

都市間交通ネットワークの脆弱性評価指標 の比較検討

相沢 圭俊¹・金子 雄一郎²

¹学生会員 日本大学大学院 理工学研究科博士前期課程土木工学専攻 (〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)

²正会員 日本大学准教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)

E-mail: kaneko@civil.cst.nihon-u.ac.jp

本研究は、都市間交通ネットワークの脆弱性を評価する複数の指標を比較検討したものである。具体的には、既往研究で提案されている一般化費用、アクセシビリティ指標、ログサム変数の3つの評価指標の特徴を整理した上で、都市間交通ネットワークの一部が途絶するケースを設定し、昨年の中日本大震災後の状況等を参考にしつつこれらの3つの指標の有効性を検証した。

Key Words : *Inter-city transportation, Vulnerability analysis*

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災は、鉄道、道路等の交通基盤施設に多大な影響を及ぼした。特に輸送量の大きい東北新幹線が約1ヶ月間運休したため、首都圏と東北圏間の移動は大きく阻害された。

一方で、航空や高速バスの増便あるいは臨時便が設定されたことで、首都圏と東北圏間の移動をある程度確保できたことが報告されている。このことから、災害が発生し、いずれかの交通ネットワークが利用不能となった場合においても、交通ネットワーク全体としての機能が完全に喪失しないように、代替性を確保することが重要であると考えられる。

このような代替性の確保には、途絶した際の影響が大きい脆弱な部分を把握することも重要となる。脆弱な交通ネットワークを把握し、そのネットワークの代替性を重点的に確保することで、震災時に脆弱な交通ネットワークが途絶した際の影響や被害を軽減することが可能となるからである。そのためには、交通ネットワークの脆弱性を評価し、把握する必要があると考えられる。

そこで本研究では、東日本大震災時の事例を参考に、都市間の交通ネットワークの脆弱性を評価する評価指標を検討することを目的とする。なお、ここでの脆弱性とは、災害やテロのように発生する確率は低いが、発生した際の影響が大きい事象について取り扱うことを意味している。そのため、確率的な観点から交通ネットワークの評価を行おうとする信頼性とは違い、交

通ネットワークを確定的に途絶させた際の影響を評価することに主眼を置いている。

2. 既往研究の整理

震災時の都市間交通ネットワークへの影響や、ネットワークの脆弱性に着目した研究はいくつか存在する。例えば高橋ら¹⁾は、地震の発生によって全国の交通ネットワークが確率的に損壊すると仮定し、日本全国にランダムに地震を発生させるシミュレーションを行っている。そして、地震発生シミュレーションの結果より、ネットワークを構成するリンクの被害状況と、全国規模の旅客流動が被る影響の分析を行っている。

また、黒田ら²⁾は、大地震発生後の旅行者の行動を経路選択行動モデルにより表現し、鉄道ネットワークの途絶が中・長距離の旅客流動に与える影響を、OD交通量の減少という指標を用いて表現している。さらに、鉄道ネットワークの途絶により発生するOD交通量の減少を、臨時便も含めた航空輸送によってどの程度まで補うことが可能であるかの検討も行っている。

谷口ら³⁾は、あらかじめ新幹線が途絶する箇所を確定的に決めておき、新幹線が途絶した際に生じる潜在需要全体をすべて航空旅客への負荷になると仮想することで、新幹線途絶による影響を定量的に示している。具体的には、新幹線途絶による旅行の取りやめや、自動車利用に転じたトリップもすべて航空旅客としてカウントすることにより、航空旅客数という共通の脆弱

性指標を作成し、途絶の影響の大きさを簡便に比較することを可能としている。

これらの既往研究は、震災時の都市間交通ネットワークのあり方を検討する上で有益な情報を提供するものであるが、対象交通機関に高速バスが含まれていない。東日本大震災時には、途絶した東北新幹線の代替手段として輸送力増強に寄与した実績があることから、高速バスの利用も考慮する必要性があるといえる^{注1)}。

一方、交通ネットワークの脆弱性評価手法に関する既往研究として、Michael et al.⁴⁾は、道路ネットワークの脆弱性評価手法について整理しており、ネットワークが途絶した際の一般化費用の変化や Hansen のアクセシビリティ指標の変化を脆弱性指標として用いることが可能であることを示している。さらに、オーストラリアの高速道路の特定の箇所を途絶させ、それらの脆弱性指標を用いて脆弱性を評価している。

Anthony et al.⁵⁾は、脆弱性評価手法として、複数の選択肢における最大効用の期待値であるログサム変数を用いる方法を提案し、テストネットワークを対象に、特定のリンクが途絶した際の平常時と途絶時のログサム変数値の変化を示し、脆弱性の評価を行えることを示している。

これらの既往研究では、複数の交通モードの利用を想定した脆弱性評価は行われていないが、前述した通り、東北新幹線が途絶した東日本大震災においては、航空や高速バスといった代替交通機関によって、都市間の移動をある程度確保することができたと報告されている。そのため、複数の交通モードによるネットワークの多重性も考慮した脆弱性評価を行うことが必要であると考えられる。

以上を踏まえ本研究では、東日本大震災時の事例を参考に、既往研究で提案されている一般化費用、アクセシビリティ指標、ログサム変数の3つの脆弱性指標を用いて交通ネットワークの脆弱性を評価し、各々の指標の特徴について比較検討を行うことを目的とする。なお、脆弱性評価の対象となる都市間交通ネットワークについては、航空・新幹線・高速バスの3つの公共交通機関を対象とした。

3. 各評価手法の概要

(1) 一般化費用の変化⁴⁾ (指標 1)

特定のリンクが途絶した際の2地点間の最小一般化費用の変化分と、流動量の積を脆弱性指標としたものであり、式(1)のように表現される。

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} v_{ijrs} \quad (1)$$

ここで、

V_{rs} : リンク e_{rs} が途絶した場合に低下する利便性

d_{ij} : ノード i から j への交通量

v_{ijrs} : リンク e_{rs} が途絶した際のノード i から j への最小一般化費用の変化量

である。

なお、一般化費用の計算に用いる時間価値については、「長期需要予測に関する調査報告書」⁶⁾の地域間旅客交通機関分担予測モデルより、171円/分とした。

(2) アクセシビリティ指標⁴⁾ (指標 2)

交通計画において一般に活用されているアクセシビリティ指標を脆弱性指標としたものであり、式(2)のように表現される。

$$A_i = \sum_j B_j f(c_{ij}) \quad (2)$$

ここで、

A_i : 都市 i から都市 j へのアクセシビリティ指標

B_j : 都市 j (東北圏の各都市) の人口

$f(c_{ij})$: 都市 i と都市 j 間の最小所要時間の逆数

である。

なお、Michael らの論文においては、 $f(c_{ij})$ は都市間の距離の逆数を用いて計算されているが、本研究では都市間の最小所要時間の逆数を用いて計算を行う。

(3) ログサム変数⁵⁾ (指標 3)

この評価手法は、一般的にアクセシビリティ指標としても利用されているログサム変数を脆弱性評価に用いた手法である。ここでログサム変数とは、交通機関選択モデルにロジットモデルを用いた場合、複数の選択肢における最大効用の期待値として表せる指標であり、式(3)、(4)のように表現される。なお、本研究では、ロジットモデルの効用関数及びパラメータについては、Kato et al.⁷⁾における検討結果を用いる。

$$\Lambda = \ln \sum_m \exp(U_m) \quad (3)$$

$$U_{ijm} = \sum_k \beta_k \cdot X_{km} \quad (4)$$

ここで、

Λ : ログサム変数の値

U_m : 交通機関 m による ij 間の効用

X_{1m} : 総所要時間 (分) (共通変数)

X_{2m} : 総費用 (円) (共通変数)

X_{3m} : 乗換回数 (回) (鉄道)

X_{4m} : 1/頻度 (回) (鉄道)

β_k : パラメータ

である。

4. 評価対象及び前提条件

本研究の脆弱性評価における評価対象と前提条件について、以下の通り設定する。

- 東京都と東北圏（青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島の各県）間の旅客流動を評価対象とし、各都県庁を出発地・到着地とする。
- 新幹線、航空、高速バスの各公共交通で構成される交通ネットワークの脆弱性を評価する。
- 表-2 に示した 3 つのケースを設定し、各ケースにおける都県庁間の脆弱性指標値を算出する。なお、東日本大震災時に運航された航空の臨時便（羽田～岩手花巻、羽田～仙台、羽田～福島）については、ケース 2 で考慮している注2)。
- 各交通機関の運賃や所要時間は、国土交通省の総合交通分析システム（NITAS）の経路探索機能を用いて求め、指標 1 では一般化費用を、指標 2、指標 3 では所要時間が最小となる経路を探索する。なお、時間価値については、文献 7) を参考に設定する。
- 震災時に設定された航空の臨時便の運賃や所要時間（アクセス、イグレス、搭乗時間等）については、NITAS に設定されていないため、航空会社や空港会社の HP 等の情報を参考に独自に設定する。なお、空港での待ち時間については、一律 45 分として設定する。ここで、各県庁から最寄りの空港までの所要時間及び費用を表-3 に示す。この値はすべて、各空港会社と各県庁の HP の情報を参考に設定したものである。
- 評価にあたって必要となる交通需要量は表-4 の通り、第 4 回（2005 年）全国幹線旅客純流動調

表-1 各パラメータの値⁷⁾

	総所要時間(分)	総費用(円)	乗換回数(回)	1/頻度(回)
鉄道	-0.2001 (-150.3)	-0.000155 (-53.8)	-0.2386 (-26.8)	-2.2575 (-30.0)
高速バス			-	-
航空			0.0000246 (-11.8)	-

(括弧内:t値)

表-2 各ケースの想定状況

ケース	東北 新幹線	航空 (定期便)	航空 (臨時便)	高速 バス
ケース0(平常時)	○	○	×	○
ケース1(震災時)	×	○	×	○
ケース2(震災時)	×	○	○	○

表-3 各県庁から最寄りの空港までの所要時間と費用

県庁	青森	岩手	宮城	宮城(山形空港経由)	秋田	山形	福島
最寄空港	青森空港	岩手花巻空港	仙台空港	山形空港→宮城	秋田空港	山形空港	福島空港
最寄空港からの 所要時間 (分)	33	53	40	105	45	50	100
最寄空港からの 費用(円)	560	1,260	820	2,280	890	1,450	1,900

表-4 2005 年の東京から各地域への流動量 (人/日)

	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
東京	1,815	2,623	7,171	1,505	2,326	5,943

注：流動量は、鉄道・航空・高速バスの利用者の合計である。

表-5 2005 年の各都道府県の人口 (人)

青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
1,436,657	1,385,041	2,360,218	1,145,501	1,216,181	2,091,319

査の代表交通機関別需要量を、都市の人口は表-5 の通り、平成 17 年国勢調査の結果を用いる。

- 以上を踏まえた東京都から各県庁へと移動する際の平常時と震災時（東北新幹線全線途絶時）の交通機関別 LOS は表-6 の通りである。

表-6 東京と各地域間の交通機関別 LOS

モード・出発地	到着地	青森(青森空港)		岩手(いわて花巻空港)		宮城(仙台空港)		秋田(秋田空港)		山形(山形空港)		福島(福島空港)	
		平常時	災害時	平常時	災害時	平常時	災害時	平常時	災害時	平常時	災害時	平常時	災害時
鉄道 (東京駅より)	所要時間(分)	190	-	148	-	124	-	238	-	165	-	97	-
	費用 ^{注1)} (円)	16,370	-	14,370	-	10,590	-	16,810	-	11,030	-	8,700	-
	往復便数(本)	29	-	58	-	97	-	27	-	26	-	57	-
航空 (羽田空港より)	所要時間(分)	80	80	-	70	-	60	70	70	60	60	-	45
	費用 ^{注2)} (円)	30,270	不明	-	不明	-	18,100	24,600	24,600	18,370	18,370	-	不明
	往復便数 ^{注3)} (本)	12	12	-	8	-	10	7	7	2	18	-	10
高速バス (東京都内より)	所要時間(分)	620	不明	450	不明	327	不明	510	不明	340	不明	260	不明
	費用 ^{注4)} (円)	8,500	不明	7,800	不明	4,500	不明	9,450	不明	6,300	不明	4,500	不明
	往復便数(本)	4	不明	3	6	10	15	1	不明	3	不明	1	不明

注 1：新幹線及び特急の片道の運賃と自由席料金の合計である。

注 2：片道の正規運賃である

注 3：航空の臨時便の本数は、最大の時点のもの。

注 4：片道料金である。

5. 脆弱性の評価結果

(1) 一般化費用の変化 (指標 1)

図-1 は、平常時 (ケース 0) と震災時 (ケース 1, 2) での最小一般化費用の差 V_{rs} を用いた脆弱性指標の値を示したものである。この脆弱性指標の値が大きいほど、震災によって一般化費用が増大していることを表す (各ケースの最小一般化費用については、付録の付表-1 を参照)。

ここで、青森、秋田の脆弱性指標値がケース 1, 2 で 0 となっているが、これは震災時にも航空の定期便が運航されたためである。また、岩手、宮城ではケース 2 が大幅に減少しているが、これは航空の臨時便が設定されたことによる。

一方で、同様に今回の震災時に航空の臨時便が設定された福島については、ケース 1, 2 のいずれのケースにおいても、選択された交通機関は高速バスとなり、脆弱性指標値も不変であった。これは表-6 に示した通り、航空を利用した場合は、福島空港から福島県庁へと移動する際のアクセス利便性が低いためであると考えられる。

(2) Hansen のアクセシビリティ指標 (指標 2)

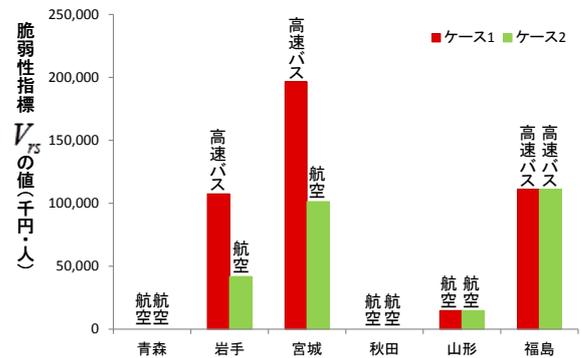
図-2 は、ケース毎のアクセシビリティ指標 A_i を用いた脆弱性指標の値を示したものである。この脆弱性指標の値が大きいほど、目的地までのアクセシビリティが高いことを表す (各ケースの最小所要時間については付録の付表-2 を参照)。

ここで、ケース 0 の宮城、福島で脆弱性指標値が高いが、これは平常時では東北新幹線を利用することが可能であることと、新幹線を利用する際の交通利便性が高いためである。一方、ケース 1 の岩手、宮城、福島では、脆弱性指標値が大幅に減少しているが、これは震災時に東北新幹線が運休したためである。このことから、平常時に東北新幹線を利用した際の交通利便性が高い地域ほど、震災時には脆弱性が大きくなる傾向があると考えられる。

また、ケース 2 の岩手、宮城では、ケース 0 の東北新幹線利用時には及ばないものの、航空の臨時便の設定により脆弱性指標値が、ある程度回復していることが分かる。

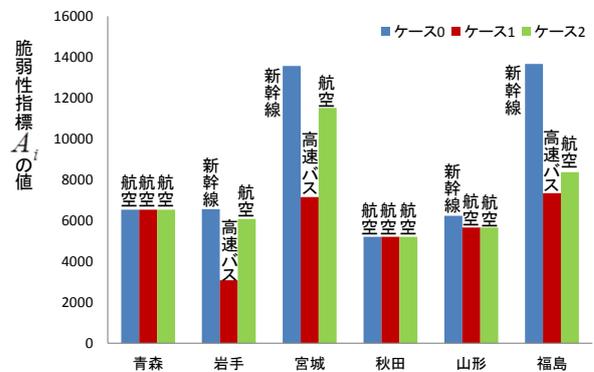
また、図-3 は平常時 (ケース 0) と震災時 (ケース 1, ケース 2) を比較した場合の脆弱性指標値の減少率を示したものであり、この減少率が大きいほど震災時の脆弱性が大きいことを表している。岩手、宮城のケース 2 では、ケース 1 と比較して減少率が 30% 以上であり、脆弱性が大幅に改善されていることが分かる。

以上のことから、岩手、宮城の 2 県における航空の臨時便の利用は、東北新幹線が利用できない場合の代替手段として、有効であったと考えられる。



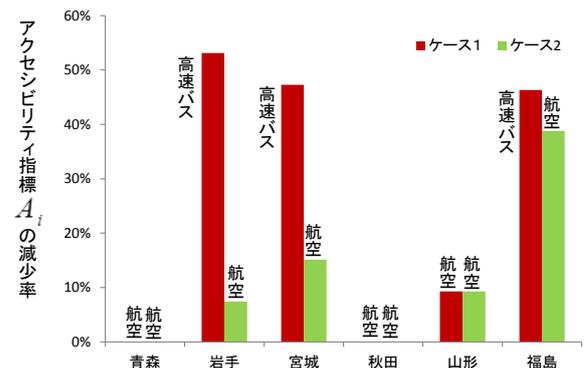
注：図中の交通機関は一般化費用が最小であるものを示す。

図-1 一般化費用の変化を用いた脆弱性指標値



注：図中の交通機関は所要時間が最小であるものを示す。

図-2 アクセシビリティ指標を用いた脆弱性指標値



注：図中の交通機関は所要時間が最小であるものを示す。

図-3 ケース 0 と比較した際の A_i の減少率

(3) ログサム変数 (指標 3)

図-4 はケース毎のログサム変数 Λ を用いた脆弱性指標の値を示したものであり、図-5 はケース 0 と比較した場合の脆弱性指標値の減少率を示したものである。

ここで、ケース 1 の岩手、宮城、福島で脆弱性指標値が大幅に減少し (図-4)、減少率も約 80%~100%と

他地域と比べて高くなっているが(図-5)、これは東北新幹線が運休したことによるものである。また、同地域ではケース2での航空の臨時便設定によって、脆弱性指標値が増加しており、減少率もケース1と比較して改善されていることが分かる。特に岩手・宮城においては、減少率がケース1と比較して、約80%~90%改善されており、指標2と同様に、航空の臨時便による改善効果が大いといえる。

なお、青森、秋田でも震災時(ケース1)に脆弱性指標値が若干減少しているが、これも東北新幹線の運休によるものである。この点について、指標1及び指標2ではこれら2県の値は不変であったが、これは一般化費用や所要時間が最小となる単一の交通機関しか考慮できないためである。これに対して、指標3では、モデルの性質上、複数の交通機関の効用を考慮できるためである。

また、図-6は、東京～宮城間の脆弱性指標値を表-7に示した復旧状況に応じて計算した結果を示したものである。ここでは、段階2、3では、羽田～山形間の航空臨時便を利用して宮城へ向かうことができると想定した。これより、仙台空港の再開による臨時便の設定によって、脆弱性が大きく改善していることが分かる。

6. 各評価指標の考察

以上の検討結果より、一般化費用の変化(指標1)とアクセシビリティ指標(指標2)は、評価に際して新たなモデルの構築やパラメータ推定を行う必要がないため、評価を簡便に行うことができる。しかし、どちらの指標も、運行頻度や容量制約等の輸送力を考慮することができないという問題がある。

一方、ログサム変数(指標3)では、評価に必要なデータが多く、モデルの構築やパラメータ推定などを行う必要もあるため、計算が複雑になるという問題があるが、一般化費用やアクセシビリティを用いた指標よりも、多くの効用を評価に反映させることができるため、より適切に評価をすることができる。また、ログサム変数については、他の2つの指標とは違い、複数の交通機関の効用を考慮することができるという大きな特徴がある。

さらに、計算結果もログサム変数を用いた計算結果が、他の評価指標よりも実際に則した結果となっていることから、脆弱性評価にはログサム変数を用いることの妥当性は高いと考えられる。

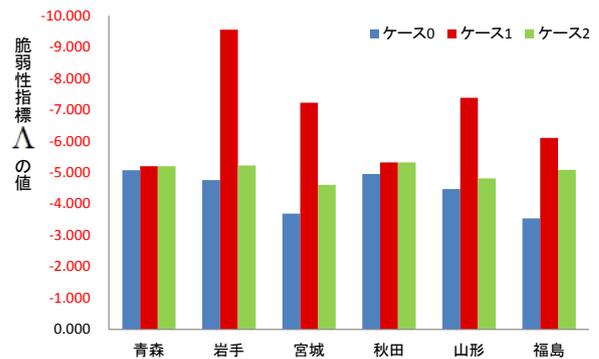


図-4 ログサム変数を用いた脆弱性指標値

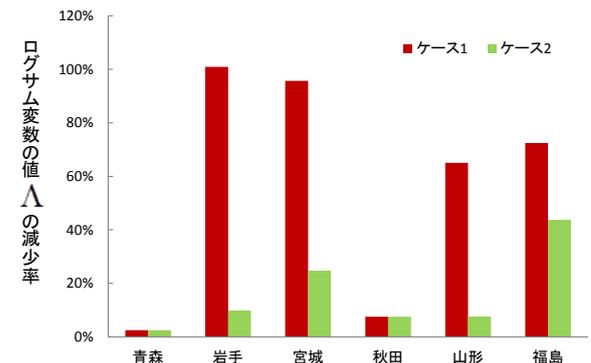


図-5 ケース0と比較した際のΔの減少率

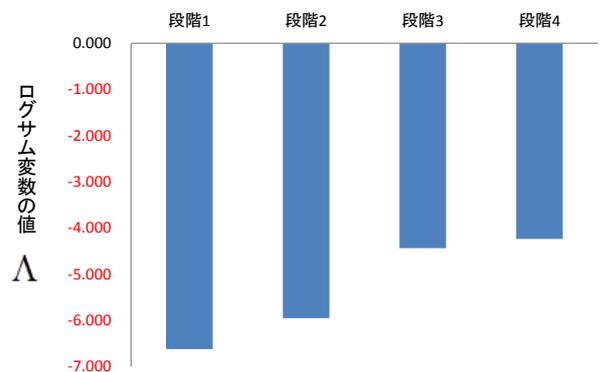


図-6 各段階での宮城の脆弱性指標値 Δ

表-7 東京～宮城間の交通機関の復旧状況

	東北 新幹線	航空臨時便 (山形空港)	航空臨時便 (仙台空港)	高速バス
段階1	×	○	×	×
段階2	×	○	×	○
段階3	×	○	○	○
段階4	○	×	×	×

ただし、本研究のログサム変数を用いた評価指標について、本研究で用いたモデルで効用として考慮されるのは、費用、所要時間、鉄道の運行頻度と乗換回数

のみである。そのため、東日本大震災時に見られた以下のような交通機関の容量拡大が考慮できていない。

- ・ 航空の臨時便が設定され、機材の大型化の措置がとられた東京～青森間や、平常時と比較して1日当たり16便増便された東京～山形間の航空の効用。
- ・ 平常時と比較して最大447%の輸送力増強がなされた首都圏～岩手（盛岡）間的高速バスの効用。

今後、これらの効用を考慮することができるモデルへの改良が必要であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、東日本大震災時の事例を参考に、都市間の交通ネットワークの脆弱性を評価する指標を比較検討した結果、脆弱性指標にはログサム変数が適していると考えられる。今後の課題として、ログサム変数を用いて評価を行う際に、航空の機材大型化や運行頻度、バスの輸送力等を効用に考慮することのできる、モデルへと改良を行うことが挙げられる。

補注

- 1) 高速バスについては、3月16日以降、順次運行が再開された。東北自動車道は12日に応急復旧が完了し、14日には高速バスも緊急通行車両に認定され通行が許可されたが、各所で発生した燃料不足などのため運行再開が遅れる結果となった。再開後は可能な限りの需要に対応するため、続行便（1回の運行で複数台車両を使用）の増発などが行われ、震災前に対する輸送力は、首都圏～東京方面間で最大266%（首都圏～仙台間では415%、首都圏～盛岡間では447%）に達した。なお、この輸送力の増強は、各事業者において貸切バス車両を活用することなどによって実現している。
- 2) 航空については、3月13日以降、羽田と花巻、山形、福島各空港を結ぶ臨時便が就航し、各空港からの高速バスや連絡バスと合わせて、主要都市間の移動手段が確保された。このうち羽田～山形間は、定期便2便に加えて臨時便が最大18便（3月16日、往復計）設定された。また、東京～青森間や東京～秋田間などの定期便でも、機材の大型化が図られた。なお、花巻、山形、福島各空港では24時間運用化が行われ、輸送力の増強に寄与している。4月13日には、震災直後から閉鎖されていた仙台空港の民航機の就航が再開され、羽田、伊丹、新千歳便などが就航している（羽田便は東北新幹線の全線再開前日まで）。

付録

付表-1 各ケースの最小一般化費用と利用された交通モード

ケース0の時の最小一般化費用(円)						
	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
東京	69,130	49,596	40,522	63,790	50,198	34,837
手段	航空	鉄道	鉄道	航空	鉄道	鉄道
ケース1の時の最小一般化費用(円)						
	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
東京	69,130	90,567	67,929	63,790	56,555	53,535
手段	航空	高速バス	高速バス	航空	航空	高速バス
ケース2の時の最小一般化費用(円)						
	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
東京	69,130	65,528	54,655	63,790	56,555	53,535
手段	航空	航空	航空	航空	航空	高速バス

付表-2 各ケースの最小所要時間と利用された交通モード

ケース0での最小所要時間(分)						
	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
所要時間(分)	220	211	174	220	195	153
アクセシビリティ指標(人/分)	6530.259	6564.175	13564.47	5206.823	6236.826	13668.75
モード	航空	鉄道	鉄道	航空	鉄道	鉄道
ケース1での最小所要時間(分)						
	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
所要時間(分)	220	450	330	220	215	285
アクセシビリティ指標(人/分)	6530.259	3077.869	7152.176	5206.823	5656.656	7337.961
モード	航空	高速バス	高速バス	航空	航空	高速バス
ケース2での最小所要時間(分)						
	青森	岩手	宮城	秋田	山形	福島
所要時間(分)	220	228	205	220	215	250
アクセシビリティ指標(人/分)	6530.259	6074.741	11513.26	5206.823	5656.656	8365.276
モード	航空	航空	航空	航空	航空	航空

参考文献

- 1) 高橋清, 田中伸治, 家田仁, 村木康行: 全国交通ネットワークにおける地震発生のリスク及びびリンク交通量への影響評価, 土木計画学研究・論文集, Vol.15, pp.345-350, 1998.
- 2) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 正木智也, 長生武志: 兵庫県南部地震後における中・長距離旅客流動に関する分析, 土木計画学シンポジウム『阪神・淡路大震災に学ぶ—土木計画学からのアプローチ—』, pp.451-458, 1997.
- 3) 谷口守, 阿部宏史, 清水健夫: 潜在的な航空旅客負荷にみる新幹線途絶による影響の基礎的検討, 土木計画学研究・論文集, Vol.18 No.4, pp.661-666, 2001.
- 4) Michael A. P. Taylor, Somenahalli V. C. Sekhar, Glen M. D'Este: Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks, Networks and Spatial Economics, Vol.6, pp.267-291, 2006.
- 5) Anthony Chen, Chao Yang, Sirisak Kongsomsaksakul, Ming Lee: Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks, Networks and Spatial Economics, Vol.7, pp.241-256, 2007.
- 6) 財団法人運輸政策研究機構: 長期需要予測に関する調査報告書, 2001.
- 7) Kato Hironori et al.: Inter-Regional Travel Demand Analysis Using Integrated Model For Practical Travel Demand Forecast, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9, pp.239-254, 2011.