

ニホンウナギのサプライチェーンに関する研究

—資源の持続的利用に向けて—

佐藤公俊・廖星

1. はじめに

ニホンウナギは海洋環境の変動や生息環境などによって、シラスウナギ（ニホンウナギの稚魚）の漁獲量が変化するため、市場価格の変化が激しい水産物である。ウナギは夏バテ、食欲減退防止の効果が期待されることから、日本国内においては夏の「土用の丑の日」に多く消費される。ウナギは絶滅危惧IB類（EN）に指定されているにも関わらず、店頭販売における売れ残りなどを理由に大量に廃棄されていることが問題となっている^[1]。近年、スーパーマーケットやコンビニエンスストアにおいては、多量廃棄を削減するために数量限定の予約販売が行われている。予約販売では、必要な量だけ生産するため、廃棄の削減に有効である。また、早期予約という消費者の不便に対して割引価格を設定することで定価での店頭販売との価格差別化を図る企業も存在する。予約販売はウナギに限らず、クリスマスケーキやお節、恵方巻きなどの季節商品に対しても導入されている。

ニホンウナギについては廃棄問題だけでなく絶滅の危機にあることも重要な問題である。さらに、日本国産のニホンウナギが少ないときには、国外からの輸入で補っているが、シラスウナギの輸出が禁止される台湾からの密輸や原産地が偽装表示されたウナギが日本国内に流通しているなどの問題も生じている^{[2][3]}。ニホンウナギを利用する主要な国・地域はウナギの資源管理を目的として、シラスウナギの池入れ量（以下では「池入れ数量」と呼ぶ）を制限しているが、いまなお、ニホンウナギは減少傾向にあり、かつウナギが日本国内で大量に消費されるため、今後も持続的に日本国内の需要を満たすには困難であることが予想される。ニホンウナギを守り未来へ引継ぐためには、シラスウナギの漁獲量の不確実性の下で、小売業者と生産業者の経営の安定化を図りつつ、シラスウナギの資源管理を行う必要があるといえる。

本研究はウナギ資源の持続的利用に向けたサプライチェーン（SC: Supply chain）の現状把握と数理モデルによる定量的な分析を行う。まず、シラスウナギとニホンウナギの流通を調査し、SCの現状を把握する。次に、生産業者と小売業者のSCモデルを構築する。第1段階では、小売業者の収益最大化を目的に最適な予約期間内の販売数を求める。第2段階では、小売業者と生産業者との契約モデルを定式化することで、ニホンウナギの供給に関する不確実性と顧客需要の不確実性の双方を考慮した最適なシラスウナギの池入れ数量を求める。さらに、数値計算によって、予約販売と卸売契約がどの程度、池入れ量の削減と総期待利益に有効であるかを検証する。

2. ニホンウナギのSCについて

2.1 ニホンウナギの養殖

水産庁が発表した、「ウナギをめぐる状況と対策について」^[2]によると、ウナギ科ウナギ属に属するニホンウナギ（*Anguilla japonica*）は、東アジアで主に捕獲および養殖されている。近年の研究により、ニホンウナギは、5年から15年間川や河口域で生活した後、海へ下り、日本から遠く離れたマリアナ諸島付近の海域で産卵して死亡することが明らかになっている。孵化したシラスウナギは黒潮に乗って11月～翌年4月頃に東アジアの沿岸に辿り着き、日本、中国、台湾等を含めた東アジア全域で採捕され、

養殖に利用される。消費者庁、うなぎ加工品品質表示基準^[4]によると、ウナギ加工品（蒲焼き）には、魚種の記載が義務付けられていない。そして、原産国の表示が義務付けられてはいるが、養殖に用いられたシラスウナギが採捕された場所は記載の義務がないとされている。

ニホンウナギの養殖はニホンウナギの稚魚（以下では「シラスウナギ」という。）を採捕し、養殖池に入れるところからスタートする。「池入れ」とは、シラスウナギを養殖池に入れることを指し、その量を制限する規則が池入れ量制限である。平成27年漁期（平成26年11月～平成27年10月）より、ニホンウナギの資源の保存及び管理を目的として、ニホンウナギを利用する主要な国・地域である日本、中国、台湾、韓国において池入れ量制限が行われている。この4カ国・地域全体で利用するシラスウナギの池入れ数量の上限値を表したものが表1である。4カ国・地域全体の池入れ数量の上限値は平成26年漁期から20%削減し、78.8tと決められている^[2]。

表1 各国・地域の池入れ数量上限値（単位：t）

	日本	中国	韓国	台湾	合計
池入れ量上限	21.7	36.0	11.1	10.0	78.8

4カ国の池入れ数量は決められているが、実際の池入れ量は平成27年漁期が37.8t、平成28年漁期が40.8t、平成29年漁期が50.5tであり、それぞれの上限である78.8tの48%、52%、64%にとどまっている。池入れ数量の上限値は、実際に池入れされているシラスウナギの量に対して明らかに過剰であり、ニホンウナギの資源は適切に管理されていないといえる。図1は水産庁のシラスウナギのデータ^[4]に基づき、池入れ上限値と実際の池入れ数量を漁期別に示している。日本以外の3カ国で池入れ数量の増加がみられる。

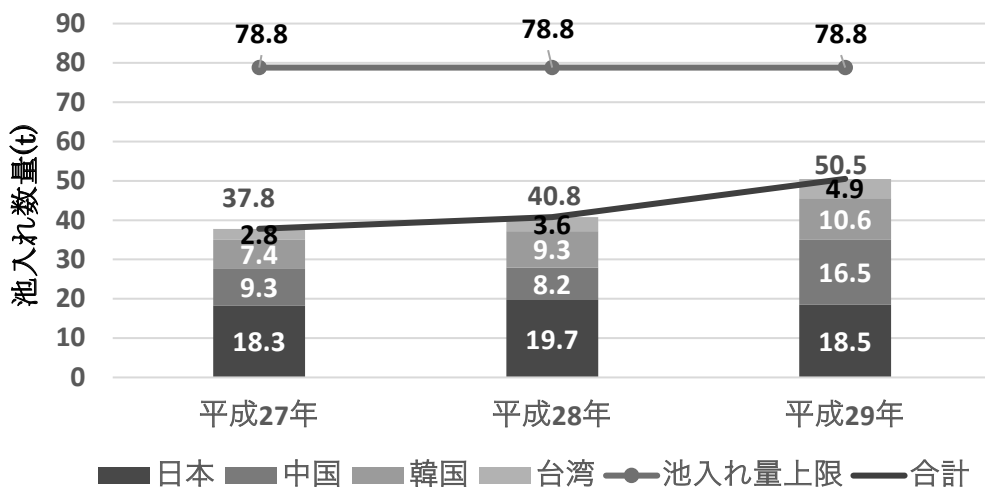


図1 平成27年～平成29年漁期池入れ上限値と実際の池入れ数量（単位：t）

2.2 ニホンウナギの流通

水産庁が発表した、ウナギをめぐる状況と対策^[2]に基づき、ニホンウナギのSCの概念図を表したものが図2である。ニホンウナギの日本市場への供給は、日本国内だけではなく海外からの輸入によっても賄われている。

一般社団法人全日本持続的養鰻機構のパンフレット^[5]によると、日本国内で流通しているウナギの内訳は図3のようになっている。中国、台湾で蒲焼等の加工品と成鰻になり、輸入されるものが多く、国内で流通しているウナギ全体の約56%が輸入品である。

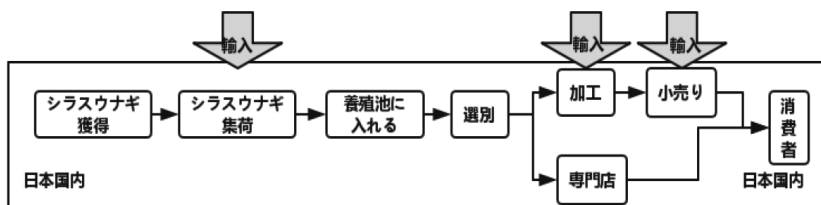


図2 ニホンウナギのSCの概念図

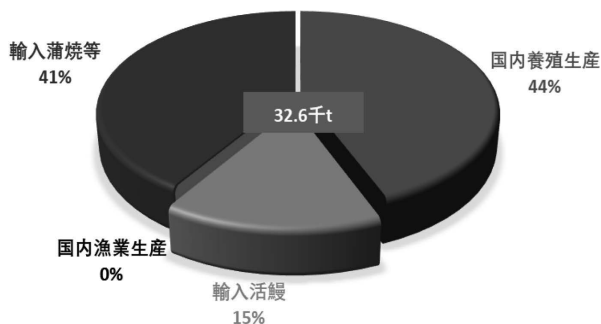


図3 ウナギの国内流通量 (平成25年)

水産庁より報告された「ウナギをめぐる状況と対策」に基づき^[2]、平成26年から平成30年までのシラスウナギの池入れ数量と取引価格の推移を表したものが図4である。平成27年の漁期から池入れ制限が実施され、平成29年の漁期まではシラスウナギが安定的に採捕されたことで、取引価格は下落したと考えられる。しかし、平成30年漁期はシラスウナギが不漁のため、1kgあたり299万円まで高騰している。さらに今年度の池入れ数量は15.2tであるが、そのほとんどが輸入したものであり、国内のシラスウナギの来遊量は減少傾向にあるといえる。

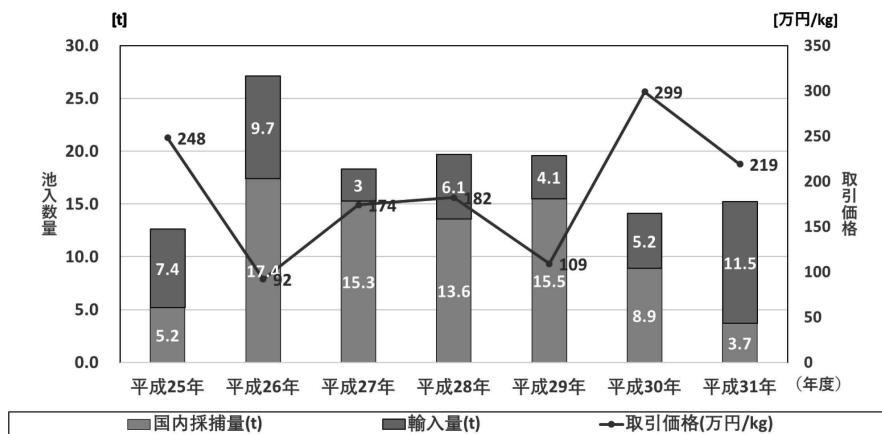


図4 シラスウナギの池入れ数量と取引価格の推移^{[1],[2]}

2.3 「土用の丑の日」について

「土用」は立夏・立秋・立冬・立春直前の約18日間の「期間」を示す言葉であり、昔の暦では日にちを十二支(子・丑・寅・卯…)で数えたため、「土用の丑の日」は、土用の期間に訪れる丑の日を指している。ウナギを食べる習慣が一般にも広まったのは1700年代後半、江戸時代である。一説によると、「夏に売り上げが落ちる」とウナギ屋から相談を受けた蘭学者の平賀源内が、「本日丑の日」と書いて店先に貼ることを勧め、そのウナギ屋は大変繁盛した。他のウナギ屋もそれを真似るようになり、土用の丑の日にウナギを食べる風習が定着したとされている^[6]。

平成 29 年の「土用の丑の日」は 7 月 25 日と 8 月 6 日である。年によっては夏の「土用の丑の日」が 2 回ある場合がある。総務省統計局家計調査^[7]により平成 29 年 7 月及び 8 月の「ウナギの蒲焼き」の 1 世帯当たりの支出金額を日別にみると、土用の丑の日に当たる 7 月 25 日が 390 円、8 月 6 日が 65 円と、同じ月の他の日に比べて特に多くなっている。図 5 に 1 世帯当たり「ウナギの蒲焼き」の日別支出金額（平成 29 年 7 月及び 8 月）を示す。これより、「土用の丑の日」に「ウナギの蒲焼き」を食べるといふ昔ながらの慣習が顕著に表れているとみられる。このことから、本研究では、「土用の丑の日」を対象にウナギのサプライチェーンモデルを構築する。

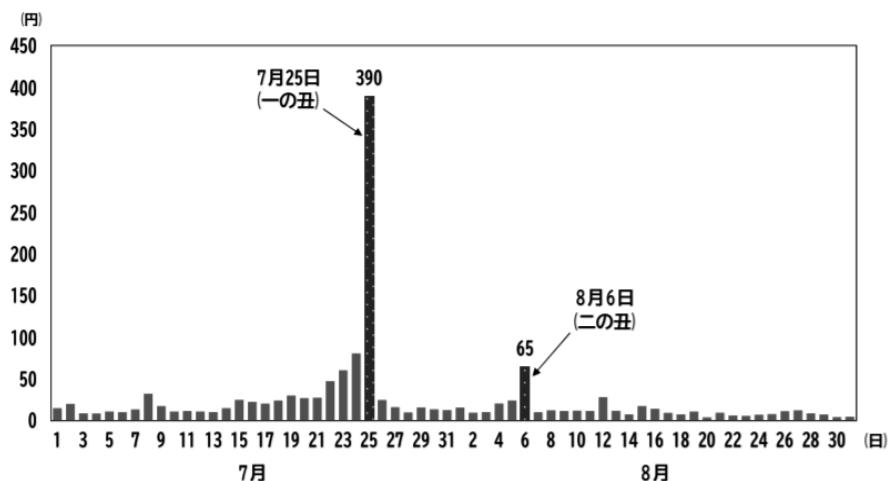


図 5 1 世帯当たり「ウナギの蒲焼き」の日別支出金額（平成 29 年 7 月及び 8 月）

次に、土用の丑の日とウナギの養殖期間の関係を述べる。ウナギを産卵から成体まで育てる「完全養殖」はまだ商業化できていないため、シラスウナギを採捕し、育てたものが出荷されている^[2]。一般社団法人全日本持続的養鰻機構のパンフレット^[5]に基づき、ウナギの養殖期間を表したものが図 6 である。

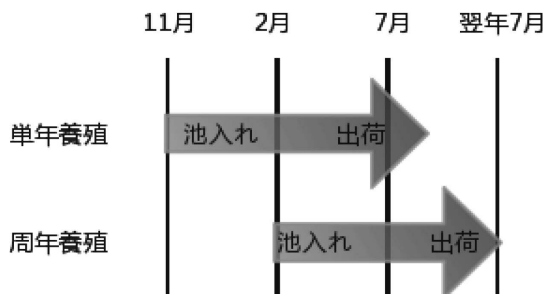


図 6 ウナギの養殖期間

ウナギの養殖には、「単年養殖」と「周年養殖」がある。「単年養殖」は、「土用の丑の日」の出荷に間に合わせるために、シラスウナギの採捕時期の中でも 11 月～1 月末頃までの比較的早い時期に採れたシラスウナギを池入れし、6 ヶ月程かけて養殖される。一方で、「周年養殖」は、2 月～3 月頃までの比較的遅い時期に採れたシラスウナギを池入れし、1 年以上かけて養殖される。したがって、生産業者は採捕量や池入れ上限、SC 下流からの需要量などを考慮し、単年及び周年の池入れ量を定める必要があるといえる^[5]。本研究では、「土用の丑の日」の消費を対象とするため、「単年養殖」を前提としてモデル化を行う。

2.4 小売店における事前予約販売について

小売店においてウナギの廃棄削減を目的として予約販売が行われている。表2は5つの小売店におけるウナギの蒲焼の販売方法をまとめたものである。多くの小売店で予約販売が行われているが、早期割引販売を実施している小売店も存在する。ファミリーマートでは、Web予約によって消費者が気軽に予約できる取り組みを行い、廃棄金額が実施前に比べ約80%減少したと報告されている。また、6月8日～7月27日にWeb予約の対象者に割引クーポン(200円)を配布し、7月7日までの予約で100円から200円割引する早割も導入されている^[8]。

表2 ウナギの蒲焼の予約販売方法

	予約締切日	お渡し日	早期割引	国産・値段 (税抜)	海外産・値段 (税抜)
ファミリー マート	7/19	7/22～26	○	鹿児島産 2,482円	中国産 1,093円
	7/24	7/27～29			
ローソン	お渡し日の 2日前18時まで	7/23～28	×	九州産 2,760円	中国産 1,093円
セブン・ イレブン	お渡し日の4日 前まで	7/23～27	×	鹿児島産 2,519円	中国産 1,220円
イトーヨー カドー	7/21	7/25・7/26	○	鹿児島産 2,280円	台湾産 1,780円
	7/23	7/27・7/28			
	7/30	8/3・8/4			
イオン	7/20	7/25～27	×	鹿児島産 2,780円	インドネシア産 店頭による

3. SCモデルの定式化

3.1 生産業者と小売業者が独立に意思決定する場合

本節では、生産業者と小売業者の2段階サプライチェーンをモデル化する。生産業者はシラスウナギの池入れ数量 x 、小売業者はウナギの発注量 Q をそれぞれが独自に決定する。集荷業者から生産業者へのシラスウナギ1単位当たりの価格を k_s 、生産業者から小売業者へのウナギの卸売価格を k_v とする。さらに、ウナギの早期割引価格を k_1 、定価を k_2 とする。価格 k のときの定価販売の需要量を $D_1(k)$ 、割引販売時の需要量を $D_2(k)$ とする。

図7はシラスウナギの池入れから消費者への販売までの流れとウナギの在庫量の変化を示している。日本国内の需要のピークは毎年7月頃の「土用の丑の日」であるため、これに間に合わせるために、生産業者は「単年養殖」を行い、生産する。「単年養殖」は6ヶ月かかるため、昨年(前年)の11月にシラスウナギを池入れる必要がある。この時点で、生産業者はシラスウナギの価格と小売業者からの受注量 \bar{Q} の不確実性を考慮して、自身の収益が最大化されるように池入れ数量 x を決定する。一方、小売店ではウナギの早期割引販売を行い、6月から7月の1ヶ月間を割引価格の適用期間とする。小売業者は6月より前に、ウナギの需要量の不確実性を考慮して発注量 Q と割引期間に販売する数量 $L(\leq Q)$ を決定する。このように限られた資源を適切に配分し、限られた期間内に販売することで得られる収益を最大化する問題は収益管理(レベニューマネジメント)問題として考えることができる。収益管理は航空業界の規制緩和以降に発展した分野であり、ホテルやレンタカー、スポーツイベントなど様々な業界に応用されている^{[9][10]}。

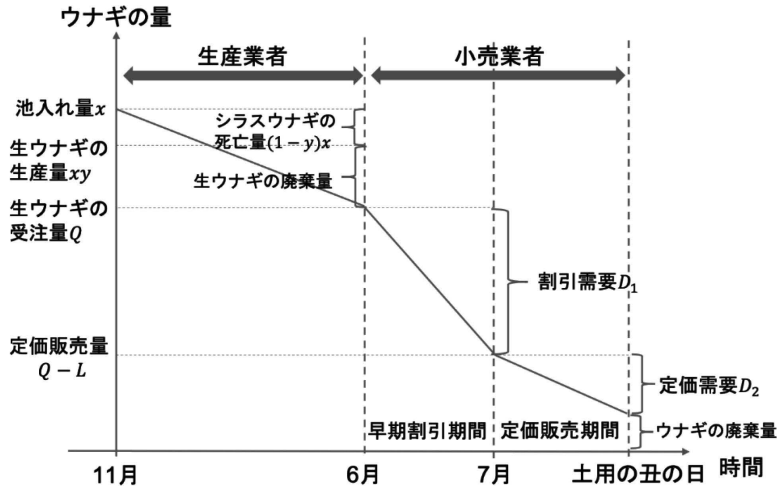


図7 生産から販売までの流れ

シラスウナギの池入れ上限値を \bar{x} 、シラスウナギの生存率を y 、シラスウナギの養殖にかかるコストとウナギの加工にかかるコストをそれぞれ c_1 、 c_2 とし、生産業者の最大期待利益 V^* を以下のように定義する

$$V^* = \max_{0 < x \leq \bar{x}} [p_v E_Q[\min\{xy, \tilde{Q}\}] - p_s x - c_1 x - c_2 E_Q[\min\{xy, \tilde{Q}\}]]. \quad (1)$$

ここで、 $E_Q[\min\{xy, \tilde{Q}\}]$ は小売業者へのウナギの出荷量の期待値を表す。上式の第1項は生産業者の期待収益、第2項はシラスウナギの仕入れ値、第3項は養殖にかかるコスト、第4項は加工にかかるコストを表す。ここで、 \tilde{Q} は小売業者からのウナギの受注量を表す確率変数である。(1)式の解 x^* を最適な池入れ量とする。

また、小売業者の最大期待利益 W^* は

$$W^* = \max_{0 \leq L \leq C} [p_1 E_{D_1}[\min\{D_1, L\}] + p_2 E_{D_1, D_2}[\min\{D_2, Q - \min\{D_1, L\}\}] - p_v Q] \quad (2)$$

と与えられる。上式の第1項は、早期割引期間の期待収益、第2項は、定価販売により得られる期待収益、第3項はウナギの仕入れ費用を表す。最適性の条件より、最適な割引期間の販売数 L^* は

$$L^* = Q - F_2^{-1}\left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right) \quad (3)$$

となる。ここで、 $F_2(\cdot)$ は確率変数 D_2 の確率分布関数である。

さらに、最適な販売量 L^* の下で、小売業者の期待利益 $W(L^*; Q)$ が最大となる最適な発注量 Q^* は

$$Q^* = \operatorname{argmax}_{0 < Q \leq yx^*} W(L^*; Q) \quad (4)$$

によって求められる。なお、早期割引を実施しない場合は(2)式において $L=0$ とおき、(4)式より最適な発注量を求める。

3.2 生産業者と小売業者が協力する場合

前節とは異なり、小売業者から生産業者へのウナギの発注量を両者の卸売契約によって定める場合を考える。これにより、生産業者は小売業者からの受注量の変動リスクをなくすことで、サプライチェーン全体の利益最大化が期待される。生産業者と小売業者の総期待利益 $V_c(C) + W_c(L^*; C)$ を最大化する最適な契約量 C^* は以下のように与えられる。

$$C^* = \operatorname{argmax}_{0 \leq C \leq \bar{x}} W_c(L^*; C) + V_c(C) \quad (5)$$

ここで、最適な割引期間の販売数 L^* は (3) 式、契約量が C のときの生産業者の期待利益 $V_c(C)$ は

$$V_c(C) = p_v C - \frac{C}{y} p_s - \frac{C}{y} c_1 - c_2 C \quad (6)$$

となる。契約量 C が確定しているため、生産業者はシラスウナギの供給リスク（成長過程での減少率）を考慮し、池入れ量を C/y とする。

4. 数値計算による分析

4.1 パラメータの設定と最適な生産・販売方策について

東京都中央卸売市場統計情報（月報・年報）^[11] より得られたシラスウナギの価格と「ウナギの蒲焼き」の卸売価格の散布図を図 8 に示す。

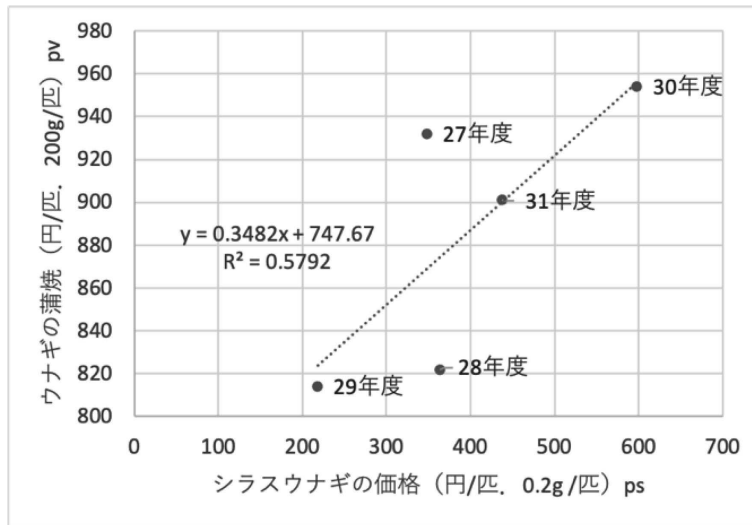


図 8 シラスウナギの価格 p_s とウナギの価格 p_v の関係

シラスウナギの価格と「ウナギの蒲焼き」の卸売価格の相関係数は 0.761 であり、やや強い正の相関が見られる。これより、以降の数値計算では、卸売価格を $p_v = 0.348p_s + 747.67$ とする。卸売契約を行わないとき、小売業者からの受注量 \tilde{Q} は一様分布 $\tilde{Q} \sim U[-0.5p_1 + 1525, -0.5p_1 + 1575]$ に従うものと仮定する。また、小売業者に対する消費者からの需要量もまた一様分布に従うものと仮定し、早期割引価格の需要量を $D_1 \sim U[-p_1 + 1900, -p_1 + 2400]$ 、定価の需要量を $D_2 \sim U[100, 300]$ とする。また、その他のパラメータは $p_s = 438$ 、 $p_v = 900$ 、 $p_1 = 1,900$ 、 $p_2 = 2,100$ 、 $c_1 = 150$ 、 $c_2 = 100$ 、 $y = 0.8$ 、 $\bar{x} = 1,000$ と設定した。

まず、卸売契約のない SC モデルにおいて、早期割引販売を実施しない場合と実施する場合の計算結果をそれぞれ表 3 と表 4 に示す。早期割引販売による価格差別化によって、需要が拡大するため、池入れ量および発注量が増加することでサプライチェーン全体の総利益が大きく増加している。また、ウナギの廃棄量については、サプライチェーン全体で僅かに増加する結果となった。したがって、早期割引販売は利益において有効な施策であるといえる。

表3 早期割引販売を実施しない場合の計算結果

生産業者		小売業者		合計
期待利益 (円)	25,144	期待利益 (円)	188,211	213,355
最適な池入れ量 (匹)	474	最適な発注量 (匹)	214	
ウナギの量 (匹)	379	期待販売量 (匹)	184	
廃棄量 (匹)	165	廃棄量 (匹)	30	195

表4 早期割引販売を実施した場合の計算結果

生産業者		小売業者		合計
期待利益 (円)	38,480	期待利益 (円)	345,972	384,452
最適な池入れ量 (匹)	724	最適な発注量 (匹)	427	
ウナギの量 (匹)	579	期待販売量 (匹)	368	
廃棄量 (匹)	152	廃棄量 (匹)	59	211

次に、早期割引販売を行う場合に卸売契約のない SC モデルと卸売契約のある SC モデルとを比較した結果を表5に示す。SC 全体の期待利益は僅かに減少するが、卸売契約によって池入れ量と廃棄量を削減することができる。従って、生産業者と小売業者とが協力して、ウナギの取引量を適切に調整することはウナギの資源管理の観点から見れば有効な方法といえる。また、基本パラメータとして早期割引価格を $p_1=1,900$ としているが、 $p_1=1,800$ と 100 円値引きした場合には、卸売契約のある場合の総期待収益が 449,889 円となり、契約のない場合を上回る。次節では、割引価格を $p_1=1,800$ として、SC 全体の総利益と廃棄量が契約によって共に改善される状況下で感度分析を行う。

表5 卸売契約の効果

	契約なし	契約あり	改善率
総期待利益 (円)	384,452	374,809	-3%
最適な池入れ量 (匹)	724	546	-25%
合計の廃棄量 (匹)	211	65	-69%

4.2 外因的要因が与える影響について

前節では、卸売契約が SC 全体の利益およびウナギの廃棄量削減において有効であることを述べた。本節では、シラスウナギの価格が変化した場合においても、この卸売契約の効果が見られるかどうかを検証する。表6は、卸売契約を締結した場合と締結しない場合における SC 全体の総期待利益、最適な池入れ量、廃棄量の合計のそれぞれの差を示している。シラスウナギの価格が高騰した場合にも、卸売契約は有効であることが確認できる。

表6 シラスウナギの価格変化に対する契約の効果

シラスウナギの価格(円)	350	400	438	450	500
総期待利益の差 (円)	+65,533	+65,324	+65,437	+65,524	+66,165
最適な池入れ量の差(匹)	-45	-53	-60	-61	-70
廃棄量の差 (匹)	-143	-146	-150	-150	-153

次に、池入れの上限値 \bar{x} が変化した場合に、卸売契約を締結することによる総期待利益と廃棄量の変化量がどのように変化するかを考察する。表7より、池入れ量の規制が厳しくなり、上限値が減少した場合においても、卸売契約によって廃棄量が減少し、総利益も改善されることがわかる。

表7 シラスウナギの価格変化に対する契約の効果

池入れ上限値 (匹)	500	600	700	800
総期待利益の差 (円)	+12,088	+33,532	+31,091	+65,437
廃棄量の合計の差 (匹)	-21	-52	-110	-150

5. おわりに

本研究では、ニホンウナギのサプライチェーンの現状をまとめ、資源の保護と収益拡大を目的とした数理モデルを定式化した。小売業者は生産業者との間で卸売契約により、ウナギを調達し、消費者に対して事前予約販売を行うことによって、ウナギの廃棄量の削減とサプライチェーン全体の総利益を増加できることを数値計算によって示した。さらに、シラスウナギの価格高騰や国の施策によるシラスウナギの池入れ上限値の削減といった市場環境が変化する状況においても、両業者の協力や予約販売が有効であることを確認した。本研究では、需要量に一様分布を仮定して分析を行なったが、今後は実際の販売データを用いて需要分布を推定し、より現実的な設定のもとでモデルを評価する必要がある。また、提案モデルには考慮されていない事前予約のキャンセルや複数店舗での販売を考慮したモデルへの拡張とその評価が求められる。

(さとう きみとし 所員 神奈川大学工学部准教授)
(りょう せい 神奈川大学工学部経営工学科 2019 年度卒業)

注

- 各年の池入数量は、前年11月～当該年5月までの合計値。平成15年～平成25年までの池入数量は業界調べ、平成26年～平成31年(令和元年)の池入数量は水産庁調べ。取引価格は業界調べ。
- 輸入量は、貿易統計の「うなぎ(養魚用の稚魚)」を基に、輸入先国や価格から判別したニホンウナギ稚魚の輸入量。採捕量は池入数量から輸入量を差し引いて算出。

参考文献

- [1] 環境省、第4次レッドリストの公表について(汽水・淡水魚類)、<https://www.env.go.jp/press/16264.html> (参照 2019-06-17)
- [2] 水産庁、「ウナギをめぐる状況と対策について」令和元年7月、<http://www.jfa.maff.go.jp/j/saibai/attach/pdf/unagi-120.pdf> (参照 2019-07-03)
- [3] 中央大学法学部、ウナギ保全研究ユニット、<https://c-faculty.chuo-u.ac.jp/blog/kaifu/> (参照 2020-01-22)
- [4] 水産庁、Data Format for Eel (Japan)、<http://www.jfa.maff.go.jp/j/press/sigen/attach/pdf/170711-2.pdf> (参照 2019-06-17)
- [5] 一般社団法人全日本持続的養鰻機構、パンフレット p. 5、<https://unagikiko.jp/pdf/panf002.pdf> (参照 2019-06-16)
- [6] ウィキペディア、土用の丑の日、<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%9F%E7%94%A8%E3%81%AE%E4%B8%91%E3%81%AE%E6%97%A5> (参照 2019-06-22)
- [7] 総務省統計局、家計調査 [2018年7月] 土用の丑の日と「うなぎのかば焼き」、http://www.stat.go.jp/data/kakei/tsushin/pdf/30_7.pdf (参照 2019-06-16)

- [8] ファミリーマート、プレリリース、「食品ロス削減」に向けて、季節商品の完全予約制 2 年目へ 2020 年土用の丑の日（うなぎ関連商品）の販売結果について、2020.
- [9] 佐藤公俊、中木達也、中島健一、スーパーマーケットにおける生鮮食品の最適値引き戦略に関する研究、日本経営工学会、Vol. 69, p. 77-83 (2018)
- [10] 佐藤公俊、澤木勝茂、レベニューマネジメント：収益管理の基礎からダイナミックプライシングまで、共立出版、2020.
- [11] 東京都中央卸売市場、類別・品目別検索（水産）、<http://www.shijou-tokei.metro.tokyo.jp/asp/smenu2.aspx?gyoshucd=2&smode=10>（参照 2020-01-14）