GIS に基づく大域構造と局部構造を結合した交通ネットワーク分析システムの開発

宝 金剛† 應 江黔‡ 速水 悟†

†岐阜大学大学院工学研究科 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1
‡岐阜大学大学院地域科学研究科 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1
E-mail: †bao@hym.info.gifu-u.ac.jp, ‡ying@gifu-u.ac.jp, †hayamizu@gifu-u.ac.jp

あらまし Transport Decision Support System という交通ネットワーク解析システムは GIS に基づいて、交通ネットワークを解析する交通管理者や研究者に地理的情報システムベースを提供する．このシステムにはデジタルマップに関する交通ネットワークデザインや交通均衡解析を行うための機能、または局部的な交差点の詳細な構成を広域ネットワークに融合する機能をもつ. この提案方法での時間計算量と領域計算量の両方のコストが高いため, 大規模な交通ネットワークの編集、表示に適用する事が困難である．そこで本研究は，一般的レベルを拡張し、比較的大規模なネットワークデータに対して､従来のバケット法による手法を改良した. 提案したアルゴリズムについての説明と評価結果を示す.

キーワード GIS，交通情報システム，交通ネットワーク，交差点分析

Development of Integrated Local/Global Traffic Network Analysis in a GIS-based System

Jingang BAO† Jiangqian YING‡ and Satoro HAYAMIZU†

† Graduate School of Engineering Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu-Shi, 501-1193 Japan

‡ Faculty of Regional Studies Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu-Shi, 501-1193 Japan
E-mail: †bao@hym.info.gifu-u.ac.jp, ‡ying@gifu-u.ac.jp, †hayamizu@gifu-u.ac.jp

Abstract This paper reports on our development of a GIS-based traffic network analysis system, named GIS-based Transport Decision Support System, which provides a graphical analysis platform to transportation planners and researchers for transportation network analysis. The system has the functions of designing traffic networks on digital maps and doing traffic equilibrium analysis, as well as a novel function to integrate local detailed structures of intersections into global networks. The latter is particularly useful for the analysis of large traffic network where the detailed local network structures of some intersections have to be taken into account. However, this method requires huge memory space and it is difficult to apply it to large transportation network, An improved bucket method is designed for the network edit and view.

Keyword GIS，Transport system，Traffic Network，Intersections Analysis

1. はじめに

交通計画、交通工学の基本的な問題は均衡ネットワーク解析方法で解決されるネットワークの中にある交通流の配分に関する設計あるいはある管理政策が与える影響を評価するということである。均衡ネットワーク解析は本質的に交通量が旅行時間に対する影響およびそれによる旅行者が行う経路の選択、そしてその選択が逆に交通量を変化させるという問題を考慮に入れる。このため、均衡ネットワーク解析のアルゴリズムを実現するソフトウェアが開発されている。

従来、交通ネットワークを計画する際の均衡解析では交差点の詳細な構造が省略されている。他方で、交差点の交通流は与えられていると仮定して、交差点の幾何学的なデザインや信号設置が行われる。一様に設置される交差点に対して、平均遅延定数を設定するというような簡単な処理をすると、十分によい精度が得られる。しかし、幾つかの交差点が特に大規模な交通流を引き付ける不均一な構造を持つネットワークに対して､この方法では低い予測精度となる可能性がある。

これを改善するため交差点の遅延関数などをネットワーク均衡モデルに導入する。しかし、ネットワークにすべての交差点の詳細な構造を導入するとデータ準備にかかる大量の仕事および計算時間が必要で、実際的には大域ネットワークへの応用は採用されていな

い。現実的な方法は、重要な交差点が構成する比較的小さなセットを研究対象としての地域を含む広域ネットワーク（例えば、都市など）に融合することである。

この場合時間計算量と領域計算量の両方のコストが高く，大規模な交通ネットワークの編集、表示に適用する事が困難である。そこで本研究では、交通ネットワークの分析を高速に処理するため、バケット法の実用性を実証する。一般的レベル付けを拡張し、比較的大規模な交通ネットワークのデータに対して、従来のバケット法による手法を改良したものである。

次のセクションでは、交通ネットワーク均衡解析理論を簡単にレビューする。セクション3では、GIS- TDSSの構成を紹介する。セクション4では、局部と広域ネットワークを融合する方法を紹介する。セクション 5では、従来のバケット法による手法を改良する手法を紹介する。セクション6では、GIS-TDSSで、改良したバケット法を評価する。セクション7では、開発したシステムがひとつの詳細の交差点を持つ都市道路ネットワークの均衡交通流解析に応用される実例を紹介する。

2. 交差点の遅延を考慮した交通ネットワーク均衡解析

交通解析には幾つかの均衡の定義がある。本セクションでは、定式化の簡単なシステムを持つ「確率的な」均衡モデル[4]を簡潔にレビューする。交通ネットワークを A={…,*ij*,…}のようなリンクによって構成される有向グラフで表すと仮定する。ここで、*i* と *j* は、ネットワークのノードである。ネットワークリンクには旅行時間コストを $t=(t_{ij}),(i,j)\in A$ で表示させる。ルート k での出発先 r から目的先 s までの旅行コストを $C_k^{rs}=\sum_{ij} t_{ij}\delta_{k,ij}^{rs}$ で表示させる。ここで、もし(i,j)が経路 k の一リンクであるなら、$\delta_{k,ij}^{rs}=1$で、それ以外では $\delta_{k,ij}^{rs}=0$である。確率均衡モデルでは、k番目の経路を選ぶ確率が $P_k^{rs}=\dfrac{\exp(-\theta C_k^{rs}(t))}{\sum_p \exp(-\theta C_p^{rs}(t))}$ で、θが定数のパラメータである。

リンク(i,j)での交通流を x_{ij} で表示させる。$x=(x_{ij}),(i,j)\in A$。一般的に、リンクコストは流ベクトルと幾つかの制御ベクトル λ（例えば、交通信号パラメータ）$t=t(x, \lambda)$の関数である。出発先 r から目的先 s までの旅行需要を q_{rs} で表示させると、ネットワークでの確率的利用者均衡は次の式によって定式化される。

$$x_{ij}-\sum_{rs} q_{rs}\frac{\exp(-\theta C_k^{rs}(t))\delta_{k,ij}^{rs}}{\sum_p \exp(-\theta C_p^{rs}(t))}=0,\ ij\in A \qquad \text{（式１）}$$

ここで[4, 6]の方程式（式１）のシステムを求めるため効率的なアルゴリズムが開発されている。

通常、一般道路リンクの時間コストは次の関数によって計算される。ここで a と b はパラメータである[4]。しかし、異なる方向の交通流が互いに妨げるという事実のために、交差点での時間コストが非常に複雑で、一般に、従来のネットワーク均衡解析では平均定数値に簡略化されている。

交通解析の精度を改善するため、交差点を詳細ネットワークに広げる。そのネットワークは、図 2-1 で示すように、交差点の交通規則による仮想リンクによって構成される。

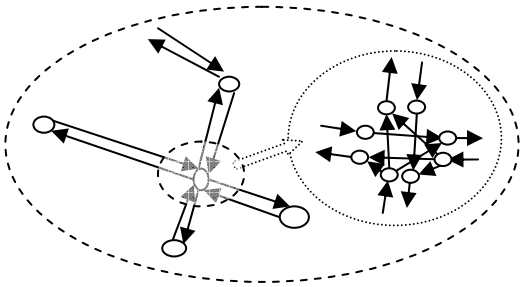

図 2-1 詳細の交差点の構造

交差点の時間遅延は交差点に関連するすべての流変数の関数である。これらの関数は[5, 6]で見られるスペース制約のために省略される。

3. 地理的情報システムベースにおける交通支援システム

交通計画、都市計画、交通政策分析のための地理情報システム（GIS）および、GIS に結合した交通解析システムを開発している。そのシステムは GIS-based Transport Decision Support System (GIS- TDSS)[1]と呼ばれ、GIS 表示機能を核とし、地理データ、地域情報データ、交通データの編集・表示機能、交通均衡解析の分析機能を実現し、また交差点の局所詳細な構造を広域ネットワークに融合する新しい機能をもつ。

4. 大域交通ネットワークと詳細なネットワークとの融合

はじめのセクションで述べたように、交差点の局所詳細ネットワークの広域ネットワークへの融合は、大きな計算の負担を伴わないで交通解析精度を向上させるのに必要である。

GIS[7]の一般構造には、空間データ（spatial data）を三つのグループに分ける：幾何データ（geometric data）：空間データの空間特性を記述するデータで、位

置データ（location data)、定位データ（positioning data）とも知られている。2）属性データ：―タイプ、レベル、ネーム、状態などの空間データの属性を記述するデータである。3）関係データ（relational data）：空間データの間のトポロジー関係を記述するデータである。これらの三種のデータグループを従来の GIS の別々のテーブルに置かれている。本研究では幾何データと関係データを統一データ管理テーブルに置かれている。次の例では、この手法を説明する。

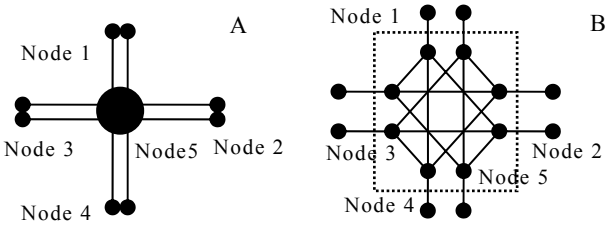

図 4-1 交差点の局所詳細なネットワーク

Div	Key1	Key2	Col1	Key3	Col2	Key4
1	1	1	X1, Y1	5	X5, Y5	0
2	2	2	X2, Y2	5	X5, Y5	0
3	3	3	X3, Y3	5	X5, Y5	0
4	4	4	X4, Y4	5	X5, Y5	0

A

Div	Key1	Key2	Col1	Key3	Col2	Key4
1	1	1	X1, Y1	5A	X5, Y5	0
2	2	2	X2, Y2	5B	X5, Y5	0
3	3	3	X3, Y3	5C	X5, Y5	0
4	4	4	X4, Y4	5D	X5, Y5	0
…	…	…	…	…	…	5
…	105	5A	0	5B	0	5
…	106	5A	0	5C	0	5
…	107	5B	0	5D	0	5
n	…	…	…	…	…	5

A

B

表 4-1 ネットワークデータの変更

図 4-1(A)に示すように、交通ネットワークでは、交差点が簡単なノードで表され、表 4-1 の A 部分がネットワークのデータ構造である。Key1 はデータの主キーである。Key2 と Key3 はリンクの起点と終点で、Col1 と Col2 はそれらの座標である。Key4 はオリジナルと変更されたネットワークの間のノード番号の対応を示す。

ノード 5 が詳細なネットワークと広げられるとき、12 個の新しいリンクは作成される（図 4-1(B)で点状の正方形で囲まれる)。同時に、既存の８つのリンクは終点を変えて交差点の詳細なネットワークとの互換性があるように変更される。

表 4-1(B)には交差点ネットワークのデータを示す。Key4 は簡単なネットワークのノード 5 の起点。Col1 と Col2 の値を無視することができる。

表 4-1 の中に Div はネットワークを編集するときの編集される対象を高速に検索し、計算する後で再表示するためバケット法で分割するのに用いられる区分標識である。セクション 6 でこの手法を簡単に説明する。セクション 7 で提案される手法の有効性を実験によって確認する。

局所詳細なネットワークが創建されているとき、リンクの属性を定義して、データの属性テーブルに挿入することができる。交通均衡解析ではそのテーブルを主キー(Key1)でアクセスできる。

図 4-2 に GIS-TDSS では上述のデータ変更を実現するためのモジュールを示す。レイヤ管理はシステムの需要によって、データファイルからデータを抽出し、幾何テーブルのデータを持つグラフレイヤを作成し、需要なレイヤ属性データをロードして、そしてメモリーにロードして需要なレイヤを輸出する。

データ管理はレイヤデータテーブルの構造とメタデータの値配分と定義を制御し、ネットワークの幾何の形状を定義し、データを抽出するなど。

5. 交差点の遅延を考慮した分析に応用

図 5-1 には日本岐阜市の中央部の主要道路ネットワークマップを示す。私たちはマップで表される特別な交差点(Int13)を横断する交通流を研究対象とする。そのために、その交差点の詳細なネットワークは広域道路ネットワークに融合される。ここで、ネットワークの詳細なデータを省略する。

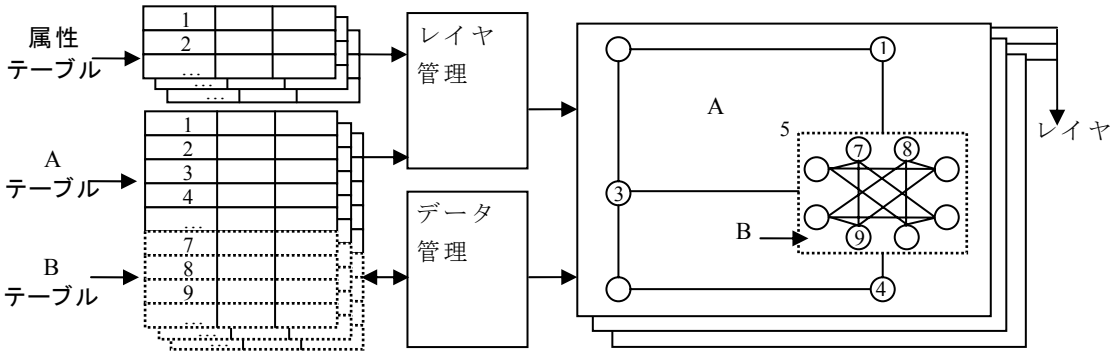

図 4-2 大域と詳細なネットワークの融合モジュール

図 5-2 には詳細構造を持たない交通ネットワークで交差点（点状の正方形中）付近のリンクの均衡解析結果を示す。

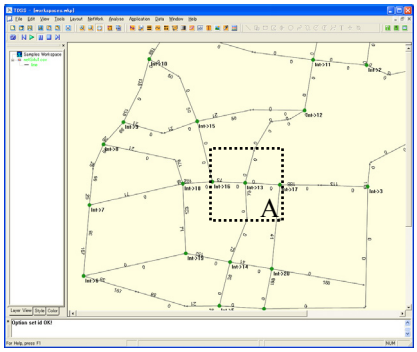

図 5-1 岐阜市の交通ネットワーク

ノード Int13 で記号される交差点の詳細な解析に対して、Int13 は 12 個の新しいリンクを持つ局所詳細なネットワークと広げられる。図 5-3 には新しく融合されるネットワークの均衡交通流を示す。交差点遅延の影響で一部の交通量をほかのリンクに変更することを見つける。

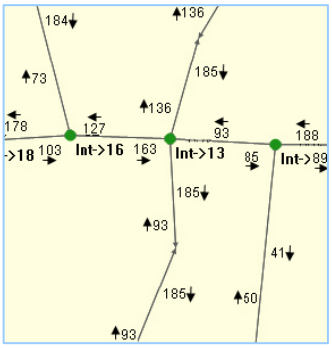

図 5-2 組入れない交差点

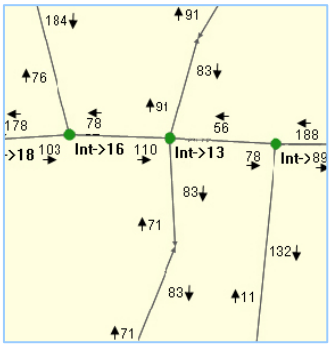

図 5-4 組入れた交差点

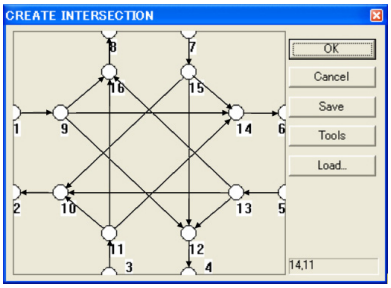

図 5-3 展開した Int13 交差点

6. GIS-TDSS におけるバケット法のレベル構造アルゴリズム

6.1. 高速化の必要性

本システムでは、計算後の図形の再表示、ネットワークの編集、拡大縮小などの操作を行う際、ベクトル図形の表示速度向上が重要な問題である。これを解決するため、本システムではバケット法という手法[11]を発展させ、データの分割管理に利用して高速化を実現する。この方法は、大型のベクトル図形処理の高速化に有効であることを確かめた。特に、大域ネットワークにおける詳細な局所ネットワークについての編集処理や表示などにおいて、全ネットワークのデータの処理を避けることができ、処理速度を向上させることができる。

6.2. 比較

既存の地理情報システムでも、バケット法が採用されている例もある。例えば、デジタルマップ(googlemap など）では、各レベルで同じ分割数の Bucket 法が採用され、サーバで分割した静止画像データを作成し、ブラザーに送信するという方式が採用されている[17]。

既存の交通分析用 GIS の中では、バケット分割法を使っている市販のシステムはまだ少ない。例えば、交通分析ソフトとして有名な TransCAD でも、このような方法は採用されていない。これは、本システムのように、大域と局所ネットワークの結合機能を要求しないからだと思われる。

6.3. バケット法の利用

最も短い時間でマップの表示または編集を行うために、以下の問題を解決しなければならない。まず、表示範囲あるいは編集範囲の以外ではできるだけ処理を行わず、範囲内で処理する。次に、マップの大規模データから最速のスピードで表示範囲または処理範囲の関連データを見つける。

上記の問題を解決するため、本システムはバケット法に基づく方法を用いる。それはマップのデータを bucket に分割して索引を作成し、レイヤで記述する方法である。この方法ではまず、マップのデータ領域を同じ大きさの長方形ユニット(bucket) に割り当てる。すべてのユニットについて、ユニットと交わる図形要素（線分などのオブジェクト）のマップデータの索引を作成する。

表示範囲の図形を処理するとき、処理する空間位置が属するユニットを検索して、そのユニットの図形オブジェクト索引から、メモリーから必要なマップデータを迅速に探し出すことができる。

6.4. 編集及び拡大処理の手順

バケット分割法は、計算幾何的な問題をより単純に高速に処理するための実際的方法である。一般的な対象物が 2 次元図形のときは、対象物を座標軸に平行な辺からなる長方形で覆い、それを縦横 $\lfloor\sqrt{n}\rfloor$ 等分し全部で $\theta(n)=\lfloor\sqrt{n}\rfloor\times\lfloor\sqrt{n}\rfloor$ 個のバケットと呼ばれる小長方形領域に分割して図形を各バケットで切り出し管理する. すると問題を各バケット内での極めて単純な問題に帰着できることもしばしばあり, 高速に処理できることになる[11]。

ネットワークグラフの編集及び拡大処理の手順は次の通りである

（1）地図データの *x,y* 座標の最大値に従って地図領域を均等なユニットに分割する。ユニットのサイズは拡大の程度によって定まる拡大の比率が大きいほど、分割数も大きい。

（2）ユニットに番号を付けて、ユニットにあるオブジェクトのデータを読取るときに、ユニット番号も一緒にメモリーに書き込む。

（3）図形の編集時は、操作範囲内のユニットを探索し、その中のオブジェクトだけを編集の対象とする。

（4）図形を拡大するときに、その時点で表示するデータのサイズを計算し、適切な分割数で部分図形をユニットに再分割し、ユニットに番号付してデータと一緒にメモリーに書きこむ。ここでいう“適切な分割数”とは、事前にデータ量に依存する最適な分割数を実験で探索しておくものである。

（5）地図要素の類別や等級によってデータの階層構造を作る。層の間の比率などの情報を記録し、地図の拡大縮小及び編集の過程で層間関係を保持する。

図 6-1 は、既存のリンク（線分）の上に、新しいノードを作る作業をするときの bucket 法の利用を示している。新しいノードの座標から、そのノードが属する bucket に付随するリンクの中から、対象となるリンクを探して処理する。

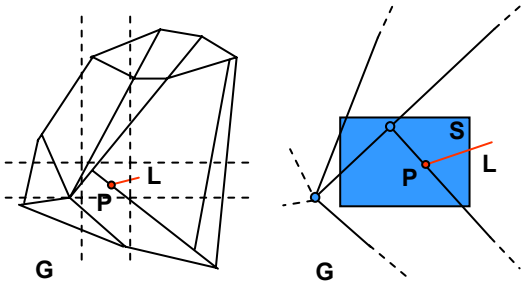

図 6-1 新しいノードを作る作業

図 6-2 は図形の拡大に伴い分割数の変化を示している。

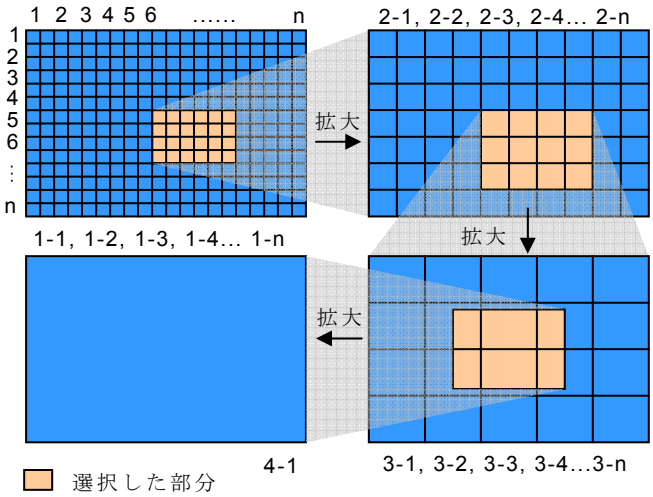

図 6-2 選択した部分を拡大する分割数の変化

Bucket 法を用いれば、bucket 数の対数に比例する計算量で該当 bucket を見つけることができ、bucket に属する図形要素の数に比例する計算量で処理すべき要素を見つけることができる。当然、この方法の速さは、bucket 数と bucket に属する要素数の平均値のバランスによる。次の節で述べるように、本研究において、最適な bucket 数を実験によって定めている。

7. バケット法の評価

本研究では提案する手法の有効性を実験によって確認する。使用したデータは岐阜市の地図から作成された道路ネットワークである。実験環境は、Intel pentium4 3.4GHz、2048MB メモリ、128MB グラフメモリ上の Windows XP で，ディスプレイの解像度が 1280x1024 スクリーンで、参照辺（分割長方形の辺）を含む GBD 木を GIS-TDSS による双方向リストで実装した。

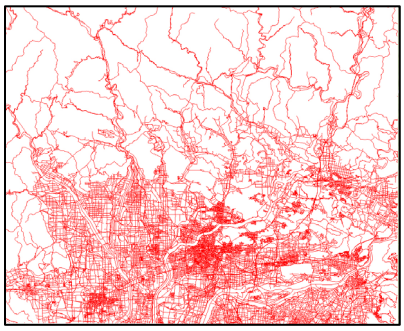

図 7-1 岐阜市地方周辺の道路ネットワーク

実験は，本手法における前処理時間および交差点組入れた道路ネットワークを計算した再表示時間を測定したものである。図 7-1 は岐阜市と周辺の交通道路ネットワークを分割している長方形の計算時間を示す。縦軸は表示時間（秒）で、横軸は分割数である。表示時間は、ハットデスクの読む時間と CPU 時間である。

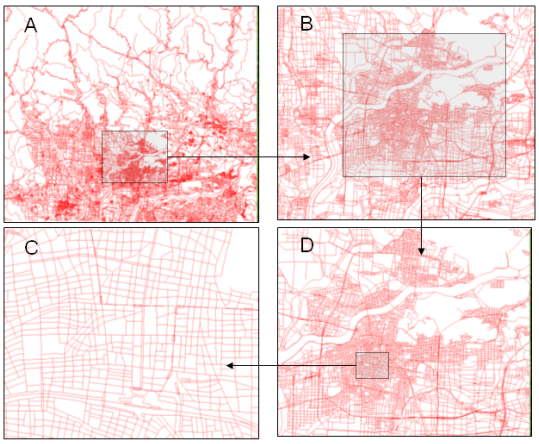

図 7-2 図 7-1 のネットワークを拡大操作

図 7-2 によって、具体的な例から始めよう。図 7-3

は岐阜市地方周辺の道路ネットワークの地図に表示されているのとほぼ同じものを選んで作った道路網図で、54,625 個の点、126,534 本の枝（支線分）から構成されている。計算した拡大操作のとき再表示の処理時間を示す。A にはレベル 1 の全て道路ネットワークの最短処理時間は分割数 100^2 個 23 秒ぐらい､B にはレベル 2 の 4 万ぐらい本の最短処理時間は分割数 15^2 個 10 秒ぐらい、C にはレベル 3 の 1 万ぐらい本の最短処理時間は分割数 15^2 個 15 秒ぐらい、D にはレベル 4 の 500 ぐらい本の最短処理時間は分割数 0 個のとき 1 秒より小さいである。

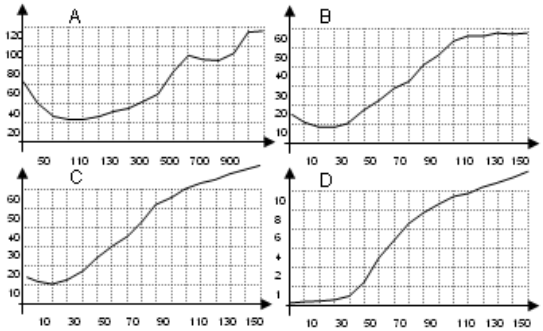

図 7-3 分割数と処理時間の比較結果

一般に 1280x1024 スクリーンを典型的なバケット分割サイズ 15x15 で分割すると 225 個バケットで、そんなことするより 10 秒ぐらいにかけた方が速いそうです。しかし、各コンピュータ環境が不同であるので、この処理速度がもちろん違って、所要時間へ影響を与えることが分かる。

8. まとめと今後の課題

交通ネットワーク均衡解析のため、私たちは GIS に基づく Transport Decision Support System を開発している。そのシステムは交差点の詳細な構造を広域ネットワークに融合する新機能をもつ。

交通現象に広域ネットワーク均衡機能または局所詳細な構造を含むために、私たちが開発しているシステムは交通ネットワーク解析用の実用な方法を提供する。

高度発展の情報技術が複雑で詳細な交通情報を収集と処理に強力なツールを提供する。それらについての技術をネットワーク解析と結合すると、より質の高い交通計画と管理を行う可能性がある。この目的で、このシステムの重要な仕事は適当の方法でネットワーク解析に局所詳細な情報と広域情報を融合する総合ベースを創建することである。

本研究では、比較的大規模で疎なグラフ構造を持つ空間データに対して、交通ネットワークを計算するアルゴリズムを提案し、実験によってその効果を検証した。

今後は，本手法を応用した交通ネットワーク解析方法を提案することが課題である。大規模グラフの計算と編集は困難である。そこで，本手法によって，各レベルのバケット分割数はデータ量から判断されるので、このアルゴリズムを研究し、データ保存形式を研究する必要がある。そのための計算コストを大幅に削減できると期待できる。

文　献

[1] Bao, J. G., 2008. Development of a GIS-based transport network analysis system, Master Thesis, Graduate School of Regional Studies, Gifu Univ.

[2] Iida, Y. (Ed.), 1992. Traffic Engineering, Kokumin Kagaku Sha Press, Tokyo (in Japanese).

[3] Koutsopoulos, H. N., 1994. Effect of intersection delay modeling on the performance of traffic equilibrium models, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 28, No. 2, pp. 133-149.

[4] Sheffi, Y., 1985. Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[5] U.S. Transportation Research Board, 2000. Highway Capacity Manual, Washington D. C.

[6] Ying, J. Q., H.P. Lu and J. Shi, 2007. An algorithm for local continuous optimization of traffic signals, European Journal of Operational Research. Vol. 181, No. 3, pp. 1189-1197.

[7] ESRI, 1998, ESRI Shape file Technical Description, An white Paper, July 1998.

[8] Caliper Cop. TransCAD Overview, http://www.caliper.com/tcovu.htm

[9] Intel-Tech, INC. JICA STRADA, http://www.intel-tech.co.jp/strada/stradae.htm

[10] T. Asano, M. Edahiro, H. Imai, M. Iri and K. Murota, "Practical Use of Bucketing Techniques in Computational Geometry," in Computational Geometry, G.T. Toussaint, ed., North-Holland, 1985.

[11] 松井 浩, “幾何的検索問題”,計算幾何と地理情報処理、腰塚 武志, pp.93-94,共立出版,

[12] 岸浩史,田名部淳,河野浩之,“Σ-tree による時空間 OLAP 技術の交通データへの適用”,電子情報通信学会,データ工学ワークショップ(DEWS2002), 2002

[13] Liujian Qian Donna J. Peuquet, “A Systematic Strategy for High Performance GIS”, Department of Geography the Pennsylvania State University University Park, PA 16802 USA qian/peuquet @geog. psu. edu

[14] 櫻井 保志,吉川 正俊,植村 俊亮,片岡 良治, “楕円体問合せのための空間変換を用いた類似探索アルゴリズム”,電子情報通信学会論文誌,Vol.J85-D1,No.3pp.303-312,2002/03/01 Online ISSN: Print ISSN: 0915-1915

[15] 仲諒子 遠山元道,“高次元空間における k+ Skyline 探索”,Page1,DEWS2008,D4-3

[16] 村松 亮介,福田 直樹,石川 博, “分類階層を利用した検索エンジンの検索結果の構造化とその提示方法の改良” ,Page 1, DEWS2008,B6-3

[17] 沓澤 克佳,鈴木 貴史, “Web 型 GIS における空間データ課金・配信ソフト作成”