

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	災害復旧期における情報の不確実性を考慮した在庫配送計画モデルの提案
Title(English)	INVENTORY DISTRIBUTION MODEL FOR RELIEF SUPPLY CONSIDERING INFORMATION UNCERTAINTY AFTER A MAJOR DISASTER
著者(和文)	河瀬理貴, 浦田淳司, 井料隆雅
Authors(English)	Riki Kawase, Junji Urata, Takamasa Iryo
出典(和文)	第57回土木計画学研究発表会・講演集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2018, 6
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2018 Japan Society of Civil Engineers.

災害復旧期における情報の不確実性を 考慮した在庫配送計画モデルの提案

河瀬 理貴¹・浦田 淳司²・井料 隆雅³

¹学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: r-kawase@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: urata@person.kobe-u.ac.jp

³正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

熊本地震では、従来のプル型支援に加えて、災害対策基本法改正で新たに導入されたプッシュ型支援による支援物資供給が初めて実施された。これにより被災地内の物資調達不足は解消されたものの、ラストワンマイル輸送がボトルネックとなり、タイムリーな物資供給は実現しなかった。ロジスティクスの観点からは、現行の物資供給システムの改善が指摘されており、末端まで考えた全体最適な輸送体制を整備することは不可欠である。本研究では、最適な供給システムの算出を可能とするためにプッシュ・プル型の輸送体制を前提とした在庫配送計画モデルを構築する。具体的には、需要不足に対するペナルティコスト及び在庫コストを目的関数とする遅れを含む確率的最適制御理論を用いる。さらに情報の伝達を含めたサプライ・チェーン (SC:Supply Chain) を想定し、プッシュ・プル型を模した在庫配送計画モデルを提案する。これにより、情報の不確実性及びそれを増長させる情報伝達の遅れを考慮した最適な配送計画を算出できる。最後に数値計算により、システムの定量評価を行う。

Key Words: humanitarian supply chain management, bullwhip effect, stochastic problem, optimal control theory

1. はじめに

大規模災害が多発する我が国において、被害を最小化するための防災・減災対策は不可欠である。交通網やインフラの損傷などの直接被害だけでなく、支援物資の不足による二次被害を抑えることは災害からの早期復旧を促す。物資の的確で迅速な供給は、こうした二次被害を抑え経済回復の遅れの最小化を可能とする。現在、我が国ではこうした支援物資の不足を改善すべく、被災地の要請を待つことなく国が供給するというプッシュ型の支援方策が計画されている¹⁾。2016年に発生した熊本地震では初めてプッシュ型支援が適用され一定の効果を上げたが、被災地内の二次集積所から避難所の間の「ラストワンマイル」で物資が停滞したことが指摘されている²⁾。こうした中、災害時における適時適切な物資供給のためのシステム構築は急務であると言える。

この熊本地震での経験を踏まえ、幾つかのシステムの改善案が提案されている。樋口 (2017)³⁾ は発災後 72 時間以内の物資供給に着目し、物資を避難所に直接供給できる体制作りを主張している。伊藤ら (2017)⁴⁾ も同様にプッシュ型支援の在り方について検討し、二次集積所の廃止を提案している。しかし、これらはプッシュ

型支援についてのみ考察されており、被災地から情報を受けて供給を行うプル型の支援策については述べられていない。発災直後は被災地内の通信が断絶しているため、平時のように正確な情報を随時把握することは困難となる。熊本地震の際には避難所ニーズの把握が遅れ、不必要な物資が集積所に滞留し物流機能を低下させたことが問題視されている²⁾。故にプル型支援策の最適なシステムを構築することは有用である。久保・橋本 (2016)⁵⁾ はプル型までを含めた物資供給に関する基本原則を示し、それに基づいた新しいシステムを提案している。特に、混乱する発災直後においては ICT の利用を前提としないカンバン方式のような簡易な方法による情報伝達が有効であると述べている。しかし既存の研究・提言の中では、システムの定量評価・数値検討はなされておらず、客観性は十分でない。そうした中、想定される災害規模に応じたシステムを提案するためにも定量評価を可能とする在庫配送計画モデルの開発は不可欠であろう。こうした背景の下で、本研究では、プッシュ・プル型の支援方策における最適なシステムの同定のために、発災直後における情報伝達を考慮した在庫配送計画モデルを構築する。

既存の救援物資のための在庫配送計画モデルについては、人口の増加と共に災害リスクが高まる中で多く

のモデルが開発されている。久保ら⁶⁾は、その中でも不完全情報下で意思決定をする必要のある点が救援物資のロジスティクスの困難性であると述べている。この不確実性を考慮するために、確率論的なモデリング手法が利用されている。これらの手法は大きく「オフラインモデル」と「オンラインモデル」の二つに分類できる。

オフラインモデルに関する既存研究としては古典的な在庫理論を用いた研究 (Beamon and Kotleba(2006)⁷⁾) や二段階確率計画法 (Barbarosoglu and Arda(2004)⁸⁾, Chang et al.(2007)⁹⁾), ロバスト最適化 (Najafi et al.(2013)¹⁰⁾) による研究がある。これらのモデルは、想定される災害とその被害確率に対して総期待費用を最小化することでシステムの事前評価を行う。すなわち、発災前に予測した避難所の想定需要をもとに供給量を決定するプッシュ型支援策のモデリングに相当する。しかし事前予測と実際の状況は乖離しやすく、これまでの我が国での経験を踏まえれば、途中からプル型の支援策に遷移する方策が有効であろう。不確実なパラメータをインプットとして与え、事前に最適な制御を求めるオフラインモデルのアプローチはプル型の支援策を評価できない。

一方、オンライン・モデルは災害後に収集される情報の活用を前提とした単一意思決定者の支援モデル¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾である。これによりプル型の支援策も考慮したリアルタイムの意思決定支援が可能となる。しかし、これらのモデルは全ての意思決定者（集積所）が情報を同時に共有している状況を仮定しており、発災直後の通信断絶下の意思決定モデルとしての適用は難しい。発災直後における情報収集には遅れが伴い、その遅れは SC の上流に行くほどは増大する。こうした環境下では情報の同時共有は不可能となり集積所間で異なる情報を有するため、各々が独立して意思決定を行う必要が生じる。加えて、情報の遅れは鞭効果 (Bullwhip Effect: 情報が上流に行くほど、その不確実性が増大する¹⁵⁾) を引き起こし、物資ニーズのミスマッチングを齎す。故に、発災直後の通信断絶下における物資支援モデリングのためには情報の遅れを考慮することが欠かせない。

本研究では、発災直後の最適なプッシュ・プル型の供給システムを算出するために、情報の不確実性及び情報の遅れを考慮した在庫配送計画モデルを提案する。提案モデルはベイズ更新により情報伝達を表現し、エシロン在庫（各集積所から見て下流にある在庫をすべて含めたもの）の考え方を援用することにより、集積所間の情報の差異をモデル化する。さらに、確率的最適制御問題として定式化することにより、システムの理論的検証を可能とする。2 章では、熊本地震における物資供給の実態をレビューを行う。3 章では、プッシュ・

プル型を模した最適制御問題を定式化し、ベイズ学習による情報更新の方法について説明する。4 章では、単純なネットワークに対して最適解を導出し、既存の提案システムについて理論的根拠を示す。5 章では、数値計算を行い、情報更新の効果を検証する。6 章では、結論と今後の課題について述べる。

2. 熊本地震における支援物資供給の実態

本節では、熊本地震における物資供給に関する論文、論説、報告を対象にレビューし、現行の日本の支援物資供給システムの問題点を整理する。まずは、1) 国が行った物資供給の流れを示し、輸送計画における問題点を述べる。次に、2) 熊本地震における物資供給の実態を「ラストワンマイル」と「情報の把握・共有」の二つに分けて整理する。1) については、内閣府の平成 28 年熊本県熊本地方を震源とする地震非常災害対策本部会議の資料及び議事録¹⁶⁾、平成 28 年熊本地震に係る初動対応検証チームの資料¹⁷⁾、熊本地震を踏まえた応急対策・生活支援検討ワーキンググループの資料¹⁸⁾ や西脇ら¹⁹⁾ を参照した。2) については、上記を含め 10 本の文献^{2)–6), 16)–20)} を元に整理した。物資供給の実態と既に提言されている改善案について整理したものを表-1 に示す。

(1) 物資供給の流れ

国による支援物資供給の流れを図-1 に示す。物資の多くは国の発注によりメーカーから調達され、熊本県の物資拠点（一次集積所）から各市町村の物資拠点（二次集積所）へ輸送、その後避難所へ配送されるプッシュ型システムが計画された (図-1-a)。しかし実際には、図-1-b に示すシステムでプッシュ型の支援策が行われた。その後プル型の支援策に切り替えられ、27 日には iPad を用いた物資発注システムが導入された (図-1-c)。国からの支援は 5 月 13 日まで行われたが、その後、被災地の物流機能回復に伴い熊本県に業務が引き継がれた。熊本地震はプッシュ型の支援策を適用した初の事例ということもあり、国による事前の輸送計画には想定が十分でない点が多かった。特に、国は熊本県までの輸送しか計画しておらず、その先のラストワンマイルにおける物資停滞を助長させた。

(2) 物資供給の実態

土木計画学研究委員会物流調査団²⁾によれば、プッシュ型支援により過去の災害に比べて物資が被災者のもとへ届いたという評価がなされている。しかし依然として、タイムリーな物資支援は実現しなかった。主な原因として、「二次集積所とその先のラストワンマイ

表-1 支援物資の実態と既存研究による提言

		実態	提言
輸送計画	(a) 想定不足	被災地の行政機能低下により国が避難所までの輸送を担ったが、県までしか想定していなかったため対応が遅れた。	SC ネットワークの末端である避難所までの物資輸送を計画する。
	(b) 備蓄品の不足	備蓄は水害に備えた小規模なものであり、被災地自治体の備蓄量が少なかった。	少なくとも3日程度は被災地外からの配送がなくとも物資が不足しないように備蓄しておくべき。
	(c) 一次集積所	計画していた一次集積所が被災。県外に新たな拠点を設けたが、施設の確保には時間を要した。	被害の規模ごとに対応可能な物流拠点のリスト化する。
	(d) 役割分担	国や自衛隊、物流事業者、民間企業等複数の主体間で度々役割分担に見直しが生じ混乱した。	役割分担の明確化（自衛隊：道路アクセス不能な地域、NPO：指定外避難所の対応）
ラストワンマイル問題	(e) 処理能力の不足	被災地内は物流機器が十分でなく、「集積所での作業効率」「ラストワンマイルでの輸送力」ともに不足。	物流事業者との協力を迅速に要請する。行政機能が麻痺した被災地内施設は中抜きし、直接避難所に輸送する。
	(f) 配送困難性	道路アクセスが寸断されている地域や指定外避難所など物流事業者による物資配送が困難な地域が存在。	役割分担の明確化（自衛隊：道路アクセス不能な地域、NPO：指定外避難所の対応）※再掲
	(g) 個人支援物資	規格が不均一な個人からの支援物資は、集積所での作業効率の低下を招いた。	配送先の負担が大きい個人支援物資は抑制、若しくは規格をルール化する。
情報の把握・共有	(h) 需要のミスマッチ	避難所需要の早期把握ができず、物資のミスマッチが発生。集積所に不要物資が滞留し、作業効率の低下を招いた。	ICT を用いて情報を一元化する。配送状況はプローブデータによる管理が有効である。一方で発災直後は通信障害が発生する可能性が高いので ICT が利用できない状況下でも、情報の流れを単純化する仕組みを作る必要がある。
	(i) 情報の不足	避難所ニーズに関する情報だけでなく、道路や配送状況等の情報も不足しており、配送の遅延を増長させた。	
	(j) 情報の多元化	情報伝達ルートが多様化していたため要請漏れや重複要請が発生。	

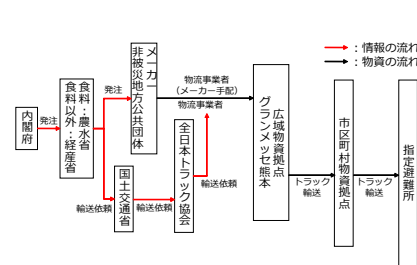


図-1-a 事前想定

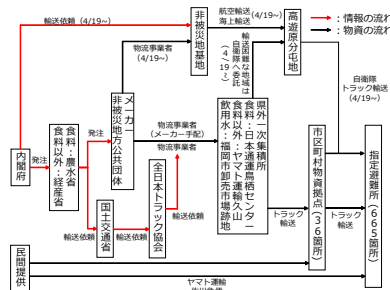


図-1-b プッシュ型支援 (4/16~4/23)

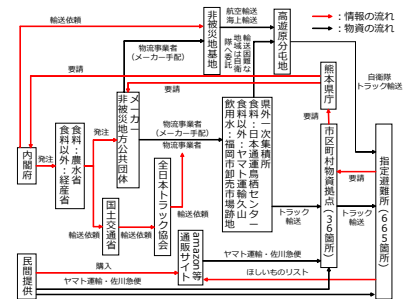


図-1-c プル型支援 (4/24~5/13)

図-1 国による物資供給の流れ

ルのスループット（単位時間あたりの供給量）の不足（ラストワンマイル問題）」と「被災者の情報が把握できなかったことによる不要物資の滞留（情報の把握・共有）」が挙げられている。

- ラストワンマイル問題とは、下流の最大スループットを超える物資が二次集積所以降の SC に供給される場合に生じる問題である。元より物流機能を有していない被災地内の最大スループットは被災地外に比べ小さいため、物資が次々と二次集積所に輸送されると物資の停滞が生じる。熊本地震の際には熊本市内の集積所であるうまかな・よかなスタジアムに大量の輸送トラックが流入し、最大約 95 台もの待ち行列が発生した。加えて、内容も規格も不均一な個人支援物資の流入がさらなる最大スループットの低下を招いた。
- 発災直後においては必要物資に関する情報が不足し、避難所ニーズのミスマッチングや配送の遅延を引き起こす原因となる。GPS 衛星からの情報や

タブレットを用いたりリアルタイム情報の把握・共有システムの構築が有効であるが、通信障害により ICT が十分に機能しない状況も大いに考えられる。故に、通信を前提としない単純な情報伝達の仕組みを想定する必要もある。

3. 在庫配送計画モデル

(1) モデルの仮定

本節では、プッシュ・プル型を模した在庫配送計画モデルの定式化を行う。2章で示した支援物資供給の実態をもとに提案モデルでは以下の仮定を置く。括弧内は表-1 のどの点を想定したものであるかを示す。

- (ア) 国の計画が不備なく実施されることを想定し、SC ネットワークは可変でないとする (a)。この計画は物資拠点が被災した場合でも、即座に新たな施設を確保可能なものである (c)。また、この仮定は民間企業や個人による外部からの物資流入がないこ

と (g), 指定外避難所は考慮しないこと (d) を示している。

- (イ) 陸路輸送のみを考える (f). 輸送形態は輸送元から輸送先までの往復のみとし, 各集積所はスループットの制御が可能であるとする. ただし, この仮定は集積所における詰替えの利点を考慮せず在庫調整の役割のみを有することを意味する.
- (ウ) 避難所の需要は完全情報でない (h). プッシュ型では, 発災直後の避難所に関する情報の不足を想定し, 事前に予測した需要をもとにスループットを決定する. プル型では, 避難所から定期的に一元化された情報が伝達され (j), それをもとに情報更新を行う. 上流に行くほど情報の遅れが増大することを考慮して, 情報更新は下流ほど頻繁であるとする. また通信が回復し, 避難所の情報が随時把握できる状況については対象としない.
- (エ) 配送状況や道路状況は集積所間で共有可能であるとする (i).
- (オ) 被災地は物資の処理能力が小さいため, SC ネットワークの下流ほどスループットの上限は小さい (e). また備蓄品は十分でなく発災直後に需要が満たされることはない (b).

(2) 遅れを含む確率的最適制御問題

a) 確率的最適制御理論の概要

動学的最適化の問題の一つとして最適制御問題がある. これは動学システム系のもとで損失や利益を最小 (最大) 化する制御系を決定する問題として定式化される. この問題の解析法の一つとして, Pontryagin et al(1987)²¹⁾ が確立した最適制御理論によるアプローチがある. Pontryagin et al(1987)²¹⁾ は, 動学的最適化問題の極値の必要条件である最大値原理を定式化した. これにより古典的な変分法では扱うことのできなかった境界上の点を最適解とする問題の解析を可能とした. 最適制御理論はその後, 確率的最適制御問題²²⁾ や遅れ時間をもつ最適制御問題²³⁾ へと発展した. 本研究では, 需要の不確実性及び輸送時間を考慮するため固定の遅れ時間を持つ確率的最適制御問題²⁴⁾ の枠組みを援用する.

b) 在庫配送計画モデルの定式化

本研究では3つのノードと3つのリンクを有する有向グラフを対象とする (図-2). ここで一次集積所から避難所に向かうリンクは避難所への直送を想定している. 定式化は以下の通りである.

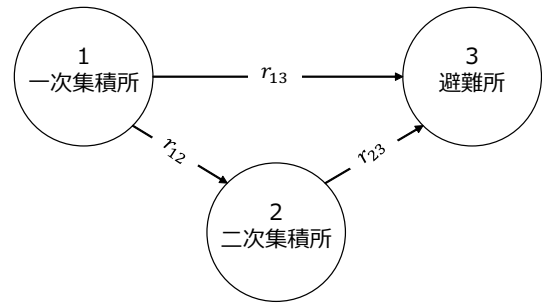


図-2 SC ネットワーク

集合

$N = \{1, 2, 3\}$: ノード集合 (1: 一次集積所, 2: 二次集積所, 3: 避難所)

$N^+ = \{1, 2\}$: 集積所ノード集合

C_j : ノード j の子ノード集合

P_j : ノード j の親ノード集合

制御変数

$S_{ij}(t)$: 時刻 t にノード i からノード j へ輸送する単位時間あたりのスループット

状態変数

$B_i(t)$: 時刻 t においてノード i が認知している避難所の残存需要

$I_{i3}(t)$: 時刻 t においてノード i が認知している避難所 3 の在庫量

$I_2(t)$: 時刻 t におけるノード 2 の在庫量

$IT_{ij}(t)$: 時刻 t においてノード i からノード j に輸送している輸送中在庫量

パラメータ

T : 計画終了時間

$\bar{S}_i(t)$: 時刻 t におけるノード i の単位時間あたりのスループット上限 ($\partial \bar{S}_i / \partial t \geq 0, \bar{S}_2(t) < \bar{S}_1(t)$)

h'_i : ノード i の在庫コスト ($0 = h'_0 < h'_1 < h'_2 < h'_3 < 1$)

h_i : ノード i の認知在庫コスト ($h_i = h'_i - h'_{i-1}$)

$D_{i\mu}(t)$: t 時にノード i が認知している避難所の単位時間あたり消費量の平均

$D_{i\sigma}(t)$: t 時にノード i が認知している避難所の単位時間あたり消費量の標準偏差

$D_\mu(t)$: t 時における避難所の単位時間あたり平均消費量の事前想定値 ($\dot{D}_\mu \leq 0$)

$D_\sigma(t)$: t 時における避難所の単位時間あたり消費量の標準偏差の事前想定値

$z_i(t)$: 標準ウィーナー過程

r_{ij} : ノード i からノード j へ輸送する際の輸送

時間 ($r_{13} < r_{12} + r_{23}$)

k_i : ノード i における情報更新間隔 ($k_i < k_{i-1}$)

目的関数

$$\min . V = E \int_0^T [TC_1(t) + TC_2(t) + TC_3(t)] dt + TC_4(T) \quad (1)$$

$$TC_1(t) = \sum_{i \in N} h_i (f(B_i(t)) + f(I_{i3}(t))) \quad (2)$$

$$TC_2(t) = (1 - h'_3) f(B_3(t)) \quad (3)$$

$$TC_3(t) = h'_2 f(I_2(t)) \quad (4)$$

$$TC_4(T) = \sum_{i \in N^+} h'_i \sum_{j \in C_i} f(IT_{ij}(T)) \quad (5)$$

制約条件

$$dB_i(t) = [D_i(t) - \sum_{i \in P_3} S_{i3}(t - r_{i3})] dt \quad \forall i \in N^+ \quad (6)$$

$$D_i(t) dt = D_{i\mu}(t) dt + D_{i\sigma}(t) dz_i(t) \quad \forall i \in N^+ \quad (7)$$

$$B_3(t) = B_2(t) \quad (8)$$

$$dI_{i3}(t) = -dB_i(t) \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$\dot{I}_2 = S_{12}(t - r_{12}) - S_{23}(t) \quad (10)$$

$$\dot{IT}_{ij}(t) = S_{ij}(t) - S_{ij}(t - r_{ij}) \quad \forall j \in C_i, i \in N^+ \quad (11)$$

$$\partial f(x)/\partial x \geq 0, \quad \partial^2 f(x)/\partial x^2 \geq 0 \quad (12)$$

$$0 \leq S_{ij}(t) \quad \forall j \in C_i, i \in N^+ \quad (13)$$

$$\sum_{j \in C_i} S_{ij}(t) \leq \bar{S}_i(t) \quad \forall i \in N^+ \quad (14)$$

$$I_2(t) \geq 0 \quad (15)$$

$$IT_{ij}(t) \geq 0 \quad \forall j \in C_i, i \in N^+ \quad (16)$$

境界条件

$$B_i(0) = -I_{i3}(0) > 0 \quad \forall i \in N^+ \quad (17)$$

$$I_2(0) > 0 \quad (18)$$

$$IT_{ij}(0) = 0 \quad \forall j \in C_i, i \in N^+ \quad (19)$$

$$S_{ij}(t) = 0 \quad \forall t \in [-r_{ij}, 0), j \in C_i, i \in N^+ \quad (20)$$

式 (2)(3) は認知している残存需要と在庫コスト, 式 (4) は二次集積所における在庫コスト, 式 (5) は輸送在庫コストを示す。提案モデルでは式 (2)-(4) の総コストの積分と式 (5) の輸送在庫コストの和を目的関数とし, 最小化を行う。式 (1) の目的関数はエシュロン在庫を援用した定式化であるが, 認知している避難所の残存需要/在庫量が全ての集積所で同じである場合, 実在庫による定式化と一致する。式 (6) は認知している避難所

の残存需要の動的変化を示し, 不確実性を有する。不確実性に関しては, 各集積所が避難所に対して主観的な消費量分布 (式 (7)) をもつとして, 避難所から伝達される情報に基づきこれを更新する。ただし一次集積所 1 と二次集積所 2 のみが意思決定者であることを考慮し, 避難所 3 が認知している残存需要を式 (8) と与える。また式 (9) は認知している避難所の在庫が残存需要と逆方向に動的変化することを示す。一方で輸送状況に関する情報は完全である (3.(1) 節の仮定 (エ)) とし, 二次集積所の在庫の動的変化を式 (10), 輸送中在庫の動的変化を式 (11) の常微分方程式で示し, 非負制約 (15)(16) を与える。ただし式 (11) より, 輸送中在庫の非負制約 (16) は明示的に満たされる。式 (12) は残存需要量・在庫量に対するコストの逓増性を示す。また災害時には十分な物資供給ができない可能性を想定し, 式 (13)(14) のスループットの上限制約を与える。スループットの上限は 3.(1) 節の仮定 (オ) に基づき, 下流ほど小さいものとする。境界条件式 (17)(18)(19) はそれぞれ, 発災直後の物資不足, 集積所における備蓄品, 発災直後には輸送車両がない状況を想定している。

式 (12) より式 (1) の被積分関数が状態変数について凸であること, 及び式 (6)-(11) の動学システム系が制御変数について線形であることからマンガサリアンの十分定理を満たす。また式 (13)(14) の不等式制約は制御変数について線形であり制約想定を満たす。

(3) ベイズ型の情報更新過程

a) ベイズ学習の定式化

本研究では, 各集積所が避難所に対して主観的な消費量分布を保持し, 避難所からの情報伝達によってその確率がベイズ更新される情報伝達アルゴリズムを導入する。災害時において避難所から伝達される情報は将来の予測を伴う不確かなものであり, 不確かな情報を扱うならば, 複数回の情報伝達による情報の蓄積を考えるべきであろう。ベイズ型の情報更新過程は, こうした社会的学習過程のモデル化を可能とする。

情報更新を行う避難所の消費量 (主観的な消費量) は式 (7) より, 次の正規分布に従う。

$$D_i(t) dt \sim N \left(D_{i\mu}(t) dt, (D_{i\sigma}(t))^2 dt \right) \quad (21)$$

避難所からの情報を $\tilde{D}(t)$ (ただし $\partial \tilde{D}/\partial t \leq 0$), 尤度分布の標準偏差を $\sigma(t)$, n 回目の更新における事後分布のパラメータを $\mu_{i\mu n}(t)$, $\sigma_{i\mu n}(t)$, 予測分布のパラメータを $D_{i\mu n}(t)$, $D_{i\sigma n}(t)$ とすると時刻 t における条件付き主観的消費量分布の更新は次式となる。

$$\mu_{i\mu n}(t) = \frac{(\sigma(t))^2}{(\sigma(t))^2 + (\sigma_{i\mu, n-1}(t))^2} \mu_{i\mu, n-1}(t)$$

$$+ \frac{(\sigma_{i\mu,n-1}(t))^2}{(\sigma(t))^2 + (\sigma_{i\mu,n-1}(t))^2} \tilde{D}(t) \quad (22)$$

$$(\sigma_{i\mu n}(t))^2 = \frac{(\sigma(t))^2 (\sigma_{i\mu,n-1}(t))^2}{(\sigma(t))^2 + (\sigma_{i\mu,n-1}(t))^2} \quad (23)$$

$$D_{i\mu n}(t) = \mu_{i\mu,n}(t) \quad (24)$$

$$(D_{i\sigma n}(t))^2 = (\sigma_{i\mu n}(t))^2 + (\sigma(t))^2 \quad (25)$$

$$\mu_{i\mu 0}(t) = D_{\mu}(t) \quad (26)$$

$$\sigma_{i\mu 0}(t) = D_{\sigma}(t) \quad (27)$$

ただし需要は非定常であるので情報更新が断続的に行われるとすると、次の情報更新が行われるまでの需要を予測する必要がある。ここでは簡単に $n-1$ 回目の情報更新値との差だけ平行移動させたものを事後分布と予測分布の平均値 $\mu_{i\mu n}(t)$, $D_{i\mu n}(t)$ の予測値とする。

$$D_{i\mu n}(t) = D_{\mu}(t) + (D_{i\mu n}(nk_i) - D_{\mu}(nk_i)) \quad (28)$$

$$\mu_{i\mu n}(t) = D_{i\mu n}(t) \quad (29)$$

また次の情報更新が行われるまでの間は事後分布と予測分布の変動係数は一定であるとする。これにより事後分布と予測分布の標準偏差 $\sigma_{i\mu n}(t)$, $D_{i\sigma n}(t)$ も同時に算出可能となる。

$$D_{i\sigma n}(t) = D_{i\sigma n}(nk_i) / D_{i\mu n}(nk_i) * D_{i\mu n}(t) \quad (30)$$

$$\sigma_{i\mu n}(t) = \sigma_{i\mu n}(nk_i) / \mu_{i\mu n}(nk_i) * \mu_{i\mu n}(t) \quad (31)$$

情報更新を k_i 間隔で行うとすると、主観的な消費量分布のパラメータ $D_{i\mu}(t)$, $D_{i\sigma}(t)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} D_{i\mu}(t) &= D_{i\mu n}(t) \\ D_{i\sigma}(t) &= D_{i\sigma n}(t) \end{aligned} \quad t \in [nk_i, nk_i + k_i) \quad (32)$$

本研究では、この主観的な消費量分布のパラメータを用いて、プル型システムの最適なスループットを算出する。

b) 鞭効果

導入した情報更新アルゴリズムが鞭効果を再現できることを示す。情報の遅れが伴う通信断絶下における物資供給システムの中で、鞭効果の発生は必至であろう。故に、提案モデルによって鞭効果が再現可能であることは、既存モデルからの大きな改善点である。ここでは簡単のため、需要が定常である場合を考える。平時のロジスティクスにおいて、鞭効果は発注量と需要量の分散比で定量的に評価される。本研究では情報更新された需要を元にスループットを決定するので、情報更新前後の需要の分散比が $(D_{i\sigma n-1})^2 / (D_{i\sigma n})^2 > 1$ であることを確認すれば良い。さらに尤度分布の分散 $(\sigma)^2$ は情報更新回数 n に依存しないので、分散の逆数を $\nu = \sigma^{-2}$ とすると式 (23)(25) より

$$\frac{(\sigma_{i\mu,n-1})^2}{(\sigma_{i\mu n})^2} = \frac{\nu_{i\mu n}}{\nu_{i\mu,n-1}} = \frac{\nu_{i\mu,n-1} + \nu}{\nu_{i\mu,n-1}} > 1 \quad (33)$$

となる。従って、ベイズ型の情報更新過程により鞭効果が表現されていることが示された。

4. 最適制御経路

本節では、図-2 の SC ネットワークを対象にプッシュ型・プル型の輸送体制における最適なスループットの導出を行う。さらに導出した最適制御を用いて、プッシュ型からプル型への切り替えについて論ずる。以下では簡単のため、関数 $f(x)$ を次式で与える。これは式 (12) を満たす。

$$f(x) = \begin{cases} x^2 & x \geq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (34)$$

(1) プッシュ型物資供給システム

3.(1) 節の仮定 (ウ) に基づき、各避難所に等しい想定需要を与える。

$$D_1(t) = D_2(t) = D(t) \quad (35)$$

この時、目的関数 (1) は次に示す実在庫による定式化に書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \min V = E \int_0^T [f(B(t)) + \sum_{i=2}^3 h'_i f(I_i(t))] dt \\ + TC_4(T) \end{aligned} \quad (36)$$

最大値原理より問題を各時刻毎の問題に分割すると、任意の時刻 t について次の最適性条件が得られる。ただし状態制約式 (15) について、indirect approach²⁵⁾ を用いる。

$$S_{ij}^*(t) = \arg \min_{S_{ij}} \{ \mathcal{L}(t) + \chi_{[0, T-r_{ij}]}(t) E[\mathcal{L}(t+r_{ij})] \}$$

$$\forall j \in C_i, i \in N^+$$

$$\mathcal{L}(t) = L(t) + \eta(t) (S_{23}(t) - S_{12}(t-r_{12}))$$

$$\begin{aligned} L(t) = H(t) + \sum_{i \in N_i} \{ - \sum_{j \in C_i} \theta_{ij}(t) S_{ij}(t) \\ + \theta_i(t) (\sum_{j \in C_i} S_{ij}(t) - \bar{S}_i(t)) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(t) = F(t) + (\lambda_B(t) - \lambda_{I_3}(t)) (D_{\mu}(t) \\ - S_{13}(t-r_{13}) - S_{23}(t-r_{23})) \\ + \lambda_{I_2}(t) (S_{12}(t-r_{12}) - S_{23}(t)) \\ + \sum_{i \in N^+} \sum_{j \in C_i} \lambda_{IT_{ij}}(t) (S_{ij}(t) - S_{ij}(t-r_{ij})) \\ + (\Lambda_B(t) - \Lambda_{I_3}(t)) D_{\sigma}(t) \end{aligned} \quad (37)$$

$$F(t) = f(B(t)) + \sum_{i=2}^3 h'_i f(I_i(t))$$

ここで $\eta(t)$, $\theta(t)$ は非負なラグランジェ乗数, $\chi_{[0, T-r_{ij}]}(t)$ は $t \in [0, T-r_{ij}]$ であれば 1, そうでなければ 0 を示すバイナリ変数である。また状態制約に関するラグランジェ乗数の導関数 $\dot{\eta}$ は非正であ

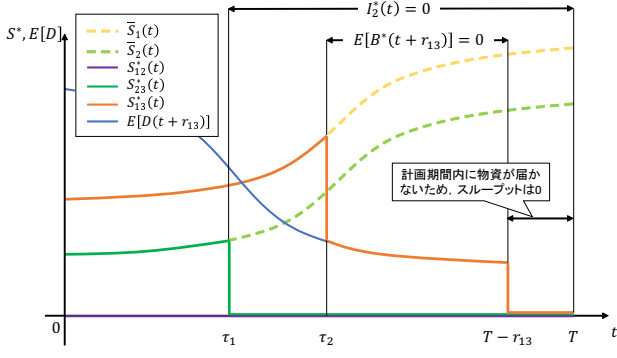


図-3 プッシュ型における最適なスループット

る。さらに随伴変数 $\lambda(t)$, $\Lambda(t)$ は次の微分方程式を満たす。

$$d\lambda_B(t) = \begin{cases} -2B(t)dt \\ + \Lambda_B(t)dz_B(t) & B(t) \geq 0 \\ \Lambda_B(t)dz_B(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (38)$$

$$d\lambda_{I_3}(t) = \begin{cases} -2h_3I_3(t)dt \\ + \Lambda_{I_3}(t)dz_{I_3}(t) & I_3(t) \geq 0 \\ \Lambda_{I_3}(t)dz_{I_3}(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (39)$$

$$\dot{\lambda}_{I_2}(t) = -2h_2I_2(t) \leq 0 \quad (40)$$

$$\dot{\lambda}_{IT_{ij}}(t) = 0 \quad \forall j \in C_i, i \in N^+ \quad (41)$$

$$\lambda_B(T) = 0, \lambda_{I_3}(T) = 0, \lambda_{I_2}(T) = 0 \quad (42a, b, c)$$

$$\lambda_{IT_{ij}}(T) = 2h_iIT_{ij}(T) \geq 0 \quad \forall j \in C_i, i \in N^+ \quad (43)$$

最適性条件 (37) 及び微分方程式 (38)-(43) を用いると、最適なスループットの組み合わせ $\{S_{12}^*, S_{23}^*, S_{13}^*\}$ は図-3 となる。ただし、二次集積所の在庫 $I_2^*(\tau_1)$ が 0 となる時刻を τ_1 、避難所の残存需要の期待値 $E[B^*(\tau_2 + r_{13})]$ が 0 となる時刻を τ_2 とする。詳しい導出過程は付録に示す。

図-3 から、全ての時刻 t において $S_{12}^*(t) = 0$ となっており、一次集積所から二次集積所に物資は輸送されないことが分かる。一方で一次集積所から避難所への直接輸送 $S_{13}^*(t)$ は、計画期間内に物資が届く限り行われている。これは樋口 (2017)³⁾ や伊藤ら (2017)⁴⁾ が提案している「避難所に直接輸送できる体制作り」が最適なシステムであることを理論的に示している。また τ_2 以降は想定需要に応じたスループットが選択されている。この時、残存需要・在庫量ともに 0 であるこの状態が最適であることが分かる。

(2) プル型物資供給システム

プッシュ型とは異なり、情報伝達により各集積所は異なる情報を有する。すなわち、

$$D_1(t) \neq D_2(t) \quad (44)$$

プッシュ型システムと同様に最大値原理を用いると、最適なスループットは図-4 となる。ただし τ'_2 を次で与

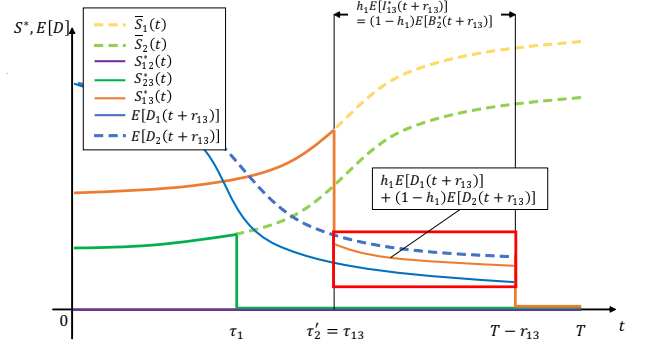
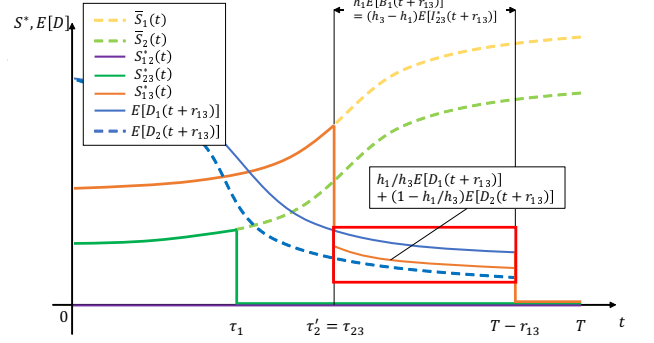

 図-4-a $\tau'_2 = \tau_{13}$ の場合

 図-4-b $\tau'_2 = \tau_{23}$ の場合

図-4 プル型における最適なスループット

える。

$$\tau'_2 = \min\{\tau_{13}, \tau_{23}\} \quad (45)$$

$$h_1E[I_{13}^*(\tau_{13} + r_{13})] = (1 - h_1)E[B_2^*(\tau_{13} + r_{13})] \quad (46)$$

$$h_1E[B_1^*(\tau_{23} + r_{13})] = (h_3 - h_1)E[I_{23}^*(\tau_{23} + r_{23})] \quad (47)$$

ここで式 (46)(47) は認知している残存需要若しくは在庫によるコストが集積所の間で均衡する状態である。図-4 から分かるように、プッシュ型システム同様に直接輸送が最適である。一方で赤枠内で示す需要に応じたスループットが選択される際に、プッシュ型と最適なスループットが異なることが分かる。これは式 (46)(47) の均衡状態を満たすようなスループットが選択されており、避難所が在庫をもつ状態が最適であると言える。

(3) プッシュ型からプル型への切り替え

プッシュ型からプル型への切り替えが一回で十分であるための十分条件を示す。集積所への情報伝達が $n = 1$ 回であるとき、ベイズ更新式 (22)-(32), 図-3, 4 より需要に応じたスループット $S_{13}^{push}(t)$, $S_{13}^{pull}(t)$ は次となる。

$$S_{13}^{push}(t) = D_\mu(t + r_{13}) \quad (48)$$

$$S_{13}^{pull}(t) = D_\mu(t + r_{13}) + \frac{(D_\sigma)^2}{(D_\sigma)^2 + (\sigma)^2} \mathcal{D} \quad (49)$$

$$\mathcal{D} = \begin{cases} h_1 \left(\tilde{D}(k_1) - D_\mu(k_1) \right) \\ \quad + (1 - h_1) \left(\tilde{D}(k_2) - D_\mu(k_2) \right) & \tau'_2 = \tau_{13} \\ \frac{h_1}{h_3} \left(\tilde{D}(k_1) - D_\mu(k_1) \right) \\ \quad + \left(1 - \frac{h_1}{h_3} \right) \left(\tilde{D}(k_2) - D_\mu(k_2) \right) & \tau'_2 = \tau_{23} \end{cases} \quad (50)$$

ここで避難所からの情報が真であるとし、これと式 (48)(49) の最適スループットとの誤差

$$\varepsilon^{system} = \left| \tilde{D}(t + r_{13}) - S_{13}^{system}(t) \right| \quad system \in \{push, pull\} \quad (51)$$

でプッシュ型とプル型のシステムを評価する。

$$(i) D_\mu(t + r_{13}) - \tilde{D}(t + r_{13}) > 0$$

式 (48)(49) より $\mathcal{D} > 0$ のとき $\varepsilon^{push} < \varepsilon^{pull}$ となる。ここで消費量が単調減少であることから、

$$\tilde{D}(k_2) - D_\mu(t) \geq \mathcal{D} \quad (52)$$

を得る。これより $\varepsilon^{push} < \varepsilon^{pull}$ であるための必要条件は

$$\tilde{D}(k_2) - D_\mu(k_1) > 0 \quad (53)$$

となる。従って $\varepsilon^{push} > \varepsilon^{pull}$ であるための十分条件は

$$\tilde{D}(k_2) - D_\mu(k_1) \leq 0 \quad (54)$$

である。さらに消費量の単調減少性と $D_\mu(t + r_{13}) - \tilde{D}(t + r_{13}) > 0$ を考慮すると、

$$\tilde{D}(t) - D_\mu(t) \leq 0 \quad \forall t \in [k_2, T] \quad (55)$$

である限り、プル型による制御が有効と言える。

$$(ii) D_\mu(t + r_{13}) - \tilde{D}(t + r_{13}) < 0$$

(i) と同様にして、 $\varepsilon^{push} > \varepsilon^{pull}$ であるための十分条件は次式となる。

$$\tilde{D}(k_1) - D_\mu(k_2) \geq 0 \quad (56)$$

消費量の単調減少性と $D_\mu(t + r_{13}) - \tilde{D}(t + r_{13}) < 0$ より、次式を満たす限りプル型による制御が有効である。

$$\tilde{D}(t) - D_\mu(t) \geq 0 \quad \forall t \in [k_2, T] \quad (57)$$

(i)(ii) より、事前想定 $D_\mu(t)$ と真の需要 $\tilde{D}(t)$ との差が常に正、若しくは負である限りプル型による制御が有効である。さらに、式 (55)(57) は最初の情報伝達 k_2 から計画終了 T までの十分条件式であることから、事前想定と真の需要の大小が逆転しない限り、プッシュ型からプル型への切り替えが一回で十分であることが分かる。これを逆説的に考えるならば、次の二点の提案が可能となる。

- 精度の高い予測が困難な場合については、ナイーブな需要予測を行い、情報の収集と共に学習しながら物資を供給するプル型のシステムが適切である。被災地内における物資の不足を想定するならば、過大に予測するのが妥当であろう。

表-2 数値設定

t	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	D_μ		$\tilde{D}$
			case1	case2	
[0, 10)	2	1.5	4.5	3.5	4
[10, 20)	4	3.5	3	3	2
[20, 30]	6	5.5	1.5	1.5	1
Δt	$B_1(0), B_2(0)$		$I_2(0)$		(h_1, h_2, h_3)
0.1	200		(3, 2, 4)		(0.3, 0.5, 0.7)

- 正確な予測が可能であるならば、情報が伝達されるのを待たずして物資の輸送を行うプッシュ型のシステムが適切である。

5. 数値計算

(1) 数値計算の設定

図-2 を対象に数値計算を行い、情報更新の効果を検証する。ここでは、情報更新間隔 k_i の感度分析を行う。数値計算におけるパラメータを表-2 で設定する。消費量の標準偏差の事前想定値 D_σ については変動係数を 1、尤度分布の標準偏差 σ については任意に $\sigma = 10$ で与えた。二種類のパラメータを設定し、case1 については全ての時刻 t において十分条件式 (55)(57) を満たし、case2 については $t \in [10, 30]$ において満たすように設定した。

(2) 計算結果

本節では、提案モデルを用いてプッシュ型とプル型のシステムを評価する。評価指標として、避難所からの情報が真であるとして計算した場合のプッシュ型とプル型の目的関数の比率を用いる。目的関数の比率 $\mathcal{V}$ は次式で算出する。

$$\mathcal{V} = V_{pull} / V_{push} \quad (58)$$

V_{push} はプッシュ型の最適スループットで算出した目的関数、 V_{pull} はプル型の最適スループットで算出した目的関数である。

図-5 に目的関数の比率に対する情報更新間隔 k_i の感度分析の結果を示す。図-5-a、5-b はそれぞれ case1 と case2 の設定で計算したものである。横軸と縦軸はそれぞれ一次集積所と二次集積所の情報更新間隔を示し、原点に近いほど情報更新が頻繁である。また $(k_1, k_2) = (30, 30)$ の組み合わせは情報更新回数が 0 回であるため、プル型の支援システムと等しい。図-5-a については全ての $\{k_1, k_2\}$ において、図-5-b については $k_2 \geq 10$ において十分条件式 (55)(57) を満たす。また色で目的関数の比率を示している。図-5-a から、十分条件式 (55)(57) を満たす領域においてプル型による制御が有効であると分かる。この傾向は、図-5-b にも確認できる。加え

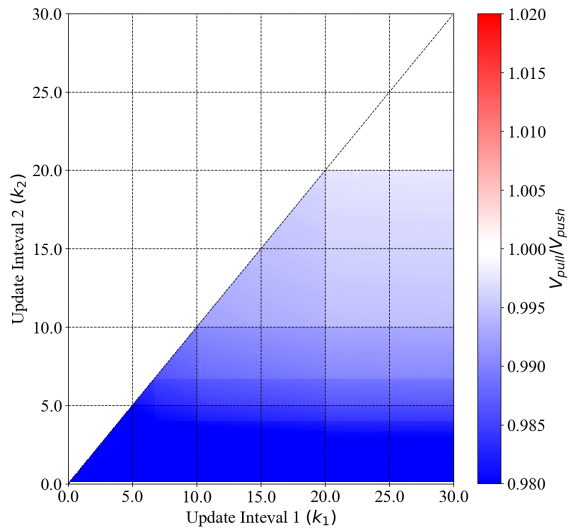


図-5-a case1

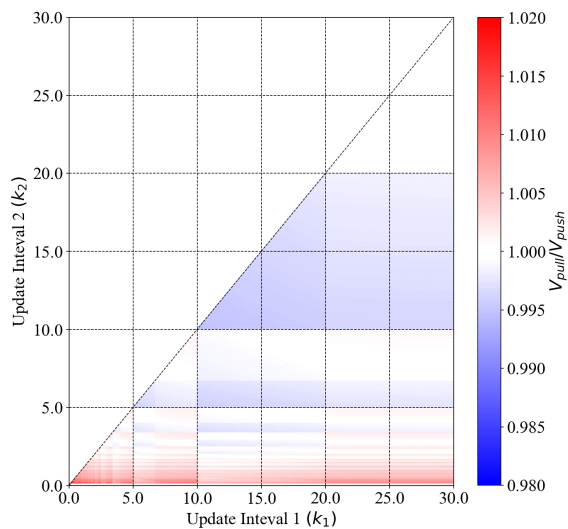


図-5-b case2

図-5 目的関数の改善率

て、図-5-a から分かるように情報更新回数が多いほどプル型の目的関数が小さくなっている。また、情報更新間隔 k_i の逆数が情報更新回数 n であることから、色の筋は情報更新回数の境界、若しくは得られる情報の違いを示していると考察できる。一方、図-5-b から、事前想定 $D_\mu(t)$ と真の需要 $\tilde{D}(t)$ の大小の逆転が起こる場合については、プッシュ型の制御が有効となる場合があることが分かる。

6. おわりに

本研究では、発災直後の通信が困難な状況におけるプッシュ・プル型の在庫配送計画モデルを構築した。日本では 2016 年に発生した熊本地震における救援物流の実態を踏まえ、物資供給システムの改善案が考案され

ている。しかしながらシステムの定量評価を可能とする手法は開発されておらず、客観性が十分でない。災害リスクマネジメントの高まりに伴い、ICT を活用した意思決定支援モデルが開発されているものの、情報の同時共有が困難な発災直後において適切なモデルとは言い難い。そこで、本研究では、ベイズ型の情報更新過程とエシュロン在庫の考え方を援用することにより、情報伝達とその遅れをモデル化した。さらに確率的最適制御理論を用いて、不確実性を伴う状況を模した定式化を示した。これにより、物資供給システムの理論的検証が可能となる。

一次集積所・二次集積所・避難所を想定した簡単な SC ネットワークを対象として、提案モデルを適用した。まず、導出した最適なスループットより、一次集積所から避難所への直接的な供給が効率的であることを示した。これにより、既存の提案「一次集積所から避難所への直接的な輸送体制」の有効性を理論的に根拠付けた。さらに、プッシュ型とプル型の物資支援システムにおけるスループットの違いを明らかにし、予測した需要と真の需要との大小関係が不変である条件においてプッシュ型からプル型への切り替えが一回で十分であることを示した。これはプッシュ型とプル型のシステムを同じ枠組みで構築した本モデルでのみ評価が可能である。また簡単な数値計算例によって、情報更新アルゴリズムによる効果を検証した。予測した需要と真の需要との大小関係が不変でない場合については、さらに調査が必要である。

今後の課題として、複数の集積所と避難所によって形成される SC ネットワークに対して、提案モデルを拡張することが挙げられる。この SC ネットワークの上では、情報伝達の遅れが集積所間で異なるだけでなく、避難所間でも同様の差異が生じる。実際の物資供給において避難所が広範囲に分布していることを考えると、複数の集積所と避難所のネットワークを対象とした理論検証は不可欠である。また、今回は限られたケースについてのみ数値計算を行っている。ベイズ型の情報更新過程を引き続きとるのであれば、多様なケースにおける計算が必要となる。特に情報が幾度も伝達される際には、その情報に対する信頼度が重要な側面となるだろう。物流からの側面に対する課題として、物資の輸送形態を往復のみとした強い仮定が挙げられる。トラック資源の効率的な活用を考慮するならば、二次集積所で詰替えを行い巡回して物資を供給する制御が有効となる状況も考えられる。ただし、この場合にも「効率的なトラック活用」と「迅速な供給」のトレードオフが存在するため、動学的最適化問題による定量評価が必要となる。

謝辞: 本研究の一部は、「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発（文部科学省）」の重点課題（3）「地震・津波による複合災害の統合予測システムの構築」のサブ課題 B「統合的予測のための社会科学シミュレーションの開発」および、科学研究費補助金（基盤研究（A）「ポスト・ビッグデータ時代に向けた次世代交通システムの動学的マネジメント手法の構築（課題番号 16H02368）」、代表：井料隆雅）の一環として実施された。

付録 プッシュ型物資支援の最適制御の導出

(1) 物資到達区間： $t \in [0, T - r_{13}]$

最適性条件 (37) より最適制御の必要条件は次となる。

$$-\theta_{12}(t) + \theta_1(t) + E[\lambda_{I_2}(t + r_{12}) - \eta(t + r_{12})] = 0 \quad (59)$$

$$-\theta_{23}(t) + \theta_2(t) - \lambda_{I_2}(t) + \eta(t) + E[-\lambda_B(t + r_{23}) + \lambda_{I_3}(t + r_{23})] = 0 \quad (60)$$

$$-\theta_{13}(t) + \theta_1(t) + E[-\lambda_B(t + r_{13}) + \lambda_{I_3}(t + r_{13})] = 0 \quad (61)$$

まず問題を制御変数について非制約の側面から見る ($\theta(t) = 0$)。このときラグランジェ関数 $\mathcal{L}(t)$ が制御変数について線形であることから最適制御は特異制御となる。特異制御となる時刻を τ_2 とすると、特異制御は式 (59)-(61) より次の条件を満たす。

$$\lambda_{I_2}(\tau_2 + r_{12}) = \eta(\tau_2 + r_{12}) \geq 0 \quad (62)$$

$$-\lambda_{I_2}(\tau_2) + E[-\lambda_B(\tau_2 + r_{23}) + \lambda_{I_3}(\tau_2 + r_{23})] = -\eta(\tau_2) \leq 0 \quad (63)$$

$$E[-\lambda_B(\tau_2 + r_{13}) + \lambda_{I_3}(\tau_2 + r_{13})] = 0 \quad (64)$$

ここで式 (64) の増分を考えると、

$$E[-d\lambda_B(\tau_2 + r_{13}) + d\lambda_{I_3}(\tau_2 + r_{13})] = 0 \quad (65)$$

さらに式 (9)(17)(38)(39) より $B(t) = -I_3(t)$ であるから次の最適経路が得られる。

$$E[B^*(\tau_2 + r_{13})] = 0 \quad (66)$$

しかし実際には制御変数制約 (13)(14) により、直ぐに式 (66) を満たすような制御することは不可能である。ここで $t \in [0, \tau_2)$ における最適制御を考えると、式 (17)(40)(42c)(66) より、 $\lambda(t)$ は次式を満たす。

$$\lambda_{I_2}(t) \geq 0 \quad (67)$$

$$-\lambda_{I_2}(t) + E[-\lambda_B(t + r_{23}) + \lambda_{I_2}(t + r_{23})] \leq 0 \quad (68)$$

$$E[-\lambda_B(t + r_{13}) + \lambda_{I_2}(t + r_{13})] \leq 0 \quad (69)$$

$$E[-d\lambda_B(t + r_{13}) + d\lambda_{I_2}(t + r_{13})] \geq 0 \quad (70)$$

これらを用いて $t \in [0, T - r_{13}]$ における最適制御を求めることができる。

(1-a) 状態制約非拘束区間： $t \in [0, \tau_1)$

状態制約式 (15) が非拘束的である区間 $t \in [0, \tau_1)$ において、 $\eta(t) = 0$ である。式 (59)-(61)(67)-(69)、 $\theta(t)$ の相補性条件式より最適制御は次となる。

$$(S_{12}^*, S_{23}^*, S_{13}^*) = (0, \bar{S}_2, \bar{S}_1) \quad (71)$$

(1-b) 状態制約非拘束区間： $t \in [\tau_1, \tau_2)$

状態制約式 (15) が拘束的であるから、ラグランジェ乗数 $\eta(t)$ は非負である。さらに相補性条件式より、

$$S_{23}^*(t) = S_{12}^*(t - r_{12}) \quad (72)$$

が得られる。残りの制御変数 (S_{12}^*, S_{13}^*) について、最適となるための必要条件は式 (59)-(61) より、

$$-\theta_{12}(t) + \theta_1(t) - \theta_{23}(t + r_{12}) + \theta_2(t + r_{23}) + E[\lambda_{I_2}(t + r_{12} + r_{23}) - \eta(t + r_{12} + r_{23})] = 0 \quad (73)$$

$$-\theta_{13}(t) + \theta_1(t) + E[-\lambda_B(t + r_{13}) + \lambda_{I_3}(t + r_{13})] = 0 \quad (74)$$

となる。これらの必要条件と式 (69)(70) より最適制御は次となる。

$$(S_{12}^*, S_{23}^*, S_{13}^*) = (0, 0, \bar{S}_1) \quad (75)$$

(1-c) 特異制御区間： $t \in [\tau_2, T - r_{13}]$

最適経路は式 (66) より、

$$E[B^*(t + r_{13})] = 0 \quad (76)$$

である。式 (74) の増分を考えると、式 (6) より最適制御は次となる。

$$S_{13}^*(t) = E[D(t + r_{13})] + S_{23}^*(t - r_{23} + r_{13}) \quad (77)$$

さらに必要条件式 (73)(74) と式 (69)(70) より

$$(S_{12}^*, S_{23}^*, S_{13}^*) = (0, 0, E[D(t + r_{13})]) \quad (78)$$

(2) 物資非到達区間： $t \in [T - r_{13}, T]$

状態制約式 (15) が拘束的であること最適性条件 (37) より最適制御の必要条件は

$$-\theta_{12}(t) + \theta_1(t) + \lambda_{IT_{12}} = 0 \quad (79)$$

$$-\theta_{13}(t) + \theta_1(t) + \lambda_{IT_{13}} = 0 \quad (80)$$

である。式 (41)(43) より $\lambda_{IT_{ij}}$ は非負であるから、相補性条件を用いて最適制御は次となる。

$$(S_{12}^*, S_{23}^*, S_{13}^*) = (0, 0, 0) \quad (81)$$

参考文献

- 1) 外岡秀俊: 3.11 複合被災, 岩波新書, 2012.
- 2) 土木計画学研究委員会物流調査団: 土木計画学・熊本地震調査報告 物流(緊急支援物資供給)の課題, 2016.
- 3) 樋口徹: 大地震発生後のプッシュ型緊急支援物資の供給の在り方に関する考察, 作大論集, 第 7 号, pp. 111–120, 2017.
- 4) 伊藤秀行, ウィセツジンドワット ウィスニー, 横松宗太: 南海トラフ巨大地震における政府調達物資供給計画の実行可能性の検討, *Policy and Practice Studies*, Vol.3, No.1, pp.31–38, 2017.
- 5) 久保幹雄, 橋本英樹: 人道支援ロジスティクス-問題点と新たな提案-, スケジュール・シンポジウム, 2016.
- 6) 久保幹雄, 小林和博, 中島健一, 花岡伸也, 真島隆博, 松川弘明: サプライチェーンリスク管理と人道支援ロジスティクス, 近代科学社, 2015.
- 7) M.Beamon Benita and Stephen A.Kotleba: Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol.9, No.1, pp.1–18, 2006.
- 8) Barbarosoglu Gulay and Yasemin Arda: A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response, *Journal of the operational research society*, Vol.55, No.1, pp.43–53, 2004.
- 9) Chang Mei-Shiang and Ya-Ling Tseng and Jing-Wen Chen: A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty, *Transportation Research Part E*, Vol.43, No.6, pp.737–754, 2007.
- 10) Najafi Mehdi and Kourosh Eshghi and Wout Dullaert: A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase, *Transportation Research Part E*, Vol.49, No.1, pp.217–249, 2013.
- 11) Patrick Jaillet and Jonathan F.Bard and Liu Huang and Moshe Dror: Delivery cost approximations for inventory routing problems in a rolling horizon framework, *Transportation Science*, Vol.36, No.3, pp.292–300, 2002.
- 12) Jotshi Arun and Qiang Gong and Rajan Batta: Dispatching and routing of emergency vehicles in disaster mitigation using data fusion, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol.43, No.1, pp.1–24, 2009.
- 13) Sheu Juih-Biing: Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters, *Transportation Research Part E*, Vol.46, No.1, pp.1–17, 2010.
- 14) Ozguven Eren Erman and Kaan Ozbay: A secure and efficient inventory management system for disasters, *Transportation Research Part C*, Vol.29, pp.171–196, 2013.
- 15) 久保幹雄: サプライ・チェーン最適化ハンドブック, 朝倉書店, 2007.
- 16) 平成 28 年熊本地震熊本地方を震源とする地震非常災害対策本部会議 (<http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/h28kumamoto/taisakukaigi.html>), 2017/12/14 閲覧.
- 17) 平成 28 年熊本地震に係る初動対応検証チーム (<http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/h28kumamoto/shodotaio.html>), 2017/12/14 閲覧.
- 18) 熊本地震を踏まえた応急対策・生活支援策検討ワーキンググループ (http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/h28kumamoto/okyuseikatu_wg.html), 2017/12/14 閲覧.
- 19) 西脇文哉, 畑山満則, 伊藤秀行: 熊本地震における緊急支援物資の計画と実態に関する考察, 第 55 回土木計画学会研究発表会, CD-ROM, 2017.
- 20) 山本慎二: 熊本地震の災害支援物資対策と今後の課題について, 運輸政策研究, No.3, 2016.
- 21) Pontryagin Lev Semenovich: Mathematical theory of optimal processes, *CRC Press*, 1987.
- 22) Peng Shige: A general stochastic maximum principle for optimal control problems, *SIAM Journal on control and optimization*, Vol.28, No.4, pp.966–979, 1990.
- 23) Gollmann Laurenz and Helmut Maurer: Theory and applications of optimal control problems with multiple time-delays, *Journal of Industrial & Management Optimization*, Vol.10, No.2, pp.413–441, 2014.
- 24) Chen Li and Zhen Wu: Maximum principle for the stochastic optimal control problem with delay and application, *Automatica*, Vol.46, No.6, pp.1074–1080, 2010.
- 25) Richard F.Hartl and Suresh P.Sethi and Raymond G.Vickson: A survey of the maximum principles for optimal control problems with state constraints, *SIAM review*, No.2, pp.181–218, 1995.

(2018. 4. 27 受付)

INVENTORY DISTRIBUTION MODEL FOR RELIEF SUPPLY CONSIDERING INFORMATION UNCERTAINTY AFTER A MAJOR DISASTER

Riki KAWASE, Junji URATA and Takamasa IRYO

In the Kumamoto earthquake, in addition to the conventional pull-type support, the push-type support newly introduced by the revision of the Disaster Countermeasures Basic Law was implemented at the first time. Although the procurement of relief goods in the affected area was sufficient, timely supply of supplies was impossible because of the bottleneck of the last one mile. In terms of logistics it is pointed out that the current supply system need to be improved and it is essential to optimize the overall supply system. Our research construct an inventory distribution model assuming the push-pull type support in order to calculate the optimum supply system. Specifically, a stochastic optimal control theory with delays, where objective function is to minimize the penalty cost for the shortage of relief goods and the inventory cost, is applied. Furthermore, we propose distribution model assuming the push-pull type support including information flow, in order to consider the uncertainty of information and information delay which amplifies itself. Finally, the system is evaluated quantitatively by numerical example.