

自動車用鉄鋼のマテリアルフロー再構成
——価値散逸と高価値循環への転換——

Reconstructing Material Flow of Automotive Steel
— Value Dissipation and High-Value Circularity —

Kohmei Halada

Discussion Paper

2026

This work was developed through iterative dialogue
with a conversational AI system.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19647062>

序文

本稿は、自動車用鉄鋼のマテリアルフローを、従来の単線的な循環図式から解き放ち、工程における分岐と、市中および老廃段階における収束とが織りなす構造として捉え直す試みである。

これまで鉄鋼の循環は、高い回収率と再利用率によって、資源循環の成功例として語られてきた。しかしその評価は主として量に基づくものであり、材料が本来有していた機能価値がどのように扱われているかについては、必ずしも十分に検討されてこなかった。とりわけ、自動車に用いられる高張力鋼のような高機能材料については、回収後に他用途へと転用されることにより、量としては循環していながら、その機能価値が維持されているとは言い難い状況が存在する。

本稿では、この問題を明示的に捉えるために、まずマテリアルフローを工程くずを含めた形で再構成し、サンキー図によって分岐と収束の全体像を可視化する。ついで、このフローに市場価格を与えることで価値フローを導出し、さらに材料価値という概念を導入することにより、市場価値との差分として価値散逸を定義する。

この差分がどこで発生しているのかを特定することにより、循環の問題は量の問題から価値の問題へと転換する。そしてその結果として、高張力鋼工程くずの受け皿としての新電炉という仮説を導入し、その効果を REA および acircularity によって評価する。

最終的に本稿が示そうとするのは、循環を成立させることそれ自体ではなく、価値が失われないうまま伝達される経路をいかに設計するかという問いである。その問いは、技術の問題であると同時に、市場と制度の問題でもある。

第1章 自動車用鉄鋼のマテリアルフロー

——分岐としての工程、収束としての市中

自動車に投入される鋼材の流れを考えると、従来は、粗鋼から製品へ、そして使用済み製品からスクラップへという、いわば単線的な経路として記述されてきた。しかし、実際の現場に目を向けると、その流れは決して単線ではなく、むしろ投入の直後から分岐し、やがて収束していく構造を持っている。本節では、その分岐と収束の具体像を、工程内循環を含めて明示し、サンキー図として可視化するためのフレームを与えることを目的とする。

1.1 基本式

まず、鋼種別の初期投入を

$$x_j (j \in \{A, N, S, C\})$$

とおく。ここで A は高張力鋼、 N は普通鋼、 S は特殊鋼、 C は鋳物である。自動車生産においては、たとえばトヨタ自動車や本田技研工業のプレス工程に、日本製鉄やJFE スチールから供給されるコイルが投入されるが、この段階で既に、後の流れを規定する重要な分岐が生じている。

すなわち、加工工程において一定割合の材料が工程くずとして切り離される。これを

$$P_j = x_j g_j$$

と書けば、典型的に $g_A \approx 0.20$ 前後であり、投入 100 に対して約 20 の工程くずが発生する。残り

$$M_j = x_j (1 - g_j)$$

が製品として車体や部品に組み込まれる。このとき、流れは既に

$$x_j \rightarrow (P_j, M_j)$$

という分岐構造を持つ。従来のマテリアルフローでは、この P_j の多くが工程内で再投入されることを理由に、系外のフローとして明示されない。しかし、サンキー図として流れを捉えるならば、この工程くずこそが、後段の構造を規定する主要な流束である。

この工程くずは、直ちに一樣なスクラップになるわけではない。むしろ、発生直後の段階では、鋼種やコイル由来の情報を保持したまま、複数の経路に分岐する。その分配を

$$\alpha_{j,r}^P$$

と書けば、受け皿 r は

$$r \in \{I, LT, SB, MB, R, L\}$$

で表される。ここで I は内・系列再生、 LT はロット買い、 SB は分別買い、 MB はミックス買い、 R はリパーパス、 L はロスである。

このうち、ロット買い LT は、外見上は市中スクラップとして扱われるが、その実態は工程くずの延長である。たとえば、プレス工場から排出された新断は、商社—メタルワンや豊通マテリアル—によってロット化され、鋼種情報を保持したまま製鉄側に戻る。この経路は、

工程内 $\xrightarrow{\text{物流}}$ 工程外

という形式を取るに過ぎず、分離状態は維持されている。したがって、本論文ではこれを市中くずではなく**工程くず系の外部化**として位置づける。

しかしながら、このロット買いは流れの一部に過ぎない。実際のスクラップ流通の大宗は、ミックス買い MB によって占められている。ここで流れは決定的に変質する。事業内回収業者によって集められた工程くずは、地域リサイクラーのヤードに持ち込まれ、異なる鋼種・異なる発生源のスクラップと混合される。この段階で、もともと持っていた鋼種情報は実質的に失われる。さらに、中規模リサイクラーや商社を経由して、スクラップは均質化された原料として束ねられ、電炉メーカー—たとえば東京製鐵—に供給される。

この一連の流れは、

分離 → 混合 → 均質化

として理解できる。ここで重要なのは、混合が単なる結果ではなく、**機能として担われている**点である。リサイクラーは、スクラップを混ぜることで、サイズを揃え、異物を除去し、電炉に適した原料を作る。その経済合理性は、

$$\Pi = p_0 Q - C_{\text{処理}}$$

に集約され、単価 p_0 が分離状態に依存しない限り、コスト低減のために混合が選好される。この意味で、現在のスクラップ市場は、**混ぜることによって成立している市場**である。

一方、製品として社会に出た鋼材 M_j は、時間を経て老廃くずとなり、回収される。その量を

$$E_j = M_j u_j h_j$$

と書けば、ここでも回収率 u_j や金属回収率 h_j によって一定の量が再びスクラップとして

市場に戻る。しかし、この段階では既に製品の解体やシュレッダー処理を経ており、スクラップは高度に混合された状態にある。したがって、その受け皿は主として

$$r \in \{MB, SH\}$$

すなわちミックス買いとシュレッダーに収束する。ここでの流れは、

$$A \xrightarrow{SH} B$$

のように、鋼種を横断した不可逆的な転換を伴う。

以上をまとめると、初期投入から最終到達までのフローは、

$$T_{j \rightarrow k} = P_j \sum_r \alpha_{j,r}^P \beta_{j,r,k}^P + E_j \sum_r \alpha_{j,r}^E \beta_{j,r,k}^E$$

で表される。この式は単なる形式ではなく、サンキー図における各流束をそのまま定義するものである。実際、工程段階では $\alpha_{j,r}^P$ によって多方向に分岐し、老廃段階では $\alpha_{j,r}^E$ によって少数の経路へと収束する。その結果として、流れは「分岐から収束へ」という非対称な構造を持つ。

この非対称性こそが、本節で明らかにしたい本質である。すなわち、自動車用鉄鋼のマテリアルフローは、

投入 → 分岐（工程） → 収束（市中）

という形を取り、その収束点においてミックス買いが支配的な役割を果たしている。ここでリサイクラーは、スクラップを「分ける主体」ではなく、「混ぜる主体」として機能している。このことは、単に現状の記述にとどまらず、次に論じるべき転換、すなわち

混ぜる → 分ける

への移行の可能性を考える上で、決定的な意味を持つ。

なお、本節で用いたフローは、付属の CSV (edge list) により定量的に与えられており、その各要素はサンキー図として可視化される。そこでは、工程くずと老廃くずの流れが並置され、分離状態の維持される経路と、混合によって収束する経路とが、明確に対比されることになる。

ここまでに見てきた工程段階での分岐、すなわち工程くずが内・系列再生、ロット買い、分別買い、そしてミックス買いへと振り分けられていく流れに加えて、もう一つの大きな経路、すなわち自動車として社会に出た鋼材が時間を経て老廃くずとして回収され、シュレッダー処理へと収束していく流れを重ね合わせてみると、自動車用鉄鋼のマテリアルフローは、はじめて全体像として立ち現れてくる。すなわち、初期投入 x_j は工程において

$$x_j \rightarrow (P_j, M_j)$$

と分岐し、工程くず P_j は分離状態を保持しうる複数の経路に散開する一方で、製品となった M_j は使用段階を経て回収され、

$$M_j \rightarrow E_j = M_j u_j h_j$$

として老廃くずの流れに入る。この E_j は、解体・選別を経たのち、実質的にはシュレッダー工程において再び一つの流れへと束ねられ、そこで異種鋼材が不可逆的に混合されることによって、電炉原料としての均質なスクラップへと変換されていく。したがって、工程段階では

$$P_j \xrightarrow{\alpha_{j,r}^P} r \xrightarrow{\beta_{j,r,k}^P} k$$

と多方向に広がっていた流れは、老廃段階において

$$E_j \xrightarrow{\alpha_{j,SH}^E} SH \xrightarrow{\beta_{j,SH,k}^E} k$$

という形で収束し、結果として

$$T_{j \rightarrow k} = P_j \sum_r \alpha_{j,r}^P \beta_{j,r,k}^P + E_j \sum_r \alpha_{j,r}^E \beta_{j,r,k}^E$$

に示される全体フローは、分岐と収束が非対称に組み合わさった構造を持つことになる。とりわけ高張力鋼に着目すれば、その一部は工程段階で分離を保ったまま内・系列再生や分別買いを経て同種鋼へ戻りうるにもかかわらず、相当部分はミックス買いを通じて平均化され、さらに老廃段階ではシュレッダーによって他鋼種と混合されることで、最終的には棒鋼などの汎用材へと転換される経路が支配的となる。このように、工程段階での「分けうる流れ」と、老廃段階での「混ざらざるをえない流れ」とを同時に描き込んだとき、自動車用鉄鋼のマテリアルフローは、単なる循環の図式ではなく、分離と混合がせめぎ合いながら形成される動的な構造として理解されるのであり、以下のサンキー図はその全体像を、投入から最終到達鋼種に至るまで一望のもとに示すものとなっている。

1.2 基本の集合と投入量

本稿では、自動車に投入される鋼材を、まず四つの鋼種群に分ける。すなわち、高張力鋼を A 、普通鋼を N 、特殊鋼を S 、鋳物を C とし、

$$j \in J = \{A, N, S, C\}$$

と置く。自動車生産に投入される鋼材量を

$$x_j$$

とし、その総和を 100 に正規化して

$$\sum_{j \in J} x_j = 100$$

とする。ここでの 100 は、車両 1 台の絶対重量ではなく、**構成量比率を投入量比率の代理変数として用いた規格化値**である。すなわち、本稿のフローはまず「どの鋼種がどのように分岐し、どこへ到達するか」を示すためのものであって、個々の車種差、部位差、設計年代差を均した代表的な構成を基礎にしている。

その代表値として、これまでの議論との整合上、ここでは

$$x_A = 47.5, x_N = 32.5, x_S = 7.5, x_C = 12.5$$

を置く。これは、現在の自動車において高張力鋼の比率が相当に高まり、普通鋼がなお相当量残り、特殊鋼と鋳物が駆動系・機械系・鋳造系の構成要素として一定の地位を占めている、という現状を反映した代表値である。WorldAutoSteel 系の車体設計知見や、高性能シート鋼の比率上昇傾向は、この置き方の背景にあるが、この比率そのものはモデル用代表値である。

1.3. 工程くずの発生

投入された鋼材は、そのまま全量が自動車になるわけではなく、プレス、切削、鋳造などの工程において一定割合が工程くずとして現れる。鋼種 j の工程くず発生率を

$$g_j$$

とすると、工程くず量は

$$P_j = x_j g_j$$

であり、自動車として組み込まれる量は

$$M_j = x_j(1 - g_j)$$

で与えられる。

代表値としては、

$$g_A = 0.20, g_N = 0.18, g_S = 0.15, g_C = 0.30$$

と置く。高張力鋼と普通鋼ではプレス工程由来のくずが、特殊鋼では切削・鍛造前後のく

ずが、鋳物ではランナー・押湯・不良品によるくずが相対的に大きい。とりわけ鋳物で g_c を高く置いているのは、鋳造工程内での戻し材が構造的に大きいためである。鋳物の内部リターンの存在、ならびに特殊鋼メーカーがスクラップを主原料として循環製造を行っていること自体は一次資料で支えられるが、ここでの係数そのものはサンキー図用の代表値である。

このとき、投入 100 に対して工程くずは

$$P_A = 9.5, P_N = 5.85, P_S = 1.125, P_C = 3.75$$

となり、総工程くず量は

$$\sum_j P_j = 20.225$$

となる。ここで、従来のマテリアルフローでは、この工程くずのかなりの部分が工程内・系列内で再投入されることを理由に、系外フローとして明示されないことが多い。だが、本稿ではこれをあえて立てている。なぜなら、この約 20 という量は、後に示すように、フロー全体を厚くし、同時にロット買いやミックス買いへ分岐する入口でもあるからである。

1.4. 工程くずの受け皿

工程くずは、発生した後に一様な「市中スクラップ」になるのではなく、複数の受け皿へ分配される。その受け皿を

$$r \in R^P = \{I, R, LT, SB, MB, L\}$$

とし、それぞれを

- I : 内・系列再生
- R : リパーパス
- LT : ロット買い
- SB : 分別買い
- MB : ミックス買い
- L : ロス

と定義する。

鋼種 j の工程くずが受け皿 r に入る比率を

$$\alpha_{j,r}^P$$

とし、

$$\sum_{r \in R^P} \alpha_{j,r}^P = 1$$

とする。ここでの肝要な点は、従来一括して「市中くず」と呼ばれていたものの中に、実際にはロット買いと分別買いのような“分離を保った流れ”と、ミックス買いのような“混合を前提とする流れ”が混在している、ということである。

代表値として、工程くずの分配を次のように置く。

高張力鋼については

$$(\alpha_{A,I}^P, \alpha_{A,R}^P, \alpha_{A,LT}^P, \alpha_{A,SB}^P, \alpha_{A,MB}^P, \alpha_{A,L}^P) = (0.03, 0.02, 0.15, 0.10, 0.65, 0.05)$$

普通鋼については

$$(0.10, 0.03, 0.15, 0.07, 0.60, 0.05)$$

特殊鋼については

$$(0.45, 0.03, 0.05, 0.12, 0.25, 0.10)$$

鋳物については

$$(0.80, 0.02, 0.03, 0.03, 0.09, 0.03)$$

とする。ここでは、鋳物と特殊鋼では内部・系列内再生 I が大きく、高張力鋼と普通鋼ではミックス買い MB が支配的になるという現状認識を反映している。愛知製鋼の統合報告書に見られるように、特殊鋼の世界では自動車・インフラ由来のスクラップを電炉で再資源化する構造が明確であり、鋳物でも工程内リターンは極めて大きい。他方、高性能シート鋼ではスクラップ汚染が大きな障害となるため、AHSS の工程くずであっても最終的にはミックス買いに流れやすい。

1.5 自動車化と老廃くず回収

工程を経て自動車に組み込まれた鋼材 M_j は、使用段階を経て老廃くずとなる。そのうち、国内で廃車回収ルートに入り、金属として回収される量を

$$E_j = M_j u_j h_j$$

とする。ここで

- u_j : 国内回収ルート流入率
- h_j : 金属回収率

である。

簡便化のため、ここでは鋼種によらず

$$u_A = u_N = u_S = u_C = u = 0.611$$

$$h_A = h_N = h_S = h_C = h = 0.95$$

と置く。前者は、日本における使用済み自動車引取台数約 256 万台と中古車輸出台数約 163 万台から導いた代表値であり、後者は自動車リサイクル全体の高い金属回収性を踏まえたモデル値である。したがって、

$$E_A = 22.06, E_N = 15.47, E_S = 3.70, E_C = 5.08$$

となる。ここで重要なのは、工程くずが「製造段階での分岐」であったのに対し、老廃くずは「社会ストックを経た後の回収」であるため、その段階で既に混合・劣化が進んでいることである。

1.6 老廃くずの受け皿

老廃くず側の受け皿を

$$r \in R^E = \{I, R, LT, SB, MB, SH, L\}$$

とし、ここで SH を老廃シュレッダーとする。鋼種 j の老廃くずが受け皿 r に入る比率を

$$\alpha_{j,r}^E$$

とし、

$$\sum_{r \in R^E} \alpha_{j,r}^E = 1$$

とする。

代表値としては、高張力鋼について

$$(\alpha_{A,I}^E, \alpha_{A,R}^E, \alpha_{A,LT}^E, \alpha_{A,SB}^E, \alpha_{A,MB}^E, \alpha_{A,SH}^E, \alpha_{A,L}^E) = (0.00, 0.01, 0.01, 0.03, 0.10, 0.80, 0.05)$$

普通鋼については

$$(0.02, 0.02, 0.02, 0.03, 0.10, 0.78, 0.03)$$

特殊鋼については

$$(0.10, 0.02, 0.03, 0.08, 0.22, 0.50, 0.05)$$

鋳物については

$$(0.05, 0.02, 0.02, 0.02, 0.08, 0.78, 0.03)$$

と置く。ここでは、老廃くず段階に入るとシュレッダー SH が支配的になり、とりわけ高張力鋼ではこの傾向が顕著であることを表している。これは、スクラップ汚染、とくに Cu や Sn などの残留元素が高性能シート鋼への再生を難しくするという、近年の総説の指摘と整合している。

1.7 最終到達鋼種

最終到達鋼種を

$$k \in K = \{A, N, B, C, S, L\}$$

とし、それぞれを

- A : 高張力鋼
- N : 普通鋼
- B : 棒鋼
- C : 鋳物
- S : 特殊鋼
- L : ロス

と定義する。

受け皿 r から最終鋼種 k に到達する比率を

$$\beta_{j,r,k}^P, \beta_{j,r,k}^E$$

とすると、

$$\sum_{k \in K} \beta_{j,r,k}^P = 1, \sum_{k \in K} \beta_{j,r,k}^E = 1$$

である。

工程くず由来の最終フローは

$$F_{j \rightarrow k}^P = P_j \sum_{r \in R^P} \alpha_{j,r}^P \beta_{j,r,k}^P$$

老廃くず由来の最終フローは

$$F_{j \rightarrow k}^E = E_j \sum_{r \in R^E} \alpha_{j,r}^E \beta_{j,r,k}^E$$

したがって、初期鋼種 j から最終鋼種 k への総到達量は

$$T_{j \rightarrow k} = F_{j \rightarrow k}^P + F_{j \rightarrow k}^E$$

となる。これが、そのままサンキー図のエッジを与える数量である。

ここでとりわけ重要なのは、ダウングレードを一括りにしないことである。すなわち、

$$A \rightarrow N, A \rightarrow B, N \rightarrow B, S \rightarrow N, C \rightarrow N$$

のように、どの鋼種が、どの鋼種へ落ちるのかを個別に立てる必要がある。なぜなら、高張力鋼から普通鋼への転換と、高張力鋼から棒鋼への転換とは、後に価値を論じる際に意味が全く異なるからである。

1.8 サンキー図に至る数値化の位置づけ

以上の式群は、単に図を描くための便法ではない。むしろ、自動車用鉄鋼のマテリアルフローを、工程で分岐し、市中・老廃で収束する動的な構造として把握するための骨格である。工程くずを明示したことにより、従来フローでは不可視だった約 20 前後の流れが前面に現れ、ロット買いを工程くず系として再配置したことにより、「市中スクラップ」と一括されていた領域が、実は分離を保った流れと混合された流れの重層体であることが見えてくる。そして、この数量的整理は、次に続く価値の議論において、どの鋼種がどの程度失われ、どの程度維持されているかを論じる際の、不可欠の量的基盤となる。

■. 参考資料群（係数設定の背景）

以下に、上記係数を置く際に参照した資料群を列挙する。ここで改めて確認しておくべきは、これらの資料が個々の係数をそのまま与えるわけではなく、実在する工程・市場・技術制約に整合するように、代表値を構成するための基礎を与えている、ということである。

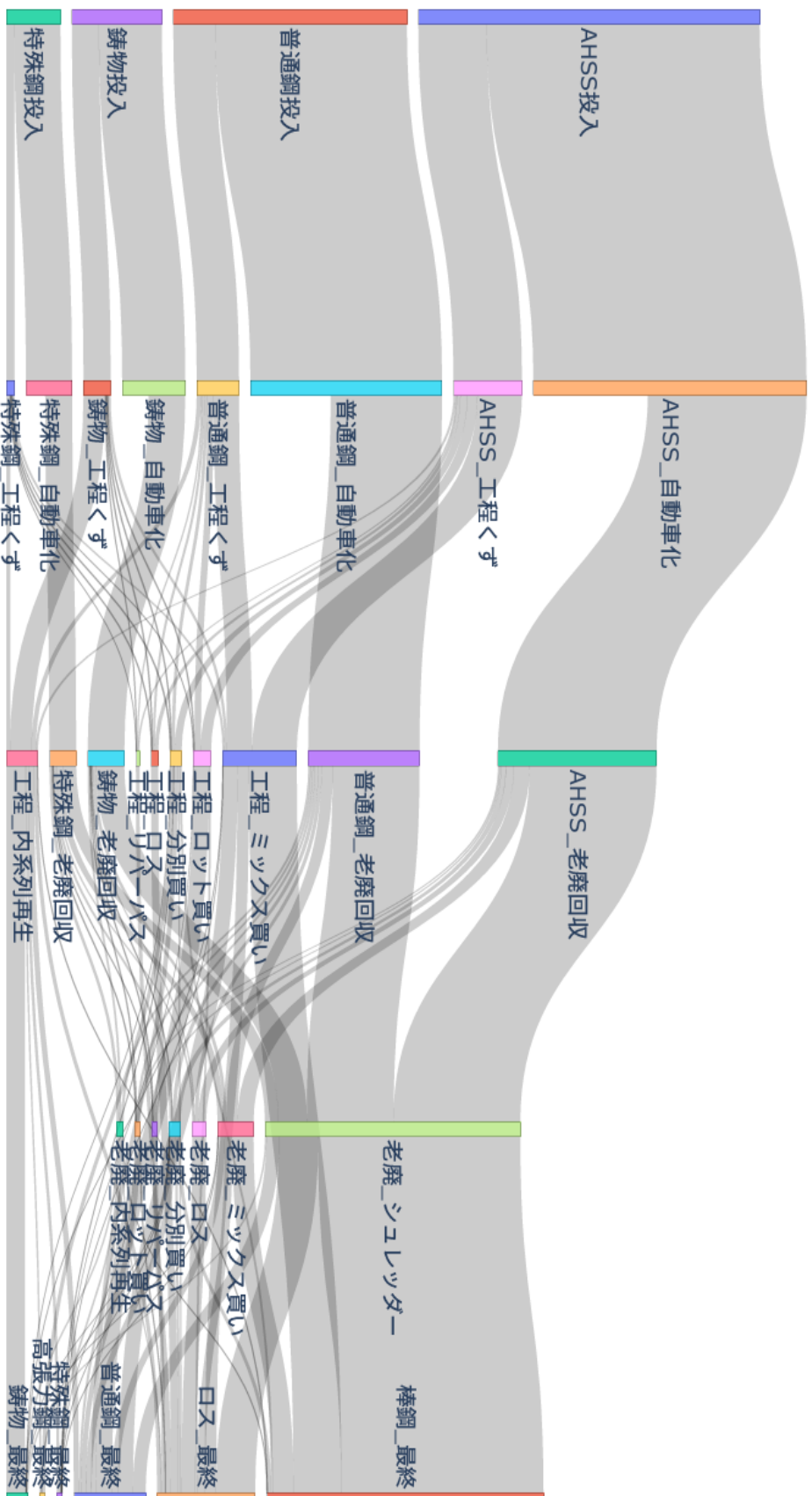
- 環境省「平成 24 年度鉄スクラップの高度利用化調査業務 報告書」
東京製鐵による新断ち屑+老廃スクラップからの自動車用鋼板試作、980-1180 MPa 級への到達。
- worldsteel “Scrap use in the steel industry”
BF-BOF ルートでのスクラップ使用比率（BOF 装入典型 15-25%）、スクラップの役割。
- worldsteel “Steel Facts 2023”
BF-BOF および EAF の代表原料構成（1000 kg 粗鋼当たりの鉄鉱石・石炭・スクラップ）。
- 経産省・自動車リサイクル WG 議事録／資料
使用済み自動車引取台数約 256 万台、中古車輸出台数約 163 万台。
- Aichi Steel Integrated Report 2025 / 2024
電炉特殊鋼メーカーとしての資源循環、自動車・インフラ解体由来スクラップの利用。

- Raabe et al., “Circular Steel for Fast Decarbonization,” Annual Review of Materials Research, 2024

高性能シート鋼に対するスクラップ汚染、残留元素制約、老廃くずの限界。

自動車用鋼の循環フロー

03 000 000



第二章 価値を用いた考察 —— フローに価格を与えるということ

2.1 価値で捉える

前章において示したサンキー図は、鋼材がどこからどこへ、どのような経路を通過して移動しているかを、量として把握するものであった。そこでは、高張力鋼が工程くずとして発生し、それがミックス買い、分別買い、あるいは老廃くずとして回収され、最終的に普通鋼や棒鋼へと至る流れが明らかにされた。しかし、その図はあくまで「どれだけ動いたか」を示すにとどまり、「その移動がどのような意味を持つのか」については何も語っていない。

ここで一步踏み込み、この同一のフローに価格を与えることを考える。すなわち、各フロー $T_{j \rightarrow k}$ に対して、その時点で市場において付与される単価 p を掛け合わせることで、

$$V_{j \rightarrow k}^{market} = T_{j \rightarrow k} \cdot p(\text{その段階})$$

という形で価値を定義する。この操作は単純に見えるが、実はここに本章の核心がある。なぜなら、この「その段階」という条件が、価値を一意に定めるのではなく、むしろ段階ごとに異なる評価体系を導入するからである。

たとえば、同じ1トンの鋼であっても、それが工程くずとして扱われる場合にはスクラップ価格 p_{scrap} が適用され、ロットとして整形されればロット価格 p_{lot} 、さらに製品として棒鋼になれば製品価格 p_{bar} が適用される。したがって、同一の物量に対して、

$$T \cdot p_{scrap} \rightarrow T \cdot p_{bar}$$

というように、価値はフローに沿って変化する。ここで重要なのは、この変化が材料の本質的な価値変化を意味しているわけではなく、あくまで市場における取引形態の変化に応じた価格の再設定であるという点である。

2.2 価値フローサンキュー図

このようにして得られる $V_{j \rightarrow k}^{market}$ をリンクの太さとして描いたものが、本章で扱う価値フローサンキーである。この図は、量サンキーと同一の構造を持ちながら、その内部に価格体系を埋め込むことによって、フローが経済的にどのように成立しているかを可視化する。すなわち、量サンキーが物質の移動を示すものであるのに対し、価値サンキーはその移動がどのような価格体系のもとで支えられているかを示すものである。

ここで一つ注意しなければならないのは、この価値は保存量ではないということである。すなわち、

$$\sum_{j,k} T_{j \rightarrow k} \cdot p(\text{途中段階}) \neq \sum_{j,k} T_{j \rightarrow k} \cdot p(\text{最終段階})$$

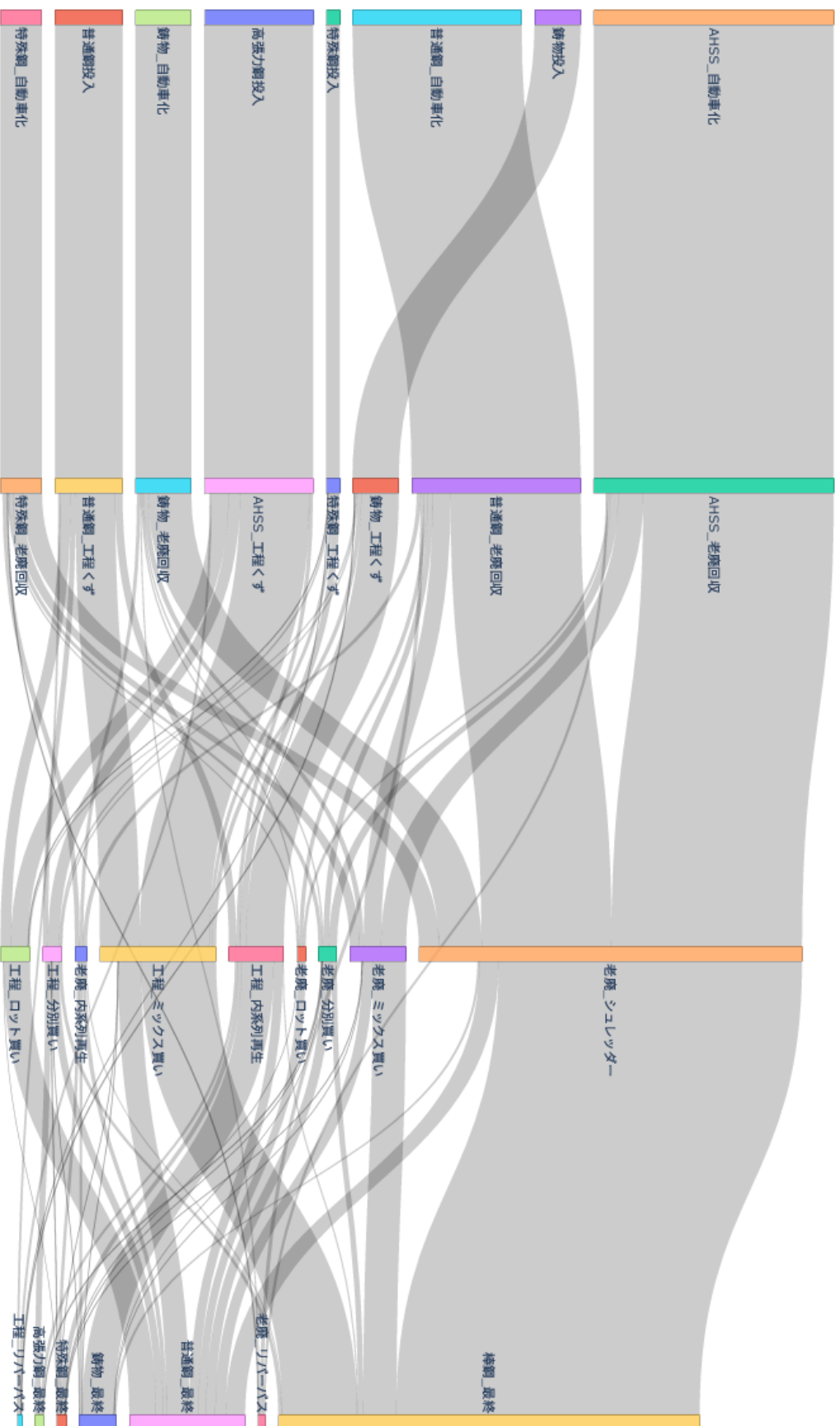
となり得る。これは、各段階で価格が付け替えられるためであり、したがって価値フローサンキーは、量サンキーのように入口と出口が一致することを前提としていない。この点はむしろ積極的に評価すべきであり、なぜならここにこそ、スクラップの分別、ロット化、加工といった過程が、どのように価格を生み出しているかが現れるからである。実際に本研究で用いた代表的な単価は、以下のように整理される。高張力鋼の材料価値はおおよそ 140,000 円/t、普通鋼は 100,000 円/t、棒鋼は 80,000 円/t 程度とした。一方、スクラップ価格については、日本鉄リサイクル工業会および鉄鋼新聞等で報告されている H2 スクラップ価格 (50,000~60,000 円/t 程度) を参考に、ミックス買いを 53,000 円/t 前後、分別スクラップをそれよりやや高い水準として設定した。また、ロット買いについては品質保証が付加されることから、ミックスより数千円程度高い価格帯を仮定している。これらはすべて市場実勢に基づくレンジの中で設定されたものであり、個別企業の契約価格を再現するものではないが、全体の構造を把握するには十分な精度を持つ。

この単価体系を量フローに重ねると、興味深いことが起きる。すなわち、高張力鋼がミックススクラップとして流通する段階では価値は一旦低下するが、その後棒鋼として再製品化されることで再び上昇する。この結果、価値サンキーの出口は、必ずしも入口より小さくならず、場合によっては膨らむことさえある。この現象は一見すると奇異に映るが、これは価値が増加したのではなく、**異なる価格体系のもとで再評価された結果**である。

ここにおいて、価値フローサンキーは一つの重要な事実を示している。それは、現在の鉄スクラップの流通は、材料としての価値を保存することよりも、むしろ市場において取引可能な形に変換することによって成立している、ということである。すなわち、分別よりも混合、品質保持よりも供給安定が優先される構造が、価格体系の中に内在している。

以上のようにして導かれる価値フローサンキーは、単なる量の可視化を超え、経済システムの作動原理そのものを映し出すものである。しかし同時に、この図だけでは、材料としての価値がどのように扱われているかは見えてこない。なぜなら、この図が描いているのは「市場で実現された価値」であって、「本来有していた価値」ではないからである。この差異こそが、次章で扱うべき問題、すなわち材料価値と市場価値の差分として現れるのである。

自動車用鋼の市場価値サンキー (投入→工程<ず/自動車化→スクラップ段階→最終到達、ロス非表示)



第三章 価値はどこで失われるのか —— 材料価値と市場価値の差分の可視化

第二章において、同一の物質フローに対して市場価格を付与することにより、価値フローサンキーを導出した。そこでは、量としては保存されるフローが、価格体系の変化に応じて膨張あるいは収縮しうること、そしてその変化が材料の本質的価値ではなく、取引形態に依存した再評価であることを示した。しかし、ここでなお残る問いがある。それは、**材料が本来有していた価値は、その過程のどこで、どのように扱われているのか**という問いである。

3.1 材料価値

この問いに答えるために、本章では材料価値という概念を明示的に導入する。すなわち、各フロー $T_{j \rightarrow k}$ に対して、その出発点における鋼種 j の価格 p_j を一貫して適用し、

$$V_{j \rightarrow k}^{material} = T_{j \rightarrow k} \cdot p_j$$

と定義する。これに対し、市場価値は前章と同様に、

$$V_{j \rightarrow k}^{market} = T_{j \rightarrow k} \cdot p_k$$

あるいは中間段階では p_r を用いて評価される。ここで両者の差として、

$$L_{j \rightarrow k} = V_{j \rightarrow k}^{material} - V_{j \rightarrow k}^{market} = T_{j \rightarrow k} (p_j - p_k)$$

を定義する。この $L_{j \rightarrow k}$ は単なる損失ではない。それは、**材料が本来有していた機能価値が、最終用途において実現されなかった部分**を意味する。すなわち、価値が消滅したのではなく、**実現されなかったまま系内に散逸した価値**である。

この差分を全フローについて積算すれば、

$$\sum_{j,k} L_{j \rightarrow k} = \sum_j x_j p_j - \sum_{j,k} T_{j \rightarrow k} p_k$$

となり、投入された材料価値総量と、最終的に市場において実現された価値との差として解釈できる。この式は単純であるが、その含意は深い。すなわち、現在のスクラップ循環は、量としては閉じていても、価値としては必ずしも閉じていないのである。

では、この差分 $L_{j \rightarrow k}$ はどこで発生しているのか。前章までのフローを重ねて検討すると、差分は均等に分布しているわけではなく、明確に二つの段階に集中していることが分かる。

3.2 材料価値差分の発生

第一は、**高張力鋼を含む高機能材がミックススクラップへと組み込まれる段階**である。工

程くずとして発生した高張力鋼は、本来であればその組成が既知であり、同等用途への再利用が可能な状態にある。しかし、これがミックス買いの過程に入ると、他の鋼種と混合されることにより、その機能的同一性が失われる。このとき、価格はミックススクラップの水準 p_{mix} に再設定されるため、

$$L_{AHSS \rightarrow mix} = T_{AHSS \rightarrow mix}(p_{AHSS} - p_{mix})$$

という差分が発生する。この段階ではまだ材料は物理的には存在しているが、その**識別可能性が失われること**によって**価値が低下する**のである。ここにおいて、価値の散逸は「物質の変化」ではなく「情報の喪失」として起こる。

第二は、**老廃くずとして回収された後の段階**である。自動車として使用された鋼材は、解体およびシュレッダー処理を経ることにより、さらに細分化され、異種材料との混合が進む。この過程においては、すでに材料の履歴情報はほぼ完全に失われており、価格はシュレッダースクラップとしての平均的水準に収束する。ここでは、

$$L_{j \rightarrow shredder} = T_{j \rightarrow shredder}(p_j - p_{sh})$$

として表される差分が生じるが、この段階の特徴は、その不可逆性にある。すなわち、工程くず段階であれば分別による回復の可能性が残されているのに対し、老廃くず段階では、もはや元の鋼種へ戻るための情報も構造も失われている。このため、差分は単に発生するだけでなく、**回収不能な形で固定される**。

以上の二点を踏まえると、差分価値の発生は連続的ではなく、むしろ特定の段階において集中的に生じていることが理解される。すなわち、

高機能材がミックススクラップへと組み込まれる瞬間

および

老廃くずとして不可逆的に処理される段階

において、価値の散逸が顕著に発生する。

この構造を可視化するために、本章の最後に示す図は、単なる市場価値サンキーではない。それは、

$$V_{j \rightarrow k}^{material} = V_{j \rightarrow k}^{market} + L_{j \rightarrow k}$$

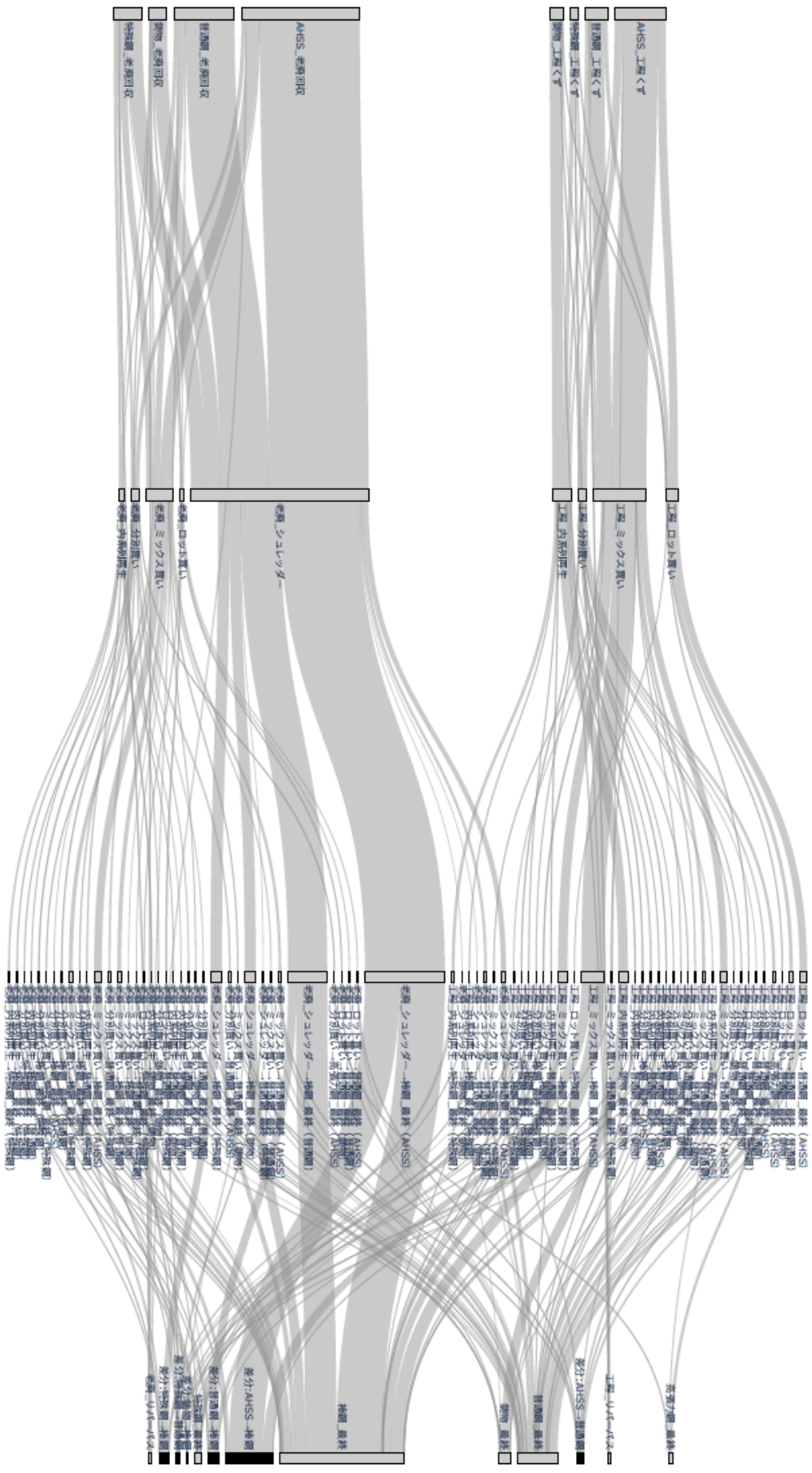
という関係をそのまま図式化したものであり、各フローは市場価値として実現される本流と、差分価値として横に流出する流れに分解される。このとき、黒く示された差分の流れは、単なる損失ではなく、**本来実現可能であった価値が実現されなかった領域**を表す。

この図において最も特徴的なのは、高張力鋼がミックススクラップおよび老廃くずの経路を経て棒鋼や普通鋼へと至る部分において、差分が極めて大きくなることである。すなわち、現在の循環システムは、量としては閉じているにもかかわらず、価値としては大きな散逸を伴っている。この事実は、単なるリサイクル率では捉えることができず、材料価値

という視点を導入することによって初めて明らかになる。

ここにおいて、循環の問題は量の問題から価値の問題へと転換する。そしてその差分がどこで生じているかを特定することは、単なる分析にとどまらず、次章で扱うべき問い、すなわちいかにしてこの差分を抑制しうる社会システムを設計するかへと直結するのである。

材料価値＝市場価値＋差分価値（差分ノード黒表示）



第四章 価値を失わない循環は可能か ― 高張力鋼板用新電炉という試み

前章において、材料価値と市場価値の差分 $L_{j \rightarrow k} = T_{j \rightarrow k}(p_j - p_k)$ を導入することにより、現在の鉄スクラップ循環が量としては閉じていながら、価値としては大きな散逸を伴っていることが明らかになった。とりわけ、高張力鋼がミックススクラップへと組み込まれる段階、さらに老廃くずとして処理される段階において、差分が集中して発生していることは、単なる偶然ではなく、現行の市場構造そのものの帰結である。

この構造に対して、「価値を失わない循環」は成立しうるのか。本章ではその問いに対する一つの具体的な応答として、高張力鋼板用の新電炉を受け皿とした循環の再設計を検討する。ただしここで重要なのは、電炉という設備そのものではない。問題はむしろ、その設備が受け入れることを前提として構築される**分別と流通の仕組み**、すなわち価値が伝達される回路の設計にある。

4.1 仮定の設定

まず仮定を明示する。本研究では前章までに示したフローに対し、以下の変更のみを導入する。

高張力鋼の工程くずのうち、ミックススクラップへ流れていた部分の80%が分別され、新電炉により再び高張力鋼として利用される。

このとき、他のフロー、すなわち老廃くずの流れや普通鋼・特殊鋼・鋳物の挙動は変化しないものとする。したがって、変化は局所的でありながら、その効果がどの程度全体に波及するかを見ることができ。

この仮定に基づくと、工程くず段階における高張力鋼の流れは二つに分岐する。従来は

$$T_{AHSS \rightarrow mix}^{proc}$$

としてミックススクラップに流入していたものが、

$$\begin{aligned} 0.8 T_{AHSS \rightarrow mix}^{proc} &\rightarrow \text{新電炉 AHSS} \\ 0.2 T_{AHSS \rightarrow mix}^{proc} &\rightarrow \text{従来ミックス} \end{aligned}$$

と再配分される。このうち新電炉へ流入した部分については、

$$V^{market} = T \cdot p_{AHSS}$$

が成立し、すなわち

$$L_{AHSS \rightarrow AHSS} \approx 0$$

となる。ここで初めて、差分が発生しない経路が明示的に導入される。

一方で、残りの20%については従来と同様にミックススクラップへ流入し、棒鋼あるいは

普通鋼として再利用されるため、

$$L_{AHSS \rightarrow B} = T_{AHSS \rightarrow B}(p_{AHSS} - p_B)$$

に対応する差分は依然として残る。しかしその総量は、

$$\sum L_{new} \approx 0.2 \sum L_{current}$$

と大きく低減されることになる。

ここで数値を置くと、前章において工程くずミックス経由の差分が概ね 30 万円相当であったとすれば、本仮定のもとではそれが約 6 万円規模にまで縮小する。この値は厳密な実測ではなく、ミックススクラップ価格（約 5.0~6.0 万円/t）、棒鋼価格（約 8.0 万円/t）、高張力鋼価格（約 14 万円/t）といった市場実勢レンジ（日本鉄リサイクル工業会、鉄鋼新聞等）に基づく概算であるが、差分の縮減が桁違いであることは十分に示される。

この結果をサンキー図として見ると、前章で黒く示された差分の流れは、工程くず段階において顕著に細くなる。特に、高張力鋼から棒鋼へと至る主経路において、従来は本流と同等あるいはそれ以上の太さを持っていた差分流が、新電炉導入後にはほとんど消失する。この変化は単なる量の再配分ではなく、**価値の実現経路が切り替わった**ことを意味している。

4.2 仮定成立の前提条件

しかしここで注意すべきは、この変化が「技術を導入すれば自動的に実現する」ものではないという点である。むしろこの仮定が成立するためには、いくつかの前提条件が満たされなければならない。すなわち、

工程くずの段階で高張力鋼が識別され、その情報が流通過程で保持されること、その識別されたスクラップに対して高張力鋼としての価格が支払われること、そしてその価格差を正当化する需要、すなわち高張力鋼として再利用される市場が存在すること、である。

これらはすべて、前章で差分が発生していた要因と表裏一体である。すなわち、価値が失われていた理由を逆転させることによってのみ、価値を保持する循環が成立する。

この意味において、新電炉は単なる設備ではなく、**価値を保持するための結節点**である。それはミックスによって均質化される流れの中に、再び分解能を持ち込む装置であり、材料が本来持っていた機能価値を市場において再び実現可能にする仕組みである。

したがって、本章で提示した仮定は、現実の完全な再現ではないにせよ、一つの方向を示している。それは、

循環を成立させるのは物量ではなく、価値が失われない経路の設計である

ということである。そしてその経路がサンキー図の中でどのように現れるかは、単に線の太さの変化としてではなく、黒い差分の流れがどこで消え、どこに残るかという形で、直

観的に読み取ることができるのである。

この図の差異を読み解くことは、そのまま次章で扱う指標——すなわち Acircularity および REA——の意味を理解するための前提となる。なぜなら、それらの指標はまさに、この差分の総量と構造を数値として捉え直したものに他ならないからである。

第五章 価値を活かす循環は、どこまで近づいたのか

— REA と acircularity による新電炉シナリオの評価 —

ここまでの議論によって、現在の鉄スクラップ循環が、量としては閉じているにもかかわらず、価値としては大きな散逸を伴っていること、しかもその散逸が高張力鋼板のような高機能材に集中していることが見えてきた。とりわけ、工程くずとしてまだ高い識別性を持っている段階で、それがミックススクラップに組み込まれてしまうことが、価値の落差を決定的に大きくしている。第四章で導入した「高張力鋼板用新電炉」は、この落差を埋める一つの仮説であったが、その意味を単にサンキー図の見え方だけで語ってしまうと、どうしても印象論に近づいてしまう。そこで本章では、原田・田原・松本論文で提案された **REA (Resource Efficiency Account)** と **acircularity** を用いて、この差を数量として読んでみる (<https://doi.org/10.20965/ijat.2022.p0684>)。ここで重要なのは、この指標が単なる循環量ではなく、**価値を活かしたかどうか** を正面から評価しようとしている点にある。そこにこそ、本稿のこれまでの議論との深い接点がある。

5.1 REA と acircularity

原田・田原・松本論文の要点は、資源循環を「量」ではなく「価値」の系として捉え直した点にある。論文では、機能段階を支える構成材料の総価値を

$$M = \sum m_j v_j$$

と定義し、そこから自系内循環 C_s 、他系への循環供給 C_e 、さらに工程段階の自然資源要求 R_v や工程内散逸 D_p 、使用後の散逸 D_e を組み合わせて、循環からどれだけ離れているかを表す指標として

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

を提案している。さらに、機能 f を与えたときの資源効率を

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

と定義し、また材料効率 $ME = f/M$ と組み合わせて

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

という関係を導いている。ここで重要なのは、論文が「循環率」ではなく、「価値の散逸」を中心に指標を組み立てていることである。すなわち、材料が他用途に落ちていくこ

と、あるいはスクラップ品質が下がることを、単なるカスケード利用としてではなく、**本来の価値の未実現=散逸**として把握しようとしている。今回われわれがサンキー図で黒い差分流として可視化したものは、まさにこの論文でいう dissipation の感覚に対応している。

5.2 REA の適用

ただし、ここで直ちに注意しておかなければならないことがある。原論文は自動車全体を対象に、各材料の specific TMR を資源価値係数として用い、さらに工程スクラップ、EoLスクラップ、外部からの循環材などを含めた全体系を評価している。これに対し本稿でここまで扱ってきたのは、自動車全体ではなく、**高張力鋼工程くずがどのような受け皿に流れ、そこでどれだけ価値を失うか**という、より局所的なフローである。したがって、本章で行う評価は、原論文の完全な再現ではなく、**その指標思想を高張力鋼工程くずの受け皿モジュールに適用した比較評価**であることを、まず明示しておきたい。絶対値としての REA や acircularity を自動車全体の既往研究と同列に置くことはできないが、少なくとも「現状の受け皿」と「新電炉を受け皿に持つ場合」との比較には、極めて有効である。そのうえで、本章の評価に用いる仮定を明確にしておく。第一に、評価対象は **AHSS (高張力鋼) 工程くずのうち、従来ミックススクラップに流れていた 6.175 t** の部分とする。これは前章までのフローで導入した値であり、この流れの行き先だけを変える。第二に、価値係数 v_j としては、原論文が price を暫定的な explanatory variable として認めつつも、最終的には specific TMR が望ましいとしている議論に従い、本稿では比較のために価格ベースを用いる。すなわち、高張力鋼の材料価値単価を

$$v_{AHSS} = p_{AHSS} = 140,000 \text{ 円/t}$$

とする。これは前章までの市場価値・材料価値サンキーで一貫して用いてきた仮定であり、ここでもそのまま維持する。第三に、本章の比較では、工程くずがすでに発生した後の受け皿の違いだけを見ているため、このモジュールに関する自然資源要求は

$$R_v = 0$$

と置く。これは「鋼板を作るところ」ではなく、「できてしまった工程くずをどう扱うか」を見ているからである。第四に、この受け皿モジュール内部で新たな工程損失を明示的には計上していないので、

$$D_p = 0$$

とする。もちろん厳密には、新電炉プロセスにも追加エネルギーや歩留まりの問題は存在するはずであり、ここは今後の詳細化課題である。しかし、本章の目的は受け皿の違いによる**価値散逸の差**を見ることにあるので、まずはここを一定として比較する。第五に、サ

ービス機能 f は比較対象間で同じとし、

$$f = 1$$

とおく。これは原論文のケーススタディでも、機能が同じであるときの比較のために用いられている簡潔な扱い方に倣うものである。

この仮定のもとで、まず現状ケースを評価する。現状ケースでは、この 6.175 t の AHSS 工程くずはミックススクラップ経路に入り、その後、普通鋼 1.235 t と棒鋼 4.014 t として市場価値が実現される。ここで材料価値は、前章で定義した通り

$$V_{j \rightarrow k}^{material} = T_{j \rightarrow k} p_j$$

であり、市場価値は

$$V_{j \rightarrow k}^{market} = T_{j \rightarrow k} p_k$$

であるから、差分価値は

$$L_{j \rightarrow k} = T_{j \rightarrow k} (p_j - p_k)$$

となる。現状ケースについては、普通鋼化部分で

$$L_{AHSS \rightarrow N} = 1.235 \times (140,000 - 100,000) = 49,400 \text{ 円}$$

棒鋼化部分で

$$L_{AHSS \rightarrow B} = 4.014 \times (140,000 - 80,000) = 240,840 \text{ 円}$$

であるから、価値散逸の合計は

$$D_e^{(current)} \approx 49,400 + 240,840 = 290,240 \text{ 円}$$

となる。これは 0.29024 百万円であり、前章で黒い差分流として見えていたものそのものである。

次に、このモジュールの構成材料価値 M を置く。対象とする AHSS 工程くずは 6.175 t であり、その材料価値単価は 140,000 円/t であるから、

$$M = 6.175 \times 140,000 = 864,500 \text{ 円}$$

となる。したがって、現状ケースの acircularity は、このモジュールに限れば

$$\text{Acircularity}_{current} = \frac{R_v + D_e + D_p}{M} = \frac{0 + 290,240 + 0}{864,500} \approx 0.336$$

である。これは、理想循環からの距離が 0.336 だけある、言い換えれば、対象となる

AHSS 工程くず価値の約三分の一が、受け皿のあり方によって本来の形では実現されていないことを意味している。さらに REA は

$$REA_{current} = \frac{f}{R_v + D_e + D_p} = \frac{1}{0.29024} \approx 3.45 \text{ (service / 百万円散逸)}$$

と書ける。ここでは分母を百万円単位にとっているので、1百万円の価値散逸あたり、どれだけのサービスを維持できているか、という見方になる。

これに対して、新電炉ケースでは、第四章の仮定どおり、ミックススクラップへ行っていた 6.175 t のうち 80% が分別され、高張力鋼用新電炉に入り、再び高張力鋼として実現される。すると、従来のミックス経路に残るのは 20% であり、差分価値もそのまま 20% に縮小する。したがって、

$$D_e^{(new)} = 0.2 \times 290,240 = 58,048 \text{ 円}$$

となる。ここでは新電炉に流れた 80% 部分は

$$L_{AHSS \rightarrow AHSS} \approx 0$$

とみなしているので、差分価値はほぼ従来経路に残った 20% 分だけになる。すると、構成材料価値 M は同じであるから、

$$Acircularity_{new} = \frac{58,048}{864,500} \approx 0.067$$

である。これは現状の 0.336 に対して、実に約 80% の低下、すなわち理想循環に向けた大幅な接近を意味する。また REA は

$$REA_{new} = \frac{1}{0.058048} \approx 17.23 \text{ (service / 百万円散逸)}$$

となる。現状ケース 3.45 と比べると、およそ 5 倍である。ここで重要なのは、循環量そのものが劇的に増えたわけではないのに、**価値散逸を抑えたことによって REA が飛躍的に改善する** という点である。

この結果は、原田・田原・松本論文の主張ときわめてよく呼応している。同論文では、自動車の現状ケース、eco-design による高度循環ケース、さらに refurbish ケースを比較し、量ベースでは見えにくかった差が、acircularity と REA によって明瞭に現れることを示している。現状ケースでは acircularity = 1.95、REA = 0.51、高度循環ケースでは acircularity = 1.46、REA = 0.69、さらに大幅な再使用を含む refurbishment ケースでは acircularity = 0.47、REA = 2.14 へと改善し、著者らは「量よりも質の改善が効いている」ことを明示した。今回の新電炉ケースは、その議論を鋼板スクラップの受け皿問題に

引き寄せたときの、一つの鮮やかな対応物である。すなわち、ここでもまた、**量を増やしたことが本質的なのではなく、価値を活かしたことが指標に表れている**のである。

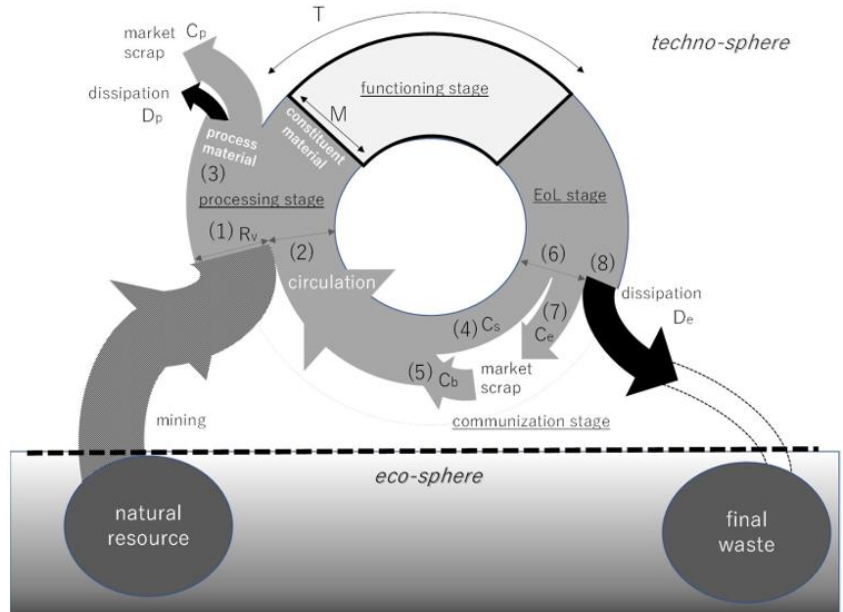
むしろ、この指標の良さはそこにある。リサイクル率や回収率で見せると、ミックススクラップ経由で棒鋼になっても、新電炉で高張力鋼になっても、どちらも「循環した」ことになってしまう。しかし acircularity は、その循環が本当に理想循環に近づいたのか、それとも量だけを閉じたのかを区別する。REA は、その改善が機能を維持しながらどれだけ資源散逸を減らしたかを示す。したがって、この指標は単なる評価指標ではなく、**どの設計変更が本当に意味を持つのかを選び分ける指標**である。

もちろん、本章の計算には限界がある。第一に、ここで用いた価値係数は price ベースの暫定値であり、原論文が本来推奨する specific TMR ベースではない。第二に、評価対象を自動車全体ではなく AHSS 工程くずの受け皿モジュールに絞っているため、絶対値としての acircularity や REA を原論文の全体系評価と単純比較することはできない。第三に、新電炉導入に伴う追加エネルギー、設備負担、歩留まり差などは D_p にまだ十分に入っていない。したがって、本章の数値は「完全な LCA 的評価」ではなく、**価値散逸の抑制効果を切り出した比較値**である。しかし、この限定はむしろ長所でもある。というのも、何が効いているかを曖昧にせず、**新電炉の本質的な貢献が、量の回収ではなく価値散逸の抑制にある**ことを、指標の上で明快に示せるからである。

以上をまとめれば、新電炉法の意味は、単に「高張力鋼スクラップを新たな設備で溶かす」ということではない。それは、原田・田原・松本論文の枠組みでいえば、散逸 D_e を大きく引き下げることにより、acircularity を押し下げ、REA を引き上げる試みである。すなわち、量を回す技術ではなく、**価値を活かす循環技術**なのである。ここにおいて初めて、循環の評価は「どれだけ回収したか」から「どれだけ価値を保持したか」へと移る。そして、その転換を企業や制度設計の現場で使える形にしているところに、この指標の真価がある。だからこそ、本稿がここで REA と acircularity を持ち出すことには、単なる引用以上の意味があるのである。

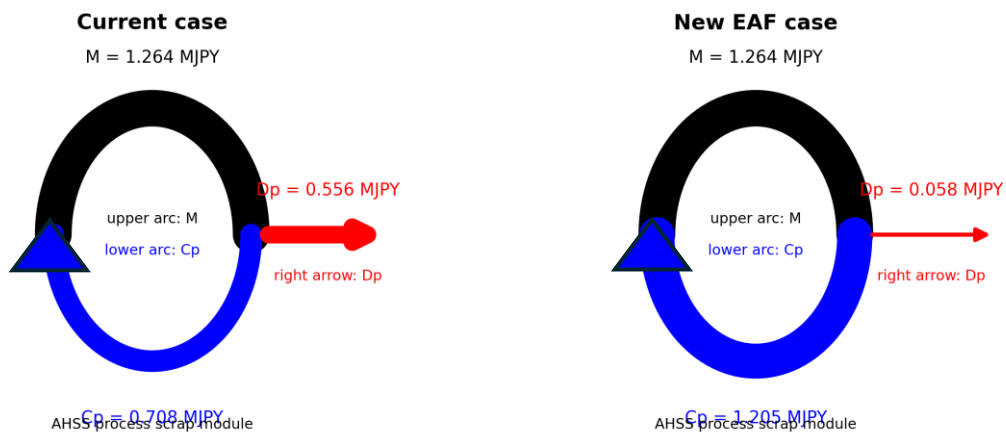
5.3 図としての簡略化

なお、REA 図は、本来以下の形のものとして提案されているが、ここでは、高張力鋼だけ



を議論しており、単位も TMR ではなく価格をもちいているので、以下のように単純化してあらわすのがわかりやすいと思われる。

REA-style circular comparison with thickness proportional to value



図の上半円は投入時による材料価値のフロー量であり、右に抜ける赤い線が散逸した材料価値、下の青い矢印円弧が高張力鋼として、自動車に循環できる価値になる。

第六章 どこが変わらねばならないのか

——「混ぜる」から「分ける」へ、そして構造としての新電炉と情報基盤へ——

ここまでの議論において、量としては閉じている循環が、価値としては大きく開いていること、しかもその開きが特定の段階——すなわちミックススクラップ化と老廃くず処理——に集中していることを確認した。第五章で示したように、acircularity や REA は、その開きを単なる印象ではなく、明確な数値として示す。そこから逆に問われるべきは、「この差分はどこから来ているのか」ではなく、**「どこを変えればこの差分は消えるのか」**である。本章はその問いに対する応答であり、三つの転換点——①混合から分別への転換、②高張力鋼板用新電炉の成立、③情報プラットフォームの形成——を、それぞれの意義と具体的課題の両面から検討する。

6.1 混ぜて均一にするから、分けて価値を残すへ

まず最初にして最も本質的な転換は、スクラップ流通の基本機能そのものに関わる。「混ぜて均一にする」という現在の機能は、決して誤りではない。それはむしろ、ぼらついたスクラップを安定供給するための合理的な解であり、電炉・高炉の操業を支えてきた。しかし、前章までで見たように、その合理性は同時に、材料価値の分解能を失わせることによって成立している。すなわち、

$$p_{AHSS} \rightarrow p_{mix}$$

という単価の再設定が行われる瞬間に、差分

$$L_{AHSS \rightarrow mix} = T_{AHSS \rightarrow mix}(p_{AHSS} - p_{mix})$$

が発生する。この差分は、物質が変わったからではなく、**識別可能性が失われたから**発生する。したがって、ここで求められている転換は、単なる分別技術の導入ではなく、「混ぜることで成立していた市場」を、「分けることで成立する市場」へと組み替えることにある。

この転換の意義は明確である。混合は供給の安定性を担保するが、分別は価値の保持を可能にする。すなわち、前者は量の論理、後者は価値の論理である。本稿がここまで積み上げてきた議論は、循環の評価軸が量から価値へと移ったとき、必然的に後者の論理が主導的になることを示している。

しかし同時に、この転換は容易ではない。問題となるのは、第一にインセンティブの欠如である。現状では、ミックススクラップは一定の価格で確実に売却できるが、分別スクラップは品質保証のコストとリスクを伴う。第二に責任の所在であり、分別されたスクラップが規格を満たさなかった場合の責任を誰が負うのかという問題が生じる。第三に取引の標準化であり、ミックススクラップは「規格でなくても売れる」商品であるのに対し、分別スクラップは「規格を満たさなければ売れない」商品であるため、契約・検査・保証の

仕組みが不可欠となる。さらに、既存のリサイクル事業者にとっては、混合という機能が価値創出の源泉であった以上、それを分解することは自らのビジネスモデルの再定義を意味する。

したがって、ここで必要なのは単なる技術導入ではなく、分別された状態の方が経済的に合理的であるという市場条件の構築である。この点が解決されない限り、「分ける」ことは理念にとどまり、現場には定着しない。

6.2 新電炉は何を実現しなければならないのか

次に、新電炉の位置づけを改めて確認する。第四章で示したように、新電炉は差分 L を縮減するための結節点であり、その意義は

$$L_{AHSS \rightarrow AHSS} \approx 0$$

という経路を実現することにある。しかし、この関係は仮定であって、自明ではない。現実の技術条件を考えれば、ここにはいくつかの本質的な課題が横たわっている。

第一に、不純物元素の問題である。老廃くず由来のスクラップには Cu や Sn が混入しやすく、これらは高張力鋼の延性や加工性を著しく低下させる。現在の電炉では、これらを十分に除去する手段が限られており、結果として高品質材への再利用が制約されている。第二に、成分制御と微細組織制御の問題がある。高張力鋼板は単なる高強度材ではなく、強度と延性の両立を前提とした複雑な組織設計に基づいており、その再現には溶解・精錬だけでなく、熱処理・圧延条件の精密な制御が必要となる。第三に、工程統合の問題である。スクラップのばらつきを前提とした原料から、安定した機械特性を持つ鋼板を製造するためには、従来の「原料→製品」という一方向のプロセスではなく、フィードバックを含んだ制御系が必要となる。

これらを踏まえれば、新電炉の技術課題は単に「溶かして固める」ことではなく、ばらつきを持つ原料から、規格化された高機能材料を再構成する能力にあると言える。そしてこの能力は、単独の装置ではなく、プロセス全体として設計されなければならない。

6.3 情報プラットフォームはなぜ「必須」なのか

最後に、情報プラットフォームである。これを単なる補助的要素と捉えるならば、ここまでの議論は成立しない。なぜなら、価値の差分が発生していた最大の理由は、物質ではなく**情報の喪失**にあったからである。したがって、情報プラットフォームは「あればよい」ものではなく、むしろ

分ける市場を成立させるための前提条件である。

その機能は具体的には三層に分けて考えることができる。第一は、トレーサビリティである。工程くずの段階で把握されている鋼種・成分・履歴情報を、スクラップとして流通する過程でも失わないようにする仕組みが必要である。これは単なる記録ではなく、ロット単位での識別と紐づけを伴う。第二は、品質認証である。分別されたスクラップが高張力鋼用として使用可能であることを、第三者が保証する仕組みがなければ、市場は成立しない。ここでは規格の定義と検査方法が不可欠となる。第三は、価格形成機構である。品質に応じた価格差が安定的に提示されなければ、分別のインセンティブは生まれない。したがって、情報プラットフォームは単にデータを流すだけでなく、

$$p = f(\text{品質情報, 用途, 需給})$$

という関係を市場において可視化する役割を担う。

これらを総合すると、情報プラットフォームとは、単なる IT システムではなく、価値が失われずに伝達されるための制度的インフラであると言える。ここが成立して初めて、「分ける」という行為が市場の中で意味を持ち、新電炉という受け皿が機能する。

以上の三点は独立しているようであるが、実際には強く結びついている。分別が行われなければ新電炉は成立せず、新電炉という需要がなければ分別のインセンティブは生まれず、情報プラットフォームがなければその両者は接続されない。したがって、ここで必要とされている変化は、個別技術の導入ではなく、市場・技術・情報が一体となった構造の再設計である。そしてその再設計の方向は、これまでのサンキー図と指標が示してきた通り、**価値を失わない循環**へと収束しているのである。

第七章 まとめ

——循環は閉じているのか、それとも価値はなお開いているのか——

本稿は、自動車用鉄鋼のマテリアルフローを、従来のような単線的な循環図としてではなく、工程における分岐と、市中・老廃における収束とが重なり合う構造として捉え直すことから出発した。その結果、従来「市中スクラップ」と一括されていた領域の内部に、実は分離を保った流れと、混合によって均質化された流れとが併存していること、そしてその混合が単なる結果ではなく、市場を成立させる機能として働いていることが明らかとなった。

この構造を量として描いたサンキー図は、循環が量としては確かに閉じていることを示す。しかし同一のフローに価格を与え、市場価値として再描写したとき、そこには別の像が現れる。すなわち、価値は段階ごとに付け替えられ、保存されるどころか、再評価の連鎖の中で膨張も収縮もする。そしてさらに一步踏み込み、材料価値という概念を導入したとき、初めて明確になるのは、循環が閉じているのは物質の側においてのみであり、価値の側ではむしろ大きく開いているという事実である。

この価値の開きは、均等に分布しているのではない。それは明確に、工程くずがミックススクラップへと組み込まれる段階と、老廃くずがシュレツダーによって不可逆的に処理される段階に集中している。そこでは、材料の本質的な価値が失われたのではなく、識別可能性が失われることによって、価値が実現されないまま散逸している。すなわち、本稿が扱ってきた問題は、資源の問題であると同時に、情報の問題であり、さらに市場の問題でもある。

この散逸を抑制するための一つの仮説として提示したのが、高張力鋼板用新電炉を受け皿とする循環であった。ここで重要なのは、電炉という装置の導入そのものではなく、その装置を成立させる分別と流通の構造である。工程くずの段階で保持されている鋼種情報が失われることなく流通し、それに対応した価格が形成され、その需要としての製造能力が存在する。この三つが揃ったときにのみ、価値は失われずに伝達される。

さらに、REA および acircularity による評価は、この構造の違いを単なる印象ではなく、明確な指標として示した。循環量が大きく変わらないにもかかわらず、価値散逸が抑制されることによって acircularity が低下し、REA が大きく改善するという結果は、循環の質がどこにあるかを端的に示している。すなわち、循環の本質は量ではなく、価値の保持にある。

ここに至って、本稿の結論は一つの形を取る。それは、

循環とは、物質を回すことではなく、価値を失わずに伝達する構造である

ということである。そして、その構造は自然に成立するものではなく、設計されなければならない。

では、その設計は誰が担うのか。最後に、本稿の議論を、それぞれの主体に引き寄せて整理しておく。

自動車製造関係者にとって求められるのは、材料の選択と設計の段階で、使用後の循環を前提とした構造を組み込むことである。すなわち、高張力鋼の使用を拡大するだけでなく、その識別性を維持しうる設計、分別可能性を損なわない接合・構造の選択、さらにはスクラップとして回収された際に同等用途へ戻りうる設計思想を持つことが求められる。循環は使用後に始まるのではなく、設計段階において既に規定されている。

リサイクル関係者にとっては、これまで価値を生み出してきた「混ぜる」機能を否定するのではなく、それを前提とした上で「分ける」機能を併置することが求められる。すなわち、均質化のための混合と、価値保持のための分別という二つの機能をどう両立させるか、さらには分別されたスクラップに対して品質保証を付与する主体へと役割を拡張することが問われている。

商社にとっては、ロット化という既存機能をさらに一歩進め、情報を伴った流通を設計することが重要となる。単に物量を集約するのではなく、鋼種・履歴・品質情報を保持したまま市場に流通させること、そしてその情報に基づいた価格形成を支えることが、今後の中核機能となる。

製鉄・製鋼企業にとっては、新電炉のような技術開発を通じて、ばらつきを持つ原料から高機能材を再構成する能力を確立することが求められる。同時に、それを成立させるための原料仕様、受入条件、品質保証の体系を明示し、市場側に対して明確なシグナルを発することが不可欠である。

アカデミーにおいては、量ベースの循環評価を超えて、価値ベースの評価手法を体系化し、それを実証的に適用することが求められる。本稿で用いた材料価値、差分価値、REAといった概念は、その出発点に過ぎない。より精緻な指標とデータ基盤の構築が必要である。

そして**行政**においては、これらすべてを接続する制度設計が求められる。すなわち、分別されたスクラップに対する認証制度、品質情報の標準化、価格形成の透明化、さらには市場におけるインセンティブ設計を通じて、「分ける方が合理的である」環境を整えることが必要である。

加えて見落としてはならないのは、**工程くずの段階そのものが、価値保持の可否を決定する起点**であるという点である。工程くずは本来、鋼種情報と品質情報を保持したまま発生する、いわば最も「分けうる」状態にあるにもかかわらず、現行の制度体系のもとでは、その管理は各事業者の内部合理性に委ねられており、結果としてミックス化への流入を抑制する仕組みは十分に与えられていない。

したがって行政には、単に市中スクラップ段階の制度整備にとどまらず、工程くずの段階においても、その分離状態を維持しうるような管理枠組み——例えば発生源別管理の明確化、トレーサビリティの義務化あるいは標準化、分別品質に応じた認証・格付け制度の導入など——を通じて、工程くずが価値を保持したまま流通に入ることを制度的に支える役割が求められる。

ここにおいて初めて、「分ける」という行為は現場の努力ではなく、制度に裏付けられた経済合理性として定着するのであり、そのとき循環は、単なる回収の仕組みから、価値を伝達する社会システムへと転換する。

これらは個別に存在するのではなく、相互に依存している。どれか一つが欠ければ、構造は成立しない。したがって、いま求められているのは、個別技術の導入でも、単独の制度変更でもなく、

価値が失われないように流れる経路そのものの再設計である。

そしてその再設計は、既に見えている。工程における分岐、老廃における収束、その間に横たわる混合と分別のせめぎ合い——それらをどのように組み替えるかという問いに対して、本稿は一つの具体的な像を与えたに過ぎない。しかし、その像は、循環という言葉の内側に隠されていた本質を、確かに指し示している。

これまで循環とは、物質が系の中を巡り、外に出ていかない状態として理解されてきた。たしかにその意味において、鉄鋼の循環は高度に達している。しかし本稿で明らかになったのは、その内部において、材料が本来有していた価値が、段階ごとに別の用途へと再割当されることによって、実現されないうまま残されているという事実である。

すなわち問題は、循環しているか否かではない。

どのような価値のまま循環しているのか、である。

本稿で示したサンキー図と指標は、この点を明確に示している。高張力鋼は確かに回収され、再び利用されている。しかしその多くは、棒鋼や普通鋼として利用されることにより、本来の機能価値を実現しないまま消費されている。ここにおいて、循環は成立しているが、価値は維持されていない。

したがって、これから問われるべきは、循環を成立させることではなく、価値がそのまま実現されうる経路を設計することである。すなわち、

循環とは、物質を閉じるのではなく、価値を失わずに伝達する構造である。

原田幸明 with conversational AI (featured)

注 1)本稿は、著者の思考のみによって閉じられたものではない。対話型 AI との往復の中で、構造が試され、数値が磨かれたものである。しかしながら、その収束の方向を定めたのは著者であり、ここに示した内容の責任はすべて著者に帰属する。

注 2) -本校の数値は、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。