令和４年新潟県豪雨における救援物資配送の実態調査を受けた救援物資配送モデル構築

春日井　裕也[1]・佐野　可寸志[2]・高橋　貴生[3]・松田　曜子[4]

[1]非会員　長岡技術科学大学大学院　環境社会基盤工学分野(〒940-2188　新潟県長岡市上富岡町 1603-1)
E-mail:s203252@stn.nagaokaut.ac.jp

[2]正会員　長岡技術科学大学教授　環境社会基盤系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: sano@vos.nagaokaut.ac.jp

[3]正会員　長岡技術科学大学特任助教　環境社会基盤系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: takataka@vos.nagaokaut.ac.jp

[4]正会員　長岡技術科学大学准教授　環境社会基盤系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: ymatsuda@vos.nagaokaut.ac.jp

令和 4 年 8 月新潟県における豪雨により，関川村・村上市にて多くの避難者が発生し，その救援物資配送実態の調査のため県・被災自治体・トラック協会にヒアリングを実施し，救援物資配送の課題を明らかにした．現状の配送実態では県と市の配送が連携されておらず，効率的に配送がされていない実態が確認された．また，県と市の配送を連携して実施することでヒアリング時に見られた配送拠点におけるトラックやリフト等のリソース不足を改善できると考えられる．

そこで，ヒアリング結果を用いて，本研究では特に発災直後から支援が可能な災害に焦点を当て，配送拠点における積み下ろしにかかる時間の考慮や災害時のトラック不足を制約条件に加え，県から市・市から避難施設への二段階配送と県から避難施設への直接配送を使い分ける救援物資配送モデルを構築した．このモデルにより今回のような規模の災害において，的確な配送の意思決定を可能とする．

Key Words: *disaster,supply chain,relief supplies delivery, optimization model*

1. はじめに

近年，地球温暖化などの気候変動により自然災害が増加，激甚化している．日本では頻繁に発生する豪雨により，河川の氾濫や土砂災害が発生し，多くの人々が被災し，被災地で救援物資配送が必要とされる．それに対応して，内閣府は「物資調達・輸送調整等支援システム」を構築し，令和 2 年から運用を開始した[1]．これにより，備蓄物資およびさまざまな物資の要請情報が国，県，市町村で一元的に管理され，情報共有が円滑化される．しかし，その情報から実際に物資を輸送するとき，誰が配送を行うのか自治体が明確な意思決定ができなければ，結果的に物資支援の遅延が引き起こされるため，意思決定は重要である．

柿本[2]の研究では，熊本地震でのラストワンマイル直前の配送拠点の廃止による配送時間の短縮や避難所における役割についての示唆がなされている．また，内閣府の物資支援の計画概要[3]より，大規模災害時における基本的な物資の考え方として，発災後 3 日目までは人員救出や道路の被災状況から，被災地では備蓄物資にて対応することが定められており，実際熊本地震などの災害ではそのような対応がされている．さらに，宇田川[4]の論文では，平成 30 年 7 月豪雨における物資配送の実態と課題が明らかにされている．ここでは，災害初動期の物資配送における課題や改善点が示唆されており，特に二次配送拠点を利用しないことによる輸送時間の短縮化について言及されている．しかしながら，これらの既往研究は発生頻度の少ない大規模な災害を主に対象としており，備蓄物資による支援後の救援物資配送を中心に取り扱っていることが多く，発災後すぐに救援物資の支援が可能であり，数年単位で発生するような災害について発災初期段階を含め救援物資配送の調査が必要である．

本研究では，令和 4 年新潟県豪雨における発災初動期の物資配送に着目し，現地での被災した自治体，新潟県，新潟県トラック協会とのヒアリングを通じてその課題を明確化し，その改善策についての調査を行い，把握した課題からより災害実態に即した救援物資配送モデルの構築をし，災害時の配送の意思決定に貢献する．

2. 令和4年新潟県豪雨によるヒアリングによる実態調査と課題分析

(1) 災害概要とヒアリング対象

令和 4 年 8 月 3 日から 4 日に渡り，新潟県の村上市，関川村，胎内市において，大雨災害が発生し，各地域では多くの避難者が発生し（**表-1**），新潟県からの救援物資支援が実施された．特に村上市では発災一日目から早期での救援物資支援が実施された．

そこで，本研究では被災した自治体への救援物資支援の実態を明らかにするために，**表-2** に示すように被災自治体と支援元である新潟県及び配送指示を行ったトラック協会にヒアリングを行った．

(2) 被災地域の状況

表-1 に示すように，今回調査対象の 3 自治体では特に村上市と関川村での避難者数が多く，村上市では発災当日，早期に救援物資支援が行われた．

a) 村上市

発災当日には 16 施設に合計 1537 人の避難者数が発生し，断水の発生や寝具の不足によって，水ペットボトルや布団が必要になった．村上市内の備蓄のみでは足りず新潟県へ物資の要請を行った．

発災後の村上市における救援物資支援では，市役所などの配送拠点でトラックと人員が不足しているため，場合によっては新潟県からの配送を行った運転者に物資をそのまま避難施設へ運搬してもらうことがあり，そのようにして自治体内で直接配送を希望するケースも存在した．

表-1 各自治体における最大避難者数

自治体名	最大避難者数	避難所閉鎖日
村上市	1537 人	令和 4 年 10 月 17 日
関川村	276 人	令和 4 年 8 月 29 日
胎内市	39 人	令和 4 年 8 月 5 日

表-2 ヒアリング対象について

	日時	ヒアリング相手
村上市	令和 4 年 10 月 19 日	村上市総務課危機管理室 福祉課社会福祉事務所
関川村	令和 4 年 10 月 12 日	関川村総務課
胎内市	令和 4 年 10 月 19 日	胎内市総務課防災対策係
新潟県	令和 4 年 12 月 2 日	新潟県防災局防災企画課
新潟県トラック協会	令和 5 年 7 月 19 日	新潟県トラック協会企画部

b) 関川村

関川村では，発災後 3 日後に救援物資支援の配送が行われた．本地域では発災初期は他の市町村から提供可能な物資を関川村役場に連絡して調整後配送をするという，半プッシュ型における配送から，発災後しばらくしてからは関川村役場からの申請によるプル型の配送へ移り変わっていった．緊急性の高い物資の種類に応じて，配送拠点毎に集積する物資の種類を差別化していた．

c) 胎内市

胎内市では発災後 1 日後の 8 月 4 日には 19 施設 39 人が避難しており，避難施設の備蓄物資を利用していた．そして 8 月 5 日には避難施設への避難は終了した．

(3) 救援物資配送実態

ここでは，配送先である被災自治体へのヒアリング，発送元や発注者である新潟県と新潟県トラック協会へのヒアリングを参考に，実際に行われた救援物資配送について整理する．

まず，被災自治体の物資要請は，災害発生後，断水や寝具の不足など備蓄物資では足りず，直ちに物資を必要とする場合，また，自治体内で翌日や翌々日に避難者の避難が続くと予想され，備蓄物資が不足すると判断された場合，新潟県等へ必要な救援物資の要請がされる．その後，新潟県では，被災自治体からの物資要請を受けると，その要請に基づいて必要な物資の量や種類から，物資の配送に必要なトラック台数を計算し，トラック協会へ要請を行う．

トラック協会は，新潟県からの物資配送依頼を受けて，各配送会社を選定し，物資の輸送を割り振る．ただし，ここで，過積載などで新潟県で計算されたトラックの依頼量と，実際に必要となるトラックの数に違いが生じる場合があり，その際，新たなトラックの追加依頼が必要となる．さらに，各配送会社の輸送範囲は通常，新潟県から自治体の配送拠点までを対象としているが，被災自治体が場合によっては，自治体の配送拠点から避難施設までの配送を追加で配送を担当しているトラック運転手へ依頼することがある．災害時には，制度としては配送先での運転手の自由な判断が可能で柔軟に対応する事が可能であるが，トラック運転手の運行時間が長くなってしまい，その後の配送へ影響を与えることがあるし，また，トラック協会から配送会社へ依頼する上で運行時間が長くなってしまうと依頼を受諾しづらくなってしまうことがある．一方，配送先では道路の影響から大型トラックが入れなかったりすることがあった．

このようなプロセスにより，被災自治体からの物資要請から始まり，新潟県，新潟県トラック協会，そして各配送会社より災害初動期の救援物資配送を実施している．

また，配送会社は原則，配送先での追加依頼へ対応可能ではあるが，通常業務を行っている中での追加での車両供出となるので，当該配送会社への災害時における BCP や運転者の拘束時間管理に十分配慮する必要があり，直接配送を行う上での理想としては事前に，県から末端の避難施設までの配送を管理して，直接配送を想定内として指示を行う必要があると考えられる．

(4) 配送の際の課題

ヒアリング結果から，被災した地域では自治体内のリソースを用いない新潟県から避難施設までの直接での配送の要望があったが，配送指示を行う新潟県トラック協会では運行時間が長くなりすぎてしまう可能性がある直接配送の要請を配送会社へ受諾してもらうには時間を要することがわかった．

また，従来は県から市の配送と市から避難施設の配送は別れていたが，新潟県から末端の市の避難施設までの直接配送を実施するには，県と市の配送が連携する必要があり，従来の二段階配送に加えて直接配送の配送指示を行う必要がある．

3. 救援物資配送モデルの構築

(1) モデルの概要

二章でのヒアリング結果を踏まえて，モデルを構築する．ヒアリングを参考に，物資は一次配送拠点（県）か二次配送拠点（市）で積替えをして避難施設へ運ばれる二段階配送と，一次配送拠点から避難施設へ運ばれる直接配送によって運ばれる．また，その際にはトラック一台当たりの配送時間が長くなりすぎないように，各トラックの最大配送時間の制約を設ける．二段階配送の定式化については Natasja ら [5]の論文を参考にした．**図-1** に配送フローの全体図を示す．

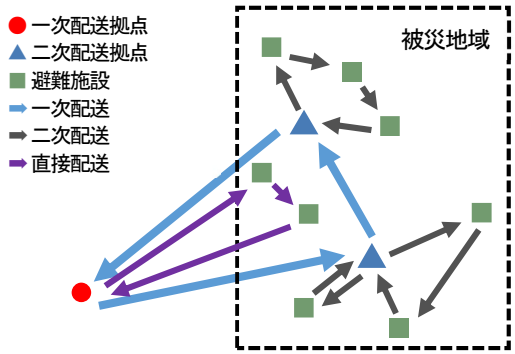


図-1 配送フロー

(2) 目的関数と制約条件について

本研究での目的関数は総配送時間の最短化とする．配送条件は次の通りである．

・二段階の配送に加えて，二次配送拠点を経由しない直接配送が可能である

・各拠点において使用可能なトラック台数・容量を設定可能である．

・各トラックの最大配送時間を設定可能である．

・避難施設に訪れる車両台数は一台である．

・一次配送拠点を複数個設定可能である

そこで，本モデルで用いる定式化と変数をいかに示す．

$$\mathrm{Min} \sum_{k\in K_1}\sum_{(i,j)\in A_1} c_{ij}x_{ijdk} + \sum_{s\in Ns,k\in K_2}\sum_{(i,j)\in A_2} c_{ij}y_{ijsk} + \sum_{k\in K_1}\sum_{s\in S} h_s w_{sk} \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_1} x_{ijdk} = \sum_{(j,i)\in A_1} x_{jidk}$$
$$i \in N_D \cup N_{DD} \cup N_s, k \in K_d^1, d \in N_D \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_1} x_{ijdk} \le 1$$
$$i \in N_D \cup N_{DD} \cup N_s, k \in K_d^1, d \in N_D \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_1} x_{djik} = 0$$
$$d \ne j, d \ne i, i \in N_D \cup N_S, k \in K_d^1, d \in N_D \quad (4)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + |S|x_{ijdk} \le |S| - 1$$
$$i,j \in N_S, i \ne j, k \in K_d^1, d \in N_D \quad (5)$$

$$w_{dsk} \le Q_{dk}^1 \sum_{(j,s)\in A_1} x_{jsdk}$$
$$d \in N_D, s \in N_{DD} \cup N_s, k \in K_d^1 \quad (6)$$

$$\sum_{s\in N_s} w_{dsk} \le Q_{dk}^1 \qquad d \in N_D, k \in K_d^1 \quad (7)$$

$$\sum_{d\in N_D}\sum_{k\in K_1} w_{dsk} = \sum_{(s,j)\in A_2}\sum_{k\in K_2} f_{sjsk}\ s \in N_{DD} \cup N_s \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_1} c_{ij}x_{ijdk} \le T \qquad d \in N_D, k \in K_d^1 \quad (9)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_2} y_{ijsk} = \sum_{(j,i)\in A_2} y_{jisk}$$
$$i \in N_{DD} \cup N_s \cup N_C, s \in N_{DD} \cup N_s, k \in K_s^2 \quad (10)$$

$$\sum_{(s,j)\in A_2}\sum_{(k)\in K_2} y_{sjsk} \le K_s^2 \qquad s \in N_{DD} \cup N_s \quad (11)$$

$$\sum_{(s,k)\in skk}\sum_{(i,j)\in A_2} y_{ijsk} \le 1 \qquad j \in N_C \quad (12)$$

$$\sum_{s\in N_{DD}\cup N_s}\sum_{(j,i)\in A_2}\sum_{k\in K_2} f_{jisk} - \sum_{s\in N_{DD}\cup N_s}\sum_{(i,j)\in A_2}\sum_{k\in K_2} f_{ijsk} = demand_i \quad i \in N_C \quad (13)$$

$$f_{ijs} \le Q_{sk}^2 \sum_{k\in K_2} y_{ijsk} \quad (i,j) \in A_2, s \in N_{DD} \cup N_s \quad (14)$$

$$\sum_{i\in V, j\in N_s} y_{ijsk} = 0 \qquad j \ne s, s \in N_{DD} \cup N_S, k \in K_s^2 \quad (15)$$

$$\sum_{i\in N_s, j\in V} y_{ijsk} = 0 \qquad i \neq s, s \in N_{DD} \cup N_S, k \in K_s^2 \quad (16)$$

$$\sum_{i\in N_s, j\in S} y_{ijsk} = 0 \qquad s \in N_{DD} \cup N_S \quad (17)$$

$$\sum_{(i,j)\in A_2} c_{ij} y_{ijsk} \leq T \qquad s \in N_{DD} \cup N_S, k \in K_s^2 \quad (18)$$

$$\sum_{j\in N_s} x_{ijik} + \sum_{j\in N_c} y_{i+n_d\, j\, i+n_d\, k} \leq 1 \qquad i \in N_D, k \in K \quad (19)$$

$$f_{ijs} \geq 0 \qquad (i,j) \in A_2, s \in N_{DD} \cup N_s \quad (20)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \qquad (i,j) \in A_1, k \in K_d^1 \quad (21)$$

$$y_{ijsk} \in \{0,1\} \qquad (i,j) \in A_2, s \in N_{DD} \cup N_S, k \in K_s^2 \quad (22)$$

ただし,

$G = (N, A)$：各施設の場所と経路を表すグラフ

$N = N_{DD} \cup N_D \cup N_s \cup N_C$

$N_D = \{0, \dots, n_d - 1\}$：$n_d$個の一次配送拠点 node の集合

$N_{DD} = \{n_d, \dots, 2 * n_d - 1\}$：直接配送をする node の集合

$N_S = \{2 * n_d, \dots, 2 * n_d + n_s - 1\}$

：n_s個の二次配送拠点の node の集合

$N_C = \{2 * n_d + n_s - 1, \dots, 2 * n_d + n_s + n_c - 1\}$

：n_c個の避難施設の node の集合

$A_s = \{(i,j,k) | i,j \in N_D \cup N_{DD} \cup N_s,\ k \in K_1, i \neq j\}$

：一次配送拠点と二次配送拠点の arc

$A_c = \{(i,j,sa,k) | i,j \in N_{DD} \cup N_s \cup N_C, \text{sa} \in N_s, k \in K_2, i \neq j\}$:二次配送拠点と避難施設

$A_1 = \{(i,j) | i,j \in N_D \cup N_{DD} \cup N_s i \neq j\}$

$A_2 = \{(i,j) | i,j \in N_{DD} \cup N_s \cup N_C i \neq j\}$

K_d^1:一次配送拠点 d にあるトラック台数，K_s^2:二次配送拠点 s にあるトラック台数

Q_{dk}^1:一次配送拠点 d のトラック k 番目の容量

Q_{sk}^2:二次配送拠点 s のトラック k 番目の容量

$demand_i$：避難施設 i の需要量

c_{ij}：施設 i から施設 j までの移動時間

x_{ijdk}：一次配送拠点 d からのトラック k が i から j 地点を通るかどうかの決定変数

y_{ijsk}：二次配送拠点 s からのトラック k が i から j 地点を通るかどうかの決定変数

モデルにて，一次配送拠点から避難施設へ配送を行う直接配送はN_DからN_Dと同一の位置にあるN_{DD}を経て，N_Cへ配送を行う．一方，一次配送拠点から二次配送拠点を経て避難施設への配送は，N_DからN_Sを経て，N_Cへ配送を行う．

目的関数(1)は，一次配送と二次配送の配送コストの和と一次拠点と二次拠点間での積替えコストの和の最小化である．以下，一次配送を FE，二次配送を SE とする．制約条件の意味は次の通りである．

(2)から(9)は一次配送 FE における制約である．

(2):各 FE 車両の流出入の経路は同じである．

(3):各 FE 車両が一回だけ各 SE 拠点を訪問する．

(4): 拠点 d からの車両 k が d から出発する．

(5):FE 配送の部分巡回路除去制約である．

(6):トラックが FE 拠点から SE 拠点への流れを強制する．

(7):FE 車両の容量制約である．

(8):FE 車両と SE 車両の合計配送量を一致させる．

(9):FE 車両の配送時間の制約である．

(10)から(18)は二次配送 SE における制約である．

(10):各 SE 車両の流出入の経路は同じである．

(11):各 SE 拠点から出発する最大車両台数の制約である．

(12): 各 SE 車両が一回だけ各避難施設を訪問する．

(13):SE 配送の部分巡回路除去制約である．

(14):SE 車両の容量制約である．

(15)～(17):不要なパスを進行不可能にする制約である．

(18): SE 車両の配送時間の制約である．

(19):FE 配送と直接配送の車両が被らない制約である．

(20)から(22)は変数の制約である．

(3) 計算結果

本研究では，**図-2** に示されるように，縦 100km×横 100km の範囲に配送拠点と避難施設を配置し，モデルを適用している．図上には，一次配送拠点と二次配送拠点それぞれが保有するトラックの容量と各避難施設における需要量が示されている，車両の種類として中型トラックと小型トラックの組み合わせによる配送を想定しており，需要量に対してここでは容量 50 のトラックを中型トラック，容量 20 のトラックを小型トラックとした．

条件としては，トラックが一律時速 30km で走るものとして配送を行い，各トラックの最大配送時間の制約を 200 分以内，250 分以内，300 分以内と変更させて計算を行った．

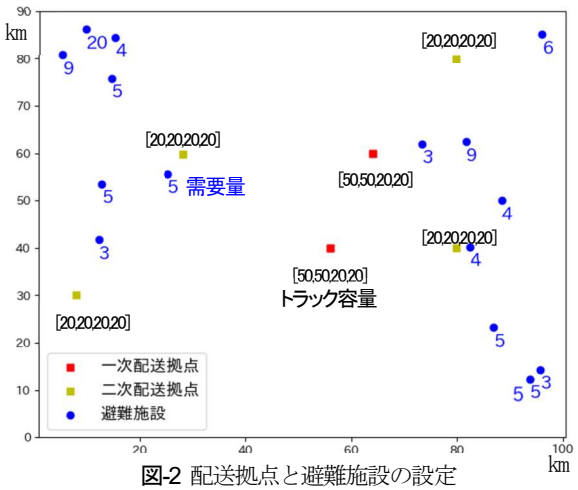


図-2 配送拠点と避難施設の設定

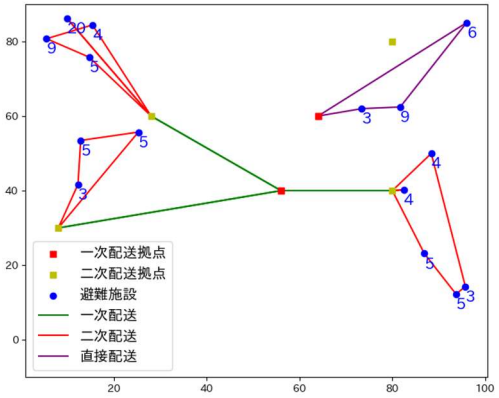


図-3 最大配送時間 200 分以内

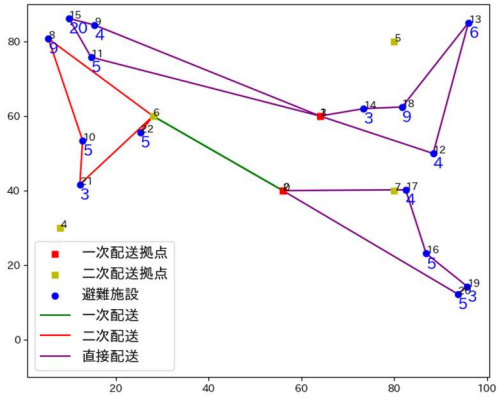


図-4 最大配送時間 250 分以内

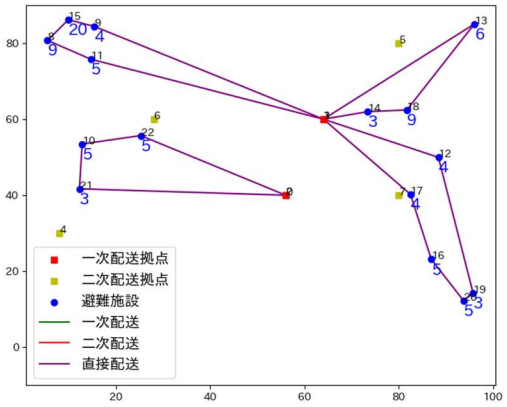


図-5 最大配送時間 300 分以内

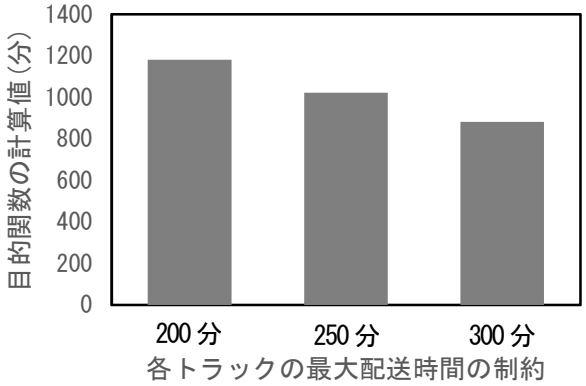


図-6 目的関数の計算値の比較

図-3 から**図-5** はそれぞれ各トラックの最大配送時間を変え，計算を行い配送経路を図示したもので**図-6** にてそれらの目的関数の計算値を比較している．

各トラックの最大配送時間の制約を 200 分から 300 分へと緩和すれば，合計の配送時間は短くなる．しかし，各トラックの配送時間が長すぎると平常時の業務に加えて行う災害時の配送を各運送会社に請けいられづらくなるので，**図-3** や**図-4** の条件を選ぶ必要が指摘される．

4. 結論

まず，ヒアリング結果から明らかになったことは，被災自治体が直接での救援物資配送を希望している一方で，配送指示を行う側では運行時間の制約が課題となっていることである．また，現状の救援物資配送では，一次配送拠点（県）から二次配送拠点（市）への物資や情報の流れと二次配送拠点（市）から避難施設への物資や情報の流れは別々であるので，一次配送拠点から二次配送拠点を経由しない直接配送を実現するうえでそれらの協力・連携が必要になってくるといえる．

一方，モデル構築では，ヒアリングの際に要望があった直接配送を実現するためには，各トラックの最大配送時間の制約を追加する必要がある．実際にトラックの最大配送時間の制約が 300 分のケースでは，合計の配送時間が短く済むが，実際には配送時間が長くなりすぎると物資配送要請の受諾してもらいにくくなり，車両ごとの配送時間の短い**図-3** や**図-4** の条件を選ぶ必要性がある．

今後の課題として，現在は中規模な災害を対象としており，合計トラック容量が需要量を下回るケースを考慮しているが，災害の規模が拡大する場合にトラック不足の問題が発生する可能性があるので，救援物資配送モデル内にピストン輸送の導入が求められる．また，食料と緊急寝具といったような一次配送拠点によって扱う物資の種類が変わる場合があるため，多品目の運搬経路問題に対応する必要がある．

謝辞：本研究結果は，株式会社東京電力ホールディングスとの共同研究により得られたものである．

REFERENCES

1) 内閣府:物資調達・輸送調整等支援システムの概要，2021.
2) 柿本竜治, 熊本地震後初期の災害対応の課題の整理, 土木学会論文集 D3（土木計画学）, Vol.75,No.5, pp.117-127, 2019
3) 内閣府:物資支援について，2016
4) 宇田川真之,初動期における物資拠点の設置・運営の現状と改善にむけて ～平成 30 年 7 月豪雨への対応事例などから～ , 地域安全学会論文集, No.34, 2019
5) Natasja, S. Alexandre, M. Florio, Joris, Kinable. Nico, D. and Tom, Van, W.: Two-echelon vehicle routing problems: A literature review, European Journal of Operational Research, 304(3) ,2023

CONSTRUCTION OF A RELIEF SUPPLY DISTRIBUTION MODEL BASED ON A SURVEY OF RELIEF SUPPLY DISTRIBUTION IN THE NIIGATA PREFECTURE HEAVY RAINFALL EVENT IN 2022

Yuya KASUGAI, Kazushi SANO, Takao TAKAHASHI and Yoko MATSUDA

In August 2022, torrential rains in Niigata Prefecture caused many evacuees in Sekikawa Village and Murakami City. To investigate the actual situation of relief goods delivery, interviews were conducted with the prefectural government, affected municipalities, and trucking associations to clarify issues related to relief goods delivery. The current delivery situation is that the prefectural and municipal governments are not coordinating their deliveries, and the delivery is not being carried out efficiently. In addition, the lack of trucks, lifts, and other resources at the delivery bases, which was observed during the interviews, could be improved by coordinating the delivery between the prefecture and the city.

Using the results of the interviews, this study focuses on disasters in which assistance can be provided immediately after the disaster strikes, and develops a relief goods delivery model that uses two-echelon delivery from the prefecture to the city and from the city to evacuation centers, and direct delivery from the prefecture to evacuation centers, taking into account the time required for loading and unloading at delivery centers and the shortage of trucks during a disaster. The model was developed to provide a two-echelon delivery system for relief supplies. This model enables accurate decision-making in the event of a disaster of this scale.