

4. LCAを用いた航空と新幹線のCO₂排出量の比較

柴原 尚希^{1*}・服部 有里¹・森本 涼子¹・加藤 博和¹・林 良嗣¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科(〒464-8603愛知県名古屋市中千種区不老町C1-2(651))

* E-mail: shibahara@nagoya-u.jp

日本における主要な地域間旅客輸送機関である航空と新幹線のCO₂排出量をLCAを用いて算出し、比較分析を行う。算出の対象範囲(システム境界)をインフラ(空港/駅・線路)および機体/車両(飛行/走行を含む)とすることで、各輸送機関の新規整備によるCO₂排出量変化を包括的に評価する。まず、東京一大阪間を想定しCO₂排出量を推計したところ、航空に比べ新幹線が約9分の1となる。輸送密度による感度分析を行ったところ、約4,000[人/日]以上で新幹線の方が航空より小さくなることが示される。さらに、各都道府県間について、現状の航空機による輸送とそれを新幹線で代替した場合のCO₂排出量や環境効率値を比較し、より優位となる輸送機関を明らかにしている。

Key Words : aviation, Shinkansen high speed railway, CO₂ emissions, eco-efficiency indicator, infrastructure provision

1. 背景と目的

日本の2007年における人為起源CO₂総排出量のうち、旅客交通起源排出量の割合は11.6%である。そのうち航空は6.1%(総排出量の0.7%)を占め、1990年比で約55%増と著しい増加を示している。また、航空産業は運輸部門のうちで非炭素燃料に切り替わるのが最も遅いと考えられており、航空からのCO₂排出量割合が他部門に比べ相対的に上昇していく要因として懸念される¹⁾。

欧州では、航空会社のETS(Emission Trading Scheme : 排出権取引市場)への参加や、運航によって排出されたCO₂の削減費用の一部を搭乗客に負担してもらい排出を埋め合わせするカーボン・オフセットの普及など、地球温暖化防止を重視した取り組みが実施に移されつつある。それとともに、地域間高速鉄道網の整備や高速道路通行への課金といった施策も推進されている。日本も今後は、導入・充実すべき輸送モードをCO₂排出量の観点から選択する時代に入っていくこととなる。

日本国内で、長距離旅客輸送を主に担う交通機関としては、航空以外に鉄道が挙げられる。環境省が公表しているデータでは、全国平均の実績値として、鉄道は航空と比較して運行/運航時のエネルギー消費量やCO₂排出量が大幅に少ないことが示されている。しかし、このことが国内のどの路線や区間においても当てはまるかどうかは即断できない。まず、新線整備においては膨大な規模

のインフラが建設されることから、それらも含めた評価が必要である。また、運行効率、すなわち輸送量や混雑度の違いも重要な要素である。特に今後整備される路線は、従来に比べ輸送量が小さい上に地形制約が大きい地域を通ることから、建設に伴うCO₂排出量が大きくなり、また輸送量あたりでの運行起源CO₂排出量も大きくなることによって、環境面での優位が逆転する可能性がある。現在建設もしくは構想段階の新幹線計画において、航空機が現在担っている地域間の需要量を鉄道に転換させることによってエネルギー・CO₂が削減されるかどうかを定量的に評価する際には、これらを考慮に入れることが必須である²⁾。

一方、日本の空港・新幹線それぞれの整備計画の進捗状況には大きな違いがある。図-1に日本の空港と新幹線の営業路線(実線)と計画路線(破線)を示す。空港は35都道府県において84箇所存在し、現在建設中および建設予定のものは2箇所のみ(うち1箇所は離島)である。一方、新幹線は23都道府県に駅が存在するにとどまっている。全国新幹線鉄道整備法に基づき、国が1973年に整備計画を決定したものの、全計画延長約6,859kmのうち営業線は2,176km(約31%)にとどまっている。現在建設を進めている路線(いわゆる整備新幹線)や、未だ計画段階の路線も存在している(図-1の破線)。新幹線が存在していない道県では、地域間旅客輸送の主流は航空・高速バス・乗用車であり、鉄道の分担率は低くなっている。

本研究では、新幹線整備プロジェクトをCO₂排出量の観点から評価するために、航空機により輸送されている旅客が、既存あるいは新設の新幹線システムへ転換された場合のCO₂排出量の増減を把握することを目的とする。その際、輸送機関の新設、そして供用後の運航/運行を包括してとらえるために、Life Cycle Assessment(LCA)の考え方を導入する。輸送量による違いを分析するために感度分析を実施するとともに、各都道府県を発着地とするOD間ごとに、実際の距離と輸送量データを当てはめて推計を行い、CO₂排出の面で優位となる輸送機関を見出す。

なお、以上の分析を厳密に行うためには、膨大なデータや綿密なシナリオ設定を必要とするが、本研究ではそれが不可能であったことから、概略的なデータや仮定に基づく分析を行っている。しかし、航空路線の運航を取りやめたことによる排出減少分では新幹線インフラの新設による排出増分を相殺できない場合があるという仮説の検証は、概略的な仮定の下でも可能であると考ええる。

2. 地域間高速旅客輸送機関に LCA を適用する際に考慮すべき点

飛行/走行起源CO₂排出量の全国平均値を、交通システムのCO₂排出量を比較する際の定量的根拠として一般的に用いるのは、前述のとおり問題がある。そこで本研究では、表-1に示す各輸送機関の特徴を考慮に入れたCO₂排出量推計を行う。

本研究では、まず両システムのライフサイクル環境負荷を単純比較する。対象とするのは、インフラ、機体/車両とその飛行/走行である。次に、新幹線の新規整備によって航空路線の運航が削減され、新幹線へ旅客転換が図られることについて評価する。そのため、日本の航空・新幹線網の現状を出発点として、各代替案の実施に伴うCO₂排出量への追加的な影響を分析する。この場合、新幹線は走行量が増加すると車両・インフラを追加しなければならないため、その分を評価する必要がある。一方、航空路線が廃止に至った場合については、機体および空港等インフラが短期的に減少するわけではないと考え、これらを評価対象として取り上げる必要はないとする。よって、新幹線についてはインフラの新規建設および車両走行分を評価対象範囲と設定し、既に存在するインフラおよび機体に関しては評価対象として取り上げない(図-2)。なお、インフラ(空港)・機体起源分を入れたとしても、値が無視できるほど小さいことが後に示される。

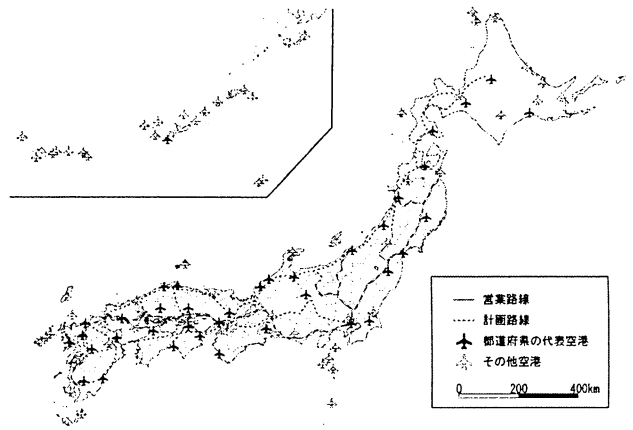


図-1 日本の空港と新幹線路線(2007年)

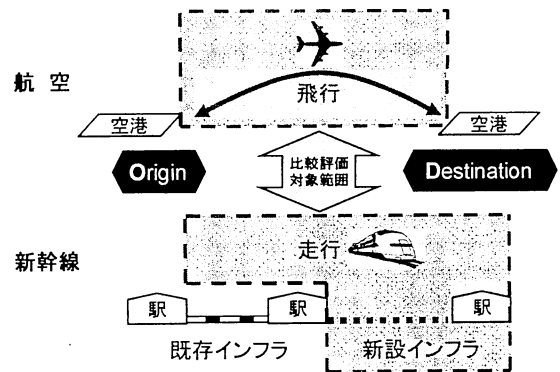


図-2 比較評価対象範囲の設定(ハッチをかけた部分)

表-1 航空と新幹線のCO₂排出量推計に影響すると考えられる特徴

航空	新幹線
・OD間にインフラがない →建設や維持管理を伴わない ・OD間を直線的に運航できる ・長距離になるほど飛行kmあたりの排出量が小さくなる	・OD間にインフラ整備が必要 →需要量の少ない区間では1人あたりに配分されるインフラ起源排出量が大きくなる ・地理的要因等により、OD間を直線的に結べない →走行距離やインフラ建設距離がその分長くなる

3. 分析方法

(1) LC-CO₂推計に用いたデータ設定

a) 航空

①インフラ

空港建設起源CO₂は中部国際空港建設工事記録より算出する。滑走路・誘導路(ライフタイム20年)の舗装の資材・施工とエプロン(ライフタイム10年)の舗装の資材・施工(掘削、埋め戻し)を評価対象とする。中部国際空港の平成18年の発着回数53,450[発着/年]と、1便あたりの平

均人km99,313[人km/便]から、空港建設のインフラを輸送人kmあたりに換算したものを用いる。

②機体

本研究では定員500人のB-777機を仮定する。実際は、需要の小さい路線ではより小型の飛行機が使われているので、過大推計になると考えられる。炭素繊維協会³⁾のLCA結果(搭乗率65%の航空機B-767の素材製造：0.25[g-CO₂/人km]、組立：1.34[g-CO₂/人km])を用いる。

③飛行

式(1)を用いて、飛行起源CO₂排出量を推計する。

$$Q_a = F(x) \cdot x \cdot N_a \quad (1)$$

ここで、 Q_a ：飛行起源CO₂排出量[t-CO₂/日]、 $F(x)$ ：飛行1kmあたりCO₂排出量[t-CO₂/(便km)]、 x ：区間距離[km]、 N_a ：便数[便/日]。

$F(x)$ は次の方法を用いて推計する。航空機は、燃料消費により機体重量が軽減することや、上昇時におけるエネルギー消費が大きいことから、長距離になるほど飛行kmあたり排出量は小さくなる。このことが考慮できるように、IPCCガイドライン⁴⁾では、ジェット機についてはLTO(Land and Take Off：離着陸)サイクル部分と巡航部分を区分して環境負荷を算定することが望ましいとされている。本研究では実際のジェット燃料消費量のデータを用いて、運航区間距離に応じたCO₂排出量原単位を推計し利用する。区間距離に応じた飛行1kmあたりのCO₂排出量のデータ(B-777)を図-3に示す。ここで、区間距離は実際の飛行距離を用いている。また、ジェット燃料油消費量からCO₂排出量に変換するために式(2)を用いる。

$$y = J \cdot \alpha \cdot e \quad (2)$$

ここで、 y ：CO₂排出量[t-CO₂]、 J ：ジェット燃料消費量[kl]、 α ：kl-TOE換算係数=0.8767[TOE/kl]、 e ：1TOEあたりCO₂排出量=2.789[t-CO₂/TOE](3EID原単位データファイル2000)。図-3のデータから、区間距離を説明変数とする飛行1kmあたりCO₂排出量の回帰式(3)を得る。

$$F(x) = 1561 \ln(x) / x + 21.0 \quad (3)$$

ここで、 $F(x)$ ：飛行1kmあたりCO₂排出量[t-CO₂/(便km)]、 x ：区間距離[km]。

b) 新幹線

①インフラ

鉄道総合技術研究所⁵⁾の原単位を利用する。本体構造物については、高架橋(7,550[t-CO₂/km])とトンネル(4,160[t-CO₂/km])の割合が半分ずつと仮定する。付帯構造物については、駅を50km毎に設置する(駅付帯設備分：1,500[t-CO₂/駅])。軌道はバラスト軌道とする(507[t-CO₂/(複線km)])。

②車両

N700系を想定する。1編成あたり1,323座席である。辻

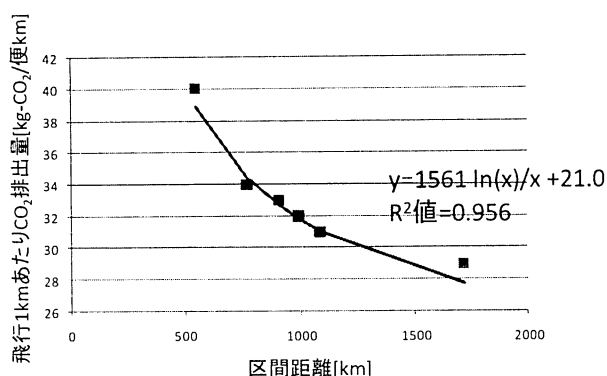


図-3 航空機(B-777)飛行によるCO₂排出量と区間距離の関係

村ら⁶⁾が算出している、製造段階：150[t-CO₂/両]、維持補修段階：95[t-CO₂/両/ライフタイム]を用いる。ライフタイムは20年とする。

③走行

式(4)から走行起源CO₂排出量を推計する。

$$Q_s = R \cdot x \cdot N_s \quad (4)$$

ここで、 Q_s ：走行起源CO₂排出量[t-CO₂/日]、 R ：走行1kmあたりCO₂排出量[t-CO₂/(本km)]、 x ：区間距離[km]、 N_s ：運行本数[本/日]。

走行1kmあたりCO₂排出量 R は東海旅客鉄道株式会社提供のデータを用いている。航空とは異なり、 x に関して一定値をとる。

区間距離 x は営業および建設中の路線については実際の値を用いる。計画段階の路線については、並行在来線の路線長を算出し代用する。

(2) 環境効率指標の定義

比較評価の指標として、機能単位あたりのCO₂排出量、すなわち「環境効率」を用いる。環境効率は一般に式(5)で表される。

$$\{\text{環境効率}\} = \frac{\{\text{機能}\}}{\{\text{生涯の環境負荷}\}} \quad (5)$$

機能単位として、まず輸送人kmを用いる。しかし、地域間旅客輸送の場合、輸送量とともに速度(=距離/所要時間)や快適性といったサービスレベルも重要である。それらを機能に考慮した環境効率指標として、本研究では式(6)の「サービス環境効率」を定義し用いる。

{地域間旅客輸送サービスの環境効率} =

$$\frac{\{\text{輸送人員}\} \times \{\text{生涯走行距離}\}}{\{\text{所要時間}\} \times \{\text{生涯の環境負荷}\}} \quad (6)$$

4. 東京－大阪間を対象とした分析

東京－大阪間を対象として、航空/新幹線システムのライフタイムを60年として評価期間に設定し、CO₂排出量を積み上げ法で推計する。区間距離は航空が450.6[km]、新幹線が515.4[km]である。航空の搭乗率を業界平均値である65%、新幹線の乗車率を実績値を参考に65%として運航/運行本数を決定する。

(1) LC-CO₂推計結果

航空については、便数を2002年4月の実績値、輸送密度(輸送人kmを区間距離で除した値)を22,478[人/日(往復)]として推計を行う。新幹線については平成17年度東海道新幹線の実績値(旅客輸送人員：144[百万人]、旅客輸送人km：438[億人km])より、平均輸送密度を233[千人km/km日(往復)]として推計を行う。ライフタイム60年のLC-CO₂推計結果を図-4に示す。航空に比べ新幹線が約9分の1となっている。いずれも飛行/走行起源の割合が大きい。特に航空に関しては、空港建設・機体製造起源は飛行起源と比べて微小であり、無視しても差し支えない程度であることが分かる。なお、東京－大阪間の実績では、新幹線の輸送密度は航空の約10倍であるため、機能単位をそろえた上での比較評価となっていない。

(2) 輸送密度の違いによる感度分析結果と考察

各機関の輸送人kmあたりCO₂を輸送密度ごとに推計した結果を図-5に示す。新幹線は、輸送密度が大きくなるほど、各乗客に配分されるインフラ起源CO₂が小さくなるため、両者の間にほぼ反比例の関係が成立する。一方、航空では途中区間のインフラが存在しないため、輸送密度に対してほぼ一定となる。なお、便数は自然数であるため、輸送密度が小さい領域では、のこぎり状に変化する形をとる。図-5から、約4,000[人/日]で値の大小が入れ替わることが分かる。

航空の実績値である22,478[人/日]で比較すると新幹線は航空の約4分の1である一方、新幹線の実績値である233[千人/日]で比較すると新幹線は航空の約8分の1である。輸送密度の違いにより比較結果が大きく異なることが分かる。

次に、サービス環境効率値を輸送密度ごとに推計した結果を図-6に示す。航空機の所要時間は新幹線の約2分の1であるため、航空機の優位性が高まり、両者の値が等しくなる点は約10,000[人/日]へシフトする。

人kmあたりLC-CO₂については、整備新幹線の区間で想定される輸送密度(4,000～32,000[人/日]程度)では、おおむね新幹線が優位となっており、サービス環境効率値については輸送密度が少ない場合に航空が優位となる。

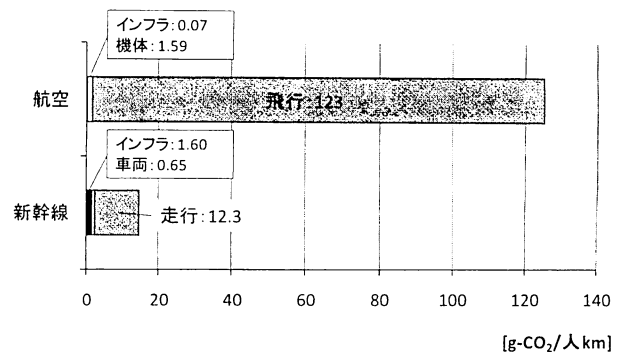


図4 航空と新幹線の人 km あたり LC-CO₂(東京－大阪間)

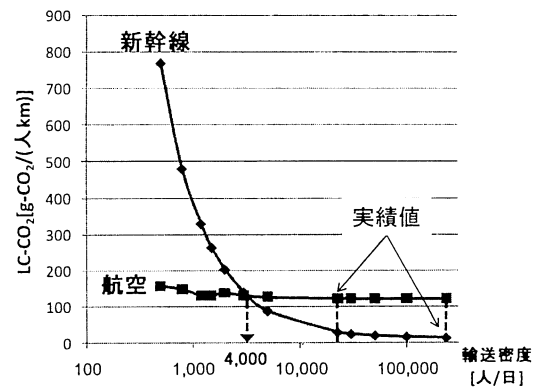


図5 人 km あたり LC-CO₂と輸送密度との関係(東京－大阪間)

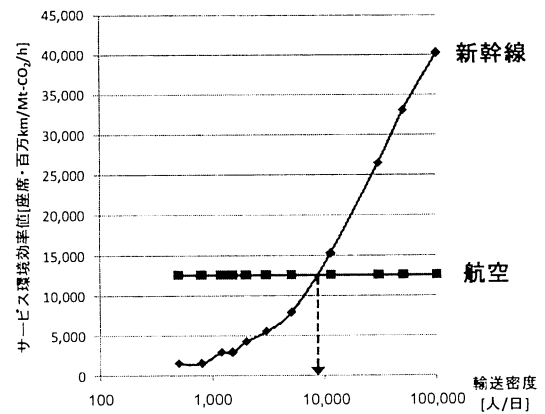


図6 サービス環境効率値と輸送密度との関係(東京－大阪間)

5. 各都道府県間を対象とした分析

次に、新幹線整備による既存航空路線からの利用転換に伴うCO₂削減可能性を分析する。そこで、2005(平成17)年時点で航空路線が存在する各都道府県間航空ODを対象に、距離と輸送人員のデータを用いて各モードのCO₂排出量を推計する。

平成17年度旅客地域流動調査では、全国の旅客輸送量

北陸・九州北部と東京とのODについては、現在の航空旅客輸送量を新幹線に転換した方が、人kmあたりLC-CO₂やサービス環境効率の観点からは優位であることが示唆される。

6. 実質所要時間を用いたサービス環境効率推計

(1) 実質所要時間の考え方

航空と新幹線(鉄道)の機関分担率をみると、一般的には距離が長くなるほど航空の分担率は増えていく。ただし、飛行時間と走行時間のみを比較すれば航空の方が所要時間が短いにもかかわらず、鉄道の分担率の方が高い場合がある。これは、航空は飛行以外の待ち時間や空港へのアクセス・イグレスなどに時間がかかることが原因である。

そこで本研究では、これらの要素を含んだ「実質所要時間」を定義し、サービス環境効率値の推計に用いることを試みる。これは、実際に飛行以外にかかる時間を求めるのではない。航空と鉄道の分担率が同じになる距離において、航空と新幹線の実質所要時間が等しくなると考えるのである。図-7は、東海道・山陽新幹線沿線について、東京(羽田)からの実際の路線の所要時間と距離との関係である。これをベースに鉄道と航空の分担率がほぼ同じになる600kmの距離の地点で、新幹線の所要時間

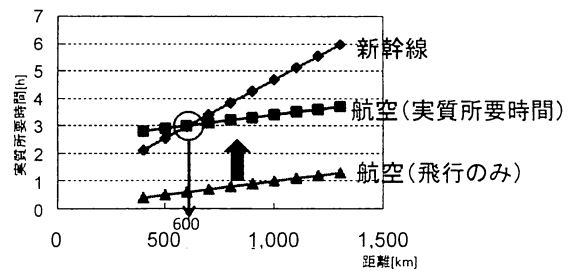


図-7 実質所要時間の算定

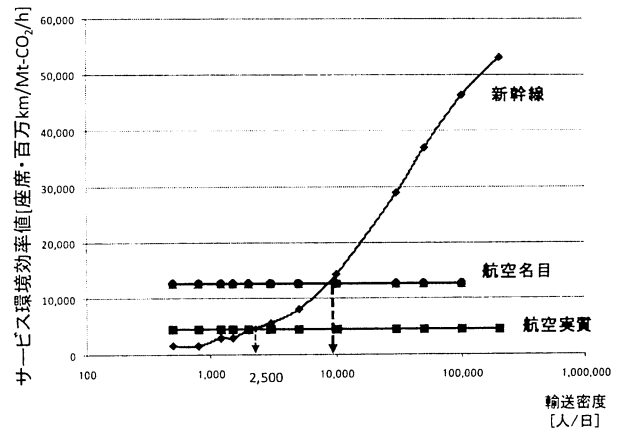


図-8 サービス環境効率値と輸送密度との関係(東京-大阪間)

表-3 各都道府県間ODの人kmあたりLC-CO₂(左下)・サービス環境効率値(右上)比較結果(航空:実質所要時間)

環境効率 LC-CO ₂	道北	道央	道南	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島	東京	新潟	富山	石川	長野	愛知	大阪	兵庫	鳥取	島根	岡山	広島	山口	徳島	香川	愛媛	高知	福岡	佐賀	長崎	熊本	大分	宮崎	鹿児島
道北		S													S	S					S		S										A
道央	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	A	S				S		A	S
道南	S																																
青森	S																																
岩手	S																	S	S														S
宮城	S																																
秋田	S																																
山形	S																																
福島	S																																
東京	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
新潟	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
富山	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
石川	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
長野	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
愛知	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
大阪	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
兵庫	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
鳥取	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
島根	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
岡山	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
広島	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
山口	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
徳島	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
香川	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
愛媛	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
高知	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
福岡	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
佐賀	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
長崎	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
熊本	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
大分	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
宮崎	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								
鹿児島	S	S	S	S	S	S	S	S	S																								

3時間、航空の実質所要時間3時間となるように、航空の所要時間線をシフトさせる。これを航空の実質所要時間とする。このシフト分から、航空は飛行以外に約2.5時間余分にかかることと捉えられていることになる。

(2) 東京－大阪間を対象とした推計結果

図-8 に、東京－大阪間を想定した、航空(実質所要時間を使用)と新幹線のサービス環境効率値の輸送密度による感度分析結果を示す。実質所要時間でのサービス環境効率値は、名目所要時間の場合と比較して小さくなり、分岐点は輸送密度約 2,500[人/日]となる。

(3) 都道府県間を対象とした推計結果

航空(実質所要時間を使用)と新幹線の人 km あたり CO₂ とサービス環境効率比較結果を表-3 に示す。左下半分の CO₂ 比較は表-3 と全く同様となる。これと右上半分のサービス環境効率比較を比べると、人 km あたり CO₂ で優位な OD とサービス環境効率で優位な OD が偶然にもほぼ同じになることがわかる。これは、航空と新幹線の実質所要時間がほぼ同じになる OD ペアが多くなるためである。

7. 結論

本研究では、日本における運輸部門の地球温暖化防止策の1つとして、航空路線を削減し、新幹線輸送に転換させることの有効性について、LCAを導入して検証を行う方法を提案し、概略的な推計を試みた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 東京－大阪間の距離を想定し、輸送密度に応じた航空と新幹線の人kmあたりLC-CO₂およびサービス環境効率値を推計したところ、新幹線が実際に存在する区間および整備新幹線の区間で想定される程度の輸送量では、新幹線が優位である。
- 2) 都道府県間の実際の航空輸送量データを用いて運輸によるCO₂排出量を推計するとともに、その輸送を新幹線によって代替する場合に追加的に生じるLC-CO₂を推計し比較した結果、輸送量が少なく、新幹線インフラの新規整備を伴うOD間で航空が優位となる傾向がみられる。
- 3) LC-CO₂比較では新幹線優位なODでも、サービス環

境効率比較では航空が優位となる場合がある。

- 4) サービス環境効率の所要時間について、航空の待ち時間やアクセス・イグレス時間等に起因する抵抗を組み込んだ「実質所要時間」を用いた場合、多くの区間で新幹線が優位となり、LC-CO₂比較と近い結果が得られる。ただし、本研究で定義した「実質所要時間」については、その妥当性が十分検討された段階ではないことから、使用にあたっては注意が必要である。

謝辞：本研究は財団法人運輸政策研究機構からの受託研究(交通の外部性と気候変動に関する分析)の一部として実施したものである。また、東海旅客鉄道株式会社および定期航空協会からデータ提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Norman Fujisaki : US Aviation, Demand, Capacity and Climate Change-Can it all be fixed in time?, International Symposium proceedings of “Climate Change and Transport Strategy”, p.19,2007.
- 2) H.Kato, N.Shibahara, M.Osada, Y.Hayashi: A life cycle assessment for evaluating environmental impacts of inter-regional high-speed mass transit projects, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.6, pp.3211-3224, 2005.
- 3) 炭素繊維協会：炭素繊維活用による環境改善効果の定量化，入手先<http://www.jemai.or.jp/lcaforum/seminar/pdf/lca090128_3.pdf>，p.11.
- 4) IPCC-NGGIP : Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories: Reference Manual (Volume 3), INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: National Greenhouse Gas Inventories Programme, 入手先<<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>>，参照 2008-4-27.
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道総研報告，2002.
- 6) 辻村太郎，宮内瞳，永友貴史，橋本淳：新幹線電車の LCA ケーススタディと環境効率，平成 10 年鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.601-604，1998.