

## 図形科学的手法による浄土寺浄土堂内の光環境の分析

環境図形科学研究室 坂田 暁洋

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景及び目的

近年、環境に配慮した建築手法として昼光利用が取り立たされている。昼光は省エネルギー効果や心理的影響が非常に大きく利用価値が大いに存在する。人工光のない時代において、太陽や蝋燭の光などの自然に存在するものしか人々は光を用いることを制限され、その時代において、浄土寺浄土堂は、昼光を利用し、極楽浄土の美しさを見事に表現し、宗教的空間を作り上げた建造物として知られている。他の歴史的建造物にはない非常に特異な光環境をもつ浄土堂は、阿弥陀三尊像の後壁部が全面部戸になっており、全て開放することが出来る。この開口部より差し込む光が、床、天井、壁で相互に反射し、三尊像を美しく照らしているのだが、どのようなメカニズムで三尊像に光が届いているのか解明されていない。

西村ら<sup>1)</sup>は昭和55年9月14日頃、堂内の照度値、「鏡面」を用いた光の経路の測定を行い、図1上のように西の開口部より入射する外光が床面で鏡面反射し、化粧屋根裏で再度反射し、三尊像を照らしている。また、最もこの現象の効果が著しいのは16時と推測している。しかし、これは床面の反射特性、外光の入射角度、天井の傾きなどを考慮すると、床面で鏡面反射した外光が三尊像を照らしているとは考えにくい。そこで外光の入射角度に関して予備調査を行い、9月における16時の太陽高度を調べた結果、約25度付近であり、この角度で入射する光は東面の天井には届かないことが確認された。以上より、光の経路を推測すると、図1上のように外光が床面で鏡面反射するのではなく、図1下のように床面

で拡散反射した光が天井へ届きそこで再度拡散反射し、東面天井を照らし三尊像を照らしていると考えられる。

そこで本研究では、この現象の光のメカニズムを解明することを目的とした。この現象の光のメカニズムを解明するには、浄土堂と三尊像を要素とし、相互反射まで含めた分析が必要であるが、何万ポリゴンにもなる三尊像を含めた相互反射計算は不可能である。そこで、時刻変化に伴う相対的な堂内の明るさの分布状況を把握するため、浄土堂、三尊像を表現する簡易オブジェクトで、相互反射計算を含めた光環境視シミュレーション分析を行った。又、阿弥陀如来像前の拝観場所から光線を出し、如来像における最も明るく輝く箇所を鏡面反射させ、三尊像を照らす堂内の場所を特定した。この二つの実験によりこの現象の光のメカニズムを明らかにし、その後、如来像と浄土堂の内部構造に着目し、内部構造と光のメカニズムの相互関係に関して研究を行った。

#### 1.2 浄土寺浄土堂の概要<sup>2,3,4,5)</sup>

鎌倉時代1197年(建久8)、兵庫県小野市に重源上人の設計により浄土寺浄土堂は創建された。浄土堂は、方三間、百八十尺四方、宝形造り、本瓦葺で建てられており、昭和27年3月29日、国宝に指定されている(図2)。堂内中央には、雲形台座の上に高さ5.3mの阿弥陀如来像が立っており、両脇には高さ3.7mの観音菩薩、勢至菩薩が配されている(図3)。浄土堂は一段高くなった丘陵の更に小高い処に建造されており、中心線の角度は真西より約9度北に片寄っている。最も特徴的なのは、三尊像の後壁部が全面開放できる部戸になっていることで、日が西に傾きかけた頃、夕日に輝く美しい西空と宙を舞っているかのような三尊像、組手と化粧垂木に反射した光により赤々と輝く三尊像を拝観することができる。又、この光の現象に影響するのは夕日の直射日光だけではなく、浄土堂の西に位置する溜池に反射した光を取り込んでいるためとも言われている。

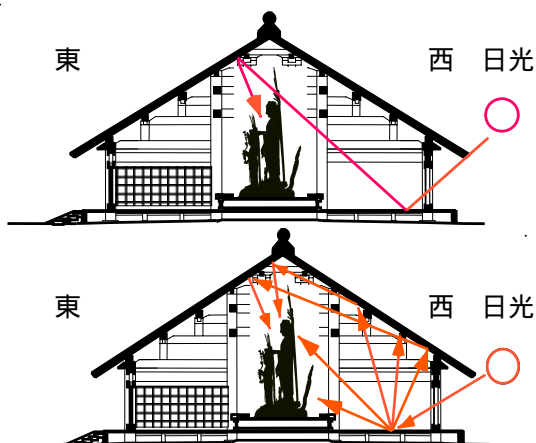


図1 外光の反射経路(上:鏡面反射 下:拡散反射)



図2 浄土寺浄土堂



図3 阿弥陀三尊像

## 2 浄土寺浄土堂におけるシミュレーション

### 2.1 相互反射計算によるシミュレーション

#### 2.1.1 シミュレーション概要

時刻変化に伴う相対的な堂内の明るさの分布状況を把握するため、浄土堂、三尊像を表現する簡易オブジェクトをモデリングソフトウェアで構築し、光束伝達法を用いた光環境予測シミュレーションを行い、堂内の時刻毎の照度分布図を算出した。モデリング及び光環境予測シミュレーションには form・Z ((株) ImageONE 社製) を用いた。シミュレーションで設定した各パラメータ、モデリング、対象空間に関して以下に示す。

計算の簡略化のため、浄土堂に関しては、堂内の柱、梁を省略し、又円柱の柱を直方体に変更、三尊像に関しては、簡易オブジェクトを作成した(図4)。なお、簡易オブジェクトを作成する際に用いたメッシュ化された三尊像は、2004年5月27日、株式会社キャドセンターによりレーザースキャンを使用して作成されたものであり、2.2においても同様のものを用いた(図5)。開口部は、西、南面の部戸と北面の出入り口とした(図6)。堂内の反射率に関しては、壁 0.75、床 0.5、天井 0.7、如来三尊像 0.3、柱及び梁 0.25、如来三尊像の台 0.4、扉 0.25 とした。シミュレーション日時は予備実験で実測を行った日時を採用した(表1)。太陽高度及び方位に関して、兵庫県神戸市(東経 135 度 11 分、北緯 34 度 41 分)での各々の時刻における値を参考にした(表1)<sup>6)</sup>。

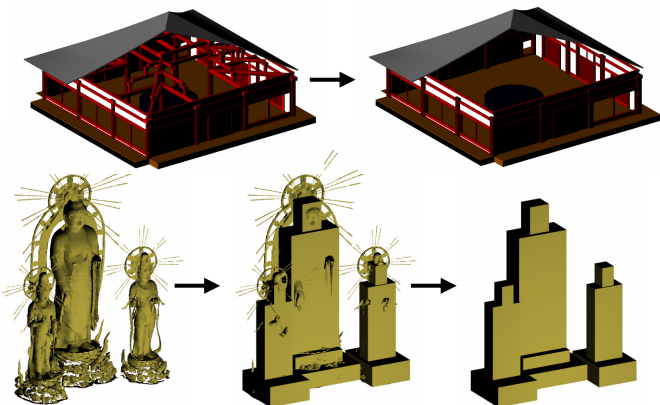


図4 簡略化した浄土堂及び三尊像

表1 シミュレーション日時、方位、太陽高度、直射日射量、天空輝度値

2004年7月27日				
時刻	方位	高度	直射日射量(W/m <sup>2</sup> )	天空輝度値(cd/m <sup>2</sup> )
14:30	253.5	54.6	760	1000
15:30	264.7	42.5	674	1000
16:00	269.2	36.3	610	1000
16:30	273.4	30.1	527	1000
17:00	277.4	24.0	422	1000
17:30	281.2	17.9	289	1000

表2 時刻毎のパッチ数、ポリゴン数、光の反復回数

時刻	パッチ数	ポリゴン数	光の反復回数
14:30	42959	533907	6512
15:30	42967	531367	8032
16:00	42967	535217	8672
16:30	42959	537749	9422
17:00	42967	523139	7802
17:30	42967	508624	7392

方位は北を基準とし、東回りに測ったものである。各々の時刻における相互反射計算の際のパッチ数、ポリゴン数、光の反復回数を表2に示す。パッチとは相互反射計算の際に分割される面で光を放射することができ、ポリゴンとは光の強さを記憶する面を示す。光源の設定に関して、直射日射量はブーゲの式を用いて時刻毎に算出した<sup>7)</sup>。天空輝度値においては全ての時刻において同値と設定した(表1)。なお、ここで設定した天空輝度とは天空光を示し、値は天頂の輝度値である。

#### 2.1.2 シミュレーション結果の分析

天井面における時刻毎の照度分布図を算出した(図8)。時刻変化に伴い、天井面の照度値は16時30分を最大とし、相対的に増加減少していることが分かる。これより、時間が経過するにつれて14時30分から16時30分まで、直射日射量の値は減少しているが、日射角度が小さくなり、西の開口部からの床面への照射量が増加し、堂内が明るくなっていると言える。又、西の天井は下部から上部にかけて照度値が減少しており、東の天井は上部から下部にかけて照度値が減少している。これは床面の拡散反射光が西面の天井へ非常に大きく影響し、その後、東の天井面へ反射している現象であると言える。

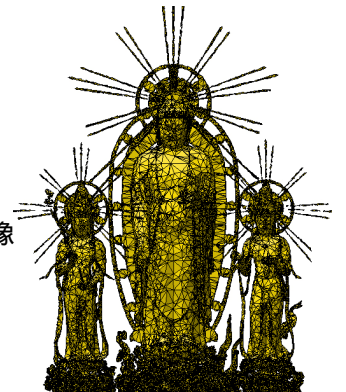


図5 メッシュ化した三尊像 (ポリゴン数約20万個)

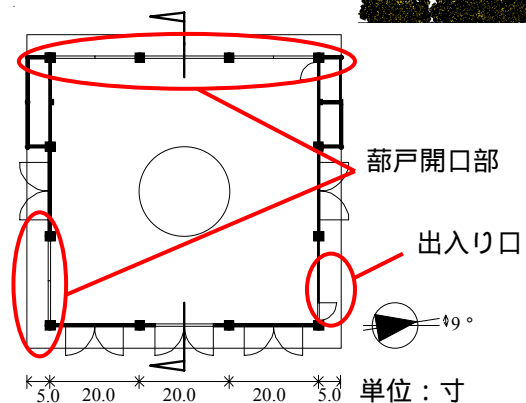


図6 浄土寺浄土堂平面図



図7 浄土寺浄土堂断面図 単位：寸

以上より、西面部戸より入射する外光が室内をどのような経路で流れているか明らかにした。又、これより、三尊像が明るく輝く現象は、西の部戸からの外光が床面へ達し、床面で拡散反射した光が西面の天井下部へ届き、再度、東面の天井上部で反射することによる影響であると推測できる。

## 2.2 フォトンマッピング手法によるシミュレーション

時刻毎の阿弥陀如来像の最も輝く場所に影響する堂内の場所を特定するため、輝度測定地点に点光源を配し、その時刻において最高輝度となる如来像ポリゴンに鏡面反射させた。

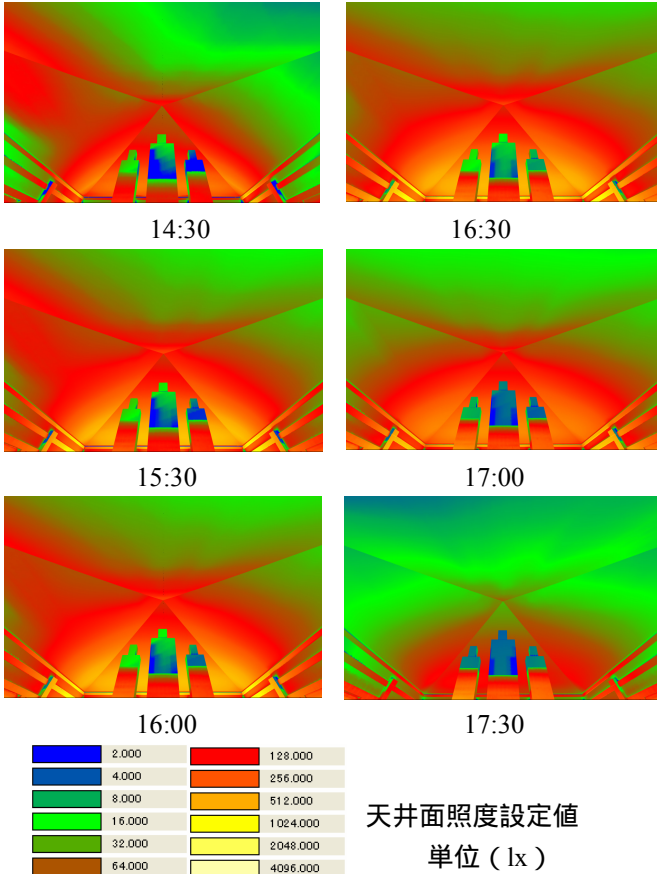


図8 天井面における照度分布図  
(如来像前より西を見上げている)

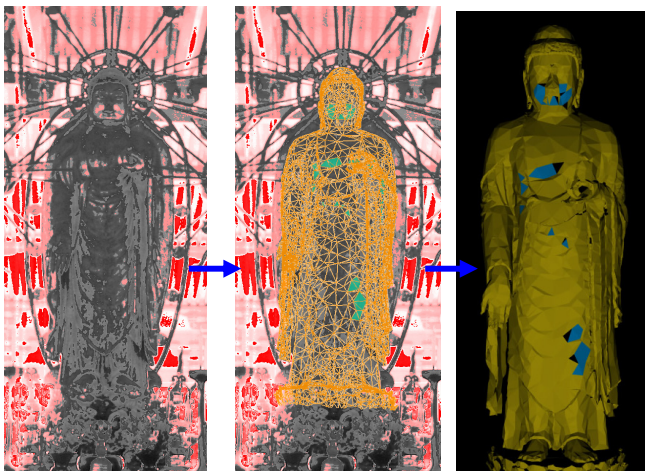


図9 16時の最高輝度値ポリゴン選定図(閾値 6cd/m<sup>2</sup>)

### 2.2.1 如来像における最高輝度ポリゴン選定概要

2004年7月27日において、時刻毎の阿弥陀如来像の最も明るく輝く箇所を選定するため、デジタルカメラを用いて阿弥陀如来像の輝度分布を算出した。算出した輝度分布を基に、時刻毎に如来像の最高輝度となる箇所が選定できる輝度の閾値を設定し、輝度分布図を作成した。そして、得られた輝度分布図にメッシュ化した如来像を重ね合わせ、最高輝度値となるポリゴンの選定を行った。例として16時の閾値及び輝度分布図、輝度分布図にメッシュ化した如来像を重ね合わせた様子、最高輝度値のポリゴンを選定した如来像を図9に示す。

### 2.2.2 シミュレーション概要

輝度測定地点に点光源を配し、2.2.1で得られた選定したポリゴンに鏡面反射させた(図10)。これにより、点光源が放射する光が選定したポリゴンで鏡面反射し、浄土堂のある場所に当たり、その場所で拡散反射し、光による映り込みが出来るのである。空間のモデリング及び光環境予測シミュレーションはPOV-Ray v3.6を用いた。実験対象空間は2.1と同様のものを用い、反射率は全て0.7とした。

本実験において、鏡面反射に用いた手法はフォトンマッピング(photon mapping)で、光の反射や屈折により生じる集光を表現する手法である。光線追跡法や光束伝達法などのレンダリング手法では表現できない、虫めがねやガラスコップを通過する光がガラスの屈折により生じる集光模様や、鏡に反射させた光による映りこみを表現することができる(図11)。

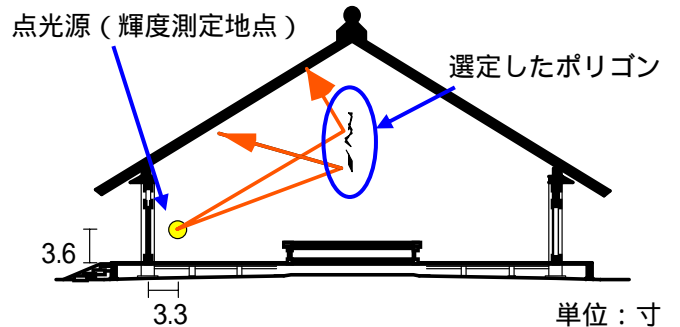


図10 選定したポリゴンの鏡面反射の概略図

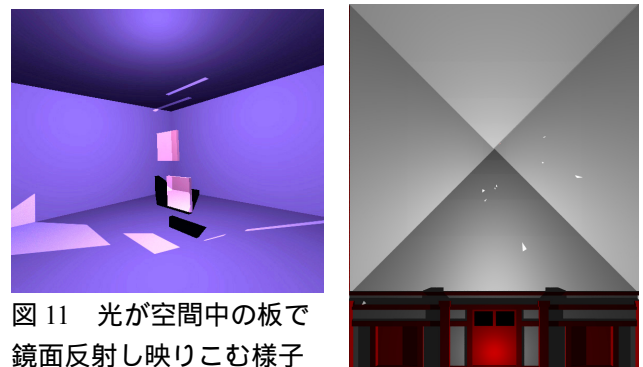


図11 光が空間中の板で鏡面反射し映りこむ様子

図12 16時における東壁面、天井面(天井面は見上げ図)

### 2.2.3 シミュレーション結果の分析

輝度測定地点から光線を出し、各時刻における最高輝度値となる陀如来像のポリゴンに鏡面反射させた結果のうち16時の東面、天井面を図12に示す。図12にて白く光る箇所が、如来像のポリゴンを鏡面反射させ映りこんだものであり、鏡面反射した光が天井上部へ映り込んでいることが分かる。つまり、阿弥陀如来像が最も輝く場所は天井上部による反射光の影響が大きいのである。これより、阿弥陀如来像が輝く現象へ寄与している堂内の場所は天井上部であると言える。

## 2.3 天井の傾斜角度変化によるシミュレーション

### 2.3.1 シミュレーション概要

2.1、2.2より、三尊像が輝く現象は天井の反射光の影響が大きいことが確認された。故に、三尊像と浄土堂の内部構造に着目し、内部構造と光のメカニズムの相互関係を検証するため、天井の傾斜角度変化による、簡易ポリゴンにおける如来像顔部の照度の変化を検証した。対象空間、モデリング、光環境予測シミュレーションは2.1と同様のものを用いた。2.1.2より堂内の相対的照度値が最も高い16:30にて実験を行った。

現状の傾斜角度は約30度であるので天井の頂点を固定し、傾斜角度0度、10度、20度、30度の4パターンで検証した(図13)。シミュレーションの際の設定は表3に示す。

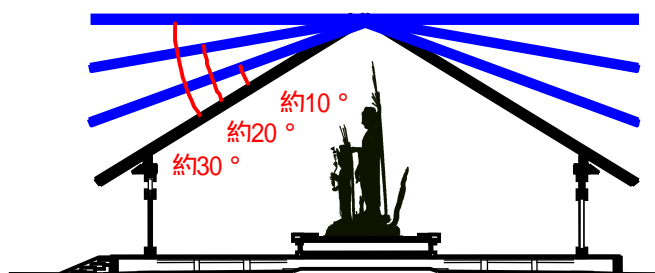


図13 天井の傾斜角度変化図

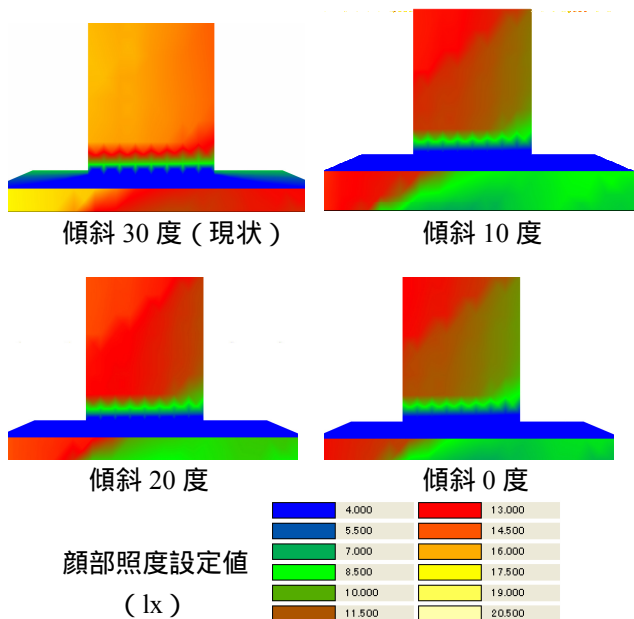


図14 阿弥陀如来像顔部における照度値

### 2.3.2 シミュレーション結果の分析

天井の傾斜角度変化による、簡易ポリゴンにおける如来像顔部の照度分布図を図14に示す。これより、天井の傾斜角度が小さくなるにつれて顔部の相対的照度値が減少していくことが確認された。つまり、浄土堂において、天井の傾斜角度が比較的大きいのは三尊像に光を取り込むためと推察できる。

## 3 まとめ

本研究では、阿弥陀如来像に影響を及ぼす光のメカニズムを明らかにすることを目的とし、時刻変化に伴う相対的な堂内の明るさの分布状況を把握し、又、如来像における最も明るく輝く箇所に寄与する堂内の場所を明らかにした。その後、天井の傾斜角度を変化させ、如来像顔部における明るさの変化を検証した。

各シミュレーションの分析結果をまとめると、阿弥陀三尊像後方の西の部戸からの入射光により三尊像が朱色に美しく照らされる現象は、外光が床面で拡散反射し、西の天井下部に届き、その光が東の天井上部を照らし、そこで再度反射した光によるものであると言える。また、浄土堂の天井の勾配が比較的大きいのは三尊像に光を取り込むためであると推察される。

更なる研究の進め方として、この現象に影響を及ぼす要因である、浄土堂の配置、内装の反射特性、開口部の大きさ、太陽方位、太陽高度などのパラメータを変化させた場合、光の現象にどのような変化が生じるのか検討することで、この浄土堂が全て計算の上で建造されたものであるのか解明するのに非常に有効である。また、この現象が浄土堂西に存在する溜池による反射光と関連があるのかどうかということも含めて研究を行う必要がある。

表3 各傾斜角度によるシミュレーション設定

傾斜	パッチ	ポリゴン	光の反復回数
0°	50983	624055	11161
10°	48321	600118	10142
20°	46499	585194	9371
30° (現状)	42959	537749	9422

### 参考文献

- 1) 西村公朝、前野堯、石川陸朗、山崎隆之、川田伸紘、熊田由美子、富沢威、矢野健一郎、佐久間博、渡辺義顕：浄土寺阿弥陀三尊像とその視覚的環境について 東京芸術大学美術学部紀要 第17号 1982年3月
- 2) 小林亨 移ろいの風景論：五感・ことば・天気 鹿島出版会 1993
- 3) 磯崎新 重源という問題構制 建築における「日本的なもの」新潮社、2003
- 4) 毎日新聞社 阿弥陀三尊 兵庫・浄土寺浄土堂 / 小川光三写真 (魅惑の仏像 / 小川光三写真 ; 20) 1987
- 5) 小野市ホームページ <http://www.city.ono.hyogo.jp/>
- 6) 国立天文台ホームページ <http://www.nao.ac.jp/>
- 7) 国立天文台編 理科年表 2000 丸善 1999