

歩道におけるセンサー照明の 活用形態と光環境

The Influence of Sensor Lighting and Lighting Quality

山口 剛志¹・窪田 陽一²・深堀 清隆³

¹学生会員 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程環境システム工学系専攻（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

E-mail:05KH017@post.saitama-u.ac.jp

²正会員 工博 埼玉大学大学院理工学研究科環境科学・社会基盤部門（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

E-mail:y1kubota@env.gse.saitama-u.ac.jp

³正会員 博士（学術） 埼玉大学大学院理工学研究科環境科学・社会基盤部門（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

E-mail:fukahori@post.saitama-u.ac.jp

The concern for the lighting environment in the street at nighttime becomes more important in recent years. As a huge amount of energy is wasted in street space without pedestrians at night, the sensor lighting is effective to save the energy. There are various way to introduce the sensor-lighting into the street, and the author aims to study what type of control method is effective for both energy saving and psychological effects such as feeling of brightness, visibility of pedestrian, and feeling against change of brightness. Since it is difficult to represent the dynamic change of sensor lighting, 3D computer animation is used in the psychologcel experiment. The type of sensor control is evaluated by using the paired comparison method.

In order for the energy saving, the most effective measure is to reduce the luminous flux of the lamps when sensor doesn't detect the pedestrian. Since the energy consumption at the time of detection is not significant compared with the constant energy consumption, it is effective to increase the luminous flux at the time of detection in order to increase the feeling of brightness.

Key Words : *Brightness ,Illumination ,Sensor lighting*

1. 研究の背景・目的

近年、街路照明を整備する上で、器具のデザイン性や消費エネルギーに加え、光害への対応が問われるようになってきている。光害とは、自然界の動植物や人間の諸活動への障害となる人工照明による光の害であり、望ましくない範囲、方向への不必要な漏れ光が問題となる。平成10年3月には環境庁より、「光害対策ガイドライン～良好な照明環境のために～」¹⁾が策定、発行され、関心が高まっている。今後、多くの自治体による施策も展開されると考えられる。照明による消費エネルギーの削減や不必要な漏れ光の低減については、街路の利用状況に合わせて照明状態を変化させるセンサー制御による街路照明が有効と考えられる。センサーによる防犯灯の明るさ制御の有効性については松井らによる一連の研究²⁾³⁾⁴⁾がある。文献²⁾では、暗幕で覆った室内実験により照

度の変動パターンに対する人の光の変化の知覚と不快感を評価している。さらに文献³⁾では、光源を明るさを落とした20W蛍光灯相当の状態から検知時にフル点灯させるセンサー制御を行う照明について、実際の街路での社会実験を行い、安心感および省エネ効果についての検討を行っている。街路空間へのセンサー照明の適用条件という観点から見ればこれはある固定した条件での検討といえるが、一方著者らは、CGを用いた仮想の評価ではあるが、街路における様々なデザイン条件を考慮した検討を行っている⁵⁾⁶⁾。ここでは検知時、非検知時の光源の明るさ、歩行者を検知する範囲、常時点灯している照明とセンサー制御照明の組み合わせなどのデザイン条件を総合的に変化させ、消費エネルギーの削減効果および心理的明るさ感の評価実験を行い、最適なセンサー照明の導入条件について検討している。しかし光源の出力や検知範囲の設定が十分でなく、より幅広い条件を考慮するこ

とが課題であった。またセンサー照明では、照明が突然、明るくなるのが落ち着きのなさや心理的不快感を歩行者に与えることが予想されるので、歩行者検知時の調光の方式を工夫する必要がある。従って本研究では、より数多くのセンサー照明の導入条件を考慮するとともに、検知時に瞬間調光する場合と明るさが漸増する条件を加えた評価を行うことにした。

センサー照明を導入した場合、光の提供が検知時に限定されるため、明るさ感の欠如による歩行者の不安感が危惧される。センサー照明の諸条件を制御し出来る限り感覚的な明るさを提供することが重要である。こうした安心感・不安感の問題は対面歩行者の存在認識によっても左右される。また従来の固定的な照明環境との違いや変化する光自体による違和感があるのか解明する必要もある。こうした心理学的課題について、評価項目として「明るさ感」「対面歩行者の見易さ」「光の変化」を設定し評価実験を行う。以上、心理的不安感や不快感を緩和しつつ、最低限のエネルギー消費でより明るさ感が得られるようなセンサー照明のデザイン条件を見出すことが本研究の目的である。加えて、評価実験で得られた知見から、より消費エネルギーを削減し、心理的不快感を抑制する上で、低位置のセンサー制御照明を導入することが有効であると考えられたので、その導入可能性の検討も実施している。

2. センサー制御照明の特徴

(1) センサー制御導入の利点

a) 省エネルギー

センサー自体の消費エネルギーは小さく、利用者のいない時間帯では必要とされない街路照明の消費電力を大幅に削減することが可能である。

b) 光害の軽減

「光害対策ガイドライン」で示されている対策に加えて、センサー導入により空間に放射される光の量を削減できることから、より根本的な光害の軽減対策になる。

c) 防犯性の向上

センサーを導入することによって、検知された範囲では周囲に比べて明るくなることから、比較的遠くからでも人の存在に気がつくことができる。また、検知される側についても自分の存在が検知されているという心理的効果から、防犯性が向上するものと考えられる。

d) 出会い頭の事故防止

人を検知した街路照明は周囲より明るく点灯することから、比較の見通しのきかない交差点などでは交差点進入歩行者を視認するよりも先に、その存在を事前に察知することができる。これにより歩行者に対して注意が向

き、事故防止につながることを期待される。

(2) センサー制御導入の問題点

a) 静止した状態だと検知されない

検知されてからある一定時間経過すると、被検知者が静止した状態であるとセンサーに認識されず、そのセンサーと連動した照明の光源が減灯・消灯する。

b) 検知・非検知の判断のみ

センサーには検知・非検知の判断のみで、被検知者の進行方向を認識することができない。従って利用者の進行方向に対応するようにセンサーを制御しようとする隣接した他のセンサーと連動させなければ困難である。また、この制御方法では複数の利用者が存在する場合は難しいと考えられる。

c) 一般的なセンサーの検知範囲が扇形

センサーによる検知範囲に空白を無くそうとする場合、センサーの配置は千鳥配列のような状態になり、道路の両端に設置することになる。また片側に配列しようとする場合、重なり合う部分が多くなり、無駄が増える。

d) センサーの検知範囲は照明範囲より狭い

街灯からの光はその光源から遠く離れた場所からでも見ることができるが、現在のセンサーではそこまで遠くのものまでは検知されにくい。つまり、人感センサーを灯具そのものに取り付けて利用することは困難である。

3. CG画像による光環境評価の信頼性

実空間に灯具を設置し評価することは困難なので、様々なモデル空間を作成出来る3次元コンピューターグラフィックス（以下3DCG）によって評価を行う。この場合問題となるのが3DCGの再現性である。そこでCGによって再現された光環境と現実の光の状態にどの程度差が生じているのかを把握するために、事前にCGによる空間と実空間との光環境の比較実験を行った。

(1) 実験方法

実空間をCGにより再現し、そのCG画像の明るさを実空間の光を調節することで比較しようとするものである。

方法として、概略図を図-1のように示す。スクリーン上に投影されたCG画像と同等の明るさになるように箱の中に設置した照明器具の明るさを被験者自ら調節を行ってもらおう。その際、スクリーン上に投影されたCG画像と箱の中の照明器具は何度でも見比べてよいものとした。CG画像は明るさの異なる3画像を用意し、スクリーン上で投影されたCG画像の輝度と実空間で被験者により調整された光源の発光部の中央の輝度を数回計測し、平均値を求めた。実験は暗室で行い、暗順応に10分間の時間を

設けた。また、被験者は学生7人（男性6人、女性1人）で行い、実験方法については事前に十分な説明を行った。

(2) 比較実験結果

CG画像と現実空間との輝度の関係を図-2に示す。被験者の調節した輝度が平均的にCGに描かれた光源の輝度と一致するかを検定したところ、両側検定（有意水準5%）では、CG画像A、Cのみが一致した（1%ではCG画像すべてで一致）。現段階ではサンプル数は十分ではないが、CG画像によって現実空間の光環境を評価することは光源の明るさの観点からは、それほど問題ではないと考えられる。

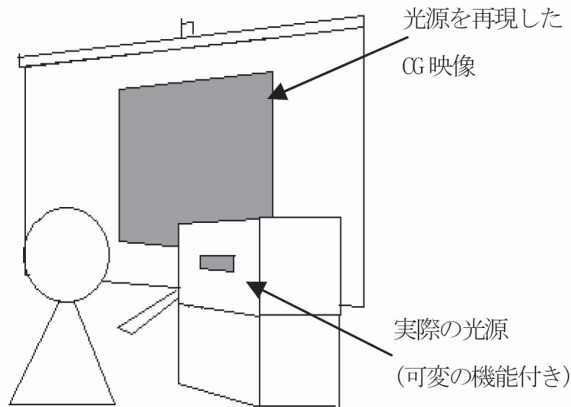


図-1 実験の概略図

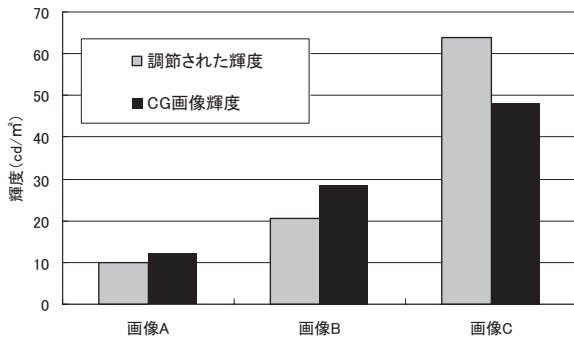


図-2 CG画像の輝度と被験者による輝度評価値の差

4. センサー照明を導入した街路の評価モデル

(1) センサー照明導入時の光環境評価の考え方

本研究では、ある街路空間に、配置や制御条件の異なるセンサー照明を導入し、その光環境を評価するものである。歩行者にとっての街路照明の性能は主に路面の平均照度で評価されている。また水平面照度の最小値を平均値で除した均斉度についても0.2以上確保することが推奨されている⁷⁾。斑のない一定以上の明るさを確保することは障害物の認知や見通しの確保上有効であるとき

表-1 歩行者のための屋外公共照明基準（照明学会推奨照度）における水平面照度の規定

場所の分類		推奨照度(lx)
使用状況	周囲の明るさ	水平面照度
夜間の使用が大	明るい	20
	中程度	15
	暗い	10
夜間の使用が中	明るい	10
	中程度	7.5
	暗い	5
夜間の使用が小	明るい	7.5
	中程度	5
	暗い	3
階段、急なスロープ	明るい	20
	中程度	15
	暗い	10

れているが、センサー照明は照明の範囲が限定されることと検知時と非検知時で明るさが変動すること、消費エネルギーの抑制をねらいとすることから、街路照明の性能評価について既存の基準の要件に拘泥することは新しい照明手法として有益とはいえない。むしろセンサー照明特有の複雑な光環境が諸々の機能的要件を満たしうるかを実験的に明らかにすることが課題である。本研究はこれに関わる諸問題のうち、街路歩行者の心理的反応（明るさ感など）と消費エネルギーの抑制効果に着目する。心理評価はセンサー照明が導入された街路をCGアニメーションにより再現し被験者に提示することで行う。その評価モデル空間には屋外公共照明基準(表-1)に対応したものを含めた。

(2) 街路横断構成

モデル空間の街路として都市部補助幹線道路を選択した。標準横断構成として両側の路肩を含んで9m、歩道部3.5mずつ取り、計16mとした。縁石の高さは15cmで歩道の高さは5cmのセミフラット形式としている。

(3) 照明器具の配置・ランプの出力

照明器具の配置は道路照明施設設置基準⁹⁾を参考に照明器具の配置とランプの出力を設定した。照明器具として、車道照明と歩道照明を設定した。ランプの明るさは光源から放出される光束(lm)によって決定される。光束は同じW(ワット)数でもランプの性能によって異なった値になってしまう。従って照明の出力は、光源の製品としての性能に捉われることのない指標として光束で設定するものとする。

a) 車道照明

補助幹線道路の幅員Wは6(m)となっており、照明の取付け高さは幅員の1.1倍ないし1.7倍以上となっている。本研究では10(m)と設定し、1灯あたりの光源の光束F(lm)を求めるには以下の式を用いる⁹⁾。

補助幹線道路の場合、灯具の配列は片側配列または千

表-2 人感センサーによって制御された光源の出力形式

形態番号	調光形態	光束			制御距離
		常時点灯	非検知時	検知時	
		lm			m
1	常時点灯	1250	—	—	—
2		2500	—	—	—
3		3750	—	—	—
4	センサー制御(瞬間)	—	0	2500	20
5		—	0	2500	30
6		—	1250	2500	10
7		—	1250	2500	20
8		—	1250	2500	30
9		—	1250	3750	10
10		—	1250	3750	20
11		—	1250	3750	30
12		—	2500	3750	10
13		—	2500	3750	20
14		—	2500	3750	30
15	センサー制御(変動)	—	0	2500	20
16		—	1250	2500	20
17		—	1250	3750	20
18		—	2500	3750	20

$$\frac{F}{S} = \frac{WKL}{NUM}$$

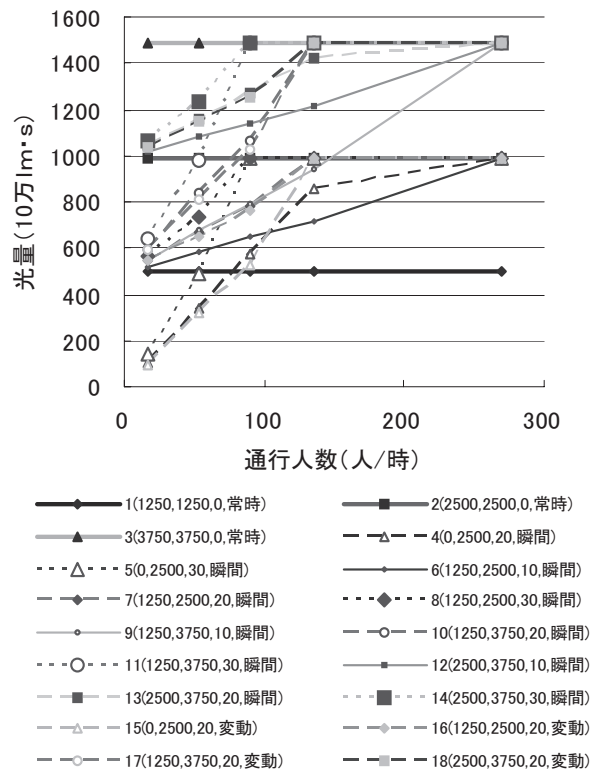
- F : 光源の光束 (lm)
- S : 灯具の間隔 = 20 m
- W : 道路幅員 = 6.0m
- K : 平均照度換算係数 = 15 (lx / cd / m²)
- L : 基準輝度 = 0.7 (cd / m²)
- N : 配列による係数 (片側配列 : 1.0)
- U : 照明率 = 0.3
- M : 保守率 = 0.7

鳥配列とされている。本研究では、片側配列として、配列による係数Nは1.0、灯具の間隔Sは幅員の3.5倍以下であるので20(m)と設定した。

平均照度換算係数K (lx/cd/m²) はアスファルト路面の場合15を採用した。基準輝度L(cd/m²)は補助幹線道路の場合0.7、照明率Uは0.3となっている。保守率Mを0.7として、1灯当たりの光束Fを6000(lm)と設定した。この求められた光源出力として評価モデルの車道照明光源の値とした。

b) 歩道照明

幅員は補助幹線道路の標準横断構成から3.5(m)となっており、灯具の配列は片側配列とした。灯具光源の設置高さは現在利用されている防犯灯などの高さを参考として5(m)と設定した。灯具の間隔は10mとし、光源は人感センサーによって制御するものとする。歩行者を人感センサーが検知し、歩道照明が点灯した場合の出力値を検知時出力とし、歩行者がいない状態で減光または消灯している出力値を非検知時出力とする。この出力は3段階に設定しており、組み合わせによって評価に与える要因が非検知時の環境なのか、検知時の環境なのか、または光の変化量が関係するのかわ確認できるように設定している。この出力差を変動幅とする。歩行者を検知した際の、その歩行者の位置から照明器具までの距離を制御距離とする。また、光環境の変化が歩行者にどのような影



※注 凡例の括弧内の要素は、形態番号(非検知時出力, 検知時出力, 制御距離, 調光形態)である

図-3 各形態の通行人数の変化による消費エネルギーの変化 (番号は表-2の形態番号に対応)

響を及ぼすのかを調べるため、光の変化のし方が、検知して直ぐにランプが最大出力となる「瞬間」と歩行者を感知してから3秒かけて光が漸増する「変動」を設けた。その一覧を表で示す(表-2)。そして、比較検討するために制御を伴わない常時点灯のモデルを作成した。CGにおける光環境の再現については、光源の設定位置・光源出力値を設定することで空間内に存在するオブジェクトの材料反射率などを考慮した計算が行われ、空間内オブジェクト上の照度、輝度が算出される。用いた評価モデルでは平均照度は歩道照明の出力値が3750(lm)のときは18.40(lx)となり、2500(lm)のときは13.54(lx)。そして、1250(lm)のときは10.64(lx)となっている。これは歩行者のための屋外公共照明基準(表-1)の各段階に合わせたものとなっている。

(4) 評価画像の設定

評価モデルの構成要素の材質について重要となる情報は、「反射率」「鏡面反射光レベル」「光沢」である。CGソフトのテクスチャから、これらの値が大きく外れないものを選定する。例えば、路面のアスファルト舗装材料について、一般的に使用されている材料の平均的な反射率は15~20%程度とあり、CGで使用したテクスチャーは平均

反射率を20%と設定した。光源の設定は点光源である。配光は等方配光でありCGで再現した灯具の形状に応じた影響を受ける。また、周辺環境として街路両端に高さ1mの花壇と1mの生垣を設置した。花壇の側面にはスケール感を持たせるためにレンガのテクスチャを用いる。また対面歩行者の見易さを評価するために歩行者の前方から1.5(m/s)の速さで近づいてくる身長170cmの人体モデルを設定した。またモデル空間内では人影や物影およびそれらの時間的変化も再現されている。作成した3DCGの中に通行する歩行者の目線（歩道中央、路面から高さ1.5m）にカメラを設置し、そのカメラを1.5(m/s)で20秒間(30m)移動させ街路空間のアニメーションを作成した。

5. 各評価モデルの消費エネルギー

センサー照明の大きな利点として重要な項目である消費エネルギーを算定する。センサー照明を導入した街路は歩行者の通行量によって消費エネルギーが変わるため、通行人数別に算出した。消費エネルギーはW数と点灯時間によって決まるが、ランプの性能によって同じW数であっても明るさが異なる場合があるために、モデルのランプ出力と同様にW数ではなく、光束(1m)を中心に考えた。横軸に単位時間当たりの歩行者数を等間隔に発生すると仮定し、縦軸にはその交通量によって生じる歩道用照明の光束出力値であり、1時間当たりに生じる光束の合計値を $lm \cdot s$ (ルーメン・秒)として計算している。この値をグラフ化したものが図-3である。図中にある凡例の番号は表-2に示された形態番号である。

図-3から制御距離30mでは90(人/時)、20mでは135(人/時)、10mでは270(人/時)で常時点灯と差が生じなくなる。これにより、交通量によっては消費エネルギーが逆転する制御方法もある。このことから、センサー制御を導入する際には導入箇所の利用状況についての調査が不可欠となる。評価実験に用いるCGモデルの通行者数の設定では、16(人/時)を採用している。本来は場所特性や夜間の歩行者数の時間帯変化を考慮すべきであるが、これを正確にシミュレートすることが目的ではないので歩行者の発生も単純化している。評価モデル100m区間に複数の歩行者を設定することは、検知による点灯状況が複雑化し、光の変化に対する被験者の理解が妨げられる。また対面歩行者の視認性を評価することが目的であるので、少なくとも1名の対面歩行者の接近が可能となる条件を考え16(人/時)としている。なお図-3によれば64(人/時)程度までの歩行者数では各モデル間の消費エネルギー量の大小関係は変化しないので、各モデルの比較という観点ではセンサー照明のエネルギー節約効果が出やすい条件での一般的傾向を捉えられると考える。

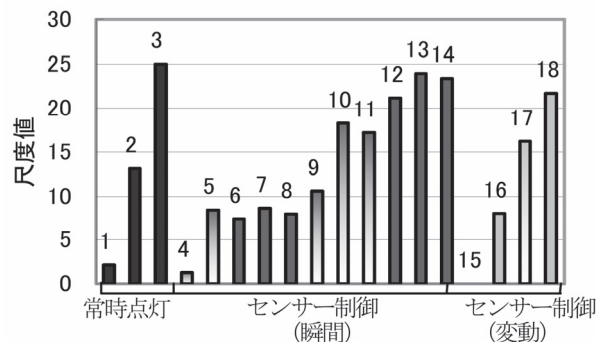


図-4 「明るさ感」尺度値 (番号は表-2の形態番号を示す)

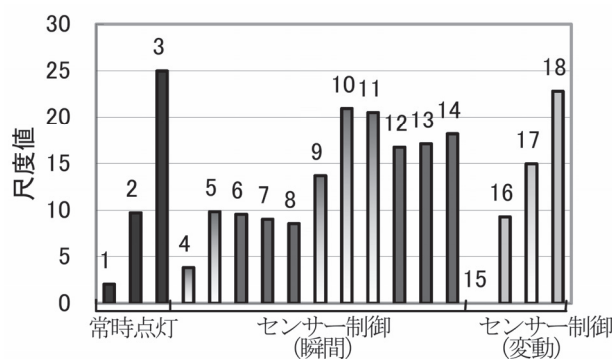


図-5 「見易さ」尺度値 (番号は表-2の形態番号を示す)

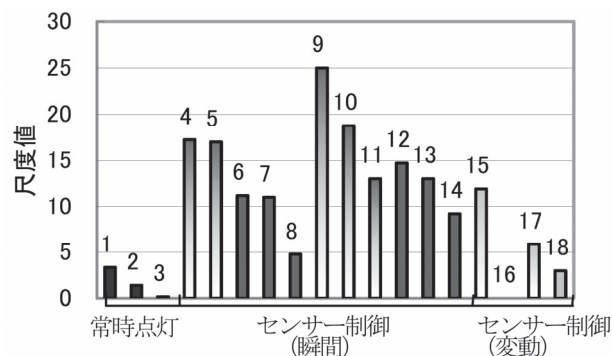


図-6 「光の変化」尺度値 (番号は表-2の形態番号を示す)

6. 通行疑似体験の評価実験

ここでは3DCGによって作られたアニメーション画像を被験者に提示し、変化する光環境に対する視覚評価実験を行った。心理指標の尺度化には一対比較法を用いた。アニメーション映像を2つずつ提示し、「明るさ感」「(対面歩行者の)見易さ」「光の変化」について優劣を判断してもらった。

(1) アニメーションの提示方法

プロジェクターを用いて、幅190cmのスクリーンにアニメーション画像を投影して被験者に評価をってもらう。被験者とスクリーンとの距離は2.5mとし、CG映像作成時のカメラと同等の視野角(約45°)になるように設定した。映像形式は解像度720×480pixel、1秒間あたりの画像は30枚とした。被験者は学生21人であった。評価の際に、夜

間街路での状態と同様にするために実験室を暗室にし、被験者の暗順応の時間を10分間設けた。また、人が光を見たときに明るさを感じるのはその見たものの輝度で決定される。そこでスクリーンに投影される映像に対して輝度計により複数点の輝度を計測し、スクリーン上の輝度がCGシミュレーションによって得られた理論上の輝度と一致するようにプロジェクターの明るさを調整した。スクリーンに投影されたCG画像の輝度と実際の光源の輝度が概ね一致することは3章の実験で示した通りであり、再現性のよい空間の明るさが提示できたと考えられる。

(2) 実験方法

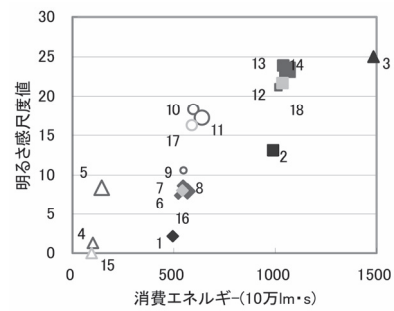
作成した評価モデルごとに20秒のアニメーションを設定し、2つずつ提示する。全てのモデルに対して総当りの一対比較を行う。約35分間のビデオにした評価映像を作成し、被験者の疲労を考慮して実験は休憩を挟んで2回にわけて実施した。適切な評価がされているかを検討するために全てのパターンについて同じ映像の組み合わせをダミーとして混入した。実験についての事前説明の際に映像が人感センサーによって制御された街路であり、光環境が変化すること、必ず対面歩行者が来ることを説明する。また、評価尺度について誤解がないように説明を行う。実験手順は、映像を2つ順に見てもらい、その後10秒間の回答時間に3つの尺度に関して比較した結果を回答する。3つの尺度とは、はじめに見た映像が後に見た映像よりも明るいのか、対面歩行者は見易いのか、光の変化に気がつくか、である。回答は○か×でしてもらい、同程度は無しとしている。

(3) 評価実験の結果

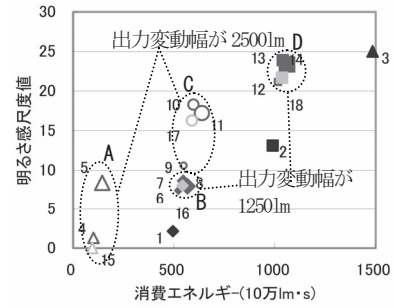
被験者によって得られた回答結果から、「明るさ感」、「対面歩行者の見易さ」、街路の「光の変化」それぞれの尺度値を求める。一対比較の尺度化については2つの刺激の差が正規分布に従うとするサーストンの方法に基づき算出した(図-4, 5, 6)。これを見ると「明るさ感」と「見易さ」は同じような傾向となる。これにより、この「明るさ感」と「見易さ」の間には相関関係が存在すると考えられ、街路を明るいと感じた場合、同時に対面歩行者に対しての視認性も高いことが期待される。「光の変化」の項目では、他の2項目とは明らかに違うグラフの分布になっている。これは、「光の変化」が他の評価項目である「明るさ感」「見易さ」とは影響される要因が異なるためと考えられる。

7. 評価実験の考察

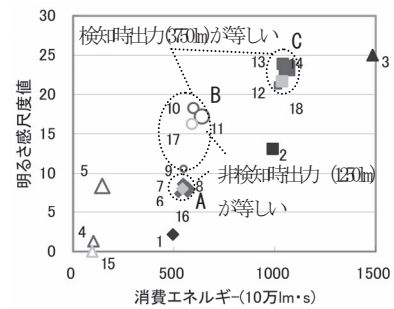
ここでは評価尺度のうち、「明るさ感」を中心に考察



(a) 「明るさ感」と消費エネルギーの関係 (図中の数字は表-2の形態番号を示す)



(b) 制御距離に着目した比較 (図中の数字は表-2の形態番号を示す)



(c) 検知時出力と非検知時出力に着目した比較 (図中の数字は表-2の形態番号を示す)

- ◆ 1(1250, 1250, 0, 常時) ■ 2(2500, 2500, 0, 常時) ▲ 3(3750, 3750, 0, 常時)
- ▲ 4(0, 2500, 20, 瞬間) ▲ 5(0, 2500, 30, 瞬間) ◆ 6(1250, 2500, 10, 瞬間)
- ◆ 7(1250, 2500, 20, 瞬間) ◆ 8(1250, 2500, 30, 瞬間) ○ 9(1250, 3750, 10, 瞬間)
- 10(1250, 3750, 20, 瞬間) ○ 11(1250, 3750, 30, 瞬間) ■ 12(2500, 3750, 10, 瞬間)
- 13(2500, 3750, 20, 瞬間) ■ 14(2500, 3750, 30, 瞬間) ▲ 15(0, 2500, 20, 変動)
- ◆ 16(1250, 2500, 20, 変動) ○ 17(1250, 3750, 20, 変動) ■ 18(2500, 3750, 20, 変動)

※注 グラフのプロット記号の意義
括弧内の要素は形態番号 (非検知時出力, 検知時出力, 制御距離, 調光形態)

図-7 各モデルの消費エネルギーと「明るさ感」尺度値の関係

を行うことにする。歩行者が空間の明るさをどう感じているかは、夜間空間における障害物の視認や安心感を考える上で基本的な尺度である。実際に前章より見易さの評価は明るさ感の評価と類似しているため、センサー照明の条件との関係も類似していると考えられる。

(1) 「明るさ感」と消費エネルギー

図-7-(a)は消費エネルギーと「明るさ感」の関係を示したものである。グラフ内では左にいくほど消費エネルギーは小さく、上にいくほど評価が高くなる。そのため、グラフ内で左上にある方が効率のよい調光形態ということがいえる。以下、調光形態の決定要因である、制御距離、光源の出力について考察する。

a) 制御距離の違い

図-7-(b)の破線で囲まれたA, B, C, Dは制御距離が違っただけで検知時出力と非検知時出力は同じである。各々破線の中をみていくと、左右へのずれがあまりみられない。つまり、制御距離はこの場合消費エネルギーに影響をあまり与えない。しかし、制御距離を長くすると歩行者が多くなった場合、常時点灯と差がない状態になりやすいのでその点に注意が必要である。また、破線A, Cは上下にバラつきが大きい、この傾向は検知時出力と非検知時出力の差である変動幅が大きいものほどはっきりと出ている。つまり、出力の幅が大きく明るさの差が明確であることから、制御距離による明るさ感の違いも感得されやすかったものと考えられる。制御距離が20mのものと30mのものを比較した場合、明るさの評価に大きな差があるとは言い難い。そうであれば消費エネルギーのより少ない制御距離20mとしたほうが効率が良い。

b) 出力の違い

図-7-(c)の破線A, Bは非検知時出力が等しく、破線B, Cは検知時出力が等しい。このとき、AとBでは評価が大幅に上がるのに対してBとCでは消費エネルギーの増加に対する評価の向上が見られなかった。このことから、非検知時の出力を抑えて、その分のエネルギーを検知時に利用した方が省エネ効果も期待でき、より明るさの評価も上昇すると考えられる。

(2) 林の数量化 I 類による影響要因の考察

各評価項目に影響を与える制御要因とそのウェイトを統計的に示すために林の数量化 I 類を適用し、その結果を図-8・9・10に示す。分析では検知時出力のアイテムを含めることができなかった。これについては数量化理論の適用において全体のカテゴリー数がデータ数に比して十分でなく解析演算ができなかった可能性がある。ここではそれ以外のアイテム間での比較考察を行う。

「明るさ感」「見易さ」については非検知時出力の影響が大きいものになっている。非検知時出力が0、つまり歩道照明が点灯していない場合、被験者は歩道空間を「暗い」「対面歩行者が見難い」と判断していると考えられる。また、この調光形態の場合、車道を挟んで反対側の歩道照明も点灯しておらず、歩行者を検知した照明のみが点灯して、近傍の空間だけが明るい状況であり、

アイテム	カテゴリー	-15	-10	-5	0	+5	+10	カテゴリースコア	レンジ	偏相関係数
非検知時出力	0							-14.356	27.616	0.969
	1250							-1.246		
	2500							13.260		
変動幅	1250							-3.523	7.549	0.845
	2500							4.026		
制御距離	10							-2.887	4.416	0.651
	20							0.318		
	30							1.529		
調光形態	瞬間							0.407	1.528	0.359
	変動							-1.121		

重相関係数:0.973 決定係数:0.947

図-8 「明るさ感」と各アイテムの関係

アイテム	カテゴリー	-10	-5	0	+5	+10	カテゴリースコア	レンジ	偏相関係数
非検知時出力	0						-13.393	23.119	0.919
	1250						0.159		
	2500						9.726		
変動幅	1250						-3.913	8.385	0.783
	2500						4.472		
制御距離	10						-2.160	3.731	0.452
	20						0.024		
	30						1.572		
調光形態	瞬間						0.259	0.971	0.173
	変動						-0.712		

重相関係数:0.922 決定係数:0.851

図-9 「見やすさ」と各アイテムの関係

アイテム	カテゴリー	-6	-4	-2	0	+2	+4	カテゴリースコア	レンジ	偏相関係数
非検知時出力	0							0.544	3.241	0.633
	1250							-1.216		
	2500							2.025		
変動幅	1250							-4.171	8.939	0.934
	2500							4.767		
制御距離	10							3.974	7.634	0.848
	20							0.340		
	30							-3.661		
調光形態	瞬間							2.615	9.806	0.937
	変動							-7.191		

重相関係数:0.967 決定係数:0.935

図-10 「光の変化」と各アイテムの関係

他の制御方法に比べてかなり暗く感じられると思われる。このような状態では遠方の歩行者の存在にも気づきにくく不安感も強いと想像されるので、完全消灯は有効な制御方法とはいえない。

出力の光束が検知時と非検知時とで大きな差（変動幅2500lm）ある場合、全ての評価項目でその評価を上げる要因となっている。つまり、出力の大小に関わらず明るさの変化が大きいほど歩行者は明るくなったと感じる傾向がある。このことから変動幅を大きくすることは有効な制御方法であるといえる。また、歩行者が少ない街路の場合、検知時の最大出力を大きくしても、エネルギーの消費には直結せず、省エネ効果も期待でき、かつ利用者に快適な光環境を提供できるものと考えられる。変動幅が大きいと違和感を感じる恐れもあるが、既存研究⁶⁾におけるアンケート調査の結果によれば問題視されていない。

次に、制御距離については、各評価尺度のうち「光の変化」を除いて制御距離が長い方が明るいと感じられている。しかし制御距離を長くすることは歩行者があまり多くなくても街路照明を常時点灯と同じ状態にしてしまうことになり、エネルギー消費抑制の利点が損なわれる。歩行者が少ない街路であれば、制御距離を長くして明るく感じさせることも有効である。

表-3 新たに提案するセンサー制御照明と従来の照明形式の比較

CG画像	出力(lm)		間隔(m)		光源高さ(m)		均斉度
	制御	補助	制御	補助	制御	補助	
A	2000	—	10	—	1.0	—	0.61
B	2000	—	10	—	0.5	—	0.41
C	2000	1250	10	20	1.0	1.5	0.67
従来照明	3750	—	10	—	5.0	—	0.89

また、光源の点灯方法については、歩行者に気づかれずに光を変化させるには「瞬間」よりも「変動」のほうが良い(図-10)。しかし、図-3より「変動」と「瞬間」の消費エネルギーの差が大きいとはいえないことに加え、「明るさ感」の評価においても「瞬間」の制御方法のほうが評価が高くなっている。消費エネルギーの抑制と明るさ感の両立を考える場合は「瞬間」の制御方法が望ましい。

(3) 評価実験のまとめ

まず消費エネルギーと明るさ感のグラフから見ると、評価を高める要因としては、「検知時出力を大きくすること」と「検知時と非検知時出力の変動幅を大きくすること」である。数量化I類の分析では非検知時出力が効いている。しかし、検知時出力を含めた分析ができていないことを踏まえ、総合的に考えれば、非検知時出力はできるだけ抑制して、変動幅を大きくとり、その結果、検知時出力を大きくとることが明るさ感を高める上で有効と考えられる。加えて光の強さが瞬間で変化する制御方法が有効であると考えられる。しかしこの要因は数量化I類の分析ではレンジが低く、ランプの出力に関わる要因より明るさに寄与する度合いが低い。最後に人感センサーによる制御方法は歩道の利用頻度に大きく影響を受ける。そのために交通量の変化に応じて設定変更が容易にできるような器具の開発が望まれる。

8. 歩道へのセンサー照明の導入提案

ここでは視覚評価実験で得られた知見や反省を踏まえ、センサー制御照明を用いたデザイン案を提案する。

従来の照明方法では、照明による均斉度を上げるために照明光源の設置高さを十分に上げて街路全体に明るさが行き渡るように配慮されている。

一方、本研究の実験結果からはむしろ歩行者近傍の路面の明るさが重要であると考えられる。これは制御距離の要因の効果からも観察される。10(m)先のランプまでが点灯している場合より20(m)の方がより明るく感じられるが、30(m)までの場合は20(m)までとあまり差がない。



図-11 従来の照明方法

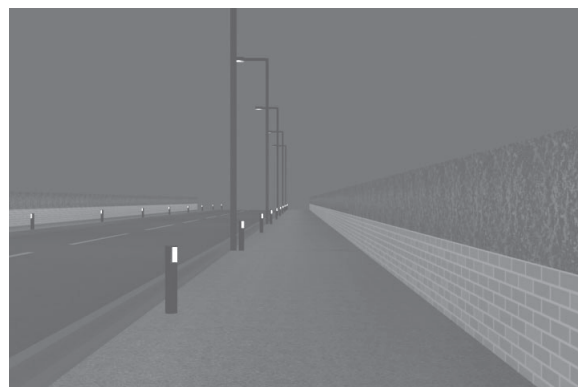


図-12 CG画像A (歩道の左側がセンサー照明)

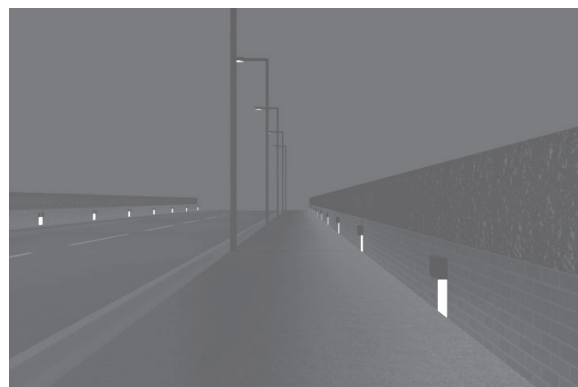


図-13 CG画像B (歩道の右側がセンサー照明)



図-14 CG画像C (歩道の左側がセンサー照明、右側が補助照明)

これは図-4に示した調光形態の内、同一条件下で比較の可能な形態番号6(10m)-7(20m)-8(30m), 9(10m)-10(20m)-

11(30m), 12(10m)-13(20m)-14(30m)のそれぞれの組み合わせについて、明るさ感の大小関係から概ね確認できる。これは路面の明るい部分の見かけ上の面積が20(m)先までと30(m)先までの場合では歩行者からより遠い位置でもあるため、あまり変わらないからと解釈できる。ドレヒュス⁹⁾によれば歩行者の視線は水平より10度下方に向かうということだが、これは歩行者の前方約8.5(m)の位置であり、路面上のこうした範囲の重要性が予想される。

そこで高さ5(m)程度の歩道照明の光源の高さを低くし、かつ出力を抑えることで消費エネルギーの抑制と歩行に必要な明るさを確保することを考える。図-11, 12, 13, 14は実験で用いた街路空間のモデルに新たに提案する照明方法と従来の照明方法を適用したCG画像である。これらCG画像の街路照明に関する情報の一覧を表-3にまとめた。なおこれらの画像は印刷用に画像処理を行っている。

図-11は現在街路に使われている照明器具を用いたモデルで、歩道照明1つ当たりの光束は3750(lm)で、光源の高さは5mである。一方、新たに提案する照明方法では照明1つ当たりの光束について従来の出力に比べて30%以上の削減を行い、光源については路上約1mの高さに設置している。

光源の平面上の位置については、車道側に制御照明を設置する場合、自動車の利用者に対して低く設定された光源部分が直接視界に入らないように配慮し、照明器具の配光を歩道方向になるようにしている。従来の照明方法の場合、車道を含めた街路の明るさは歩道照明の光が車道側に影響しているために従来の照明方法のほうが街路全体の光環境に寄与していると考えられる。しかし図-12, 13, 14の提案したCG画像A, B, Cはすべての条件で路面平均照度は15(lx)を上回っており、歩行者のための屋外公共照明基準(表-1)における利用頻度が大きい空間にも対応できている。

また、一般にセンサー制御照明は利用者に対して「暗い」「点灯するタイミングがわかりにくい」などの問題点⁷⁾があるといわれている。それはセンサー照明を従来の照明配置条件にそのまま取り入れ、センサー制御に適した配置を考えていないためである。今回提案したセンサー照明の配置方法はこれらの問題に配慮し、照明光源の位置を低くすることで歩行者の快適かつ安全な歩行にとって最も重要な路面の状態を明るくすることができた。

また、歩行者がいない状態であっても照明の光源の出力をすべて抑えず、ある程度の出力を保持している。これにより歩行者がいる場合、照明器具の位置が事前に把握することができ、照明の点灯による明るさの変化が、歩行者の視線を自然に前方に誘導し歩行の安全性が保たれる。以下(1)~(3)に提案した照明方法の利点、問題点、対策をまとめる。

(1)新たに提案した照明方法の利点

提案した照明方法の利点を整理すると以下のとおりである。

- ・照明光源の高さを低くすることで出力を抑えても路面の明るさを確保できる。
- ・利用者が必要と感じている場所のみを照らしている。
- ・街路に光の斑ができることで、そこにリズムが生じて歩行が楽しくなる。

(2)新たに提案した照明方法の問題点

一方、この照明方法の問題点として考えられる事項は次の通りである。

- ・均斉度が低下することで街路の障害物の早期発見の妨げになる。
- ・照明光源が低くなることで自動車利用者と光源の距離が近くなる。そのため変化する光源に運転中に注意が向く可能性がある。
- ・歩道照明の光源が利用者に近いために照明の発光体が視界に入り、グレアが生じる。
- ・光源が低いために対面歩行者の表情を読み取れない。

(3)低位置照明の問題点の対策

特に問題となるのが、照明光源の高さを低くすることで照明光源の出力を抑えることができる代わりに光の斑が生じることである。この光の斑は利用者にとって歩行に必要な障害物の早期発見を妨げる恐れがある。そこで、対策として従来の照明方法ではない「補助照明」を用いることで問題を解決することができると考える。補助照明の目的とその役割は以下のようにまとめられる。

- ・センサー制御照明のみで生じる光の斑の軽減。
- ・人感センサーの非検知範囲の点灯。
- ・利用者がいない状態での街路空間の光環境の維持。

人感センサー制御の照明と補助照明を組み合わせた照明環境は図-14のようになっている。このときに光源で消費されているエネルギーであるが、街路照明をセンサー制御とする最大の利点である省エネ効果を考慮に入れる必要がある。図-11で示した従来の照明方法による街路照明の消費エネルギーとの差は新たに提案する照明方法の最大の消費エネルギー時で約20%の削減が可能であり、利用者がいない場合では制御照明の出力を半分に落としたとすると50%の削減ができる。また、補助照明の器具は鉛直面の照射を考慮した配光を想定すれば、対面歩行者の表情を読み取るのに十分な照度を確保できるものと考えられる。またこの場合、グレアについては問題にならない程度のレベルであると考えられる。このような照明形態であれば消費エネルギーを抑え、歩行利用者にとって快適な照明環境が提供できると考える。また、今回提案した照明方法については沿道の利用状態によっ

ては実現困難である場合があるために個別の検討が必要である。

(4) 低位置へのセンサー照明の導入と街路景観

ここでは表-3 で示した新たな照明案の設定条件に捉われず、低位置にセンサー照明を導入した場合に想定される街路景観の一般的特性について考察を行う。

a) 心理的現象としての意義

低位置に照明器具を導入した場合、その景観的特性は、歩行者に固有の情緒的印象をもたらすと考えられる。

- ・ 明るさの変化が昼間とは異なる印象の景観を提供し、街路に光の斑ができることで、そこにリズムが生じて歩行が楽しくなる。
- ・ 目線より低い位置に光源があるので、光は下方からの照射が卓越し、安心感、落ち着き、プライバシーの感じられる空間を創出する。これは歩行時の緊張感を軽減する。
- ・ 対面歩行者の表情が視認しにくくなる。また視認できても通常は斜め上方からの光がもっとも自然な表情となるはずで、逆に下方からの光は非日常的かつ不自然な印象を与える。これにより歩行者に不安感を与える恐れがある。
- ・ 高齢者は明るさに対してより眩しさを感じやすいので低位置照明による明るさには配慮がいる。逆にセンサー照明で歩行者近傍のみを限定して明るくすることは対面歩行者や障害物の注意喚起の上でメリットとなる。

b) 歩行者の空間認識に及ぼす影響

一方、情緒的印象のみならず、以下のような空間知覚に及ぼす影響も考慮しなければならない。

- ・ 低い位置の光源は光の照射を受ける面と近く、陰影が強調される。陰影の強調は、単調になりがちな歩道面に奥行きと立体感を創出し、舗装材のテクスチャーをより強調する効果がある。これは足元の障害物の存在感を浮き立たせることにつながる。また空間の奥行き感が強調されることで、歩道空間をより広く感じさせる効果が期待できる。ただし照明器具のデザインに工夫を加えないと空間を狭く感じさせることになる。
- ・ 低位置の照明器具については、ポール照明やその他のストリートファーニチャーと統合するようにし、煩瑣な感じを軽減し、空間をより広く感じさせる必要がある。
- ・ センサー照明によって遠方が暗くなることは空間をより狭く感じさせる恐れがある。これに対し光源を低くすることでそれを補っていると考えられることができる。
- ・ ポール照明によって均質かつ漠然と周囲を照らすのではなく、低位置照明により路面を強調して浮かび上がらせることにより移動方向、街路空間構造の視覚的理解を助け、夜間に喪失しがちな場所の認知を強化することができる。

- ・ センサー制御により歩行者より遠方の明るさが減じることは空間理解の妨げとなる。
- ・ 明るさの確保は常時点灯光源に担当させ、低位置のセンサー照明を適切な間隔でスポット的に配置する。その光の明確な変化により特定の場所を強調し、歩行者に位置の感覚と歩行距離の感覚を提供するよう配慮する。

c) 街路の低位置センサー照明と沿道の照明条件との兼ね合い

歩道上低位置に不均質な光を配置した場合、以下のような種々の沿道景観の特性との兼ね合いを考慮する必要がある。

- ・ 商業系街路であれば歩道の照明デザインと直接的な連続性を強調し店舗へのアクセシビリティを確保する。店舗側はこれまで述べてきたセンサー照明の動的な光の効果に配慮し集客を意図した均質かつ過剰な光の使用を避ける。抑制されたスポット的な光の活用は商品ディスプレイ強調と歩道景観のトータリティ双方にとって好ましい。
- ・ 住宅系街路であれば敷地および道路の境界領域において、最低限の遮蔽性を確保し漏れ光を抑制する。敷地内へのアクセス空間の道路からの見えは夜間住宅地景観のポイントであり、道路のセンサー照明とのデザイン上の連続性、監視性とテリトリアリティが適度に確保できるような光を配置する。照明の光源提供については沿道住民の協力も視野に入れる。

9. 結論

本研究では街路にセンサー照明を導入した際のエネルギー消費と歩行者の心理評価を実施した。心理評価実験からは最低限のエネルギー消費でより明るさ感や対面歩行者の視認性が確保できるセンサー照明の設置・制御条件を見出すことができた。歩行者の通行量や空間条件などに注意する必要があるが、検知時と非検知時およびその変動幅を重点的に制御することが消費エネルギーと明るさ感を調整するうえで効果的であるとの知見は、様々な空間条件への適用において有効と考えられる。防犯への関心の高まりから街路の歩道照明や防犯灯の設置が一層推進されると思われるが、消費エネルギーの抑制を考えるセンサー照明の導入は今後、重要性を増すと考えられる。また本研究でセンサー照明を低位置に設置する提案をしたように、従来型の照明設置形態に捉われることなく、より多様な灯具の配置やデザインを考案していくことが、動的な光制御の有する防犯、消費エネルギー削減等の機能的性能を高め、優れた夜間街路景観を創出する上で重要と考える。

参考文献

- 1) 環境庁：光害対策ガイドライン ～良好な照明環境のために～, 1997
- 2) 松井俊成, 茨薫, 井上学：低照度空間における明るさ変動知覚に関する検討, 第38回照明学会全国大会講演論文集, p.107, 2005
- 3) 松井俊成, 田中稔：事例紹介(1)ーひとセンサ段調光防犯灯による社会実験ー, 照明学会誌, Vol.89, No.1, pp.43-45, 2005
- 4) 松井俊成：防犯照明の先進技術の紹介, 第39回照明学会全国大会講演論文集, pp.271-272, 2006
- 5) 高橋靖, 窪田陽一, 深堀清隆, 松村明子：センサ照明を導入した街路の光環境特性, 21世紀総合研究機構プロジェクト研究発表会ポスターセッション, 2003
- 6) Kiyotaka Fukahori, Yoichi Kubota, Meiko Matsumura, and Osamu Takahashi : *Evaluation of Lighting Environment of Street with Sensor controlled Lighting*, Proceedings of the 6TH International Symposium for Environment Behavior Studies, pp.259-266, 2004
- 7) 社団法人 照明学会：歩行者のための屋外公共照明基準, 1994
- 8) 社団法人 日本道路協会：道路照明施設設置基準・同解説, pp.115-116, 1980
- 9) Henry Drefuss: *The measure of man :Human Factors in Design*,Whitney Publication, New York , 1959
- 10) 高島康行, 平川倫明：人感センサ付防犯灯による防犯・省エネの効果検証, 第39回照明学会全国大会講演論文集, p.103, 2006
- 11) 新谷洋二：都市交通計画, 技報堂出版, pp.137-141, 2003
- 12) 建設省：重点整備地区における移動円滑化のために必要な道路の構造に関する基準, 1999

(2006.4.17 受付)