

人道支援ロジスティクス

従来法の問題点と新たな提案

東京海洋大学 久保 幹雄, 橋本英樹

東北大学 奥村 誠

本当のタイトル

ここが変だよ
人道支援ロジスティクス

なぜ、毎度毎度支援物資が
避難所に届かないのか？

なぜ、地震の度に同じような報告書が出されるのか？

現在の基本方針

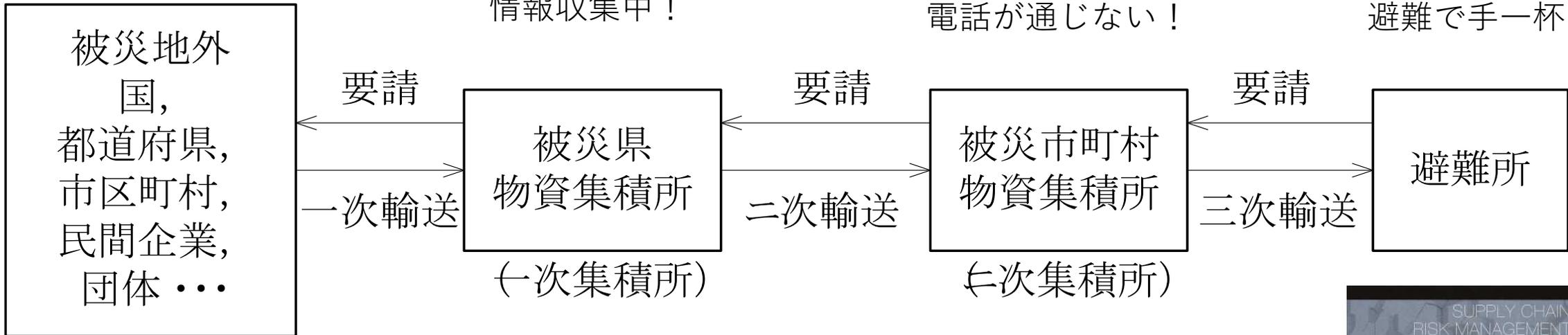
要請がないので
何もできない！

松川，久保編「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」

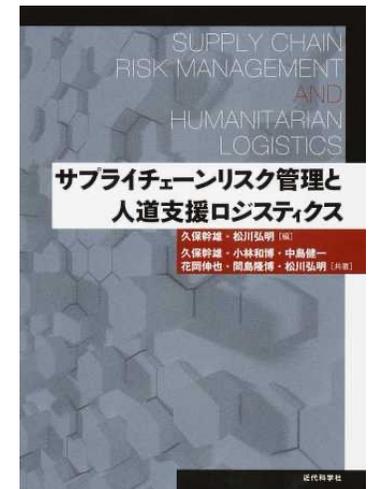
情報収集中！

電話が通じない！

避難で手一杯！

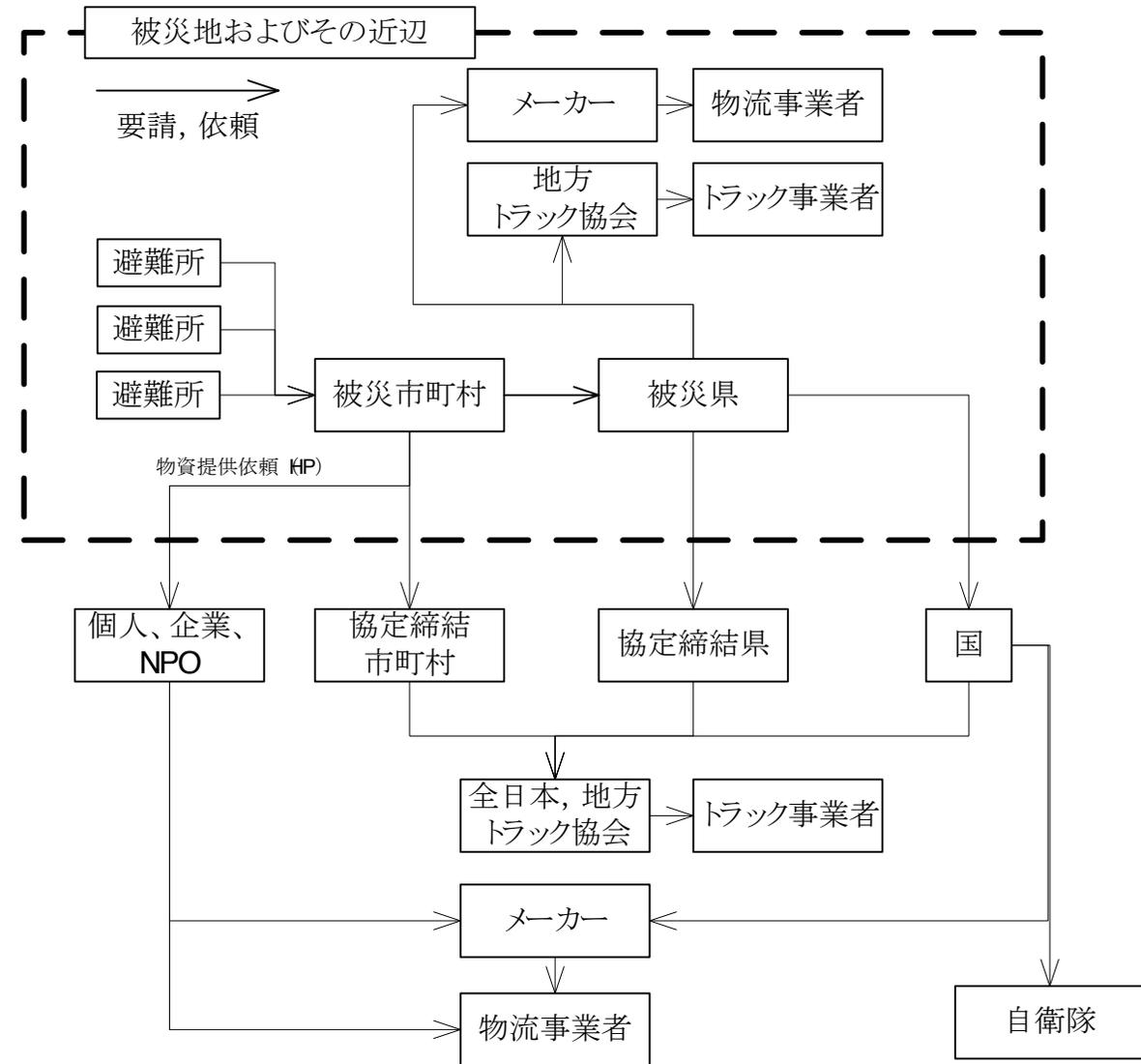


- 毎回大混乱を引き起こすもと
- 災害は県単位，市区町村単位で発生するのではない

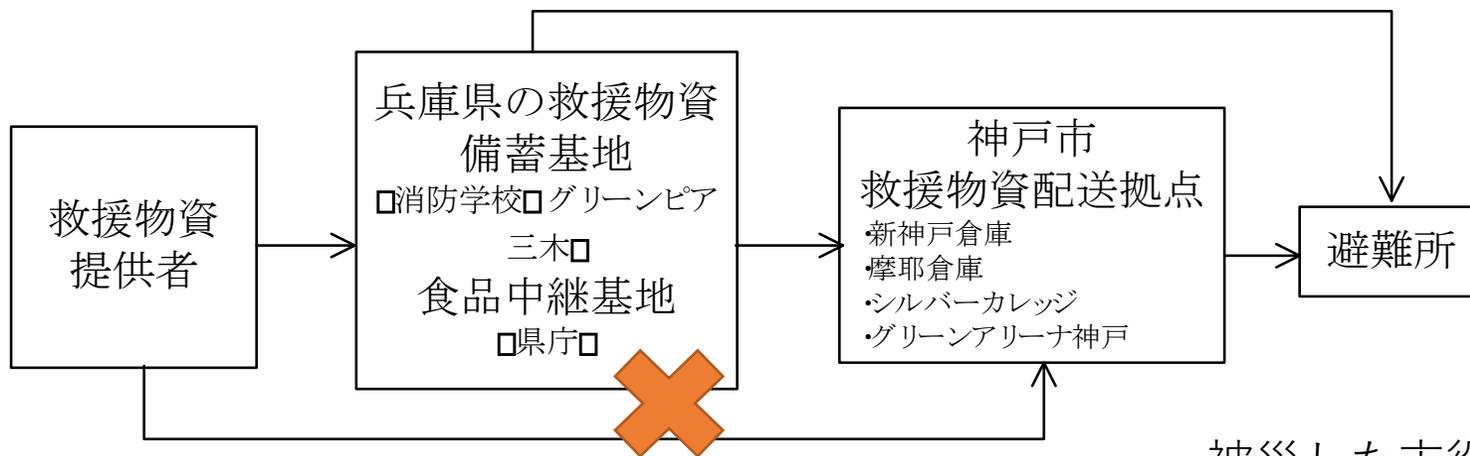
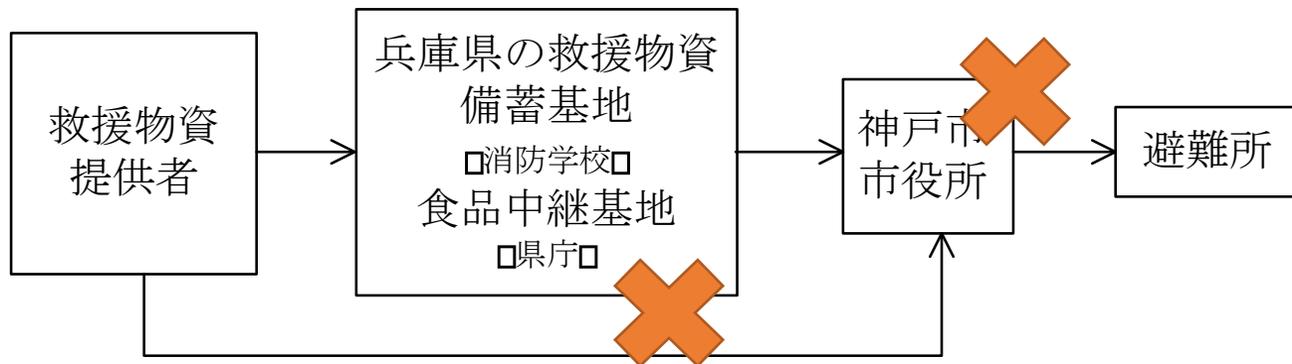


情報フロー

- 一見すると格好いいが、情報の流れは単純で一元化させなければいけない
- 輸送フローと同様で、実際に発生した様々な流れを図にしても、役に立たない
- 必要物資に関する要請が、被災市町村から現地対策本部に伝達されるルートと、直接県に伝達されるルートなど、複数のルートがあったため、**要請漏れ**や**重複申請**が発生し、しばしば混乱した
(H28熊本地震に係る初動対応の検証レポート)

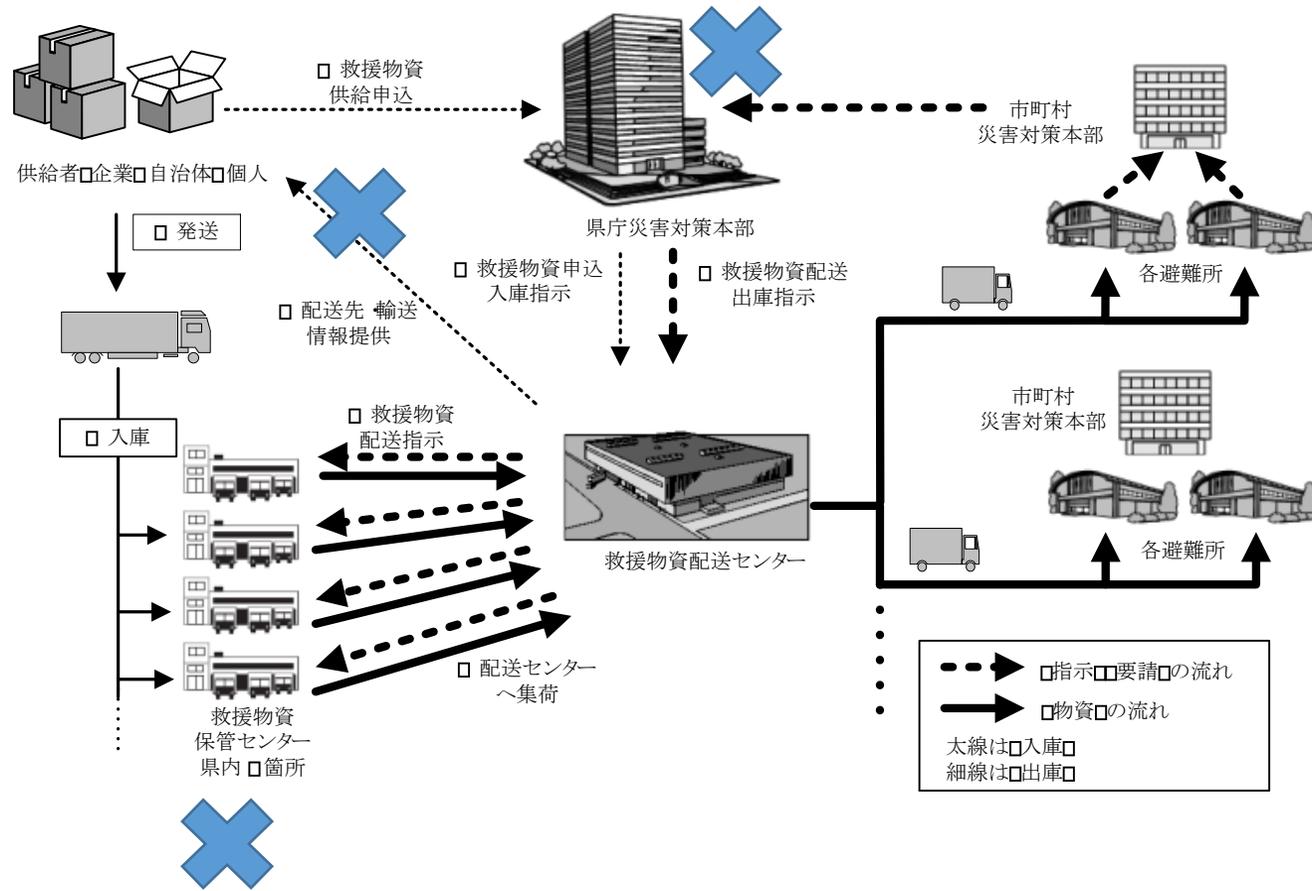


阪神淡路大震災



被災した市役所に送って大混乱

新潟県中越大震災

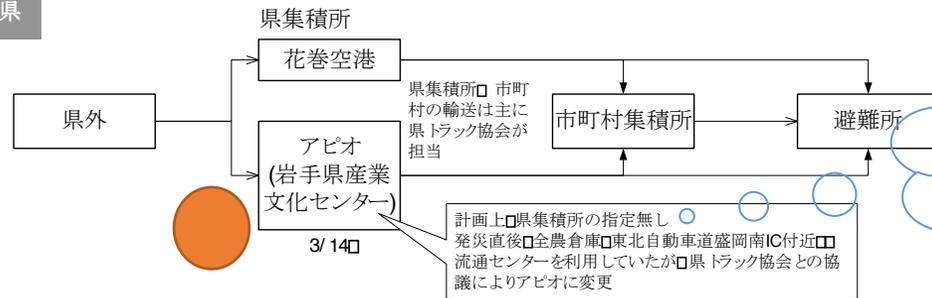


一見すると格好いい図だが、実際には避難所に物資は届いていない情報とモノの流れが一致していない（絵に描いた餅）
（例：小千谷市の市役所ホールは段ボールで満杯）

東日本大震災

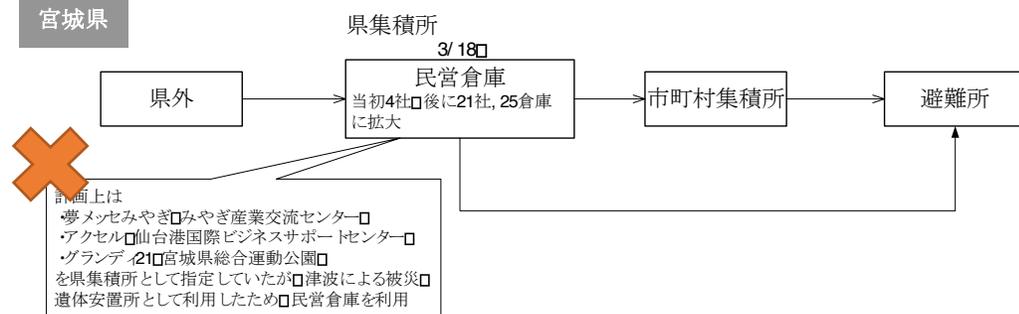
- たまたま計画した集積所をもたない岩手だけうまくいった（他は大混乱）
- たまたま、被災者数が少ない地域で、支援人数が大勢いたためだったという話もある

岩手県

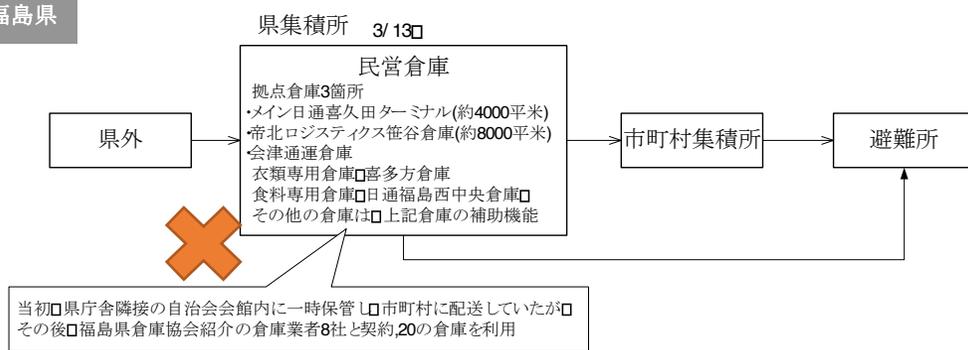


たまたまこれが良かった

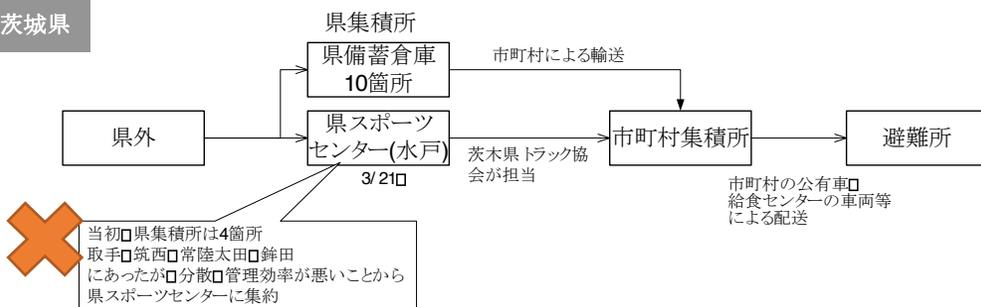
宮城県



福島県



茨城県



熊本地震



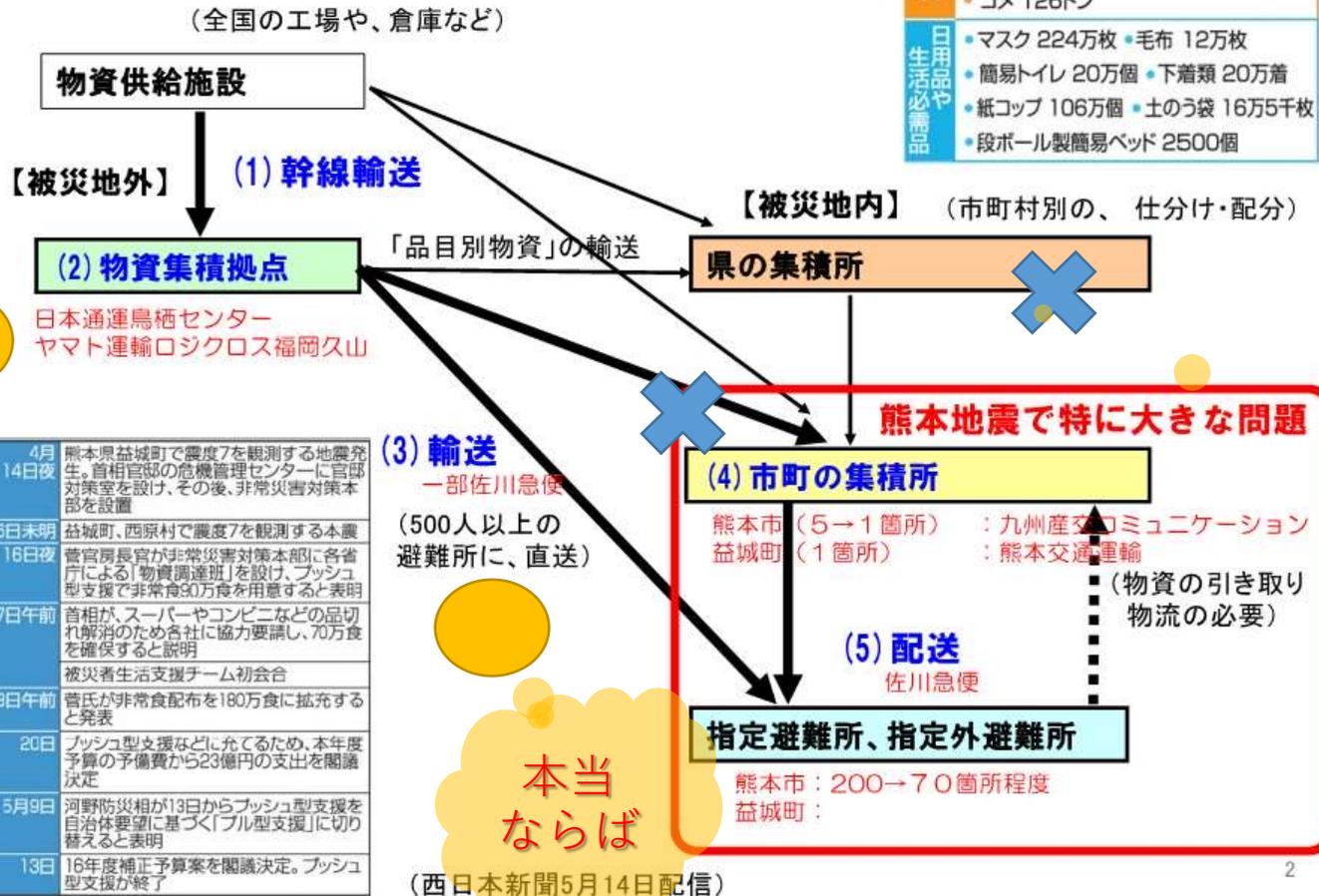
- 熊本地震で始まった「プッシュ型支援」 (?)
 - 実際は，県庁ロビーに積まれ，3から6時間待ち
 - 直接避難所に配送する情報をもたないため
 - 「支援物資は避難者一人一人の手元まで確実に届けなければ意味がない」 (官房長官談)
- =>ということは，今回も意味がなかった

熊本地震の輸送フロー

1. 緊急支援物資の供給

■ プッシュ型支援で送った主な物資

食料	パン 57万食	おにぎり 23万食
	バックご飯 30万食	カップ麺 60万食
	コメ 126トン	
日用品や生活必需品	マスク 224万枚	毛布 12万枚
	簡易トイレ 20万個	下着類 20万着
	紙コップ 106万個	土のう袋 16万5千枚
	段ボール製簡易ベッド 2500個	



政府によるプッシュ型支援を巡る主な経緯

4月14日夜	熊本県益城町で震度7を観測する地震発生。首相官邸の危機管理センターに官邸対策室を設け、その後、非常災害対策本部を設置
16日未明	益城町、西原村で震度7を観測する本震
16日夜	菅官房長官が非常災害対策本部に各省庁による「物資調達班」を設け、プッシュ型支援で非常食30万食を用意すると表明
17日午前	首相が、スーパーやコンビニなどの屋切れ解消のため各社に協力要請し、70万食を確保すると説明 被災者生活支援チーム初会合
18日午前	菅氏が非常食配布を180万食に拡充すると発表
20日	プッシュ型支援などに充てるため、本年度予算の予備費から23億円の支出を閣議決定
5月9日	河野防災相が13日からプッシュ型支援を自治体要望に基づく「プル型支援」に切り替えると表明
13日	16年度補正予算案を閣議決定。プッシュ型支援が終了

(西日本新聞5月14日配信)

検証

500人以上の避難所へ直送？

ヒヤリングより
SNS?
(デマに注意)

熊本市立白山小学校
850人避難してて物資がまったくないそうです
水も電気も止まっています
もし余裕があるなら物資まわしてください
(Twitterまとめサイトより)
<http://matome.naver.jp/odai/2146084967097835101>



熊本市立江南中学校



熊本国府高校

人道支援ロジスティクスの公理

- 被災直後の末端（避難所）までの必要物資の輸送が重要
- 初期対応後は、民間企業に任せ、妨害してはいけない
- 行政単位での伝言ゲームは避ける（重複発注の弊害）
- 通過型の（24時間使える）配送センターの活用
- 物流のプロや自衛隊に任せればOKという訳ではない（物流業者は平時のみ；自衛隊とは連携すべきだが兵站のプロではない）
- 本当に必要な物資は（季節に依存するが）予測可能；
避難所の希望を聞くことは様々な問題点
- 自衛隊との連携は大事
- インターネット，IT機器は（被災直後の被災地では）使用できない；
被災地外では使用可
- 集積所に入ってくる支援物資の制御が重要（善意の物資は逆に迷惑）

被災直後の末端までの必要物資の輸送

- 3日後までに避難所までの輸送が我々の対象
- 1週間・1ヶ月を過ぎた後の支援と混同してはいけない

熊本地震
4/14, 16発生

3日

4/19 受入れ状況が困難な状態です。
1日～2日ご支援の延期をお願いします。
受け入れ体制が整い次第、お知らせいたします。
益城町 災害対策本部

4/19
食糧等（保存期間が長いもの）
についての支援要求

4/19 ヤマト, 日通,
佐川輸送再開

1週間

4/21
物資受入施設の人的不足等により24時間体制での受入れ
が困難 => 支援物資受入れ時間 午前8時～午後10時

1ヶ月(対象外)

(避難所の希望を聞くことの) 問題点 1

龍田中学校が寄付を募り、GETした商品を見てみよう。

▼59,800円の40V型液晶テレビAQUOS、6個希望。

前回の記事：[【炎上】熊本市立龍田中学校がAmazonの欲しいものリストを悪用して高級テレビや一眼レフをGET→批判したら逆ギレで「アホ注意報」](#)

「龍田中学校避難所」という名義で開設されたAmazonの欲しいものリスト。
なぜか高級品がずらっと並んでおり、次から次へと高価なものをGETしていた。

【被災地】熊本市龍田中学校避難所への支援物資
お届け先住所 熊本市弥生が丘3-1-3, 佐賀県, 841-8505, Japan
「避難所になっている熊本市立龍田(たつた)中学校です。全国の皆様からご支援をいただけますと助かります。鳥栖にあるアマゾンの物流センターに一旦配送された後、避難所に届けようになっています。どうぞよろしくお願いいたします。」

保存する 読み込みと置換え シェアする

	シャープ 40V型 ハイビジョン 液晶テレビ AQUOS LC-40H30 ★★★★☆ (45) ¥ 59,800 プライム サイズ: 40V型 在庫あり。販売元: Amazon.co.jp、35点の新品/中古品 ¥ 59,600より	「地震によりテレビが破損し、高齢の避難者の方がテレビによる情報収集ができない状態です。情報収集の手段として、活用させてもらうとありがたいです。」 -【被災地】熊本市立龍田中学校 希望: 6 所有: 4	追加した日 2016年4月22日 ショッピングカートに入れる 他サイトで購入しますか?
	YAMAHA ヤマハ 軽便 譜面台 ケース付 MS303ALS ★★★★☆ (55) ¥ 4,730 プライム 在庫あり。販売元: Amazon.co.jp、18点の新品/中古品 ¥ 4,390より	「本校吹奏楽部の備に入れていたメトロノーム、譜面台が全滅しました。」 -【被災地】熊本市立龍田中学校 希望: 60 所有: 34	追加した日 2016年4月22日 ショッピングカートに入れる 他サイトで購入しますか?
	YAMAHA メトロノーム ブラック MP-90BK ★★★★☆ (10) ¥ 3,280 プライム 在庫あり。販売元: Amazon.co.jp、16点の新品/中古品 ¥ 3,200より	「本校吹奏楽部の備に入れていたメトロノーム、譜面台が全滅しました。」 -【被災地】熊本市立龍田中学校 希望: 50 所有: 29	追加した日 2016年4月22日 ショッピングカートに入れる 他サイトで購入しますか?
	北星鉛筆 Art Set 演奏用鉛筆 #9900 11990 ★★★★☆ (11) ¥ 658 プライム 通常11~14日以内に発送。販売元: Amazon.co.jp。	希望: 700 所有: 547	追加した日 2016年4月22日 ショッピングカートに入れる 他サイトで購入しますか?



シャープ 40V型 ハイビジョン 液晶テレビ
AQUOS LC-40H30
★★★★☆ (45)
¥ 59,800 プライム
サイズ: 40V型
在庫あり。販売元: Amazon.co.jp、35点の新品/中古品 ¥ 59,600より

「地震によりテレビが破損し、高齢の避難者の方がテレビによる情報収集ができない状態です。情報収集の手段として、活用させてもらうとありがたいです。」 -【被災地】熊本市立龍田中学校

追加した日 2016年4月22日

ショッピングカートに入れる

他サイトで購入しますか?

希望: 6 所有: 4



Canon デジタル一眼レフカメラ EOS Kiss X7i ダブルズームキット EF-S18-55 IS STM/EF-S55-250 IS STM付屋 KISSX7I-WKIT
★★★★☆ (93)
¥ 64,310
1点在庫あり。ご注文はお早めに。販売元: Gnetアキバ。
45点の新品/中古品 ¥ 52,704より

希望: 2 所有: 0



Panasonic デジタルハイビジョンビデオカメラ シルバー HDC-HS200-S
★★★★☆ (1)
¥ 73,500
1点在庫あり。ご注文はお早めに。販売元: H・T ネットワーク。

希望: 3 所有: 0

追加した日 2016年4月23日

ショッピングカートに入れる

他サイトで購入しますか?

問題点 2

今、熊本の避難所に必要なもの

<https://narublo.com/hinanjo-mono>

水, 食料, 清潔用品などの他に...

娯楽はとても大切

避難所で2日もすると娯楽が必要になります

特にご高齢の方は動くのが不自由になる方もいらっしゃいますので、相撲や水戸黄門が見れるテレビなどがあればと思いました。

ただし、NHKなどで震災情報ばかり見ていると余計に疲れます。

ご高齢の方にとっての楽しみを必ず用意してあげてください。

一般の方の娯楽、お子様用のおもちゃも必要です。

被災したということを考えない時間が大切です。

本・絵本

ファッション誌・ティーン誌

ジャンプなど少年誌

クロスワード・ナンクロ本

筆記用具

色鉛筆

子供用のおもちゃ、ボール

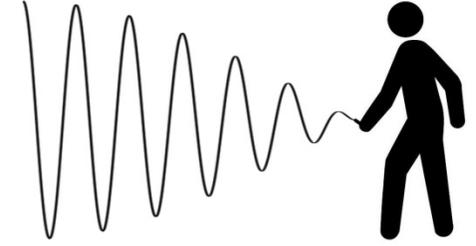
問題点 3

- 配分ゲーム (allocation game): 鞭効果 (後述) の原因のひとつ
- 南海トラフや首都圏直下など大規模震災の場合には、集積所でも物資不足の可能性
- 避難所の中には、配分量を増やすために多めに発注 => 不公平, 在庫の振幅増大

解決法

- 発注量に応じて配分するのが公平ではない
- 避難人口に応じてプッシュ

鞭効果



- モダンなSCの基本概念（でも，どの報告書にも書いていない）
- SCの下流の変動が上流に行くに従い増大する現象
- 原因
 1. 複数の地点での情報伝達（避難所で簡易トイレ不足=>市・県・国と伝言ゲームをするうちに増大）
 2. リード時間（国が簡易トイレを大量に運んだときには需要なし）
 3. 供給不足と供給配分により見せかけの需要が増大
- 対処法
 1. 段階数を減らす（集積所から避難所へ直送）
 2. 中央集権型の管理（市，県，国と伝言ゲームをしない）
 3. リード時間短縮（近場の供給地点から輸送）
 4. 配分ゲームをさせない（避難所の御用聞きをしない）

鞭効果（理論的背景）

- 情報分散型
（現状：避難所，市，県，供給地点の4段階，リード時間大）

$$\frac{\text{Var}[q_t^i]}{\text{Var}[D_t]} = \prod_{k=1}^i \left(1 + \frac{2L_k}{p} + \frac{2L_k^2}{p^2} \right)$$

- 情報中央集権型

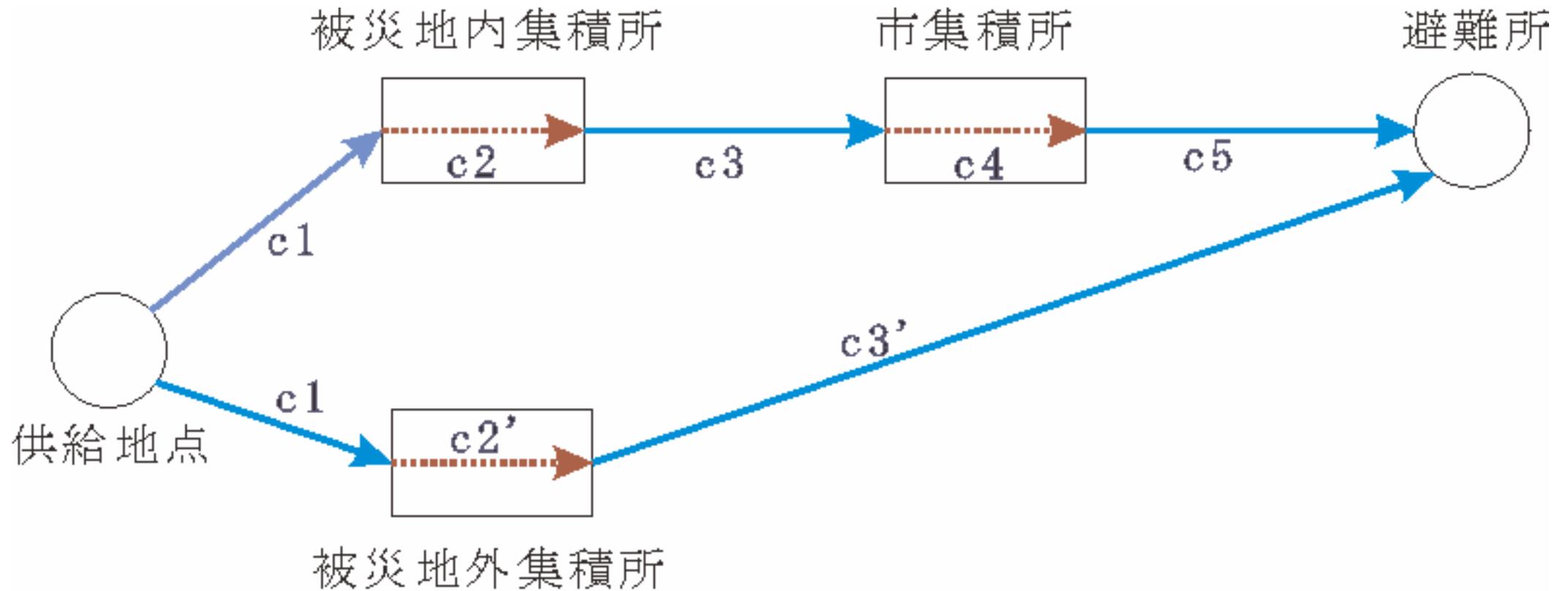
$$\frac{\text{Var}[q_t^i]}{\text{Var}[D_t]} = 1 + \frac{2 \sum_{k=1}^i L_k}{p} + \frac{2 \left(\sum_{k=1}^i L_k \right)^2}{p^2}$$

D(需要)，q(発注量)，i,k (段階)，t(期)，L(リード時間)，p(移動平均の期数)

提案

- フロー：支援物資供給地点 => 被災地外集積所 => 避難所
(南海トラフなど広域災害の場合には4階層も)
- 被災地外集積所の候補 = 宅配便の積み替え地点 (スループット型)
- そこから配送する可能性がある避難所の情報を保管 (紙ベース) し、
事前巡回路戦略 (a priori tour strategy) => ITに依存しない
- 集積所から避難所へは初回のみ押し出し (プッシュ)
2回目以降はカンバンで引っ張り (プル) => 情報なし, 動的 (非定常需要)
集積所へは (予測には基づくが) 引っ張り
- 輸送資源の利用はバケツリレー (bucket brigade) 方式 => 自己組織化

フローの理論的裏付け



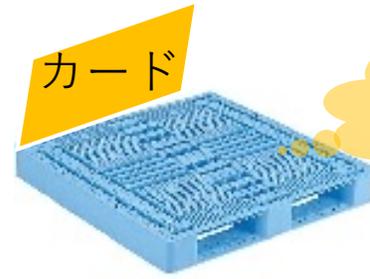
- 最大フロー・最小カット定理より
- $\min(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) \ll \min(C_1, C_2', C_3')$

避難所の情報

- 名称
- 住所
- 緯度・経度
- 収容人数（現在避難している人数；幼児，子供，性別なども）
- 備蓄量（食品が何日分とか）
- 空間充填曲線法の θ ，もしくは事前巡回路順の番号（ローロデックスボックスに保管）
- 入庫可能なトラックの大きさ（そこに至る道に対して通過制限があるなら，その情報も；入庫可能なトラックの種類がすぐにわかるように，色分けしておくときらに良い）
- 荷さばき施設の有無
- 近い集積所（宅配便センター）の名称と位置（複数）
- 近所の地図とアクセス推奨ルート（複数）



パレットによるカンバン方式



備蓄は
パレット化！

- 避難所にはカンバンに対応するパレット(避難所の最大収容人数に応じた枚数；上には備蓄品)
- パレットは支援物資ごとに色分け（たとえば食料は赤，毛布は青，清潔用品は白）
- パレットには避難所の位置（住所，緯度・経度）や情報（名称，収容人数など）が記載されたカードを収容
- 最初の1回目はプッシュ；備蓄品が使用された空パレットを回収し集積所へ戻る
- 集積所：
 1. 事前巡回路順にパレットを並べ，パレットの色に応じた支援物資を載せる
 2. 再びトラックに積み込み，満車になれば配送（go when full方式）
- 避難所における支援物資の在庫量 \leq パレット数分の物資量

避難所カードの例

$\Theta = 19302$

- 名称 エコミュージアムセンター広場
- 住所 北海道釧路市阿寒町阿寒湖温泉1-1
- 人数 2300人
- 規模 4600m²
- 緯度 43.4352452432
- 経度 144.100944244
- 配送インデックス (Θ) = 19302
- 第1近接集積所 ○ ×
- 第2近接集積所 ■ △ . . .



集積所までの輸送

なるべく近い県の避難所の備蓄在庫など

東北から九州への恩返し輸送などは論外

必要物資のみを
近隣の供給地点から供給

集積所

避難所

初期はプッシュ
その後は、基在庫方策によるプル
基在庫レベル=
 $\text{リード時間} \times \text{平均需要} +$
 $\text{安全在庫係数} \times \text{sqrt(リード時間)}$

不足物資を表示. 受け入れ用のWEBアプリ

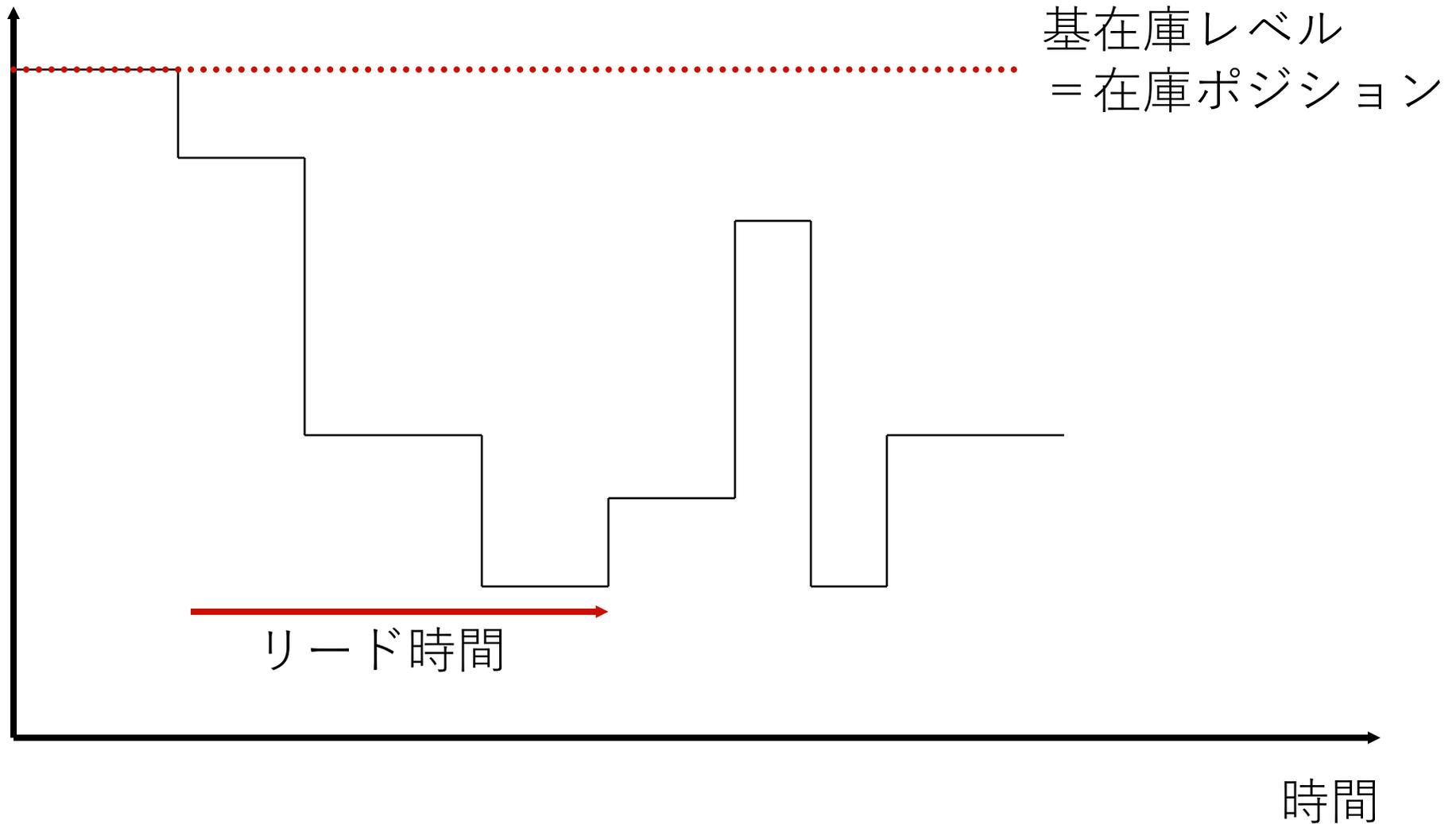
物資名	不足量
水	28万L
パン	27万食

IT使用

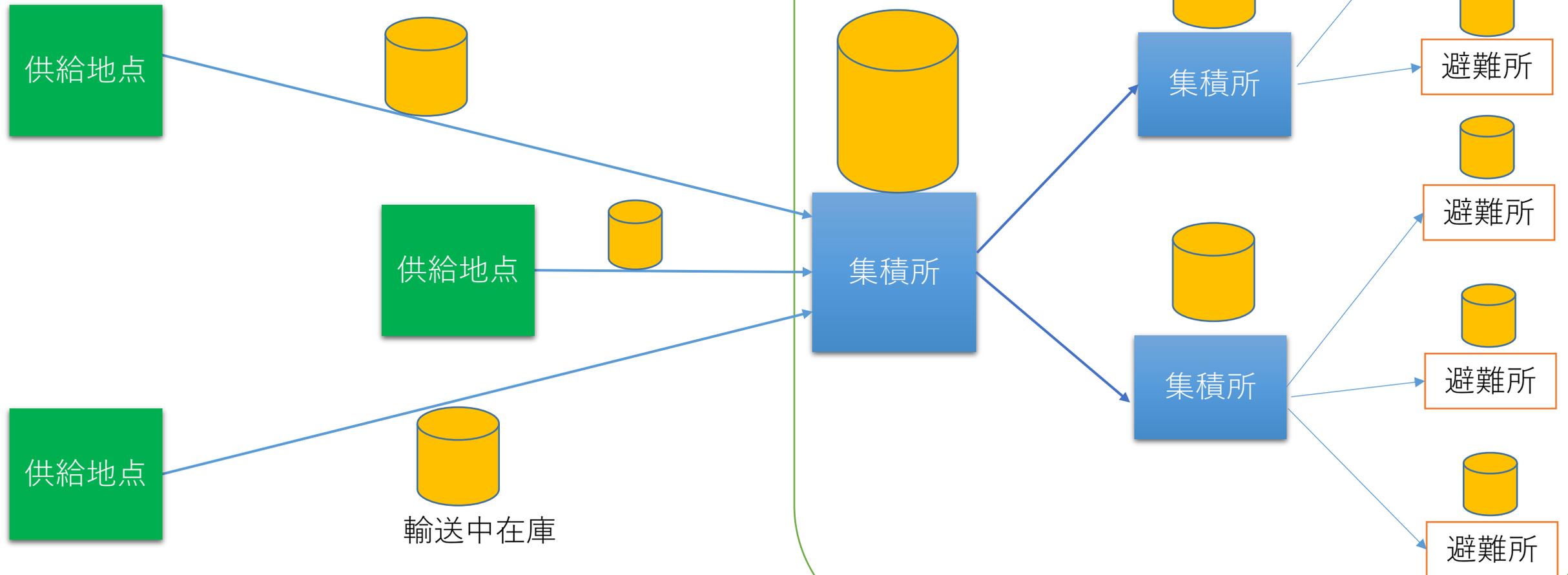
基在庫方策

- 基在庫レベル = 在庫ポジションの目標値
- 在庫ポジション
= 実在庫量 + 輸送中在庫量 - バックオーダー量
- 基在庫方策：在庫ポジションをモニタリングして、基在庫レベルを切ったら、基在庫レベルになるように発注（もしくは生産）を行う方法

基在庫方策



多段階在庫システム



エシェロン在庫ポジション = エシェロン在庫 + 輸送中在庫 - バックオーダー

簡易Webシステム構成例

集積所	品目	実在庫量	輸送中在庫量	バックオーダー	在庫ポジション	需要量	最大リード時間	基在庫レベル
福岡	パン	30トン	20トン		50トン	40トン/日	2日	90トン
	毛布	2トン	10トン		90トン	3トン/日	10日	38トン
	ミルク			10トン	-10トン	1トン/日	3日	3トン

品目	供給量	供給地点	リード時間	承認	輸送方法	到着地点
パン	68トン	埼玉県	80時間	×	航空機	佐賀空港
パン	10トン	山口県	6時間	○	トラック	福岡集積所
パン	30トン	島根県	24時間	○	トラック	福岡集積所
ミルク	30トン	大阪府	2日	○	トラック	福岡集積所

集積所から避難所への輸送 (公理とソリューション)

- 必要な支援物資の量や位置に対する事前情報を前提としない.
- 災害の規模や場所は事前にはわからない.
- 需要の定常性を仮定しない=> オンラインアルゴリズム
- 自己組織化システム
- ITの使用を前提としない

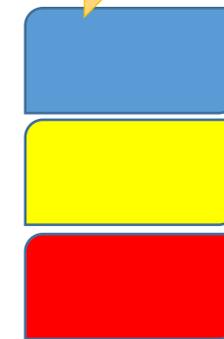
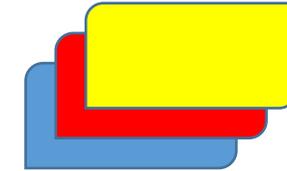


- カンバン方式
- 事前巡回路方策
- バケツリレー方式, の3つの戦略の複合システム

集積所から避難所への輸送

カンバン方式：トヨタが開発したITなしで動くプル型在庫方策
輸送（生産）停止しても仕掛在庫が一定

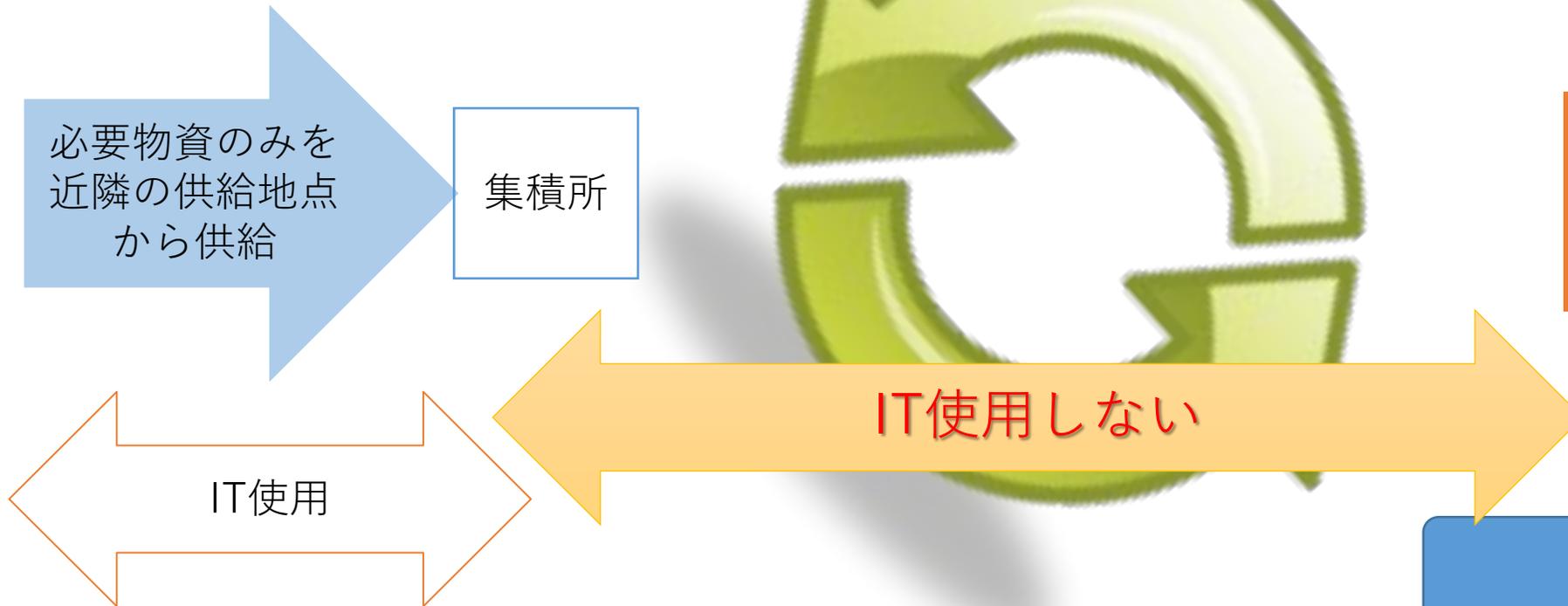
色分けされた
カンバン付き
パレット



毛布

水

米, パン



カンバン方式によるプル1



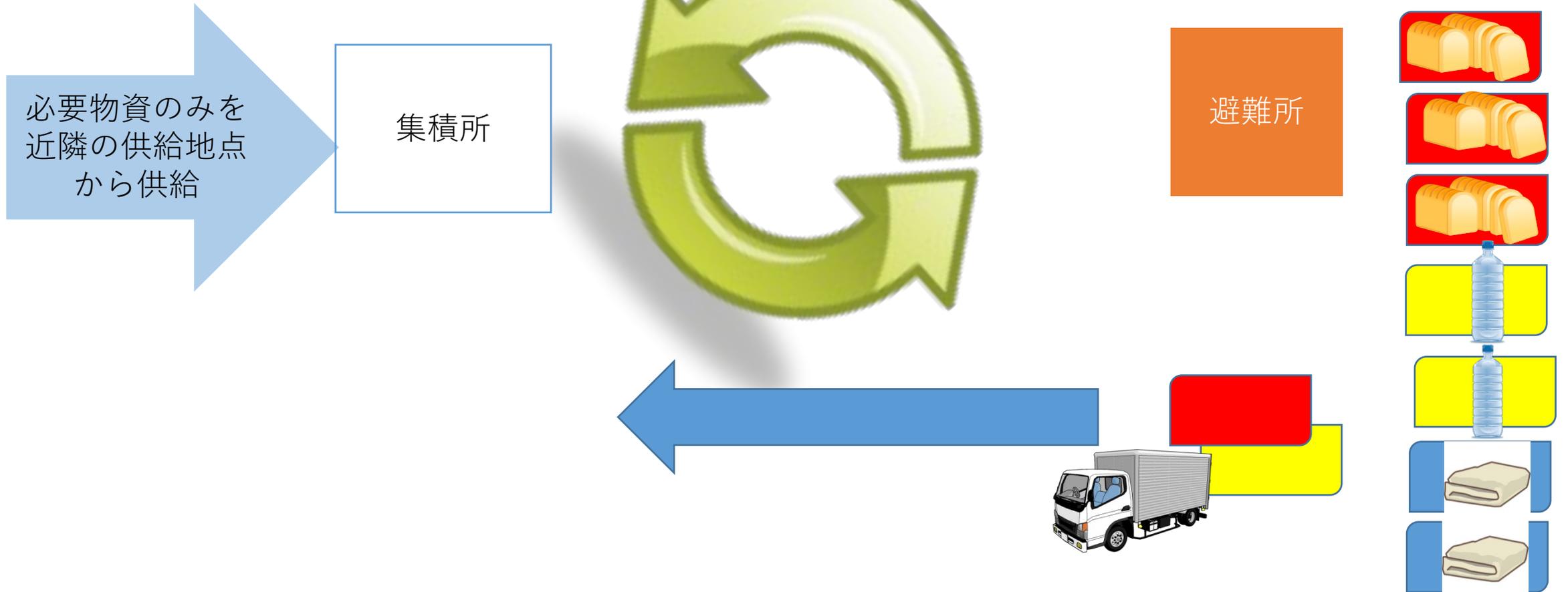
カンバン方式によるプル3



カンバン方式によるプル4



カンバン方式によるプル5

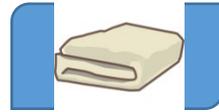


集積地点での運用

出庫バース



積載可能パレット数=6



避難所
 $\Theta = 10401$

避難所
10408

避難所
10456

避難所
10460

避難所
10401

避難所
10408

避難所
10456

避難所
10460



満載出発方式
(go when full policy)
ただし1日1便以上

配送インデックス (Θ) の小さい順に並べる



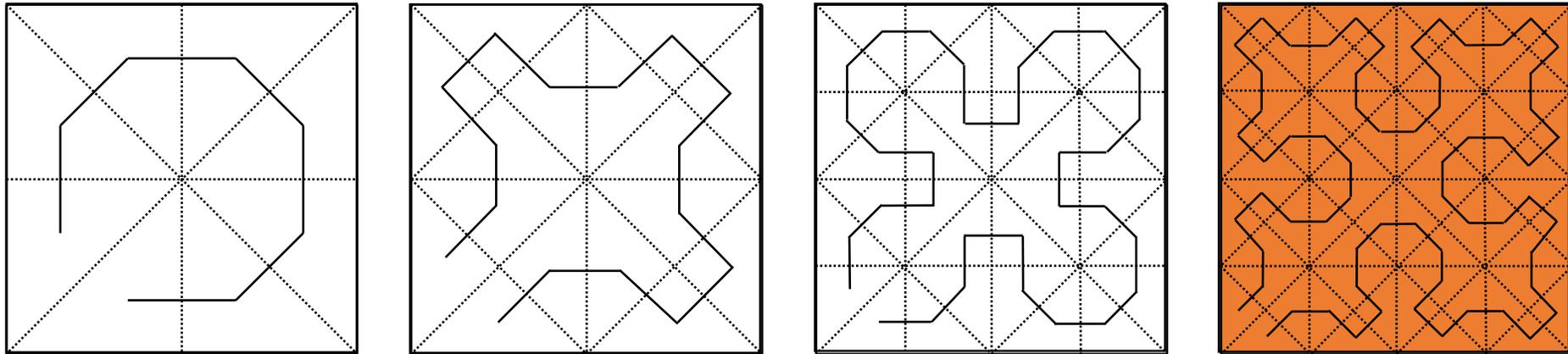
事前巡回路戦略で計算

事前巡回路戦略 (a priori tour strategy)

- MITで提案：JailletのD論, その後BertsimasのD論
- 巡回セールスマン問題(TSP)に対しては, 事前巡回路に空間充填曲線 (GTのBartholdi IIIが提案)を使うと $O(\log n)$ 倍の保証 (nは点数)
- 配送計画問題に対してはルート先・クラスター後法
 1. 事前にTSPを解き(ルート先), その後で容量制約を満たすように分割 (クラスター後)
 2. 1ルート内の顧客 (避難所) が多いなら, 漸近的に最適

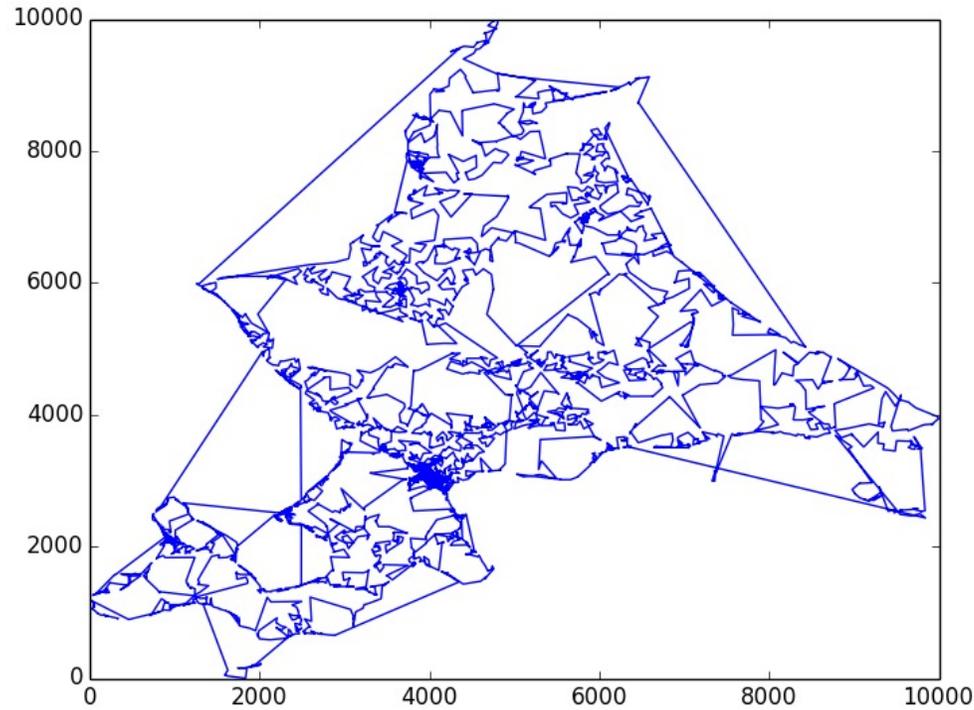
空間充填曲線 Spacefilling Curve (SFC)

- 空間内の点をすべて通過する曲線
- 例：シェルピンスキー曲線
（以下の操作を無限回繰り返した極限）
- $[0,1] \times [0,1]$ を $[0,1]$ に写像（ x,y 座標を θ に写像）



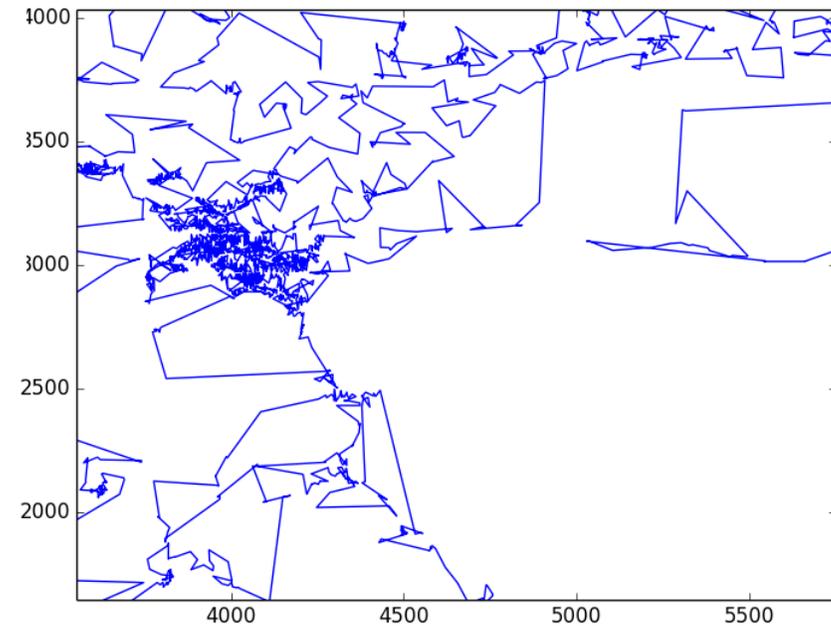
配送インデックス (Θ) の理論的背景

空間充填曲線法
(Bartholdi III)によるX,Y座標を
 Θ 値へ写像 (近さを保持)



北海道の避難所に対する巡回順

拡大図



Pythonによる θ の計算

```
maxInput=10000
```

```
def SFC(x,y):
```

```
    INC=1
```

```
    loopIndex=maxInput
```

```
    result=0
```

```
    if x>y:
```

```
        result+=INC
```

```
        x=maxInput-x
```

```
        y=maxInput-y
```

```
    while loopIndex>0:
```

```
        result=result+result
```

```
        if x+y>maxInput:
```

```
            result+=INC
```

```
            x,y=maxInput-y,x
```

```
        x=x+x
```

```
        y=y+y
```

```
        result=result+result
```

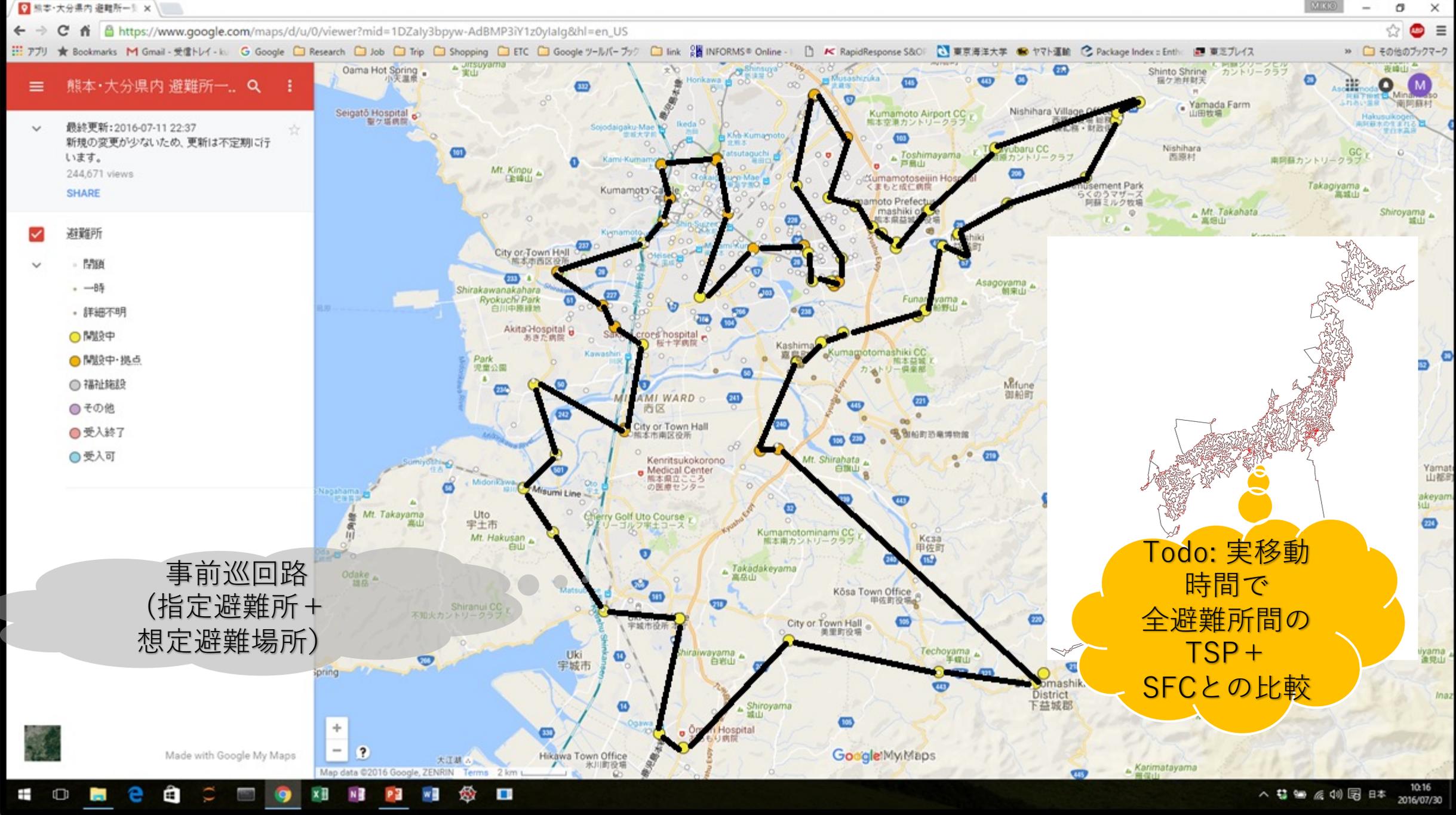
```
        if y>maxInput:
```

```
            result+=INC
```

```
            x,y=y-maxInput,maxInput-x
```

```
        loopIndex=int(loopIndex/2)
```

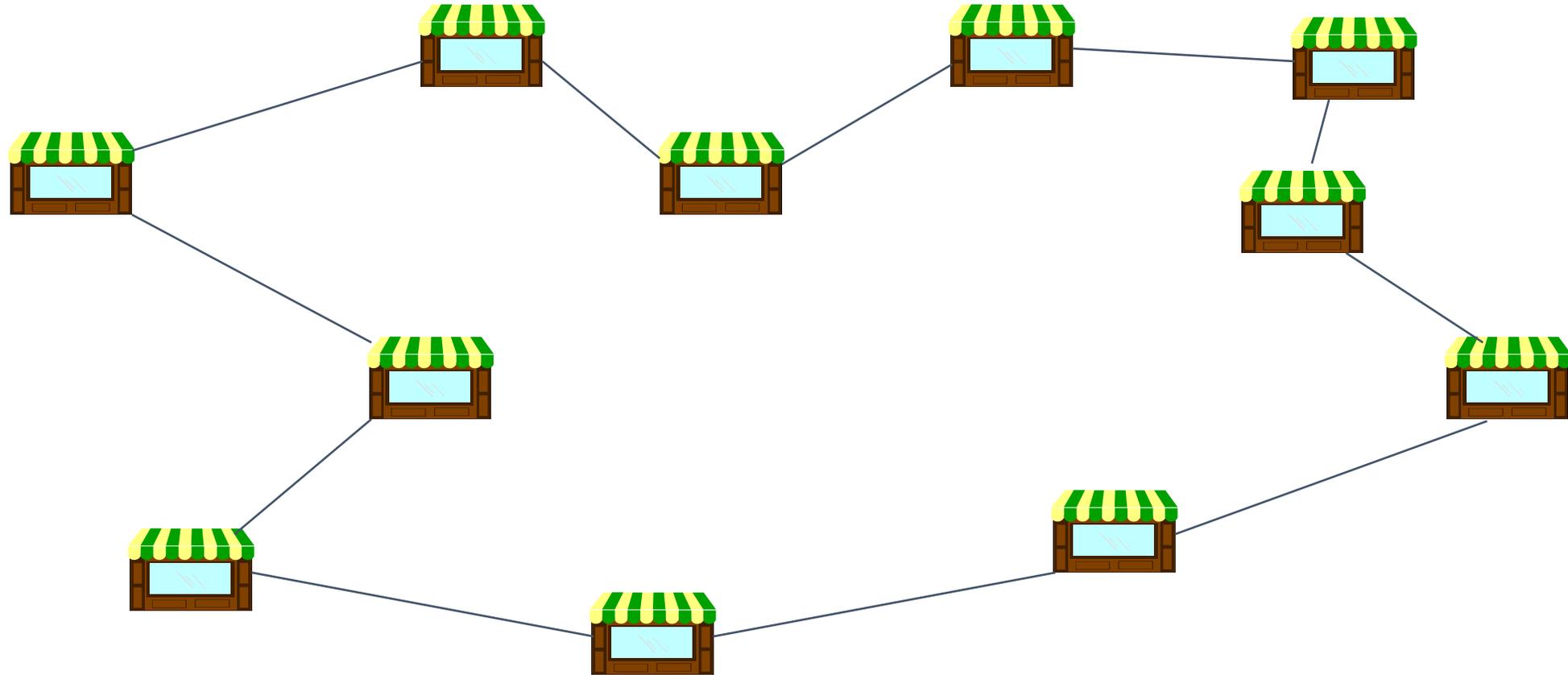
```
    return result
```



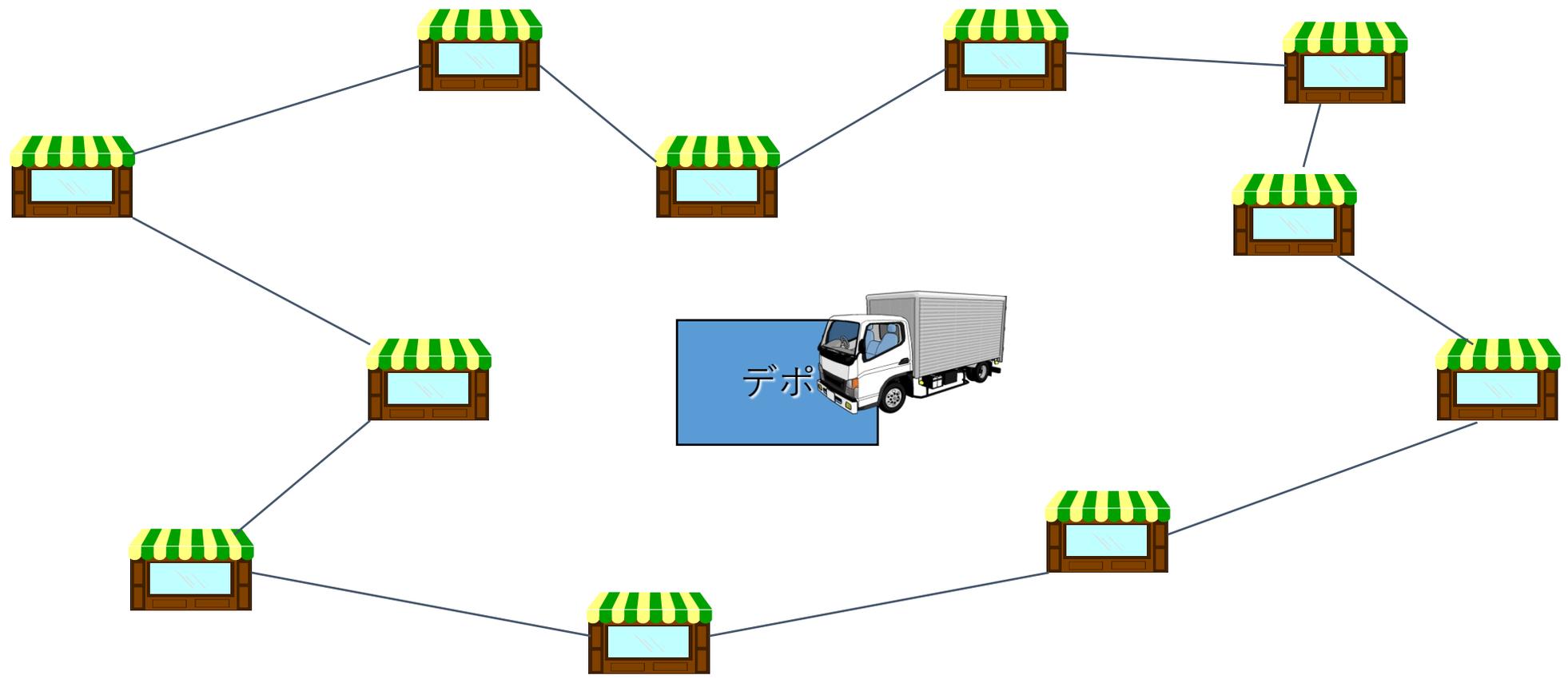
事前巡回路
(指定避難所+
想定避難場所)

Todo: 実移動
時間で
全避難所間の
TSP+
SFCとの比較

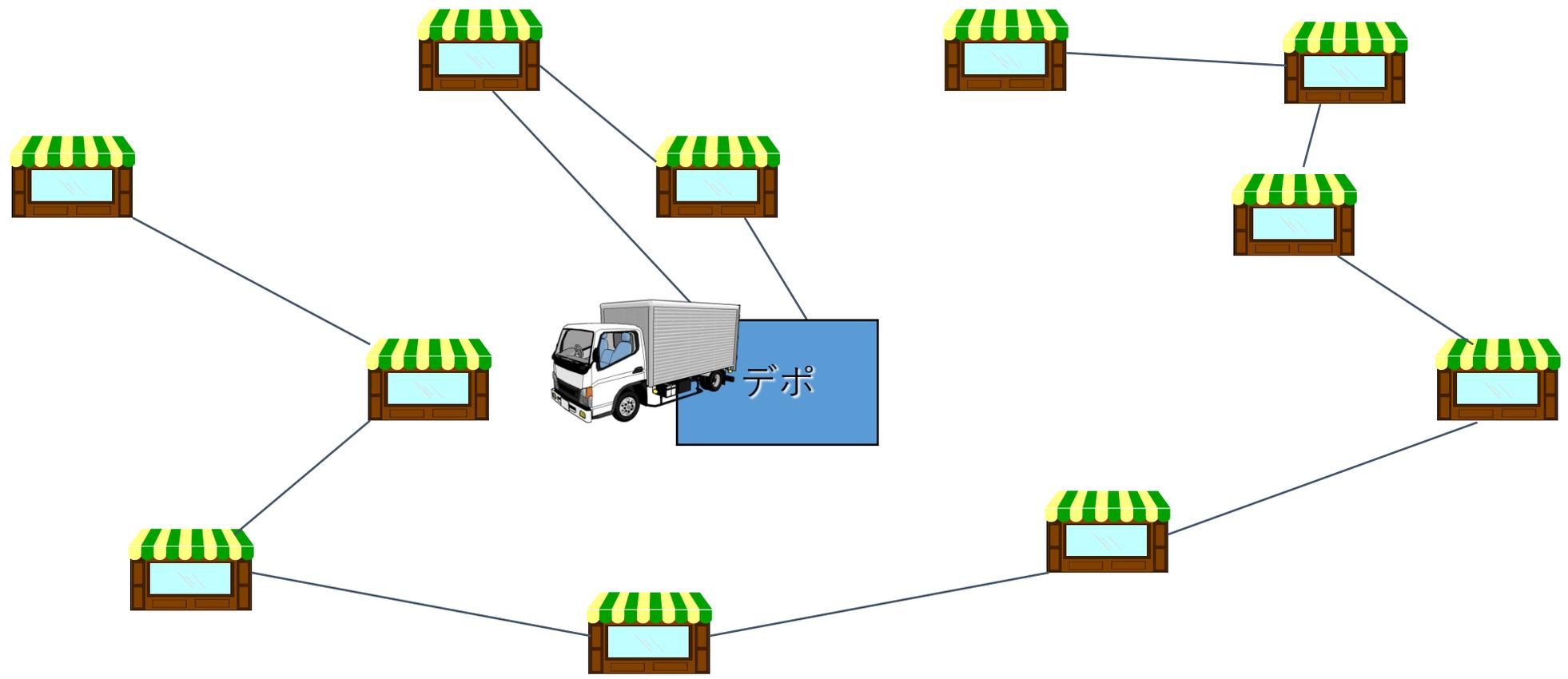
事前巡回路 + ルート先・クラスター後法 1



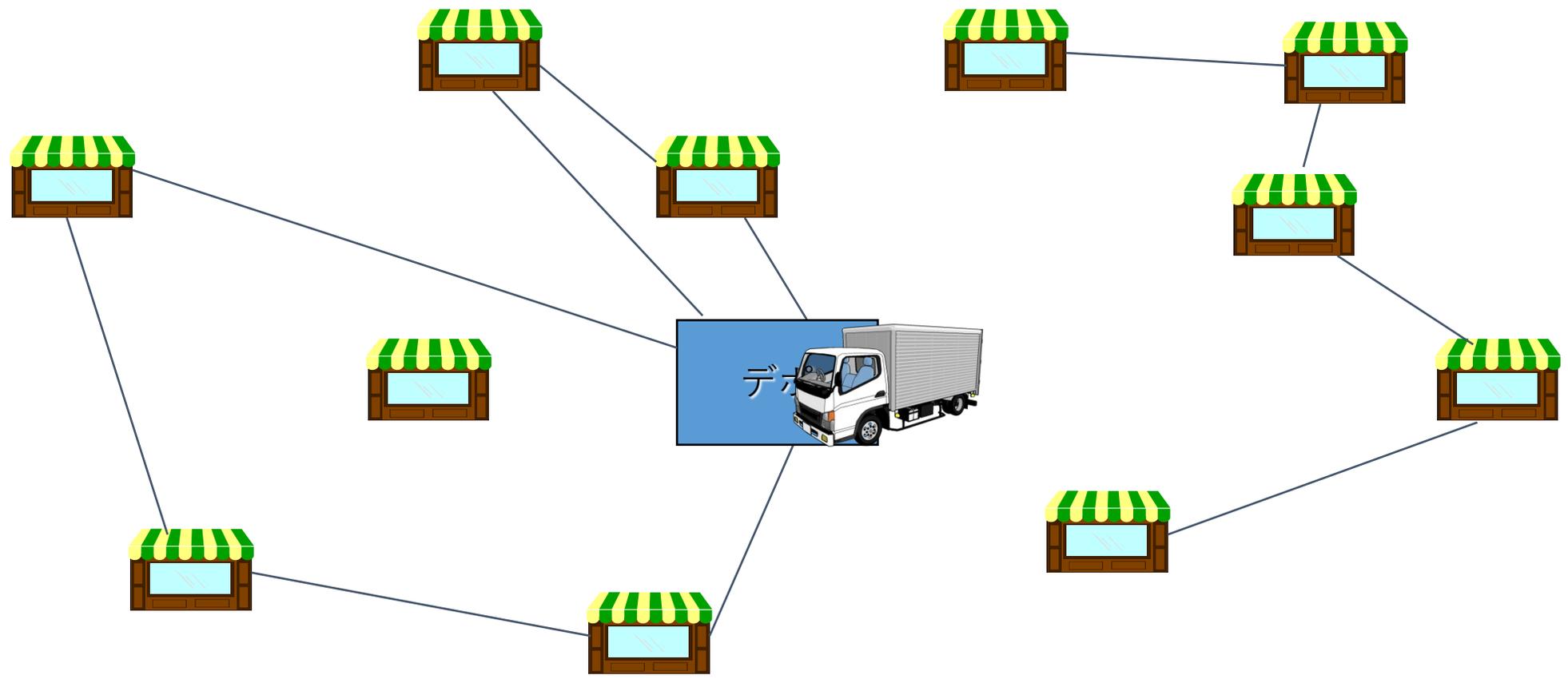
事前巡回路 + ルート先・クラスター後法 2



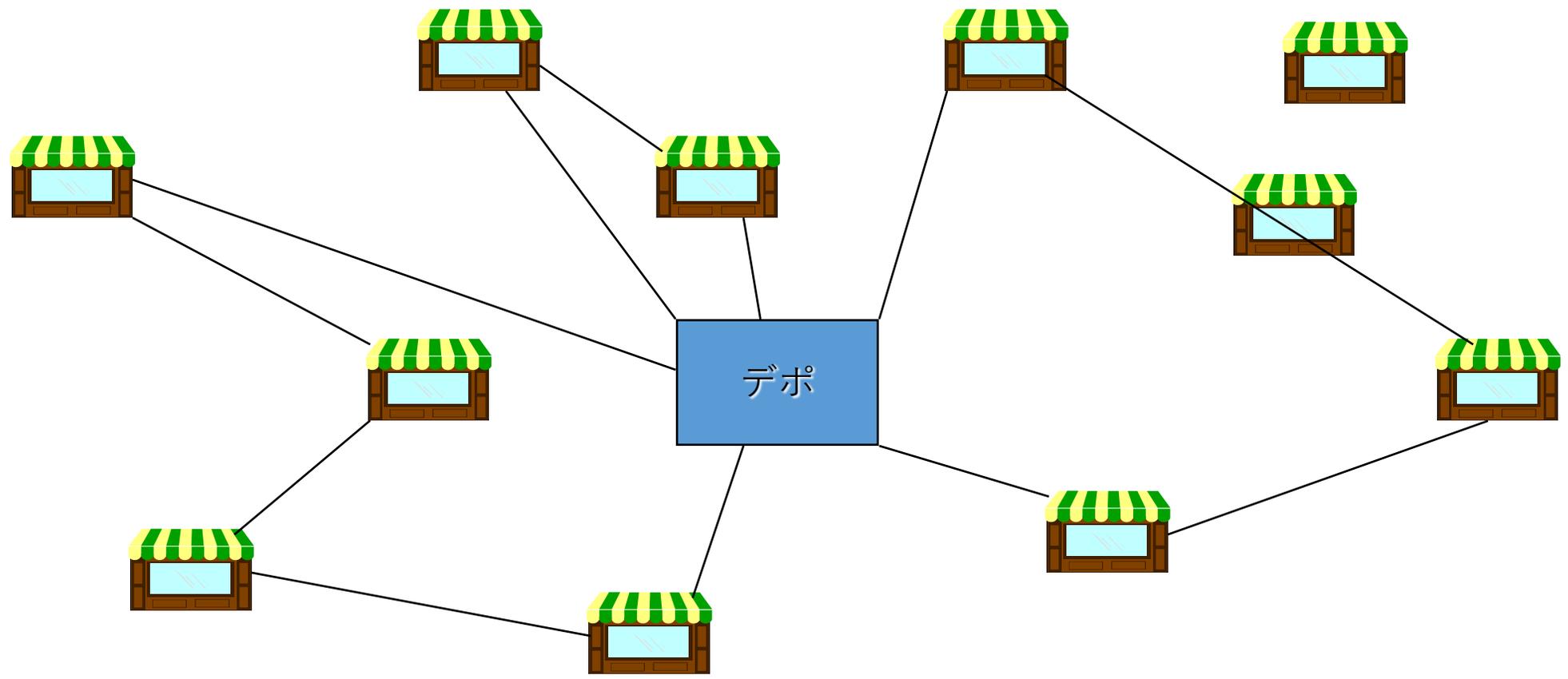
事前巡回路 + ルート先・クラスター後法 3



事前巡回回路 + ルート先・クラスター後法 4

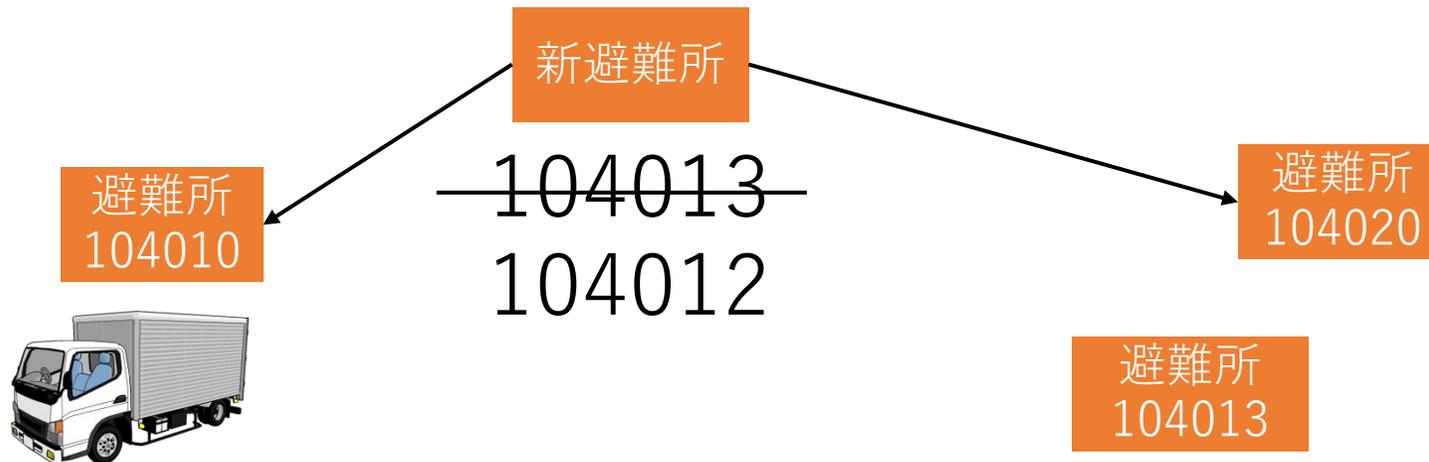


事前巡回回路 + ルート先・クラスター後法 5



新たな避難所の追加

- 実際には，指定避難所以外の地点が臨時避難所になる
- 事前巡回路の番号 Θ を事前に10倍しておく
- 新規避難所に近い避難所を2つ選択
- 番号を補間する（同じ番号があるときには前後にずらす）
- 情報を記入したカードを適切な位置に挿入する



$\Theta = 104010$

- $\Theta = 104012$
- 名称 ○×集会所
- 住所
- 人数 23人
- 規模 46m²

事前巡回路戦略の漸近値解析

点（避難所）の数 n が無限大

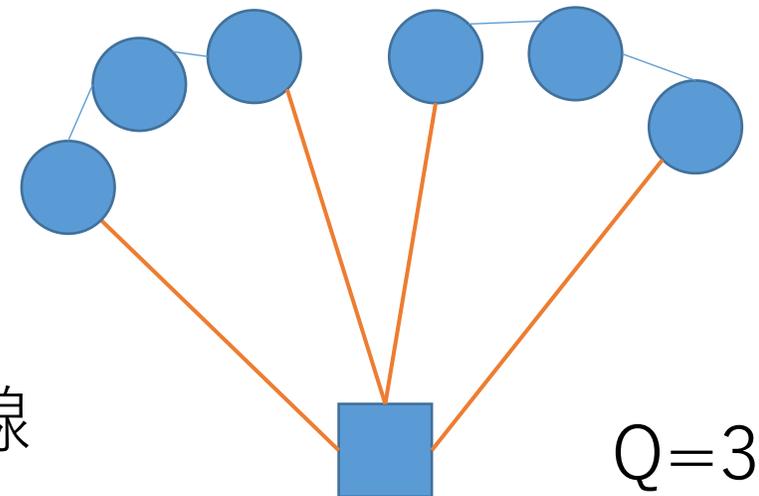
トラックの容量 Q （避難所1件の需要量でスケーリング）が定数

移動費用 $\rightarrow n \times$ デポからの往復費用の期待値/ Q (almost surely)

ということは...

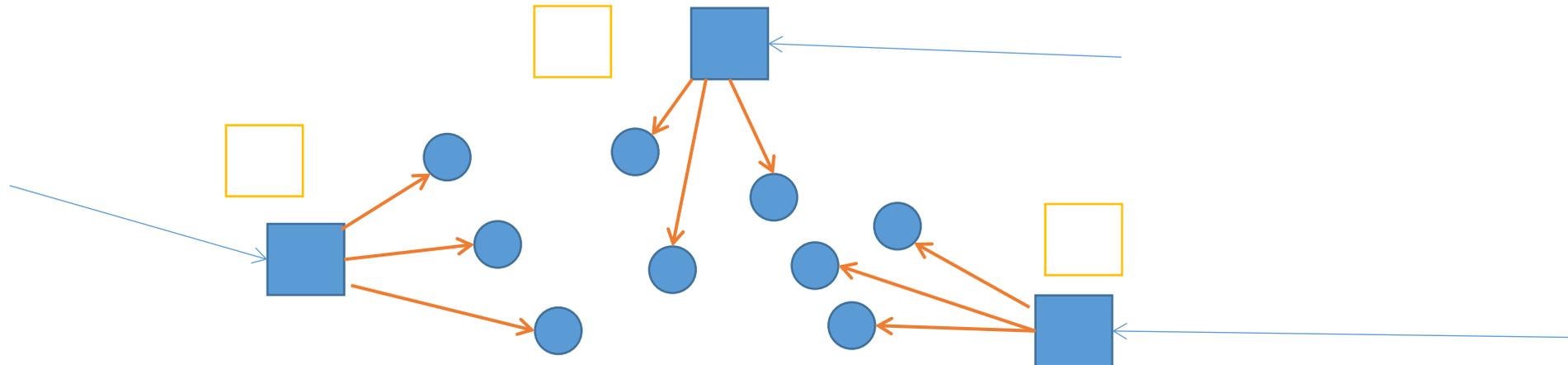
デポからの往復費用で近似可能

$$4 \times \text{青線} + 4 \times \text{赤線} \doteq 6 \times 2 \times \text{赤線} / 3 = 4 \times \text{赤線}$$



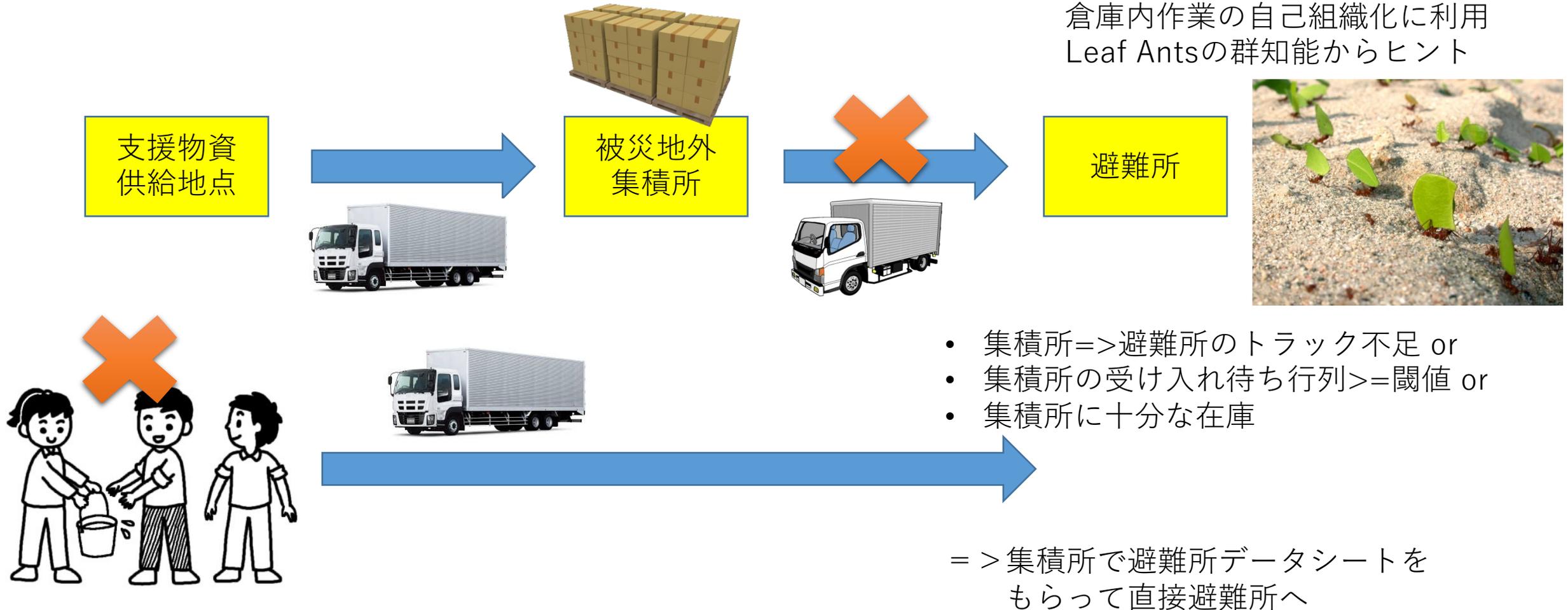
複数デポからの配送

- (漸近値解析から) デポからの往復費用で近似可能
- 外からの輸送 => 集積所の選択 => 避難所への往復輸送
は単純な3段階のロジスティクス・ネットワーク設計モデル
- (被災地外なので) 計算機を用いて最適化し, 集積所に担当避難所を連絡
- 避難所の情報を書いたカードから担当地区を選択して, 配送



バケツリレー方式 (3段階の場合)

Bucket Brigade :
Georgic Tech. のBartholdi らが
倉庫内作業の自己組織化に利用
Leaf Antsの群知能からヒント



バケツリレー方式（4段階の場合）



支援物資
供給地点



被災地外
集積所



被災地外
集積所



避難所

自己組織化
= 自動的に最適な資源配分に収束



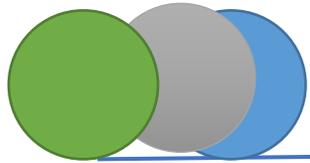
- 集積所に十分な在庫がない
- 上流のトラック不足



- 下流のトラック不足
- 集積所の受け入れ待ち行列 \geq 閾値
- 集積所に十分な在庫

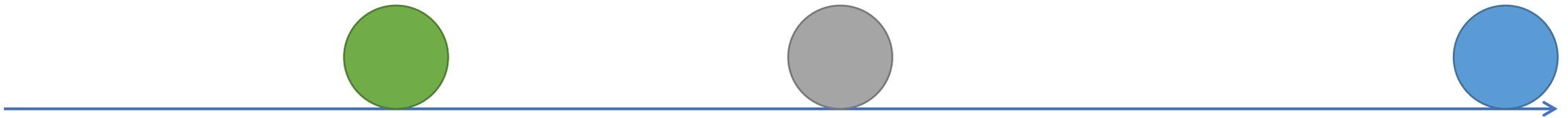


(Original) Bucket Brigade

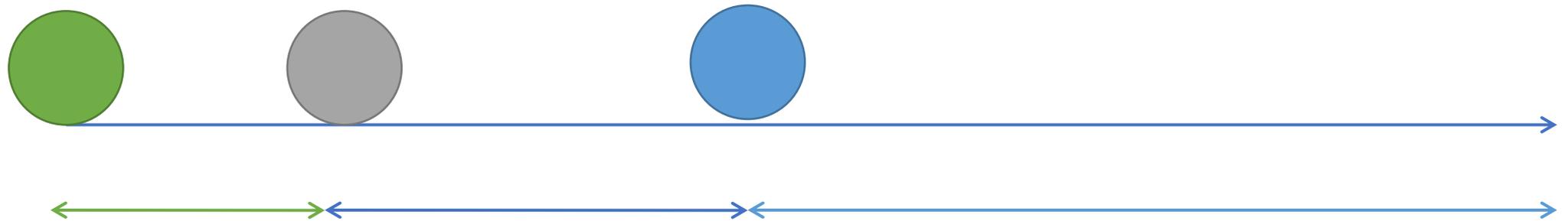


早い順

(Original) Bucket Brigade

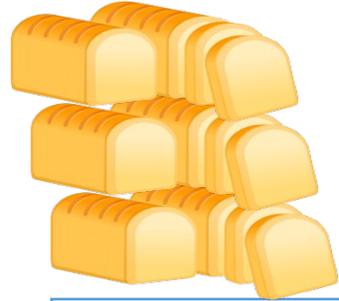


(Original) Bucket Brigade



自己組織化によるテリトリー分け

支援物資供給 従来法 (1)



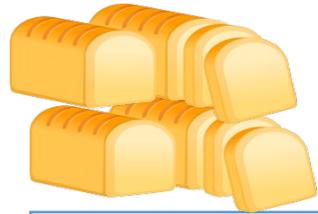
集積所

集積所

避難所



支援物資供給 従来法 (2)



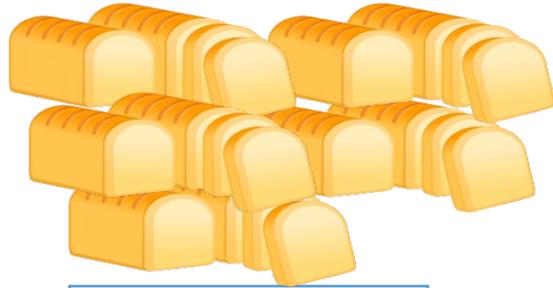
集積所

集積所

避難所



支援物資供給 従来法 (2)



集積所

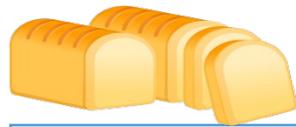
集積所

避難所



支援物資供給

Bucket Brigade (1)



集積所



集積所



避難所



支援物資供給 Bucket Brigade (2)



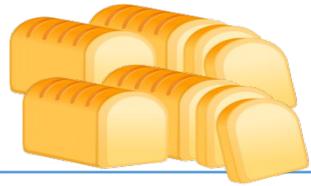
集積所

集積所

避難所

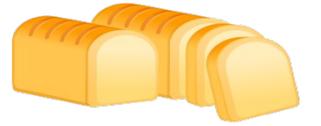


支援物資供給 Bucket Brigade (2)

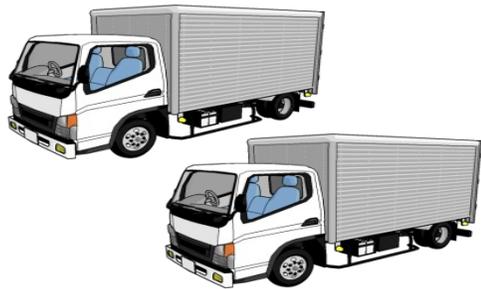


集積所

集積所



避難所



課題

- 避難所の役割別の正確な収容人数（種別，昼夜別）；現在は数あわせのため公園に数千人収容とか；避難所指定されていない候補地点も
- 宅配便のセンターのデータ
- 宅配業者の協力
- センターからの事前巡回路の計算
- 色別パレットによるカンバン方式の実証実験
- バケツリレー方式の実証実験

他の課題

- 災害管理（最適化）の研究がカトリーナの後で出てきている
例：<http://pascalvanhentenryck.engine.umich.edu/>
- 避難・救助計画（動的フロー問題）
- 備蓄在庫の最適配置（在庫配置問題）
- 電力システムの早期復旧（修理スケジューリング問題）
=> 電力会社との共同研究
- デブリの最適処理（ネットワーク設計問題）