

都市の歩行者流動量の推定 —愛知県豊橋市を対象として—

M2010MM034 櫻井洋子

指導教員：腰塚武志

1 はじめに

都市の中心市街地や商店街の交通量の調査を行っている地方自治体は多い。しかし調査結果の分析は十分に行われておらず、これらの調査が有効に利用されていない可能性がある。一方、歩行者流動の分析方法はいくつか提案されている。腰塚ら [1] は、駅から線形にのびる商店街の歩行者流動のモデル化を行った。そしてモデルを用いて土浦市の歩行者流動量調査データから土浦市の駅前商店街全体の流動量を求め、商店街全体での歩行者流動量の経年変化を示す指標を求めた。また田村ら [2] は道路網上のあらゆる 2 点間の移動を対象とした距離分布と流動量分布を解析的に導出し、茨城県道路網の分布・流動量の比較を行っている。そこで本研究では、少数の調査地点から市街地の歩行者流動量を再現できる 2 次元モデルを作成する。そして市街地の歩行者流動の再現と、歩行者流動量 (人) の推定を行うことを目的とする。研究対象として愛知県豊橋市の歩行者流動を事例に取り、歩行者流動量は豊橋市内交通量調査 [3] の結果を利用する。

2 歩行者流動モデル

モデルの領域を図 1 のような格子状の田の字型の領域とし、各辺に図 1 のように x_{ij} と名付け、田の字の左下に駅があるとする。田の字の 1 区画の 1 辺の長さは、全て l とし、各辺の左端または下端の基準点 O から x 離れた地点を地点 x とする。歩行者は辺上に出発地・目的地を持ち、辺上を最短経路で移動する。複数の最短経路がある場合には、各経路を利用する確率は等しいものとする。

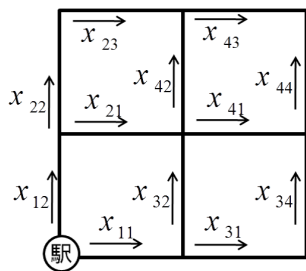


図 1 格子状田の字型モデル

3 流動パターン

流動を「駅からの流動」と「ネットワーク (以下 NW とする) における内々の流動」の 2 つに分ける。

3.1 駅からの流動量 (人)

出発地は格子上の点 (駅) で、目的地は NW 上に一様に存在している場合、地点 x を通過する歩行者量は、駅からの最短経路上に地点 x が存在する目的地の量と等しい。ただし目的地に到達する経路が地点 x を通る経路以外に

もある場合には、目的地の量に地点 x を通る経路を利用する割合をかける。そして駅からの流動量の全体を 1 と基準化するため、求めた目的地量を全体量の $12l$ で割る。この方法でそれぞれの辺の地点 x の駅からの基準化した流動量 (人) を求める。その値に駅からの流動量 α (人) をかけた値が、地点 x の駅からの流動量 (人) である。

3.2 NW における内々の流動量 (人)

出発地・目的地ともに NW 上に一様に存在している場合、地点 x を通過する歩行者量は、出発地から目的地への最短経路上に地点 x が存在するペア数と等しい。ただし目的地に到達する経路が地点 x を通る経路以外にもある場合には、ペア数に地点 x を通る経路を利用する割合をかける。そして NW における内々の流動量の全体を 1 と基準化するため、求めたペア数を全体量の $(12l)^2$ で割る。この方法でそれぞれの辺の地点 x の NW における内々の基準化した流動量 (人) を求める。その値に NW における内々の流動量 β (人) をかけた値が、地点 x の NW における内々の流動量 (人) である。

3.3 NW 全体での流動量 (人)

各辺の地点 x の駅からの流動量 (人) と NW 内々の流動量 (人) の総和を求め、図 1 の辺 x_{ij} の流動量総和 (人) $F_{ij}(x)$ とすると、

$$\begin{aligned} F_{12}(x) = F_{11}(x) &= \alpha \frac{6l-x}{12l} + \beta \frac{2x^2 + 8lx + 11l^2}{144l^2} \\ &= \frac{\beta}{72l^2} x^2 - \left(\frac{\alpha}{12l} - \frac{\beta}{18l} \right) x + \frac{\alpha}{2} + \frac{11\beta}{144} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{21}(x) = F_{32}(x) &= \alpha \frac{\frac{8}{3}l-x}{12l} + \beta \frac{2x^2 + 8lx + 24l^2}{144l^2} \\ &= \frac{\beta}{72l^2} x^2 - \left(\frac{\alpha}{12l} - \frac{\beta}{18l} \right) x + \frac{2\alpha}{9} + \frac{\beta}{6} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{22}(x) = F_{31}(x) &= \alpha \frac{\frac{7}{3}l-x}{12l} + \beta \frac{2x^2 - 12lx + 21l^2}{144l^2} \\ &= \frac{\beta}{72l^2} x^2 - \left(\frac{\alpha}{12l} + \frac{\beta}{12l} \right) x + \frac{7\alpha}{36} + \frac{7\beta}{48} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{23}(x) = F_{34}(x) &= \alpha \frac{\frac{4}{3}l-x}{12l} + \beta \frac{2x^2 + 8lx + 11l^2}{144l^2} \\ &= \frac{\beta}{72l^2} x^2 - \left(\frac{\alpha}{12l} - \frac{\beta}{18l} \right) x + \frac{\alpha}{9} + \frac{11\beta}{144} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{42}(x) = F_{41}(x) &= \alpha \frac{\frac{5}{3}l-x}{12l} + \beta \frac{2x^2 - 12lx + 34l^2}{144l^2} \\ &= \frac{\beta}{72l^2} x^2 - \left(\frac{\alpha}{12l} + \frac{\beta}{12l} \right) x + \frac{5\alpha}{36} + \frac{17\beta}{72} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{44}(x) = F_{43}(x) &= \alpha \frac{l-x}{12l} + \beta \frac{2x^2 - 12lx + 21l^2}{144l^2} \\ &= \frac{\beta}{72l^2} x^2 - \left(\frac{\alpha}{12l} + \frac{\beta}{12l} \right) x + \frac{\alpha}{12} + \frac{7\beta}{48} \quad (6) \end{aligned}$$

となる。

3.4 アクティビティの高い商店街の重みづけ

前述の 3.2 と 3.1 における議論は、12 辺のアクティビティが等しいことを前提としているが、実際には隣接した通りでもアクティビティが異なる場合がある．そこで「アクティビティ」とは「出発地・目的地として選ばれる頻度」を意味するとして、普通の商店街とアクティビティが高い商店街が混在している場合には、普通の商店街とアクティビティの高い商店街に「出発地・目的地として選ばれる頻度」の差 Δ を設けて、アクティビティの高い商店街に重みづけをする．つまりアクティビティの高い商店街の出発地・目的地に選ばれる頻度は、普通の商店街の $(1 + \Delta)$ 倍となる．図 2 のように辺 x_{11}, x_{31} がアクティビティの高い商店街の場合を例に挙げる．辺 x_{11}, x_{31} は、出発地・目的地として選ばれる頻度が他の 10 辺の $(1 + \Delta)$ 倍となるため、辺 x_{11}, x_{31} に関する流動は、 $(1 + \Delta)$ 倍することに注意しながら 3.1, 3.2 と同様の方法で、各辺の地点 x の駅からの流動量 (人) と NW 内々の流動量 (人) の流動量総和 (人) $F_{ij}(x)$ を求めると、

$$F_{11}(x) = -\frac{2\beta(\Delta^2 - 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta^2 + 7\Delta + 6) - 2\beta(2\Delta^2 + 7\Delta + 4)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{4\alpha(\Delta^2 + 9\Delta + 18) + \beta(9\Delta + 11)}{(12 + 2\Delta)^2} \quad (7)$$

$$F_{12}(x) = \frac{2\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{\alpha(\Delta + 6) + 2\beta(\Delta - 2)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{12\alpha(\Delta + 6) + \beta(9\Delta + 11)}{(12 + 2\Delta)^2} \quad (8)$$

$$F_{21}(x) = \frac{2\beta(\Delta + 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) - 8\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{16\alpha(\Delta + 6) + 6\beta(\Delta + 12)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (9)$$

$$F_{22}(x) = \frac{2\beta(\Delta + 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 4\beta(\Delta + 3)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{14\alpha(\Delta + 6) + 3\beta(5\Delta + 21)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (10)$$

$$F_{23}(x) = \frac{2\beta(\Delta + 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) - 8\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{8\alpha(\Delta + 6) + 3\beta(\Delta + 11)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (11)$$

$$F_{31}(x) = -\frac{2\beta(\Delta^2 - 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta^2 + 7\Delta + 6) + 2\beta(7\Delta + 6)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{\alpha(6\Delta^2 + 50\Delta + 84) + 3\beta(2\Delta^2 + 23\Delta + 21)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (12)$$

$$F_{32}(x) = \frac{2\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 4\beta(\Delta - 2)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{16\alpha(\Delta + 6) + 6\beta(11\Delta + 12)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (13)$$

$$F_{34}(x) = \frac{2\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 4\beta(\Delta - 2)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{8\alpha(\Delta + 6) + 3\beta(9\Delta + 11)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (14)$$

$$F_{41}(x) = \frac{2\beta(\Delta + 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 4\beta(\Delta + 3)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{10\alpha(\Delta + 6) + 6\beta(2\Delta + 17)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (15)$$

$$F_{42}(x) = \frac{2\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 4\beta(\Delta + 3)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{10\alpha(\Delta + 6) + 6\beta(5\Delta + 17)}{3(12 + 2\Delta)^2} \quad (16)$$

$$F_{43}(x) = \frac{2\beta(\Delta + 1)}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 2\beta(\Delta + 3)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 3\beta(\Delta + 7)}{(12 + 2\Delta)^2} \quad (17)$$

$$F_{44}(x) = \frac{2\beta}{(12 + 2\Delta)^2 l^2} x^2 - \frac{2\alpha(\Delta + 6) + 4\beta(\Delta + 3)}{(12 + 2\Delta)^2 l} x + \frac{2\alpha(\Delta + 6) + \beta(5\Delta + 21)}{(12 + 2\Delta)^2} \quad (18)$$

が得られる．

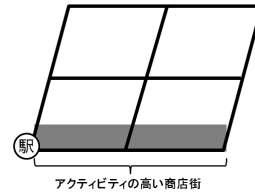


図 2 x_{11}, x_{31} に重みづけ

4 愛知県豊橋市の歩行者流動量 (人/日) の推定

愛知県豊橋駅前市街地の歩行者流動量 (人/日) の推定を行い、歩行者流動量の変遷を示す．推定を行うのは、調査結果を得られた 1961, 1965, 1966, 1967, 1970, 1972, 1980 ~ 1983, 1985 ~ 1989, 1996 ~ 1999, 2006 ~ 2010 年度である．

4.1 2010 年度の歩行者流動量 (人/日) の推定

まず豊橋駅前市街地の田の字型に近い通りの 2010 年度の歩行者流動量 (人/日) を推定する．図 3 のように、田の字上に調査点は 4 点ある．1 辺の長さ l は、実際の長さの平均で $l = 184.17m$ とした．また田の字の左下を駅、辺 x_{11}, x_{31} をアクティビティの高い商店街として (図 2)、実

測値と式 (7) ~ (18) を用いて、最小二乗法により α β Δ を推定する (ただし $\alpha, \beta, \Delta \geq 0$) . その結果, $\alpha = 7,400$ $\beta = 2,300$ $\Delta = 5.3$ となった . 図 4 に, 流動量の推定値のグラフと実測値を示すが, 実測値と推定値の差はほとんどない . またモデルが最大の流動量となるのは駅に近い点で, 駅からの距離が離れるほど流動量が減少していく . この流動の形は, 経験から現実的な結果だと言うことができる . さらに駅からの流動量 (人/日) が 7,400 人という推定結果も, 妥当な値である . よって, 2010 年度の豊橋駅前市街地には, 辺 x_{11}, x_{31} に重みづけしたモデルが妥当であると判断した .

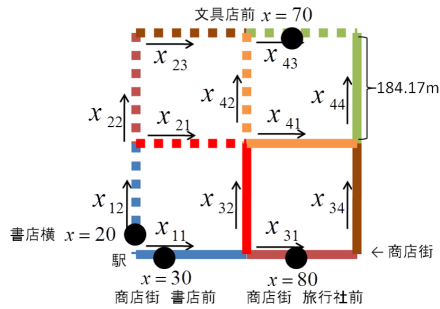


図 3 2010 年度の調査点の位置

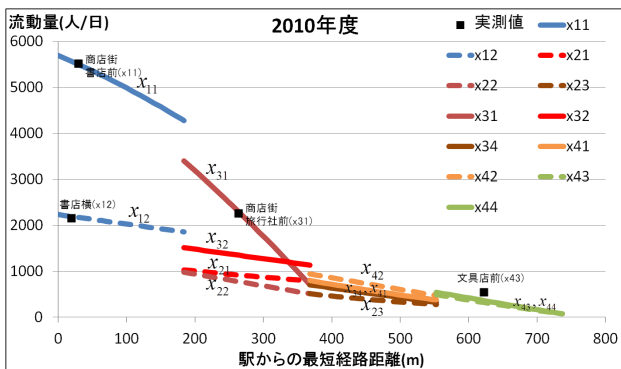


図 4 2010 年度の推定結果

4.2 歩行者流動量 (人/日) の変遷

次に 2010 年度と同様に田の字の左下を駅, 辺 x_{11}, x_{31} をアクティビティの高い商店街として, 1961 年から 2010 年までの歩行者流動量 (人/日) の推定を行う . しかし 1990 年以前は当てはまりが悪かった . そこで, 重みづけする辺を「 x_{11}, x_{31} の場合」, 「 x_{11}, x_{12}, x_{31} の場合」, 「 $x_{11}, x_{12}, x_{22}, x_{31}$ の場合」の 4 パターンについて推定を行い, 差の二乗和が小さく, 流動を最も再現できている場合の推定結果を選ぶことにした . その結果, 1990 年以降は辺 x_{11}, x_{31} に重みづけした場合, 1990 年以前は辺 x_{11}, x_{12}, x_{31} に重みづけした場合が選択された . 歩行者流動量 (α, β) (人/日) と, アクティビティの差 (Δ) の推定結果を表わすと, 図 5, 6 のようになる . 1980 年から 1990 年では, 駅からの流動量 (α) が 0 になる . この結果は不自然で現実的ではないが, 流動の形を見る限りでは考えたモデルの中では最もあてはまりがよい . 駅からの流動量 (α) が 0 になる原因は, 駅からの流動量が 0 になっている一方, NW 内々の流動量やアクティビティの差 (Δ) が大きな値になって

いるため, これらが駅からの流動量を説明してしまっている可能性があるが, 明確な原因は分からない . これを克服するには別のモデル分析が必要と考えられるが, 間に合わなかったため, この部分は理論的不備を承知で当てはまりの良い点のみに着目する . そこで 1980 年から 1990 年までの結果を他年と比較する場合は個々の α, β には着目せず, 流動量総和 ($\alpha + \beta$) であればそれなりに意味があると考え, 流動量の変遷の考察は流動量総和のみについて述べることにする .

流動量総和 (人/日) は 1960 年代から 1980 年代までは 25,000 (人/日) で安定しているが, それ以降は徐々に減少し, 近年では約 12,000 (人/日) である . アクティビティの差 (Δ) は 1960 年代は約 1.5 だが, 1980 年代は駅からの流動を説明しているせいか 20 前後になる . 1990 年代には約 3 になり, それ以降徐々に上昇し, 近年では約 6 になっている . アクティビティの高い商店街が出発地・目的地として選ばれる頻度は $(1 + \Delta)$ なので, 現在辺 x_{11}, x_{31} が出発地・目的地として選べる頻度は普通の商店街の約 7 倍である . 流動量が減少しているにもかかわらず, アクティビティの差が増加しているため, アクティビティの差の増加の原因は, アクティビティの高い商店街のアクティビティがより高くなったというよりは, 普通の商店街のアクティビティの低下により, 相対的に大きくなったからであると考えられる . また, 1960 年代から 1980 年代にかけては辺 x_{11}, x_{12}, x_{31} に重みづけした場合が最も当てはまりが良かったことから, 現在はアクティビティの高い商店街ではない辺 x_{12} が, 1980 年代までは辺 x_{11}, x_{31} と同等のアクティビティがあったことが分かる .

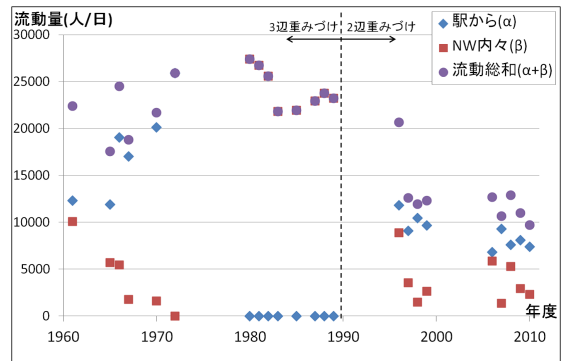


図 5 歩行者流動量 (人) の変遷

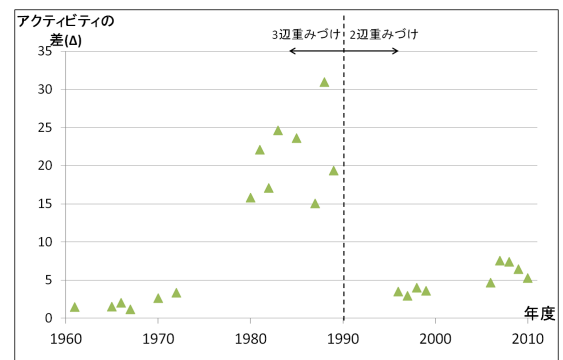


図 6 アクティビティの差の変遷

5 愛知県豊橋市の総交通量 (人 km) の変遷

5.1 総交通量 (人 km)

歩行者流動量 (人/日) の式を辺の長さで積分すると、総交通量 (人 km) を求めることができる。たとえば、3.3 で求めた駅が左下にある重みなしの NW 全体の流動量 (人/日) の式 (1) ~ (6) について積分し、各辺の駅からの総交通量 (人 km) を求めると、

$$G_{12} = G_{11} = \left(\frac{11}{24}\alpha + \frac{47}{432}\beta\right)l \quad (19)$$

$$G_{21} = G_{32} = \left(\frac{13}{72}\alpha + \frac{86}{432}\beta\right)l \quad (20)$$

$$G_{22} = G_{31} = \left(\frac{11}{72}\alpha + \frac{47}{432}\beta\right)l \quad (21)$$

$$G_{23} = G_{34} = \left(\frac{5}{72}\alpha + \frac{47}{432}\beta\right)l \quad (22)$$

$$G_{42} = G_{41} = \left(\frac{7}{72}\alpha + \frac{86}{432}\beta\right)l \quad (23)$$

$$G_{44} = G_{43} = \left(\frac{1}{24}\alpha + \frac{47}{432}\beta\right)l \quad (24)$$

が得られる。格子全体での総交通量 (人 km) は式 (19) ~ (24) をすべて足すと求められ、

$$G = \left(2\alpha + \frac{5}{3}\beta\right)l \quad (25)$$

となる。また一人当たりの平均移動距離 (km) は

$$g = \frac{G}{\alpha + \beta} = \frac{6\alpha + 5\beta}{3(\alpha + \beta)}l \quad (26)$$

となる。

5.2 愛知県豊橋市の総交通量 (人 km) の変遷

前述の方法で辺 x_{11}, x_{12}, x_{31} に重みづけした場合、1990 年代以降は辺 x_{11}, x_{31} に重みづけした場合の総交通量 (人 km) と一人当たりの平均移動距離 (m) の式を求め、推定した駅からの流動量 (α) (人/日)、ネットワーク内々の流動量 (β) (人/日)、アクティビティの差 (Δ) を代入して、各年度の総交通量と一人当たりの平均移動距離を推定する。総交通量と一人当たりの平均移動距離の推定結果を表わすと、図 7, 8 のようになる。流動量総和の総交通量 (人 km) は、1960 年代は 6,000 (人 km) だったが徐々に減少し、現在は 3,000 (人 km) になっている。一方、一人当たりの平均歩行距離 (m) の流動総和を見ると、1980 年代に約 220 (m) に減少するが、それ以外の年では約 300 (m) になっていることが分かる。つまり総交通量 (人 km) の減少の原因は、個々の歩行者の歩行距離の減少ではなく、歩行者の数の減少にある。

6 まとめと今後の課題

本研究では格子状田の字型の簡単な歩行者流動モデルを示し、そのモデルを利用して愛知県豊橋駅前市街地の歩行者流動量 (人/日) と総交通量 (人 km) と一人当たりの平均移動距離 (m) の変遷を示した。その結果、愛知県豊橋駅前市街地の田の字型の通りの歩行者流動量 (人/日) は 1980 年代までは約 25,000 人だったが、それ以降減少

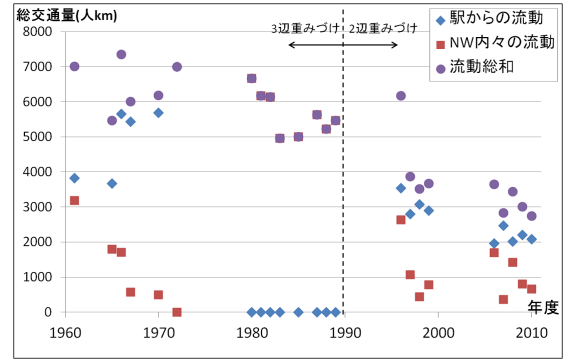


図 7 総交通量 (人 km) の変遷

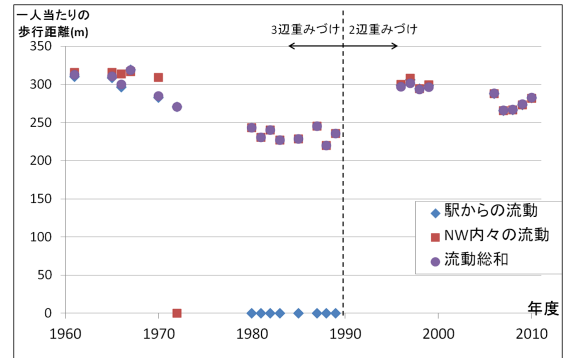


図 8 一人当たりの平均歩行距離 (m) の変遷

傾向が続いていることが分かった。一方、一人当たりの平均移動距離 (m) もほぼ横ばいである。また、現在の豊橋市の人口は 1960 年代の約 1.5 倍に増加している。つまり市街地の総交通量 (人 km) の減少の原因は、歩行距離の減少や都市規模の縮小ではなく、市街地へ徒歩で向かったり、市街地を徒歩で散策したりする人の減少であることが分かる。

また作成した流動モデルについて、現在から 1990 年代に関しては、当てはまりの良い結果が得られた。しかしそれ以前の推定では、不自然な点がある。この原因としては、駅的位置や重みづけする商店街の位置に関して住宅地図等から想像するしかなく実情を反映しきれないという点、重みづけする辺全てに同じ Δ を与えている点があげられる。しかし調査点数が 3~5 点しかないため、これ以上変数を増やすことは難しい。これらの改善については今後の課題とする。さらに、今回は田の字型の通りのみが対象だったため、今後は流動分析の範囲を市街地全体に拡張することを目指したい。

参考文献

- [1] 腰塚武志, 北澤哲 (1991): 歩行者流動調査の分析 土浦市を事例として, 日本 OR 学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.118-119.
- [2] 田村一軌, 腰塚武志 (2000): 道路網上の距離分布と流動量分布に関する基礎的研究, 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.1021-1026.
- [3] 愛知県立豊橋商業高等学校: 豊橋市内交通量調査, 1950 ~ 2010.