十三湖における汽水環境の長期的な 変化要因の検討

A STUDY ON FACTORS RELATED TO LONG-TERM ENVIRONMENTAL CHANGES IN LAKE JUSAN

松根駿太郎¹・梅田信²・田中仁³・佐々木幹夫⁴

Shuntaro MATSUNE, Makoto UMEDA, Hitoshi TANAKA and Mikio SASAKI

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

³フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

⁴正会員 工博 八戸工業大学教授 工学部環境建設工学科 (〒031-0814 青森県八戸市大字妙字大開88-1)

Lake Jusan is a brackish lake located in the down reaches of Iwaki River system and is one of the most famous places for *Corbicula japonica* in Japan. The aquatic environment in the lake and the river has long been changing under numerous natural and anthropogenic factors. The former includes changes in meteorological and hydrological systems, while the latter is composed of river improvement works, reclamation for farmland, etc. In this study, we first focused on topographical changes in Lake Jusan caused by the reclamation project completed in 1969 and by sedimentation. The influence on salinity fluctuation in the lake was investigated using computational hydraulic simulation and was found rather small. We then assessed influence of hydrological changes. In 1950s before large dams were constructed in the basin, drought occurred more frequently than 2000s, which seems to have caused excessively high salinity condition for habitation of *C. japonica*.

Key Words: brackish lake, land reclamation, quasi-3D model

1. 序論

河川や湖沼の長期的な環境の変化には、流域負荷や湖内循環の変化が関係している¹⁾。その原因として、降水量変化のような自然的影響に加え、人為的影響も考えられる。例えば、イシガイ類の生息環境悪化²⁾や涸沼におけるヤマトシジミの漁獲量減少³⁾に対する要因として、河川改修や護岸工事を含めた人間活動の影響が指摘されている。本研究で対象とする十三湖は、岩木川の最下流部に位置する汽水湖であるが、河口導流堤の建設や上流域の干拓、あるいは岩木川の河川整備や上流でのダム建設等、この数十年間のうちに様々な影響による変化を受けている。

十三湖は、国内でも有数のヤマトシジミの漁場として知られており、水産業は地域の主要な産業の一つである。ヤマトシジミの生息は、当然のことながら、汽水条件⁴⁾や水質条件^{6,7)}あるいは底質条件⁸⁾の影響を受ける。ただし、ヤマトシジミの漁獲量に関しては、漁獲状況や養殖・放流といった漁業方法の影響も大きいため、一概に

議論することが難しい。例えば、十三湖の経年的な漁獲高の変化を見ると、非常に大きな変動があったことが分かっている⁹⁾。昭和35年から昭和50年は、漁獲規制がなく最大では年間3,000トンに達することもあった。しかし、この乱獲に加え異常渇水等が発生し、この後の10年程度は漁獲量が低迷した。それ以降は、資源管理が徹底され年間2,000トン程度で維持している。

ヤマトシジミの生息や漁獲の中長期的な変遷を考える上では、水質、底質が悪化したから、あるいは乱獲したからであるといった単純な議論ではなく、例えば当時の水環境がどのようなものであり、現在とどのように異なるかを、実測データや数値シミュレーション等に基づいて定量的に論じていく必要があると考えられる。また、将来的な河川・湖沼管理の方針を検討する際には、気候変動等の時間的に変化する外部環境要因を考慮した予測に基づいた議論も必要になるように考えられる。

このようなことから、本研究では、1950年代頃までの十三湖の地形的、水文的な環境についてのデータを整理・解析し、現在(2000年代)との差違について検討し

図-1 十三湖平面図

図-2 岩木川流域の概略

た。その上で、ヤマトシジミの生息に大きく関与すると考えられる湖内の塩分環境について、流動数値シミュレーションに基づいて、過去と現在の状況について比較検討を行った。

2. 研究対象

十三湖は、青森県津軽半島北西部に位置し、日本海に面している汽水湖である。図-1に十三湖の平面図を示す。湖の北西部において十三湖と日本海が接続されており、この地点を水戸口という。かつて水戸口は閉塞と開削を繰り返してきたが、1946年に現在の位置に導流堤が竣工したことにより、閉塞することはなくなっている。十三湖の中心部の最大水深は約2mと浅く、湖の容積に対して集水面積が大きい。そのため、湖水の平均滞留期間が1日程度と非常に短い。十三湖への流入河川は岩木川、山田川、鳥谷川等であるが、岩木川が全集水面積の約78%を占める。図-2に示すように、岩木川流域の上流に

図-3 岩木川河口の比較（上図：1917年，下図：現在）

は目屋ダム（1960年竣工）、浅瀬石川ダム（1988年竣工）といった2つの大きなダムがある。

十三湖干拓建設事業は、十三湖湖面2.37km²及び岩木川下流域の湿地帯8.48km²の範囲で行われた。1948年に着工し、湖口の汀線を大きく囲むような堤防（囲繞堤）が建設され、1969年に干拓が完了した。図-3に、1917年の地形図¹⁰⁾と現在の岩木川河口部分¹¹⁾を示す。干拓により鳥趾状の河口が直線化され、網目状に分かれていた岩木川は、岩木川本川から直接流入するようになっている。

3. 解析方法

(1) 地形変化

明治時代の測量地図（岩木川平面図）を用いて、過去の十三湖の地形を解析した。岩木川平面図は、岩木川の改修にあたって、1911年から1912年に掛け、内務省により測量、作成されたものである。全体では、岩木川の中流部までを含む、河口から約50kmまでの範囲で制作されたものだが、本研究では十三湖を含んだ最下流部のみを利用した。縮尺は3000分の1、十三湖内に引かれた等深線の間隔は、1尺（約0.303m）である。原本は不鮮明であったことから、清野らがトレースした十三湖内等深線の電子画像¹²⁾を用いた。この等深線のトレース画像から、デジタル化ソフトウェア（GoldenSoftware社製Digger）を用いて、湖岸および等深線をデジタル化した。

この等深線データについて、湖内の深度情報を空間内挿した格子データ（格子間隔40m）を作成して、深度ごとの湖底面積や容積を計算し、標高一湖容量曲線を作成した。なお、深度の空間内挿方法は、クリギング法、動径基底関数法、最小曲率法等種々の手法を試行した上で、元の等深線と対応が最も良かった最近傍法を採用した。

現在の地形は、国土交通省青森河川国道事務所が、2006年に実施した十三湖の深浅測量結果を用いて解析を

行った．この測量では，十三湖内の全域で概ね200m間隔の測線が設定されて計測された．これについてはクリギング法により空間内挿した格子データ（格子間隔40m）を作成して，標高一湖容量曲線を作成した．なお，次節で述べる湖水流動計算の計算格子は同様の方法で，格子間隔200mの格子データを作成した．

(2) 湖水流動の解析モデル

十三湖内の汽水環境（塩分変動）の解析は，準3次元の流動解析モデルを用いて行った．本モデルは梅田ら⁹⁾によって十三湖に適用されており，再現性が確認されている．支配方程式である運動方程式は，以下のようになる．

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\tau_{wx} - \tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho dz + f_v \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\tau_{wy} - \tau_{by}}{\rho_0} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho dz - f_u \quad (2)$$

ここで， t ：時間， x, y ：水平方向座標， z ：鉛直上向き座標， $\{u, v, w\}$ ： $\{x, y, z\}$ 方向の流速， η ：自由水表面の静水面からの高さ， g ：重力加速度， ρ ：水の密度， ρ_0 ：水の平均密度， A_x, A_y, A_z ： x, y, z 方向の渦動粘性係数， τ_{wx}, τ_{wy} ： x, y 方向の風による水面せん断応力， τ_{bx}, τ_{by} ： x, y 方向の底面せん断応力， f ：コリオリパラメータである．

連続式については，水深方向に積分し，水位変動の計算に用いた．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{-H}^\eta u dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{-H}^\eta v dz \right] \quad (3)$$

ここで H は底面の鉛直座標である．

水温と塩分は以下の移流拡散方程式より求めた．

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + w \frac{\partial \phi}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + S_\phi \quad (4)$$

ここで， ϕ ：塩分・水温， K_x, K_y, K_z ： x, y, z 方向の渦動拡散係数である． S は生成項であり，水温については，気象条件による水面を通じた熱収支を考慮した．

(3) 流動計算の条件

主要な計算条件は，既往研究^{5),13)}と概ね同様に与えた．計算対象領域は7.4km×5.8kmで水平計算格子間隔200m，鉛直格子間隔0.1mとした．計算期間は，6月中旬から10月中旬までとした．この期間とした理由は，序論で記したとおり，湖内でのヤマトシジミの生息状況が，筆者らの関心事項であることが大きい．計算対象期間は，概ね

夏季であるが，既往研究¹⁴⁾等によれば，この間にヤマトシジミの産卵期が含まれる．さらに，産卵および孵化には，塩分および水温の条件が重要である⁴⁾ことから，この時期の汽水環境の解析が重要と考えた．

各種の境界条件は，以下のように設定した．河川流入量は，五所川原地点で国土交通省により計測された流量に対して，十三湖地点との流域面積比を乗じて十三湖への流入量とした．一方，水戸口通過流量 Q_M は，十三湖水位の実測値 h と河川流入量 Q_R を用いて，湖水の連続条件である以下の式(5)から推定した．

$$Q_M = Q_R - A_L \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

なお A_L ：十三湖面積である．海水塩分は，水戸口における過去の計測結果から，33psuの一定値を与えた．

過去の環境における湖水流動の計算条件は，以下のような考え方で設定した．検討条件の一つ目は，干拓等による湖地形の変化の影響を調べるものである．湖の水深条件は，岩木川平面図の等深線から作成したものをを用いた．その他の条件（河川流量，湖水位）については，現在（2008年実測）の値に揃えて検討をした．ただし，地形改変前の岩木川の河口は，図-3に示すように網目状に分散している．この条件を模擬するため，岩木川の流入を6カ所に分散させた．各流入部からの流量については，それぞれの川幅が概ね等しいことから流量も概ね等しいと判断し6等分とした．

検討条件の二つ目は，岩木川の流況変化による影響を把握するためのものである．干拓工事が完了する前の1950年代（最も過去の流量データが得られた1953年から1959年）の岩木川の流況と2000年代（2001年から2010年）の流況とを示したのが図-4であり，両年代では，非常に大きな差があることが分かった．1950年代には，五所川原地点での流量が10m³/s以下となる日数が，平均で40日程度あった．一方2000年代は，2007年に生じた数日を除き10m³/s以下となることがなかった．このようなことを踏まえ，過去と現在の流量条件も含めた検討も行った．計算は，次の全4カ年で実施した．過去の条件として，1954年（低水流量と渇水流量が最も小さい年）と1957年（1950年代の中で平均的な流況の年）を選定した．現在条件には，2007年と2008年を選定した．この2年間は，既往検討⁹⁾でも対象にされたことから，各種の実測計算条件が最もよく整っており，再現性についても確認されているためである．

1954年と1957年の流動計算で，湖地形は現実に即するよう干拓前の条件を与えた．河川流量は，2000年代は時間流量データを用いたのに対して，1950年代は日流量を用いた．ただし，本研究での計算の趣旨は，前段落に記したように低水時の流況の変化による影響を中心とした検討としているため，時間流量と日流量の差は，大きく効かないと考えられる．一方，湖水位はデータが得られなかったため，計算期間の天文潮位を計算し，これを湖

図-4 五所川原地点における(a)1950年代(1953～1959年)と(b)2000年代(2001～2009年)の岩木川流況の比較

水位として与えた。十三湖は、図-1のように延長数百mのごく短い水戸口を挟んで日本海に面しているため、概ね潮位に等しい湖水位変動をする。したがって、推算潮位を湖水位の変動とすることは、概ね妥当な仮定であると考えられる。

4. 解析結果

(1) 地形変化

岩木川平面図から再現した地形データと2006年の深浅測量結果を比較した結果、比較的顕著な差として、岩木川流入部の鳥趾状の地形が直線化されたことに加え、水戸口付近における等深線の後退が見られた(図-5)。これは、導流堤の竣工により水戸口付近における湖水と海水の交換速度が増大し、底質の洗掘が進んだ影響があると考えられる。十三湖中心部の湖底標高は、明治時代が約2.1m、現在が約1.9mであり、現在の方がわずかながら浅くなっていた。これは河川からの流入土砂が湖底に堆積したためであると考えられる。

図-6に地形図から作成した標高-湖容量(H-V)曲線を示す。明治時代からほとんど変化は見られないが、深

図-5 明治時代(水戸口建設と干拓の前)と現在(2006年)の湖岸線および標高-0.9mの等深線の比較

図-6 明治時代と現在の測量結果に基づく十三湖の標高-湖容量(H-V)曲線

部と浅部にそれぞれ、堆砂と干拓によると考えられる差があった。浅部の差は干拓による容積変化に対応し、深部における差が、約100年間の土砂堆積量に対応するものと仮定して、深部における土砂堆積量を算出したところ約 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ が得られた。この値は藤田ら¹²⁾による岩木川の掃流砂量調査の結果に基づいた推定値の約0.7倍となった。かなり大雑把な計算ではあるが、両者は概ね一致する結果となったことから、この値は妥当な推定値と考えられる。これを比堆砂量に換算すると $2.7 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ となった。これは、同じく青森県の太平洋側にある馬淵川河口(八戸港)の平均的な堆砂量¹⁵⁾から推定した値の約 $170 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ や石狩川での推定値¹⁶⁾である $35 \sim 56 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$ と比較すると非常に小さい。この理由の一つとして、五所川原よりも下流の河道内における堆積が大きい¹²⁾ことがあると考えられる。

(2) 地形改変と塩水流動

図-7に、2008年の流量条件に対して実施した計算により、十三湖の地形変化に基づく塩分変動の相違を示す。過去の地形条件の計算結果では、現在と比較して、浅部における塩分がわずかに高く(図-7(b), (c))、深部で低下(図-7(d))している時期があるものの、湖内塩分の変動に大きな変化はなかった。浅部での塩分が、潮汐

図-7 2008年夏の岩木川流量および湖内塩分の計算結果

に対応して大きく変動することや、湖心付近の底層（D地点標高-1.1m）において塩水が滞留しやすいという傾向も現在の状況⁹⁾と変わらなかった。これは、先述のように干拓や堆砂が十三湖の湖水容量にほとんど影響を与えなかったためであると考えられる。

(3) 流況変化と塩水流動

流量条件についても変化させ、過去（1954年、1957年）と現在（2007年、2008年）の岩木川流量を適用した塩分変動の計算結果を図-8から図-11に示す。1954年（図-8）と1957年（図-9）の計算値には、潟水と出水の影響が強く表れており、河川流量の影響が湖内塩分に対して大きな影響を与えることが分かった。このような塩分への影響に関して、ヤマトシジミの生息環境としての観点から、流況の変化と合わせて以下で議論する。

ヤマトシジミが水温に関係なく長期間生存可能な塩分濃度範囲は1.5～22psuであるとされている⁸⁾。1954年は、塩分が7月中旬から8月下旬の長期間にわたって海水塩分（33psu）に近い値を示した。そのため、この年の夏季はヤマトシジミの大量斃死が起こった可能性がある。1950年代の岩木川（五所川原地点）の潟水流量は、平均で4.7m³/sであったが、1954年は特に低く、わずか0.42m³/sだった。1957年は、6月下旬から7月上旬にかけて流量10m³/s以下の日が続いており、同期間では塩分は海水塩分に近い値を示している。ただし、7月上旬以降は出水が繰り返されたため、湖内塩分は低下した。

このような1950年代の状況に対し、1960年以降は、恐らく目屋ダム供用の効果から流況が安定し、1960年代の

図-8 1954年夏の岩木川流量およびB地点標高-0.1mにおける湖内塩分の計算結果

図-9 1957年夏の岩木川流量およびB地点標高-0.1mにおける湖内塩分の計算結果

図-10 2007年夏の岩木川流量およびB地点標高-0.1mにおける湖内塩分の計算結果

図-11 2008年夏の岩木川流量およびB地点標高-0.1mにおける湖内塩分の計算結果

潟水流量は平均で16.4m³/sまで上昇した（2000年代は21.4m³/s）。しかし、2007年は、7/15に流量が15m³/s程度になるとともに塩分が急激に上昇するイベントが見られた。7月17日、18日は、2000年代でこの期間だけとなる10m³/s未満にまで流量が低下するような厳しい潟水であり、結果として高塩分の日が続いた。2007年はヤマトシジミの斃死が起こったことが、地元から報告されており、高塩分が斃死を引き起こしたと推測される。2008年については、まとまった出水が何度も起こっており、低塩分

の日は続いた。

以上の結果から、十三湖の塩分環境に対して、岩木川の流況の影響が大きいことが示された。1950年代は、図-4に見られるように、年ごとの流況変動が大きく、また渇水流量がかなり低かった。そのため、湖内の塩分から考えると、ヤマトシジミの生息に対しては、やや過酷な環境だったと考えられる。一方、2000年代には、流域のダム建設による効果もあると考えられるが、流況が安定し渇水の頻度が減少している。しかし、2000年代でも、渇水が発生すると高塩分の日が続き、ヤマトシジミ斃死の原因となる可能性があることが分かった。

5. 結論

本研究においては、明治時代の測量地図である岩木川平面図のデジタル化および数値シミュレーションを行うことにより、地形改変前の十三湖と現在の十三湖の地形相違と水環境の相違を明らかにした。また、岩木川の流況変化の考察を行い、1950年代と2000年代の岩木川流量を用いてシミュレーションを行うことにより、流況の変化による湖内の塩分条件の変化を示した。以下に、本研究で得られた主要な結論を示す。

- 1) 十三湖は、この約100年間で上流域の干拓等地形の人為改変があったものの、堆砂を含めた湖水容量の変化は非常に小さい。
- 2) 干拓は、岩木川からの流入条件等上流部の地形を大きく変えたが、湖内の塩分環境に対する影響は小さかった。ただし、干拓による湖岸線の単調化や干潟面積の減少などが、湖内生態系への影響を及ぼした可能性については引き続き検討が必要である。
- 3) 1950年代の岩木川流量の条件を用いて湖内塩分の計算を行った。低水時の流況が、現在（2000年代）と大きく異なっていたため、現在よりも常時の塩分がかなり高いことが推定された。この流況変化は、気候的な変化による降水の変化およびダムの建設等による流量の変化によるものと考えられる。
- 4) したがって、岩木川上流のダム群や灌漑用水を含めた流域内の水運用を適切に行い、夏季の渇水を防ぐことができれば、十三湖内の高塩分によるヤマトシジミの斃死を防止できる可能性があると考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS科研費21360230および河川砂防技術研究開発（河川生態、代表：佐々木幹夫）の援助により実施された。また、国土交通省青森河川国道事務所から、岩木川平面図（写し）、十三湖周辺地図および湖内深浅測量データの提供を受けた。九州大学清野聡子准教授からは、岩木川平面図（十三湖部分）をトレースした

電子画像の提供を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 福島武彦, 川村修平, 恩田裕一, 今井章雄, 松重一夫: 霞ヶ浦, 諏訪湖における底質長期変化と栄養塩収支, 水環境学会誌, Vol.28, No.5, pp.313-319, 2005.
- 2) 根岸淳二郎, 萱場祐一, 塚原幸治, 三輪芳明: 指標・危急生物としてのイシガイ目二枚貝: 応用生態工学, Vol.11, No.2, pp.195-211, 2008.
- 3) 中村幹雄編著: 日本のシジミ漁業, p.266, たたら書房, 2000.
- 4) 鶴田泰士, 石川忠晴, 西田修三, 成田舞, 藤原広和: 小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.175-187, 2002.
- 5) 梅田信, 小西絵里子, 田中仁, 佐々木幹夫: 浅い汽水湖における塩分変動解析, 水工学論文集, 第54巻, pp.1423-1428, 2010.
- 6) 中村由行, 井上徹教, 柳町武志, 石飛裕, 神谷宏, 嘉藤健二, 山室真澄: 汽水湖沼沿岸部における水温, 水質構造の日周変動—鉛直対流循環が二枚貝生態系に及ぼす影響—, 水工学論文集, 第41巻, pp.469-474, 1997.
- 7) Atas Pracoyo, Makoto Umeda, Hitoshi Tanaka, Mikio Sasaki and Masayasu Nagasaki: Factors effecting on mortality rate of *Corbicula japonica* in Lake Jusan, Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 68, No.4, I_295-I_300, 2012.
- 8) 中村幹雄: 宍道湖におけるヤマトシジミと環境の相互関係に関する生理生態学的研究, 北海道大学博士論文, 1997.
- 9) 中村幹雄編著: 日本のシジミ漁業, p.90, たたら書房, 2000.
- 10) 国土交通省青森河川国道事務所提供: 十三湖周辺地図（大正6年）.
- 11) 電子国土Webシステム. (<http://portal.cyberjapan.jp/>)
- 12) 河川生態学術研究会岩木川研究グループ: 岩木川の総合研究, 2012.
- 13) Atas Pracoyo, 梅田信, 田中仁, 佐々木幹夫: 汽水環境解析のための十三湖水戸口流量の推定方法に関する検討, 土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 66, pp.981-985, 2010.
- 14) Atas Pracoyo, 梅田信, 田中仁, 佐々木幹夫, 長崎勝康: 十三湖におけるヤマトシジミ産卵期の塩分・水温と稚貝生息数に関する検討, 土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 67, No.2, pp.1001-1005, 2011.
- 15) 片寄誠, 村上敏幸, 山田貴裕, 原信彦: 八戸港内の埋没実態と予測モデルの構築, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 431-435, 2007.
- 16) 清水康行, 嵯峨浩, 早川博, 品川守: 石狩川の土砂流出に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, pp.1039-1044, 1998
(2012. 9. 30受付)