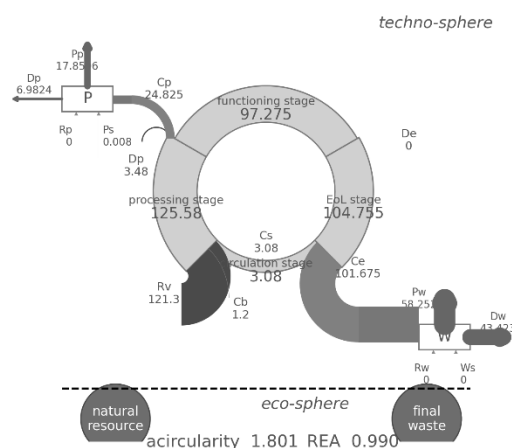


循環の可視化と資源価値評価の統合: CVG(Circulation Visualizing Graphics)によるサーキュラーエコノミー指標の拡張

Extending Circularity Visualization and Resource Value Accounting: A CVG-Based Framework Integrating Processing and EoL Flows

循環は量ではなく、構造であり、
価値として読むべき対象である



Kohmei Halada
Sustainability Design Institute (SusDI)

Circular Economy Multi-Value Circulation Research Group
2026

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19749270>

循環の可視化と資源価値評価の統合: CVG (Circulation Visualizing Graphics) によるサーキュラーエコノミー指標の拡張

Extending Circularity Visualization and Resource Value Accounting: A CVG-Based Framework Integrating Processing and EoL Flows

全体要旨

本文章は、サーキュラーエコノミーにおける循環の可視化と資源価値評価を統合的に扱う枠組みとして、Circulation Visualizing Graphics (CVG) を提案する。既存の指標である acircularity および Resource Efficiency Account (REA) は、循環の質を評価する上で重要な役割を果たしてきたが、スクラップが市場段階で止まり、材料への再生過程が十分に記述されていないという課題を有していた。

ここでは、この点を拡張し、工程くずおよび老廃くずをそれぞれ処理する P ボックスおよび W ボックスを導入することで、スクラップから材料への再生過程を明示的に組み込んだ。さらに、入力データ構造として CSV 形式、技術係数として JSON 形式を採用し、実装可能な計算体系として定式化した。

資源価値については、価格、TMR 補正值、不純物依存の材料価値の 3 つの定義を統合的に扱い、CVG が量ベース・価値ベースの両方で表現可能であることを示した。適用例として自動車を対象に、現状、次世代電炉による高張力鋼循環、および老廃スクラップから普通鋼への再生という 3 つのケースを比較し、循環構造の違いが視覚的かつ定量的に評価可能であることを示した。

本手法は、循環を単なる量ではなく「価値の保持・散逸」として捉える新しい資源観に基づくものであり、資源安全保障、CO₂削減、ネイチャーポジティブ戦略に対する評価ツールとしての応用が期待される。

■第 1 章 既存指標の意義とその限界

—循環はどこまで測れていたのか—

サーキュラーエコノミーという言葉が広く使われるようになってから久しいが、その議論の多くは、いまだに「どれだけ循環しているか」という量の議論にとどまっているように見える。リサイクル率や回収率といった指標は、その代表例であり、確かに循環の拡大を示すには有効であった。しかし、現実の資源利用を見たとき、同じ量が循環していても、その意味は大きく異なる。高品質の材料として戻ることなのか、それとも用途の限定された低位材としてしか使えないのかによって、資源としての意味は大きく変わるからである。

この問題意識に対して、著者らは先行研究 (New Indicators 'Acircularity' and 'Resource

Efficiency Account, <https://doi.org/10.20965/ijat.2022.p0684>)において、循環を「量」ではなく「価値」として扱う指標を提案した。それが、acircularity および Resource Efficiency Account (REA) である。

まず、循環の状態を記述するために、製品やサービスの機能を支える材料の総体を考える。このとき、構成材料の総価値 M は、各材料 j の質量 m_j と、その単位質量あたりの資源価値 v_j によって、

$$M = \sum_j m_j \cdot v_j$$

と表される。ここで重要なのは、この v_j が単なる価格ではなく、資源としての意味を含んだ価値である点である。具体的には、TMR (Total Material Requirement) や不純物による品質低下を反映した値を用いることで、資源としての「重み」を表現することができる。

このように定義された材料価値をもとに、資源の流れを大きく二つに分けて捉える。一つは、自然界 (エコスフィア) から新たに投入される資源であり、その総価値を R_v とする。もう一つは、技術圏 (テクノスフィア) の内部で循環する資源であり、これを自系内循環 C_s と市場経由循環 C_e に分けて扱う。

一方で、循環から外れていく資源、すなわち散逸 (dissipation) も明示的に扱う必要がある。製品使用後の段階における散逸は、

$$D_e = M - C_s - C_e$$

と表される。また、製造工程においても、投入された資源のすべてが製品に転化するわけではなく、工程内での散逸が存在する。このとき、製造段階における散逸 D_p は、

$$D_p = R_v + C_b + C_s - M - C_p$$

と書くことができる。ここで C_b は市場から受け入れた循環資源、 C_p は工程スクラップとして市場へ出る資源である。

このようにして定義された諸量を用いると、循環の理想状態からの距離を表す指標として、acircularity が導かれる。

$$\text{Acircularity} = \frac{R_v + D_e + D_p}{M}$$

この指標は、資源が完全に循環し、外部からの投入も散逸もない状態においてゼロとなる。すなわち、循環の理想状態からどれだけ離れているかを示す指標である。

さらに、社会に提供される機能量を f とすると、資源効率を表す指標として REA は次のように定義される。

$$REA = \frac{f}{R_v + D_e + D_p}$$

これは、資源の投入と散逸の合計に対して、どれだけの機能が提供されているかを示すものであり、循環の質を含めた資源効率の指標である。また、材料効率 $ME = f/M$ を用いると、

$$REA = \frac{ME}{Acircularity}$$

という関係が得られ、材料効率と循環の状態が統合的に扱われる。

これらの指標の意義は明確である。すなわち、循環を単なる量ではなく、資源価値の保持と散逸として捉え直した点にある。とりわけ、スクラップの品質低下を価値の低下として定量化し、散逸として扱ったことは、従来の指標にはなかった視点である。

しかしながら、この枠組みには一つの重要な限界が残されている。それは、スクラップが市場に出た段階で記述が終わってしまうことである。すなわち、工程くずや老廃くずは市場スクラップとして扱われるが、それがどのようなプロセスを経てどの材料に再生されるのかは、モデルの外側に置かれている。

この結果、循環の「量」と「価値」は評価できても、「構造」、すなわちどのような経路で価値が保持され、あるいは失われているのかは十分に可視化されない。言い換えれば、循環は測られているが、まだ描かれてはいない。

また、価値を重視するあまり、その価値の一つの定義である、不純物による価値劣化についても述べたが、それは本来循環を可視化する問題とは異なる問題であった、たとえば、循環の可視化は物量だけを取り上げて開花することもできなくてはならず、可視化と価値の取り扱いとは別々の問題として記述されるべきであった。

本文章は、この点を出発点とする。まず次章では、スクラップから材料への変換過程を含めた循環構造の可視化を試み、循環を「図として理解する」ための枠組みを提示する。

■第2章：CVGによる循環可視化の拡張

■2.1 循環はどこで切れていたのか

—スクラップで止まるモデルの限界—

サーキュラーエコノミーに関する議論において、循環はしばしば「戻る量」として語られてきた。しかし、その量がどこまでを含んでいるのかを丁寧に辿っていくと、実は一つの暗黙の前提が置かれていることに気づく。すなわち、工程くずや使用後製品が「スクラップとして市場に出たところ」で循環の記述が終わっている、という点である。

既存の指標体系では、製造工程から排出されるスクラップは C_p 、使用後に回収されるスクラップは C_e として扱われ、それらが循環の主要な構成要素として集計される。これらは確かに、循環の量的規模を把握するうえでは有効であり、また、回収やリサイクルの進展を評価する指標として機能してきた。しかしながら、ここで一度立ち止まって考える必要があるのは、その後である。

すなわち、 C_p や C_e として市場に出たスクラップは、その後どのような材料に戻るのか、あるいは戻らないのか、という点が、モデルの内部では記述されていない。形式的には、これらは循環資源として扱われているが、実際には、用途の限定された低位材へと変換される場合もあれば、エネルギー回収や最終処分に近い形で失われていく場合もある。にもかかわらず、それらは同じ「循環」として扱われている。

この構造は、式の上でも確認できる。例えば、循環の評価においては、

$$D_e = M - C_s - C_e$$

といった形で、使用段階における散逸が定義されるが、ここで C_e はあくまで「市場に出たスクラップ量」であり、その後の変換は含まれていない。同様に、工程段階でも、

$$D_p = R_v + C_b + C_s - M - C_p$$

と書かれるとき、 C_p は工程から出たスクラップとして扱われるが、その後の再資源化の経路は外部に委ねられている。

このように、既存の枠組みは、循環を「どこまで戻るか」という量の問題としては整然と整理している一方で、「何に戻るか」という構造の問題については、意図的に切り離しているとも言える。その結果として、異なる性質を持つ循環が、同一の指標の中で扱われることになる。高品質の材料へと再生される場合と、用途の制限された材料へと変換される場合とが、同じ「循環」としてカウントされるのである。

ここに、循環評価のもう一つの限界がある。すなわち、循環は測られているが、まだ描かれてはいない、ということである。スクラップがどのような経路を経て、どのような材料に戻るのか、そのプロセスが見えない限り、循環の質を十分に理解することはできない。本文章では、この点を可視化の問題として捉える。すなわち、スクラップを終点とするのではなく、その先にある変換過程までを含めて記述することで、循環の構造そのものを明らかにしようとするものである。次節では、そのための枠組みとして、P ボックスおよび W ボックスを導入した新たな可視化手法を提示する。

■2.2 CVGの基本構造

—P ボックスと W ボックスの導入—

前節で見たように、既存の循環記述は、スクラップが市場に出るところで一度区切られていた。そこでは、循環は「戻る量」としては把握されるが、「どのように戻るか」という構

造は外側に置かれている。この切断面をそのままにしておく限り、循環の質を論じることは難しい。CVGは、この切断面をあえて内部に取り込み、スクラップ以降の過程を構造として記述することを試みるものである。

そのために導入されるのが、工程くず処理を担うPボックスと、老廃くず処理を担うWボックスである。Pボックスは製造工程から発生するスクラップを受け取り、それを再び材料へと戻す役割を担う。一方、Wボックスは使用後に回収されたスクラップを受け取り、同様に材料への再生を行う。いずれも、従来はモデルの外に置かれていた「スクラップから材料への変換」を、内部に引き込むための装置である。

この導入によって、循環の図式は大きく変わる。従来の表現では、製品の使用段階を中心とした単一のリング構造が描かれていたが、CVGではそのリングの外側に二つの変換経路が付加される。すなわち、工程から出たスクラップはPボックスを経て材料に戻り、使用後のスクラップはWボックスを経て材料に戻る。それぞれの経路は独立しているように見えながら、最終的には同じ材料群へと収束する。

このとき重要なのは、PボックスとWボックスが単なる「通過点」ではないという点である。そこでは、追加のスクラップが投入されることもあれば、新たな資源が必要とされることもある。また、すべてが元の材料に戻るわけではなく、別の材料へと変換される場合や、価値が低下した形でしか利用できない場合も含まれる。すなわち、これらのボックスは、資源の質が変化する場であり、循環の成否が実質的に決まる場でもある。

この構造は、結果として循環を「リング」ではなく、「分岐と再合流を伴うネットワーク」として捉えることを可能にする。工程くずと老廃くずという二つの起点から、それぞれ異なる経路で材料へと戻る流れが存在し、それらがどの材料にどの程度配分されるかによって、全体の循環の姿が決まる。したがって、循環の評価は単一の指標ではなく、構造そのものを読み解くことを必要とする。

CVGは、この構造を視覚的に把握するための枠組みである。中心には機能を担う材料群があり、その周囲に製造段階、使用段階、循環段階が配置される。そして、その外側にPボックスとWボックスが置かれ、それぞれがスクラップを受け取り、再び材料へと送り返す。さらに、その過程で生じる散逸や外部資源の投入も同時に描かれることで、循環の全体像が一つの図として閉じる。

このようにして得られる図は、単なるフローの集合ではない。どの経路が太く、どの経路が細いのか、どこで価値が保持され、どこで失われているのかが、一目で読み取れる形となる。したがって、CVGにおけるPボックスとWボックスの導入は、単なる要素の追加ではなく、循環の見方そのものを転換するものであると言える。

■2.3 変数体系の拡張

—量から構造への変換—

前節で示したように、CVGはスクラップ以降の変換過程を内部に取り込むことで、循環を

構造として捉える枠組みである。このとき必要となるのが、従来の指標体系に対する変数の拡張である。すなわち、既存の $M, R_v, C_b, C_s, C_p, C_e$ に加えて、スクラップ処理過程そのものを表現するための変数群を導入する必要がある。

まず、既存の変数を簡潔に整理しておく。

M は機能を担う材料の総価値、 R_v は自然資源からの新規投入、 C_b は市場から受け入れる循環資源、 C_s は自系内循環、 C_p は工程くずとして市場に出る資源、そして C_e は使用後に市場へ出る資源である。これらは、いずれも「どこから来て、どこへ出るか」を記述するものであり、循環の量的把握には十分であった。

しかし、CVG ではここから一步踏み込み、スクラップがどのように再資源化されるかを内部で扱う。そのために、工程くず処理 (P ボックス) および老廃くず処理 (W ボックス) に対応する変数を新たに定義する。

まず、P ボックスに関しては、

$$P_p, P_s, R_p$$

を導入する。ここで、 P_p は工程くずから再生される材料、 P_s は他のスクラップから補助的に投入される量、そして R_p は工程くずの再生に際して必要となる新規資源である。すなわち、工程くずがそのまま元の材料に戻るわけではなく、他のスクラップや新規資源を伴って再構成される過程を明示するものである。

同様に、W ボックスに関しては、

$$P_w, W_s, R_w$$

を導入する。ここで、 P_w は老廃スクラップから再生される材料、 W_s は他のスクラップの追加投入、そして R_w は老廃スクラップの再資源化に必要な新規資源である。工程くずと異なり、老廃スクラップは混合・劣化の程度が大きいため、一般により多くの補助的投入や資源が必要となることが多いが、この点も変数として明示される。

このようにして導入された変数は、単に数が増えたということではなく、循環の意味を質的に変える。すなわち、スクラップはもはや一つの集計量ではなく、「再資源化のプロセスを経て材料へと変換される中間状態」として位置付けられる。その結果として、循環の評価は「どれだけ戻るか」から、「どのような条件で戻るか」へと移行する。

これらの関係は、例えば P ボックスにおいては、

$$P_p = f(C_p, P_s, R_p)$$

のように、工程くずに加えて追加スクラップや新規資源に依存して決まる量として表される。同様に W ボックスでも、

$$P_w = f(C_e, W_s, R_w)$$

と書くことができる。ここで重要なのは、これらの関係が単純な比例ではなく、材料の種類や品質、プロセスの特性によって規定される点である。

したがって、CVGにおける変数体系は、単なるフローの分解ではなく、循環の内部構造を記述するための座標系であると言える。この座標系を導入することによって、どのスクラップがどの材料へと変換され、その過程でどの程度の追加資源が必要とされるのかが明確になる。

結果として、循環は単なる量の移動ではなく、価値と条件を伴った構造的な変換として理解されることになる。ここにおいて、CVGは「量の可視化」から「構造の可視化」への転換を完成させる。

■2.4 入力データ構造 (CSV)

—循環を記述する最小単位—

CVGにおける循環の記述は、最終的には一枚の図として表現されるが、その実体は極めて単純な表形式、すなわち CSV (Comma Separated Values) に基づいている。ここでの CSV は単なるデータの入れ物ではなく、循環構造そのものを記述する最小単位として設計されている点に特徴がある。

各行は、材料またはスクラップという「要素」を表す。言い換えれば、この表は製品を構成する材料と、それらに変換されるスクラップ群を並列に並べたものであり、それぞれがどの段階でどのような役割を持つかを、列方向の情報によって規定する。

主要な項目は以下の通りである。

- product_in : 製造段階において投入される量
- product_out : 製品として機能段階に残る量
- EoL_out : 使用後に材料として分別される量
- P_in_from_Cp : 工程くずとして P ボックスに流入する量
- W_in_from_Ce : 使用後スクラップとして W ボックスに流入する量
- phi_value : 単位量あたりの資源価値

これらの項目は、一見すると単純なフローの記述に見えるが、実際には循環の構造を規定する重要な意味を持つ。例えば、product_in と product_out の差は工程くずに対応し、その量が P_in_from_Cp によって明示される。また、product_out がどの程度そのまま使用後スクラップとして回収されるかは、W_in_from_Ce によって規定される。

ここで重要なのは、すべての項目を必ずしも埋める必要がない、という点である。本文章では、値が存在しない場合に none を記述することを許容している。これにより、ある材料が特定の段階に関与しない場合、その列を空白ではなく明示的に「関与しない」と記述することができる。この設計は、循環構造を柔軟に記述するうえで本質的な意味を持つ。すなわち、CVGの CSV は「完全なデータ表」である必要はなく、「構造を示す表」であればよい。ある材料が工程くずを持たないのであれば P_in_from_Cp = none とすればよ

く、使用後に分別回収されないのであれば $EoL_out = none$ とすればよい。このようにして、各要素がどの経路に乗るかを明示的に制御することができる。

さらに重要なのは、材料行とスクラップ行の役割の違いである。材料行は、製品の機能を担う主体であり、 $product_in$ 、 $product_out$ を中心に記述される。一方でスクラップ行は、P ボックスおよび W ボックスへの入力として機能し、主に $P_in_from_Cp$ および $W_in_from_Ce$ によって定義される。すなわち、材料行が「機能段階」を記述するのに対し、スクラップ行は「変換段階」を記述する。

この二つを同一の表に置くことによって、循環は連続した構造として表現される。材料からスクラップへ、スクラップから再び材料へという流れが、個別の表を介さずに一つのデータ構造の中で完結するのである。この設計により、CVG は複雑な循環構造であっても、比較的単純な入力形式で記述することが可能となる。

また、 ϕ_value の導入によって、この構造は単なる量の流れにとどまらず、資源価値の流れとしても扱われる。すなわち、同一の CSV 構造に対して異なる価値係数を与えることで、量ベースの図と価値ベースの図を同時に生成することができる。この点は、後章で述べる資源価値の議論と密接に関係する。

以上のように、CVG における CSV は、単なる入力データではなく、循環の構造そのものを記述する言語として機能する。各列は単独で意味を持つのではなく、相互に関係しながら、どの資源がどの経路を通るかを定義する。この構造を適切に記述することが、CVG による可視化の前提となる。

■2.5 技術係数 (JSON) の意味

—プロセスを数値で記述する—

前節で示した CSV は、循環の「経路」を規定するものであったが、それだけではスクラップがどのように材料へと戻るかは決まらない。どの材料がどの程度生成されるのか、またその過程でどの程度の追加資源やエネルギーが必要となるのかは、別途与えられる必要がある。CVG では、この部分を JSON 形式の技術係数によって記述する。

この JSON は、各スクラップ種ごとに、その再資源化プロセスの特性をまとめたものであり、基本的には次の三つの要素から構成される。

- $input_coeff$: 追加的に必要となるスクラップやエネルギー
- $output_coeff$: 生成される材料の種類と割合
- $loss_coeff$: 散逸として扱われる部分

まず $input_coeff$ は、対象とするスクラップを処理する際に、どの程度の補助的な投入が必要かを示すものである。ここには、他種スクラップの追加投入量 (add_scrap) や、新規資源の投入 (μ_virgin)、さらにはエネルギー負担 (μ_energy) が含まれる。特に重要なのは、エネルギーを単なる付加的項目としてではなく、資源価値に換算された形で扱う

点である。本文章では、エネルギーを TMR (Total Material Requirement) に換算し、さらに対象スクラップの単位価値で割ることによって、スクラップ 1 単位あたりの資源負担として組み込んでいる。これにより、異なる材料間でエネルギーの影響を一貫した尺度で比較することが可能となる。

次に `output_coeff` は、スクラップがどの材料にどの割合で変換されるかを示す。例えば、鉄系スクラップであれば、棒鋼として再生される場合もあれば、普通鋼や特殊鋼に戻る場合もある。このとき、それぞれの生成割合を係数として与えることで、スクラップがどのような「出口」を持つかが定義される。重要なのは、ここでの係数が単なる歩留まりではなく、「どの価値に戻るか」を規定している点である。同じ量であっても、異なる材料に戻ることは、そのまま資源価値の違いとして現れる。

一方で `loss_coeff` は、散逸として扱われる部分を記述するためのものであるが、本文章ではその扱いに注意を要する。すなわち、散逸を独立した項として明示的に与えると、`output_coeff` による価値低下と二重に計上される可能性がある。このため、本文章では原則として `loss_coeff` を最小限にとどめ、散逸は主として `output_coeff` の総和が 1 に満たない部分として表現する。すなわち、出力係数の不足分が、そのまま散逸に対応する。この設計により、プロセス内での価値低下を一貫した形で扱うことができる。

以上を踏まえると、あるスクラップ j' に対して生成される材料 j の量は、

$$m_j = \lambda_{j' \rightarrow j} \cdot m_{j'}$$

と表される。また、その際に必要となる追加投入は、

$$R_{j'} = \mu_{j'}^{(v)} \cdot m_{j'} + \mu_{j'}^{(e)} \cdot m_{j'}$$

のように、スクラップ量に比例する形で与えられる。ここで $\lambda_{j' \rightarrow j}$ は `output_coeff`、 $\mu^{(v)}$ 、 $\mu^{(e)}$ はそれぞれ新規資源およびエネルギーの係数である。

このように、JSON で与えられる技術係数は、単なる補助的パラメータではなく、スクラップから材料への変換過程そのものを定義するものである。CSV が循環の「経路」を規定するのに対し、JSON はその経路における「変換の質」を規定する。両者が組み合わせられることで、循環は初めて具体的な形を持つ。

したがって、CVG における JSON は、個別プロセスの詳細を忠実に再現することを目的とするものではなく、循環構造の本質を捉えるための「縮約されたプロセス記述」であると言える。どの係数をどの程度に設定するかは、対象とする材料系や技術水準に依存するが、その設定自体が循環の評価結果に直接影響を与える。この意味において、JSON は単なる入力データではなく、循環の解釈そのものを担う要素である。

■2.6 計算プロセス

—CSV と JSON から CVG へ—

ここまで示した CSV と JSON は、それぞれ単独では循環を表現しない。CSV は経路を与え、JSON は変換の規則を与えるに過ぎない。CVG において重要なのは、この二つを重ね合わせたときに、はじめて循環が一つの構造として立ち上がる点にある。本節では、その計算過程を整理する。

出発点は CSV である。ここでは、各材料およびスクラップについて、product_in、product_out、P_in_from_Cp、W_in_from_Ce といった値が与えられている。これにより、製品として機能段階に存在する材料量 M は

$$M = \sum_j m_j^{\text{out}}$$

として求められる。また、製造工程におけるスクラップ流入は C_p 、使用后スクラップ流入は C_e として、それぞれ

$$C_p = \sum_{j'} m_{j'}^P, C_e = \sum_{j'} m_{j'}^W$$

と整理される。ここまでは、従来のフロー記述と大きく変わらない。

次に、このスクラップがどのように材料へと戻るかを決めるのが JSON である。各スクラップ種 j' に対して、output_coeff によって材料への変換係数 $\lambda_{j' \rightarrow j}$ が与えられる。したがって、P ボックスにおける再生材は

$$P_p = \sum_{j'} \sum_j \lambda_{j' \rightarrow j} m_{j'}^P$$

として求められる。同様に、W ボックスにおける再生材は

$$P_w = \sum_{j'} \sum_j \lambda_{j' \rightarrow j} m_{j'}^W$$

となる。

しかし、この変換は単純な比例では完結しない。JSON の input_coeff によって、追加スクラップや新規資源、エネルギーが必要とされるからである。これらは、それぞれ

$$P_s = \sum_{j'} \mu_{j'}^{(s)} m_{j'}^P, R_p = \sum_{j'} \mu_{j'}^{(v)} m_{j'}^P$$

$$W_s = \sum_{j'} \mu_{j'}^{(s)} m_{j'}^W, R_w = \sum_{j'} \mu_{j'}^{(v)} m_{j'}^W$$

のように、スクラップ量に比例する形で導出される。ここで $\mu^{(s)}$ は追加スクラップ、 $\mu^{(v)}$ は新規資源およびエネルギーに相当する係数である。

この段階で、循環の主要な流れはすべて揃う。すなわち、材料として残る M 、新規投入 R_v 、工程循環 C_p 、使用后循環 C_e 、そしてそれぞれの再資源化過程で生じる $P_p, P_s, R_p, P_w, W_s, R_w$ が明示される。

次に行われるのは、これらの量の整合性を確認することである。すなわち、製造段階および使用段階における散逸を、全体の収支から導出する。

製造段階における散逸は、

$$D_p = R_v + C_b + C_s - M - C_p$$

使用段階における散逸は、

$$D_e = M - C_s - C_e$$

として求められる。ここでの D_p 、 D_e は、単なる残差ではなく、どの経路にも回収されなかった資源の総体として解釈される。

以上の計算を経て得られるのは、単なる数値の集合ではない。それぞれの流れがどの程度の大きさを持ち、どの経路を通っているかが定量的に定まった「構造」である。この構造が、そのまま CVG 図として描画される。

すなわち、円環上には材料の流れ M が配置され、その外側に P ボックスおよび W ボックスが配置される。各フローの太さは、その量あるいは資源価値に比例して描かれ、どこで資源が戻り、どこで失われているかが視覚的に示される。

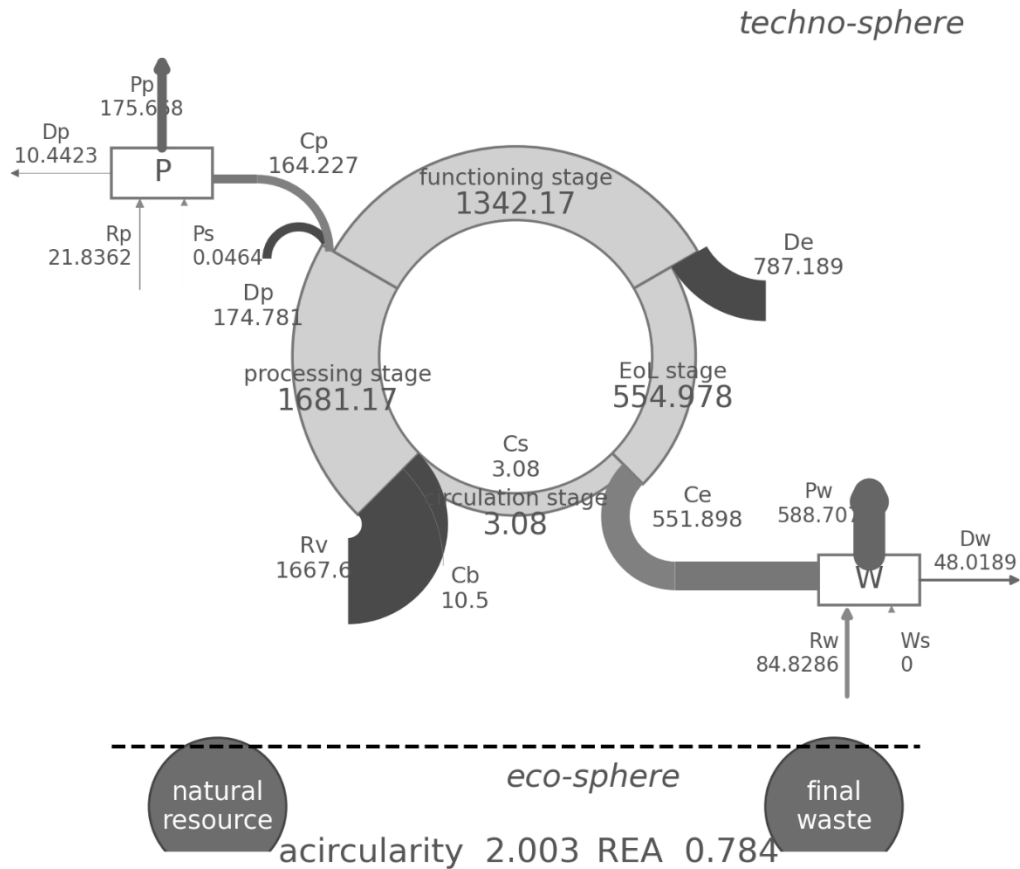
ここで重要なのは、この図が単なる可視化ではないという点である。背後には CSV と JSON に基づく明確な計算が存在し、図はその結果として生成されている。したがって、CVG は「描いた図」ではなく、「計算された構造」であると言える。

この意味において、CVG における計算プロセスは、循環を集計から解放し、構造として再現するための中核的な役割を担っている。

■2.7 CVG による可視化の特徴

—構造としての循環を描く—

前節までに示したように、CVG は CSV と JSON に基づく計算によって構造を導出し、それを図として表現するものである。本節では、その結果として得られる図がどのような特徴を持ち、どのように読み取られるべきかを整理する。



CVG 図の第一の特徴は、工程、使用、循環が分離された段階としてではなく、一体化したリング構造として描かれている点にある。中心には機能を担う材料群が配置され、その周囲に製造から使用、さらに循環に至るまでの流れが連続的に配置される。この構造によって、材料がどの段階に存在し、どの段階で変化するのが一つの視野の中で把握される。

第二に、P ボックスおよび W ボックスの導入によって、再生経路が明示される。工程くずは P ボックスを経て材料へと戻り、老廃くずは W ボックスを経て同様に再生される。このとき、それぞれの経路は単に戻るのではなく、どの材料へと変換されるかという形で描かれる。すなわち、循環は一方向の戻りではなく、複数の材料への分岐を伴う構造として表現される。

第三に、散逸の存在が視覚的に把握できる点が挙げられる。製造段階および使用段階において回収されなかった資源は、それぞれ D_p 、 D_e として図中に現れる。これらは、従来の指標では数値としては存在していたが、図として認識されることは少なかった部分である。CVG では、どこで資源が失われているかが明確に示されるため、循環の弱点が直感的に理解される。

さらに重要なのは、フローの太さが材料量だけでなく資源価値に基づいて描かれる点である。同一の量であっても、価値の高い材料は太く、価値の低い材料は細く描かれる。このため、単なる質量フローでは見えなかった「価値の集中」や「価値の散逸」が一目で把握できる。特に、スクラップがどの材料に戻るかによってフローの太さが変化するため、循環の質的差異が強調される。

これらの特徴を総合すると、CVGは単なるサンキー図の拡張ではないことが分かる。従来のサンキー図は、与えられたフローを視覚的に整理するものであったのに対し、CVGはフローそのものを構造として計算し、その結果を描画するものである。したがって、図は単なる説明ではなく、計算結果の表現であり、そこに描かれた形そのものが循環の構造を示している。

このようにして得られる図は、「どれだけ戻っているか」を示すだけでなく、「どの価値として戻っているか」を示す。言い換えれば、循環の量ではなく、その戻り方の質を可視化するものである。ここにおいて、CVGは循環を「構造として読む」ための手段となる。

■2.8 小括

—循環は「構造」として扱われる—

本章では、CVG (Circulation Visualizing Graphics) を通じて、循環の可視化を従来の枠組みから拡張する試みを示した。出発点は、スクラップで記述が途切れていた既存モデルに対して、その先にある再資源化過程を内部に取り込むことであったが、その結果として得られたのは、単なる記述範囲の拡張ではない。循環そのものの見方が、量から構造へと移行する契機である。

PボックスおよびWボックスの導入により、工程くずおよび老廃くずは、それぞれ異なる経路と条件のもとで材料へと戻る存在として位置付けられた。そこでは、追加スクラップや新規資源、エネルギーが必要とされ、また、すべてが同じ材料に戻るわけではない。すなわち、循環は単純な往復ではなく、分岐と選択を伴う変換過程であることが明確になる。

この構造を支えるのが、CSVによる経路の記述と、JSONによる変換規則の記述である。前者は循環の流れを定義し、後者はその流れの中で何が起こるかを規定する。両者を組み合わせることで、循環ははじめて具体的な形を持ち、計算可能な対象となる。さらに、その結果はCVG図として描画されることにより、数値の集合ではなく、直感的に読み取ることのできる構造として提示される。

ここで重要なのは、この可視化が単なる表現の問題ではないという点である。どのスクラップがどの材料に戻るのか、その過程でどの程度の資源が追加的に必要となるのか、どこで価値が保持され、どこで失われるのか、といった問いは、すべてこの構造の中で初めて意味を持つ。すなわち、循環の評価は、個別の量や比率ではなく、全体の構造の中で解釈されるべきものである。

この意味において、CVGは循環を「描く」ための手法であると同時に、循環を「理解する」ための枠組みでもある。量としては同じであっても、異なる経路を通る循環は異なる意味を持つ。その差異を明示するためには、循環を構造として扱うほかない。

本章で示した枠組みは、そのための基盤を与えるものである。次章では、この構造の上に資源価値の概念を導入し、循環を量だけでなく価値の観点から評価する方法について検討する。

■第3章 資源価値の定義と拡張

—循環は何を戻しているのか—

前章までで、循環は構造として記述できることを示した。ここで先行論文(New Indicators 'Acircularity' and 'Resource Efficiency Account)が取り上げていた次の問題に入る。循環は構造として記述できたが、その構造の中を流れているものを、単に質量として扱うだけでは、循環の意味は十分に捉えられない。1kgの鉄と1kgの銅は同じ重さであっても、その背後にある資源の動員量も、用途としての機能も大きく異なる。さらに言えば、同じ鉄であっても、どの品質の鉄であるかによって、その価値は変わる。

このような違いを扱うために、本文章では資源価値 ϕ_j として整理し、各材料の質量に重みを与える。CVGは、この ϕ_j をどのように定義するかによって、同じ構造を異なる視点で読み替えることができる枠組みである。先行論文では、単一の価値計算を行っていたが、それを ϕ_j として計数化することで、ここでも触れていない多様な価値評価を循環の構造で評価できるようにした。もちろん、その例としての著者としての資源価値観の推奨はある。それを以下に述べる。

ここでの出発点となるのが、TMR (Total Material Requirement) である。TMRは、ある材料を得るために、どれだけの資源が動員されたかを表す指標であり、採掘から製錬、精製に至るまでの総物質投入量を含んでいる。したがって、材料そのものの「重さ」ではなく、その背後にある資源の重さを表していると言える。

この意味で、TMRは資源価値の基礎として適している。すなわち、ある材料がどれだけの資源を必要として成立しているかを、そのまま価値として扱うことができるからである。

本文章においても、材料の基本的な価値は、このTMRに基づいて定義される。

しかし、ここで一つの問題が生じる。スクラップである。スクラップは、もともと同じ材料から来ているため、TMRだけで見れば、バージン材と同じ値を持つことになる。だが現実には、スクラップはそのままでは同じ価値を持たない。用途が制限され、品質が低下し、追加的な処理を必要とする場合が多いからである。すなわち、TMRだけでは「価値の劣化」が表現できない。

この問題に対して、本文章では二つの補正方法を提示する。

第一の方法は、価格比による補正である。スクラップ価格とバージン材価格の比は、市場が評価している品質差をある程度反映している。したがって、スクラップのTMRにこの

価格比を乗じることで、実効的な資源価値を定義することができる。例えば、ある材料のスクラップ価格がバージン材の半分であれば、その資源価値も TMR の半分として扱う。この方法は単純でありながら、現実の取引を反映した補正として有効である。

ただし、この方法は市場に依存するため、価格変動や地域差の影響を受ける。また、価格には需給や政策といった要因も含まれるため、必ずしも純粋な材料価値を表しているとは限らない。この点が第二の方法の動機となる。

第二の方法は、不純物濃度に基づく補正である。材料の品質低下は、多くの場合、不純物の蓄積として現れる。例えば、鉄スクラップに含まれる銅や錫といった元素は、一定濃度を超えると材料の用途を制限する。このとき、スクラップを再び高品質材料として利用するためには、不純物を希釈する、すなわちバージン材を混合する必要が生じる。

この関係は、単なる経験則ではなく、物質収支として記述することができる。ある不純物濃度を持つスクラップを、目標とする品質レベルまで低減するために必要なバージン材の量は、濃度の関係式から求められる。このとき、スクラップ 1 単位が実質的にどれだけの「有効材料」に相当するかが計算できる。すなわち、スクラップの価値は、不純物を希釈するために必要なバージン材量によって規定される。

この方法の特徴は、価格に依存せず、材料の物理的性質に基づいて価値を定義する点にある。どの程度の不純物がどの用途に影響するかを明示的に扱うことで、「どの材料に戻れるか」という観点から資源価値を評価することが可能となる。

以上の二つの補正方法はいずれも、TMR を基礎としながら、その上に価値の劣化を重ねるものである。すなわち、材料の価値は TMR によって与えられ、スクラップの価値はそこから低下として表現される。この構造により、資源価値は一貫した尺度の上で比較可能となる。

CVG においては、これらの価値はすべて CSV の ϕ_i によって与えられる。したがって、同一の循環構造に対して、質量ベース ($\phi_j = 1$)、価格ベース、TMR ベース、不純物ベースといった異なる価値定義を適用することができる。図の形は変わらず、フローの太さのみが変化することで、循環の意味が異なる形で現れる。

このとき重要なのは、どの定義が正しいかという問題ではない。むしろ、異なる定義が異なる側面を示すという点にある。量としては同じ循環であっても、価値の観点から見れば、その意味は大きく変わる。どの材料に戻るのか、どの程度の価値が保持されるのかという問いに対して、これらの指標は異なる答えを与える。

循環とは、何がどれだけ戻るかではなく、どの価値として戻るかである。本章で示した資源価値の枠組みは、この問いを具体的に扱うためのものであり、次章ではその違いが実際の事例においてどのように現れるかを確認する。

■第 4 章 自動車への適用

—同じ「リサイクル」は同じではない—

本章では、前章までに示した CVG の枠組みを、自動車を対象として適用する。自動車は多様な材料から構成される代表的な製品であり、鉄鋼、アルミニウム、銅、プラスチックといった異なる資源系が同時に存在する。そのため、循環の構造と資源価値の変化を同時に観察する対象として適している。

ここでは、同一の自動車構成（CSV）を基準としつつ、スクラップから材料への変換を規定する JSON を変更することによって、三つのケースを比較する。

- 現状（current）
- 高張力鋼の水平リサイクル（新電炉）
- 老廃スクラップから普通鋼への再生（東鉄型）

これらは、いずれも「リサイクルが行われている」状態であるが、その中身は大きく異なる。

■4.1 現状（current）の構造

現状のケースでは、鉄スクラップの多くは電炉によって棒鋼へと再生される構造を持つ。これは技術的・経済的に成立している経路であり、スクラップは確実に材料として再利用される。

しかし、このとき CVG で見ると、鉄の流れの多くが**自動車用鋼板ではなく棒鋼へと移行している**ことが明確に現れる。すなわち、量としては循環しているが、機能としては別の用途に移っている。

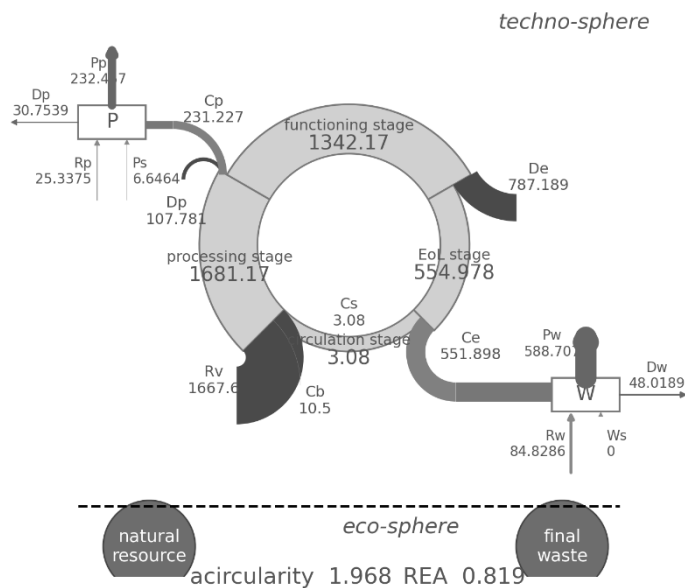
数値的に見ると、例えば鉄老廃スクラップの再生においては、

- 棒鋼への再生係数：約 0.75
- 普通鋼への再生：ほぼ 0

となっており、価値としては自動車用鋼板の系から外れている。この結果、CVG 図では W ボックスから棒鋼へのフローが太く、元の材料への戻りは細い、あるいは存在しない形となる。

この構造は、従来のリサイクル率では評価されないが、CVG では「価値の戻り方」として明確に可視化される。

■4.2 高張力鋼の水平リサイクル（新電炉）



次に、高張力鋼を高張力鋼として再生する新電炉プロセスを仮定したケースである。これは、まだ実装されていない過程的プロセスであり、工程スクラップの発生段階での選別を強め、高張力鋼は高張力スクラップとして分別され、不純物の混入のない専用の電気炉でよいかいされて高張力鋼に戻す。この場合、JSONにおいて高張力鋼スクラップの出力係数に変更される。

現状では：

- 高張力鋼スクラップ → 普通鋼 (約 0.9)

であったものが、

- 高張力鋼スクラップ → 高張力鋼 (約 0.9)

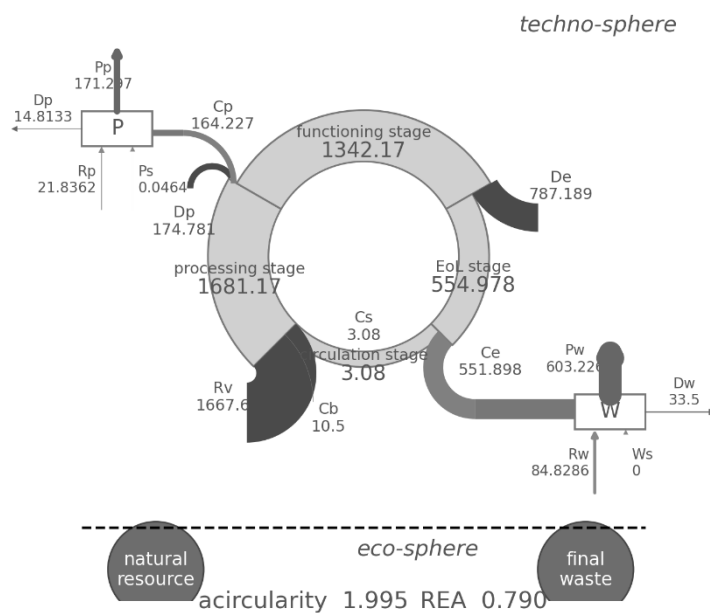
とされる。

この変更は一見小さいが、CVG 上では大きな違いを生む。すなわち、スクラップが**元の材料系に戻る経路が再び開かれる**ことになる。

この結果、CVG 図では、高張力鋼のリング内での循環が強化され、外部材料への流出が減少する。フローの太さとしても、高張力鋼への戻りが顕著に増加し、材料価値の保持が視覚的に確認できる。

また、このケースでは追加スクラップや新規資源の投入が抑えられるため、 R_w や W_s の値も相対的に小さくなる。すなわち、同じ循環であっても、より少ない外部資源で成立する構造となる。

■4.3 老廃スクラップから普通鋼への再生（東鉄型）



第三のケースは、老廃スクラップから普通鋼を再生する経路を強化したものである。これは、すでに一部の電炉メーカーで行われている技術であり、電炉の生成物を不純物尤度の高い建設用の棒鋼ではなく、より上位用途に近い材料への再生を指向した構造である。JSONにおいては、鉄老廃スクラップの出力係数が次のように変更される：

- 棒鋼：約 0.75 → 約 0.10
- 普通鋼：約 0 → 約 0.55

この結果、スクラップの多くが棒鋼ではなく普通鋼として再生される。

CVG 図では、W ボックスから普通鋼へのフローが太くなり、従来は棒鋼へ流れていた価値が、再び自動車用材料系へと戻る構造が現れる。この変化は、単なる材料の置き換えではなく、**価値の帰属先の変更**として理解される。

ただし、この再生には追加スクラップやエネルギーが必要となるため、 W_s や R_w が増加する傾向がある。すなわち、価値の保持は向上する一方で、そのための資源投入も増える。このトレードオフもまた、CVG 上で明示される。

■4.4 三ケースの比較と含意

以上の三つのケースはいずれも、従来の指標で見れば「リサイクルが行われている」状態である。しかし、CVG で比較すると、その意味は大きく異なる。

- 現状：量は循環するが、価値は落とされて別用途へ移行
- 新電炉：価値が元の材料に保持される
- 東鉄型：価値をある程度戻すことができる

この違いは、単なる数値ではなく、構造として現れる。すなわち、どのフローが太く、どの経路が支配的であるかによって、循環の性質が直感的に理解される。

ここで重要なのは、どのケースが「正しい」かを決めることではない。むしろ、同じ「リサイクル」という言葉で括られていたものの内部に、これだけ異なる構造が存在することを明らかにすることに意味がある。

CVG は、この違いを可視化する。量としては同じであっても、どの価値として戻ることによって、循環の意味は変わる。この点を明示することが、本手法の適用例としての意義である。

■第5章 他製品への展開

—循環は“書ける”ということから始まる—

前章では自動車を対象として CVG の適用例を示したが、本手法の本質は個別の製品にあるのではない。むしろ、どの製品であっても、その循環構造を同じ形式で記述できるという点にある。本章では、そのための入力方法と、CSV という形式をどのように読み、どのように使うかを具体的に示す。

(CVG_input.csv の代表例)

item	type	phi_value	f_product	f_recycled	input_kind	product_in	product_out	EoL_out	P_in_from	W_in_from	note		
高張力鋼	material	15.3	1	1	virgin	47.5	38	0	none	none	高張力鋼		
普通鋼	material	10.9	1	1	virgin	32.5	26.65	0	none	none	普通鋼		
特殊鋼	material	16.35	1	1	virgin	7.3	6.375	0	none	none	特殊鋼。全投入はスクラップとの		
鋳鉄	material	9.8	1	1	virgin	11.8	8.75	0	none	none	鋳鉄。全投入はスクラップとの		
棒鋼	material	8.7	0	1	none	0	0	0	none	none	棒鋼		
展延アルミ	material	25	1	1	virgin	8	6	0	none	none	展延アルミ		
アルミ鋳物	material	18	1	1	virgin	2.7	2.4	0	none	none	アルミ鋳物。全投入はスクラップ		
銅	material	50	1	1	virgin	1.5	1.3	0	none	none	銅		
PP	material	3	1	1	virgin	7	6	0	none	none	ポリプロピレン		
PE	material	2.5	1	1	virgin	2	1	0	none	none	ポリエチレン		
PVC	material	2	1	1	virgin	1	0.8	0	none	none	塩ビ		
再生プラ	material	0.5	1	1		0	0	0	0	0			
高張力鋼分	scrap	12	0	0	none	0	none	none	1	0	高張力鋼として分別される分。		
普通鋼分	scrap	8	0	0	none	0	none	none	0	0	普通鋼分別分。		
特殊鋼分	scrap	10	0	0	none	0.2	none	none	0.5	none	特殊鋼の工程内再溶解対象。pro		
鋳鉄分	scrap	7	0	0	none	0.7	none	none	0.8	none	鋳鉄の工程内再溶解対象。produ		
展延アルミ	scrap	15	0	0	none	0	none	none	1.5	0	展延アルミとして分別されるもの		
アルミ鋳物	scrap	12	0	0	none	0.3	none	none	0.4	none	アルミ鋳物工程内再溶解対象。p		
銅スクラップ	scrap	30	0	0	none	0	none	none	0	1.5	使用後に回収される銅スクラップ		
PP分別ス	scrap	1.8	0	0	none	0	none	none	0	0	PPとして分別避けるもの		
PE分別ス	scrap	1.6	0	0	none	0	none	none	0	0	PEとして分別避けるもの		
PVC分別ス	scrap	1.4	0	0	none	0	none	none	0	0	PVCとして分別避けるもの		
普通鋼ミックス	scrap	5.8	0	0	none	none	none	none	0	0	普通鋼・高張力鋼工程くずのミッ		
鉄ミックス	scrap	5.5	0	0	none	none	none	none	16.125	0	鉄源としてのスクラップ		
鉄老廃ス	scrap	4.9	0	0	none	none	none	none	none	79.775	使用後鉄系材料がシュレッダー		
アルミス	scrap	10	0	0	none	none	none	none	2.3	10.4	アルミ源としてのスクラップ		
ミックス	scrap	6	0	0	none	none	none	none	none	0	非鉄スクラップ		
ミックス	scrap	1.5	0	0	none	none	none	none	none	0	マテリアルリサイクル可		
老廃プラ	scrap	1.2	0	0	none	none	none	none	2.2	10	サーマルリサイクル対象		

まず、この表は単なるデータではない。各行は材料またはスクラップという「要素」を表し、各列はその要素がどの段階に参与するかを示している。すなわち、この表は循環の構造そのものを記述したものであり、これを読み解くことが、そのまま循環の理解につながる。

例えば、ある材料行において `product_in` と `product_out` が与えられていれば、それは製造段階から機能段階へと移行する材料量を意味する。その差分は工程くずとして外に出るが、それがどのスクラップとして扱われるかは、`P_in_from_Cp` によって定義される。一方で、使用後にどの程度回収されるかは `W_in_from_Ce` によって示される。

ここで注目すべきは、すべてのセルが埋まっている必要はないという点である。`none` と記述された部分は、その要素がその経路に参与しないことを意味する。例えば、ある材料が使用後に分別回収されないのであれば `EoL_out = none` とすればよく、工程くずをほとんど出さないのであれば `P_in_from_Cp = none` とすればよい。このようにして、存在しない経路を明示的に排除することで、循環構造はむしろ明確になる。

次に重要なのが、材料行とスクラップ行の役割の違いである。材料行は製品の機能を担う部分であり、循環の中心に位置する。一方でスクラップ行は、P ボックスおよび W ボックスへの入力を定義するものであり、再資源化の出発点となる。この二つを同一の表に並べることによって、材料からスクラップ、そして再び材料へという流れが一つの構造として閉じる。

また、スクラップの記述においては、分別スクラップとミックススクラップの区別が重要である。分別スクラップは特定の材料に対応しており、比較的高い確率で同等の材料へ戻る可能性を持つ。一方でミックススクラップは複数の材料が混在しており、その再生先は限定される。この違いは JSON の `output_coeff` によって反映されるが、その前提として CSV においてスクラップの種類を区別しておく必要がある。

このような記述方法は、自動車に限らず、他の製品にもそのまま適用できる。例えば家電製品では、鉄、アルミ、銅、プラスチックに加えて、基板や複合材が存在する。これらが分解・分別されるか、それとも混合されたまま処理されるかによって、CSV の構造は大きく変わる。分別される場合には対応するスクラップ行に値を入れ、そうでない場合にはミックススクラップとしてまとめて記述する。

プラスチック製品においても同様である。単一樹脂であれば分別スクラップとして扱えるが、多層構造や添加剤を含む場合にはミックス廃プラとして扱われる。このとき、

`W_in_from_Ce` における分配の違いが、そのまま循環の質の違いとして CVG に現れる。

さらに重要なのは、この CSV が単体で完結しているわけではないという点である。スクラップがどの材料へと戻るかは JSON によって定義されるため、同じ CSV であっても、異なる JSON を適用することで全く異なる循環構造が得られる。逆に言えば、JSON を共通にすれば、異なる製品間の違いは CSV の構造として純粋に比較される。

このように、CVG は「構造を書くための CSV」と「変換を定める JSON」を分離して扱う

ことで、多様な製品に対して適用可能な枠組みとなっている。家電、プラスチック製品、電子機器、さらには建材やエネルギー機器に至るまで、それぞれの循環はこの形式で記述することができる。

循環を評価するためには、まず循環を書かなければならない。そして書かれた循環は、同じ形式で比較されることによって初めて意味を持つ。本章で示した CSV は、そのための最小単位であり、同時に共通言語でもある。

どの製品であっても、その循環は書くことができる。そのこと自体が、循環を議論可能な対象へと変える。本手法の一般性は、まさにこの点にある。

■第6章 結論と展望

一循環から散逸へ、そして新しい資源観へー

本文章では、サーキュラーエコノミーにおける循環を、単なる物質の移動ではなく「価値の流れ」として捉え、その構造を可視化する手法として CVG (Circulation Visualizing Graphics) を提案した。既存の指標がスクラップの段階で記述を終えていたのに対し、本手法はその先にある再資源化過程を P ボックスおよび W ボックスとして取り込み、循環を一つの構造として再構成した点に特徴がある。

しかし、本文章の射程は循環そのものにとどまるものではない。むしろ、循環を構造として描いたときに初めて見えてくるのは、「循環していない部分」、すなわち資源の散逸である。

従来、資源問題は主として「どれだけ回収し、どれだけ再利用できるか」という観点で語られてきた。しかし現実には、どの循環系においても、必ず一定の資源が回収されず、あるいは価値を失った形で外部へと流出している。この散逸は、単なる損失ではなく、資源利用の構造そのものを規定する要因である。

CVG においては、製造段階および使用段階における散逸 D_p 、 D_e が明示的に描かれる。このとき、循環は単に閉じたリングではなく、「散逸を伴いながら維持される構造」として現れる。ここにおいて、資源は循環するものというよりも、「散逸を抑えながら利用されるもの」として再定義される。

この視点は、資源観そのものの転換を意味する。すなわち、資源の価値は循環によって維持されるのではなく、散逸によって失われる。そして、その散逸をいかに抑制するかが、資源利用の本質的な課題となる。この意味で、本文章は「サーキュラー・エコノミー」を補完するものとして、「散逸を含む資源経済」という新しい枠組みを示唆するものである。この資源観は、カーボンニュートラルの議論とも深く関係する。CO₂排出は、エネルギーや資源の利用過程における一種の散逸として理解することができる。すなわち、投入された資源価値の一部が、回収されることなく大気中に放出される現象である。このとき、どの循環経路がどの程度のエネルギー投入を必要とし、その結果としてどの程度の CO₂排出

を伴うのかは、CVGの構造の中で直接的に扱うことが可能となる。

さらに重要なのは、ネイチャーポジティブとの関係である。資源の散逸は、単に物質が失われることを意味するのではなく、その多くは自然環境への負荷として現れる。すなわち、採掘に伴う生態系の破壊、廃棄に伴う汚染、さらには微細な物質の拡散といった形で、自然資本の劣化として蓄積される。

このとき、CVGは単に工業的な循環を示す図ではなく、「人間の資源利用と自然との接点」を示す図としても機能する。どの経路で資源が自然へと戻るのか、その戻り方がどのような形で環境に影響を与えるのかを、散逸という概念を通じて読み取ることができるからである。

ネイチャーポジティブとは、自然への負荷を単に減らすだけでなく、正の影響を生み出すことを目指す概念である。そのためには、どこで負荷が発生しているのかを構造として把握する必要がある。CVGは、そのための基盤を提供する。すなわち、資源の流れと散逸の構造を可視化することによって、どの部分に介入すべきかを明確にすることができる。

このように、本手法はサーキュラーエコノミーの枠内にとどまるものではなく、資源安全保障、カーボンニュートラル、ネイチャーポジティブといった異なる政策領域を接続する基盤となる可能性を持つ。それぞれの領域は個別に議論されることが多いが、その根底には共通して「資源の流れとその帰結」が存在している。CVGは、その共通基盤を可視化するものである。

今後の課題としては、技術係数の精緻化や資源価値の定義の深化に加え、散逸の扱いをさらに発展させることが挙げられる。特に、どの散逸が不可避であり、どの散逸が制御可能であるかを区別することは、実践的な政策設計において重要な論点となる。

本文章が示したのは、循環を評価するための一つの方法であると同時に、資源をどのように捉えるかという問いへの一つの応答である。資源は循環するものではなく、散逸しながら利用されるものであり、その散逸をいかに制御するかが問われている。

循環とは、終わりのない運動ではない。

そこには必ず出口があり、その出口の形こそが、資源利用の未来を決めている。

Appendix JSON構造と係数設定の考え方

—現状モデルを基準とした技術係数の記述—

CVGでは、CSVが材料およびスクラップの流れを記述するのに対し、JSONはスクラップがどのような処理を受け、どの材料へ戻るかを記述する。すなわち、CSVが「どこからどこへ流れるか」を示す表であるなら、JSONは「その途中で何が起こるか」を与える技術係数である。

JSONは、スクラップ種ごとに一つの項目を持ち、基本的には次の三つのブロックから成る。

```

{
  "スクラップ名": {
    "meta": {
      "process": "処理名",
      "scrap_class": "分別・ミックス・老廃などの分類",
      "note": "係数設定の説明"
    },
    "input_coeff": {
      "add_scrap": {
        "追加スクラップ名": 係数
      },
      "mu_scrap_total": 追加スクラップ合計,
      "mu_virgin": 新規資源投入係数,
      "mu_energy": エネルギーTMR 換算係数
    },
    "output_coeff": {
      "生成材料名": 係数
    },
    "loss_coeff": {
      "process_loss": 係数
    }
  }
}

```

ここで input_coeff は、対象スクラップを処理するために必要な補助投入を示す。add_scrap は他のスクラップを混合して成分調整を行う場合に用い、mu_virgin はバージン資源の追加投入、mu_energy は処理エネルギーを資源価値に換算したものである。output_coeff は、そのスクラップからどの材料がどの割合で得られるかを示す。loss_coeff は損失を直接与える項であるが、本文章では原則として過大に用いず、出力係数が1に満たない部分として散逸を表すことを基本とした。これは、ロスを出産係数と loss_coeff の両方で数える二重計上を避けるためである。

現状モデルでは、係数設定をできるだけ「現在の一般的なスクラップ利用」に寄せた。たとえば高張力鋼分別スクラップは、高張力鋼へ戻るのではなく、高炉・転炉系に入り普通鋼化するものとして扱った。したがって、出力は普通鋼 0.9 とし、高張力鋼への水平循環は現状では置かなかった。

```

"高張力鋼分別スクラップ": {
  "input_coeff": {

```

```

    "add_scrap": {},
    "mu_virgin": 0.0,
    "mu_energy": 0.1
  },
  "output_coeff": {
    "普通鋼": 0.9
  },
  "loss_coeff": {
    "process_loss": 0.0
  }
}

```

普通鋼分別スクラップについては、電炉で棒鋼へ向かう現実的経路を想定した。その際、成分調整・投入構成として鉄ミックススクラップを0.2加えるものとし、出力は棒鋼0.8とした。これは、普通鋼スクラップであっても、現状では必ずしも自動車用鋼板へ戻るわけではなく、棒鋼などの低位用途へ向かうことを表現するためである。

```

"普通鋼分別スクラップ": {
  "input_coeff": {
    "add_scrap": {
      "鉄ミックススクラップ": 0.2
    },
    "mu_virgin": 0.0,
    "mu_energy": 0.10625
  },
  "output_coeff": {
    "棒鋼": 0.8
  }
}

```

特殊鋼分別スクラップは、比較的品質を維持しやすい分別スクラップとして扱い、特殊鋼0.6、普通鋼0.3へ戻るとした。すべてが特殊鋼に戻るとはせず、一部は普通鋼側へ落ちるものとして、品質保持とダウングレードの中間的な設定とした。

鑄鉄分別スクラップは、鑄鉄としての同系循環が比較的成立しやすいとみなし、普通鋼ミックススクラップ0.01を補助的に加えたうえで、鑄鉄0.9へ戻るとした。

普通鋼ミックススクラップおよび鉄ミックススクラップは、いずれも電炉で棒鋼へ向かうものとし、出口は棒鋼0.9とした。ここでは、ミックス状態であっても鉄資源としては利用されるが、自動車用鋼板のような高品位用途には戻りにくいという現状を表現している。

鉄老廃スクラップは、使用後にシュレッダー等を経て発生するスクラップであり、現状では棒鋼への再生を基本とした。出力は棒鋼 0.75 とし、分別スクラップよりもやや低い回収効率として設定した。

アルミ系では、展延アルミ分別スクラップはごく一部が展延アルミに戻るものの、大部分はアルミ鋳物へ向かうとした。具体的には、展延アルミ 0.01、アルミ鋳物 0.8 である。これは、アルミのスクラップ循環において、展延材から展延材への水平循環が容易ではなく、鋳物側へのカスケードが一般的であることを反映している。アルミスクラップおよびアルミ鋳物分別スクラップはいずれも、アルミ鋳物 0.8 を出口とした。

銅スクラップについては、銅としての回収が比較的成立しやすいが、混入や回収ロスを考慮し、出力を銅 0.6 とした。ミックスメタルスクラップについては、銅 0.1、アルミ鋳物 0.1 とし、多くは有効な材料価値としては残らないものとした。

プラスチックについては、分別された PP、PE はそれぞれ 0.4 程度で同種材料へ戻るものとし、PVC は制約が大きいため 0.2 とした。ミックス廃プラは、再生プラ相当として 0.05 のみを材料回収とし、老廃廃プラは材料出力なしとした。

エネルギー係数 μ_{energy} は、単純な任意係数ではなく、処理エネルギーの TMR を対象スクラップの資源価値係数で割った値として設定した。たとえば鉄スクラップの電炉溶解については、普通鋼 1kg あたりの電炉処理に相当するエネルギー TMR を基準にし、それを各スクラップの ϕ_{value} で割ることで、スクラップ 1 単位あたりの追加資源負担に換算した。これにより、エネルギー負担は材料価値と同じ尺度の中に組み込まれる。

この現状 JSON に対して、新電炉ケースでは差分のみを与える。すなわち、他のスクラップ処理は現状と同じとし、高張力鋼分別スクラップの出口だけを変更する。現状では普通鋼 0.9 であったものを、新電炉ケースでは高張力鋼 0.9 へ戻す。これは、高張力鋼スクラップを高張力鋼として水平循環できる技術が成立した場合を表す。

```
"高張力鋼分別スクラップ": {  
  "output_coeff": {  
    "高張力鋼": 0.9  
  }  
}
```

東鉄型ケースでは、老廃鉄スクラップの出口を変更する。現状では鉄老廃スクラップは棒鋼へ向かうものとしていたが、東鉄型では老廃スクラップから普通鋼を製造する経路を想定し、棒鋼ではなく普通鋼へ戻る割合を高める。この差分によって、単なる鉄スクラップ利用ではなく、自動車材料系へ戻りうる普通鋼化の効果を表現する。

```
"鉄老廃スクラップ": {  
  "output_coeff": {  
    "普通鋼": 0.55,  
    "棒鋼": 0.10  
  }  
}
```

}

}

以上のように、JSON は絶対的な物理モデルではなく、循環技術の状態を縮約して記述するための係数表である。現状モデルは現在一般的に想定されるカスケード的循環を表し、新電炉および東鉄型モデルはその一部を水平循環または高位用途循環へ変更した差分モデルとして位置付けられる。CVG では、このように CSV で製品構造を与え、JSON で技術状態を切り替えることにより、循環構造の変化を比較可能な形で示すことができる。

(原田幸明)

注-本稿の数値は、複数情報源を横断的に統合し、言語統計的整合性に基づく最尤推定値を用いたものである。なお推論に際しては単回生成ではなく、反復的対話により注意の集中を誘導し、確率的偏差の低減を図っている。したがって、本稿の数値は個別事例の値ではなく、構造を表す代表値として解釈されるべきものである。