

[論文]

森林生態系マネジメントのためのデジタルツインに基づく 管理会計

皆川 芳輝

名古屋学院大学名誉教授

要 旨

自然資本の生態系サービスは、日々の生活ならびに地球の存続に不可欠である。生態系サービスは自然資本の配当である。最近、自然資本の毀損から配当である生態系サービスが減少している。本論文は、管理会計およびデジタルツインが与える森林生態系サービス投資マネジメントへの影響を考察する。

キーワード：デジタルツイン，森林生態系，自然資本金

Digital twin-based management accounting for forest ecosystem management

Yoshiteru MINAGAWA

Emeritus Professor
Nagoya Gakuin University

1. はじめに

生態系サービスへの投資は、一般的に何世代に渡る投資期間を要し、その結果、投資総額が巨額に達する。さらに自然資本の変化の影響が不確実である場合には、最善の対応策の決定が困難である (Valatin and Price, 2014)。実際に自然資本は、変化の発生および変化の影響について不確実性が高い。本研究は、この問題を取り上げる。

本論文は、自然資本のうち、森林マネジメントに焦点を当て、環境管理会計およびデジタルツインの戦略的有用性を明らかにする。

2. 森林生態系

(1) 生態系サービス

Millennium Ecosystem Assessment (2005) によると、生態系サービスは、次の4つのカテゴリから構成される。すなわち、(i) 供給サービス：食料、水、燃料、木材、繊維など、人間と地球に不可欠な資源を提供するサービス、(ii) 調整サービス：気候調節、洪水防止、防疫、水質浄化など、自然のプロセスを通じて自然環境を保護・調節するサービス、(iii) 文化的サービス：レクリエーション、美的、精神的な恩恵を提供するサービス、(iv) 基盤サービス：他の3つの生態系サービスの持続的機能を可能にする支援サービス（植物の光合成や土壌形成など）。これらの生態系サービスは、言わば自然資本からの配当である。しかしながら、近年において自然資本の枯渇が激しくなり、その配当も減少傾向にあると言われている (Woetzel *et al.*, 2020)。

(2) 森林生態系

森林は地球上で最大かつ最も多様な生態系の1つであるため、森林が生態系サービスに及ぼす影響は重要である (Döllner *et al.*, 2023)。本項では、森林生態系サービスが地球の存続に対していかなる貢献を果たすかを明らかにする。森林生態系は、以下のサービスを提供している。

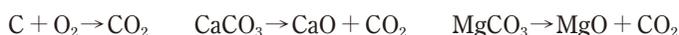
- ①供給サービス：森林から採取され、利用または販売される身近で具体的かつ直接的な生産物の供給である (SCION, 2017)。これには、繊維、燃料、非木材林産物（食料、動物、工芸品など）、遺伝資源、水の供給、生物多様性などが含まれる (Louise *et al.*, 2015)。
- ②調整サービス：気候調節、炭素隔離、水質、土壌保護、洪水防止、病虫害防除などが含まれる (Louise *et al.*, 2015)。
- ③文化的サービス：非物質的な社会的・文化的便益は、森林によってもたらされる。これには、レクリエーションの機会、美的な楽しみ、精神的な豊かさなどが含まれる (SCION, 2017)。
- ④支援サービス：これは、上記3つのサービスの提供を支えるサービスである。これには、総一次生産（光合成による二酸化炭素の固定が、植物の成長と酸素生産、土壌形成、栄養循環、水循環、生物多様性を生み出す）などが含まれる (Louise *et al.*, 2017)。

3. 環境管理会計

(1) 自然環境毀損削減・防止の経済的効果計算

本項では、自然環境毀損につながる原因のうち、二酸化炭素排出に焦点を当て、その削減の経済的効果計算方法を考察する。

二酸化炭素生成の化学式は次の通りである (Qi, 2022)。



したがって、二酸化炭素の経済的価値は、上の化学式に現れる炭素などの化学物・元素のそれによって決定される。しかしながら、炭素や炭酸カルシウムの価額算定には困難が伴う。

二酸化炭素削減効果を貨幣的に表現する方法は、社会的費用と二酸化炭素削減費用に大別できる。すなわち、Damage cost approach および Abatement cost approach である (Sundqvist, 2004, p.1755; 川島, 2015年, 4頁)。前者は、社会が二酸化炭素排出から被った損害を金銭評価する (Sundqvist, 2004, p.1755; 川島, 2015年, 4頁)。これは、二酸化炭素排出の社会的費用である。この方法は、二酸化炭素排出削減の経済的効果を、二酸化炭素排出に起因する社会的費用に基づいて排出削減量に相当する金額を求めて、二酸化炭素排出削減の経済的効果とする。後者は、二酸化炭素排出に起因する社会的・経済的損失を軽減および防止するのに必要な費用による (Sundqvist, 2004, p.1755; 川島, 2015年, 4頁)。

(2) 社会的費用

① 会計における社会的費用の内部化に関する研究

会計における社会的費用の認識・測定・表示に関する最近の研究の1つとしては、岡・呉 (2023年) があげられる。岡・呉 (2023年) は膨大な国内外の文献レビューを行った。岡・呉 (2023年) による研究の1つは、1960年代から80年代のわが国『原価計算基準』に基づく社会的費用会計である。その研究の視座は、社会的費用の原価性の有無が社会的コスト (その負担が社会全体に転嫁される原価) と企業が負担する私的コストの不一致を引き起こす点にある。

さて本研究は管理会計の役割を考察する。管理会計では、社会的費用の分析が重要になる。とりわけ、環境管理会計の実践では、意思決定への社会的費用の導入が不可欠である。たとえば、牧戸 (2005年) および國部 (2012年) は、社会的費用と私的費用のトレードオフ関係の分析を含む管理会計システムを提案している。國部 (2012年) は、企業コスト、消費者が負担するコストおよび社会的コストから成るフルコスト分析の重要性を主張した。

社会的費用については、その計算方法が課題になる。これが以下の考察テーマである。

② 社会的費用の計算方法

GHG排出の原因は、多種多様であるため、その社会的費用の計算には統合評価モデル (Integrated Assessment Models) が用いられる (山口, 2022年)。Rennert他 (2022) は、統合評価モデルに基

づく社会的費用計算方法を提示した。これは次の4つの手順から成る。すなわち、(i)一定の将来における人口およびGDPを予測し、かかる社会経済的变化が二酸化炭素排出量に及ぼす影響を及ぼすかを予測する。(ii)将来の二酸化炭素排出増減が及ぼす気候への影響を予測する。すなわち、CO₂はいつまで大気中に残留するか。海面や気温の上昇速度はどの程度か。いかなるタイプの異常気象が発生するか。(iii)このような変化それぞれの影響を金額的に計算し、それらを合計して経済的被害の総額とする。(iv)一定の割引率に基づいて各年の被害予測総額から現在価値合計を計算する。

上述の二酸化炭素の社会的費用算出は、二酸化炭素排出による異常気象の被害に焦点を当てる。一般的に社会的費用つまり被害の金額がいくらかについては、どのような被害を当該の社会的費用計算に含めるかによって異なる。すなわち、社会的費用の評価額は、計算に含める被害の範囲いかにによって決定的に異なる。この点に関し、Cho (2021)は、二酸化炭素排出の社会的費用に含める被害の範囲について、二酸化炭素排出に起因する天候変動が及ぼす農業への影響、海面上昇による被害、異常な温暖化によるエネルギー超過使用、温暖化による生産性の減少をあげている。

社会的費用の効果は、自然環境毀損などの社会問題が引き起こす被害・損害の金銭評価を社会全体の共通の目標として全構成員に提示することにより、社会問題の軽減に向けた行動を促すとともに、社会問題解消のための政策実施に対するグループメンバー間の社会的合意形成を促進することにある。

社会的費用の効果は、特定の社会問題を解決するために、それに起因して社会全体が被る損害額を社会に示して、社会を構成する全員に当該の社会問題の軽減に向けた行動を促すことにある。したがって、二酸化炭素排出の社会的費用は、排出削減に関する社会全体の共通目標の役割を果たす。これにより、二酸化炭素排出削減のための社会経済的政策実施における社会の合意形成を促進する。これは、企業におけるGHG排出削減などの社会的な環境問題の解決に向けて、いかなる活動をどのように実施するかに関する経営意思決定においても当てはまる。すなわち、企業は、特定の社会問題に起因する社会的費用の単位当たり金額に自社の事業活動量を乗じて自社の社会的費用総額を計算する。この金額は企業における社会問題解消政策決定に不可欠である。

(3) 環境会計情報の計算目的

企業活動が及ぼす環境への影響を貨幣的に計算するにあたり、適切な計算方法は目的によって異なる(PUMA, 2010)。経営活動による環境への影響を貨幣的に計算する目的には、次の2つが含まれる。第1は、企業が環境に与えた影響を企業内外の全ての利害関係者と共有することである。第2は、企業における効果的かつ効率的な環境マネジメントの実施に関する意思決定情報の作成である。以下では、これら2つの目的を考察する。

① プーマ (PUMA) の環境損益計算書

企業が環境に与えた影響を社会に説明するために (accountability) 作成し公表する会計報告書の1つは、環境損益計算書である。スポーツウエアメーカーのプーマ (PUMA) の「環境損益計算書 (E P&L)」は有名な自然資本金会計報告書の1つである。PUMAのE P&Lは、同社の経営活動を引き金として社会で発生するコストを示す (PUMA, 2010)。したがって、その環境損益計算書作成において

使用される会計情報は社会的費用である (PUMA, 2010)。PUMA の E P&L は、地域の人々が特定の環境問題によって被った経済的損失を測定・表示する。PUMA (2010) によれば、abatement cost は、社会への影響の測定値ではなく技術革新の評価値であるため、環境損益計算書作成目的に対して適切でない (PUMA, 2010)。

プーマ社の2010年環境損益計算書において公開された同社の経営活動による環境影響項目は、以下の通りである (PUMA, 2010)。

- (i) 水資源の利用: 企業が経営活動によって水を消費することは、社会が利用できる水の量を減らし、水から得る利益を減らすことになる。
- (ii) GHG 排出量: GHG 排出は世界の至る所で気候変動を引き起こす。PUMA における GHG 排出は、発電および輸送における化石燃料の燃焼、土地利用の転換および牧畜による排出から生じる。
- (iii) 土地利用の転換: 生物多様性に富んだ自然地域は、生態系の持続的利用への貢献、レクリエーションの機会の提供、および文化的・精神的な豊かさの提供など、社会に不可欠なサービスを提供している。しかしながら、建築物の建設・使用および原材料の生産に伴う土地の転用は、自然豊かな土地を希少なにし、その結果、土地が社会に提供できるサービスを減少させる。
- (iv) 他の大気汚染: 大気汚染物質には、微粒子、二酸化硫黄、アンモニア、窒素酸化物、一酸化炭素、揮発性有機化合物 (VOC) などが含まれ、主に化石燃料の燃焼や木材の乾燥・加工によって排出される。
- (vi) 廃棄物: 廃棄物の処理が及ぼす環境への影響は、処理方法に依存する。

プーマは、環境データの測定をいくつかの仮定の元で行った (PUMA, 2010)。本研究は、デジタルツインが環境データの直接的な測定に貢献することを明らかにする。

②環境管理会計の役割

環境会計情報作成の第2の目的は、環境管理会計の役割である。企業は、経営がもたらす環境へのマイナスの影響を削減し社会的費用の発生を回避するために、環境保全計画を設定する。そこでは、いかなる資産を導入し、それをどのように使用するかを決定する。環境投資および環境保全活動の計画策定では、各代替案のコストおよび効果に関するデータが不可欠であり、これに基づく環境活動による改善の程度とその活動コストのトレードオフ分析が重要である。

費用対効果分析の有効性の程度は、意思決定問題が完全なる解決に至るまでの期間に依存する。一気に解決できるのではなく、長期的かつ継続的な改善計画の策定と実行が必要な意思決定問題は、コストと効果のトレード分析が重要である。たとえば、二酸化炭素排出削減や森林創造には世代を超えた対応が必要になる。

4. 森林生態系投資マネジメント

(1) 費用対効果分析に基づく森林投資計画の策定および実施

本節は、森林保全投資マネジメント方法を検討する。造林 (樹木を植え育てて森林を造る) への投

資は、世代を超えて長期に渡る投資期間を要し、それに応じて投資総額も巨額に達する。さらに、森林の変化の影響は不確実である (Valatin and Price, 2014)。このような投資条件下では、各年度において費用対効果比率の高い森林投資計画の策定および実施が重要である。すなわち、毎年度の森林投資計画策定においては、森林投資期間全体の目的を投資期間中に達成できるように、その全体目的から分解して各年度の森林保全目標を設定し、続いて森林投資成果に関する年度目標を最善の費用対効果比率にて達成可能な各年度の森林保全活動実行計画案を決定する。さらに、各年度期中においては、年度別の森林投資成果および保全活動に対する投下資金額の両目標の達成、つまり目標の年度別費用対効果比率達成に向けて森林投資を管理・統制 (マネジメント・コントロール) することが必要である。

以下では、持続的な森林に向けて資本投下を行うか否かに関する意思決定および森林投資計画の策定・実施に関する意思決定を考察する。

①森林投資 (自然資本投資) への着手決定

自然資本毀損の社会的費用に対する社会全体での共有が進むに応じて、企業の3つの持続的価値の中で、環境問題に関連する社会的価値および環境的価値が及ぼす経済的価値への影響は大きくなる。たとえば、将来において積極的な自然資本投資の実施が売上高に無視できない程に重要な影響を与えるケースも現れる可能性が高い。その結果として、企業は自然資本投資を検討することが必要になる。

森林投資など自然資本投資実施の決定要因の1つとしては、上述の自然資本の生態系サービスがあげられる。たとえば、樹木を原材料として使用する場合には、その入手見込みいかんによって、生産・販売計画が変化し、その影響を通じて、最終的に稼得利益が決定的に異なったものになる。かくして、自然資本投資の経済性計算には、生態系サービスの変化を予測し、それが及ぼす企業経営への影響を決定し、その影響を財務的に評価することが重要である。かかる自然資本の会計情報作成により、自然資本投資の経済性計算が実施可能になる。

企業経営が及ぼす自然資本の生態系サービスへの影響の計算に関し、先に取り上げたプーマ社の環境損益計算書を考察する。そこにおける「企業経営が及ぼす環境への影響の範囲」と「その測定方法」は、次の通りである (PUMA, 2010)。

- ・気候変動：自社のGHG排出量
- ・水資源使用：自社の使用量 (この使用量だけ民生用が減少したと捉える)
- ・生物多様性および生態系サービスの毀損：工業用に転換した土地面積 (この面積だけ民生用が減少したと捉える)
- ・高濃度大気汚染ガス酸性雨：微粒子, アンモニア, 二酸化硫黄, 窒素酸化物, 揮発性有機化合物 (VOC), 一酸化炭素のトン数
- ・廃棄物の埋立および焼却による浸出水と排水の影響：埋立および焼却廃棄物トン数

これらの測定値には、それぞれの自然環境毀損の単位当たり社会的費用を乗じて、社会的費用を計算する (PUMA, 2010)。

②費用対効果分析

費用対効果分析の評価は、目標数値単位当たり費用による (Valatin and Price, 2014)。費用対効果分析の一般的な適用方法は、まず投資成果に関する目標値を設定し、次に、これを達成する活動について実行計画案を作成する。さらに、各代替案の費用を計算し、最後に費用対効果指標に基づいて最善の代替案を選択する。すなわち、費用対効果分析は、目標を達成する活動内容と活動費用のトレードオフを解決する (Valatin and Price, 2014)。

(2) 二酸化炭素排出削減投資マネジメントの事例

本項は、文献研究に基づいて二酸化炭素排出削減投資マネジメントの実例を2つ考察する。

① Laemel and Milikowsky (2016) : イェール大学における炭素排出削減プロジェクト

Laemel and Milikowsky (2016) は、イェール大学 (Yale University) における各キャンパスの二酸化炭素排出削減に向けての取組みを考察している。それによると、同大学の各キャンパスは、二酸化炭素排出量に対して課金される。その金額は当該年度の実際排出量に社内炭素価格を乗じて計算した金額である。社内炭素価格は社会的費用から算出された。イェール大学の排出に関するマネジメント・コントロールシステムでは、本部に集められた各キャンパスからの課金合計は一定の方法でキャンパスに返還される。その主な返還方法は以下の通りである。

- (i) 第1の方法 (Target) : この方法は、各キャンパスに対してベースラインより1%削減するという削減目標を課し、この削減目標値を上回る、または下回る排出量に対して、それぞれ二酸化炭素排出量1トン当たり40ドルを受け取る、または支払う。
- (ii) 第2の方法 (Redistribution) : この方法の適用を受けるキャンパスは、グループ全体のベースラインからの排出量の変化率 (削減率) と比較され、この値を上回るか下回るかの実績に基づいてリベートを受け取る、または支払う。
- (iii) 第3の方法 (Investment) : この方法は、各キャンパスの自助努力によるエネルギー対策への支出に対して、基準炭素料金の20%の補助金を付与する。

② Valatin and Price (2014) : 森林の二酸化炭素排出削減プロジェクトの費用対効果分析

Valatin and Price (2014) は、森林二酸化炭素排出削減プロジェクトにおいて次の計算式を用いた。本年度の費用対効果値 = (本年度の排出削減活動から発生した費用 - 昨年度あるいは基準年度の排出削減費用) ÷ (本年度の削減量 - 昨年度あるいは基準年度の削減量)

上式は、削減目標を達成するのに必要な追加的な費用を追加的な削減量で除した数値である。投資計画案決定においては、できるかぎり多くの削減方法を企画し上述の費用対効果指標を計算し、全代替案の中から費用対効果比率の最も高い案を選択する。さらに、投資実行後は、この比率と比較して投資を評価する。

Valatin and Price (2014) によれば、二酸化炭素排出削減費用の計算は、状況に応じて社会的費用あるいは削減活動から発生した費用のいずれかを採用する。

5. 森林デジタルツインの有用性

本節は、Buonocore *et al.* (2022) に基づいて森林デジタルツインの特徴を明らかにし、それを通じてデジタルツインに基づく森林投資計画の策定および実施がいかなる便益を生み出すかについて考察する。

(1) 樹木デジタルツイン構築

Buonocore *et al.* (2022) による森林デジタルツインは、樹木を基本要素とする。Buonocore *et al.* (2022) によれば、樹木のデジタルツインは、次の3つのモジュールから成る。

第1モジュール：デジタルツインを仮想空間に構築するためには、まず、いかなる実物（樹木）データが必要であるかを解決しなければならない。この問題は、森林マネジメントにおいてリアルタイムで観察 (monitoring) する必要がある樹木の状態に関する変数（データ）が何かに依拠する。Buonocore *et al.* (2022) によれば、樹木デジタルツイン構築に向けて必要な実物（樹木）データは次の通りである。

- (i) 樹木要因：樹木の機能的・構造的な安定性、葉の照射温度、光のスペクトル成分、肥大成長、根茎の成長、樹液の流れ、および揮発性有機化合物
- (ii) 土壌要因：水分、呼吸（土壌中の微生物と植物の根の細胞呼吸による二酸化炭素の排出）、養分、および土壌微生物
- (iii) 気候要因：空気の質、気温、湿度、および風速

第2モジュール：上述の樹木の状態に関するデータを測定し、それをデジタルツインに対応づける (mapping) ために樹木およびその周辺環境の適切な場所にデジタルソケットを設置する。デジタルソケットは、樹木等のデータを測定し、デジタルツインに対応付ける。これによって、デジタルツインは仮想空間と現実空間の双方向かつリアルタイムな統合を可能にする。デジタルソケットには、樹冠の光のスペクトル成分を捕捉する分光計、樹形計測器センサーなどがある (Buonocore *et al.*, 2022)。

デジタル技術に基づく森林データ測定方法について、Döllner *et al.* (2023) は次のデジタル機器をあげている。すなわち、①Light Detection and Ranging (LiDAR)：レーザービームまたはパルスを照射し、その反射を検出してセンサーとターゲット表面の距離を測定し、物体表面の3次元スキャンを作成する。②レーダー・センサー：電波を放射し、その反射を検出して物体の位置を測定する。③画像センサー：対象の表面から反射された電磁波を捉えるパッシブセンサー (passive sensor, 人工的な信号源を必要としないセンサー)。

第3モジュール：バイオマス生産や樹木の光合成など、樹木の物理的・生理的プロセスの同期化されたサイバー・フィジカル (cyber-physical) モデルを構築する。

(2) 森林デジタルツインに基づく森林生態系マネジメント

(Buonocore *et al.*, 2022) によれば、森林デジタルツインは、樹木デジタルツインと同様に上述の3

つのモジュールから構成される。森林デジタルツインが現実空間から獲得する森林の状態に関するデータは、次の通りである。すなわち、野生生物、草食動物、天候、大気汚染、大気ガス、エネルギー交換、河川・湖沼・湿地帯・海洋などの水域に水を流出させる土地の状況、自然攪乱（森林景観の変化に関する特徴の描写）、林分の林冠層の変化（高木や低木など立木構成状態を空間分布として表したものの変化の状況）、および種多様性である（Buonocore *et al.*, 2022）。

森林デジタルツインは、現在の森林の状態をデジタル情報に変換し仮想空間に双子の森林を構築する。仮想的な双子と現実世界の双子は同期化されたCPS（Cyber-Physical System）であり、両者の間では双方向かつリアルタイムなデータ交換が継続的に行われる。これにより、森林デジタルツインは、現在の森林の状態を継続的に観察・モニタリングし、さらに森林の現在のデータに基づいてシミュレーションを行い、森林の将来の状況を予測する。

（3）デジタルツインによる森林炭素隔離の促進

本研究は、森林デジタルツインがどのように森林の炭素隔離強化に貢献するかを明らかにする。これは森林生態系サービスの1つである。その森林炭素隔離は、森林から大気への炭素排出を抑制する。以下では、前項で示した森林の実物データ（実際の森林の状態に関するデータ）に基づいて森林デジタルツインがいかにして炭素隔離を促進するか、その諸経路を明らかにする。

（i）ガス交換

森林と大気の間では種々のガス交換が行われており、相互に影響を及ぼし合っている。例えば、二酸化炭素は光合成によって森林に吸収されているが、その一方で、動植物などの呼吸によって二酸化炭素は森林から放出される（森林総合研究所, 2020）。このような森林におけるガス交換を正確に把握することは、森林炭素隔離強化に向けての施策作りの基礎となる。

（ii）森林攪乱

台風や山火事などで森林が大きく破壊されると、樹木が倒れたり枯れたりした場所に新たな空き地ができる。これは炭素隔離に悪影響を及ぼす。二酸化炭素の大気放出を減らすためには、森林デジタルツインを利活用して実際の森林の状態をリアルタイムに観察・監視し、それを通して攪乱された場所を速やかに修復することが重要である（Ontl *et al.*, 2020）。

（iii）多種多様な樹木の種目（species diversity）

山下他（2013）は、生物多様性が生態系の機能向上に及ぼす本質的なメカニズムとして、次の2つをあげている。1つは、ある種が存在することで別種も資源を利用できるようになった結果、生態系の中で、より高い機能が発揮されるというメカニズムである。2つ目は、生物多様性が増加するにしたがい機能的に優れた種が群集に含まれる可能性が高くなり、さらにその種が優占的になることで生態系の機能が増加するというメカニズムである。

上述の2つのメカニズムのうちいずれが適切であるかを決定するためには、デジタルツインを利活用して、森林のリアルタイムな観察の継続およびシミュレーションによる森林の将来の予想が重要である。

(iv) 地下水のデータ

土壌から植物ならびに大気に至る連続体において水分が不足すると、光合成が阻害される。したがって、デジタルツインを利活用して、リアルタイムで継続的な水循環の観察が重要である。

(v) 立木構造

1haの森林(樹木)が1年間に吸収する二酸化炭素量の計算式は、次の通りである(林野庁, 2021年)。

$$\begin{aligned} & \text{森林 1ha 当たりの年間二酸化炭素吸収量 (t-CO}_2\text{/年・ha)} \\ & = \text{森林 1ha 当たりの年間幹成長量 (m}^3\text{/年・ha)} \times \text{拡大係数} \times (1 + \text{地下部比率}) \\ & \quad \times \text{容積密度 (t/m}^3\text{)} \times \text{炭素含有率} \times \text{CO}_2\text{ 換算係数} \end{aligned}$$

この式から、幹の太い高木ほど炭素吸収量が多いことがわかる。したがって、炭素貯留量を正確に把握するためには、デジタルツインに基づくリアルタイムベースの森林構造状態データのモニタリングと観察が不可欠である。

6. デジタルツイン駆動マネジメントコントロールの有用性**(1) デジタルツインの特徴****① スマート (“smart”)**

Grievs (2019) によれば、デジタル時代に市場に供給される製品・サービスは、これまでのそれにはないスマート性という差別化された特徴を有する。スマートとは、何らかの状態に対する感覚が起ることであり、その感覚は望ましい状態との比較の下で評価される (Grievs, 2019, p.183)。具体的にスマートであることは、次の3つの部分から成る。すなわち、(i) 対象の現在の状態を測定して認識・把握する。(ii) 現状を望ましいそれと比較する。(iii) 現状を望ましい状態に近づける (Grievs, 2019, p.183)。Grievs (2019) の「スマート」概念に基づけば、スマートな製品は、その機能上の現状を自動的にユーザーに知らせ、不具合が生じている場合には警告を発し、その不具合を修復する。

スマートな製品・サービスおよびビジネスの構築を可能にするデジタル技術の1つは、デジタルツインである。これは、現実世界にあるモノ・システム・プロセスなどをコンピュータ上で忠実に再現する技術である。この仮想的な双子は、IoTなどを使用して現実世界の対象の内部および外部環境から収集したデータをデジタル化した情報に基づいて構築される (Grievs, 2019)。

Grievs (2014) は、次の要素から成る3次元のデジタルツインモデルを提案している。すなわち、(i) 現実世界にある物理的対象(物理的ツイン)、(ii) 仮想世界にある仮想的対象(デジタルツイン)、(iii) リアルタイムに両者を接続するためのデータ・情報統合。デジタルツインの特徴の1つは、物理的ツインと仮想的ツインの間におけるデジタル化されたデータ・情報の交換がリアルタイムかつ双方向で行われることである。これにより、物理的ツインと仮想的ツインは、継続的に同期化される (Segovia and Garcia-Alfaro, 2022)。この同期化は、デジタルツインのシュミレーション結果および演算結果がリアルタイムベースで物理的ツインにフィードバックされ記録されることを意味する。

(2) シミュレーションに基づくデジタルツイン (Simulation-Based Digital Twins)

① 仮想的センサー (virtual sensor)

センサーには2種類ある。1つは物理的なセンサーである。これは、機械のように現実の空間に存在する資産などに設置される。もう1つは仮想的センサーである。仮想的センサーは、物理的センサーやハードウェアセンサーとは対照的に、ソフトウェアベースのセンサーである。仮想的センサーは、異種の物理的センサー群から感知されたデータを組み合わせることで、物理的に測定できない抽象的な状態を間接的に測定することができる (Kabadayi *et al.*, 2006)。仮想的センサーは、デジタルツインのデータソースとしても機能する (Martin *et al.*, 2021)。デジタルツインシステムを通じて仮想的センサーを活用する方法の1つは、物理的センサーから受信したデータを使用して、マルチボディシステムに基づく動的シミュレーションを実行することである。

このように、デジタルツインは、意思決定・シミュレーションモデルを起動するために2種類のデータを利活用する。すなわち、デジタルツインは、物理的センサーに基づいて、現実世界に存在する物理的ツインおよびその周辺環境からデータを受信するのみならず、仮想的センサーを用いて当該のデジタルツインならびに他のデジタルツインが実行したシミュレーションおよび演算の結果 (データ) をも受信する。次に、物理的センサーと仮想的ツインから獲得したデータに基づくデジタルツイン・シミュレーションは、いかにして企業の競争優位に貢献するかを明らかにする。

② シミュレーションに基づくデジタルツインの有用性

本項は、Verdugo-Cedeño *et al.* (2023) に基づいて、シミュレーションに基づくデジタルツインの戦略的有用性を示す。

デジタルツインは、現実世界の物理的ツインとの間でリアルタイムかつ双方向のデータ交換を継続的に行う。さらに、デジタルツインは、物理的ツインの将来にわたる状況態様の変化を予測するため、物理的ツインと対応付けされている変数に基づいて、意思決定モデルを構築するとともに物理的ツインのリアルタイム・データを用いてシミュレーションを行う (Tan *et al.*, 2019)。加えて、デジタルツインは、仮想世界においてリアルタイムベースで物理的ツインの状況を監視し、物理的ツインの状況とシミュレーション予測の比較を行う。これにより、物理的ツインの状況が予測からかい離している場合、その是正措置を直ちに講じることが可能になる (Verdugo-Cedeño *et al.*, 2023)。

③ デジタルツイン・シミュレーションに基づく差異分析 (予測値と実際値の比較)

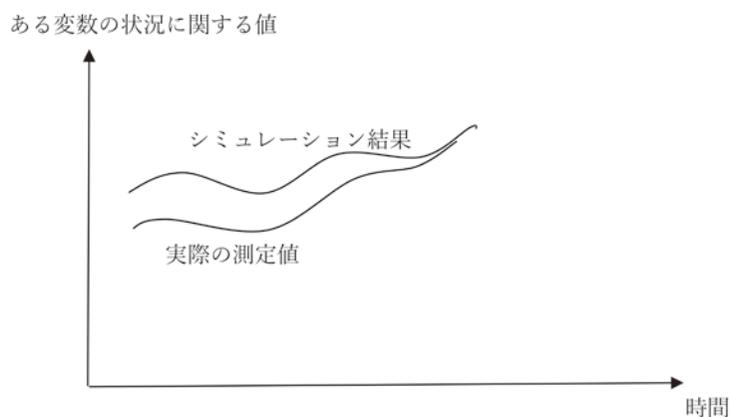
Tan *et al.* (2019) に基づいて、デジタルツインが物理的ツインに関するリアルタイム・データを継続的に受信する時間間隔とデジタルツインが当該のデータに基づいて実行するシミュレーション結果の出力の時間間隔は、同じであるとする。これは通常においてあり得る。ここでは、その時間間隔をシミュレーション時間間隔と呼ぶ。

デジタルツインに基づくモデルベース・シミュレーション手順は、次の通りである。

- (i) デジタルツインは、現実世界に設置したセンサーなどから受信した物理的ツイン (管理対象) に関する現在のデータに基づいて、管理対象の将来の状況を予測するために、1回目のシミュレーションを実行する。
- (ii) シミュレーション時間間隔経過時点において、次の2つの事象が同時に起こる。すなわち、(a)

デジタルツインが1回目のシミュレーション結果を出力・記録すること、(b) デジタルツインが物理的ツインの更新されたリアルタイム・データを受け取り、記録するとともに、それを用いて2回目のシミュレーションを実行することである。これらにより、シミュレーション時間間隔経過時点における管理対象のシミュレーション結果（予測値）と実際値の差異分析を、短サイクルで実施できる。

図表は、上述のデジタルツインに基づく差異分析の概念を表す。同図は、シミュレーションによる予測値（目標値）に実際値が近づくケースを示す。



図表 デジタルツインに基づく差異分析

注1) 物理的ツインの観察はリアルタイムに行うため、実際の測定値もリアルタイムに得られるとする。

注2) デジタルツインが物理的ツインのリアルタイム・データを継続的に受信する時間間隔とデジタルツインのシミュレーション結果の出力の時間間隔は、同じであるとする。

(出所) Verdugo-Cedeño *et al.* (2023) に基づく

④ デジタルツインによる GHG 排出量測定

GHG 削減を促進するためには、その排出量の把握が不可欠である。自社の GHG 排出量を計算する方法は、次の2つに大別できる。第1は、GHG 種類別の排出係数を用いる方法である。排出係数は、GHG 種類ごとに様々な事業活動での単位生産量・消費量あたりの排出量を表す数値である。排出量の計算式は、事業活動量×排出係数である（環境省ホームページ，2012）。

第2の GHG 排出量計算方法は、直接的測定である。これにはデジタル技術が威力を発揮する。以下では、Zhang and Ji (2019) のデジタルツインに基づく二酸化炭素排出量測定モデル研究を取り上げる。

Zhang and Ji (2019) は、バーチャルな工場モデルを構築するために、カーボンセンサーで収集した排出データ、機械設備の状態に関するデータ、加工品の状態に関するデータを現実世界と仮想空間の相互で論理的に対応づけた。このシステムは、バーチャル工場に現実空間のリアルタイムのデータを再現する。デジタルツインが仮想空間に投影する現実空間のデータは常に更新される。このシステ

ムは、実際の工場において二酸化炭素排出検知センサーネットワークが構築されている。したがって、そのネットワークの双子が仮想空間に再現される。これにより、システムユーザーは工場の至る所の二酸化炭素の排出状況を継続的に監視できる。さらに、現実の機械設備の運転状況エネルギー消費状況に関するデータがリアルタイムにバーチャル工場に再現され続ける。デジタルツインは、現実世界からのデータと仮想空間におけるシミュレーション結果に基づいて、二酸化炭素排出の予想を行う。このように、デジタルツインおよびセンサーは、二酸化炭素排出のリアルタイムの監視と予想を可能にする (Zhang and Ji, 2019)。

7. おわりに

森林デジタルツインは、実物の森林（物理的ツイン）とそのデジタルツインの間で継続的にリアルタイムの双方向のデータ交換を行い、これにより、仮想空間においてシミュレーションを実行し、目標の対象の将来の状態を予測する。かかる森林デジタルツインが及ぼす森林生態系マネジメントへの影響をGrieves (2019) の研究に則して考察するならば、森林デジタルツインはスマートな森林マネジメント手法と位置づけられる。森林デジタルツインのスマート性をさらに高めるためには、環境管理会計に基づく環境データの金銭評価が必要である。

参考文献

- 會田義雄 (1959年) 「ソーシャル・コストの原価性」『企業会計』第11巻第4号, 66-71頁。
- 植岡照二・呉綺 (2023年) 「サステナビリティ会計の構築に向けた社会的費用の内部化」関西大学商学論集, 第67巻第4号, 1-14頁。
- 川島雄一郎 (2015年) 「地球温暖化対策の評価～CO₂に値段はつけられるか?」国土交通政策研究所報, 第57号, 2-7頁。
- 環境省HP (2012年) 「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度」(<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/>, 2024年10月10日閲覧)。
- 國部克彦 (2012) 「環境管理会計」(國部克彦・伊坪徳宏・水口剛『環境経営・会計 (第2版)』所収, 有斐閣アルマ), 25-55頁。
- 森林総合研究所 (2020年) 「森の中の土壌ガス観測」(<https://www.ffpri.affrc.go.jp/snap/2020/4-gasu.html>, 2024年10月10日閲覧)。
- 牧戸孝郎 (2005年) 「論壇 管理会計の新たな地平—戦略管理会計への期待」『企業会計』第57第9号, 1220-1227頁。
- 山形休司 (1981年) 「ソーシャル・コストの原価性」(岡本清編『原価計算基準の研究』所収, 国元書房), 63-72頁。
- 山口臨太郎 (2022年) 「気候変動の社会的費用」地球環境, 27巻2号, 155-160頁。
- 山下聡, 岡部貴美子, 佐藤保 (2013年) 「森林生態系における生物多様性と炭素蓄積」森林総合研究所研究報告, 12 (1), 1-21頁。
- 諸井勝之助 (1954年) 「社会的コストと私的コスト」『企業会計』第6巻第6号, 41-45頁。
- 林野庁 (2021年) 「森林による二酸化炭素吸収量の算定方法について」(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/attach/pdf/kyushuryosantei-2.pdf>, 2024年10月10日閲覧)。

- Buonocore, L., Yates, J., and Valentini, R. (2022). A Proposal for a Forest Digital Twin Framework and Its Perspectives, *Forest*, 13(4) (<https://doi.org/10.3390/f13040498.48>, 2024年10月10日閲覧).
- Cho, R. (2021). Social Cost of Carbon: What Is It, and Why Do We Need to Calculate It? *State of the Planet* (<https://news.climate.columbia.edu/2021/04/01/social-cost-of-carbon/2021>, 2024年10月10日閲覧).
- Döllner, J., de Amicis, R., Burmeister, J.-M., and Richter, R. (2023). Forests in the Digital Age: Concepts and Technologies for Designing and Deploying Forest Digital Twins, in *The 28th International ACM Conference on 3D Web Technology* (Web3D '23), October 09–11, 2023, San Sebastian, Spain. ACM, New York, NY, USA (<https://doi.org/10.1145/3611314.3616067>, 2024年10月10日閲覧).
- Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, White paper, 1–7 (<https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>, 2024年10月10日閲覧).
- Grieves, M., and Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Kahlen, J., Flumerfelt, S., and Alves, A. (eds), Springer Cham, pp.85–113.
- Grieves, M. (2019). Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins, in *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, Flumerfelt, S., Schwartz, K. G., Mavris, D., and Briceno, S. (eds), American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 175–200.
- Kabadayi, S., Pridgen, A., and Julien, C. (2006). Virtual Sensors: Abstracting Data from Physical Sensors, in *Proceedings-WoWMoM 2006: 2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp.587–592 (<https://doi.org/10.1109/WOWMOM.2006.115>, 2024年10月10日閲覧).
- Laemel, R., and Milikowsky, J. (2016). *Yale University's Carbon Charge: Preliminary Results from Learning by Doing* (https://carbon.yale.edu/sites/default/files/files/Carbon_Charge_Pilot_Report_20161010.pdf, 2024年10月10日閲覧).
- Louise, S., Duncan, R., and Kevin, W. (2015). *Ecosystem Services and Forest Management*, Forestry Commission, Edinburgh. (<https://cdn.forestresearch.gov.uk/2015/08/fcrn020.pdf>, 2024年10月10日閲覧).
- Martin, D., Kuhl, N., and Satzger, G. (2021). Virtual Sensors. *Business & Information Systems Engineering*, 63(3), pp.315–322.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Island Press, Washington, DC (<https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>, 2024年10月10日閲覧).
- Ontl, T. A., Janowiak, M.K., Swanston, C.W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., Mccarthy, L., Patch, N. (2020). Forest Management for Carbon Sequestration and Climate Adaptation, *Journal of Forestry*, 118(1), pp.86–101 (<https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062Quick>, 2024年10月10日閲覧).
- PUMA (2010). *PUMA's Environmental Profit and Loss Account for the year ended 31* (<http://danielsotelsek.com/wp-content/uploads/2013/10/Puma-EPL.pdf#:~:text=able%20to%20present%20the%20initial%20results%20of%20the%20first%20ever>, 2024年10月10日閲覧).
- Qi, H. (2022). Cost Accounting and Benefit Evaluation of Carbon Emissions in Cement Enterprises Based on Cluster Analysis, *Proceedings of the 2nd International Conference on Information, Control and Automation, ICICA 2022*, December 2–4, Chongqing, China (<https://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.2-12-2022.2327978eai.2-12-2022.2327978>, 2024年10月10日閲覧).
- Rennert, K., Errickson, F., Prest, B. C. Rennels, L., Newell, R. G., Pizer, W., Kingdon, C., Wingenroth, J.,

- Cooke, R., Parthum, B., Smith, D., Cromar, K., Diaz, D., Moore, F. C., Müller, K., Plevin, R., J., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Sheets, H., Stock, J. H., Tan, T., Watson, M., Wong, T. E., and Anthoff, D. (2022). Comprehensive Evidence Implies a Higher Social Cost of CO₂, *Nature*, 610, pp.687–692. (<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05224-9>, 2024年10月10日閲覧).
- SCION(2017). *Forest ecosystem services* (<https://www.nzfoa.org.nz/resources/file-libraries-resources/environment/factsheets/613-ecosystems/file>, 2024年10月10日閲覧).
- Segovia, M., and Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, Modeling and Implementation of Digital Twins, *Sensors*, 22, 5396 (<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/14/5396>, 2024年10月10日閲覧).
- Sundqvist, T. (2004). What Causes the Disparity of Electricity Externality Estimates? *Energy Policy*, 32, pp. 1753–1766.
- Tan, Y., Yang, W., Yoshida, K., & Takakuwa, S. (2019). Application of IoT-aided simulation to manufacturing systems in cyber-physical system, *Machines*, 7(1), 2. (<https://doi.org/10.3390/machines7010002>, 2024年10月10日閲覧).
- Valatin, G. and Price, C. (2014). How Cost-Effective Is Forestry for Climate Change Mitigation? in *Challenges and Opportunities for the World's Forests in the 21st Century*. Fenning, T. (ed.), Springer, pp.297–339.
- Verdugo-Cedeño, M., Jaiswal, S., Ojanen, V., Hannola, L., and Mikkola, A. (2023). Simulation-Based Digital Twins Enabling Smart Services for Machine Operations: An Industry 5.0 Approach, *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(20), pp.6327–6343 (<https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2254607>, 2024年10月10日).
- Weiskopf, S. R., Isbell, F., Arce-PlaM. I., Di Marco, M., Harfoot, M., Johnson, J., Lerman, S. B., Miller, B. W., Morelli, T. L., Mori, A. S., Weng, E., and Ferrier, S. (2024). Biodiversity Loss Reduces Global Terrestrial Carbon Storage, *Nat Commun*, 15(1), pp.2–15 (<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47872-7>, 2024年10月10日閲覧).
- Woetzel, L., Krishnan, M., Pinner, D., Samandari, H., Engel, H., Kampel, C., and Leyen, J. (2020). *Reduced Dividends on Natural Capital?* McKinsey Global Institute (<https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/reduced-dividends-on-natural-capital>, 2024年10月10日閲覧).
- Zhang, C., and Ji, W. (2019). Digital Twin-Driven Carbon Emission Prediction and Low-Carbon Control of Intelligent Manufacturing Job-Shop., *Procedia CIRP*, 83, pp.624–629.