

生物環境情報工学とファイナンスの数理的つながり

(Mathematical linkages of biological and environmental information engineering and finance)

吉岡 秀和¹, 李 治², 吉岡 有美³, 谷野 章¹¹ 島根大学学術研究院環境システム科学系² 鳥取大学連合農学研究科³ 鳥取大学農学部

要約

「生物環境情報工学」分野では、人間生活と密接に関わる生物の管理や利活用、およびその生息・生育環境の制御を考究し、生物、環境、情報、工学、各々の観点から、多岐にわたる問題を対象とした研究を進めてきた。本稿では、生物環境情報工学における河川環境管理に関する研究および太陽光発電システム制御に関する研究という 2 つの事例を紹介し、ファイナンスにおける研究事例との類似点と相違点について数理的な観点から論述する。

1. はじめに

「生物環境情報工学」分野では、人間生活と密接に関わる生物の管理や利活用、およびその生息・生育環境の制御を考究することを主目的とした、理学と工学、双方の視点を交えた学際的研究を実践している。筆頭著者と第 4 著者は、本稿執筆時点で島根大学生物資源科学部環境共生科学科における同名の研究分野[1]に所属する教員である。他大学においても生物環境情報工学の名をもつ研究室や講座がある。本稿では、島根大学生物資源科学部のものに焦点を絞る。

生物環境情報工学は、生物、環境、情報、工学という 4 単語から構成される言葉である。本分野の研究活動は、それぞれの単語と次のような関わりをもつ。

- ・ **生物**：植物、昆虫、魚類、鳥類など。管理や制御を行う対象となる、本分野において最も基本的かつ不可欠な要素。
- ・ **環境**：降雨、気温、湿度、日射、水温、水深など。生物の生息・生育環境の状態を評価するための基本要素。
- ・ **情報**：観測、管理、制御、予測。生物そのもの、およびその生息・生育環境を実際に評価し、将来的に如何にして管理や制御していくべきかを検討するために活用する要素。
- ・ **工学**：上記の 3 要素を、よりよい社会づくりに役立てる。本研究分野のゴールに該当する。

本稿では、生物環境情報工学とファイナンスの類似点と相違点について、数理的な観点から論述する。また、本分野における最近の具体的な研究事例を紹介しつつ、ファイナンスの数理的方法論がどう役立つかを論じる。

2. ファイナンスとの類似点・相違点

2.1 確率制御問題

ファイナンスやその関連研究分野では、資産価格や株価など、確率論的な変動を呈する観測可能な量の状態推定や予測、制御が大きな研究課題のひとつである。とくに、そのような量の制御問題は確率制御問題と呼ばれる[2]。代表的な事例は、ある資金を安全資産と危険資産にどういう割合で分配して運用すべきか、というポートフォリオ問題である[3]。ポートフォリオ問題には多岐にわたるヴァリエーションが存在するが、ほとんどの問題設定では、安全資産の価格が決定論的かつ指数関数的に増加し、かつ危険資産の価格が確率論的に増減する。安全資産と危険資産への資金配分を決定するためには、最大化されるべき評価関数（効用関数とも呼ばれる）を設定し、実際にその最大化を実現する最適ポートフォリオを算出することが常套手段である。とくに、動的計画原理[2]と呼ばれる制御理論における基本原理に依拠すれば、最適ポートフォリオの算出は、Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程式と呼ばれる非線型退化楕円型方程式の求解に帰着される[2, 3]。すなわち、ひとたび HJB 方程式の解が求まれば、資産の状態に応じた最適ポートフォリオが判明する。HJB 方程式の求解をゴールとするこの構図は、他の確率制御問題においても広く通用する。

以下では、確率制御問題の観点から、生物環境情報工学分野において近年行われてきた研究事例について論じる。

2.2 事例 1: 河川環境の管理

我が国における多くの一級河川は、ダムを有する。ダムは地域への安定した水資源供給をなすとともに治水の要であり、現代の人間生活において基幹的な役割を担う水利構造物である。写真 1 は、島根県斐伊川中流域に存在する尾原ダムを下流側から撮影したものである。



写真 1：斐伊川中流域に存在する尾原ダム（2018 年 8 月 21 日に吉岡秀和が撮影）

現代の人間生活におけるダムの重要性については、論を俟たない。しかし、ダムは下流の環境や水圏生態系を大きく改変することは大きな事実である。例えば、ダム下流では流量と

その擾乱が減少し、本来は擾乱に弱いカワシオグサ (*Cladophora glomerata*, 写真 2) などの大型糸状藻類が異常繁茂することが報告されている[4]。これが、我が国における主要な内水面水産資源であるアユ (*Plecoglossus altivelis*) の主食であるケイ藻類の生息域を減少させると懸念されている[5]。

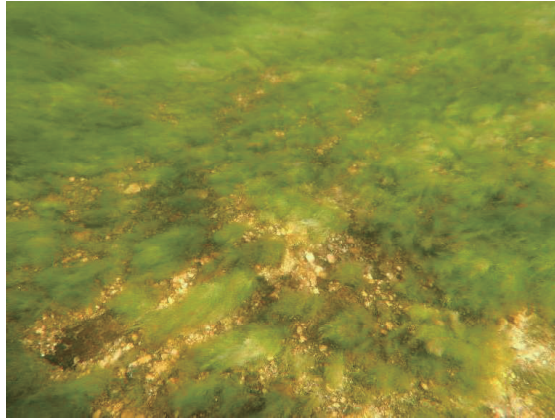


写真 2：尾原ダム下流域に繁茂するカワシオグサ (2018 年 4 月 18 日に吉岡秀和が撮影)

筆頭著者らはこれまで、ダム下流におけるカワシオグサの繁茂を省力的に抑制するためにはどうすれば良いか、確率制御理論に依拠して検討してきた。ここでは便宜上、この観点から提示された数理的な問題を河川環境管理問題と呼ぶ。例えば、パラメータの不確実性を加味した制御問題としてのダムからの放流量制御[4]、特異制御問題としての河川清掃[6]、インパルス制御問題としての河川への土砂投入[7]、が河川環境管理問題として挙げられる。いずれの問題においても、定式化は異なるものの、カワシオグサの個体群ダイナミックスを制御すべき対象として確率微分方程式に依拠した定式化を行い、繁茂による負の効用と繁茂抑制に要するコストの和を最小化したいという目標を掲げている。さらに、制御問題の求解は HJB 方程式の求解に帰着されている。前述したポートフォリオ問題とここで述べた河川環境管理問題を比較すると、資産価格のダイナミックスと個体群のダイナミックス、正の効用と負の効用、が対をなすことがわかる。もちろん、互いにダイナミックスや評価関数の式形が異なるために、問題定式化の細部や導かれる HJB 方程式の式形は異なる。しかし、数理的な見地からは、両問題は概念的には極めて高い類似性を有することがわかる。

では、ポートフォリオ問題と河川環境管理問題の相違点は何か。まず、観測量の性質が異なる。例えば、ポートフォリオ問題では、資産価格が主要な観測量である。資産価格ダイナミックスを記述する最も基本的な確率過程は、幾何 Brown 運動や幾何 Lévy 過程である[2]。これらに基づくモデルは、ある種の線形性と非有界性を有するために解析的な取り扱いが容易である。先端的なモデルにおいてさえ、数値計算に頼らない問題解決が可能である場合が多い[8, 9]。もちろん、定式化によっては数値計算が必須となる[10]。一方、河川環境管理問題で制御されるべき対象である個体群ダイナミックスでは、個体群の存在量が主要な観測量

である．個体群の存在量は本質的に非線型かつ有界なダイナミックスにしたがい、この点が資産価格とは大きく異なる．いずれも、生物成長が環境容量により制限されるという Logistic 的な成長モデル[11]に起因する．これまでに、局所的な線型化解析により、個体群が小さいときや放流量が時間的に一定である場合に限り、個体群の状態に基づいた制御則の振る舞いが解析的に評価されている[6]．しかしながら、個体群ダイナミックスの非線型性に起因して、一般的な条件下における HJB 方程式の求解には数値計算手法の利用が不可欠である[4, 7]．また、システムダイナミックスの定性的な相違から、ファイナンスにおける HJB 方程式と河川環境管理問題における HJB 方程式の求解領域や終端・境界条件は大きく異なる．そのため、解の意味も自ずと異なる可能性がある[12]．しかし、安定性、一様性、一貫性を兼ね備えた数値計算手法の利用により、幅広い種類の HJB 方程式を効果的に数値計算できることが知られている[13, 14]．このことは、ファイナンスにおいても河川環境管理においても共通である．

2.3 事例 2: 太陽光発電システムの制御

太陽光は、再生可能エネルギーの代表格である[15]．太陽光発電は、太陽光が日頃から利用可能であることや汚染物質を発生させないことなど、多様な利点を有する[16]．近年では、電力事業者が広大な敷地に大規模な太陽光発電システムを設置して需要に応じた供給や売電を行うケースが多い[17]．現在では、太陽光に限らず、自然エネルギーを用いた発電施設の価格付け[18]がファイナンスにおける研究課題のひとつである．ごく端的に言えば、ファイナンスの観点からは、どの規模のどのような太陽光発電施設を建造してどういった運用をすれば利潤の最大化とコストやリスクの最小化の妥協点に到達可能か、が中心課題である．すなわち、電力量や需要量のダイナミックスを如何にして制御すべきか、という制御問題である．

一方で、生物環境情報工学では、太陽光発電について全く異なる見方がなされている．一般に、生物、とくに作物の栽培には太陽光の存在は必須である．市場の需要に見合った作物の供給を実現するために、農地での栽培のみならず、ハウスでの栽培が広く行われている．ハウスでの作物栽培を行う場合、ハウス内の環境（温度や湿度、光環境）を作物の成長に適した状態に維持することが肝要であるが、そのために必要な人的労力は計り知れず、精緻化を念頭に置く場合には問題はより一層深刻化する．生物環境情報工学では、人的労力を抑えつつ作物の生育に適したハウス内の環境を維持できないか、という問題を解決するために、太陽光発電、そして確率制御問題が注目されている．

写真 3 は、島根大学松江キャンパスに設置されている実験用ハウスである．このハウスの屋根の一部には、設置角度が可変である太陽光パネルが設置されている（**写真 4**）．この太陽光パネルの基本的な性質については、実験的な観点から詳細に評価されてきた[19, 20]．これまで、本パネルの実験的な運用では、太陽からの日射強度がある閾値以下であるか否かに応じて、パネルの角度を二者択一的に変化させるという方針が採用されてきた[19, 20]．パネルの角度は数秒で変化させることができる．これは、ハウスの運用時間（年単位）と比較して十分短い．しかし、パネルの角度を変化させる際に貯留した電力を消費してしまうので、無闇な角度変化は省エネルギーの観点から望ましくない．さらに、多くの電力を貯留できた方

が、ハウス内の環境制御に利用できる電力が増加し、結果として人的労力の削減に繋がる。

現在、筆頭著者らにより、太陽光強度や雲量のダイナミックスを鑑みつつパネルの角度を省エネルギー的に変化させる方策に関する数理モデリングが進められている、ここでは、雲量ダイナミックスを確率微分方程式で記述しつつ、パネルの角度をインパルス的に変化させる最適スイッチング問題[21]としての定式化が採用されている。ファイナンスにおいては、ポートフォリオ問題と同様に、最適スイッチング問題についても解析的なアプローチが主流である[22, 23]。これは、問題の見通しをよくするためであると考えられるが、生物環境情報工学における本問題においては、解析的なアプローチは難しそうだと言うことが示唆されてきている。ただし、もしごく単純化された条件下であっても解析的なアプローチが樹立できれば、問題解決に向けた研究が格段に進歩することが期待される。



写真 3：島根大学松江キャンパスの実験用ハウス (2017 年 7 月 27 日に李治が撮影)



写真 4：実験用ハウスに装着した太陽光パネル (2017 年 7 月 27 日に李治が撮影)

3. おわりに

生物環境情報工学とファイナンスについて、確率制御問題の観点から互いの類似点と相違点について論じた。生物環境情報工学は極めて多岐にわたる問題を対象としているため、制御対象や制御目的も様々である。ファイナンスにおける数理的方法論の発展とともに、生物環境情報工学はその恩恵を享受できると期待される。両分野の大いなる発展を期待したい。

謝辞

本研究は科研費 17K15345 の援助を受けた。また、本研究は京都大学数理解析研究所の共同利用・共同研究拠点事業を活用して発表された。

引用文献

- [1] 島根大学生物資源科学部 環境共生科学科 生物環境情報工学分野.
URL: <http://www.ess.shimane-u.ac.jp/field/pg79.html> (Last Accessed on December 14, 2018)
- [2] Øksendal, B. K., & Sulem, A. (2005). *Applied Stochastic Control of Jump Diffusions*. Springer, Berlin.
- [3] HA Davis, M., & Lleo, S. (2015). *Risk-Sensitive Investment Management*. World Scientific Publishing, Singapore.
- [4] Yoshioka, H., & Yaegashi, Y. (2018). Robust stochastic control modeling of dam discharge to suppress overgrowth of downstream harmful algae. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 34(3), 338-354.
- [5] 内田 朝子, 近藤 和広, 竹内 康之, & 永田 直人 (2004). 矢作川, 豊川, 長良川における大型糸状緑藻の発生状況. *矢作川研究*, 8, 89-98.
- [6] Yoshioka, H., & Yaegashi, Y. (2018). Singular stochastic control model for algae growth management in dam downstream. *Journal of Biological Dynamics*, 12(1), 242-270.
- [7] Yoshioka, H., Yaegashi, Y., Yoshioka, Y., & Hamagami, K. Hamilton-Jacobi-Bellman Quasi-Variational Inequality arising in an environmental problem and its numerical discretization. *Computers & Mathematics with Applications*. (Accepted on December 1, 2018).
- [8] Pun, C. S. (2018). Robust time-inconsistent stochastic control problems. *Automatica*, 94, 249-257.
- [9] Yan, W. (2018). Optimal portfolio of continuous - time mean - variance model with futures and options. *Optimal Control Applications and Methods*, 39(3), 1220-1242.
- [10] Van Staden, P. M., Dang, D. M., & Forsyth, P. A. (2018). Time-consistent mean-variance portfolio optimization: A numerical impulse control approach. *Insurance: Mathematics and Economics*, 83, 9-28.
- [11] Brauer, F., Castillo-Chavez, C., & Castillo-Chavez, C. (2012). *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, New York.
- [12] Akian, M. et al. (2018). *Hamilton-Jacobi-Bellman Equations: Numerical Methods and*

Applications in Optimal Control. de Gruyter.

- [13] Neilan, M., Salgado, A. J., & Zhang, W. (2017). Numerical analysis of strongly nonlinear PDEs. *Acta Numerica*, 26, 137-303.
- [14] Yoshioka, H., & Yaegashi, Y. (2019). A finite difference scheme for variational inequalities arising in stochastic control problems with several singular control variables. *Mathematics and Computers in Simulation*, 156, 40-66.
- [15] Lewis, N. S. (2017). Toward cost-effective solar energy use. *Science*, 315, 798-801.
- [16] Singh, G. K. (2013). Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, 53, 1-13.
- [17] McKenna, E., Pless, J., & Darby, S. J. (2018). Solar photovoltaic self-consumption in the UK residential sector: New estimates from a smart grid demonstration project. *Energy Policy*, 118, 482-491.
- [18] Ernstsen, R. R., & Boomsma, T. K. (2018). Valuation of power plants. *European Journal of Operational Research*, 266(3), 1153-1174.
- [19] Li, Z., Yano, A., Cossu, M., Yoshioka, H., Kita, I., & Ibaraki, Y. (2018). Shading and electric performance of a prototype greenhouse blind system based on semi-transparent photovoltaic technology. *Journal of Agricultural Meteorology*, 74(3), 114-122.
- [20] Li, Z., Yano, A., Cossu, M., Yoshioka, H., Kita, I., & Ibaraki, Y. (2018). Electrical energy producing greenhouse shading system with a semi-transparent photovoltaic blind based on micro-spherical solar cells. *Energies*, 11(7), Article No. 1681.
- [21] Pham, H. (2009). *Continuous-time Stochastic Control and Optimization with Financial Applications*. Springer Science & Business Media.
- [22] Leung, T., & Yan, R. (2018). Optimal dynamic pairs trading of futures under a two-factor mean-reverting model. *International Journal of Financial Engineering*, 5(03), 1850027.
- [23] Zervos, M., Oliveira, C., & Duckworth, K. (2018). An investment model with switching costs and the option to abandon. *Mathematical Methods of Operations Research* (in press).

吉岡 秀和

島根大学学術研究院環境システム科学系

〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060

yoshih@life.shimane-u.ac.jp