

異なる属性を考慮した錯綜環境下の歩行者流動シミュレーションモデルの構築*

Development of Pedestrian Simulation Model Considering Heterogeneity *

松本麻美**・マークミスカ***・桑原雅夫****・田中伸治*****

By Mami MATSUMOTO**・Marc MISKA***・Masao KUWAHARA****・Shinji TANAKA*****

1. はじめに

本研究は歩行空間における交通容量やサービスレベル等の交通工学指標を評価するため、より現実社会に即した再現性の高い歩行者流動シミュレーションモデルの提案・検証を目的としている。

人口の集中する日本の都市部では、ターミナル駅やイベント会場、繁華街の歩道といった歩行者が錯綜する空間の設計において、機能性および安全性から混雑状態とそれに応じたサービスレベルの定量的評価が大変重要である。既存の研究では、階段や駅の改札のように主に一方に流れる歩行者について、幾何構造上明確なボトルネックが発生する際の歩行者交通は様々な角度から取り扱われてきた。しかし、複数の方向へ移動する歩行者交通の錯綜する状況下について扱うものは、観測分析・シミュレーション評価ともに少ない。また、そうした状況下において歩行者の属性を考慮した評価モデルは非常に少なく、特に、メンバー歩行者間の総合作用を考慮する必要があるグループ歩行者を扱うモデルは未だに確立されていない。本研究では、歩行空間の限定されない交錯交通時および混雑時における歩行挙動の特徴を明らかにするため、渋谷駅前にあるスクランブル交差点にて観測を行った。この観測より歩行者の希望する歩行速度や移動方向の選択傾向を考察し、また同状況において、ベビーカーの有無、移動速度の速さ、グループでの歩行など、歩行者の属性毎における歩行挙動特性の違いを明らかにした。歩行者属性及びグループ歩行者のモデル化については、歩行者の物理的な行動特性に基づいたモデルを構築した。周辺歩行者に応じて移動方向を決定する歩行者属性ごとの意思決定モデルを確立した後、グループ内にお

ける歩行者の意思決定を組み込みモデルの拡張を行った。また、このモデルの妥当性を示すため、構築したモデルと実際の観測結果とを照合してモデルの再現性を確認した。

2. 既往の歩行者シミュレーションモデル

交差点やイベント会場、ターミナルなど、多様な状況が想定される交錯点では

- 通過交通量の減少
- 混雑時における事故

を防止するため、混雑状態とそれに応じたサービスレベルの定量的評価が必要である。特に歩行施設などの設計を行う際には容量をできるだけ正確に評価することが不可欠である。歩行者は車両と違い様々な移動方向を選択することができるため、単純なボトルネックの評価だけではなく複雑な交錯交通を考慮した評価が必要とされる。また交錯交通のパターンは双方向に移動する通路や、十字路、スクランブル交差点など複数方向の動線が交錯する状況など、非常に多種多様であり、そのパターンに応じて歩行者の交通状態は複雑に変化する。駅や交差点など、旧来の設計評価においては対象地点の断面幅員など個々の地点のみに着目した分析が主であった。しかし需要の発生パターンは時間によって大きく変動することから、その変動を考慮した動的な交通流分析が必要となる。歩行者シミュレーションモデルはその分析ツールとして有効である。

Helbingら¹⁾が提案したSocial Forceモデルは、障害物や他の歩行者と自分との間に斥力が働き、目的地及び歩行者の興味を引く対象と自分との間に引力が働くと仮定するものである。この斥力と引力の合力により運動方程式をたて、各時刻における加速度を算出する。このような運動方程式によるモデルは、次の時刻における解の導出が容易なことが利点である。しかし、実際の歩行者は、回避対象となる歩行者同士が今の位置から移動することを予測した上で、お互いの目的地に向かって進むことのできるギャップを見つけて交錯部に流入している。またこの差異が混雑時の通過交通量に大きな影響を及ぼすものと考えられるが、Social Forceモデルでは歩行者の意思

*キーワード：歩行者流動モデル，歩行者属性

**非会員，修士(工学)，西日本旅客鉄道(株)

***非会員，PhD，東京大学生産技術研究所

****正会員，PhD，東北大学情報科学研究科

*****正会員，博士(工学)，東京大学生産技術研究所

(東京都目黒区駒場 4-6-1, TEL:03-5452-6419,

E-mail: stanaka@iis.u-tokyo.ac.jp)

決定行動の表現がしづらく、周辺歩行者との相互作用や将来の状況の予測を組み込むことができない。よって、歩行者の属性によって変化する意思決定や周囲から受ける影響を考慮できない。

横山ら²⁾は災害時における歩行者の避難行動シミュレーションモデルとしてポテンシャルモデルを提案している。このモデルは、目的地までのポテンシャルコストにより経路選択を行うモデルである。まず任意の点から目的地までの移動コストを算出して移動コストのポテンシャル面を描き、このポテンシャル面に対して勾配の急な方向に向かって歩行者が移動する。歩行者の性別、年齢、知識に応じてポテンシャル面を変化させることによりある程度歩行者の属性を考慮することが可能であるが、モデルが歩行者の避難行動という状況を想定しているため十分な検証がなされていない。また、ポテンシャルモデルでは、最適な方向を常に探索できる反面、同じ目的地の歩行者については属性に関係なく経路が一意に決まってしまうという問題がある。

Hoogendoornら³⁾は、歩行者はコストを考慮してその人の効用を最大化するように加速度を選択するとしている。加速度を決定するコストは、希望速度から離れることによる不効用、他の歩行者や障害物の接近による不効用、急激に速度変化することによる不効用の3つである。このモデルでは他の歩行者の動きを考慮した意思決定行動が反映されているが、近い将来の状況を先読みした上で行動するまでには至っていない。また、歩行者属性として年齢、性別、健康状態を一つのパラメータで表してモデル内に組み込んではいいるが、それを拡張するには限界があり、属性による特徴を表現するには十分とはいえない。

浅野ら^{4) 5)}は目的地まで移動する歩行者の行動を移動コストの最小化問題として表現した歩行者モデルを提案している。歩行者は、希望する移動方向を持ち、間近の将来までの限られた時間内の移動距離を移動方向成分において最大化する。そして、同時に歩行者が周辺歩行者の行動を先読みした上で、次の時刻の経路と歩行速度を決定するものである。移動時間中も周辺歩行者が等速等運動で移動し続けると仮定した上で移動距離を最大化し、その際に壁や周辺歩行者などの障害物とは衝突しないように方向と速度を選択する。つまりこのモデルでは、混雑した状況下で重要となる「周辺歩行者の位置を予測しつつ移動する」という挙動を先読み時間として設定することで再現している。この歩行者モデルにおいても、モデル内における母集団の性質が同一タイプであり、交通容量の評価が十分になされているとはいえない。しかし浅野らのモデルは個々人の行動メカニズムに基づくため、ビジネスマンやグループ歩行といった歩行者の個人特性の要素を付加し、挙動パラメータを設定することに

よって、より現実的なシミュレーションが可能である。

3. 歩行者モデルのフレームワーク

(1) モデルの前提と概要

周辺歩行者の予測位置を制約として個々の歩行者が最適な移動方向と速度を選択するモデル概念をベースとしたモデルの概要を述べる。

このモデルは物理モデルと異なり、歩行者の行動メカニズムに立脚していることから、個人の挙動特性を付加することが容易であり、実測に基づいた検証が可能である。図1に歩行者の速度ベクトル算出フローを示す。歩行者は、他の歩行者や障害物の行動を考慮し、お互いに等速直線運動すると仮定したうえで、選択可能方向毎に、ある方向を選択した時の衝突時間（以下 *TTC*: Time to Collisionと表記）を算出する。*TTC*が最大となる方向と現在の移動方向を考慮した方向を、希望方向に対する最速到達距離をとる最適方向として次ステップの移動方向として選択する。現在の歩行速度 v_i が個人々人毎によって設定された希望速度 v_d と等しければ最適方向へ等速で運動する。一方現在の歩行速度が希望速度に満たない場合は加速し、希望速度に近づく速度で歩行しようとする。この時の速度選択は、*TTC*が大きい場合、歩行者は*TTC*の大きさに比例して希望速度に到達するまで段階的に加速する。一方*TTC*が1秒未満で、次ステップで対向歩行者に衝突してしまう状況下では、歩行者は歩行エリアに合った挙動を選択して*TTC*を大きくしようとする。他の歩行者の挙動を考慮して停止及びシフトすることにより*TTC*が1秒以上になれば、歩行者は再び希望速度に到達するまで段階的に加速する。結果、希望方向へ新規の速度 v_{i+} で歩行する。

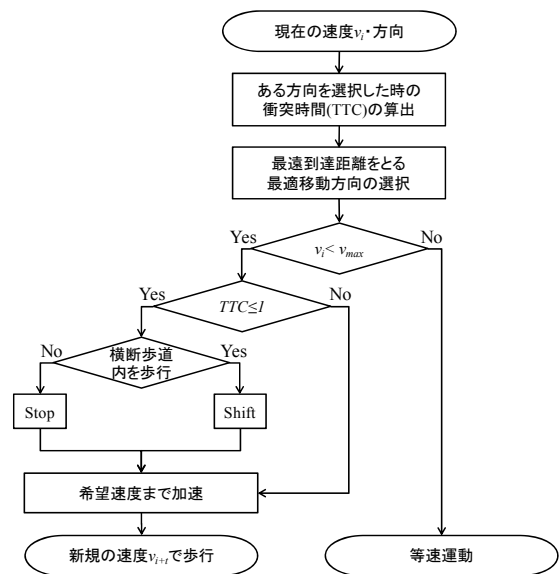


図1 歩行者の速度ベクトル算出フロー

モデルの基本仮定を以下に示す,

- 歩行者はTTC内において移動時間を最小化する.
- 壁や周辺歩行者などの障害物と衝突しないよう, 方向と速度を選択する.
- TTC中の周辺歩行者は, 等速等方向 (直近過去の平均速度) で移動し続ける.

歩行者はスキャンインターバル Δt 毎に, 現在時刻 t において時刻 $t+TTC$ までの周辺歩行者の行動を予測した上で, 時刻 $t+\Delta t$ における歩行速度と方向を決定する.

(2) 歩行者の選択可能速度と方向の決定

図2に歩行者 i の選択可能速度ベクトルの抽出図を示す. 周辺歩行者や障害物の抽出には, 対象歩行者 i の現在の位置を中心とし, 時刻 t において, 現在の進行方向ベクトル $\phi_i(t)$ を中心に角度 ϕ_i をとる範囲を歩行者 i の選択可能方向の集合 Ω とする. この視界内に入り, TTC内に衝突する可能性のある歩行者や障害物が回避対象として抽出される. 選択可能方向最大角度 ϕ_i の大きさは対象歩行者 i の時刻 t における現在の歩行速度 $v_i(t)$ 及び希望速度 v_d に依存し, 式(1)より得る. 選択可能方向角度は速度が遅いときに広くなり, 速いときは最小角度まで狭くなる. また最大角度 ϕ_{max} および ϕ_{min} の角度はそれぞれ歩行者属性によって変化する.

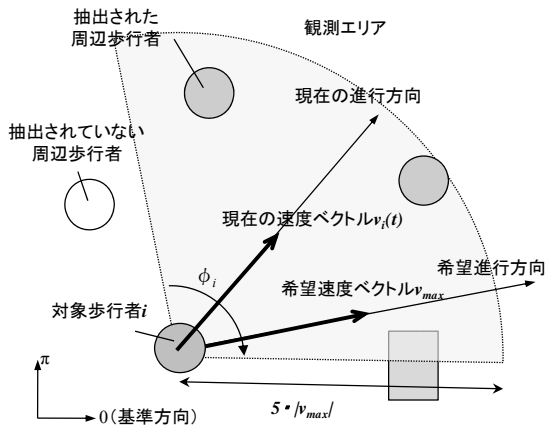


図2 歩行者 i の選択可能速度ベクトル

$$\phi_i = \left(v_i(t) + \frac{v_d \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} \cdot \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{v_d \phi_{min} \phi_{max}} \right)^{-1} \quad (1)$$

(3) グループ歩行者モデルへの展開

歩行者の属性を考える際, 個人ごとの挙動相違だけではなく, 歩行者が属するグループも歩行者流動を決定する際の大きな要因となる. 図3に本研究における基本モデルの拡張フローを示す. グループで歩行する歩行者は, 個人で行動する歩行者と違い, 同行者になるべく接近して追従歩行する挙動がみられる. 本研究ではグルー

プ構成歩行者の違いによってグループを3グループに分類し, 概要を表1にまとめた. まず, グループ内における先導者によりグループ全体の挙動は変化する. 先導者が妊婦や高齢者など保護対象となる歩行者の場合, 追従者である他のグループ構成員は彼及び彼女の周囲を囲うようにして歩行する. 先導者がリーダーとなる場合, 追従する者は目的地を把握しているか否かによりグループ構成は変わる. 追従者に目的地情報が付与されていなければ, 追従歩行者は先導者を目的地に設定して行動し, 先導者は最後尾の追従者との距離を考慮して速度選択する. 追従者に目的地情報が与えられている場合は先導者に追従する一方で追従者間においても相互作用が働くため, 団体を固まって行動する.

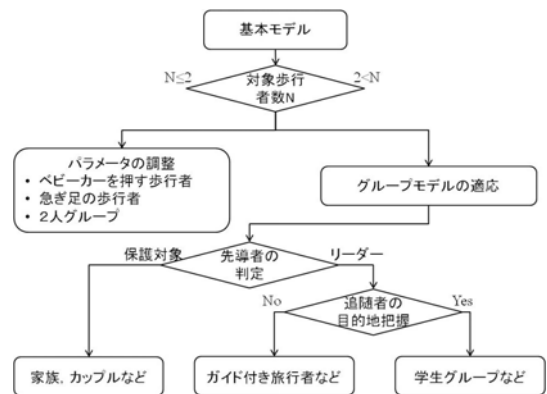


図3 基本モデルの拡張フロー

表1 グループ歩行者モデルのまとめ

グループ種別	家族, カップルなど		ガイド付き旅行者		学生グループ	
対象歩行者 (抽出対象)	○	○	○	○	○	○
追従歩行者 (抽出対象外)	○	○	○	○	○	○
先導者	○	○	○	○	○	○
追従者	○	○	○	○	○	○
目的地	○	○	○	○	○	○
モデル構成	<ul style="list-style-type: none"> • 集合力が強い • 目的地は全員既知 • グループは必ず一列に行動し, 分離することはない. 		<ul style="list-style-type: none"> • 目的地は先導者のみ既知 • 追従者は先導者に追従 • 追従者と一定距離以上離れた場合, 先導者は後続. 		<ul style="list-style-type: none"> • 目的地は全員既知 • 追従者は前方の歩行者と目的地方向のベクトルを算出し, 追従距離を越すとベクトルを逆転して歩行. 	

4. 交錯時の歩行者行動検証のための観測

パラメータ設定によってより現実に即した交錯交通時における歩行者シミュレーションモデルの構築を可能とするため, 年齢, グループ行動・職業・荷物の有無など, 様々な属性に応じた歩行者の挙動特性を観測する必要がある. 歩行者の属性に応じた挙動を観測するため渋谷駅前のスクランブル交差点にてビデオ観測を行った. 観測時間帯は駅前に混雑が発生する午前中に行った. 写真1に, 観測対象地点である渋谷駅前交差点の写真およびそのサイズを示す. 歩行者の軌跡をビデオ画像処理システ

ム⁶⁾により抽出し、歩行速度や回転角度を算出した。

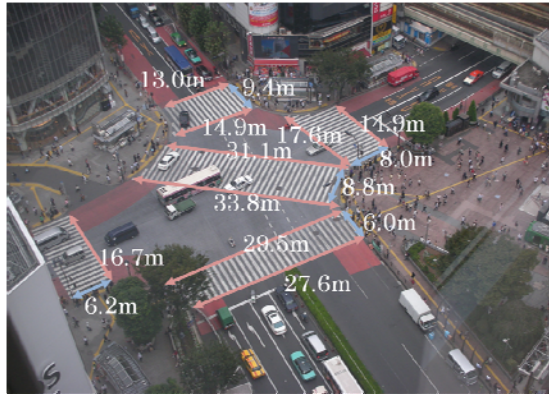


写真1 渋谷駅前交差点及びそのサイズ

観測対象とする歩行者の属性はベビーカーを押す歩行者(Pram), 平均歩行速度1.35[m/s]⁷⁾に比べて平均2.0[m/s]以上で歩行する急ぎ足の歩行者(Hurry), 2人グループで歩行する者(Group), 一般的な歩行者(Normal)の3つに分類した。表2に観測より得た結果から、モデル内に設定するそれぞれのパラメータ値を示す。

表2 観測より得た設定パラメータ値

パラメータ		Pram	Hurry	Group	Normal
速度[m/s]	平均速度	1.03	2.29	1.21	1.35
	標準偏差	0.48	0.71	0.51	0.45
人体楕円(横幅x) [m]		0.6	0.2	0.3	0.3
人体楕円(縦幅y) [m]		0.5	0.5	0.5	0.5
方向転換可能角度 [rad]		0.35	1.40	0.52	1.05
方向転換可能角度 [度]		20	80	30	60

速度の速い歩行者は頻繁に加減速することで歩行者を回避し、一方遅い歩行者は一定の速度で歩行しようとする傾向にある。以上の観測結果より、既往の研究ではすべての歩行者は急激な速度変化を好まないと仮定されているが、歩行者の属性によっては必ずしもそうとは言えないことがわかった。また、急ぎ足の歩行者は経路選択の自由度が高いため、方向選択可能角度を他属性と比べて大きく設定した。

5. モデルの検証

提案した歩行者移動モデルの性能を検証するため、渋谷駅前スクランブル交差点の実際の交通現象においてシミュレーションを行った。シミュレーション実行時の一例を写真2に示す。一部の歩行者は、対向歩行者を避けるために横断歩道外の経路を選択している挙動が見受けられる。観測と信号50サイクルのシミュレーション結果における歩行者の属性別速度分布を図4に、回転角度の累積分布を図5に示す。両図ともにシミュレーション結果を実線で表し、比較のため観測結果は破線で示す。

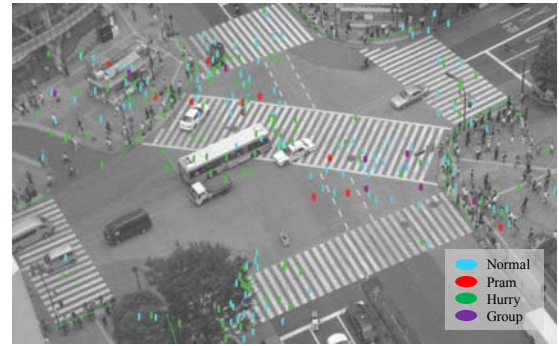


写真2 渋谷駅前スクランブル交差点におけるシミュレーション実行時の一例

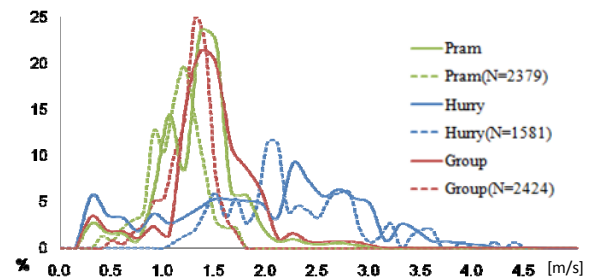


図4 歩行者の属性別速度分布

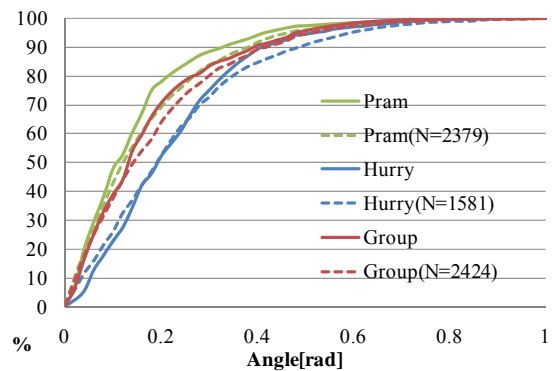


図5 歩行者の回転角度累積分布

図4, 5より、観測結果とシミュレーション結果は共に近い値と分布を示している。表3に、シミュレーション内において最も観測値に適合したパラメータ値を示す。今回のシミュレーションで設定した速度は、歩行者の希望速度として観測で得られた実際の歩行速度より速く設定された。これは、目的地方向に対向者や障害物があると歩行者は歩行速度の変更を強要されるため、希望速度で歩行出来ない為である。つまり、観測速度は現状下において歩行した歩行速度であり、実際の歩行者の希望する速度は観測速度より速い。特に急ぎ足の歩行者では希望速度と歩行速度の差は拡大する。

表3 シミュレーションより得たパラメータ値

パラメータ		Pram	Hurry	Group	Normal
速度[m/s]	平均速度	1.15	2.70	1.26	1.85
	標準偏差	0.30	0.75	0.20	0.25
人体楕円(横幅x) [m]		0.6	0.2	0.3	0.3
人体楕円(縦幅y) [m]		0.5	0.5	0.5	0.5
方向転換可能角度 [rad]		0.35	1.40	0.52	1.05
方向転換可能角度 [度]		20	80	30	60

6. まとめ

本研究では、歩行者が合理的な意思決定行動を行うと仮定した上で歩行者移動モデルを構築した。その際に、歩行者の属性による違い、及び個人とグループの歩行形態による挙動の違いを考慮したモデルを構築した。最終的にそれらを統合したモデルについて、実際の歩行者行動との比較検証を行った。本研究における成果を以下にまとめる。

- [1] ある幅員が定められた一方向の歩行者交通の観測、交錯状況および避難行動の実験結果はあるものの、複数の方向の歩行者が交錯する現象の調査はほとんど行われていなかった。本研究では、様々な属性をもった歩行者が一斉に移動を開始し交錯する渋谷駅前のスクランブル交差点で観測し、歩行者のデータを得た。
- [2] 人体円を楕円形とし、速度によって変化するパーソナルスペースを考慮した。これによってより現実に近い歩行者挙動のシミュレーションを可能にした。
- [3] 物理モデルと異なり、歩行者の行動メカニズムに立脚して個人の挙動特性を考慮できるモデルを構築した。これは個人の歩行特性に基づいているためパラメータを変化することで歩行者の属性を容易に組み込むことができる。
- [4] 既往のモデルにおいてすべての歩行者は速度の頻繁な変更は好まないと仮定されており、方向選択角度も一定の値に固定されていた。しかし、観測結果より速度の速い歩行者は頻繁に加減速することで歩行者を回避する傾向があることが分かった。よって、既往のモデルにおける仮定が、歩行者の属性によっては必ずしも成り立たないことがわかった。本モデルでは実際の歩行者の行動に則り、速度が速くなると方向選択角度が狭まる特性を組み込んだ。これにより速度の変更頻度も歩行者の属性によって変化でき、速度増加に伴い方向選択角度を限定することが可能になった。
- [5] 個人歩行者以外の属性としてグループを形成して歩行する歩行者についても本モデルの歩行者行動理論に基づいて説明可能とした。
- [6] ほとんどの既往のシミュレーションモデルが出発点と目的地が定められ経路の固定されている一方向に

においてのみ検証されたものであるか、または歩行者の目的地がある地点に集中する避難行動時におけるモデルであった。本研究におけるモデルは、自由度が高く経路が限定されないスクランブル交差点において適用が可能であり、歩行者の目的地が分布する交錯状況下において歩行者の経路選択歩行を再現することができた。

7. 今後の課題

本研究ではグループ行動として、三種類のグループによる歩行モデルを提案したが、観測データの限界のため、今回は歩行特性の指標による検証のみに留まっている。今後グループ行動のさらなる解析を進め、挙動の空間的な検証を行うことが必要である。

参考文献

- 1) Helbing, D., Molnar, P. : Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), pp.4282-4286, 1995.
- 2) 横山秀史, 目黒公朗, 片山恒雄: 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集, 507(I-31), pp.225-232, 1995.
- 3) Hoogendoorn, S.P : Pedestrian flow modeling by adaptive control, TRB 2004 Annual Meeting, 2004.
- 4) 浅野美帆, 井料隆雅, 桑原雅夫: 交錯交通の容量評価のためのマイクロ歩行者行動モデル, 交通工学, 43(4), pp.80-89, 2008.
- 5) 浅野美帆, 桑原雅夫: 先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション, 生産研究, 59(3-1) pp.38-41, 2007.
- 6) 鈴木一史・中村英樹: 交通流解析のためのビデオ画像処理システムTrafficAnalyzerの開発と性能検証, 土木学会論文集D, Vol.62, No.3 pp.276-287, 2006
- 7) 岡田光正: 建築と都市の人間工学, 鹿島出版, 1977