

修士論文2013年度(平成25年度)

建築空間の高精度な光環境シミュレーションによる 自然光を用いたデザイン手法に関する研究

-近代教会建築のCG画像に対する心理的印象の分析-

A Study on Design Method Using Nature Light by the Accurate
Simulation of Light Environment in Architectural Space

: Analysis of the Psychological Impression on CG Images of
Modern Church Architecture

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance Keio University

安ソージュン
Suhjune Ahn

修士論文 建築空間の高精度な光環境シミュレーションによる自然光を用いたデザイン手法に関する研究―近代教会建築のCG画像に対する心理的印象の分析― 安ソージユン

修士論文2013年度(平成25年度)

建築空間の高精度な光環境シミュレーションによる自然光を用いた デザイン手法に関する研究

-近代教会建築のCG画像に対する心理的印象の分析-

論文要旨

自然光が与える建築および建築空間への影響は大きく、建築にとって光とは変えられない重要な要素である。この重要な要素の自然光をうまく使えることができれば、人に与える印象にも大きな影響を与える建築を設計可能になると考える。そこで本研究では建築を変化する光による現象と解釈し、自然光の変化による建築や建築空間への影響とその関係を明らかにする。また、変化する光の現象における印象の変化傾向を調べ、光の現象の心理的効果の比較分析および考察を行う。

研究方法として、自然採光および心理的作用が重視される用途である教会建築、特に装飾性の少ない近代建築の教会空間を対象とした、画像による光環境シミュレーションと自然光の変化に対する考察を行う。光の効果を意図として設計された20世紀の教会建築の名作3つ(ロンシャン礼拝堂、光の教会、カプチーナス礼拝堂)を選択し、再現方法が最も現実の光に近いMaxwell RendererでCGレンダリング画像シミュレーションを行い、建築空間にあたる自然光の変化の比較分析を行う。自然光の変化を分析するためには、一日の太陽高度変化や季節による変化、地球の経度、緯度による自然光の変化、天候による変化をパラメーターとして設定し、レンダリングを行う。このとき、建築空間における自然光には壁やものに当たって反射する間接光があることも考慮し、画像の角度から見えない物体はすべてモデリングして精確に再現を行う。そして、変化する自然光の建築空間における心理的効果を、アンケート調査による印象変化の傾向分析でもって明らかにしていく。これらの発見は、設計手法の研究の一環として位置づける。自然光と建築空間の関係を明らかにすることで、単に意匠的な意味で自然光を取り入れるのではなく、心理的な効果を意図とした人間にとって豊かな空間環境になるデザインへと発展する事を期待する。

キーワード

1.Maxwell Renderer 2.建築レンダリング 3.教会 4.自然光 5.建築空間

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

安ソージュン

A Study on Design Method Using Nature Light by the Accurate Simulation of Light Environment in Architectural Space

: Analysis of the Psychological Impression on CG Images of Modern Church Architecture

Summary

The effects of natural lighting in an architecture or space are extensive, making light an inevitable element in architecture. If lighting is used effectively, improvements on psychological effects of architecture become possible. This thesis will interpret architecture as a part of the lighting phenomenon and will clarify the effects on architecture via changes to natural lighting. Also, this thesis will investigate the changes upon phenomenon of light and discuss the comparison analysis on the psychological effects.

Upon study, church architectures are the subject for study, for its use of natural lighting and the importance of the spatial interpretation. It is also essential for architectural form to directly effect the lighting phenomenon, choosing 3 modern architecture churches (Ronchamp Chapel, Church of Light, Capuchinas Chapel) for study. Simulation with rendering images is used to analyze effects of lighting changes. The study uses most accurate representation of light in a CG rendering software, Maxwell, and will simulate the effects of natural light in architectural space. To study changes in natural light, changes on sun's altitude, seasons, latitudes and longitudes, and weather are made upon rendering. Here, it is important to accurately represent indirect lights and model every object interacting in the scene, even if not visually seen. Then, a study on psychological effects of natural light in architecture was done by an impression survey, analyzing the tendencies of the impression ratings. These discoveries are a part of the study on the design method. By clarifying relationships of natural lighting and architecture, the psychological intentions can be a part of the design, making a rich spatial environment for humans.

Keywords:

1. Maxwell Renderer 2. Architecture Rendering 3. Church 4. Natural Lighting
5. Architectural Space

目次

1	1. 序論
2	1.1. 研究の背景
2	1.1.1. 光の現象としての建築の見方
2	1.1.2. 自然光の現象
2-3	1.1.3. 変化する自然光の現象
3	1.1.4. 光の現象の心理的印象
4	1.2. 研究の目的
4	1.3. 研究の意義
4	1.4. 研究の方法
5	1.4.1. 変化する自然光の扱い方
6	1.4.2. CG画像シミュレーションの質
6	1.4.3. 分析対象空間選定
7	1.4.4. 神秘的空間印象分析
7	1.5. 既往研究
8	1.6. 研究の構成
9	2. 自然光の効果と光環境シミュレーション
10	2.1. 自然光の原理
10	2.2. 自然光の効果
10	2.2.1. 心理的效果
11	2.2.2. 視覚情動的効果
12	2.3. 光環境シミュレーション(Maxwell Renderer)
12	2.3.1. Maxwell Renderの性質
13	2.3.2. 光再現アルゴリズム
13	2.3.2.1. Ray Tracing
13	2.3.2.2. Ray Casting Algorithm
14	2.3.2.3. Ray Casting起源と種類
15-16	2.3.2.4. Metropolis Light Tracing
17	2.3.2.5. 他のレンダリング法
18	2.3.2.6. 他のレンダリング法と比べた利点

19	3.3 次元モデルによる再現手法
20	3.1. プログラム選定
20	3.2. 間接光の影響
20	3.2.1. 直接光の影響
21	3.2.2. 間接光の影響
22	4. 分析対象空間選定
23-24	4.1. 分析対象空間選定方針
25	4.2. 選定建築
25-28	4.2.1. ロンシャン礼拝堂 ル・コルビュジェ
29-32	4.2.2. 光の教会 安藤忠雄
33-36	4.2.3. カプチーナス礼拝堂 ルイス・バラガン
37	5. 3Dモデルのレンダリングデータでの実験
38	5.1. ロンシャン礼拝堂
39-41	5.1.1. 1日による変化データ
42-49	5.1.2. 季節による変化データ
50-51	5.1.3. 天気による変化データ
52-53	5.1.4. 場所による変化データ
54	5.2. 光の教会
55-57	5.2.1. 1日による変化データ
58-66	5.2.2. 季節による変化データ
67-68	5.2.3. 天気による変化データ
69-70	5.2.4. 場所による変化データ
71	5.3. カプチーナス礼拝堂
72-74	5.3.1. 1日による変化データ
75-83	5.3.2. 季節による変化データ
84-85	5.3.3. 天気による変化データ
86-87	5.3.4. 場所による変化データ

88	6. レンダリング画像によるアンケート調査分析
89	6.1. アンケート調査方法
89	6.1.1. アンケートの画像選定
89	6.1.2. アンケートの質問選定
89	6.1.3. アンケートの調査実施
90	6.2. アンケート回答の分析
90-92	6.2.1. 文献による印象調査との比較
93-94	6.2.2. 回答の一致に対する考察
95	6.3. アンケート結果の分析
95-97	6.3.1. 時間の変化で現れた印象の変化の考察
98	6.3.2. 天気の変化で現れた印象の変化の考察
99	6.3.3. 季節の変化で現れた印象の変化の考察
100	6.3.4. 場所の変化で現れた印象の変化の考察
101-102	6.3.5. まとめ
103	7. 結論
104	7.1. 総括
104	7.2. 展望
105-107	参考文献

序論
第1章

1.1.研究の背景

1.1.1.光の現象としての建築の見方

「建築は光で作られた造形物だ」ール・コルビュジエ
「構造物は光の中のデザインだ」ルイス・カーン

ル・コルビュジエ、ルイス・カーンと言った近代建築の巨匠達が語るように、建築を物質として捉えるのではなく、光の現象で創られるという見方がある。当たり前だが、建築にとって光とは変えられない重要な要素である。光がなければ建築を視覚的に認知する事もできなければ、その印象を記憶として残すこともできない。数多くの建築家達はその光の要素を重要視して、デザインの意図として光の現象を工夫している。特に巨匠と呼ばれるル・コルビュジエ、ルイス・バラガン、アルバロ・シザといった建築家達のデザインには、光の現象を強く意識して空間を表現しているとの見方が出来る。

1.1.2.自然光の現象

光の現象の中でも特に建築設計の前提条件になるのが、自然光の条件である。建築を設計する際には、その立地する場所や光の条件によって採光を工夫したり自然のエネルギーを最大限に活用しようとする。自然光の特徴には可変性と制御不能性があげられ、これらの人間にはコントロール出来ない条件を、窓の位置を変えたりや素材を変えたりして建築で工夫する、と言ったプロセスが見られる。しかしここまで自然光を駆使する理由はなんだろうか。極端な話では、建築の設計で自然光を完全に遮断し人工光の中で生活する事も不可能ではない。それを実行しないのには、人間と生態的な関わりがあるからだろうと考えられる。特に人間の身体リズムと自然光の変化には密接な関係がある。人間は生活の中で自然光の変化を敏感にとらえ、必然的に1日のリズムをつくり上げる。本能的に、一日の活動が夕方から始まるという人はいないだろう。太陽の光で目が覚め、暗くなると自然に眠くなるといった本能的な理由で、自然光の役割と大きく関係しているからではないだろうか。この様に、建築空間は自然光の現象と切っても切れない関係にあり、その必然性を前提としてこの研究を進めていく事とする。

1.1.3.変化する自然光の現象

また、時間軸が自然光の現象に与える影響は大きく、自然光の現象でも変化を考慮する必要もある。同じ日でも朝、昼、夜によって光の現象は大きく変化する。しかも、同じ時間であっても天候での変化、季節によつての変化もある。更に、立地の変化によつても光の現象は大きく変化する。一瞬、一瞬で光の作用は同じではなく、その変化によつて自然光は常に変化し続ける。この様に光の現象を変化するものとして捉える。

その捉え方の従来の方法では、写真や映像があげられる。写真は一瞬の記録を正確に写す事が可能であるが、現象の変化を捉えるには難しい。

常にシャッターを押し続けなければいけないからである。映像は、それと比べて短時間の変化を正確に記録する事が可能である。しかし、月や年単位といった、長時間の変化を記録するには時間がかかりすぎて効率が悪い。

この様な従来の方法とは違い、近年の技術の発達によりCG画像による光の現象をシミュレーションすることが可能になった。時間、気候、季節、場所の変化を設定し、変化する光の現象を容易に記録する事が可能である。

そのシミュレーション方法にも、意図の違いで様々な方法が見受けられる。例えば環境解析シミュレーションのように光の現象を物理的に検証することが可能な場合もある。シミュレーション技術が発達するにつれ、Autodesk社のEcotectの様なソフトウェアを用いた環境解析によるデザイン手法も普及し始めている。窓の大きさを変化させたり、位置を変化させて光の明るさやエネルギーを計算することが可能である。しかし、これらの物理的なシミュレーションではそれらが人に与える心理的作用を見ることができない。

この研究では物理的な効果ではなく、シミュレーション結果を画像に落としこみ、その心理的作用を確認することが出来るように考慮した。それによってCG画像によって自然光の変化が捉えられるように工夫した。

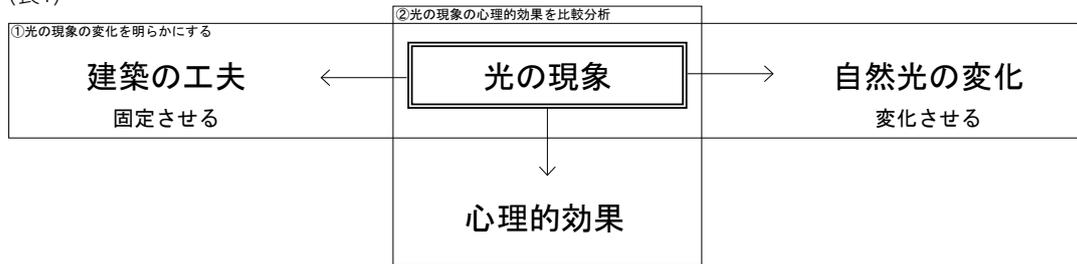
1.1.4.自然光の現象の心理的印象

自然光の現象によって、建築空間の印象は大きく変化する。光の現象は人間の知覚と認知に強い影響を与える。それは色彩や明るさによる光の現象の変化が空間の印象を大きく影響しているからである。同じ建築物でも、時間帯や季節、天気によって光の現象の印象は常に変化していて、それらを捉えるには光の現象を意識しなければいけないと考えられる。

このような心理的印象は、建築物の用途によって必要とされない場合もある。例えば工場や映画館のように、特に自然光による変化が重要とされないような建築もあり、心理的印象の重要性は高くない。しかし、教会建築のように、建築空間の雰囲気や心理的作用を重要と、それを建築の意図として大きく関わりがあるような場合では、心理的印象が建築空間の重要な要素になる場合もある。神に近づく神聖な場所としての教会は、自然光の現象の心理的印象を捉えるのが重要な役割を果たす。

1.2.研究の目的

(表1)



本研究は、2つの目的をもって進める。

- ①近代教会建築において、光の現象として移り変わる自然光と建築空間の関係を明らかにする。
- ②変化する光の現象における印象の変化傾向を調べ、光の現象の心理的効果を比較分析する。

1.3.研究の意義

変化する自然光の現象、建築空間の心理的作用の傾向を知ることによって、自然光の現象を設計過程に応用することが可能だと考える。特に自然光の印象を重要とする教会建築の場合では、光の変化とともに人に与える空間の印象をシミュレーションし、自然光の心理的効果を意図したデザインになりうる。近代建築の形態の工夫を同様にデザインに取り入れる事も可能となり、光の現象の心理的な効果を駆使したデザインを設計過程に応用できると考える。単に意匠的な意味で自然光を取り入れるのではなく、自然光の変化を心理的な効果とともに取り入れることで人間にとって豊かな空間環境になるデザインへと発展する事を期待する。

1.4.研究の方法

光の現象として移り変わる自然光と建築空間の関係を明らかにするために、CG画像シミュレーションの自然光の変化比較分析を行う。変化を分析するためには、一日の太陽高度変化や季節による変化、地球の経度、緯度による自然光の変化、天候による変化をシミュレーションで分析する。さらに、建築空間における自然光には壁やものに当たって反射する間接光を表現するために画像の角度から見えなくてもモデリングをして間接光の効果を再現する。本研究では、単純な空間で自然光を取り入れている3つの近代建築の教会空間を対象とする。そして、変化する自然光の建築空間における心理的効果を、アンケート調査による印象変化の傾向分析でもって明らかにする。最終的にこれらの考察と分析による総合的な結論を論ずる。

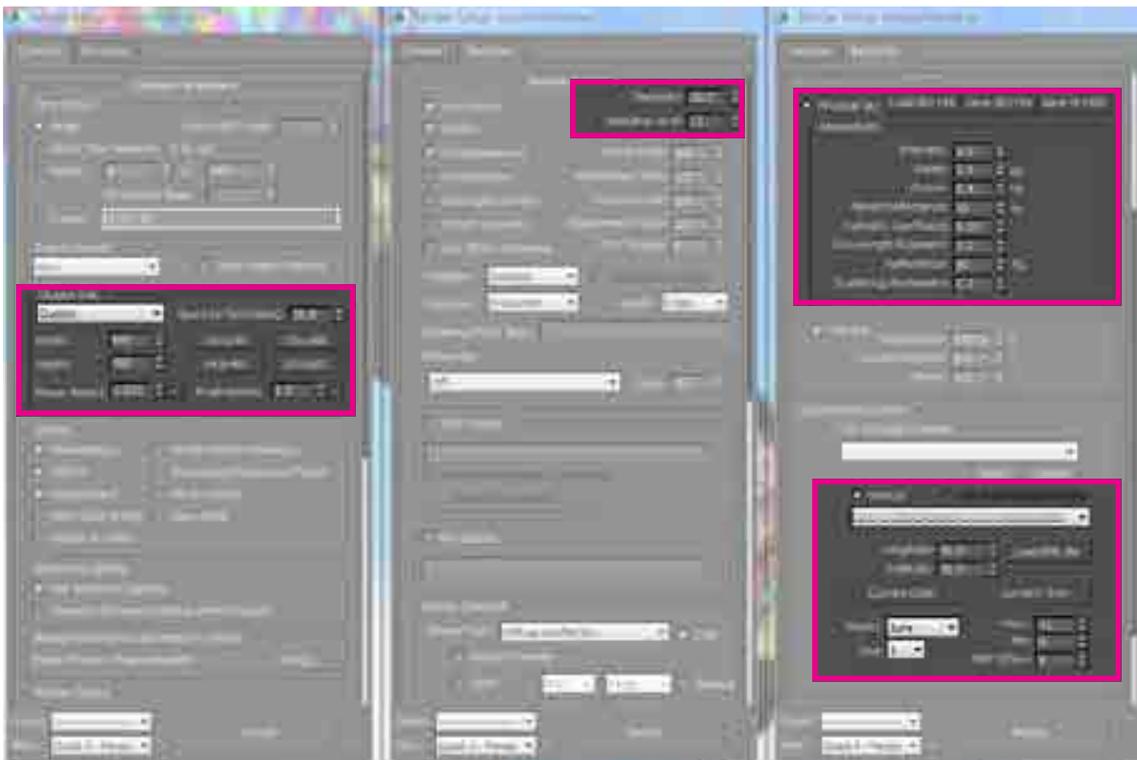
1.4.1.変化する自然光の扱い方

目的のひとつである光の現象として変化する自然光を扱う際に、直接光が大きく変わる理由である1日の変化、季節の変化、天気の変化、場所の変化という4つのパラメーターを操作し、変化を設定した上でCG画像シミュレーションを実行する。MAXWELL RENDERERレンダリングソフトのレンダリング設定内で以下の変化をすべて実行し、1つの教会空間のCG画像シミュレーションにつき計360枚の画像となる。

- 1日の変化 (7:00~17:00の10分置き) × (春/夏/秋/冬)
= 60枚 × 4日 = 計240枚
 - 季節の変化 (春/夏/秋/冬) × [(11-12時の10分置) + (15-16時の10分置)]
= 4日 × 12枚 = 計48枚
 - 天気の変化 (晴れ/曇り/雪) × [(11-12時の10分置) + (15-16時の10分置)]
= 3日 × 12枚 = 計36枚
 - 場所の変化 (フランス/メキシコ/日本) × [(11-12時の10分置) + (15-16時の10分置)]
= 3箇所 × 12枚 = 計36枚
- ※ 1つの建築につきCG画像合計 360枚
※ 3つの建築のCG画像合計 1080枚

次にこれらの結果である空間の心理的印象分析に移る。1.4.4.神秘的空間印象分析のアンケート調査結果から、3つのキーワードに沿った評価を-1、0、1として、それぞれの評価平均Rを比較しそれらの変化傾向を考察するものとする。

図1 Maxwellの設定



Maxwellの設定は大きく4つ、画像の①サイズ②サンプリングレベル③フィジカルスカイ④経緯と時間を調節する。

1.4.2.CG画像シミュレーションの質

自然光には窓から入ってくる直接光と、壁やものに当たって反射する間接光の2種類が存在し、それらがすべてこの空間の中で作用すると考える。これらの作用については、建築の形態と自然光の変化パラメーターの設定の精確な再現をすることが要求される。そこで、本研究では現在あるレンダリング表現の中で最も現実と近い再現方法とされるMetropolis Light Transport法を採用したソフトウェアMAXWELL RENDERERを使用し、多くの図面を元に3次元再現を忠実に精密に行うとする。特に間接光の作用については、モデリングの精確さとともに、アングル外の部分の反射日光に影響する物体すべてをモデリングすることが重要となる。インテリアから外周の建物まで精密に3次元再現することで、空間の中で作用する反射光すべてを再現することとなる。光は物にあたって反射を行うため本研究での重要な要素であることを意識した上で、CG画像シミュレーションを行う。

1.4.3.シミュレーションの対象空間

次に、これらのシミュレーションを行う上での対象空間の選定を行う。特に教会の聖堂は、講堂やホールなどは本質的に違うところがある。聖堂空間がもつスペース・コンセプトは、神に近づくための人間の内なるエネルギーを開放する場所であり、外と内では違う次元がある空間、それが聖堂であり、心理的な作用が指針の中でも重要と考える。このような観点から、自然光の変化と空間印象の対象としての妥当性があると考え、教会の聖堂空間を対象空間として扱う。

また、数ある教会空間の分類では、建物の形態形状と自然光の変化の印象がもっとも結びつきの高い関係性のある空間を選定することを試みる。例えば、ゴシックやロマネスク教会であれば、建築の形態と同時に装飾性の高い空間を見ることになる。しかし、そのような装飾性があれば建築形態以外の要素で空間の印象が作用されてしまうかもしれない。そういった傾向を避けるため、本研究では特に建築の形態が直接的に自然光の変化や空間の印象に影響をあたえる、装飾のもっとも少ない近代建築物を対象空間とした。

近代建築物の中では、特に多くの人を訪れる世界的に認識のある聖堂を選ぶこととして、より多くの印象の記述があることと、場所、天候、天気等の変化パラメーターにばらつきがあることを重要視して、選定を行った。選定した近代教会建築の聖堂は以下の3つで構成される。

- ・ロンシャンの礼拝堂(フランス)
- ・光の教会(日本)
- ・カプチーナス礼拝堂(メキシコ)

1.4.4.神秘的空間印象分析

神秘的空間印象の分析では、文献による一般的な空間印象を踏まえた上で、CG画像の自然光の変化によって変わる印象の傾向を分析し、考察を行う。

まず、3つの建築物の一般的な印象の文献調査を行う。建築の知識の有無は関係なく、出来るだけ多様な意見を交えた調査により神秘的となる空間印象要素を調べ、アンケート調査分析を行ううえでの比較対象の背景として位置づける。

次に、レンダリング画像によるアンケート調査を実施する。アンケート調査ではレンダリング画像を用意し、各被験者が3つのキーワードの印象の表現に当てはまるか3段階(×・△・○)で評価していく。この統計をとる際に、×は-1点、△は0点、○は1点と点数をつけていく。アンケート調査は、キーワードに沿って、結果の評価をマッピング方式によって比較し、建築と光の現象の変化による印象の変化を分析を行う。

1.5.既往研究

光の現象を3次元モデルに再現し、光解析シミュレーションを行うと言った物理的な実験は多く存在する。

Lau, B.P.H., 2008. The poetics of sacred light in Le Corbusier's religious building: a comparative study of the luminous environment in Ronchamp Chapel and the Monastery of La Tourette Royal Institute of British Architects.

ロンシャンの礼拝堂の空間の重要要素である光を、ル・コルビュジエの設計意図と照らしながら考察している

。現地調査および3次元モデルの再現によって、量的質的の双方向から考察を行った。また、視覚情報全体の一部としての光、個々の光、集合的な光と分けて考察を行い総合的な光の分析を行った。

Jaime, A.C. and Lau, B.P.H., 2012. Poetics of Light in Capuchinas Sacramentarias del Purísimo Corazón de María Chapel designed by Barragan.

カプチーナス礼拝堂の光を研究し、ルイス・バラガンのカプチーナス礼拝堂を考察を行う。カプチーナス礼拝堂に在籍する修道女の電話インタビューおよび3次元モデルの再現によって、量的質的の双方向から考察を行っている

1.6.研究の構成

本論文は序論(第1章)、本文(第2章・第3章・4章・5章・6章)、結論(第7章)より構成され、その概要を以下に記す。

第1章では、本研究の序論を述べる。

第2章では、本研究に関連する自然光の現象の原理とそのシミュレーション手法であるレンダリングアルゴリズムについて述べる。

第3章では、CG再現の中の3次元モデリング過程とその詳細について述べる。

第4章では、本研究での空間選定過程について述べる。

第5章では、3次元モデルによるシミュレーション実験を(1日の変化/季節による変化/場所による変化/天候による変化)によって行う。計1080枚のレンダリング画像を記す。自然光の変化による建築と空間の関係を考察する。

第6章では、神秘的空間の印象分析研究を行う。CG画像を用いた印象評価のアンケート調査の結果を-1、0、1の評価点数の集計を用いて分析し、考察を述べる。

第7章では、本文(第3章・4章・5章・6章)の総括を述べる。

自然光と
光環境シミュレーション
第2章

2.1.自然光

光の種類においては自然光と人工光に分類される。今回の研究では、光の照度等のコントロールが出来る人工光ではなく、建築設計の前提条件である人間の手ではコントロール出来ない地球の変化によって変わる自然光による、建築空間への影響を追求する。

自然光の現象として建築と関わる光は①透過②反射に分類される。太陽から大気層を通過して地表へ到達する光は、透過によって届く直射日光と、重なる反射によって散乱された光が地表に到達すると間接光の2種類に分類される。

透過による直射日光は、時間、季節、天候、雲の動きによって大きく変動し、その強い光源の直接的な反射によってグレア効果を生む。そして、心理的な効果に影響する熱エネルギーも含む。一方反射による間接光は、変動はあるもののその範囲は直射日光に比べて小さく、供給も安定しているため観覧や展示に用いられる。また、壁や家具といった物体に反射するため、これらの配置や素材の反射率によっても変動する性質を持つ。

2.2.自然光の効果

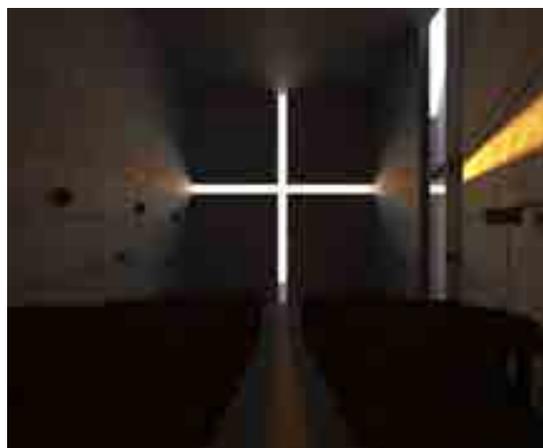
2.2.1.心理的効果

自然光は視覚によって感知されるが、光源の視覚効果は人間の心理に影響するほんの一部であり、それ以上に視覚情報全体へ大きく影響する。それによって、同じ太陽光でも昼間の光でみる風景と、夕暮れに見る風景では全く心理的効果が異なる。それは色彩、太陽高度、空気、強度の違いから起こる変化によるものであり、人間の心理に与える影響は大きい。わずかな月や星の明かりで安らぎを覚えたり、朝に太陽とともに起きる事で一日を活動的過ごす事ができたりと、その効果は誰でも経験したことがあるだろう。(写1・図2参照)

写1 建築と自然光の例



図2 自分でレンダリングした光の教会の画像



2.2.2.視覚情報的効果

自然光は透過と反射による2つの光源が存在するが、人間が感知する光の現象カテゴリーとしては、①光源をみた場合②光に作用される空間をみた場合③光に作用される物質をみた場合の3つに分けられる。本研究では建築室内の光の現象を検証するため②③の空間と物質に作用された光の現象が反映される。

その原理を説明すると、自然光は光源から発する光線が空気中を移動し、最終的には物質の表面がその進行を妨げる。真空内ではこの線が直線になるが、この光線は空気内で4つの作用によって変形する可能性がある：①吸収②反射③屈折④蛍光発光。表面は光線の一部を吸収し、反射光や屈折光の強度が下げたり、光線の一部又は全てを多方向へと反射させたりする。また、もし表面が透明または半透明の性質を持つ場合、スペクトルの一部または全てを吸収し(または変色させ)ながら、光線の一部を屈折し移動方向を変える。すべての入射光の合計は吸収、反射、屈折、蛍光発光の占めている必要がある。例えば、入ってくる光線の59%を反射し、60%を屈折させることは、合計が119%になるため不可能である。反射光や屈折光はその後も移動し別の表面に当たり、再度吸収、反射、屈折、蛍光発光を繰り返す。これらの光線の一部は人間の目やカメラのレンズに当たることで、最終的に見えるイメージが生成される。

2.3.光環境シミュレーション(Maxwell Render)

2.3.1.Maxwell Renderとは



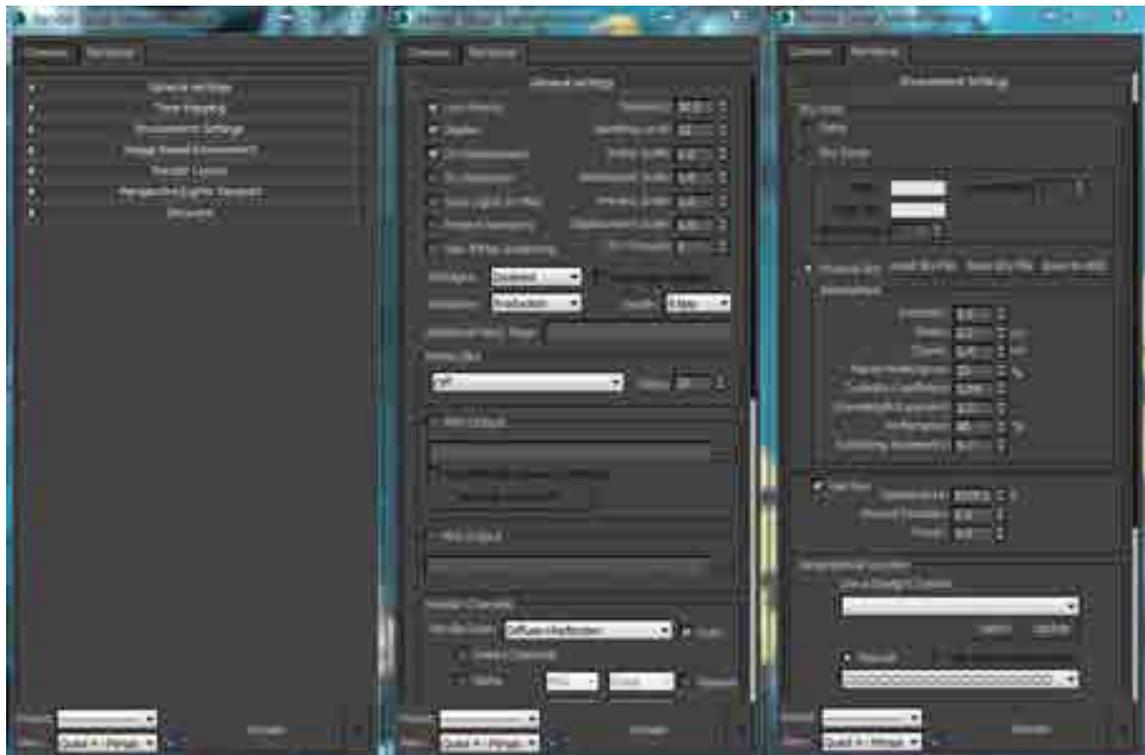
Maxwell Renderは実際の光を物理的に捉えて表現するレンダリングソフトウェアである。MaxwellにはCAD以下のソフトウェアのプラグインが用意されている。

3dsMax, Viz, Maya, Lightwave, Solidworks, Rhino, ArchiCAD, Cinema4D, SketchUp, FormZ, HOUDINI

今回の実験ではモデリングで使用する3DSMaxのMaxwellプラグインを使用する。

Maxwell Renderの光再現アルゴリズムでは、RayTracing法(→2.3.2.1.に記述)の一例であるMetropolis Light Transport法(→2.3.2.4.に記述)を使用し、現実の光の現象を忠実に再現する仕組みになっている。

図3 3DSMAXからのPluginするMaxwellのセッティング



2.3.2.光再現アルゴリズム

2.3.2.1. Ray Tracing

CGにおけるレイトレーシング法とは、画像平面のピクセル内を通過する光が仮想物質と当たる効果を再現し、その経路をたどることにより画像を生成する技術である。この技術は、従来のスキャンライン法よりも高精度な画像を生成することで現実世界に近い結果が得られる事が特徴だが、その分コンピューターにかかる計算量が大きくなる(計算に時間がかかる)。よって、このレイトレーシング法はテレビや映画のビジュアル・エフェクト、静止画像のようにレンダリング十分に時間が取れる際での使用が最適である。レイトレーシング法では、反射や屈折、拡散および分散現象(色収差等)の光学的効果の様々なシミュレーションを行うことが可能である。

2.3.2.2 Ray Casting Algorithm

光レイトレーシング法は、3次元CGモデルからビジュアル画像へと生成しするレンダリング技法の一種であり、レイキャスト法やスキャンライン法のいずれかよりも現実世界に近い画像が生成可能である。その技法は、仮想画面内の架空の目(カメラの位置)から各画素へパスをトレースし、それを通して見えるオブジェクトの色を計算する。モデリング範囲すべてである「シーン」の設定は、数学的な記述またはプログラムによって変えられるが、デジタル写真やモデルからのデータを組み込む事も可能である。また、現実的なイメージ生成に加えて、レイトレーシング法では視野の深さや口径の形状まで再現する事が可能である。

通常、各レイはシーン内すべてのオブジェクトのいくつかの部分集合との交差を計算される。最も近いオブジェクトが特定されると、アルゴリズムは交点からの入射光を推定、物体のマテリアルを調べ、画素の最終的な色を計算する。特定の照明アルゴリズムや反射、半透明マテリアルは、シーンに再度レイを当てる必要がある。

現実世界のようにカメラに向かって光線を送らず、この様にカメラからシーンに向けて「逆に」光線を送ることで、効率よく情報を抽出することが可能になる。なぜなら、シーン内の光源からなる光線の殆どは目には映らない為、コンピューターは画像に映らない光路まで膨大な計算処理を行ってしまい時間が無駄なるからである。

したがって、レイトレーシング法ではすべてのレイが「ビューフレームと交差する」ことを前提とする。レイが一定の距離を通過しても交差が見られない場合、計算が止まる仕組みになっている。

2.3.2.3. Ray Casting起源と種類

初期のレンダリングアルゴリズムは1968年にアーサー・アペルによって提示された。以降、このアルゴリズムは「レイキャスティング」と呼ばれ、1ピクセルから1光線放ち、その光線の経路を遮断する最も近いオブジェクトを識別する。画像は1ピクセルごとに分けられ、その画素を通してオブジェクトのマテリアルや光効果を反映させる。このアルゴリズムの仮定として表面が光を受けるとき、光は必ず到達し影によって妨げられない。表面の陰影は、従来の3次元CGシェーディングモデルを用いて計算される。スキャンラインアルゴリズムを介して提供されるレイキャスティングの最大の利点としては、簡単に非平面的なサーフェスやソリッド(コーンや球体)を対処できることである。更に精巧オブジェクトに関しては、ソリッドモデリング技法を使用して作成され、容易にレンダリング出来る。

Recursive Ray Tracing Algorithm

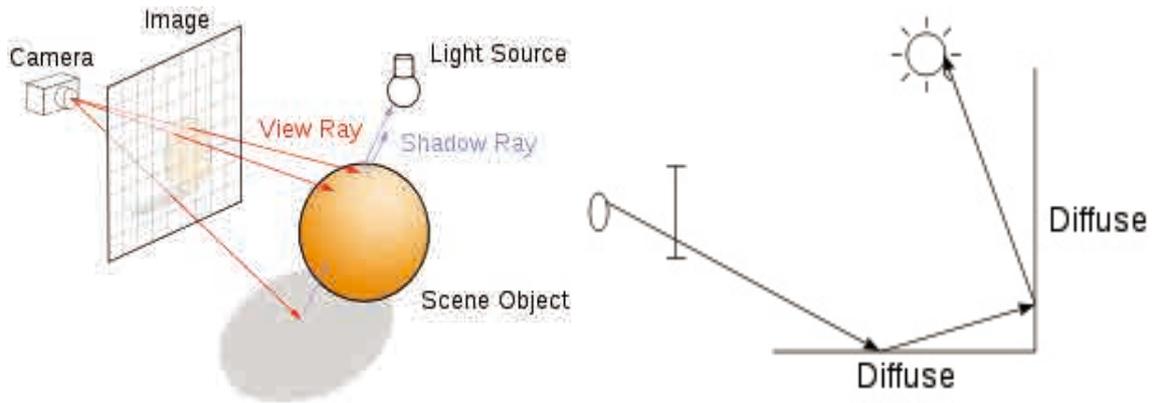
次の画期的な開発は1979年ワナー・ウィットッドによるRecursive ray tracing algorithm 再帰的レイトレーシングアルゴリズムである。以前のアルゴリズムではレイを再帰的にトレースすることなく線の色を決定した。しかし、ウィットッドがトレースを再帰的に続けた結果、レイが表面にあたった際には最高3つの新しい光線(反射、屈折、影)を生み出すことを確認した。それらの反射レイは鏡面反射方向にトレースされ、この反射オブジェクトが1番近いオブジェクトに値するものと発見した。屈折光の透明素材の面に当たる際にも同様の作用するが、入射か反射のいずれかを識別しなければならない。また、シャドウレイは、全ての光にトレースされ、もしも不透明なオブジェクトに妨げられた場合は影になり点灯しない。この再帰的レイトレーシングアルゴリズムの開発によって、よりリアリティに近い画像生成を可能にした。

Backwards Ray Tracing Method

眼から光源のレイを放つ手法は「Backwards Ray Tracing Method」と呼ばれ、光子が実際に通過する方向とは逆に動く。この用語には混乱があるが、眼を起点としてレイトレーシングを行うことであって、光源を起点とするレイトレーシング法とは区別しなければならない(レイトレーシング法は開発初期から眼を起点としていたため、一時は光源起点を後方レイトレーシング法と呼んでいた)。

図4は、再帰的にアルゴリズムを使用して光源にカメラ(または目)から生成される光線の経路の簡単な例を示す図である。拡散反射面が全方向に光を反射している。まず光線が目線で作成され、画素ずつ拡散表面に当たるシーンへとトレースされる。その表面から、アルゴリズムは再帰的に①別の拡散反射面に当たるシーンをトレースし反射光線を生成する。最後に、②別の反射光線を生成し、それを光源に当たって吸収されるまでトレースする。画素の色は、①及び②の拡散反射面と、光源から出射される光の色に依存する。光源が白と2つ拡散表面を放射光源が青だったら、ピクセルの結果の色は青となる。

図4



2.3.2.4. Metropolis Light Transport

Ray Tracingの中でも特に再現方法に優れているのが、Metropolis Light Transport法(以下MLT)であり、それは Ray Tracingを統計学的にみたMonte Carlo Methodの応用、双方向Bidirectional Path Tracingの更に応用を加えたものとなっている。

基本方法 > 応用 という関係で表すと、

Ray Tracing > Monte Carlo Method > Bidirectional Path Tracing > MLT

という関係になる。詳しい関係性は図5を参照。

Bidirectional Path Tracing

一般的に直接照明のサンプリングには眼を起点とするレイトレーシング法が最適であるが、一部の間接的効果は光源を起点とするレイを発生させるのが望ましい。例えばコースティクスという光の焦点を広い反射領域から狭い領域である拡散表面へ当てる際に引き起こされる現象では、レイを光源から直接反射オブジェクトに当てるアルゴリズムを用いるほうが最適である。この様に、レイを眼の起点と光源の起点で統合させる方法を双方向性パストレーシングと呼ぶ。

Metropolis Light Transport

MLTとは光環境シミュレーションに用いるモンテカルロ法を応用してつくられた、Metropolis-Hastingsアルゴリズムを用いるレンダリング計算方法である。

<手順>

目を起点にしたBidirectional Path tracingを利用し、わずかな光の変形を行う。Metropolisアルゴリズムと呼ばれる統計的計算を用い、対応する明るさ配分に反映させる。利点としてはBidirectional Path Tracingのように、一度光源から眼へのパスを発見したらその後アルゴリズムはそのルートの周辺を探索することができ、探索に困難なパスを容易に発見することが可能になる。つまり、アルゴリズムはパスを生成した後にその"ノード"による情報をリストに蓄積していく仕組みになっており、ノードの追加によって新しいパスを生成していく。MLTはその公平な方法によって、従来のMonte Carlo MethodおよびBidirectional Path Tracingよりも速いレンダリング処理を行うことが可能である。

図5

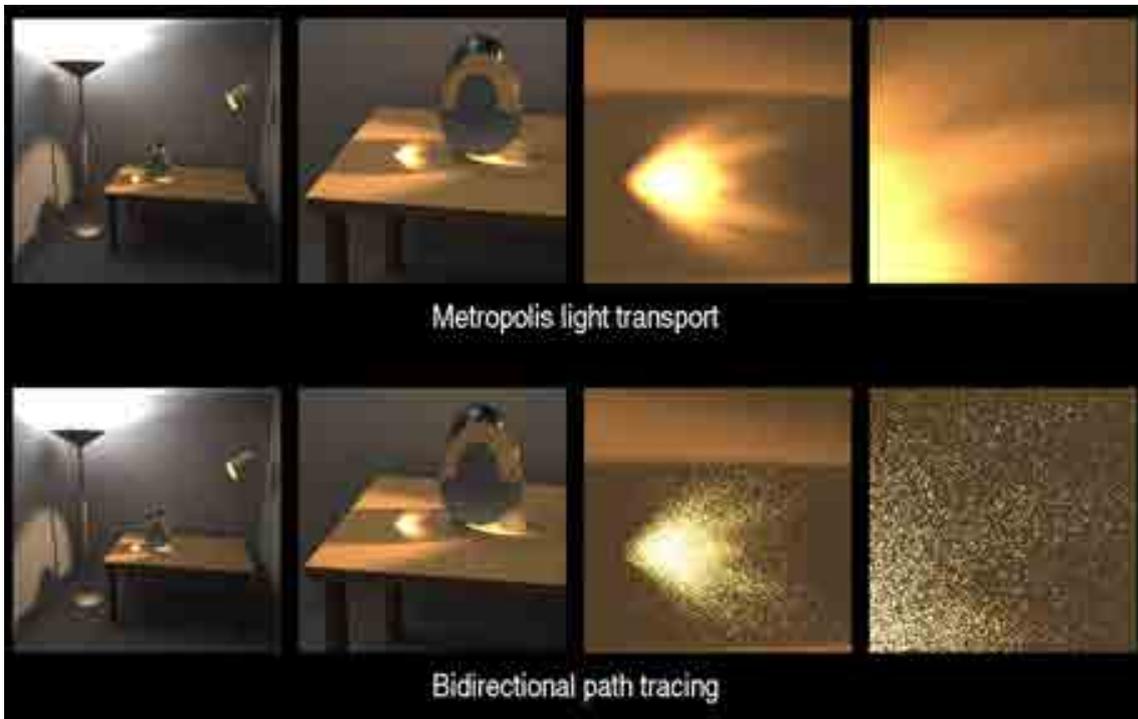


図6 自分で再現してみたロンシャンの窓の部分



2.3.2.5.その他のレンダリング法

Radiosity

すべての光源を統計計算するモンテカルロ法とは違い、光源から数回まで乱反射して眼に反映される光線のみを計算する方法。計算処理の速さと実際の光に近い効果が得られるが、再現手法の正確性に欠ける。

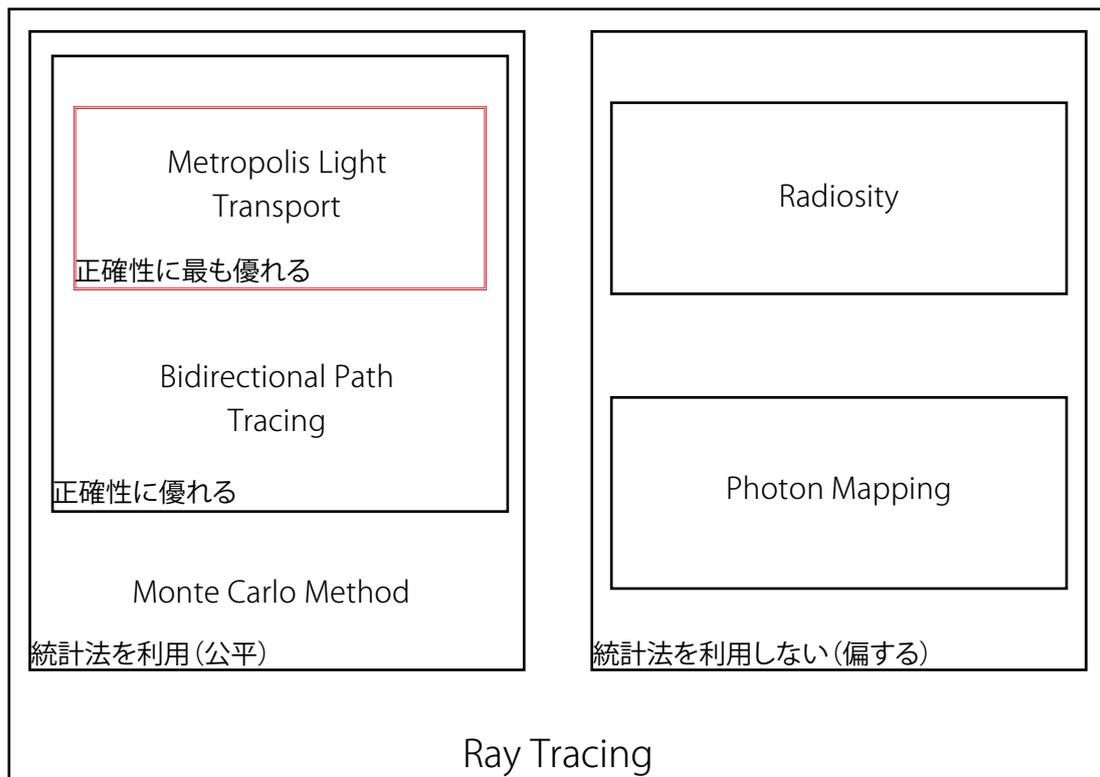
使用レンダラーは3DS Max, Vray, LightWave 3D, formZ 等。

Photon Mapping

一部の光源の統計計算の代わりに効率的な計算処理を行う。光子マップと呼ばれるデータ構造により、計算処理の速さがメリットであるが、偏った計算方法により再現の公平性に欠ける。

再現の公平性は、統計学的に計算処理を行うMonte Carlo Methodが優れており、更に応用を加えたBidirectional Path Tracing、MLTが最も正確性に優れている。

(表2):各レンダリング法の関係図



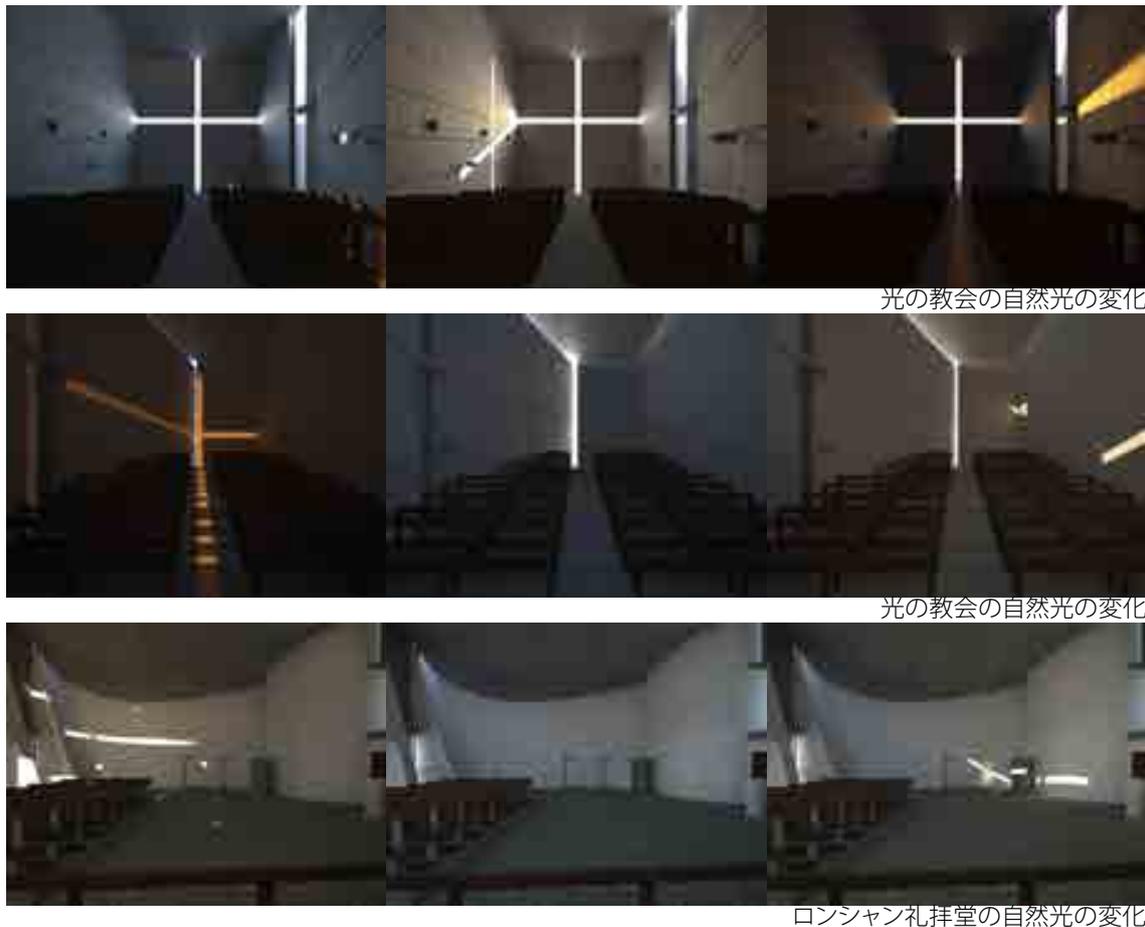
2.3.2.6. その他のレンダリング法と比べたメリット

MLTの最大のメリットは、そのほかのレンダリング法に比べて、最も現実的なシミュレーションを行えることである。他のアルゴリズムが出来ない反射や影の効果やシミュレーションを、容易に、正確に、公平に、行う事ができる。また、各光線は独立した並列計算法に従順するため処理の速さも利点である。

図7 3つのレンダラからのレンダリング画像



図8 Maxwellレンダリングの自然光の変化



3次元モデルによる
再現手法

第3章

3.1.ソフトウェア選定

3次元モデルで再現するには、Autodesk社の3dsMAXを利用する。今回の3次元を表現するのに十分な精度をもち、かつ簡単なインターフェースであるため選定した。図9は、各プログラムが持つ機能を比較したものである。

図9 モデリングソフトウェア比較

				
<ul style="list-style-type: none"> •3ds Maxユーザインタフェース •データとシーンの管理ツール •ポリゴンモデリングおよびテクスチャリング •アニメーション •キャラクターアニメーション •高度なアニメーションツール •スペースウォープ •ダイナミクス •布 •パーティクル •複数のレンダリングオプション •レンダリングコントロールとエフェクト •ヘアとファーシステム •MAXScript •3ds Max API/ SDK •接続と統合 •プラグイン 	<ul style="list-style-type: none"> •Maya Nucleus統合シミュレーションフレームワーク •Maya nCloth •Python •プラットフォームサポートの拡張 •mental rayシェーダ •ポリゴン属性切り替え •mental rayのワークフロー 	<ul style="list-style-type: none"> •NURBS曲線モデリング •編集 •インターフェース •ディスプレイ •レンダリング •図面の作成と印刷 •デジタルファブリケーションメッシュツール •3Dキャプチャ解析/分析大型プロジェクト 	<ul style="list-style-type: none"> •使いやすいインターフェース •インテリジェントなobject base作業 •効率的な作業環境を提供(共同共同作業支援) •さまざまなモデリング機能をサポート •Radiosityレンダリングエンジン •プレゼンテーション機能を提供 	<ul style="list-style-type: none"> •ソリッドデータの体積を計算 •Dynamic Component •Push/Pull •リアルタイム日照、日英の検討 •断面切断 •フォローミー機能 •サンドボックス機能 •2D描画機能

3.2.CGシミュレーションの質

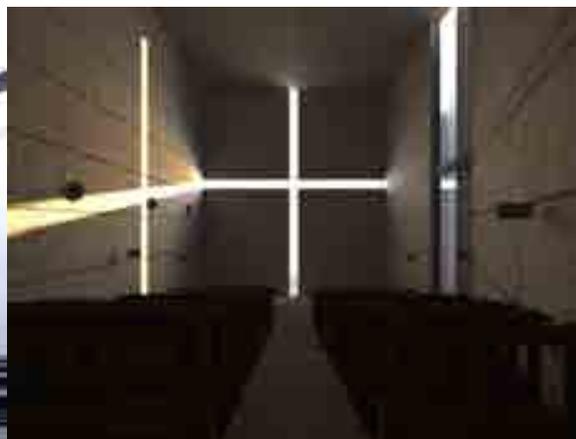
3.2.1.直接光の影響

モデリングを行う際には、精密かつ忠実な再現を行うことで実際の建築の印象と相似させる必要がある。まずは数多くの図面をトレースしていくことから始め、壁や窓の開き方を図面と照らし合わせながら建てていく。

写2 光の教会実物写真



図10 CGシミュレーションの画像



3.2.2.間接光の影響

間接光の作用については、モデリングの精確さとともに、アングル外の部分の反射日光に影響する物体すべてをモデリングすることが重要となる。なぜならば、アングル内で働く反射日光は、アングル外の物体の反射によっても光に影響をあたえてしまうものであり、それらの物体のモデリングをしないと光の再現が精確ではなくなってしまうからである(図11、12参照)。もしこれらのアングル外のモデリング部分の正確性が低いと、光の作用が変わってしまう。アングル外のモデリング部分が精密でないと、光の作用が再現性の低いものになってしまう。それらを写真や図面と比べながら、再現のモデルを形成していく作業を繰り返し行うことで、精確なモデルへと近づけていく。

図11 ロンシャン礼拝堂の長い塔の細長い窓

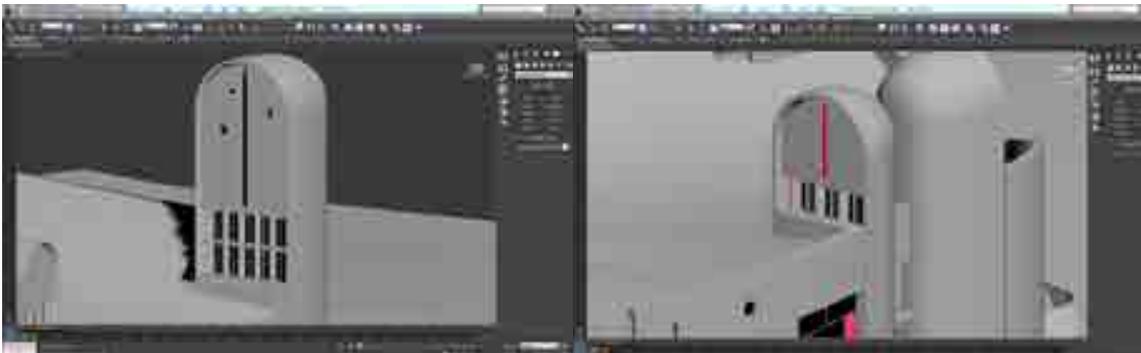


図12 窓から入ってくる間接光に関するCGシミュレーション画像



インテリアから外周の建物まで精密に3次元再現することで、空間の中で作用する反射光のすべてを再現するが重要となる。なぜなら、光は物にあたって反射を行う。これらの反射した間接光の影響まで再現することが、本研究での重要な要素なのだ。

分析対象空間選定

第4章

4.1. 分析対象空間選定方針

本来は多くの建築物を分析するべきであるが、CG分析の時間的制約、比較分量が膨大になってしまう事を考えると分析対象の空間を選定せざるを得なかった。まずは1つの建築物で予備分析を行い、分析に要する時間を確認した。その結果、今回3つの建築物を選定し比較分析する事に決定した。

まずは今回の目的である「建築空間での自然光の現象」をどのように分析するのかについてを考える。一つは変化する自然光の現象を研究する際に、用途としてふさわしいものを選定する。建築用途において、自然光か人工光を利用するかは異なり、その光の特徴を考える必要があった。

用途別の光の特徴：

- 学校…平日9時—15時頃まで使われる
読書の用途に相応しい明るさまで人工光を使用する
- 美術館…展示においては平・休日の9時—17時頃の営業
展示品の見え方に合わせて人工光、自然光の組み合わせる
- 教会…常時営業、参拝時間は日曜の午前
礼拝堂においては主に自然光を使用する

特に教会の聖堂は、講堂やホールなどとは本質的に違うところがある。聖堂空間がもつスペース・コンセプトは、神に近づくための人間の内なるエネルギーを開放する場所であり、外と内では違う次元がある空間、それが聖堂であり、心理的な作用が指針の中でも重要と考える。このような観点から、自然光の変化と空間印象の対象としての妥当性があると考え、教会の聖堂空間を対象空間として扱う。

次に、数ある教会空間の中でどれを選定するかであるが、建物の形態形状と自然光の変化の印象がもっとも結びつきの高い関係性のある空間を選定することを試みる。例えば、ゴシックやロマネスク教会であれば、建築の形態と同時に装飾性の高い空間を見ることになる。しかし、そのような装飾性があれば建築形態以外の要素で空間の印象が作用されてしまうかもしれない。そういった傾向を避けるため、本研究では特に建築の形態が直接的に自然光の変化や空間の印象に影響をあたえる、装飾のもっとも少ない近代建築物を対象空間とした。

近代建築物の中では、特に多くの人々が訪れる世界的に認識のある聖堂を選ぶこととして、より多くの印象の記述があることと、場所、天候、天気等の変化パラメーターにばらつきがあることを重要視して、選定を行った。

モデリングを行う際に十分なデータ(図面、写真、ディテールの詳細、以降「図面データ」)があるか、そこから3の建築空間のデータ、光の現象についての記述がされている文献が十分に存在し、またその印象が記述されているか(以降「印象データ」)を調べた。

そこで著名な建築家による建築ならば多くの一般客が足を運んだことがあると踏んで、候補を12つ挙げた。

これらの候補の中で、モデリング可能なほどデータが時間内に集まるか、客観的な印象として使用できるよう記述者の偏りはないか（建築家、評論家、一般客による印象がまんべんなく存在するか）、3つの所在地に偏りはないかを調べて最終的な選定建築物を考えた。(表3)は候補である近代教会建築物の所在地、図面データの有無、印象データの有無をまとめた表である。これらの中から最も精度の高いモデリングを作れる図面データがあり、幅広い印象データがあり、所在地に偏りがないように3つの建築物を選定した。

(表3) 分析対象近代教会建築物の比較表

	建築家	所在地	図面データ	印象データ
★ロンシャン礼拝堂	ル・コルビュジェ	フランス	◎	◎
ラ・トゥーレット修道院	ル・コルビュジェ	フランス	◎	◎
ユニテリアン教会	ルイス・カーン	アメリカ合衆国	○	○
★カプチーナス礼拝堂	ルイス・バラガン	メキシコ	○	○
ブリオン家墓地	カルロ・スカルパ	フィンランド	△	○
ユニティ教会	フランク・ロイド・ライト	アメリカ合衆国	◎	○
ミュールマキ教会	ユハ・レイヴィスカ	フィンランド	△	△
三本の十字架をもつ教会	アルヴァー・アアルト	フィンランド	△	○
マルコデカナヴェーゼス教会	アルヴァロ・シザ	ポルトガル	○	○
水の教会	安藤忠雄	日本	○	◎
★光の教会	安藤忠雄	日本	◎	◎
京東教会	金壽根	大韓民国	△	○

★…選定建築物

近代建築の巨匠であるル・コルビュジェの作品のひとつであるロンシャン礼拝堂は、図面データ、印象データが十分にあった。まず暫定的にこれを選択し、モデリングからレンダリングまでの時間を計る予備分析の際に利用した。結果、この建築の詳細までモデリング出来て情報も十分にあったため、これを選定した。

以降、所在地の偏りと必要データの所蔵を考慮し、次に同じく近代建築家であるルイス・バラガンのカプチーナス礼拝堂を選択した。印象データはル・コルビュジェの作品程多くは見つからなかったが、今回モデルを作成する最低限の情報と、文献の確保が出来た為これに選定した。

最後に、日本に所在する安藤忠雄の建築を選定した。特に今回のテーマである自然光の現象に適していると見られた光の教会に決定し、これら3つの近代建築物の比較分析を行う。

4.2.選定建築

4.2.1.ロンシャンの礼拝堂 ル・コルビュジェ

写3 ロンシャン礼拝堂のサイト



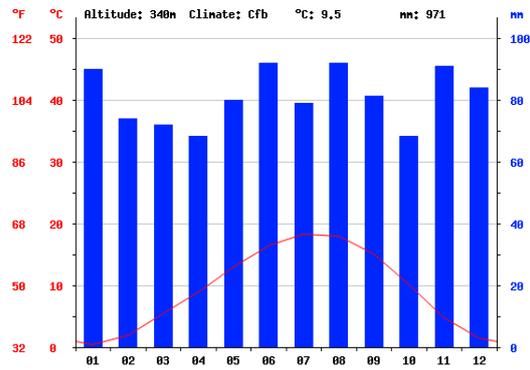
(表4)

建築名	Chapelle Notre-Dame-du-Haut(ロンシャン教会)
位置	Ronchamp, Haute-Saône, France
座標	47°42' 16.37" N 6°37' 14.08" E
建築家	Le Corbusier
構造	コンクリート
着工	1953
完工	1955

フランス東部ベルフォール付近の丘に建つ。もともとは巡礼の地で中世に建てられた礼拝堂があったが、第二次世界大戦に破壊されたため、戦後ロンシャンのローマ・カトリック改革派教会のために再構築されたものである。

モダニズムの原則である合理性・機能性から外れたロンシャンの礼拝堂は、コルビュジェの全作品の中でも特異をもつ代表作であり、敷地の特性をデザインしているとされる。厚いコンクリートシェル製の壁が、箱舟のように曲がった屋根を支える構造となっている。

(表5)



最も乾燥する月は10月、平均降水量は68mm。最も湿度が高い月は8月、平均降水量は92mm。

写4 ロンシャン礼拝堂の外部①



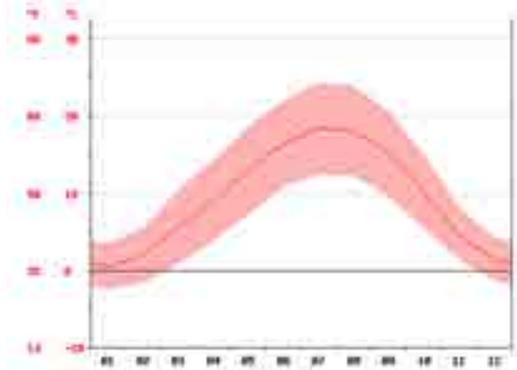
G.Vielle, la chapelle Notre-Dame du Haut, Ronchamp © ADAGP, 2013, Paris

写6 ロンシャン礼拝堂の内部①



Martine Harlé, la chapelle Notre-Dame du Haut, Ronchamp © ADAGP, 2013, Paris

(表6)



1年の最大平均気温は7月であり、平均気温は18.3°C。1年の最低平均気温は1月であり、平均気温は0.5°C。

写5 ロンシャン礼拝堂の外部②

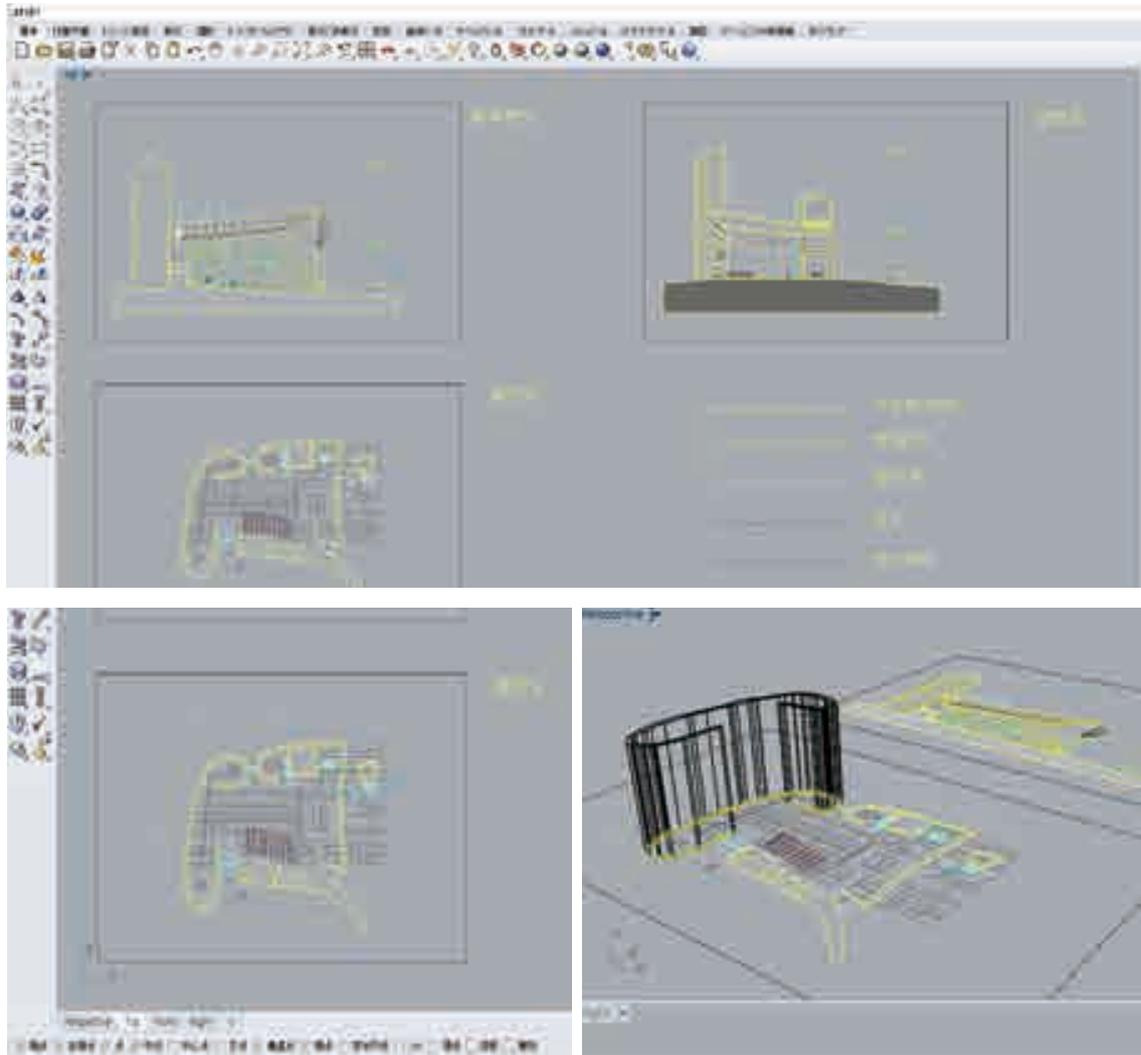


写7 ロンシャン礼拝堂の内部②



A.Liess, la chapelle Notre-Dame du Haut, Ronchamp © ADAGP, 2013, Paris

図13 ロンシャン礼拝堂のレンダリング画像と3次元モデル



写8 外部写真③



写9 外部写真④



写10 内部写真③



写11 外部写真⑤



図面から3次元でモデリングをしながら細かい部分は実物の写真を見て修正する

写12 モデリング①



写13 モデリング②



写14 モデリング③



写15 モデリング④



最終的に完成した3次元のロンシャン礼拝堂

写16 ロンシャン礼拝堂のレンダリング画像と3次元モデル



写16 3DSMAXからのモデリング

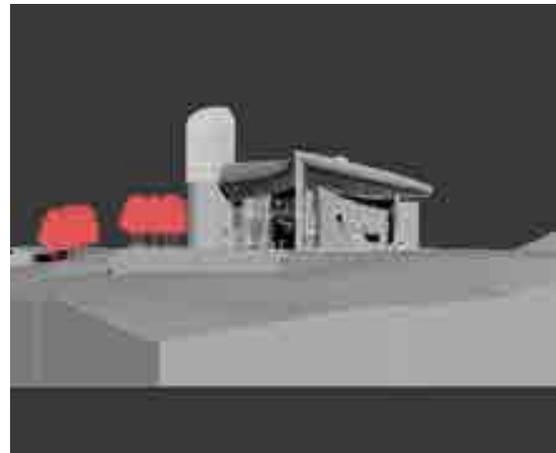
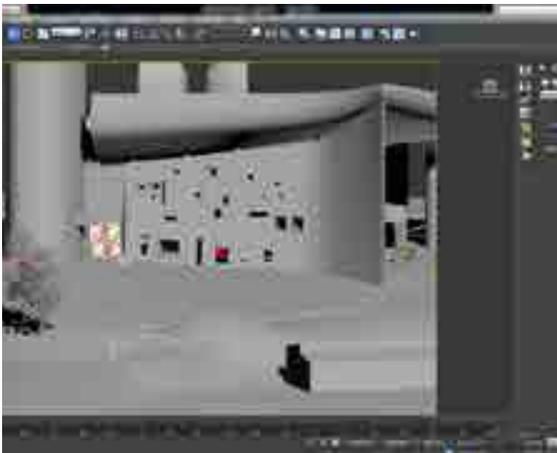
写17 3DSMAXからのモデリング



写18 3DSMAXからのモデリング



写19 3DSMAXからのモデリング



ロンシャンの礼拝堂の3DSMax上のモデリング画像

4.2.2.光の教会 安藤忠雄

写20 光の教会サイト



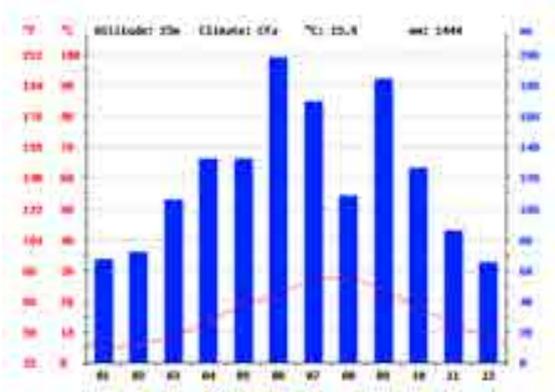
(表7)

建築名	Ibaraki Kasugaoka Church (光の教会)
位置	Ibaraki, Osaka
座標	34° 49' 7" N, 135° 32' 13" E
建築家	Tadao Ando
構造	鉄筋コンクリート
着工	1987
完工	1989

大阪府茨城市の閑静な住宅街に位置する安藤忠雄の建築の代表作である。既存の木造礼拝堂の増築として計画され、17.7m×5.9m×5.9mの3つの立方体と、15度で貫通する壁が礼拝堂と玄関を分割して構成されている。

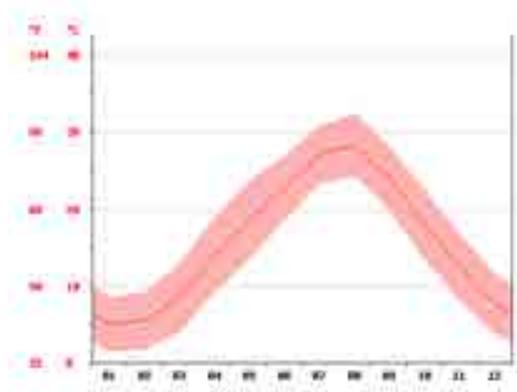
礼拝堂は光と壁の強いコントラストで成り立ち、十字型のスリット窓が設置されている。プロテスタント教会の礼拝堂は簡素な内部空間であり、スリット窓以外に十字架は設置されていない。木でできた家具は暗く塗られている。

(表8)



最も乾燥する月は12月、平均降水量は65mm。最も降水量が多い月は6月、平均降水量は198mm。

(表9)



最も温かい月は8月、平均気温は28.2°C。最も低い平均気温は1月で、4.9°C。

写21 光の教会内部



写23 光の教会外部



写22 光の教会外部



写24 光の教会外部



<http://ibaraki-kasugaoka-church.jp/gallery.html>

図14 光の教会の図面



図15 ライノからのモデリング

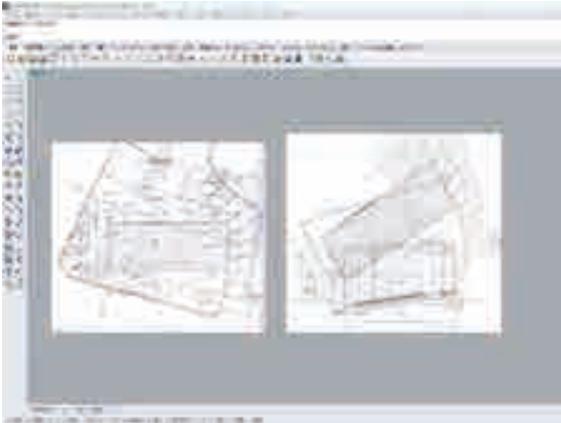
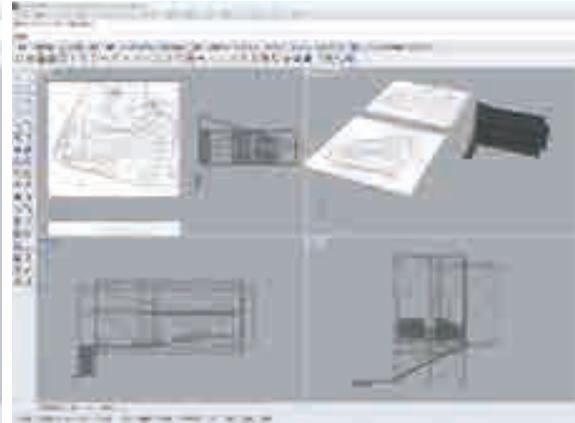


図16 ライノからのモデリング



写25 光の教会内部



写25 外部



写25 外部



写25 外部



図面から3次元でモデリングをしながら細かい部分は実物の写真を見て修正する

図17 モデリング①



図18 モデリング②



図19 モデリング③



図20 モデリング④



最終的に完成した3次元の光の教会

図21 光の教会の3次元モデル

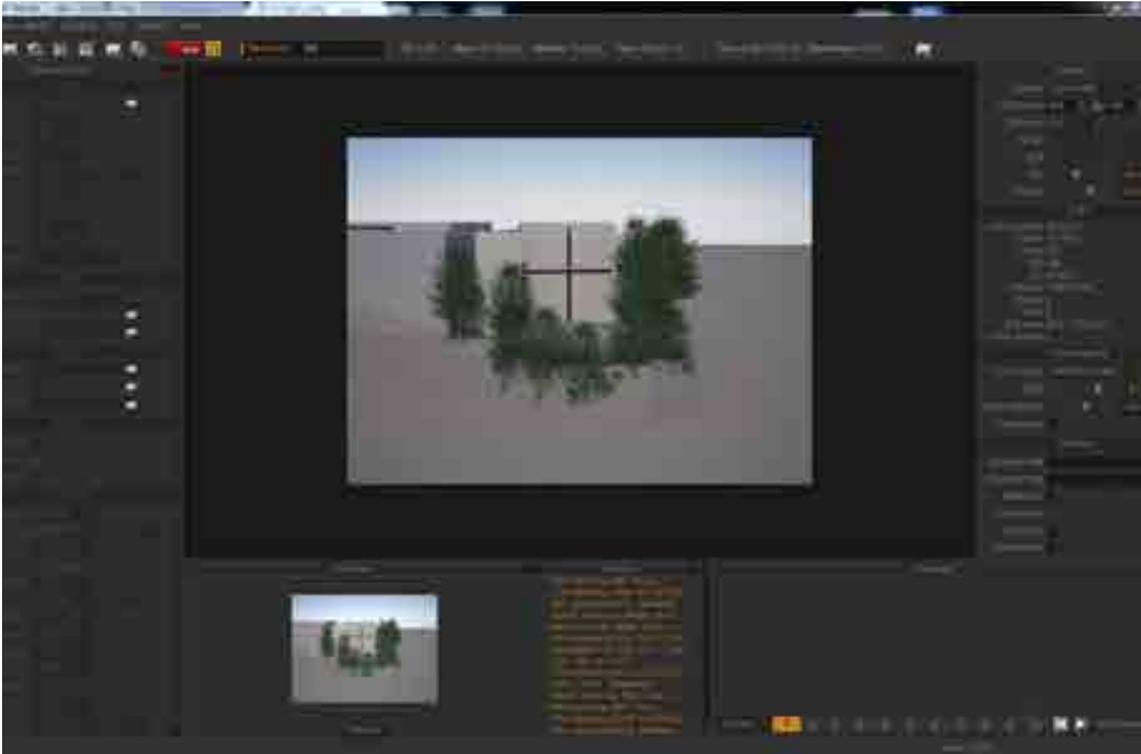


図22 光の教会の3次元モデル

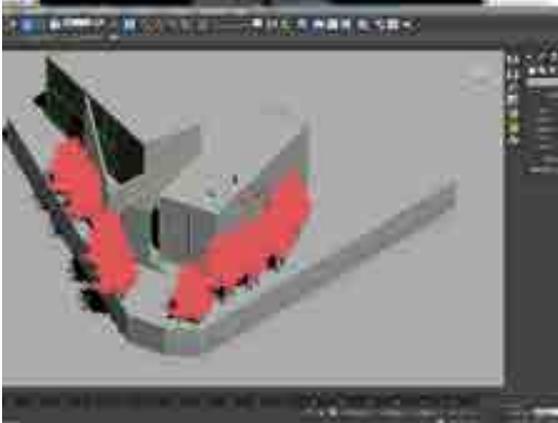


図24 光の教会の3次元モデル

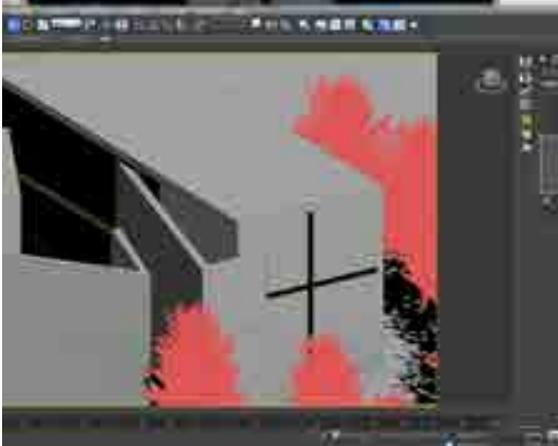


図23 光の教会の3次元モデル

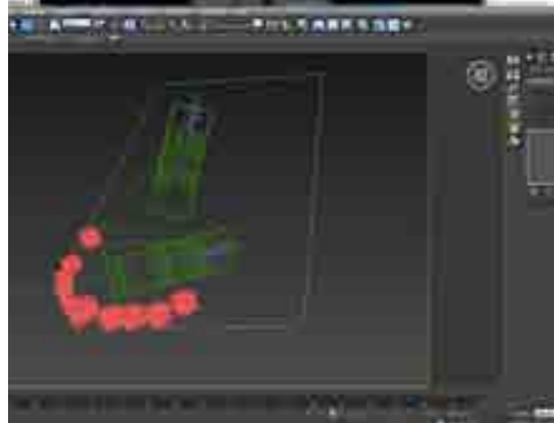


図25 光の教会の3次元モデル



光の教会の3DSMax上のモデリング画像

4.2.3.カプチーナス礼拝堂 ルイス・バラガン

写26 カプチーナス礼拝堂サイト



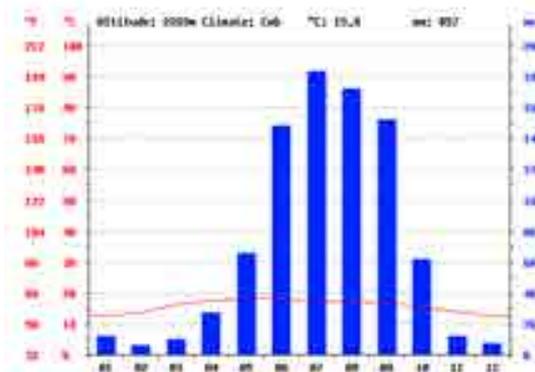
(表10)

建築名	Chapel for the Capuchinas Sacramentarias del Purísimo Corazon de Maria (カプチーナス礼拝堂)
位置	Miguel Hidalgo, Tlalpan Centro I, Tlalpan, 14000 Miguel Hidalgo, Distrito Federal
座標	19°17'17.59"N 99° 9'51.78"W
建築家	Luis Barragán
構造	コンクリート
着工	1952
完工	1955

既存のチャペルの改修として始まったこのプロジェクトは、バラガン自身が敬虔なカトリック信者であり莫大な資金を調達したために、彼自身のコンセプトを満たすように拡張された。

黄色い光が差し込む光景が特徴的な礼拝堂は、3つの採光によるもので、1つは側面の10mほどの黄色いステンドグラス窓によるもので、3.5mの十字架の視界の奥に位置する。1つは天窓にある黄色い窓から格子状の壁を進み差し込む光、もう1つは間接光によるものである。

(表11)

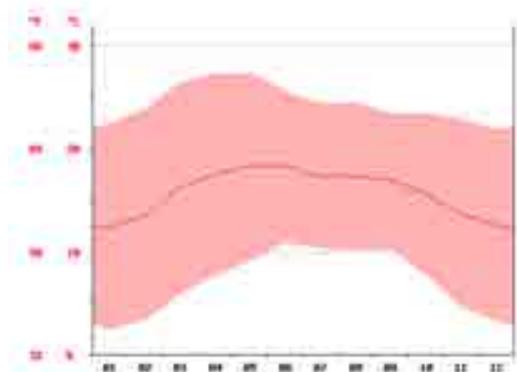


最も乾燥する月は2月で、降水量は平均6mm。最も降水量が多い月は7月、平均183mm。

写27 カプチーナス礼拝堂外部



(表12)



最も温かい月は5月、平均気温は18.3°C。最も低い平均気温は1月で、12.4°C。

写28 外部



Cortesía de Mi Moleskine Arquitectónico © Usuario de Flickr: thom´s

写29 カプチーナス礼拝堂内部



© Usuario de Flickr: URBANIKA arquitectura / Federico Campos

図26 カプチーナス礼拝堂の図面

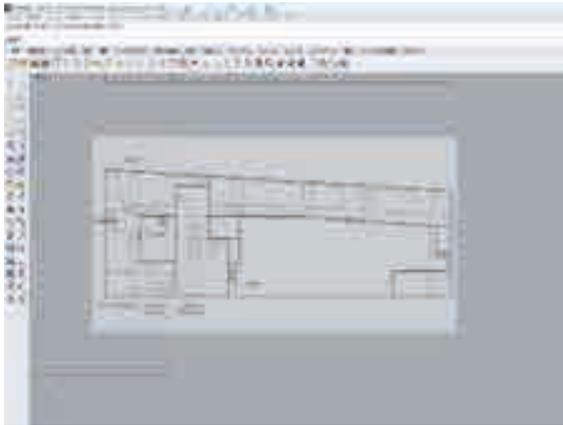


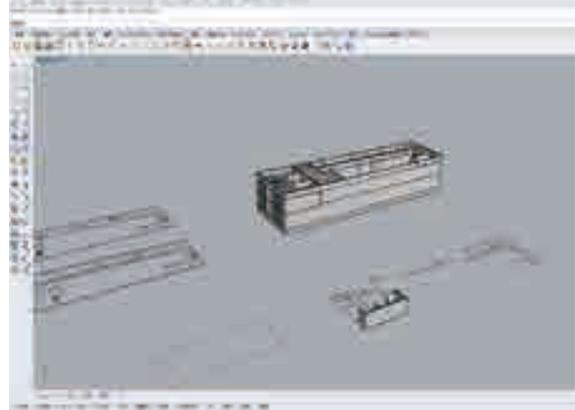
図27 カプチーナス礼拝堂の図面



図28 カプチーナス礼拝堂の3次元モデル



図29 カプチーナス礼拝堂の3次元モデル



写30 内部



写31 内部



写32 内部



写33 内部



図面から3次元でモデリングをしながら細かい部分は実物の写真を見て修正する



図30 3次元モデル

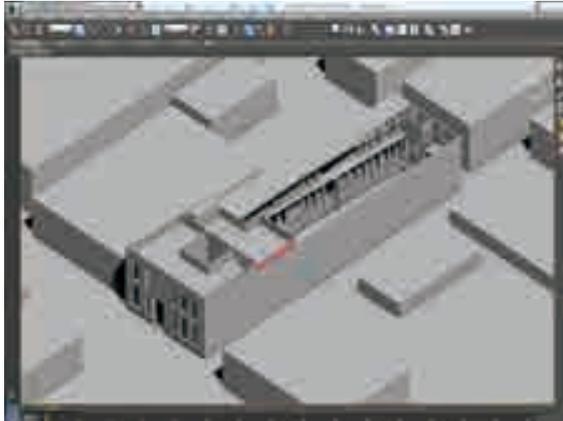
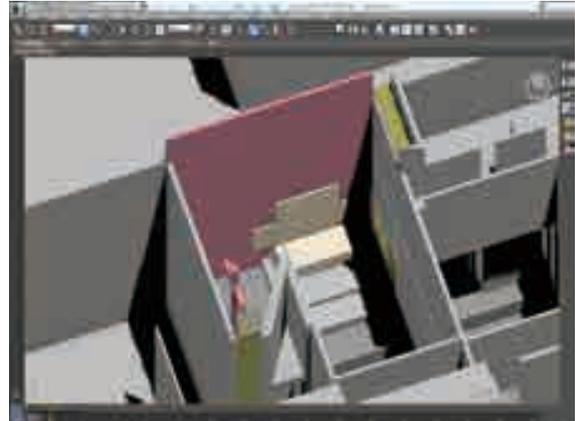


図31 3次元モデル



最終的に完成した3次元のカプチーナス礼拝堂

図32 カプチーナス礼拝堂の3次元モデ

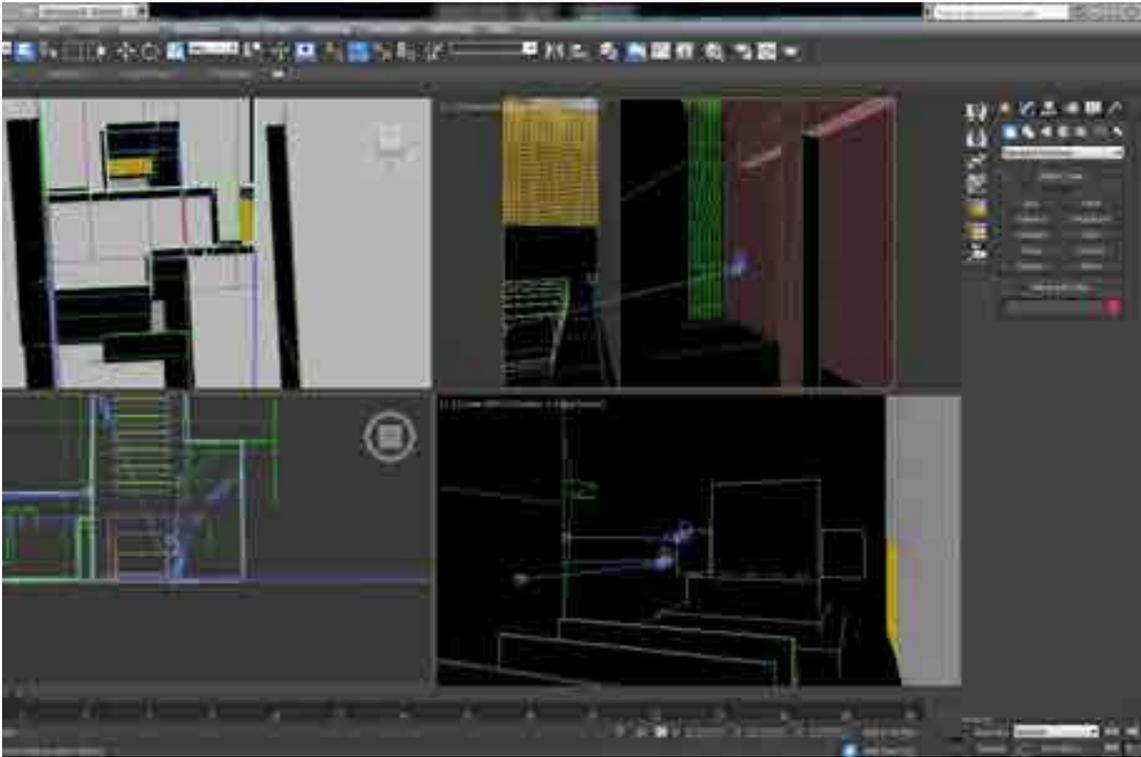


図33 3次元モデル

図34 3次元モデル



図35 3次元モデル

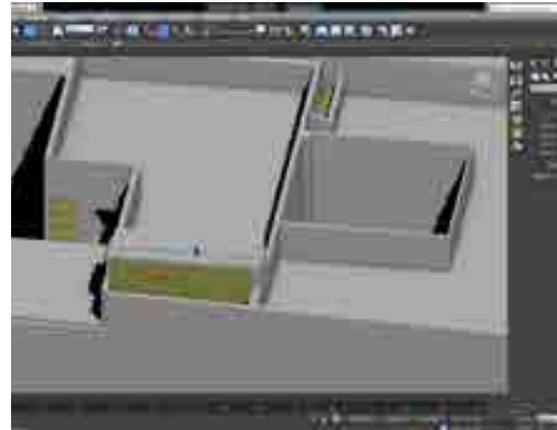
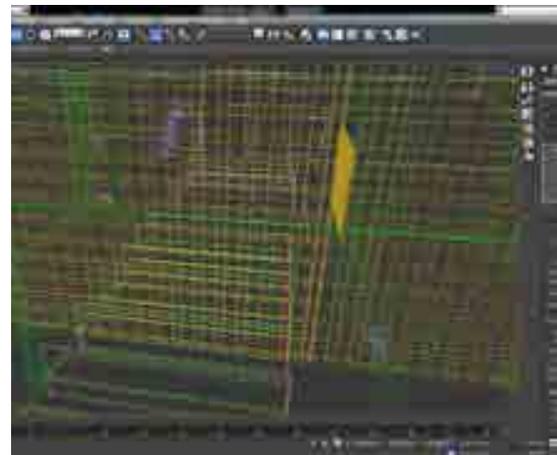
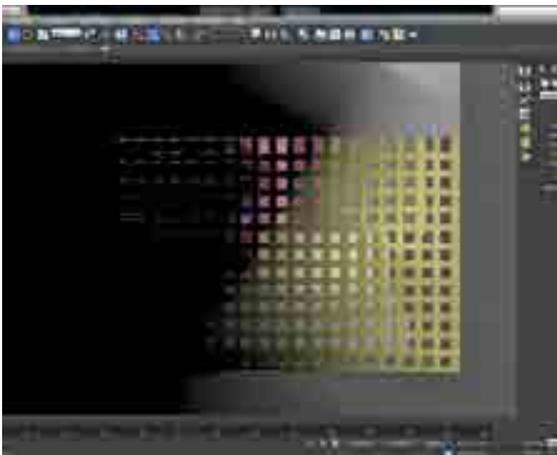


図36 3次元モデル



カプチーナス礼拝堂の3DSMax上のモデリング画像