

基礎研 レター

気候変動が運輸にもたらす影響

材料の改善や技術の進展により、強靱化が可能な部分もある

保険研究部 主席研究員 篠原 拓也
(03)3512-1823 tshino@nli-research.co.jp

1—はじめに

気候変動問題への注目が高まっている。2023年の夏は、世界各地で記録的な暑熱を観測した。ハリケーンや台風、豪雨、海面水位の上昇、山林火災、干ばつなど、さまざまな形で、極端な気象があらわれつつある。

地球温暖化の背景にあるのは、さまざまな部門が排出する温室効果ガスとされる。国連をはじめ、国際機関や各国政府では、気候変動緩和に向けた各部門の役割について議論が行われている。運輸部門についても、自動車運送、鉄道輸送、水運、航空輸送などの輸送インフラとそれらの運用にあたり、いかにして、運輸の温室効果ガス排出を減らして、脱炭素化目標の推進を図るかといった点が論じられている。

それとともに、気候変動が運輸に深刻な影響を及ぼす可能性もある。本稿では、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書などをもとに、その影響について見ていくこととしよう。

2—運輸の拡大

本章では、運輸の推移について、統計的にみていくこととしたい。

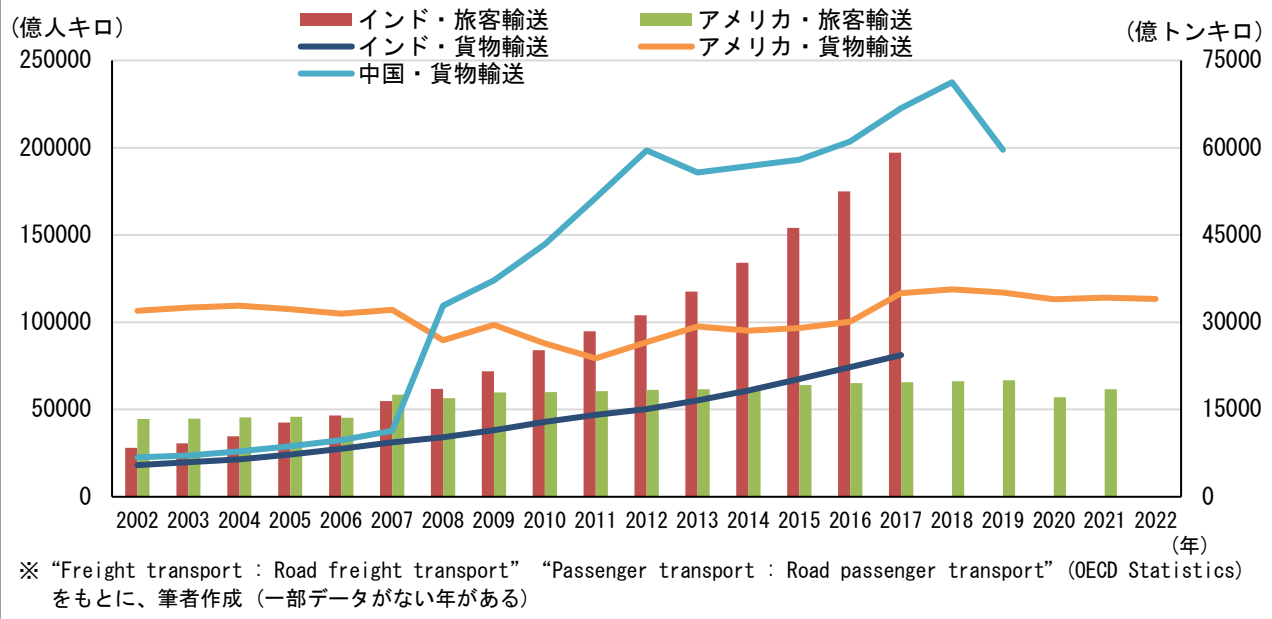
1 | インドでは経済成長を背景に自動車運送が増加

まず、インド、中国、アメリカの3カ国について、自動車による旅客輸送と貨物輸送の運送量の推移を見ていくと、次のグラフの通りとなる²。インドはいずれも年々増加、中国は貨物輸送が増加していたが2019年にやや減少、アメリカはいずれも横ばいで推移している。インドでは、経済成長を背景に、自動車輸送量が伸びつつあることがうかがえる。

¹ “Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change” (IPCC WG3, AR6, 2022)

² 中国の旅客輸送については、OECD統計データでは揭示されていない。

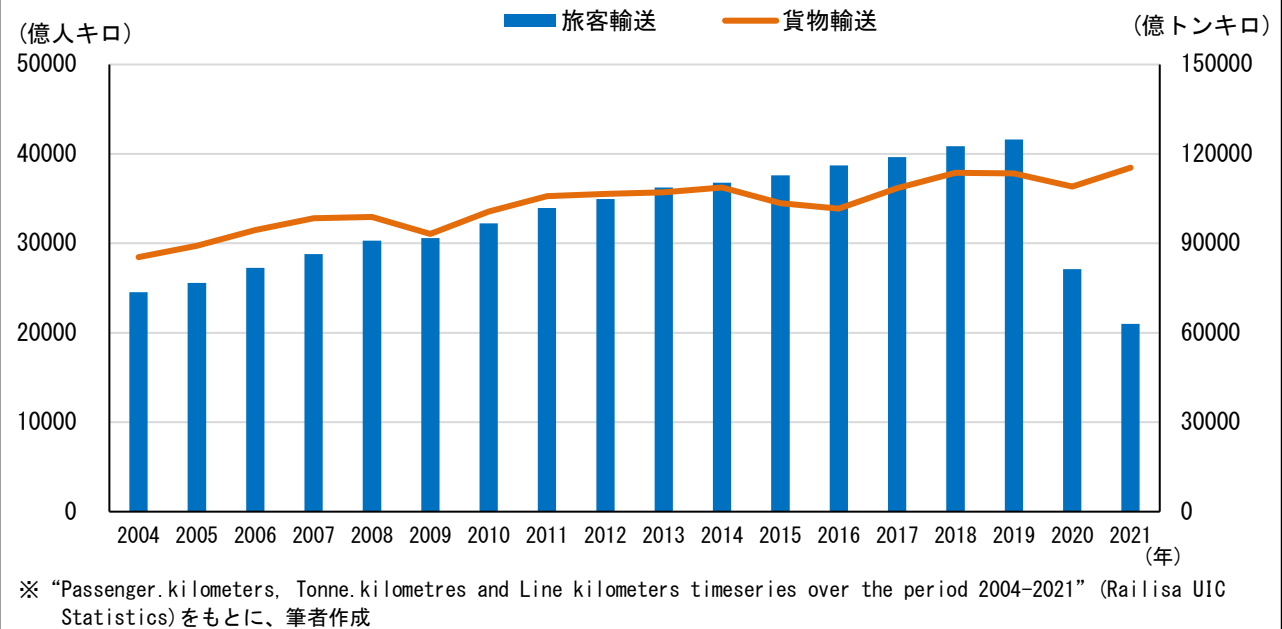
図表1. 世界の自動車輸送の推移



2 | 世界の鉄道輸送も右肩上がりが続いている

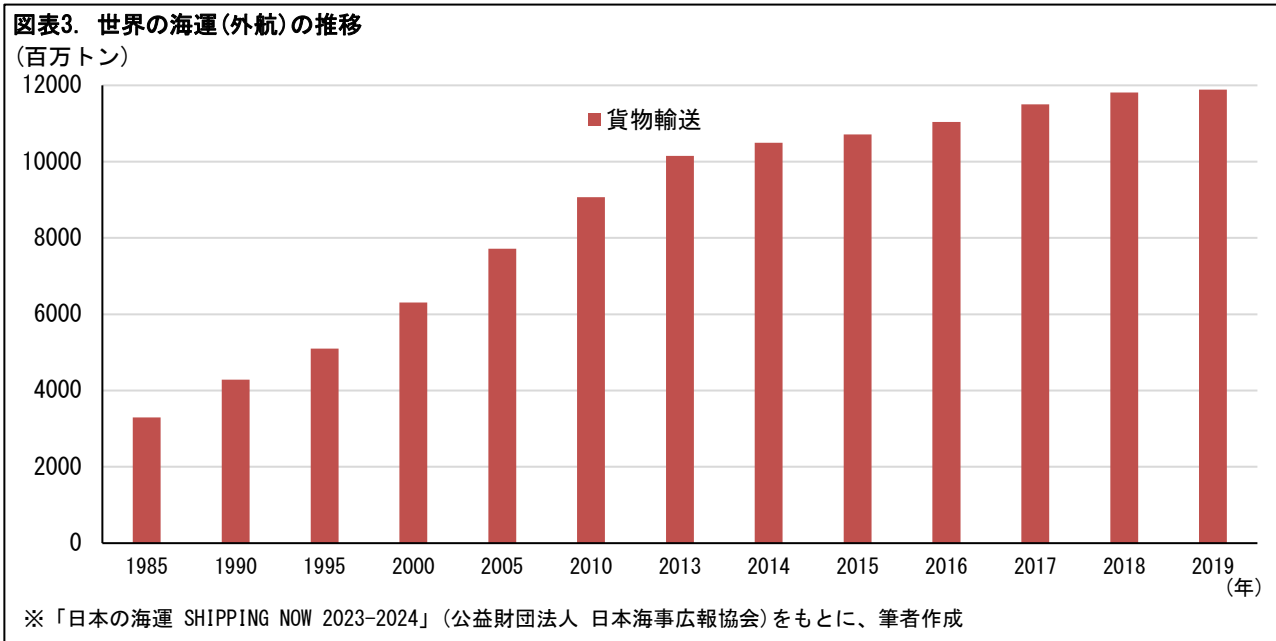
次に、鉄道輸送について見ていく。世界の旅客輸送の輸送量は、2019年まで増加を続けてきた。一方、貨物輸送は増加傾向が頭打ちとなりつつある。2020年以降はコロナ禍の影響で旅客輸送が落ち込んでいる一方、貨物輸送は横ばいを続けている。今後、旅客輸送がコロナ前の姿に戻ってくることが考えられる。

図表2. 世界の鉄道輸送の推移



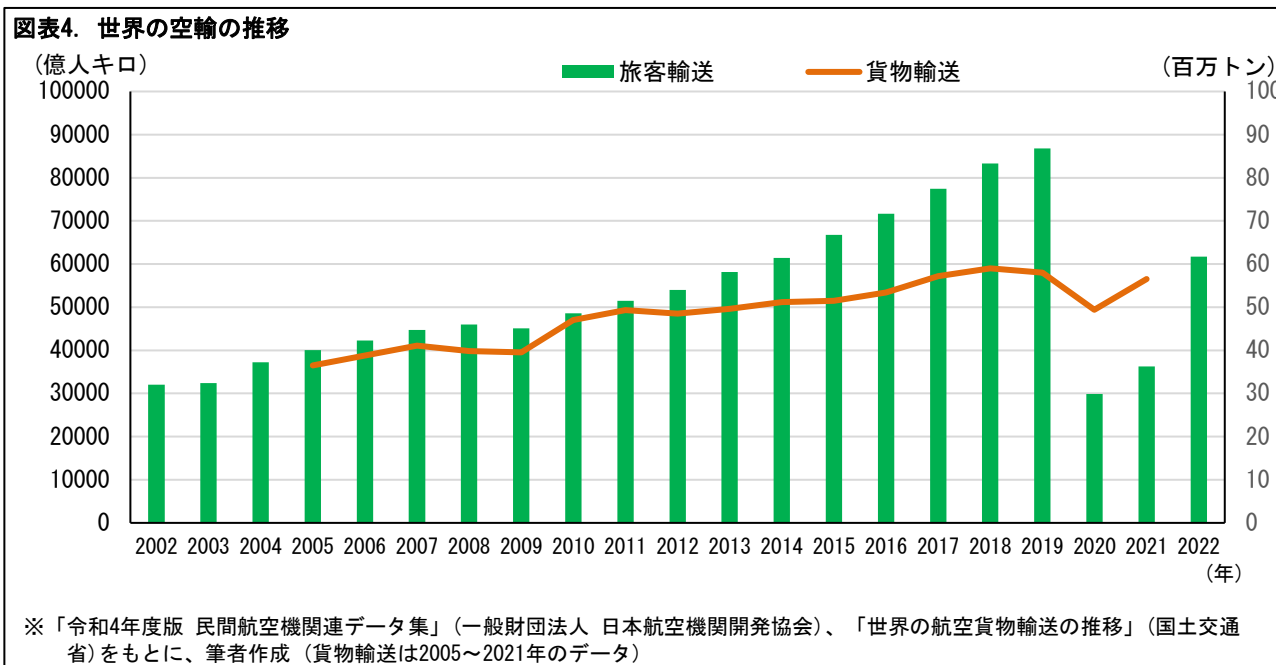
3 | 世界の海運は右肩上がりが続いてきた

つづいて、海運を見ていく。世界の海運(外航)の輸送量は、2019年まで増加を続けてきた。³ グラフでは、2020年以降のデータはないが、コロナ禍の影響が出ていることが想定される。



4 | 世界の空輸も右肩上がりが続いている

最後に、空輸について見ていく。世界の空輸の輸送量は、旅客、貨物とも2019年まで増加を続けてきた。2020年にコロナ禍の影響で落ち込んだが、2021年には貨物が回復。2022年には旅客も急速に回復しつつある。



³ 「トンキロ」は、1トンのものを1キロメートル運ぶ量。「トン」は、距離によらず1トンのものを運ぶ量を指す。

3—気候変動と運輸の関係

極端な高温、洪水をもたらす激しい降雨、激しい風や暴風雨、海面上昇などの気候変動の影響は、道路、鉄道、水運、航空の輸送インフラ、運行、輸送に深刻な影響を及ぼす可能性がある。IPCC の報告書では、多くの資料や文献をもとに、気候変動と運輸の関係について述べられている。

1 | 気候変動が輸送に及ぼす潜在的な影響を見過ごすことはできない

イタリアを中心に、各国の都市の道路に関する 108 個の文献を系統的に調査して、気温、豪雨による洪水、海面水位上昇が、輸送インフラに与える影響を論じた報告書がある。気温上昇が道路舗装の脆弱性を引き起こす問題、豪雨による雨水が地表に浸透せずに洪水を引き起こす問題、海面水位上昇が沿岸部の都市に高潮や洪水をもたらす問題等を取り扱っている。そして、舗装の材料や防潮堤の構造などに関する技術的な解決策を示している。そのうえで、輸送は現在の工業化社会の生命線であり、人、物、サービスの移動が阻害されると、都市環境や人口の脆弱性が増大する。したがって、気候変動が輸送に及ぼす潜在的な影響を見過ごすことはできない、と結論づけている。⁴

2 | 極端な気候は被害の大きさだけでなく、その種類も変化させる

気候のハザード(危険)、インフラのエクスポージャー(曝露)、ハザードに対するインフラのセンシティブティ(感度)の3つを組み合わせ、気候変動による損害の推定方法を紹介する論文もある。

総合的な推定の結果として、現在の災害は、河川の洪水(44%)と暴風(27%)に関連するものが多く、干ばつと熱波の割合は合計 12%に過ぎない。だが、今後は、干ばつと熱波の割合が大幅に増加し、今世紀末までに気候災害全体の 90%近くを占めるようになる。つまり、極端な気候は被害の大きさもさることながら、その種類も変化させる可能性がある、としている。

つぎに、各インフラごとの推定の結果として、輸送部門では、熱波は主に鉄道と道路に影響を与える(2080年代には輸送部門の災害の92%)。気温上昇に伴う、レールの座屈⁵やアスファルトの溶解などが主な被害。また、内陸部では現在の鉄道と道路の半数以上が被災、沿岸部では洪水による損害を受け、これらは時間の経過とともに増加する。一方、現在、鉄道と道路の被害の10%を占める寒波の影響は大きく減少する。内陸水路による水運は、河川の水位低下による航行能力の低下など、干ばつの影響をますます受けるようになる。暴風が、河川航行に与える被害はやや増加する。海面水位上昇と高潮の増加は、22世紀の港湾被害の大幅な増加につながる、としている。⁶

4—運輸種類別の影響

つぎに、運輸の種類別に気候変動の影響をみていこう。自動車運送、鉄道輸送、水運、航空輸送の4つを取り上げる。

⁴ Moretti, L. and G. Loprencipe, 2018: Climate Change and Transport Infrastructures: State of the Art. Sustainability, 10(11), 4098, doi:10.3390/su10114098.

⁵ 細長い棒や薄い板に対して縦方向に加えた圧力が或る限界値に達すると、横方向に変形をおこす現象(「広辞苑 第七版」(岩波書店)より)

⁶ Forzieri, G. et al., 2018: Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. Glob. Environ. Change, 48, 97-107, doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007.

1 | 自動車運送：温暖化により道路の舗装コストが増加

(1) 道路舗装コスト

まず、欧米と日中豪などの19個の気象モデルをアンサンブルに用いて⁷、アメリカの道路舗装の将来のコストを予測した論文をみってみる。それによると、舗装コストは2040、2100年までにIPCC第5次評価報告書のRCP4.5⁸のシナリオの下で約19.0、21.8億米ドル。RCP8.5の下で約26.3、35.8億米ドルが追加で必要になる、と推定されている。これらのコストは、影響を緩和するための資源に乏しい地方自治体には、不釣り合いに大きな影響を与えるという。⁹

(2) 舗装の材料

道路舗装では、舗装の材料が重要な要素となる。アメリカのバージニア州の道路舗装について、舗装に用いられる結合材(バインダー)の違いに応じた気候変動の影響をコストとして試算した論文がある。オリジナルのバインダーを使用した舗装に比べて、改良されたバインダーを用いた舗装は、2020~39年に予想される将来の気候条件の下で優れた性能を発揮するとともに、メンテナンスの頻度が減り経済的にも有利であると結論づけている。こうした舗装の材料の改良が、自動車運送に気候変動リスクへの強靭性をもたらすものと考えられる。

2 | 鉄道輸送：鉄道インフラにはさまざまな影響が及ぶ

鉄道輸送は、軌道や架線等のインフラを必要とする点で、海運、航空輸送と異なる。気候変動がもたらす影響を見るうえで、インフラに与える影響も考慮する必要がある。鉄道輸送については、数多くの文献がある。^{10, 11, 12, 13} それらを参考に、筆者がまとめてみた。

(1) 軌道

極端な熱は、普通鋼のレールを膨張させ、座屈リスクを招く。また、洪水や高潮等により線路が冠水すれば、車両の脱線等の重大な事故を引き起こす恐れがある。線路が冠水しやすい水路の近くにある場合、線路を支持する盛土が削られたり流されたりすることがある。さらに、強風によって倒木などが線路を塞ぐ。線路脇のポイントが、洪水、高温(交換機構の過度の拡張)、低温(氷や雪による詰まり)により故障して輸送サービスの停止につながる、といったリスクもある。

⁷ 並行して多数の予測を行い、結果の平均やばらつきの程度といった統計的な情報を用いて予測を確率的に捉えること。

⁸ RCPの後の数字は、2100年時点での放射強制力(単位は、ワット毎平方メートル)を表す。RCP4.5は温暖化対策が中程度で、1986-2005年に対する今世紀末の世界平均地上気温が平均1.8度上昇(「可能性が高い」予測幅は1.1~2.6度上昇)。RCP8.5は温暖化対策なしで、同平均3.7度上昇(同2.6~4.8度上昇)との予測とされている。(「IPCC第5次評価報告書の概要-第1作業部会(自然科学的根拠)-」(環境省、2014年12月版)より)

⁹ Underwood, B.S., Z. Guido, P. Gudipudi, and Y. Feinberg, 2017: Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. *Nat. Clim. Change*, 7(10), 704-707, doi:10.1038/nclimate3390.

¹⁰ Palin, E.J., I.S. Oslakovic, K. Gavin, and A. Quinn, 2021: Implications of climate change for railway infrastructure. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, 12(5), e728-e728, doi:10.1002/WCC.728.

¹¹ Forero-Ortiz, E., E. Martínez-Gomariz M. Cañas Porcuna, L. Locatelli, and B. Russo, 2020: Flood Risk Assessment in an Underground Railway System under the Impact of Climate Change - A Case Study of the Barcelona Metro. *Sustainability*, 12(13), 5291, doi:10.3390/su12135291.

¹² Pérez-Morales, A., F. Gomariz-Castillo, and P. Pardo-Zaragoza, 2019: Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers. *Water*, 11(6), 1197, doi:10.3390/w11061197.

¹³ Dawson, D., J. Shaw, and W. Roland Gehrels, 2016: Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. *J. Transp. Geogr.*, 51, 97-109, doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.11.009.

(2) 架線

架線は、熱または寒さによって影響を受ける可能性がある。また、強風は送電線やそれを支える構造物を崩壊させることもある。さらに、浸水と凍結の影響を受ける可能性もある。一方、冷たい雨は、ワイヤや支持構造物に急速に氷を蓄積させる可能性がある。この大きな余剰負荷は、強風時にケーブルの過剰な移動を引き起こし、ケーブルや接合部の故障につながる可能性がある。信号装置は、通気性の悪い筐体(きょうたい)¹⁴に収納されている場合、暑熱により過熱する可能性がある。そして、線路の横では、洪水の影響を受ける可能性がある。

(3) 線路の勾配

線路の勾配には、近代的な設計基準が存在する前に建設されたものも多い。これらの中には、現代の交通インフラの基準よりもはるかに急勾配となっているものもある。そのようなケースでは、大量の降水によって引き起こされる表層部の地滑り、荷重の増加や斜面形状の変化がもたらす深層部の地滑り、凍結の融解によって生じる落石などが問題となる。

(4) 擁壁

近年の擁壁¹⁵は、地盤の強度を安定させるために柔軟な埋込式構造が多いが、過去に造られた擁壁は重力式構造が多く、安定性を高めるために構造の自重と保持土の組み合わせに依存している。これらの壁は均質ではなく、荷重の変化の影響を受けやすい。

(5) トンネル

浸水や排水の問題による応力¹⁶の増大、浸透氷の形成などの問題が考えられる。氷が形成され、通過車両に氷が衝突したり、線路に落ちたりして、脱線を引き起こす。また、大雨は洪水や一時的な閉鎖を引き起こす可能性がある。

(6) 橋梁

洪水時には、水中の基礎の周囲から材料が取り除かれることがある。これは、洗掘と呼ばれる。材料が失われると、橋梁自体の崩壊につながる可能性がある。

(7) 地下鉄

都市部では、地下鉄網が発達していることが多い。地下鉄には、豪雨などに伴う洪水のリスクがある。インフラの防水の状況や降雨条件によっては、線路や駅が洪水に見舞われることもある。特に、ヨーロッパなどで古くからある地下鉄の場合、高いリスクにさらされているものと見られる。

3 | 水運：海面水位の上昇が港湾施設に影響を及ぼす可能性もある

海運では、港湾施設が不可欠となる。カリブ海の島嶼国であるジャマイカとセントルシアの4つの空港と4つの港湾について、海面水位上昇の影響を予測した研究もある。それによると、産業革命前に比べて1.5℃以下の平均気温上昇のシナリオであっても、ほとんどの港湾で、今世紀中に浸水が予測されるという。島嶼国等では、海面水位の上昇により港湾が機能しなくなるリスクがある。¹⁷

¹⁴ 機器をおさめているはこ。(「広辞苑 第七版」(岩波書店)より)

¹⁵ 崖などの土留めのために造った壁。(「広辞苑 第七版」(岩波書店)より)

¹⁶ 物体が荷重を受けたとき荷重に応じて物体の内部に生ずる抵抗力。(「広辞苑 第七版」(岩波書店)より)

¹⁷ Monioudi, I. N. et al., 2018: Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): the case of Jamaica and Saint Lucia. Reg. Environ. Change, 18(8), 2211-2225, doi:10.1007/s10113-018-1360-4

一方、河川や運河による内陸水路による水運では、水位の変化による船舶の航行への影響が問題となる。国連欧州経済委員会が2020年にまとめた報告書では、干ばつに伴うライン川の水運低下が論じられている。2018年に発生した流量の低下は、気候、水文学、内陸航行、輸送市場、関連産業を含む因果関係の連鎖を引き起こし、最終的には各国の経済に大きな影響を与えたとしている。¹⁸

4 | 航空輸送：気候変動によりジェット気流が増強し空輸に影響をもたらす可能性も

前節で取り上げた研究によると、産業革命前に比べて1.5℃以下の平均気温上昇のシナリオであっても、調査した国際空港でいくつかの滑走路は、今世紀中に浸水が予測されるという。島嶼国等では、海面水位の上昇により空港が機能しなくなるリスクもある。

空輸の場合は、気候変動によってもたらされるジェット気流の増強が注目される。気候変動による北大西洋におけるジェット気流の変化をモデルによって試算した研究がある。それによると、冬の大西洋横断飛行ルートにおける中度以上の晴天乱気流の量が、気候の変化に伴って将来大幅に増加することが示されている。^{19, 20}

また、南半球別の中緯度での大規模な大気循環について、ジェット気流の変化を、40個の気象モデルをアンサンブルに用いてモデル試算した研究もある。その研究では、今世紀中にジェット気流が強化されることが、1年のすべての季節で見出されたという。²¹

5—おわりに（私見）

本稿では、気候変動が運輸にもたらす影響についていくつかの文献をもとに見ていった。気候変動問題と運輸の話題と言えば、運輸の温室効果ガス排出を減らして、脱炭素化目標の推進を図るという点が注目されやすい。例えば、自動車分野では、電気自動車(EV)や低排出ガスを用いたカーシェアリング、ライドシェア等を通じた輸送効率の向上、AI(人工知能)等の先端技術を活用した次世代モビリティの社会実装などの取り組みが進められている。一方、気候変動が、既存の運輸システムに与える影響については、あまり論じられていないものとみられる。

現代の社会において、人の輸送、物品の運送は欠かすことのできない要素と言える。日本は、四方を海に囲まれており、海外との運輸には海運や空輸が必須となる。そのため、港湾や空港の施設が欠かせない。また、国土に山地や河川が多いため、道路や鉄道のインフラでは数多くの斜面、トンネル、橋梁が存在する。

気候変動がこうした運輸関係の施設やインフラに与える影響を見過ごすことはできない。今後も、気候変動と運輸の関係については、さまざまな研究・調査が進むものと見られる。引き続き、それらに注目していくこととしたい。

¹⁸ “Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes” (United Nations Economic Commission for Europe, 2020)

¹⁹ “Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change” Paul D. Williams (Advances in Atmospheric Sciences, VOL. 34, 576-586, MAY 2017)

²⁰ “Mechanisms Influencing Cirrus Banding and Aviation Turbulence near a Convectively Enhanced Upper-Level Jet Stream” Stanley B. Trier and Robert D. Sharman (National Center for Atmospheric Research, Monthly Weather Review, 144, 3003-2037, May 2016)

²¹ “Highly significant responses to anthropogenic forcings of the midlatitude jet in the Southern Hemisphere” Abraham Solomon and L. M. Polvani, (Journal of Climate, 29, 3463-3470, March 2016)

(参考資料) [IPCC 報告書における参考文献は、そのままの形で記載]

“Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change” (IPCC WG3, AR6, 2022)

“Freight transport : Road freight transport” (OECD Statistics)

“Passenger transport : Road passenger transport” (OECD Statistics)

“Passenger.kilometers, Tonne.kilometres and Line kilometers timeseries over the period 2004-2021” (Railisa UIC Statistics)

「日本の海運 SHIPPING NOW 2023-2024」(公益財団法人 日本海事広報協会)

「令和4年度版 民間航空機関連データ集」(一般財団法人 日本航空機関開発協会)

「世界の航空貨物輸送の推移」(国土交通省)

Moretti, L. and G. Loprencipe, 2018: Climate Change and Transport Infrastructures: State of the Art. Sustainability, 10(11), 4098, doi:10.3390/su10114098.

「広辞苑 第七版」(岩波書店)

Forzieri, G. et al., 2018: Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. Glob. Environ. Change, 48, 97-107, doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007.

「IPCC 第5次評価報告書の概要 -第1作業部会(自然科学的根拠)-」(環境省, 2014年12月版)

Underwood, B.S., Z. Guido, P. Gudipudi, and Y. Feinberg, 2017: Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. Nat. Clim. Change, 7(10), 704-707, doi:10.1038/nclimate3390.

Palin, E.J., I.S. Oslakovic, K. Gavin, and A. Quinn, 2021: Implications of climate change for railway infrastructure. Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change, 12(5), e728-e728, doi:10.1002/WCC.728.

Forero-Ortiz, E., E. Martínez-Gomariz M. Cañas Porcuna, L. Locatelli, and B. Russo, 2020: Flood Risk Assessment in an Underground Railway System under the Impact of Climate Change - A Case Study of the Barcelona Metro. *Sustainability*, 12(13), 5291, doi:10.3390/su12135291.

Pérez-Morales, A., F. Gomariz-Castillo, and P. Pardo-Zaragoza, 2019: Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers. *Water*, 11(6), 1197, doi:10.3390/w11061197.

Dawson, D., J. Shaw, and W. Roland Gehrels, 2016: Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. *J. Transp. Geogr.*, 51, 97-109, doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.11.009.

Monioudi, I. N. et al., 2018: Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): the case of Jamaica and Saint Lucia. *Reg. Environ. Change*, 18(8), 2211-2225, doi:10.1007/s10113-018-1360-4

“Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes” (United Nations Economic Commission for Europe, 2020)

“Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change” Paul D. Williams (*Advances in Atmospheric Sciences*, VOL. 34, 576-586, MAY 2017)

“Mechanisms Influencing Cirrus Banding and Aviation Turbulence near a Convectively Enhanced Upper-Level Jet Stream” Stanley B. Trier and Robert D. Sharman (National Center for Atmospheric Research, *Monthly Weather Review*, 144, 3003-2037, May 2016)

“Highly significant responses to anthropogenic forcings of the midlatitude jet in the Southern Hemisphere” Abraham Solomon and L. M. Polvani, (*Journal of Climate*, 29, 3463-3470, March 2016)