

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：32686
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17K03801
 研究課題名(和文)自治体が環境対策資金を金融市場から直接調達する「環境リスクファイナンス」の提案

 研究課題名(英文)Proposal of "environmental risk finance" in which local governments procure environmental measures funds directly from financial markets

 研究代表者
 久保 英也(KUBO, Hideya)

 立教大学・21世紀社会デザイン研究科・特任教授

 研究者番号：10362815

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：温暖化に伴い、流域人口1,400万人の琵琶湖・淀川水系の水質と生態系に多大な影響を与えるのが琵琶湖の全循環停止である。この緊急事態に対応する資金を金融市場から直接調達する2つの手法を実際の調達に耐えられる形まで整え、提案した。

第1が、金融市場で取引量の多いインデックス型の3変量の「全循環日モデル」あり、そこに琵琶湖特有の風の動きのモデルを組み合わせている。第2が、より汎用性を高め、全循環停止だけでなく世界の多くの湖が直面する部分循環にも対応できる「溶存酸素量モデル」である。この時系列モデルと6.5万回のモンテカルロシミュレーションを組み合わせ、納得感の高いオプション料の算出を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然環境は、人間にとって大きな潜在価値を有しているが、実際にキャッシュフローを生まないため、資金調達が難しい。当研究の意義は、自然環境保護資金が不足する地方自治体が、通常予算とは別に、大きな対策資金を金融市場から調達する手法として「環境リスクファイナンス」を提案することにある。

具体的には、地球温暖化の加速により、複数府県にまたがる琵琶湖・淀川流域水系の源泉である琵琶湖の全循環停止という異常事態に対応するデリバティブを開発し、それを社会実装できる水準まで高めることができた。また、この手法は、観測データさえ備えられれば、更に同対策資金の調達が困難な発展途上国でも応用できるといった特色を有している。

研究成果の概要(英文)：Due to the effects of global warming, it is the suspension of the entire circulation of Lake Biwa that has a great impact on the water quality and ecosystem of the Lake Biwa/Yodo River basin, which has the population of 14 million. We have proposed two methods for raising funds in response to this emergency situation directly from the financial markets, so that they can withstand actual procurement.

The first is an index-type three-variable derivative with a large volume of transactions in the financial market, which is combined with a model of the wind movement in peculiar with Lake Biwa. The second is a dissolved oxygen option that is more versatile and can accommodate not only total circulation stops but also partial circulations facing many lakes in the world. By combining a time series model and 65,000 Monte Carlo simulations, it is possible to calculate option charges with a high level of satisfaction.

研究分野：保険・ファイナンス

キーワード：環境リスクファイナンス 琵琶湖の全循環 インデックス型デリバティブ 溶存酸素量モデル モンテカルロシミュレーション 全循環と部分循環

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化による暖冬が加速する中で、琵琶湖の湖底(水深は90m)に酸素を送り込む「全循環」の発生時期が後ろ倒しになるトレンドが出ており、このままでは、近い将来、全循環自体が停止する可能性が高いと考えたことが背景にある。

(2) 全循環が停止した時には、琵琶湖の水質と生態系連鎖を守るために、酸素を湖底に人工的に送り込む対策が考えられるが、その対策資金は50億円規模と想定される。将来の返済財源や収益機会を前提に投資できる企業とは異なり、地方自治体の自然環境保護対策は短期的には利益(将来のキャッシュフロー)を生まないことから、元本返済の必要ない資金調達方法を新たに提供する必要に迫られていた。

2. 研究の目的

(1) 地方公共団体が急激な自然環境の悪化に直面した時に、金融市場から直接対策資金を調達する「環境リスクファイナンス」の提案を行うことを目的としている。具体的には、京阪神1,400万人の水瓶である琵琶湖の「全循環の停止リスク」に対し、金融市場から対応資金を直接調達する理論スキームの提案と具体的なオプションとして取引する際のフィージビリティ・スタディを行うことである。

(2) また、このスキームは汎用性があることから、より自然環境対策資金が乏しいアジア諸国の自然環境対策資金の調達に応用することも目的とする。

3. 研究の方法

(1) 琵琶湖の全循環停止リスクという金融市場にはなじみのない自然環境リスクを市場が受け入れやすいオプションモデルの形で表現する必要がある。そこで、2つのオプションモデルの制作にかかった。第1は、天候デリバティブなど既に天候リスクの移転に際し、広く使用されているインデックス型の「全循環日モデル」、第2が、琵琶湖の溶存酸素量の年間変化を表現できる「溶存酸素量モデル」である。これらの構造モデルに乱数を与え、特定の水準(全循環日インデックスや溶存酸素量)を下回る確率を直接求め、オプション料に変換する手法である。

(2) また、調達金額が巨額になる場合には、幅広い投資家の理解を得る必要があるため、琵琶湖の水循環を気温や積雪など物理的自然現象と生態系の影響とを組み合わせる大型の自然科学のモデルに金融の確率モデルを接合する必要がある。ここでは、Kitazawa et al. (2010)の「流れ場・生態系結合モデル」に金融確率モデルを接合する方法を提案する。

4. 研究成果

(1) インデックス型「全循環日モデル」: 全循環は気温が上昇する4月後半になると発生しないことから、全循環日が4月以降になる確率を求めるというアプローチである。被説明変数に全循環発生時期(インデックス)を置き、全循環に影響を与える説明変数に冬季の気温、水温、風速などを用いて重回帰モデルを作成する。その選定のために、説明変数の候補を表1の通り、丁寧に洗い出した。

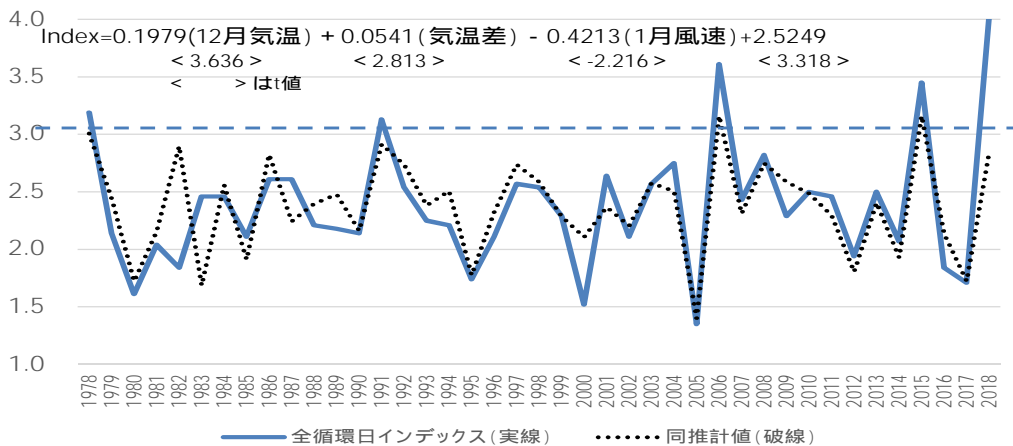
表1 琵琶湖の全循環に与える各自然環境要素の影響度(単回帰)

被説明変数	説明変数	1959～2018年度 (60)			うち、2.29以降全循環 (33)			1978～2018年度 (41)		
		自由度調整済みR ²	t-値	ダービンワトソン比	自由度調整済みR ²	t-値	ダービンワトソン比	自由度調整済みR ²	t-値	ダービンワトソン比
全循環日：インデックス	気温:12月～2月:彦根市	0.345	5.670	2.326	0.184	2.822	1.212	0.353	4.782	2.045
	気温:同全年度差	0.282	4.878	2.100	0.114	2.204	1.245	0.353	4.776	2.047
	気温:12月～1月:彦根市	0.346	5.682	2.261	0.052	1.650	1.355	0.300	4.258	1.990
	気温:1月～2月:同	0.249	4.531	2.355	0.247	3.339	1.172	0.287	4.132	2.182
	気温:12月気温	0.379	6.083	2.451	0.152	2.553	1.706	0.359	4.833	2.250
	気温:1月気温	0.233	4.352	2.305	0.093	2.046	1.366	0.224	3.544	2.145
	気温:2月	0.151	3.395	2.386	0.244	3.319	1.073	0.193	3.255	2.288
	風速:12月～2月	0.038	-1.830	2.227	-0.019	-0.649	1.166	0.004	-1.073	2.176
	風速:12月～1月	0.100	-2.745	2.073	-0.003	-0.952	1.213	0.087	-2.192	1.927
	風速:1月～2月	0.084	-2.528	2.245	0.025	-1.340	1.042	0.058	-1.855	2.199
	風速:12月	-0.004	-0.861	2.238	-0.031	-0.276	1.294	-0.009	-0.803	2.154
	風速:1月	0.223	-4.230	2.033	0.050	-1.627	1.155	0.262	-3.895	1.797
	風速:2月	-0.010	-0.641	2.293	0.000	-0.997	1.096	-0.023	-0.325	2.252
	最大風速:12月～2月	-0.014	-0.438	2.283	-0.021	-0.577	1.306	-0.252	0.127	2.261
	最大風速:12月～1月	0.003	-1.091	2.277	-0.032	-0.008	1.296	-0.016	-0.609	2.186
	最大風速:1月～2月	-0.071	0.085	2.277	-0.028	-0.355	1.287	-0.007	0.844	2.327
	最大風速:12月	0.015	-1.384	2.270	-0.012	-0.780	1.365	0.025	-1.422	2.034
	最大風速:1月	-0.013	-0.507	2.287	-0.009	0.854	1.280	-0.021	0.440	2.245
	最大風速:2月	-0.014	0.455	2.273	0.009	-1.130	1.240	-0.009	0.797	2.343

(注) ()は観測データ数。(出所)筆者が推計、作成。

この中から、最適な組み合わせとして、12月の気温、冬季の気温の前年度との差、1月の平均風速を選び、t値、自由度調整済み決定係数から構造式を選定した。この推計値と実績値をプロットしたのが図1である。縦軸は全循環時期をインデックス化した(3月20日であれば、 $3+20/31=3.65$)もので、この数値が4(4月)を超える確率を求め、オプション料を算出する。

図1 全循環日の推計(インデックスモデル)



(2) 溶存酸素量モデル：琵琶湖の底層部(水深90m)の溶存酸素量(mg/L)そのものをオプションの原指数とし、溶存酸素量が特定値を下回ることをトリガーとしたモデルである。このため、溶存酸素量の確率モデルを構築する必要があるが、年間を通じた変動性、非季節変動項の変動度合い(ボラティリティ：夏季が小さく、冬季が大き)を織り込む必要がある。

そこで、 t 時点での底層部の溶存酸素量を DO_t と表す。ここで、時間単位を15日とし、一月(ひとつき)の日数を30日と仮定する。次のように、 DO_t の対数値の非季節項をモデル化する。非季節項 U_t は以下で定義されるものである。 $U_t = \log DO_t - \overline{\log DO_t}$

ここで、 $\overline{\log DO_t}$ は、 t 時点が属する毎年X月第*i*回調査日(ここで*i*は1か2)における、琵琶湖今津沖中央水深90mの溶存酸素量の実測値(1979年度から2015年度におけるデータが対象)の自然対数値を単純平均した量を表すとす。

次に、非季節項を以下のように時系列モデルとして定式化する。

$$U_t = \sum_{j=1}^k \rho_j U_{t-j} + \sigma_t \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim i.i.d. N(0,1)$$

ここで、非季節項のボラティリティ σ_t を以下のように定式化する。

$$\sigma_t = \sigma_0 - \sigma_1 |\sin(\pi t + \beta)|$$

この定式化により、非季節変動項のボラティリティの季節性をモデルに取り込めることになる。同モデルに基づき、1979年度から2012年度までの34年間の溶存酸素量のデータを用いて最尤法で推計を行った。推定値を表2に示した。

表2 最尤推定の結果

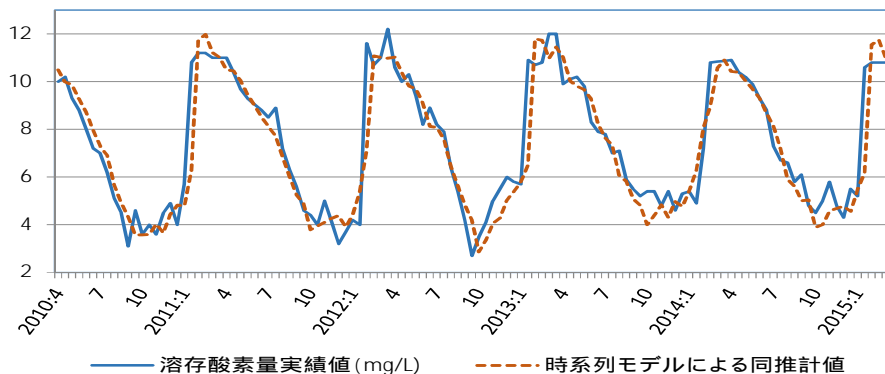
	σ_0	σ_1	α	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\log L(\Theta)$	SBIC
Type I	0.4680 (0.0026)	0.4096 (0.0036)	0.3756π (0.0123 π)	0.5225 (0.0141)	—	—	319.58	-612.01
Type II	0.4647 (0.0028)	0.4063 (0.0039)	0.4151π (0.0103 π)	0.4751 (0.0170)	0.09571 (0.0170)	—	324.44	-614.95
Type III	0.4638 (0.0029)	0.4058 -0.004	0.4566π (0.0094 π)	0.4697 (0.0166)	0.06811 (0.0167)	0.05636 (0.0132)	326.7	-612.69

(注1) Type IIはAR(1)、Type IIIはAR(2)、Type IIIはAR(3)を、 $L(\Theta)$ は、対数尤度を表す

(注2) SBICはSchwartz Bayesian Information Criteriaを表す。括弧内の数値は標準誤差を表す。

シュワルツ・ベイジアン情報量基準 (SBIC) から Type I を選択し、当損酸素量の推計値と実績値を図2にプロットした。このモデルに65,000回のモンテカルロ・シミュレーションを施し、4月に溶存酸素量が8.0mg/Lを下回ったシナリオは169本、全循環停止確率は0.26%と推計した。この確率からオプション価格が容易に算出できることになる。

図2 琵琶湖の溶存酸素量の推計(時系列モデル)



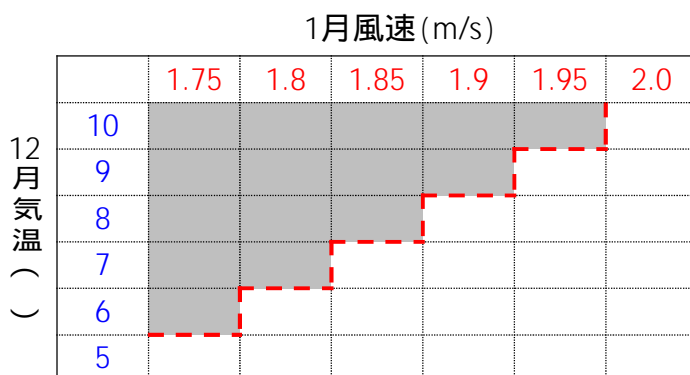
(注) 推計期間は1978/4～2015/3の月2回データ。うち、2010/4以降を表示。

なお、上記の2モデルは、既にフィージビリティ・スタディの段階に入っており、投資家の納得感を引き上げるために、琵琶湖の溶存酸素量データを定点観測している琵琶湖環境科学センターの定期観測船に国際保険ブローカーを招待し、国際基準から見た観測方法の妥当性を検証した(2019年7月)。また、産業技術総合研究所の太陽光発電研究センターにおいて全循環停止時に、湖底へ酸素を送るための具体的設備について検討した(2019年10月)。

(3) 流れ場・生態系結合数値モデルと金融確率モデルの接合：前述の2つのモデルは、複雑な琵琶湖の溶存酸素量の構造に立ち入らずに済むことから、なじみやすい。一方、リスク移転金額が大きい場合には、金融市場の投資家を納得させる必要があり、琵琶湖の全循環メカニズムを示

す構造モデルを出発点に、金融的手法でリスク発生確率を評価するという手順が必要になる。そこで、複雑な琵琶湖の水循環構造を表す自然科学系の大型決定論モデルである Kitazawa et al.(2010)の「流れ場・生態系結合数値モデル」を用いて、全循環発生確率を求めることに挑戦した。同モデルに数万本のモンテカルロ・シミュレーションを施すことは計算負荷から不可能であることから、全循環に大きな影響力のある3変数（気温、全天日射量、風速）について、まず、全循環が必ず停止するであろうシナリオ（3変数を指数化し総合順位を付与）をあらかじめ、計算、抽出する。次に、この中から総合順位上位シナリオ、同下位シナリオを順次「流れ場・生態系結合数値モデル」に入れて全循環が停止するかどうかを判別する。シナリオの抽出が妥当であれば、図3のように全順が起るか起らないかの境界、いわば、全循環リスクの閾値を算出することが可能となる。この閾値を順次求め、点線で示した、いわば閾値帯が得られれば、総合順位シナリオ上位L本と下位M本の合計を分母にして、全循環が停止した本数を分子にすることで、その除数を全循環停止確率とすることができる。

図3 全循環が停止する気象条件の閾値（2変数の例示）



この閾値帯の算出作業は、現在7割程度終えているが、今回の研究期間内では完了できず、次の研究課題、次のステップとなった。この研究は大きな可能性を秘めている。すなわち、一般に、決定論的な自然科学モデルを用いて自然現象の発生確率を計算することは、自然科学モデルの計算負荷が大きいためリスク評価が難しい。しかし、ここで示したような、自然現象に影響を与える入力変数の条件を切り口とする閾値帯を見つけ出すことにより確率計算を行うという方法は汎用性が高く、琵琶湖以外の他の湖沼の全循環停止リスクや他の自然環境リスクのカテゴリにおけるリスク移転にも応用できる可能性があると考えている。

<引用文献>

Kitazawa, D, Kumagai, M, Hasegawa, N,(2010) “Effects of Internal Waves on Dynamics of Hypoxic Waters in Lake Biwa,”*Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 13, No. 1. pp. 30-42.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 吉田 毅郎, 北澤 大輔, 周 金, 朴 相圭, 久保 英也, 菊池 健太郎, 吉山 浩平	4. 巻 70
2. 論文標題 琵琶湖における全循環の数値シミュレーションと気候変動の関係	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.70.25	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 菊池健太郎、久保英也	4. 巻 31
2. 論文標題 気候変動と琵琶湖全循環停止リスク	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本リスク研究学年次大会予稿集	6. 最初と最後の頁 92-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 久保 英也, 菊池 健太郎, 北澤 大輔	4. 巻 81
2. 論文標題 自然環境保護に資する環境リスクファイナンスの提案 琵琶湖と池田湖の比較研究から	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 損害保険研究	6. 最初と最後の頁 107~131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保英也
2. 発表標題 環境リスクファイナンスの提案
3. 学会等名 日本保険学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菊池健太郎、久保英也
2. 発表標題 気候変動と琵琶湖全循環停止リスク
3. 学会等名 日本リスク研究学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 久保 英也（兼：編集委員長）、浅見 真理、李 泰榮、伊藤 哲郎、植村 信保、臼田 裕一郎、甲斐良隆、神田 玲子、菊池 健太郎、岸本 充生、北野 大、鬼頭 弥生、久保田 泉、酒井 義弘、佐々木 良一、島田 陽子、下山 憲治、城山 英明、関澤 純、竹田 宜人、近本 一彦、津田 博史、土田 昭司、東海 明宏、全160名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 丸善出版株式会社	5. 総ページ数 804
3. 書名 リスク学事典	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	菊池 健太郎 (KIKUCHI Kentaro) (60738368)	滋賀大学・経済学部・准教授 (14201)	