

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

河瀬 理貴¹・井料 隆雅²

¹正会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉六丁目 6-06)
E-mail: riki.kawase.d3@tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉六丁目 6-06)
E-mail: iryo@tohoku.ac.jp

大規模災害時には、多くの避難所が広域的に設置され、被災地の外から各避難所へ食料や衣類などの救援物資を必要に応じて供給する必要がある。しかし、災害による混乱の中では、信頼性の高い情報を収集し必要な救援物資を適切なタイミングで適切な場所に供給することは困難である。実際に 2016 年の熊本地震では、情報の一元管理が困難な環境下で救援物資の偏在が発生したことが報告されるなど、情報の利用可能性が制限される中で如何にして救援物資を届けるかは、早急に解決すべき重要な課題の一つである。本研究では、情報伝達に遅れが伴う環境において、避難所や物流拠点が分散的に発注や輸送の意思決定を下す物流制御システムの性能や性質を数値実験より検証する。

Key Words: humanitarian logistics, decentralized control, inventory control

1. はじめに

近い将来の発生が予想されている南海トラフ巨大地震などの大災害のリスクが高まる中、迅速かつ確かな物資供給を目的とする「人道支援物流 (Humanitarian Logistics: HL)」は、災害による被害を緩和するのに重要な役割を果たす。交通網やラインラインの損傷により生活必需品が不足する状況で被災者の安全を保つためには、政府機関をはじめとする救援組織が食料や衣類などの必要な救援物資を被災地に供給する必要がある。この際、「被災者の物資需要を満たすため、供給者から消費者まで、救援物資の流動と保管および関連情報を、効率的に計画・実施・管理するプロセス^{1),2)}」を適切に設計することが救援組織に求められる。この一連のプロセスを HL と呼ぶ。2005 年から 2055 年の間に、世界中で発生する災害数は約 5 倍増加すると推定されている³⁾ ように、今後も災害による被害を緩和し復旧を加速するためには、HL のさらなる研究が不可欠である。

HL への関心が高まる中、商業物流 (Commercial Logistics: CL) 向けに開発された意思決定技術を HL に応用する試みが活発である^{4),5)}。しかし、平時の CL と災害時の HL の間には、戦略的目標、物資需要の性質、環境的要因などの点で大きな違いがある^{6),7)}。具体的に、救援組織は物理的資源 (e.g., 輸送能力) や技術的資源

(e.g., 情報共有システム) が不足する環境下で、物資需要を満たすための物流方策を策定する必要がある。また、災害という事象の希少性故に、将来の物資需要を高い精度で予測することは困難である。さらに、被災地の復旧とともに被災者が必要とする救援物資は大きく変化する。こうした物資需要の予測不可能かつ動的な性質は、効率的な HL (e.g., 在庫管理費用の最小化、物資が不足する確率の最小化) の設計に複雑さをもたらしている。例えば、2016 年に発生した熊本地震では、ライフラインの復旧に伴う需要の変化に対応できず大量の余剰物資が物流拠点に滞留したために、物流システムの機能停止を招いたことが報告されている⁸⁾。

物資需要の不確実かつ動的な性質を考えれば、被災地の状況をリアルタイムに共有する情報システムが、効率的な HL の発展に大きく寄与することは想像に難くない。Sourirajan et al. (2008)⁹⁾ は、段階的な物流システムにおいて観測される需要情報の不確実性が増幅する現象が、情報技術を活用した物流方策の必要性を示す一例であると述べた。ここで段階的とは、供給点-物流拠点-避難所のように複数の段階を介して物や情報が流動する物流システムを指す。Holguín-Veras et al. (2014)¹⁰⁾ は、東日本大震災における HL の実態を例に、被災地自治体とのコミュニケーションを円滑にする情報機器を備える必要性を指摘した。Ozguven and Ozbay (2013,

2015)^{11),12)} や Biswal et al. (2018,2020)^{13),14)} は、ネットワーク全体の在庫情報を追跡するモバイルタグを活用した在庫管理モデルを開発し、情報機器を導入する効果を実証した。今後の情報技術の発展を考えれば、それらと統合した HL の意思決定技術の開発が災害による被害の緩和に大きく貢献することは間違いない。

実際には、通信設備の損傷や情報収集のための労働力不足により、被災地との情報共有を円滑にする情報システムが十分に機能しない可能性は高い。例えば、東日本大震災の際には、基地局やケーブルなどの通信設備や商用電源の復旧に一ヶ月以上要した事例¹⁵⁾ や、職員の被災により業務遂行に著しい支障が生じた事例¹⁶⁾ が確認されている。また熊本地震では、iPad を用いた情報の一元管理システムを導入する前の期間において、重複発注や発注漏れが発生し物流システムが非効率になったことが報告されている⁸⁾。河瀬ら (2021)¹⁷⁾ は、リアルタイムに需要情報を観測できない環境において、単一の救援組織が指揮する物流システムの性能が低下することを定量的に示した。このように情報の利用可能性に制限がある中で如何にして救援物資を届けるかは、早急に解決すべき課題である。

情報システムが機能しない環境下でも効率的な物資供給が期待できる物流方策の一つとして、供給者と消費者の間に介在する戦略的主体による救援物資の分散的な制御が考えられる。具体的に、物流拠点や避難所が輸送車両などの簡易な方法で断続的に情報交換を行いながら、得られる局所的な情報 (e.g., 手元の在庫量や下流からの発注) を頼りに救援物資の発注や輸送を決定することで、不要な在庫を減らしつつ必要な物資を供給することができる。情報の利用可能性が制限される環境下で、単一の救援組織が指揮する物流システムの性能が低下することを考えれば、物流拠点や避難所による分散的な制御方策が優れた性能を発揮すると期待することは合理的であろう。

HL の文脈で救援物資の分散的な制御に着目した既存研究としては、Beamon and Kotleba (2006)¹⁸⁾ をはじめ、避難所による発注方策を分析する研究^{19),20)} が盛んである。既存研究が提案する分散制御モデルは、避難所の発注先である物流拠点には大量の在庫があり、追加発注を行わないと仮定している。しかし実際には、物流拠点も被災するケースが確認されており⁸⁾、多くの在庫を管理することが困難となる状況が往々にして発生する。この場合、物流拠点は避難所からの発注を受け、将来的な在庫切れを回避するために追加の発注を行う必要がある。在庫管理を担う職員や物流拠点内の設備が被災する可能性の高い HL において、このような避難所と物流拠点の相互作用を分析する必要性は高い。

CL 分野では、複数の戦略的主体の意思決定をモデル

化する数学的ツールであるゲーム理論を用いて、小売店とその仕入先が分散的に発注方策を決定するシステムが検討されている^{21),22),23),24)}。小売店と仕入先の関係は、避難所と物流拠点の関係と類似した関係であると考えられる。しかし、ナッシュ均衡戦略の性能検証など、ゲームの静学的な分析に限られ、物流システムの状態変化に応じて戦略を修正するような動学的な意思決定を分析した研究は、筆者の知る限り無い。複数主体間の頻繁な情報交換が容易な CL とは対称的に、HL は情報システムが機能不全に陥る可能性が高いため、各主体が時点の需要情報や発注情報などを頼りに戦略を修正するプロセスを分析する重要性は高い。

以上の背景を踏まえ、本研究では、避難所と物流拠点という二種類の戦略的主体が互いに情報交換し、新しい情報を得る度に戦略を修正するプロセスを繰り返す動学的な分散制御システムを構築し、その性質を分析する。具体的に、各主体による情報交換と戦略策定の行動規範を定式化し、その行動規範を数値的に繰り返し実行することによって得られるシステムの性能や各主体の戦略の時間変化を評価する。まず、2章では、分散制御システムの仕様を説明し、システムにおける実際の在庫量の変化と各主体の意思決定ルールを定式化する。3章では、定式化に従って各主体の意思決定を繰り返し計算し、最終的に得られる戦略や分散制御システムの性能を分析することで、HL の特性を適切に考慮した分散制御モデルを開発するための基礎的な知見を得る。最後に、結論と課題を4章にまとめる。

2. 分散制御モデル

(1) 分散制御システムの仕様

本研究で扱う分散制御システムを図1に示す。この制御システムには、単一の物流拠点 w と単一の避難所 s という二つの主体が存在する。システムの外部には、物流拠点 w に救援物資を供給する供給点 o が存在する。供給点 o と物流拠点 w との間、物流拠点 w と避難所 s との間には、それぞれ単一の輸送車両群 (以下、輸送車両と呼称する) が走行している。全ての施設の地理的關係は既知と仮定する。供給点 o と物流拠点 w との間の走行時間 L_w 、物流拠点 w と避難所 s との間の走行時間 L_s は一定かつ確定的であり、道路の被災状況に関連する不確実性や交通混雑は考慮していない。

物流拠点 w と避難所 s は、システム全体で発生する費用 (e.g., 物資不足や在庫切れによるペナルティ費用) を最小化することを目的に戦略を決定する。避難所 s は発生する物資需要を満たすために物流拠点 w に発注を行い、その発注を受けて物流拠点 w は救援物資を避難所 s に輸送する。同様に、物流拠点 w は救援物資の在

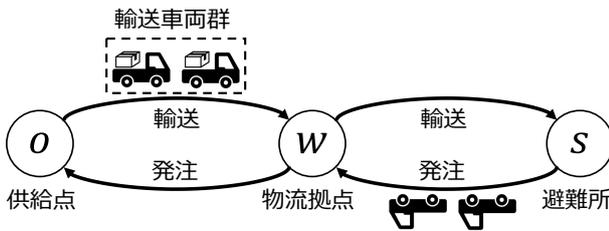


図-1 分析対象とする分散制御システム

庫切れを回避するために供給点 o に発注をかけ、供給点 o は物資輸送を行う。供給点 o には大量の救援物資の在庫があり、常に物流拠点 w が発注した量の救援物資を輸送することができると仮定する。各施設は、救援物資を積んだ輸送車両が到着した際に、現時点で発注する量と将来的な発注計画（以下、発注戦略と呼称する）を策定し、救援物資のない輸送車両が戻って来た際に、現時点で輸送する量と将来的な輸送計画（以下、輸送戦略と呼称する）を策定する。ただし、生鮮品を除く一般的な保存食や飲料など長期間ストック可能な物資を分析対象とする。

物流拠点 w と避難所 s との間の情報伝達は、最も簡易な方法として、施設間を走行する輸送車両の往来によってのみ行われることを想定する。この方法は、通信設備が損傷しリアルタイムな情報を得ることが困難な状況でも、容易に実装可能な情報伝達方法である。物流拠点 w から出発する輸送車両は、救援物資を輸送するとともに、出発時点における物流拠点 w の輸送戦略と発注戦略を避難所 s に伝達する。避難所 s から出発する輸送車両は、出発時点における発注戦略および出発時点までに発生した物資需要を物流拠点 w に伝達する。物流拠点 w と避難所 s との間には、単一の輸送車両群のみが存在すると仮定しているので、各主体は $2L_s$ ごとに新しい情報を取得できる。

本システムでは、各主体が輸送車両の到着と同時に新しい情報を取得し戦略を決定するという行動規範を無限期間繰り返し実行する。施設間の走行時間が $L_w = 2, L_s = 1$ 、最初の時点（時刻 $t = 0$ ）で二つの輸送車両が物流拠点 w に滞在しているケースを例に説明する。このシステムは、物流拠点 w が発注戦略と輸送戦略を策定し、二つの輸送車両が供給点 o と避難所 s に出発することで稼働する。次に、 $t = 1$ の時点で、避難所 s は物流拠点 w から輸送した救援物資を受け取り、到着した輸送車両に発注戦略を伝達する。この間、物流拠点 w には輸送車両が到着していないため発注も物資輸送もできない。避難所 s の発注を受けた輸送車両が $t = 2$ の時点で物流拠点 w に到着し、物流拠点 w は発注戦略を確認するとともに自身の輸送戦略を策定する。同時

刻に、供給者 o は輸送車両を介して物流拠点 w による発注を受け物資輸送を行う。この一連の行動規範を繰り返し実行し、システムで発生した総費用や戦略の時間変化を検証することで、HLの分散制御モデルの開発に向けた基礎的な知見を得る。以下では、第一に、上記の分散制御システムにおける実際の救援物資の流れとそれによって発生する費用を定義する。第二に、物流拠点 w と避難所 s が実際の救援物資の流れの内、何を認識しているかを明確にし、戦略を策定するための最適化問題を定式化する。

(2) 救援物資の流れとシステム費用の定式化

本節では、分散制御システムにおける救援物資の流れを定式化し、その後、システム内で発生する費用を定義する。ここで、物流拠点 w と避難所 s は実際の救援物資の流れをリアルタイムに認識することはできないことに注意する。各主体は、輸送車両を介して情報交換することによって初めて、システム全体の状態を把握する。各主体が認識する情報の定義については、次節で議論する。以下では、システムで実際に発生する救援物資の流れと費用関数を説明する。

a) 実在庫の変化

各主体が保有する在庫量とバックオーダー量の変化を定義する。バックオーダー量とは、受注を受けたが在庫がないために満たすことができなかった量を表す。本研究で扱うシステムでは、バックオーダーが発生した場合でも、受注は取り消されず、後で満たされるものと仮定する。在庫量とバックオーダー量は、各主体の輸送戦略や発注戦略および避難所 s で発生する物資需要によって変化する。時刻 t において供給点 o および物流拠点 w が輸送した物資量を $S_o(t), S_w(t)$ 、物流拠点 w と避難所 s が発注した物資量を $Q_w(t), Q_s(t)$ 、避難所 s で発生する物資需要を示す確率変数の実現値を $D_s(t)$ とする。このとき、物流拠点 w の在庫量 $I_w(t)$ とバックオーダー量 $B_w(t)$ 、避難所 s の正味在庫量（正であれば在庫量、負であれば不足している物資量） $IN_s(t)$ の変化を次式で記述する：

$$I_w(t+1) = I_w(t) + S_o(t - L_w) - S_w(t), \quad (1)$$

$$B_w(t+1) = \max\{B_w(t) - I_w(t) - S_o(t - L_w) + Q_s(t), 0\}, \quad (2)$$

$$IN_s(t+1) = IN_s(t) + S_w(t - L_s) - D_s(t), \quad (3)$$

$$I_w(t) \geq 0. \quad (4)$$

式(1)に示すように在庫量 $I_w(t)$ は、時刻 t に施設へ搬入する物資量 $S_o(t - L_w)$ と避難所 s へ輸送する物資量 $S_w(t)$ によって変化する。 $S_w(t)$ は、式(4)に示す $I_w(t)$ の非負制約によって制限される。式(2)はバックオーダー量 $B_w(t)$ の変化を示しており、避難所 s の発注量

$Q_s(t)$ から物流拠点 w が時刻 t において保有する物質量 $I_w(t) + S_o(t - L_w)$ を引いた分だけ、バックオーダー量が変化する。式 (4) に示す避難所 s の正味在庫量 $IN_s(t)$ は、物資需要量 $D_s(t)$ によって確率的に変動する。簡単のため、 $D_s(t)$ は定常過程であると仮定する。本研究で扱うシステムにおいて、供給点 o は物流拠点 w が発注した救援物資を常に輸送できるため、式 (1)(2) を次式に書き換えることができる：

$$I_w(t+1) = I_w(t) + Q_w(t - 2L_w) - S_w(t), \quad (5)$$

$$B_w(t+1) = \max\{B_w(t) - I_w(t) - Q_w(t - 2L_w) + Q_s(t), 0\}. \quad (6)$$

式 (3)-(6) に示す定式化は、単一の供給点・物流拠点・避難所によるシステムを想定した定式化であるが、複数個の施設で構成するシステムに容易に拡張できる。本研究では、物流拠点 w と避難所 s の二つの主体による分散的な意思決定によるシステムの性能を検証することで、HL の分散制御モデルを開発するための基礎的な知見を整理する。上記を含め以下に示す数式は、特に記載がない限り、任意の時刻 t において成り立つ。

b) システム費用の定義

本研究で扱う分散制御システムにおいて、実際に発生する費用を定義する。ここで、実際に発生する費用とは、ある確率分布に従う物資需要 $D_s(t)$ の実現値が発生した場合の費用を意味する。無限期間 $[0, \infty]$ において発生する総費用 V は、時刻 t での費用 $TC(t)$ の総和として次式で定式化する：

$$V = \sum_{t=0}^{\infty} TC(t), \quad (7)$$

$$TC(t) = TC_Q(t) + TC_S(t) + TC_I(t) + TC_B(t), \quad (8)$$

$$TC_Q(t) = q_s Q_s(t) + q_w Q_w(t), \quad (9)$$

$$TC_S(t) = s_o Q_w(t - L_w) + s_w S_w(t), \quad (10)$$

$$TC_I(t) = h_s [IN_s(t)]^+ + h_w I_w(t), \quad (11)$$

$$TC_B(t) = b_s [IN_s(t)]^- + b_w B_w(t). \quad (12)$$

ここで、 $[\cdot]^+ = \max\{\cdot, 0\}$ 、 $[\cdot]^- = -\min\{\cdot, 0\}$ である。式 (8) は時点 t での費用 $TC(t)$ を示し、発注に伴う費用 $TC_Q(t)$ 、輸送に伴う費用 $TC_S(t)$ 、在庫管理に伴う費用 $TC_I(t)$ 、バックオーダーや物資不足に伴うペナルティ費用 $TC_B(t)$ という 4 種類の費用の総和として与える。式 (9)-(12) は各費用の定義を表す。 q_s, q_w は単位あたりの発注費用、 s_o, s_w は単位あたりの輸送費用、 h_s, h_w は単位あたり在庫管理費用、 b_w は単位あたりのバックオーダー費用、 b_s は被災者の深刻度の尺度を示す費用係数である。被災者の深刻度の尺度を測定する方法論は確立されていないが、在庫管理費用よりも十分大きい値 ($h_s < b_s$) とするのが一般的な仮定である^{25),26)}。

(3) 意思決定ルールの定式化

本節では、分散制御システムにおける物流拠点 w と避難所 s の意思決定ルールを説明する。はじめに、情報環境を整理し、各主体がシステム全体の在庫量をどのように認識しているか述べる。次に、各主体が現時点で実行する戦略および将来的な計画を策定するための動学的最適化問題を定式化する。

a) 情報環境

はじめに、システムの情報環境を整理する。本研究で扱うシステムでは、リアルタイムな状況把握が可能な通信設備が復旧しておらず、情報伝達は単一の輸送車両群を介してのみ行われる。輸送車両は、輸送・発注戦略、各在庫量および施設を出発するまでに発生した物資需要量を伝達する。ただし、輸送車両が移動するには L_s だけ時間を要するため、 L_s だけ遅れた情報が伝えられる。また、避難所では被災者の需要情報を取りまとめるのに時間を要する状況が往々して発生する。このように情報整理に要する時間を Δ と表記する。このとき、物流拠点 w が受け取る需要情報は $\Delta + L_s$ だけ以前の情報となる。

上記の情報環境において、各主体は手元の在庫量や輸送車両を介して伝達された情報などの局所的な情報しか有していない。さらに、将来の物資需要は不確定であるため、式 (3)-(6) に示す実在庫の変化を用いて、現時点での意思決定および将来的な計画を策定することはできない。本システムでは、把握している情報に基づきシステム全体の在庫量を予測し、それをもとに戦略の策定を行うとする。ある変数 $x(t)$ に対する物流拠点 w と避難所 s の予測に基づく値（以下、予測値と呼称する）を $x^w(t), x^s(t)$ と表記する。例えば、 $Q_s^w(t)$ は避難所 s の発注量 $Q_s(t)$ を物流拠点 w が予測した値を示す。このとき、物流拠点 w によるシステム全体の在庫量の予測値の変化を次式で与える：

$$I_w(t+1) = I_w(t) + Q_w(t - 2L_w) - S_w(t), \quad (5)$$

$$B_w^w(t+1) = \max\{B_w^w(t) - I_w(t) - Q_w(t - 2L_w) + Q_s^w(t), 0\}, \quad (13)$$

$$B_w^w(0) = B_w(0), \quad (14)$$

$$IN_s^w(t+1) = IN_s^w(t) + S_w(t - L_s) - D_s^w(t). \quad (15)$$

また、避難所 s の予測値の変化を

$$I_w^s(t+1) = I_w^s(t) + Q_w^s(t - 2L_w) - S_w^s(t), \quad (16)$$

$$B_w^s(t+1) = \max\{B_w^s(t) - I_w^s(t) - Q_w^s(t - 2L_w) + Q_s^s(t), 0\}, \quad (17)$$

$$IN_s^s(t+1) = IN_s^s(t) + S_w^s(t - L_s) - D_s^s(t), \quad (18)$$

$$IN_s^s(0) = IN_s(0) \quad (19)$$

で与える．式 (5) および式 (13)-(19) のうち，上付き文字がない変数は実際の量と等しいことを示す．

在庫量の変化と同様にして，各主体は，システム全体で発生する費用も予測値に基づき算出する．物流拠点 w の予測に基づく費用 $TC^w(t)$ は，実際の在庫量の変化を表す式 (3)-(6) から予測値の変化を表す式 (5) および式 (13)-(15) への書き換えと同じように，次式で与える：

$$TC^w(t) = TC_Q^w(t) + TC_S(t) + TC_I^w(t) + TC_B^w(t), \quad (20)$$

$$TC_Q^w(t) = q_s Q_s^w(t) + q_w Q_w(t), \quad (21)$$

$$TC_S(t) = s_o Q_w(t - L_w) + s_w S_w(t), \quad (10)$$

$$TC_I^w(t) = h_s [IN_s^w(t)]^+ + h_w I_w(t), \quad (22)$$

$$TC_B^w(t) = b_s [IN_s^w(t)]^- + b_w B_w(t). \quad (23)$$

同様にして，時刻 t における避難所 s の予測に基づく費用 $TC^s(t)$ は，

$$TC^s(t) = TC_Q^s(t) + TC_S^s(t) + TC_I^s(t) + TC_B^s(t), \quad (24)$$

$$TC_Q^s(t) = q_s Q_s(t) + q_w Q_w^s(t), \quad (25)$$

$$TC_S^s(t) = s_o Q_w^s(t - L_w) + s_w Q_s(t - L_s). \quad (26)$$

$$TC_I^s(t) = h_s [IN_s(t)]^+ + h_w I_w^s(t), \quad (27)$$

$$TC_B^s(t) = b_s [IN_s(t)]^- + b_w B_w^s(t) \quad (28)$$

で与える．

発注量と輸送量の予測値 $Q_s^w(t), Q_w^s(t), S_w^s(t)$ および正味在庫量 $IN_s^w(t)$ ，在庫量 $I_w^s(t)$ ，バックオーダー量 $B_w^s(t)$ の初期値については，輸送車両を介して伝達された情報に従う．輸送車両から情報を受け取るまでは，各主体が独自に予測した値を与える．ある変数 $x(t)$ に対して物流拠点 w と避難所 s が独自に予測した値を $x^{w0}(t), x^{s0}(t)$ と表記する．ただし，避難所 s の正味在庫量 $IN_s^s(t)$ の変化については，発注量 $Q_s(t)$ だけ物流拠点が物資輸送を行うと予測し，式 (18) を次式に置き換える：

$$IN_s^s(t+1) = \begin{cases} IN_s^s(t) + S_w^s(t - L_s) - D_s^s(t) \\ \quad \text{if } t_{s0} > t - 2L_s, \\ IN_s^s(t) + Q_s(t - 2L_s) - D_s^s(t) \\ \quad \text{otherwise.} \end{cases} \quad (29)$$

ここで， t_{s0} は避難所 s が戦略を決定する時刻を表す．式 (29) に示すように， t_{s0} における発注が物流拠点に伝達され避難所 s に物資が届くまで ($t_{s0} > t - 2L_s$) は，式 (18) と同様に正味在庫量 $IN_s^s(t)$ を予測する．

需要量 $D_s(t)$ については，情報の遅れが伴う上に不確定であるため，将来的な計画の策定には予測が不可欠である．避難所 s は戦略を決定する時刻 t_{s0} より後の

需要量 $D_s^s(t)$ を予測する．物流拠点 w は戦略を決定する時刻 t_{w0} から $L_s + \Delta$ だけ遅れた需要情報を避難所 s から受け取り，その時刻より後の需要量 $D_s^w(t)$ を予測する．本システムでは，次の二種類のいずれかの需要予測方法を行うと仮定し，将来の確率的な物資需要を確定的な値に近似する：

- 物資需要の期待値 μ に従う ($\therefore D_s^s(t), D_s^w(t) = \mu$)．
- 過去の需要履歴をもとに移動平均法を用いて予測した値に従う．過去の p 個の需要履歴を用いて予測する場合，需要の予測値 $D_s^s(t), D_s^w(t)$ は次式で与えられる：

$$D_s^s(t) = \frac{\sum_{j=1}^p D_s(t_0 - j)}{p} \quad \forall t > t_0, \quad (30)$$

$$D_s^w(t) = \frac{\sum_{j=1}^p D_s(t_0 - j - L_s - \Delta)}{p} \quad \forall t > t_0 - L_s - \Delta. \quad (31)$$

ここで p は戦略的な操作が可能なパラメータである．

上記の二種類の需要予測は， $D_s(t)$ が定常過程という仮定に整合する．物資需要の期待値については，救援物資の原単位および被災地の潜在者数や収容人数を用いて推定可能である．各主体は，上記に示すように計算した値をシステム全体の在庫量の予測値とみなし，戦略の意思決定に用いる．

b) 最適化問題の定式化

主体 $m \in \{w, s\}$ は，輸送車両から新しい情報を取得した時刻 t_{m0} から一定時刻後 T_0 までに発生する費用を最小化するように戦略を決定する．ここで T_0 を計画期間と呼称する．以下では，簡単のため，物流拠点 w は発注量 Q_w^* と輸送量 S_w^* を，避難所 s は発注量 Q_s^* を意思決定し， $t \in [t_{m0}, t_{m0} + T_0]$ の期間の戦略とする ($\therefore Q_w(t) = Q_w^*, S_w(t) = S_w^*, Q_s(t) = Q_s^*$)．この仮定は，物資需要 $D_s(t)$ の確率分布が定常であれば整合的な仮定である．また，意思決定した $[t_{m0}, t_{m0} + T_0]$ 間の戦略のうち実行するのは，再び輸送車両が到着し新たな情報が得られる期間までの戦略である．このように，短期間の戦略を意思決定する際に，不確実性は伴うものの現在得られている将来の情報を用いて，長期的な視点を取り入れた意思決定方式をローリング・ホライズン方式と呼ぶ．上記の操作を繰り返すことで，無限期間の動的な意思決定が可能である．

以上の議論を踏まえ，期間 $[t_{m0}, t_{m0} + T_0]$ における主体 $m \in \{w, s\}$ の戦略を決定する最適化問題を次式で定式化する：

$$\min V^m = \sum_{t=t_{m0}}^{t_{m0}+T_0} TC^m(t) \exp\{-\rho(t - t_{m0})\} \quad \forall m \in \{w, s\} \quad (32)$$

subject to Eqs.(5)(13) – (31) and initial conditions.

表-1 費用係数パラメータの設定

パラメータ	q_s, q_w	s_w, s_o	h_s, h_w	b_s, b_w
Base	1.0	1.0	1.0	20.0
Case1	5.0	1.0	1.0	20.0
Case2	10.0	1.0	1.0	20.0
Case3	1.0	5.0	1.0	20.0
Case4	1.0	10.0	1.0	20.0
Case5	1.0	1.0	5.0	20.0
Case6	1.0	1.0	10.0	20.0

表-2 予測値の初期値の設定

初期値	Q_s^{w0}	$IN_s(0)$	$IN_s^{w0}(0)$	$I_w(0)$	$I_w^{s0}(0)$	$B_w(0), B_w^{s0}(0)$
Base	100	-40	-40	80	80	0
CaseA	100	-40	-40	80	100	0
CaseB	100	-40	-60	80	80	0
CaseC	120	-40	-40	80	80	0

ここで、 ρ は時間割引率を示し、 T_0 ともに時間選好の程度を表す戦略的パラメータである。各在庫量の初期値については外生的に与える。主体 $m \in \{w, s\}$ は、輸送車両から新しい情報を取得する度に、式 (32) に示す動的的最適化問題を解き戦略を決定する。

3. 数値計算

(1) 数値設定

本章では、設定した分散制御システムの性能と戦略の時間変化を検証するために、モンテカルロシミュレーションを行う。無限期間の計算は不可能であるため、数値計算では十分長い期間だけ物流拠点 w と避難所 s の意思決定を繰り返し実行する。以下では、計算の終了時刻を 700 と設定する。ただし、ローリング・ホライズン方式は最終期近辺で誤差が発生するため、 $t \in [0, 500]$ におけるシステムの挙動を分析する。また、 $t \in [0, 700]$ における物資需要 $D_s(t)$ の仮想実現値（サンプルパス）を 50 個生成し、 $D_s(t)$ のサンプルパスごとに物流拠点 w と避難所 s の戦略および在庫量を計算する。 $D_s(t)$ のサンプルパスは、期待値 $\mu = 20$ 、標準偏差 $\sigma = 10$ で、時刻 t に関して独立な連続一様分布より生成する。 $D_s(t)$ の下限は $\mu - \sqrt{3}\sigma$ 、上限は $\mu + \sqrt{3}\sigma$ である。なお、 $D_s(t)$ の期待値 μ は物流拠点 w と避難所 s ともに既知であり、需要予測に用いられる。施設間の走行時間は $L_w = 6, L_s = 2$ とし、最初の時点で二つの輸送車両が物流拠点 w に滞在していると設定する。需要情報については、遅れがない ($\Delta = 0$) 場合を Base ケースとして、遅れが発生するケース ($\Delta = 2, 4, 6$) を含め、計 4 ケースのいずれかの値を設定し計算する。費用係数パラメータについては表 1 に示す 7 ケース、予測値の初期値

については表 2 に示す 4 ケースの計算を行う。各主体が操作可能なパラメータは、計画期間 $T_0 = \{20, 50, 100\}$ 、時間割引率 $\rho = \{0, 0.01, 0.1\}$ 、移動平均法パラメータ $p = \{10, 50, 100\}$ を考える。需要予測に関しては、期待値 μ をそのまま予測値とする方法と、 $p = \{10, 50, 100\}$ の移動平均法の計 4 ケースを考える。移動平均法による需要予測は需要情報に遅れがない $\Delta = 0$ 場合のみ行うとする。

本研究の数値計算による検証は次の三つに分かれる。第一に、予測値の初期値による戦略の違いを検証する。ここでは、需要情報の遅れと費用係数パラメータについては Base ケースを設定し、表 2 に示す 4 ケースの予測値の初期値について数値計算を実行する。第二に、戦略的パラメータや需要情報の遅れによる戦略の変化を検証する。費用係数パラメータと予測値の初期値については Base ケースを設定する。第三に、システムの性能が向上する輸送・発注戦略の傾向を検証する。予測値の初期値については Base ケースとし、他のパラメータについては上記に示す全ての組合せ計 441 ケースの数値計算を行う。式 (32) に示す最適化問題の解法については、プログラム言語 python のモジュール `scipy.optimize.minimize` に実装されている制約付き局所的最適化手法の一つである逐次最小 2 乗法を用いた。

(2) 計算結果

はじめに、予測値の初期値の設定ごとに戦略の違いを検証し、本研究で定式化した分散制御システムの初期依存性を検証する。システムの初期依存性がないことは、各主体が自律的に行動することで全体最適化を実現する分散制御システムを構築する上で必要な要素である。各主体が情報交換と意思決定を繰り返し行うことによって、初期値に関わらず戦略がある一定の範囲に収束する場合、初期依存性が小さいシステムであることを示す。図 2-4 に予測値の初期値ごとの発注量 $Q_s(t), Q_w(t)$ および輸送量 $S_w(t)$ の時間変化を示す。青実線は Base ケース、緑破線は CaseA、黄色点線は CaseB、赤一点破線は CaseC で初期値を設定した場合の戦略の期待値を示し、期待値 \pm 標準偏差の範囲を塗りつぶしたものである。図 2 は計画期間を $T_0 = 50$ 、時間割引率を $\rho = 0.00$ 、需要予測を期待値 μ としたケース、図 3 は図 2 から時間割引率を $\rho = 0.01$ に変えたケース、図 4 は図 3 から需要予測を移動平均法 ($p = 100$) に変えたケースの結果を示す。なお、需要量の期待値の真値 μ は、物流拠点 w と避難所 s ともに既知である。

図 2,3 から分かるように、期待値 μ をそのまま需要の予測値とする場合、各主体が戦略を繰り返し決定することで、初期値に関わらず期待値がある一定の範囲に収束する。避難所 s の発注量 $Q_s(t)$ と物流拠点 w の輸送

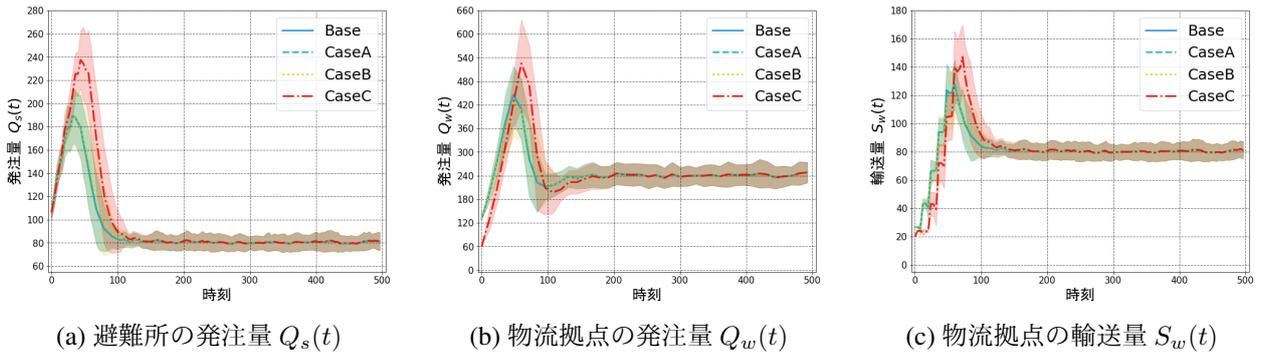


図-2 $T_0 = 50, \rho = 0.00, D_s^s(t), D_s^w(t) = \mu$ とした場合の発注戦略と輸送戦略の時間変化

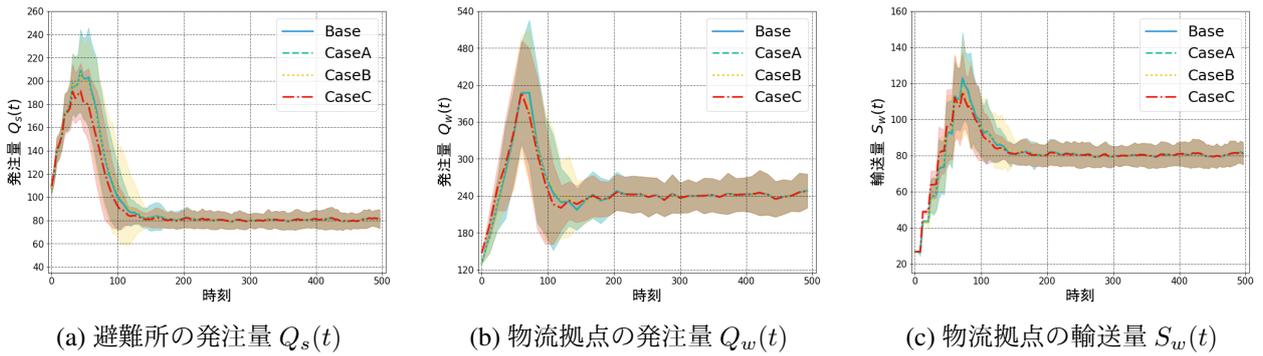


図-3 $T_0 = 50, \rho = 0.01, D_s^s(t), D_s^w(t) = \mu$ とした場合の発注戦略と輸送戦略の時間変化

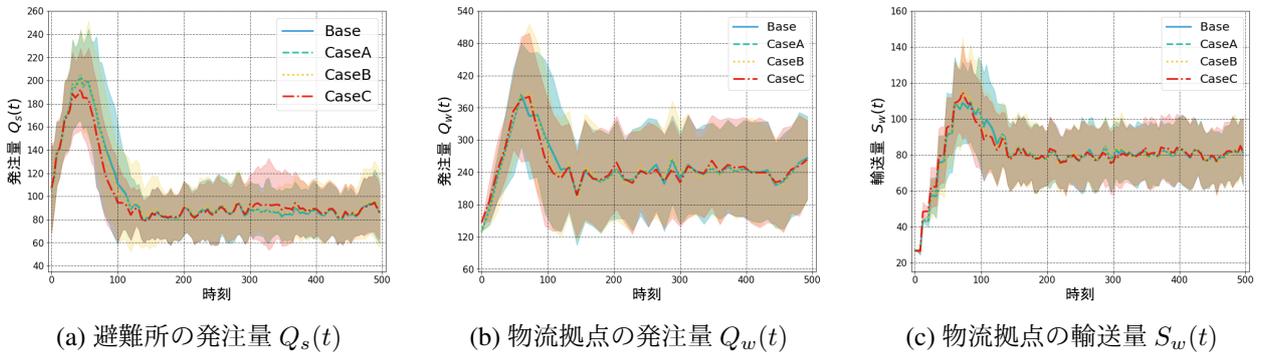


図-4 $T_0 = 50, \rho = 0.01, p = 100$ とした場合の発注戦略と輸送戦略の時間変化

量 $S_w(t)$ は、輸送車両が物流拠点と避難所を往復する時間 ($2L_s = 4$) の間に発生する需要の期待値 ($4\mu = 80$) に収束し、物流拠点 w の発注量 $Q_w(t)$ は、輸送車両が供給点と物流拠点を往復する時間 ($2L_w = 12$) の間に輸送する物資量 ($3 \times (S_w(t)$ が収束する値) = 240) に収束することが分かる。図 2 と図 3 を比較すると、収束する値は時間割引率 ρ に関係なく、ほぼ同じ値に収束することが見て取れる。一方で、移動平均法による需要予測を行う場合は、図 4 から分かるように、需要予測を期待値 μ としたケースにて収束した値の周辺で、戦略の期待値が変動する。さらに、初期値に依存して戦略の期待値および標準偏差が異なることが分かる。図 2,3 と図 4 を比較すると、移動平均法による需要予測を

行うことで、各時刻の標準偏差も大きくなっていることが見て取れる。また、図 2-4 のいずれのケースにおいても、明らかに、発注量 $Q_s(t), Q_w(t)$ と輸送量 $S_w(t)$ は同じような時間変化を示す。以上の結果から、需要の期待値 μ を需要の予測値とする場合は初期依存性の小さいシステムとなり、移動平均法による需要予測を行う場合は初期依存性が比較的大きいシステムとなることが示唆される。

次に、戦略的パラメータや需要情報の遅れによる戦略の変化を検証し、定式化した分散制御システムの性質を把握する。発注量 $Q_s(t), Q_w(t)$ と輸送量 $S_w(t)$ は同じような時間変化を示すことから、以下では、発注量 $Q_s(t)$ を代表して図示する。また、移動平均法による予

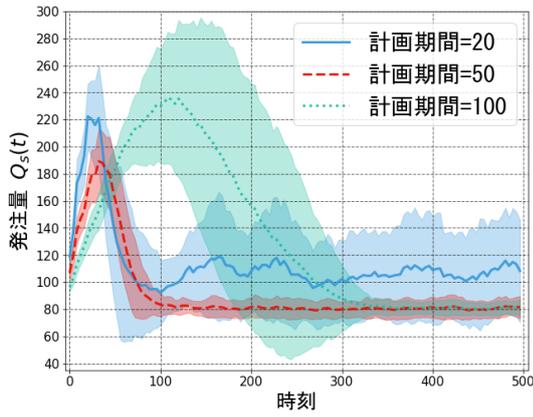


図-5-a $\rho = 0.00, \Delta = 0$

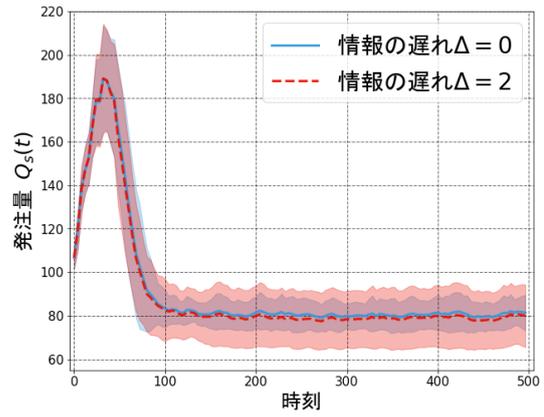


図-6-a $\rho = 0.00, T_0 = 50$

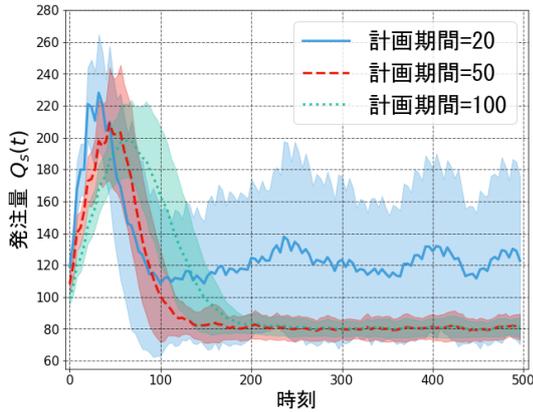


図-5-b $\rho = 0.01, \Delta = 0$

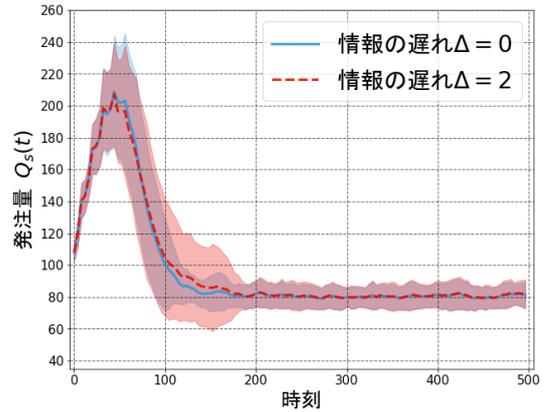


図-6-b $\rho = 0.01, T_0 = 50$

図-5 計画期間 T_0 ごとの発注量 $Q_s(t)$ の時間変化の比較

図-6 需要情報の遅れ Δ による発注量 $Q_s(t)$ の影響の比較

測は初期依存性を高めることが予想されるため、以下では期待値 μ を予測値として用いる。戦略的パラメータ (T_0, ρ) による戦略の変化を図5, 需要情報の遅れによる戦略の変化を図6に示す。

図5から分かるように、時間割引率 ρ に関わらず、計画期間を $T_0 = 50, 100$ と長くすると発注量 $Q_s(t)$ の期待値がある一定の範囲に収束し、計画期間を $T_0 = 20$ と短くすると収束しない傾向にある。これは、主体が短期的な視点で戦略を決定する場合、戦略のばらつきが大きくなり、分散制御システムの挙動が安定しないことを示唆する。また、計画期間が $T_0 = 50$ と $T_0 = 100$ とした場合 $Q_s(t)$ の時間変化を比較すると、 $T_0 = 100$ のほうが収束するまでに多くの時間を要していることが見て取れる。さらに、図5の上図と下図を比較すると分かるように、時間割引率を $\rho = 0.01$ とすると、 $T_0 = 50$ のケースは収束が遅くなり、 $T_0 = 100$ のケースは収束が早くなる。以上の結果から、計画期間 T_0 を大きくすることで収束はするものの、収束までの速度は計画期間 T_0 と時間割引率 ρ による時間選好の程度に依存する

ことが示唆される。

需要情報の遅れによる影響については、図6から分かるように、遅れが発生すると発注量 $Q_s(t)$ の期待値はほぼ変化のないまま、ばらつきが大きくなる。災害時には情報の遅れが往々にして発生するため、この戦略のばらつきの増加をいかに抑えるかは一つの行動指針と考えられる。図6の上図と下図を比較すると、時間割引率を $\rho = 0.01$ と大きくすることで、需要情報の遅れによるばらつきの増加が小さくなっていることが見て取れる。このことから、時間割引率の与え方が、需要情報の遅れによる戦略のばらつきの増加を抑制する方策の一つであることが示唆される。

最後に、システムの総費用と戦略の関係性を検証する。ここまで、戦略的パラメータ (T_0, ρ, p) による戦略のばらつきや収束性への影響を整理した。以下では、戦略のばらつきとシステムの性能との関係性を明らかにすることで、全体最適を実現する分散制御システムを構築するための知見を得る。図7に示すのは、各戦略の標準偏差と総費用の二次元ヒストグラムを図示した

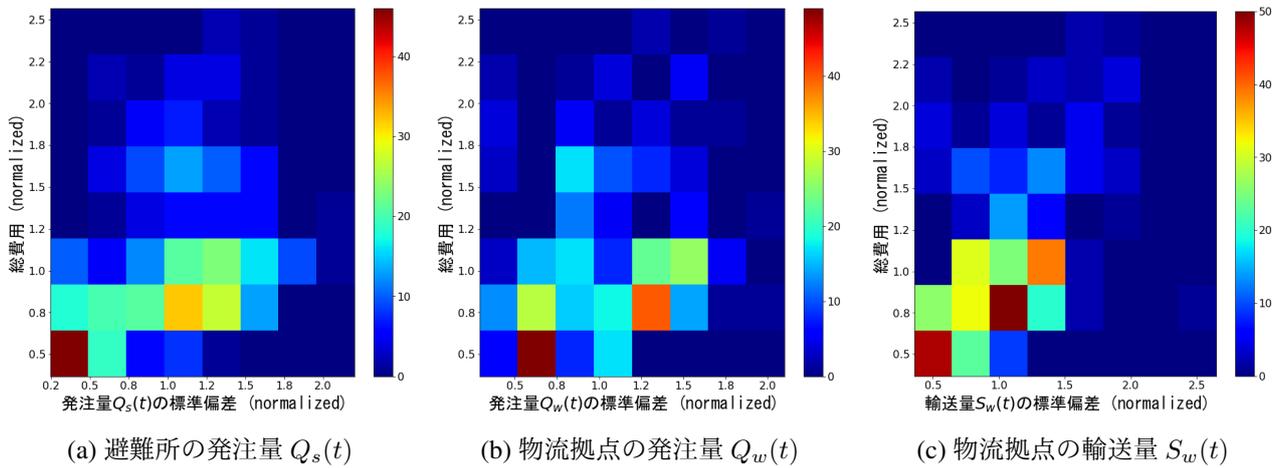


図-7 戦略の標準偏差と総費用の二次元ヒストグラム

ものである。横軸は、各時刻の戦略の標準偏差に関して時間平均したものを、費用係数パラメータと需要情報の遅れの組合せごとに期待値で正規化した値を示す。縦軸は、各試行ごとに算出した総費用の平均を、同様の方法で正規化した値を示す。図7から分かるように、戦略の標準偏差の時間平均と総費用の平均は正の相関関係にある。このことは、戦略のばらつきを抑えることで分散制御システムの性能が良化する可能性を示唆する。戦略的パラメータ (T_0, ρ, p) を操作することで、戦略はある一定の範囲に収束しばらつきも小さくなるため、 (T_0, ρ, p) が全体最適を実現する分散制御システムの構築に向けた主要素の一つであると考えられる。

4. おわりに

本研究は、救援物資の需要に関する情報の利用可能性が制限される環境下でも迅速かつ的確に救援物資を供給できる物流方策を策定するために、物流拠点や避難所が救援物資を分散的に制御するシステムを検討した。災害時には通信設備が損傷するため、単一の救援組織が指揮する物流システムの性能は大きく低下する。実際に、情報システムが機能していないために重複発注が発生し、物流システムの停滞を招いたことが過去の災害で確認されている。この点を踏まえれば、避難所や物流拠点が分散的に救援物資の発注や輸送を意思決定することで、不要な在庫を削減しながら適切に救援物資を供給できる物流システムの性能を検証することは自然な発想であろう。本研究は、小規模な分散制御モデルの数値実験を通じて、HL 特有の性質を考慮した救援物資の分散制御方策の策定に向けた基礎的な知見を得る。

上記のシステムの性質を検証するために、単一の物流拠点と避難所が輸送車両を介して情報交換を行いな

がら、新しい情報を得る度に戦略を策定するという行動規範を繰り返す動的な分散制御モデルを構築した。輸送車両による情報交換は、通信設備が被災する中でも容易に実装可能と考えられる。物流拠点は、輸送車両から得られた発注情報や過去の需要履歴をもとに避難所の在庫量や需要量を予測し、外部の供給者に発注する量と避難所に輸送量を意思決定する。避難所も同様に、輸送車両から得られる情報を元に予測を行い、物流拠点に発注する量を決定する。各主体の意思決定はローリング・ホライズン方式で実行することで、無限期間の意思決定を計算することができる。この分散制御モデルの数値実験を行い、得られた知見を以下に整理する：

- 過去の需要履歴を用いて将来の需要を予測する移動平均法により需要量の予測値を与える場合、各主体の戦略は初期値に依存する。
- ローリング・ホライズン方式における計画期間を小さく取り、短絡的な視点で戦略を決定する場合、戦略のばらつきが大きくなり、システムの挙動が不安定となる。計画期間を大きくすることでばらつきが小さくなり戦略はある一定の範囲に収束するが、収束までの速度は計画期間と時間割引率による時間選好の程度に依存する。
- 需要情報の取りまとめに時間を要する場合、戦略のばらつきが大きくなる傾向にある。この戦略のばらつきの増幅を抑える方策の一つとして、時間割引を考慮した意思決定の効果を示した。
- 戦略のばらつきとシステムの総費用は正の相関関係にある。時間選好の程度を表すパラメータ (e.g., 計画期間や時間割引率) の与え方は、戦略の収束性やばらつきの抑制に寄与することから、自律的に全体最適化を実現する分散制御システム構築の鍵となることが示唆される。

本研究は、HL の分散制御モデルの開発に向けた基礎的な知見を得ることを大きな目的として、単一の物流拠点と避難所という二つの戦略的主体による最も簡易な分散制御システムを検証した。実際には、物流拠点や避難所は複数存在するため、発注戦略と輸送戦略の自由度が大きくなり、各戦略が収束しない可能性が考えられる。さらに、避難所間での在庫競争や物流拠点間での在庫負担の分散により、本研究で明らかにしたものとは異なる性質が発現することは十分に想定できる。複数の物流拠点と避難所で構成される分散制御システムの性質について、適切な成果が出た際には発表時に追加で報告する予定である。

挑戦的な課題としては、需要情報の伝達方法や確率分布に関して、より現実的なモデルを検討することである。本研究では、輸送車両を介して主体間の情報交換を行うと定義したが、実際には物資輸送と情報伝達は異なる機能が担当するため、様々な情報伝達方法を検証する必要がある。河瀬ら (2021)¹⁷⁾ は、災害時の物流システムの性能が情報伝達のタイミングに大きく依存することを定量的に示しており、(情報技術に頼らない) 情報伝達方法を検討することは効率的な HL の発展に寄与することが期待できる。また、本研究の数値計算では需要量の確率分布が定常分布であるとしたが、在庫量の変動が小さく、避難所に在庫が存在する確率が高いほど需要の変動も小さくなるなど、戦略に応じて需要量の確率分布は変化すると想定される。今後は、本研究の数値計算や上記の拡張を施したシステムの数値計算より得られた知見を用いて、自律的に全体最適化を実現する分散制御システムを構築する。

謝辞： 本研究は、科学研究費補助金（特別研究員奨励費「災害時における人道支援物流に関する最適化の数理（課題番号 21J12181）」、代表：河瀬理貴）の一環として実施された。

参考文献

- 1) Thomas, A. S. and Mizushima, M.: Logistics training: necessity or luxury, *Forced migration review*, Vol.22, pp.60–61, 2005.
- 2) Sheu, J.-B.: Challenges of emergency logistics management, *Transportation research part E: logistics and transportation review*, Vol.43, No.6, pp.655–659, 2007.
- 3) Thomas, A. S. and Kopczak, L. R.: From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector, *Fritz Institute*, Vol.15, pp.1–15, 2005.
- 4) Altay, N. and Green III, W. G.: OR/MS research in disaster operations management, *European journal of operational research*, Vol.175, No.1, pp.475–493, 2006.
- 5) Galindo, G. and Batta, R.: Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management, *European Journal of Operational Research*, Vol.230, No.2, pp.201–211, 2013.
- 6) Van Wassenhove L. N.: Humanitarian aid logistics: supply

- chain management in high gear, *The Journal of the Operational Research Society*, Vol.57, No.5, pp.475–489, 2006.
- 7) Holguín-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., Pérez, N., and Wachtendorf, T.: On the unique features of post-disaster humanitarian logistics, *Journal of Operations Management*, Vol.30, pp.494–506, 2012.
- 8) 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)*, Vol.76, No.5, pp.1987–1999, 2021.
- 9) Sourirajan, K., Ramachandran, B., and An, L.: Application of control theoretic principles to manage inventory replenishment in a supply chain, *International Journal of Production Research*, Vol.46, No.21, pp.6163–6188, 2008.
- 10) Holguín-Veras, J., and Taniguchi, E., and Jaller, M., and Aros-Vera, F., and Ferreira, F., and Thompson, R. G.: The tohoku disasters: Chief lessons concerning the post disaster humanitarian logistics response and policy implications, *Transportation research part A*, Vol.69, pp.86–104, 2014.
- 11) Ozguven, E. E. and Ozbay, K.: A secure and efficient inventory management system for disasters, *Transportation research part C: emerging technologies*, Vol.29, pp.171–196, 2013.
- 12) Ozguven, E. E. and Ozbay, K.: An RFID-based inventory management framework for emergency relief operations, *Transportation research part C: emerging technologies*, Vol.57, pp.166–187, 2015.
- 13) Biswal, A. K., Jenamani, M., and Kumar, S. K.: Warehouse efficiency improvement using RFID in a humanitarian supply chain: implications for indian food security system, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.109, pp.205–224, 2018.
- 14) Biswal, A. K., Jenamani, M., and Kumar, S. K.: The impact of RFID adoption on donor subsidy through for-profit and not-for-profit newsvendor: Implications for Indian Public Distribution system, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol.69, pp.205–224, 2020.
- 15) 総務省: 平成 23 年版情報通信白書 (<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h23.html>), [Accessed Sep. 28, 2021].
- 16) 国土交通省: 『支援物資物流システムの基本的な考え方』に関するアドバイザー会議報告書 (<https://www.mlit.go.jp/common/000184634.pdf>), [Accessed Jun. 17, 2020].
- 17) 河瀬理貴, 井料隆雅, 浦田淳司: 情報の不確実性を考慮した救援物資の在庫輸送戦略の数理解析, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.77, No.3, pp.184–200, 2021.
- 18) Beamon, B. M. and Kotleba, S. A.: Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol.9, No.1, pp.1–18, 2006.
- 19) McCoy, J. H. and Brandeau, M. L.: Efficient stockpiling and shipping policies for humanitarian relief: UNHCR's inventory challenge, *OR spectrum*, Vol.33, No.3, pp.673–698, 2011.
- 20) Das, R. and Hanaoka, S.: Relief inventory modelling with stochastic lead-time and demand, *European Journal of Operational Research*, Vol.235, No.3, pp.616–623, 2014.
- 21) Cachon, G. P.: Stock wars: inventory competition in a two-echelon supply chain with multiple retailers, *Operations Research*, Vol.49, No.5, pp.658–674, 2001.
- 22) Axsäter, S.: A framework for decentralized multi-echelon inventory control, *Iie Transactions*, Vol.33, No.2, pp.91–97, 2001.

- 23) Jemai, Z. and Karaesmen, F.: Decentralized inventory control in a two-stage capacitated supply chain, *IIE transactions*, Vol.39, No.5, pp.501–512, 2007.
- 24) Hoseinia, M., Esfahani, M. S., Didehvar, F., and Haghi, A.: Inventory competition in a multi channel distribution system: the nash and stackelberg game, *Scientia Iranica*, Vol.20, No.3, pp.846–854, 2013.
- 25) Balcik, B. and Beamon, B. M.: Facility location in humanitarian relief, *International Journal of logistics*, Vol.11, No.2, pp.101–121, 2008.
- 26) Rawls, C. G. and Turnquist, M. A.: Pre-positioning of emergency supplies for disaster response, *Transportation research part B: Methodological*, Vol.44, No.4, pp.521–534, 2010.