

自転車の最安全経路の可視化および最短経路との比較分析

Visualizing the Safest Route for Cyclists and Weighing against the Shortest One

都市人間環境学専攻 森田 有哉 (交通まちづくり研究室)
Yuya MORITA / Mobility Planning Lab.

Key Words : bicycle, safety, route choice, stated preference (SP), binomial logit model (BNL)

1. 本研究の背景

(1) 自転車の安全性に関する現状分析と問題提起

自転車は環境負荷の低減や地域活性化、健康増進に資する移動手段としてその有効活用を促進する機運が高まる一方、自転車関連交通事故発生件数の構成比も増加に転じている¹⁾。幅広い用途で利用される自転車にとって必要不可欠な安全性の確保に改善の余地があり、交通事故を未然に防止するための戦略的かつ重点的な対策を講じることが喫緊の課題である。

現在、交通事故統計情報が公開されているのに加え²⁾、交通事故発生マップのように事故現場が一目で分かり、危険箇所の回避に一役買う仕組みも実装されている³⁾。しかし、自転車利用者の立場に立つと、各地点でなく起終点間全体の安全性を容易に把握できることこそが実用的であると考えます。

(2) 自転車の安全性に関する先行研究の調査

自転車関連交通事故発生状況を足掛かりに安全性を評価した先行研究の多くは通行位置や進行方向に言及しており、局地的と広域的の2アプローチに大別できた。

まず、前者については自転車安全利用五則に則って車道左側通行を励行する自転車の交通事故発生確率が低いことを、既に数多くの先行研究が実証している⁴⁾。歩車道選択は主に幅員や交通量に決定付けられる一方、起終点の位置関係も理由に挙げられており⁵⁾、経路選択との関連性が窺える。さらに、車道左側通行に伴って生じる迂回距離の許容範囲が年齢ごとに異なることが、選好意識 (SP) 調査を通じて実証されている⁶⁾。

次に、後者ではトリップ単位の交通事故遭遇確率の観点から、行動特性や地理的特性に即した通行区分を指定すべきとの提言がある。先述した迂回距離が走行距離全体に占める割合が高くなる短距離帯においては、車道左側通行よりもむしろ歩道両側通行の方が効果的であるという⁴⁾。このように、交通事故遭遇確率が走行距離や交差点密度に依存する点では、車道左側通行は普遍的な行動指針でなく、各々の経路選択次第である。

(3) 自転車の経路選択に関する先行研究の調査

以上を踏まえて、走行ルート自体も自転車利用者の安全性に直結すると考え、経路選択に主眼を置くこと

とした。自転車の経路選択に係る尺度としては最短性、すなわち走行距離の短さが特に通勤時で重要なものの⁷⁾、時間に余裕があれば安全性を重視するとの意見もあり⁷⁾、価値判断が状況に応じて変わると裏付けられている。オランダでのアンケート調査では最短経路であっても安全でない走行ルートはなるべく回避したいと考える回答者が半数近くを占めた⁸⁾。同論文で実走調査を基に構築した多項ロジットモデルでは発生件数のパラメータが有意でなく、実際に選択された走行ルートの発生件数が高齢者男性を中心にむしろ多い傾向にあるなど、経路選択要因として重視されていないと指摘していた⁹⁾。このほか、ポートランドでの実走調査では右左折回数に着目したところ、“右側”通行の際に車道を横断しなければならぬ左折回数の方がより強く経路選択に作用したとの推定結果も報告されている⁸⁾。

ここで、必ずしも安全性を兼ね備えるとは限らない最短経路に対する代替案の例示を試みた実例としては、マンハッタンでの犯罪の悪質性と交通事故に伴う人的被害の重大性を鑑みた「最安全経路」がある¹⁰⁾。しかし、物損事故を考慮に入れていない上、死者数を負傷者数の2倍の重みに設定した根拠も明記していない。特に、ターゲットである利用者の視点に立ち返って、最安全経路への選好意識を検証すべきであったと考える。

2. 本研究の目的

そこで、本研究では自転車が安全に走行できる交通社会の実現を最終目標に掲げ、最短経路と同じ要領で最安全経路を新たな選択肢として情報提供する、意思決定支援システムの拡充に着目した。本研究の目的は、ただ単に最安全経路を提示するのみならず、この提案自体の実効性を検証することまでとする。具体的には、最短性と安全性の2尺度においてトレードオフの関係にある2ルート可視化した上で、経路選択要因としての重みを定量的に比較検討する。実際の自転車利用者によるフィードバックを求める点に新規性を見出した。

3. 研究デザイン

本研究における最安全経路を、通過する自転車関連交通事故発生場所が最も少ない「事故現場回避経路」と命名した。顕在化した希少な発生件数の多寡でなく、

表-1 各走行ルートへの記述統計：最小値-最大値と平均値
Note. 区間数N=1,176.

走行ルート\尺度	走行距離 [km]	発生件数 [件]
最短経路	0.165- 6.108; 2.141	0-22; 5.218
事故現場回避経路	0.165-13.792; 3.107	0- 4; 0.367

表-2.1 選定した9区間の2ルートの差異：短距離帯0.5-1.5km
Note. 区間数n=305.

回避 件数 [件]	迂回距離 [km]		
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5
1- 3	0.206; 2 (n= 115)	0.686; 2 (n= 37)	1.335; 2 (n= 30)
4- 5	0.269; 5 (n= 22)	0.650; 4 (n= 12)	1.613; 4 (n= 18)
6-13	0.117; 6 (n= 3)	0.790; 7 (n= 6)	1.297; 7 (n= 12)

表-2.2 選定した9区間の2ルートの差異：中距離帯1.5-2.5km
Note. 区間数n=410.

回避 件数 [件]	迂回距離 [km]		
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5
1- 3	0.253; 2 (n= 90)	0.696; 2 (n= 42)	1.379; 3 (n= 15)
4- 5	0.264; 4 (n= 32)	0.661; 4 (n= 37)	1.561; 4 (n= 31)
6-13	0.366; 6 (n= 24)	0.761; 7 (n= 32)	1.857; 8 (n= 76)

表-2.3 選定した9区間の2ルートの差異：長距離帯2.5-5.5km
Note. 区間数n=395.

回避 件数 [件]	迂回距離 [km]		
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5
1- 3	0.303; 3 (n= 22)	0.615; 3 (n= 12)	1.612; 3 (n= 9)
4- 5	0.287; 5 (n= 21)	0.817; 5 (n= 18)	1.712; 5 (n= 31)
6-13	0.368; 7 (n= 34)	0.790; 8 (n= 69)	1.567; 9 (n= 136)

ルート1	ルート2
・ 走行距離1.616 km ※参考：所要時間約10分；左折4回；右折3回	・ 走行距離1.982 km ※参考：所要時間約12分；左折7回；右折9回
・ 過去3年間の自転車関連交通事故発生件数6件	・ 過去3年間の自転車関連交通事故発生件数0件



Note. 星印：事故現場；S：出発地；G：目的地。
図 表-2.2の3行目1列目に相当する区間の表題図

幅員や交通量などの道路環境でも定義付けられるが⁷⁹⁾、本研究で用いたデジタル道路地図(DRM)全道路リンクの多くが道路環境の属性値を持たないため、因果関係の構築は困難と判断した。何よりも、最短経路における走行距離との対立構造において、あくまでも感覚的に分かりやすい客観的指標とすることを尊重したため、安全性の判断基準として発生件数を採用するに至った。本研究は、最短経路と事故現場回避経路の可視化と、選好意識の定式化の二部構成である。異なる複数の区間における各走行ルートをSP調査で提示したのちに、経路選択モデルの構築を通じて走行距離と発生件数のパラメータの符号と統計的有意性を明らかにする。

(1) 本研究の対象地とデータセット

シェアサイクル事業「札幌みんなのサイクルporocle」(ポロクル)の49ポートの位置情報をご提供いただいた。空間的分布が疎らな2箇所にて起終点が固定されることで、走行距離や発生件数が適度にバラついた走行ルートを設定できる利点があり、全1,176区間を対象地とした。

自転車が走行し得る道路網をDRMの全道路リンクで代用し、札幌市の交差点と単路部における自転車関連交通事故のうち、2019-2021年の2,412件²⁾のみを抽出した。これは、車道混在の自転車通行空間を整備した2018年の「札幌都心部 自転車通行位置の明確化の取り組み」¹⁾を契機として行動変容が生じたと推察したためである。

(2) ネットワーク解析による走行ルートの探索

はじめに、空間分析ソフトQGIS 3.4.9を用いて全1,176区間の最短経路と事故現場回避経路を可視化した。

a) 解析手法

ここでは、ネットワーク解析の最速経路探索機能を応用した事故現場回避経路探索について説明する。

まず、事故現場をDRMに紐付けた。都市部における主要幹線道路幅員の最大値40 m¹²⁾に合わせて作成した、DRM20 mバッファ領域に含まれる事故現場を計上した。

次に、リンク長を変数 $TA+(1)$ で除したものをスピードレイヤに代入し、 $\sum_{リンク} TA+$ が最小となる事故現場回避経路を得た。このとき、 $TA_{交/単} = 0$ のリンクがあるため、経由するリンク数が1,000未満であるとの見積りの下、補正項0.001を加えた。このことによって、 $\sum_{リンク} TA+$ の整数部分の発生件数が最小となる候補が複数あるとき、小数部分のリンク数が最小となるものが出力される。例えば、 $\sum_{リンク} TA+ = 1.003$ は発生件数1件、リンク数3の走行ルートを意味する。なお、 $TA_{交}$ を2で除したのは、DRM20 mバッファ領域が交差点で重複し、そのままでは発生件数がダブルカウントされてしまうためである。

$$TA+ \equiv \frac{TA_{交}}{2} + TA_{単} + 0.001 \geq 0.001 > 0 \quad (1)$$

($TA_{交/単}$: 各リンクの交差点/単路部での発生件数)

そして、出力された最短経路と事故現場回避経路の20m バッファ領域を作成し、改めて発生件数を計上した。

b) 解析結果

各走行ルートの走行距離および発生件数は表-1の通り、事故現場回避経路は平均約1 km遠回りとなる代わりに、通過する事故現場(2019-2021年)が平均5件少なかった。

以後、前者を迂回距離、後者を回避件数と呼称し、表-2の通り両者が多種多様な区間を次節で選定した。

(3) SP調査に基づく経路選択モデルの構築

続いて、仮想2ルートへの選好意識を検証するために、セルフアンケートツールFreeasyを用いてSP調査を実施し、統計ソフトR4.2.1を用いて経路選択モデルを構築した。

表-3.1 事故現場回避経路の選択結果：短距離帯0.5-1.5km
 Note. 左3列の通勤群 $n=168$ (226)；右3列の買い物群 $n=163$ (218).

回避 件数 [件]	迂回距離 [km]					
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5
1- 3	80 (95)	42 (57)	50 (65)	83 (102)	44 (63)	57 (76)
4- 5	81 (96)	33 (48)	30 (45)	81 (100)	44 (63)	40 (59)
6-13	118 (133)	42 (57)	37 (52)	110 (129)	51 (70)	51 (70)

表-3.2 事故現場回避経路の選択結果：中距離帯1.5-2.5km
 Note. 左3列の通勤群 $n=143$ (221)；右3列の買い物群 $n=141$ (226).

回避 件数 [件]	迂回距離 [km]					
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5
1- 3	26 (42)	53 (69)	41 (57)	42 (59)	45 (62)	42 (59)
4- 5	88 (104)	49 (65)	46 (62)	100 (117)	38 (55)	32 (49)
6-13	61 (77)	52 (68)	45 (61)	57 (74)	38 (55)	49 (66)

表-3.3 事故現場回避経路の選択結果：長距離帯2.5-5.5km
 Note. 左3列の通勤群 $n=127$ (218)；右3列の買い物群 $n=122$ (220).

回避 件数 [件]	迂回距離 [km]					
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.5
1- 3	61 (86)	56 (81)	44 (69)	51 (86)	47 (82)	42 (77)
4- 5	60 (85)	48 (73)	50 (75)	62 (97)	53 (88)	53 (78)
6-13	74 (99)	67 (92)	43 (68)	70 (105)	57 (92)	43 (76)

a) 集計方法

まず、実験計画法を用いて2因子3水準のSP調査を設計した。通勤目的および短距離であるほど、迂回距離1 kmが相対的に重いと想定し、回答者を2利用目的、区間を3距離帯に層別した上で6パターンの質問票を作成した。3距離帯の範囲を区間数がほぼ均等となるように設定し、各水準の範囲を統一した。水準数3は回答者への負担と経路選択モデルの精度を天秤にかけて9区間が適当との判断に基づく。表-2の通り3距離帯合計27区間を選定し、それぞれ経路検索結果画面を模した表題図を作成した。例えば、表-2.2の3行目1列目は24区間のうち、中央値に最も近い迂回距離0.366 km、回避件数6件の区間である。

次に、下記の手順でSP調査を遂行した。北海道在住Freeasy登録者8,000人のうち、札幌都心部への外出頻度が年数日以上、利用頻度が年1日以上、の自転車利用者2,526人を抽出した。その目的別利用頻度に応じて通勤群と買い物群のいずれかに割り付けた上で、年齢や性別が均等となるように3距離帯へと振り分けた。§3(1)で先述した通り車道左側通行を基本とする札幌都心部にて、通勤時または買い物時を想定したときにより選択したい走行ルートを、9区間の地図を手掛かりに二者択一でご回答いただいた。なお、札幌都心部と同じく格子状の都市を対象地とした先行研究⁹⁾に倣って右左折回数も経路選択要因とし、それぞれ表題図上に記載した。

b) 集計結果と考察

回答者6群合計1,329人の内訳は表-3の括弧内の通りで、うち338人が最短経路、127人が事故現場回避経路のみを選択していた。該当者全員が機械的に回答したと一概

表-4.1 二項ロジットモデルの推定結果：短距離帯0.5-1.5km
 Note. ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

説明変数	通勤群		買い物群	
	パラメータ β	t 値	パラメータ β	t 値
走行距離 L [km]	-0.858	-6.444***	-0.604	-4.761***
左折回数 L_t [回]	-0.231	-5.628***	-0.183	-4.771***
定数項	0.401	3.838***	0.338	3.273**
データサイズ N	1,512		1,467	
初期尤度 $L(0)$	-1,048.039		-1,016.847	
最終尤度 $L(\beta)$	-894.041		-930.666	
(自由度調整済み) 尤度比 ρ^2	0.147(0.144)		0.085(0.082)	

表-4.2 二項ロジットモデルの推定結果：中距離帯1.5-2.5km
 Note. ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

説明変数	通勤群		買い物群	
	パラメータ β	t 値	パラメータ β	t 値
走行距離 L [km]	-0.655	-5.367***	-0.834	-6.623***
発生件数 TA [件]	-0.120	-3.711***	-0.102	-3.092**
右折回数 R_t [回]	-0.195	-6.344***	-0.209	-6.733***
定数項	0.098	0.521	0.338	1.765
データサイズ N	1,287		1,269	
初期尤度 $L(0)$	-892.080		-879.604	
最終尤度 $L(\beta)$	-810.824		-784.878	
(自由度調整済み) 尤度比 ρ^2	0.091(0.087)		0.108(0.103)	

表-4.3 二項ロジットモデルの推定結果：長距離帯2.5-5.5km
 Note. ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

説明変数	通勤群		買い物群	
	パラメータ β	t 値	パラメータ β	t 値
走行距離 L [km]	-0.448	-4.061***	-0.345	-3.083**
定数項	0.157	1.376	0.040	0.341
データサイズ N	1,143		1,098	
初期尤度 $L(0)$	-792.267		-761.076	
最終尤度 $L(\beta)$	-775.666		-746.536	
(自由度調整済み) 尤度比 ρ^2	0.021(0.018)		0.019(0.016)	

には断定できないが、その可能性も否定できないため、経路選択モデルの構築に先立って除外することとした。該当者数は長距離帯で合計189人と最も多く、表題図の縮尺の大きさに伴う情報量の多さや視認性の低さが、回答意欲の低下を招いたと解釈できる。

有効回答者6群合計864人による選択結果は表-3の通り、事故現場回避経路は一定数の回答者から支持された。短・長距離帯では迂回距離が短い割に回避件数が多い区間ほど、事故現場回避経路が選択されやすかった。

c) 推定手法

利用目的別距離帯別6群ごとの集計結果を基にNelder-Mead法を用いて二項ロジットモデル(BNL)を構築した。

最短経路と事故現場回避経路の効用関数 $V_1(2)$ 、 $V_2(3)$ は、§1(3)で引用した一連の先行研究においても言及された走行距離 L 、発生件数 TA 、左折回数 L_t 、右折回数 R_t 、年齢 A 、性別 G (男性0；女性1)の6説明変数で構成され、ここから事故現場回避経路の選択確率 $P_2(4)$ を算出する。

$$V_1 = \beta_1 \cdot L_1 + \beta_2 \cdot TA_1 + \beta_3 \cdot Lt_1 + \beta_4 \cdot Rt_1 \quad (2)$$

$$V_2 = \beta_1 \cdot L_2 + \beta_2 \cdot TA_2 + \beta_3 \cdot Lt_2 + \beta_4 \cdot Rt_2 + \beta_5 \cdot A + \beta_6 \cdot G + \beta_7 \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{\exp(V_2)}{\exp(V_1) + \exp(V_2)} \quad (4)$$

相関分析を通じて多重共線性が確認されず、統計的有意性が確認された説明変数のみとなるまで試行した。

d) 推定結果と考察

利用目的別距離帯別6群ごとの推定結果は表-4の通り、パラメータの符号が群間で一致していた点で論理性は高かったが、尤度比 0.3 未満と説明力は軒並み低かった。

β_{1i} は6群全てで負かつ有意となり、 L の短さがあらゆる利用目的や距離帯で選択結果に寄与した。長距離帯に至っては唯一有意な説明変数となったが、中距離帯に限っては通勤群よりも買い物群の方が統計的有意性に優れ、サンプルの異なる先行研究⁹⁾とは合致しなかった。

β_{2i} は β_{1i} に及ばずとも中距離帯では負かつ有意となり、 TA の少なさが自転車の経路選択要因となったことから、これを新たに情報提供する意義が裏付けられた。

β_{3i} は短距離帯のみで、 β_{4i} は中距離帯のみで負かつ有意となり、先行研究⁹⁾との整合性こそ部分的であったが、 Lt 、 Rt の少ない直線的な走行ルートへの選好意識の高さが示唆された。

β_{5i} と β_{6i} は6群全てで統計的有意性が確認されなかった。

最終的に構築したBNLの各パラメータと予め計上した全ての区間の L 、 TA 、 Lt 、 Rt を改めて関係式(2-4)に代入して、対象地全体の選択確率 P_2 を試算した。なお、 Lt 、 Rt は進行方向に左右されるために各区間の往復平均とし、0.5 km 未満と5.5 km超の合計66区間にはそれぞれ短・長距離帯の推定結果を適用した。事故現場回避経路の分担率は表-5の通り、利用目的や距離帯にかかわらず40%前後で、一定割合の利用が期待できると判明した。

4. 結論と今後の展望

本研究では自転車の安全な走行ルートを提言すべく、走行距離が最も短い最短経路と発生件数が最も少ない事故現場回避経路を図示するとともに、対象地である札幌都心部を知る自転車利用者864人による選択結果を基にBNLを構築した。その結果、経路選択要因の重みは回答者の利用目的や区間の距離帯によって異なった。走行距離の短さが全ての回答者群で重視された一方、年齢と性別は経路選択要因として全く有意でなかった。短距離帯では右折回数、中距離帯では左折回数と発生件数の少なさが通勤目的でも買い物目的でも判断材料として機能し、情報提供に値するとの知見を得た。BNLの推定結果を基に試算した対象地全体の事故現場回避経路の選択確率は平均40%弱と、自転車利用者の新たな選択肢として提示する実効性はあると結論付ける。

表-5 選択確率 P_2 の試算結果：最小値-最大値と平均値

距離帯\利用目的	通勤群	買い物群
短距離帯305区間	0.573-77.6%;38.3%	2.20 -73.3%;41.2%
中距離帯410区間	0.108-76.9%;36.2%	0.0253-80.8%;35.8%
長距離帯395区間	2.87 -53.6%;40.2%	5.77 -50.8%;40.3%
全1,176区間	0.108-77.6%;38.6%	0.0253-80.8%;39.3%

最後に今回の反省点を振り返り、改善策を整理する。§3(2)走行ルートの探索では、§1(3)で指摘した前例¹⁰⁾の問題点であった交通事故の重み付けが今後の課題だが、入手を断念した幅員や交通量などを感覚的に分かりやすい安全性の指標に反映する方法も考案すべきである。§3(3)a)SP調査では有効回答率、c)BNLの構築では精度の向上を図りたい。引き続き回答者に配慮した表題図の作成や条件設定、選定する区間の吟味を前提としつつ、回答者数や出題する区間数を増やすといった改善策も考えられる。また、本研究では結果的に一部の説明変数と定数項に集約されたが、他の説明変数やBNL以外の推定手法を採用することにも検討の余地がある。

謝辞：本研究の遂行に際して、データおよび貴重ご意見を頂戴した認定 NPO 法人ポロクルおよび(株)ドーコンの関係者の皆さまに、心より深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：令和3年中の交通事故の発生状況，2022。
- 2) 警察庁：交通事故統計情報のオープンデータ，2021。
https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/opendata/index_opendata.html (最終閲覧：2022年08月19日)
- 3) 北海道警察本部：交通事故情報マップ。<https://hokkaido-ppm.geocloud.jp/public/map.html> (最終閲覧：2023年01月03日)
- 4) 小川圭一，石田信之，安隆浩：道路ネットワーク特性と出発地・目的地間の距離を考慮した自転車の通行位置と通行方向による交通事故遭遇確率の比較分析，交通科学，Vol.51, No.1, 55-65, 2021。
- 5) 金利昭，本田慎弥：自転車の車道左側通行に伴う迂回・歩道押し歩き・歩道通行に関する研究，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.75, No.5, I_585-I_594, 2019。
- 6) 矢野伸裕，横関俊也，萩田賢司，森健二：自転車利用者に対する歩道通行を行う理由についての聞き取り調査，土木計画学研究・講演集，CD-ROM, Vol.50, No.40, 2014。
- 7) 轟修，松村暢彦：実走調査による自転車の経路選択等の傾向に関する分析，土木計画学研究・講演集，CD-ROM, Vol.30, No.346, 2004。
- 8) Broach, J., Dill, J., & Gliebe, J.: Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data, Transportation Research Part A, Vol.46, 1730-1740, 2012。
- 9) Kuiper, M.D.: The impact of safety on cycling route choice, Geographical Information Management and Applications, 2021。
- 10) Soni, S., Shankar, V. G., & Chaurasia, S.: Route-The Safe: A Robust Model for Safest Route Prediction Using Crime and Accidental Data, International Journal of Advanced Science and Technology, Vol.28, No.16, 1415-1428, 2019。
- 11) 札幌市建設局：札幌都心部 自転車通行位置の明確化の取り組み，2018。
- 12) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，丸善出版，pp.162-164, 2002。