

移動のコストに基づく都市部におけるCCS導入の優位性に関する分析

笠原 光将¹・高橋 翔²・萩原 亨³

¹学生員 北海道大学工学部環境社会工学科(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:d1205cherish@eis.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 北方圏環境政策工学部門(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: stakahashi@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学教授 大学院工学研究院 北方圏環境政策工学部門(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:hagiwara@eng.hokudai.ac.jp

本研究では最短の距離や時間だけでなく、運賃などの金銭コストや移動に伴うエネルギーコストなど、複数のコストを考慮した経路一般化費用を新たに定義する。これを用いることで、コミュニティサイクルシステムの導入によって多様化する交通の影響について、複数のコストに注目した分析が可能となる。また、本研究では、札幌市の都心部を対象として経路一般化費用を用いた実験を行い、目的地への移動が優位になる地点を明らかにした。さらに、経路一般化費用を最小化するステーションの配置についても併せて検証を行った。これらより、シェアサイクルシステムの導入が目的地への移動コストを減少させる地点が現れることが示された。

Key Words : CCS, Bike-sharing programs, Bike-station location, MaaS, Seamless Transit, Subway

1. はじめに

近年、情報通信技術の発達に伴い、交通分野においてもこれらを活用したシェアリング・エコノミーが台頭してきている。このような現状から、複数の交通手段をシームレスにつなぎ、それらを1つのサービスとしてとらえる新たなモビリティ(移動)の概念である **Mobility as a Service**(以下、**MaaS**)が注目を集めている¹⁾。**MaaS**は、都市部における自動車の混雑などの問題の解決や軽減に貢献するものと期待されている。特に、都市部では、自転車を用いたコミュニティサイクルシステム(以下、**CCS**)が、既に活用され始めており、交通手段の多様化が進んでいる²⁾。ここで、**CCS**とは、ステーションと呼ばれる自転車貸出・返却場所を複数かつ高密度に設置する自転車の共同利用システムである。この導入によって、鉄道やバス、自家用車等の従来の交通手段が補完され、それらのシームレスな接続が期待できる。

CCS等のサービスは、ラストワンマイル問題の解決に近づくことが期待されており、東京都の自治体での導入実績がある¹⁾。また、札幌市においても **CCS** のサービスであるポロクル²⁾が運用されている。国外では、ニュー

ヨーク市において、**Citi Bike**³⁾が運用されており、2019年3月の時点で、750の駅と12,000台の自転車が稼働している。特に、このニューヨーク市に見られる例として、**CCS**の**Citi Bike**や、配車サービスの**Uber**や**lyft**といった、サービスの出現により交通手段が多様化し、地下鉄の年間乗車数が減少に推移している²⁾。

交通手段が混在する環境を分析する既存研究として、ステーションの配置の検討⁴⁾や、乗換抵抗の評価⁵⁾、経路選択における要因の分析⁷⁾、公共交通網を対象とした最適経路の算定⁸⁾などがある。これらの研究によって、多様化する交通の分析が高度化されてきているが、ステーションの配置を検討するためには、移動時の様々なコストを考慮した分析手法の確立が課題である。特に、移動は日々行われるため、金銭コストは重要な要素の一つであり、これを含めた最小コストの経路算定は、交通の多様化が進む今後必須であるといえる。

そこで、本研究では、都市部を対象とし、**CCS**導入によって見られる所要時間や金銭コストの変化など、複数の要因に注目した分析手法を提案する。具体的には、最短の距離や時間だけでなく、運賃などの金銭コストや移動に伴うエネルギーコストなど、複数のコストを考慮し

1 <https://dx.como-cycle.jp/tokyo-project/>

2 <https://poroclr.jp/http://web.mta.info/nyct/facts/ridership/>

3 <https://www.citibikenyc.com/>

た経路一般化費用を定義する。また、本稿では、札幌市を対象とした分析を実施し、CCSが導入されることで目的地への移動が優位になる圏域や、ステーションの配置について、複数のコストを考慮した検証を行う。

2. 関連研究

多様な交通手段が混在する環境を分析する既存研究として、ステーションの配置の検討や、乗換抵抗の評価、経路選択における要因の分析、公共交通網を対象とした最適経路の算定などがある。これらを以下に詳述する。

ステーションの配置の検討について、Juan Carlos⁴⁾らは、GISのデータからトリップの潜在需要の空間分布を求め、これを用いて、ステーションの位置や、それらの容量および需要を分析する方法を提案している。これは、GISやトリップのデータから評価したものであって、本研究で注目する多様なコストについては考慮されていない。

乗換抵抗の評価については、時間やエネルギー、金銭コストに着目した研究が行われている。中でも、佐藤⁵⁾らは、公共交通ターミナルを対象として、時間コストやエネルギーコスト、心理コストをアンケート調査に基づくパラメータ推定により求めることで、乗換一般化費用を計測可能とし、乗換抵抗の要因を分析している。さらに、塚田⁶⁾らは、交通結節点における乗り換えの利便性を評価するため、階段やエスカレータを利用する際の負荷を定量化する手法を提案している。これらの研究によって、乗換抵抗の評価に重要となる要素の定量化が可能となっている。

経路選択における要因の分析について、石村⁷⁾らは、経路検索サービスが収集する予定登録機能や、メールやSNSの利用履歴を用いた経路選択行動の分析を行っている。具体的には、表示優先条件や発着日時指定条件、終発の時刻選択、最安運賃、経路表示順位に関するデータに基づいた分析を行っている。

公共交通網を対象とした最適経路の算定については、これまでに研究が活発に行われ、経路探索アルゴリズムが種々提案されている。これらは、アプリケーション・ソフトウェアとして既に多くが実装されている。しかしながら、これらの多くは、最短の距離あるいは時間を求める機能に留まっている。このことから、吉川⁸⁾らは、地下鉄網を対象として、利用者の身体的条件に対応した乗換抵抗を算出し、時間の最小化だけでなく、移動のエネルギーを最小とする経路を求めるシステムを開発している。しかしながら、このシステムは、主に高齢者などの移動制約者が対象となっている。また、金銭コストは考慮されていない。日々行われる移動を対象とする場合、金銭コストは無視できず、これを含めたコストの最小化に関する分析は極めて重要な課題であるといえる。

表-1 階段昇降に要する時間の計測結果

移動方向	計測結果[単位]	サンプル数
上り	17.2 [秒/箇所]	88
下り	15.6 [秒/箇所]	103

3. 提案手法

本章では、複数のコストを考慮した経路一般化費用、およびCCS等が導入されることによる効果費用を求める手法を提案する。本手法を用いることで、CCS等の導入によって、目的地への移動が優位になる圏域や、ステーションの配置についての検証が可能となる。

(1) 複数のコストを考慮した経路一般化費用の算出

本研究では、分析対象エリア内の各地点（ノード）から目的地への経路について、所要時間のみならず、乗換回数や運賃、エネルギー消費量といった要因を定量化し、その優劣を考える。具体的には、時間や乗換回数、運賃、エネルギー消費量からなる経路要素ベクトルに基づいて経路一般化費用を算出する。この経路一般化費用を用いることで経路の優劣が分析可能となる。

(a) 経路要素ベクトル

経路要素ベクトル $V(A, B)$ は、出発点 A から目的地 B への経路を、時間や乗換回数、運賃、エネルギー消費量を要素として表すものであり、次式(1)によって求める。

$$V(A, B) = (a, b, c, d, e) \quad (1)$$

a : 所要時間から階段移動を引いた時間 [分]

b : 乗換回数 [回]

c : 運賃などの金銭コスト [円]

d : 階段を利用する時間の合計 [分]

午後 2 時から午後 3 時の札幌市営地下鉄の駅構内で実施した定点観測により、階段昇降に要する時間を計測した（表-1）。提案手法では、この時間を 1 階分の階段昇降に要する時間として設定した。

e : エネルギー消費量 [Kcal]

エネルギー消費量は、文献⁹⁾に基づいて METs を用いて求める。具体的には、体重 60 [kg] の人が時間 t [h] だけ移動する場合、 $e = 60 \text{ [kg]} \cdot 1.05 \cdot t \text{ [h]} \cdot m \text{ [METs]}$ となる。提案手法では、文献⁹⁾より階段を上る場合、階段を下りる場合、徒歩(4.8 [km/h])の場合、自転車に乗る(15 [km/h])場合のそれぞれを 4.0 [METs], 3.5 [METs], 3.5 [METs], 4.0 [METs] とした。

(b) 経路一般化費用

経路一般化費用は、経路における様々なコストを統合し、貨幣タームで表す。出発点 A から目的地 B への経路

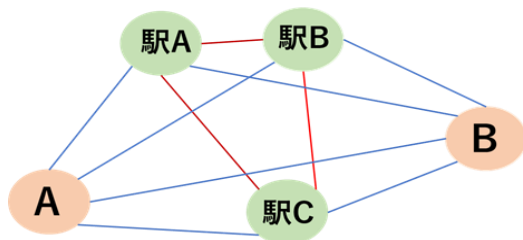


図-1 データ取得の模式図

一般化費用 $R(A, B)$ は、次式(2)で算出する。

$$R(A, B) = V(A, B) \cdot (T, C, F, St, E)^t \quad (2)$$

T : 時間価値のパラメータ [円/分]

提案手法では、石村⁷⁾らが導出した時間価値を用い、23.0[円/分]とする。

C : 金銭コストの重み係数

本研究では、1.0とする。

F : 乗換抵抗を表すパラメータ [円/回]

提案手法では、石村⁷⁾らが導出した時間価値を用い、14.5[円/分]とする。

St : 階段昇降に関する時間価値のパラメータ [円/分]

塚田⁸⁾らが提案した一般化時間に基づいて次式(3)により求めたものであり、33.9[円/分]となる。

$$St = T \cdot Wn \quad (3)$$

ここで、 Wn は等価時間係数⁹⁾である。

E : エネルギー価値に関するパラメータ [円/Kcal]

階段昇降や平面の歩行時間、自転車の乗車時間から求める。ここでは、佐藤⁵⁾らのエネルギー価値を用いる。

(2) データの取得

本研究では、経路一般化費用の算出に用いるデータをGoogle Maps API⁴⁾およびYahoo!乗換案内⁵⁾から取得する。具体的には、図-1に示すAを出発点、Bを目的地とするネットワークを考える。このとき、AまたはBのノードと、その他のノードとの間に張るエッジ(青)についてのデータをGoogle Maps API、駅間エッジ(赤)についてのデータをYahoo!乗換案内から取得する。

(3) CCS等の導入による効果費用の算出

本研究では、前節で入手したデータを用い、ノード間の経路のすべての組み合わせに対して、経路一般化費用を算出する。その後、これが最小となる経路を探索する。この探索をCCS等が導入されているか否かの2つの状態に対して行い、その差によって効果費用を求める。以下に、手法の詳細を説明する。

まず、提案手法では、出発点をA、目的地をBとする



図-2 対象とする範囲と目的地の位置

(©2017 Vladimir Agafonkin. Maps © OpenStreetMap contributors)

複数の経路から、経路一般化費用の最小値 $M(A, B)$ を次式によって求める。

$$M(A, B) = \min\{R(A, B)\} \quad (4)$$

次に、式(4)で求める $M(A, B)$ について、CCS等の導入前を $Mb(A, B)$ 、CCS等の導入後を $Ma(A, B)$ として、効果費用 $E(A, B)$ を次式で求める。

$$E(A, B) = Ma(A, B) - Mb(A, B) \quad (5)$$

$E(A, B)$ を用いることで、目的地への経路一般化費用がどのように変化するか、すなわちCCS等の導入の効果がどの程度あるのかが、把握可能となる。

4. 実験設定

本研究では、札幌市の都心部を対象として、提案手法によってCCSを導入した場合の効果費用を算出し、CCSが導入されることで、目的地への移動が優位になる圏域や、多様なコストの観点からステーションの配置を検証する実験を行う。本章では、この実験の設定を説明する。

(1) 探索範囲およびノードの設定

図-2に示す札幌市の都心部において黒線内側のエリアを本実験の探索範囲とする。分析に用いるノードは、範囲内の交差点に設定する(図-2青丸)。また、青線が南北線、緑線は東西線である。このとき、本研究で対象とするエリアのノード数 n は520(個)である。

(2) 条件

本実験では、目的地、利用料金、時間および札幌市営地下鉄の待ち時間について、次のように設定する。

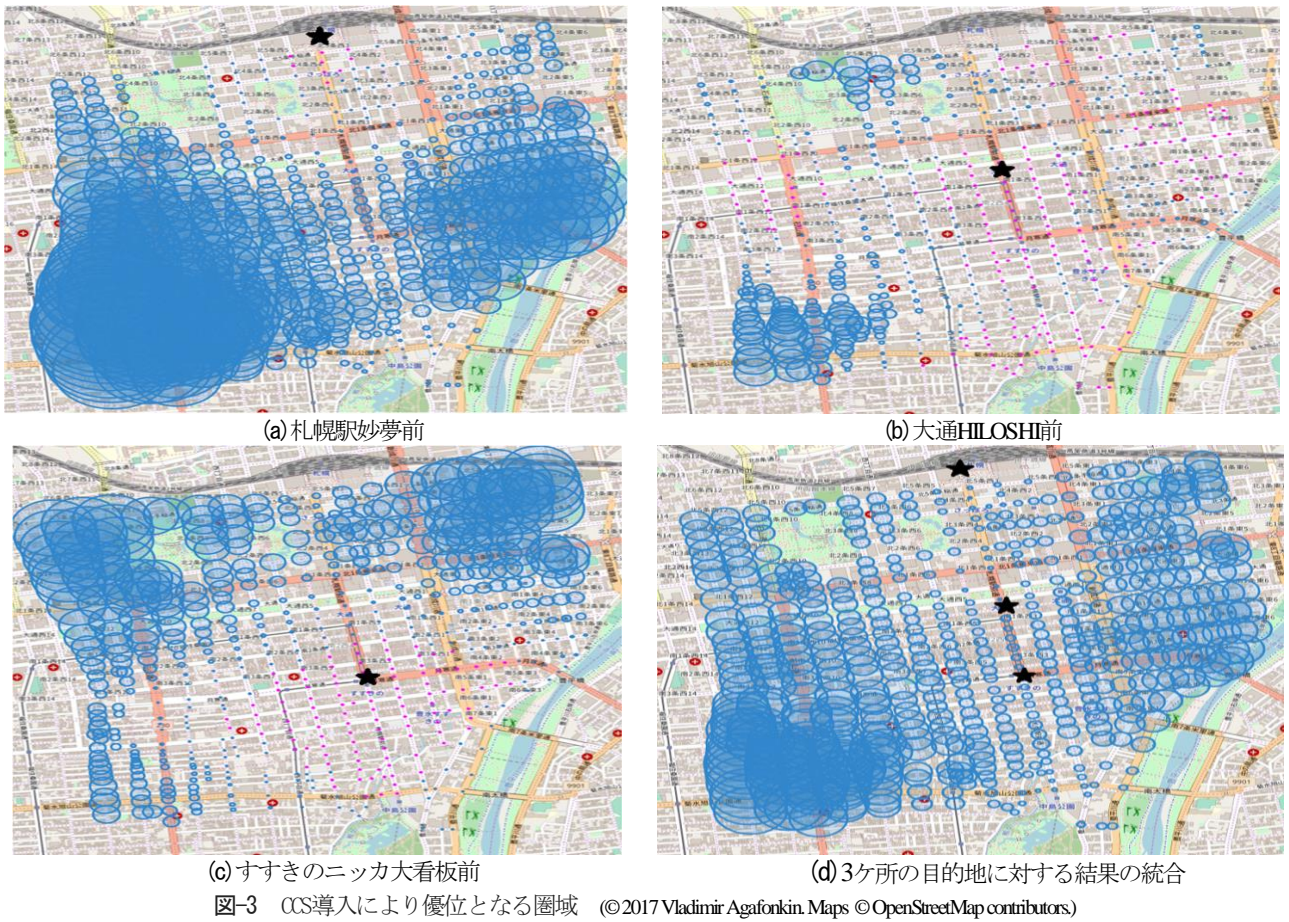
目的地 : 札幌駅妙夢前(図-2 I)、大通HILOSHI前(図-2 II)、およびすすきのニッカ大看板前(図-2 III)。なお、これらは、札幌市内の有名な待ち合わせ場所である。

利用料金 : 札幌市営地下鉄の2019年現在の料金設定。また、CCSの利用料は108[円/回]とする。

時間 : 午後2時

4 <https://cloud.google.com/maps-platform/>

5 <https://transit.yahoo.co.jp/>



札幌市営地下鉄の待ち時間：午後2時の平均待ち時間

用の改善がみられる圏域を明らかにする。

5. 実験方法

本章では、CCSが導入されることで、目的地への移動が優位になる圏域や、多様なコストの観点からステーションの配置を検証する実験の方法について説明する。

(1) CCS導入により優位となる圏域

以下の手順によって、効果費用 $E(A, B)$ の可視化を行う。

- ① 全ノードAから目的地のノードBの $Mb(A, B)$ を求める。
- ② n 個のノードからランダムにステーションを6個設定し、全ノードAから目的地のノードBまでの $Ma(A, B)$ を求める。
- ③ $Mb(A, B)$ および $Ma(A, B)$ から $E(A, B)$ を求める。
- ④ ①～③を N 回繰り返し、全ノードに N 回算出される $E(A, B)$ から、ノード毎にその平均値を求める。
- ⑤ ④で求める各ノードの平均値を半径とする円を地図上にプロットし、効果費用 $E(A, B)$ の変化を可視化する。

本実験では、4.に示した目的地を設定し、以上の手順で求める $E(A, B)$ を用いて、CCSの導入によって効果費

(2) 効果費用が最大となるステーション配置

本研究では、CCSの導入によって優位となる圏域を求める際に得られる $E(A, B)$ を用いて効果費用が最大となるステーションの配置を得る。具体的には、CCSの導入によって優位となる圏域を求める際に N 回得られる $E(A, B)$ を用い、次式(6)を考える。

$$G(B) = \max \left\{ \sum_N E(A, B) \right\} \quad (6)$$

本研究では、式(6)によって、効果費用が最大となるステーションの配置を得る。

(3) 計算回数の決定

本実験では、繰り返し計算の打ち切りを判断するためのパラメータ ε を、式(7)のとおり、 K 回目までの計算結果の平均と $K - 1$ 回目までの平均の差によって求める。

$$\varepsilon = \left| \left[\frac{\sum_K \left\{ \sum_n E(A, B) \right\}}{K} \right] - \left[\frac{\sum_{K-1} \left\{ \sum_n E(A, B) \right\}}{K-1} \right] \right|$$



図-4 効果費用が最大になるステーション配置 (©2017 Vladimir Agafonkin, Maps ©OpenStreetMap contributors.)

$$\left\| \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_n E(A, B) \right\} / K - 1 \right\| \quad (7)$$

本実験では、 ϵ が1.2未満のとき、計算を打ち切ることとし、このときの計算回数をNとする。

6. 実験結果および考察

本章では、4. および5. に説明した設定の下に行った実験の結果を示し、それらについて考察する。

(1) CCS導入により優位となる圏域

本実験では、4. に示した3カ所の目的地を設定し、それぞれについて、CCS導入が優位となる圏域を求め図-3に可視化した。さらに、これらを統合した場合の結果も図-3(d)に併せて示す。図-3(d)は、3カ所の目的地それぞれに対する計算の際に求まる各ノードの効果費用の平均である。なお、図-3では、黒色の星印が目的地となっている。また、全ノードに青または桃色の円が描画されており、その半径によって効果費用の大きさを表している。効果費用が0となる場合、すなわちCCSの導入による変化が見られないノードは、桃色となっている。図-3では、特に、札幌市営地下鉄の駅から遠いノードほど円の半径が大きく、CCSの導入による効果費用が高くなる

ことがわかる。一方、全ての目的地の最寄駅が含まれる路線(南北線)の駅付近は、効果費用が大きくなるノードは見られず、半径の小さい円または桃色の円が多くなっている。また、南北線と交差する路線である東西線付近のノードに注目すると、南北線付近と比べて半径の大きな円がみられる。これらは、提案手法に含まれる、乗換抵抗を表すパラメータ、階段昇降に関する時間価値のパラメータ、およびエネルギー価値に関するパラメータによる影響と考えられる。加えて、図-3(d)では、青い円が多く見られ、CCSを札幌市に導入することによる効果費用が期待できることがわかる。

以上より、提案手法を用いることで、多様なコストの観点から経路一般化費用に基づく効果費用が算出され、CCS導入の効果が期待できる圏域の可視化が可能となったことがわかる。

(2) 効果費用が最大となるステーション配置

本実験では、前節の実験で得られる効果費用 $E(A, B)$ を用い、効果費用が最大となるステーションの配置を求める。具体的には、3カ所の目的地をそれぞれ設定した場合の $G(B)$ を求め、その時のステーション配置を得る。さらに、それらの合計が最大となるステーション配置も併せて得る。これらの可視化結果を図-4に示す。この図では、得られたステーションの位置を紫色の三角形で示

している。図-4では、効果費用が最大となるステーションは、目的地の最寄駅が含まれる路線(南北線)から離れた場所に位置している。特に、図-4(b)では、目的地の最寄駅である大通駅が、南北線と東西線を有するため、それらの路線から離れた南西部にステーションが複数配置されている。また、3カ所の目的地に対する結果を統合した図-4(d)では、東西線の駅である西11丁目駅およびバスセンター前駅の付近にステーションが配置されていることがわかる。これらは、提案手法に含まれる、乗換抵抗を表すパラメータ、階段昇降に関する時間価値のパラメータ、およびエネルギー価値に関するパラメータによる影響と考えられる。

以上の結果より、提案手法によって、移動のコストに基づく都市部におけるCCS導入の優位性に関する分析が可能となることが確認された。

7. まとめ

本研究では、CCS導入によって見られる所要時間や金銭コストの変化など、複数の要因に注目した分析手法を提案した。具体的には、最短の距離や時間だけでなく、運賃などの金銭コストや移動に伴うエネルギーコストなど、複数のコストを考慮した経路一般化費用を定義し、それに基づく効果費用を算出可能とした。この効果費用を用いることで、CCSの導入によって目的地への移動が優位になる圏域や、複数のコストを考慮したステーション配置についての検証を可能とした。

また、本研究では、札幌市を対象とした実験を行った。この実験では、提案手法によって求める経路一般化費用とそれに基づく効果費用を用いることで、都市部におけるCCS導入の優位性に関する分析が可能となることが確認された。

参考文献

- 1) 藤垣 洋平, Giancarlo Troncoso parady, 高見 淳史, 原田 昇: 統合モビリティサービスの概念と体系的分析手法の提案, 土木計画学研究・論文集, Vol. 73, No. 5, pp. 735-746, 2017.
- 2) Citi Bike : Citi Bike Daily Ridership and Membership Data, <https://www.citibikenyc.com/system-data>, (2019年3月8日閲覧)
- 3) The Metropolitan Transportation Authority : Introduction to Subway Ridership, <http://web.mta.info/nyct/facts/ridership/>, (2019年3月8日閲覧)
- 4) Juan Carlos García-Palomares, Javier Gutiérrez, Marta Latorre : Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach, *Applied Geography*, Vol. 35, pp. 235-246, 2012.
- 5) 佐藤 寛之, 青山 吉隆, 中川 大, 松中 亮治, 白柳 博章: 都市公共交通ターミナルにおける乗換抵抗の要因分析と低減施策による便益計測に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, No. 4, pp. 803-812, 2002.
- 6) 塚田 幸広, 河野 辰男, 田中良寛, 諸田 恵士: 一般化時間による交通結節点の評価指標に関する研究, 第25回交通工学研究発表会論文報告集, Vol. 47, No. 10, pp. 145-148, 2005.
- 7) 石村 怜美, 梶原 康至, 太田 恒平: 乗換検索サービスの経路選択データを用いた公共交通の経路選択行動分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 49, 2014.
- 8) 吉川 耕司, 金森 俊樹: 乗換抵抗と運行ダイヤを考慮した地下鉄の最適経路算出システム, 土木情報システム論文集, Vol. 10, pp. 193-202, 2001.
- 9) Babara E. Ainsworth, William L. Haskell, Stephen D. Hellmann, Nathanael Meckes, David r. Bassett jr, Catrine Tudor-Locke, Jennifer I. Greer, Jesse Vezina, Melicia C. Whitt-Glover, and Arthur s. Leon : Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values, *A Med. Sci. Sports Exerc*, Vol. 43, No. 8, pp. 1575-1581, 2011.

SUPERIORITY ANALYSIS OF CCS BASED ON COST OF MOVEMENTS IN URBAN AREA

Kosuke KASAHARA, Sho TAKAHASHI and Toru HAGIWARA

In this research, we defined "route generalization expenditure", which is considering not only shortest distance, shortest time but also various cost. By using this, when the means of transportation was diversified by the introduction of the community cycle system, it was possible to analyze the effects, focusing on a plurality of costs. In this research, we conducted an experiment for the central area of Sapporo city, and clarified the point where movement to the destination gets advantage by using "route generalization cost". As a result, it was shown that a point where introduction of the share cycle system reduces the cost of moving to the destination.