況と比較した。冬季風浪である西風と夏期風浪である東風について、沖波の周期を1.7 s とし、湖岸への波向き線を計算した。

西風の場合の波向き線図である図-7と植生繁茂域を示す図-2を比較すると、西風では湖の西岸は風上側となって波浪が来襲しない領域となり、植生繁茂域である図-2の点1~3、点5~11、点13~14は静穏域と

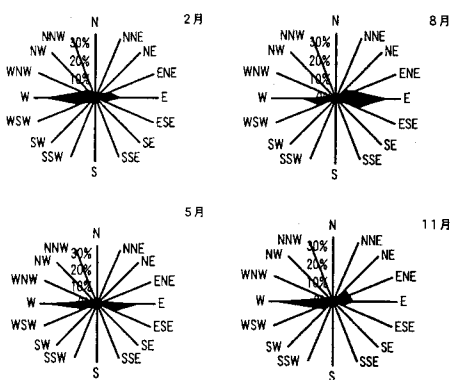


図-3 松江市における風向きの月別頻度分布

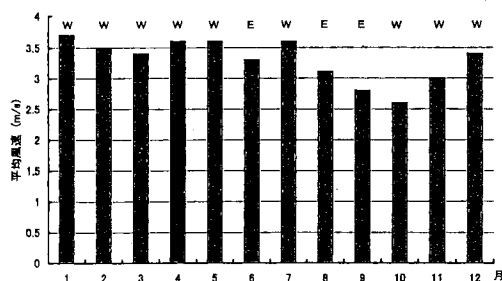
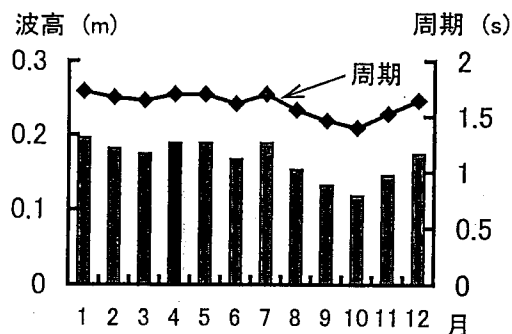
図-4 松江市における月別平均風速
(棒グラフの上の記号は卓越風向き)

図-5 推算有義波高と推算有義波周期

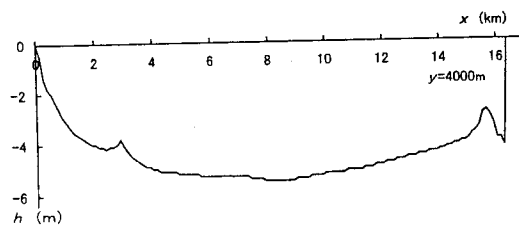


図-6 宍道湖の横断面

なる。また風下側の植生繁茂域である点18、20は、図-7の波向き線が広がっている領域や湖岸に遮蔽される領域

と対応していることがわかる。

一方、東風の場合の図-8では、こうした西岸の繁茂域に波が来襲するが、それでも植生繁茂域である点5～7, 点13～14の付近は波向き線が拡がっており、波浪が比較的穏やかな領域となることがわかる。

領域内の任意点の屈折係数は、波向き線間隔の逆数の平方根として求められる。各波向き線を追跡し、浅海域になった地点から浅水係数を求め、湖岸各点に来襲する波の波高を計算した。図-9および図-10にそれぞれ、西風(冬季)、東風(夏季)による湖岸に沿った波高分布を示す。西風時の結果である図-9から、地点番号No. 1～15は風上側で、波が打ち寄せない側となるが、図-2よりその範囲には植生が繁茂する(図中にVegetationと記した横線の範囲)ことがわかる。また、No. 18～20は風下側になるが、波向き線からこの領域は湖岸の遮蔽領域となっており波高は小さい。この静穏域も植生の繁茂域となっている。

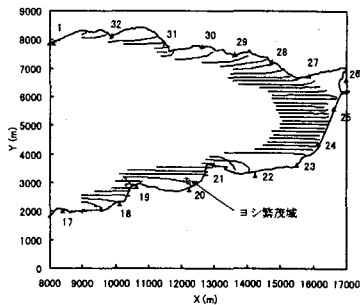


図-7 西風の場合の波向き線

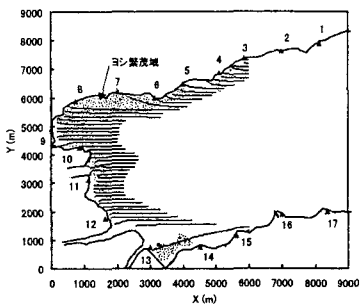


図-8 東風の場合の波向き線

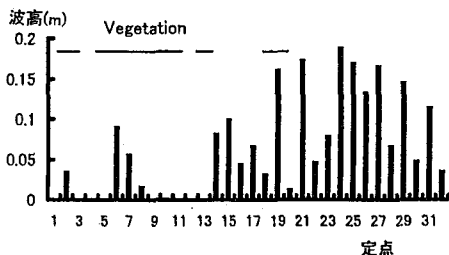


図-9 西風の場合の波高分布

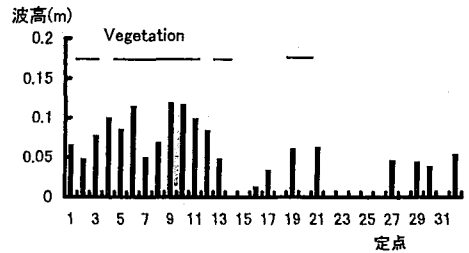


図-10 東風の場合の波高分布

一方、図-10は東風の結果であり、植生が繁茂する側が風下側となって波浪が来襲する側と一致するが、卓越風向が東向きとなる期間は3ヶ月程度と短かく波高も小さい。

3. 神西湖における調査・検討

(1) 神西湖の現況

神西湖は島根半島の最西に位置する、面積 1.35 km^2 、平均水深 1.5 m 、平均塩分濃度 1.50% の汽水湖である(図-1, 図-11)。湖岸は北東部など一部を除いて自然湖岸のまま残され、全体で約 6 ha のヨシ湿地が繁茂している。神西湖の深浅測量は、平成13年9月に島根県出雲土木建築事務所によって行われた。この水深データは 100 m 正方形格子で約120点の測点があり、これに基づいて等深線コンターが描かれている。このコンターを 50 m 格子で読みとると同時に、kriging 内挿により 12.5 m 格子間隔の水深データに直し、後述する屈折計算に用いた。代表的な横断面図を図-12に示す。神西湖も盆状の湖底地形となっている。

秋葉・細見(1997)は、図-11に示すSt. A～Dの4箇所の調査地点において、繁茂するヨシの現存量の季節変動を調査し、単位面積当たりの乾燥後重量(g dry weight)の形で整理した。図-13に彼らが測定したヨシの現存量の時系列を調査地点ごとに示す。どの調査地点でも共通して見られる結果として、4月～5月にヨシの現存量はほぼ最小値となること、6月のヨシの出芽時期

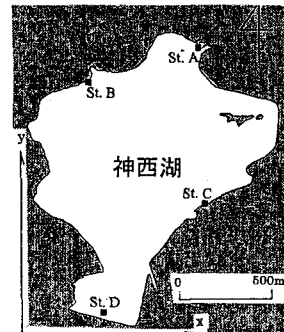


図-11 神西湖

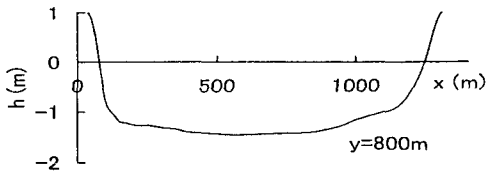


図-12 神西湖の横断面

とともに現存量は増加を始めること、8月から10月にかけて最大値を示すとともに、ヨシの穂が出尽くして枯れていく10月以降に現存量が減少すること、などが認められる。秋葉・細見はヨシ湿地を維持していくための環境条件を検討するために、各調査地点の塩分濃度、栄養塩濃度、底質土壌の含水比、強熱減量および平均粒径などを測定し、こうした環境因子のヨシ現存量に与える影響に付いても考察している。なお、現地の底質土壌は、St. AとSt. Dは流入河川の河口部に近いため粒径が $100\mu\text{m}$ 程度の泥質であり、一方、St. B, St. Cは平均粒径 $200\sim 420\mu\text{m}$ の砂泥質である。

(2) 湖岸に到達する波の波浪推算

風波の推算には、出雲市における1988年から1997年の月平均風速・風向をアメダスデータから読みとった。その結果は図-3、図-4に示した松江市の結果とほぼ同じである。

湖岸上の各点に來襲する波の波高分布を前述の Bretschneider - 井島法によって推算した。風向きに沿って吹送距離を求め、その区間の平均水深を与えて有義波高と有義波周期を計算した。神西湖は東西方向の吹送距離が最大で約1200 m、南北方向でも1600 mと短く、日平均風速を用いた場合の発生する風波の平均有義波高は2～3 cmとなる。秋葉らがヨシ現存量を観測した1993年7月～1994年10月の期間について、出雲市における日別の風向・風速観測データから、図-11のSt. Cにおける波浪推算を行ったところ、日平均風速に対する推算有義波は $H_{1/3}=11.8\text{ cm}$ (この時有効波周期 $T_{1/3}=0.94\text{ s}$)が最大であった。この日の日最大風速で計算しても $H_{1/3}=15.4\text{ cm}$ ($T_{1/3}=1.12\text{ s}$)となった。

こうして得られた推算波を沖波として、湖岸に來襲する波高分布を求めた。西風(冬季)、東風(夏季)にほぼ対応)のそれぞれについて波向き線間隔方程式に基づく屈折計算を行った。前述の推算された沖波の周期では、ほとんどの領域で深海波となって波向き線はほぼ直線となった。

(3) ヨシの繁茂密度と湖岸に來襲する波高との関係

図-13に示した秋葉・細見のヨシ現存量の季節変化のデータと、湖岸に來襲する波浪との関係を調べた。図-11のA～Dの各点に來襲する波のエネルギーは次のように求めた。各点に対して日々変動する風向に対応する

フェッチと平均水深を求め、日平均風速から推算される月当たりの波エネルギー E_m を次式から計算した。

$$E_m = \sum_{\text{day}} \frac{1}{8} \rho g H_{1/3,d}^2 C_{g,d} \cos \alpha_d \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 $H_{1/3}$ は推算沖波有義波高、 C_g は沖波の群速度であるが深海波条件から波速の1/2となる。また、 α は沖波の波向きが汀線と成す角であり、下付添字 d は1日ごとの推算値、 Σ は1ヶ月にわたる総和を表す。測定地点A～Dで計算された月平均の來襲波のエネルギー E_m の月別変化を前述の図-13中にプロットした。

図-13のSt. AやSt. Cでは來襲波エネルギーの大きい期間ではヨシ現存量の減少傾向が見られるが、來襲波浪の小さいSt. BやSt. Dでは両者の関係は明確ではない。図-14はすべての観測月、調査地点に対して、ヨシの現存量の測定データを縦軸に、來襲波のエネルギーを横軸にプロットしたものである。このように単純に月別の両者の関係に対応させただけでは、ばらつきが大きく明確な特性が見いだせない。

前述のようにヨシは6月から出芽し、夏季に著しい成長を示し、10月以降には枯れて現存量が減少する。來襲

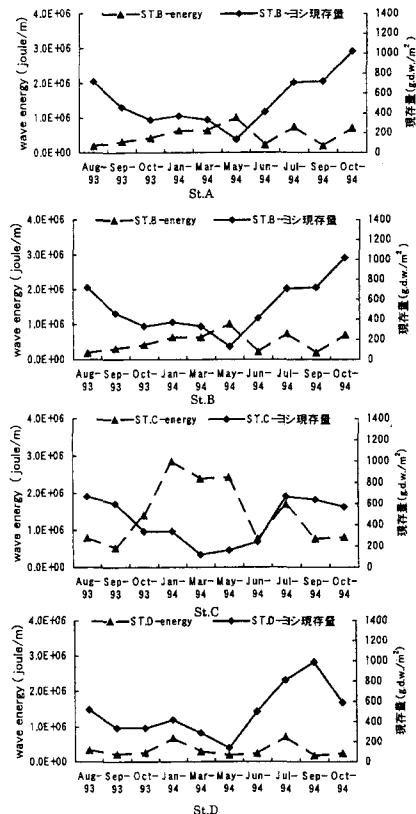


図-13 秋葉ら(1997)が測定したヨシの乾燥重量と來襲波エネルギーとの関係

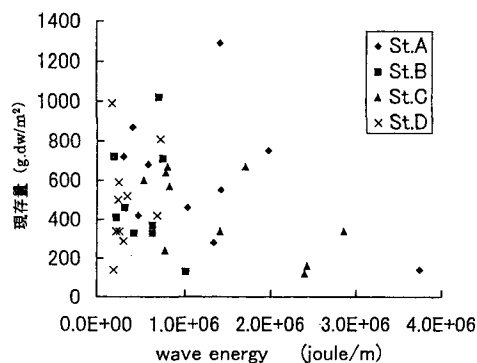


図-14 ヨシの現存量と来襲波浪のエネルギーとの関係

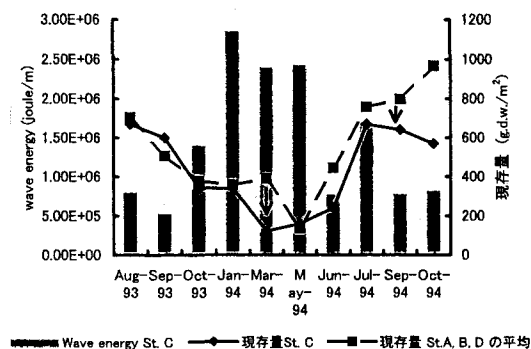


図-15 St. Cでの来襲波のエネルギーとヨシの現存量との関係

波のエネルギーの弱い地点では、ヨシの現存量の変動は主として生体としての成長・枯死の特性を表しており、来襲波エネルギーの大きい地点では生体としての変動に来襲波浪の影響が重なっていると考えた。

そこで、西からの卓越波向の風浪を直接受ける観測点 St.C のヨシ現存量と、St.C 以外の来襲波浪の小さい 3 測定点の平均のヨシ現存量の季節変動を分けて示したのが図-15 である。図中には St.C における来襲波エネルギーを棒グラフで示したが、来襲波は 1 月～5 月で大きく、7 月でも小さなピークがある。来襲波浪の大きい月の直後の月では St.C のヨシ現存量は他の 3 測定点の現存量より低下していること（図の矢印）がわかる。このような整理によって、ヨシ現存量に及ぼす来襲波の影響を明らかにすることができた。

4. 結 論

(1) 宍道湖において来襲波浪と植生の繁茂域の関係を調べたところ、植生の繁茂域は、現地の卓越風向である西風に対する風上側、ならびに風下側では湖岸地形に遮蔽する領域と一致しており、護岸の設置など人工化の影響は大きいものの、現在の植生の繁茂域は、風波の静穏域と対応していることがわかった。

(2) 自然湖岸が多く残されている神西湖において、来襲する風波のエネルギー量と、秋葉・細見の調査した植生の現存量との関係を調べたところ、来襲波のエネルギーの小さな観測地点では、植生生体としての活性度の季節変動に隠れ、来襲波の影響は明確には見出せないが、卓越波向きの風浪を直接受ける調査地点については、来襲波浪の大きな観測月の直後の月にヨシ現存量が減少していることがわかった。

来襲波の増大が植生の現存量の減少につながる力学的要因については、植生体に作用する波力・風による流体力が植生の土壌を把持する力を上回ること、波による底面付近の流れによって地盤土壌が流失すること、等が考えられるが、これらの検討は今後の課題としたい。前者の課題については例えば林ら(2001)の研究があり、後者についても砂浜の侵食・堆積の指標である C 値に基づいた中村ら(2001)の研究がある。植生の繁茂には、物理環境のみならず塩分濃度・栄養塩濃度の化学環境や植物生体としての特性も関与する。こうした要因が今回の結果にどの程度含まれているかも今後検討すべき課題である。

謝辞：神西湖の水深測量データは島根県出雲土木建築事務所から水深測量データの提供を受けた。また、国土交通省出雲河川事務所、島根県内水面水産試験場から、各種の資料提供を頂いた。当時鹿児島大学学生の田中雄一君（現 ㈱ 国際航業）には屈折計算や図面作成でご協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 秋葉道宏, 細見正明(1977): 神西湖沿岸湿地におけるヨシの分布, —ヨシの現存量と環境因子の関係—, 汽水湖研究, Vol. 4, pp. 7-10.
- 宇多高明, 吉田隆昌, 西嘉照毅, 富士川洋一(1994): 植生を利用した湖浜保全に関する一考察, —琵琶湖を例として—, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1111-1115.
- 坂本巖(1992): 宍道湖のヤマトシジミの生息地としての湖岸ヨシ帯, 汽水湖研究, Vol. 2, pp. 1-7.
- 中村圭吾他(2001): Relation between littoral zone vegetation and wave action in Lake Shinji, 第9回世界湖沼会議発表文集, pp. 569-572.
- 林健二郎, 木村保夫他(1999): 湖沼における植生護岸の形成とその効果, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1116-1120.
- 林健二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘(2001): 水辺植生に作用する波力と消波機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 891-895.
- Keddy, P. A. (1982): Quantifying within-lake gradients of wave energy: Interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in Axe Lake, Ontario, Aquatic Botany, Vol. 14, pp. 41-58.
- Morris, P.A., N. M. Hill, E.G. Reekie and H. L. Hewlin (2002): Lakeshore diversity and rarity relationships along interacting disturbance gradients: catchment area, wave action and depth, Biological Conservation, Vol. 106, pp. 79-90.