

## 現代美術館の展示室における自然光利用に関する研究： 採光手法の類型化および開口部の透過特性を考慮した光環境シミュレーション

馬, 健

九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻環境・遺産デザインコース

井上, 朝雄

九州大学大学院芸術工学研究院環境デザイン部門

<https://doi.org/10.15017/4706169>

---

出版情報：芸術工学研究. 35, pp.1-20, 2021-10-01. 九州大学大学院芸術工学研究院  
バージョン：  
権利関係：

## 現代美術館の展示室における自然光利用に関する研究

## 採光手法の類型化および開口部の透過特性を考慮した光環境シミュレーション

## A Study on the Use of Natural Light in the Exhibition Rooms of Contemporary Art Museums

## Typology of Daylighting Methods and Simulation of Light Environment Considering Transmission Characteristics of Apertures

馬健<sup>1</sup>

MA Jian

井上朝雄<sup>2</sup>

INOUE Tomo

## Abstract

This paper focuses on the use of natural light in the exhibition rooms of contemporary art museums. Through daylight simulations, it examines the effects of daylighting methods on the illuminance of the exhibition rooms, and clarifies some of the possibilities of using natural light in exhibition spaces. First of all, in order to clarify the overall picture of daylighting methods, multivariate analysis was used to classify the daylighting methods of the exhibition rooms with top lights, and the characteristics of the results were discussed. Based on the results of the classification, daylight simulations are conducted for 11 representative cases, and the characteristics of natural light use in each case are discussed under the conditions of different season, time of day, etc. from the viewpoint of instantaneous illuminance values. In order to compare the results with the instantaneous illuminance values under ideal weather conditions, annual daylight simulations were conducted using meteorological data that can also consider the actual weather conditions of each case study. The characteristics of the light environment of the 11 cases were discussed in terms of spatial illuminance distribution, calculated values, appearance time of the specified range of illuminance, and climatic characteristics. Finally, by comparing the above simulation results with the design background of some case studies, the effects of the daylighting methods were comprehensively discussed.

## 1. はじめに

近年では、美術館の展示空間における自然採光が再評価される傾向にあり、展示空間に自然光の積極的な採り入れを試みる美術館も散見される。こうした自然光の必要性を再認識していく中で、設計段階で展示物に対する損傷の大きな影響要因とされた照度の瞬時値と年間積算照度<sup>1)</sup>の検討がますます重要になってきた。これらの要因による採光手法<sup>註1)</sup>の考察は、近年で著しい発展を遂げたコンピュータシミュレーションによって可能となり、採光手法の定量的な評価の必要性も既往研究<sup>註2)</sup>において示唆された。しかしながら、現状では建築計画の視点から構成や形態的特徴等によって採光手法を定性的に体系化する研究は多く見られるが、シミュレーションという観点から考察を試みるものはまだ少ない。このような背景から、様々なニーズに応える必要のある展示空間において、季節・気候によって変化する自然光はどのような状況では利用可能なのか、昼光利用やシミュレーション技術の進歩は自然採光にどのような可能性をもたらしたのかという視座は、今後を見据えた美術館の建築および採光設計には不可欠であると考えられる。また、建築家による空間演出としての自然光利用の設計手法が、美術作品の鑑賞とうまく適合しているのかを検証し、その改善策を示したいということも研究動機の1つである。

以上より、本研究は光環境の形成に最も関わる要素として現代美術館の展示室の採光手法に着目し、実際の美術館事例をモデル化し、光環境シミュレーションを通して、建築家の模索によって蓄積された多様な採光手法が美術館の展示室内の照度に与える影響を気候・時間や開口部の透過特性等の条件下で検討し、展示空間における自然光利用の可

連絡先：井上朝雄, t-inoue@design.kyushu-u.ac.jp

1 九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻環境・遺産デザインコース  
Environment and Heritage Design Course, Department of Design,  
Graduate School of Design, Kyushu University2 九州大学大学院芸術工学研究院環境デザイン部門  
Department of Environmental Design, Faculty of Design, Kyushu University

能性の一端を明らかにすることを目的としている。そこから得られた知見は、今後新たに自然光による豊かな光環境を持つ空間を創造する際に有用であると考えられる。

## 2. 既往研究

美術館の展示空間における自然採光を巡り、様々な研究が行われている。展示空間における自然採光方式に着目する研究のうち、加藤らによる展示空間の採光方式の体系化及び要求側からみた採光手法の全体像を整理したもの<sup>2)</sup>、内藤らによる現代の美術館の展示室とトップライトの形態的な関係性を明らかにしたもの<sup>3)</sup>等が挙げられる。以上の研究はいずれも空間形態や開口部の配置等の視点から体系的に展示室の採光手法をまとめたものであり、それぞれの採光手法が光環境に与える具体的な影響について言及されていない。また、これらの研究は展示室の形態、開口部の配置と形状等の要素の単純集計やクロス集計で採光手法の全体像を掴む傾向にあり、多変量解析によって各要素の潜在的な関係性を考慮した類型化はほとんど見られない。

光環境シミュレーションによる採光手法の考察に着目した本研究の先行研究として、筆者らは年間積算照度に着目し、各種の透明ガラスの光学特性データのコレクションである International Glazing Database を用いて開口部の仕様を設定し、年間動的シミュレーションを行い、代表的な採光手法を用いた 8 つの美術館展示室の事例の年間積算照度分布の特徴を定量的・視覚的に把握した<sup>4)</sup>。また、宮森らによる AUTODESK 3DS MAX を用いてトップライトの構成と屋内照度の関係を明らかにしたもの<sup>5)</sup>と、田崎らによる DIVA for Rhino を用いて美術館の展示室の採光手法を考察したもの<sup>6)</sup>が挙げられる。以上の研究はいずれも、動的シミュレーションに基づく年間積算照度のみに着目したもの<sup>4)</sup>あるいは静的シミュレーションに基づく照度瞬時値のみに着目したもの<sup>5)6)</sup>であるが、両者を結合して総合的に採光手法を考察する研究は見られない。また、これらの研究は主に透明な開口部の条件下で検討が行われたもので、空間の光環境に大きな影響を与える開口部の拡散性に関する検討は見られない。更にシミュレーション結果の考察について、既往研究は計算値と推奨値の比較が中心となっており、本研究のような年間評価指標と気候特性による分析や設計意図による影響等の面からの考察は見られない。

以上の既往研究に対して本研究はまず採光手法の構成要素の潜在的な関係性に着目し、数理的な観点から展示

室の採光手法を類型化する。その上、季節・時間、気候データや開口部の拡散性等の条件を考慮し、開口部の光学特性データを扱うことができるシミュレーション方法を用い、代表的な美術館の展示室の光環境を定量解析することで、より多面的な視点から採光手法による具体的な影響を考察する。

## 3. 多変量解析による展示室の採光手法の類型分析

本章では、採光手法の全体像を把握するため、現代美術館におけるトップライトを用いた常設と企画展示室の採光手法を分類し、各類型の特徴を考察する。

### 3.1. 研究対象と方法

研究対象について、日本における代表的な建築ジャーナリズムである『新建築』(1960-2020年)と『GA Document』(1980-2020年)及び『GA Museum』を資料とし、展示室のトップライトの構成が確認できる74例の美術館から常設展示室54例(表1)と企画展示室28例(表2)を抽出した。同一美術館における採光手法が類似する複数の展示室がある場合、1つの代表的な展示室を対象にした。研究の方法として、採光手法の構成要素の有無を確認し、データをダミー変数として収集した。解析手法は、各事例の採光手法の潜在的な関係性を見出す数量化Ⅲ類とデータを分類するクラスター分析を用いた。なお、統計解析は群馬大学の

表 1 分析対象事例(常設展示室)

NO.	美術館名	NO.	美術館名
1	東京都現代美術館	28	ヤコ-美術館
2	富岡市立美術館	29	ル-ブルン
3	岡山県立美術館	30	愛知芸術文化センター
4	谷村美術館	31	出石町立伊藤美術館
5	国立国際美術館	32	村井正誠記念美術館
6	国立西洋美術館新館	33	ア・パ・ル美術館
7	海岸美術館	34	イェル大学イリス美術研究センター
8	酒田市美術館	35	シツカト・ルト美術
9	録 Museum	36	フェイン・ドーン美術館
10	群馬県立近代美術館	37	フランクフルト現代美術館
11	織田廣喜ミュージアム	38	ミル・コルケヨ美術館
12	山口県立萩美術館・浦上記念館	39	アウルト・セラー
13	神奈川県立近代美術館葉山	40	クローギャラー
14	天童市秋野不矩美術館	41	ゲッティセンター
15	Luyeyuan Sculpture Art Museum	42	フォートワース現代美術館
16	西脇市岡之山美術館	43	SSM 菅野美術館
17	香川県立東山魁夷せとうち美術館(2)	44	N's YARD(2)
18	脇田美術館(2)	45	遠山美術館
19	大山崎山荘美術館	46	長谷川美術館
20	塩沢町立今泉博物館	47	由布院美術館
21	岩崎美術館	48	Bourdelle Museum
22	志摩 museum	49	サクラー・ギャラー
23	直島コンプレックス・アートミュージアム	50	パ・イテ-財団美術館
24	カ・カミュージアム	51	川村記念美術館
25	オトネ・リス・アート・ミュージアム		
26	とくろミュージアム大三島		
27	ニス国立西洋美術館		

\*())内は展示室の数を示す

表 2 分析対象事例(企画展示室)

NO.	美術館名	NO.	美術館名
1	東京都現代美術館	14	フランクフルト中川村美術館
2	東京芸術大学美術館	15	ニューミュージアム
3	金沢 21 世紀美術館(2)	16	パルミュージアム(2)
4	名古屋美術館	17	ワグロイテ・ツクン美術館
5	目黒区美術館	18	茨城県近代美術館
6	軽井沢・高輪美術館	19	大分市美術館
7	松塚堂	20	札幌-美術館
8	熊本県立美術館分館	21	アレクソ美術館
9	塩沢町立今泉博物館	22	ホト現代美術館
10	札幌芸術の森美術館	23	ロサンゼルス現代美術館
11	中央美術学院美術館	24	アリゾナ州立大学芸術センター
12	METAL ART MUSEUM 光の谷	25	ウイロ美術館
13	フランクフルト現代美術館	26	ケンベル美術館

青木繁伸元教授が作成、公開した計算ツールを用いた<sup>23)</sup>。対象事例の詳細資料とデータマトリックスに関するデータセットはオンラインで公開している<sup>24)</sup>。

### 3.2. 採光手法の構成要素の選定

構成要素の選定は、従来の研究にて言及された要素に、本研究で提案された新たな要素を加えた。また、常設展示室と企画展示室は展示空間としての機能が異なるため、本章では両者を分けて論じる。

常設展示室の構成要素の選定について、内藤ら<sup>3)</sup>の先行研究に言及された「平面形状」、「天井形状」、「トップライトの平面配置」、「展示品の種類」や「展示品の配置」の5つの項目に、「突出部位」、「光透過材の形状」、「光の制御」の3つの項目を加え、構成要素を8項目のアイテム、29種類のカテゴリーに分類した。

以下、先行研究から引用した5つの項目の内容を概説していく。展示室の「平面形状」を「長方形」、「正方形」や「正円」といった「定形」、その他を「不定形」として分けた。「天井形状」を勾配の有無と勾配の変化によって「変化なし」、「変化あり+点変化」、「変化あり+線変化」に分けた(表3)。天井面における「トップライトの平面配置」を、展示室の角に配置される「角」、トップライトが配置される壁面の数による「1辺」、「2辺」、それ以上の「多辺」と、点状にトップライトが配置される「点」、展示室を横断する「線」、分散的に複数配置される「分散」、天井全面から光を取り入れる「全面」、鋸天井のように線状のトップライトが反復する「ストライプ」、点状のトップライトが反復する「格

子」に分け、またトップライトとサイドライトを併用する事例も見られたため、この項目に壁面に設けられた窓の有無を「窓」として入れた(表4)。「展示品の種類」を絵画等の「平面」、彫刻等の「立体」、その両方が展示されている「両方」に分けた。「展示品の配置」を壁面や壁沿いのみ配置されるものを「周縁のみ」、壁面から離れている位置のみに配置されるものを「周縁以外のみ」、両方に配置されるものを「両方」として3つに分けた。

上述の要素以外に、本研究では、「突出部位」、「光の制御」、「光透過材の形状」の3つの項目を付け加えた。それぞれの内容について述べる。「突出部位」は、展示室の断面形状から基本の天井または屋根の平面から突出した部位の有無によって採光手法を分類する(表5)。「光の制御」について、屋根の開口部と天井の開口部は同一で、自然光を直接屋内に取り入れるものを「透過」、直射日光を遮蔽・反射・拡散するため、屋根の開口部と天井の間の形態的操作により、外側の開口部から入射した光と室内に入射した光が、異なる伝搬方向を示すものを「透過+形態操作」、屋根または天井の開口部に電動ルーバー等の可動的な装置を取り付けるものを「透過+制御装置」として3つに分類した(表6)。「光透過材の形状」について、展示室の開口部にピラミッド形やリッジ形等様々な形のグレージング(ガラス)が見られ、これらの形も意匠や機能の面から採光手法の1つの特徴として位置づけられる。グレージング(ガラス)は1つの面で構成されるものを「平面」、複数の面で構成される「立体」に分けた(表7)。以上の項

表3 展示室の形態パターン<sup>3)</sup>

		平面形状		
		長方形	定形	不定形
天井形状	変化なし			
	線変化			
	点変化			

表5 突出部位の有無

変化なし	突出部位あり		突出部位なし
	変化なし	変化あり	

表6 光の制御方法

企画展示室			
常設展示室			
透過	透過+形態操作	透過+制御装置	透過+形態操作+制御装置

表4 トップライトの平面配置<sup>3)</sup>

周縁のみ				周縁以外のみ			全体		
角	1辺	2辺	多辺	点	線	分散	全面	ストライプ	格子

表7 光透過材の形状

平面	立体

目内容を踏まえ、対象事例の図面や写真から各構成要素の有無を確認し、データを1-0(有を1,無を0)のダミー変数として収集し、データマトリックスを作成した(表8)。

また、企画展示室の構成要素は基本的に常設展示室に類似しているが、展示品の種類と配置等の要素が不確定であるため、常設展示室の解析項目から「展示品の種類」と「展示品の配置」を除外した。また、数量化Ⅲ類では、ある要素がすべての対象で無(0)であると計算ができないため、企画展示室のすべての対象が該当しない「角」、「多辺」を除外した。常設展示室では見られなかった、「透過+形態操作」と「透過+制御装置」の両方の項目に該当する対象が見られたため、「光の制御」に「透過+形態操作+制御装置」項目を追加した(表6)。

### 3.3. 数量化Ⅲ類とクラスター分析の解析結果

#### 3.3.1. 常設展示室

数量化Ⅲ類の解析から得られたカテゴリースコアを表9に示す。解釈しやすい固有値と寄与率の上位3軸を抽出し、各対象に与えられたサンプルスコアを用いて散布図を作成した。各軸の解釈は以下となる。

第1軸では、カテゴリースコアの正の値の上位で、「線」、「透過+制御装置」、「長方形」、「平面(展示品)」、「周縁のみ」等、自然光を人工的にコントロールする必要があり、一般的に壁面に展示される絵画などの平面の展示品に適した採光手法の要素が見られた。負の値では「周縁以外のみ」、「角」、「立体(展示品)」、「点」等、光を局部に集中させることによって得られる陰影の効果が求められる彫刻などの立体の展示品に適した採光手法の要素が見られた。総体として、この軸は主に展示品の種類による採光手法の特徴を評価していると解釈し、「平面展示型-立体展示型」と名付けた。第2軸では、カテゴリースコアの正の

値の上位で、「透過+形態操作」、「格子」、「ストライプ」、「全面」等、天井面における開口部が全面的に配置され、光が空間全体に拡散されるという傾向を示す要素が見られた。負の値では、「多辺」、「角」、「点」、「線」等、天井面における開口部が局部に集中して配置されるという傾向を示す要素が見られた。総体として、この軸は天井面における開口部の配置を評価していると解釈し、「全面拡散型-局部集中型」と名付けた。第3軸では、カテゴリースコアの正の値の上位で、「周縁以外のみ」、「全面」、「立体(展示品)」、「窓」、「不定形」等の多様な要素が混在し、空間の無秩序性が強調される傾向が見られた。それに対して、カテゴリースコアの負の値では、「定形」、「ストライプ」、「点」、「変化あり+点変化」、「周縁のみ」等、対称的な空間形態と規則的な開口部および展示品の配置によって空間の秩序性が強調される要素が見られた。総体として、この軸は採光手法による空間秩序的な光効果<sup>注5</sup>を評価していると解釈し、「無秩序型-秩序型」と名付けた。

サンプルスコアの散布図の分布特徴について、第1軸と第2軸より構成された散布図(図1)では、「立体展示型」(第1軸の負方向)に偏る左半分において、「局部集中型」(第2軸の負方向)と重なる部分に対象がより広がった分布となっており、彫刻など立体の展示品に対して光を局部に集中させる傾向が見られる。「平面展示型」(第1軸の正方向)に偏る右半分において、顕著な分布特徴は見られず、絵画などの平面の展示品に対して開口部の配置が全面と局部の両方が見られる。

第2軸と第3軸の散布図(図2)では、特に左上の「局部集中型」(第2軸の負方向)と「無秩序型」(第3軸の正方向)の重なる部分に対象の分布は広がっていない。この原因について、開口部の局部配置は全面配置と異なり、展示品

表8 常設展示室のデータマトリックス(一部)

No.	対象事例	平面形状			天井形状			突出部位の有無	透過材の形状		トップライトの平面配置										光の制御		展示品の種類			展示品の配置				
		長方形	定形	不定形	変化なし	変化あり+線変化	平面		立体	角	1辺	2辺	多辺	点	分散	全面	ストライプ	格子	窓	透過	透過+形態操作	透過+制御装置	平面(展示品)	立体(展示品)	両方(展示品)	周縁のみ	周縁以外のみ	全体		
1	東京都現代美術館	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
2	富岡市立美術館	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
3	岡山県立美術館	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
4	谷村美術館	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
5	国立国際美術館	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
6	国立西洋美術館新館	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
7	海岸美術館	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
8	酒田市美術館	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
9	録 Museum	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
10	群馬県立近代美術館	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
11	織田廣喜ミュージアム	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
12	山口県立秋美術館・浦上記念館	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
13	神奈川県立近代美術館葉山	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
14	天竜市松野不矩美術館	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
15	Luyeyuan Sculpture Art Museum	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
16	西脇市岡之山美術館	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
17	香川県立東山魁皇せとうち美術館	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0

表9 常設展示室カテゴリースコア

	Axis 1	Axis 2	Axis 3
長方形	1.901144	0.399002	0.4170933
定形	-1.143689	0.6419831	-3.286918
不定形	-0.939871	-0.718174	0.926468
変化なし	-0.418977	0.5643322	0.2659227
変化あり+点変化	-1.7853	-1.952433	-1.561368
変化あり+線変化	1.6211018	-0.152365	0.1286434
突出部位の有無	-0.053133	0.2871258	-0.2261
平面	0.0314788	0.283829	-0.027498
立体	-0.042636	-0.711695	0.0338644
角	-2.801044	-2.836861	-0.161932
1辺	0.7131905	-0.03433	0.7830635
2辺	-0.001833	-0.318411	1.949428
多辺	-1.23827	-3.239242	-0.858239
点	-1.755348	-0.90076	-1.551067
線	2.4318262	-0.834274	-0.064438
分散	-0.675093	0.1080185	-0.398838
全面	-0.279422	0.533609	2.9939279
ストライプ	0.6019528	3.0798665	-3.141465
格子	-0.229911	3.1694836	-1.273451
窓	-0.139543	-0.90319	1.1046493
透過	-0.487751	-0.409206	0.0070429
透過+形態操作	0.2999348	3.5579058	-2.287436
透過+制御装置	1.6406448	-0.077296	0.9585209
平面(展示品)	0.9883956	-0.674242	-0.61895
立体(展示品)	-2.286341	-0.908469	1.045298
両方(展示品)	-0.668681	1.8052773	0.5987687
周縁のみ	0.6489278	-0.987559	-0.826767
周縁以外のみ	-2.782358	-0.315861	4.1046133
全体	-0.601858	1.4385417	0.725817

負の値(上位) 正の値(上位)

の配置, 空間演出等の要因に制約される場合が多いため, 空間の秩序性が生み出されやすいと推測される。

第1軸と第3軸の散布図(図3)では,「立体展示型」(第1軸の負方向)に偏る左半分において, 第3軸に沿って広く分布している対象が多く,「平面展示型」(第1軸の正方向)に偏る右半分においては, 第3軸に沿って各対象が広がっていない分布となっている。すなわち, 採光の制限が厳しい平面展示品に比べ, 立体展示品に適する採光手法は空間秩序を強調したり, 破ったりすることによって, よ

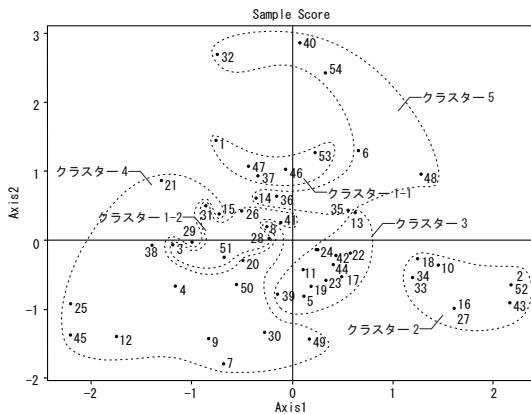


図1 第1軸×第2軸の散布図とクラスターの分布(常設)

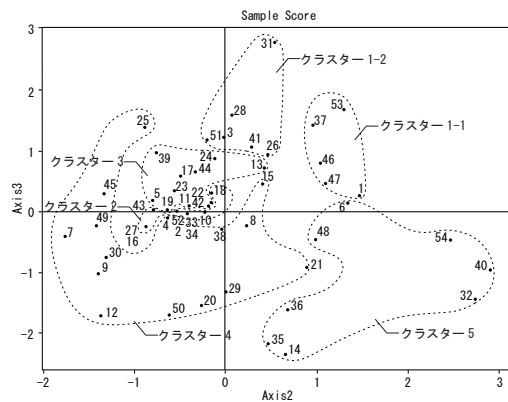


図2 第2軸×第3軸の散布図とクラスターの分布(常設)

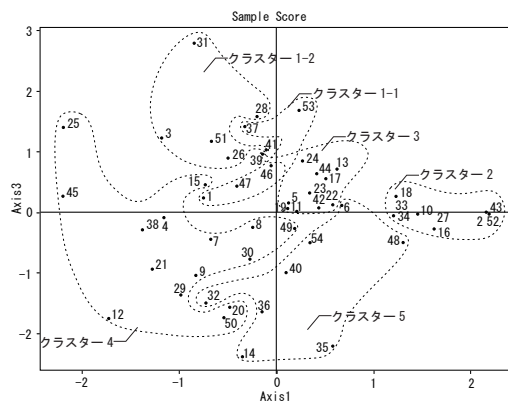


図3 第1軸×第3軸の散布図とクラスターの分布(常設)

り個性的な空間が形成されることが示唆された。

数量化Ⅲ類で得られた第1軸, 第2軸と第3軸の各対象のサンプルスコアを用いて階層クラスター分析(ウォード法)を行った。得られた樹形図(図4)より対象を5つのクラスターを分類し, 前節のサンプルスコアの散布図に各クラスターの位置を示した。各クラスターの対象例は図5に示す。以下, クラスターごとに対象の備えている特徴を記述する。

クラスター1:2つの小クラスターに分類される。クラスター1-1:第1軸では0軸付近, 第2軸では負方向, 第3軸では正方向に分布した。天井に勾配がなく, 平面は「長方形」で, 天井面における開口部が全面的に配置される傾向があり, 光が空間全体に拡散されることは主な特徴である。この特徴は, 内藤ら<sup>3)</sup>が論じた最も典型的な展示空間の特徴に類似<sup>注6)</sup>, クラスター1-1はトップライトによる典型的な採光手法として位置づけられる。クラスター

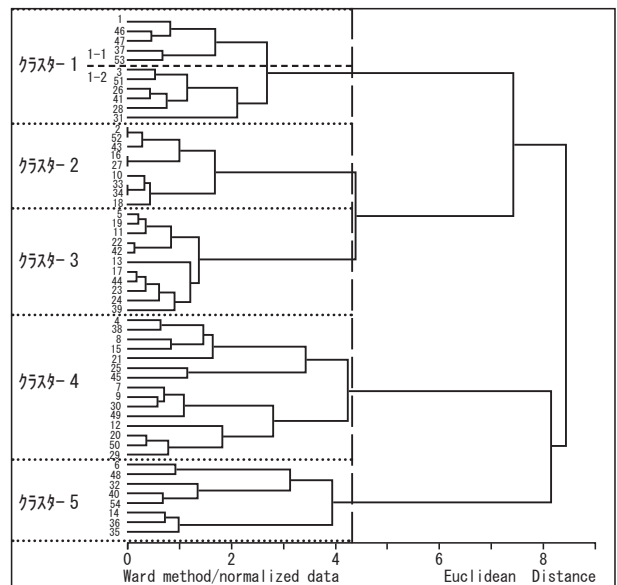


図4 クラスター分析による樹形図(常設)



図5 常設展示室の各クラスターの対象例<sup>注18)</sup>

1-2:第2軸では0軸付近,第1,3軸では負方向に分布した。平面は「不定形」で,天井形状と開口部の配置は多様である。展示品は主に「立体」と「両方」のもので,光の取り入れ方と関係なく空間の全体に配置されることで,光と展示配置の関係性が弱まった採光手法と推測される。

クラスター2:第1軸では,正方向の高い値のエリアに分布した。第2軸では負方向,第3軸では0軸付近に分布した。平面は「長方形」で,展示品は「平面」のものを中心に,周縁の壁に配置される対象が多い。天井に「変化あり+線変化」のような勾配があり,その中心部における線状の開口部からの光が反射され,周辺の壁面に拡散される特徴が見られる。

クラスター3:第1軸では主に正方向,第2軸では正負両方向に大きく分散した。第3軸では0軸付近に分布した。平面は「不定形」や「長方形」で,天井に勾配がなく,展示品は「平面」のものを中心に,周縁の壁のみに配置される対象が多い。また,天井面における開口部(「1辺」,「2辺」)も空間の周縁のみに配置される傾向が見られたため,光と展示配置の対応関係が強調されることが特徴である。

クラスター4:第1軸では負方向,第2軸では正方向,第

3軸では負方向に大きく分散した。平面の形状と展示品の種類および配置は多様で,天井の形状は主に「変化なし」と「変化あり+点変化」である。天井面における開口部は主に点状であり,部分集中の光は空間全体にまとまりと演出効果を与えることが主な特徴である。

クラスター5:第1軸では0軸付近に分布した。第2,3軸では,負方向に大きく分散した。平面形状と天井形状は多様で,「格子」と「ストライプ」状の開口部の配置によって,光が空間全体に拡散されることは主な特徴である。

### 3.3.2. 企画展示室

数量化Ⅲ類の解析から得られたカテゴリースコアを表10に示す。また,解釈しやすい固有値と寄与率の上位2軸を抽出した。各軸の解釈は以下となる。

第1軸では,カテゴリースコアの正の値の上位で,「透過+形態操作+制御装置」,「透過+形態操作」,「格子」,「ストライプ」等,外側の開口部から入射した光を可動装置や形態的操作によって,人工的にコントロールされることで,光の取り入れ方と空間形態の無関係を示す要素が見られた。負の値では,「変化あり+点変化」,「点」,「定形」,「立体」,「透過」等,開口部から入射した光に過度な干渉を与

表10 企画展示室カテゴリースコア

	Axis 1	Axis 2
長方形	0.3724212	1.3979164
定形	-2.039511	-1.488005
不定形	0.4711792	-0.305469
変化なし	0.4854688	-0.331735
変化あり+点変化	-3.039877	-0.049725
変化あり+線変化	0.5054994	1.009338
突出部位の有無	0.2854607	-0.589953
平面	0.6698101	-0.098086
立体	-1.718027	0.5662207
1辺	-0.486339	1.4105459
2辺	1.2902015	1.5949595
点	-2.705609	-0.147731
線	-0.017218	1.0388313
分散	1.1093504	-3.001225
全面	0.4558683	-1.944608
ストライプ	0.7734535	0.469329
格子	1.1093504	-3.001225
窓	-0.847283	-1.330304
透過	-0.464846	0.6411658
透過+形態操作	1.1457194	0.0166888
透過+制御装置	0.5581576	-3.034109
透過+形態操作+制御装置	1.6885518	2.4555729

■ 負の値(上位) ■ 正の値(上位)

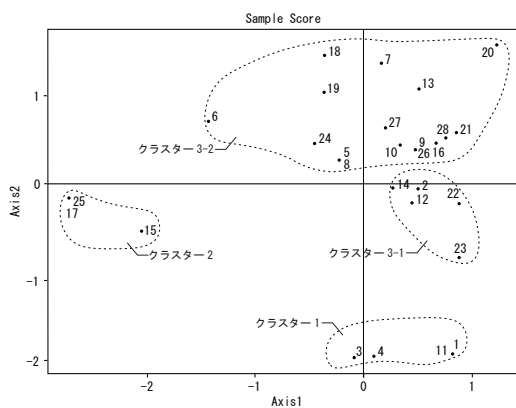


図6 第1軸×第2軸の散布図及びクラスターの分布(企画)

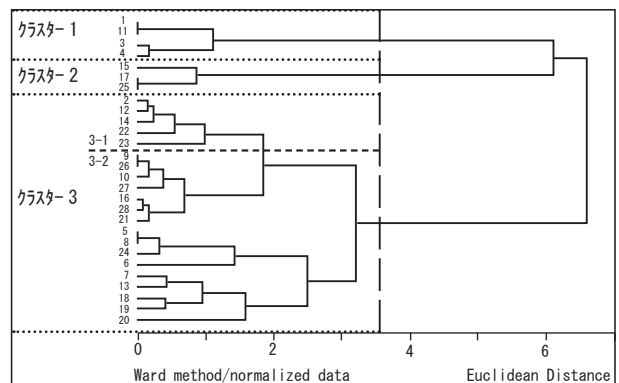


図7 クラスター分析による樹形図(企画)



図8 企画展示室の各クラスターの対象例<sup>注19</sup>

えず、光の取り入れ方と空間形態の呼応関係による空間の演出効果を強調する要素が見られた。総体として、この軸は主に光の制御方式による光と空間形態の関係性を評価していると解釈し、「制御型-自然型」と名付けた。第2軸では、カテゴリースコアの正の値の上位で、「2辺」、「1辺」、「長方形」、「変化あり+線変化」、「線」等、平面が長方形の空間で、天井面における線状の開口部が局部に集中して配置されるという傾向を示す要素が見られた。負の値では、「分散」、「格子」、「全面」等、天井面における開口部がより全面的に配置され、光が空間全体に拡散されるという傾向を示す要素が見られた。総体として、この軸は常設展示室の第2軸と類似し、天井面における開口部の配置を評価していると解釈し、「局部集中型-全面拡散型」と名付けた。

サンプルスコアの散布図の分布特徴について、第1軸と第2軸より構成された散布図(図6)では、「制御型」(第1軸の正方向)に偏る右半分と「局部集中型」(第2軸の正方向)に偏る上半分において対象がより多く分布し、それに対して「自然型」(第1軸の負方向)に偏る左半分と「全面拡散型」(第2軸の負方向)に偏る下半分においては、対象数が少なく、特に左下の部分に対象の分布は広がっていない。すなわち、多様な展示品に対応する必要がある企画展示室の採光手法について、開口部が局部に集中され、自然光もより人工的にコントロールされるという特徴が窺える。

数量化Ⅲ類で得られた第1軸と第2軸の各対象のサンプルスコアを用いて階層クラスター分析(ウォード法)を行った。得られた樹形図(図7)を3つのクラスターを分類し、前節のサンプルスコアの散布図に各クラスターの位置を示した。各クラスターの対象例は図8に示す。以下、クラスターごとに対象の備えている特徴を記述する。

クラスター1:第1軸では正負両方向に分散し、第2軸では負方向の高い値のエリアに分布した。天井に勾配がなく、天井面における開口部が全面的に配置され、可動制御装置等の方法によって光をコントロールすることは主な特徴であり、多様な展示方式に対応できる均質な光環境が形成される採光手法であると考えられる。

クラスター2:第1軸では負方向の高い値のエリアに分布し、第2軸では負方向に分布した。天井形状は「変化あり+点変化」で、平面は「定形」で、空間の上部に集中した点状の開口部があり、部分集中の光は空間全体にまとまりと演出効果を与えることが主な特徴である。

クラスター3:2つの小クラスターに分類される。クラ

スター3-1:第1軸では正の方向に、第2軸では負方向に分布した。天井に勾配がなく、平面は「不定形」で、天井面における「ストライプ」と「全面」の開口部があり、光が空間の全体に拡散することが主な特徴であるが、平面形状や天井形状といった空間形態の変化により、余分な凹凸や室内装飾が排除されがちなホワイト・キューブのような空間と異なる傾向が窺える。クラスター3-2:第1軸では正負両方向に広く分散しており、第2軸では正の方向に分布した。平面は「長方形」や「不定形」で、天井形状は「変化なし」や「変化あり+線変化」の2種類が見られ、天井面における線状の開口部の配置を特徴とした採光手法であると考えられる。細長い空間の天井面の中央部に線状の開口部から光を取り入れ、軸線光のように光が空間に方向性を与えるもの<sup>註7</sup>、天井面における線状の開口部が周縁のみに配置されるものや、「ストライプ」のように線状の開口部が反復し、光が空間全体に拡散されるものの3つのタイプが見られる。

#### 4. 照度瞬時値からみた美術館展示室の採光手法

本章では昼光照明シミュレーションを行い、照度瞬時値の視点から季節、時間帯や開口部の透過特性等の条件下で代表的な採光手法の自然光利用の特徴を考察する。

##### 4.1. シミュレーションの対象

シミュレーションの対象について、第3章で行った常設と企画展示室の類型化の結果から得られた8クラスター(常設5クラスター、企画3クラスター)に基づき、各クラスターの特徴に合わせて、前章で取り上げた82個の対象から以下の代表的な11事例を選定した(表11、表12、図9)。

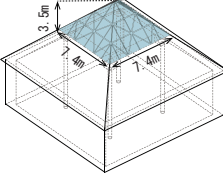
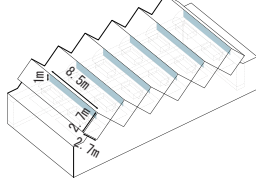
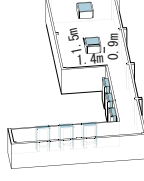
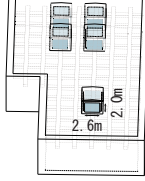
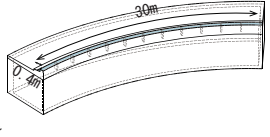
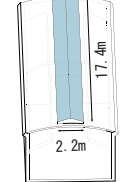
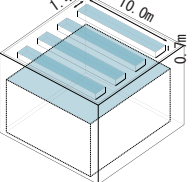
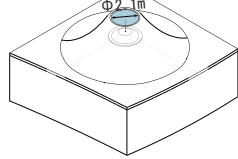
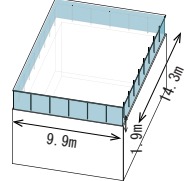
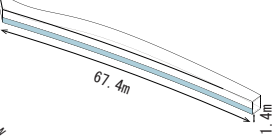
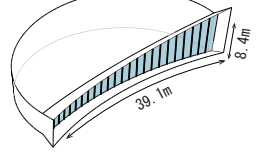
クラスター1(常設)とクラスター1(企画)は主に、天井

表11 シミュレーション対象の一覧

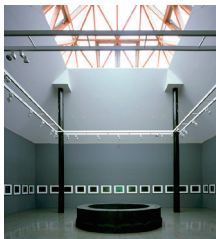
	館名	開館年	室名	展示物と位置	所在地	開口部素材(実際)
1	ハルミュージアム7-ク	1988	ギャラリー-A	絵画/壁	群馬県	拡散
2	一宮市三岸節子記念美術館	1998	一般展示室	絵画/壁	愛知県	透明
3	Luyeyuan Sculpture Art Museum	2002	2階展示室	彫刻/床	中国四川省	透明
4	札幌芸術の森美術館	1990	展示室	絵画・彫刻等/壁・床	北海道	透明+拡散
5	織田廣喜ミュージアム	1998	常設展示室	絵画/壁	滋賀県	透明
6	ハルミュージアム7-ク	1988	ギャラリー-C	絵画・彫刻等/壁・床	群馬県	拡散
7	金沢21世紀美術館	2004	展示室7	絵画・彫刻等/壁・床	石川県	透明+拡散
8	材川越美術館	2011	展示室2	絵画/壁	埼玉県	拡散
9	N's YARD	2018	展示室4	絵画・彫刻等/壁・床	栃木県	透明
10	林美術館	2010	ギャラリー-1	絵画/壁	千葉県	透明
11	群馬県立館林美術館	2001	展示室1	彫刻/床	群馬県	透明



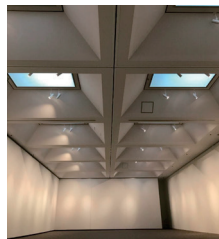
表12 シミュレーション対象の概要

<p>Case1 ハラミュージアムアーク</p>  <p>室名：ギャラリーA 採光手法：トップライト（ピラミッド形） 位置設定（緯度・経度）：36.50, 138.95 気象データ：Matsumoto/ 松本</p>	<p>Case2 一宮市三岸節子記念美術館</p>  <p>室名：一般展示室 採光手法：トップライト（鋸形） 位置設定（緯度・経度）：35.31, 136.75 気象データ：Nagoya/ 名古屋</p>	<p>Case3 Luyeyuan Sculpture Art Museum</p>  <p>室名：2階常設展示室 採光手法：トップライト（長方形） 位置設定（緯度・経度）：30.89, 103.87 気象データ：Sichuan Chengdu/ 成都</p>	<p>Case4 札幌芸術の森美術館</p>  <p>室名：展示室 採光手法：トップライト（モニター形） 位置設定（緯度・経度）：42.94, 141.34 気象データ：Sapporo/ 札幌</p>
<p>Case5 織田廣喜ミュージアム</p>  <p>室名：常設展示室 採光手法：トップライト（線形-周縁） 位置設定（緯度・経度）：35.01, 136.28 気象データ：Nagoya/ 名古屋</p>	<p>Case6 ハラミュージアムアーク</p>  <p>室名：ギャラリーC 採光手法：トップライト（線形-中央） 位置設定（緯度・経度）：36.50, 138.95 気象データ：Matsumoto/ 松本</p>	<p>Case7 金沢 21 世紀美術館</p>  <p>室名：展示室7 採光手法：トップライト（全面） 位置設定（緯度・経度）：36.56, 136.66 気象データ：Matsumoto/ 松本</p>	<p>Case8 ヤオコー川越美術館</p>  <p>室名：展示室2 採光手法：トップライト（凸形） 位置設定（緯度・経度）：35.93, 139.49 気象データ：Tokyo Hyakuri/ 東京百里</p>
<p>Case9 N's YARD</p>  <p>室名：展示室4 採光手法：ハイサイドライト 位置設定（緯度・経度）：37.00, 139.99 気象データ：Tokyo Hyakuri/ 東京百里</p>	<p>Case10 ホキ美術館</p>  <p>室名：ギャラリー1 採光手法：ローサイドライト 位置設定（緯度・経度）：35.52, 140.28 気象データ：Tokyo Hyakuri/ 東京百里</p>	<p>Case11 群馬県立館林美術館</p>  <p>室名：展示室1 採光手法：サイドライト（全面ガラス） 位置設定（緯度・経度）：36.27, 139.51 気象データ：Tokyo Hyakuri/ 東京百里</p>	

開口部



Case1



Case2



Case3



Case4



Case5



Case6



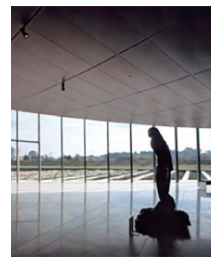
Case8



Case9



Case10



Case11

図9 シミュレーション対象の内観<sup>注20</sup>

面における開口部が全面的に配置されることが特徴であるため、トップライト(全面)を用いた Case7 を選定した。クラスター2(常設)とクラスター3-2(企画)は主に、天井に「変化あり+線変化」のような勾配があり、天井面の中央部に線状の開口部から光を取り入れることが特徴であるため、トップライト(線形-中央)を用いた Case6 を選定した。クラスター3(常設)は主に、天井面における開口部が空間の周縁のみに配置される傾向が特徴であるため、トップライト(線形-周縁)を用いた Case5 を選定した。クラスター4(常設)とクラスター2(企画)は主に、空間の上部に集中した点状の開口部があり、部分集中の光は空間全体にまとまりと演出効果を与えることが特徴であるため、トップライト(ピラミッド形)とトップライト(凸形)を用いた Case1 と Case8 を選定した。クラスター5(常設)とクラスター3-1(企画)は主に、「格子」と「ストライプ」状の開口部の配置によって光が空間全体に拡散されることが特徴であるため、トップライト(鋸形)を用いた Case2 を選定した<sup>注8</sup>。上記以外に、天井または屋根における突出部位の設置によって光を制御するという特徴的な採光手法として、トップライト(直方体)を用いた Case3、トップライト(モニター形)を用いた Case4 を加えた。また、トップライト以外に、サイドライトにおけるハイサイドライト、ローサイドライト、全面ガラスを用いた Case9、Case10、Case11 を選出した。

以上の事例の建築図面を参照し、方位や内部仕上げ材等の部位の仕様は事例ごとに個別に設定し<sup>注9</sup>、それぞれの展示空間をモデル化した。

#### 4.2. シミュレーションの方法

本研究では、信頼性の高い照明計算プログラム Radiance<sup>注10</sup>を利用し、既往研究<sup>注11</sup>によって精度の検証が報告され、年間積算照度や照度の瞬時値の計算および BSDF<sup>注12</sup> データを扱うことが可能な昼光照明シミュレーション方法 Three-phase method<sup>注13</sup>を採用した。シミュレーションの設定について、筆者らの既往研究<sup>4)</sup>では、International Glazing Database を用いて開口部の仕様を設定し、透明素材の範疇で年間積算照度を計算した。本研究はより普遍的・包括的な状況を検討するため、詳細なガラス仕様を追及せず、開口部の透過特性を大きく「透明」と「拡散」の2種類に分け、照度瞬時値と年間積算照度の両方を計算した。また6章で採光手法の意図と効果を考察するため、表11に各事例の実際の透過特性を示し、実在事例の透過特性に近いシミュレーション結果を考察に用いた。

本章のワークフローは以下の通りである。①各事例の3Dモデルを立ち上げ、0.5mの間隔で各展示室の展示状況によって壁面と床面の計算点を設定する。②各事例の開口部を、一般的に使用される透明ガラス等のような透明素材 a(透過率 83%)、乳白ガラス等のような完全拡散素材 b(透過率 40%)の2つの事例に設定し、それぞれの BSDF データは Radiance の genBSDF コマンドを用いて生成した<sup>注14</sup>。③シミュレーションの天空モデル、位置および時間を設定して各計算点の照度を計算し、その結果はプログラム言語 Python<sup>注15</sup>を用いて照度分布図にプロットする。また、天空モデルは CIE 標準晴天空と CIE 標準曇天空を用いた。位置の設定は各事例の経緯度に準じた。時間について、太陽の南中高度が最も高い夏至と最も低い冬至、そしてそれらの中間である春分の日 9時、13時、17時(冬至は16時)の3つの時間を用いた。

#### 4.3. シミュレーションの結果と考察

上記のシミュレーション条件に基づき、代表的な気候条件と時間における異なる開口部の素材を用いた各事例の床・壁面の計算点の平均照度を照度の瞬時値として算出した。JIS 照明基準総則(JIS Z9110-2010)より作成した表13に示す推奨照度を参照し、照度の分布状況、均斉度、計算値や展示状況等の面から各事例の光環境の特徴を考察する。絵画の推奨照度は種類によって 200lx や 500lx が規定されているが、本研究では変動し続ける自然光の照度と比較するため、200-500lx を適切な範囲とした。彫刻の推奨照度は種類によって 500lx や 1000lx が規定されているが、500-1000lx を適切な範囲とした。なお、彫刻等の立体展示品は多様なサイズが存在し、展示の需要によって計算点の設定が非常に多くの可能性があるため、本研究では一律に床面を参照面とする。以下は採光手法に共通する特徴として、3つのパターンを通して各事例の考察結果を述べる(表14-1、14-2)。

ピラミッド形のトップライトを用いた事例(Case1)、線形のトップライトを用いた事例(Case6)や凸形のトップライトを用いた事例(Case8)は開口部が屋根の中央部に位置し、透明素材を使用すると太陽高度の高い(夏至や昼など)晴天時の直射日光の変動による室内の明暗差が大きいため、開口部に可視光透過率の低い拡散素材の使用

表13 展示品による推奨照度

展示品の種類	推奨照度 (lx)
彫刻(石、金属)、造形物、模型	1000
彫刻(プラスタ、木、紙)、洋画	500
絵画、日本画、工芸品、一般陳列品	200
標本、はくせい品	100

表14-1 季節・時間別の照度分布

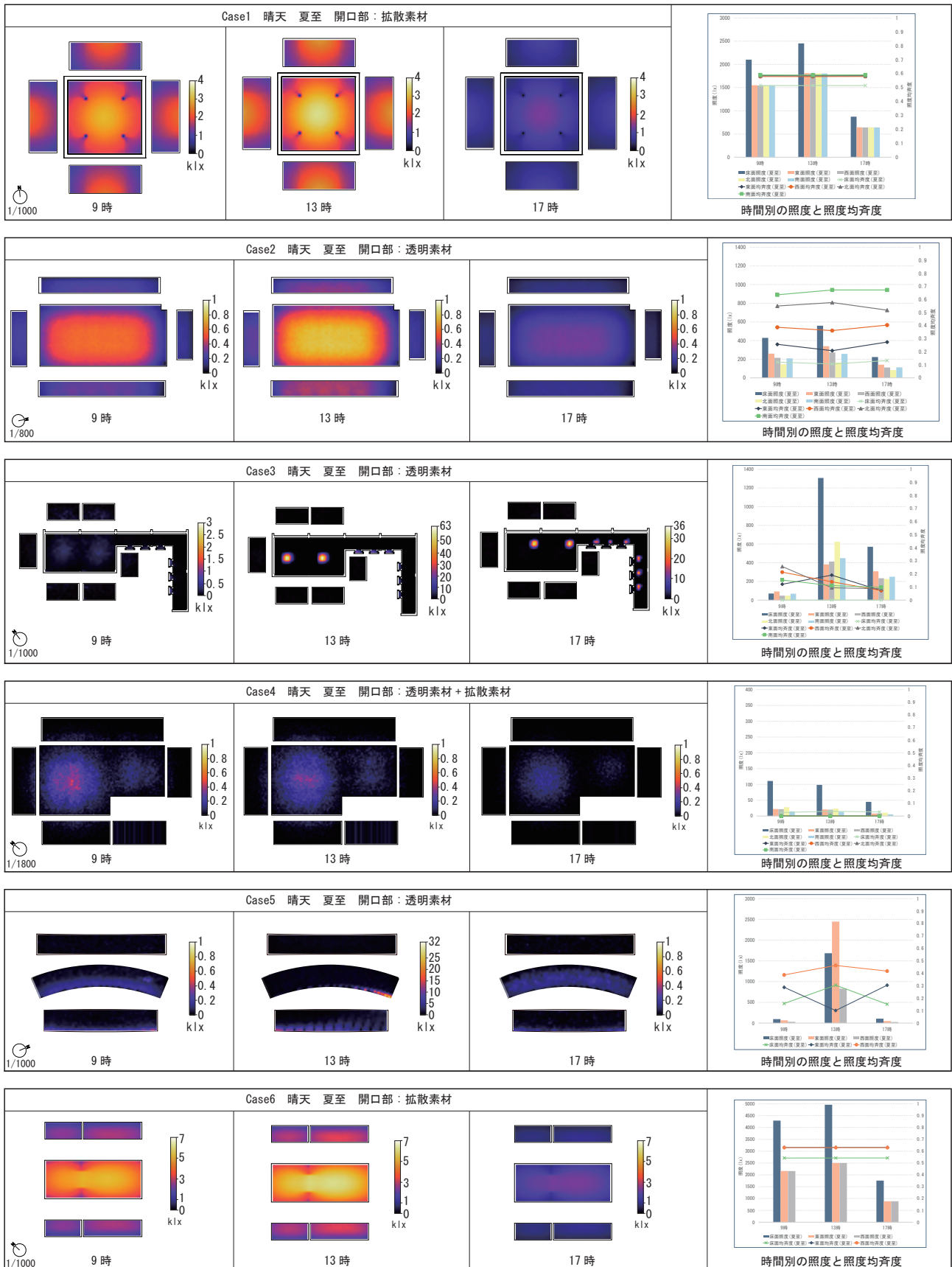
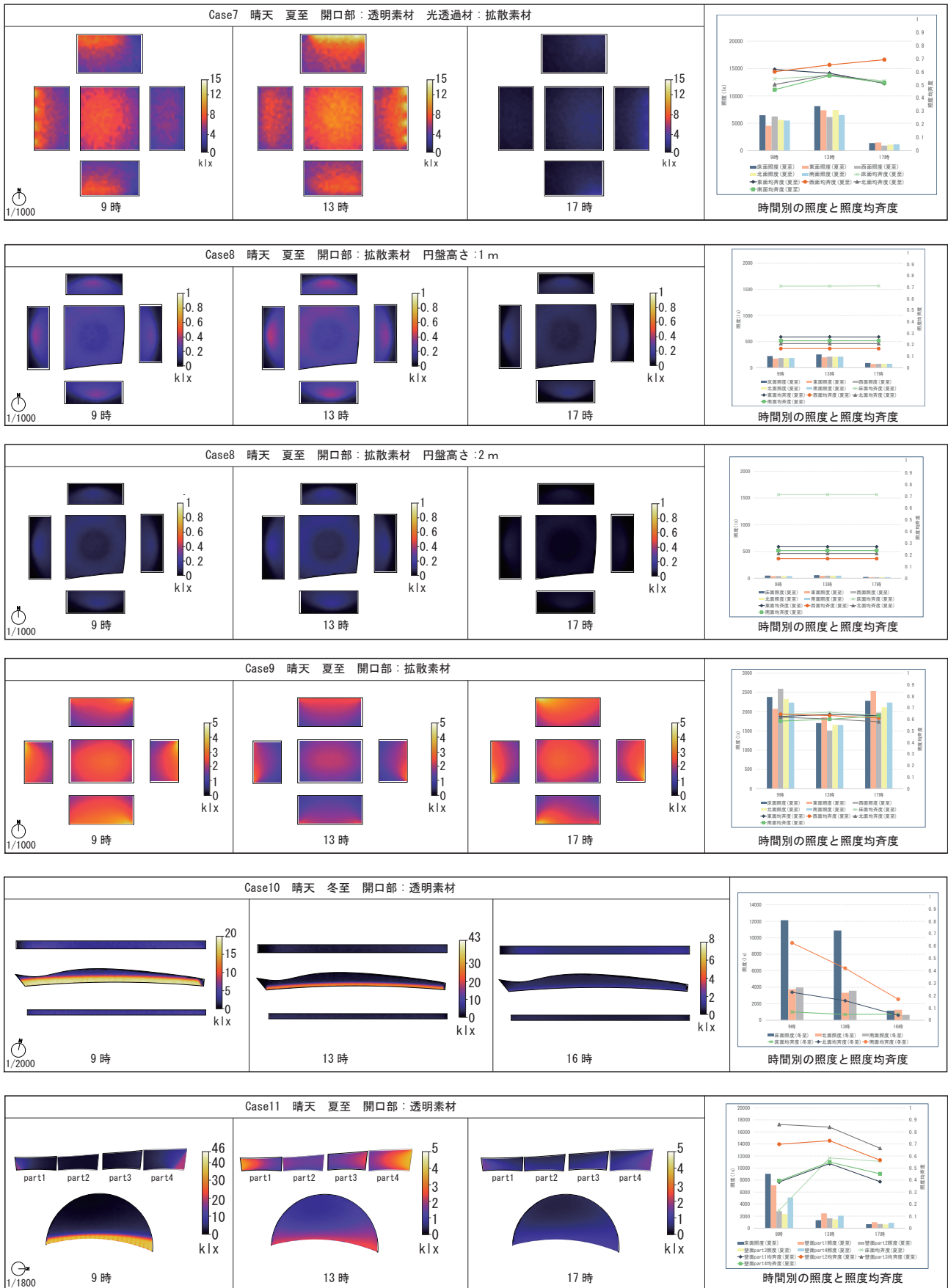


表14-2 季節・時間別の照度分布



により光をすべての面に拡散させることができ、均一で安定した光環境が得られる。曇天時においては、主に天空光による室内の各面照度は対応する展示品の推奨照度の近い範囲に抑えられたが、夕方等の一部時間帯では人工照明の使用が必要となる。一方、Case8 は採光を調整できる円盤(図10)が用いられているが、円盤の高さの変化による効果はほとんど見られなかった。また、屋根における開口部から光透過材を介して光を取り入れる事例(Case7)は上述の事例の特徴と類似し、夏や昼等の時期に空間全体の照度が高いが、光透過材に拡散素材を使用すれば、晴天時において各面の照度が推奨照度を若干上回った程度に大幅に抑えられ、均斉度も高められた。天井面における光透過材が空間全体を覆っており、かつ屋根と一定の距離があり展示壁に近い場合、光透過材の異なる部分に入射した直射日光の拡散状況が壁面に敏感に反映され、天候等の変化による光環境の不均一性が見られる。曇天時において、各面の照度は推奨照度の近い範囲に抑えられ、空間全体が非常に均質的な状態となっている。四面の壁にハイサイドライトを用いた(Case9)は、太陽高度が一定の範囲にある時の直射日光が室内に入りやすく、開口部に拡散素材を使用すれば、晴天時において各面の照度が一定的に推奨照度を上回るが、照度分布は均斉であり、安定した光環境が形成された。曇天時において各面の照度は推奨照度の近い範囲に抑えられた。以上の事例は太陽高度の高い時期または特定の高度の範囲にある時期に自然光が室内に入りやすいパターンであり、拡散素材を使用すれば、空間全体の照度と均斉度は向上しているが、夏期等の開館時の光環境にもっと注意を払うべきであると考えられる。

長方体のトップライトを用いた事例(Case3)と壁面の全面ガラスからサイドライトを取り入れる事例(Case11)は透明素材を使用する場合、晴天時の直射日光の変動による室内の明暗コントラストが大きく、高照度部分が開口部付近に集中され、彫刻品の展示に相応しい光環境が得られる。数万ルクスにも達する Case3 の高照度部分に比べ、Case11 は東向きで直射日光が当たる時間が少なく強度も低い場合、ある程度の保護が必要な彫刻品の展示に適していると考えられる。線形のトップライトが屋根の周縁に設置された事例(Case5)は透明素材を使用する場合、晴天時の直射日光がほぼ遮蔽され、太陽高度の高い時期における特定の角度にある一部の光しか室内に入れない。さらに、展示品は壁面の中部より下の位置に置かれたことで高照度エリアが回避され、照度計算値の視点から

も絵画の展示が可能な光環境が得られる。ローサイドライトを用いた事例(Case10)は透明素材を使用する場合、Case5 と対照的に、太陽高度の高い時の直射日光が遮蔽されることが多く、太陽高度の低い時の直射日光は室内に入りやすい。また、Case10 は南向きで両側の壁面が開口部に近いため、一部の時期では若干壁面の照度が推奨照度を上回った。開口部に可視光透過率の低い透明素材の使用が必要であると考えられる。以上の事例は展示品の状況を踏まえ、晴天時の直射日光を巧みに利用し、自然光による演出効果を楽しむパターンと言える。

鋸形のトップライトを用いた事例(Case2)は主に室内に天空光を取り入れ、照度分布の状況は開口部の素材や季節、時間帯による顕著な変化が見られなく、晴天時において各壁面の照度は推奨照度に近く、自然光の利用に逃向きである。モニター形のトップライトを用いた事例(Case4)は開口部に透明素材、その下に光拡散材を使用する場合(図11)、分散している開口部の下に1つまとまったエリアが多く照射されたが、周囲の壁面も含めて空間全体の照度が多量の季節や時期において低くなっており、自然光利用の効果はあまり見られない。以上の事例は季節や時間に関わらず、室内により安定した自然光を取り入れるパターンであると考えられる。一方、自然光に対する制限が強いため、曇天時や冬期等の場合において、人工照明を中心とした採光計画が必要となる。

## 5. 年間積算照度からみた美術館展示室の採光手法

4章では快晴や曇天といった理想的な天候条件で代表的な採光手法の光環境を考察したが、本章では、設計段階で展示物に対する損傷の大きなもう一つの影響要因とされた年間積算照度に着目し、各事例の実際の天候条件も考慮できる気象データを用いた年間昼光照明シミュレー

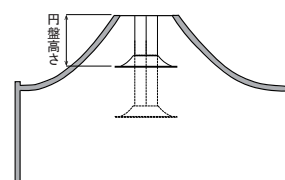


図10 Case8の円盤の高さの設定

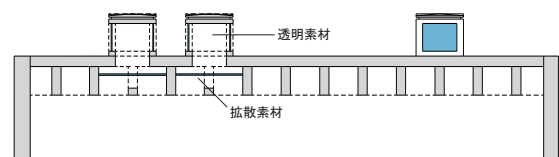


図11 Case4の透明素材 + 拡散素材の位置設定

ションによって、空間の照度分布、計算値、指定範囲の照度の出現時間、展示状況や気候特性等の面から、前章で抽出した 11 事例の光環境の特徴を考察する。

評価指標として、『CIE 157:2004』<sup>7)</sup>による展示品の年間積算照度の推奨値を用いる(表15)。それに加え、昼光の年間評価指標のうち、年間の在室時間に対して指定範囲の照度が達成できる時間の割合を評価する Useful Daylight Illuminance という指標があり、その考え方をい、各事例の床や壁面の理想的な照度範囲の出現時間も算出して考察を行う。なお、本研究では年間の在室時間以外に展示室の遮光が徹底されるという条件を想定した。

### 5.1. シミュレーションの概要

シミュレーション対象と方法は 4 章と同じで、天空モデルは各事例の位置に最も近い EPW 気象データ<sup>注16</sup>を用いた。その設定は表12に示す。照度範囲の設定について、4 章の推奨照度の範囲を参照し、それぞれ壁面の照度範囲を 200lx 以下、200-500lx、500lx 以上、床面の照度範囲を 500lx 以下、500-1000lx、1000lx 以上の 3 つの範囲を用いて計算した。また、年間の在室時間について、1 日の開館時間を 8 時間(9:00-17:00)とし、休館日を週 1 日および年末年始の 12 月 28 日-1 月 3 日に設定した。

### 5.2. シミュレーションの結果と考察

上記のシミュレーション条件に基づき、各事例の床・壁面の計算点の年間積算照度と年間の在室時間内に各照度範囲に達した時間の割合を算出してプロットした。以下は気候特性が類似する事例をまとめて考察結果を述べる(表 16-1, 16-2)。なお、気候特性の分析について、Climate Consultant<sup>注17</sup>を用いて各地域の日照量を分析するための図を作成した。

Case1, Case6 や Case7 において、開口部または天井面の光透過材に透明素材を使用する場合、各床と壁面の年間積算照度は数千キロルクスから数万キロルクスに及び、推奨値を大きく上回った。拡散素材を使用する場合、照度分布がより均一になり、計算値も大幅に抑えられたが、依然として推奨値をやや大きく超過している。これらの事例の各照度範囲に達成できる時間の割合を見ると、拡散素材を使用しても、床と壁面のほとんどの部分において、それぞれの照度が 1000lx 以上と 500lx 以上の時間は年間の在室時間の 75%以上を占めている。各種の展示品の推奨照度によれば、全体として理想的な展示条件を満たす可用時間はまだ少ない。分布特徴の形成要因について、これらの事例は採光手法による一定程度の日射遮蔽効果はあるが、開口部がやや大きく太陽高度の高い時の強い直

射日光が室内に入りやすいと推測される。また、晴天日が多く年間の全天日射量の多い松本市の近くに位置するため(図 12)、他の地域より多くの自然光が室内に入ると考えられる。

Case2 と Case5 において、開口部に透明素材を使用する場合、展示壁面の年間積算照度の分布がほぼ均斉である。絵画の展示位置の計算値について、Case2 は 500-1000klx・h の間に、Case5 は 300-600klx・h の間にあり、どちらも推奨値に近い。各照度範囲に達成できる時間の割合から見ると、Case2 の壁面において、大部分の計算点の 50%-70%の時間が 200-500lx の範囲にあり、500lx 以上の時間がほぼない。推奨照度を満たす可用時間が多く、自然光の利用に逃向きである。Case5 は展示位置の照度が 200lx 以下の時間は年間の在室時間の約 85%、200-500lx の間の時間は約 10%を占めており、理想的な展示条件を満たす可用時間が少ない。分布特徴の形成要因について、これらの事例は年間の全天日射量と天空日射量の多い名古屋市の近くに位置するため(図 13)、開口部が北面に向いている Case2 は他の地域より多くの天空光が室内に入ったと考えられる。Case5 は開口部が小さいため室内に入る天空光が少ない。さらに太陽高度の低い冬期では、名古屋の法線面直達日射量が他の月を上回る高い数値となっているが、Case5 においては太陽高度の低い時期の直射日光が遮蔽されやすい。この傾向も年間の照度の可用時間に影響を与えたと推測される。

Case3 において、開口部に透明素材を使用する場合、開口部の真下の床面の年間積算照度は集中的に分布され、その周囲および壁面が非常に低い照度値となっている。計算値について、展示室の床面の照度が高い点は 6000-8000klx・h の間で、周辺は 800-2000klx・h の間の点が多い。四周の壁面の点の照度値はほとんど 200-900klx・h の間にある。各照度範囲に達成できる時間の割合から見ると、床面において、開口部の下の部分は約 30-50%の時間が 1000lx 以上の範囲にあり、周縁の部分はほとんどの時間において 500lx 以下である。彫刻品(石等)の推奨照度(1000lx)を満たす可用時間がやや少ない。

表15 光に対する資料の応答度と推奨露光量<sup>7)</sup>

	材料分類	限界露光量 (lx・h/年)
応答度なし	金属、石、ガラス、陶磁器、琥珀、鉱物	無制限
低応答度	油彩画やテンペラ画、フレスコ画、未染色の皮革や木、角、骨象牙、ラッカー、プラスチック	600,000
中応答度	水彩画、パステル画、タペストリー、印刷物や素描、原稿、模型、ディスプレイ画、壁紙、グワッシュ画(不透明水彩画)、染めた皮革等	150,000
高応答度	絹、非常に変質しやすいと知られている色素、新聞	15,000

表16-1 床・壁面の年間積算照度分布と各照度範囲の時間割合の分布

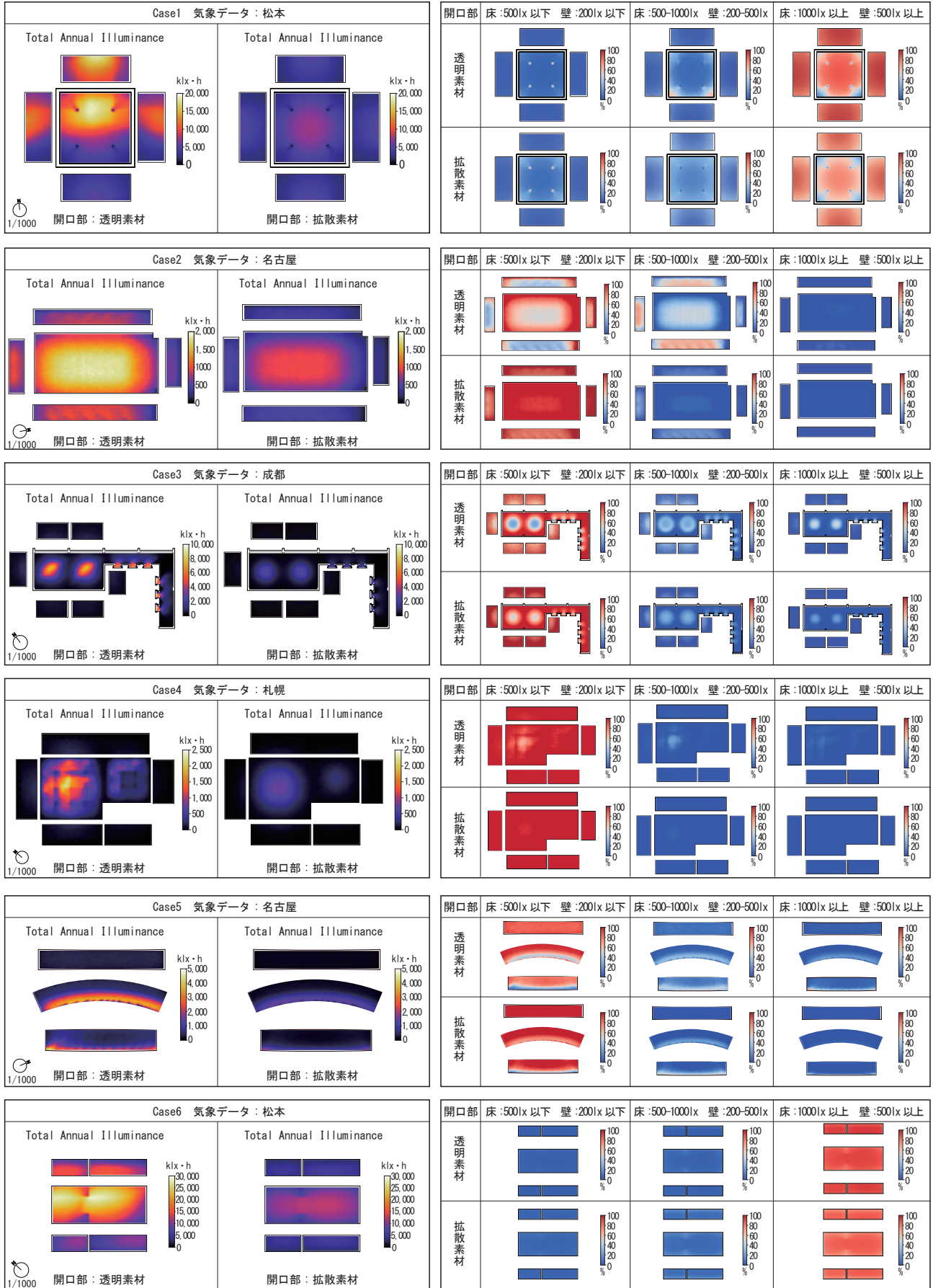
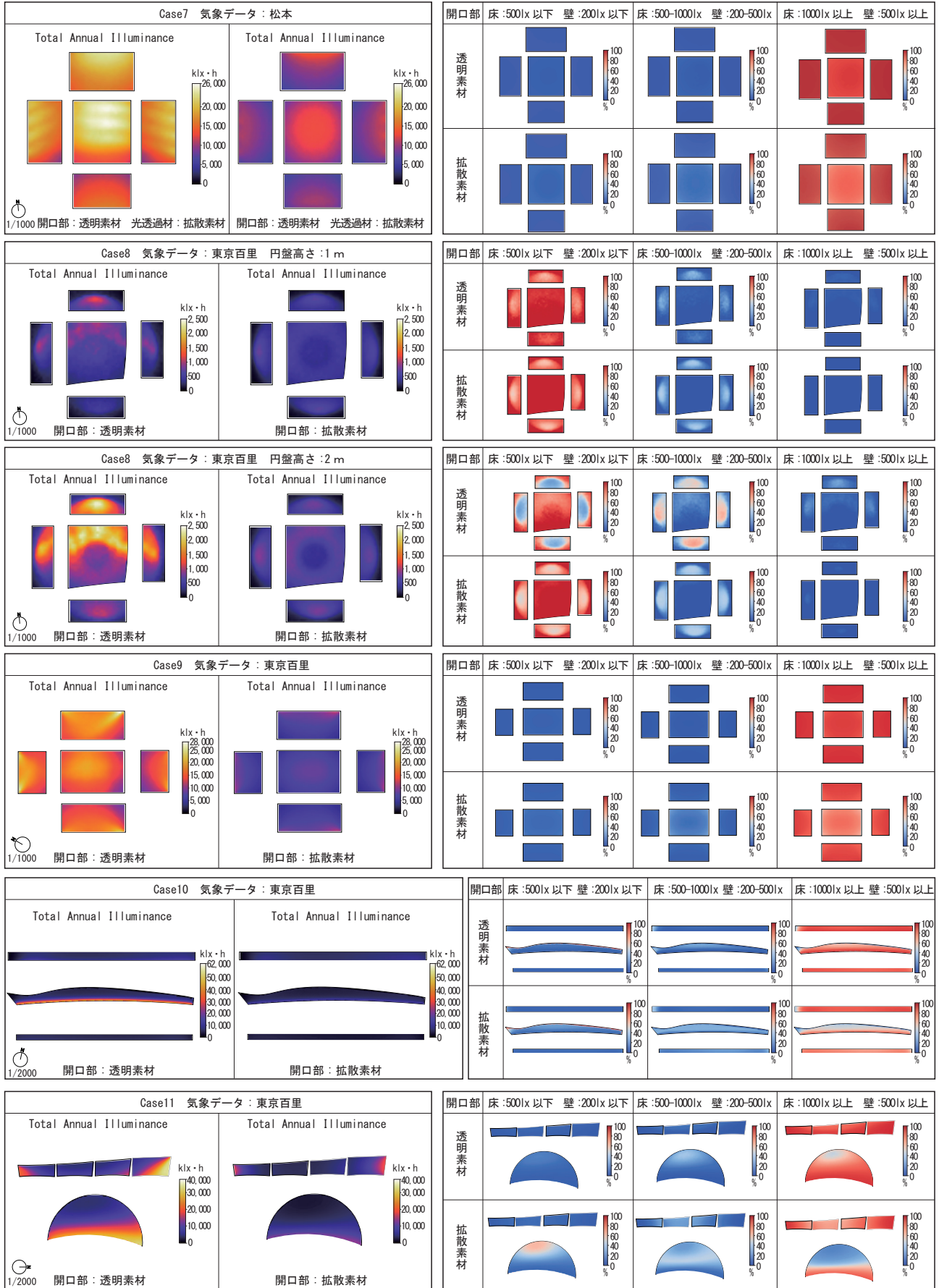


表16-2 床・壁面の年間積算照度分布と各照度範囲の時間割合の分布





分布特徴の形成要因について、天井からトップライトの突出部分が深いいため、直射日光は太陽高度の高い時のみ室内に入れる。また、Case3 に最も近い成都市の EPW データにおいて、ほとんどの月の水平面全日射量は 500Wh/m<sup>2</sup> を下回り、日射の少ない地域と思われる。それに加え、法線面直達日射量の数値も低く、ほとんどの時間帯において水平面天空日射量に抜かれた(図 14)。この傾向も直射日光が必要となる Case3 の年間の照度の可用時間に影響を与えたと推測される。

Case4 は開口部に透明素材、その下に光拡散材を使用する場合、分散している開口部の下に 1 つまとまった、周辺より年間積算照度のやや高いエリアが見られた。計算値について、そのエリアの点は 150-300klx・h の間にあり、その周囲は 100klx・h 以下である。壁面のほとんどの部分が 50klx・h 以下となっている。各照度範囲に達成できる時間の割合から見ると、開口部の透過特性に関わらず、床と壁面において、それぞれの照度が 500lx 以下と 200lx 以下の時間は年間の在室時間の 90%以上を占めており、自然光のみでは理想的な展示条件を満たす可用時間が非常に少ない。分布特徴の形成要因について、床面における

まとまったエリアは 4 つの開口部からの拡散光の重なり合いによる結果と考えられる。また、Case4 は年間を通じて天空日射量が多く、更に冬期の曇りや雪の日も多い北海道札幌市に位置することも(図 15)、その年間の照度の可用時間に影響を与えたと推測される。

Case8, Case9, Case10 や Case11 は気候特性よりも(図 16)、それぞれの採光手法による光環境への影響が大きい傾向が見られた。Case8 において調光用の円盤の高さ設定に関わらず、開口部に拡散素材を使用する場合、

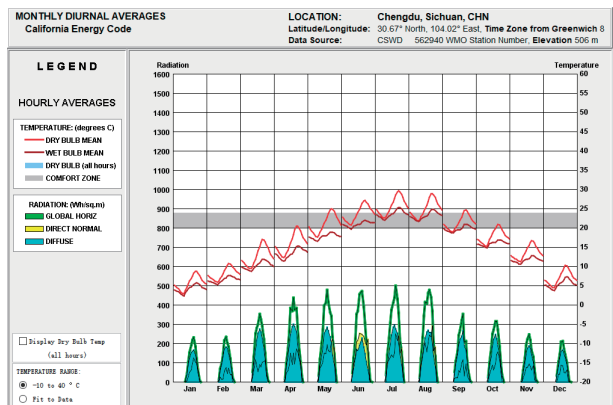


図14 成都の年間の水平面日射量の分布

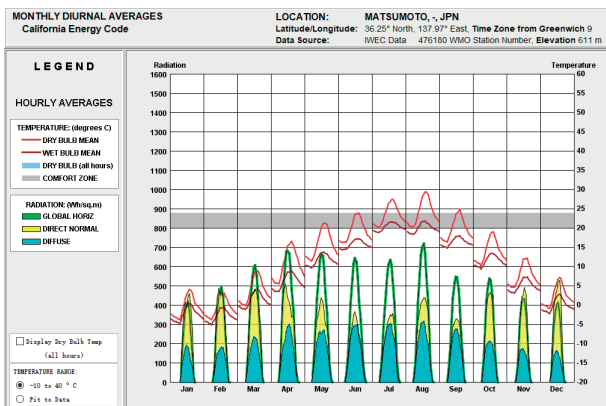


図12 松本の年間の水平面日射量の分布

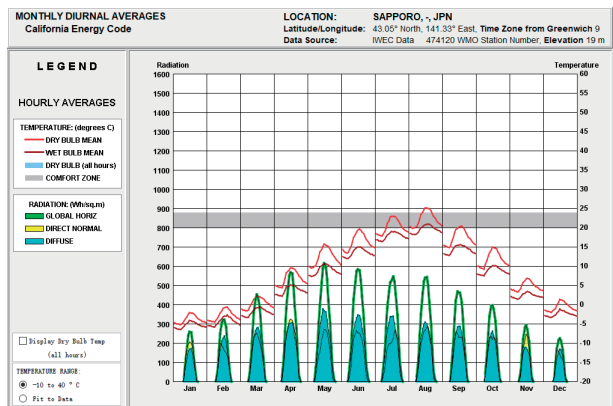


図15 札幌の年間の水平面日射量の分布

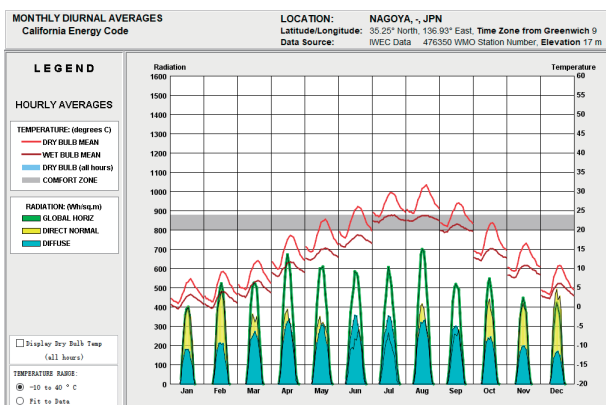


図13 名古屋の年間の水平面日射量の分布

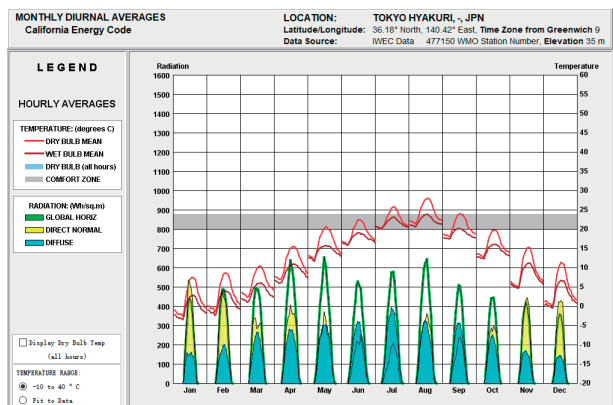


図16 東京の年間の水平面日射量の分布

照度分布が非常に均質になり、各壁面の多くの点は400-800klx・hの間にあり、推奨値の近い範囲にある。各照度範囲に達成できる時間の割合について、円盤の高さを1mから2mに変えると、各壁面の展示位置の照度が200-500lx以内に入る時間は年間の在室時間の20-40%から40%までに増加した。Case8は効果的な自然光利用が可能である。分布特徴の形成要因について、屋根が凸形で開口部が小さいため、太陽高度の高い時の一部直射日光しか室内に入れなく、その多くが開口部に近い円盤に反射されたと考えられる。Case9において、開口部に拡散素材を使用する場合、照度分布が比較的均斉であるが、床と壁面の多くの点は5000-8000klx・hの間にあり、推奨値を大きく超過した。各照度範囲に達成できる時間の割合を見ると、床と壁面の展示位置において、それぞれの照度が1000lx以上と500lx以上の時間は年間の在室時間の80%以上を占めており、全体として理想的な展示条件を満たす可用時間は少ない。分布特徴の形成要因について、年間の多くの方向からの直射日光が開口部に当たり、入射光の総量が多いと推測される。Case10とCase11は異なる開口部の大きさと方向から側光を取り入れたが、開口部に透明素材を使用する場合、床面において開口部付近の照度が非常に高く、奥に向かって漸減する傾向が見られる。壁面の大部分は比較的均斉である。計算値について、床も壁面も数千キロルクスから数万キロルクスに及び、推奨値を大きく上回った。各照度範囲に達成できる時間の割合を見ると、Case10では壁面の全体として理想的な展示条件を満たす可用時間は少ないが、Case11では床面の多くの部分は彫刻品(石等)の推奨照度(1000lx)を満たす可用時間が多い。分布特徴の形成要因について、Case10は南向きで、室内に取り込まれた光の量が多い。また壁面が開口部に近いため、多くの反射光を受けたと推測される。Case11は東向きで午前以外の強い直射日光が入りにくい、全面ガラスを用いたため、天空光を含め年間で室内に取り込まれた光の量が多いと推測される。Case9、Case10やCase11は自然光と風景を楽しむ観点から、開口部に透明フィルムの使用等の空間全体の照度を低減する方法が効果的であると考えられる。

## 6. 設計背景からみた採光手法の効果

4章と5章では、主に物理的環境の側面から各採光手法による光環境の特徴及びその形成要因を考察したが、実際の設計過程において採光手法の選定は多くの要因に影響される。本章では、『新建築』等の建築雑誌や美術館の

公式サイトより採光手法に関わる設計背景の記述を参照し、設計上の意図的要因とシミュレーションの結果が結びつけられる事例に対して採光手法の効果を考察する。

Case1とCase6のハラミュージアムアークは、東京における現代美術専門館の「原美術館」の夏期分館として群馬県山麓に建てられ、1988年に開館した。敷地内の牧場は観光用で、夏には野外コンサートが行われる。年間を通して主に4月から11月の間に利用が可能である。建築の特徴としては、建物の中央部にピラミッド形のトップライトを用いた正方形のギャラリーがあり、その左右に2つの線形のトップライトを用いた長方形のギャラリーが線形に配置された。また、採光はすべてトップライトを用いた理由は、展示空間を最大限に確保するためである。シミュレーション結果から見ると(表14-1, 16-1, Case1)、両展示室の開口部は中央上部にあり、太陽高度が高い時には直射日光が入りやすいため、太陽高度が比較的高い4月から11月の間において、開口部に拡散素材を使用しても各面が推奨照度を一定的に超える傾向が見られる。気象特性について、Case1とCase6は特に夏期の水平面全天日射量が多い地域に位置するため、空間の上部に開口部を意図的に設置する場合、夏期の開館に休館日を増やしたり、開口部の大きさを小さくしたりすることによって、自然光をもっと効果的に利用できると考えられる。

Case2の一宮市三岸節子記念美術館は愛知県一宮市に建てられ、1998年に開館した美術館である。建築の特徴としては、鋸屋根を特徴とした繊維工場という一宮市の産業景観と呼応し、常設展示室は北向きの鋸形のトップライトを用いた。シミュレーション結果から見ると(表14-1, 16-1, Case2)、鋸屋根は光の取り入れる方向を限定できるため、天空光しか室内に入れなく、各面が推奨照度の範囲に近い。この事例において、意匠設計とシミュレーション結果がうまく対応していると考えられる。

Case3のLuyeyuan Sculpture Art Museumは中国四川省成都市の郊外に建てられ、2002年に開館した石の彫刻を中心に展示を行う美術館である。建築の採光は主に隙間から差し込む光、トップライト、壁面の反射光の3つの手法を用い、それらの共通点は非日常を表現することという。また、採光手法の意図について、設計者自身は直接言及していないが、他の研究者の論述によれば、美術館の設計者は成都市の天空光が多いという気候特性を十分に考慮した上、室内と室外の明暗差によってこの明るくない光を際立たせるため、隙間からさし込む光という採光手法を好むのではないかと<sup>8)</sup>。シミュレーション結

果から見ると(表 14-1, 16-1, Case3), Case3 は天井からトプライトの突出部分が深いため, 年間を通して多くの光が開口部の下の小範囲に集中され, 開口部付近の明暗差が大きい特徴が見られた。このシミュレーション結果は明暗差によって光を強調するという設計者の傾向と一致し, 設計意図が達成されたと言えよう。

Case5 の織田廣喜ミュージアムは滋賀県の農業公園の池畔に建てられ, 1998 年に開館した美術館である。建築の特徴としては, 一層の建物における展示室の採光は天井における円弧状のトプライトのみで, 人工照明を一切使わず, 日没とともに閉館する。設計意図について, 設計者の論述によれば, 時間とともに変化する自然光は「生きた環境」を提供し, 画家の当時の制作環境と同じ光の環境に観客を置くことができるという<sup>9)</sup>。シミュレーション結果から見ると(表 14-1, 16-1, Case5), Case5 の展示品は東と西壁面の中部より下の位置に置かれたことで, 高照度エリアが巧みに回避された。また, 東壁面は季節や時間帯によって照度の変動が大きく, 「生きた環境」を提供するという設計意図も達成されたが, 年間を通じて室内がやや暗くなっている時間が多いため, 開口部の可視光線透過率をもっと向上させる必要がある。

Case7 の金沢 21 世紀美術館は石川県金沢市内の中心部に建てられ, 2004 年に開館した美術館である。展示室の多くは, 「トプライト方式のガラス天井になっていて, 展示室の中で作品を見ている時も自然光によって外の光の変化が感じられる」<sup>10)</sup>という。また, 設計当時の設計者の言論によれば<sup>11)</sup>, 現代美術は近代美術より展示空間の全体の均質性と極端的な照度の変化が求められるという。シミュレーション結果から見ると(表 14-2, 16-2, Case7), ガラス天井が拡散素材を使用する場合, 時刻の変化によって, 均一な照度分布にも微妙な違いが見られる。床面と壁面の平均照度および照度均斉度の差は小さく, 空間全体が均質になっている。更に屋根の開口部とガラス天井の間にブラインドが設けられたため, 室内の極端な明暗の変化も実現できる。以上より, 設計意図はシミュレーションの結果と一致し, うまく実現されたと考えられる。

Case9 の N's YARD は那須連山の麓の森に建てられ, 2018 年に開館した現代美術を中心に展示を行う美術館である。建築の特徴としては, 5 つのプロポーシオンや光の取り入れ方が異なる展示室が連続的に配置され, シークエンスを楽しめる展示空間が意図された。本研究で取り上げたハイサイドライトを用いた展示室について, 設計者が「屋外にいるような明るい空間」<sup>12)</sup>を求めた。シミュレ-

ーション結果から見ると(表 14-2, 16-2, Case9), 太陽高度が一定の角度範囲にある時, 直射日光が室内に入りやすい, かつ年間の多くの方向からの直射日光が開口部に当たり, 入射光の総量が多いため, 開口部に透明または拡散素材を使用しても各面が推奨照度を大きく上回る傾向が見られ, 一年中明るい空間である。この傾向は設計者の意図とほぼ一致している。そこで, この事例において, シミュレーション結果は推奨照度を満たしていないが, 設計者の意図がうまく実現されたと考えられる。

## 7. まとめ

近年では, 省エネルギー等の観点から, 昼光利用に関する研究は光・視環境及び熱環境等の分野で盛んに行われている。その中, 特にオフィスや学校等の設計プランが把握しやすい施設を対象とした研究が散見された。一方, 従来から光環境は重要とされるが, 展示品によって異なる光環境の需要や建築家及び芸術家の主張に影響されやすい等の特徴を持ち, 即ち些か特殊解としての美術館のような展示施設を対象に, シミュレーションによって展示環境を定量的・系統的に検討するものは少なく, 関連する評価指標や基準値の検討も十分とは思えない。昼光利用分野が著しく進化しつつある今, その技術や指標等を用いた定量的な検討は, 美術館の自然光利用に可能性を示し, 今後の新たな評価基準の確立にも繋がるであろう。本研究はその第一歩として, 現代美術館の展示室における自然光利用に着目し, 「多変量解析による採光手法の類型化」, 「各天候条件における照度の瞬時値」, 「気象データによる年間積算照度」, 「設計背景からみた採光手法の効果」という各種の主題を通して, 採光手法の全体像を整理・把握した上, 定量的なシミュレーション結果によって代表的な採光手法を用いた事例の光環境を詳細に考察した。

その結果, 「多変量解析による採光手法の類型化」においてトプライトを用いた常設展示室の採光手法を 5 つのクラスターに分類し, 従来の分類結果に類似する天井面における点状, 線状や全面的な開口部の配置を特徴としたもの以外に, 光と空間の関係が弱まったものや採光手法と展示品の対応関係が強調されるもの等の独特な特徴を持つクラスターも見られた。企画展示室の結果は常設展示室に類似している。また, サンプルスコアの散布図における対象の分布から, 彫刻等の立体展示品に対して光を局部に集中させる傾向や開口部の局部配置は空間の秩序性を生み出しやすい等といった採光手法の全体像の特徴を見出した。

「各天候条件における照度の瞬時値」と「気象データによる年間積算照度」において、多面的な視点から個別の代表事例の自然光利用の可能性を考察した。ピラミッド形のトップライトを用いた事例(Case1)、線形のトップライトを用いた事例(Case6)や屋根における開口部から光透過材を介して光を取り入れる事例(Case7)について、開口部が空間の上部の中央付近に位置し、開口部(光透過材)に拡散素材の使用により、均一で安定した光環境が得られる。一方、これらの事例は太陽高度の高い時期に自然光が室内に入りやすく、かつ年間の全天日射量の多い地域に位置する等の要因に影響されたため、拡散素材を使用しても各面の照度瞬時値と年間積算照度の計算値が推奨値をやや大きく超過し、年間の理想的な展示条件を満たす可用時間も少なく、空間演出と美術品の鑑賞を両立させることを目指した自然光利用の可能性が低いと言える。今後、以上のような採光手法を使用するには、開口率や光透過率の調整、日射遮蔽装置の使用などの措置が考えられる。凸形のトップライトを用いた事例(Case8)の自然光利用は上述の事例の特徴と類似しているが、開口部が小さくかつ調光板が設置されたため、各面の照度計算値が推奨値の近い範囲にある。調光板の高さの調整は年間の可用時間への顕著な改善効果も見られ、Case8の採光手法は効果的な自然光利用が可能である。四面の壁にハイサイドライトを用いた(Case9)は、太陽高度が一定の範囲にある時の自然光が室内に入りやすく、開口部に拡散素材を使用すれば、晴天時において各面の照度が一定的に推奨照度を上回るが、照度分布は均斉であり、安定した光環境が形成された。年間の多くの方向からの直射日光が開口部に当たるため、各面が理想的な照度範囲を上回る時間も多く、美術品保護の観点から、この採光手法の自然光利用には他の遮光措置が必要となる。

線形のトップライトが屋根の周縁に設置された事例(Case5)は透明素材を使用する場合、太陽高度の高い時期における一部の光しか室内に入れなく、展示品の位置は高照度エリアを回避し、各面の照度計算値が推奨値の近い範囲にある。一方、開口部の大きさや地域の気候特性等の影響で、年間の多くの時間において空間全体が暗くなっている。ローサイドライトを用いた事例(Case10)は南向きで両側の壁面に近いため、透過特性に関わらず、各面の照度計算値が推奨照度をやや大きく超過し、理想的な照度範囲を上回る時間も多し。これらの事例は美術品鑑賞の視点から自然光利用の可能性は低い、今後、これ

らの採光手法を使用するには、開口率や光透過率の調整などの措置が考えられる。長方体のトップライトを用いた事例(Case3)と壁面の全面ガラスからサイドライトを取り入れる事例(Case11)は透明素材を使用する場合、晴天時の直射日光の変動による室内の明暗コントラストが大きく、高照度部分が開口部付近に集中され、彫刻品の展示に相応しい光環境が得られる。数万ルクスにも達するCase3の高照度部分に比べ、Case11は東向きで直射日光が当たる時間が少なく強度も低いため、ある程度の保護が必要な彫刻品の展示に適していると考えられる。

鋸形のトップライトを用いた事例(Case2)は特定の方向から採光できる手法で、透明素材を使用する場合、適切な照度計算値や均一な照度分布が得られる。また、Case2は主に天空光を取り入れ、かつ天空日射量が多い地域に位置するため、年間の理想的な展示条件を満たす可用時間も長く、自然光の利用に逃向きである。モニター形のトップライトを用いた事例(Case4)は開口部に透明素材、その下に光拡散材を使用する場合、分散している開口部の下に1つまとまったエリアが多く照射されたが、周囲の壁面も含めて空間全体の照度が多く季節や時期において低くなっており、年間から見ても理想的な照度範囲を下回る時間が多く、自然光利用の効果はあまり見られない。これらの採光手法は季節や時間に関わらず、室内に安定した自然光を取り入れられる。

「設計背景からみた採光手法の効果」において、Case2、Case3やCase7の地域の景観、気候特性や展示品の特徴を考慮した設計意図とシミュレーション結果が概ね一致し、採光手法は光環境の形成に良好な効果をもたらした。Case1とCase6について、空間の上部に開口部を意図的に設置する場合、開館時間の調整等の方法によって自然光をより効果的に利用できる。また、Case5とCase9のような事例から見出した、採光手法の特徴等の要素を考慮した上、独自の設計意図を実現するため、敢えて採光手法を活用するという建築家の傾向がシミュレーションの結果によって検証された。

なお、本論文は日本建築学会九州支部研究報告に発表したデータ<sup>16)</sup>を大幅に再構築し、新たなシミュレーションと考察を加えてまとめ直したものである。

## 注

- 注1 参考文献13)の中で、「採光」は昼光を光源とする照明をいう。また、「採光設計」について、「昼間の自然光を用い、見るものをはっきり見せ、不快感や疲労感を起こさせないような快適な光環境をつくり出す設計手法。」と記されている。以上の定義を踏まえ、本研究での「採光手法」は「採光設計」に近い意味合いをとり、自然光を活用する設計手法という広範な意味とする。
- 注2 参考文献14)において、小泉らは大量の実例を観察し空間秩序的な光効果とそれらの要因を定性的に体系化した。今後について「要素を抽象した模型やコンピュータシミュレーション等による評価実験より、効果の強弱とその要因の定量的な関係を探る事によってより実用性の高い資料に発展すると思う」と述べている。
- 注3 <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/>。(参照2021-08-15)
- 注4 <https://github.com/majian2/Museum-cases.git>。(参照2021-08-15)
- 注5 参考文献14)において小泉らは「空間秩序的な光効果とは、物によって既にある空間秩序を光が強調したり、新たに光が空間秩序を作り出す場合の効果を目指す」と述べ本研究ではこの定義を踏襲する。
- 注6 参考文献3)において、内藤らは「最も典型的な展示空間といえる天井全体に配置されたトップライトによる長方形の展示室へ採光するパターンを『原形』とし…」と述べ、「直方体の天井全体から採光する展示空間」を典型的な展示空間とした。
- 注7 軸線光について、参考文献15)において、小泉らは「空間形態がそのプロポーションによって方向性をもつ場合、その空間形態軸上の(位置)、空間全体を貫く線的な光(形態)が、空間の軸線を可視化し、空間の方向性を高めるタイプである」と述べた。
- 注8 天井の開口部配置が「格子」状になっている事例の詳細資料は、第3章の雑誌では見つけることができなかった。インターネットおよび現地調査を通じ、Case2を選定し、資料を収集した。
- 注9 内部仕上げ材料の設定反射率について、各展示室の仕上げ材と色彩を考慮した上で、関連資料による仕上げ材反射率の平均値を用い、適切な設定を行った。地物の反射率は一般的な値として20%とする。各展示室の設定反射率は注4のウェブサイトに公開した。
- 注10 Radianceはアメリカのローレンス・パークレー研究所によって開発された計算精度の高い照明シミュレーションプログラムであり、世界中の多くの研究者に使用されている。Radianceの計算パラメータの設定値は注4のウェブサイトに公開している。
- 注11 A. McNeil, E. S. Lee: A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems, *Journal of Building Performance Simulation*, Volume 6, Issue 1, p24-37, 2013. 当該研究は three-phase method で計算した年間照度と実測値との比較を行った結果、「absolute mean bias errorは13%以下, root mean square errorは23%以下」と結論している。
- 注12 双方向散乱分布関数 BSDF (bidirectional scattering distribution function) は、物体表面で異なる方向に散乱する光を計算するために使用されるモデルである。
- 注13 Three-phase method はアメリカのローレンス・パークレー研究所 (LBNL) が提案した一連のマトリックスに基づく動的シミュレーション方法の中の1つであり、光の伝達を、①開口部の外側への直射日光・天空光、②開口部の透過部分、③開口部から内部空間への伝達部分の3つの phase の計算に分け、それぞれの段階の計算結果をマトリックスで掛け合わせることで、指定した平面の照度や輝度を計算する方法である。
- 注14 Radiance の genBSDF コマンドは光線追跡法によりユーザが指定した素材の BSDF データを生成することができる。
- 注15 Python はインタプリタ型、オブジェクト指向、動的型付けの高レベルプログラミング言語である。その描画ライブラリである

Matplotlib を用い、各種データの可視化が可能である。

- 注16 気象データはEnergyPlusの公式ホームページから取得できるEPWデータを用いた。
- 注17 Climate Consultant は、UCLA (University of California) によって開発され、EPW 気象データを読み込み、当該地域の気候特性を詳細に分析できるツールである。
- 注18 図の出典は以下に示す。No. 53: 『GA Document 55』 No. 31: 『新建築』 No. 27: 『新建築』 No. 42: 『GA Document 19』 No. 30: 『新建築』 No. 40: 『GA Museum 01』。
- 注19 図の出典は以下に示す。No. 1: 『新建築』 No. 17: 美術館の公式サイト No. 22: 『GA Museum 01』 No. 18: 『新建築』 No. 20: 『新建築』。No. 9: 『新建築』。
- 注20 図の出典は以下に示す。Case1: 美術館の公式サイト Case2: 美術館の提供 Case3: JIAKUN ARCHITECTS の公式サイト Case4: 『新建築』 Case5: 『新建築』 Case6: 『新建築』 Case8: 『新建築』 Case9: 美術館の公式サイト Case10: 美術館の公式サイト Case11: 『新建築』。また、Case7 について、詳細図面は雑誌で見つけたが、適切な内観写真は収集できなかった。

## 参考文献

- 1) 中村洋, 沖允人: 美術館における展示照度の連続測定(国立西洋美術館本館の展示照度と累積光量), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), p479-480, 1987
- 2) 加藤詠大, 眞鍋恒博, 菊池孝司: 展示空間における自然採光の構法に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), p697-698, 1999
- 3) 内藤誠人, 鈴木春奈, 村田寛, 安田幸一: 現代美術館におけるトップライトによる展示室への採光手法の形態的特徴, 日本建築学会計画系論文集, 第79巻, 第701号, p1553-1560, 2014
- 4) 馬健, 井上朝雄: 年間昼光照明シミュレーションによる美術館展示室の採光手法に関する考察, 芸術工学会誌, 第82号, p62-69, 2021
- 5) 宮森結季子, 井上朝雄, 林裕昌: 美術館の展示室におけるトップライトの構成に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第58号, p169-172, 2019
- 6) 田崎敏士, 二瓶士門, 佐藤慎也: 美術館の展示室における光環境に関する研究: コンピュータシミュレーションによる採光手法の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p81-82, 2015
- 7) CIE: Control of damage to museum objects by optical radiation, CIE 157:2004
- 8) 鐘文凱: Grey Sky Second & Third Phases of Mrgadava Museum of Stone Sculpture and A Reinterpretation of LIU Jia-kun's Built Projects: Time + architecture, p99, 2006
- 9) 安藤忠雄: 安藤忠雄の美術館・博物館, 美術出版社, p65, 2001
- 10) 『新建築』, 新建築社, 2004年11月, p79
- 11) 青木淳, 妹島和世, 西沢立衛: 「青森県立美術館」と「金沢21世紀美術館」を語る, 新建築社, 新建築2001年7月, p56-69
- 12) 『新建築』, 新建築社, 2019年1月, p185
- 13) 『建築大辞典』, 彰国社, 1993
- 14) 小泉隆, 鈴木信宏: 建築空間における空間秩序的太陽光効果とそれらの要因, 日本建築学会計画系論文集, 第516号, p153-160, 1999
- 15) 小泉隆, 桶師徳行, 鈴木信宏: 自然光の構成とその知覚状態からみた建築空間におけるまとまりと方向性を与える自然光タイプ, 日本建築学会計画系論文集, 第482号, p95-103, 1996
- 16) 馬健, 井上朝雄, 鄭睿ブン: 多変量解析によるトップライトを用いた美術館展示室の採光手法の類型分析, 日本建築学会九州支部研究報告, 第60号, p73-76, 2021