# 道路の密度と所要時間

# 腰塚 武志

### 1. はじめに

都市におけるさまざまな活動を対象としてモデルを 構築する場合,ずいぶん複雑で膨大な数のパラメータ を含むものになってしまい、モデル構築で何がわかっ たかが曖昧になってしまうことが多い。これは対象と した活動に関する数値データにあまりにも振り回され た結果であり、数値的には一見精緻になったかのよう にみえても、モデルの明確な構造が失われ、結局モデ ル化の意味が失われるのである。

このような傾向の反対のやり方、すなわちモデルの明確な構造が失われないような分析はできないのだろうか。別な言葉を用いれば現実の数値にとらわれるのではなく、現実の本質的な構造にこだわる態度という言い方ができるだろうか。そこでモデルの前提となる現実を単純化し、結果を厳密に求めることにこだわることにする。これは場合によっては厳密な結果を得るために現実を単純化すると言い変えることもできるだろう。

現実を単純化することにより厳密な結果の前提が現実と乖離するので、結果が数値的に現実とかなり隔たるという場合があると考えられる。しかし前提と結果の間に曖昧なものがないので、これらは複雑な現実を考えるうえでの指針のようなものを与えてくれることがあるかもしれない。そこでこれらを将棋や碁でいう定跡(定石)のようなものと考え、複雑なモデルを構築する替わりに、前提を単純化した'定跡'を作っていきたい。考えてみると都市計画の分野ではあまりにこの'定跡'が作られてこなかったことに気がつく。これは、われわれの分野が「現実は非常に複雑である」ということを口実に理論化するという知的活動を常に放棄してきた結果にほかならない。

ところで都市を、密度を高くしてコンパクトなもの にすべきか、または、より広い範囲で密度を低くした 方がよいか、という問題は都市計画の分野でもさまざ まな局面で議論されてきた。それぞれに長所と短所があり、単純な状況を設定してこれらを明確にしておくことは、都市計画のいわば'定跡'として意味のあることだと考えられる。そこで、本論文では道路の密度というものに焦点を当て、道路密度の高いコンパクトな都市と道路密度の低い都市を対象とし、主に走行時間で両者を比較する問題を考えよう。

道路の量が多いとよいかというと必ずしもそうではない。たとえば新しい道路を建設し続けて、道路延長を増加させていくことを想定する。このとき道路網相互の交差すなわち交差点はどんどん増加する。交差点においては交差する道路のうちの1つが優先されることになり、他の1つは使用が制限される。信号があればこれが一定の時間で交代するわけであり、赤信号で止められている側にとっては、短い時間であっても、このあいだ道路が存在しないことに等しい。このことは道路を増やしていっても、通過するという機能のみからみれば、実際に有効に使用できる部分はそれほど増えないかもしれない。という考えを導く

以上のことについては、感覚的、定性的に議論していても実りのあるものは得られないので、信号数(交差点数)、走行速度、道路延長等について、ある程度きちんとした議論を展開しなければならない。

## 2. 平均所要時間と信号密度

信号によって道路の使用を制限されると、止まっていた時間によって平均走行速度(交通工学では旅行速度という)が低下することになる。そこである地点から目的地までの自動車による走行を単純化して、停止状態から一定の加速度で定常速度vに達し、その後この定常速度を保ち、また停止するときは一定の加速度(負の)で止まるものとする。さらに信号で止まる確率や、停止時間を一様分布であると想定すると、信号の停止も考慮に入れた平均所要時間をTとして、単純な以下の式

$$\overline{t} = \alpha n + \beta l + \gamma \tag{1}$$

が得られた(文献[1])。ただしある地点から目的地までにある信号の総数 $e^n$ ,走行距離 $e^l$ とし,aは信号

こしづか たけし 筑波大学 社会工学系 〒305 つくば市天王台1-1-1

1 つあたりの平均損失時間, $\beta$ は走行中の定常速度v の逆数すなわち $\beta=1/v$ で, $\beta$ lが距離lを定常速度v で走行した時の所要時間, $\gamma$ は停止状態から速度vに達するまでの1 回の加速に要する時間となっている。

そこで筑波研究学園都市内のいくつかのルートにおいて信号の総数(止まったかどうかに関係なく), 走行距離, 所要時間を計測し, 217個のサンプルを得た。これより式(1)の係数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ を最小二乗法によって推定すると, 時間の単位を秒, 長さの単位をkmとして

T=21n+55l+16(秒) ( $R^2=0.96$ ) (2) が得られた(文献[1])。この式で $\alpha=21($ 秒) ということは,実際に停止してもしなくても,信号1つについて平均的に21秒ほど余計に時間がかかることを示している(正確にいうと,走行速度を常に一定としているので,加速に含まれる時間の損失も停止時間に入っている)。

また  $\beta$ =55(秒/km)ということはこれが速度の逆数なので秒を時間に変換すると定速速度(最高速度)vが 3600/55=65.5(km/時)であることを意味する。このサンプルには学生諸君のデータもかなり入っており、彼らのスピードが速いことの結果であろう。

ところで 1 回の加速または減速の所要時間に相当する $\gamma=16($ 秒) というのは小さい値なので,式(1)の両辺をl で割って逆数をとり,l がかなり大きいとして $\gamma$  を無視すれば,交差点密度 $\lambda$   $(=n/\ell)$  と平均走行速度 $\overline{v}$  との関係が

$$\overline{v} \sim \frac{1}{\alpha \lambda + \beta}$$
 (3)

と得られる。そこで現実の値からこの平均走行速度を計算するために、きりのいい数字として $\alpha$ =20、法定速度は守るものとして $\beta$ =60(すなわち定速速度3600/60=60(km/時))、そして平均走行速度  $\overline{v}$ の単位をkm/時とすれば

$$\overline{v} = \frac{3600}{20\lambda + 60} \text{ (km/時)}$$
 (4)

が得られる。ただし信号密度λの単位は個/kmとする。 実際の走行状態は簡単に議論できるようなきれいな ものではない。 縦軸に速度,横軸に時間をとって実際 の走行状態を表わすと,図1の(a)のようになってい ると思われる。これをモデル式(1)にあてはめるという ことは、図1の(a)のようなものを(b)のように、停止 しているか、または定常速度で走行しているかのどち らかである、とみなして所要時間を計算する、という ことを意味する。この式がかなりよく適合するという

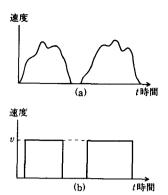


図1 現実の走行(a) とモデル(b)

ことは、図1の(a)の一山を(b)における同一面積の長 方形に置き換えてうまくいく、ということにほかなら ない。

# 3. 平均走行速度と実際の速度

さて以上の導出ではある種の理想化された状況、すなわち渋滞がなく、しかも他の車に邪魔されないというもの、が想定されている。他に車が1台もなく、しかも信号機の点滅を遵守して走行した場合で、実際には真夜中に似たような状況が生ずることがあるだろう。

したがって式(4)の平均走行速度では、与えられた道路網では最も速く走れた場合(定常速度60km/時での平均値としてではあるが)の数値で、実際の混雑した路線における走行速度のモデル式ではない。しかし実際の観測値との比較は興味深いので、混んでいるときの実際の観測値として文献[2]よりピーク時平均旅行速度というものに注目する。そして国道1号から20号までが通っている各県、各国道ごとに、その国道の旅行速度を計算し、その路線における信号密度と組み合わせてプロットすると、図2のようになった。

図における実線のグラフは式(4)を示しており、プロットされたデータはこの実線の少し下に多く分布し、しかもこれを越えるものがほとんどない。この事実は、この平均走行速度でが与えられた信号密度における理想化された状況における走行速度、すなわち平均速度の上限を表わしていて、大変重要であることを示している。

図2において信号密度の高いのはほとんど東京の各国道の路線であり、信号密度の高さによって東京では、ピーク時平均旅行速度も平均走行速度(限界速度)も、ともにとても低いレベルとなっている。国道6号線を例にとると式(4)より、宮城県では信号密度が0.93個/km

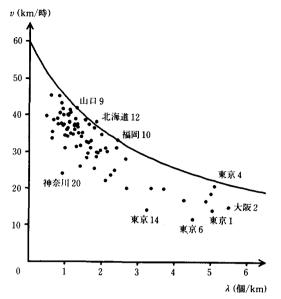


図2 ピーク時平均旅行速度と平均速度の上限(4) (都道府県名の後の数字は国道番号)

で上限速度が46km/時、東京都では信号密度が4.50個/kmで上限速度が24km/時と計算される.このことは混雑を考えなくても東京が宮城より倍近く時間がかかることを意味する. つまり東京が面積的にはコンパクトにまとまっていたとしても、そのコンパクトな良い面をそれほど生かしていないことがわかる.

平均走行速度がと実際のピーク時平均旅行速度との 隔たりは道路の混雑すなわち車線数や交通量によるも のと考えられ、これについて分析することには興味が ある。たとえば図2の山口県の9号線、北海道の12号 線はあまり交通量が多くなく、また神奈川県の20号線 や東京の6号線は混雑が激しいと予想される。しかし ピーク時平均旅行速度に関する調査方法やサンプル数 等で不明な点もあり今後の課題としておきたい、ただ し東京等の信号密度が高いところでは複数の信号で1 つの信号と同じように制御されている場合が予想され るので、図2における点の位置がもう少し左に移動し、 上限速度との隔たりはより一層大きいという場合もあ るかもしれない。図1のところの議論でも明らかなよ うに、混雑が激しい場合には定常(最高)速度60km/時 には達することができないのでβはもう少し大きい値 になり、平均走行速度はもっと落ちることになる。

なお、言うまでもないことながら図2の実線で表わされている式(4)は、この図でプロットされているデータから求められているわけではない。しかし、これら点群の上限を示しているという意味で無関係ではない

と考えられる。ピーク時平均旅行速度というのはさまざまな状況下で得られたデータであり、同じ時間同じ場所で計測しても極端なはなし翌日には違った結果が得られるといったものであろう。しかしいかなる場合でも上限を越えることはほとんどないという点に着目し、最小二乗法等とは異なる論理で、このような限界線をデータから求める方法はないものだろうか。

# 4. 道路密度と平均走行時間

式(3)のところでみたように、信号機が増加すれば走行速度は低下することがわかった。走行速度からみる限り信号が少ないほどよい。しかし、道路延長が増加すれば交差点は増加する。いま対象としている領域の総面積をS、道路総延長を $\Lambda$ 、交差点数を $\nu$ とすると近似的に

$$\Lambda \sim \sqrt{\nu \pi S}$$
 (5)

という関係が成立する(文献[3])。ここではこの式を 理論的に説明するための紙面の余裕はないので、この 式を現実の東京都の一部で検証した文献[3]の実例を 示す. 図3で示されているのが検証に用いた道路網図 で国土地理院発行の1/25,000の地図で東京西部を4分 割した南東の部分である。これを10×10のメッシュで 切り(1つの単位はいわゆる500mメッシュと呼ばれる ものである),その1つ1つのメッシュについて道路延 長 $\Lambda$ と交差点数 $\nu$ を計測し、これらをプロットしたのが 図4である。ただし大きな施設があって明らかにメッ シュの一部しか道路が通っていないものは除去してあ る、図3の実線は式(5)を表わしており、これをみると 現実のデータは(5)を少し下回っているもののよく適合 していることがわかる.この下回っている点を文献[3] では3差路の割合で補正する議論をしているが、ここ ではあまり本質的ではないので式(5)をそのまま用いる ことにする. そこで交差点において信号が設けられて いる比率をァとすれば信号の存在する交差点数はル である。そして道路全体を一筆書きのようになぞらえ て、これを一直線に延ばして考えれば、大部分の信号 交差点を4差路とすると、この直線に同じ交差点が二 度あらわれる。それゆえ長さAに信号数が2かなので、 これと式(5)より信号の密度λについて

$$\lambda \sim \frac{2r\nu}{\Lambda} = \frac{2r\Lambda}{\pi S} \tag{6}$$

が得られる。したがってこれと式(3)より平均走行速度 $\overline{v}$ が道路密度A/Sによって

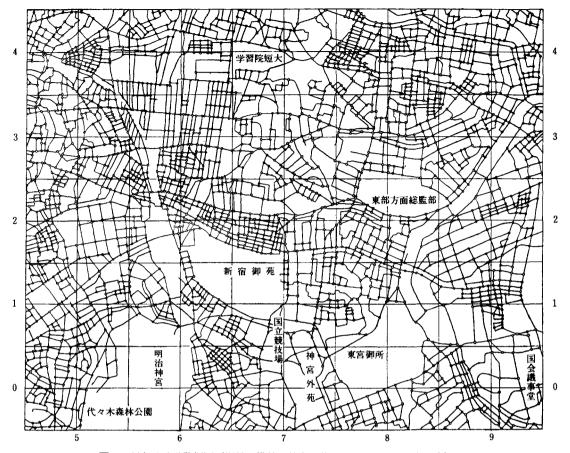
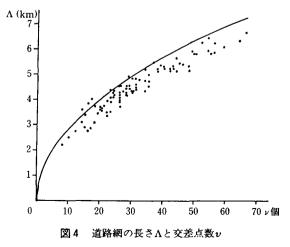


図3 対象地域道路網図(縦軸と横軸の数字は基準メッシュコードを示す)

$$\overline{v} \sim 1 \left( \frac{2\alpha r \Lambda}{\pi S} + \beta \right)$$
 (7)

と説明できることがわかった(文献[1])。この式は、 道路延長 $\Lambda$ が大きくなれば平均走行速度 $\overline{v}$ が落ちるこ とを具体的に関数形で示したものであり、道路網とい うものを考えるうえで重要なものと考えられる。



さてここで対象地域の道路延長Aは一定とし、面積 Sを変化させることを考えよう。つまり流動の起点や 終点の道路延長あたりの密度を一定とすれば、面積S が小さいときは単位面積あたりの流動量が大きく、道 路密度A/Sも高いコンパクトな状況を表わし、面積S が大きいときは単位面積あたりの流動量が小さく、道 路密度A/Sも低い状況を表わしている。

このとき距離 $\sqrt{S}$ を走行する平均所要時間 T(S) は式(7) より

$$\overline{t}(S) = \frac{\sqrt{S}}{\overline{v}} \sim \sqrt{S} \left( \frac{2\alpha r \Lambda}{\pi S} + \beta \right)$$
 (8)

となる。面積Sの領域が正方形であれば√Sはその一辺であり、式(8)は端から端までの所要時間を表わしている。また領域が不定形(角数の多い多角形)で表わされるようなものであっても、その領域内で一様に発生するトリップの平均トリップ長は√Sに比例するので(文献[4])この距離を想定した。

式(8)の右辺をSのみの関数と考えれば,これは $S=2lpha r\Lambda/(\pieta)$ で最小値をとり,このときの道路密度は

$$\frac{\Lambda}{S} = \frac{\pi \beta}{2\sigma r} \tag{9}$$

と表わされる。そこで式(4)のところと同じ実際の数値  $\alpha=20($ 秒),  $\beta=60($ 秒/km<math>), さらにすべての交差点に信 号があるとして r=1を式(9)にいれると、最短所要時間 を与える道路密度が

$$\frac{\Lambda}{S} = \frac{3\pi}{2} (\approx 4.7) \quad (km/km^2) \tag{10}$$

と計算できる。

ところで式(8)は所要時間の近似式であり、上式(10)は 近似式の最小を与えるものであるから3π/2という数 値にそれほどこだわらなくてよいかもしれない。しか しこのような状況で最短所要時間を与える道路密度が 存在する。すなわち道路密度A/Sが大きくても時間が かかるし、道路密度が低くても時間がかかり、中間の どこかに最小となる密度が存在するということが判明 したことが重要である.

さて、これまで述べたことはさまざまな道路パター ンで一般的に成立すると考えられるが、以下に表示し やすい例を呈示することにする。まず対象地域を正方 形とし、ここに格子状の道路網を考え総延長を100kmと する. 式(10)で得られた密度に近いものとして 4 (km/

(格子間隔 125m)

km²)を表示すると、図5の(a)のようになる。これは5 km×5 kmに縦横10本ずつ計20本の道路があり、交差点 間隔は500mとなっている、先の式(4)のところの議論か ら信号数 n, 距離 l を走行するときの平均所要時間(混 雑が無いという仮定のうえだが) テは

$$\overline{t} \sim 20n + 60l(2) \tag{11}$$

であった. そこで図5(a)において端から端まで走行 するとすれば、上式においてn=10、l=5とおいて 所要時間は約500秒と得られる。一方これよりコンパク トなものとして図5の(b)のような一辺が半分の2.5 km (面積1/4) のものを考えると, 道路密度は4倍と なり縦横20本ずつ計40本の道路があり、交差点間隔は 125mとなっている. そこで式(11)より端から端まで2. 5kmの所要時間を計算すると、n=20、l=2.5より約 550秒となり距離が半分になったにもかかわらず,所要 時間は図5の(a)のときよりも余計にかかることがわ かった。数値の差は50秒であまりないように見えるか もしれないが、図5の(b)の場合は交差点間隔が125m と短く,現実には60km/時の定常走行に達しないうちに 減速をよぎなくされることが多いはずで、仮に定常走 行が30km/時だとすればβ=120(秒/km)となり、所要時 間は700秒となってしまう.

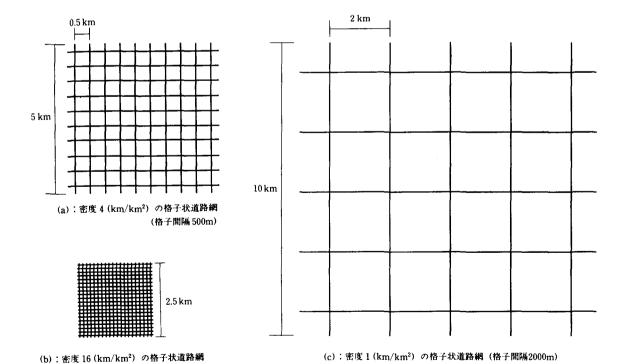


図5 密度の異なる格子状道路網

次に(a)よりも密度の低いものとして図5の(c)のように一辺を倍の10kmに伸ばしたものを考えよう。今度は道路密度は1/4となり縦横5本ずつ計10本の道路があり、交差点間隔は2kmとなっている。前と同様に式(11)より端から端まで10kmの所要時間を計算すると、n=5、 l=10より約700秒となり、図5の(a)の場合が最短所要時間の道路密度に近いことを実例として示しているといえるだろう。

道路を走行するさいの信号による停止を考慮に入れて、前述のような状況のもとで最短所要時間を与える 道路密度を算出した。単純な仮定の下での結果で問題 もあるが、'最適' な道路密度というものが存在すると いうことは、都市を設計する場合に示唆を与えるので はないかと思っている。ただこれには混雑による速度 の低下を考慮しておらず、これを含めて最適を得るの が今後の課題である。

### 5、おわりに

本論文では、ある理想化された状況において、道路における平均走行時間が信号数と走行距離で説明できるということをもとにしている。実際このような簡単なもので議論することは、現実の大都市における道路交通の実状を考慮すると、強引で単純すぎる、といわれるかもしれない。しかし議論の出発点としては、簡潔であればあるほど実り豊かな議論が可能になるのではないだろうか。筑波学園都市という計画されて道路が整備されている都市に居住しているからこそ、最初の実証がうまくいき、このような展開が可能になった。

本論文で主張したかったことは,道路という線的な都市施設は他の道路と独立ではなく,場合によっては互いに他の本来の目的や機能を制限するという根本的な性質をもっているという点である。もちろん昔から道路は互いに連結していることにより,どこにでもゆくことができるという意味では,互いに他の役割を助け合って1つのシステムを作り上げてきた。しかし自動車の増加,それにともなう信号機の設置等が互いに足を引っ張る関係を道路網にもたらした,という言い方もできるだろう。このような意味において,本論文で指摘したことは,現代の都市活動を象徴しているとも考えられる。

本特集の趣旨からいえば、本来高密な都市と低密な 都市におけるエネルギー消費を、道路交通の面から計 算しなければならなかった。自動車の燃費をめぐって はさまざまな論文や多くの説があるにもかかわらず、

ごく平均的なわれわれが通常運転するときの燃費を, 大まかに、しかし本質的部分をはずさないで推定しよ うとすると、ことはそれほど簡単ではない、さまざま な局面で出された燃費に関する数値のどれを信用すべ きか途方にくれてしまうからでもある。そこでここで はストップウォッチさえあればわれわれにも測れる時 間というもので、都市の密度について論じてみた。時 間がかかれば当然エネルギーも消費するから、時間で みてもある程度のことはわかるかもしれないし、信号 で止まったり発進したりすればそれ相当のエネルギー を消費することだろう. しかし消費エネルギーを所要 時間で代替することは本質的に無理であり、最終的に はエネルギーで算出しなければならないと考えている. あと2年ある研究期間の間で試算するつもりであり、 この点についてはさまざまな方からご教示願いたいと 考えている.

最後にこの研究は次の2つの研究会に関係して得られたものである。ひとつは文部省科研費重点領域研究の研究班であり、ご指導ご助言をいただいた責任者の伏見正則先生をはじめ分担者の先生方に謝意を表します。また、もうひとつは建設省総合技術開発プロジェクトの都市構造とエネルギー研究会であり、建築研究所河中俊都市計画研究室長をはじめ研究班の皆様に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 腰塚武志,今井和敏(1991):平均走行速度と信号 密度,日本都市計画学会学術研究論文集26号,pp. 547-552,
- [2] 建設省道路局編(1989):昭和63年度道路交通センサス一般交通量調査基本集計表、交通工学研究会、
- [3] 腰塚武志 (1978): 道路網と交差点。都市計画103号, pp.36-41.
- [4] 腰塚武志 (1978): 地域内距離, Journal of the Operation Research Society of Japan Vol. 21, pp. 302-319.
- [5] 腰塚武志 (1993):信号停止を考慮した最短所要時間道路密度。日本OR学会春季研究発表会アプストラクト集, pp.18-19.
- [6] (財)計量計画研究所 (1993): 広域都市群レベルの エネルギー消費及び省エネルギー対策の効果の把握に 関する方法論の検討ー省資源・省エネルギー型国土建 設技術の開発ー平成 4 年度都市構造とエネルギー研究 会報告書、pp.1-180.