

輸送システムにおける走行距離に関する研究(第1報)

慶應義塾大学 千住鎮雄・盧 淵源
日本鋼管(株) 福原 猛

A STUDY ON THE DISTANCE OF DRIVING IN PHYSICAL DISTRIBUTION SYSTEM (REPORT No. 1)

SHIZUO SENJU and IUAN-YUAN LU, *Keio University*
TAKESHI FUKUHARA, *Nihon Kokan Co.*

(Received July 29, 1976; Revised December 7, 1976)

Abstract. Recently the importance of physical distribution system is emphasized, and various research about it are studied. When comparing alternative physical distribution systems on viewpoint of profitability, the distance of driving of trucks is one of the factors that mostly complicate the problem.

When the total distance of driving required for carrying given goods is changed, the number of truck, driver and helper, etc., is changed too. It greatly influences the total cost of physical distribution system.

On the other hand, because the total distance of driving is changeable by the other factors, such as the demand of goods, the period of supply, the size of truck, the way of dividing the delivery route of trucks, etc., it is rather difficult to infer it in advance theoretically. If it is able to infer the distance of driving simply with allowable error before adopt a new physical distribution system into practice, it is very convenient for examining the optimal physical distribution system.

The purpose of this paper is to derive some approximate formula from which we could infer the distance of driving in advance, before adopted alternative physical distribution systems into practice.

At first, the consideration of the shortest route on some typical models, such as radial type, join-2-points type, circle type, straight-line type, etc., instead of the delivery route of real world network has helped us to find out the common characteristics about the distance of driving.

Secondly, some approximate formula of the distance of driving on the real world network has been studied out by means of 'Go' Board model. Based on the experimental results with maps and actual data from one soft-drinking company, the degree of error of the approximate formula has been examined.

1. はじめに

近年、合理的な輸送システムを考えることの重要性が指摘され、多くの研究がなされているが、現実の輸送関連問題はきわめて複雑であり、残された問題もまた非常に多い。その中の1つに、異なる輸送手段や配送方式によって生じる延走行距離の“変化”を調べる問題がある。

1例として、全国に販売網を持つ清涼飲料水会社が、自社の状況・目的に適した特殊トラックを開発したり、選択したりする場合を考えると、特定地域の個々の輸送距離最小化問題とは別に、トラックのサイズや構造（積み卸しの機械化のレベルなど）の違いが輸送コストにどんな影響を及ぼすかを調べる必要がある。その際に遭遇する困難な問題の1つは、異なるトラックを使った場合に、全国販売網における延走行距離がどう変わるかをマクロに、事前に推定する問題である。

また、小売店に一度にとどける品物の量（ロット・サイズ）を決める問題（逆に云えば配送間隔を決める問題）においても、ロット・サイズによって延走行距離が変化し、輸送コストが変わるのを無視することはできない。

本研究においては、輸送距離最小化問題を特にほりさげることがを目的とはせず、“トリップ数”（後述）を仲介として、異なる輸送手段や配送方式を採択したときの延走行距離の“変化”を調べることに重点を置いて近似式を導き、あわせて、地図による机上実験と某清涼飲料水会社の現実のデータとに基づいて、その近似式の誤差の程度を検討したものである。

2. 代表的道路モデルにおける走行距離

本研究では解析の便宜上、トラックが商品を積んで営業所を出発し、多くの小売店に商品を配送して再び営業所までもどってくるまでの1サイクルを1トリップと呼び、このトリップ数を使って走行距離を調べることにする。

一定期間に配送すべき商品の総量が与えられているとき、トラックの積載量が2倍になればトリップ数は半減するし、各小売店にとどける商品のロット・サイズが平均的に2倍になれば全小売店を1巡するに要するトリップ数は倍増するなど、トリップ数は輸送の車輛や方式による延走行距離の違い

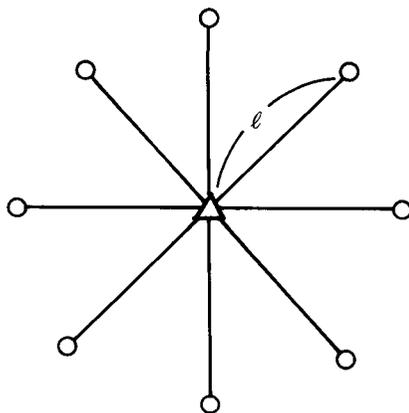


図1. タイプ1：放射型

をあらわすのに便利な指標だからである。

さて、現実の複雑な道路網における走行距離を検討する前に、4つの代表的な道路モデル——1.放射型、2.2点連結型、3.円周型、4.直線型の各道路モデル——をとりあげ、配送区域内にあるN個の小売店をrトリップに分けて重複することなく1巡するときの延走行距離 $L^r(N)$ を調べる。

タイプ1. 放射型モデル

図1に示すように、営業所(図1の△印)からN個の小売店までの距離 ℓ が等しく、各店間を直接につなぐ通路がないため、ある店から他の店へ行くには必ず営業所まで戻らなければならないという特殊な場合を放射型モデルと呼ぶ。このタイプでは、すべての店を残りなく、かつ重複せずに1巡するためには、何トリップに分けて走っても、N個の店まで往復しなければならないので、延走行距離は $2N\ell$ となってトリップ数rに無関係である。即ち

$$(1) L^r(N) = 2N\ell$$

この場合には、たとえ大型トラックを使うことによってトリップ数が減っても走行距離の合計は短縮できないので、大型トラックのメリットはない。

タイプ2. 2点連結型モデル

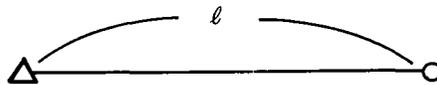


図2. タイプ2: 2点連結型

1つの工場から1つ営業倉庫まで商品を大量輸送するときや、1つの営業所から離れた所にN個の小売店が密集している場合には、図2に示すような、2点を連結するモデルと考えることができる。この場合には、rトリップで走れば、2点間をr回往復することになるので

$$(2) L^r(N) = 2\ell r$$

この場合には、もしも積載量2倍の大型トラックを使えばトリップ数は半減するので、走行距離の合計も半分になり、大型トラックのメリットは最大に発揮される。

タイプ3. 円周型モデル

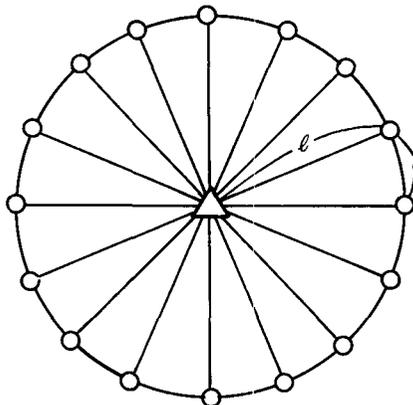


図3. タイプ3: 円周型

図3に示すように、営業所を中心とした半径 ℓ の円周型道路上に、 N 個の小売店が等間隔 e で並んでおり、かつ、各小売店と営業所との間にも道路がある場合を円周型モデルと呼ぶ。

この場合には、 N 個の小売店を Γ トリップで重複せずに訪問するときの延走行距離 $L^{\Gamma}(N)$ は次式で与えられる。

$$(3) \quad L^{\Gamma}(N) = 2\ell\Gamma + (N - \Gamma)e = (2\ell - e)\Gamma + Ne$$

従って大型車のメリットはある程度発揮される。

タイプ4. 直線型モデル

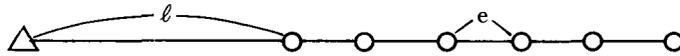


図4. タイプ4：直線型

図4に示すように、営業所(図4の△印)から出ている1本の道路上に、同等と見なせる N 個の小売店が等間隔 e で並んでいる場合を直線型モデルと呼ぶ。但し、営業所から最初の店までの距離を ℓ とする。この場合に、1トリップで h 店(h は N の整数分の1とする)訪問できる大きさのトラックで配送すれば

$$\begin{aligned} \frac{N}{h} L^{\Gamma}(N) &= 2 \{ [\ell + (h-1)e] + [\ell + (2h-1)e] + \cdots + [\ell + (N-1)e] \} \\ &= \frac{2N\ell}{h} + \frac{N(N+h-2)e}{h} \end{aligned}$$

この式を、トリップ数 $\Gamma = N \div h$ で書き直せば

$$(4) \quad L^{\Gamma}(N) = [2\ell + (N-2)e]\Gamma + Ne$$

この場合にも大型トラックのメリットはある程度発揮される。

上述のように、4つの道路モデルにおける延走行距離の理論式は、いずれの場合にも

$$(5) \quad L^{\Gamma}(N) = \lambda_{(N)} \cdot \Gamma + \mu_{(N)}$$

のように、トリップ数 Γ の1次式で表わされるので、 Γ を横軸に取り $L^{\Gamma}(N)$ を縦軸にとると図5のように直線として表現できる。従って、直線上の任意の2点が決まれば直線は決まる。

いま、過去の実績などから、2つの異なるトリップ数 s, t に対する延走行距離 $L^s(N), L^t(N)$ がわかったものとすれば、トラックの大きさ、あるいは各小売店に対するロット・サイズが変わることによって決まる任意のトリップ数 k に対する延走行距離 $L^k(N)$ は、上述のどの道路モデルの場合にも、次の(6)式で与えられる。

$$(6) \quad L^k(N) = \frac{1}{t-s} \{ (t-k)L^s(N) + (k-s)L^t(N) \}$$

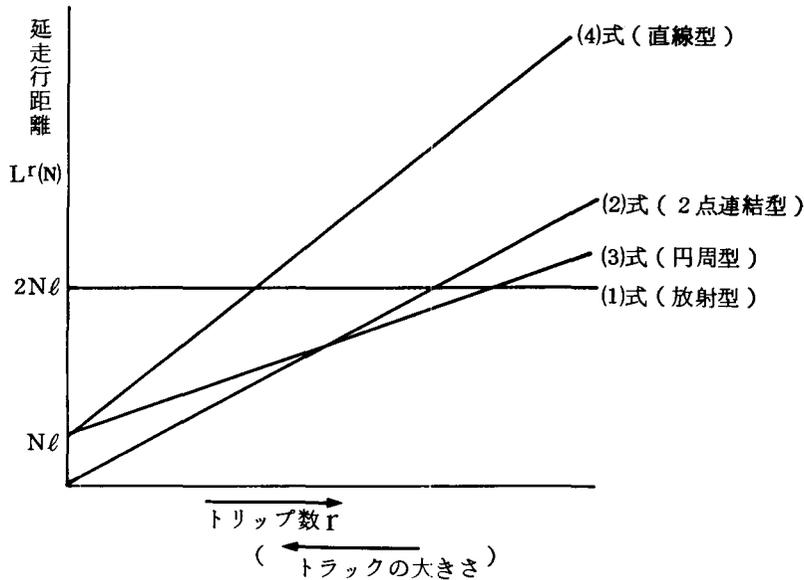


図5 r と $L^r(N)$ との関係

さて、上述の4つの代表的な道路モデルの相互関係を調べてみよう。

直線型において、 $\ell = ae$ とすれば、(4)式は次の(7)式のように書き直される。

$$(7) \quad L^r(N) = Ne + \{ 2(a-1)e + Ne \} r$$

ここで、(i)小売店の存在する領域の長さ $(N-1)e$ を一定として、小売店の密度が増せば $(N$ が増えて間隔 e が小さくなれば)、(7)式から分かるように、延走行距離を表わす直線の勾配が小さくなる。(ii)営業所までの距離が小さく $(a$ が小さく) になると、勾配は小さくなる。(iii) $e \rightarrow 0$ のときには、直線型が2点連結型に近づく。(iv) 円周型においても $\ell = ae$ で表わしたとき、 $a(\text{直}) = a(\text{円}) - (N-1)/2$ なる関係があるならば、直線型と円周型とのグラフ上の直線が一致する。また、(v) 直線型において、営業所が小売店群の中心にあるときは、

$$(8) \quad L^r(N) = Ne \left\{ \frac{3N-2}{2N-2} \right\} + Ne r \left\{ \frac{N-2}{2N-2} \right\}$$

になるので、直線の勾配は、営業所が小売店群の外にあるときより小さくなる。

このように、直線型道路モデルにおいて、小売店の数、その密度、営業所の位置などを変えることによって、他のタイプの道路モデル(放射型を除く)における延走行距離をかなり自由に表わすことができるという便利な性質のあることがわかった。

3. 一般道路における走行距離

さて、現実の一般道路がモデル1～4をまぜ合わせた性質を持ったものであると近似的に見なせるならば、一般道路の走行距離も、2つの異なるトリップ数に対応する延走行距離がわかっている場合には、(6)式によって近似的に表現できるものと思われる。これを調べるために実際の地図を用いて机上実験を行なった。

実験方法：

道路条件が違う世田谷区と、墨田・江東両区においてランダムに中学校をそれぞれ24校選び、その区域の端に架空の営業所を定め、24校を1～4トリップにわけて訪問するときの延走行距離を地図上でカービメーターを用いて測定した。実験者AとDは何回も店の訪問順序と経路を変えて、走行距離が短くなるように試みてその最短路をとったが、その他の実験者は直観的な一度の判断で最短と思われる走り方をした。これは、距離そのものよりも、異なるトリップ数による延走行距離の“変化”を調べることに重点を置いたためである。

実験結果：

表1. 地図による実験結果(単位: Km)

実験者	世 田 谷 区			墨 田 ・ 江 東 両 区		
	A	B	C	D	E	F
L ¹ (24)	3 7.3 5	4 1.4 0	4 2.7 5	3 1.5 0	3 3.7 5	3 4.4 2
L ² (24)	4 7.2 5	5 4.9 0	5 3.3 3	3 9.1 5	4 0.2 8	4 1.5 0
L ³ (24)	6 1.4 3	6 1.6 5	6 2.7 8	5 1.0 7	5 1.9 8	5 7.1 5
L ⁴ (24)	6 8.1 8	7 3.5 8	7 5.8 3	5 8.2 8	6 2.1 0	6 6.8 3

表1に示す実験結果の中のL¹(24)とL⁴(24)から(6)式を用いてL²(24)とL³(24)を推測し、実験値との誤差を調べた結果を表2に示す。L¹(24)とL²(24)とから(6)式によ

表2. (6)式による推測値と実験値との比較

実験者		世 田 谷 区			墨 田 ・ 江 東 両 区		
		A	B	C	D	E	F
L ² (24)	推測値	4 6.6 2	5 2.1 2	5 3.7 7	4 0.4 2	4 3.2 0	4 5.2 2
	誤 差	0.8 %	- 5 %	0.8 %	3.2 %	7.2 %	8.9 %
L ³ (24)	推測値	5 7.9 0	6 2.8 5	6 4.8 0	4 9.3 5	5 2.6 5	5 6.0 3
	誤 差	- 5.6 %	1.9 %	3.2 %	- 3.3 %	1.2 %	- 2 %

って他の延走行距離を推測した場合もほぼ同様の結果が得られた。即ち、実験者によって延走行距離自体は確かに違うが、異なるトリップ数による延走行距離の間には(6)式の関係が比較的良好に保たれていることがわかった。

4. 正方碁盤型モデルにおける走行距離

本節では、ただ1つのトリップ数に対応する延走行距離のデータから、任意のトリップ数に対応する延走行距離を推測する問題を取扱う。そのために、その前段階として、一般道路に近いと考えられる正方碁盤型モデルを取り上げることにする。

4・1 正方碁盤型モデルにおける近似式

ここで云う正方碁盤型モデルとは、図6に示すように、縦横等間隔 e で同数の道路が並び、営業所

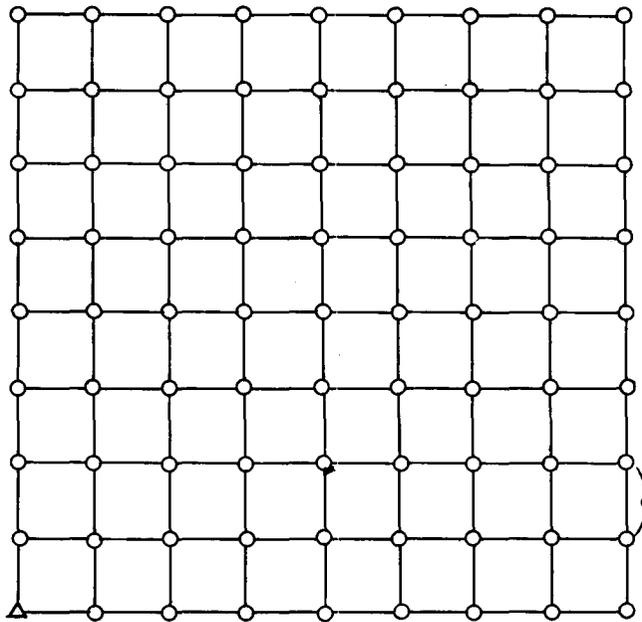


図6 タイプ5： 正方碁盤型 営業所が角にある

が碁盤の角(図6の△印)にあり、道路のすべての交点(ただし営業所を除く)に小売店がある場合で、これをタイプ5とする。

碁盤型道路の延走行距離 $L(N)$ をすべての N について正確に表わす一般式を作ることは困難である。そこで、(6)式が正方碁盤型モデルにおいても近似的に成り立つことを前提として式を誘導した上でその誤差の程度を調べてみる。

先づ、全小売店を1トリップで訪問するときの延走行距離を調べる。縦横それぞれ偶数本ずつの道路がある場合(小売店の数 N が奇数の場合)には、営業所を出て帰るまでに、距離 $1e$ 走れば1つの店に到着するので、合計 $(N+1)e$ だけ走ることになる。両方の道路の本数が奇数(店数 N は偶数)

の場合には、最後の店から営業所までは $2e$ 走らなければならない。従って、 $(N+2)e$ だけ歩くことになる。即ち、 $L^1(N)$ の理論式は

$$(9) \quad L^1(N) = (N+1)e \quad (N \text{ が奇数の場合})$$

$$(9') \quad L^1(N) = (N+2)e \quad (N \text{ が偶数の場合})$$

となる。

次に、 N 店を N トリップで訪問するときの延走行距離 $L^N(N)$ を考える。

先ず、縦横それぞれ3本ずつの道路がある正方碁盤型モデルを考えると、営業所からの距離が、 $e, 2e, 3e, 4e$ である小売店の数はそれぞれ2軒、3軒、2軒、1軒である。一般に、縦横それぞれ m 本ずつの道路がある正方碁盤型モデルでは、営業所から小売店までの距離とその軒数は表3に示すとおりである。

表3 タイプ5における営業所から小売店までの距離とその軒数との関係 ($r = N$ のとき)

小売店までの片道距離	軒数
$1e$	2
$2e$	3
$3e$	4
.....
$(m-1)e$	m
me	$(m-1)$
.....
$2(m-1)e$	1

従って、 N 店 ($N=m^2-1$) を N トリップで訪問するときの延走行距離 $L^N(N)$ は次式で表わされる。

$$L^N(N) = 2 \cdot 1e \cdot 2 + 2 \cdot 2e \cdot 3 + \dots + 2(m-1)e \cdot m + \dots + 2 \cdot 2(m-1)e \cdot 1$$

これを变形すれば、 N が奇数でも偶数でも、 $L^N(N)$ の理論式は次式で表わされる。

$$(10) \quad L^N(N) = 2(m-1)m^2e = 2(\sqrt{N+1}-1)(N+1)e$$

さて、 N が奇数の場合には、 $L^1(N)$ を表わす(9)式と $L^N(N)$ を表わす(10)式とを(6)式に代入すれば

$$(11) \quad L^r(N) = \frac{N+1}{N-1} \{ (2\sqrt{N+1}-3)r + (N+2-2\sqrt{N+1}) \} e$$

同様にして、 N が偶数の場合には、

$$(11') \quad L^r(N) = \frac{1}{N-1} \{ [2(N+1)\sqrt{N+1}-3N-4]r + \{ (N+1)(N+2) + N - 2(N+1)\sqrt{N+1} \} \} e$$

$$= (11) \text{ 式} + \left(\frac{N-r}{N-1} \right) e$$

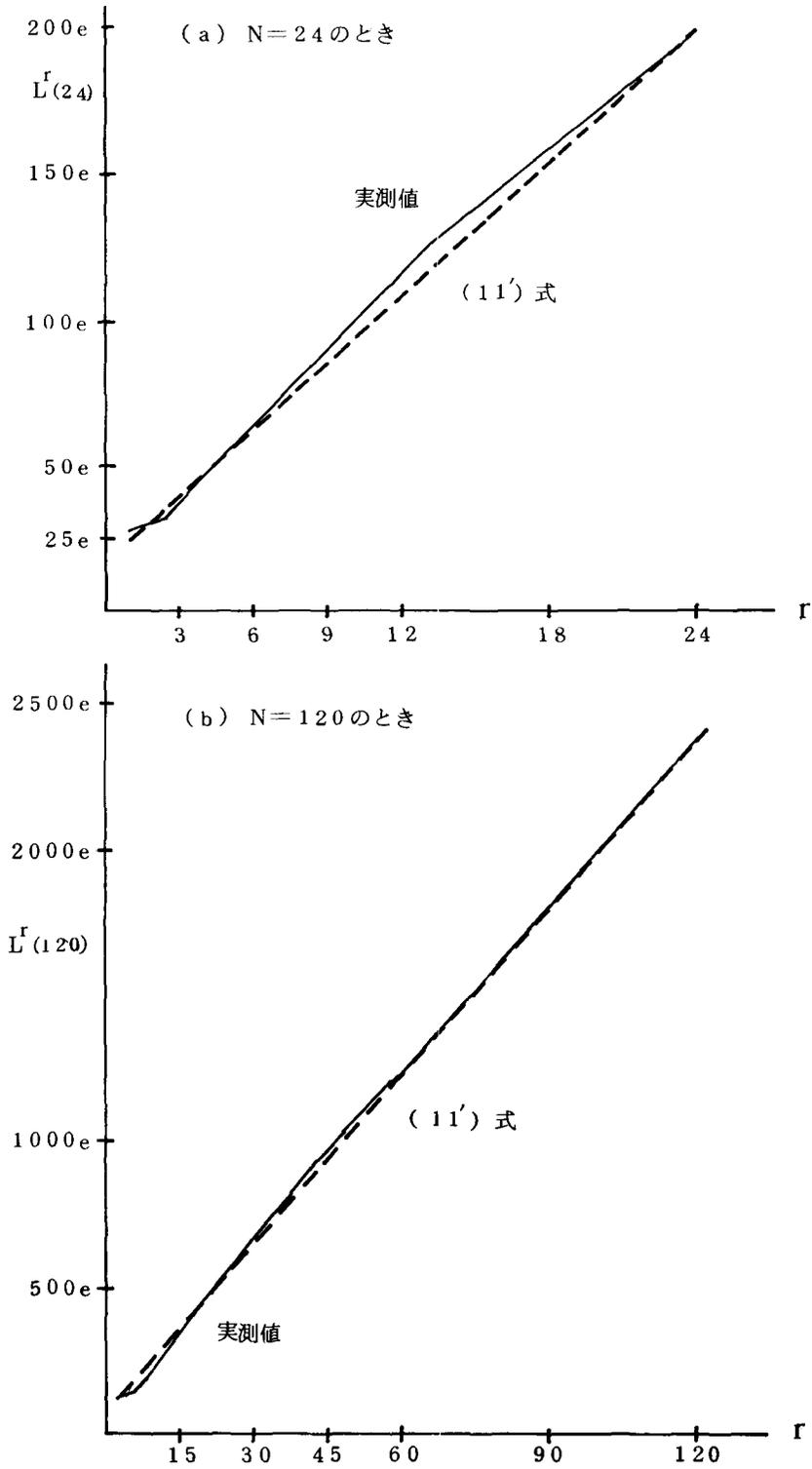


図7 (11') 式推測値と基盤型実測値との比較

なる近似式が得られる。なお、 $N \rightarrow$ 大のとき、近似的に $N - 1 \div N \div N + 1$ とみなせば

$$(12) L^r(N) = \{ (2\sqrt{N} - 3) r + (N - 2\sqrt{N}) \} e$$

正方基盤型モデル ($N = 24$ ならびに $N = 120$ の場合) の図上で、トリップ数 r を変えて計算した最短距離の実測値と、近似式として導き出した (11') 式による推測値との誤差の検討を行った結果、図 7 に示すように、両者はかなりよく一致していることがわかった。

4・2 一般道路への適用性

先づ、第 3 節の地図実験 ($N = 24$) による走行距離と、 $N = 24$ の基盤型における実測値及び (11') 式による推測値を使って、それらの比率 $L^a(N) / L^t(N)$ を比較した結果 (表 4 参照)、両者はかなりよく一致していることがわかった。

表 4 $L^a(24) / L^t(24)$ の比較

	1. 基盤型	2. 世田谷 区	3. 墨田・江 東両区	4. 1, 2 の 誤 差	5. 1, 3 の 誤 差	6. (11') 式	7. 6, 2 の 誤 差	8. 6, 3 の 誤 差
L^2/L^1	1.1 5	1.2 7	1.2 0	1 0 %	4 %	1.3 0	- 2 %	- 8 %
L^3/L^1	1.4 6	1.5 2	1.6 0	4	1 0	1.6 1	- 6	- 1
L^4/L^1	1.7 7	1.7 9	1.8 8	1	6	1.9 1	- 6	- 2
L^3/L^2	1.2 7	1.2 0	1.3 3	- 5	5	1.2 3	- 3	8
L^4/L^2	1.5 3	1.4 0	1.5 6	- 8	2	1.4 7	- 5	6
L^4/L^3	1.2 1	1.1 7	1.1 7	- 3	- 3	1.1 9	- 2	- 2

注：2, 3 の値は各実験者の平均値

追加実験 1：

トリップ数 r が大きくなったときの状況を調べるため、実験者 A に世田谷区の地図で $r = 6, 8, 12, 24$ の実験を追加し (表 5 参照)、最小 2 乗法によりその延走行距離と r との関係を示す直線

表 5 地図による追加実験値 (単位：Km)

r	6	8	12	24
$L^r(24)$	83.7	100.8	137.7	253.4

を当てはめた結果

$$(13) L^r(24) = 9.68 r + 21.96 \text{ (Km)}$$

となる。一方、(11) 式によると

$$(14) L^r(24) = (7.7\Gamma + 17.6)e$$

となるので、 $e = 21.96 / 17.6$ Kmと置いて(14)式の定数項を(13)式の定数項と等しくすると

$$(15) L^r(24) = 9.61\Gamma + 21.96 \text{ (Km)}$$

となり、 Γ の係数もほぼ等しくなる。即ち、平均的店間距離 e に適当な値を与えることによって、(11)式によって現実の道路の走行距離を近似的に表わし得ることがわかった。

追加実験2：

某清涼飲料水会社営業所の現実の小売店をプロットした地図の1区画(N=91)を選び、営業所がその区画の角にあると仮定して、それらを1~4トリップで回ったときの距離を地図上で測った結果

$$L^1(91) = 139 \text{ cm}, \quad L^2(91) = 145 \text{ cm}$$

$$L^3(91) = 174.5 \text{ cm}, \quad L^4(91) = 207.5 \text{ cm}$$

となった。これらの実験値と、近似式(12)式を用いて計算した延走行距離との誤差を比較した結果、表6に示すようになりによい近似が見られる。

表6 実例(N=91)の $L^s(91) / L^t(91)$ の比較

	(12) 式	実験値	誤差
L^2 / L^1	1.18	1.04	-12 %
L^3 / L^1	1.36	1.26	-7
L^4 / L^1	1.53	1.49	-3
L^3 / L^2	1.15	1.21	5
L^4 / L^2	1.30	1.43	10
L^4 / L^3	1.13	1.19	5

これら3つの実験結果より、タイプ5の近似式(11)、(11')、(12)式が一般道路にもかなりよく適用できることがわかった。即ち、1つのトリップ数における延走行距離の実績値がわかっている場合には、(11)、(11')または(12)式とそれの実績値とから先ず平均的な店間距離 e を求め、それと(11)、(11')または(12)式によって、他の任意トリップ数の走行距離を推測することができるのである。

5. 現実問題での適合例

ここでは某清涼飲料水会社の実際のデータに基づいて検証を行なう。

清涼飲料水の需要量は夏は多く、冬は少ない。従って、夏も冬も週1回小売店を訪問するとすれば、夏は冬に比べ1回の訪問でとどける品物の量(ロット・サイズ)が大きくなる。従って、1トリップで訪問できる店数は夏の方が少ないので、営業所の販売領域全体を1巡するためのトリップ数が増える。従って、夏と冬の延走行距離も相当違ってくる。

实例 1 :

某清涼飲料水会社名古屋地区の営業所 A において、延小売店数は 680 軒で、それらが 9 ルートに分けられている。2 月には各ルートとも 1 日 2 トリップ、週 5 日勤務で、1 週間の延走行距離は 1,350 Km である。また 8 月には平均 1 日約 2.5 トリップ、週 6 日勤務で、1 週間の延走行距離は 2,050 Km である。

従って、2 月の 1 週間の延トリップ数 $\Gamma = 2 \times 5 \times 9 = 90$ 、8 月の 1 週間の延トリップ数 $\Gamma = 2.5 \times 6 \times 9 = 135$ となる。

(12) 式によると、2 月では $L^{90}(680) \doteq 5052e$ 、8 月では $L^{135}(680) \doteq 7263e$ となる。

2 月の 1 週間の延走行距離から 8 月の 1 週間の延走行距離をこれらの値を使って、推測してみると、 $1,350 \text{ Km} \cdot \frac{7263e}{5052e} \doteq 1,930.5 \text{ Km}$ になる。

この推測値と、前述の 8 月の実際の延走行距離との誤差は 6% になる。

この实例から、小売店数の多い現実の企業において、販売領域全体の延走行距離を予測する現実問題に、地図実験により確かめられていた正方碁盤型の近似式 (11)、(11')、(12) 式を適用できることが明らかとなった。

6. むすび

本研究ではまず、代表的な 4 つの道路モデルにおいて、延走行距離がトリップ数の 1 次式で表わされることを示し、この性質が現実の道路においても近似的に成り立つことを実験によって確かめた。これによって、現実の道路において 2 つのトリップ数に対応する延走行距離がわかっている場合には、それらから任意のトリップ数に対応する延走行距離を近似的に推定し得ることがわかった。

しかし現実には、ある配送区域のある特定のトリップ数で巡回しているときの延走行距離だけしかわかっていない場合に、トラック・サイズを変えたり、小売店に配送する品物のロット・サイズを変えたりするとき（つまりトリップ数を変えるとき）の延走行距離の変化を知りたい場合が多い。この問題を解決するために、碁盤型道路モデルを考え、これと上述の 1 次式の関係式を使って、1 つのトリップ数に対応する延走行距離から、他のトリップ数に対応する延走行距離を推定する近似式を導き、実験によって近似の程度を調べた。

このように本研究では延走行距離の最小化問題を検討することはしなかった。また得られた近似式による誤差が 10% に達する場合もあることがわかった。従って本研究の結果は、個々の道路網における延走行距離自体を推定するために使うのは適当でないが、全国の販売網に使う特殊トラックを設計あるいは選択したり、全国的レベルで配送間隔を検討したりするようなマクロな検討を行なう場合に適している。またミクロな問題に対しても、精密な分析を行なう前段階として、輸送コストに及ぼす多くの要因の感度分析を行なう場合には適しているものと思われる。

連絡先：盧 淵源

慶応義塾大学管理工学科

〒223 横浜市港北区日吉町3の14の1, TEL: 044(63)1141