

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	災害時の救援物資支援における地域内・地域間連携に向けたサプライチェーンネットワークの分散制御システムの構築
研究者名※	河瀬 理貴
所属組織※	東北大学大学院 情報科学研究科 人間社会情報科学専攻 学振特別研究員 (東京工業大学 環境・社会理工学院 助教)
研究種別	研究助成
研究分野	都市計画、都市景観
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

## 大林財団 2021 年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京工業大学  
申請者氏名 河瀬理貴

研究課題	災害時の救援物資支援における地域内・地域間連携に向けたサプライチェーンネットワークの分散制御システムの構築
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>本研究では、災害時の不完全な情報環境下での意思決定に対して適用可能な分散制御システムを構築することを目的とする。第一に、複数の配給拠点と物流拠点で構成されるサプライチェーンでの分散型在庫制御システムを構築した。具体的に、配給拠点ごとの最適制御を求める主問題と配給拠点間の調整を記述する双対問題の繰り返し計算により、対象とするサプライチェーンの最適制御を得られる。第二に、被災者と人道支援組織の分散的な意思決定による効率低下を定量化し、その効率低下を抑制する事前戦略を提案した。まず、対象とするシステムのベンチマークとして、配給拠点への被災者の最適誘導および救援物資の最適供給を求める制御問題を定式化した。次に、問題の線形性を活用することで、最適性条件を一般化線形相補性問題として再定式化し、定量的解析のための効率的でロバストな計算アルゴリズムを適用した。その結果、避難所に近い配給拠点に多くの配給人員を割当てることによって効率性が改善する傾向を確認した。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>世界的な人口増加や都市への人口集中により、自然災害は劇的に増加し人々の生活に多大な損失をもたらしてきた。Magrath (2007)<sup>1)</sup>や Thomas and Kopczak (2005)<sup>2)</sup>によると、年間災害発生数は 1980 年から 2006 年にかけて約 4 倍に増加、災害による年間経済損失額は 1960 年代から 1990 年代にかけて約 8.8 倍に増加している。災害発生数は今後 40 年間で 5 倍に増加すると予想されており<sup>2)</sup>、災害は今後も人命や経済に壊滅的な影響を与えるであろう。</p> <p>救援物資支援は、被害の緩和を目的とする災害対策活動の中でも、最も費用のかかる要素であり、かつ、様々な主体が関与する複雑な活動である<sup>3)</sup>。「被災者の需要を満たすため、供給地から消費地まで、救援物資や資材の流動と保管および関連情報を、効率的・費用効果的に計画・実施・管理するプロセス<sup>5)</sup>」は、平常時の商業サプライチェーン (SC) と対比して人道支援 SC と呼ばれる。災害が生起確率の低い事象であることを考えれば、救援物資の在庫制御等の戦略を支援する意思決定技術を、実践からのフィードバックも踏まえながら、継続的に改良していくことが、効率的な人道支援 SC の発展に大きく寄与することは想像に難くない。</p> <p>近年、商業 SC 向けに開発された意思決定技術を人道支援 SC に応用する試みが活発であるが、災害時特有の不完全な情報環境下での意思決定に対して適用可能な方法論は限られる。災害時には通信設備の損傷により人道支援 SC 全体での情報共有が困難となるため、大域的な情報共有を前提とした意思決定は予期せぬ結果を招き得る。実際に過去の災害では、不適切な意思決定 (e.g.,</p>	

重複要請、救援物資の偏在)により、人道支援 SC が機能不全に陥った事例 (e.g., 不要物資による保管場所の圧迫) が報告されている<sup>7)8)</sup>。こうした不完全な情報環境下でも機能するロバストな救援物資支援システムを確立するには、各主体が局所的な情報交換の下で意思決定する分散制御が有効であろう。本研究では、制御理論の既存手法を参考に、分散型の物資支援システムの最適運用方法を確立することを目的とする。

#### 【参考文献】

- 1) J. Magrath, Climate alarm: Disasters increase as climate change bites, *Oxfam Policy and Practice: Climate Change and Resilience*, 3 (2), pp.1-28, 2007.
- 2) A.S. Thomas and L.R. Kopczak, From logistics to supply chain management: The path forward in the humanitarian sector, *Fritz Institute*, 15 (1), pp.1-15, 2005.
- 3) L.N. Van Wassenhove, Humanitarian aid logistics: Supply chain management in high gear, *Journal of the Operational research Society*, 57 (5), pp.475-489, 2006.
- 4) G. Kovács, and K. M. Spens, Logistics theory building. *The Icfai Journal of Supply Chain Management*, 4 (4), pp.7-27, 2007.
- 5) A. Thomas and M. Mizushima, Logistics training: necessity or luxury? *Forced migration review*, 22, pp.60-61, 2005.
- 6) J.B. Sheu, Challenges of emergency logistics management, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43 (6), pp.655-659, 2007.
- 7) 河瀬理貴, 浦田淳司, 井料隆雅, 災害時における人道支援ロジスティクスの在り方: 東日本大震災と熊本地震のケーススタディ, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, 76 (5), pp.I\_987-I\_999, 2021.
- 8) R. Kawase, J. Urata, T. Iryo, Improving post disaster humanitarian logistics with theoretical and empirical approaches, *Proceedings of the 24th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, pp.145-152, 2019.

## 2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

まず本研究では、複数の配給拠点 (Points of Distribution: PODs) とその物資要請先である物流拠点 (Distribution Center: DC) で構成されるサプライチェーンでの分散型在庫制御システムを構築した。具体的に、PODs は担当の被災地域に滞在する被災者に救援物資を配給しながら、定期的に追加の救援物資を所定の DC に要請する。物資要請を受注した DC は被災地外から供給された救援物資を、その要請に基づき PODs に配分する。被災地外から十分な物資供給があれば、各 POD が手持ちの情報 (e.g., 保管在庫量) のみを参照して物資要請しても、その要請を満たす救援物資を配分できる。しかし、災害時には予測困難な物資需要の急増などにより、PODs の要請に対応できない状況が往々にして発生する。そこで DC は被災地外からの供給不足が発生した際に、物資要請を調整するよう PODs に伝達する。その後、各 PODs は手持ちの情報と要請先の DC から得た情報に基づき (i.e., 他の PODs の情報とは無関係に) 追加の救援物資を要請する。本研究では、このような分散型在庫制御システムに着目して、DC による PODs 間の調整や、PODs の物資要請および保管在庫量の最適戦略を求めるモデルを構築した。

次に、避難所 (Evacuation Center, EC) に滞在する被災者と DC を指揮する人道支援組織による

分散的な意思決定に焦点をうつした。具体的に、人道支援組織は災害が起こりやすい地域の PODs に備蓄と配給人員を事前配置し、発災後、被災地外から供給された救援物資を各 PODs に配分する。被災者は PODs に移動し配給担当者から救援物資を受け取る。しかし、被災者の移動との調整を欠いた人道支援組織の活動は、需要と供給のミスマッチを引き起こす。その結果、外部から十分な救援物資を入手できたとしても、過剰在庫や長い配給行列が発生する可能性がある。本研究では、このような被災者と人道支援組織による分散的な意思決定システムのベンチマークとして、救援物資の最適配分および被災者の最適誘導を求めるモデルを構築した。さらに、意思決定の分散化による効率性 (e.g., 在庫量, 待ち行列長さ) の低下や、その低下を抑制する備蓄と配給担当者の事前配置戦略を示した。

### 3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

分散型在庫制御システムに関する成果は以下のとおりである。まず、複数の PODs と DC で構成される在庫制御システムの最適戦略を求める動学最適化問題を定式化した。次に、この動学最適化問題に対応するラグランジュ関数が物資要請および保管在庫量に関して PODs ごとに分解できることを示した。この性質より双対分解を用いて、PODs ごとに分解したラグランジュ関数を最大化する物資要請および保管在庫量を解く問題 (以下、主問題) と、双対関数を最大化するラグランジュ乗数 (i.e., PODs 間の調整) を解く問題 (以下、双対問題) を繰り返し解くことで、最適な在庫制御戦略および対応する PODs 間の調整を求められる。さらに、物資要請および保管在庫量に関して二次関数的に増加する目的関数を仮定すると、双対問題の解の応答関数として、主問題のオープンループ制御解およびフィードバック制御解を導出できる<sup>1)</sup>。また、目的関数の凸性より射影勾配法を用いて双対問題を解くことができる。双対問題は計画期間内の物資需要を所与としてのみ解くことができるが、実際の物資需要は確率的に変動する。そこで、計画期間内の物資需要はその期待値に従うという予測に基づき最適戦略を計算し、実際の物資需要が発生するたびに再計算するローリングホライズン方式を提案した。最後に、モンテカルロシミュレーションにより提案した分散制御戦略の性能検証を行った。その結果、物資需要の確率過程が定常であれば、約 90% の最適性を示すことを確認した。本研究の成果は、第 16 回日本地震工学シンポジウム<sup>8)</sup>で発表予定である。

次に、被災者と人道支援組織による分散的な意思決定に関する成果は以下の通りである。本研究では、単一の EC, 単一の DC, 二つの PODs で構成されるシステムを考える。本システムでの備蓄と配給人員の最適な事前配置、救援物資供給と被災者誘導の最適制御を求めるために、二段階確率最適化問題を定式化した。下位問題は、災害の動学的不確実性に対処するため、PODs での物資在庫および配給行列の観測を活用したフィードバック制御問題として定式化する。上位問題は、下位問題の最適値関数を最小化する事前配置戦略を求める問題である。定式化した問題の線形性より、次の 2 つの数学的性質を導出した。第一に、配給人員への投資は被災者不便益 (移動や待機費用) と支援者不便益 (輸送や在庫費用) を同時に改善する (i.e., パレート効率的である) 一方で、備蓄の事前配置への投資は支援者不便益を犠牲にして被災者不便益を減少させる。第二に、下位問題の最適性条件は一般化線形相補性問題として記述することができ、制御問題の定量的解析のための効率的でロバストなアルゴリズム<sup>2)</sup>が適用できる。このアルゴリズムを用いてフィードバック制御解を求め、被災者が自由に移動する場合の効率性の低下や、その低下を抑

制する救援物資と配給担当者の事前配置戦略を数値的に検証した。その結果、避難所に近い POD に多くの配給人員を割当てることで効率性が改善する傾向を確認した。本研究の基礎的な研究成果は、第 17 回防災計画研究発表会<sup>3)</sup>や第 64, 66 回土木計画学研究発表会<sup>4)5)</sup>、第 10 回 制御部門マルチシンポジウム<sup>6)</sup>、World BOSAI Forum 2023<sup>7)</sup>で発表しており、今後、6th International Conference on Dynamics of Disasters<sup>9)</sup>で発表予定である。

#### 【参考文献】

- 1) R. Kawase and T. Iryo, Optimal stochastic inventory-distribution strategy for damaged multi-echelon humanitarian logistics network, *European Journal of Operational Research*, 309 (2), pp.616-633, 2023.
- 2) T. Akamatsu and T. Nagae, Dynamic ramp control strategies for risk averse system optimal assignment, *Proceedings of the 17th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp.87-110, 2007.
- 3) 河瀬理貴, 支援者と被災者の相互連携に基づく支援物資供給に関する研究, 第 17 回防災計画研究発表会, オンライン, 9/25-26, 2022.
- 4) 河瀬理貴, 井料隆雅, 災害時における情報の遅れを考慮した分散型物流制御の検討, 第 64 回土木計画学研究発表会, CD-ROM, オンライン, 12/3-5, 2021.
- 5) 河瀬理貴, 被災者の調達行動を考慮した物資輸送戦略の検討, 第 66 回土木計画学研究発表会, CD-ROM, 沖縄, 11/11-13, 2022.
- 6) 河瀬理貴, 待ち行列-在庫制御問題の効率的解法, 第 10 回 制御部門マルチシンポジウム, 滋賀, 3/8-11, 2023.
- 7) 河瀬理貴, 支援者と被災者の連携に基づく支援物資供給システム, World BOSAI Forum 2023, 仙台, 3/10-12, 2023.
- 8) 河瀬理貴, 不確実性下の救援物資要請と在庫管理に対する分散最適化アプローチ, 第 16 回日本地震工学シンポジウム, 横浜, 2023, forthcoming.
- 9) R. Kawase, Multi-objective optimization analysis for pre-positioning of relief resources and post-disaster dynamic demand-supply control, *6th International Conference on Dynamics of Disasters*, Athens, Greece, 2023, forthcoming.

#### 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

分散型在庫制御システムに関する課題として、以下が挙げられる。

- 1) 社会は平常時の生活に復旧・復興することから、物資需要の確率過程は非定常である。主問題と同様に双対問題のフィードバック解を導出・計算するフレームワークを構築することで課題解決を図る。
- 2) 実際の人道支援サプライチェーンでは物流拠点も、配給拠点の物資要請を踏まえて追加の救援物資を被災地外の主体に要請する。このとき鞭効果（SC の上流に行くに従い、要請量および在庫量の分散が増幅する現象）の影響を抑制するメカニズムを導入する必要がある。被災者と人道支援組織による分散的な意思決定に関する課題として、以下が挙げられる。

- 1) 定式化した問題の最適戦略は被災者不便益を改善する一方で、個々の被災者の便益を無視した戦略である。個々の被災者便益を損なうことなく、システム全体にとって望ましい戦略の実現には、被災者の移動を促す正のインセンティブを与えることが有効である。例えば、移動一回あたりの物資配給量を増やすことで、個々の被災者の総行動回数を減らすといった動学的なインセンティブが考えられる。