

反射を考慮した日照量計算手法の評価

寺前 早苗^{†1} 石川 千里^{†1}
高田 雅美^{†1} 城 和貴^{†1}

本稿では、レイトレーシング法の光線追跡を利用した日照量算出の一手法を、実際の都市データに適用した実験結果について述べる。各建造物における総照射量や直接光・反射光別の照射回数を1時間ごとに1日分算出し、太陽方向や建造物の位置関係などによる違いを確認する。また、毎月1日における1日の総照射量を1年分調べることで、季節による日照量の違いについても確認する。なお、実験に使用したデータは、2値化された地図画像から日照量算出手法に適したデータ形式に変換したものであり、その変換手順についても述べる。

Evaluation of Insolation Calculation with considering Reflection

SANAE TERAMAE,^{†1} CHISATO ISHIKAWA,^{†1}
MASAMI TAKATA^{†1} and KAZUKI JOE^{†1}

In this paper, we report the experimental result where we apply the routine to calculate the amount of sunlight using ray tracing to real buildings data. We calculate the amount of sunlight and irradiation frequency of direct or reflect light every hour, and confirm the difference by sun direction and buildings position. We also calculate them every month, and contrast the difference by season. In addition, we introduce a method that converts binarized map images into the data format for calculation of insolation.

^{†1} 奈良女子大学大学院 人間文化研究科

Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University

1. はじめに

自然エネルギーである太陽光エネルギーの利用に関心が高まっている。特に、太陽光エネルギーを利用した発電は発電時に大気汚染物質などを排出せず、枯渇が心配される化石燃料に変わる新たなエネルギーとして、様々な国で導入が進んでいる。近年では、採光性があり、窓ガラスに設置することができる発電モジュールも開発され¹⁾²⁾、設備の多様化と共に、今後さらなる利用増加が期待される。しかし、発電設備が高額であると共に、他の発電方法に比べてエネルギー変換効率が低いことが欠点として挙げられる。また、発電モジュールにかかる影は発電量低下を招く大きな原因になっており、効率よくエネルギーを発電するためには、モジュール設置範囲に対する日照量をあらかじめ知っておくことが重要であると考えられる。そこで、発電量予測シミュレーション³⁾が必要となる。しかし、既存の発電量予測シミュレーションは、算出対象範囲が県単位や主要な都市単位であるなど、比較的広い範囲を対象としており、周囲の物体による影などの影響は考慮されていない。一方、我々は、周囲の建造物による光の遮蔽・反射を考慮し、より正確な日照量算出を目的とする計算手法を提案した⁴⁾。この手法では、部分的な照射に対応するために、建造物形状を複数のボクセルで表現するデータ構造を採用し、各ボクセルにおける照射判定をレイトレーシング法の光線追跡を利用して行う。本稿では、この手法を実際の都市データに対して適用する。また、その適用結果を基に、提案手法の有効性を検証する。なお、2値化された地図画像から、本手法に必要なデータを得る手順についても説明する。

2章で、反射を考慮した日照量計算手法における照射判定の手順と、それに適したデータ構造について述べ、3章で、2値化画像から日照量計算に用いるデータを得る手順について説明する。4章では、本研究で行った実験手順について述べ、その結果について考察する。最後に、5章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 反射を考慮した日照量計算手法

本章では、2.1節で、本稿で適用する反射を考慮した日照量計算手法における照射判定の手順について説明し、2.2節で、その手法に適したデータ構造について述べる。

2.1 照射判定の手順

照射判定には、レイトレーシング法の光線追跡を利用する。太陽光線をベクトルとして表現し、このベクトルを起点から伸ばした結果、他の物体に衝突するかどうかを基本的な判定基準とする。

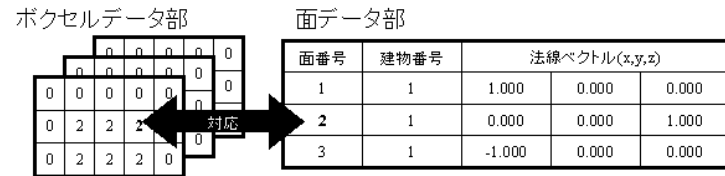


図1 データ構造

太陽光ベクトルを伸ばす起点は、建造物の壁面部分であるボクセルである。まず、起点とするボクセルから太陽方向へとベクトルを伸ばす。このベクトルが他の壁面ボクセルに衝突した場合、太陽光線が他の物体により遮蔽されたと判断する。つまり、起点とするボクセルには直接光が照射しないと判断し、次の壁面ボクセルへと処理を移す。太陽光線が他の物体に衝突しなかった場合、起点とするボクセルには直接光が当たると判断し、続けて反射光の照射判定に移る。初めに起点とした壁面ボクセルに対する法線ベクトルから、反射光ベクトルを計算し、その方向へとベクトルを伸ばしていく。ここで、この反射光が他の物体に衝突した場合、衝突先には反射光が照射すると判断する。衝突しなかった場合、この起点からの反射光はどこにも照射しなかったとして、処理を終了する。

2.2 シミュレーションに適したデータ構造

照射判定に必要な情報は、3次元空間における各成分が建造物の壁面部分であるのか、または空間部分であるのかを表す判別番号、壁面の法線ベクトル情報、各壁面が属する建物番号・壁面番号である。

判別番号は、全てのボクセルに必要な情報である。一方、法線ベクトルなどの壁面の詳細情報は、同一壁面を表す複数のボクセルで共有可能であり、全てのボクセルに与える必要がない。そこで、判別番号のみを格納したボクセルデータ部と、壁面の詳細情報を格納した面データ部とに分けて保存する。図1は、ボクセルデータ部と面データ部に分けて保存した建造物データの例である。

ボクセルデータ部に与える判別番号の値は、壁面部分には面番号、空間部分は0とする。面データ部には、各面が属する建物番号と、各面の法線ベクトルを格納し、面番号順に保持する。この面データは、日照量算出範囲に含まれる総壁面数と同じ数だけ用意する。このように必要な値のみでのデータ構造にすることで、データの軽量化を図っている。



(a) 2値化された地図画像 (b) 得られたボクセルデータ

図2 実験に用いた2値化画像とボクセルデータ

3. 建造物データへの変換

本章では、2値化された地図画像から、日照量計算に必要なデータを得るための変換手順について提案する。図2は、本実験のために用意した2値化画像と、以下に述べる手順で得られたボクセルデータを可視化したものである。

- (1) 2値画像の読み込み
- (2) 輪郭線抽出
- (3) 頂点抽出
- (4) 側面生成
- (5) 上面生成

まず、手順(1)で、建造物の形状を表す2値化画像を読み込む。この画像はあらかじめ地図画像などに前処理を施して用意する。

手順(2)では、手順(1)で読み込んだ2値化画像における建造物の輪郭線追跡を行い、追跡開始点からの連結方向配列 $d(k)$ として保持する。図3は、この処理に用いる連結方向番号と、連結方向配列の設定例について示したものである。まず、画像の左上の画素から順に横に走査し、初めに衝突した黒画素を追跡開始点 P_0 とする。次に、 P_0 を中心として時計回りに周囲の画素を探索し、初めに会った黒画素を P_1 とする。この時、 P_0 に対する P_1 の位置を、連結方向番号を用いて保存する。図3(a)は、探索順序及び連結方向番号について表したものである。次に、 P_1 を新たな追跡点として周囲の画素を調べ、初めに会った

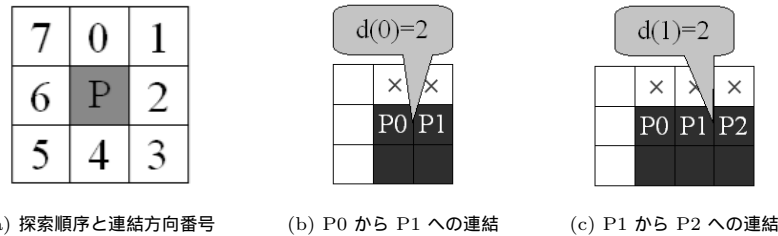


図 3 連結方向番号, 連結方向配列の設定例

黒画素を P_2 とする．ここで, P_1 に対する P_0 の位置に 1 を加えた番号から調べることによる．図 3(b) は, 連結方向番号を用いて P_0 から P_1 への連結を設定した例である．この例において, P_0 の周囲を探索順序 0 番から順に探索した結果, 初めに出会う黒画素 P_1 は 2 番の位置にある．よって, 追跡開始点からの連結方向配列の 1 つ目として $d(0) = 2$ を与える．図 3(c) は, 連結方向番号を用いて, P_1 から P_2 への連結を設定した例である． P_0 に対する P_1 は 6 番の位置にあるため, P_1 を中心とした探索は 7 番から始める．探索の結果, 初めて出会う黒画素 P_2 は, P_1 に対して 2 番の位置にあるため, 連結方向配列の 2 つ目として $d(1) = 2$ を与える．以上のように, 新たな追跡点と連結方向配列の設定を繰り返し, 追跡点が P_0 と一致すれば輪郭線追跡を終了する．

手順 (3) では, 手順 (2) で得られた連結方向配列を利用して, 頂点の座標を得る．連結方向配列 $d(k)$ において以下の式のどちらかを満たす時, 該当する輪郭線上の点を建造物形状の頂点とする．

$$\begin{cases} |(d(k) - d(k-1)) \bmod 8| \geq 2 \\ |(d(k) - d(k-1)) \bmod 8| \geq 1 \cap d(k-1) \neq d(k+1) \end{cases}$$

手順 (4) では, 手順 (2) で得られた連結方向配列と手順 (3) で得られた頂点情報を利用して, 指定した高さを持つ壁面を生成すると共に, 各面の法線を設定する．手順 (3) で得られた頂点情報は, 追跡開始点からの連結方向配列を利用して生成しているため, 建造物の形状に沿って順に並んでいる．そのため, 頂点情報を得られた順番通りに 2 つずつ選ぶことで, その 2 点間に存在する壁面の法線情報の計算に用いることが出来る．まず, 1 つ目の頂点を始点とし, 連結方向配列を用いて輪郭線上を走査する．各点において該当するボクセルデータに, 面番号を格納する．この時, 指定した高さまで y 座標の値を増やしなが

場所	東京・新宿駅周辺
緯度	北緯 35.69
経度	東経 139.70
範囲 (メートル)	190 × 190
画像サイズ (ピクセル)	820 × 820
ボクセル数	205 × 50 × 205
建物数	65
総面数	434

し格納する．2 つ目の頂点に達するまで格納し終わったら, 法線の設定をする．選んだ 2 頂点と, 2 つ目の頂点の y 座標を建造物の高さに設定した点, 以上の 3 点から面の法線ベクトルを計算し, 面データ部に格納する．これらの処理を, 新しい頂点に出会う度に面番号を増やしなが

り行う．手順 (5) では, 手順 (2) で得られた連結方向配列を利用して建造物上面の輪郭線を描いた後, 上面の塗りつぶし処理を行う．塗りつぶしにはスキャンライン・シード・フィルアルゴリズム⁵⁾を利用する．なお, 上面の法線ベクトルは $(x,y,z)=(0,1,0)$ とする．

手順 (5) 終了後, 手順 (2) に戻り, 新たな追跡開始点を見つける．これを繰り返し, 画像内の全ての建造物に対して処理を行う．

4. 実 験

本章では, 本研究で行った実験について述べる．4.1 節で, 行った実験手順について説明し, 4.2 節で, その実験結果を示す．なお, 実験は, CPU が Intel(R) Xeon(TM) CPU 3.00GHz, メモリが 1GB であるパソコンを使用して行う．

4.1 実験手順

3 章で得られた建造物データを用いた日照量計算の実験手順について説明する．

1. 建造物データの読み込み
2. 太陽光ベクトルの設定
3. 照射判定 (法線ベクトルによる判定)
4. 照射判定 (直接光)
5. 照射判定 (反射光)

まず, 手順 1 で, 用意した建造物データを読み込む．本実験で用いたデータの詳細は表 1 の通りである．

手順 2 では、日時・緯度・経度をパラメータとして太陽方向ベクトルを計算する⁶⁾。まず、元旦からの通し日数 d_n を用いて、以下の式から θ_0 を定める。

$$\theta_0 = 2\pi(d_n - 1)/365$$

次に、 θ_0 を用いて、太陽赤緯 δ 、均時差 E_q を求める。

$$\delta = a_0 - a_1 \cos(\theta_0) + a_2 \sin(\theta_0) - a_3 \cos(2\theta_0) + a_4 \sin(2\theta_0) - a_5 \cos(3\theta_0) + a_6 \sin(3\theta_0)$$

$$E_q = b_0 + b_1 \cos(\theta_0) - b_2 \sin(\theta_0) - b_3 \cos(2\theta_0) - b_4 \sin(2\theta_0)$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.006918 \\ 0.399912 \\ 0.070257 \\ 0.006758 \\ 0.000907 \\ 0.002697 \\ 0.001480 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.000075 \\ 0.001868 \\ 0.032077 \\ 0.014615 \\ 0.040849 \end{pmatrix}$$

経度 λ 、均時差 E_q 、日本標準時間 JST から、太陽の時角 h を求める。

$$h = (JST - 12)\pi/12 + \lambda + E_q$$

以上で得られた値と緯度 ϕ から、太陽方位 ψ 、高度 α を求める。

$$\alpha = \arcsin(\sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(h))$$

$$\psi = \arctan(\cos(\phi)\cos(\delta)\sin(h) / (\sin(\phi)\sin(\alpha) - \sin(\delta)))$$

本稿では、1 時間ごとの日照量算出を行う実験のみ取り扱うこととする。つまり、パラメータである時間を 1 時間ずつ進めながらその都度太陽方向を計算し、高度が 0 度以上になる場合のみ、手順 3 以降に進む。なお、手順 3 以降は、壁面部分であるボクセルに対してのみ行うものである。

手順 3 では、手順 2 で設定した太陽光ベクトルと、対象ボクセルの法線ベクトルとの積と差を利用した照射判定を行う。建造物の内部から対象壁面へ向かう照射方向である場合、つまり、太陽光ベクトルが壁面の裏側から照射するような方向である場合、この時点でそのボクセルには直接光が当たらないと判断することができる。そこで、太陽光ベクトルと法線ベクトルの各成分について積をそれぞれ計算した結果、1 つでも負であるものがあり、かつ、法線ベクトルが 0 でない成分において、太陽光ベクトルの成分との差が 0 でないかどうかを調べる。この条件に合うボクセルについてのみ、以降の処理に移ることとする。

手順 4・手順 5 では、2.1 節で述べた計算手法を用いて、対象ボクセルに対する直接光・

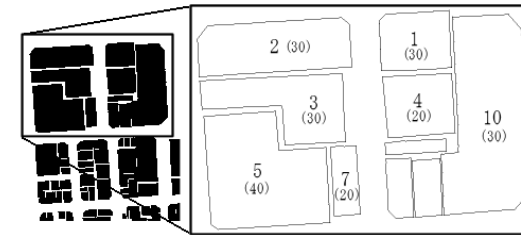


図 4 建物番号と高さ

反射光の照射判定を行う。なお、本稿で行った実験では、2 回反射した光までを扱うこととする。つまり、初めて計算された反射光の照射先ボクセルを新たな起点として、再び反射光を計算し、2 つ目の反射光の照射先についても調べる。本実験では、日照量として、直接光の照射先ボクセルには 100、第 1 反射光では 50、第 2 反射光の照射先では 20 を加算する。

手順 5 終了後、手順 2 に戻り、新たな太陽方向の下での日照量算出を行う。これを繰り返して、全ての時間において処理し終わったら、終了する。

4.2 結果

実験を行って日照量を得られた計 65 個の建造物の内、本稿では図 4 に示す 7 つの建造物について比較した結果を述べる。図 4 における数字は各建造物の建物番号であり、括弧内の数字は高さを表している。数字が示されていない建造物の高さは、全て 20 とする。

4.2.1 では 1 日を通して、4.2.2 では 1 年を通しての照射量と照射回数算出結果について述べる。4.2.3 では、実験に要した実行時間について述べる。

4.2.1 1 日を通しての照射量の違い

図 4 に示した建造物において、1 月 1 日の日照量を算出した実験の結果を述べる。この実験では、日の出後の午前 7 時から日の入前の午後 4 時までの間、1 時間ごとに日照量計算を行っている。図 5 は、各建造物における時間ごとの照射量を表したグラフである。

図 5(a) は、各時間ごとの総照射量について比較したものである。この図より、上面部分の面積が大きい 5 番と 10 番に多く照射していることがわかる。

図 5(b) は、各建造物の側面への照射量のみを取り出した結果の中で、特徴が見られる 1・2・5・10 番の建造物について比較したものである。10 番のグラフにおいて午前中が多く午後が少ないのは、この建造物が東側に位置するため、午前中に東からの照射を受けているからであると考えられる。他のグラフも同様に、建造物の位置が影響していると思われる結果となった。5 番のグラフが 10 番と比べて反対の結果を示していることや、2 番の値が午後

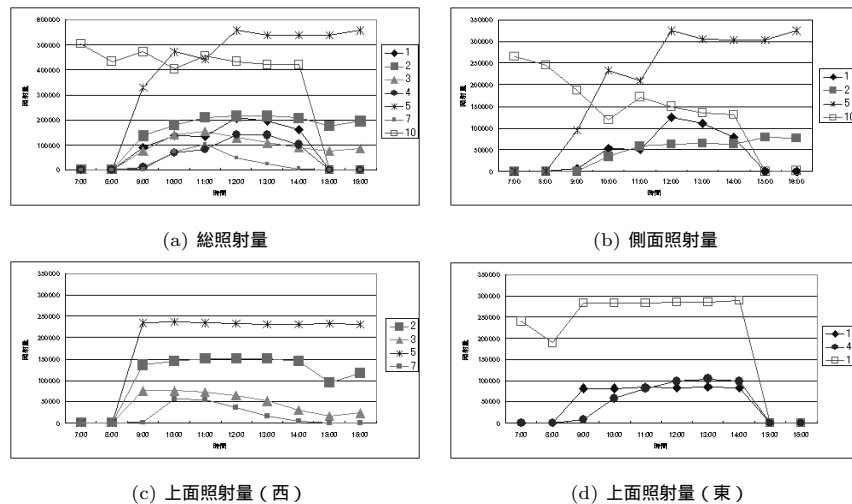


図5 1月1日における1時間ごとの照射量

かけて増えているのも、午後に発生する西からの光を受けているためと考えられる。1番の値は、午前から昼にかけて増加し、午後になるにつれて減少している。これは、1番が2・3・4・10番に囲まれた位置にあるため、建造物郡中央の南北の道路により光が差し込む時間帯に、多く照射していることを表している。

図5(c)において、5番の照射量が多いことが分かる。この理由として、5番の高さが最も高く設定されており、他の建造物による光の遮蔽を受けていないことと、他の建造物と比べて上面の面積が広いことが挙げられる。一方、2番と3番のグラフを比べると、午前と午後で同じような推移をしているものの、2番の方が全体的に照射量が多い。これは、2番と3番の建造物の高さは共に同じであるが、3番は、自身より高く南側に隣接する5番によって光の遮蔽の影響を多く受けているためであると考えられる。7番についても同様に、5番による光の遮蔽により、午後の日照量が減少しているものと思われる。

図5(d)においても、10番の照射量が多いのは上面の面積が多いためであると考えられる。一方、上面の面積がほぼ同じである1番と4番のグラフを比べると、午前9時の結果を除いてほぼ同じ照射量である。午前9時において4番の方が照射量が少ない理由として、隣接する10番に高度の低い太陽光線が遮られたことが考えられる。

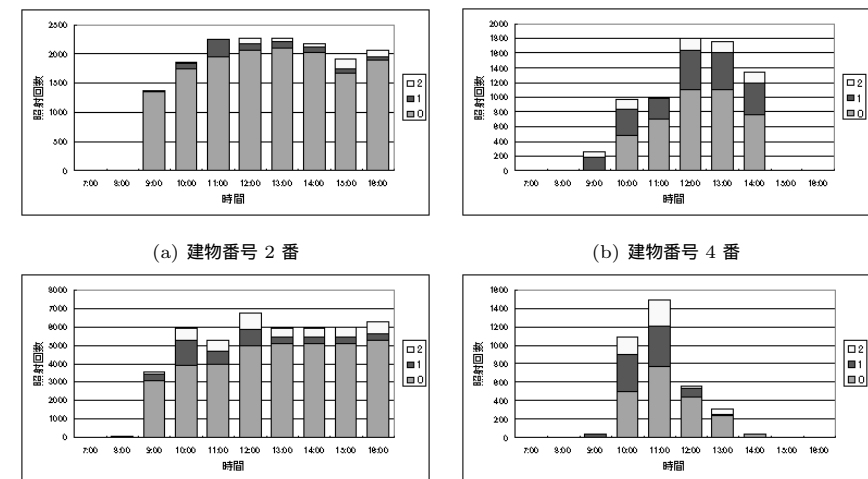


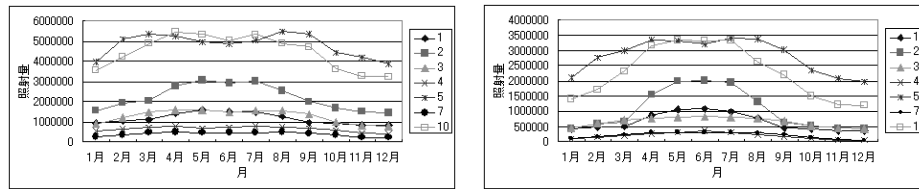
図6 1月1日における反射回数の違いによる照射回数

図6は、建物番号2・4・5・7番の建造物における反射回数別の照射回数を、時間ごとに表したものである。図の0は反射回数0回、つまり直接光の照射回数を表し、1及び2は、第1反射光及び第2反射光の照射回数を表している。図より、4・7番の建造物は2・5番の建造物に比べ、総照射数に対する反射光の照射回数の割合が高いことがわかる。これは、4番と7番の建造物がそれぞれ周囲の建造物より低く、上面において反射光を受けやすい位置関係であるためと考えられる。特に、4番の午前9時においては、反射光のみの照射となっている。図5の説明でも述べたように、この時間は10番の建造物により直接光が遮られていると考えられるが、このグラフから、周囲の建造物による反射光を受けていることが分かる。

4.2.2 1年を通しての照射量の違い

期間を1年間に設定した日照量算出実験の結果を述べる。この実験では、毎月1日について日の出から日の入までの間の各時間0分の時点を対象にして、1時間ごとに日照量計算を行っている。

図7は、毎月1日における総照射量と側面への照射量を月別に示したものである。図7(b)によると、建物番号2・5・10番の側面における日照量が、6月をピークにして大きく変化



(a) 総照射量 (b) 側面照射量

図7 毎月1日における月ごとの照射量

しているのがわかる。本実験では、算出対象日の日の出から日の入までを計算するため、夏至を含む6月付近と冬至を含む12月付近では算出回数異なる。また、2・5・10番は、算出対象範囲内の建造物の中で外側、特に東端と西端に位置している。そのため、これらは日の出・日の入付近の時間帯での日照量計算において側面部分に多くの日光を受けた計算結果であると考えられる。実際の都市では、ボクセルデータ化した範囲の外にも建造物郡があると考えられるため、外側に位置する建造物に関しては適正な結果が得られないことが予想されるが、日照量を得たい建造物を中心に配置した都市データを作成することで回避できると考える。

図8は、毎月1日の正午における上面照射量について、月ごとに表したグラフである。南中時刻に近い正午では、太陽光は上面のほぼ真上から照射すると予想される。このグラフのように、上面の日照量は年間を通してあまり変化がない。例外として、3番の建造物は季節による差が生じていることがわかる。これは、南中時刻でも太陽高度が低い冬の時期において、3番に隣接する5番による光の遮蔽が発生したことが主な理由であると考えられる。

4.2.3 実行時間

各実験に要した実行時間について述べる。

1時間分の日照量算出に要した平均時間は約3分であり、1日分では約40分、1年分では約8時間であった。この時間の多くは、照射判定処理内でベクトルを少しずつ伸ばしながら衝突判定を行う処理に関係している。照射判定は起点ボクセルごとに独立しているため、今後、並列処理などの工夫をすることにより、時間短縮が見込まれる。

5. まとめと今後の課題

光の反射を考慮した日照量計算手法を、実際の都市データに適用し、その性能を実験によ

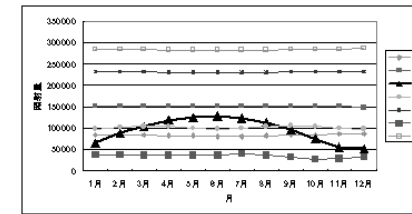


図8 毎月1日の正午における月ごとの上面照射量

り評価した。また、実験に即して、2値化された地図画像から必要なデータを得る変換処理を行った。得られたデータを用いて、1日、1年の期間を設定した日照量算出実験を行った。算出期間を1日とした実験結果から、時間や建造物の位置関係による、日照量や反射光の照射回数の違いについて確認した。算出期間を1年した実験により、正午における上面の照射量の推移を調べた結果、周囲の建造物による光の遮蔽の影響を受けている箇所を確認した。

今後の課題としては、都市データの取得方法の検討と、実行時間の短縮が挙げられる。本稿で述べた手順は、生成する建造物の側面の形状を、長方形に限定するものである。複雑な形状の建造物への対応や、各壁面の反射率などを考慮するために、2値画像以外の情報の利用が必要となる。実行時間の短縮については、レイトレーシング法の高速度手法の適用や、照射判定処理を並列計算させることで、処理速度の向上に繋がると考えられる。

参考文献

- 1) シースルータイプ薄膜太陽電池, シャープ株式会社:
<http://www.sharp.co.jp/kameyama/eco/solar/seethru.html>
- 2) 三菱公共・産業用太陽光発電システム, 三菱電機株式会社:
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/taiyo/sangyo/index.htm>
- 3) 住宅用ソーラー発電シミュレーション, 京セラ株式会社:
<http://www3.kyocera.co.jp/solar/app/simu/hp/step1.html>
- 4) 樽井沙知, 芳野裕子, 寺前早苗, 石川千里, 高田雅美, 城和貴: 反射を考慮した日照量計算の一手法, 情報処理学会数値モデル化と問題解決研究会, MPS08-72, pp.45-48, 2008.
- 5) ペイント・ルーチン:
<http://fussy.web.fc2.com/algo/algo3-1.htm>
- 6) 太陽方位, 高度, 大気外日射量の計算:
http://www.es.ris.ac.jp/~nakagawa/met_cal/solar.html