

Title	災害時におけるLPガスの復旧効率化の定量的評価： フィリピンにおけるBCP策定のためのシミュレーションとエージェント・ベース・モデルの構築
Sub Title	
Author	八木, 真理奈(Yagi, Marina) 高橋, 大志(Takahashi, Hiroshi)
Publisher	慶應義塾大学大学院経営管理研究科
Publication year	2024
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2024年度経営学 第4271号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40003001-00002024-4271

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

慶應義塾大学大学院経営管理研究科修士課程

学位論文(2024 年度)

論文題名

災害時における LP ガスの復旧効率化の定量的評価
—フィリピンにおける BCP 策定のためのシミュレーションとエージェント・ベース・モデルの構築—

主 査	高橋 大志
副 査	岡田 正大
副 査	齋藤 卓爾

氏 名	八木 真理奈
-----	--------

論文要旨

指導教員	高橋 大志	氏名	八木 真理奈
(論文題名)			
災害時における LP ガスの復旧効率化の定量的評価—フィリピンにおける BCP 策定のためのシミュレーションとエージェント・ベース・モデルの構築—			
(内容の要旨)			
本研究は、災害時における LP ガス供給ネットワークの効率的な復旧計画を策定するための包括的な枠組みを提案することを目的とし、道路ネットワークの寸断が復旧効率に与える影響について定量的な評価を実施した。フィリピンのメトロマニラおよびパンパンガを対象に、都市特性および地域条件を考慮した事業継続計画(BCP)の策定に向け、道路ネットワーク特性の基礎分析、グリッドモデル、実際の道路ネットワーク、エージェント・ベース・モデルという 4 つのアプローチを採用することで、LP ガス事業者が災害時の復旧活動におけるシナリオを多角的に分析した。 道路ネットワーク特性の基礎分析では、メトロマニラは高密度かつ複雑な道路ネットワークを有している一方で、他都市は低密度でシンプルな道路構造を持つことが明らかとなり、都市の道路の特性に大きな違いがあることを確認できた。グリッドモデルによる分析では、道路寸断率が一定の割合を超えると復旧効率が急激に低下することが確認され、実際の道路ネットワークを用いた分析では、都市間の特性差が明らかとなり、パンパンガのような疎な道路ネットワークを持つ地域では、初期段階の道路寸断が復旧効率に非常に大きな影響を及ぼすことが分かった。最後に、今回のエージェント・ベース・モデルの結果は、地域ネットワーク構造や官民パートナーシップが災害復旧に果たす役割を直接証明するものではないが、一部のシミュレーション結果から、これらの要素が復旧プロセスを支える可能性があることを確認できた。 これらの成果により、災害時の LP ガス復旧において、都市特性や道路寸断率が与える影響を定量的に示すことができた。本研究は、データに基づいた定量的な BCP 策定を可能とし、災害時の迅速かつ効果的な復旧の実現に貢献するものである。さらに、インフラの迅速な復旧は、住民の負担を軽減し地域や顧客からの信頼を高め、LP ガス事業者の競争力強化や企業価値向上にも寄与する。本研究で得られた知見は、災害リスクが高い地域における持続可能なエネルギー供給ネットワークの構築に向けた新たな視点を提供し、業界全体の防災意識の向上と災害に強い地域づくりにおいて重要な貢献を果たすものである。			

目次

1. 序論.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 研究課題.....	1
1.3 研究の目的と意義.....	2
2. 関連研究.....	3
2.1 防災の主流化と国際的枠組み.....	3
2.2 自然災害と事業継続の課題.....	3
2.3 災害リスクと社会的影響.....	4
2.4 LP ガスの動向.....	6
2.5 フィリピンにおける LP ガス供給の早期復旧の重要性.....	7
2.6 復旧計画におけるルーティングの効率化.....	8
3. 分析方法.....	9
3.1 分析の構成.....	9
3.2 道路ネットワーク特性の基礎分析.....	10
3.3 基本モデルによる復旧活動時間の評価.....	10
3.4 実際の道路ネットワークを用いた復旧活動効率の評価.....	12
3.5 レジリエンスを考慮した復旧プロセスの評価.....	14
4. 実行結果・考察.....	16
4.1 道路ネットワーク特性の基礎分析.....	16
4.2 基本モデルによる復旧活動時間の評価.....	18
4.3 実際の道路ネットワークを用いた復旧活動効率の評価.....	19
4.4 レジリエンスを考慮した復旧プロセスの評価.....	20
4.5 定量的な BCP の検討.....	23
5. 結論・今後の課題.....	25
5.1 研究のまとめ.....	25
5.2 今後の展望.....	26
参考文献.....	27
謝辞.....	31

1. 序論

1.1 背景

防災の分野では、事後対応から事前のリスク削減へと移行する取り組みとして、「防災の主流化」という考え方が世界的な広がりを見せている。2005 年の兵庫行動枠組 2005-2015 や、2015 年の仙台防災枠組 2015-2030 において、国際的な防災方針が明確に打ち出され、企業においても、防災は単なるコストではなく企業価値を維持・向上させるための投資として扱われるようになった。災害リスクへの適切な対応は、社会的信用の向上や長期的な競争優位性の確保に寄与するため、企業は事業継続マネジメント(Business Continuity Management: BCM)を導入し、事業継続計画(Business Continuity Plan: BCP)の策定と訓練を行うことが求められている。

また、災害時に迅速な復旧ができるエネルギーとして、LP ガス(Liquefied Petroleum Gas)が注目されている。災害が発生した場合でも、LP ガスは一戸単位で点検・修理を行うことですぐに利用することができ、迅速な復旧が可能な分散型エネルギーとして期待されている。その一方で、道路インフラの寸断が復旧活動に重大な影響を及ぼすため、LP ガス事業者にとって効率的な復旧計画の策定は極めて重要である。こうした背景から、限られた資源を最大限活用し、災害時の効率的な復旧点検ルートを計画するためには、災害発生前の段階で道路ネットワークの寸断状況を定量的に評価し、これを事業計画に反映させることが求められている。防災への事前投資を通じて、企業は社会的・経済的安定の確保とともに、持続可能な成長への基盤を強化することが重要となる。

1.2 研究課題

LP ガスは、「自立稼働が可能な分散型エネルギー」として災害に強いエネルギー源の一つとして位置づけられている[1]。LP ガスは災害時に他のエネルギー源よりも迅速に回復することで知られており、分散型エネルギーとしての特徴を活かし、日本では全国で利用可能な供給ネットワークが確立されている。実際に、東日本大震災時の LP ガス販売事業者の対応についての調査では、LP ガスは他のエネルギー源に比べて復旧が早く、問題が少なかったと報告されている[2]。LP ガスの独立性、可搬性といった強みはエネルギー安全保障の観点からも、他のエネルギー源と比較して優れていると言える。また、LP ガスは木材や炭等の伝統的な燃料の代替として利用され、室内空気汚染の削減、健康被害の軽減、森林伐採の抑制に寄与している一方、被災地や難民キャンプにおける LP ガス供給ネットワークはいまだ十分に整備されていないという課題もある[3]。

本研究で焦点を当てる LP ガスは、分散型エネルギーとして都市部から地方都市、さらにはインフラが十分に整備されていない新興国に至るまで、幅広い地域で利用されている。特に、新興国におけるエネルギー供給は、中央集権型のインフラに依存せず、分散型のエネルギー供給に頼ることが多い。このため、本研究で提案する復旧計画のフレームワークは、新興国や自然災害に脆弱な地域における迅速なエネルギー復旧策として活用できる可能性が高い。災害時の LP ガス復旧活動においては、限られた時間と資源の中でどのように効率的な復旧ルートを計画し、実行するかが重要である。一方で、道路ネットワークの寸断率が高まるにつれ、車両移動が困難となり、徒歩移動等の代替手段が必要となる場面も多い。本研究では、災害時における道路寸断が LP ガス復旧活動に与える具体的な影響を定量的に評価する。車両と徒歩を併用した復旧シナリオを比較分析し、効率的な復旧計画の条件を明らかにすることを目指す。さらに、レジリエンスに関するエージェント・ベース・モデルを構築し、地域ネットワーク強度や官民パートナーシップを高める施策と、災害発生時の迅速な復旧の関係性を明らかにし、防災施策の具現化の支援を行うことを目指す。

1.3 研究の目的と意義

本研究の目的は、災害時における LP ガス供給の効率的な復旧計画策定を支援することである。特に、道路ネットワークの寸断率と復旧効率の関係を分析し、効率的な復旧点検の計画を立案するためのデータと手法を明らかにする。本研究成果は、BCP の具体化や災害対応力の向上に貢献するものであり、LP ガス事業者や自治体の災害対策における意思決定を支援することを目指す。BCP は、自然災害や社会的不安定性が頻発する現代において、企業の存続と社会的責任を両立させるための重要な指針となる。本研究では、LP ガス復旧点検の効率化を通じて、災害時のエネルギー供給維持を支援し、企業価値向上に貢献することを目指す。同時に、分散型エネルギーとしての LP ガスの特性を活かし、中央集権型インフラに依存しない新たな復旧モデルを構築する。このような視点は既存研究には見られず、災害対応の新たな可能性を提示するものである。さらに、本研究では、道路ネットワークの寸断率や地域ネットワーク強度、官民パートナーシップが復旧点検作業に及ぼす影響を定量的に評価し、現場で活用可能な枠組みを提供する。本研究で提案する枠組みは、災害リスクの高い地域や複雑な道路ネットワークを持つ地域等、同条件を有する国や地域にも適用可能と考えられ、持続可能なエネルギー供給ネットワークの構築に広く寄与するものである。

2. 関連研究

2.1 防災の主流化と国際的枠組み

「防災の主流化(Mainstreaming Disaster Risk Reduction)」[4]という概念は、2000年頃に国連国際防災戦略事務局(UNISDR: United Nations International Strategy for Disaster Reduction)の設立に伴い登場した。この概念は、開発の各段階や各分野において、災害リスク削減を包括的かつ継続的に組み込むアプローチを指し、命を守り、持続可能な発展と貧困削減を目指す取り組みとして定義されている。防災の主流化の目的は、災害が社会に与える損失や発展の機会損失を軽減し、より災害に強い社会を構築することにある。特に、災害リスク削減を未来への投資として捉える視点は、持続可能な社会経済の発展を確保するための重要な基盤となっている。この認識が国際的に広がることで、防災に強い国や地域を構築する取り組みが一層加速することが期待される。

国際的な枠組みとしては、2005年に開催された第2回国連防災世界会議において「兵庫行動枠組 2005-2015(HFA: Hyogo Framework for Action 2005-2015～Building the Nations and Communities Resilient to Disasters)」[5]が採択され、自然災害に対する脆弱性を軽減し、災害に強い国やコミュニティを構築するための国際的な基本指針が策定された。この枠組みは、多くの国の防災政策に大きな影響を与え、国際的な防災活動の基盤を提供した。また、2007年には、フィリピンのセブで行われたアジア太平洋経済協力(Asia Pacific Economic Cooperation : APEC)エネルギー大臣会合にて、「東アジアのエネルギー・セキュリティに関するセブ宣言」が採択され、エネルギーレジリエンスが重要な政策課題として位置付けられた[6]。エネルギーレジリエンスとは、自然災害や人為的災害等の影響に効果的に対応し、安定的なエネルギー供給を確保する能力のことを指し、エネルギー問題を専門に議論するAPECエネルギー作業部会(Energy Working Group: EWG)では、エネルギーレジリエンスの向上と、それに伴う経済成長(economic growth)、エネルギー安全保障(energy security)、環境の持続可能性(the environmental sustainability)という3Eに加えて安全性(safety)を前提とした「3E+S」を目標に置き、取り組みを進めている[7]。

さらに、2015年に開催された第3回国連防災世界会議(WCDRR)では、「仙台防災枠組 2015-2030(Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030)」[8]が採択され、防災の主流化、事前の防災投資等の新しい考え方を提示したほか、地球規模で取り組む防災の目標を初めて設定したことで話題となった。また、仙台防災枠組では、企業や専門家等を含む民間セクターの役割が明確に規定され、災害リスク管理のための研究や技術開発への関与および支援が明記された。これらの取り組みは、災害リスク管理をより実効性のあるものにし、企業も持続可能な社会経済発展を支える重要な役割を担っていることを示している。

2.2 自然災害と事業継続の課題

自然災害に対するBCPの策定に関する研究は、近年、国内外で注目を集めている。持続可能な投資を推進する国際的な機関投資家団体が出した報告では、投資家が企業に最低限期待することとして、気候ガバナンスの枠組みの確立、物理的リスクと機会の評価、気候レジリエンス構築のための戦略策定があげられており、リスクを定量的に評価しシナリオ分析を行う重要性が高まっている[9]。このような要求に対応するため、米国の国際災害復旧協会¹(Disaster Recovery Institute International, DRI)や英国の事業継続協会²(The Business Continuity Institute, BCI)等の国際的な事業継続・災害復旧の枠組みが注目されている。これらの組織は、事業継続計画の普及や災害対応能力の向上を目的としており、認証制度やガイドラインを通じて実効性のある防災戦略を企業や行政に提供している。この国際的な知見は、各国の防災政策や企業活動に活用され、地域特有の課題に対

¹ <https://drii.org/>

² <https://www.thebci.org/>

応した効果的なリスク軽減策の立案を支えている。

日本では、気候変動による災害リスクの増加に対応するため、2023 年 4 月に経済産業省が災害に対するレジリエンス社会の実現を目指した産業政策を提示した[10]。近年、気候変動の影響により自然災害が頻発し、それに伴う経済的被害が拡大している背景を受け、本政策の柱として、企業による防災投資を単なるコストではなく、中長期的な価値創造を支援するものとして認識させることを挙げている。しかしながら、日本企業における 2020 年の BCP の策定状況については、「策定済み」と回答した企業が、大企業では 68.4%(平成 29 年度比 4.4 ポイント増)、中堅企業では 34.4%(同 2.6 ポイント増)となっており、前回の調査実施時より増えているものの、検討中や未対応の企業も多数存在する状況となっている[11]。

一方、フィリピンでは、企業が法規制を守りながら事業継続を確保することが求められており、2010 年に制定された National Disaster Risk Reduction and Management Act (Republic Act No. 10121)[12]に基づき、災害リスク軽減管理の体制が強化された。本法律では、フィリピンの災害リスク軽減管理システムを強化するとともに、コミュニティの災害耐性を構築し、予測される気候リスクを含む災害リスクを軽減し、災害への備えと対応能力を強化するための取り決めと対策を制度化するために、中央政府と地方自治体の能力を認識して強化する方針が示されている。この法律に基づき、国防省市民防衛局³(Office of Civil Defense: OCD)が国家災害リスク軽減管理評議会(National Disaster Risk Reduction and Management Council: NDRRMC)の事務局として防災活動の中心的役割を担うよう規定されており、予防や軽減を含む多様な防災活動の実施が行われている。このような取り組みは、フィリピン国内における BCP の策定と実施を支える重要な枠組みとなっている。しかしながら、2015 年のフィリピン中小企業に対する調査によると、中小企業のうち書面による事業継続計画(BCP)を持っているのはわずか 6%にとどまり[13]、BCP という概念に馴染みがない、BCP 作成に関する情報が不足しているといった中小企業の事業継続に関する問題が存在する。

本研究では、特に BCP 策定の情報不足という問題に焦点を当てる。BCP 策定に際して客観的なデータや根拠に基づく判断が難しく、計画に落とし込めない状態が続くと、たとえ政府主導で BCP を策定したとしても、策定した BCP の有効性を事前に検証する手段が乏しいため、抽象的な「何をすべきか」という計画にとどまり、災害時に十分に機能しない可能性がある。LP ガス事業者としても、増加する災害リスクに対して、実効性のある BCP を策定することは、住民の生活を守り、企業価値を向上させるために不可欠である。この問題に対処するため、本研究では、災害時の迅速な復旧を可能にするシミュレーション手法を検討し、データに基づく合理的な BCP 策定を支援する枠組みを提案する。

2.3 災害リスクと社会的影響

フィリピンの首都圏(National Capital Region: NCR)は、2020 年の国勢調査によると、人口は 1,300 万人でフィリピン全体の人口の約 12%が居住しており[14]、東南アジア最大級の経済拠点である。一方で、マニラ首都圏を横断するウェストバレー断層(West Valley Fault)沿いにおいて「The Big One」と呼ばれるマグニチュード 7.2 の地震が想定されており、約 4 万 8,000 人の死亡および 480 億米ドルの経済損失が発生する可能性が指摘されている[15][16][17]。2019 年に発生したルソン島でのマグニチュード 6.1 の地震[18][19]では、首都圏の被害は比較的少なかったが、これにより明らかになった交通インフラの脆弱性が、将来的な災害対応における重要な課題として浮き彫りとなった。具体的には、道路網の約 34%が液状化の影響を受ける可能性があり、これにより平均アクセス時間が 148%増加することが予測されている[20]。このような課題に対応するためには、緊急対応能力の強化に加え、都市計画や BCP におけるリスク評価のさらなる深化が必要不可欠である。このような背景を踏まえ、本研究ではフィリピンの首都圏であるメトロマニラと、ルソン島に位置する地方都市の一つであるパンパンガに焦点を当てることとする。

³ <https://www.ocd.gov.ph/>

自然災害は、物的損失や経済的損害だけでなく、社会的・人間的なウェルビーイングにも深刻な影響を及ぼしている。フィリピンのマリンデュケ島を対象とした地域の脆弱性評価の指標と手法を提案する研究[21]や、脆弱性と災害リスクを社会的要因や学際的視点から分析し、統合的な対策と理論的枠組みを提案する研究[22][23][24][25]も進展している。これらの研究では、災害は単なる自然現象ではなく、貧困、都市化、気候変動、ガバナンスの失敗等が関与し、人々の脆弱性や社会的要因によって影響が拡大すると指摘されている。また、Venable らの研究では、台風被災後の住宅安全性に関する住民の認識と技術的評価の不一致を指摘し、災害復旧における住民意識の重要性を強調した[26]。さらに、Ong らは、「The Big One」に備える意識形成に関する研究を通じ、脅威に対する深刻度の認識や主観的規範、メディアが住民の災害準備行動を促進する要因であることを示した[27]。

こうした災害リスクに対応するために、レジリエンスの強化が注目されている。米国国立アカデミーはレジリエンスを「不利な出来事に備え、計画し、それを吸収し、回復し、よりうまく適応する能力」として定義し、レジリエンスの強化に投資することが、災害が国や地域社会に与える影響を軽減する方法の1つとしている[28]。また、災害の可能性や強度を表す Hazard(ハザード)、地域がどれだけ被害を受けやすいかを示す Vulnerability(脆弱性)、影響を受ける範囲を指す Exposure(曝露)、災害からどれだけ早く復旧できるかを示す Resilience(回復力)を用いて、以下のように計算される[29][30]。

$$Risk = \frac{Hazard \times Vulnerability \times Exposure}{Resilience} \quad (1)$$

この時、レジリエンスは以下式で表される。

$$Resilience = \frac{1}{\frac{T_f - T_i}{T_i}} \quad (2)$$

T_i は初期復旧時間、 T_f は最終復旧時間を指し、 T_i を短縮する、もしくは完全復旧までの時間 $T_f - T_i$ を最小化することでリスク全体が小さくなる。そのため、回復プロセスを短くし、レジリエンスを高めることで、リスクを軽減することができる。このような背景から、災害分野でのレジリエンスを強化するため、コンピテンシーベースの能力構築プログラムに関する研究[31]や、福祉政策を通じて地域ごとの災害リスク管理能力を向上させる手法の研究[32]、災害が発生した際の事業復旧の分析[33]等がある。また、国連アジア太平洋経済社会委員会(United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific: ESCAP)は、情報通信技術(ICT)の活用がレジリエンス強化に有効であると指摘し、デジタルレジリエンスの重要性を示している[34]。

さらに、Walsh らは、「ウェルビーイング損失」という新たな視点で、災害の影響を評価した結果から、従来の資産損失に基づくリスク評価だけでなく、貧困や福祉損失を考慮した評価が重要であると、これによりリスク管理の介入効果を最大化できることを明らかにした[35]。

これらの研究から、企業は、防災投資を通じて自社のBCPを強化するだけでなく、地域社会のレジリエンスを向上させる活動に積極的に関与することが求められている。Stewart らの研究では、災害対応と復旧における官民パートナーシップ(Public Private Partnership: PPP)の重要性を指摘しており、PPPは、災害後の迅速な対応と復旧を支える基盤として、信頼と協力に基づく関係性の構築が求められている[36][37]。このように、企業が災害リスクに対応するレジリエンスを向上させることは、自社の持続可能性だけでなく、地域社会の安全性と経済的安定性を確保するための重要な手段となる。企業と地域社会の連携による相互のレジリエンス向上こそが、自然災害の影響を軽減し、持続可能な発展を実現するための重要な要素となり得る。

2.4 LP ガスの動向

2011 年、潘基文国連事務総長(当時)は「エネルギーはすべての国の経済開発の根幹にある」とし、「Sustainable Energy for All(SE4All)」イニシアチブ⁴を提唱した。このイニシアチブでは、近代的エネルギーへの普遍的アクセスの達成、エネルギー効率改善ペースの倍増、再生可能エネルギーの割合倍増の三つを目標に掲げており、LP ガスはこれらの目標を達成するための重要なエネルギー資源の一つと位置付けられている。また、2024 年に作成された国際エネルギー機関(International Energy Agency: IEA)の年次報告書によると、世界のガス需要は 2024 年に 2.5%以上増加し、2025 年も同様の成長が見込まれている[38]。また、世界 LP ガス協会(World LP Gas Association: WLPGA)の報告では、発展途上国でのエネルギー貧困解消において LP ガスが重要な役割を果たす可能性があることが示された[39]。

一方、世界ではいまだ約 30 億人が木材、木炭、家畜糞といった従来型燃料に依存しており、年間 160 万～380 万人の早期死亡の原因となっている[40]。実際に、インドのバンガロールで行われた調査では、灯油を使って調理する家庭の女性と子どもは、LP ガスを使って調理する家庭の女性と子どもに比べて、呼吸器系の症状や疾患を発症する可能性が高かったとの結果も報告されている[41]。LP ガスは清潔で効率的な燃料であり、調理や暖房の用途において代替手段を提供することで、屋内外の大気汚染を削減し、健康リスクを軽減する可能性が示されている。また、LP ガスの普及は家事労働の負担を減らし、女性や子どもの生活向上にも寄与する可能性がある[42]。このような LP ガスのメリットから、世界保健機関(World Health Organization: WHO)は、煙による有害な曝露を減らし、直火や伝統的なストーブの使用に伴う火傷や負傷のリスクを軽減するために、LP ガスの普及を推奨している[40]。さらに、IEA は、2030 年までにクリーンな調理環境を実現するために、LP ガスのようなクリーンで効率的、かつ健康的な燃料へ移行する必要がある人口を 12 億人と推定しており、WLPGA は 2012 年に「Cooking For Life」キャンペーンを開始した[43]。このキャンペーンは、従来型燃料から LP ガスへの転換を支援するものであり、官民協力のもとで推進されている。

しかしながら、LP ガスの普及には課題も多い[44]。初期設備の導入費用が 15～60 米ドルと高額であり、特に低所得層にとって経済的な負担となることが指摘されている。また、燃料の補充にかかる費用も普及を阻害する要因となっている。さらに、LP ガス供給地点の地理的な偏在も課題であり、特に地方都市においては、災害時の供給体制が十分に整備されていない現状がある。加えて、LP ガスの使用は火傷や直火による火災リスクの低減に貢献するものの、燃料や機器が正しく操作されず、定期的に点検されない場合には、ガス漏れや爆発といった新たなリスクが生じる可能性がある。したがって、災害発生時には、専門技術者による迅速かつ適切な復旧点検作業が不可欠である。

⁴ <https://www.seforall.org/>

2.5 フィリピンにおける LP ガス供給の早期復旧の重要性

フィリピンは環太平洋火山帯に位置し、地震や火山噴火、台風が頻発する地域であり、災害時の損失が特に大きい。同国では、1990 年のルソン地震[45]や 1991 年のピナトゥボ火山噴火[46]といった甚大な災害が記録されており、災害による人的・物的被害が社会全体に深刻な影響を及ぼしている。また、図 1 世界リスク指標（2020 年）[47]で示す通り、2020 年の世界リスク指標(World Risk Index: WRI)[47]では、フィリピンは世界で 9 番目に災害リスクが高く、アジア諸国では 2 番目となっており、世界的にリスクの高い地域とされている。このような背景の下、LP ガス供給の途絶は住民の生活や経済活動に直結するため、災害対応としての供給の安定性向上は非常に大きな社会的意義を有する。

Rank	Country	Risk
1	Vanuatu	49.74
2	Tonga	29.72
3	Dominica	28.47
4	Antigua and Barbuda	27.44
5	Solomon Islands	24.25
6	Guyana	22.73
7	Brunei Darussalam	22.30
8	Papua New Guinea	21.12
9	Philippines	20.96
10	Guatemala	20.09

図 1 世界リスク指標（2020 年）[47]
World Risk Report 2020 より筆者作成

特に LP ガスは可燃性が高いため、災害時にはガス漏れや火災が発生するリスクが増大する。フィリピンの貧困地域では、床面積が 10 平方メートル未満の建物が 2 階建てまたは 3 階建てであることが一般的であり、木造住宅が隣接して建てられている場合が多い[48]。こうした環境では、ガス漏れが発生した際、複数箇所で爆発や火災が連鎖的に発生するリスクが高まる。これらの二次災害を防ぐためには、日常的な安全教育や啓発活動とともに、災害発生後の迅速な復旧対応が特に重要となる。そのため、地域住民に対して災害時の適切な対応方法を周知するとともに、地域協同組合等のコミュニティでの連携を強化し、供給網の早期復旧を支援する仕組みを整備する必要がある。社会全体の災害レジリエンス向上に向けて、LP ガス供給の迅速化と安全管理を両立するための技術的および組織的な対応が求められている。

2.6 復旧計画におけるルーティングの効率化

復旧計画における効率的なルーティングを扱った先行研究は、災害時の迅速かつ効果的な対応を目指す上で重要な位置を占めている。ルーティングの分野では、期限と時間における制約下での複数拠点のルーティング[49]等、時間的・地理的な制約を考慮し、物資や人員の移動を最適化するモデルに関する研究が進展している。また、災害時の復旧活動に特化した研究として、救命物資の配布における救援ルート最適化[50]や、被災インフラの復旧過程のモデル化[51]、災害による道路網の脆弱性のモデル化[52]、実際の道路データを用いた分析[53][54][55]、電力とガスの共同インフラストラクチャのラストマイル復旧に関する研究[56]が挙げられる。これらの研究は、それぞれ災害における復旧活動の効率化を目指しているが、地域の道路特性やコミュニティ特性に応じた研究は限定的である。例えば、都市部と地方都市ではそれぞれが有する課題と要件が異なることが想定される。具体的には、都市部では、高密度の道路ネットワークが災害時に寸断されることで復旧点検作業の効率は低下するが、迂回ルートがいくつも存在するため、地域の孤立は生じにくい。一方で、地方都市では主要ルートの寸断によって復旧効率が大きく低下することが予想される。本研究では地域の状況を正しく把握し災害時のシミュレーションを行うことでBCPの具体化を支援し、災害発生時における復旧対応の効率化を目指す。さらに、個々のエージェントの行動や相互作用をシミュレーションし、その集団的な結果やシステム全体の挙動を分析する手法であるエージェント・ベース・モデル[57][58]を構築し、復旧の変化をシミュレーションすることで、最適な復旧戦略の立案を目指す。

以上のことから、本研究では、災害における地域のレジリエンスと企業の復旧活動の効率化を統合したアプローチを採用し、以下の3つを目的とする。第一に、地域特性に応じた柔軟かつ持続可能なLPガス供給網の復旧計画を構築し、復旧活動の効率化を図る。第二に、フィリピンの首都圏であるメトロマニラと地方都市のパンパンガを対象とし、復旧計画の適用可能性を検討する。第三に、レジリエンスを考慮した枠組みを提示し、企業の災害対応力を強化するとともに、災害に強い地域社会の形成を促進する。これらの取り組みにより、災害時の効率的な復旧活動に関する新たな知見を提供し、持続可能なエネルギー供給ネットワークの構築に貢献することを目指す。

本研究は、LPガスの分散型エネルギーとしての特性に着目し、一戸単位での点検・修理が可能という特徴を活かして迅速な復旧計画をシミュレーションで検証した点で新規性を有する。従来の災害復旧研究がインフラや地域全体に焦点を当てているのに対し、本研究はLPガス分野における新たな視点を提供する。また、道路ネットワークの寸断率が復旧点検作業に及ぼす影響を定量的かつ段階的に評価し、復旧効率の臨界点を算出する。この具体的な数値を目安とすることで、実務者が復旧計画を立案する際により具体的なBCPの作成が可能となる。車両と徒歩を併用した複数の復旧シナリオを比較分析し、車両が到達困難な場合でも徒歩移動を組み込む計画の効率性を可視化することで、災害時の現実的な対応策として多地域での実用化が期待される。さらに、本研究で提案するシミュレーションやエージェント・ベース・モデルのフレームワークは、災害復旧において地域特性に応じた柔軟な適用を可能にする。このフレームワークは都市型災害や新興国の農村部、インフラ整備が不十分な地域でも迅速なエネルギー復旧策として横展開が可能である。

3. 分析方法

本研究では、災害時における LP ガス復旧点検のルート探索を効率化することを目的として、道路ネットワークデータを基にしたシミュレーションとエージェント・ベース・モデルを構築した。分析では、LP ガス事業者の車両および徒歩による復旧活動を考慮し、複数のシナリオを比較することで、寸断状況に応じた復旧計画の効率性を評価する。本章では、本研究で採用した分析方法およびデータ処理手法について説明を行う。

3.1 分析の構成

本研究は、災害時における LP ガス事業者の復旧活動効率化を定量的に評価し、BCP の策定を支援することを目的とする。図 2 BCP の策定・運用サイクルで示す通り、BCP の策定・運用サイクルにおける「BCP の準備、事前対策を検討する」、「BCP を策定する」のフェーズにおいて、定量的な BCP 策定の支援を目指す。

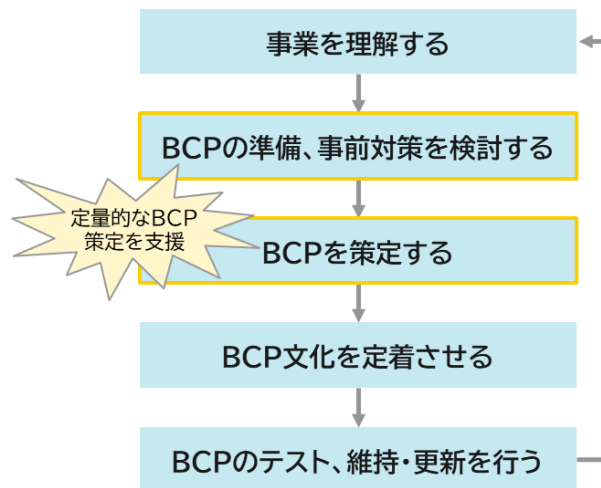


図 2 BCP の策定・運用サイクル
(中小企業 BCP 策定運用指針[59]より筆者作成)

本研究の分析では、以下の 4 つのステップを設けた。第一に、道路ネットワーク特性の基礎分析を実施し、実際の道路状況の把握や特性の違いを把握した。第二に、グリッドモデルを用いて道路寸断が復旧効率に与える影響を基礎的に評価した。これは、シンプルな仮想環境下で寸断率と復旧時間の基本的な関係を把握することを目的とする。第三に、実際の道路ネットワークを用いた分析を実施した。具体的には、OpenStreetMap データ[60][61]を使用して構築したメトロマニラおよびパンパンガの道路ネットワークを対象に、現実的な地理条件を考慮した復旧活動の効率性を評価した。この分析は、実世界の地理的制約が復旧活動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。第四に、エージェント・ベース・モデルを導入し、復旧プロセスの評価を行った。この分析では、道路寸断が地域全体のレジリエンスに及ぼす影響を定量的に評価するとともに、官民パートナーシップや地域ネットワークが災害からの回復プロセスに与える効果を考慮した。これらの分析は、以下のような相互補完的な関係を持つ。グリッドモデル分析では、基礎的な理論枠組みを提供し、次のステップにおける現実的なネットワーク分析の指針を与える。ネットワーク分析では、具体的な地理的条件を考慮し、グリッドモデルから得られた知見を補完する。さらに、レジリエンスに着目したエージェント・ベース・モデルの構築により、復旧効率だけでなく地域全体の復旧力を検証する。このような多層的な分析アプローチを通じて、LP ガス事業者の復旧活動効率を包括的に評価し、定量的な BCP 策定の支援を目指す。

3.2 道路ネットワーク特性の基礎分析

災害時の復旧計画における地域ごとの効率性を評価するためには、対象地域の道路ネットワーク構造を把握することが不可欠である。そのため、まずフィリピンの首都圏であるメトロマニラと、フィリピンの地方都市(Cebu, Davao, Pampanga, Laguna)を対象に、各地域の道路ネットワーク特性を定量的に分析し、各都市の交通構造の違いを明らかにする。

まず、オープンソースの地理情報データプラットフォームである OpenStreetMap を使用して、各都市の道路ネットワークデータを取得した。OpenStreetMap とは、市民ボランティアによって提供される Volunteered Geographic Information(VGI)[62]である。各地のボランティアによって作成されたデータではあるため完全性を担保するのは難しいが、精度についてはほとんどの国で精度が 60% を超え、フィリピンにおける精度は 60-80%となっている[63]。

その後、取得したデータに基づき、ノード数、エッジ数、ノード密度等の指標を用いて道路ネットワークの構造を示し、都市ごとの道路ネットワーク特性を整理することで、地域特性の差異を定量的に示した。

3.3 基本モデルによる復旧活動時間の評価

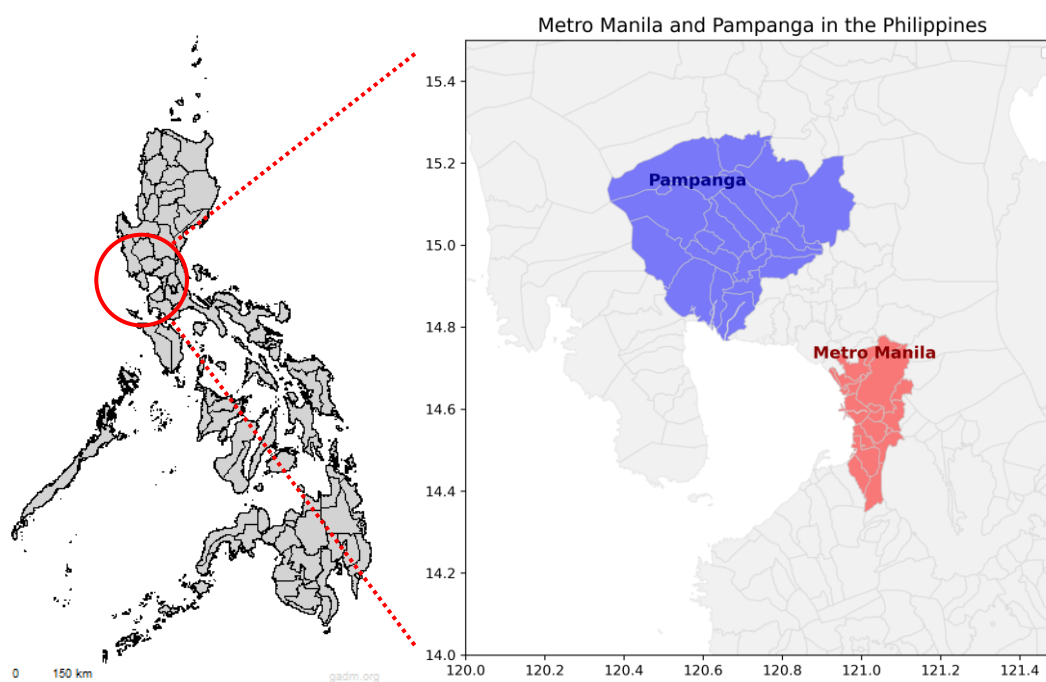


図 3 メトロマニラとパンパンガの地図[64]

本研究では、災害時における LP ガス復旧点検作業の効率化に際し、道路寸断の影響を基礎的に評価するため、都市ごとのグリッドモデルを構築し、シミュレーションを実施した。まず、フィリピン国内で都市部と地方都市を代表する 2 つの地域として、フィリピン諸島の中で最も面積の大きな島であるルソン島に位置する、メトロマニラとパンパンガの 2 都市を選定した。メトロマニラはマニラ市をはじめとする 17 の行政地域の集合体を指し、高密度な人口、複雑な道路ネットワーク、商業および産業の中心地として特徴づけられ、フィリピンの首都圏として災害時の復旧効率がフィリピン全体の経済および社会に与える影響が大きい。一方、パンパンガは都市化が進む地方都市であると同時に台風や洪水等の災害が頻発する地域である。両地域は熱帯気候下にあり、洪水や

地震といった自然災害のリスクが高いのが特徴であり，都市部と地方都市における道路寸断の影響を比較し，異なる災害リスク環境下での供給復旧モデルを検討するために本 2 都市を選定した．2 都市の位置関係を図 3 メトロマニラとパンパンガの地図[64]に示す．

まず，これらの都市について，面積および人口密度のデータを収集し，都市ごとの推定総人口および世帯数を計算した．2020 年人口・住宅国勢調査によると，フィリピンの世帯平均人数は 4.1 人[65]であるが，今回は計算を簡略化するために 5 人と設定した．また，LP ガス利用世帯率を 40%[66]と設定し，各都市における LP ガス需要世帯数を推定した．都市のモデル化に際しては，各都市を正方形グリッドで表現した．グリッドのセルサイズは都市面積から計算され，これに基づき各都市を均等なセルに分割した．グリッドのノードは需要地点を表し，ランダムに選定したノードに推定需要世帯数を割り当てた．これにより，LP ガス需要が分布するシンプルなモデル環境を再現した．次に，道路ネットワークを構築した．隣接するノード間をエッジで接続し，各エッジには距離情報としてセルサイズを付与した．このネットワークは復旧点検車両が利用可能な道路を表し，後述する道路寸断シナリオの適用により復旧効率への影響を分析可能とした．シミュレーションでは，道路寸断率を 0%から 100%まで 10%刻みで設定し，各シナリオにおいて復旧効率を評価した(図 4 グリッドモデルを用いた道路寸断シナリオのイメージ)．

車両速度は時速 40km と仮定し，グリッド左上隅の固定されたスタート地点から，全ての需要地点を訪問するルートを生じた．ルート生成には最短経路アルゴリズムを使用し，道路寸断により到達不能となる場合には遅延時間を加算した．各シナリオについて 1,000 回の試行を行い，復旧時間の平均値を算出した．最後に，各道路寸断率における平均復旧時間を都市ごとにグラフ化し，寸断率の変化が復旧効率に与える影響を比較分析した．これにより，都市ごとの特性や道路寸断の影響を定量的に示すことが可能となり，災害時の道路寸断が LP ガスの復旧点検作業に与える影響を簡易に評価することができるようになった．本分析の結果は，都市ごとの異なる特性を考慮した効率的な復旧戦略の基本設計を支援するものである．



図 4 グリッドモデルを用いた道路寸断シナリオのイメージ

3.4 実際の道路ネットワークを用いた復旧活動効率の評価

道路ネットワークの寸断は、災害時のエネルギー供給に重大な影響を与える。特に、LP ガスに代表される重要なエネルギー資源の供給確保は、被災地の生活再建や持続可能な復興計画において重要な課題である。前項のグリッドモデルは、寸断率と復旧効率の基礎的な関係を理解する上で重要な役割を果たし、実際の道路ネットワーク分析ではそれを現実の条件に適用し、地域ごとの特性を考慮した復旧計画の具体化に役立つ。本研究はこれらのアプローチを組み合わせることで、災害時における効率的な復旧計画の提案を目指した。

本分析では、まずメトロマニラとパンパンガの中心座標をそれぞれ設定し、OpenStreetMap のデータを用いて半径 1km の範囲内に存在する道路データを取得した。このデータから、車両が利用可能なネットワークと徒歩移動可能なネットワークを生成し、それぞれのエッジに距離情報を付与した。次に、道路ネットワーク内に LP ガス需要を割り当てた。対象エリアの人口密度および面積データを基に推定人口を計算し、前項と同条件で世帯数の算出を行い、需要ノードとしてランダムに選ばれたノードに需要量を割り当てた。道路寸断の影響を評価するため、寸断率を 0% から 100% まで 10% 刻みで設定し、それぞれの条件下でランダムにエッジを削除することで道路寸断を再現した。図 5 パンパンガの道路寸断イメージ[60][61]は、シミュレーション対象エリアの交通網がどのように変化するかを示したものである。指定されたエリアの道路ネットワークを青い線、各シミュレーションにおいてランダムに寸断した道路区間を赤い線で示した。この削除されたエッジの割合を寸断率として定義し、各寸断率における移動時間を算出した。車両が利用可能な場合は最短経路を基に移動時間を計算し、車両が到達できない場合は徒歩ネットワークまたは直線距離を基に点検時間を含めた移動時間を算出した。各寸断率で 30 回の試行を行い、平均復旧時間を算出した。最後に、各寸断率での平均復旧時間を都市ごとに集計し、グラフ化することで、寸断率の増加が復旧点検作業に与える影響を示した。

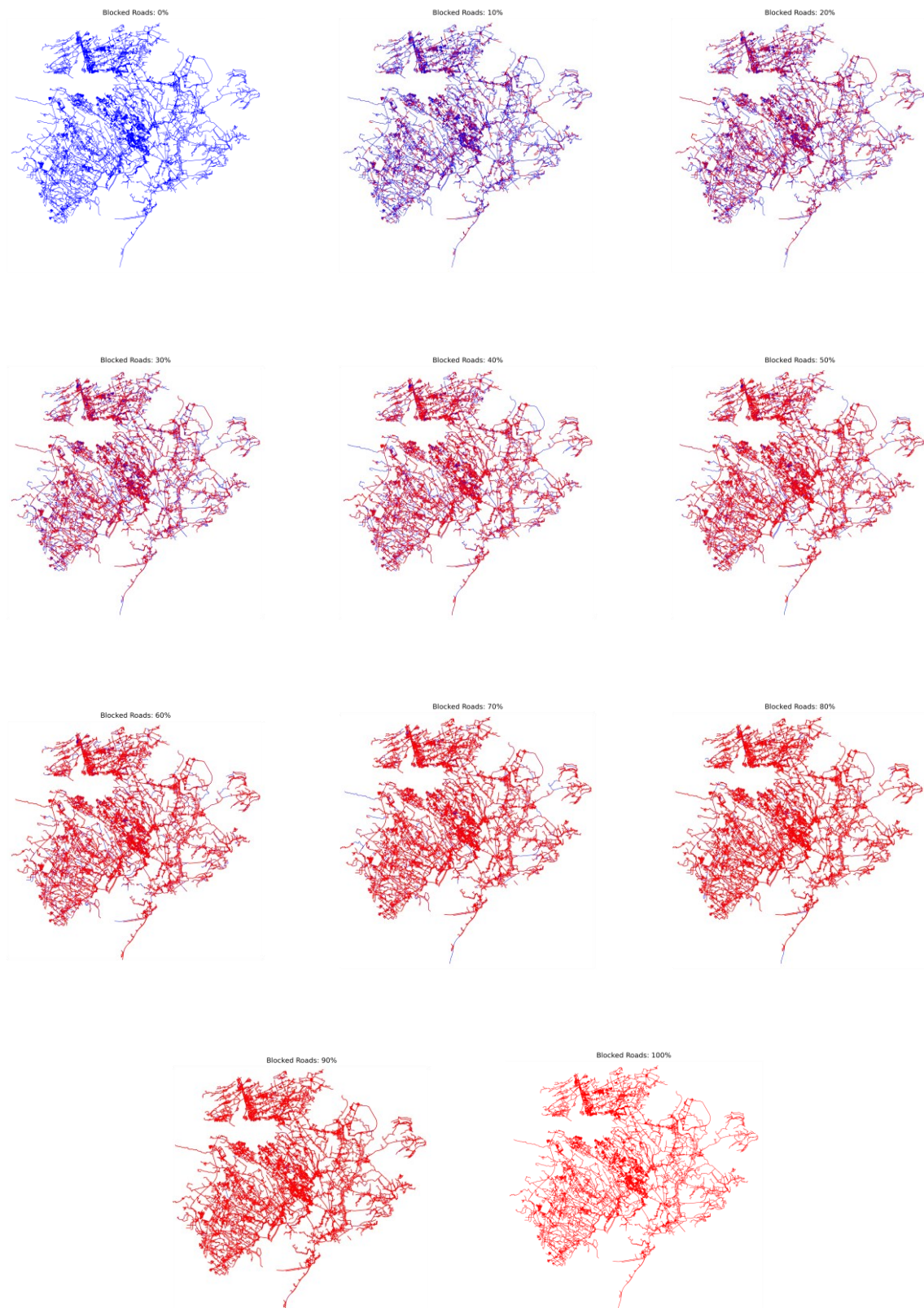


図 5 パンパングの道路寸断イメージ[60][61]

3.5 レジリエンスを考慮した復旧プロセスの評価

本研究では、メトロマニラとパンパンガをモデルケースとして、道路寸断の影響と地域ネットワーク強度、および官民パートナーシップ強度の関係性を明らかにする。本研究では、道路寸断シナリオの構築、ならびにエージェント・ベースのシミュレーションを組み合わせることで、災害時のレジリエンスの挙動を分析する。

まず、基準としてメトロマニラとパンパンガの LP ガス販売店を 1 つずつ選定し、半径 d が 10km の円形エリアを復旧点検作業の対象エリアと仮定する。このエリアの面積 A は $A = \pi d^2$ 、人口密度 ρ より、総人口 P は $P = \rho \cdot A$ と推定される。対象地域内で LP ガスを利用する世帯数 H は、平均世帯人数が 4.1 人[65]であることから簡易的に $h=5$ とおき、LP ガス利用世帯の割合 $r=0.4$ [66]を用いて次のように算出される。

$$H = \frac{P}{h} \cdot r \quad (3)$$

道路ネットワークは、交差点や道路の端点をノード集合 V 、道路の接続をエッジ集合 E として、それらで構成されるグラフ $G = (V, E)$ として表現される。災害時のシナリオをシミュレーションするために、道路寸断率 b を設定し、ランダムにエッジを削除することで、改変ネットワーク $G' = (V, E')$ を生成する。改変後のエッジ集合 E' は以下の式で定義される。

$$|E'| = \left(1 - \frac{b}{100}\right) \cdot |E| \quad (4)$$

ここで、 $|E|$ は元の道路ネットワーク G のエッジ数、 $|E'|$ は寸断後のネットワーク G' のエッジ数を表す。この操作により、災害時に発生する道路寸断をシミュレーションし、ネットワークのレジリエンスを評価する基盤を構築する。

次に、エージェントは、初期ノードから LP ガス需要ノードへ移動しながらレジリエンス R を更新する。レジリエンス R_t は以下の式で定義される。

$$R_{t+1} = R_t + \alpha\beta \left(1 - \frac{b}{100}\right) (1 - R_t) + noise \quad (5)$$

ここで、 α は地域ネットワーク強度、 β は官民パートナーシップ強度、 $noise$ はランダムノイズである。本研究では、各地域のネットワーク強度 α を、道路ネットワークのノード密度を基準として計算した。ノード密度は、各地域の道路ネットワークにおけるノード数(交差点や道路の端点の数)を地域面積で除することで得られる指標である。その後、各地域のノード密度を、最大ノード密度で割ることで相対スケールを作成した。このスケール化により、各地域のノード密度が全体の中でどの程度の割合を占めるかを明確にすることができる。相対ノード密度は次式で表される。

$$\text{Relative Node Density} = \frac{\text{Max Node Density}}{\text{Node Density for Region}} \quad (6)$$

本研究では、地域のノード密度が高いほど住民間の結びつきが強固であり、社会関係資本が蓄積されやすいという仮説のもと、地域ネットワークの強度を評価する。

一般に、都市部では人口密度が高いものの、高層マンションの増加や公共交通機関の発達により、近隣住民間の直接的な交流が希薄になり、物理的な近接性や物理的接触の増加が必ずしも地域ネ

ネットワークの強度に直結しない場合がある。しかし、新興国においてはこの状況が異なり、物理的な近接性や物理的接触の増加に加えて SNS の普及がオフラインでのコミュニケーションを補完することで、情報共有の速度を加速させ、社会関係資本の蓄積に寄与する可能性が高い。特に、人口が集中する地域では、大量の多様な情報が集積・交換されることで、従来の地域共同体とは異なる形での社会的結びつきが形成されている。フィリピンは世界的に見ても Facebook の利用者数が極めて多く[67]、同プラットフォームは単なる SNS にとどまらず、社会インフラとして機能している。実際に、Facebook 上では行政からの公式情報発信、住民間の助け合い、災害時の支援ネットワークの形成等が活発に行われており、オンラインネットワークがオフラインのネットワークを強化する重要な役割を担っている。この点を踏まえると、フィリピンにおいてはノード密度が高い地域ほど、人口が多く、SNS を介した情報流通が活発であり、それによって地域ネットワークも強固になる可能性が高い。

このような背景を考慮し、本研究では、相対ノード密度を基にして α の値を 0.1 から 0.9 の範囲でスケール化した。ノード密度が最も高い地域では $\alpha = 0.9$ 、最も低い地域では $\alpha = 0.1$ と設定される。今回は計算の結果、メトロマニラの α が 0.9、パンパンガの α が 0.3 となり、この値を使用した。

$$\alpha = 0.1 + (\text{Relative Node Density}) \times (0.9 - 0.1) \quad (7)$$

官民パートナーシップ強度については、メトロマニラは首都圏であり、官民連携に必要な行政能力や資源が優位にある可能性があるが、スラム等一部地域では連携のムラがある可能性も考えられるため、官民パートナーシップはどちらの地域とも 0.3 から 0.7 まで 0.1 ずつ実行した。

各時間ステップにおいて、エージェントのレジリエンスを集計し、平均レジリエンス $\overline{R}_t$ を以下の式で計算する。

$$\overline{R}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{i,t} \quad (8)$$

4. 実行結果・考察

4.1 道路ネットワーク特性の基礎分析

メトロマニラとパンパンガを中心に、フィリピン主要都市の道路ネットワーク特性を比較した結果を表 1 都市間の道路ネットワーク基礎統計の比較に示す。

表 1 都市間の道路ネットワーク基礎統計の比較

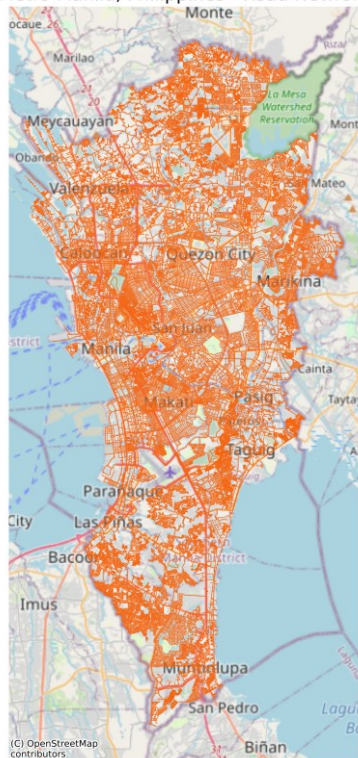
地域	ノード数	1エッジあたりの長さの平均(m)	総道路延長(km)	交差点数	1ノードあたりの道路数の平均	ノード密度(ノード/m ²)	道路延長密度(m/m ²)
Metro Manila	59,639	92	13,800	48,165	2.78	4,207	0.97
Cebu	25,673	250	15,011	16,913	2.37	115	0.07
Davao	24,637	138	8,469	18,206	2.56	579	0.20
Pampanga	39,731	122	11,944	28,701	2.52	928	0.28
Laguna	37,365	107	10,277	28,868	2.63	659	0.18

メトロマニラは、ノード数および交差点数がパンパンガを大きく上回り、交通接続性が高いことが示され、1 エッジあたりの長さの平均(m)から、メトロマニラでは短い道路が密に接続されていることが分かった。ノード密度および道路延長密度はメトロマニラで特に高く、他都市との顕著な差が見られ、メトロマニラが集約的な都市構造を持つのに対し、他都市では広域分散型または単純な道路のネットワーク構造が見られた。これらの結果から、メトロマニラは高密度かつ複雑な道路ネットワークを有している一方で、他都市は低密度でシンプルな道路構造を持つことが明らかとなった。これらの結果は、メトロマニラでは災害時に迂回ルートでの復旧が可能な一方、パンパンガでは幹線道路の寸断が広範囲に影響を及ぼす可能性を示している。

次に、メトロマニラとパンパンガにおける道路ネットワークと交差点密度ヒートマップの可視化結果を図 6 メトロマニラとパンパンガの道路ネットワークの比較[60][61]、図 7 メトロマニラとパンパンガにおける交差点密度のヒートマップ[60][61]に示す。メトロマニラは、全体的に高い交差点密度を示しており、特に商業活動や交通の中心地では密度が極めて高く、細分化された道路網が特徴である。一方で、パンパンガは地方都市として、中心部と郊外でネットワークの特性が大きく異なり、都市中心部では交通需要に応じた計画が見られる一方、郊外では簡素な構造を維持していることが明らかとなった。

メトロマニラの高密度な交差点や複雑な道路網は、商業活動を効率的に支える一方で、交通渋滞や災害時の混乱を引き起こす可能性がある。これに対し、パンパンガの道路ネットワークは広範囲へのアクセスを重視した構造となっており、都市部では比較的効率的な交通が見込まれる一方、郊外では道路寸断時のアクセス性の向上が課題となる可能性がある。

Metro Manila, Philippines - Road Network



Pampanga, Philippines - Road Network



図 6 メトロマニラとパンパンガの道路ネットワークの比較[60][61]

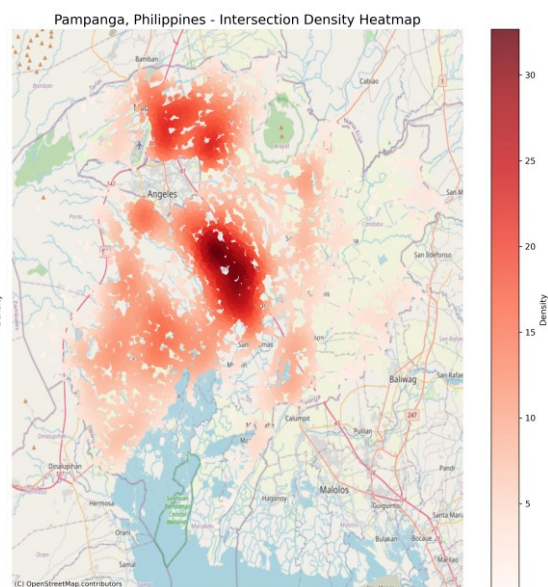
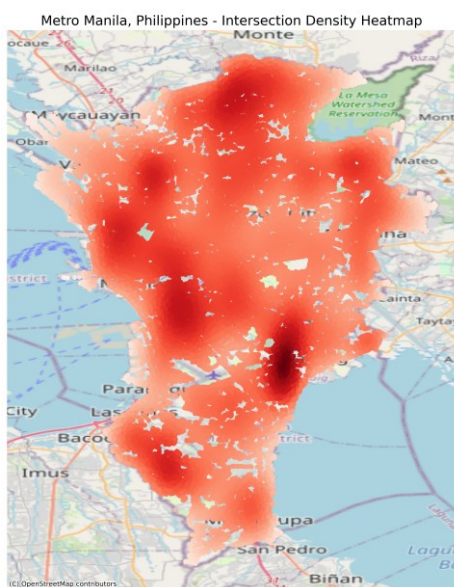


図 7 メトロマニラとパンパンガにおける交差点密度のヒートマップ[60][61]

4.2 基本モデルによる復旧活動時間の評価

シミュレーションの結果を図 8 道路寸断シナリオごとの都市別の復旧評価に示す。オレンジの実線はメトロマニラ、紺色の破線はパンパンガを表し、x 軸は道路寸断率、y 軸は平均復旧時間を示している。

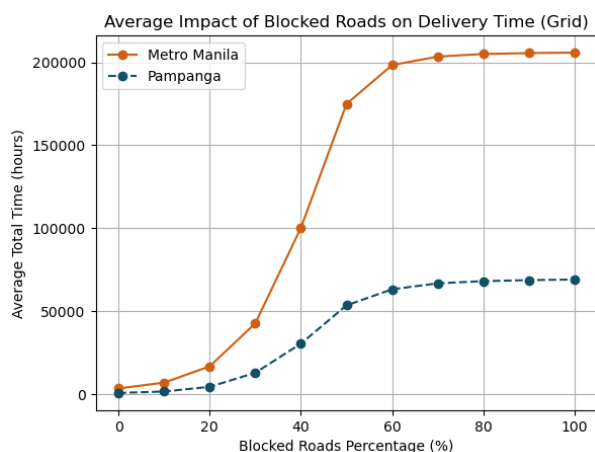


図 8 道路寸断シナリオごとの都市別の復旧評価

メトロマニラでは道路寸断率が増加するに従い、平均復旧時間が急激に増加する傾向がみられた。特に、道路寸断率が 60%以上に達すると、多くの需要地点への到達が困難となり、復旧活動の効率が著しく低下することが確認された。一方、パンパンガでは、道路網が比較的疎であるにもかかわらず、道路寸断率の増加に伴う影響はメトロマニラと比べて緩やかであった。

グリッドモデルは、単純化された環境下で基礎的な関係を分析するのに適しているものの、均一な道路配置や需要分布を仮定するため、都市特有の道路ネットワーク構造や地理的制約を反映することは難しい。そのため、今回のパンパンガのような道路網が簡素で基幹道路への依存度が高い地域では、基幹道路が寸断されると復旧効率が大幅に低下すると考えられるが、グリッドモデルではその特性を再現しきれないことが課題として浮かび上がった。これらの課題を補うため、次項では実際の道路ネットワークデータを使用した分析を行い、都市ごとの道路密度や寸断率の変化が復旧効率に与える影響を、現実的な条件下で評価することとした。

4.3 実際の道路ネットワークを用いた復旧活動効率の評価

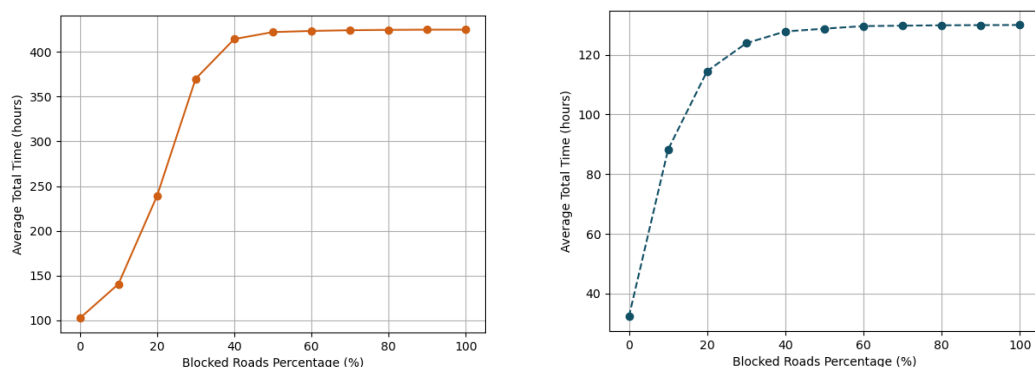


図 9 メトロマニラ(左)とパンパンガ(右)の道路寸断率が復旧時間に与える影響

メトロマニラとパンパンガにおける復旧時間の変化を図 9 メトロマニラ(左)とパンパンガ(右)の道路寸断率が復旧時間に与える影響に示す。

本分析では、メトロマニラおよびパンパンガにおける LP ガス供給ネットワークの復旧効率を評価し、道路寸断率と復旧時間の関係を定量的に明らかにした。その結果、両都市において寸断率が 10%から 40%の範囲で復旧時間が顕著に増加し、40%を超えると復旧時間が飽和する傾向が確認された。

メトロマニラにおける分析結果から、本条件における寸断率 10%の復旧時間は最大復旧時間の約 35%であった。これは、同都市が高密度かつ複雑な道路ネットワークを有しているため、初期段階の寸断に対して代替ルートの確保が容易であり、復旧点検作業の遅延が最小限に抑えられるためと考えられる。そのため、都市部における災害復旧計画では、複数の迂回ルートを考慮した冗長性の高いネットワーク設計が有効であることが示された。一方、パンパンガでは、寸断率 10%時の復旧時間が最大復旧時間の約 65%に達しており、低密度で単純な道路ネットワーク構造が災害復旧の遅延要因となることが明らかとなった。この結果は、地方都市においては主要道路への依存度が高く、寸断の影響が広範囲に及ぶことを示している。したがって、地方都市における災害対応策として、道路ネットワークの冗長性向上や供給拠点の分散配置が重要であると考えられる。

本分析により、都市特性に応じた災害リスクの特定と対応策の検討が、復旧効率の向上に不可欠であることが確認された。特に、最大復旧時間に対する寸断率 10%時の復旧時間の割合を指標化することで、異なる都市に対する災害復旧計画への応用が可能となる。本指標を活用することで、都市ごとのネットワーク特性に応じた最適な BCP の策定が期待される。

本研究の結果は、都市部および地方都市における異なる災害復旧戦略の必要性を明確に示しており、データ駆動型の復旧計画立案に寄与するものである。今後の研究では、さらなる地域特性の反映とともに、異なる災害シナリオへの適用可能性を検証し、復旧効率の向上に向けた実践的な方策を提案する必要がある。このような地域特性の違いを定量的に把握することは、都市ごとの災害復旧計画において考慮すべき重要な要素であり、地方都市や郊外では、初期段階での寸断リスクを特定し、要所となるルートや交差点を優先的に保全することが必要であり、首都圏や大都市では、高密度なネットワークの特性を活かし、代替ルートの確保や冗長性の向上を目指した戦略が有効であると考えられる。

4.4 レジリエンスを考慮した復旧プロセスの評価

本研究では、道路ネットワークの寸断が LP ガス供給ネットワークのレジリエンスに与える影響を分析するため、メトロマニラおよびパンパンガを対象地域とし、地域ネットワーク強度と官民パートナーシップ強度を変数とし、異なる道路寸断率におけるレジリエンスの推移を時系列的に評価した。図 10 メトロマニラにおける道路寸断率とレジリエンスの関係、図 11 パンパンガにおける道路寸断率とレジリエンスの関係に、各道路寸断率における平均レジリエンスの時間変化を示す。

本条件では、道路の寸断率が増加するにつれて、レジリエンスの向上速度が低下し、最終的なレジリエンスの到達値も低くなることが確認された。道路の寸断率が低い場合、エージェントの移動が容易なため、レジリエンスが迅速に向上する。一方、寸断率が高くなると、エージェントの移動が制限され、レジリエンスが停滞する傾向が見られた。特に、寸断率が高い場合には、レジリエンスの初期値が大幅に低下し、その後の回復も遅滞する傾向が見られた。また、地域ネットワーク強度および官民パートナーシップ強度が高い条件下では、レジリエンスの回復速度が相対的に向上することが確認された。特に、メトロマニラにおいて $\alpha = 0.9$ および $\beta = 0.7$ の条件では、道路寸断率が 60%程度までの範囲において、レジリエンスが早期に 1.0 に近づく傾向を示した。一方で、 $\alpha = 0.3$ および $\beta = 0.3$ の条件下では、道路寸断率が低い場合であってもレジリエンスの回復が緩やかであることが確認できた。今回は、首都圏と地方都市で道路寸断におけるレジリエンスの全体的な挙動は類似していたが、 α や β 、そしてその重みの算出方法の研究を進めることで、より具体性のある BCP の策定が実現できる。例えば、地域の特性を把握し、備蓄倉庫の確保等の地域で支えあうコミュニティ強度を高める施策と、地方自治体との協力体制強化等の官民パートナーシップ強度を高める施策を比較し、災害発生確率やその被害を考慮して、地域特性に基づいたシナリオ分析を行うことで、BCP のさらなる具体化と深掘りが可能になる。本研究では、災害発生時の復旧において地域ネットワーク構造や官民パートナーシップの具体的な影響を直接明らかにできなかったが、一部の結果は、これらの要素が復旧の迅速化に寄与する可能性を示唆しており、今後の研究でより深い検証が期待される。これにより、LP ガス事業者の BCP の策定・改善に寄与し、地域からの信頼向上に伴う企業価値の向上を目指す。

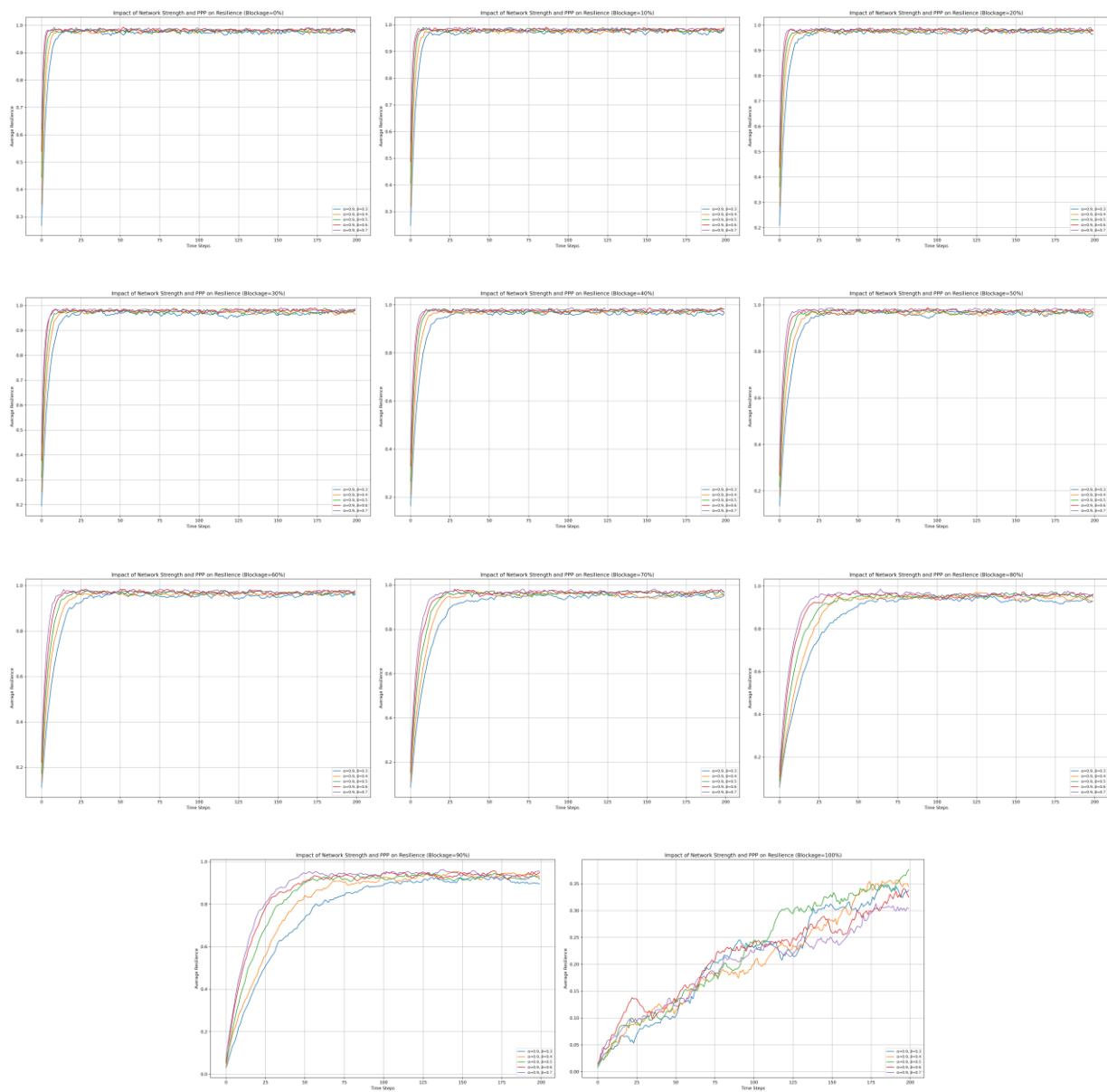


図 10 メトロマニラにおける道路寸断率とレジリエンスの関係

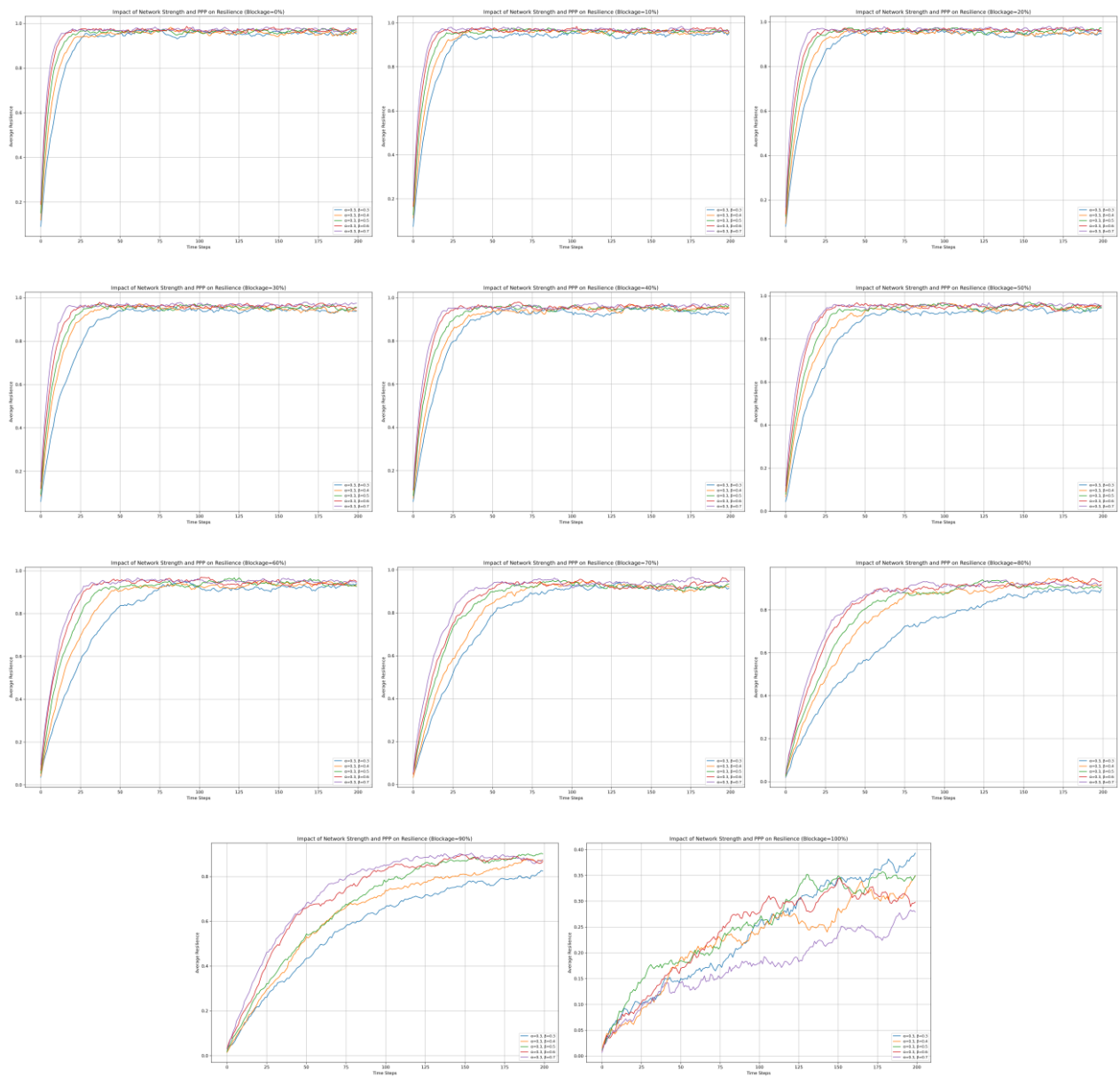


図 11 パンパンガにおける道路寸断率とレジリエンスの関係

4.5 定量的な BCP の検討

これまでの研究の分析結果を踏まえ、災害時における LP ガス供給のレジリエンス向上に向けた応用例として、都市部および地方都市の特性を考慮した施策が求められる。まず、メトロマニラのような都市部においては、高密度かつ複雑な道路ネットワークが存在するものの、災害発生時には迂回ルートができる可能性が高い。一方で、交通渋滞が深刻な課題となる可能性があるため、バイクによる小型・軽量の LP ガスボンベの運搬を可能とする供給システムの開発が有効であると考えられる。加えて、リアルタイム交通情報を活用し、最適な配送ルートを迅速に特定するシステムを導入することで、輸送の効率化を図ることができる。これにより、都市部における迅速な供給対応が可能となり、災害時の供給遅延を最小限に抑えることが期待される。

次に、パンパンガのような地方都市においては、道路ネットワークの低密度性および幹線道路の寸断が復旧効率に与える影響が大きい。そのため、供給網の強化策として、小規模かつ分散型の供給拠点の設置が重要である。地方都市の疎な道路ネットワークにおいて、幹線道路が寸断された場合でも、各地域において独立した供給機能を確保するための小規模移動式タンクステーションの開発が求められる。これにより、広範な地域において安定したガス供給が可能となり、被災地の復旧支援に寄与することができると考える。

また、官民パートナーシップの強化も不可欠である。都市部では既に一定の官民連携が確立されているものの、地方都市においては未成熟な地域が多い。したがって、政府と民間企業、さらには NGO や国際機関との連携を強化し、災害備蓄ポイントの設置や迅速な物資供給ネットワークの整備を推進することが必要である。加えて、地域住民やボランティアチームとの協力体制を構築し、平時からの訓練や災害時の即応体制を確立することで、より強固な供給基盤を構築することが可能となる。

以上の施策を統合的に実施することで、都市部と地方都市それぞれの特性に応じた適切なガス供給戦略を策定することができ、災害時の供給途絶リスクを低減させるとともに、迅速な復旧を実現するための実践的な知見を提供することが期待される。

本研究の成果をフィリピンの防災計画である Republic Act No. 10121[12]と整合させ、災害時における LP ガス供給ネットワークの復旧戦略を実効性のある BCP として確立するためには、政府機関、地方自治体、および民間事業者との協力体制の強化が不可欠である。Republic Act No. 10121 の枠組みに基づき、官民連携の強化、データ駆動型の復旧計画の効率化、ならびにエージェント・ベース・モデルの精緻化を通じた実践的な BCP 策定の必要性が示唆される。

まず、官民連携の強化については、Republic Act No. 10121 において官民の協力が防災および復旧活動における重要な柱として位置づけられていることから、LP ガス事業者と地方自治体、NDRRMC との連携を強化することが求められる。特に、供給ネットワークの復旧優先順位の明確化、役割分担の明確化、ステークホルダーとの調整プロセスの確立が重要である。これにより、災害時の迅速な意思決定を可能とし、供給の中断を最小限に抑えることが期待される。また、地域特性に応じた BCP 策定を標準化することで、Republic Act No. 10121 が掲げる「Community-Based Disaster Risk Reduction and Management(CBDRRM)」の理念に即した、より実効性の高い計画が策定可能となる。さらに、定期的な防災訓練の実施を通じて、シミュレーション結果に基づくフィードバックループを確立し、BCP の実効性を継続的に向上させる必要がある。

次に、データ駆動型アプローチによる復旧計画の効率化が求められる。Republic Act No. 10121 の要件に基づき、復旧戦略の効果を最大化するためには、リアルタイムモニタリングの導入が不可欠である。災害発生時に供給ネットワークの状態をリアルタイムで把握し、事前に策定した定量的な復旧計画をもとに現状に応じた適切な復旧計画を実行することで、迅速な供給の再開が可能となる。また、シミュレーションに基づくリスク指標の定量化により、各都市の道路ネットワークの脆弱性を評価し、寸断率と復旧効率の関係を標準化することで、他地域への応用が可能となる。

最後に、エージェント・ベース・モデルの精緻化と運用の改善が重要である。本研究では、LP ガ

ス供給ネットワークの復旧効率を評価するためにエージェント・ベース・モデルを導入したが、実際の災害状況では交通状況の変動、人的要因の影響、供給拠点の稼働状況等、多様な不確実性が存在する。これらの要素をより精緻に反映させるためには、実際の災害対応データを活用したパラメータの調整が不可欠である。また、異なる災害シナリオへの適応性を高めるため、地震だけでなく台風や洪水、火山噴火等、フィリピン特有のリスク要因を考慮したシミュレーションモデルの開発が求められる。さらに、災害対応におけるオペレーターの意思決定プロセスや供給体制の変化等、人的要因をモデルに組み込むことで、より実践的な復旧計画の策定が可能となる。

以上のように、本研究の提案する復旧戦略は、フィリピンの防災計画 Republic Act No. 10121 と整合し、政府および民間事業者との連携を強化することで、災害時の LP ガス供給のレジリエンスを高めることを目的としている。官民連携の強化、データ駆動型アプローチの活用、エージェント・ベース・モデルの精緻化を通じて、実務への応用可能性を高めるとともに、持続可能な防災体制の構築に寄与することが期待される。

5. 結論・今後の課題

5.1 研究のまとめ

本研究では、災害時の LP ガス供給ネットワークの復旧効率を定量的に評価し、地域特性を考慮した復旧計画の枠組みを提案した。災害時における LP ガス供給ネットワークの復旧計画を効率化するため、道路寸断率が与える影響を定量的に評価し、都市特性や地域条件を考慮した分析を行った。道路ネットワーク特性の基礎分析、グリッドモデル、実際の道路ネットワーク、エージェント・ベース・モデルという 4 つのアプローチを採用することで、LP ガス事業者が災害時の復旧活動におけるシナリオを多角的に分析した。

道路ネットワーク特性の基礎分析では、メトロマニラは高密度かつ複雑な道路ネットワークを有している一方で、他都市は低密度でシンプルな道路構造を持つことが明らかとなり、都市の道路の特性に大きな違いがあることを確認できた。グリッドモデルによる分析では、道路寸断率が一定の割合を超えると復旧効率が急激に低下することが確認され、実際の道路ネットワークを用いた分析では、都市間の特性差が明らかとなり、パンパンガのような疎な道路ネットワークを持つ地域では、初期段階の道路寸断が復旧効率に非常に大きな影響を及ぼすことが分かった。最後に、今回のエージェント・ベース・モデルの結果は、地域ネットワーク構造や官民パートナーシップが災害復旧に果たす役割を直接証明するものではないが、一部のシミュレーション結果から、これらの要素が復旧プロセスを支える可能性があることを確認できた。

本研究の新規性は、災害時の効率的な復旧計画を支援するデータ駆動型アプローチを構築するとともに、都市部と地方都市における道路ネットワーク特性の違いを考慮した柔軟な復旧戦略を提示する点にある。本研究では、災害時の LP ガス供給復旧計画において、都市特性や道路寸断率が与える影響を定量的に示すことができ、データに基づいた定量的なシナリオ作成および BCP 策定を可能とし、災害時の迅速かつ効果的な復旧計画の実現に貢献するものである。

さらに、インフラの迅速な復旧は、住民の負担を軽減し地域や顧客からの信頼を高めることで、LP ガス事業者の競争力強化や企業価値向上にも寄与する。本研究で得られた知見は、災害リスクが高い地域における持続可能なエネルギー供給ネットワークの構築に向けた新たな視点を提供し、業界全体の防災意識の向上と地域社会からのロイヤリティ向上において重要な貢献を果たすものである。

5.2 今後の展望

本研究では、災害時における LP ガス供給ネットワークの復旧効率を定量的に評価し、地域特性を考慮した定量的な BCP 策定の枠組みを提案した。しかし、研究の適用範囲と実務への応用において、実際の企業との連携による BCP の深化の必要性が挙げられる。本研究では、災害時の復旧効率をシミュレーションによって分析し、地域特性に応じた計画の重要性を示した。しかし、実際の事業運営においては、供給事業者の経営戦略、リソース配分の優先順位、ならびに関係機関との調整プロセス等、複雑な意思決定要因が関与する。これらの要因を考慮し、現場での運用可能性を高めるためには、企業との連携による BCP 策定プロセスのさらなる深化が求められる。特に、災害発生時の意思決定フローや、各ステークホルダーの役割分担を明確にするとともに、現場からのフィードバックを受け、BCP 改善のための実証的な検証が必要である。また、本研究では、LP ガス供給網の復旧効率を評価するためにエージェント・ベース・モデルを導入し、一定の条件下でのシミュレーションを実施した。しかし、実際の災害状況では、交通状況の変動、人的要因の影響、供給拠点の稼働状況等、多様な不確実性が存在する。これらの要素をより精緻に反映させるためには、政府データや実際の災害におけるデータを活用してパラメータ設定の精緻化および感度分析を行い、異なる災害規模や地理的条件下での適用可能性を検証することが求められる。

本研究をさらに発展させるために、まず、LP ガス事業者と連携し、災害時の状況をより詳細に想定したうえで、複数拠点からの同時復旧や、復旧活動に従事するスタッフの増減を考慮したシミュレーションの実施が今後の課題として挙げられる。現実の災害時には、単一の拠点からの活動に限らず、複数拠点間での連携が重要であるとともに、リソースの限界や動員可能な人員数が復旧効率に直接的な影響を及ぼす。本研究で構築したモデルにこれらの要素を組み込むことで、より現実的かつ柔軟な復旧計画を構築するための基盤が提供されると思われる。加えて、本研究では地震を主な想定災害としたが、台風や洪水、火山噴火等、フィリピンを含む災害多発地域において実際に発生する多様な災害に対応するモデルの構築が必要である。これにより、各災害特有の影響や課題を包括的に評価し、それぞれに適した復旧戦略を提案することが可能となる。

今後の研究では、異なる気候条件や、異なる社会経済構造を持つ地域において、同様の手法を適用することで、本研究の結果を検証し、その汎用性を評価する必要がある。それと同時に、対象地域の地域ネットワーク構造や官民パートナーシップの成熟度がレジリエンスに与える影響を、さらに詳細に調査することが求められる。具体的には、地域における災害の意識や地域でのコミュニティの強度、また政府自治体での取り組みの評価等を定量的に考慮し、変数として組み込むことで、道路特性だけでなく地域としての防災に向けた取り組みをモデルに組み込むことが可能となる。これにより、災害対応の効率化にとどまらず、将来的な防災力の向上やエネルギー供給網全体のレジリエンス強化を目指し、地域住民や自治体との協力体制を促進することで、持続可能な災害対応モデルを構築することが期待される。

これらの展望を踏まえ、今後の研究では、より現実的で多角的なモデルの構築を目指すとともに、地域の取り組みや地理的差異を反映した復旧計画の効率的な策定を進めていくことが重要である。本研究のさらなる発展は、災害時のエネルギー供給網のレジリエンス向上に寄与するとともに、企業の社会的価値と経済的価値の両立を実現する上で重要な意義を持つ。

参考文献

- [1] Ministry of Economy, Trade and Industry: 災害に強い分散型エネルギー, LP ガスの利活用, (2021). Available at: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/lpgas.html>, Accessed January 5, 2025.
- [2] 総合資源エネルギー調査会, 高圧ガス及び火薬類保安分科会, 液化石油ガス部会: 東日本大震災を踏まえた今後の液化石油ガス保安の在り方について～真に災害に強いLPガスの確立に向けて～, (2012)
- [3] Bélaïd, F., Awasthy, A., Hejazi, M., Sedaoui, R., Ansari, M., Ratka, S.: Role of LPG in enabling a just and inclusive energy transition in Africa and the Arab region. In: *Proceedings of IFESD*, Bangkok, December 2-4 (2023)
- [4] Benson, C., Twigg, J., Rossetto, T.: Tools for mainstreaming disaster risk reduction: Guidance notes for development organisations. *ProVention Consortium* (2007)
- [5] International Strategy for Disaster Reduction: Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters. Extract from the final report of the World Conference on Disaster Reduction (A/CONF.206/6) (2005)
- [6] APEC: CEBU Declaration on East Asian Energy Security (2007)
- [7] APEC Energy Working Group: APEC energy resiliency guidelines. *APEC Project: EWG 07 2020A* (2023)
- [8] Asian Disaster Reduction Center: Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*, Geneva (2015)
- [9] Institutional Investors Group on Climate Change: Building resilience to a changing climate: Investor expectations of companies on physical climate risks and opportunities. *IIGCC* (2021)
- [10] 経済産業省 経済産業政策局: 「レジリエンス社会の実現」に向けた産業政策の方向性; 経済産業省, (2023)
- [11] 内閣府: 令和元年度 企業の事業継続及び防災の取組に関する実態調査; 内閣府, (2020)
- [12] Republic of the Philippines: Republic Act No. 10121: Philippine Disaster Risk Reduction and Management Act of 2010. *Official Gazette* (2010). Available at: <https://www.officialgazette.gov.ph/2010/05/27/republic-act-no-10121/>, Accessed January 5, 2025.
- [13] Asian Disaster Preparedness Center (ADPC): Strengthening Disaster and Climate Resilience of Small & Medium Enterprises in Asia. *SME Resilience Survey Results*. ADPC (2015)
- [14] Philippine Statistics Authority: Highlights of the National Capital Region (NCR) Population 2020 Census of Population and Housing (2020 CPH). *Press Release*, Reference No. 2021-314 (2021)
- [15] Azul, K. M.: The Big One: The Magnitude 7.2 West Valley Fault Earthquake. *University of the Philippines Diliman* (2018)
- [16] Department of Science and Technology, Science and Technology Information Institute: Prepare for “The Big One”: DOST makes Valley Fault atlas available online. (2016). Available at: <https://stii.dost.gov.ph/442-prepare-for-the-big-one-dost-makes-valley-fault-atlas-available-online>, Accessed January 5, 2025.
- [17] World Bank: Philippines: World Bank approves funding to protect public buildings against earthquakes in Metro Manila while strengthening emergency preparedness and response. *Press Release* (June 2, 2021). Available at: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2021/06/02/philippines-world-bank-approves-funding-to-protect-public-buildings-against-earthquakes-in-metro-manila-while-strengthen>, Accessed January 5, 2025.
- [18] Philippine Institute of Volcanology and Seismology: Primer on the 22 April 2019 Magnitude 6.1 Central Luzon Earthquake. *Philippine Institute of Volcanology and Seismology* (2019). Available at: <https://www.phivolcs.dost.gov.ph/index.php/news/8233-primer-on-the-22-april-2019-magnitude-6-1-central-luzon-earthquake-23-april-2019>, Accessed January 5, 2025.
- [19] Garciano, L. E., Villaraza, C., Tamayo, C. P., Tamayo, M., Flordeliza, R., Quiaem, M. A., Ramos, J. M.:

- Infrastructure damage analysis of the April 22, 2019 Pampanga, Philippines earthquake. *JSCE Journal of Disaster FactSheets*, Vol. FS2020-E-0002 (2020)
- [20] Rentschler, J., Klaiber, C., Saldivar-Sali, A., Shenfeld, E.: Seismic resilience in Metro Manila: Accessing healthcare after a catastrophic earthquake on the West Valley Fault Line. *World Bank Blogs* (2023). Available at: <https://blogs.worldbank.org/en/sustainablecities/seismic-resilience-metro-manila-accessing-healthcare-after-catastrophic>, Accessed January 5, 2025.
- [21] Prasetyo, Y. T., Senoro, D. B., German, J. D., Robielos, R. A. C., Ney, F. P.: Confirmatory factor analysis of vulnerability to natural hazards: A household vulnerability assessment in Marinduque Island, Philippines. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 50, 101831 (2020)
- [22] Adger, W. N.: Vulnerability. *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 268–281 (2006)
- [23] Füssel, H. M.: Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, Vol. 17, No. 2, pp. 155–167 (2007)
- [24] Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B.: *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Routledge (2014)
- [25] White, P., Pelling, M., Sen, K., Seddon, D., Russell, S., Few, R.: Disaster risk reduction: A development concern—A scoping study on links between disaster risk reduction, poverty and development. *Overseas Development Group, School of Development Studies, University of East Anglia* (2004)
- [26] Venable, C., Javernick-Will, A., Liel, A. B., Koschmann, M. A.: Revealing (mis)alignments between household perceptions and engineering assessments of post-disaster housing safety in typhoons. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 53, 101976 (2021)
- [27] Ong, A. K. S., Prasetyo, Y. T., Lagura, F. C., Ramos, R. N., Sigua, K. M., Villas, J. A., Redi, A. A. N. P.: Factors affecting intention to prepare for mitigation of “The Big One” earthquake in the Philippines: Integrating protection motivation theory and extended theory of planned behavior. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 63, 102467 (2021)
- [28] National Research Council: *Disaster Resilience: A National Imperative*. National Academy Press, Washington, DC (2012)
- [29] Joyce, J., Chang, N.-B., Harji, R., Ruppert, T.: Coupling infrastructure resilience and flood risk assessment via copulas analyses for a coastal green-grey-blue drainage system under extreme weather events. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 100, pp. 82–103 (2018)
- [30] Hayashi, H.: *Science and Technology for Disaster Resilience*. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan (1995)
- [31] Bhagavathula, S., Brundiers, K., Stauffacher, M., Kay, B.: Fostering collaboration in city governments’ sustainability, emergency management and resilience work through competency-based capacity building. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 63, 102408 (2021)
- [32] Yonson, R., Noy, I.: Disaster risk management policies and the measurement of resilience for Philippine regions. *Risk Analysis*, Vol. 40, No. 2, pp. 254–275 (2020)
- [33] Liu, H., Tatano, H., Samaddar, S.: Analysis of post-disaster business recovery: Differences in industrial sectors and impacts of production inputs. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 87, Article No. 103577 (2023)
- [34] ESCAP, U. N.: *Building e-resilience in the Philippines: Enhancing the role of information and communications technology for disaster risk management*. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (2016)
- [35] Walsh, B., Hallegatte, S.: Measuring natural risks in the Philippines: Socioeconomic resilience and wellbeing losses. *EconDisCliCha*, Vol. 4, pp. 249–293 (2020)
- [36] Auzzir, Z. A., Haigh, R. P., Amaratunga, D.: Public-private partnerships (PPP) in disaster management in developing countries: A conceptual framework. *Procedia Economics and Finance*, Vol. 18, pp. 807–814

(2014)

- [37] Stewart, G. T., Kolluru, R., Smith, M.: Leveraging public-private partnerships to improve community resilience in times of disaster. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 39, No. 5, pp. 343–364 (2009)
- [38] International Energy Agency (IEA): *Global Gas Security Review 2024*. IEA, Paris (2024). Available at: <https://www.iea.org/reports/global-gas-security-review-2024>, Accessed January 5, 2025.
- [39] World LPG Association: *LPG and the Global Energy Transition: A Study on Behalf of the World LPG Association*. World LPG Association (2015)
- [40] Puzzolo, E., Cloke, J., Parikh, J., Evans, A., Pope, D.: National scaling up of LPG to achieve SDG 7: Implications for policy, implementation, public health and environment. *Modern Energy Cooking Services* (2020)
- [41] Choi, J. Y., Baumgartner, J., Harnden, S., Alexander, B. H., Town, R. J., D'Souza, G., Ramachandran, G.: Increased risk of respiratory illness associated with kerosene fuel use among women and children in urban Bangalore, India. *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 72, No. 2, pp. 114–122 (2015)
- [42] World LPG Association: *Opportunities for Using LPG in Humanitarian Settings*. World LPG Association (2016)
- [43] Rosenthal, J., Quinn, A., Grieshop, A. P., Pillarisetti, A., Glass, R. I.: Clean cooking and the SDGs: Integrated analytical approaches to guide energy interventions for health and environment goals. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 42, pp. 152–159 (2018)
- [44] World LPG Association: *Annual Report 2012*. World LPG Association (2012)
- [45] Leone, F., Gaillard, J. C.: Analysis of the institutional and social responses to the eruption and the lahars of Mount Pinatubo volcano from 1991 to 1998 (Central Luzon, Philippines). *GeoJournal*, Vol. 49, pp. 223–238 (1999)
- [46] De Guzman, E. M.: *Eruption of Mount Pinatubo in the Philippines in June 1991*. Asian Disaster Reduction Center (2004)
- [47] Bündnis Entwicklung Hilft, Institute for International Law of Peace and Armed Conflict (IFHV) of Ruhr University Bochum (RUB): *WorldRiskReport 2020: Focus on Forced Displacement and Migration*. (2020). Available at: <https://reliefweb.int/report/world/worldriskreport-2020-focus-forced-displacement-and-migration>, Accessed January 5, 2025.
- [48] Iuchi, K., Esnard, A. M.: Earthquake impact mitigation in poor urban areas: The case of Metropolitan Manila. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 454–469 (2008)
- [49] Cantu-Funes, R., Salazar-Aguilar, M. A., Boyer, V.: Multi-depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 69, No. 2, pp. 296–306 (2018)
- [50] de la Torre, L. E., Dolinskaya, I. S., Smilowitz, K. R.: Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 88–97 (2012)
- [51] 片岡正次郎, 白戸智, 牛島由美子, 高宮進: インフラシステムの災害復旧過程のモデル化と震災復旧シミュレーション; 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.1, pp.1-19 (2013)
- [52] Wisetjindawat, W., Ito, H., Fujita, M., Hideshima, E.: Modeling disaster response operations including road network vulnerability. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 10, pp. 196–214 (2013)
- [53] Yagi, M., Murakami, E., Takahashi, H.: Evaluating the Effects of LP Gas Restoration Activities on Disaster-Prepared Urban Development: A Foundational Analysis of Kohoku Ward, Yokohama. In: *Abstracts of Annual Conference of Japan Society for Management Information 2024*, Vol. 202411, Session ID PR0087, pp. 208–210 (2024)
- [54] Watanabe, Y., Suzuki, T.: Road restoration process and network configuration determined by restoration priority indices. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, No. 44-1 (2009)

- [55] Sato, T., Suzuki, K.: Impact of transportation network disruptions caused by the Great East Japan Earthquake on distribution of goods and regional economy. *Journal of JSCE*, Vol. 1, No. 1, pp. 507–515 (2013)
- [56] Coffrin, C., Van Hentenryck, P., Bent, R.: Last-mile restoration for multiple interdependent infrastructures. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 26, No. 1, pp. 455–463 (2012)
- [57] Epstein, J. M., Axtell, R.: *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Brookings Institution Press (1996)
- [58] Massaguer, D., Balasubramanian, V., Mehrotra, S., Venkatasubramanian, N.: Multi-agent simulation of disaster response. In: *Proceedings of the ATDM Workshop in AAMAS 2006* (2006)
- [59] 中 小 企 業 庁 : 中 小 企 業 BCP 策 定 運 用 指 針 . Available at: https://www.chusho.meti.go.jp/bcp/contents/level_a/bcppl_03a.html, Accessed January 5, 2025.
- [60] OpenStreetMap contributors: *OpenStreetMap*; Open Database License (2024). Available at: <https://www.openstreetmap.org>, Accessed January 5, 2025.
- [61] Boeing, G.: OSMNX: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 65, pp. 126–139 (2017)
- [62] Haklay, M.: Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation. In: *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, pp. 105–122 (2012)
- [63] Zhou, Q., Wang, S., Liu, Y.: Exploring the accuracy and completeness patterns of global land-cover/land-use data in OpenStreetMap. *Applied Geography*, Vol. 145, Article No. 102742 (2022)
- [64] GADM: *GADM Maps and Data*. Available at: <http://www.gadm.org/>, Accessed February 2, 2025.
- [65] Philippine Statistics Authority: Household Population, Number of Households, and Average Household Size of the Philippines (2020 Census of Population and Housing). *Philippine Statistics Authority*, Reference Number 2022-111 (2022). Available at: <https://psa.gov.ph/content/household-population-number-households-and-average-household-size-philippines-2020-census>, Accessed January 5, 2025.
- [66] Gatchalian, W.: Sponsorship Speech. *Senate Bill No. 1955 / Committee Report No. 160: An Act Providing for the National Energy Policy and Regulatory Framework for the Philippine Liquified Petroleum Gas Industry* (2021)
- [67] Dixon, S.J.: Leading countries based on Facebook audience size as of April 2024. *Statista* (2024). Available at: <https://www.statista.com/statistics/268136/top-15-countries-based-on-number-of-facebook-users/>, Accessed January 5, 2025.

謝辞

本研究を進めるにあたり，慶應義塾大学大学院経営管理研究科の高橋大志先生には，指導教員として熱心なご指導を賜りました．ここに深く感謝申し上げます．また，副査の先生方，高橋研究室の皆様，OB・OGの皆様等，多くの方々にご助言とご支援を賜りましたことに，心より御礼申し上げます．そして，ガーディアンズ，富士山登頂会，ピザ会，カルキノス，三田茶荘をはじめ，これまでグループワークや授業で共に議論し，たくさんの思い出を作ってきたKBSの皆様，本当にありがとうございました．最後に，日々温かく見守り，そっと背中を押してくれた両親，いつもそばで明るく励ましてくれた姉に，心から感謝します．ありがとうございました．