

輝度分布と明るさ感に基づく建築と照明設備のトータルデザイン

Total Design of Architecture and Lighting Based on
Luminance Distribution and Spatial Brightness

坂田 克彦

I. はじめに

部屋の照明を計画するとき、第一に文字などの明視性を確保するための照度、第二に部屋の用途に適した明るさの印象すなわち「明るさ感」を念頭に置くはずである。この両者は同じことではないかと感じる人もいるかもしれない。確かに、シーリングライトやペンダントのみで室内を照らす一室一灯型の照明では、照度と明るさ感とは連動し、照度を決めれば明るさ感も決まる関係にあった。しかし、近年、省エネが求められ、住宅では多灯分散照明、オフィスではタスク・アンビエント照明やエリア別点灯といった不均一照明が普及するにつれ、照度が十分でも暗い印象となる場合があることや、間接照明などを用いて壁や天井を照らすなどの工夫をすれば照度を低く抑えても明るい印象となることが、多くの人に知れ渡るようになった。こうして、明るさ感と省エネの両立は照明計画の共通言語となり、明るさ感の評価に基づく設計が展開されるようになった。

II. 輝度分布と明るさ感

1. 照度設計から輝度分布の設計へ

今日、照明設備は多様化し、床だけを照らすのではなく、天井・壁・家具の中を照らす照明など、どこを明るく照らすかを3次元で計画することが当たり前となりつつあり、2次元の照度分布だけではこのような照明を定量的に計画できないことは明らかである。

昼光利用は、従来は省エネを図る目的で机上照度の一部を担うという考え方が主流だった。しかし、LEDによって省電力が進んだ今日、その役割は、壁や天井面を照らし明るさ感や開放性を高めることに向けられるようになってきた。本来昼光は不安定さを合わせ持っているため、作業のための照度に充てるよりも理にかなっている。しかし、一部の窓から多くの昼光を取り入れると、窓と室内との明るさの違いが大きくなり、かえって室内が暗く感じられてしまう。いわゆる輝度の対比が暗い印象を与えてしまうのである。昼光利用においても、視野内のどの部分をどの程度明るく見えるようにするか、輝度の対比を防ぎつつ、いかに広範囲に拡散させるか、このような3次元の見え方のデザインの重要性が増してきている。

多くの光環境の研究者は、照度分布に加え、輝度分布による評価の必要性を唱えてきた。輝度分布は、室内の標準的な視点を決め、そこから見える視野内の明暗の分布を表したものであり、いわば写真のようなものである。ここには人が知覚する明暗の情報がほぼ網羅されている。すなわち、人がそこから感じとる明るさの印象を説明しうる情報を有しているわけである。

以上のような背景のもと、観察範囲の明るさ感を輝度分布から定量的に推定する方法の研究が30年ほど前から始まり、今日まで盛んに行われてきている。輝度分布から定量化した数値が、意図通りの明るさ感を得るための照明設計の「ものさし」として使えるように

なれば、3次元の光のデザインをしやすくなる。これまでに提案された明るさ感を推定するモデルや指標、明るさ感への影響が示唆された要因は多岐にわたる¹⁻⁶⁾。しかしながら、それらの指標^{例えば2-4)}は、ある特定の環境にはあてはまるが、想定していない輝度分布に対しては、輝度の対比の影響を正しく考慮することができず、適用範囲に限界があることも指摘されている。学会では明るさ感に関する研究会が組織され、明るさ感指標の標準化に向けた議論も重ねられているが、これは一朝一夕には実現できそうにない。まずは既存の指標の適用限界を明らかにすることが急がれているが、十分な整備が進まないまま“仮使用”されているのが現状である。既存の指標は適用限界に外れた条件では誤った評価をする脆弱性を抱えてはいるものの、設計段階で明るさ感を検討することが、より高度な光環境設計に寄与していることに異論を唱える人は少ない。ニーズが高く今や不可欠な評価項目となりつつありながら、指標として成熟していないことが、明るさ感評価の課題なのである。

2. 輝度対比の数値化の必要性

均一な輝度分布における明るさ感は、スティーブンスのべき法則^{注1)}において測光量に対して適切な係数を与えることで説明でき、わざわざ「明るさ感」という測光量と異なる概念を用いて数値化する必要がない。それに対し、不均一な輝度分布における明るさ感は測光量と比例しない場合があり、このような場合、単に「明るさ」と表現されることもある測光量（例えば平均輝度）と明るさ感すなわち人が知覚する「明るさ」とを区別する必要が生じる。

窓などの大光源により視野の一部のまとまった領域が明るいような偏りがある輝度分布（粗い輝度対比）では、平均輝度から推定される明るさ感よりも、暗い印象となることが知られている。この現象を説明するため、高輝度面を平均輝度算定対象から除外する理論¹⁾²⁾、不均一の程度により明るさ感の推定値を小さく（暗く）補正する理論³⁾⁴⁾が提案されている。一方、これとは逆に小さな領域の高輝度部（細かい輝度対比）は、明るさ感を高める効果があるとも考えられている⁵⁾。実空間の輝度分布には、窓からの採光などにより生じる視野の半分近くのまとまった領域が明るいような粗い輝度対比に加え、電灯照明の光源部など細かい輝度対比も存在するのが通常である。そして、粗い輝度対比の明るさ感を低くする効果と、細かい輝度対比の明るさ感を高くする効果の両方が同時に作用していると考えられる。したがって、細かい輝度対比と粗い輝度対比を区別して定量化できれば、明るさ感への作用の異なる両者を正しく指標値に反映することができるようになるはずである。

では、粗い輝度対比と細かい輝度対比の違いとは何だろうか。本稿では、隣接するある大きさを持った領域同士の輝度の違いを「輝度対比」と呼び、ある点の輝度値と他の点の輝度値の単なる比である「輝度比」とは区別して用いている。つまり、隣接する領域のサ

イズ（視角）という輝度比にない概念が考慮されたものである。今日、輝度対比のサイズは、空間周波数^{註2)}を用いて表現することが一般的である。中村⁷⁾は、フィルタリングや離散ウェーブレット分解を用いることにより細かい輝度対比から粗い輝度対比までをそれぞれ区別して抽出できることを示し、本稿が扱うような視環境評価に関する研究の基本的な解析方法の基盤となっている。粗い輝度対比と細かい輝度対比の違いとは、空間周波数の違いのことなのである。

III. 輝度対比を考慮した明るさ感推定モデル

1. 粗い輝度対比量と細かい輝度対比量の定義

本稿の明るさ感推定モデル⁶⁾では、粗いものから細かいものまで様々な空間周波数の輝度対比が混在している輝度画像から、空間周波数毎の輝度対比を抽出するために離散ウェーブレット分解を用いる。Fig. 1に示すように、元の輝度画像において、最も空間周波数が細かい輝度対比をレベル(以下、lv.) -1として最初に取り出し、以降は残りの成分から前に取り出したlv.の2倍のサイズ(空間周波数が1/2)に相当する輝度対比を順々に“ふるい”にかけるように取り出していく。この例では画角180°(10pixel/deg)の輝度画像から、lv.-10まで検出空間周波数の異なる10種類の輝度対比を取り出すと、最後に輝度対比がほぼ含まれない画像が残って分解を終える。これらの10枚の画像を各lv.の輝度対比画像と呼ぶこととする。輝度対比画像に示される値は輝度比の常用対数に相当し、正の値はその空間周波数で周囲より明るく、負の値は暗いことを示し、対比の強さに相当する。輝度対比画像の濃淡のムラ、すなわち設定する画角内の標準偏差は、その空間周波数の輝度対比がどの程度その画角内に存在しているかを示す量となる。その画角は人が主に見回す範囲を設定することになるが、ここでは水平100°鉛直40°とする。そして、その範囲の標準偏差^{註3)}をそのlv.の輝度対比量と定義し、全lv.の輝度対比量を計算する。

次に、どのlv.の輝度対比量が明るさ感に影響を及ぼしているかを調べるために被験者実験を行い、被験者が評定した明るさ感評定値を目的変数、各lv.の輝度対比量を説明変数とした重回帰分析に

基づき、以下に記すCD値とAD値を定義した。

(1) 明るさ感を増加させる「細かい輝度対比量」CD値

lv.-2~5の輝度対比量の総和×20を「CD値(空間の明るさ感を増加させる細かい輝度対比量)」と定義する。照明の光源付近や、明るい色と暗い色が組み合わされた内装や家具の部分の色のメリハリなどが、CD値の大きさに反映される。CD値が大きくなる条件は、にぎやかでシャープな印象である傾向が見られる。

(2) 明るさ感を減少させる「粗い輝度対比量」AD値

lv.-7~9の輝度対比量の総和×10を「AD値(空間の明るさ感を低下させる粗い輝度対比量)」と定義する。窓側が明るく室内側が暗いなど、視野を大きく二分するような明るさの違いがAD値の大きさに反映される。AD値は、昼光と室内照明とを重ね合わせた光の指向性が弱いほど小さく、指向性が強いほど大きくなる。

2. 明るさ感推定モデル NSB

細かい輝度対比が多いまたは強いほど明るさ感が大きくなり、粗い輝度対比が多いまたは強いほど明るさ感が小さくなる現象は、平均輝度(LM)に加えてCD値とAD値を説明変数とすることで説明できる。明るさ感のカテゴリカル尺度をFig. 2に示す1~13の数値で表し、これをNSBと呼ぶとき、NSBは次式(1)により推定される。

$$NSB = 0.29 e^{0.84 LM - 0.13 AD + 0.15 CD + 1.03} \dots (1)$$

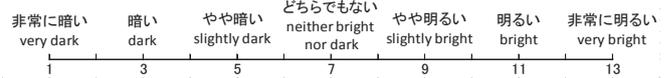


Fig. 2 明るさ感のカテゴリカル尺度 (NSB) (Categorical Scale of Spatial Brightness)

CD値とAD値を反映しない平均輝度による従来の推定式では、Fig. 3に示すように、理想的な推定式とのズレが生じる。窓採光のような粗い輝度対比の影響や、きらめきのような細かい輝度対比の影響を明るさ感の推定値に反映できないためである。これに対し、NSBは、平均輝度が過小あるいは過大に推定してしまう問題を解消でき、明るさ感を高い精度で予測できる。

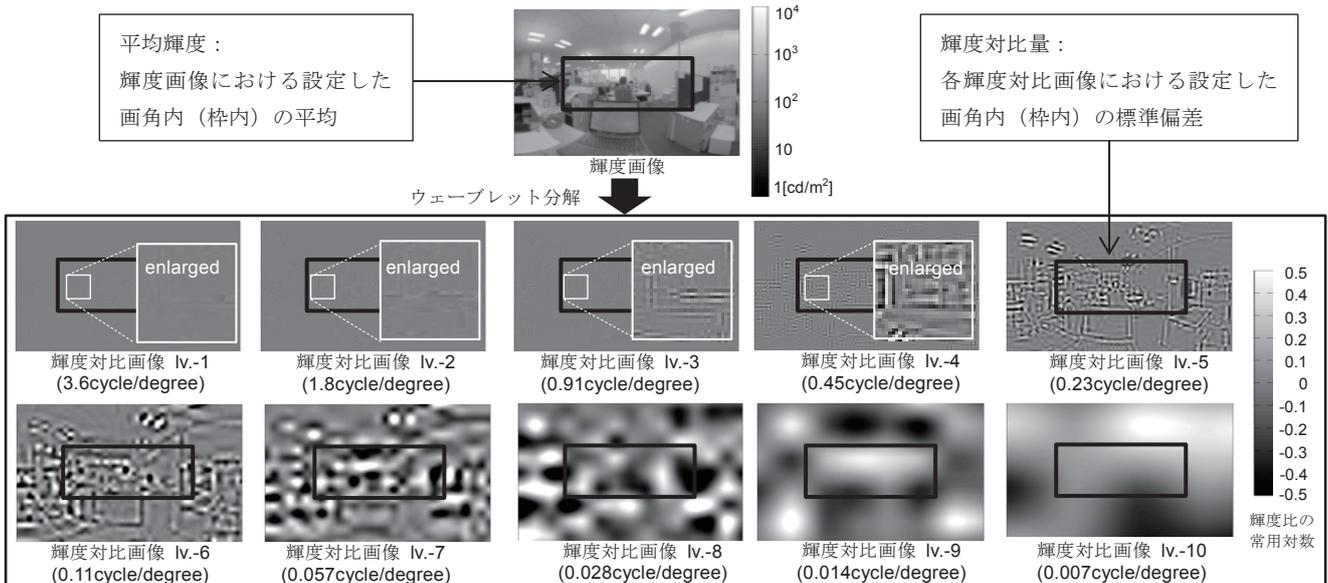
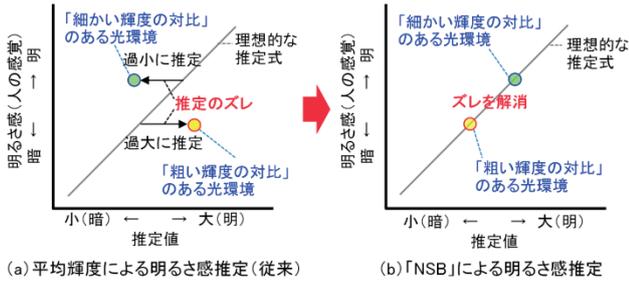


Fig. 1 輝度画像の輝度対比画像への分解と輝度対比量の算定

(Calculating Variance of Contrast Images Decomposited from Luminance Image by Wavelet Transformation)



(a) 平均輝度による明るさ感推定(従来) (b)「NSB」による明るさ感推定
 Fig.3 従来の明るさ感推定の課題と「NSB」による改善のイメージ
 (Improvement of the Problem with a Conventional Method)



Photo 1 従来の明るさ感評価に基づく設計
 (Design Example by a Conventional Method)

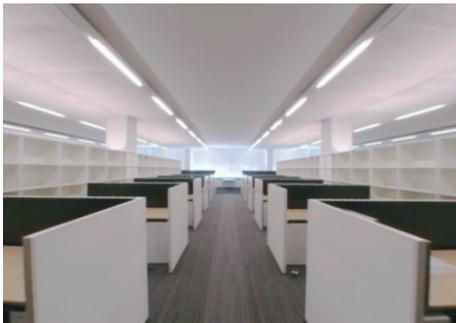


Photo 2 NSBに基づく設計
 (Design Example by NSB)

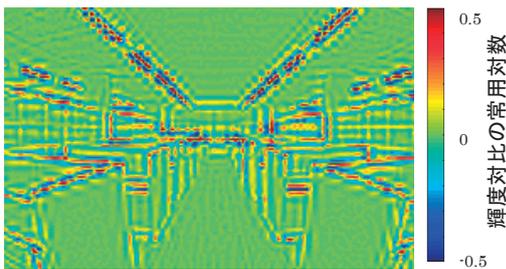


Fig.4 Photo 2 の条件における細かい輝度対比画像 (lv. -4)
 (Contrast Image of High Spatial Frequency)

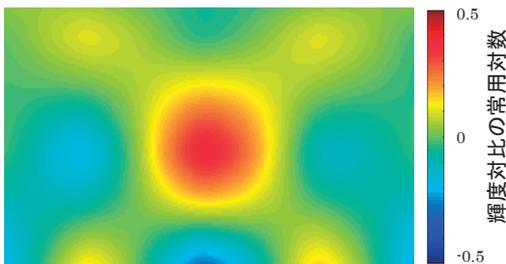


Fig.5 Photo 1 の条件における粗い輝度対比画像 (lv. -9)
 (Contrast Image of Low Spatial Frequency)

IV. NSBに基づく光環境のトータルデザイン

明るさ感は、照明設備の性能だけで決まるものではなく、採光やインテリアデザインなど、様々な要因に影響される。

例えば、Photo 1 のオフィスを見てみると、家具全体が白っぽいため、平均輝度が大きくなり、一見すると明るさ感は大きくなると期待できる。ところが、細かい輝度対比が少ないため、ディテールがはっきり見えない印象から、それほど明るく感じられない。一方、Photo 2 には、黒い内装部材も使われており、白に比べれば平均輝度は小さく、暗い印象にならないか懸念されるかもしれない。しかし、この暗い色は、視野の大部分を占めているわけではなく、細かく分散しているため、粗い輝度対比が生じず、細かい輝度対比のみが生じるように配慮されている。その結果、明るさ感は低下せず、むしろそのメリハリから明るい印象を生んでいる。次に、採光について見てみると、Photo 1 は窓の光の遮蔽が不十分のため、室内との輝度対比が大きく、室内が暗く感じられる要因となっている。それに対し、Photo 2 では、ブラインドによって適度に遮光され、窓部分と室内との輝度対比が小さいため、明るさ感が低下しにくい。また、Photo 2 では、本棚上部に設けた間接照明によって照射した天井面の輝度が大きくなっているため、アンビエント照度を370ルクスまで低減しているのだが、まったく暗い印象がない。

このような明るさ感の違いはNSB、AD値、CD値、輝度対比画像を確認することで定量的に設計にフィードバックできるようになる。Photo 1 をNSBによって評価すると、およそNSB=6であり、それに対し、Photo 2 はNSB=7である。また、その要因は、Fig.4とFig.5に示すような輝度対比画像によって明確となるので、きめ細やかに設計できる。

従来、照明設備に頼っていた明るさ感の設計は、採光とインテリアデザインの計画も含めて総合的にフィードバックできるようになった。これをうけて、今後は照明設備と電力に頼らない光環境の設計技術に目が向けられていくはずである。

V. NSBに基づく昼光利用の設計

NSBを用いることにより、エビデンスに基づいた採光設計、さらには昼光と融合させた照明設計も可能になる。Fig.6にNSBに基づき窓採光における開口部2案(アウトフレームとインナーフレーム)を年間に渡り比較評価した例を示す。ブラインドは時刻毎にグレア指標に基づき開閉状態を設定し、室内照明はタスク・アンビエント照明におけるアンビエント照度3案(300, 400, 500lx)を設定して、

開口部条件	立断面図	ブラインド開閉状態の割合	設定照度		
			300lx	400lx	500lx
インナーフレーム ボウ窓	ブラインド	35% 16% 0%	0% 18%	15% 85%	16% 84%
	欄間 ブラインド	15% 6% 1%	0% 7%	19% 81%	2% 36%
凡例		<ul style="list-style-type: none"> ■ 開 ■ 水平 ■ 45° ■ 全閉 	<ul style="list-style-type: none"> ■ NSB 4~6 やや暗い ■ NSB 6~8 ちょうどよい ■ NSB 8~10 やや明るい ■ NSB 10~12 明るい 		

Fig.6 NSBに基づく建築と照明設備の総合的な検討
 (Total Examination of Daylighting and Artificial Lighting)

各々照度一定制御を行う場合の年間を通じた NSB のレンジ別割合である。各条件の年間毎時の輝度画像のレンジリングを経て NSB を算出し、そのレンジ別の年間時間割合を比較した。NSB の適正範囲を 6~8 としたとき、その割合は、インナーフレームでは 400lx が最大であり、照度一定制御の想定でも 85% の割合で明るさ感の過不足がない。一方、アウトフレームでは躯体で遮光されるため「ブラインド閉」の割合がインナーフレームより小さくなり、結果的に昼光利用が増え、NSB=6~8 の割合が最大となるのは 300lx で、93% である。

この NSB の年間評価は、開口部の建築的検討、または照明方式・設定照度の検討のいずれか一方のみに対しても可能であるが、両者をクロス分析することで、省電力と明るさ感を両立する優れた組み合わせをエビデンスに基づきより合理的に設計できる点が特徴である。並行して、眺望性や熱性能の評価も行う場合は、Fig. 7 に示すような設計のフローとなる。

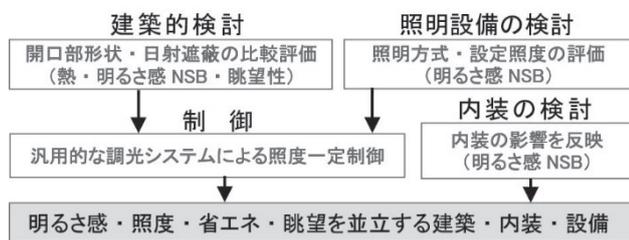


Fig. 7 各評価項目を並立する設計のフロー
(Flow of the Design to Balance with Each Evaluation)

この手法では、想定する設定照度において不快となるリスクの有無を評価できるため、照明台数の削減など、上流からミニマムな設計を進められるメリットがある。さらに、制御の面では汎用的な照度一定制御との親和性が高く、新たな設備を必要としないため、広く展開できる設計手法といえる。

VI. NSB に基づく照明制御

前節で述べたように、NSB の年間評価に基づく設計によれば照度一定制御であっても明るさ感の過不足のリスクを最小限に抑えることが可能である。その一方、PC 作業が中心となりつつあるオフィスでは机上面照度が一定である必要がない。そこで、制御方法を照度一定制御から明るさ感 (NSB 値) を一定に保つ制御に切り替えることも一案である。その考え方のもと、Fig. 8 に示す、窓面輝度などの室内に入射する外光の量を汎用センサなどでセンシングし、調光制御後の明るさ感を予測して制御に反映するフィードフォワード型の制御システム⁸⁾が開発されている。このシステムでは、竣工時にあらかじめ様々な外光の量に対する輝度分布を測定し、測定結果に基づき外光と室内照明をあわせた NSB を推定する。そのため、リアルタイムの輝度画像の計測や解析は不要であり、明るさ感を一定に保つ制御としては、簡易なシステム構成となる。

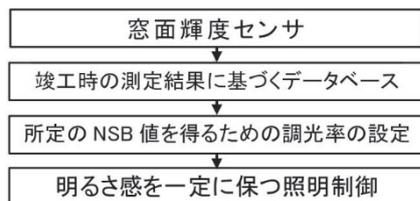


Fig. 8 NSB の推定に基づく照明制御のフロー
(Lighting Control Method Based on Predicted NSB)

VII. まとめ

本稿ではまず、照度設計から「明るさ感」に基づく設計への流れと、既存の明るさ感指標を用いた評価法の課題を示した上で、筆者が提唱する明るさ感指標 NSB の特徴について述べた。次に、NSB に基づく光環境設計の事例を示し、昼光利用などの建築面と照明設備面の総合的な検討に基づき設計することのメリットを示した。快適性と省電力の両面において優れた光環境を設計するための道具はそろっている。今後は、その設計手法を広く展開することに加え、輝度対比を活用した新しい素材やデザインの提案、価値の創造につながることを望まれる。

謝 辞

本稿で用いた分析データの作成にあたり、鹿島技術研究所の三浦優氏、太田雅子氏のご協力をいただいた。また、鹿島建設建築設計本部の杉岡正敏氏、渡部裕一氏、上村健氏、合田和弘氏とそれぞれ共同で開発した内容を引用した。ここに感謝申し上げる。

注

- 注 1) 感覚量は、刺激強度のべき関数によって表されるとした法則。
 注 2) 視野内で明暗が分布する様子における、視角 1 度あたりの明暗の繰り返しの多さを表し、単位に cycle/degree を用いる。
 注 3) 文献 6) 以降に行った再分析により、AD 値と CD 値の算定方法の改良を行ったため、文献 7) に示す定義とは異なる。

参考文献

- 1) 荻内康雄, 石田泰一郎; 仮想輝度分布法による実大空間の明るさ感推定に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, No. 583, 2004. 9, pp. 7-14.
- 2) 岩井彌, 井口雅行; 空間の明るさ感指標「Feu」による快適な空間創りのための新しい照明評価手法, 松下テクニカルジャーナル, 2008. 1, 53(2), pp. 64-66.
- 3) 加藤未佳, 太田裕司, 羽入敏樹, 関口克明; 光の到来バランスを考慮した空間の明るさ感の評価, 日本建築学会環境系論文集, No. 568, 2003. 6, pp. 17-23.
- 4) 高乗佑, 魯斌, 古賀誉章, 平手小太郎; 輝度のばらつきを考慮した空間の明るさ感の予測に関する基礎的研究, 照明学会誌, Vol. 97, No. 8, 2013. pp. 429-435.
- 5) Akashi, Y., Tanabe, Y., Akashi, I. and Mukai, K.; Effect of sparkling luminous elements on the overall brightness impression: A pilot study, Lighting Res. Technol. 32(1), 2000, pp. 19-26.
- 6) 坂田克彦, 中村芳樹, 吉澤望, 武田仁; 輝度対比量に基づく明るさ感推定モデル, 日本建築学会環境系論文集, No. 732, 2017. 2, pp. 129-138.
- 7) 中村芳樹; ウェブレットを用いた輝度画像と明るさ画像の双方向変換—輝度対比を考慮した明るさ知覚に関する研究 (その 3), 照明学会誌, Vol. 90, No. 2, 2006. 2, pp. 97-101.
- 8) 上村健, 合田和弘, 坂田克彦; 明るさ感簡易予測型照明制御システムの開発 (第 1 報) 導入建物概要とシステム概要, 電気設備学会全国大会講演論文集, 2017.