

ユーグレナの可能性と その研究開発投資に関する研究

織笠一輝、田辺弘輝、高橋和生、谷本将大、
金井達也、新徳一輝、斉藤千奈津、雨宮巧

1 はじめに

地球温暖化の進行により、1880～2012年の間に世界平均温度は0.85℃上昇した。また海面は1901～2010年の間に19cm上昇している。その結果、太平洋上に存在するキリバス共和国では1886～2006年の20年で国土が半分になってしまった。このように地球温暖化は、すでに私たちの住む地球に深刻な影響を及ぼしている。

1992年の国連気候変動枠組条約の採択以来、国際社会は地球温暖化対策を検討してきた。2015年には、京都議定書以来18年ぶりの国際的枠組みとなるパリ協定が締結された。パリ協定では、地球平均気温の上昇を2℃以内に抑えることが国際合意されている。しかし、この目標を実現することは容易ではない。パリ協定で約束した各国の温暖化対策が実現されても、今世紀の半ば以降、世界の温室効果ガスの排出をゼロあるいはマイナスにしなければ目標の実現は困難であると予想されている¹⁾。

日本の二酸化炭素(CO₂)排出量の内訳(直接排出量)を見ると、約40%が火力発電所等のエネルギー転換部門である。この状況は他の国々も同様であり、主要な温室効果ガスであるCO₂を排出することなくエネルギーを得ることが、温暖化対策の最重要課題となっている。このため、風力や太陽光発電などの再生可能エネルギーの普及促進政策が、各国でとられている。しかしそれらの技術だけでは十分ではない。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、生物に大気中のCO₂を吸収させ、作り出された有機物を火力発電所で燃やしてエネルギーを得、発電所の排煙からCO₂を隔離貯蔵するBECCS(Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)の実用化が、温暖化対策のカギとなるとしている(文部科学省ほか, 2015)。

そこで私たちは、光合成生物のなかで最も高いCO₂吸収効率をもつユーグレナに注目

* 社会科学総合学術院 赤尾健一教授の指導の下に作成された。

した。本論文ではその CO₂ 固定能力の可能性を考察する。

2 ユーグレナの可能性

2-1 ユーグレナとユーグレナ社²⁾

ユーグレナとは、鞭毛虫の仲間では直径は 0.1mm 以下の微生物である。一般にはミドリムシとして広く知られている。植物のように光合成を行い、動物のように細胞を変化させ行動する類い稀な生き物である。ユーグレナ (Euglena) の名称は、ラテン語で美しい (eu) 眼 (glena) という意味であるが、これはユーグレナの赤い点 (図 1 を参照) を眼と勘違いしたことに由来する。

ユーグレナは、「微生物学の父」と呼ばれるオランダの科学者アントーニ・ファン・レーウェンフックによって 1660 年代に発見された。1950 年、米国の科学者、ジェームズ・バッシュム、メルヴィン・カルヴィン、アンドリュウ・ベンソンが、ユーグレナ等を用いた光合成の研究を行い、光合成による炭素固定反応であるカルビン回路を解明した。この業績によってカルビンとベンソンは 1961 年にノーベル化学賞を受賞している。

ユーグレナはその優れた性質によって昨今様々な分野から注目を集めている。まず、栄養価が高いため、栄養ドリンク、サプリメントとして利用されている。また、バイオ燃料としても期待されている。豊富な油分を含むこと、驚異的な成長スピードをもつこと、他のバイオ燃料作物 (油ヤシや大豆) と違って食糧作物と競合しないことが、ユーグレナの特長である。ユーグレナはさらに大気中の CO₂ 濃度が高いほど成長スピードが促進されるという性質も持っている。このことから発電所で発生した CO₂ の除去 (Carbon Dioxide Removal: CDR) にも利用できるのではないかと期待されている。

ユーグレナを中心として、微細藻類に関する研究開発及び生産管理、品質管理、販売等を展開している会社が、ユーグレナ社 (2005 年設立) である。上記のバイオ燃料に関して、同社は、JX 日鉱日石エネルギー (株) と (株) 日立プラントテクノロジーと共に、バイオジェット燃料開発のためのフィジビリティ調査を行っており、2018 年には実用化を予定している。また、CDR 利用に関しても、沖縄電力 (株) や住友共同電力 (株) と連携して火力発電所で実証調査を行っている。

2-2 地球温暖化問題とユーグレナ

以上のような特長を持つユーグレナに関する事業は、有望な投資対象としてビジネス的にも注目を浴びている。例えば大和証券グループは、地球温暖化問題に対応するため、とりわけその原因物質である CO₂ 等温室効果ガスの削減のために、バイオ燃料と CO₂ 固定化という 2 つの技術開発に取り組んでいる。そして、これらの課題に対して、ユーグレナ

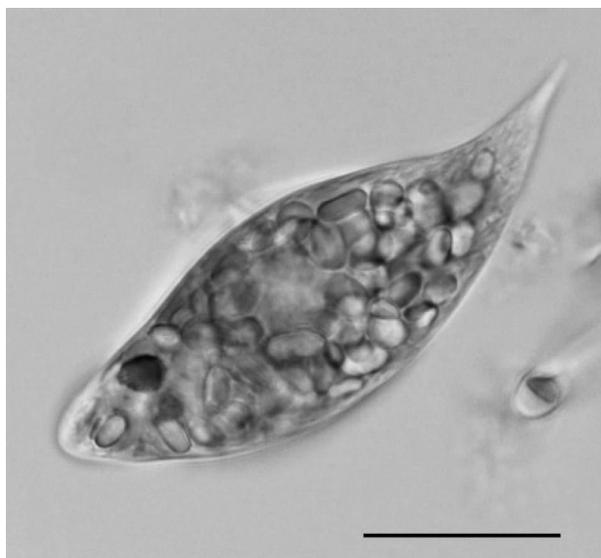


図1 ユーグレナ

出典：起業tvホームページ

の利用をその解決策として提案している³⁾。

以下では、これら2つの課題の重要性と、大和証券がどのようにユーグレナに期待しているかを説明する⁴⁾。

2-2-1 バイオ燃料

石油は、搬送がしやすく、備蓄も可能であることから、世界の一次エネルギー消費において最大のシェア（2012年時点で31.4%）を占めており、特に輸送用燃料として、堅調な需要を維持している。しかし、石油燃料をエネルギー転換する際に、地球温暖化の原因物質である温室効果ガスが排出されてしまう。このため自動車や飛行機に用いられる輸送用の代替燃料として、バイオ燃料が注目されてきた。例えばEUでは、2020年までに運輸部門の燃料のうち10%程度をバイオ燃料にすることを目標とし、米国でも2022年までに360億ガロン（約1億1400万kl）を生産することを目標としている。

現在、バイオ燃料は、サトウキビやトウモロコシ等の糖・でんぷん質をもとにしたバイオエタノールと、菜種、パーム油等の油脂を原料とするバイオディーゼルが実用化されている。しかし、これらの原料は農地で作られるため、食用農産物との競合による食糧価格の高騰や森林伐採等の弊害を招くことが問題視されている。別の問題として、バイオ燃料の製造方法のなかには、製造過程でのCO₂排出を考慮するとカーボンニュートラルと言えないものがある。そこで、木質系原料や稲わら等セルロース系原料、藻類等を用いる

次世代バイオ燃料が注目されるようになった。中でもユーグレナを含む微細藻類は、単位面積当たりのエネルギー収率の高さやCO₂固定への寄与率が高さ、耕地を必要とせず食糧生産と競合しない点等で優位性を有しているとされている。

2-2-2 CO₂固定化

このバイオ燃料とともに、地球温暖化対策技術として注目されているのが、CO₂回収・貯留技術（Carbon Capture and Storage; CCS）である。CCSとは、発電所等から排出されるCO₂を化学・工学的に分離回収して固定化し、地中または海洋に注入し貯留する技術を指す。CCSの実用化は極めて重要な課題であり、それなしにはパリ協定の2度目標は実現が極めて困難になる⁵⁾。一方で、CCSは現状、貯留に適した地層を見つけることが困難であること、貯留量の検証が困難であること等の深刻な障壁がある。

CCSの実用化に多くの問題点があることから、大和証券は、CO₂固定化技術として、ユーグレナに着目している。その理由は、ユーグレナが、最適条件下で、2秒のガス滞留時間で80~99%という高いCO₂捕捉効率を生み出すためである。この特徴を利用して、発電所などのCO₂排出源の近くにユーグレナの池を設置し、排出されたCO₂を池に注入すれば、CO₂を回収できる。大和証券は、この回収したCO₂を再び燃料として利用するCCU（Carbon Capture and Utilization）をビジネスモデルとして提案している。

その背景として、日本の約束草案における2030年度の2013年度比26%の温室効果ガス削減目標積み上げの基礎として、火力発電高効率化が位置付けられていることが挙げられる。CCS、CCUは火力発電所の排ガスに含まれるCO₂を削減し、火力発電の高効率化のための有望な技術と見なされている（資源エネルギー庁, 2015）。

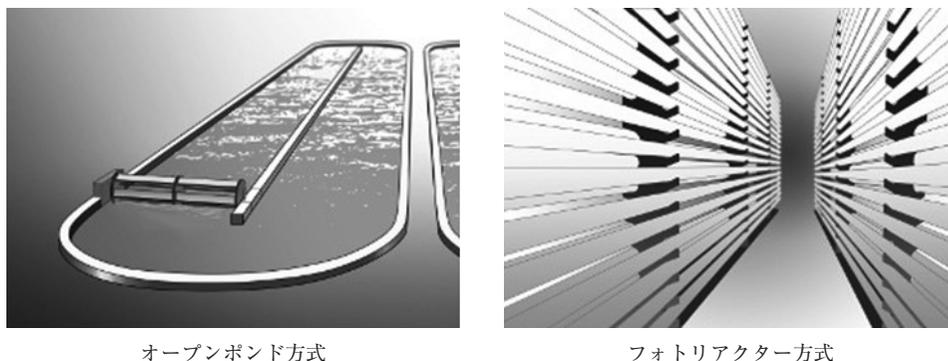
2-3 ユーグレナによるCO₂固定化技術

ここでは、ユーグレナによるCO₂固定化技術について詳述する。

Sayre (2010)によると、ユーグレナをはじめとする微細藻類は、重炭酸塩を細胞に輸送する能力を持ち、炭素を捕捉するのに適している。ユーグレナによるCO₂捕捉効率は、ユーグレナの生理状態、池の化学状態、および温度に応じて変化するが、最適条件下では、80~99%という高い捕捉効率が達成可能である。

化石燃料発電所やセメントキルンなどの定点源から排出されるCO₂の捕捉隔離のために、これら定点源の近くにユーグレナの池を配置することが考えられる。煙道ガスをそのまま統合された発電所藻池施設に注入できれば、CO₂輸送のコストを削減し、電力に炭素クレジットを与えられる利点がある。

しかし、このCO₂回収のためには、30℃以下の温水、7以上のpH、栄養素（窒素、リン）が必要である。栄養素は、下水処理場から取り出す方法が一般的である。また、発電



オープンポンド方式

フォトリアクター方式

図2 CO₂の捕捉方法

出典：SCHOTT ホームページ

所などの大規模 CO₂ 排出源の排ガスには窒素酸化物 (NO_x) や硫黄酸化物 (SO_x) が含まれ、純粋な CO₂ をユーグレナに注入するよりも、排ガスを直接注入した方が約 30% 吸収効率が良い。

藏野ほか (2009) によると、CO₂ の捕捉方法として、①オープンポンド型、②フォトバイオリアクター型という 2 つのケース (図 2) がある。

①オープンポンド型 (開放型培養システム) :

池は通常、環状または走路の形状で構築されている。大量生産が可能で、建設費やメンテナンス費が安価だが、非効率な光の利用や、水の高い蒸発率、大気汚染物質により水が汚れるといったことを主要な原因として、面積単位のバイオマスの収穫量は低く、水の使用量が多くなる。

②フォトバイオリアクター型 (閉鎖型培養システム) :

大量生産が難しく、洗浄の手間が重要な問題である。オープンポンド型と比較して生産性は高く、広大な土地を必要としない、汚染のリスクが少ない、少量の水で生産が可能であること等の利点がある。

捕捉効率に関して、Sayre (2010) によると、オープンポンド型への発電所からの煙道ガスの注入の場合、1 日当たり 200MWh の発電量標準的な天然ガス発電所では、その CO₂ 排出量の 80% を捕捉するために約 3600 エーカー (約 1457ha。東京ドーム 310 個) の池が必要である。石炭火力発電所では、MWh 当たりの CO₂ 排出量が大きいため、日中の 200MWh の石炭火力発電所からの CO₂ 排出量の 80% を捕捉するには、約 7000 エーカー (約 2833ha。東京ドーム 600 個分) の池が必要になる。このように、ユーグレナによる定点源からの CO₂ 捕捉には大面積の池が必要になる。なお、バイオマス生産量は乾燥重量 20 グラム / 平方メートル / 日である。上述の 3600 エーカーの池からは、291 トン / 日のバイオマスが生産されることになる。

3 経済性評価

本節では、ユーグレナ利用による石炭火力発電所から排出される1トンのCO₂を除去するために必要な費用を、CCS一貫配備の石炭火力発電所におけるCO₂処理費用とCO₂の排出量取引価格と比較し、ユーグレナによるCO₂固定化技術の経済性を評価する。この目的のため、まず前節で述べたオープンポンド型とフォトバイオリクター型の2つのユーグレナ培養方法別に石炭火力発電所から排出される1トンのCO₂を除去するために必要な費用を試算する。そこで試算された2つのケースのうち、より安価な費用をCCS一貫配備の石炭火力発電所におけるCO₂処理費用とCO₂の排出量取引価格と比較する。

3-1 ユーグレナによるCO₂固定化技術費用

石炭火力発電所から排出される1トンのCO₂を除去するための費用について、オープンポンド型とフォトバイオリクター型の2つのケースについて試算した。前提条件として、本研究では石炭火力発電所から発生したCO₂の運搬からユーグレナへのCO₂注入までの工程に要する費用を、ユーグレナによるCO₂固定化技術費用と定義している。この2つのケースの費用を比較した結果を表1に示す。

以上の試算により、ユーグレナ利用による1トンのCO₂を除去するために必要な費用はオープンポンド型を使用する場合は合計32,400円/ton-CO₂、フォトバイオリクター型を使用する場合は合計178,300円/ton-CO₂であった。どちらのケースも資本費用が全体の95%以上を占めている。フォトバイオリクター型の場合、設備自体の費用や設置費、減価償却費が高いため、資本費が172,200円/ton-CO₂と高額になった。

3-2 排出量取引価格

次にユーグレナ利用によるCO₂除去費用と比較するため、CCS一貫配備の石炭火力発電所におけるCO₂処理に必要な費用及びCO₂の排出量取引価格を示す。

まず、石炭火力発電所におけるCCS費用について、データとして、環境省(2015)の表3-10「発電技術別・輸送距離別のCCSコスト」を使用した。本研究ではCCS一貫配備の超臨界圧石炭火力、超々臨界圧石炭火力、石炭ガス化複合発電、天然ガス複合発電の4種類の発電技術における費用の平均をCCSの費用とした。ここでCCS一貫配備とは、火力発電所、CO₂回収、液化、シャトルシップによる輸送、圧入の設備を配備し、運転保守管理をするシステムである。想定として、発電容量は75万kwとし、シャトルシップによる液化CO₂の海上輸送距離は600kmとした。以上から推定されたCCS費用は10,300円/ton-CO₂であった。

排出量取引価格に関しては、Argus Media Limited (2017) による、東京都排出量取引制

表1 オープンpond型及びフォトバイオリアクター型費用 (円/ton-CO₂)

| | オープンpond型 | フォトバイオリアクター型 |
|-------|-----------|--------------|
| 資本費 | 30,800 | 172,200 |
| 運転維持費 | 900 | 4,000 |
| 光熱費 | 400 | 100 |
| 栄養費 | 300 | 2,000 |
| 合計 | 32,400 | 178,300 |

注：フォトバイオリアクター型の費用の試算に関して、Wilson et al. (2014) の Table 6 及び Table 7 をもとに推計した。オープンpond型の費用試算に関して、上記のフォトバイオリアクター型に関するデータに加え、Slade and Bauen (2013) の Fig. 3 及び Fig. 4、及び Davis et al. (2016, Ch. 6) を元に推計を行った。

表2 費用の比較 (円/ton-CO₂)

| 二酸化炭素固定化技術 | | | |
|------------|--------------|--------|---------|
| オープンpond型 | フォトバイオリアクター型 | CCS | 排出量取引価格 |
| 32,400 | 178,300 | 10,300 | 1,500 |

度の2016年12月査定価格を参照した。査定対象となったクレジットには第一計画期間(2010～2014年度)発行クレジットの超過削減量と再エネクレジット(グリーン電力証書)の2種類があるが、後者は取引量が少ないため前者の価格を採用することにした。超過削減量のクレジット価格(査定額)は1,500円/ton-CO₂であった。

3-3 ユーグレナによるCO₂固定化技術費用の評価結果

ユーグレナによるCO₂固定化技術の経済性を評価する。以下の表2において3-1、3-2で試算、使用したそれぞれの費用を比較した。

ユーグレナによるCO₂固定化技術費用について、オープンpond型利用時とフォトバイオリアクター型利用時の2つのケースで比較した結果、オープンpond型費用はフォトバイオリアクター型費用の約5.5分の1であることが示された。しかし、ユーグレナによるCO₂固定化技術費用(オープンpond型使用時)をCCS一貫配備の石炭火力発電所におけるCO₂処理費用と比較した場合は約3倍、CO₂の排出量取引価格と比較した場合は約22倍の費用がかかることが判明した。

4 ユーグレナCCU実用化のための研究開発投資

前節で見たように、現時点ではユーグレナを利用したCCUを行うには、多大なコストを必要とし、当面はその実用化や普及は期待できない。一方、地球温暖化対策には

BECCS や CCU の普及が必要不可欠である。このため適切な研究開発 (Research & Development; R&D) 投資を行うことで、その生産コストを下げることは重要な課題である。本節では、その可能性を検討する。

具体的には、一定年限 (たとえば 10 年) でコストを一定量 (たとえば 1/2) に削減するために、研究開発投資をどのように、そしてどの程度行えばよいかを考察する。

この目的のために、以下で説明する 2FLC (two factor learning curve) モデルに設備、R&D 投資モデルを組み込んだ赤尾 (2017) の温暖化緩和技術開発モデルを用いて、シミュレーション分析を行う。ただし、ユーグレナ CCU に関するデータは非常に乏しいため、ここでのシミュレーションは、風力および太陽光発電を参考とした仮想的なパラメータの値に基づいている。今後、技術やコストに関するデータが得られれば、具体的な最適 R&D 投資計画を描くことができる。

4-1 2FLC モデル

生産コストが投資によってどのように低下するか、その関係を表すモデルとして、伝統的に学習曲線 (learning curve) モデルが使われてきた。学習曲線は経験曲線ともいわれ、事業活動の過程で生まれる設備ストックの蓄積が知識やノウハウの向上をもたらし、その結果コストが低下するという経験則を表した曲線である (図 3 (a))。

しかし、学習曲線には、意図的に知識や技術の向上を図る R&D 投資が含まれていない。このため、再生可能エネルギーや CCS の技術進歩に関して、伝統的な学習曲線モデルに知識を加えた 2FLC モデルが使われ、それによる分析と将来予測が行われている (図 3 (b))。そのことによって、単なる経験則ではなく、R&D 投資計画に関する政策の成果を評価、予想することができる (Miketa and Schrattenholzer, 2004; Klaassen ほか, 2005; Santen ほか, 2014)。

2FLC モデルは次のように表現される。

$$C(t) = aF(t)^{-b}K(t)^{-c}, \quad a, b, c > 0. \quad (1)$$

ここで $C(t)$ は t 時点での単位コスト、 $F(t)$ は t 時点での設備ストック、 $K(t)$ は t 時点での知識ストックである。たとえば、 t 時点でのコストを現在 ($t=0$) の半分にすることを考えよう。それを設備投資のみで行う場合、

$$\frac{1}{2} = \frac{C(t)}{C(0)} = \frac{aF(t)^{-b}K(0)^{-c}}{aF(0)^{-b}K(0)^{-c}} = \left(\frac{F(t)}{F(0)} \right)^{-b} \Rightarrow \frac{F(t)}{F(0)} = 2^{1/b} \quad (2)$$

より、 t 時点の設備を現在の $2^{1/b}$ 倍にする必要がある。同様に、もし知識ストックの増加 (R&D 投資) のみでそれをする場合には、知識ストックを $2^{1/c}$ 倍にする必要がある。

以下では、設備、知識の単位を、それぞれ適切に選ぶことによって標準化し、 $F(0) = 1$, $K(0) = 1$ とする。そうするとコストを 1/2 にするために必要な上記ストック量は $F(t)$

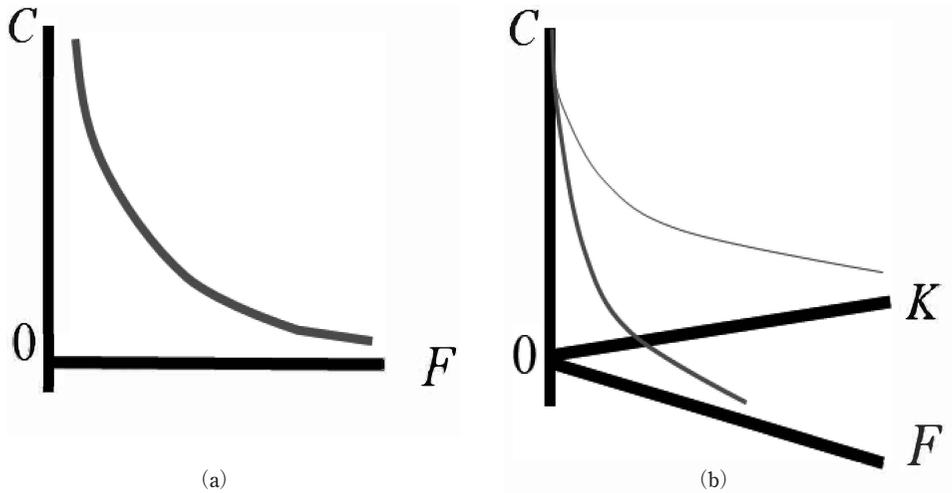


図3 学習曲線モデルと2FLCモデル

注：Fは設備ストック量を表し、Kは知識・技術のストック量を表す。

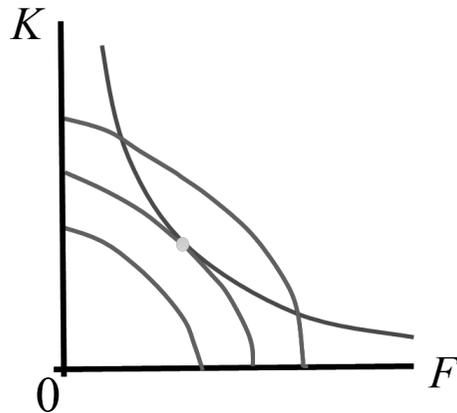


図4 (F, K)-フロンティア、等投資費用曲線、最適投資

注：原点に凸の曲線はCCU単位コストの削減目標を実現する(F, K)の組合せ((F, K)-フロンティア)を表す。3つの無差別曲線は、それぞれある総投資額で可能な(F, K)の組合せ(等投資費用曲線)を表す。2つの接点が、(F, K)の最適投資の組合せとなる。

$= 2^{1/b}$, $K(t) = 2^{1/c}$ と表現される。また、これらのケースを含めて、コストを $1/n$ にするための設備・知識の組合せは、

$$\frac{1}{n} = \frac{C(t)}{C(0)} = F(t)^{-b} K(t)^{-c} \tag{3}$$

と表現できる。

$C(t)$ を、ユーグレナによってCO₂を大気から除去し、発電に利用して1kwhの電力を得るまでの生産費と解釈し、CCU単位コストと呼ぶことにする。また、設備を $F(0) = 1$

から F まで増加させるために必要なコストを $C_F(F)$ と表現し、知識を $K(0)=1$ から K まで増加させるために必要なコストを $C_K(K)$ と表現する。技術進歩にかけることのできる最大コストを \bar{C} で表す。

ここでは、CCU 単位コストを最小にするコストのかけ方を求める問題、最適な設備と知識の組合せを求める問題を考える。図 4 の (F, K) -フロンティアは、(3) を満たす (F, K) の組合せを表している。このフロンティア上で投資総コスト $\bar{C} = C_F(F) + C_K(K)$ を最小にする点を探す。図 4 の無差別曲線群は、それぞれある総コストで実現できる設備と知識の組合せを表している。右上にある無差別曲線ほど投資総コストが高くなるので、 (F, K) -フロンティアとちょうど接している無差別曲線の接点 (F^*, K^*) が費用を最小化する (F, K) の組合せであり、それに対応する $C_F(F)$, $C_K(K)$ が最適なコストのかけ方である。

4-2 最適投資計画

次の問題は、 (F_T^*, K_T^*) をいかに実現するかである。赤尾 (2017) に従い、 $F(0)=1, K(0)=1$ から $F(T)=F_T^*, K(T)=K_T^*$ まで設備と知識を増加させるための最適投資計画を次のように定式化する。

4-2-1 設備の最適投資計画

各時点の設備への投資額を $i_F(t)$ で表す。設備の増分は次の微分方程式で表されるとする。

$$\frac{dF(t)}{dt} = i_F(t) - \delta_F F(t), \quad F(0) = 1. \quad (4)$$

ここで $\delta_F > 0$ は設備の資本減耗率である。投資額 $i_F(t)$ には上限 \bar{i} があると仮定する。すなわち、

$$0 \leq i_F(t) \leq \bar{i} \quad (5)$$

利子率を r で表す。また資本減耗率を δ_F で表す。すると最適投資問題は次で表される。

$$\begin{aligned} C_F(F_T^*) &= \min \int_0^T i_F(t) e^{-rt} dt \\ \text{subject to } \frac{dF(t)}{dt} &= i_F(t) - \delta_F F(t), \\ 0 \leq i_F(t) &\leq \bar{i}, \quad F(0) = 1, \quad F(T) = F_T^*. \end{aligned} \quad (6)$$

この問題から得られる設備の最適投資計画は、ある時点 t_F まで一切投資をせず、それ以降最大限の投資を持続するものとなる (図 5 を参照)。

コスト $C_F(F_T^*)$ は次で与えられる。

$$C_F(F_T^*) = \frac{\bar{i} e^{-rT}}{r} \left[\left(\frac{\bar{i}}{\bar{i} - \delta_F F_T^* + \delta_F e^{-\delta_F T}} \right)^{r/\delta_F} - 1 \right] \quad (7)$$

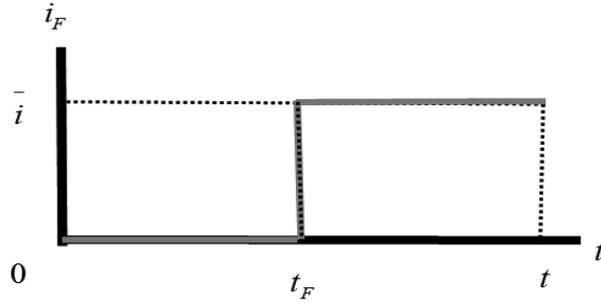


図5 最適設備投資経路

投資が始まる時点 t_F は、

$$t_F = T + \frac{1}{\delta_F} \log \left(1 - \frac{\delta_F}{\bar{i}} (F_T^* - e^{-\delta_F T}) \right) \quad (8)$$

で与えられる。なお、目標 (F_T^*, T) は、

$$e^{-\delta_F T} < F_T^* \leq 1 + \frac{(\bar{i} - \delta_F)(1 - e^{-\delta_F T})}{\delta_F} \quad (9)$$

を満たす必要がある。最初の不等式が満たされないと、目標が小さすぎてゼロ投資でも実現できなくなる。一方、2番目の不等式が満たされないと、目標が大きすぎて最大限の投資を全期間行っても目標を達成できない。

4-2-2 R&D の最適投資計画

各時点の R&D 投資額を $i_K(t)$ で表す。知識の増分は次の微分方程式で表される。

$$\frac{dK(t)}{dt} = a (i_K(t))^\beta (K(t))^{1-\beta} - \delta_K K(t), \quad K(0) = 1 \quad (10)$$

ここで $\beta \in (0, 1)$ は、 i_K を 1% 増やすとき知識の増分が何% 増えるかを示す弾力性である。また、 $\delta_K > 0$ は知識の資本減耗率である。設備投資と違ってそれまでに蓄積されてきた知識が多いほど、同じ投資でも知識の増分は大きくなる。

利子率は設備投資と同じ r として、 K_T^* を最小費用で実現するための R&D 投資計画が次で表される。

$$\begin{aligned} C_K(K_T^*) &= \min \int_0^T i_K(t) e^{-rt} dt \\ \text{subject to } \frac{dK(t)}{dt} &= a (i_K(t))^\beta (K(t))^{1-\beta} - \delta_K K(t), \\ K(0) &= 1, \quad K(T) = F_T^* \end{aligned} \quad (11)$$

この問題の最適解 $i^*(t)$ は、

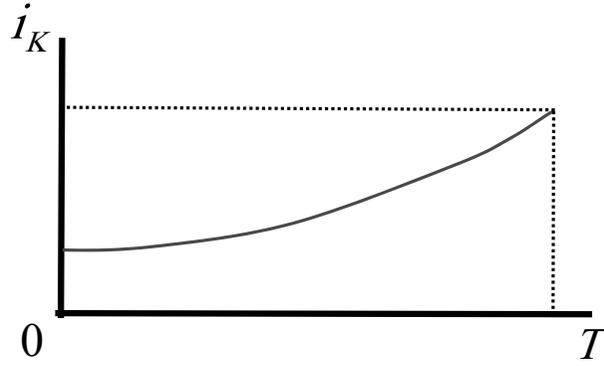


図6 最適 R&D 投資経路

$$\frac{di^*(t)/dt}{i^*(t)} = \frac{ds^*(t)}{dt} + \frac{dk^*(t)}{dt} = \frac{r + \beta \delta_K}{1 - \beta} \quad (12)$$

を満たす。つまり、初期値や目標にかかわらず、最適 R&D 投資は定率で成長する（図6を参照）。

最適初期投資額 $i_K^*(0)$ は、

$$i_K^*(0) = K_T^* \left[\left(\exp \left[\frac{-r + \beta \delta_K}{1 - \beta} T \right] \right)^\beta - ((K_T^*)^{-\beta} e^{-\alpha \beta \kappa T}) \frac{\kappa}{1 - e^{-\alpha \beta \kappa T}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

で与えられる。ただし、

$$\kappa = \left(\frac{r + \delta_K}{\alpha (1 - \beta)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (14)$$

である。(12), (13) より $K(0) = 1$ から T 年後に $K(T) = K_T^*$ を実現するための R&D コストは次のようになる。

$$\begin{aligned} C_K(K_T^*) &= \int_0^T i_K^*(0) \exp \left[\left(\frac{r + \beta \delta_K}{1 - \beta} - r \right) t \right] dt \\ &= \frac{1 - \beta}{\beta (r + \delta_K)} i_K^*(0) \left(\exp \left[\left(\frac{\beta}{1 - \beta} (r + \delta_K) \right) T \right] - 1 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

4-3 シミュレーション分析

以上のモデルに具体的なパラメータの値を与えて、ユーグレナ CCU の実用化のための最適投資を計算する。目標として $(N, T) = (2, 10), (2, 15), (2, 20)$ の3つを考える。すなわち10年でコストを1/2にすること、15年で1/2にすること、20年で1/2にすることの3つである。

パラメータの値は、ユーグレナ CCU に関する情報が乏しいため、今回は、再生可能エ

表3 シミュレーション分析結果

| | シナリオ | N=2, T=10 | N=2, T=15 | N=2, T=20 |
|--------------------|------|-----------|-----------|-----------|
| solar+ (c/b=0.316) | 番号 | 13 | 11 | 8 |
| | 設備割合 | 0.699608 | 0.917165 | 0.897049 |
| | 知識割合 | 0.300392 | 0.082835 | 0.102951 |
| solar (c/b=0.366) | 番号 | 12 | 9 | 7 |
| | 設備割合 | 0.6918075 | 0.877785 | 0.896197 |
| | 知識割合 | 0.3081925 | 0.122215 | 0.103803 |
| wind (c/b=0.416) | 番号 | 11 | 8 | 6 |
| | 設備割合 | 0.6768482 | 0.871037 | 0.888464 |
| | 知識割合 | 0.3231518 | 0.128963 | 0.111536 |
| wind+ (c/b=0.466) | 番号 | 10 | 7 | 5 |
| | 設備割合 | 0.6535714 | 0.858703 | 0.87242 |
| | 知識割合 | 0.3464286 | 0.141297 | 0.127579 |

注1：表の「番号」とは、番号が若いほど知識ストックが大きくなることを示している。

注2：設備割合とは、総コストに対する設備コストの割合を、知識割合とは、総コストに対する知識コストの割合を示している。

エネルギーに関する技術進歩と普及を論じた Santen ほか (2014) を参考にした。

2FLC モデルのパラメータ b, c について、その比 c/b が最適投資に重要な役割をもつ (赤尾, 2017)。Santen ほか (2014) は、太陽光発電について $c/b = 0.366$ 、風力発電について 0.416 を用いている。これを参考に、ユーグレナ CCU について、 $c/b = 0.316, 0.366, 0.416, 0.466$ の4通りを分析することにした。すなわち、太陽光発電以上に R&D への投資が有効になるケース (solar+: $c/b = 0.316$) から、反対に風力発電以上に施設への投資が有効になるケース (wind+: $c/b = 0.466$) まで、その比が太陽光と風力の差 (0.05) だけ変化させた4つのケースを考える。なお、それぞれの投資額を比較するために、 $c + b = 0.36$ を満たすように b, c を選んだ。これは、設備と R&D の2つの投資額が同じであるとき、いずれのケースも同じだけのコスト削減効果をもつことを意味している。それ以外のパラメータについては、年利子率 $r = 0.05$ 、設備の資本減耗率 $\delta_F = 0.05$ 、設備投資の上限 $\bar{i} = 5$ 、知識ストックの資本減耗率 $\delta_K = 0.01$ 、知識ストック生産関数のパラメータ $a = 0.4$ 、 $\beta = 0.5$ と設定した。

以上のパラメータの値で、上記に挙げた目標として、設備を全く増やさない場合と知識を全く増やさない場合を両端のケースとして、全体で20通りの組合せを考え、それぞれの組合せを実現する設備投資額と研究開発投資額を求めた。それら2つの投資額の合計が最小となるものが、その目標を実現する最適投資である。

表3に、solar+ から wind+ までの4つパターンでのシミュレーション結果を示す。シナリオは目標年数を示す。番号はコストを最小にする設備と知識の量的な組合せを示し、数

が小さいほど知識の相対的な割合が大きくなる。設備割合と知識割合は総投資額に対する設備コストと知識コストの割合を示している。

表3からわかることとして、まず縦に表を見ると、solar+からwind+へとパラメータ c/b が大きくなるにつれて、量的にも費用的にも知識の割合が大きくなっている。このことは、 c/b が大きいほど、全体の投資に対して、R&D 投資の比重を高めることが最適投資につながることを示している。

次に表を横に見ると、目標期間が延びると番号が小さくなること、すなわち量的に知識ストックの比重が増えることがわかる。一方で、投資額については、目標期間の延長が知識割合（総投資に対する R&D 投資の割合）に与える影響は必ずしも単調ではない。すなわち、solar+ では15年で知識割合が最小となるが、それ以外は目標期間が延びるにしたがって知識割合が低下する。また、目標期間が延びると、量的には知識ストックの比重が増えるのに、金額的には設備投資の比重が増えるという複雑な関係も現れている。

5 まとめ

ユーグレナのもつ炭素固定能力や、食品やバイオ燃料としてのユーグレナの様々な利用可能性から、ユーグレナが地球温暖化問題の解決のために果たす可能性は非常に大きい。その高い能力から、その画期的な利用が直ちに社会に普及すると思えても無理のないことのように思われる。しかし、研究を進めていくなかで明らかになったのは、現段階においては、ユーグレナの利用は採算のとれるようなものではないということである。

ただし、最初から採算がとれるような技術などほとんどない。現在では馴染みのある太陽光発電や風力発電といったものも、その当初はユーグレナ CCU と同じように莫大なコストがかかるものであった。将来的なコスト削減のためには、現在の投資をいかにして行っていくかが重要である。

注

- 1) United Nation Framework Convention on Climate Change (2015)
- 2) 以下の記述はユーグレナ社ホームページを参考にした。
- 3) 大和証券グループ本社ホームページ
- 4) 以下の記述は、大和証券グループ本社ホームページを参考にした。
- 5) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第5次アセスメントでは、今世紀末の温室効果ガス CO₂ 換算濃度が450ppmであれば、今世紀の温度上昇を2℃以内に収まる可能性が高いとしている。そして、この濃度を CCS なしで実現する場合、緩和に要する費用は138%増加するとしている。(文科省ほか, 2015)

引用文献

- [1] Argus Media Limited (2017) 『総量削減義務と排出量取引制度 取引価格の査定結果について：東

- 京都排出量取引セミナー』 http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/large_scale/%E2%91%A3%E5%8F%96%E5%BC%95%E4%BE%A1%E6%A0%BC%E3%81%AE%E6%9F%BB%E5%AE%9A%E7%B5%90%E6%9E%9C%E8%A7%A3%E8%AA%AC.pdf#search=%27%E6%8E%92%E5%87%BA%E9%87%8F%E5%8F%96%E5%BC%95%E4%BE%A1%E6%A0%BC%27 (アクセス 2017/11/20)
- [2] Davis, R., J. Markham, C. Kinchin, N. Grundl, E. C. D. Tan, and D. Humbird (2016) “Process Design and Economics for the Production of Algal Biomass: Algal Biomass Production in Open Pond Systems and Processing Through Dewatering for Downstream Conversion,” *National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-5100-64772*, 128pp.
- [3] Klaassen, G., A. Miketa, K. Larsen, T. Sundqvist (2005) “The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom,” *Ecological Economics* 54: 227–240.
- [4] Miketa, A., Leo Schratzenholzer (2004) “Experiments with a methodology to model the role of R&D expenditures in energy technology learning processes; first results,” *Ecological Economics* 32: 1679–1692.
- [5] Sayre, R. (2010) “Microalgae: The Potential for Carbon Capture,” *BioScience* 60: 722–727.
- [6] SCHOTT 『藻類の培養』 http://www.schott.com/tubing/japanese/special_glass/pbr/algae_production.html (アクセス 2017/11/19)
- [7] Slade, R. and A. Bauen (2013) “Micro-algae cultivation for biofuels : Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects,” *Biomass and Bioenergy* 53: 29–38.
- [8] United Nation Framework Convention on Climate Change (2015) *Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions*. (FCCC/CP/2015/7) <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/07.pdf> (アクセス 2017/11/19)
- [9] Wilson, M. H., J. Groppo, A. Placido, S. Graham, S. A. MortonIII, E. Santillan-Jimenez, A. Shea, M. Crocker, C. Crofcheck, R. Andrews (2014) “CO₂ recycling using microalgae for the production of fuels,” *Applied Petrochemical Research* 4: 41–53.
- [10] 赤尾健一 (2017) 『2FLC モデルと最適投資』 Mimeograph.
- [11] 環境省 (2015) 『CCS の円滑な導入手法の検討』 <https://www.env.go.jp/earth/ccs/h26mat05.pdf> (アクセス 2017/9/27)
- [12] 企業 tv ホームページ 『2012 年上場、株式会社ユーグレナ～バイオテクノロジーで昨日の不可能を可能にする事業とは?』 <https://kigyotv.jp/news/special163/> (アクセス 2017/11/25)
- [13] 藏野憲秀, 福田裕章, 永久保雅夫, 渥美欣也 (2009) 「微細藻類によるバイオマス生産」 『デンソーテクニカルレビュー』 14: 59–64 <https://www.denso.com/jp/ja/innovation/technology/dtr/v14/10.pdf> (アクセス 2017/11/28)
- [14] 資源エネルギー庁 (2015) 『CO₂ 回収、利用に関する今後の技術開発の課題と方向性』 http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/002_01_00.pdf#search=%27CCUS%27 (アクセス 2017/12/5)
- [15] 大和証券グループ本社 『Case Study 6 株式会社ユーグレナ』 <http://www.daiwa-grp.jp/csr/citizen/support/college/resume006.html> (アクセス 2017/11/19)
- [16] 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省 (2015) 『IPCC 第 5 次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約』 http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf (アクセス 2017/11/19)
- [17] ユーグレナ社公式ホームページ <http://www.euglena.jp/> (アクセス 2017/11/19)