

# 排出量取引制度導入に備えた自動車製造工程における CO<sub>2</sub> 排出原単位の分析

## Analysis of CO<sub>2</sub> Emission Intensity per Unit in Automobile Manufacturing Processes in Preparation for Introduction of Emissions Trading System

登 尾 匡 成 <sup>\*</sup>・ 前 匡 鴻 <sup>\*\*</sup>・ 吉 岡 剛 <sup>\*\*\*</sup>・ 松 橋 隆 治 <sup>\*\*\*\*</sup>

Kyosei Noborio

Masahiro Mae

Tsuyoshi Yoshioka

Ryuji Matsushashi

### **Abstract**

With the implementation of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) and GX-ETS, the automobile industry faces urgent requirements to visualize and reduce CO<sub>2</sub> emissions. This paper analyzes CO<sub>2</sub> emissions intensity specifically for the vehicle body manufacturing process, excluding powertrain components, to establish a universal baseline. Using energy demand data from a typical Japanese automobile plant, we calculated Scope 1 and Scope 2 emissions across different seasons. The results indicate an average emission of 170 kg-CO<sub>2</sub>/unit, with Scope 1 accounting for 62% of the total, primarily driven by thermal demand in the painting process. Significant seasonal fluctuations were identified; winter emissions were approximately 1.9 times higher than intermediate periods due to increased HVAC loads and equipment start-up energy. Notably, concentrated production schedules reduced per-unit emissions by minimizing daily start-up losses. The findings suggest that beyond electrification, decarbonization strategies must prioritize thermal management in painting processes and the optimization of production schedules to mitigate start-up energy losses.

**Key words** : Automobile Manufacturing, CO<sub>2</sub> Emissions, Scope 1 and 2, Painting Process, Emissions Trading System

### 1. 序論

気候変動問題に対し、国際社会はパリ協定のもと、産業革命前からの気温上昇を 1.5 度に抑える目標を掲げた。そのため、あらゆる産業において、脱炭素という制約条件を前提とした最適化が不可欠となっている。中でも、再生可能エネルギーの導入拡大や化石燃料からの脱却、エネルギー利用効率の抜本的改善は世界的な急務である。とりわけ自動車産業に対しては、走行時の CO<sub>2</sub> 排出のみならず、製造から廃棄・リサイクルに至るライフサイクル全体を見据えた排出削減が強く要請されている。

企業の自主的な取り組みを加速させるため、各国政府は強力な経済的インセンティブと規制の枠組みを導入し始めている。その代表例が、欧州連合による炭素国境調整メカニズム (CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism) である。CBAM は、気候変動対策が不十分な国からの輸入品に対して、その製造時に排出された炭素量に応じた課徴金を課す制度であり、事実上の炭素関税として機能する。この制度の核心は、排出規制の緩い国へ生産拠点が移転する炭素リーケージを防止し、公平な競争条件を確保することにある。本論文において特に留意すべき点は、CBAM の規制対象物質が炭素や温室効果ガス (メタン、フロンなど) ではなく、CO<sub>2</sub> として定義されている点である<sup>1)</sup>。また、日本国内に

においても、グリーントランスフォーメーション (GX) を実現するための排出量取引制度 (GX-ETS) の導入が進められている。GX-ETS は、GX リーグに参加している企業に排出枠を割り当て、超過分や削減分を市場で取引させることで、社会全体での削減費用を最小化しようとするメカニズムである。ここでも対象となるのは CO<sub>2</sub> であり、企業は Scope 1 および Scope 2 を正確に算定し、第三者検証に耐えうるデータを提示する義務を負うことになる<sup>2)</sup>。

自動車産業は、極めて広範なサプライチェーンを持つ産業であり、CBAM や GX-ETS の影響を多層的に受けることになる。CBAM や GX-ETS が本格運用される局面において、日本の基幹産業たる自動車業界の対応は急務である。しかし、既存の自動車産業に関する研究を概観すると、内燃機関車と EV の比較<sup>3)</sup>や産業連関表等によるマクロ分析<sup>4)</sup>が主流である。これらは国レベルの政策には有用だが、特定の工場での改善評価や、規制が要求する製品単位の具体的なデータの提示には不十分であり、製造現場の視点に基づく CO<sub>2</sub> 算定の研究は著しく不足している。そこで本論文は車体製造段階に限定し、一般的な日本の自動車工場における CO<sub>2</sub> 排出原単位を算出する。本論文における CO<sub>2</sub> 排出原単位は、車体製造工程における自動車 1 台当たりの CO<sub>2</sub> 排出量と定義する。分析対象からエンジンや部品製造を除外する理由は 2 つある。第一に、電動化により、内燃機関はモーターとバッテリーに置き換わる過渡期にある。エンジン製造工程を含めた分析は、将来予測としての普遍性を失い

<sup>\*</sup> 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail : noborio@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

つつある。一方で、車体の製造は、動力源が何であれ自動車が存在する限り不可欠な工程である。第二に、GX-ETSの初期段階において、車体製造工場が直接管理可能な Scope 1, 2 の排出源として、自社組立工場内のエネルギー消費が最も明確なターゲットとなるからである。バッテリーやタイヤ、電子部品はサプライヤーからの調達となるケースが多いが、ボディのプレス・溶接・塗装・組立は車体製造工場として内製化率が高く、自社の努力で排出削減を実現できる領域である<sup>9)</sup>。

本論文は CO<sub>2</sub> 排出原単位の評価を通じて、車体製造工程における CO<sub>2</sub> 排出構造を解明することを主たる目的とする。具体的には、以下の 3 点に焦点を当てる。1 つ目は、排出構造の可視化である。自動車 1 台当たりの製造に必要なエネルギーを Scope 別に算出し、その量的関係を明らかにする。2 つ目は、削減ポテンシャルの特定である。主要な排出源を特定し、プロセス改善等が排出量に与える影響を分析することで、製造工程における削減ポテンシャルを明らかにする。3 つ目は、CO<sub>2</sub> 排出削減戦略の示唆である。CBAM や GX-ETS といった政策動向を踏まえ、算出されたデータが企業の CO<sub>2</sub> 削減計画にどのような意味を持つのかを考察する。

## 2. 手法

### 2.1 対象工場

本論文における分析対象は、「車体製造段階」に限定する。具体的には、鋼板を金型で加圧し車体部品を成形する「プレス」、成形された部品を接合し骨格を形成する「溶接」、防錆や美観向上の処理を行う「塗装」、および部品の「組立」、最終的な「検査・出荷」の 5 工程を対象とする。

一方で、エンジン製造段階における、鋳造・鍛造・機械加工・熱処理・エンジン組立・検査の各工程及び、部品製造段階に含まれるプレス・鋳造・鍛造・機械加工・熱処理・樹脂成型・表面処理・塗装については本論文の分析対象からは除外する。

このパワートレイン製造を含まない境界設定は、本論文の特徴的な点である。近年増加傾向にある EV は、走行時 (Scope3) の CO<sub>2</sub> 排出量が少ない反面、エンジン製造工程において内燃機関車よりも多くの CO<sub>2</sub> を排出する<sup>9)</sup>。したがって、車体製造という普遍的な製造プロセスのみ焦点を当てることで、パワートレインの種類に依存しない、車体製造の基礎的な CO<sub>2</sub> 排出ベースラインを確立することが可能となる。

### 2.2 調査データ

一般的な車体製造工場の夏期 (7 月)、冬期 (2 月)、中間期 (10 月) におけるエネルギー需要データを用いる。各対象期間における、稼働日と休日それぞれの 1 時間ごとの電力

表 1 各対象期間の稼働状況と気温表

	夏期	冬期	中間期
生産台数 (台/日)	536	483	536
生産シフト	1 シフト	1 シフト	1 シフト
最高外気温 (°C)	36.3	-2.2	12.48
平均外気温 (°C)	29.8	3.8	11.43

需要・熱需要データである。エネルギー需要データには電力需要として「購入電力 (kWh)」「コジェネレーションシステム (CGS) による自己発電 (kWh)」が、熱需要として「都市ガス (m<sup>3</sup>)」「購入蒸気 (t)」「CGS 供給熱 (MJ)」が含まれる。さらに、各需要データの元となる工場設備のデータも用いた。各対象期間における稼働状況と気温は表 1 に示した。

また、算定の基礎となる稼働日数やエネルギー負荷のパターンについては、業務用カレンダー<sup>7)</sup>を参照データとして採用した。自動車工場は一般に、週末や長期休暇に稼働を停止するが、保全作業や空調、常時稼働設備によるベースロード消費が存在するため、稼働日と休日の区分を考慮した年間を通じた加重平均を行うことが、精度の高い CO<sub>2</sub> 排出原単位算出には不可欠である。

これらのデータを用いて、代表月以外の月に関しては、各期の差分が比例すると仮定して、12 ヶ月分の稼働日・休日のエネルギー需要データを作成した。

本論文で用いるデータは、各対象期間における稼働日及び、休日の特定日の実測値に基づくものである。従って、当該日特有の気象条件や生産品目の変動等により、エネルギー需要に特異的なバイアスが含まれている可能性がある点に留意が必要である。結果の解釈にあたっては、これらの季節変動や日次変動の可能性を考慮する。

### 2.3 Scope 判別と CO<sub>2</sub> 排出係数

CO<sub>2</sub> 排出原単位は、エネルギー消費量に排出係数を乗じて生産台数で割ることで算出される。この節では、エネルギー需要データからそれぞれに適用する Scope と CO<sub>2</sub> 排出係数を算出する。

工場内に設置された CGS によって自家発電された電力については、その発電行為自体に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を直接計算することはしない。代わりに、CGS の燃料となる都市ガスの燃焼による排出とみなし、Scope 1 として一括計上する。これは、CGS が電力と熱を同時に生成するため、工場内に入った炭素の総量を把握し、かつ二重計上を防止するという観点に基づくものである。したがって、計算上、自家発電電力の排出係数はゼロとして扱う<sup>8)</sup>。

購入蒸気は、GJ に変換して CO<sub>2</sub> 排出係数<sup>9)</sup>を乗ずる必要がある。単位変換の際は式(1)を用いた<sup>10)</sup>。ここで  $Q_{steam}$  は発

**表 2** 電力・熱需要データの CO<sub>2</sub> 排出係数と Scope 判別

エネルギー需要	CO <sub>2</sub> 排出係数	Scope
購入電力 (kWh)	0.431 kg-CO <sub>2</sub> /kWh <sup>12)</sup>	2
CGS による自家発電 (kWh)	0	-
都市ガス (m <sup>3</sup> )	2.21 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> <sup>13)</sup>	1
購入蒸気 (t)	174 kg-CO <sub>2</sub> /t	2
CGS による供給熱 (MJ)	0	-
CGS 流入燃料 (Nm <sup>3</sup> )	2.24 kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	1

生・消費飽和蒸気量[GJ],  $m_{steam}$  は発生・消費飽和蒸気量[t], 定数は発生・消費飽和蒸気の比エンタルピーを表す.

$$Q_{steam} = m_{steam} \times 2.675 \quad (1)$$

CGS 供給熱は, CGS から回収された排熱であり, これに対する CO<sub>2</sub> 排出量は別途計算しない. 前述の通り, 投入されたガス燃料の段階で全 CO<sub>2</sub> 排出量をカウントしているため, ここで計算すると二重計上となるためである.

電力と熱を作る CGS に供給されるガス燃料は, 工場内で燃料を燃やすため Scope 1 に分類される. 単位変換のため, 式(2)で CO<sub>2</sub> 排出係数を計算する <sup>14)</sup>. ここで,  $E_{CO_2}$  は CO<sub>2</sub> 排出量[kg],  $V$  は標準状態換算後の都市ガス使用量[Nm<sup>3</sup>],  $H$  は都市ガスの単位発熱量[GJ/Nm<sup>3</sup>],  $C_f$  は都市ガスの排出係数[t-C/GJ],  $\frac{M_{CO_2}}{M_C}$  は CO<sub>2</sub> と C の分子量比を表す.

$$E_{CO_2} = V \cdot H \cdot C_f \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (2)$$

以上より, 電力需要・熱需要データの Scope 判別と CO<sub>2</sub> 排出係数を表 2 にまとめた.

### 3. 検証

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 排出原単位

前章で定めた手法に基づき, 自動車 1 台当たりの CO<sub>2</sub> 排出原単位を算出した. 算出されたデータをエネルギー源ごとに整理し, それぞれの Scope 区分と排出寄与度を表 3 に示す. この表は, 車体製造段階 (プレス, 溶接, 塗装, 組立, 検査・出荷) の自動車工場の現場で具体的にどのようなエネルギーがどれだけ消費され, それがどの程度の CO<sub>2</sub> 排出に繋がっているかを表している.

表 3 に関するデータを, Scope 1 と Scope 2 のカテゴリに集約した結果を表 4 に示す. この結果より, 本論文の対象とする車体製造工程における CO<sub>2</sub> 排出原単位は 170kg-CO<sub>2</sub>/台 であると結論付けられた.

既存の文献や自動車メーカーの公表値 <sup>14)</sup>によれば, 自動車製造時 (Scope 1, 2) の自動車 1 台当たりの CO<sub>2</sub> 排出量は一般に 400~600 kg-CO<sub>2</sub>/台 程度の範囲にあるとされる. 本

**表 3** エネルギー源ごとの CO<sub>2</sub> 排出原単位

エネルギー需要	1 台当たり平均エネルギー	CO <sub>2</sub> 排出原単位(kg-CO <sub>2</sub> /台)	Scope
購入電力	126 kWh/台	54.3	2
CGS ガス燃料	28.4 Nm <sup>3</sup> /台	63.8	1
都市ガス	18.9 m <sup>3</sup> /台	41.7	1
購入蒸気	0.0596 t/台	10.4	2

論文の算出値はこの一般的な水準と比較して低値を示しているが, これは評価対象とする製造工程の差異に起因するものであり, 以下の理由から妥当な数値であると判断できる.

第一に, 一般的な報告値 <sup>14)</sup>には, 多大な熱エネルギーを消費するパワートレイン製造工程が含まれている点である.

本論文の評価範囲は完成車組立工程に限定しており, 高負荷なパワートレイン製造および部品製造工程は対象範囲外としている. これらを除外した車体製造工程単体の CO<sub>2</sub> 排出原単位として, 当該数値は適正な範囲内にある.

第二に, 対象とした製造工程におけるエネルギー供給構成の影響である. この工場においては, CGS による発電および蒸気供給が行われている. 塗装工程等の熱需要に対して高効率なエネルギー供給が行われていることが, CO<sub>2</sub> 排出原単位の低減に寄与していると考えられる.

以上より, 170 kg-CO<sub>2</sub>/台 という結果は, パワートレイン製造を含まない車体製造工場の排出実態を表す数値として妥当である.

また, 表 4 において, 構成比率で見ると, 全排出量の 62% が Scope 1, つまり燃料の燃焼によるものである. 通常, 組立や溶接工程は産業用ロボットや搬送コンベア, 溶接ガンなどを多用するため, 電力消費 (Scope 2) が主体となる傾向がある. しかし, 本工場において Scope 1 の構成比率のほうが多い結果は, 以下 2 つの理由から考察できる.

第一に, 塗装工程の熱需要が工場全体のエネルギー消費の多くを占めているからだ. 塗装工程では, 前処理・電着, 塗装ブースの空調, 乾燥炉, VOC 処理におけるプロセスで大量の熱エネルギーが必要となる.

第二に, 本工場では CGS が導入されており, これが Scope 1 および Scope 2 の数値に関与しているからだ. Scope 1 に算出される CGS 燃料流入量は 1 台当たり 28.4 Nm<sup>3</sup> であり, これによる CO<sub>2</sub> 排出量は 63.8 kg-CO<sub>2</sub>/台 に達する. これは Scope 1 全体の約 6 割を占めており, ボイラー等の直接燃焼を上回る最大の排出源となっている. CGS は電力を発電し, その排熱を製造工程に供給することで総合効率を高めるシステムである. CGS の導入により, 本来 Scope 2 として計上されるべき購入電力量が抑制されている側面がある.

表 4 Scope 1 と Scope 2 の CO<sub>2</sub> 排出原単位

カテゴリ	CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /台)	構成比 (%)
Scope 1	105	62
Scope 2	64.7	38
合計	170	100

### 3.2 月別の CO<sub>2</sub> 排出原単位の変動

図 1 の Scope 1 と Scope 2 を合算した月別 CO<sub>2</sub> 排出原単位の推移を見ると以下の季節ごとの特性が見られる。まず、冬期のピークとして 2 月には 238 kg-CO<sub>2</sub>/台 の排出を記録している。これは年間を通して最大値である。続いて、夏期のピークとして、冬期より低いが、7 月には 182 kg-CO<sub>2</sub>/台 の排出を記録している。そして、中間期として 5 月には 127 kg-CO<sub>2</sub>/台 まで低下し、これが年間の最小値となっている。この変動幅は極めて大きく、2 月は 5 月の約 1.9 倍に達する。つまり、どの季節に車を作るかによって、その車 1 台に紐づく CO<sub>2</sub> 排出量が倍近く異なるという事実を示している。

冬期の CO<sub>2</sub> 排出原単位を押し上げている主因は、Scope 1 の増大である。図 2 によると 2 月の Scope 1 排出量は 170 kg-CO<sub>2</sub>/台 に達しており、これは 5 月の Scope 1 排出量である 68.0 kg-CO<sub>2</sub>/台 の約 2.5 倍である。この激増の背景は、塗装ブースの空調負荷にあると考えられる<sup>15)</sup>。冬期の代表日における平均気温は 3.8℃である。塗装ブース内を品質保持可能な温度に維持するためには、外気を加熱し続ける必要がある。さらに、冬期の乾燥した外気を加湿するために、蒸気や温水を大量に消費する。この温度差と湿度差を埋めるためのエネルギーが、CGS による供給熱の利用だけに収まらず、都市ガスの消費量を増大させている。実際、図 3 によると、冬期の都市ガスの日合計消費量は 17,916 m<sup>3</sup> であり、夏期の 3,987 m<sup>3</sup> と比較して約 4.5 倍に膨れ上がっている。さらに、2 月は生産台数が 483 台/日 と、年平均生産台数 523 台/日 に比べて低い水準にある。

CO<sub>2</sub> 排出原単位は総 CO<sub>2</sub> 排出量を生産台数で割ることで産出されるが、2 月は寒冷による暖房需要で分子が最大化する一方で、生産調整等により分母が最小化している。これにより、2 月は 238 kg-CO<sub>2</sub>/台 という CO<sub>2</sub> 排出原単位の悪化を招いたのだと考えられる。

冬期の熱需要を抑制する根本的な解決策として、塗装工場建屋および設備への断熱施工が挙げられる。理想論としては、すべての塗装工場に高度な断熱を適用すべきである。冬の空調負荷の影響がこれほど大きいのであれば、冬期の生産量を調整するか、工場の断熱性能を飛躍的に高めるか、根本的な解決を図る必要がある。実際に、冬期におけるエネルギー効率化施策は既に各社で進められている。しかし

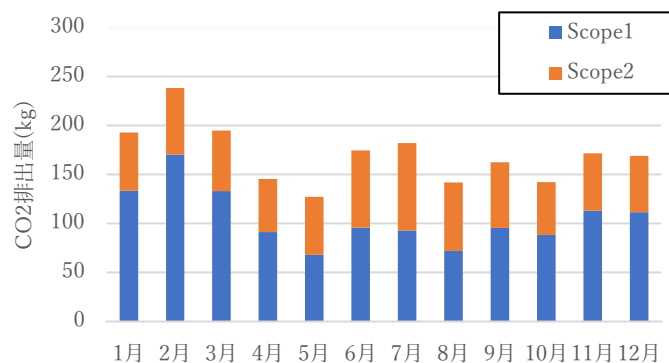


図 1 月別の Scope 1, 2 を合算した CO<sub>2</sub> 排出原単位

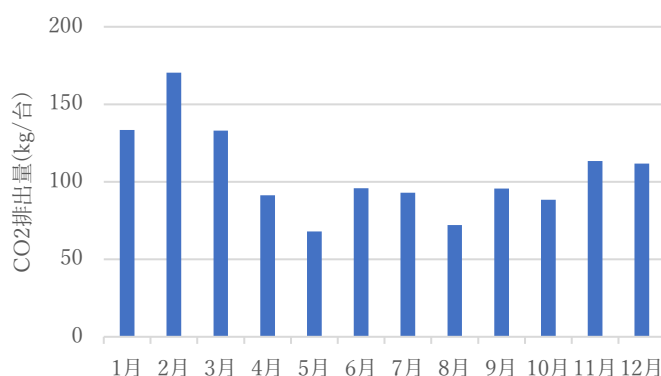


図 2 月別の Scope 1 の CO<sub>2</sub> 排出原単位

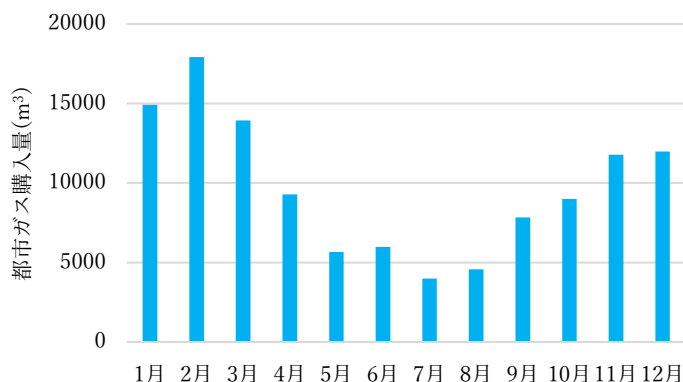


図 3 月別の都市ガス（CGS 含まず）購入量

ながら、一般的な車体製造工場の現状として、既存設備への断熱改修は、その投資額に対して回収期間が長期化する傾向にある。断熱材の効果が最大限に発揮されるのは主に冬期に限られるため、年間を通じた投資対効果の算出において、企業が求める短期的な回収基準を満たすことが難しい場合が多い。そのため、技術的には有効性が明らかであっても、中々元金回収期間が見合わず、断熱材の大規模な導入や改修を見送る工場も多いのが実情であると考えられる。この経済的な障壁も、冬期の CO<sub>2</sub> 排出原単位を高止まりさせている一因と言える。

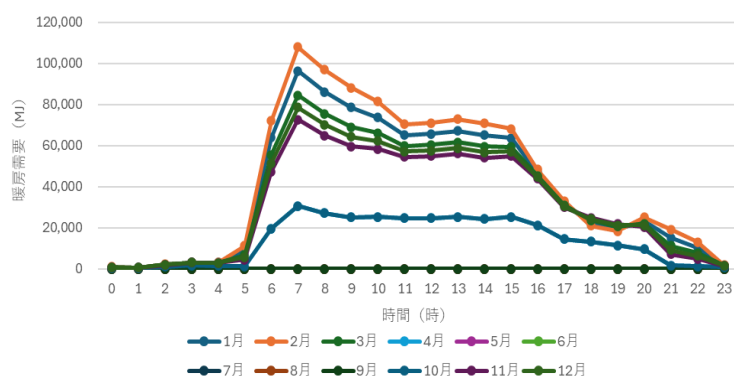


図4 工場稼働日における1時間ごとの暖房需要

冬期のCO<sub>2</sub>排出原単位増加の原因として、始業時における暖房需要の急増も挙げられる。図4には工場稼働日の1時間ごとの暖房需要を示した<sup>16)</sup>。冬期においては5:00～7:00の時間帯にかけて、他の季節と比べて急激なエネルギー消費のピークが確認できる。この現象は、夜間の操業停止により外気温と同等レベルまで冷却された工場建屋および生産設備を、操業可能な温度環境まで昇温させるための「暖機運転」に多大なエネルギーが費やされていることに起因する。特に、1シフト生産体制の場合、設備の再加熱というプロセスが毎日繰り返されることとなる。そのため、稼働日の生産活動において始業時の立ち上げエネルギーが固定的に発生し、これがエネルギー効率を低下させ、CO<sub>2</sub>排出原単位を悪化させる要因となっている。連続2シフトや3シフト操業であれば、設備が冷却される間隙が減少し立ち上げロスが抑制されるが、1シフトの生産体制下においては、この毎朝の昇温工程が冬期のCO<sub>2</sub>排出原単位を大幅に押し上げる構造的な課題となっていることが示唆される。夏期の特徴は、図5に示す通りScope 2に分類される電力の比率が高まることである。7月のScope 2のCO<sub>2</sub>排出原単位は89.0 kg-CO<sub>2</sub>/台であり、中間期である4月、5月、10月に対し約1.5倍である。これは冷房需要による電力消費の増大である。

特に注目すべき現象として、図1に示される8月のCO<sub>2</sub>排出原単位の挙動が挙げられる。本論文において、稼働日と休日の日数は業務用カレンダー<sup>7)</sup>を参考にしており、8月の稼働日は17日、休日は14日と、お盆休みによって通常よりも休日が多くなっている。お盆休みなどで稼働日が少ない月は、生産台数（分母）が減少する一方で、工場の維持管理に必要な待機電力やベースの熱需要（分子）は一定量発生し続けるため、月全体で見た時にCO<sub>2</sub>排出原単位は前後の月よりも多くなるはずである。しかし、図1より実際は8月のCO<sub>2</sub>排出原単位である141 kg-CO<sub>2</sub>/台は、7月の182 kg-CO<sub>2</sub>/台や9月の163 kg-CO<sub>2</sub>/台よりも低くなっている。この現象は、以下のように考察できる。稼働日が少

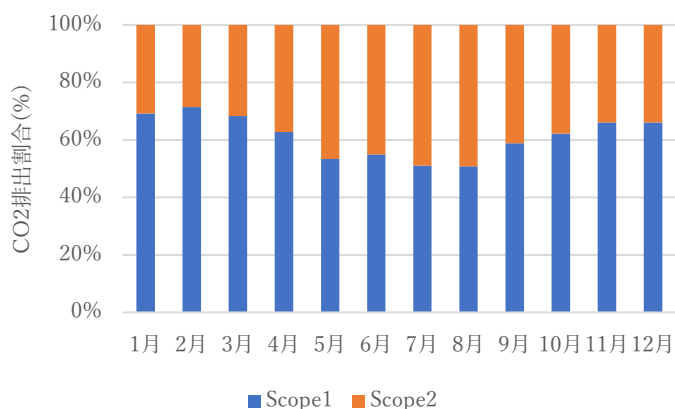


図5 月別のScope 1とScope 2のCO<sub>2</sub>排出原単位の割合

ないということは、それだけ設備の立上げを行う回数が少ないことを意味する。塗装工場の乾燥炉や大型空調設備は、一度停止させてから再稼働し、所定の温度まで昇温させるために莫大なエネルギーを消費する。お盆休みのように長期連休として休日をまとめることで、日々の立上げ回数が減少し、結果として月間の総エネルギー消費量が抑制されたと考えられる。つまり、8月のCO<sub>2</sub>排出原単位が低いのは、生産台数による分母減少の影響よりも、立ち上げロスの削減による分子減少の影響が上回った結果であり、これによってCO<sub>2</sub>排出原単位が少なくなっていると推察される。このことは、工場のCO<sub>2</sub>削減において連続稼働による立ち上げ回数の削減がいかに有効であることを示唆している。

#### 4. 結論

本論文では、パワートレインを含まない車体製造工程を対象に、CO<sub>2</sub>排出原単位の分析と削減戦略の検討を行った。一般的な車体製造工場データに基づく分析から得られた結論は、以下の2点である。

第一に、排出構造の可視化である。算出されたCO<sub>2</sub>排出原単位は170 kg-CO<sub>2</sub>/台であり、その構成比率はScope 1が62%を占めている。車体製造工場は電力消費主体ではなく、実際には塗装工程における乾燥炉や空調への熱需要、およびCGS燃料としてのガス消費が支配的であることが判明した。これは、CBAMやGX-ETSへの対応において、電力の再生可能エネルギー化だけでは不十分であり、熱源の脱炭素化こそが本質的な課題であることを示唆している。

第二に、削減ポテンシャルの特定である。月別データの分析により、冬期のCO<sub>2</sub>排出原単位が中間期の約1.9倍に達する季節変動が確認された。この主因は、塗装ブースの空調負荷に加え、始業時の設備昇温に伴う暖機運転等のエネルギーロスにある。一方で、稼働日が集約された8月のデータからは、日々の立ち上げ回数の削減がCO<sub>2</sub>排出原単位の抑制に寄与することが示された。したがって、断熱改修と

いったハード面の対策に加え、連続操業による立上げロス削減などの生産管理手法が、即効性のある有効な削減策となり得る。

本論文に残された課題は2点ある。第一に、車体製造工程全体における塗装工程のエネルギー消費比率を定量的に評価し、同工程内部のより詳細な実態分析を行うことである。第二に、エネルギー源の脱炭素化に向け、電化や水素・合成燃料への転換といった具体的な代替技術の導入可能性とその効果を検証することである。

### 参考文献

- 1) EU 炭素国境調整メカニズム (CBAM) の解説 (基礎編); <https://www.jetro.go.jp/world/reports/2024/01/b56f3dflfceeecd.html> (アクセス日 2025.11.17)
- 2) GX-ETS における第1フェーズのルール; <https://gx-league.go.jp/action/gxets/> (アクセス日 2025.11.17)
- 3) Kamila Romejko and Masaru Nakano; Life Cycle Analysis of Emissions from Electric and Gasoline Vehicles in Different Regions, IJAT, 11-4(2019), pp572-582
- 4) Chen, Z., Carrel, A. L., Gore, C. and Shi, W.; Environmental and economic impact of electric vehicle adoption in the U.S, Environmental Research Letters, 16-4 (2021), 045011
- 5) 経済産業省 製造産業局 自動車課; 自動車ベンチマーク案, [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/emissions\\_trading/benchmark\\_wg/pdf/005\\_08\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/emissions_trading/benchmark_wg/pdf/005_08_00.pdf) (アクセス日 2025.11.20)
- 6) Maxwell Woody, Parth Vaishnav et al. ; Corrigendum: The role of pickup truck electrification in the decarbonization of light-duty vehicles, Environmental Research Letters, 17-8 (2022), 089501.
- 7) トヨタ自動車東日本株式会社; 2021 年度カレンダー, [https://www.toyota-ej.co.jp/images/company/calender/calender\\_2021.pdf](https://www.toyota-ej.co.jp/images/company/calender/calender_2021.pdf) (アクセス日 2025.11.20)
- 8) 環境省; コージェネレーションシステムから得られる電気・熱に係る二酸化炭素排出量の算定方法について, <https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/heat/2025/app4.pdf> (アクセス日 2025.11.21)
- 9) 環境省・経済産業省; 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, [https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran\\_2023\\_rev4.pdf](https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf) (アクセス日 2025.11.21)
- 10) 経済産業省 資源エネルギー庁; 令和6年度エネルギー消費統計調査, [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy\\_consumption/ec001/r06/pdf/kinyu\\_yoryo\\_all.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec001/r06/pdf/kinyu_yoryo_all.pdf) (アクセス日 2025.11.21)
- 11) 東京ガス株式会社; 法人のお客さま向け FAQ, [https://support.tokyo-gas.co.jp/faq/show/8968?category\\_id=851&site\\_domain=ee](https://support.tokyo-gas.co.jp/faq/show/8968?category_id=851&site_domain=ee) (アクセス日 2025.11.21)
- 12) 環境省・経済産業省; 電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用), [https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r07\\_denki\\_coefficient\\_rev4.pdf](https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r07_denki_coefficient_rev4.pdf) (アクセス日 2025.11.20)
- 13) 東京ガス株式会社; 東京ガスグループサステナビリティファクトブック 2025, <https://www.tokyo-gas.co.jp/sustainability/download/pdf/sr2025.pdf> (アクセス日 2025.11.21)
- 13) 日産自動車株式会社; Sustainability Data Book 2025, [https://www.nissan-global.com/JP/SUSTAINABILITY/LIBRARY/SR/2025/ASSETS/PDF/DB25\\_J\\_All.pdf](https://www.nissan-global.com/JP/SUSTAINABILITY/LIBRARY/SR/2025/ASSETS/PDF/DB25_J_All.pdf) (アクセス日 2025.11.21)
- 15) 一般社団法人 日本エレクトロヒートセンター; 塗装・乾燥工程への電気エネルギー活用ガイド, [https://www.jeh-center.org/asset/00032/tosouguide/tosouguide3text\\_JEHC\\_202207\\_48MB.pdf](https://www.jeh-center.org/asset/00032/tosouguide/tosouguide3text_JEHC_202207_48MB.pdf) (アクセス日 2025.11.20)
- 16) 松橋隆治; 再生可能エネルギー及びコージェネレーションを導入する事業スキームの設定と基本設計報告書, 2025.3.31