

学 位 論 文 要 旨

氏 名

伊藤 祐二

題 目

水資源としての湖の水収支に関する研究
(Studies on Hydrologic Budget of Lake as Water Resources)

湖水は、様々な産業の貴重な水資源である。湖水の水利用が湖の水収支におよぼす影響を評価することは、将来の利水計画と適切な湖水管理に対して極めて重要である。本研究の対象地である池田湖は、鹿児島県薩摩半島南部に位置し、湖水は周辺地域の上水や農業用水として利用されている。また、池田湖では、大規模畑地かんがい事業によって湖水管理システムが導入された 1983 年以降、利水による湖水の減少を補うために河川水の供給が行われている。このように、池田湖においては、湖水の利用および水管理の影響が比較的大きいと考えられるが、その影響評価についてはこれまで検討されておらず、水収支の解明も十分ではない。よって本研究では、まず地域の貴重な淡水資源である池田湖に対して、湖水位推定モデルを構築し、1967 年から 1997 年の水収支解析によってその妥当性を検証した。次に本モデルを用いて湖の水収支を明らかにし、水利用と水管理が池田湖水位におよぼす影響について検討した。

湖水位推定モデルにおける水収支構成要素は、降水量、湖面蒸発量、流域からの流入量、湖底漏出量、河川水供給量および利水量であり、利水量は上水利用量、水田および畑地かんがい用水量の 3 要素に分けられる。湖面蒸発量は、バルク法に基づいて推定し、その妥当性は 2004 年 8 月から 2005 年 9 月の現地観測データに基づく熱収支解析によって評価した。流域流入量および湖底漏出量は、タンクモデルおよびダルシー則に基づいて推定し、モデルパラメータは SCE-UA (Shuffled Complex Evolution)法を用いて最適化した。また、湖水の利用と水管理が池田湖水位におよぼす影響については、利水 3 要素と河川水供給量に 4 つの条件を仮定し、1983 年から 1999 年の湖水位のシミュレーションによって検討を行った。

本研究で得られた成果は、以下のように要約される。

- 1) 降水と蒸発水による移流熱フラックスが池田湖の熱収支におよぼす影響は小さく、移流熱の影響を省略したバルク法による潜熱フラックスの推定値は、現地観測データと Bowen 比法に基づく結果とよく一致した。また、Priestley-Taylor 法による月単位の潜熱フラックスは、Bowen 比法による結果とよく一致した。
- 2) 本研究で構築した湖水位推定モデルによる 1983 年から 1997 年の湖水位の計算値は、実測湖水位と極めてよく一致した。したがって本モデルは池田湖の水収支の評価に有用である。
- 3) 池田湖では、降水量、流域流入量、河川水供給量および畑地かんがい用水量の年変動は大きく、湖底漏出量、湖面蒸発量、上水利用量および水田かんがい用水量の年変動は小さい。
- 4) 利水と河川水供給のない自然の水収支条件における池田湖水位は、湖への流入量が流出量よりも大きくなるため、実際の湖水位よりも高くなる。
- 5) 湖水を上水と水田および畑地かんがい用水として利用する場合には、河川水の供給を行うことで安定した湖水位の維持管理が可能である。

学 位 論 文 要 旨

氏 名

ITO Yuji

題 目

Studies on Hydrologic Budget of Lake as Water Resources
(水資源としての湖の水収支に関する研究)






Lake water is a variable freshwater resource for various industries. Hydrological assessment of the influences of water utilizations on a lake water budget is indispensable for water use planning and proper lake water management. Freshwater from Lake Ikeda, in the southern part of Satsuma peninsula in Kagoshima prefecture, is used as tap and agricultural water for the surrounding area. Since 1983, when the lake water management system was introduced by the Large-scale Upland Irrigation Project, river water has been transferred into the lake to compensate for the water loss due to water uses. Despite the impacts of water uses and management on lake hydrologic budget, the effects have never been assessed and the hydrologic budget has not been properly evaluated. The objectives of this study are to develop a water level estimation model for Lake Ikeda based on a water budget analysis for 1964-1997, to understand the lake hydrologic budget, and to examine the effect of the lake water uses and management on the lake water level by using the proposed model.

The daily water budget components in the model consist of precipitation, lake evaporation, inflow from the lake catchment area, leakage from the lake bottom, river water supply, and water uses. Water uses consist of namely, tap water use, paddy field and upland irrigations. Lake evaporation was estimated based on bulk method which was verified by heat budget analysis based on field data observed from Aug. 2004 to Sep. 2005. The inflow and leakage were estimated based on the Tank Model and Darcy's law in which the model parameters were optimized by the SCE-UA (Shuffled Complex Evolution) method. To investigate the effects of the lake water uses and management on the lake water level, four simulation cases were analyzed with the model under the hypothetical conditions for the tap water use, paddy field and upland irrigations, and river water supply for 1983-1999.

The results of this study are summarized as follows;

- 1) The effect of advected heat fluxes on the lake heat budget is small. The latent heat flux of the lake estimated by bulk method without the advected heat fluxes was in good agreement with the one based on field observation data and Bowen ratio method. The latent heat flux estimated by Priestley-Taylor method also agreed well with that by Bowen ratio method.
- 2) The calculated lake water level using the developed model was in good agreement with the observed one for 1983-1999. Therefore, the model must be useful to evaluate the lake water budget.
- 3) Annual variations of precipitation, inflow from lake catchment area, river water supply, and upland irrigation are large, while that of leakage, lake evaporation, tap water, and paddy field irrigation are relatively small.
- 4) Under the natural hydrologic budget condition, without the water uses and river water supply, the lake water level became higher than the present due to relatively large total inflow.
- 5) The result of simulation analyzed under the water use condition where lake water is used as tap water, paddy field and upland irrigations indicated that the appropriate lake water level can be maintained by supplying river water.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	伊藤 祐二				
審査委員	主査	鹿児島大学	教授	初井 和朗	
	副査	鹿児島大学	助教授	中川 啓	
	副査	佐賀大学	教授	瀬口 昌洋	
	副査	佐賀大学	教授	加藤 治	
	副査	宮崎大学	教授	秋吉 康弘	
審査協力者					印
題 目	<p style="text-align: center;">水資源としての湖の水収支に関する研究 (Studies on Hydrologic Budget of Lake as Water Resources)</p>				
<p>湖は種々の産業における貴重な水の供給源となっている場合が多く、水資源としての湖の果たす役割は重要である。鹿児島県薩摩半島南部に位置する池田湖は、水面標高約65m、最大水深230mであり、貯水機能を有した地域の貴重な淡水資源としての湖である。その水利用は、農業用水から生活、観光および水産用水の多岐にわたっている。しかし、渇水期には水面標高が農業用水管理水位を下回ることがあり、今後も持続可能な水利用を行うには、池田湖の水収支を明らかにし、適切な水管理手法を構築する必要がある。すなわち、池田湖流域で繰り返される種々の水利用に対して、自然の水循環系をできる限り維持し、かつ利水および親水に対する社会的要求を満たしながら、健全な水循環系を構築していくためには、湖水位の変動および湖の水収支を明らかにすることが必要となる。本研究では、過去に生じた渇水も含めて池田湖の水収支を明らかにすることを目的に、池田湖の熱収支解析に基づく蒸発量の推定、湖水位推定モデルの構築と妥当性の検証、および種々の水利用に対する湖水位の応答について検討を加えている。</p>					

池田湖の熱収支に関しては、現地で実測した湖水温および湖面上での気象資料を用いて、降水や蒸発水による移流熱フラックスが池田湖の熱収支に及ぼす影響を数値解析に基づいて評価し、移流熱フラックスを考慮した熱収支式およびボーエン比法に基づき検討を加えた。その結果、移流熱フラックスが池田湖の熱収支に及ぼす影響は小さいこと、温暖な地域に位置する池田湖では、年平均の顕熱フラックスは小さいが潜熱フラックスは大きくなること、および、池田湖の潜熱フラックスの季節変化は、潜熱フラックスが秋冬季に大きく春夏季に小さくなる日本の北部地域における深い湖の季節変化とは異なり、時期的に1ヶ月程度早い傾向にあることを明らかにした。

湖水位推定においては、湖面蒸発量はバルク法、流域流入量および湖底漏出量はタンクモデルおよびダルシー則に基づいて推定している。計算に用いるモデルパラメータは大域的探索手法SCE-UA (Shuffled Complex Evolution)法を用いて最適化し提案したモデルによる湖水位の推定値と実測値は比較的よく一致している。

湖水の利用と水管理が湖水位におよぼす影響については、提案したモデルに対して、人為的な利水量と河川水供給量を仮定し、1983年から1999年の湖水位のシミュレーションを行い、実際の湖水位との比較を行っている。利水と河川水供給のない水収支条件を仮定した場合の池田湖水位は、湖への流入量が流出量よりも大きくなるため、実際の湖水位よりも高くなること、および湖水を上水および農業用水として利用する場合には、周辺河川からの適切な水の補給を行うことによって、湖水位を農業用水管理水位に維持可能であることを明らかにした。

以上のように、本研究で対象とした池田湖の熱収支は、日本の北部に位置する深い湖の熱収支とは異なることを現地観測データに基づいて指摘した点、さらに地域の淡水資源として重要な役割を果たす湖の水位を推定するモデルを構築し、実測湖水位と比較し、本研究で新しく提案するモデルが高い再現性を有している点に研究の独創性があり、今後の適切な湖水位管理に有益であり、学術的に高く評価できる。したがって、審査委員一同は本論文が博士（農学）の学位論文として十分に価値があるものと判定した。

最終試験結果の要旨

学位申請者 氏名	伊藤 祐二		
審査委員	主査	鹿児島大学 教授	籾井 和朗
	副査	鹿児島大学 助教授	中川 啓
	副査	佐賀大学 教授	瀬口 昌洋
	副査	佐賀大学 教授	加藤 治
	副査	宮崎大学 教授	秋吉 康弘
審査協力者			
実施年月日	平成19年 1月 5日		
試験方法（該当のものを○で囲むこと。）			<input checked="" type="radio"/> 口答・筆答
<p>主査及び副査は、平成19年1月5日の公開審査会において学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士（農学）の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに識見を有すると認めた。</p>			

学位申請者
氏 名

伊藤 祐二

[質問 1] 鉛直透水度の定義および透水係数との相違点は何ですか。また湖の水収支を検討する際に、鉛直透水度は一般的に使用されていますか。

[回答 1] 鉛直透水度は、鉛直方向に平均化した透水性を表す指標であり、透水係数を流下距離で除することで得られます。湖の水収支研究で一般的に使用されているかどうかは不明ですが、フロリダの湖の水収支研究で用いられています。

[質問 2] 従来の熱収支解析法に対して、本研究の熱収支解析法はどのような点が異なりますか。

[回答 2] 正味の移流熱フラックスが考慮されている点が異なります。

[質問 3] モデルパラメータ同定の手法として、SCE-UA法を用いていますが、他の探索手法を試すなど比較検討は行いましたか。また、SCE-UA法を用いた理由を教えてください。

[回答 3] 探索手法間の比較検討は行いませんでしたが、既往の文献によれば、大域的探索手法の中でもSCE-UA法が優れていることが報告されており、実際に本研究でも実測とモデルによる結果が十分に一致するパラメータを同定することが出来ました。

[質問 4] 安定した湖水位とはどのような水位を指すのでしょうか。

[回答 4] 池田湖の農業用の管理水位は標高62mとなっており、実際の湖水位は標高62~66mの範囲で管理されているので、その範囲で変動する湖水位を安定した湖水位と定義いたしました。

[質問 5] 池田湖の湖底漏出量と鉛直透水度を日本の北部地域のカルデラ湖やフロリダのカルスト湖と比較している理由について教えてください。

[回答 5] 日本の北部地域に位置するカルデラ湖は池田湖と成因が同じであり、フロリダの湖については、湖底漏出量と鉛直透水度の評価方法が池田湖の評価方法と同じです。したがって各々の湖のデータを参考値として示し、本研究で推定した湖底漏出量と鉛直透水度が他の湖と比べて異常な値となっていないことを確かめるために比較を行いました。

[質問 6] ボーエン比法、ペンマン法およびプリーストリ・テラー法による潜熱フラックスの推定値を比較した理由について教えてください。

[回答 6] ボーエン比法は現地観測データに基づいて湖面側と大気側の2点の条件から理論的に推定する方法ですが、他の2つの方法は貯熱項を除けば大気側の条件だけで求めることが出来るので、ボーエン比法による潜熱の推定値に対し、ペンマン法やプリーストリ・テラー法がどの程度一致するのかを調べるために比較を行いました。

[質問7] ペンマン法による潜熱フラックスの推定値がボーエン比法による結果を過大評価した理由を教えてください。

[回答7] 過大評価の要因の一つとして、気温が水温よりも低い場合に温度飽和水蒸気圧曲線の勾配が過小評価され、ペンマン式第2項が過大評価されることが挙げられます。池田湖では、一般に気温は水温よりも低いため、結果として潜熱フラックスが過大評価されると考えます。

[質問8] 1967年当時のモデルパラメータが1983年以降の湖水位の推定に適用できない理由として、流域の水文特性の変化を挙げていますが、実際に流域はどのように変化したのですか。

[回答8] 実際の状況を確認したわけではありませんが、鹿児島県の資料によると流域の林野面積は低下傾向にあることが報告されています。

[質問9] 池田湖の蒸発量は秋に高くなっています。この特徴を池田湖固有のものとして説明していますが、もう少し具体的に説明して下さい。

[回答9] 水深が深く熱容量が大きい池田湖では、日射や大気からの放射エネルギーの多くは春夏季に湖水中に貯えられ、気温および放射エネルギーが低下する秋冬季に潜熱フラックスとして放熱することが湖面蒸発量の季節変化を特徴づける主な要因です。また既往の研究において、日本の北部に位置する十和田湖の蒸発量は、4月に最低となり11月に最高となることが示されており、本研究における池田湖の蒸発量は、概ね3月に最低となり10月に最高となります。よって池田湖の蒸発量の季節変動パターンは、十和田湖よりも時期的に約1ヶ月程度早い傾向にあり、このような特徴を池田湖固有のものとして表現しました。

[質問10] 仮定の条件下でのシミュレーションでは、水位が上昇していく場合の湖面積をどのように評価していますか。

[回答10] 標高62~66m付近での水位変化に対する湖面積変化については、湖面積の変化を考慮した場合としない場合の湖水位のシミュレーション結果に大きな相違がないことを確認致しました。標高66m以上については、湖面積の実測データが無く、また標高62~66mで管理されてきた湖水位について、標高66m以上の汀線を評価することは困難であるため、湖面積10.62km²の一定値としました。

[質問11] 池田湖の水温躍層はどのくらいの深度ですか。また熱収支の数値解析では、計算の対象深度を湖底までとしています。水温の時間変化がなくなる深度まで行えば十分ではないでしょうか。

[回答11] 水温躍層は、約10mから深くても20~25m程度です。池田湖の水深100m付近の水温は、約11℃でほぼ一定となっているため、水深100m程度の計算を行えば十分であると考えます。