

ロジスティクス向け 経路探索アルゴリズムの検討

奥出 真理子¹・河村 慶太郎²・園田 信幸³

¹正会員 株式会社日立製作所 日立研究所（〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1）
E-mail:mariko.okude.uh@hitachi.com

²非会員 株式会社日立情報制御ソリューションズ（〒110-0006 東京都台東区秋葉原6番1号）
E-mail:keitaro.kawamura.fu@hitachi-ics.co.jp

³非会員 株式会社日立情報制御ソリューションズ（〒110-0006 東京都台東区秋葉原6番1号）
E-mail:nobuyuki.sonoda.qu@hitachi-ics.co.jp

物流分野では、顧客サービスの向上や配送業務の効率化を背景に、より信頼性の高い輸配送計画が求められている。本研究は、輸配送計画の信頼性向上を目的とし、実際の道路状況を反映した経路の輸配送計画への適用を検討している。道路状況を反映した実用的な経路を生成するには、交通情報をはじめとする様々な条件を加味し、全顧客間の配送経路を瞬時に計算できる高速な経路探索技術が求められる。そこで、本稿では、配送経路を探索する過程で得られた経路情報を再利用し、探索エリアを効率良く絞り込むことで全体の計算量を削減する、高速な経路探索アルゴリズムを提案する。評価用の配送地点データを用いて提案アルゴリズムの計算性能を評価し、その有効性を確認した。

Key Words : route search, dijkstra's algorithm, logistics, vehicle routing problem

1. はじめに

2009年のコペンハーゲン合意において、日本政府は温室効果ガス削減の中期目標を主要国の参加による「意欲的な目標の合意」を前提に「1900年比で2020年までに25%削減を目指す」ことを表明した。日本は環境先進国として各国から注目されることになり、環境に対する意識がより一層高まっている。

物流分野では、改正省エネ法（正式名：エネルギーの使用の合理化に関する法律）が適用され、企業のエネルギー使用量をさらに抑制するために、2010年4月からはその適用範囲が拡大された。これより、エネルギー使用量1,500kl/年以上の企業に対してもエネルギー使用量に関わる定期報告や中長期計画書の提出が義務化され、環境負荷を考慮した輸配送計画（グリーンロジスティクス）へのニーズが急速に高まってきている。物流業者は、顧客数の増大、多頻度小口配送や時間指定配送など市場ニーズが多様化、複雑化している中で、信頼性確保、低コスト化に加えて環境対応を進めていかなければならない。

ITSの普及により、VICSセンターからリアルタイムに提供される渋滞や交通規制などの道路交通情報を利用し、

目的地までの経路の旅行時間の見積もり精度が向上している。主に一般ドライバーを対象に普及が促進されてきたITSを輸配送計画に取り入れることで、多様なニーズへの対応が期待できる。例えば、配送拠点を出発し順次顧客を訪問する配送経路の計算にVICS旅行時間を適用し、時間リスクを考慮した立案方法が検討されている¹⁾。実際の交通状況を考慮することで時間制約に対応した実用的な輸配送計画により、配送サービスの飛躍的な向上が期待できる。交通状況は、生活習慣や事故等の突発的な事象によって変動するため、このような変動を予測した最適な配送経路を速やかに提供することが、輸配送計画の信頼性を維持するために重要である。

輸配送計画では、顧客数に応じて最適経路探索を数多く解く必要があり、顧客規模や配送エリアが大規模化すると、取り扱うデータ量や計算量が増大し、より多くの計算時間を要するという課題がある。そこで、与えられた配送地点の全ての組合わせで多数の経路を短時間で計算できる高速な経路探索アルゴリズムが求められる。高速な経路探索アルゴリズムに関して、最近では大規模なネットワーク問題を対象としたアプローチが多く検討されている²⁾³⁾⁴⁾。従来のアプローチは、カーナビのような

個人の旅行計画をサポートする経路サービスを想定した、一対の出発地から目的地までの最適経路の計算時間を短縮することを目的としている。一方、道路交通需要予測の配分計算や交通流のダイナミックシミュレーションに用いる最短経路探索の効率化を目的に、1対Nの最短経路探索において、経路計算過程で着目ノードとした順番を次の経路探索に利用するようにした、繰り返しGraph Growth方法⁵⁾、同様に1対Nの経路探索において、ネットワークの接続関係とは無関係に、起点からの距離で経路を確定するようにした状態量確定型ダイクストラ法⁶⁾が検討されている。しかしながら、輸配送計画に必要な全ての配送地点間(N対N)の経路計算を効率化し、全配送地点間経路の計算時間を削減するアプローチは現時点で見当たらない。

そこで、物流分野における輸配送作業の効率化および環境負荷低減につながる輸配送計画の実現を目指し、全ての配送地点間の経路情報を高速に計算する、高速な経路探索アルゴリズムを提案する。本研究では、カーナビ向けに実用化されている経路探索技術を輸配送計画に展開することを検討しており、提案アルゴリズムは、カーナビで一般的に利用されているダイクストラ法⁷⁾を、以前の計算で得られた経路情報を再利用するように動作させ、全ての配送地点間の経路計算量を削減して高速化を図る。

本稿では、輸配送計画における経路探索の課題を述べ、全配送経路の計算量を削減し高速化を試みた経路探索アルゴリズムについて述べる。更に、本経路探索アルゴリズムの計算性能を、評価用の配送地点データと道路ネットワークデータを用いて評価した結果について述べる。

2. 輸配送計画における経路探索の課題

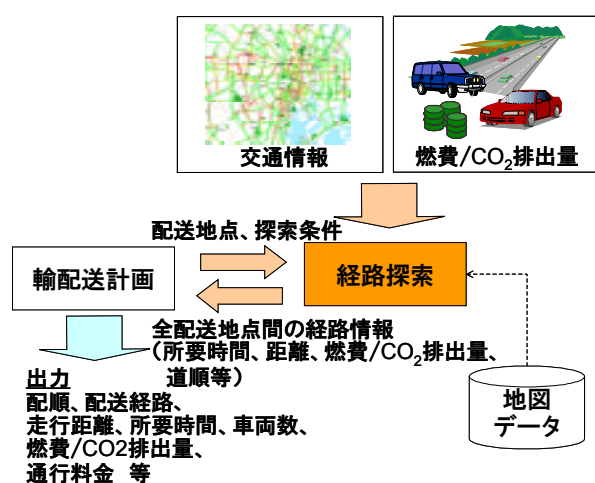


図-1 輸配送計画と経路探索の関係

本研究が想定している輸配送計画と経路探索との関係を図1に示す。経路探索は、配送時の道路状況、配送車両の車種や道路種別等の様々な条件を考慮し、様々なコンテンツ(交通情報、燃料消費量やCO₂排出量等)と地図データ(道路ネットワークデータ)を用いて全配送地点間の最適経路を計算し、得られた経路情報(所要時間、距離、燃料消費量やCO₂排出量等)を輸配送計画に提供する。輸配送計画は、経路探索が出力した全配送地点間の経路情報を用いて、考えられる全ての配送地点の組み合わせと配送順序を検索し、目標とする評価値(配送時間や車両の稼働台数等)が最少となる配送経路を決定する。

カーナビで利用されている経路探索が対象とするのは、一対の地点間の経路である。既存の経路探索を利用して配送地点数 m の全地点間経路を計算する場合、その計算量は $O(m^2 \times 1\text{回の経路計算量})$ となる。ダイクストラ法の計算量は、探索対象となる道路ノード数を n とすると $O(n^2)$ で表されるので、全ての配送地点間の経路計算量は $O(m^2 n^2)$ となり、扱う問題の道路ノード数 n と配送地点数 m が増えると計算量が膨大に膨れ上がり、実時間で解くことが困難になる。

3. 提案アルゴリズム

ダイクストラ法は、始点から終点までの経路計算で、起点から計算対象となった全てのノードへの最小コスト経路を計算する、1対全ノード n 間の経路を探索するアルゴリズムである。この特徴を利用して、以下の3つの改良により、全ての配送地点間の経路計算量を削減する。

(1) 繰り返し回数の削減

図2に従来の経路探索を用いた処理フロー、図3に改良後の処理フローを示す。図2に示すように従来手法では、

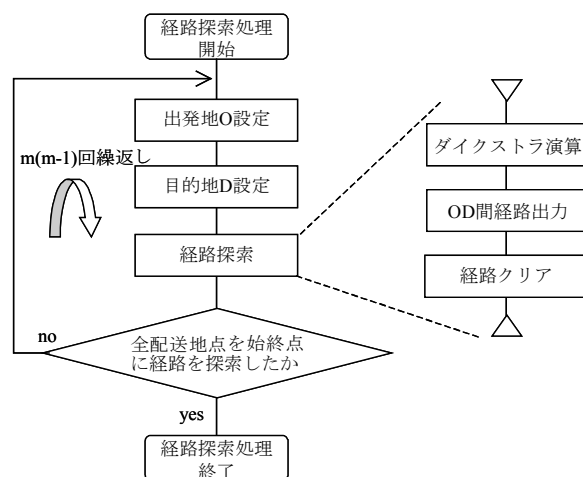


図-2 従来の経路探索処理フロー

配送地点 m から一つの出発地 O と目的地 D のペアを設定し、ダイクストラ法を用いて与えられた OD 間の経路計算を実行する。全ての配送区間の経路が得られるまで、出発地と目的地のペアを更新していき、更新された OD 間の経路計算を $m(m-1)$ 回繰返すので、全体の計算量は $O(m^2n^2)$ であった。一対の出発地 O と目的地 D の経路計算で、出発地 O から目的地 D を含む全てのノード n への経路が得られるにもかかわらず、それらの経路情報が利用されることなく破棄され、同様の経路計算が無駄に繰返されている。そこで、図3に示すように、全ての配送地点が含まれるエリアを探索エリアとして、与えられた出発地から全てのノード n への経路情報を出力することで $m-1$ 回の繰返し処理を不要とし、全体の計算量を $O(mn^2)$ に削減する。

(2) 探索エリアの絞り込み

従来の経路探索は、出発地と目的地が含まれる地図メッシュ内に存在する全てのノードを計算対象とする。その結果、最小コスト経路となる可能性の低いノードが探索エリア内に数多く含まれ、高い計算負荷をもたらす要因となる。そこで、探索エリアを必要最小限に絞り込むことで探索ノード数 n を減らし、全配送経路の計算量を削減する。ダイクストラ法の改良アルゴリズムである A^* アルゴリズム⁸⁾の考え方を応用して探索エリアの絞り込みを行う。 A^* アルゴリズムは、目的地までの到達コストを推定し、推定値が小さいノードを優先し経路を探索するアルゴリズムである。そのメリットは、目的地への到達コストが小さいノードから優先的に探索し速い段階で最適経路が得られる可能性が高いことにある。本アルゴリズムでは、経路計算の速い段階で最適経路が得られるなら、最適経路となり得る可能性の低いエリアでの探索を省略してもよいとし、目的地への推定コストに基づいて探索エリアを限定し経路計算を実行するようにした。推定コストは出発地と目的地を結ぶユークリッド距離を用いる。

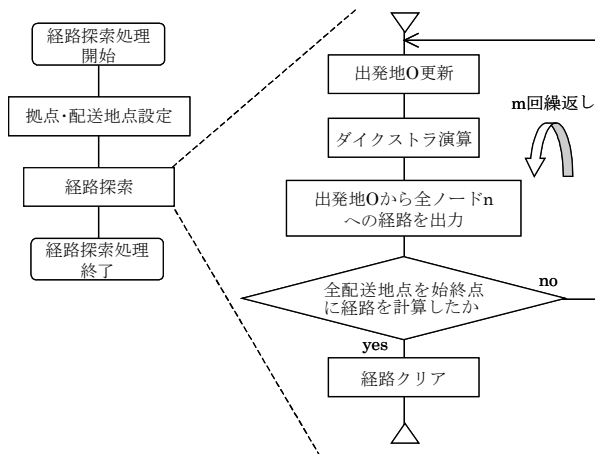


図-3 改良後の経路探索処理フロー

図4に推定コストに基づく探索エリアの概念図を示す。出発地 O_i から目的地 D_j までの経路の上限コストの初期値を $C_{\max}(O_i, D_j)$ をユークリッド距離 R に基づき、式(1a)を用いて設定する。

$$C_{\max}(O_i, D_j) = \alpha \cdot R \quad (1a)$$

α : 係数

式(2a)に示すように、探索ノード w において、ノード w を経由する目的地 D_j までの推定コスト $C_w(O_i, D_j)$ を、探索ノード w への到達コスト u と、ノード w と目的地 D_j を結ぶユークリッド距離 r との和で計算し、得られた推定コスト $C_w(O_i, D_j)$ が式(1a)で設定した上限コスト $C_{\max}(O_i, D_j)$ よりも小さい場合、当該ノードは、経由地候補であり経路計算の対象ノードとなる。到達コストが $C_{\max}(O_i, D_j)$ を越えるノードは計算対象から除外する。このように、探索エリアは $C_{\max}(O_i, D_j)$ に基づき経路計算過程で動的に更新され、探索エリアは目的地に近づくに従い絞り込まれる。

$$C_w(O_i, D_j) = u + r, C_w(O_i, D_j) < C_{\max}(O_i, D_j) \quad (2a)$$

(3) 経路情報を利用した探索エリアの絞り込み

地点間のユークリッド距離による探索エリアの絞り込みは、係数 α の与え方によって狭い範囲に探索エリアが設定され最小コスト経路が存在しなかったり、逆に無駄なエリアを含み経路計算量が十分に削減できない場合がある。そこで、以前に計算した経路計算の結果を利用して推定コスト $C_w(O_i, D_j)$ を設定するよう更に改良を加える。

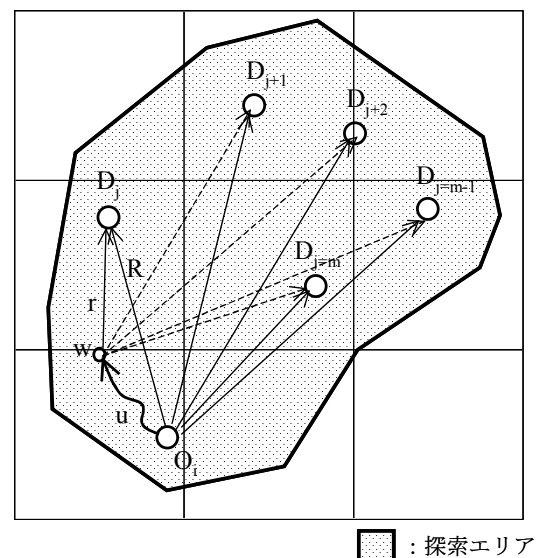


図-4 探索エリアの概念図

図5にアルゴリズムの改良点を示す。ノード w から目的地 D_j までの経路コスト v が以前の経路計算で得られていた場合、式(2a)の代わりに式(3a)を用いて目的地 D_j までの推定コスト $C_w(O_i, D_j)$ を設定し、 $C_w(O_i, D_j)$ が上限値 $C_{\max}(O_i, D_j)$ よりも小さい場合、 $C_w(O_i, D_j)$ で $C_{\max}(O_i, D_j)$ を更新する。本改良方法では、以前の経路計算で得られた経路コストを用いて探索エリアを設定するので、探索エリアには必ず最小コスト経路が存在する。

$$C_w(O_i, D_j) = u + v, C_w(O_i, D_j) < C_{\max}(O_i, D_j) \quad (3a)$$

4. 性能評価

(1) 評価条件

評価データは表1に示す3つのエリアの地点データを用いた。探索地点数は配送地点を道路データにマッチング処理した後の数値である。道路データは財団法人 日本デジタル道路地図協会から提供されているDRM1900版の基本道路データ、探索コストには距離を用いた。

(2) 実行結果

表1に示した評価データを使用し、ダイクストラ法による従来のアルゴリズムと、前節で説明した3つの改良点を段階的に反映した提案アルゴリズムを用いて全地点間の経路計算時間を実測した結果を表2に示す。評価マシンはPentium4 (3.4/3.4GHz)、メモリ3.87G、WindowsXPを使用した。今回は、提案アルゴリズムの性能効果を検証するため、並列処理など実装による高速化は実施しない。

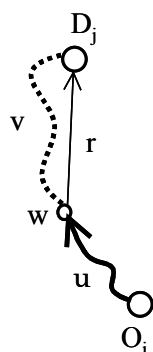


図-5 アルゴリズムの改良点

表-1 評価データ

データ名	探索エリア	探索地点数
area-1	都市近郊 (道路密度高)	415
area-2	郊外 (道路密度中)	780
area-3	郊外 (道路密度少)	214

改良3の方法を含めた提案アルゴリズムの計算時間は、いずれも従来の1/100を下回っており、提案アルゴリズムを用いることで全地点間の経路計算が大幅に削減できることが示された。

area-2およびarea-3の実行結果について、改良2の計算時間が改良1より増加する傾向が見られた。これは、配送地点が広範囲に点在するケースである。広範囲に存在する地点間の上限コストが係数 α によって大きい値が設定され、改良1よりも改良2の探索エリアが広くなり、探索ノード数 n が増えたためである。最終的に改良3を講じることで適切な探索エリアが得られ、計算時間を削減できたが、改良3が適用できない地点間の経路探索において改善の余地を残している。

5. 性能分析

評価データを用いて、提案アルゴリズムが全ての配送地点間の経路探索の高速化の実現に有効であることを確認した。提案アルゴリズムは、評価データによってその効果に差があることがわかった。そこで、各評価データから図6に示す無作為に抽出した200地点を対象に、計算回数の削減効果と経路情報の利用状況を分析する。

表-2 計算時間の実測結果

時間単位は[ms], () 内は従来比[%]

データ名	従来	改良1	改良2	改良3
area-1	55,203,453	854,349 (1.54)	361,762 (0.66)	17,720 (0.03)
area-2	33,864,449	576,875 (1.7)	5,272,464 (15.57)	235,523 (0.7)
area-3	355,903	15,346 (4.31)	213,153 (59.89)	392 (0.11)

改良1：繰返し回数を削減

改良2：探索エリアの絞込み

改良3：経路情報を利用した探索エリアの絞込み

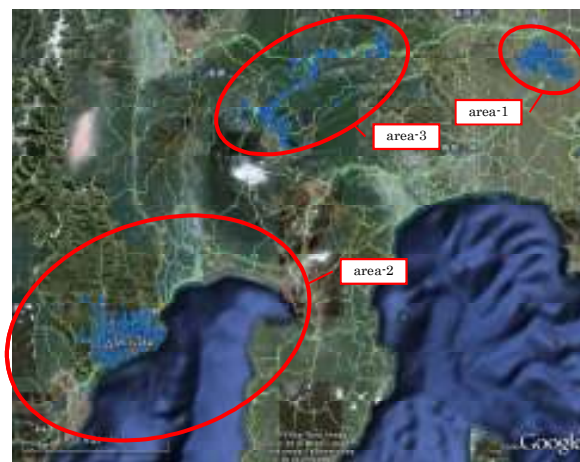


図-6 分析対象データ

(1) 計算回数

改良2と改良3を実行したときの計算回数（コスト更新の総数）と式(4a)にて算出した削減率を表3に示す。

$$\text{削減率} = \frac{C2 - C3}{C2} \times 100 \quad (4a)$$

改良3の方法を適用すると、いずれの評価データも従来の計算回数の90%以上が削減されている。特にarea-3の計算回数の削減率が高い。

(2) 経路情報の利用率

出発地点を順次更新した全地点間の経路計算において各出発地点における経路情報の利用率を式(5a)に基づき算出した。その結果を図7～9に示す。また、各データにおける利用率の平均値を表4に示す。

$$\text{利用率} = \frac{\text{経路情報によるコスト更新回数}}{\text{コスト更新回数}} \times 100 \quad (5a)$$

表-3 計算回数と削減率

	area-1	area-2	area-3
改良2の計算回数 C2	24,366,270	32,893,855	28,934,802
改良3の計算回数 C3	1,175,876	2,687,597	407,838
削減率[%]	95.2	91.8	98.6

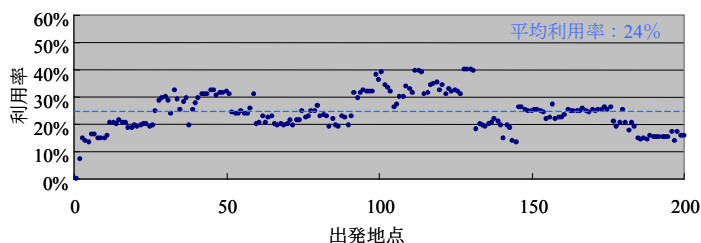


図-7 経路情報の利用率 (area-1)

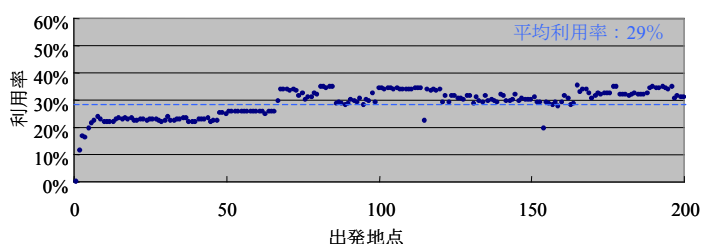


図-8 経路情報の利用率 (area-2)

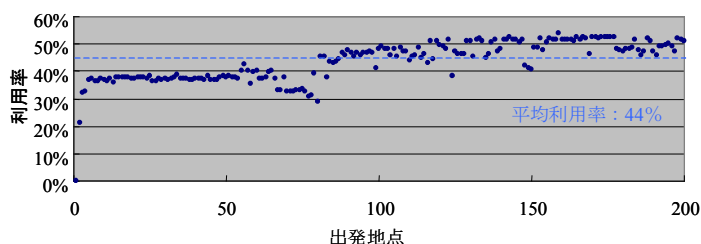


図-9 経路情報の利用率 (area-3)

図7～図9のいずれも初期の出発地点の経路計算でその利用率が平均利用率に近い値を出している。表4の平均利用率を更に平均すると、今回用いた評価データでは、全体の計算処理のおおよそ3割が以前に計算した経路情報を利用して経路が計算されていることがわかる。個別に見ると、area-3の平均利用率が他のエリアに比べて44%と最も高い値を示した。同データでは、計算回数の削減率も他に比べて最も良好な値を示している。

ここで、平均利用率を左右する要因を調べるため、各データの探索エリアに存在する道路ノード間の平均距離と平均利用率との関係を調べた。その結果を図10に示す。道路ノード間の平均距離Lは式(6a)に基づいて計算した。

$$\text{平均距離} L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} d(v_i, v_j) \quad (6a)$$

n : ノード数, $d(v_i, v_j)$: ノード v_i, v_j 間の距離

図10において、道路ノード間の平均距離と平均利用率には正の相関があり、平均距離の値が大きくなるに従って利用率が高くなることが確認できた。これより、表4に示した平均利用率のばらつきは、探索エリア内の道路ノードの粗密が要因になっていると思われる。

経路情報の平均利用率と削減率の関係について、いずれも高い値を示したarea-3では、経路情報の再利用が全体の計算量の削減に最も有効であったといえる。一方、経路情報の平均利用率がarea-1よりも良好な値を示した割に削減率が伸びていないarea-2については、経路情報の利用効果よりも探索エリア内の道路ノード数が多いために計算回数の削減効果が低いと考えられる。これを裏付けるため、探索エリアの道路ノード数を推定する。

表-4 経路情報の平均利用率

	area-1	area-2	area-3
平均利用率[%]	24	29	44

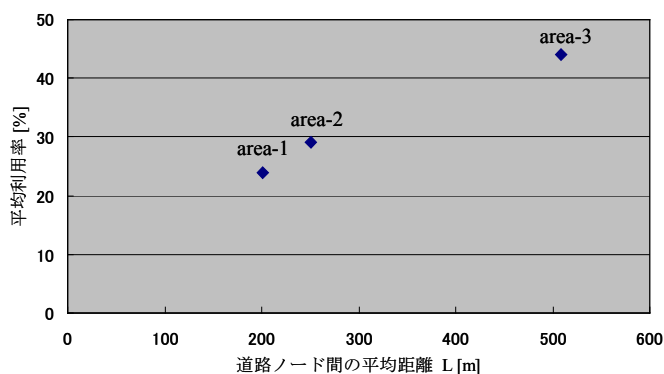


図-10 道路ノード間の平均距離と平均利用率との関係

6. 道路ノード数の推定

提案アルゴリズムは、経路計算過程で探索エリアを動的に確保していくので、全ての配送地点間の経路計算で探索対象となる道路ノード数を正確に把握することが難しい。そこで、配送地点の分布から暫定的な探索エリア k を設定してその面積 S_k を求め、道路ノード間の平均距離 L を用い、探索エリア k 内に存在する道路ノード数 n_k を推定した。探索エリア k は、配送地点の最も外側の地点を結んだ多角形を行動域とする最外郭法⁹⁾を用いて設定する。最外郭法を用いた探索エリア k の設定例を図11に示す。探索エリア k 内の道路ノード数 n_k は、道路ノード間の平均距離を半径としたエリア内に一つの配送地点が存在すると仮定し、式(7a)を用いて概算する。

$$n_k = \frac{S_k}{\pi L^2} \quad (7a)$$

分析対象とした各評価データの200地点を対象に探索エリア k の面積 S_k と、そのエリア内の道路ノード数 n_k を計算した結果を表5に示す。これよりarea-2の探索エリア内のノード数が最も多くなっていることがわかった。area-2では、経路情報の利用効果よりも探索エリア内のノード数が多いために計算回数の削減効果が低いとの考えを裏付ける結果が得られた。

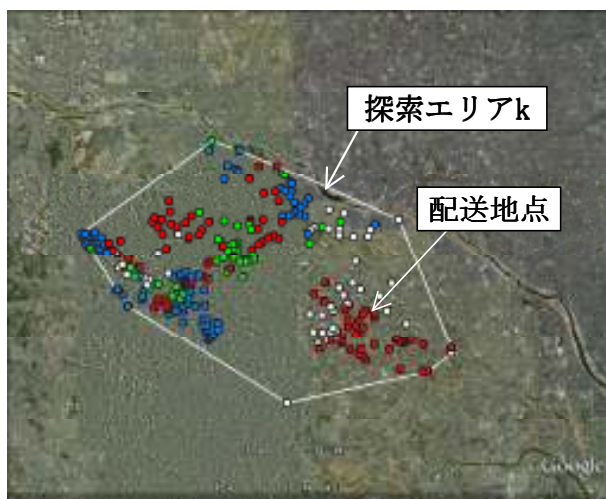


図-11 探索エリア k の設定例

表-5 探索エリア k の面積 S_k とノード数 n_k

	area-1	area-2	area-3
面積 S_k [Km ²]	73.17	595.53	553.24
ノード数 n_k	2,303	12,056	2,718

7. 考察

図7～図9によると、出発地点を順次更新しながら経路計算を進めていく初期の計算過程で、既に平均利用率に近い値の利用率が得られていることから、計算の初期段階で再利用可能な経路情報が一通り揃い、配送地点数がさほど多くない規模の問題でも提案アルゴリズムが有効に働くと考ええる。経路計算の負荷要因は、配送地点数が多くなくとも、配送地点が存在する探索エリアのノード数に依存し増大するからである。area-3のように道路ノードが疎なエリアでは、探索エリア内のノード数が少なく、経路の選択肢も限られてくる。故に経路情報の再利用による効果が大いと考えられる。area-1やarea-2のように道路ノードが密なエリアでは、経路の再利用よりも探索エリア内のノード数が計算性能に大きく影響するため、如何に探索エリアを絞り込むかが重要となる。area-1のように、配送地点が比較的狭い範囲であれば、探索エリアを効率良く絞り込めるので効果があるが、area-2のように配送地点が広範囲に存在する場合において、提案アルゴリズムは改善の余地を残している。

8. おわりに

本稿では、輸配送計画における経路探索の課題を明らかにし、配送経路を探索する過程で得られた経路情報を再利用し、探索エリアを効率良く絞り込むことで全体の計算量を削減する、高速な経路探索アルゴリズムを提案し、3つの評価用配送地点データを用いた性能評価により、その有効性を実証した。更に、提案アルゴリズムの計算回数の削減効果と経路情報の利用状況を分析し、道路ノードが疎なエリアでは、経路の再利用率が高く、計算回数の削減効果が大いことを明らかにした。また、探索エリア内の道路ノード数を推定し、道路ノードが密な都市エリアでは、経路の再利用よりも探索エリア内のノード数が計算性能に大きく影響することを示した。今後の課題として、アルゴリズム改善や並列処理化などの実装方法を含めた高速化がある。

参考文献

- 1) 谷口栄一：デジタル道路地図を活用した大規模道路ネットワークにおける所要時間変動を考慮した最適配車配送計画, pp.45-60, 2009.
- 2) Lauther, U. : An Experimental Evaluation of Point-To-Point Shortest Path Calculation on Roadnetworks with Precalculated Edge-Flags. In 9th DIMACS Implementation Challenge, 2006.
- 3) Hilger, M., Köhler, E., Möhring, R. H. and Schilling, H. : Fast Point-to-Point Shortest Path Computations with Arc-Flags, In 9th DIMACS Implementation Challenge, 2006.
- 4) 宮本裕一郎, 宇野毅明, 久保幹雄：最短路高速検索のための階層メッシュ疎化法, 情報処理学会研究報告, AL-119,

2008.

- 5) 勝呂純一, 本田健, 山口久行 : 最短路探索アルゴリズムの開発と下限時間の定義, 交通工学, vol.43, No.4, pp.90-100, 2008.
- 6) 最短路探索の経路確定定理と状態量確定型ダイクストラ法, 交通工学, vol.45, No.5, pp.37-46, 2010.
- 7) Dijkstra, E. W. : A note on Two Problem in Connexion with Graphs, Numeriche Mathematik 1, pp.269-271, 1959.
- 8) Peter, E.H. : A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, vol.SSC-4, No.2, 1968.
- 9) 尾崎研一, 工藤琢磨 : 行動圏 : その推定法, 及び観察点間の自己相関の影響, 日本生態学会誌, Vol.52, pp. 233-242, 2002.