

Ebisu

日本研究

58 | 2021

2011～2021年：危機・断絶・新たなダイナミクス。3月11日の三重災害から10年

This translation is based on the following French article:

DOI: <https://doi.org/10.4000/ebisu.5683>

災害における交通のレジリエンス： 2011年3月11日の日本における地震と津波

レオ・マーシャル*、中村文彦**、吉田樹***、作田莉子****

Ebisu 58 | 2021 | p. 47-92

*. 横浜国立大学都市イノベーション研究院博士。

** . 横浜国立大学都市イノベーション研究院教授。

***. 福島大学経済経営学類准教授、Fukushima Future Center for Regional Revitalization (FURE)。

****. 横浜国立大学都市イノベーション研究院修士課程。

序論

現代社会はエネルギーインフラ、交通、電気通信への依存をますます強めている。日常生活に不可欠なこれらのサービスは、過去数十年の間に技術的に複雑化し、相互依存性を高め、高コスト化してきたことで、脆弱になり維持が困難となっている。この依存の増大は、予期せぬ事態において多大な人的・経済的損失を引き起こす可能性がある。交通システムは自然災害によって最も影響を受けることが多いにもかかわらず、被災地域の被災者の救助や、緊急対応および長期的な復旧活動の支援に不可欠であり続ける (Graham et al. 2007)。

日常的な頻繁な変動からまれな自然災害に至るまで、様々な擾乱に晒された際の交通システムの性能を研究するために、いくつかの概念が提案されてきた。中でもレジリエンスという用語が学術文献においてますます頻繁に登場するようになってきている。堅牢性、信頼性、生存能力、柔軟性といった他の概念と比較して、レジリエンスは、不可避な擾乱に対する性能の低下と回復に焦点を当てている。システムの設計においては、日常的な変動を考慮し「吸収」することで、その機能を維持しなければならない。地震やその他の大規模災害は、システムを必然的にその均衡状態から逸脱させる。計画された性能水準からの逸脱の振幅と持続期間の両方を効果的に縮減するシステムの能力が、レジリエンスの最も本質的な定義である。実際、レジリエンスは元来、材料の衝撃に対する耐性を指していたが、その後、システム、有機体、種、または構造がその環境の劣化を克服する能力へと定義が拡張された。まず生態系の文脈でレジリエンスと安定性の区別を確立する形で定義され (Holling 1973)、その後、組織 (Sheffi 2015)、経済 (Rose 2014)、社会科学 (Adger 2000)、サプライチェーン (Christopher 2004)、工学 (Hollnagel 2006) といった様々な分野に導入された。レジリエンスの概念は分野によって複数の解釈を受け入れるが、大半は、深刻な擾乱の後に構造を根本的に変化させながらシステムが初期状態に戻る能力という考え方を共有している (Hosseini 2016)。レジリエンスは交通工学において、特にここ数年、広く研究されてきた。これらの研究は、物理的ネットワークの本質的特性に特に焦点を当てているが、交通結節点やエネルギー供給経路、経済的・社会的影響のレジリエンスを測定するものは少ない (Reghezza-Zitt et al. 2015)。また、主要な交通拠点のレジリエンスをローカルまたは全国スケールで評価する手法が特に不足している。

日本は、戦後に発生した自然災害から得た教訓に基づき、多くの制度と法律を整備してきた。

救援物資の提供、避難所の管理、仮設住宅の建設といった緊急対応は、厚生労働省が管轄する災害救助法に基づいて実施される。公共インフラについては、以下の三つの法律に基づきそれぞれ復旧が行われる。

- ・国土交通省（MLIT）：災害により損壊した土木公共施設の復旧。
- ・農林水産省（MAFF）：農業、林業、漁業施設の復旧。
- ・文部科学省（MEXT）：学校施設の復旧。

大規模災害時には、地方自治体も特別な財政支援を受けることができる。しかし、大規模公共インフラの復旧プログラムは有効であるものの、1995年の阪神・淡路大震災を受けて1999年に設けられた被災者支援メカニズムは、個人の経済的・社会的回復に対して限定的な援助しか提供しないため、しばしば遅く不十分であると評価されている。

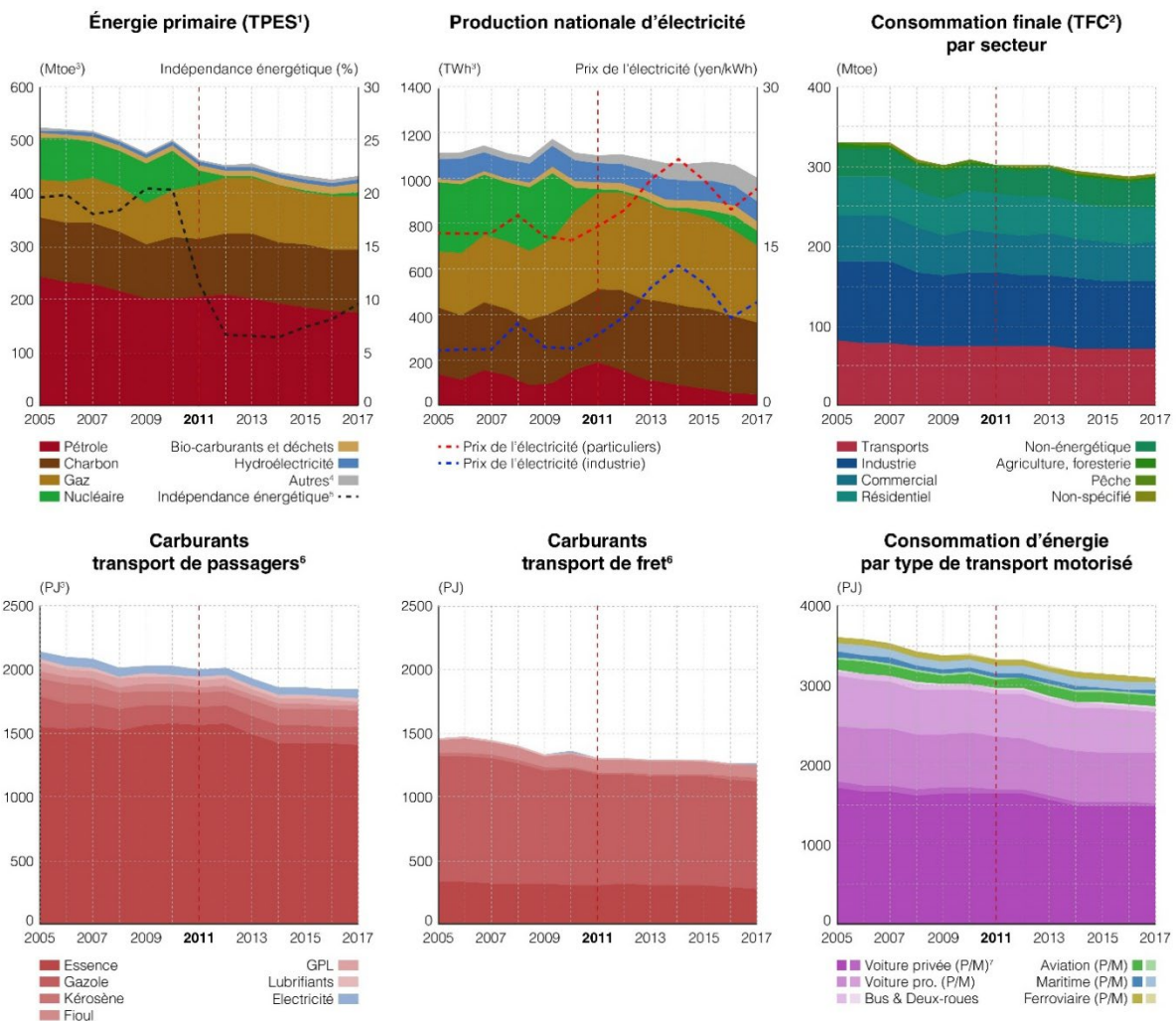
多数の犠牲者のほかにも、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震と津波の影響は、交通インフラにとって壊滅的であった。住民の生存に不可欠であり緊急対応に不可欠な多くのインフラが破壊されるか深刻な被害を受けた。被害を受けた地域は極めて広範囲であったため、緊急対応、後方支援、防災を担う機関は前例のない損害と資源不足に直面し、業務能力が大幅に低下し、場合によっては完全に停止した。橋梁や高架橋の崩壊、路面のひび割れ、地滑り、津波が運んだ瓦礫による道路の閉塞といった状況が重なり、数百の高速道路区間と国道区間が通行止めとなった。複数の県における極度の燃料不足と救助活動を円滑にするため、当局は直ちに国民に対し自家用車の使用を控えるよう要請した。東北新幹線の全面運転再開には49日を要し、一方、東北地方の在来線の運行再開には、場合によっては数か月から数年にわたる工事が必要であった。仙台空港や多くの港湾施設も深刻な被害を受け、電気通信は制限されるか途絶した。

エネルギーインフラと交通インフラのレジリエンス向上は数年前から議論されており、本稿は前例のない規模の災害状況の分析を通じてそれを検討するという独自のアプローチを提案する。第一部では、2011年3月11日の地震と津波による被害と影響の分析、緊急・移行・復旧の三段階にわたり各省庁が採用した対策の検討、および交通インフラのレジリエンスに関する過去の能力と獲得された能力の評価を行う。第二部では、災害がエネルギー供給に与えた影響を検討

する。第三部では、道路、鉄道、海上、航空の四つの交通ネットワークと電気通信ネットワークの状況を検討する。第四部では、日本列島における交通のレジリエンスに関する長期的な研究の方向性を提示し、短期的な破壊的災害と長期的なレジリエンスの対比を通じて得られた教訓を振り返る。

第一部 エネルギー問題

3月11日の地震と津波、そして福島原発事故は、日本列島におけるエネルギー論争を喚起し、「変革」「コミュニティ」「リーダーシップ」「脆弱性」「レジリエンス」といった用語を議論の中心に据えた（Samuels 2013）。市民にとってのエネルギーの認識は、日常の単なる利便性から、高度に複雑で、時に対立し、欠陥を抱え、偏りのあるシステムの一端を垣間見るものへと変化した。原子力は発電政策の変更をめぐる議論の中心であったが（Aoki et al. 2013）、この災害は、特に郊外部および農村部における自動車と石油への依存も浮き彫りにした。



1. Total Primary Energy Supply : Consommation totale d'énergie primaire, avant pertes et transformations
 2. Total Final Consumption : Consommation d'énergie finale, après pertes et transformations (TFC Japon, 2010 : 62,21 % TPES, 2017 : 67,77 % TPES)
 3. Tonne équivalent pétrole (1 Mtoe = 41.868 PJ = 11.630 TWh)
 4. Photovoltaïque, géothermie, éolien, biomasse, déchets municipaux, autres déchets
 5. Rapport entre production et consommation nationales d'énergie primaire
 6. Charbon et gaz naturel négligeables, non-représentés
 7. P = Passagers, M = Marchandises

【図 01 : 2011年3月11日の三重災害以降の日本のエネルギー状況の推移。出典：国際エネルギー

ギー機関、経済産業省。作成：Martial (2021)。】

第一部 1 節 石油製品の輸送

2010年、交通部門、特に道路・航空・海上輸送はほぼ全面的に石油のさまざまな形態（ガソリン、灯油、軽油、重油）に依存しており、日本の最終エネルギー消費の24.3%を占め、97%が石油製品で賄われていた。鉄道輸送のみが、日本ではほぼ完全に電化されており、電力生産のために複数のエネルギー形態を大規模に利用できる。したがって、石油インフラは旅客および貨物輸送の大部分にとって極めて重要である。

日本は自国の領域にわずかな石油資源しか持たず、輸入に依存している。そのため、公的・民間のさまざまな主体が、供給の突然の途絶に備えて重要な戦略的備蓄を保有している。しかし、人口減少と高齢化、産業の衰退、燃料の緩やかだが継続的な代替、およびより厳しいエネルギー効率目標により、日本の石油消費量は2005年以降一貫して減少している（Granier 2019）。また、天然ガスが一部の産業部門で石油に取って代わりつつあり、家庭・商業用暖房は徐々に電化が進んでいる。2011年の地震後の原子力発電所の停止により、日本は火力発電所での直接燃焼用に石炭と原油の輸入を増加させざるを得なくなり、設備利用率を引き上げた。

2011年3月11日の地震と津波は、深刻な石油不足を引き起こし、東北地方と関東地方の大部分において交通と物流に重大な影響を及ぼした。多くのガソリンスタンドの燃料枯渇により道路交通は困難を極めた。営業を続けるスタンドも強い需要に対して備蓄を厳しく配給せざるを得ず、長蛇の列が生じた。この状況は東北地方の各地で数週間にわたり続き、特に宮城県と岩手県では災害発生から3週間後も依然として危機的状況にあった。この燃料不足は多くの活動に深刻な影響を与えた。すなわち、救助活動や一部地域における数千人の避難民の大半の避難に重大な困難をもたらし、被災地への緊急物資の配送に大きな支障をきたし、多くの社会経済活動の低下ないし停止、物流機能の低下、産業・製造サプライチェーンの断絶を引き起こし、兆円規模の莫大な経済的損失をもたらした（Kajitani et al. 2013）。これは1970年代の石油危機以来、日本列島で最も深刻な供給不足であった。

石油不足の全体像を示すために公開された最初の情報は不十分であった。経済産業省（METI）はオンラインで対策・運営に関する情報を地震の1週間後ようやく公表し始めたが、METIも

石油連盟（PAJ）も、状況の定量的な全体把握を可能にする分析結果を公表しなかった。政府と石油業界はまず、不足の原因を被害を受けた製油所と港湾施設に帰した。被害を受けた東北の3つの製油所は、2011年当時、日産450万バレルの国内精製能力の10分の1を占めていた。しかし、製油所の標準的な設備利用率が約80%であるため、稼働を続けていた他の21の製油所の生産量を増やすことで国内精製能力は迅速に均衡を回復できるはずであったが、これらの製油所が関西地方や中国地方の遠隔地に位置していたため、関東・東北への輸送は困難であった。関東の他の3つの製油所も10日間操業を停止し、千葉の製油所では爆発が発生して6人が負傷した。METIとPAJからのこの情報不足は、実施された対策、その成果、不足が一部の地域で約1か月間続いた理由について、多くの疑問を残した。一部消費者による石油の買い占め・貯蔵という説は、事実の誤った解釈であるとして早期に退けられた（Akamatsu et al. 2016）。

その後の独立した研究により、東北地方への石油製品供給量が不十分であったことが明らかになった。北海道からの増強供給は、関東からの配送減少を完全には補えなかった。METIが発表した関西・中国地方など西日本からの大規模な輸送は、実際にはMETIの発表の10分の1に過ぎなかった。災害後の2週間、東北地方への輸送量は通常需要の約3分の1にとどまった。この間、東北では日本海側の港のみが稼働可能であった。太平洋側の被災地の港は3月23日ようやく部分的に稼働を再開し、最初のタンカーを受け入れて不足を緩和した。供給面では、災害の1週間後、秋田県と山形県（日本海側）の多くの市町村は60%以上の供給率を維持できたが（それでも災害直後の数日間よりは低下）、太平洋側にはほとんど燃料が届かなかった。2週間後には、日本海側の大部分の市町村で供給率が80%以上に回復したが、太平洋側では深刻な不足が続いた。3週間後、日本海側の需給がほぼ正常化した一方、太平洋側の一部市町村では供給率が40%未満にとどまり、災害から1か月後も燃料不足は解消されなかった（図03）。さらに、岩手県と宮城県は需要消失の80%を占め、地域経済の減速を反映していた。宮城県の一部市町村では、この需要消失は2010年3月と比較して消費量の半分に達した可能性がある。

この危機的状況は、現代の交通システムにおける石油の不可欠な性質を改めて想起させた。石油は社会経済活動を支える公益財であり、その短期的な供給停止は莫大な経済的損失をもたらす。実際、日本列島の他の地域からのガソリンの緊急輸送に要した費用は2~3億円と推定されたのに対し、経済的損失は1,500~2,000億円と推定された（Akamatsu et al. 2016）。この出来

事から得られた経験と知識は、東海、東南海、南海の各断層での新たな地震において同様の事態が繰り返されないよう、将来の災害に対する新たな予防策を策定するために十分に活用されるべきである。これらの断層は日本の最大都市圏に近接している。予防策には、石油製品供給施設の強化、備蓄の増大、地震時の国家支援体制の構築が含まれる。特定分野への緊急石油製品供給のための物流戦略のより強固な計画が望ましいと思われる。多くの企業は、災害時の事業継続計画（BCP）を精緻化し、縮退モードでの運営を可能にしてきた。

第一部 2 節 電力供給

2011年、電力は日本の旅客輸送のエネルギー需要の3.1%を占めるに過ぎず、そのほぼ全量が鉄道で消費されていた。電力消費量は増加しているものの、日本の大規模なモータリゼーション以前の1965年の7.2%と比較すると、その割合は低下している。しかし、この低い割合は日本における鉄道の重要性を反映していない。沿岸部や観光路線のごくわずかな例外を除いてほぼ完全に電化され、エネルギー効率に優れた鉄道は、年間旅客輸送量の3分の1を占めている。太平洋沿岸の多くの火力発電所と全国の原子力発電所の停止により、日本の電力網は大規模停電のリスクにさらされた。首都圏では、東京電力（TEPCO）は地震後に52GW（地震前日）に対して31GWしか供給できなくなり、需要は41GWであったため、菅直人首相は4,700万人（人口の37%）に影響する計画停電を承認した。全国的には発電能力への影響は比較的小さく、282GWから243GWへの低下にとどまったが、10の電力会社間の連系が限られていること、そしてとりわけ北海道・東北・東京圏の50Hzと国内他地域の60Hzという電力周波数の差異のため、西日本から十分な電力を送ることは不可能であった。この周波数差は、19世紀末に日本の電力網が関東ではドイツ製、関西ではアメリカ製の設備を用いて発展した遺産である。長野県と静岡県に位置する周波数変換装置の容量はわずか1GWで、災害後に必要となった送電量の10分の1に満たなかった。

計画停電は、混乱状態に至りかねない突然の停電を避けるために実施された。東京電力はサービスエリアを配電所の位置に基づきまず5つ、次いで25の区域に分割し、各区域で順番に数時間の停電を実施しながら、需給バランスの最適な予測に努めた。停電は最大3時間に及ぶことがあり、一部の鉄道路線は数日間運休した。この混乱した状況により多くの人々が鉄道内で足止めされたが、停電は事前に告知されていた。なお、この種の計画停電は、1974年の第一次石油危機以来初めてのことであった。

より長期的には、日本のエネルギー生産に占める化石燃料の割合は、原子力発電のほぼ全面停止を主因として、2010年の81%から2016年には89%に上昇した。日本は現在、世界第3位の石炭輸入国、第2位の天然ガス輸入国であり、このことがエネルギー安全保障、経済、環境に大きな影響を及ぼしている。2010年に既に控えめな20%であったエネルギー自給率は、2012年には6.7%にまで急落し、2017年まで10%未満にとどまり、日本をOECD諸国の中で下から2番

目に位置づけた。化石燃料の輸入増加は電力料金の急騰をも引き起こし、2014年以降低下傾向にあるものの、2017年時点でも依然として著しく高い水準にある。

電力・ガス取引監視等委員会（EGC）と電力広域的運営推進機関（OCCTO）は、2015年に第5次電力市場改革の一環としてMETIによって設立された。その役割は、電力配電網の整備を促進し、広域的な電力利用を確保することで、通常時および緊急時における電力の需給バランス維持機能を全国的に強化することである。例えば、2027年までに周波数変換設備の容量を3倍にすること、また東京と東北間の電力融通容量を2倍にすることが計画されている。

METIはエネルギー基本計画を数回改定し、再生可能エネルギー22～24%のエネルギーミックス、化石燃料への依存度を56%に削減した上での自給率40%、電力消費量の17%削減を、すべて2030年までに達成するという野心を掲げた。これらの公約を裏づけるため、政府はエネルギー・環境分野における技術的・社会的イノベーションの推進に関して産学と連携しており、特にNEST 2050（エネルギー・環境イノベーション戦略）を推進している。日本政府は、代替的かつ潜在的にクリーンなエネルギー担体である水素の生産・配送インフラの構築について頻繁に発信している。多様な生産手段により供給リスクが低減される可能性があり、特に交通分野を中心に日本のエネルギー需要の脱炭素化の機会でもある。蓄電池と異なり、水素は大規模かつ長期の貯蔵が可能であり、断続的なエネルギー源をより有意義なものにする。したがって、差し迫る石油ピークや気候変動といった現代の課題に照らし、日本列島におけるエネルギー転換の最も実現可能な選択肢の一つとなりうる。

第二部 交通

第二部 1 節 道路ネットワーク

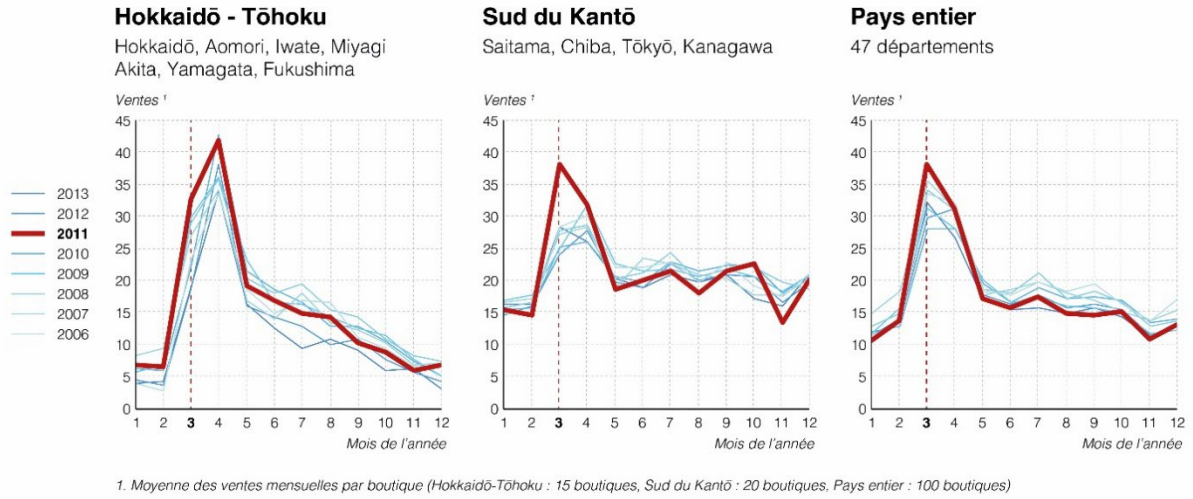
道路ネットワークは甚大な被害を受けた。有料道路、国道、県道の 540 区間が閉鎖された。40 万台以上の車両、4,198 の道路、116 の橋梁が破壊または損傷し、207 件の地滑りと 45 件の堤防決壊が記録され、洪水と瓦礫の道路上への流入を引き起こし、ネットワークへの影響を著しく増大させた。東京と仙台を結ぶ国道 6 号線および仙台と青森を太平洋岸経由で結ぶ国道 45 号線は特に大きな被害を受けた。前者の被害は福島県において多くの住民の孤立を招き、後者は当時未完成であった三陸自動車道の重要な代替ルートであった。津波により 1 万 6,000 人が道路網から孤立し、特に岩手県船越半島と宮城県南三陸町で顕著であった。宮城県牡鹿半島は、国道 398 号線の部分的破壊により孤立した。地震発生 4 時間後、救急車両の通行を可能な限り迅速に確保するため、「くしの歯作戦」と名付けられた道路啓開作業が開始された（図 01）。この最優先任務は、自衛隊、警察、および各県・市町村の組織によって共同で実施された。その名は、まず東北自動車道（いくつかの区間が損傷していたにもかかわらず）と、同じく東北を内陸部において南北に縦断する国道 4 号線からなる主要回廊を確保し、第二段階で、この回廊から太平洋岸に至る 12 本の道路を 24 時間以内に、さらに 3 本を追加の 2 日間で啓開したことに由来する。第三かつ最終段階は、八戸から仙台までの国道 45 号線（わずか 1 週間で 97% の区間が通行可能に）、次いで仙台からいわきまでの国道 6 号線の啓開であった。国道 6 号線の広野・南相馬間の 50km 超の区間は、度重なる地滑りと洪水のため通行止めとなった。啓開と水の退去の後も、20km の区間は福島第一原子力発電所の放射性降下物のため通行止めが続いた。同発電所はこの道路区間の中程に位置している。2011 年 4 月 22 日以降、認可車両のみが通行可能となり、全車両への完全再開は 2014 年 9 月 15 日であった。さらに数キロメートル南方の久之浜には、2017 年 2 月 26 日に内陸への迂回路が開通し、災害時の閉鎖リスクを低減し緊急車両の通行を改善した。

東日本高速道路株式会社（NEXCO 東日本）管轄の多くの高速道路も地震直後に救急車両のため閉鎖され、その後段階的に一般に再開された。東北自動車道は 2011 年 3 月 24 日に再開した。地域の高速道路は、被災地の産業、観光、住民の避難・帰還を支援するため、2012 年 3 月 31 日まで被災者に対し無料で開放された。高速道路と国道は 2012 年末までに、一部の避難区域と国

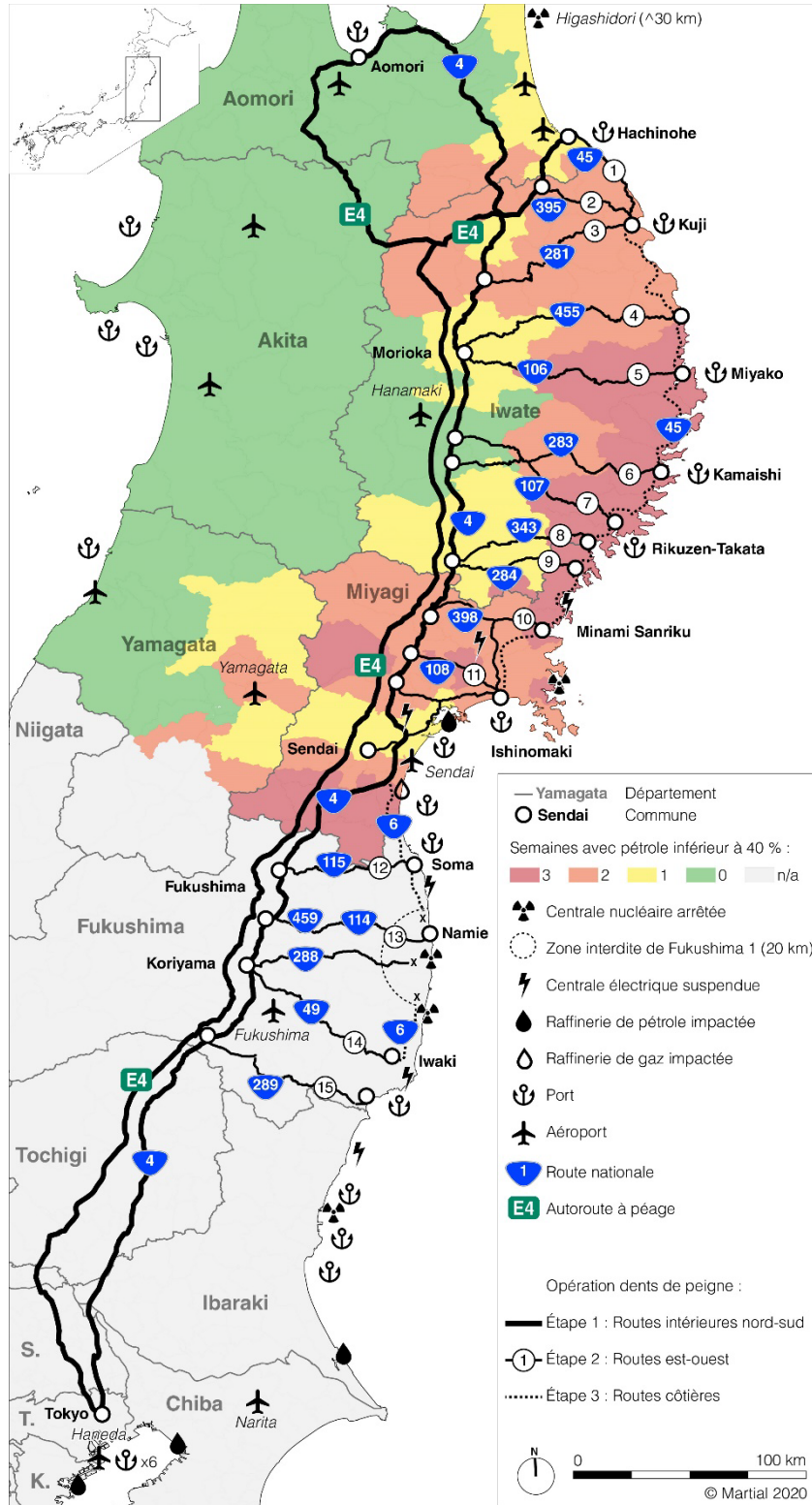
道 45 号線の一部橋梁を除き全面復旧した。東京都心部の被害は軽微であったが、首都高速のある高架橋は大きな損傷を受け、複数の区間が数週間にわたり通行止めとなった。被災地における道路網の復旧は、1995年の神戸の道路網全面復旧に18か月以上を要したのと比較して、はるかに迅速かつ効果的であった。

首都圏における鉄道の運休は、首都高速を含む道路網全体に深刻な渋滞を引き起こし、道路ネットワークの脆弱性を浮き彫りにした。極めて多くの鉄道乗客が歩行者となったことで、交差点での交通が非常に困難となり、収集されたデータによると大規模なグリッドロック（交差するすべての道路を車両が塞ぎ、全方向の交通を完全に停止させる状態）が発生した（Kiyota et al. 2014）。最初の渋滞は皇居周辺に発生し、都市圏の外環道路まで広がるまで悪化した。通常は約20か所のところ、首都内で145の交差点の閉塞・ボトルネックが確認された。一部の地域では翌日の午後4時まで渋滞が記録された。災害当日の夕方、500万人以上が帰宅困難に陥った。

この混乱した状況は、多くの人々にとって自転車を唯一の信頼できる移動手段に変えた。多くの通勤者は、しばしば30キロメートルを超える距離を自転車で帰宅するほかなかった（Takada et al. 2012）。南関東全域で自転車の売上が急増し（図02）、大半の自転車店は深夜まで、在庫が完全に尽きるまで営業を続けた。大手自転車販売店あさひは、地震後の1か月間で地域の売上が2倍になったと発表した。山形県などの農村県でも災害後の数日間に売上の増加が記録された。しかし、農村部の低い都市密度では通勤距離が自転車には長すぎるが多く、この急増は一時的なものにとどまった。1990年代以降、都市部ではさまざまな個人的・環境的・経済的理由から自転車通勤者が増加していたが、3月11日の災害は多くの人々に個人の移動手段としての自転車の信頼性を再認識させた。自転車は、交通システムが疲弊し、道路状態が劣悪で、燃料が慢性的に不足していた戦後の日本において、既に何百万人もの人々にとって貴重な存在であった。自転車活用推進研究会会長の小林成基は、地震が自転車利用者数だけでなく日本の自転車文化そのものにも大きな影響を与えたと述べた。被災地については、ボランティア団体やメーカーが避難民を支援するために自転車を送った。台湾のメーカーGIANTは、「震災復興支援品」として限定版自転車1,000台を送った。これらの高品質で頑丈なマウンテンバイクは、車両が通行できなくなった道路上で地元の緊急組織やボランティアが使用するために特別に設計された。



【図 02：2006 年から 2013 年までの月別自転車販売数。出典：自転車産業振興協会、Japan Bicycle Promotion Institute。作成：Martial (2021) 。】



【図 03：2011年3月11日以降の道路・航空・海上交通の状況。出典：Akamatsu et al. 2016、PAJ、MLIT。作成：Martial (2021)。】

第二部 2 節 鉄道輸送

東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）および他の鉄道事業者は、地震直後にすべてのサービスを停止した。駅員、運転士、車掌は、津波警報が発令されたすべての地域で乗客を避難させ、乗客に死者は出なかった（Hayashi 2012）。

新幹線は在来線とは異なる専用軌道上を運行する。JR 東日本が運行する東北新幹線は、大宮駅から岩手沼宮内駅までの約500kmにわたり、約1,200か所で重大な被害を受けた。具体的には、電柱の傾斜ないし倒壊、架線の断裂、高架橋の柱のせん断損傷などである。全面的なサービス再開にはわずか49日しか要しなかった。これは、1995年の神戸での地震後の山陽新幹線の復旧に81日を要し、特に8つの橋の崩壊があったことと比較される。2004年の新潟県中越地震では複数のトンネルが損傷し、上越新幹線が2か月以上にわたり運休した。この地震では、現在に至るまで唯一の新幹線脱線事故が発生したが、死傷者はなかった。新幹線およびその他の高速鉄道は、脱線時に折れ曲がらないように設計されており、鉄道事故における最も致命的な現象である車両の圧縮を防いでいる。

2011年3月11日の地震動の強度は前例のないものであったにもかかわらず、東北新幹線は3つの本質的要因により迅速に復旧できた。第一は、過去数十年にわたり段階的に整備された地震早期警報システムである。1982年以降、宮城県沿岸に設置された地震計が地震波を12~15秒前に検知し、フルスピードで走行中の新幹線に警報を発した。この早期検知により、1998年に設置された警報システムの作動、2006年に設置された給電遮断機能の同時起動、そしてすべての運行中車両の非常ブレーキの作動が可能となり、重大な被害と脱線が回避された。第二の要因は、前年の神戸での地震を受けて1996年に開始された大規模な耐震設計と改修のキャンペーンである。2011年の地震はより強力であったにもかかわらず、被害はより軽微で、致命的なものはなかった。1995年のような柱の転倒も、2004年のようなトンネルの崩壊もなかった。第三の本質的要因は、徹底的なインフラ復旧作業であった。通信設備、機材、重機を備えた緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE）の数千人の技術者が昼夜を問わず広範な復旧作業を行ったほか、約8,500人がJR 東日本の従業員、グループ企業、パートナー企業を含む鉄道網の復旧に毎日参加した。民間部門は緊急対応と復旧作業における重要性を実証した。この協力は、薄く不規則な燃料供給の中でも実現された。他の鉄道事業者も現場検査・復旧作業への人員派遣、保守車両

から検査機器、燃料供給支援に至る物的支援を提供した。これら官民のさまざまな協力は、民間部門の能力が低下する中で不可欠である。インフラ建設に対する国家予算の削減により建設会社の数は近年減少しており、日本はこの点である程度の成熟に達している。民間部門は重機の独占的保有や新たな技術者の雇用がますます困難になっている。しかし復旧作業は中断なく続けられ、東北新幹線は2011年4月29日にサービスを再開した。なお、他のJRグループ各社の管轄地域では被害がなかったにもかかわらず、被災地域で生産される部品の調達に困難を来し、特にJR西日本の一部列車で運休が生じた。

在来線も深刻な被害を受け、地震のみで1,730か所、地震と津波を合わせて4,400か所の被害が記録された（図04）。36の路線区間で被害が確認され、再び電柱の傾斜・倒壊、バラスト沈下を含む軌道の不整、駅プラットフォームの破壊などが見られた。津波被害を受けた7つの在来線区間では、約23の駅舎、60kmの線路、101か所の橋脚が流失または埋没した。4月7日以降の断続的な余震は被害を悪化させ、既に復旧していた路線にも新たな運休を引き起こしたが、これらは数日以内に再開された。

明瞭さのため、太平洋沿岸の北部から南部にかけて総括的な状況を示す。最北で被害を受けた路線はJR東日本の大湊線であった。三陸鉄道（第三セクター）が運営する北リアス線と南リアス線は、2011年の地震前はJR山田線によって宮古～釜石間で分断されていたが、最も深刻な被害を受けた路線の一つであり（Makoto et al. 2011）、300か所以上で駅舎や橋梁に重大な被害があった。津波は約6kmの線路を押し流し、サービスは新しいディーゼル車両により2014年4月によろやく再開された。しかし両路線は、旧山田線の損傷区間によって依然として分断されていた。旧山田線は元来、内陸部を通り盛岡と宮古を結ぶ区間と、三陸海岸沿いに宮古から釜石を結ぶ区間の2区間で構成されていた。前者は1か月の運休にとどまったが、後者は甚大な被害を受け、21km超の線路が浸水し、13駅中4駅、線路の10分の1、6つの橋梁、10の盛土が破壊された（Kazama & Noda 2012）。JRは2012年に、損傷区間を廃止し、その用地をバス高速輸送システム（BRT）の交通路として使用することを提案した。この決定は2015年に撤回され、区間は将来的に三陸鉄道に移管することを目標に再建されることとなった。この区間の再開には合計8年を要し、2019年に開通して北リアス線と南リアス線が接続され、リアス線が創設された。久慈駅から盛岡駅まで163kmを約4時間強で直通できるようになったが、各駅停車の低速

列車のみの運行である。この路線は2019年の台風19号（ハギビス）の通過後に再び運休となった。

支援・復旧メカニズムは半世紀以上にわたって個別に設定されてきたが、全体的な視点は欠けており、通常は民間所有のインフラを対象としていない。三陸鉄道が地方自治体と民間部門の共同所有であることが、困難の原因となっている。路線の復旧には180億円という莫大な費用を要し、人口減少が続く農村地域で既に経営難を抱えていた会社にとって巨大な負担であった。国は当初、既存の法律の枠内で復旧費用の25%を負担することを提案したが、残りの大部分を民間会社を支援する地方自治体に委ねた。これは地方自治体の裁量を大幅に縮小し、損傷したインフラの利用改善を不可能にする。この硬直性はまた、次の災害に備えた日常的なリスク管理への定常的な投資を抑制しかねず、さらには地方自治体に大規模プロジェクトの実施のために「災害を待つ」姿勢さえ促しかねない。中央政府は、維持管理や予防のプロジェクトよりも復興プロジェクトに対してより高い補助金を交付する傾向があるからである。

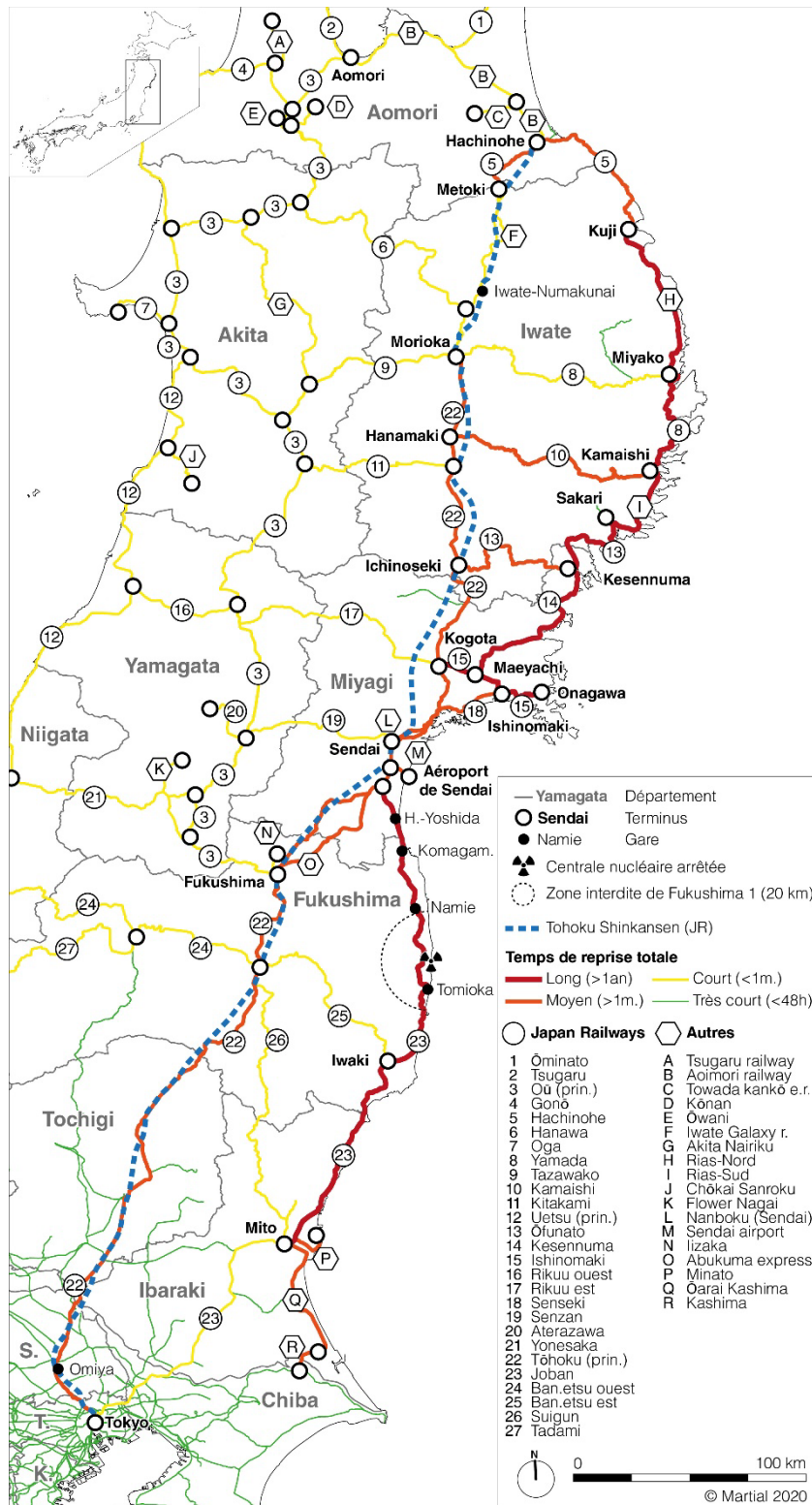
南リアス線の終点である盛駅では大船渡線への乗り換えが可能であったが、その沿岸部は深刻な被害を受けた。一ノ関・気仙沼間の西側62kmの区間は早期に運行再開したが、気仙沼・盛間の43.7kmの区間は、JR東日本がその廃止を正式に決定し、用地を「気仙沼線・大船渡線BRT」の路線として活用することとなった後、閉鎖されたままとなった。同様に、気仙沼線も南気仙沼や志津川などで駅舎が破壊されるなどの甚大な被害のため、鉄道復旧費用が禁止的に高額であったことから、一部が廃止されBRTに置き換えられた。現在、旧路線72.8kmのうち、鉄道として運行されているのは前谷地・柳津間の17.5kmの区間のみである。旧終点の気仙沼駅には現在、大船渡線でのみアクセス可能である。大船渡線と気仙沼線は、完全に再建も移設もされなかった唯一の路線であり、合計99kmの軌道の大部分がアスファルト道路またはBRT専用路線に転用された。

さらに南方では、常磐線の沿岸部が最も被害の大きかった路線の一つであった。大部分の区間は数日から数週間、あるいは数か月以内に再開したが、津波による最も深刻な被害は浜吉田・駒ヶ嶺間に集中しており、後者の駅は福島第一原子力発電所から50km弱の位置にある。これらの被害により、市の復興計画の一環として路線の一部がより内陸側に移設されることとなった（Fujimoto et al. 2018）。常磐線は原子力発電所のすぐ近くも通過しており、双葉駅と大野駅は

10km以内、線路は5km以内まで接近している。浪江・竜田間の最後の不通区間20.8kmの運行再開は2015年に決定され、2019年までに全線を再開する目標が設定された。2017年10月21日の富岡駅の再開を経て、2020年3月14日に全線が復旧し、これは地震による日本列島における鉄道復旧工事の完了を意味した（表01参照）。この区間の復旧条件は、放射能汚染、避難区域の長期存続と継続的な見直し、多数の避難者、汚染土壌の貯蔵・処分の必要性のため極めて複雑であり、地元の公共交通インフラ、建設資材・労働力の確保に深刻な影響を及ぼした。

Ligne	Date de reprise totale (1)	Terminus	(5)	(6)
Japan Railways				
Tōhoku Shinkansen 東北新幹線	29 avril 2011	Tokyo - Hachinohe	593,1	49
1 Ōminato 大湊線	17 mars 2011	Noheji - Ōminato	58,4	6
2 Tsugaru 津軽線	15 mars 2011 (10 avril 2011)	Aomori - Mimmaya	55,8	7
3 Oū (principale) 奥羽本線	31 mars 2011 (11 avril 2011)	Fukushima - Aomori	486,3	24
4 Gonō 五能線	19 mars 2011 (10 avril 2011)	H.-Noshiro - Kawabe	147,2	11
5 Hachinohe 八戸線	17 mars 2012	Hachinohe - Kuji	64,9	372
6 Hanawa 花輪線	19 mars 2011 (11 avril 2011)	Kōma - Ōdate	106,9	12
7 Oga 男鹿線	15 mars 2011	Oiwake - Oga	26,6	4
8 Yamada 山田線	23 mars 2019 (2)	Morioka - Miyako	102,1	2934
9 Tazawako 田沢湖線	18 mars 2011 (9 avril 2011)	Morioka - Ōmagari	75,6	10
10 Kamaishi 釜石線	6 avril 2011 (12 avril 2011)	Hanamaki - Kamaishi	90,2	31
11 Kitakami 北上線	20 mars 2011 (11 avril 2011)	Kitakami - Yokote	61,6	13
12 Uetsu (principale) 羽越本線	14 mars 2011 (9 avril 2011)	Niitsu - Akita	274,4	5
13 Ōfunato 大船渡線	1er avril 2011 (18 avril 2011) (3)	Ichinoseki - Sakari	105,7	-
14 Kesenuma 気仙沼線	29 avril 2011 (4)	Maeyachi - Kesenuma	72,8	-
15 Ishinomaki 石巻線	21 mars 2015	Kogota - Onagawa	44,9	1471
16 Rikuu ouest 陸羽西線	1 ^{er} avril 2011 (9 avril 2011)	Shinjō - Amarume	43,0	23
17 Rikuu est 陸羽東線	3 avril 2011 (16 avril 2011)	Kogata - Shinjō	94,4	32
18 Senseki 仙石線	30 mai 2015	Aoba-dōri - Ishinomaki	50,8	1541
19 Senzan 仙山線	23 avril 2011	Sendai - Uzen-Chitose	58,0	12
20 Aterazawa 左沢線	28 mars 2011 (9 avril 2011)	K.-Yamagata - Aterazawa	24,3	19
21 Yonesaka 米坂線	20 mars 2011	Yonezawa - Sakamachi	90,7	9
22 Tōhoku (principale) 東北本線	21 avril 2011	Tokyo - Morioka	575,7	41
23 Joban 常磐線	14 mars 2020	Nippori - Iwanuma	351,0	3291
24 Ban.etsu ouest 磐越西線	26 mars 2011	Kōriyama - Niitsu	175,6	15
25 Ban.etsu est 磐越東線	15 avril 2011	Iwaki - Kōriyama	85,6	35
26 Suigun 水郡線	11 avril 2011	Mito - Asaka-Nagamori	147,0	31
27 Tadami 只見線	14 avril 2011	Aizu-Wakamatsu - Koide	135,2	34
Autres				
A Tsugaru railway 津軽鉄道線	13 mars 2011	Tsugaru-G. - Tsugaru-N.	20,7	2
B Aoimori railway 青森鉄道線	17 mars 2011 (10 avril 2011)	Metoki-Aomori	121,9	9
C Towada kankō e. r. line 十和田観光電鉄線	13 mars 2011	Misawa - Towadashi	14,7	2
D Kōnan 弘南線	14 mars 2011	Hirosaki - Kuroishi	16,8	3
E Ōwani 大鰐線	14 mars 2011	Ōwani - Chūō-Hirosaki	13,9	3
F Iwate Galaxy railway いわて銀河鉄道線	17 mars 2011 (10 avril 2011)	Morioka - Metoki	82,0	9
G Akita Nairiku 秋田内陸線	22 mars 2011	Takanosu - Kakunodate	94,2	11
H Kita-Rias 北リアス線	23 mars 2019 (2)	Kuji - Miyako	71,0	2934
I Minami-Rias 南リアス線	23 mars 2019 (2)	Kamaishi-Sakari	36,6	2934
J Chōkai Sanroku 鳥海山ろく線	13 mars 2011	Ugo-Honjō - Yashima	23,0	2
K Flower Nagai フラワー長井線	20 mars 2011 (9 avril 2011)	Akayu - Arato	30,5	11
L Nanboku (métro de Sendai) 南北線	29 avril 2011	Izumi-Chūō - Tomizawa	14,8	49
M Sendai airport 仙台空港線	1 ^{er} octobre 2011	Natori - Aéroport	7,1	204
N Iizaka 飯坂線	13 mars 2011	Fukushima - Iizaka onsen	9,2	2
O Abukuma express 阿武隈急行線	16 mai 2011	Fukushima - Tsukinoki	54,9	66
P Minato 湊線	23 juillet 2011	Katsuta-Ajigaura	14,3	134
Q Ōarai Kashima 大洗鹿島線	12 juillet 2011	Mito - Kashima-Jingū	53,0	123
R Kashima 鹿島線	16 avril 2011	Katori - Kashima-Jingū	17,4	36
1 : Après les répliques du 7 avril 2011 si remise en service totale avant 2 : Sous la forme de la nouvelle ligne Rias 3 : Sauf tronçon Kesenuma-Sakari 4 : Sauf tronçon Yanaizu-Kesenuma 5 : Longueur de la ligne (km) 6 : Nombre de journées impactées				

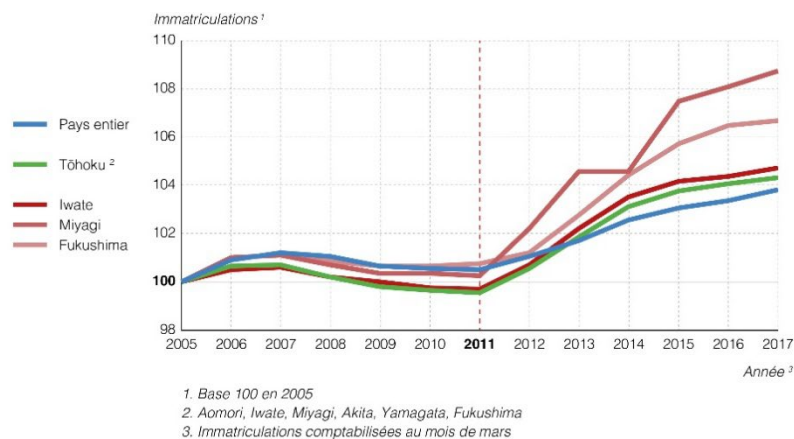
【表 01 : 2011 年 3 月 11 日の地震により影響を受けた鉄道路線 (旅客) の詳細。出典 : 「よみがえれ! みちのくの鉄道 : 東日本大震災からの復興の軌跡」。作成 : Martial (2021) 。



【図 04：2011年3月11日の地震により影響を受けた鉄道路線（旅客）。出典：「よみがえれ！みちのくの鉄道：東日本大震災からの復興の軌跡」。作成：Martial (2021)。】

地震災害の規模、原発災害による被災地の人口動態の激変、放射能汚染に伴う不確実性は、地域の交通の運営と計画を引き続き困難にしている。災害後、大半の地域交通は麻痺していたが、

一部は緊急避難の初期段階で不可欠な手段を提供し、その後の移行期にも避難区域の更新に伴う変動する需要に対応した。新たなバス路線、BRT、さらにはデマンド型シャトルが整備された。BRTは低密度の農村地域における旅客輸送にしばしば適しているが、市営バスのようにより多くの停留所を持ちながら病院や学校といった特定の目的地に直接アクセスすることはない。市営バスはより低速だが停留所がより多く、停留所間の距離も短い。あるNPOは、さまざまなボランティア交通サービスを通じて、公共サービス、スーパーマーケット、その他の日常的な目的地へのアクセスを調整し、特に大船渡市において避難者の移動を支援した。石油製品の供給不足は、タクシーやバスに対しては個人車両ほどの影響を及ぼさなかった。タクシーは主にLPGで運行しており、バスは日本バス協会を通じて全国の備蓄から緊急の燃料輸送を受けることができた。しかし、これらの新たな交通サービスは2011年にMLITが10年間（2020年末まで）の期限付きで支出した資金に大きく依存しているため、長期的な存続は不安定に見える。この予算の一部は、例えば人口が減少し続ける仮設住宅と住民を結ぶために充てられたが、バス会社は政府の補助金終了後の経営モデルの適応に遅れているようである。また、東北地方はマイカー文化が根強く、公共交通網が都市の拡散に対応できていないことにも留意すべきである。大多数の住民は可能な限り早期に自家用車を再購入し、移動習慣を変えることを望まなかったか、あるいはできなかった（図05）。仙台の交通の活力と密度は地域における反例であり続けている。災害後に閉鎖された大半の鉄道路線は、地方路線の多くと同様に経営状態が不安定であった。鉄道輸送は、採算性を期待するには高い都市密度を必要とする投資である。導入されたBRTは、はるかに少ない投資で高品質のサービスを提供するが、スマートグリッドやスマートコミュニティの発展期にある現在、さまざまなデマンド型交通ソリューションを提案する中での一つの選択肢に過ぎない。



【図 05：2005 年から 2017 年までの日本における登録自動車台数の推移。出典：自検協 (AIRIA)。作成：Martial (2021)。】

登録自動車台数は、40 万台の車両が損傷・破壊されたにもかかわらず、2011 年に顕著な減少を示さなかった。これはその年のうちにほぼ全面的な買い替えが行われたことを示している。全国レベルでは登録台数の増加は比較的継続的であるが、東北では 2011 年に変曲が見られ、特に公共交通のサービス水準の著しい低下の影響を最も受けた宮城県と福島県で顕著であった。

第二部 3 節 航空輸送

道路・鉄道輸送の危機的状況は、航空輸送を災害後少なくとも 20 日間、被災地へのアクセスにおける最も実用的かつ効率的な解決策に転換させた。最初の地震の揺れの数分後、海岸からわずか数百メートルに位置し、十分な堤防と防波堤を有していなかった仙台空港は、津波の直撃を受けた。2本の滑走路、駐機場、誘導路は数メートルの水に浸かり、ターミナルビルの1階はほぼ完全に浸水した。しかし、約 1,200 名の乗客と職員は上階に避難する時間があったため、空港敷地内での死者・行方不明者はなかった。非常用発電機と管制塔の地上レーダーは破壊された。通常、仙台空港は東北の航空交通のハブであり、他の地域空港は通常、限られた旅客と貨物のみを扱っている。したがって、仙台空港の復旧は当局にとって最優先課題であった。

在日米軍は、極めて重要な「トモダチ作戦」の一環として人員と資材を提供した。この作戦は 2011 年 3 月 12 日から 5 月 4 日にかけて実施され、米軍人 24,000 名、航空機 189 機、軍艦 24 隻が動員され、費用は 9,000 万ドルであった。日本列島の大半の米軍基地が動員され、自衛隊との共同作戦を展開した (Wilson 2012)。米軍は常に大量の燃料を必要とするため、その豊富な備蓄を活用できた。消防士やボランティアが主に個人の救援に当たる中、軍の動員により、避難所、仮設トイレ、シャワーの設置だけでなく、3 月 15 日には仙台空港を人道支援便のために再開することが可能となった。空港はそのまま緊急物資輸送のハブに転換されたが、空港敷地内には約 2,000 台の損傷車両と 37 万 m³の瓦礫が散乱していた。ヘリコプターは災害から 4 日目、米軍の輸送機は 5 日目に到着した。滑走路に臨時の航空管制設備が直接設置された後であった。空港は 4 月 13 日に商業便を再開し、災害からわずか 32 日後であり、2011 年 9 月 25 日に通常運用を回復した。

仙台空港の完全復旧までの間、民間航空の緊急代替策が必要であった。当局は東北のいくつかの地方空港の余剰容量を活用し、災害後も同程度のサービス水準を維持する方策を選択した。すなわち、運用不能となった仙台空港のフライトを花巻、福島、山形の各空港に迂回させ、旅客数の大幅な増加をもたらした。山形空港は、仙台市との近接性、放射能汚染の少なさ、軽微な被害により、災害後 20 日間で旅客数が 15 倍に増加した。1 日の発着便は 20 機から 60 機に増加し、花巻は 20 機から 100 機に、福島は 25 機から 85 機に増加した (Aratani et al. 2013)。これらの変更の迅速さと柔軟性は驚くべきものであったが、航空機やヘリコプターの駐機管理、

燃料供給などの一部の運用では臨界点に達した。緊急管理の責任者は増大する需要に対し山形空港の輸送能力を最大限適応させようとしたが、最初の数日間はターミナルに到着するすべての旅客にフライトを保証することはできなかった。空港への陸上交通需要の著しい増加は地域の公共交通にも波及した。鉄道の不通に加え、山形空港の新たな役割は東北の陸上交通システムに大きな負荷をかけた。

首都圏を担う羽田空港と成田空港は、国内で群を抜いて利用者が多い空港であるが、滑走路やターミナルに大きな被害がなかったにもかかわらず、最初の地震の揺れの数分後に活動を停止した。それぞれ1日約500便と250便を受け入れる両空港のうち、86便が他の空港に迂回した。トモダチ作戦における航空支援および米国人家族の避難において真の要衝となった東京近郊の米軍横田基地は、米国民間機11機も受け入れた。合計8,500名の旅客が帰宅に困難を来した。

仙台空港を除き、全国の空港は3月14日までに再開することができた。しかし、原発事故に対する懸念から、複数の航空会社が3月15日以降、首都圏への就航を一時停止した。各空港は定期的に耐震対策を更新してきたが、2011年の災害は津波対策の不十分さを浮き彫りにし、災害時における空港の重要性を実証し、いくつかの教訓の獲得に寄与した（Hanaoka et al. 2013）。第一に、緊急時における各空港組織間の連絡と協力を改善・簡素化し、過度の混乱を避ける必要がある。2008年の岩手・宮城内陸地震は、花巻空港のスタッフがこれらの課題に3年間取り組む機会を提供し、災害前夜にその経験を全国で迅速に共有することを可能にした。他の空港も航空管制、駐機場の配分、給油について同様の取り組みを行った。国土交通省航空局（JCAB）は継続的な研修を提供し、航空管制を担当できるようになり、地方自治体が空港の管理者となり、航空事業者と空港施設管理者は緊急時においても一連の運航業務を管理できるようになった。さらに、航空機の燃料源の多様化と供給ルートの確保は、供給業者、燃料配送業者、空港管理者の間の連携に基づいている。

航空機運航者間の協力は、災害の初期段階で最も重要な迅速な意思決定を確保するために極めて重要である。政府機、自衛隊機、海上保安庁機、米軍機、ドクターヘリ、報道ヘリ、さらに緊急輸送を行う民間航空機の全てが重要な役割を果たした。当然ながら、関与した各組織はそれぞれの本部に情報を伝達しながら状況を管理した。災害対策本部が航空部門に具体的かつ詳細な指示を出すことは困難であった。一般的な行政組織がこれらの活動に関与することはまれ

だからである。各組織は他の組織の行動を部分的にしか把握しておらず、調整に困難を来した。災害の即時性は必然的に各機関による迅速かつ独立した行動を招くが、活動状況といった最低限の有用な情報を共有するメカニズムがおそらく不足していた。災害対策本部内に移行期と復旧期における航空作戦チームを設置していれば、情報共有、対策の実施、組織間の指示伝達を可能にする明確な指揮系統を備えたシステムにより、より効果的な危機管理が可能になったであろう。災害時の航空機間の通信は、複数の組織による特定地域への多数のフライトの同時発進において不可欠な役割を果たした。通常時にはフライトの安全を確保するための多くの規則が存在するが、航空機と地上局間の共通通信方法の確保は、情報収集と安全な救助活動の遂行において極めて貴重であった。

この災害は、空港を危機管理と補給の拠点に転換する必要性を改めて認識させた。航空輸送は連続的な物理的ネットワークを持たず、国内外の目的地に接続されるという性質上、道路や鉄道のネットワークよりも優れたレジリエンスを有している。空港施設の稼働率における大きな余力は、災害の衝撃の一部を吸収するための余剰能力と一定の冗長性の重要性を実証した。しかし、2011年の管理は、緊急発電機、十分な航空機駐機スペース、追加の臨時燃料貯蔵、夜間作業用の臨時照明、救援物資の仕分け・保管のための倉庫の確保など、危機的状況に対する空港施設の多目的利用を示唆した。

第二部 4 節 海上輸送

島国である日本は、広大な海域、34,000km の海岸線、そして多くの港湾施設に近接した沿岸部に主に立地する産業を有している。約 1,100 の商港と 3,000 の漁港が、国内で輸送される貨物の 99%（重量ベース）を担っている。しかし、大船渡港では 9.5m に達する波を伴い、津波は太平洋沿岸全域にわたって多くの施設を壊滅させた。仙台港は最初の地震動から数分後に津波に襲われ、南三陸と陸前高田の港は水没した。津波は多くの防波堤・消波堤を損傷ないし破壊したが、その中には 2009 年に釜石湾に竣工した世界最長の防波堤も含まれる。宮古の長さ 2.5km の堤防も複数箇所を損壊した。しかし、これらの防護施設は一部の地域において波の到達を遅らせ、高さを低減する効果を発揮した。青森から茨城にかけて、多くのコンテナが埠頭や海岸に散乱した。車両、船舶、建物、木材などの漂流物と合わせて、これらは各水路やアンカレッジの安全な航行にとって重大な障害物となった（Kumagai 2013）。したがって、荷揚げを可能にする係留施設が確保されるまで、海上輸送による救援は限定的であった。3 月 13 日夕方の津波警報解除後、翌朝から水路と港湾施設の啓開が開始された。東北最大の港である仙台塩釜港のほか、宮古港と釜石港に対し、緊急物資の輸送を最優先として啓開作業の優先権が与えられた。その後、啓開は他の主要港にも拡大された。最初の生活必需品輸送船は 3 月 16 日に釜石港に入港した。最初のタンカーは 3 月 21 日に仙台塩釜港に接岸し、地域の燃料不足を緩和した。3 月 23 日には 10 港の航路が安全確認され、海上輸送による救援活動のより本格的な展開が可能となった。

港湾の破壊による経済的影響は東北地方全域、特に宮城県で顕著であった。地域の国際貿易の約 40%を占めるその仙台塩釜港湾コンプレックスは、石巻、塩釜、松島、仙台の 4 港から構成される。仙台塩釜港は 4 月 16 日に部分的に再開したが、コンテナ取扱量は 2011 年に半減以上となり、2010 年の水準を回復したのは 2015 年になってからであった。300 以上の漁港と約 20,000 隻の漁船が損傷ないし破壊された。災害後 2 年以内にすべての活動を再開できたのは 115 港のみであり、2019 年末時点で 35 港がなお限定的な稼働状況にあった。

2011 年の太平洋沿岸の港の経験は、世界中の港に多くの教訓を提供している。被害の規模は、技術的に先進的な経済であっても脆弱であることを改めて示しただけでなく、インフラが修復されてもなお長期にわたるトラフィックの大幅な減少が持続しうることを明らかにした。これ

は、自然災害の脅威にさらされている港湾施設だけでなく、戦争、禁輸措置、ゼネストといった人為的な突発事態にも適用される教訓を提示している。仙台塩釜港は、地盤改良や締固めによる土壌強化、港湾構造物の耐震設計、インターモーダル施設である橋梁の近代化、そしてもちろん防波堤・消波堤の設置といった災害前の軽減策または予防的措置がリスクに対処する最善の選択肢であることを実証した。しかし2011年の津波の規模に対しては、これらの対策はいずれも十分ではなかった。これらの持続的な損失は、国内外の激しい港湾間競争に内在するものである。この長期的な視点は、港湾のような資本集約的な施設にとって、災害計画の立案者にとって重要な教訓を示している。大規模な突然の被害による混乱は、短期的には港湾収入の急落を、長期的には競争力の弱体化をもたらさう。自然災害の経済的影響の古典的モデルは、物理的被害が完全に修復されれば完全な回復を想定している。しかし2011年3月11日は、これらのモデルの陳腐化と、物理的復旧期間を超えて持続しうる潜在的な経済的影響に対応する新しいモデルの必要性を示した。

第二部 5 節 電気通信

最初の被害評価と救助活動には高性能な通信手段が必要であり、電気通信ネットワークは災害時に極めて重要である。被災地のサービスは通常をはるかに超える需要にさらされ、ネットワークに物理的被害がなくても管理者は緊急運用を強いられる。3月11日の災害は、危機的状況における性能改善の広範な領域を開いた。過去の建物や情報機器の耐震強化は被害を低減したが、接続部分の大半はアップグレードされていなかった。これらは液状化、地盤変形、地滑りなどの地震時の甚大な地質的制約により再び損傷を受けた。

電気通信は、最初の揺れの数秒前にユーザーに予告を提供し、避難や建物からの脱出を可能にする地震早期警報システムの構築を促進した。第一に、この最初の防護のためにネットワークの保守が不可欠であり、その後の余震警報時にも重要である。日本列島で定期的に発生する地震は、通信事業者にとって劣化した条件下でネットワークを改善・維持する機会を多く提供してきた。これらの事前の学習機会により、2011年には重大な障害が発生したものの、災害の規模に鑑みて総合的に満足のいくパフォーマンスを維持することができた。

東北地方を超えた通信ネットワークへの影響は限定的であった。東京圏では利用量が8~9倍に増加したが、他の災害時とは異なり深刻な問題は生じなかった。これは、通話規制の実施と、大部分の通信を被災地の安否確認サービスに転送したことなどによるものである。ネットワーク全体の最適な保護は依然として極めて困難であるが、物理的ネットワークの冗長性と緊急介入計画に対する顕著な取り組みが、1995年の神戸での地震と比較してシステムの復旧における明確な改善をもたらした。神戸の地震はその当時、通信のレジリエンス向上の可能性に関する多くの教訓を提供した。

3月11日から13日にかけて150万回線の固定電話が故障した。その半数は14日までに復旧したが、90%のサービスを復旧するには約2週間を要した。NTTの1,800の建物の半数以上が地震または津波の被害を受け、その大半は停電によるものであった。これらの建物は24~48時間稼働可能なバッテリーに依存しており、13日までに障害が拡大した理由である。損壊した道路がバッテリーの充電・交替のための可搬型発電機の迅速な配備を妨げた。しかし、ケーブルを収容する地下構造物の耐震設計の改善により、固定電話網は1995年と比較してより堅牢になっていた (Kwasinski et al. 2012)。

無線通信設備にも重大な障害が発生した。これも複数の停電と津波で損傷した運用センターが原因であった。基地局のバッテリーは約8時間のより短い自律時間のためさらに脆弱であり、3月11日のうちに数千の送信機が停止した。通信事業者は、通常は遠隔地で使用される数百台の衛星電話を最も被害の大きい地域に提供することで緊急カバレッジを確保した。Wi-Fi アクセスポイントも開放されたが、帯域幅は基本的な通信に制限された。送信機は徐々に復旧されたが、4月初旬時点でなお1,000基以上が停止していた。この困難な状況において、メッセージアプリLINEの成功は、電話ネットワークよりも障害の少ないインターネットを利用した通信に基づいていたことで説明される。

地震時にはインターネット検索数の大幅な減少が記録されたが、これも停電の影響であり、状況は1時間以内に正常化した。その後、ネットワークは通常約200倍のトラフィックピークを経験した。密なメッシュ構造であるため、固定電話や携帯電話の回線と比較して良好に持ちこたえた。日本列島と世界を結ぶ約20本の海底ケーブルのうち、損傷を受けたのはごく一部であり、日本列島内の数千のルーティングセンターのうちわずかな数が停止しただけであった。また、従業員の過度に困難な通勤を避けるため、複数の企業がテレワークを推奨した。

各通信ネットワークの全体的なパフォーマンスは災害の規模を考慮すれば妥当なものであったが、改善の余地が明らかになった。障害モードのより精緻な理解と緊急介入計画は、さらにレジリエントなシステムの構築を可能にする。接続速度の向上とデータ転送量の増大に対する需要の高まりに応じて展開されている光ファイバーネットワークは、より堅牢な耐震設備とともに敷設されている。NTTはまた、災害やその他の緊急事態時の停電に備え、病院や工場など近隣の重要施設のために、太陽光・風力発電設備とバッテリーシステムに6年間で6,000億円を投資すると発表した。

第三部 結論

本稿は、2011年3月11日に発生した地震と津波後の交通状況と当局の対応を分析したものであり、その壊滅的な結果は事後的に、より耐久性のあるインフラの開発における重要な段階を形成している。交通インフラの能力を強化するために多くの教訓が引き出された。交通は本質的に学際的な分野であり、この災害状況はそれぞれの計画とモデルにおける分節化の少ないアプローチの必要性を浮き彫りにしただけであった。持続可能な開発に関する研究は近年増加しているが、交通に関する研究は比較的少ない。しかし、持続可能な交通に関する研究は4つの大きなカテゴリーに分けられている (Badassa et al. 2020)。第一は、持続可能な交通システムの定義、指標、パラメータに関するもの。第二は、社会技術システムの評価に焦点を当てるもの。第三は、都市交通のパフォーマンス指標に焦点を当てるもの。第四は、都市と都市間交通サービスの持続可能性の分析に基づくものである。

日本列島における継続的な都市の拡散に起因する自動車と石油への大きな依存は、さまざまな不足によって浮き彫りにされ、日本における都市の持続可能性とコンパクトシティに関する議論を活発化させた。これらはまず、国の人口減少の文脈で、特に限界集落、すなわち住民の半数以上が65歳を超える段階に達し消滅の危機に瀕する過疎が進行した地域社会との関連で取り上げられた。

関連するもう一つのテーマとして、消滅可能性自治体は、若年女性の半数以上を失うと予測される数百の自治体を指し、消滅の道をたどると見なされている。政府は地方創生、すなわち新たな交通手段を含むこれらの地域の活力を改善することを目指す一連の政策によってこの現象を食い止めようとしている。コンパクトシティ戦略は2011年以前からあったが、災害は中心市街地の活性化や都市中心部と公共交通ネットワークの改善を目的とした多くの施策を加速させた。日本の人口は今後数十年でさらに減少する可能性があるため、都市拡散の賢明な削減は喫緊の課題であり、より慎重な土地利用計画と連動して行われなければならない。

津波の被害を受けた多くの場所は、過去にも繰り返し壊滅的な被害を経験してきた。多くはより高く頑丈な数百キロメートルに及ぶ堤防に依拠して同様の方法で再建されてきたが、これらの堤防は多くの論争の対象であり、時に癒着的と評される政府と建設会社の関係も同様である。堤防の妥当性は実際に議論の対象であり、技術的、経済的、安全上の観点は社会的、景観的、

生態学的側面によって緩和されるべきである。この決定は、危険地域への再定住という過去の過ちを繰り返すべきではないと主張する多くの人々から批判されており、住宅地は距離と高度を確保して配置されるべきである。浸水可能地域については、漁港周辺の自然用地、農業用地、工業用地として位置づけるべきである。

これらの決定はしばしば地方自治体に委ねられる。地方自治体が災害時の最前線の介入主体であることは国際的に認知されており、移行と復旧の成功は強力なリーダーシップに依存する (Berke et al. 1993)。国の機関は警報システム、避難計画、継続的な教育の整備を通じて災害への備えにおいて重要な役割を果たすが、災害の被害を可能な限り軽減するための建築基準と土地利用規制の主要な責任者は地方自治体である。日本はこのプロセスに従っている。災害時には、首相は国土交通省傘下の防災情報（日本の災害管理センター）の長として指令を発出できる。これらの指令は災害対策基本法に基づき、1995年の神戸での地震から得られた教訓に基づいて改定されている。しかし、災害の予防と対応策を直接管理する単一の国家機関は存在しない。これらの行政組織、地方自治体、公的機関の責任者は、指令に基づき必要と判断される措置を講じることができる。市町村および都道府県の防災会議は、基本計画の原則に基づき地域の状況を考慮した各計画を策定する義務がある。しかし実際には、各組織と地方自治体が首相の直接的な指揮系統の一部ではないため、首相の権限が効果的に行使される可能性は低い (Suzuki et al. 2013)。原則として地方自治体を実施すべき緊急対応が、首相の中央指揮を困難かつ遅延させている。

全国レベルで得られた教訓として、防災対策推進検討会議は3つの重要な点について提言している。すなわち、施設の設計基準の見直しと復旧マニュアルの作成、災害のない平常期における復旧計画の策定、国と地方自治体間の協力精神の強化と民間企業との事前協定の促進である。これら3点は、2011年の災害時に認められたいくつかの不足を補うべきものである。具体的には、より柔軟な財政措置メカニズムの確立、災害前の民間部門との協定締結、国レベルでの専門家チームの編成、さらに耐久性の高いインフラの建設、および復旧すべき主要インフラのより明確な優先順位付けである。国はまた、スマートグリッドとスマートコミュニティの推進の枠内で、特に地形的・人口統計的・社会的データのより良い統合による、交通に関するいくつかの革新的な措置を講じた。スマートグリッドはトップダウンのアプローチで機能するが、ス

スマートコミュニティは市民、公的機関、企業が参加し、長期的なレジリエンスを高めるための、よりエネルギー消費が少なく汚染の少ないライフスタイルの構築を目指すボトムアップのアプローチを提案する。ただし、これらのスマートグリッドは緊急事態における極めて短期的な対応にも適用可能である (Nakagawa et al. 2004)。さまざまなイニシアチブが時間をかけて開始され、環境省 (MOE)、METI、MLIT によって推進されてきた。特に、1997年に開始されたエコタウンモデルプロジェクト、2004年の環境的持続可能交通モデルプロジェクト (EST)、2008年の環境モデル都市プロジェクト (EMC)、2011年の環境未来都市構想が挙げられる (Lecler et al. 2015)。

当局の対応を緊急・移行・復旧の3つの段階に分けることで、各段階で取り組むべき課題が浮き彫りになる (Nakanishi et al. 2011; Yoshida 2012)。緊急段階では、インフラの即時修復と絶えず変化する交通需要への適応能力が必要であった。国レベルのイニシアチブの大半にはいくつかの弱点が見られたが、地方レベルの介入は優先課題への対応において全般的に機能した。人命救助、緊急物資の輸送、道路の復旧は、密な情報ネットワークと企業ネットワークに基づく多様な地方のイニシアチブにより前例のない速度で達成された。地方の指導者は、さまざまな交通需要に関する情報の収集とボランティアの配送において重要な役割を果たした。移行段階は、個人ができるだけ早く日常生活を取り戻すことを支援するための交通サービスの適応力の重要性を示した。コミュニティの参加と社会関係資本もまた、異常で複雑な資源の限られた状況における意思決定に不可欠であった。復旧段階は、より耐久性のある共同体の構築への序章であり、交通インフラの相互運用性と冗長性の向上に基づき、次の災害をより効果的に予測できるものである。

日本は定期的に自然災害に見舞われているが、それらを予測し備えるために必要な知識と技術を蓄積している。しかし、レジリエンス能力の強化は依然として課題である。過去の出来事を経験した地域でさえ、時に記憶が短すぎることを示されているだけでなく (Sato et al. 2017)、それ以上に、それを全国規模、さらには国際規模で適用するためにも重要である。また、災害時の被害と死者の大部分が建築・都市計画の結果であることを国民に啓発する必要もある。既存の文献に照らし、これらの課題が実践においてどのように克服されうるかについてのさらなる研究が、レジリエントな交通インフラの計画を裏づけるために不可欠である (Faturechi et al.

2014)。より長期的には、この災害は私たちのインフラの脆弱性を暴力的に思い起こさせるものであり、再考の必要性を示している。実際、石油ショックが政治的決定に起因する供給困難と価格高騰によって強制的かつ加速的に最初のエネルギー転換を引き起こしたのに対し、日本は2011年3月11日に物理的現実によってエネルギーの極限に追い込まれた。日本は強いエネルギー的、地理的、人口的制約にもかかわらず経済的繁栄を達成してきたが、三重災害はエネルギーと経済の強い相関を改めて想起させ、世界的な石油ピーク、予想される供給困難、気候変動に備えた、おそらくは救済的なエネルギー転換を加速させる機会を示した。

参考文献

Adger W. Neil 2000, "Social and Ecological Resilience: Are They Related?", *Progress in Human Geography*, 24 (3): 347-364.

Akamatsu Takashi 赤松隆, Nagae Takeshi 長江剛志, Ōsawa Minoru 大澤実 & Yamaguchi Hiromichi 山口裕通 2016, 「巨大災害時のガソリン不足に対する戦略とその社会経済評価：東日本大震災における実証分析」, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, 72 (5): 1-19.

Aoki Masahiko & Rothwell Geoffrey 2013, "A Comparative Institutional Analysis of the Fukushima Nuclear Disaster: Lessons and Policy Implications", *Energy Policy*, 53: 240-247.

Aratani Tarō 荒谷太郎 et al. 2013, 「東日本大震災時の航空機活動と空港運用の実態分析—いわて花巻・山形・福島空港を対象として—」, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, 69 (5): 229-246.

Badassa Bayissa Badada, Sun Baiqing & Qiao Lixin 2020, "Sustainable Transport Infrastructure and Economic Returns: A Bibliometric and Visualization Analysis", *Sustainability*, 12 (5): 2033.

Barker Kash, Hosseini Seyedmohsen & Ramirez-Marquez Jose E. 2016, "A Review of Definitions and Measures of System Resilience", *Reliability Engineering & System Safety*, 145: 47-61.

Berke Philip, Kartez Jack & Wenger Dennis 1993, "Recovery After Disaster: Achieving Sustainable Development, Mitigation and Equity", *Disasters*, 17 (2), 93-109.

Black John, Nakanishi Hitomi & Matsuo Kojiro 2014, "Disaster Resilience in Transportation: Japan Earthquake and Tsunami 2011", *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 5 (4): 341-361.

Christopher Martin & Peck Helen 2004, "Building the Resilient Supply Chain", *International Journal of Logistics Management*, 15 (2): 1-13.

Futurechi Reza & Miller-Hooks Elise 2014, "Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review", *Journal of Infrastructure Systems*, 21 (1): 04014025.

Fujimoto Kosuke, Ishikawa Fumio, Iwata Michitoshi & Tatsuki Shinichi 2018, "Restoration of Joban Line Railway Facilities Damaged by Tōhoku-Pacific Ocean Earthquake", in Hordijk Dick A. & Luković Mladena, *High Tech Concrete. Where Technology and Engineering Meet*, Cham, Springer: 1942-1950.

Fujiu Makoto 藤生慎 et al. 2011, 「2011年東北地方太平洋沖地震における三陸鉄道の被害調査速報」, *The University of Tokyo, Institute of Industrial Science, Seisan kenkyū*, 63 (4): 535-540.

- Graham Stephen & Thrift Nigel 2007, "Understanding repair and maintenance", *Theory, Culture & Society*, 24 (3): 1-25.
- Granier Benoit 2019, 「Gouverner la consommation d'énergie des ménages」, *Ebisu. Études japonaises*, 56: 223-252.
- Hayashi Yoshinari 林能成 2012, 「東日本大震災における鉄道の避難誘導」, *Journal of Societal Safety Sciences*, 2: 36-37.
- Holling Crawford 1973, "Resilience and Stability of Ecological Systems", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4 (1): 1-23.
- Hollnagel Erik, Leveson Nancy & Woods David D. 2006, *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*, Farnham, Ashgate Publishing.
- Kajitani Yoshio, Chang Stephanie & Tatano Hirokazu 2013, "Economic Impacts of the 2011 Tohoku-Okai Earthquake and Tsunami", *Earthquake Spectra*, 29 (1 suppl): 457-478.
- Kazama Motoki 風間基樹 2012, 「2011年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題」, *Japanese Geotechnical Journal*, 7 (1): 1-11.
- Kazama Motoki & Noda Toshihiro 2012, "Damage Statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tōhoku Earthquake damage)", *Soils and Foundations*, 52 (5): 780-792.
- Kiyota Yūtarō 清田裕太郎, Iwakura Seiji 岩倉成志, Nonaka Yasuhiro 野中康弘 2014, 「東日本大震災時のグリッドロック現象に基づく都区内道路のボトルネック箇所の考察」, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, 70 (5): 1059-1066.
- Kumagai Kentaro 2013, "Tsunami-induced Debris of Freight Containers due to the 2011 off the Pacific Coast of Tōhoku Earthquake", *Journal of Disaster FactSheets*: 1-25.
- Kwasinski Alexis & Tang Alex K. 2011, "Telecommunications Performance in the M=9.0 Off-shore East Coast of Japan Earthquake and Tsunami March 11 2011", *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake*: 1514-1525.
- Lecler Yveline & Faivre d'Arcier Bruno 2015, "Smart Cities Experiments in France and Japan: Preparing the Energy Transition", *Association of Asian Studies Annual Conference, AAS, Chicago, United States*.
- Nakagawa Yuko & Shaw Rajib 2004, "Social Capital: A Missing Link to Disaster Recovery", *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 22 (1), 5-34.
- Reghezza-Zitt Magali & Rufat Samuel 2015, *Resilience Imperative: Uncertainty, Risks and Disasters*, Elsevier.
- Rose Adam 2004, "Defining and Measuring Economic Resilience to Disasters", *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 13 (4): 307-314.

Samuels Richard J. 2013, 3.11: Disaster and Change in Japan, Ithaca, Cornell University Press.

Sheffi Yossi 2005, The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage, Cambridge, MIT Press.

Suzuki Itoko & Kaneko Yuko 2013, Japan's Disaster Governance: How was the 3.11 Crisis Managed?, Berlin, Springer Science & Business Media.

Wilson Rockie K. 2012, "Operation Tomodachi: A Model for American Disaster Response Efforts and the Collective Use of Military Forces Abroad", John F Kennedy School of Government Cambridge, Harvard University.

Yoshida Itsuki 吉田樹 2012, 「東日本大震災被災地におけるモビリティと避難者のアクセシビリティに関する考察（小特集 大規模災害時のモビリティ確保）」, Traffic Science, 43 (1): 11-18.