

カーボンニュートラルの実現に向けて 今後求められるロジスティクス施策 ～スロー・ロジスティクスのススメ～

(公社) 日本ロジスティクスシステム協会 理事 JILS総合研究所 所長 北條 英 Masaru Hojo

要 旨

2050年に電力や代替燃料のカーボンニュートラルといった技術が社会に実装されれば、物流部門のカーボンニュートラルは、輸送機器また物流施設や荷役機器の使用段階においては、達成されるケースもあるだろう。しかしながら、電力や代替燃料がカーボンニュートラルに至るまでの技術的また社会的な課題が多々あることは言をまたない。さらに、カーボンニュートラルが実現されたとしても、エネルギー使用量をゼロにすることはできない。この意味で、本稿で述べる、ロジスティクスという経営戦略を使って物流活動の省エネ/低炭素化を図る“スロー・ロジスティクス”は、将来にわたって有効な施策のひとつであり続けるはずだ。

1. 貨物輸送部門のCO₂排出量

物流には6つの機能がありそれぞれの機能でCO₂を排出していることと思われるが、公的な統計で実績値がわかるのは輸送機能に相当する貨物輸送部門のみである。

1.1 概況

1990年度から2021年度の31年間で、日本国内の全産業のCO₂排出量は10億6,756万t-CO₂から9億8,822万t-CO₂となり、2021年度は1990年度と比較して7.4%の減少となった。

同じ期間、貨物輸送部門では1億252万t-CO₂から8,188万t-CO₂へと変化、2021年度は1990年度比20.1%減と全産業と比べて大きく減少している。

1.2 貨物輸送部門のCO₂排出量の推移

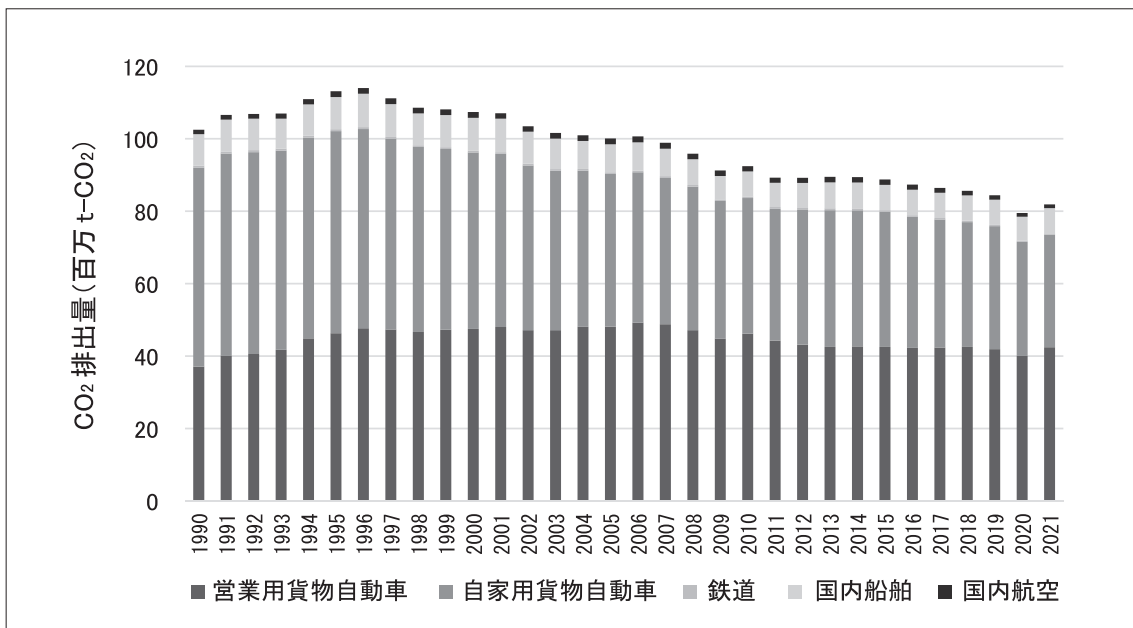
1990年度から2021年度までの貨物輸送部門のCO₂排出量の推移を図表1に示す。2021年度の内訳は、営業用貨物自動車51.9%、自家用貨物自動車38.0%、鉄道0.4%、国内船舶8.5%、国内航空1.3%。貨物自動車が全体の90%を占めている。構成比に係わる傾向は、過去31年間ほぼ同じである。

日本が国際社会に約束した2030年度の目標である2013年度比46%削減に係り、運輸部門の目標は35%削減、これに応じたCO₂の排出量は5,817万t-CO₂である。過去31年間の実態を考えると極めて野心的な数字に見える。だが、これが2050年のカーボンニュートラルを実現するために大変重要なマイルストーンになることは間違いない。

2. 貨物輸送部門のCO₂排出量の将来推計

2.1 推計の前提条件

今回の推計の前提条件として、①時点、②ケース、③活動量、④分担率、⑤排出係数の5つを設けた。①時点については、2019年度（現況）、2030年度、2050年度の3時点とした（以降、文献の名称以外は原則的に年度を年と記す）。②ケースについては、BaU（Business as Usual；今後追加的な対策を見込まないまま推移した場合）、モーダルシフト、パワートレイン、ロードファクター*¹の4種類とした。パワートレインについてはさらにICE（Internal Combustion Engine；内燃機関）とEV/FCV（Electric Vehicle/Fuel Cell Vehicle；電気自動車/燃料電池自動車）の2種類を設けた。



出典：国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス 日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2021年度）確報値より著者作成

図表1 貨物輸送部門のCO₂排出量の推移（1990～2021年度）

③活動量については、CO₂排出量は「活動量×活動量当たりのCO₂排出量」で求められることから、物流部門の活動量の指標として一般的に使われている輸送重量（t）に輸送距離（km）を乗じた輸送量（t・km）とした。

ここでは、2030年までの輸送量は、2019年の輸送量を基準に、資源エネルギー庁の『エネルギー基本計画』による貨物需要の見通しに倣いGDP比で伸長するものとした。また、2031年以降2050年までは横ばいとした。

④分担率（輸送機関別のt・km/全t・km）あるいは輸送機関別の輸送量については、②のケースごとに次のように設定した（航空機は、2019年の分担率が0.2%、CO₂排出量のシェアが1%といずれも大変に少なく将来的にもこの状況が続くと見做したことから、今回の推計の対象から外した）。BaUでは、2030年、2050年も2019年（現況）と同じ分担率とした。

モーダルシフトでは、『地球温暖化対策計画』（閣議決定）で示されている2019年から2030年までの鉄道と船舶の輸送量の変化率から鉄道と船舶の輸送量を設定し、残りをトラックの輸送量とした。

図表2 輸送機関ごとの輸送量の変化率（対2019年）

	2019年	2030年	2050年
トラック	1.00	0.95	0.92
鉄道	1.00	1.25	1.35
船舶	1.00	1.20	1.30

2030年から2050年までは趨勢とした（図表2）。

パワートレインとロードファクターでは、極端な想定ではあるが、2019年の貨物輸送部門のCO₂の90%が自動車から排出されていること、ならびに自動車で特徴的なパワートレインの改革と後述（2.4）するロードファクターとCO₂排出量の相関性に着目して、2030年と2050年では全ての輸送を自動車が担うことを想定した。

⑤排出係数については、2050年のカーボンニュートラルを推計するにあたり重要な指標であるため、以降に3つの節を設けてやや詳しく述べる。

*1 ロードファクター（積載効率）は輸送量（t・km）/輸送能力（t・km）で定義される。輸送量は輸送重量（t）×輸送距離（km）、輸送能力は最大積載重量（t）×走行距離（km）で計算されることから、定義式を変形すれば、ロードファクター＝（輸送重量/最大積載重量）×（輸送距離/走行距離）＝積載率×実車率となる。

2.2 排出係数 (BaUならびにモーダルシフト)

鉄道と船舶は、参照できる情報がなかったため、2030年10%、2050年20%の改善が一律で見込めるとした。

自動車は、化石燃料、電力、水素、合成燃料の排出係数 (2.3参照) を輸送量で加重平均した。

2.3 排出係数 (パワートレイン)

今回の推計では、①化石燃料、②電力、③水素、④合成燃料の4つを設けた。

①化石燃料は、温暖化対策推進法で定められている燃料種別の炭素排出量 (エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数一覧表) を使用した。

②電力は、時点に応じて以下のように設定した。

2019年：現在のCO₂排出係数 (0.47kg-CO₂/kWh、電気事業者別排出係数2019年度実績 (環境省・経済産業省)) を使用した。

2030年：『第6次エネルギー基本計画』 (閣議決定) に基づき電気事業低炭素社会協議会が発表した計画のCO₂排出係数 (0.25 kg-CO₂/kWh) を使用した。

2050年：カーボンニュートラルが達成されたCO₂排出係数 (0.00kg-CO₂/kWh) を使用した。

③水素は、2030年は『Hydrogen Scaling Up』 Hydrogen Council (2017) Exhibit13の想定に基づき、また、2050年はゼロエミッション水素を想定して、次のように設定した。

2019年：天然ガス由来水素と想定してCO₂排出係数を設定した。

2030年：Green/Clean水素と想定してCO₂排出係数を設定した。

2050年：CO₂排出係数をゼロと設定した。

④合成燃料は、将来の合成燃料のCO₂排出係数の推定値・目標値のデータは存在しないため、以下のように設定した。

2019年：1kg-CO₂/ℓ (天然ガスの1/2程度)

2030年：0.5kg-CO₂/ℓ (2019年の1/2)

2050年：0kg-CO₂/ℓ (ゼロエミッション)

なお、②から④のエネルギーを用いる輸送機器は、ストックベースで2030年まで

に50%、2050年までに100%普及していることを想定した。

2.4 排出係数 (ロードファクター)

ロードファクターのケースでは、2030年と2050年の全ての輸送を化石燃料 (軽油) を燃種とする自動車が担うことを想定した。軽油の貨物輸送量当たりの排出係数はロードファクターによって変わるため、まずロードファクターの設定方法を述べる。

北條・下村・田中 (2010) によれば、ロードファクターと出荷ロットの間には正の相関がある。今回の推計にあたり、『自動車輸送統計調査年報』と『物流センサス』 (いずれも国土交通省) のデータを用いて回帰式を求めたところ、次のようになった。

$$Y = 33.58X + 16.18 \quad (R^2 = 0.88)$$

ここに、

Y；ロードファクター (%)

X；出荷ロット (t/件)

2019年 (現況) の出荷ロットは0.54 (t/件) *2であったが、2050年にはこれが2倍になる (方策については4.1で後述) とすると、出荷ロットは1.07 (t/件) になる。これらに対するロードファクターは上の回帰式から、また積載率はロードファクターを実車率で除することでそれぞれを求めると、2019年、2030年、2050年の状況は**図表3**のようになる。

積載率が取り得る範囲は0以上1以下であることと過去の実績値ならびに輸送に係わる実務家の感触などから、今回の推計では実車率を70%とした時の積載率を、この後の貨物輸送量当たりの燃料使用量の算定に用いることとした。

軽油を燃種とする貨物自動車の積載率、最大積載量、排出係数の間には次の関係式がある (平成18年3月29日 省エネ法経済産業省告示第66号)。

図表3 出荷ロットと積載率の関係

年	出荷ロット (t/件)	ロードファクター (100%=1.00)	実車率 30%	実車率 50%	実車率 70%
			積載率 (100%=1.00)		
2019	0.54	0.34	1.13	0.68	0.49
2030	0.73	0.41	1.37	0.81	0.58
2050	1.07	0.52	1.73	1.04	0.75

$$\ln X = 2.71 - 0.812 \ln (Y/100) - 0.654 \ln Z$$

ここに、

X：貨物輸送量当たりの燃料使用量（ℓ/t・km）

Y：積載率（%）

Z：貨物自動車の最大積載量（kg）

この関係式に対し、2030年と2050年の2時点の積載率（Y）には**図表3**の実車率70%の場合の積載率を代入、最大積載量（Z）には2時点とも保有台数資料（（一社）日本自動車工業会『2016年度普通トラック市場動向調査』）から推定した5,900kgを代入して、貨物輸送量当たりの燃料使用量（ℓ/t・km）を求め、これに軽油1ℓ当たりのCO₂排出量（2.58 kg-CO₂/ℓ）を乗じた値を貨物輸送量当たりの排出係数（kg-CO₂/t・km）とした。

*2 物流センサスは、原則的に、5年に1回の頻度で実施されている調査であり、2019年は調査年ではなかった。このため、2019年の出荷ロットは今回求めた回帰式に同年のロードファクターを代入して求めた。

2.5 推計結果

5種類のケースごとに、3つの時点のCO₂排出量を**図表4**および**図表5**に示す。

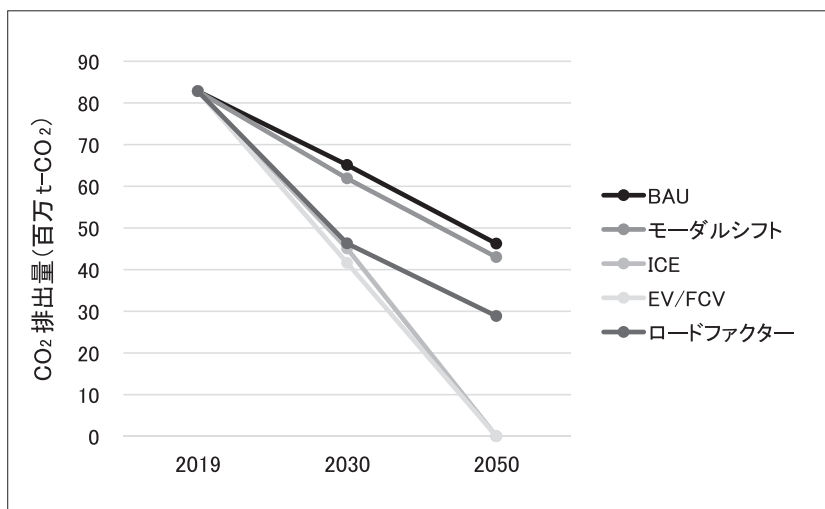
輸送の全てが貨物自動車で行われることを想定したパワートレインの2つのケース、ICEとEV/FCVでは、どちらも2050年の排出係数がゼロになる設定が効いて、カーボンニュートラルが達成される。

BaU、モーダルシフト、ロードファクターの3つのケースでは、2050年におけるカーボンニュートラルは達成されない。しかしながら、2013年比マイナス35%とした場合の2030年の目標値58,168千t-CO₂（航空機を含む輸送機関計）については、パワートレイン、ロードファクター双方のケースで目標が達成される結果となった。さらに、仮に2030年の鉄道、船舶と航空機を合わせたCO₂排出量が2019年と同じ（8,526千t-CO₂）^{*3}だと想定した場合、これを加えても目標は達成される。

*3 航空機を含むこの値は、本推計の2019年の値ではなく、温室効果ガスインベントリオフィスの2019年の確定値

図表4 貨物輸送部門のCO₂排出量の推計結果

物流機能	ケース	CO ₂ 排出量（千t-CO ₂ ）			
		2019	2030	2050	
輸送	BaU	82,803	65,097	46,232	
	モーダルシフト		61,874	42,985	
	パワートレイン		ICE	45,055	0
			EV/FCV	41,600	0
	ロードファクター		46,287	28,851	



図表5 貨物輸送部門のCO₂排出量の推計結果

に基づく。ちなみに、航空機を除く貨物輸送部門のCO₂排出量は、インベントリオフィス82,803千t-CO₂、本推計83,108千t-CO₂。本推計はインベントリオフィスの確定値より0.37%大きい。

3. 保管・荷役部門のCO₂排出量の将来推計

倉庫の中で使われる代表的な物流機能である保管機能と荷役機能については、公的な統計からCO₂排出量を知ることができない。そこで、JILSでは、保管ならびに荷役機能が使われている倉庫に係る複数の公開データを用いて、保管・荷役部門のCO₂排出量を推計した。

なお、倉庫の中ではWMS（Warehouse Management System；倉庫管理システム）などに係わる情報機能が、また一部の倉庫では流通加工機能が使われ、これらのための電力に起因するCO₂の排出があると考えられるが、今回は情報と流通加工の電力に起因するCO₂排出量を分別していない。また、荷役機能については、CNGなどの化石燃料をエネルギー源とするフォークリフトなどの機器も使われているが、これらに係わるCO₂排出量は推計していない。

3.1 推計の前提条件

今回の推計の前提条件として、①時点、②対象業種、③延床面積、④倉庫の分類、⑤原単位（電力使用量/延床面積）、⑥ケース、⑦排出係数の7つを設けた。

- ①時点については、輸送と同様に、2019年（現況）、2030年、2050年の3時点とした。
- ②対象業種については、倉庫を利用する代表的な業種として、「運輸業・郵便業」「卸売業」「小売業」を選択した。
- ③延床面積については、2030年までは、2019年（現況）の輸送量（t・km）を基準に、輸送と同じく5%増大、2031年以降は横ばいと推定した。
- ④倉庫の分類については、2019年（現況）時点の延床面積に応じて、大型（5万m²以上）と小型（5万m²未満）、そして冷蔵の3種類に分類した。
- ⑤原単位（電力使用量/延床面積）については、大型、

小型、冷蔵の3種類に応じて設定した。

原単位の分子である電力使用量は『総合エネルギー統計』（資源エネルギー庁）から、また、分母である延床面積は『法人土地・建物基本調査』（国土交通省）、『物流・倉庫統計季報』（国土交通省）、日本冷蔵倉庫協会資料から分類別の延床面積を求め、2019年（現況）の原単位を推計した。

- ⑥ケースについては、BaU（Business as Usual）、追加的省エネの2種類とした。

BaUは、3種類の倉庫で年率1%の省エネ（省エネ法の目標値）が進展するものとした。

追加的省エネは、大型倉庫については、各種荷役機器の自動化によってエネルギー使用量は増加すると考えられる一方で、無人化による空調や照明等に係るエネルギー使用量の削減効果が期待できることから、2019年から2050年までにエネルギー使用量が10%削減されるものとした。

- ⑦排出係数については、電力を想定して、輸送と同様に、時点に応じて設定した。

3.2 推計結果

2019年の荷役・保管部門（倉庫）のCO₂排出量は推計で2,554千t-CO₂。同年の貨物輸送部門（貨物輸送機器）のCO₂排出量の推計値は82,803千t-CO₂であった。保管・荷役部門から排出されるCO₂は貨物輸送部門の3%程度と推定された（図表6）。

2050年については、倉庫の延床面積は輸送量（t・km）に応じて伸長するが、CO₂排出量は、電力の排出係数が0になることにより、BaU、追加的省エネの双方のケースでカーボンニュートラルを実現すると推定された。

今回は保管・荷役の2013年のCO₂排出量を推計していないが、2019年のCO₂排出量をベースに、2013年と2019年の輸送量（t・km）の比を用いて推定す

図表6 保管・荷役部門のCO₂排出量の推計結果

物流機能	ケース	CO ₂ 排出量（千t-CO ₂ ）		
		2019	2030	2050
保管・荷役	BaU	2,554	1,270	0
	追加的省エネ		1,253	0

ると2,652 (千t-CO₂) となり*4、2013年比マイナス35%は1,724 (千t-CO₂) に相当する。よって、BaU、追加的省エネの双方のケースで、2030年の目標を達成する結果となった。

*4 $2,554 (千t-CO_2) \times 459 (10億t \cdot km) / 442 (10億t \cdot km) = 2,652 (千t-CO_2)$

4. 今後求められる計画 ＝スロー・ロジスティクス＝

4.1 輸送と保管・荷役の連携

今回の推計では、2019年（現況）における保管・荷役（倉庫）のCO₂排出量は、同年の貨物輸送のCO₂排出量の僅か3%程度であることがわかった。CO₂排出量の大きさは輸送と保管・荷役では桁違いに異なっているものと思われる。

輸送のロードファクターのケースでは、出荷ロットを大きくしてこれと正の相関がある積載率を大きくすることで、貨物自動車から排出されるCO₂の量を減らすことを想定した。積載率を大きくするために出荷ロットを大きくすること、例えば毎日出荷を隔日出荷に変更することは、在庫の量が増えるため、倉庫で使用される延床面積が大きくなり、保管・荷役のCO₂排出量が大きくなることを意味している。

既に述べたように、今回の推計では、出荷ロットを2019年から2050年にかけて2倍（0.54t/件→1.07t/件）にし、さらに実車率を3時点とも70%に設定すると、貨物輸送のCO₂排出量は、2019年の82,803千t-CO₂から2030年の46,287千t-CO₂を経て、2050年には28,851千t-CO₂にまで減少する（図表7の「輸送_ロードファクター」）。

一方、2019年から2050年にかけて出荷ロットを2

倍にすることで保管量が2倍になってCO₂排出量がBaUの2倍になることを想定しても、保管・荷役のCO₂排出量は、2019年の2,554千t-CO₂から2030年の2,540千t-CO₂を経たのち、2050年のカーボンニュートラルを実現する（図表7の「保管・荷役_在庫」）。

このように、輸送と保管・荷役の元々のCO₂排出量のオーダーの違いから、輸送の積載率の増大に伴う保管・荷役の量の増大があっても、輸送と保管・荷役を合わせた際のCO₂排出量の削減効果は大きいものになることが推定された（図表7の「計_ロードファクター+在庫」）。輸送に保管と荷役を加えたこのケースでは、輸送の前提条件のため、2050年のカーボンニュートラルは達成できないものの、2030年の貨物輸送部門の目標削減率2013年比35%（CO₂の排出量は58,168千t-CO₂）を達成できる（「ロードファクター+BaU」ケースも同様）。

このように、出荷の頻度を下げて、輸送と保管・荷役の低炭素化を図る計画を、以降「スロー・ロジスティクス」と呼ぶことにする。

4.2 物流の問題をロジスティクスで解く

スロー・ロジスティクスは企業の物流部門における低炭素化に資すること（企業の非財務指標の改善）はわかったが、その一方で、在庫量の増加は企業の財務指標であるROA（Return On Assets；総資産利益率）などの悪化に繋がると考えられる。スロー・ロジスティクスが産業界に実装されるためには、CO₂排出量のような非財務指標とROAなどの財務指標双方のバランスが、経営の視点から評価された上で、実行される必要がある。

JILSが荷主企業に対して毎年行っている物流コスト調査の中で、「自社の経営者は物流に対してどのような認識を持っていると思うか」を尋ねている（複数回答）。2022年調査の1位は「事業者や取引先との連携による持続可能な物流構築が重要」の142票（77%）、2位は「調達から販売を通じた自社の物流の全体最適が重要」の122票（66%）、3位は「物流は環境やSDGsなど社会課題の解決の鍵となる」の101票（55%）で、前年

図表7 輸送と保管・荷役の連携によるCO₂排出量の推計結果

物流機能	ケース	CO ₂ 排出量 (千t-CO ₂)		
		2019	2030	2050
輸送	ロードファクター	82,803	46,287	28,851
保管・荷役	BaU	2,554	1,270	0
	在庫	2,554	2,540	0
計	ロードファクター+BaU	85,357	47,557	28,851
	ロードファクター+在庫	85,357	48,827	28,851

調査の3位「物流はコストでありコスト削減が最優先事項」を抜いた。

一方、JILSの法人会員を対象に行っている会員アンケート調査で毎年訊いている「自社の物流課題」（複数回答）では、2022年調査においても、「ドライバー不足/2024年問題への対応」（31%）を20ポイント以上離して「物流コスト適正化（物流コスト改善）」（55%）が首位であった。しかしながら、上述のように、企業の経営層が物流を視る目は変わりつつあると思われる。取引先との調整が必要になるスロー・ロジスティクスも、昨今の経営環境ならびに経営層の物流に対する認識の変化によって、産業界で実行される機運が高まっているものと思われる。物流の問題をロジスティクスで解くための環境がようやく整いつつあるのだ。

4.3 行政の動向

このような中、行政機関においても注目すべき動きがある。経済産業省・国土交通省・農林水産省が事務局をつとめる「持続可能な物流の実現に向けた検討会」では、トラックドライバーの時間外労働時間の上限が2024年4月から年間960時間に制限されることに伴って発生すると言われる、いわゆる物流の2024年問題を受け、主にトラックドライバーの生産性を向上させることを狙いとした実効性のある施策を検討している。この検討会で議論されていることで特に注目すべきは、省エネ法を模範とした新たな法の整備である。

ポイントは2つある。ひとつは、日本の商慣行では一般的に輸送費を負担しない（が、輸送のロットや頻度などを決めている）着荷主も法の対象者に想定していること、もうひとつは、省エネ法のエネルギー管理者に相当する役割に就く者を役員クラスにすることを想定している点である。欧米の企業ではCLO（Chief Logistics Officer；最高ロジスティクス責任者）と呼ばれるロジスティクスを所管する役

員がいるところが多くあり、物流現場の問題を経営の領域で解くことがしばしば行われていると聞く。もし、この法が施行されると、日本の企業でも同様のことが起こり始めることが期待できるのである。

スロー・ロジスティクスは低炭素のための計画であるが、出荷頻度を低めたりリードタイムを延長することは余裕を持った輸送計画の策定と実行に結びついて、物流の現場を支えているトラックドライバーのみならず倉庫で働いている人々の生産性やQOL（Quality of life）の向上にも役立つはずだ。スロー・ロジスティクスが、今後一層求められてくる物流部門の低炭素化と物流現場で働く人々のQOL向上に資する計画の嚆矢となるよう、著者は現在検討されている新たな制度に期待を寄せている。

謝辞

本稿の内容の多くは、2022年度にJILSが実施した「脱炭素型ロジスティクス調査」に基づいている。同調査の意見交換会のメンバー各位（ひとりの理事と6人の法人会員の皆様）ならびに調査に多大なご協力を戴いた株みずほりサーチ&テクノロジーズの研究員各位にこの場を借りて御礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) (一社) 日本物流団体連合会 (2023) 『数字で見る物流 2022年度版』
- 2) 経済産業省・国土交通省 (2018) 『省エネ法告示第3号 (荷主の判断の基準)』
- 3) 経済産業省・国土交通省 (2018) 『省エネ法告示第4号 (貨物輸送事業者の判断の基準)』
- 4) 経済産業省・国土交通省 (2016) 『ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法 共同ガイドラインVer.3.1』
- 5) 北條英・下村博史・田中達之輔 (2010) 「貨物自動車のエネルギー情報管理に関する研究」『経営情報学会誌』 3, 221-234
- 6) 経済産業省・国土交通省・農林水産省 (2022-2023) 持続可能な物流の実現に向けた検討会資料 (第1回~第9回)