
Intermodal hub-and-spoke network design Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers

Qiang Meng, Xinchang Wang

Transportation Research Part B, Vol.45, pp. 724-742, 2011

2011年10月16日(日)

秋期集中論文ゼミ1日目#4

浦田 淳司

0. 論文全体構成

1. Introduction

1.1 Previous related studies

1.2 Contributions and objectives

2. Network representation

2.1 Physical network

2.2 Operational network

3. Problem statement

3.1 Decision variables

3.2 Intermodal route choice model for intermodal operators

3.3 IHSND problem

4. Model formulation

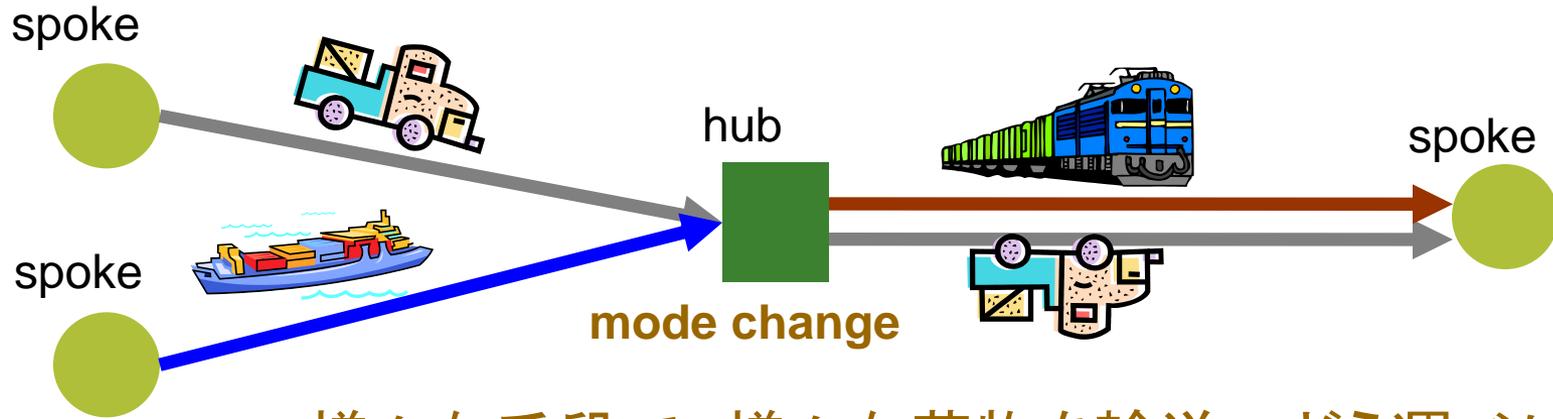
5. Solution algorithm

6. Numerical examples

7. Conclusions

1. Introduction

■ Intermodal freight transportationとは



様々な手段で、様々な荷物を輸送⇒どう運べばよいか

■ Stakeholders

- ・Carriers: 荷物輸送者(例 鉄道貨物会社, 船会社, トラック業者)
- ・Hub operators: 荷物積替え業者(例 港湾会社)
- ・Intermodal operators: 荷物配送請負業者(例 日本郵船, 荷物配送仲介業者)
- ・Network planner: 輸送ネットワークを計画・形成(例 政府機関, 国際組織, 大手民間)

└─▶ 限られた予算の中での輸送コストを最小化できるネットワークの形成
(Intermodal Hub-and-Spoke Network Design : IHSND)

1.2 Contributions and objectives

▼IHSNDの特徴

- Intermodalを考えるため、ネットワーク構造が複雑化
- Intermodalを考えるため、手段ごとのコスト関数が必要
- 積替えコスト・地点も含めた検討が必要
- Network designは複数種類のステークホルダー

▼2種類のネットワークを設定

- 物理ネットワーク: Network plannerがデザイン可能なHub, Spoke, Linkのネットワーク
- 配送ネットワーク: Intermodal operatorが選択する交通手段を含めたネットワーク

▼輸送に関するコスト関数を設定

- 規模のメリット, 規模のデメリットを反映したコスト関数を設定(輸送費用と混雑化費用)
- 全体コスト最小化のため, MPEC問題(均衡制約つき数理最適化問題)として設定

▼遺伝的アルゴリズムにより解く

- MPEC問題を解くために, 遺伝的アルゴリズム(Hybrid genetic algorithm)を用いる
- EEA(exhaustive enumeration algorithm)とHGAの計算結果・量の比較を実施

2. Network representation

2.1 Physical network

■ ノード関連

N_0 : spoke node

N_1 : hub node

N_2 : new hub node

$H = N_1 \cup N_2$

$N = N_0 \cup H$

■ 輸送関連

M : mode

P : container

U : carrier

■ リンク関連

A_0 : spoke node同士をつなぐリンク

A_1 : hub nodeのリンク

A_2 : 追加リンク

$A = A_0 \cup A_1 \cup A_2$

$a = \begin{pmatrix} \tilde{h}_a & \tilde{t}_a & m_a \end{pmatrix}$
↑ ↑ ↙
始点 終点 mode

Γ_a : a の交通容量

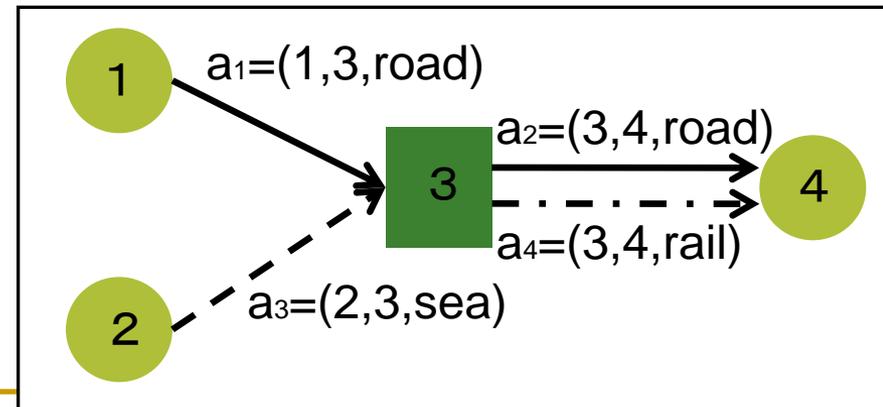
■ 積替え関連

$b \in B_h$: transshipment line

$B_h = B_h^1 \cup B_h^2$

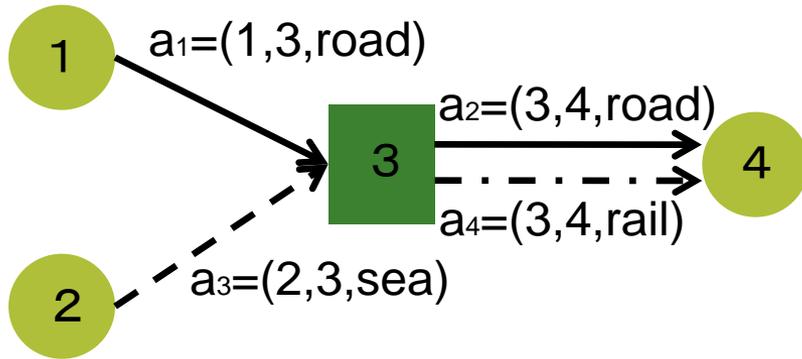
$b = (m_1, m_2)$ m_1 から m_2 への積替え

Γ_b : b の積替え容量



2.2 Operational network

物理ネットワーク: $g = (N, A)$



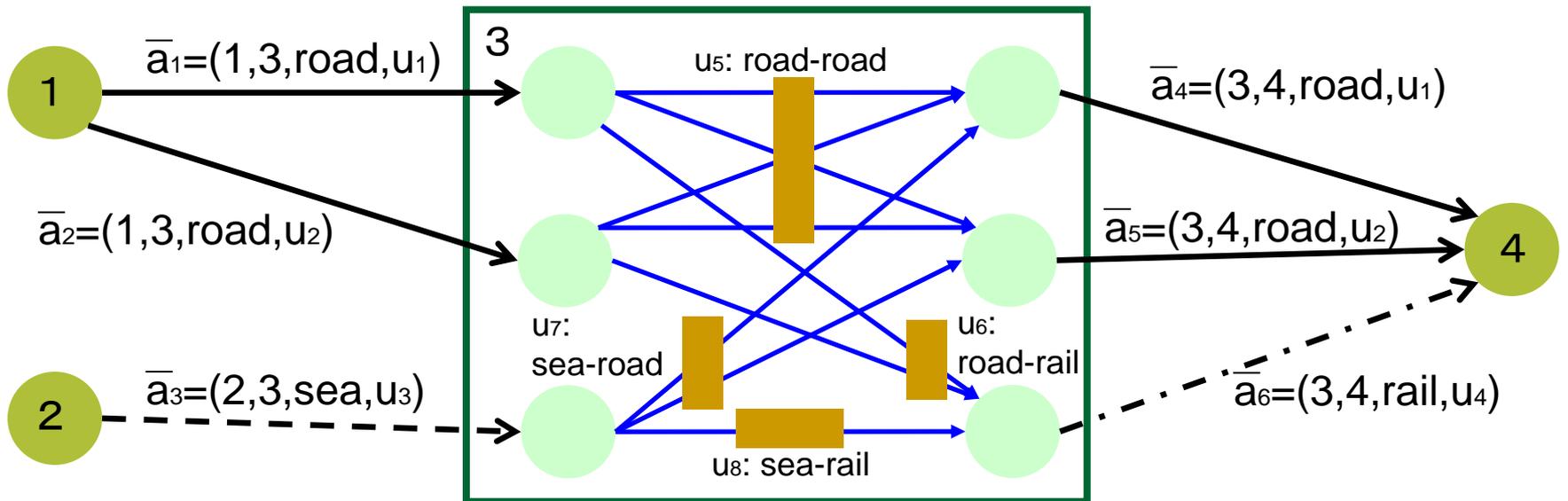
⇒ 配送ネットワーク: $G = (N, A, T)$

$A \subseteq A \times U$ ※キャリアーによって区別

$T \subseteq A \times A$ ※積替えを明示

$\bar{a} = \left(\tilde{h}_{\bar{a}}, \tilde{t}_{\bar{a}}, m_{\bar{a}}, u_{\bar{a}} \right)$ ※キャリアーも追加

Γ_a^p : a のコンテナ p の輸送容量



3. Problem statement

3.1 Decision variables

■ IHSND問題の仮定

- i) spoke nodeでは, 積替えはできない
- ii) spoke node間に新しいリンクはできない

■ plannerの戦略

	戦略	費用	容量
i) 既存リンク(A_1)の容量の増加	$x_a = 1 (\forall a \in A_1)$	$\text{cost } B_a$	$\Gamma_a \rightarrow \Theta_a$
ii) 新規リンク(A_2)の作成	$x_{\hat{a}} = 1 (\forall \hat{a} \in A_2)$	$\text{cost } B_{\hat{a}}$	$\Theta_{\hat{a}}$
iii) 積替え容量(B_1)の増加	$y_b = 1 (\forall b \in B_1)$	$\text{cost } F_b$	$\Gamma_b \rightarrow \Theta_b$
iv) 新規積替えline(B_2)の作成	$y_{\hat{b}} = 1 (\forall \hat{b} \in B_2)$	$\text{cost } F_{\hat{b}}$	$\Theta_{\hat{b}}$
v) 新規ハブノード(N_2)の作成	$z_h = 1 (\forall h \in N_2)$		$(ii + iv)$

solution $\mathbf{s}=(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ に対して, intermodal operatorが荷物経路選択を実施

3.2 Intermodal route choice model for intermodal operators (1/2)

■ ネットワーク配分のコスト

- ネットワークsに対して、最適なネットワーク配分を指示する
- リンクでの配送, ハブでの積替えのコストとして、次の二つを考慮
 - 貨物運賃r
 - 輸送に関する時間価値 ϕ (容量と混雑の関係を考慮)
- 混雑は、キャリアーやコンテナによらず、物理ネットワークのリンクから算出

▼ 荷物流(交通流)v $\vec{v} = (v_a^p, \bar{a} \in A; v_l^p, \bar{l} \in T, p \in P)$ (12)

▼ 配送時間t $t_a^p(\vec{v}, \vec{s}), t_l^p(\vec{v}, \vec{s})$

▼ 総コスト $g_a^p(\vec{v}, \vec{s}) = r_a^p + \phi_a^p t_a^p(\vec{v}, \vec{s})$ (13)

$$g_l^p(\vec{v}, \vec{s}) = r_l^p + \phi_l^p t_l^p(\vec{v}, \vec{s}) \quad (14)$$

3.2 Intermodal route choice model (2/2)

■ 配送時間の算出(BPR関数を援用)

①リンク配送時間 t_a

$$t_a^p(\vec{v}, \vec{s}) = t_a^{p0} + \alpha_a^p t_a^{p0} \left(\frac{\kappa_a \beta_a^p v_a^p + k_a^p (w_a - \kappa_a \beta_a^p v_a^p)}{\Gamma_a (1 - x_a) + \Theta_a x_a} \right)^{\omega_a^p} \quad (15)$$

$$w_a = \kappa_a \sum_{\bar{a} \in A_a} \sum_{p \in P} \beta_a^p v_{\bar{a}}^p / \eta_a \quad (16)$$

β_a^p : コンテナ p 車を標準コンテナ車相当に変換
 κ_a : 標準コンテナ車から標準車相当に変換
 k_a^p : 多種のコンテナによる交通流内での相互作用
 η_a : コンテナ車の標準車換算台数がリンク a で占

②積替え時間 t_i

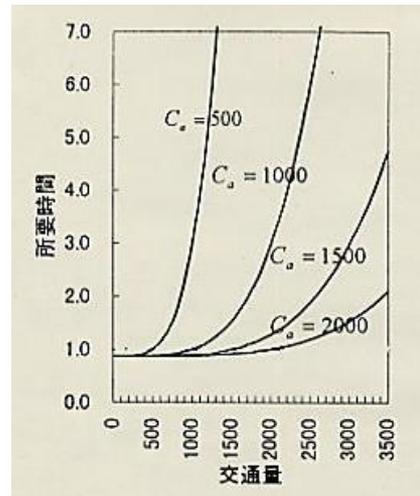
$$t_i^p(\vec{v}, \vec{s}) = t_i^{p0} + \alpha_i^p t_i^{p0} \left(\frac{\beta_b^p}{\Gamma_b} \right)$$

$$w_b = \sum_{\bar{l} \in T_h^b} \sum_{p \in P} \beta_b^p v_{\bar{l}}^p$$

■ 等価最適化問題 (UE principle)

$$\sum_{\bar{a} \in A} g_{\bar{a}}(\vec{v}, \vec{s})(\hat{v}_{\bar{a}} - v_{\bar{a}}) + \sum_{\bar{l} \in T} g_{\bar{l}}$$

cf. BPR関数



$$t_a(x_a) = t_{a,0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\}$$

出典: 交通ネットワークの均衡分析

3.3 IHSND problem

■コスト関数の設定 $c_{\bar{a}}(\vec{v}_{\bar{a}})$, $c_{\bar{b}}(\vec{v}_{\bar{b}})$

- i) 各コンテナの輸送に対して設定
- ii) 荷物量に対して増加
- iii) 荷物量0でも算出可能(対数利用に注意)
- iv) U字型の輸送コスト関数(規模のメリット, デメリット)

$$c_{\bar{a}}(\vec{v}_{\bar{a}}) = \exp \left(\begin{aligned} & \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i ((v_{\bar{a}}^i)^\theta - 1) / \theta + \sum_{i=1}^{n_Q} \beta_i \ln \pi_i + \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} \delta_{ij} ((v_{\bar{a}}^i)^\theta - 1)((v_{\bar{a}}^j)^\theta - 1) / (2\theta^2) \\ & + \sum_{i=1}^{n_Q} \sum_{j=1}^{n_Q} \gamma_{ij} \ln \pi_i \ln \pi_j / 2 + \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_Q} \rho_{ij} \ln \pi_j ((v_{\bar{a}}^i)^\theta - 1) / \theta \end{aligned} \right) \quad (29)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \beta_i, \delta_{ij}, \gamma_{ij}, \rho_{ij}, \theta$: パラメータ

(Baumol et al., 1988)

※ $c_{\bar{b}}(\vec{v}_{\bar{b}})$ は, $v \rightarrow w, \bar{a} \rightarrow b$ とし, 同様

4. Model formulation (1/2)

▼ 輸送コストを最小化する戦略s

$$\min f(\vec{s}, \vec{v}) = \sum_{a \in (A_0 \cup A_1)} \sum_{\bar{a} \in A_a} c_{\bar{a}}(\vec{v}_{\bar{a}}) + \sum_{a \in A_2} \sum_{\bar{a} \in A_a} x_a c_{\bar{a}}(\vec{v}_{\bar{a}}) + \sum_{b \in B_1} c_b(\vec{v}_b) + \sum_{b \in B_2} y_b c_b(\vec{v}_b) \quad (34)$$

▼ 制約条件

$$\sum_{a \in A} B_a x_a + \sum_{b \in B} F_b y_b \leq B \quad (35) \quad \text{[予算制約]}$$

$$z_h \leq \sum_{b \in B_h} y_b \leq M z_h \quad \text{for } \forall h \in N_2 \quad (36,37) \quad \text{[新規ハブ内の積替えline数の制約]}$$

$$x_a \leq z_{\bar{h}_a} + z_{\bar{t}_a}, \quad \text{for } \forall a \in A_2 \quad (38) \quad \text{[新規リンク数の制約]}$$

$$\sum_{r \in R_{od}^p} \left(\prod_{a \in A_r \cap A_2} x_a \cdot \prod_{b \in B_r \cap B_2} y_b \right) \geq 1, \quad \text{for } \forall o \in O, d \in D, p \in P \quad (39)$$

[各ODペアに1つ以上のintermodalルートの存在]

4. Model formulation (2/2)

▼ 制約条件

$$\kappa_a \sum_{\bar{a} \in A_a} \sum_{p \in P} \beta_a^p v_{\bar{a}}^p / \eta_a \leq (1 - x_a) \Gamma_a + x_a \Theta_a, \quad \forall a \in A \quad (40)$$

$$\sum_{\bar{l} \in T_h^b} \sum_{p \in P} \beta_b^p v_{\bar{l}}^p \leq (1 - y_b) \Gamma_b + y_b \Theta_b, \quad \forall b \in B_h, h \in H \quad (41)$$

$$v_{\bar{a}}^p \leq \Gamma_{\bar{a}}, \quad \forall \bar{a} \in A, p \in P \quad (42)$$

$$\sum_{\bar{a} \in A} g_{\bar{a}}(\vec{v}, \vec{s})(\hat{v}_{\bar{a}} - v_{\bar{a}}) + \sum_{\bar{l} \in T} g_{\bar{l}}(\vec{v}, \vec{s})(\hat{v}_{\bar{l}} - v_{\bar{l}}) \geq 0, \quad \forall \hat{v} \in \Omega(s) \quad (43)$$

〔容量制約〕

▼ (34)をcarrier, hub operatorの利益最大化と読みかえ

$$\begin{aligned} \max f(\vec{s}, \vec{v}) = & \sum_{a \in (A_0 \cup A_1)} \sum_{\bar{a} \in A_a} \left[\sum_{p \in P} r_{\bar{a}}^p v_{\bar{a}}^p - c_{\bar{a}}(\vec{v}_{\bar{a}}) \right] + \sum_{a \in A_2} \sum_{\bar{a} \in A_a} x_a \left[\sum_{p \in P} r_{\bar{a}}^p v_{\bar{a}}^p - c_{\bar{a}}(\vec{v}_{\bar{a}}) \right] \\ & + \sum_{h \in H} \sum_{b \in B_h^1} \left[\sum_{\bar{l} \in T_h^b} \sum_{p \in P} r_{\bar{l}}^p v_{\bar{l}}^p - c_b(\vec{v}_b) \right] + \sum_{h \in H} \sum_{b \in B_h^2} y_b \left[\sum_{\bar{l} \in T_h^b} \sum_{p \in P} r_{\bar{l}}^p v_{\bar{l}}^p - c_b(\vec{v}_b) \right] \quad (44) \end{aligned}$$

5. Solution algorithm (1/2)

■ 遺伝的アルゴリズム (Hybrid GA) により解を求める

▼ (40)-(42)式の容量制約を(34)式に付加 (ペナルティ関数 r を利用)

$$h(s, v) = f(s, v) + \sum_{\bar{a} \in A} \sum_{p \in P} r_{\bar{a}} (\max(v_{\bar{a}}^p - \Gamma_{\bar{a}}^p, 0))^2 + \sum_{a \in A} r_a (\max(w_a - (1 - x_a)\Gamma_a - x_a\Theta_a, 0))^2 \\ + \sum_{b \in B} r_b (\max(w_b - (1 - y_b)\Gamma_b - y_b\Theta_b, 0))^2 \quad (45)$$

▼ Step0. Initialization(母集団の初期化)

(35)~(39)式を満たす戦略 s の組 $S^n = \{s_i^n | i = 1, 2, \dots, \lambda\}$ をランダムに設定

▼ Step1. Crossover(交叉) & mutation(突然変異)

交叉確率 p_c と突然変異確率 p_m に従い, 操作を実施 ($S^n \rightarrow \tilde{S}^n$)

5. Solution algorithm (2/2)

▼ Step2. Fitness evaluation(適応度評価)

Step2.1 Network flow calculation (交通量の算出)

(43)式を用いて, s_i^n に対応する v_i^n を算出

Step2.2 Fitness normalization (適応度算出と正規化)

(45)式の値を算出し, (46)式により適応度を算出

$$\tilde{h}_i^n = \left[h_{\max}^n - h_i^n(s_i^n, v_i^n) + \gamma \right] / \left[h_{\max}^n - h_{\min}^n + \gamma \right], \quad i = 1, 2, \dots, \lambda, \quad \gamma \in (0, 1) \quad (46)$$

▼ Step3. Breed a new population (新規グループの作成)

2者トーナメント方式により, 新規グループ S^{n+1} を作成



任意の二者ペアリングし, 比較. 適応度の高い固体を残す



▼ Step4. Stopping test (終了判定)

$h_{\min}^{n+1} - h_{\min}^n < \varepsilon_1$ を満たしたとき, 探索終了

6. Numerical examples

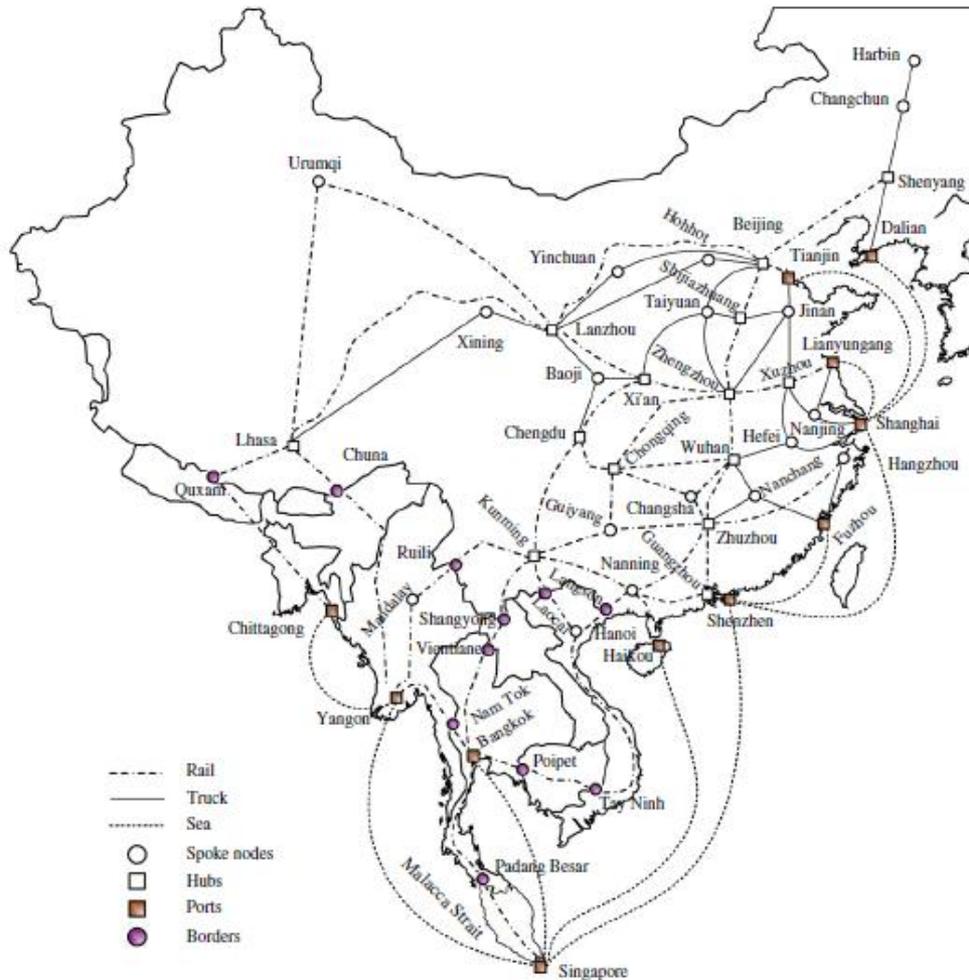


Table 3
Network design projects to be planned in comparison analysis.

Actions	Links or location	Optimal solution	
		HGA	EEA
Hub location	Kunming	1	1
Hub location	Lhasa	1	1
Transshipment line establishment	{rail-rail} at Kunming	1	1
Transshipment line establishment	{rail-truck} at Lhasa	1	0
Transshipment line establishment	{rail-rail} at Lhasa	1	1
Transshipment line establishment	{truck-rail} at Lhasa	1	1
Rail link establishment	Urumqi → Lhasa	1	1
Rail link establishment	Ruili → Kunming	0	1
Rail link establishment	Nanning → Langson	1	0
Rail link establishment	Kunming → Shangyong	1	0
Rail link establishment	Kunming → Laocai	1	1
Rail link establishment	Lhasa → Urumqi	0	1
Rail link establishment	Kunming → Ruili	0	1
Rail link establishment	Langson → Nanning	0	0
Rail link establishment	Shangyong → Kunming	0	0
Rail link establishment	Laocai → Kunming	1	1

Table 4
Comparison of the two algorithms.

	HGA	EEA
CPU time	236.64 h	1084.8 h
Min. objective value	1107,468,713	1106,710,821
Max. objective value	1107,468,713	1575,785,221

おまけ：社会ネットワーク？

Intermodal→リンクの非等質性

ハブ→組織

積替え→組織内の情報交換，翻訳

コスト意識(手間，緊急性)，方向性(階層性)をどう考えるか。

- ・情報伝達系(伝達コスト，伝達方向性)

- ・関係性(維持コスト-intermodalは違う種類の関係？)

(hub operatorがハブ・ブリッジ？ 増強することでどうなるか)

