

ヒューリスティクスを用いたベトナムにおけるマルチモーダル輸送の導入に関する基礎的研究*

A Fundamental Study on the Introduction of Multi-Modal in Vietnam by using heuristics*

一寸木俊**・國府方久史***・松本修****・川嶋弘尚*****

By Shun CHOKKI**・Hisafumi KOKUBUGATA***・Syuichi MATSUMOTO****・Hironao KAWASHIMA*****

1. はじめに

ベトナムでは近年、政府主導による規制緩和策などにより、急速に経済発展を進めてきた。それに伴い、国内の物流も発展し、地域間輸送量は増加を続けてきた。

その一方で、増大した物流の円滑な運用を支えるべきインフラの現状を見ると、その多くの部分を道路輸送に依存しており、また各交通インフラとも経済発展に伴う大規模な貨物輸送に対応する設備は不十分である。鉄道輸送では多くの車両が1960～70年代に製造されたもので設備の老朽化が進行し、大規模な輸送に対応した鉄道設備は建設されていない。また、水上輸送も大規模輸送に対応可能な港湾設備は未整備である。今後一層の貨物輸送の増加により、道路混雑による経済的損失や環境への悪影響が生じる可能性が懸念される。これを未然に防止する手段として、道路、鉄道、水運等の複数交通手段を機動的に活用するマルチモーダル輸送の推進と、それに向けたインフラの整備が必要である。

また、物流ネットワークにおける効率的な輸送に関して、最短経路探索問題の手法を用いることが期待される。しかし、従来これらの問題は多くが単一輸送手段のみを想定し、複数輸送手段の併用を考慮したマルチモーダル輸送の問題については十分に考慮されてこなかった。本稿では、ベトナムにおけるマルチモーダル輸送を対象にネットワークを最短経路探索問題としてモデル化し、その計算機実験の結果について報告を行う。

*キーワード：マルチモーダル、配車配送法、ベトナム、シミュレーテッドアニーリング

**非会員、工学士、慶應義塾大学理工学研究科

***非会員、工修、慶應義塾女子高等学校

(東京都港区三田2-17-23、

TEL 03-5427-1674、FAX 03-5427-1675)

****正員、博(工)、慶應義塾大学先端研究センター

(横浜市港北区日吉3-14-1、

TEL 045-563-1141、FAX 045-566-1617)

*****正員、工博、慶應義塾大学理工学部

(横浜市港北区日吉3-14-1、

TEL 045-563-1141、FAX 045-566-1617)

2. マルチモーダル輸送への最短経路問題の適用

マルチモーダル輸送の経路最適化における、複数ある巡回先をどのような順番で選択するかという問題は、数学的には組合せ最適化問題に帰着する。特に、巡回する順番を決定する問題は巡回問題(Routing Problem)と呼ばれる。巡回問題は、流通やロジスティクスなどの分野から生じた問題であり、その実際の意義は大いに知られている^{1), 2)}。

最短経路問題(Shortest Path Problem)は、ネットワークの出発地と目的地を結ぶ最短経路を求める問題である。SPPは、制約条件のもと、指定した出発地点から目的地まで輸送する、最小コストのルートを求める問題である。本稿ではこの問題をマクロな物流問題に拡張する為、個別の車両を想定するのではなく、地域間で輸送される種類の物資を出発地点から目的地まで運ぶ仮想的な貨物を想定し、この貨物の輸送コストを最適化するように各地の中継点でモードを選択する問題とした。

SPPには、ダイクストラ法のような効率のよい厳密解法が存在するが、マルチモーダル輸送のSPPはより複雑な問題であるため、貨物が極めて少数でない限り厳密解法で解を求めることは困難であるので、近似解法であるヒューリスティクスを用いて解を求めることにする。

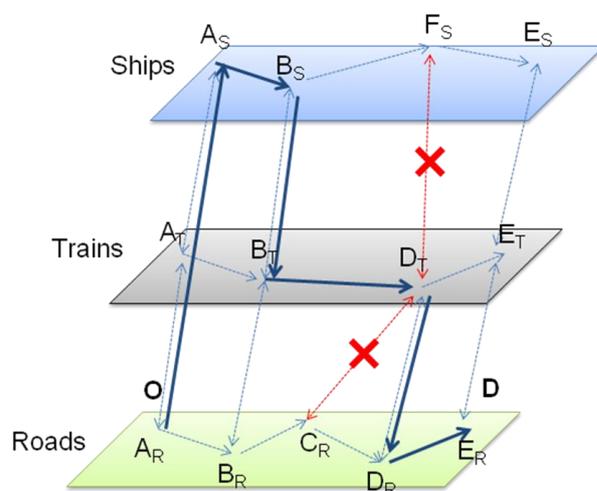


図-1 マルチモーダル最短経路問題のモデル

マルチモーダル輸送を考慮したSPPは、与えられた出発地と目的地のペアを結ぶコスト最小の経路となるように、交通モード・地域を表すノードを選択する問題となる(図1参照)。この問題の目的関数は、(1)式のように書ける。

$$\min c = \sum c_i(p, m) + \sum c_s(m_1, m_2) \quad (1)$$

ここで $c_i(p, m)$ は地域間 p を同一モード m で移動した際に要するコスト、 $c_s(m_1, m_2)$ はある地域内でモード m_1, m_2 の間で遷移のあった場合の乗換コストを表す。この問題は、出発地から目的地までを結ぶ経路を選択した上で、選択した経路の(1)式を最小化する問題として表すことができる。

3. NRPの新たな解法の提案

(1) 本研究で用いるアルゴリズム

本研究では、マルチモーダル輸送にSA法を適用するアルゴリズムを考案し、その性能を検証した。SA法は、熱した固体を徐々に冷却すると、完全格子をもつ構造に再結晶できるという、金属工学における原理を取り入れた確率的探索手法である。SA法では、繰返し計算における現在の解の近傍解のうちの1つをランダムに選んで次の時点の解の候補とするが、評価関数の値を改善する場合だけでなく、評価関数が改悪する場合にも、温度に対応する変数 T の値に従う確率 $\exp(-\Delta E/T)$ で、その解を次の時点の解として許容する。解探索の初期では、温度変数 T の値を大きく設定し、解の改悪を実行する確率を高くして局所最適解に陥らないようにし、徐々に T の値を低くしていった探索の後期には、改悪の確率を減らし大域的な最適解への収束を促す。

本手法では、以下の評価関数によって解を評価して最小化を図る。

$$E(x) = c(x) + \alpha q(x) \quad (2)$$

ここで、 $c(x)$ は解 x の総走行コスト、 $q(x)$ は各種制約違反量の合計、 α は項の重み係数である。コスト項である $c(x)$ は走行距離や走行時間といった最小化の目的である。また、 $c(x)$ 以外のペナルティ項を付加した場合、問題の制約条件を満たさない違反量を測り、これを加算し最小化することで制約条件を満たす最適解を求めようとする。ペナルティ項の和が0でない解は実行不可能解であるが、ペナルティ項の重みが大きければ、 $E(x)$ を最小化することにより、実行可能解を得られる。

本提案手法に適用したSA法のアルゴリズムは、Johns on et al.³⁾によるパラメタ表記(大文字斜体のもの)を用いて、以下のように表示できる。

- 1 初期解 x を生成
- 2 評価関数の値 $E(x)$ を最良値 E^* として記録

- 3 同一温度での平均探索近傍数 N を指定
- 4 温度変数 T を $INITTEMP$ に設定
- 5 試行回数 $trials := 0$,
解変形実施回数 $changes := 0$ に設定
- 6 x の近傍解 x' をランダムに生成し、
 $trials := trials + 1 : \Delta E := E(x') - E(x)$
- 7 $\Delta E < 0$ のときは必ず、そうでないときも T の値に従う確率 $\exp(-\Delta E / T)$ で解変形を実施し、
 $changes := changes + 1, x := x',$
 $E(x) < E^*$ ならば、 $E^* := E(x), x^* := x$
- 8 $trials < SIZEFACTOR \cdot N$ かつ
 $changes < CUTOFF \cdot N$ なら step 6へ
- 9 $T := T \cdot TEMPFACOR$
- 10 $T > INITTEMP / FINDIVISOR$ なら step 5へ
- 11 最良解 x^* の出力

(2) スtringモデルによる解の表現と最適解探索のための解の変形方法

本研究で提案する手法では、Kokubugata et al.⁴⁾によって、積載制約のある複数の車両が倉庫から出発してデマンドのある顧客へ荷物を配達して倉庫に戻る配送計画問題

(VRP)のために考案されたString形式のデータモデル(図2参照)を応用して、マルチモーダル輸送の最短経路問題の解を表すことにする。VRPにおけるStringモデルは、利用者の利用地点を示す記号“a~h”と出発地点・目的地を示す記号“0”から成る各車両のルートを経路に展開することで得られる横一列の一次元配列である。このStringモデルに対して、“0”を他の文字と同等に扱う文字列の変形を行うことで、利用者の車両への割り当て(クラスタリング)と巡回順の決定(ルーティング)を同一の手順内で行うことができる。本節では、マルチモーダル輸送経路最適化問題をStringモデルで表現する際の、削除・挿入、1対1交換に関して説明を行う。

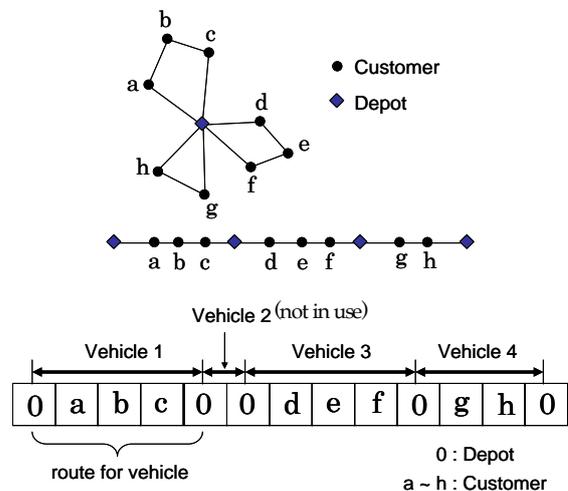


図-2 VRPのためのStringモデル

一般にVRPの解は各車両のルートが車両の出発地かつ最終到着地（以下「デポ」と記す）を中心に結びついた形をしている。利用者の利用地点を示す記号“a～h”とデポを示す記号“0”から成る各車両のルートを紐状に展開し、図2のように横1列の1次元配列で表現したものがストリングモデルである。

また、Kokubugata and Kawashima⁵⁾が指摘するように、ストリングモデルは基本的なVRPだけでなく、車両の回転利用が可能なケース、時間帯制約付きの問題などに対しても応用可能であることが示されており、拡張性、発展性の高い解の表現方法である。ストリングモデルに対して、両端以外の“0”を他の文字と同等に扱う文字列の変形を行うことで、利用者の車両への割り当て（クラスタリング）と巡回順の決定（ルーティング）を同一の手順内で行うことができる。

次に、Kokubugata et al⁵⁾によってVRPのために考案されたストリングモデルを用いて、本研究の対象であるマルチモーダル輸送ネットワークを表現する方法と、その解表現に確率的に適用する変形方法である、削除・挿入と1対1交換について説明を行う。マルチモーダルネットワーク下での最短経路問題はVRPとは異なり、全てのノードを経由する必要はなく、出発地と目的地を結ぶ最短経路となる、交通モード・地域を表すノードを選択する問題となる。この問題をストリングモデルで表現する際には、各交通手段についてその輸送手段を利用可能な全ての地点のノードと、同地点において異なる輸送手段を接続するノードが存在し、輸送手段を変更する際にはそれらが隣接しなければならない。最適解の探索における近傍解の作成（解の変形）手順においては、代表的な近傍解作成の手法でありそれぞれの変形効果が期待される削除・挿入（図2）と1対1交換（図3）の2種類の試行変形方法のうちのどちらか1つを1:1の確率でランダムに適用する。

削除・挿入では、まずストリングモデルの中からデポを示す“0”以外から項目をランダムに選択する（図23: A_T）。そして、その項目を現在の位置から取り除き、ストリングモデル中のランダムに選ばれた箇所へ挿入する（図2: A_RとB_Rの間）。しかし、このままではマルチモーダル輸送SPにおける異なるモードへの乗換は「同地域・異モード間でのノードの接続により行われる」という制約が保証されないため、乗換の起きたモードと同じモードで異なる地域を示すノードか、同地域を示すノードが後ろに接続されなければならない。ここではB_TがA_Tの後ろに挿入されることで実行可能解の条件を満たし、可能な変形が完了する。

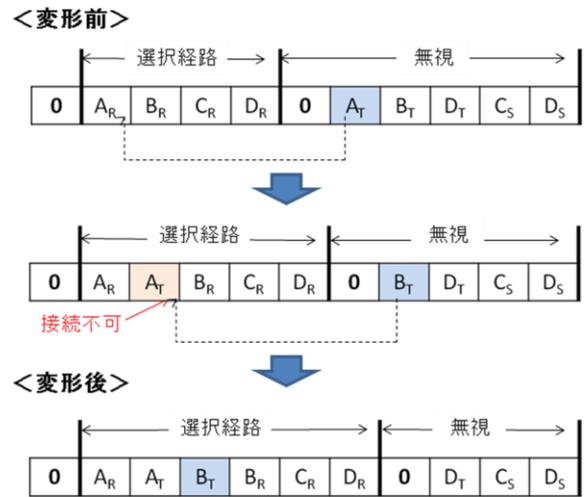


図-3 ストリングモデルと試行変形（削除・挿入）

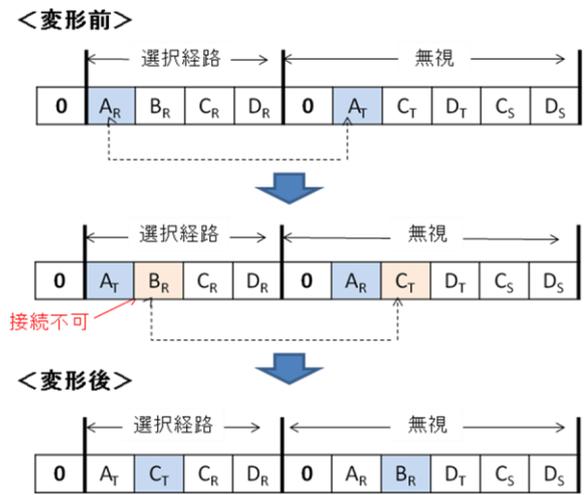


図-4 ストリングモデルと試行変形（1対1交換）

また、1対1交換については、まずストリングモデルの中からデポを示す“0”以外から項目を2つランダムに選択し（図3: A_RとA_T）、その位置を交換する。しかし、このままではモード乗換に関する制約が満たされないため、交換した項目と接続可能なノード（図4: C_TをA_{D_T}とC_{D_R}の間、）を選び、そこへ移動することで制約条件が満たされる。

4. 計算機実験

(1) 問題の概要

本提案手法をベトナムの地域間輸送において適用するため作成した問題の概要を示す。

本問題では、ベトナムを64の地域に分割し、物資の種類別に各地域間の輸送コストを道路・鉄道・内陸水運の3種について算出した⁷⁾。ベトナムの地域間交通輸送網の概要については（図5）の通りである。

(2) 実験結果

本手法を用いたマルチモーダル輸送を考慮したSPPの問題ではベンチマークとする先行研究が少ないため、実地データを用いた単独での検証結果を示す。本研究では、64地域から14地域を抽出し構築した小規模問題と、64地域全てを使用した大規模問題を作成した。貨物の出発地・到着地はHanoi - TPHCM間とし、コメの輸送コストを最小化する問題とした。

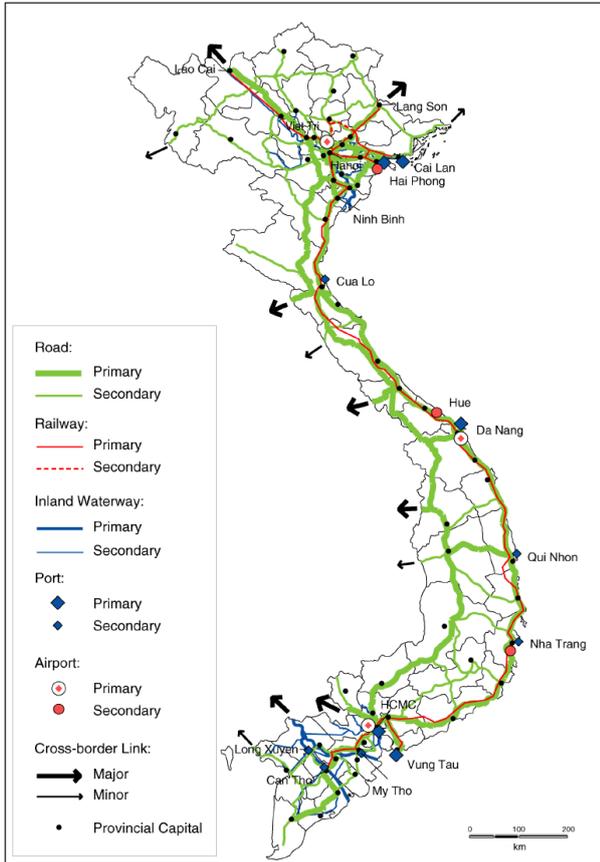


図-5 ベトナムの長距離交通ネットワーク概要⁶⁾

表-1 実験結果概要

	小規模問題	大規模問題
ノード数	36	186
初期解のコスト(ベトナムドン/日)	4601.9	2002.41
計算時間(s)	1	7
最終解のコスト(ベトナムドン/日)	658.07	609.9

実験条件における結果を表-1に示す。提案手法による大規模問題の実験結果からは、初期解の経路にかかわらず、適切なモードを使用した経路が解法により導出された。

5. おわりに

本研究では、マルチモーダルを考慮した最短経路問題を、ベトナムの輸送ネットワークに応用し、ヒューリスティクスによる解法を行った。この手法は、ストリング形式のデータモデルとSA法を用いた、データ構造とアルゴリズムが極めて単純なものである。

本手法を用いて実際の輸送データを元としたモデルにおいて計算機実験を行ったところ、比較的性能の良い解が短時間で導出される良好な結果が得られ、本手法が現実問題に対しても効果的であることが示唆された。

輸送ネットワークのマルチモーダル化は交通計画の分野で今後重要性が更に高まると考えられ、本研究の成果の応用と、これを基にした研究を更に発展させ、進めてゆきたい。

参考文献

- 1) Bodin, L., Golden, B., Classification in Vehicle Routing and Scheduling, Networks, vol.11, no.2, p.97-108, 1981
- 2) Lenstra, J. K., Rinnooy-Kan, A. H. G, Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problem, Networks, vol.11, no.2, p.221-227, 1981
- 3) Johnson, D. S., Aragon, C. R., McGeoch, L. A. and Scheverson, C. : Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation, part II, graph coloring and number partitioning, Operations research, Vol.39, pp. 378-406, 1991.
- 4) Kokubugata, H., Itoyama, H. and Kawashima, H. : Vehicle routing methods for city logistics operations, Preprint for IFAC Symposium on Transportation Systems, Hania, Greece, pp.727-732, 1997.
- 5) Kokubugata, H. and Kawashima, H. : Application of simulated annealing to routing problems in city logistics, in 'Simulated Annealing', Cher Ming Tan (Ed.), I-Tech Education and Publishing, Vienna, pp.131-154, 2008.
- 6) Japan International Cooperation Agency (JICA), Ministry of Transport, Socialist Republic of Vietnam (MOT), Transport Development and Strategy Institute (TDSI), The Study on the National Transport Development Strategy in the Socialist Republic of Vietnam (VITRANSS) Final Report Summary, pp.7, 2000.
- 7) 独立行政法人国際協力機構(JICA)「ベトナム国運輸交通開発戦略調査2 (VITRANSS2)」, 2008.