

利用者均衡配分とシステム最適配分による配分結果の相違と道路網連結信頼性

Characteristic Difference of Terminal Reliability
between User Equilibrium and System Optimum Assignments

若林 拓史 * ・ 中川 真治 ** ・ 飯田 恭敬 ***

By Hiroshi WAKABAYASHI, Shinji NAKAGAWA and Yasunori IIDA

From the point of view of traffic management for a highly reliable road network, the results of user equilibrium assignment (UE) and system optimum assignment (SO) are compared with travel time and terminal reliability. The characteristic difference between UE and SO is discussed using a simple network. Two types of assignments are carried out both for a simple network and an actual network. It is shown that there are not much differences from a point of view of total travel time between user equilibrium and system optimum assignments for the actual network. The policy for road network management is discussed.

1. はじめに

交通制御・規制、情報提供等の交通管理運用策によって道路網の信頼性を維持・向上させることを考える。この場合、誘導すべき規範的な交通状況およびその状態における利害得失を把握しておくことが重要である。本研究では、等時間配分（利用者均衡配分、UE配分）と、交通計画的配分とされてきた総走行時間最小化配分（以下SO配分）を現実の道路網に対して実行し、その相違を考察する。具体的には、ネットワークの配分に関連して、

（１）UE配分とSO配分の総旅行時間はどの程度異なるか、

（２）UE配分結果とSO配分結果をODペア毎に比較し、旅行時間の短縮されるODペアと増加す

ネットワークの信頼性、道路交通運用、均衡配分、最適配分
* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校 助教授
(〒572 寝屋川市幸町26-12)

** 正会員 工修 信州大学工学部 助手

*** 正会員 工博 京都大学工学部 教授

るODペアの数や旅行時間差はどのくらいか、

を明らかにする。さらに、道路網信頼性に関連して、

（３）SO配分とUE配分の場合とで、ノード間連結信頼性はどの程度の差が生ずるか、

（４）利用者にも受容され、交通管理者と利用者の相互協調によって達成できる交通管理運用策は存在するか、等を考察することを目的としている。

（１）に関しては、Ben-Akiva *et al*¹⁾ は、1OD 2経路の簡単なネットワークで両配分を行い、交通管理運用の方法を示唆している。Kanafani *et al*²⁾ は、それよりもやや複雑なネットワークで同様の分析をしているが、リンクコスト関数の設定にネットワーク上での統一性がない。両研究ともにSO配分とUE配分における総所要時間あるいは平均旅行時間の差は4%程度であるが、いずれの場合もネットワークが小規模であり、大規模ネットワークになった場合の相違までは明らかにしていない。大規模ネットワークを扱った研究はきわめて少ないのが現実であ

る。このため、本研究では、ネットワークをより複雑にした場合の両者の配分も比較するものである。また、(2)では、SO配分をネットワークの運用目標とし、利用者がこの運用策に従ったとすれば運用結果によってUE配分時よりも旅行時間が大きくなるODペアが出現すると考えられる。このため、UE配分結果とSO配分結果をODペア毎に比較し、旅行時間の短縮されるODペアと増加するODペアの数や旅行時間差は、UE配分の場合と比較してどのくらいか、を明らかにする。

このように本研究では、SO配分とUE配分を総所要時間に関して比較する一方、各OD毎に比較している。この場合、ネットワークのフローに関してリンクフローの一意性は保証されるものの、パスフローの一意性が保証できないという問題点がある。要するに、仮に交通量配分によってネットワーク上の交通状態を表現し得ても、リンクフローにのみ意味があってパスフローとしては解釈の多様性があるということである。しかしながら、現実には交通はパスフローとして流れており、これがシステムにとって望ましくない状態であるとするならば、何らかの規範的状态に誘導する必要がある。冒頭で述べた社会的要請を背景とすれば、パスフローの一意性という問題はあるにせよ、実験的に1つのフロー状態を出現させ、フローの状態を追いかけることによって、SO配分とUE配分に関して有用な知見が得られるものと考えている。

対象ネットワークは、考察のしやすい1OD2リンクの単純なネットワークおよび95ノード、290リンクに簡略化した京都市ネットワークである。

2. 交通量配分の方法

等時間配分は、フローの連続式を制約条件に、数理計画問題、

$$Z = \sum_a \int_0^{v_a} t_a(v) dv \rightarrow \min \quad (1)$$

として定式化できる。ここに、 $t_a(v)$ はリンクaの走行時間関数、 v_a はリンクフローである。一方、SO配分では同じ制約条件の下で、目的関数は、

$$W = \sum_a v_a \cdot t_a(v_a) \rightarrow \min \quad (2)$$

である。この目的関数は、

$$W = \sum_a \int_0^{v_a} v \cdot \frac{d}{dv} \{v \cdot t_a(v)\} dv \rightarrow \min \quad (3)$$

と書き換え可能で、式(3)の被積分項 $d/dv\{v \cdot t_a(v)\}$

を仮定の走行時間関数と見なせば、総走行時間最小化配分は、利用者均衡配分とまったく同一の問題として取り扱える³⁾。

今、ネットワーク上で均衡状態が出現しているものと考え、この交通状態をSO状態に変化させることを考える。簡単のため、図-1のような、1OD2リンクのフローを考える。均衡状態では、average travel cost が等しくなり、SO配分では、

$$\partial(v_1 t_1(v_1)) / \partial v_1 = \partial(v_2 t_2(v_2)) / \partial v_2 \quad (4)$$

となり、marginal travel cost が等しくなる。交通量が少ないうちは、最短経路が両配分手法で一致するために両者の解は一致する。本論文では、交通量の増加とともに両配分原則の解がどのように変化するかを見るものである。

均衡状態のフローから、 Δv だけ経路交通量をシフトすることを考える。このとき、総走行時間Sの変化量 ΔS は、

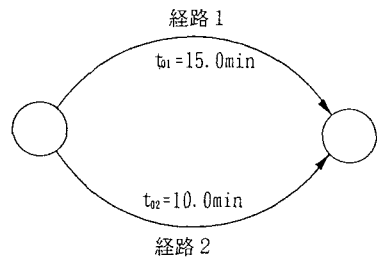


図-1 1OD2リンクのネットワーク

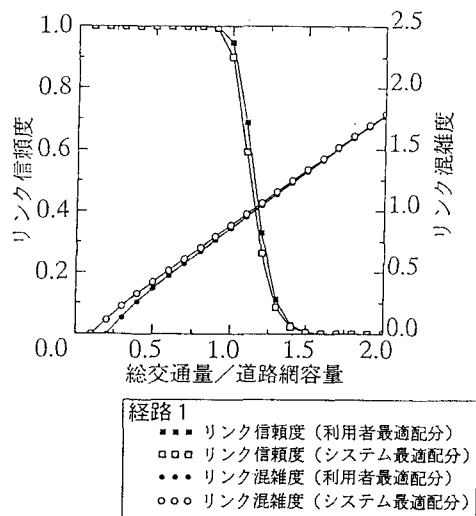


図-2 リンク信頼度と混雑度

$\Delta S = S_{UE} - S_{\Delta v} \approx v_1 t_1'(v_1) \Delta v - v_2 t_2'(v_2) \Delta v$ (5)
 で与えられ、総走行時間の改善量は $v_1, t_1'(v_1), v_2, t_2'(v_2)$ に依存することがわかる。

3. 信頼性指標の特性と意義

ここでは、道路網サービス水準の指標として、従来からの指標と信頼性指標を比較し信頼性の意義を明らかにする。なお、道路網信頼性の支配的要因が交通量の変動にあるものとする⁴⁾。図-1のネットワークに対して、各リンクに対して信頼度と混雑度の比較を行う。結果を図-2に示す。この図では、横軸に道路網容量に対する配分交通量の割合、縦軸にはリンク信頼度とリンク混雑度をとっている。図から、リンク信頼度の値は、配分交通量が道路網容量を超える付近で急激に低下することがわかる。これに対して、混雑度は当然のことながら線形に増加するだ

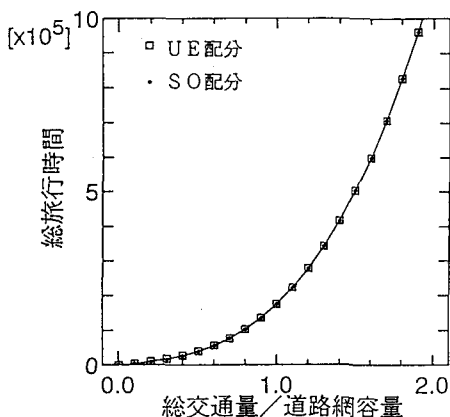


図-3 1OD2リンクネットワークにおける総旅行時間

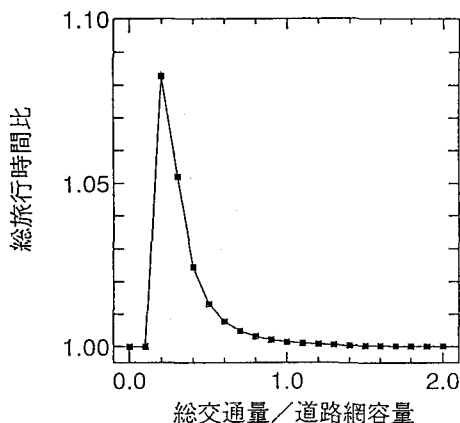


図-4 1OD2リンクネットワークにおける総旅行時間の比

けである。交通量が容量に近づくと円滑移動が阻害され、交通のサービスレベルが急激に低下することが混雑度では説明できず、信頼度を用いて説明することが可能である。このように、容量付近で値が急激に低下する信頼性指標は、交通サービス水準を表す指標として望ましい性質を有している。

4. 1OD2リンクのネットワークでの検討

図-1の簡単なネットワークに対し、道路網容量を基準として配分交通量を徐々に増加させ、総旅行時間をプロットしたのが図-3である。2つの配分原則による総旅行時間の比（UE配分の総旅行時間／SO配分の総旅行時間）を図-4に示す。図-4によると、OD交通量が道路網容量の約10%のときに総旅行時間の比が最大となり、UE配分の総旅行時間はSO配分の総旅行時間の8%増となっていて、それ以降は総旅行時間が一致する方向に向かっている。特に、OD交通量が道路網容量を超える付近からは2つの配分原則による違いはほとんど存在しないといえる。

ノード間信頼度（図-5）は、リンク信頼度と同様に道路網容量付近で急激に低下していることがわかる。ここに、ノード間信頼度は、

$$R = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (6)$$

で求めている。道路網容量付近ではUE配分の方がノード間信頼度が高くなり、その差はおよそ0.1である。この理由は、信頼性指標は交通量の容量に対する余裕で決ってくるため、およびUE配分の方が余裕の大きなリンクを生ずるためと考えられる。

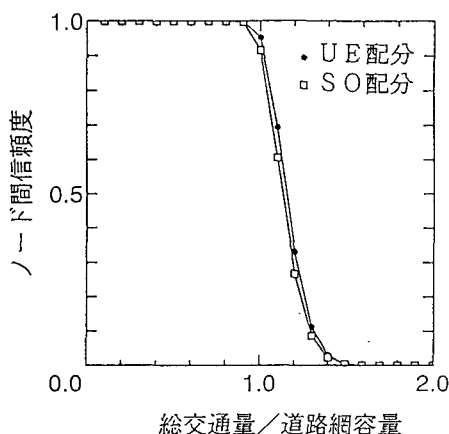


図-5 ノード間信頼度（1OD2リンクネットワーク）

5. 複雑なネットワークでの検討

図-6に示す簡略化した京都市道路網と1985年センサスに基づくODパターンから道路網容量⁵⁾を算出し、道路網容量を基準に漸次配分交通量を増加させ、UE配分とSO配分を行って、両者の配分結果およびノード間連結信頼度を比較する。近似解法である分割増加配分法を採用し、分割数は100とした。走行時間関数はBPR関数を用いた。

まず、各ODペアごとの総旅行時間を比較する。表-1では、ODフローが存在するODペア2225組に対して、UE配分とSO配分の比をとったものである。この表から、SO配分の方が旅行時間が大きくなるODペアの方が少ないことがわかる(表-1上下各表の4行目までの数値によりわかる)。道路網容量付近においてSO配分時の方が旅行時間がUE配分に比較して30%以上短縮されるODペアが存在する。逆に、UE配分の方が旅行時間が短いODペアについては15%程度である。このことから、仮に利用者がSO配分の流れ方に完全に従ったとしても、SO配分の実現によってUE配分時よりも旅行時間

がきわめて大きくなるODペアは少ないといえる。

次に、両配分手法での総旅行時間を表-2に示す。

表の縦方向に総交通量を増加させている。両配分結果にはほとんど差はなく、道路網全体の旅行時間という非常にマクロな視点からは両者の配分結果は似たものとなる。単純なネットワーク(1OD複数リ

表-1 UE配分・SO配分によるOD間の総旅行時間の比

OD間の 総旅行時間の比	総交通量/道路網容量									
	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
0.80 ≤ K < 0.85								1		
0.85 ≤ K < 0.90					7	11	6	5	6	6
0.90 ≤ K < 0.95			3	26	27	30	41	35	28	26
0.95 ≤ K < 1.00	708	595	573	668	747	746	708	730	723	684
1.00 ≤ K < 1.05	1517	1542	1387	1242	1168	1236	1333	1352	1399	1457
1.05 ≤ K < 1.10		71	209	216	226	167	119	86	56	45
1.10 ≤ K < 1.15		16	35	52	38	25	11	9	9	5
1.15 ≤ K < 1.20		1	15	15	8	6	1	2	2	1
1.20 ≤ K < 1.25			3	4	1		5	4	2	1
1.25 ≤ K < 1.30				1	1	2	1	1		
1.30 ≤ K < 1.35				1		1				
1.35 ≤ K < 1.40					2	1				

OD間の 総旅行時間の比	総交通量/道路網容量									
	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00
0.80 ≤ K < 0.85			1	1		1		1		
0.85 ≤ K < 0.90	5	2			1		1		1	1
0.90 ≤ K < 0.95	16	12	17	11	9	4	6	5	2	2
0.95 ≤ K < 1.00	655	742	739	712	757	794	780	848	794	841
1.00 ≤ K < 1.05	1511	1438	1446	1482	1442	1417	1428	1365	1423	1377
1.05 ≤ K < 1.10	32	28	20	18	16	9	10	6	5	4
1.10 ≤ K < 1.15	5	2	2	1						
1.15 ≤ K < 1.20	1									
1.20 ≤ K < 1.25										
1.25 ≤ K < 1.30										
1.30 ≤ K < 1.35										
1.35 ≤ K < 1.40										

注) Kは、各ODペアごとのUE配分とSO配分の総旅行時間の比

表-2 UE配分・SO配分によるネットワーク全体での総旅行時間

	U.E. 配分	S.O. 配分	時間差	時間比
0.00	0(分)	0(分)	0	-
0.20	12,116,507	12,116,163	344	1.00002839
0.40	24,253,296	24,248,656	4,640	1.00019135
0.60	36,438,160	36,423,360	14,800	1.00040633
0.80	48,710,704	48,686,656	24,048	1.00049393
1.00	61,135,680	61,102,448	33,232	1.00054387
1.20	73,800,944	73,756,672	44,272	1.00060024
1.40	86,808,432	86,751,072	57,360	1.00066120
1.60	100,280,830	100,207,330	73,500	1.00073348
1.80	114,358,350	114,266,420	91,930	1.00080452
2.00	129,200,220	129,085,090	115,130	1.00089189
2.20	144,982,880	144,842,640	140,240	1.00096822
2.40	161,900,560	161,730,580	169,980	1.00105101
2.60	180,169,340	179,967,920	201,420	1.00111920
2.80	200,021,570	199,787,260	234,310	1.00117280
3.00	221,713,030	221,434,580	278,450	1.00125748
3.20	245,516,080	245,204,940	311,140	1.00126890
3.40	271,710,460	271,337,730	372,730	1.00137368
3.60	300,605,950	300,200,700	405,250	1.00134993
3.80	332,535,810	332,094,980	440,830	1.00132742
4.00	367,824,130	367,304,450	519,680	1.00141485

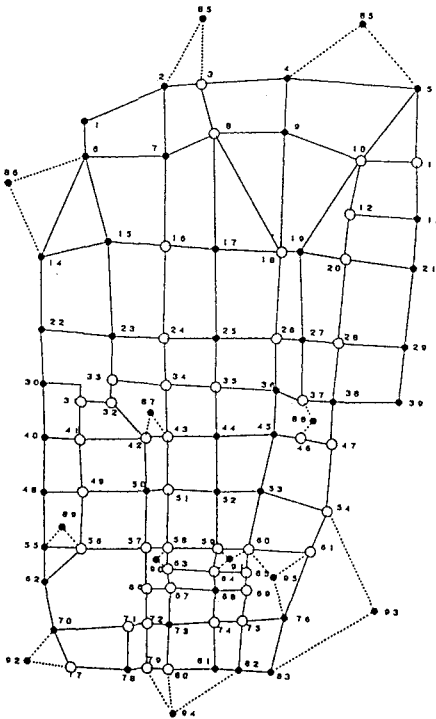


図-6 京都市ネットワーク

ンク)での数値計算では、両配分結果は総旅行時間で最大5~8%の相違となり、混雑してくるとその差が小さくなるのに対し、多数のODペアに対する配分結果ではその差がより小さくなる(その理由については次節で簡単に考察している)。配分結果が似ていることから、連結信頼性⁶⁾を南北方向と東西方向のODペアに対して算出しても、明確な一般的傾向は現われず、その差も小さかった(図-7,8)。

UE配分の旅行時間の方が良好なODペア数よりも、SO配分の旅行時間が良好なODペア数が多いことから、総旅行時間が両者でほとんど変わらないということから、多数のOD別総旅行時間の少ないODペアの旅行時間改善のために、少数のOD別総旅行時間の大きいODペアがtrade-offの関係にあるといえるかもしれない。この極端な例は、多数の近距離ODペアの旅行時間改善のために少数の遠距離OD

Dペアの旅行時間が増加する場合である。また、総旅行時間の減少を達成するためには、UE配分の場合よりも大きい旅行時間を受容するODペアの存在が必要である。しかし一方、道路網全体として見た場合には、短縮される旅行時間と増加する旅行時間が相殺して、必ずしも効率的とはいえない側面がある。本研究では、数値解析のみで静的なUE配分とSO配分を比較したのみで、現実の交通状態が、どのようになっているのかを議論していない。現実の交通状態が、どのように表現されるかは今後の課題であるため議論は慎重を要するが、その生起状態によっては、SO配分とUE配分による総旅行時間の差が小さい場合に限り、利用者の理解と協力の得やすいUE配分を実現するように交通状態を誘導することも1つの選択肢かもしれないと考えられる。

6. 考察と課題

本論文では交通状態を静的な状態として議論してきたが、現実の交通状態(ここでは静的に捉えると考えている)が、SO配分およびUE配分の状態からどの程度乖離しているかを知ることは重要である。というのは、種々の配分原則が実際の交通現象を正しく反映したものであるかどうか議論の余地があるからである⁷⁾。Ben-Akiva論文¹⁾では、自動車1台あたりの平均費用をSO状態とUE状態毎に算出し、現実の交通状態での平均費用が仮に観測できたとしてその後の交通管理の指針を示唆している。さらに、SO配分とUE配分の結果が相当乖離した状態として、両者が均等配分状態を挟む形で生ずるケースを想定しているが、このSO配分とUE配分が相当乖離した状態はかなり非現実的であると考えられる。

総走行時間を評価指標とした場合、式(5)での第1項が大きく、第2項が小さい場合に総走行時間の減少が大きくシステムにとって望ましい。しかし、これが、 $t_1'(v_1)\Delta v$ が大きく、 $t_2'(v_2)\Delta v$ が小さいことによってもたらされるならば、これは両経路の走行時間差が大きくなることを意味し、ドライバーにとっては受容しにくい交通管理となると考えられる。したがって、所要時間差があまり大きくならない範囲で、 ΔS を大きくする条件は、 $v_1 \gg v_2$ である。経路数がより多くなった場合やODが多数存在する場合には、パスフローの一意性の問題も加わって10

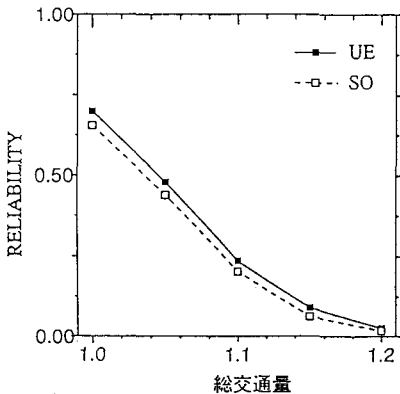


図-7 交点法によるノード間信頼度(南北ノードペア(3,80))

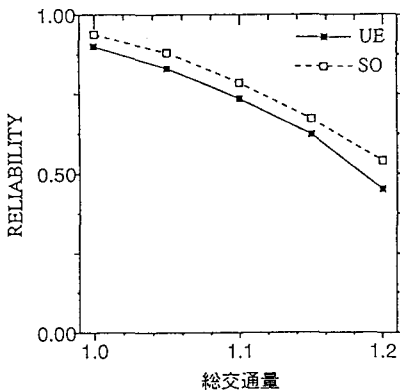


図-8 交点法によるノード間信頼度(東西ノードペア(22,29))

D 2 リンクの場合のように単純に議論できないかもしれないが、複数経路を持つODの場合、このような条件が成立する場合はあまり多いとはいえない。結局のところ、複数の経路間での所要時間特性がよく似たものとなって、UEの結果とSOの配分結果が似たものとなるのではないかと考えられる。

今後は、ドライバーの有している情報量の不確実性を時間比配分と関連させ、時間比配分における諸特性をUE配分およびSO配分と論じることが必要である。

信頼性に関する結論としては、UEとSOが似通ったものとなった結果、大きな差異は見出せなかった。ただし、リンク信頼度は、その性質上容量に対する余裕度で決まってくるため、この性質をうまく利用して交通管理運用を図ることができる。交通運用には交通規制等の静的なもの、流入制御等の動的なものが含まれるが、単独および両者を組み合わせた管理・誘導方針の明確化が必要である。

参考文献

- 1) Ben-Akiva, M., de Palma, A. and Kaysi, I. Dynamic Network Models and Driver Information Systems. Transpn. Res. Vol.25A, pp.251-266, 1991.
- 2) Kanafani, A. and Al-Deek, H.. A Simple Model for Route Guidance Benefits. Transpn. Res. Vol.25B, pp.191-201, 1991.
- 3) 佐佐木綱監修・飯田恭敬編著：交通工学，pp. 83-87, 1992.
- 4) 若林拓史・飯田恭敬・井上陽一：シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法，土木学会論文集，No. 458/IV-18, pp. 35-44, 1993.
- 5) 前掲3)，pp. 171-178.
- 6) 飯田恭敬・若林拓史・福島 博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究，土木学会論文集，No. 407/IV-11, pp. 107-116, 1989.
- 7) 飯田恭敬：交通モデルの課題と展望，土木計画学研究・論文集，No. 10, pp. 1-13, 1992.