

奨励金No.1536

不完全な情報環境における災害物流の 主体間連携のための分散制御手法

河瀬 理貴

東京科学大学 環境・社会理工学院 助教

Distributed Control of Relief Logistics for Inter-organizational Coordination under Imperfect Information

Riki Kawase

Institute of Science Tokyo School of Environment and Society, Assistant Professor



災害時には、通信設備の損傷により不完全な情報環境下で意思決定する場面が多い。本研究では、不完全な情報環境下での頑健な災害物流ネットワーク構築に向けて、主体間連携のための分散制御手法を開発する。第一に、複数の避難所と供給点で構成される災害物流ネットワークでの分散型確率在庫制御モデルを開発した。第二に、動的計画法アプローチに基づき、一般ネットワークをノード（e.g., 拠点）ごとの問題に分解するアルゴリズムを開発した。最後に、開発した分散制御手法を前提とした備蓄計画の数値解析を実施した。

After disasters, damage to communication infrastructure often forces decision-making under an incomplete information environment. This study develops a distributed control for inter-organizational coordination to construct a robust disaster logistics network under incomplete information environments. First, we propose a distributed stochastic inventory control model for disaster logistics networks consisting of multiple evacuation centers and distribution centers. Second, based on a dynamic programming approach, we decompose a network flow problem in general networks into subproblems concerning nodes (e.g., distribution centers). Finally, our numerical analysis demonstrates that the proposed distributed inventory control has a significant impact on the pre-positioning planning of relief stockpiles.

1. 研究内容

1.1 研究背景と目的

南海トラフ地震をはじめとする広域災害からの迅速な復興を実現するためには、多様な主体間の垂直的・水平的連携を基盤とした効率的な災害物流ネットワーク（図1）の構築が不可欠である。しかし、災害時における通信インフラの損傷は、ネットワーク全体での大域的な情報共有を著しく困難にし、結果として主体間の円滑な連携を阻害する。こうした不完全な情報環境下においても、容易に機能不全に陥らない頑健な災害物流ネットワークを構築するためには、限定的な情報交換

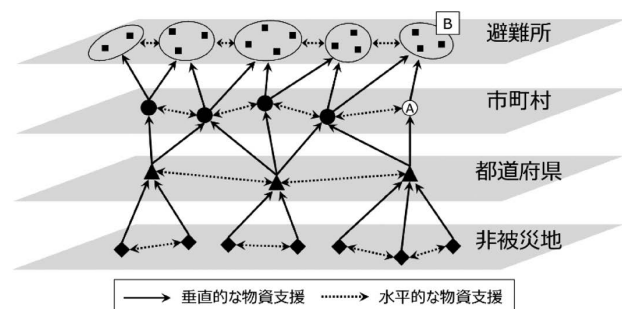


図1. 典型的な災害物流ネットワーク

（図2）のみで意思決定を可能にする分散型システムの導入が有効な解決策となる。ただし、情報交換しない主体との相互作用を無視した場当たりの

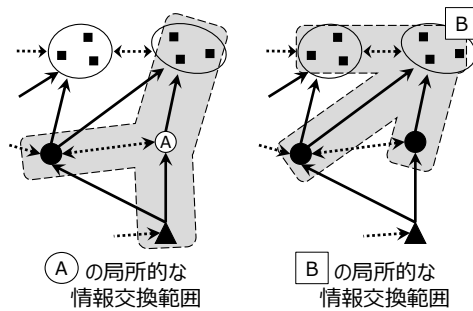


図 2. 限定的な情報交換の一例

な意思決定は不都合なシステム挙動を招きかねない。本研究では、上述の問題に対し、制御理論を基盤としたアプローチを採用することで、システムの機能不全を回避し得る高度な分散制御手法の構築を遂行する。

1.2 研究経過と成果

本研究の成果は以下の三つの取り組みに集約される：

- A) 複数の避難所と供給点から構成される災害物流ネットワークの分散型確率在庫制御モデルの開発、
- B) 一般的なネットワークフロー問題をノード（例：拠点）単位の問題へと分解するアルゴリズムの構築。
- C) 不完全情報下での災害物流制御を加味した最適な備蓄計画の数値解析

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、複数の避難所と供給点で構成される最適な確率在庫制御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、物資発注量および在庫量に関して避難所ごとに分解可能であることを理論的に証明した。この性質を利用し、双対分解を適用することで、以下の二つの問題を反復的に解くことにより、最適な在庫制御戦略および対応する避難所間の調整パラメータを導出することが可能となった：

- (A) 避難所ごとに分解したラグランジュ関数を最大化する物資発注量および在庫量を解く問題（主問題）
- (B) 双対関数を最大化するラグランジュ乗数（i.e., 避難所間の調整）を解く問題（双対問題）

さらに、物資発注量および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解析的に導出することに成功した。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。

一般ネットワークの分解アルゴリズムに関する成果は以下のとおりである：

提案する分解アルゴリズムは、多段階確率線形計画問題を解く典型的なアルゴリズムである Stochastic Dual Dynamic Programming (SDDP) を応用した手法である。SDDP は、各段階の（試行的な）決定変数を前向きに決定する Forward Step と、各段階の（決定変数を引数とする）将来期待費用を後向きに更新する Backward Step で構成される。ただし、Forward Step と Backward Step の計算には、一般的にシステム全体の情報が完全である必要がある。本研究では、Forward Step における各段階の主問題および双対問題がネットワークのノード（e.g., 拠点）ごとの問題に分解できることを理論的に証明した。この性質を用いて、次の計算アルゴリズムを提案する：a) 中央集権的なブレーカーが、 n 日目の始めに $n-1$ 日の情報より将来期待費

用を試行的に計算する。b) 各ノードの意思決定者は、局所的な観測情報（e.g., ノードの在庫量）とブレイカーが提供する将来期待費用を用いて、下流リンクへの物資輸送量を時々刻々決定する。c) 所定の計画期間に到達したら $n=n+1$ とし a) に戻る。

最適な備蓄計画に関する成果は以下の通りである：

A) で開発した分散型在庫制御システムの性能を促進する戦略的設計として、避難所の備蓄計画を検討した。具体的に、分散型在庫制御問題を下位問題、避難所の備蓄計画を決定する問題を上位問題とする二段階確率計画問題を構築した。下位問題を中央集権的な在庫制御問題とする備蓄計画と比較し、分散型在庫制御に基づく備蓄計画では、より多くの備蓄量を確保する計画が最適となることを数値的に示した。この傾向は、不完全な情報下で救援物資を追加発注するリスクが相対的に高いことに因ると示唆される。

2. 発表（研究成果の発表）

Kawase, R., Decentralized Optimization for Stochastic Relief Inventory Control in a Single-echelon Logistics Network, 27th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (HKSTS), Hong Kong, December 11-12, 2023.

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、神奈川、11/23-25、2023.

Kawase, R., Multi-objective Optimization Analysis for Pre-positioning of Relief Resources and Post-Disaster Dynamic Demand-supply Control, 6th International Conference on Dynamics of Disasters (DOD), Athens, Greece, July 3-6, 2023.

河瀬理貴、分布的ロバスト計画法による不確実性下での動的ネットワークフロー最適化、オペレーションズ・リサーチ：経営の科学、Vol. 70, No. 7, pp. 344-351, 2025. 【招待論文】

河瀬理貴、井料隆雅、浦田淳司、人道支援ロジスティクスにおける在庫モデルのレビューと展望—商業分野の理論研究を踏まえて—、土木学会論文集、Vol. 80, No. 20, pp. 24-20072, 2024.