

災害救援ロジスティクスの検討

— 東日本大震災をケースとして —

開沼 泰隆

首都大学東京システムデザイン学部

サプライ・チェーン合同セミナー@海洋大 25 September, 2013



研究背景(1)

2011年3月11日
東北地方太平洋沖地震

一部の被災者の元に
物資が届かない

災害時のサプライ・チェーン
構築の必要性

情報技術の駆使、複数団体の協調、在
庫戦略等まで含めて考えた、
救援物資の円滑かつ迅速な供給活動



Yomiuri Online



Asahi.com



Asahi.com



Yomiuri Online

研究目的(1)

災害時のサプライ・チェーン・ネットワーク設計

東日本大震災
の事例

文献研究

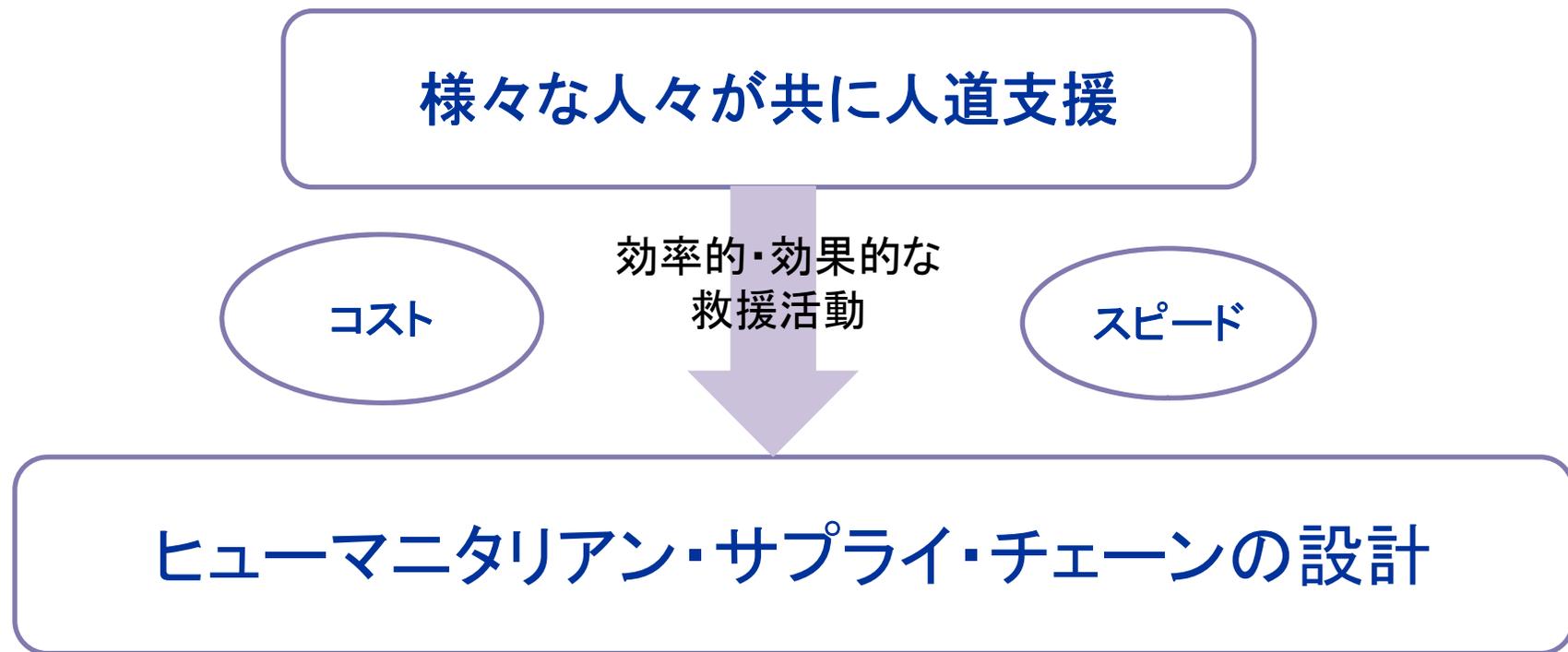
- ①これまでに提唱されてきた、災害時のサプライ・チェーン・ネットワーク設計に必要な原理は十分なのか？
- ②各原理に関して、東日本大震災の事例において適切な対応ができていたのか？



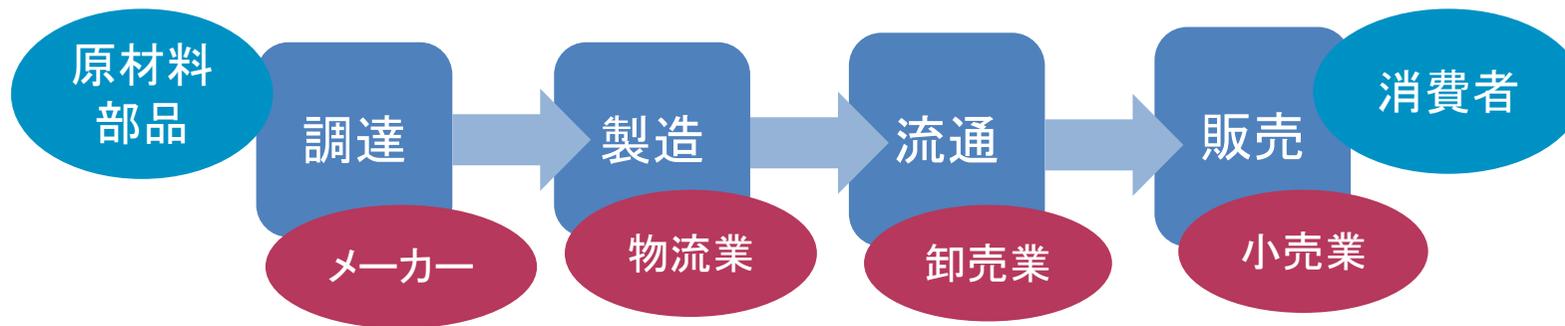
関連研究(1-1)

Rolando M. Tomasini, Luk N. Van Wassenhove,

“From preparedness to partnerships : Case study research on humanitarian logistics”, *International Transactions in Operational Research*, Vol.16, pp.549-559 (2009)



2つのSCMの違い



商業的なサプライ・チェーン



ヒューマニタリアン・サプライ・チェーン

| | 商業的なサプライ・チェーン | ヒューマニタリアン・サプライ・チェーン |
|----|---------------|---------------------|
| 目的 | 消費者満足の上 | 被災者満足の上 |
| 需要 | 部品・製品・商品 | 救援物資、人員の派遣 |

関連研究(1-2)

I. Nyoman Pujawan, Nani Kurniati, Naning A. Wessiani, “Supply chain management for Disaster Relief Operations: principles and case studies”, *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 5, No. 6, pp. 679-692 (2009)

人道支援の中で、災害に焦点
災害救援活動(DRO: Disaster Relief Operations)の
SCを設計していく上で必要な4原理を定義

原理1
情報の
見える化

災害時のSCMの
4原理

原理4
説明責任

原理2
協調

原理3
専門性



原理の定義

原理1: 情報の見える化(information visibility)

- 関係者に対する、救援物資に関する記録・情報伝達
- メディア等が重要な役割⇒通信インフラの整備の必要性

原理2: 協調(coordination)

- SC内の各組織間の情報共有
- 各組織の役割分担による重複作業削減

原理3: 専門性(professionalism)

- 正しいプロセスによる救援活動の実施
- ロジスティクスの専門家の現地配置

原理4: 説明責任(accountability)

- 提供された救援物資の行先の透明性
- 物資提供者への情報公開



2原理の提案

- ①情報の見える化
- ②協調
- ③専門性
- ④説明責任

重要な原理

4原理だけでは
災害時のサプライ・チェーン設計において不十分

新たな2原理の提案

原理5
俊敏性

原理6
SCネットワーク
設計



2原理の提案・定義

原理5: 俊敏性(agility)

被災者の元に、「必要な時」に「必要な物」を「必要な量」だけ供給するというミッションがある

⇒限られた時間という中での迅速な対応

⇒震災発生後の時間経過に伴うニーズの変化への柔軟な対応

原理6: サプライ・チェーンネットワーク設計(SC Network Design)

救援物資の在庫・輸送計画 -プッシュとプルの境界を決定

時間経過の観点

発生直後の初動対応 プッシュシステム

順次きめ細かな対応 プルシステム

ネットワーク設計の観点

被災地外・被災地域間の輸送(プッシュ方式) ⇒ 避難所への配送(プル方式)

プッシュ・プル境界を出来るだけ被災者に近い位置に決定



2原理の必要性に関する検証

仮説1

災害時のサプライ・チェーンの設計において、原理5が原理1～原理4と同等に重要である

仮説2

災害時のサプライ・チェーンの設計において、原理6が原理1～原理4と同等に重要である

分析対象

河北新報の1ヶ月分の地震・津波関連の全新聞記事1058件(サンプル数)

分析方法

「2群の比率の差の検定」

全記事に対する、原理1と原理5, 原理1と原理6に関する記事数の頻度の違いを比較

(仮説1[原理5]) $H_0: P_1 = P_5, H_1: P_1 > P_5$

有意水準5%のとき $u_0 = -1.713 \leq 1.645$

→ H_0 を採択し、 P_1 と P_5 に有意差があるとは言えない

(仮説2[原理6]) $H_0: P_1 = P_6, H_1: P_1 > P_6$

有意水準5%のとき $u_0 = 1.579 \leq 1.645$

→ H_0 を採択し、 P_1 と P_6 に有意差があるとは言えない

→原理1と原理5・原理1と原理6ともに、両者の比率に違いはないことが示せた

仮説1と仮説2はともに支持された



分析Ⅰ 静的視点の分析

1. 河北新報社：“河北新報特別縮刷版 3.11東日本大震災 1ヶ月の記録”，竹書房(2011)
2. 須藤彰“東日本大震災 自衛隊救援活動日誌 東北地方太平洋沖地震の現場から”，扶桑社(2011)
3. 立入勝義：“検証 東日本大震災 そのときソーシャルメディアは何を伝えたか？”，携書ディスカヴァー(2011)
4. 内閣府 公式ホームページ
5. 国土交通省 公式ホームページ 他

東日本大震災の事例を6原理の観点から評価

静的分析(1)

原理1: 情報の見える化(information visibility)

- 通信インフラ早期復旧の取り組み
- インターネットツールによる情報提供
- ソーシャルメディアによる情報伝達の広がり

原理2: 協調(coordination)

- 国が主体になるも、各自が様々なルートで救援物資の供給
- 全体を総括する組織・指針の存在がなし

原理3: 専門性(professionalism)

- 各集積所において地方自治体の職員によるオペレーション
⇒ 物資の滞留、非効率な輸配送

原理4: 説明責任(accountability)

- 国主体で輸送した物資情報は各省庁・各縣市町村の公式Webサイトで公開
- 全ての物資についての公表は明らかでない



静的分析(2)

原理5: 俊敏性(agility)

- 予想外の被災地内の備蓄在庫の被災により震災直後の緊急物資が不足
⇒震災直後に、被災者の元に必要な量の食料や毛布等が不足するケース
- 時間経過後の、毛布等の不要物資の大量流入
- 受入停止の判断の遅延による、集積所の過剰在庫

原理6: サプライ・チェーンネットワーク設計(SC Network Design)

プッシュ・プル境界が明確に決定されず機能しなかった

⇒第一段階(県外から県の1次集積所): プッシュ型で救援物資が送られた

第二段階(県の集積所から市町村の2次集積所): 1次集積所で在庫になり、市町村の2次集積所や避難所へ配送されない

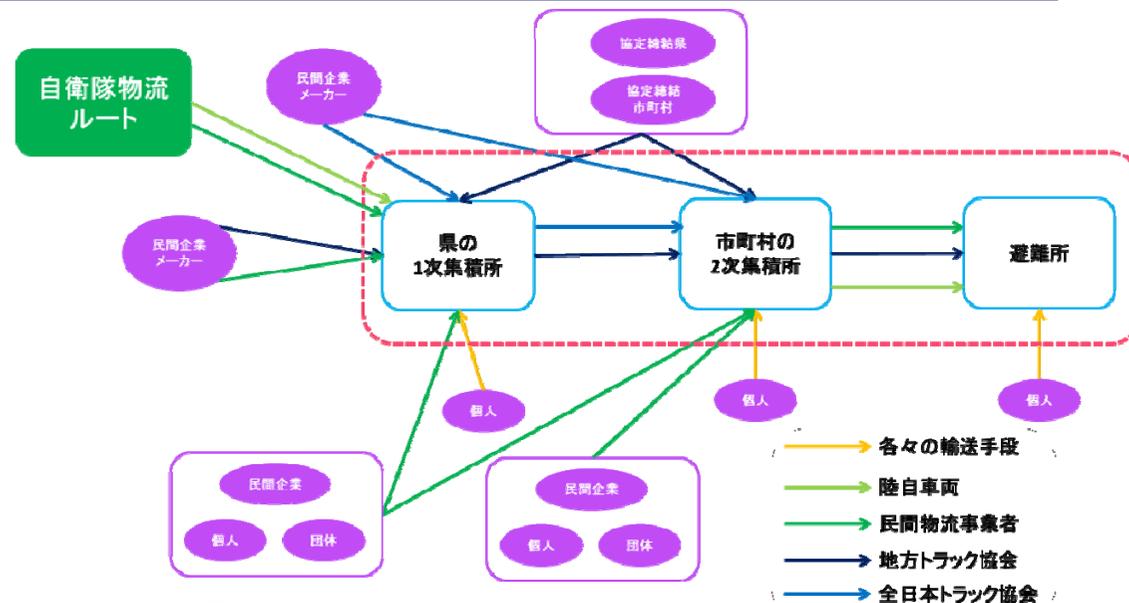


図1: 東日本大震災における物資輸送体系
(参考: 国土交通省)

2原理の必要性

東日本大震災の評価・検証より、

4つの原理

①情報の見える化 ②協調 ③専門性 ④説明責任

+

2つの原理

⑤俊敏性 ⑥ネットワーク設計



災害時における
ヒューマニタリアン・サプライ・チェーン・ネットワークの設計



分析Ⅱ 動的視点の分析

河北新報社：“河北新報特別縮刷版
3.11東日本大震災 1ヶ月の記録”，竹書房(2011)
2011.3.12～4.11 関連記事 全286件

数量化Ⅲ類

震災後の時間経過に伴って記事に特徴は見られるのか
(適切な動きをしていたのかどうか)を観察

- ⇒各原理関連記事の中で内容を分類し、カテゴリーを設定
- ⇒新聞記事の日付をサンプルに設定

※もし救援活動が順調に行われていれば、
それに対応して日付に沿って新聞報道もされていると仮定

動的分析—原理5

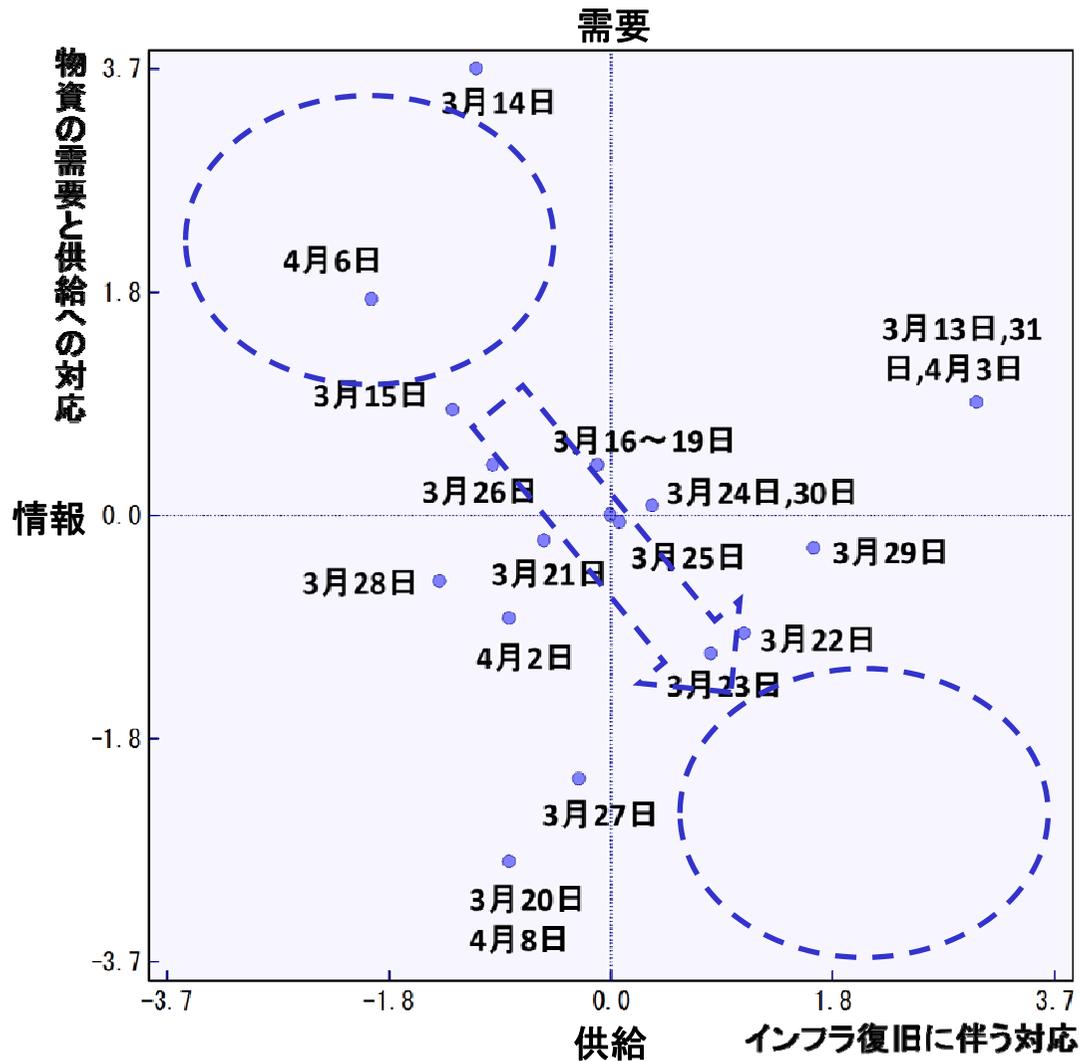
表1: 原理5の固有ベクトルと固有値

| カテゴリー名 | 成分1 | 成分2 | 成分3 | 成分4 |
|------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| インフラ復旧状況 | 0.078 | -0.233 | -0.266 | 0.828 |
| インフラ復旧への動き | 0.816 | 0.210 | 0.182 | -0.200 |
| 情報提供への動き | -0.441 | 0.743 | 0.289 | 0.143 |
| 物資不足への対応 | -0.260 | -0.585 | 0.633 | -0.148 |
| 物資輸送の動き | -0.256 | -0.087 | -0.641 | -0.482 |
| 固有値 | 0.331 | 0.244 | 0.177 | 0.130 |
| 寄与率 | 0.375 | 0.277 | 0.201 | 0.147 |
| 累積寄与率 | 0.375 | 0.652 | 0.853 | 1.000 |

成分1: インフラ復旧に伴う対応
成分2: 大衆への情報発信の素早さ
成分3: 物資の需要と供給への対応



動的分析—原理5



望ましいプロット

日付の経過とともに
 需要(不足)の対応(左上)
 →供給活動(右下)

図2:原理5の新聞記事(サンプル)の時間的変化



動的分析—原理5

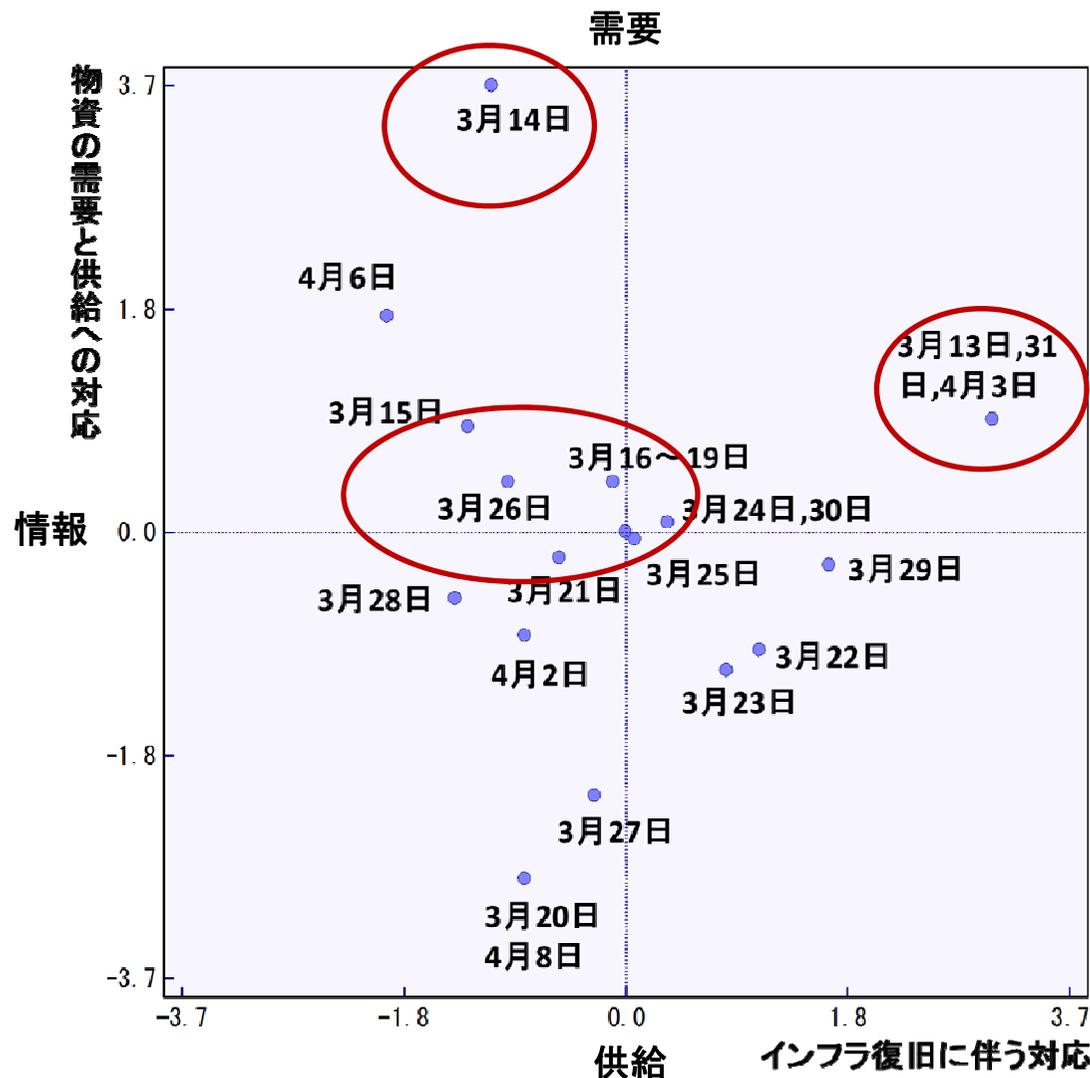


図2: 原理5の新聞記事(サンプル)の時間的変化

望ましいプロット

日付の経過とともに
需要(不足)の対応(左上)
→供給活動(右下)

実際のプロット

震災直後は、左上や上部
にばらつき、その後もまと
まっていない。

交通

インフラ復旧、物資の需要
と供給の対応共に俊敏性
という点で評価し難い

動的分析—原理6

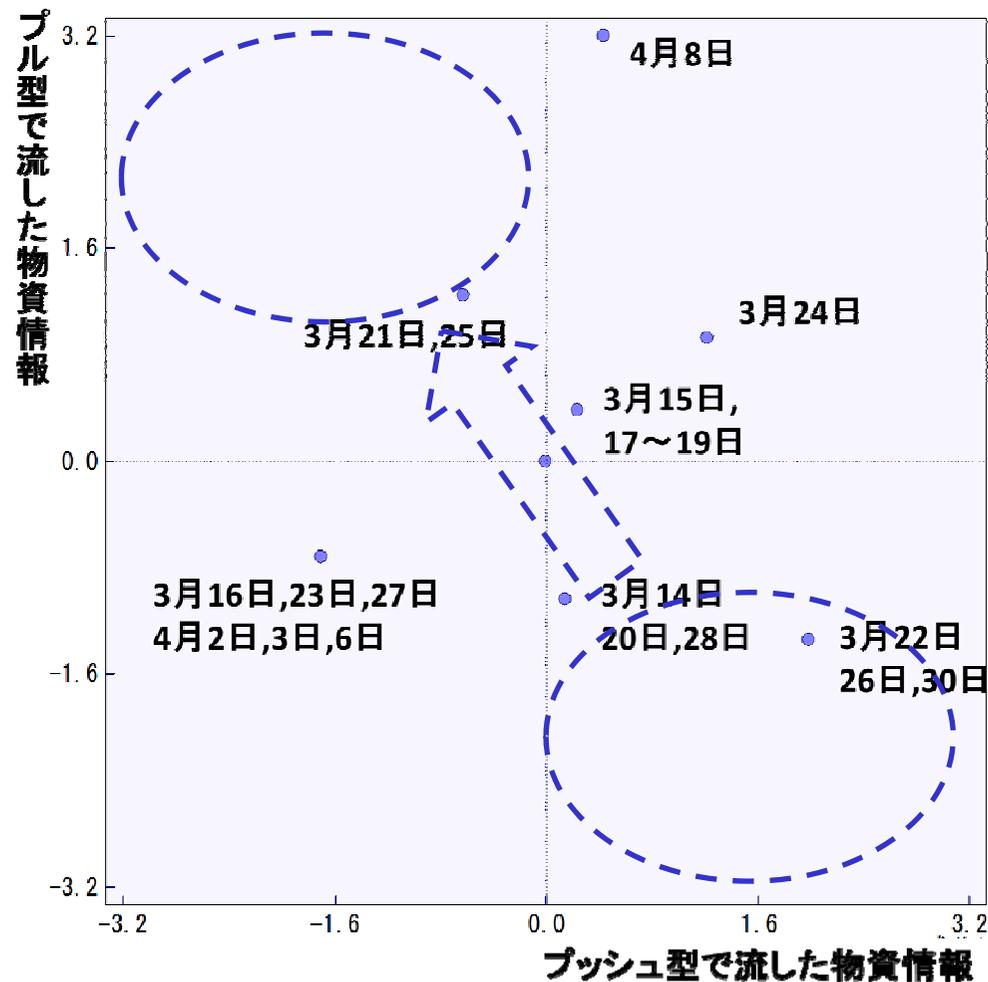
表2:原理6の固有ベクトルと固有値

| カテゴリー名 | 成分1 | 成分2 |
|------------|--------|--------|
| 県内までの物資情報 | 0.703 | -0.426 |
| 市町村までの物資情報 | 0.132 | 0.865 |
| 避難所までの物資情報 | -0.698 | -0.266 |
| 固有値 | 0.393 | 0.317 |
| 寄与率 | 0.554 | 0.446 |
| 累積寄与率 | 0.554 | 1.000 |

成分1:プッシュ型で流した(輸送)物資の情報
成分2:プル型で流した(配送)物資の情報



動的分析—原理6



望ましいプロット
日付の経過とともに
プッシュ型(右下)
→プル型(左上)

図3: 原理6の新聞記事(サンプル)の時間的変化



動的分析—原理6

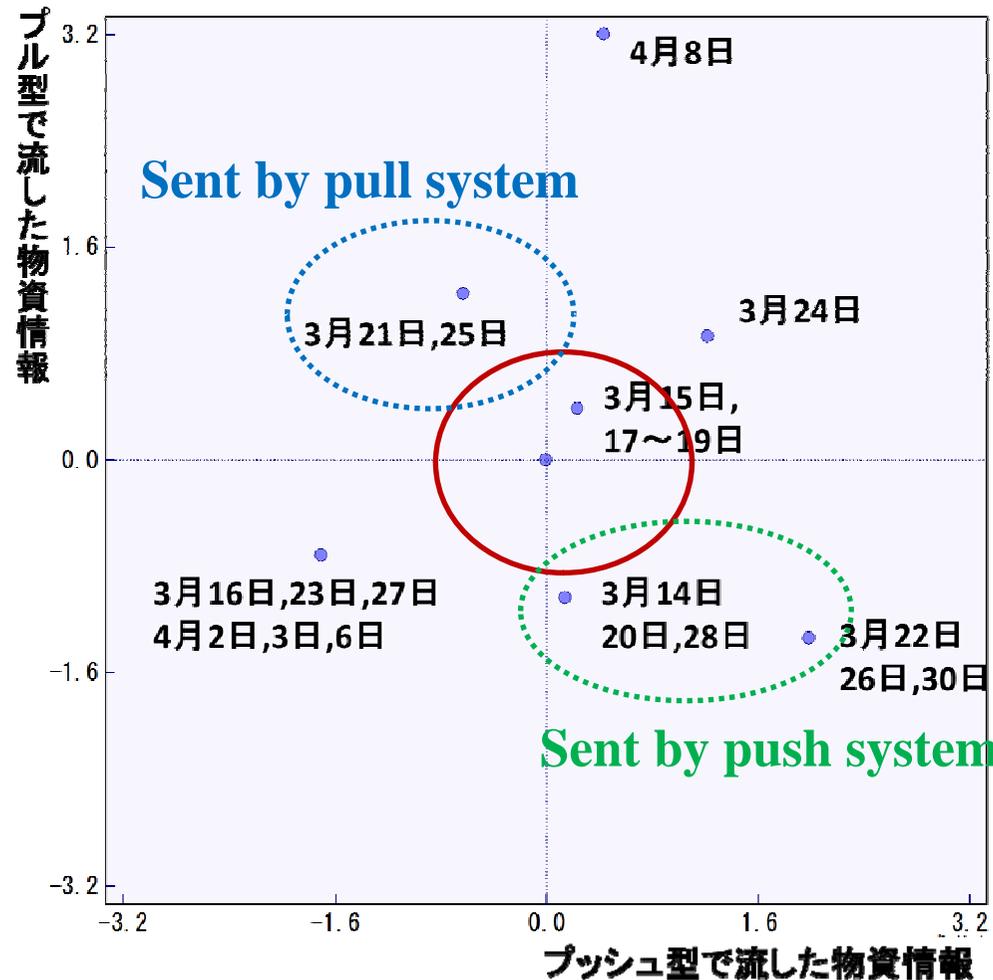


図3: 原理6の新聞記事(サンプル)の時間的変化

望ましいプロット

日付の経過とともに
プッシュ型(右下)
→プル型(左上)

実際のプロット

震災直後は、物資の情報がないor原点付近に多い。その後も日付の経過で顕著な特徴はない。



プッシュとプルの
使い分けができていない





まとめ(1)

- ▶ 東日本大震災の事例から、4原理に加えて新たに提案した「俊敏性」と「SCネットワーク設計」という2原理が重要であることを確認できた。
- ▶ 物流システムという点だけでなく、マスメディアによって必要な情報が伝わっていなかったことは、実際の救援活動が上手く機能しなかった一因ではないかと考えられる。



研究目的(2)

◆ 災害時の目標:『被災者の苦しみを和らげる』

・当時の配給方法などに関して開かれる様々な検討会

⇒混乱状況の中でも、“必要な時”に、“必要な物”を、“必要な量”の物資が提供されるべきである。

◆ ロジスティクス・モデルを通して

＜最大の目標＞
被災者の満足度の最大化

つまり、

＜モデルにおける目標＞
被災者の満たされない需要の最小化





関連研究

◆Özdamar, et al. による

”Emergency Logistics Planning in Natural Disasters” (2004)

◆提案されたロジスティクス・モデル

- ・概要: 救援物資の配給に関する数理的ロジスティクス・モデル
- ・目標: 被災者の満たされない需要の最小化

◆検討された理論

- ・多品種ネットワークフロー, 輸送経路問題

◆考慮される事項

- ① Address: 需要地(避難所)の位置
- ② Vehicles: 輸送車両の種類
- ③ Service Strategy: 配送方法・条件
- ④ Objectives: モデルを使うことの目的



ロジスティクス・モデル

◆東日本大震災を参考にすると・・・

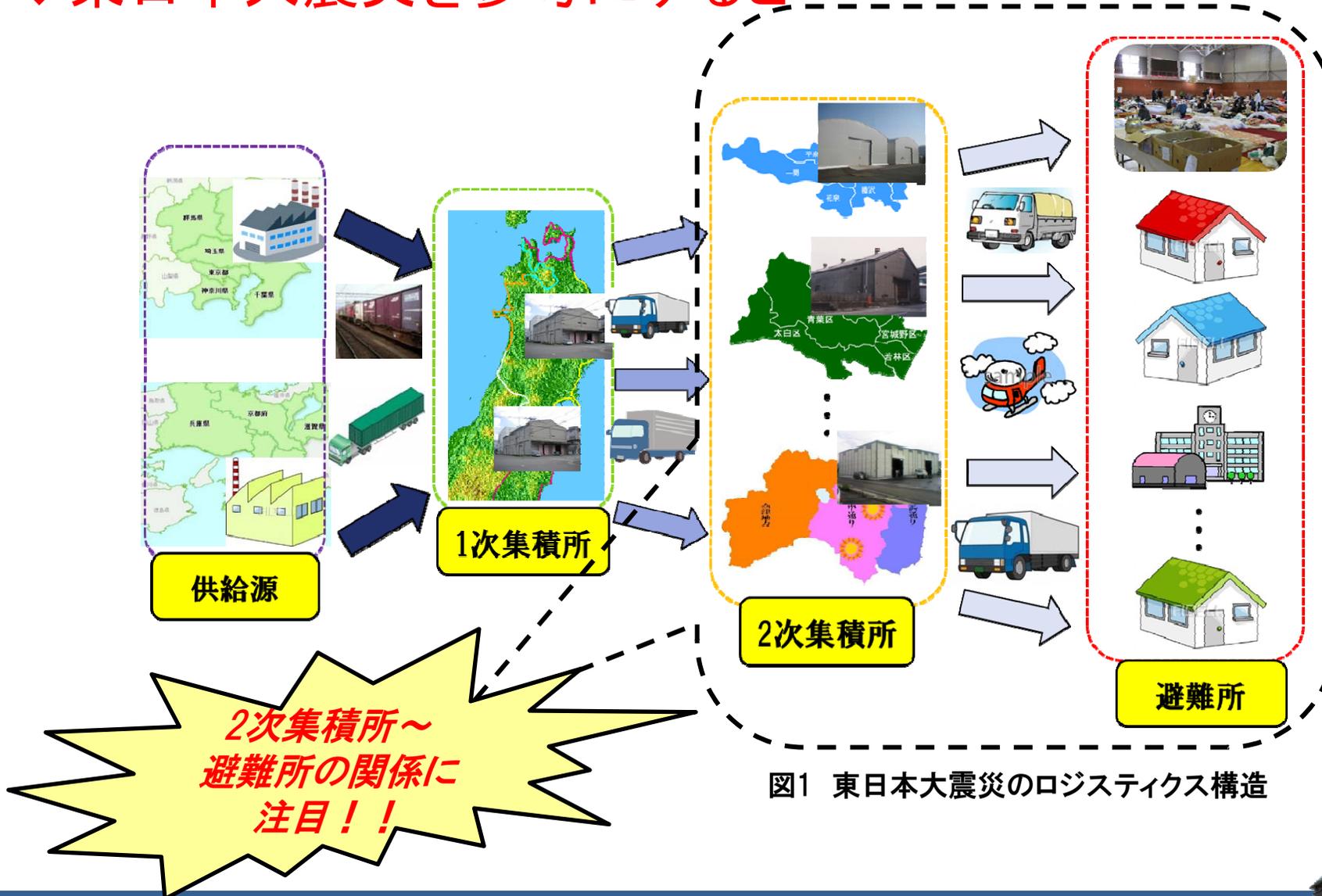


図1 東日本大震災のロジスティクス構造

Ⅱ 2次集積所~避難所の関係に着目

◆より被災者の近い流れに着目

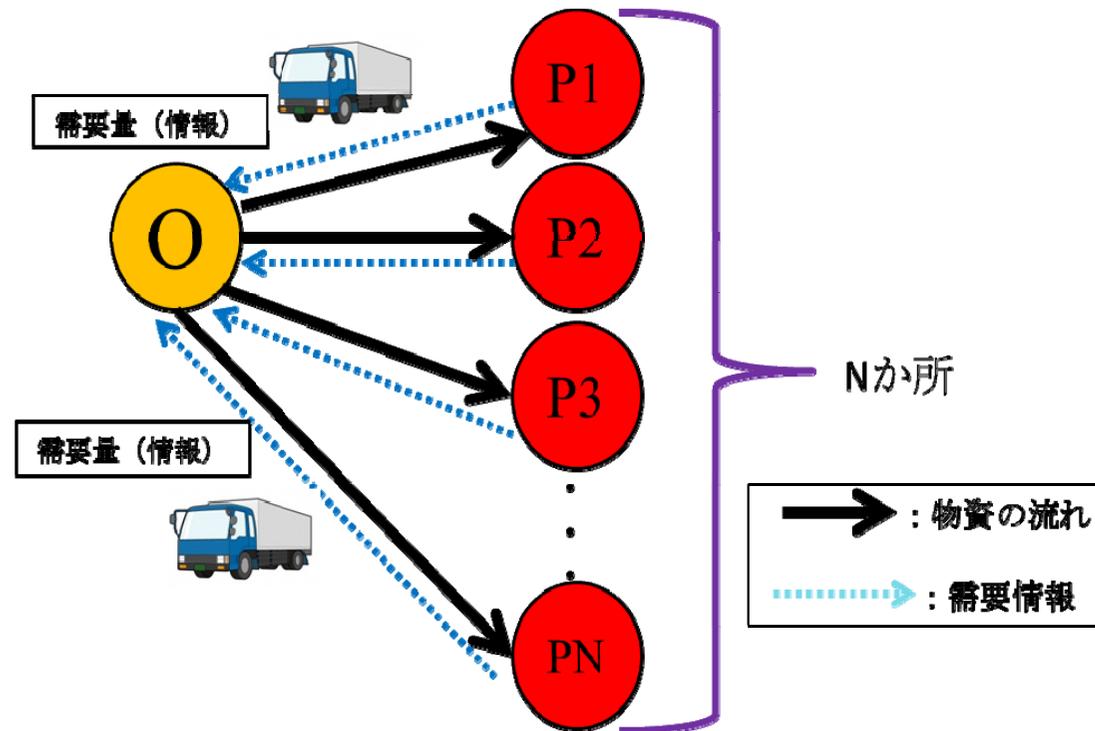


図2 2次集積所と避難所の関係

<検討するモデル>

- ・O地点(供給源:2次集積所)が1か所であり,P地点(避難所)がNか所という関係.
- ・輸送方式は1つであり,トラックの使用を想定.

様々なニーズ

◆避難所での様々なニーズ

＜衣料品＞

- ・衣類(未使用品, 美品)
- ・男女下着
- ・高齢者向け衣類

＜生活用品＞

- ・文房具類(コピー用紙, ペン等)
- ・寝具(シーツ, 布団, 掛布等)
- ・防寒具(暖房, カイロ, 毛布)

＜食品＞

- ・飲料水
- ・常温保存食全般
- ・調味料, 缶詰

＜消耗品＞

- ・生理用品(子供・高齢者オムツ)
- ・タオル, バスタオル
- ・紙類(トイレットペーパー, ティッシュ)

◆つまり, 提案するモデルで考えると・・・

1回の輸送で複数の品種を提供することが必須であり,
“多品種ネットワークフロー”の考えが必要となる！！

N点間・I品種モデル

◆記号

<パラメーター>

Cap : 輸送車両の容量

y_t : 用意された車両の台数

T : 計画対象期間 ($T \in t$)

N : ノード数 ($N \in n$)

I : 必需品の品種数 ($I \in i$)

w_i : 必需品*i*の単位質量

D_{tn}^i : 避難所 P_n における必需品*i*の*t*期の需要量

S_t^i : 供給地における必需品*i*の*t*期の供給可能量

α_i : 必需品*i*に関する物資の充足率

α_{min} : 物資の最低充足率

<決定変数>

Y_{tn} : P_n に向かう*t*期の車両台数

Z_{tn}^i : 避難所 P_n に運ばれる必需品*i*の*t*期の物資量

$P_n^i \in \{0,1\}$: 避難所 P_n に向かう必需品*i*の過供給に関する0-1変数

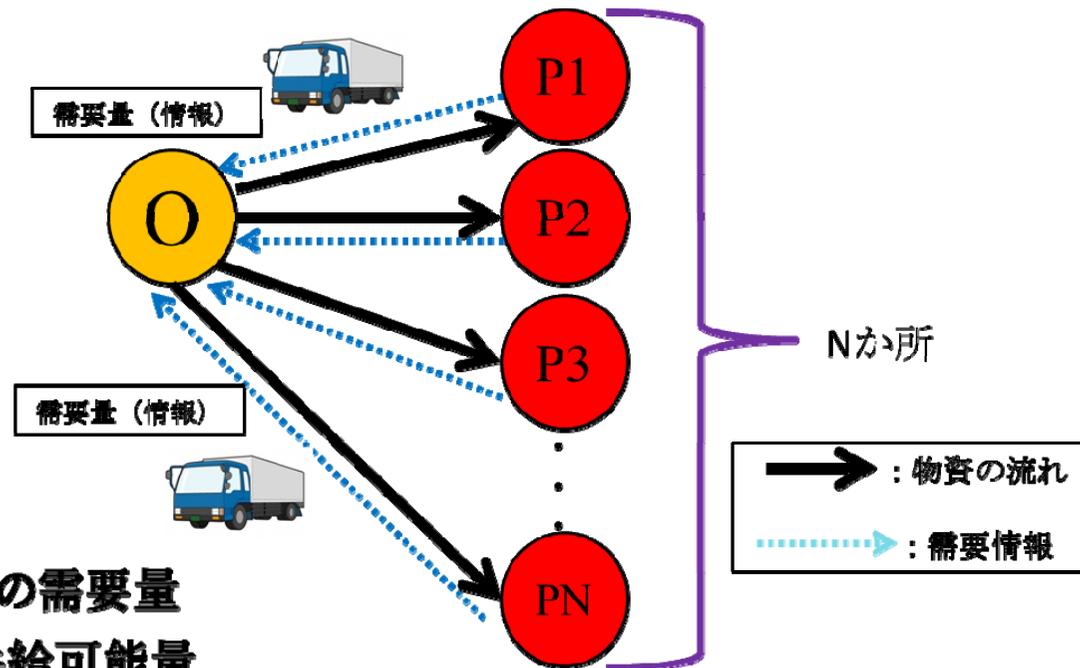


図3 2次集積所と避難所の関係

N点間・I品種モデル

◆ 目的関数

$$\text{最小化 } \sum_{i \in I} \sum_1^N \sum_1^T P_n^i (D_{tn}^i - Z_{tn}^i) \quad (1)$$

◆ 制約条件

$$Cap \times \sum_1^T Y_{tn} \geq w_a \times \sum_1^T Z_{tn}^a + w_b \times \sum_1^T Z_{tn}^b \cdots w_I \times \sum_1^T Z_{tn}^I \quad (n=1,2,3 \dots N) \quad (2)$$

$$y_t \geq \sum_1^N Y_{tn} \quad (\forall t) \quad (3)$$

$$\sum_1^T S_t^I \geq \sum_1^N \sum_1^T Z_{tn}^I \quad (n=1,2,3 \dots N) \quad (4)$$

$$P_n^i = \begin{cases} 1 & (D_{tn}^i \geq Z_{tn}^i) \quad (\forall t, n) \\ 0 & (D_{tn}^i < Z_{tn}^i) \quad (\forall t, n) \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_1^T S_t^i / \sum_{i \in I} \sum_1^N \sum_1^T D_{tn}^i = \alpha_i \quad (\forall i, t, n) \quad (6)$$

式 (7) の α_i より一番低い充足率を選択し, α_{min} とする.

$$Z_{tn}^i / D_{tn}^i \geq \alpha_{min} \quad (\forall i, t, n) \quad (7)$$

$$Y_{tn} \geq 0 \text{かつ整数}, Z_{tn}^i \geq 0 \quad (8)$$





モデルの検証

◆ 市町村の選定

被災した青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県の中から市町村を選定。その後、公式HPに避難者数データのある岩手県と宮城県の合計87市町村の中から市町村を選定。

市町村：**福島県相馬市**に決定

◆ 物資の選定

選定基準①: どんな災害でも必要とされる物

選定基準②: 東日本大震災で特に必要とされた物

必需品の種類⇒**精米、お菓子、水、おかず、毛布の5品種**に決定

理由: 重さ単位の物資、ケース単位の物資を検討するため。





モデルの検証

◆ 車両の選定

被害の大きい地域では車一台が通るのも厳しい状況。
パネルバンよりも平ボディーや軽トラックの方が現実的。



図4 平ボディー

車両⇒平ボディー(750kg)の1種に決定

◆ パラメーターの選定

- ・計画対象期間:24時間(⇒食料と水は3食分とする。)
- ・一人当り1食の必要な物資量(※H23年度国土政策関係報告書参照)

精米:150g お菓子:100g 水:500ml
おかず:100g 毛布:1枚



東日本大震災の事例 ～福島県相馬市～

◆ 3月21日14時の需要量に着目

表1 避難者数

| 避難所名 | 避難者数 |
|-------------|-------|
| 中村第一小学校 | 450人 |
| 飯豊小学校体育館 | 150人 |
| 八幡小学校体育館 | 142人 |
| 向陽中学校体育館 | 460人 |
| スポーツアリーナそうま | 260人 |
| 老人憩いの家 | 28人 |
| はまなす福祉センター | 500人 |
| 日立木公民館 | 49人 |
| 山上公民館 | 22人 |
| 相馬東高校 | 489人 |
| 合計 | 2550人 |

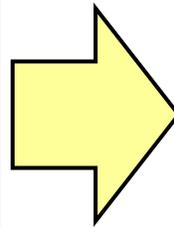


表2 需要量

| 需要量 | 精米 | お菓子 | 水 | おかず | 毛布 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 中村第一小学校 | 21 | 135 | 57 | 57 | 45 |
| 飯豊小学校体育館 | 7 | 45 | 19 | 19 | 15 |
| 八幡小学校体育館 | 7 | 43 | 18 | 18 | 15 |
| 向陽中学校体育館 | 21 | 138 | 58 | 58 | 46 |
| スポーツアリーナそうま | 12 | 78 | 33 | 33 | 26 |
| 老人憩いの家 | 2 | 9 | 4 | 4 | 3 |
| はまなす福祉センター | 23 | 150 | 63 | 63 | 50 |
| 日立木公民館 | 3 | 15 | 7 | 7 | 5 |
| 山上公民館 | 1 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| 相馬東高校 | 23 | 147 | 62 | 62 | 49 |
| 合計 | 120 | 767 | 324 | 324 | 257 |

◆ パラメーターの数値

- **利用可能車両数** ($= y_t$) (車両の容量 (Cap): 750kg): 15台
- **物資の単位質量** ($= w_i$)
 精米: 30kg お菓子: 1kg 水: 12kg おかず: 2.4kg 毛布: 1kg
- **供給可能量** ($= S_t^i$)
 精米: 90袋, お菓子: 590ケース, 水: 290箱, おかず: 250ケース, 毛布: 190セット
- **最低充足率** ($= \alpha_{min}$): 0.7

東日本大震災の事例 ～福島県相馬市～

表3 需要量

| 需要量 | 精米 | お菓子 | 水 | おかず | 毛布 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 中村第一小学校 | 21 | 135 | 57 | 57 | 45 |
| 飯豊小学校体育館 | 7 | 45 | 19 | 19 | 15 |
| 八幡小学校体育館 | 7 | 43 | 18 | 18 | 15 |
| 向陽中学校体育館 | 21 | 138 | 58 | 58 | 46 |
| スポーツアリーナそうま | 12 | 78 | 33 | 33 | 26 |
| 老人憩いの家 | 2 | 9 | 4 | 4 | 3 |
| はまなす福祉センター | 23 | 150 | 63 | 63 | 50 |
| 日立木公民館 | 3 | 15 | 7 | 7 | 5 |
| 山上公民館 | 1 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| 相馬東高校 | 23 | 147 | 62 | 62 | 49 |
| 合計 | 120 | 767 | 324 | 324 | 257 |

表4 決定変数(供給量と使用した車両数)

| 避難所名 | 決定変数 (※カッコ内は不足分) | | | | | | 合計 | 車両数 |
|-------------|------------------|-------------|-----------|------------|------------|--------------|----|-----|
| | 精米 | お菓子 | 水 | おかず | 毛布 | | | |
| 中村第一小学校 | 14.7(6.3) | 128.8(6.2) | 52.7(4.3) | 45.6(11.4) | 31.5(25.5) | 273.3(41.7) | 2 | |
| 飯豊小学校体育館 | 4.9(2.1) | 31.5(13.5) | 17.1(1.9) | 13.5(5.5) | 10.5(4.5) | 77.5(27.5) | 1 | |
| 八幡小学校体育館 | 4.9(2.1) | 30.8(12.2) | 16.5(1.5) | 12.8(5.2) | 10.5(4.5) | 75.5(25.5) | 1 | |
| 向陽中学校体育館 | 14.7(6.3) | 108.4(29.6) | 50.9(7.1) | 44.2(13.8) | 32.2(13.8) | 250.4(70.6) | 2 | |
| スポーツアリーナそうま | 8.4(3.6) | 54.6(23.4) | 30.2(2.8) | 24.1(8.9) | 23.1(2.9) | 140.4(41.6) | 1 | |
| 老人憩いの家 | 1.4(0.6) | 6.3(2.7) | 2.8(1.2) | 2.8(1.2) | 2.1(0.9) | 15.4(6.6) | 1 | |
| はまなす福祉センター | 16.1(6.9) | 105(45) | 57.2(5.8) | 49.2(13.8) | 40.2(9.8) | 237.7(111.3) | 2 | |
| 日立木公民館 | 2.1(0.9) | 10.5(4.5) | 4.9(2.1) | 5.4(1.6) | 3.5(1.5) | 26.4(10.6) | 1 | |
| 山上公民館 | 0.7(0.3) | 4.9(2.1) | 2.1(0.9) | 2.6(0.4) | 2.1(0.9) | 12.4(4.6) | 1 | |
| 相馬東高校 | 22.1(0.9) | 109.2(37.8) | 55.6(6.4) | 49.7(12.3) | 34.3(14.7) | 270.9(72.1) | 3 | |
| 合計 | 90(30) | 590(177) | 290(34) | 250(74) | 190(67) | 1410(382) | 15 | |

東日本大震災の事例 ～福島県相馬市～

◆結果と考察

- 総需要量1,792単位に対し、382単位まで満たされない需要を最小化することができた。この時の満足度は78.9%である。

◆平等性

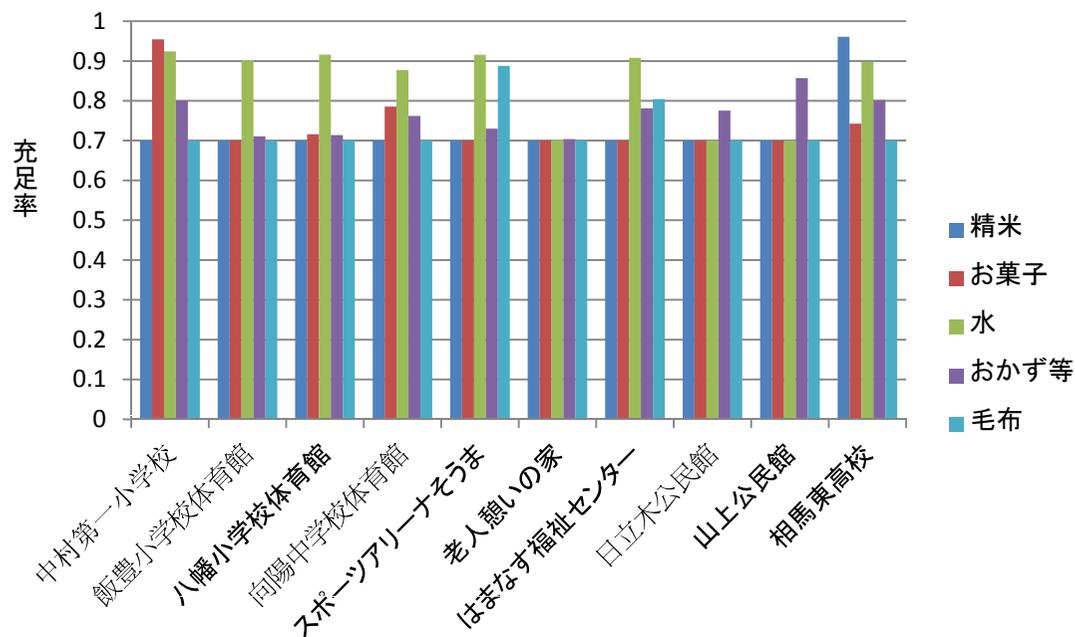


図5 各避難所における各物資量に対する充足率

最低充足率0.7を超え、かつ、平等に物資の配給が行われたと言える。



まとめ(2)

- N点間, I品種の災害時の災害救援ロジスティクス・モデルの検討ができた. 特に, 平等性に関する概念を取り入れた災害救援活動ロジスティクス・モデルの構築ができた.
- 福島県相馬市のデータを用いて、提案したモデルにより公平に救援物資を各避難所に供給できることを確認した。



今後の展望

- 俊敏性
 - 必要な需要にどう対応するか(柔軟性)
 - 需要が発生してから物資が届くまでのスピード
- Push-Pull境界設定
 - ノードに定めた水準以上に在庫を確保(Push)
 - 品目ごとに平等性(Pull)を適用

