

# 修士論文

南極地域におけるペネトレータ観測システム維持のための  
太陽光発電の検討

Consideration of Solar Power Generation for Maintaining Penetrator  
Observation System in Antarctic Region

---

## 報告者

学籍番号：1265035

氏名：山本 耕大

---

## 指導教員

山本 真行 教授

---

令和6年3月1日

高知工科大学大学院工学研究科  
基盤工学専攻航空宇宙工学コース

# 目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	ペネトレータについて	2
第2章	理論式の構築	4
2.1	求めたい日射量の式	5
2.2	太陽位置	5
2.3	大気減衰を受けた日射量の式	8
2.4	観測点の太陽光パネルに入射する日射量の式	11
2.5	太陽光パネルと入射光との内積関係	14
2.6	太陽光パネルでの瞬間発電量の式	16
2.7	太陽光パネルでの発電量の式	18
2.8	太陽光パネルの搭載による観測期間	18
第3章	観測期間の計算結果	19
3.1	計算値と観測値との差	19
3.2	昭和基地における角度と反射を考慮した日射量の変化	22
3.3	昭和基地におけるペネトレータの運用期間	24
第4章	吟味と検討	26
4.1	計算値と観測値との差	26
4.2	観測期間の検討	28
第5章	結論と今後の展開	33
5.1	結論	33
5.2	今後の展望	33
	謝辞	35
	参考文献	36
付録 A	係数表	39

# 第 1 章 序論

## 1.1 背景

近年の宇宙開発は、月や火星への有人探査を目指す計画が現実味を帯びてきた。有人探査を行うには、対象惑星の環境を把握する必要があるが、現在、多くの探査機や人工衛星を送り込む科学探査が計画されており、実際に探査機を送ったミッションもある。(直近では、JAXA の「SLIM」 [1] NASA の「OSIRIS-REx」 [2] などがある。) その様々な計画の中でも、宇宙科学研究所が 1980 年代から研究開発を行っており、ペネトレータを使った日本の独自性が高いハードランディング計画に興味を持った。

月・火星に着陸する際に用いられる方法として、ソフトランディングとハードランディングの二通りの方法がとられている。ソフトランディングは、十分に減速してから、着地時の衝撃を和らげて安全に着陸する方法であるが、ハードランディングは減速をあまり行わず探査機を惑星にぶつけるようにして着陸させる方法である。ハードランディング方式の一種であるペネトレータは、ソフトランディングと比較して、全体重量を削減できること、到達困難地域 (Unmanned-Place) に観測機器を無人で設置できること、複雑なソフトランディングシステムによる工学的リスクに比べ低リスクで設置可能などのメリットがある。しかし、デメリットとして探査機を惑星表面に衝突させることから、非常に高い衝撃性を有する着陸であり、搭載機器を安全に着陸させるための技術的ハードルが高いことがいえる。このような特徴からも、日本の LUNAR-A 計画 [3] や海外では DS-2 ミッション [4] などでペネトレータを使用した月・火星ミッションが準備されたが、これまで、観測・探査が成功した例はない。しかし、これらの計画は 20 年以上前の計画であり、現在は、電気電子回路技術等も発達したことでシステムとして成熟しており、ペネトレータを惑星・衛星探査に再び使用する価値は大きく高まっている。著者が、本研究に取り組むきっかけとなった出来事は、修士 1 年次に、第 64 次南極地域観測隊 (Japanese Antarctica Research Expedition 64th: JARE64) に同行者として参加し、ペネトレータに触れ、昭和基地付近で、地震波およびインフラサウンド (超低周波音) のデータ取得を行ったことがきっかけである。このうちインフラサウンドセンサは著者の所属研究室が提供した。多種の着陸探査機をシステムとして完成させるには、多くの要素開発を達成しなければならない。例えばローバのような車輪が必要な探査機であれば、車

輪だけでも対象惑星の探査のために多くの技術要素を達成する必要がある。しかし、ペネトレータは、一度システムを完成させ、搭載機器への技術ハードルを達成すれば、高い拡張性から観測が容易に展開できるという利点がある。

## 1.2 目的

現在のペネトレータの観測システムには、1次電池を使用しており、短期間の観測のみしか達成できていない。しかし、搭載する観測機器の要求によっては、長期間の観測を行う必要が出てくる。この要求を現在のペネトレータは満たすことが出来ない。このことから、本研究では、システム維持のための太陽光発電の可否を数値計算によって判断し、ペネトレータの観測可能期間を定量的に評価することが目的である。数値計算で観測可能期間の検討を行うのには、ペネトレータの設置方法に理由があり、Unmanned-Place に設置する都合上、日射量の観測を行うことが難しく、設置後に電池交換などシステム維持のメンテナンスが出来ない。そのため、数値計算によって日射量を定量的に示すことが必要である。本論文では、数値計算のために、理論構築を行い(2章)、その結果を気象庁 [5] の観測値と比較し、月別日射量について比較した(3章)。その後、昭和基地におけるペネトレータの太陽光パネルの有無による運用期間の検討を行った。(4章)。

## 1.3 ペネトレータについて

ペネトレータとは、鉛筆形状をしたアルミニウムで構成されている容器である(図1.1)。特筆すべき特徴は1.1節で挙げた通りである。ここで、ペネトレータの歴史について解説する。詳細については [6] が詳しいが、簡単にまとめると、もともと航空機による爆撃を成功させるために使われてきた貫通、貫入爆弾の技術を利用して、爆薬の代わりに観測機器を搭載して観測を始めたことが始まりである。しかし、ペネトレータの利用範囲は狭く、宇宙探査分野での探査機や地球においては石原ら [7] が行った火山の火口付近での観測や南極で松島ら [8] が利用した実績にとどまっている。

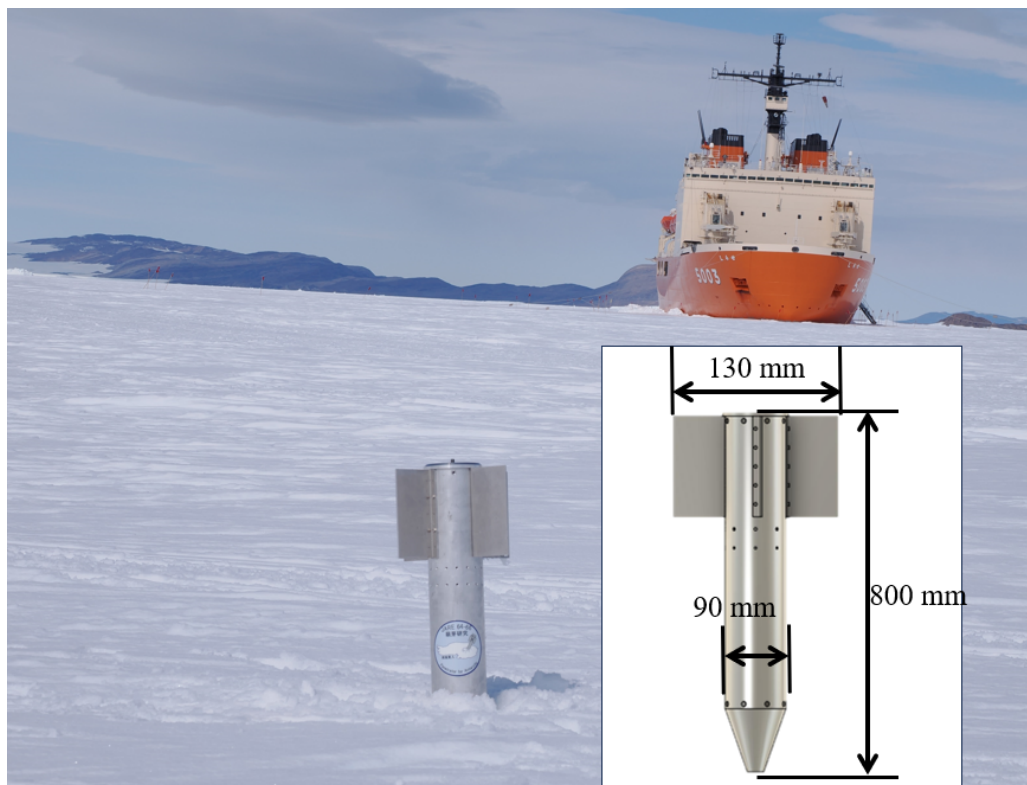


図 1.1 ペネトレータの使用例。南極で著者が触れた多くのペネトレータは、長さ 800 mm 程度、最大直径 130 mm 程度の大きさであった。図 1.1 は南極 (JARE64) で実際に使用したペネトレータであり、雪面に貫入している。

## 第2章 理論式の構築

本章では、観測点での日射量を求めるために理論式の構築を行う。太陽光発電は、太陽による日射光を受け光電効果により発電する。簡単に発電のメカニズム (図 2.1) を示す。太陽光パネルを構成している n 型半導体にマイナスの電子が帯電しており、p 型半導体にプラスの正孔が形成されている。pn 接合面領域は帯電し電界が生じており、ここに、太陽光が当たることにより、電子・正孔対が両側の面へに移動し、電位差が発生する。入射する日射量に応じて発生する起電力を外部回路に取り込めば、太陽光発電が可能となるわけである。

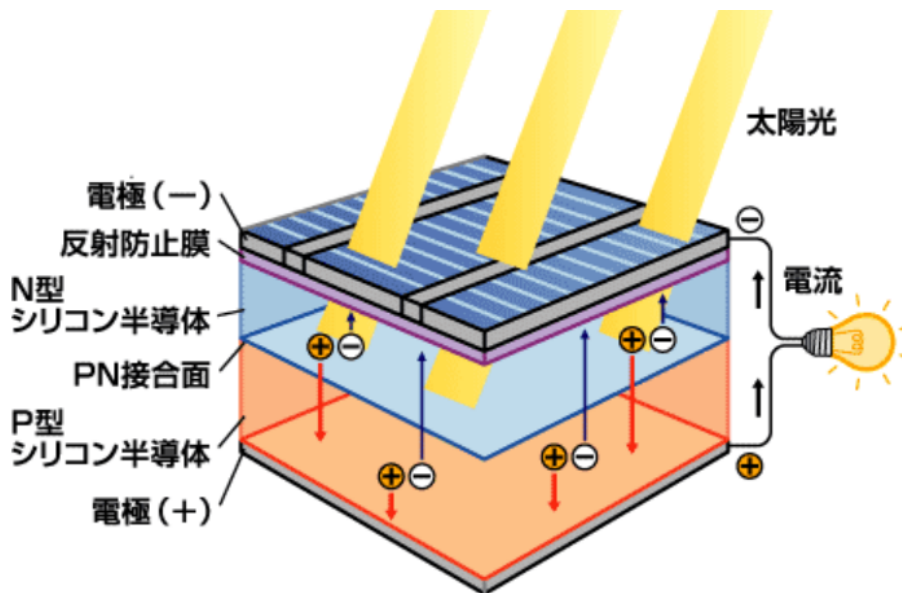


図 2.1 太陽光発電メカニズム [9]

さて、本題に入るが、地上のある地点に入射している太陽の放射エネルギーを総称して日射量という。この日射量を求めるためには、天球座標における太陽の位置を把握する必要がある。太陽位置の把握のために、2.2 節ではある日のある時刻における天球座標での太陽位置を求める。その後 2.3 節で光学厚み、天候の影響を受けた日射光がどのように減衰するかを示す。2.4 節では、太陽光パネルの法線ベクトルと日射光ベクトルの向きがどの程度一致しているかを確認するために、太陽光パネル法線ベクトルと日射光ベクトルの内積をとった。さらに地面からの反射を加味するために、反射光のパラメータを導入した (2.4 節)。最終的に太陽光パネルの発電効率 (2.6 節) を考慮した発電量を、地球の公転 (年)・自転 (日) で積分すれば、自転しながら公転する惑星上の任意の地

点における一年間の日射量を算出することが可能となる。計算に使用したパラメータは付録 A に記載する表 A.1 を確認されたい。

## 2.1 求めたい日射量の式

まず、初めに観測点に入射する日射量の関数を定義する (式 (2.1))。このとき、入力する変数として  $\omega, t, \theta$  を定義した。 $\omega$  は緯度、 $t$  は時角、 $\delta$  は日赤緯 (太陽の赤緯)、 $\theta$  は太陽光パネルの方位角、 $\phi$  は太陽光パネルの傾斜角、 $P_o$  は太陽高度が 90 度のときの光学厚み、 $C$  は気象条件による損失係数である。

$$J_{all} = f(\omega, t, \delta, \theta, \phi, P_o, C) \quad (2.1)$$

つまり定義した式 (2.1) は、7 つの変数で構成され、それぞれの変数が独立した値をもつ。

## 2.2 太陽位置

天球座標における太陽位置は太陽高度  $h$  [°] と太陽方位角  $A$  [°] から記述することが出来る (図 2.2) [10]。

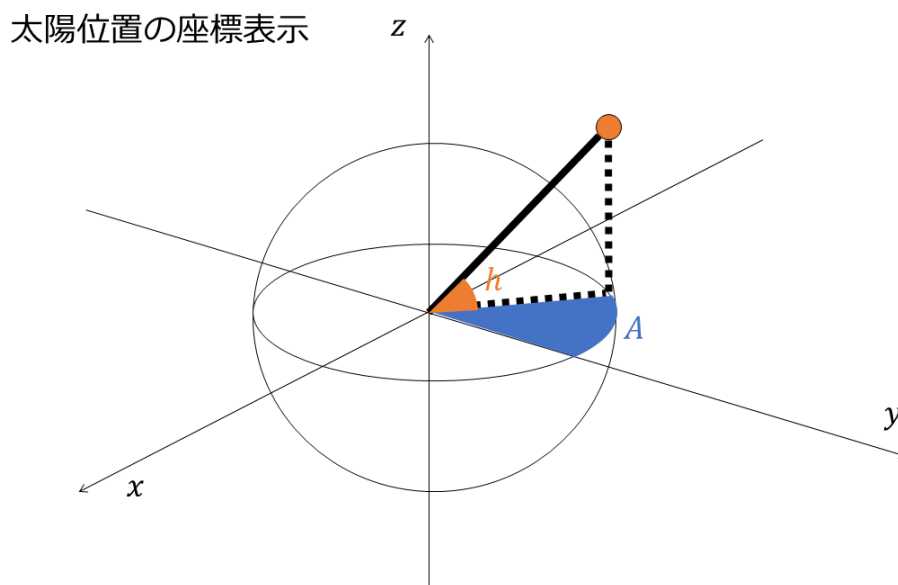


図 2.2 太陽位置の座標

## 太陽高度 $h [^\circ]$

太陽高度  $h [^\circ]$  は、図 2.2 より、太陽の高さの度合い (仰俯角) を表す変数である。観測点の緯度は  $\omega [^\circ]$ 、日赤緯  $\delta [^\circ]$ 、時角  $t [^\circ]$  を用いると式 (2.2) が求まる [11]。なお、観測点緯度  $\omega [^\circ]$  は 60 進法で表されている緯度経度を 10 進緯度に変換している。

$$h = \sin^{-1}(\sin \omega \sin \delta + \cos \omega \cos \delta \cos t) \quad (2.2)$$

$\omega [^\circ]$ : 赤道座標系における観測点の緯度

$\delta [^\circ]$ : 日赤緯

$t [^\circ]$ : 時角

## 時角 $t [^\circ]$

時角  $t$  は太陽の方位を表した値である。南中時を  $t = 0^\circ$  とし、時計回りを正とする。このとき 24 時間に時角  $t$  の取り得る範囲は  $-180^\circ \leq t \leq 180^\circ$  である。

念のため、弧度法表記での時角  $\tau [\text{rad}]$  を示すと、このとき 24 時間に  $\tau$  の取り得る範囲は、南中時を  $\tau = 0$  とし、時計回りを正とすると、 $-\pi \leq \tau \leq \pi$  である。このとき、1 時間あたり  $\frac{\pi}{12} \text{ rad}$  増減する。

$$t = 15(T_m - 12) + (\Omega - \Omega_0) \quad (2.3)$$

$T_m [\text{hour}]$ : 観測地点の標準時

$\Omega [^\circ]$ : 観測点経度

$\Omega_0 [^\circ]$ : 標準時経度

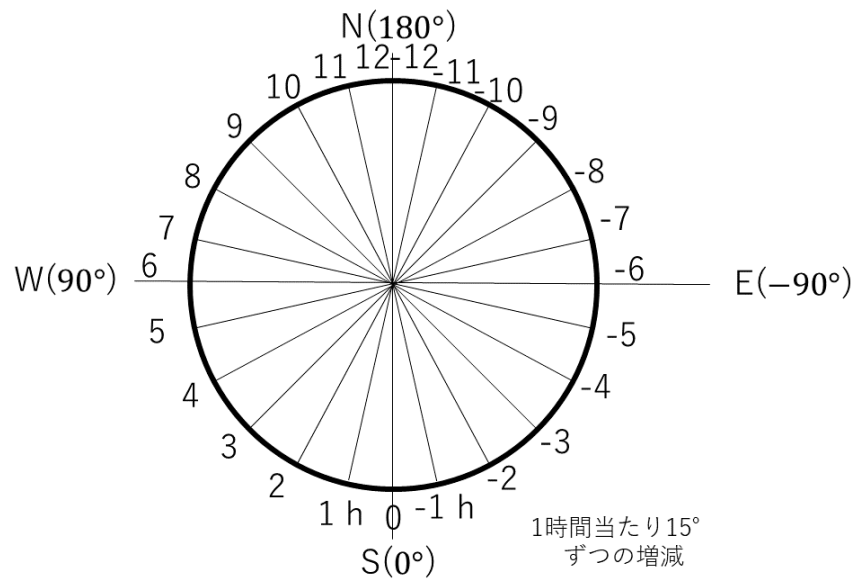
## $\delta [^\circ]$ : 日赤緯

日赤緯  $\delta$  は太陽位置の季節変動を表すパラメータである。 $\delta = 0^\circ$  のときは、春分、秋分であり、夏至のときは  $\delta = 23.4^\circ$  となり、冬至のときは  $\delta = -23.4^\circ$  となる。夏至のときの太陽高度が  $23.4^\circ$  を基準として、式 (2.4) で表せる [12]。

$$\delta = 23.4 \sin 0.9856(X - 80) \quad (2.4)$$

$X [\text{日}]$ : 元旦からの起日



図 2.3 時角  $t$  [°]

### 太陽方位角 $A$ [°]

太陽方位角  $A$  [°] は、図 2.2 より、太陽の方位を表す変数である [11]。

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos h} \quad (2.5)$$

$$\cos A = \frac{\sin h \sin \omega - \sin \delta}{\cos h \cos \delta} \quad (2.6)$$

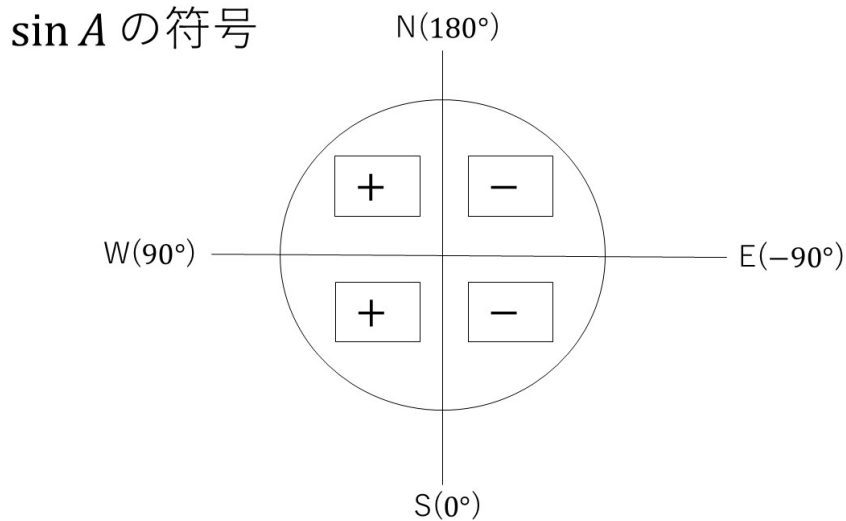
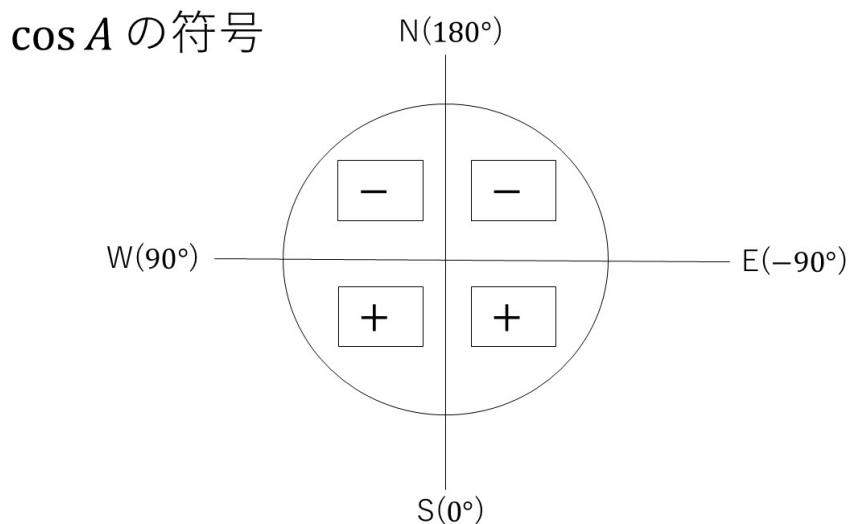
太陽方位角は、式 (2.5)、式 (2.6) の符号について考慮する必要があり、正負の判定をもって方位を確定しなければならない (図 2.4, 図 2.5)。

$\sin A > 0$  のとき

$$A = 90 - \tan^{-1} \frac{\cos A}{\sin A} \quad (2.7)$$

$\sin A < 0$  のとき

$$A = -90 - \tan^{-1} \frac{\cos A}{\sin A} \quad (2.8)$$

図 2.4 太陽方位角  $A$  の符号 ( $\sin A$ )図 2.5 太陽方位角  $A$  の符号 ( $\cos A$ )

## 2.3 大気減衰を受けた日射量の式

大気減衰を受けた日射量の式 (2.9) [11] は、法線面直達日射量  $J_D$ (式 (2.11)) [11] と水平面の天空日射量  $J_s$ (式 (2.14)) [13] の水平面に入射した成分を定式化したものが式 (2.9) である。式 (2.9) は、数値計算上で途中計算の確認が必要なため定式化を行った。

$$J_\alpha = J_0 \cdot \left( P^m + \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \cdot \ln P} \right) \cdot C \quad (2.9)$$

$J_\alpha$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]: 観測点に入射する全天日射量

$J_0$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]: 太陽定数 (地球公転軌道における日射量 =  $1370 \text{W}/\text{m}^2$ )

$P[-]$ : 大気透過率

$m[-]$ : 大気路程

$C[-]$ : 気象条件による損失

### $P[-]$ : 大気透過率

大気透過率  $P$  (Transparence) とは、大気上端の入射光量  $I_0$  に対する地上で得られる光量  $I$  の割合  $\frac{I}{I_0}$  のことである (Lambert Beer の法則 [14])。この大気透過率  $P$  があることにより、日射光が大気を通り抜けるときに日射が減衰する (2.10)。

$$I = I_0 e^{-m \cdot \lambda} \quad (2.10)$$

$I [\text{W}/\text{m}^2]$ : 入射光量

$I_0 [\text{W}/\text{m}^2]$ : 太陽定数 (地球公転軌道における日射量 =  $1370 \text{W}/\text{m}^2$ )

$m[-]$ : 大気路程

$\lambda[-]$ : 減衰率

このとき、Bouguer の式 [15] より地表に到達する法線面直達日射量  $J_D$  は、

$$J_D = J_0 \cdot P^m \quad (2.11)$$

$m$  は大気路程といい、太陽高度が低くなったときに大気の曲率が太陽光に影響し、太陽光の通る経路が相対的に長くなる。このことから、大気路程  $m$  とは、天頂方向の大気の柱 (気柱) の長さを 1 とし、太陽天頂角の気柱の相対的長さ (大気路程) を大気路程という。大気路程は、Kasten [14] によって近似式で表される。

$$m = \frac{1}{\sin h + 0.1500(h + 3.885)^{-1.253}} \quad (2.12)$$

鈴木らは、大気透過率  $P$  を減衰率  $\lambda$  を用いて太陽高度に依存する関数として扱う必要があるとして、両対数グラフの縦軸に  $\lambda$ 、横軸  $\sin h$  をとり観測値をプロットすると、約  $1/3$  の傾きを有すことを示している [16]。この結果により、高度毎の太陽光の減衰を考慮することが可能となった。したがって、高度毎の大気透過率  $P$  は式 (2.13) のように表される。

$$P = 1 - (1 - P_0) \sqrt[3]{\sin h} \quad (2.13)$$

$P_0[-]$ : 透過係数

また、水平面の天空日射量  $J_s$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] (散乱光による成分) は、Berlage の式 [13] から算出できる。

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot \sin h \cdot \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \cdot \ln P} \quad (2.14)$$

しかし、Berlage の式 (式 (2.14)) は Rayleigh 散乱は考慮されているが、粒子径の大きい水蒸気やエアロゾルなどの散乱光モデルである Mie 散乱が考慮されていない。そのため、永田はこの問題を解決するために Berlage の式 (式 (2.14)) を修正した永田の式を提案した [17, 18]。

$$J_{sn} = J_0 \cdot \sin h \cdot (1 - P^m)(0.66 - 0.32 \sin h)(0.5 + (0.4 - 0.3P) \sin h) \quad (2.15)$$

永田の式のほかに散乱光のモデルとして、直散分離によって得られる Erbs モデル [19] や Perez モデル [20] などがあるが、これらはいずれも観測値を用いたり実装が困難であったりするため時別の太陽高度、大気透過率を参考とする永田の式を用いた。

結果として、水平面が受ける全天日射量  $J_N$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] は式 (2.11)、式 (2.15) を組み合わせて、

$$J_N = J_D \times \sin h + J_{sn} \quad (2.16)$$

となる。

### $C[-]$ : 気象条件による損失

気象条件による日射量の減衰を仮定する。雲量によって天気が決定的ため戸田ら [21] を参考に、減衰係数を次のように定義した。

$$\begin{aligned} C_S &: \text{快晴のとき (雲量 0)} = 1.0 \\ C_{SN} &: \text{晴れのとき (雲量 1 \sim 2)} = 0.9 \\ C_{CS} &: \text{薄雲のとき (雲量 3 \sim 6)} = 0.8 \\ C_C &: \text{曇りのとき (雲量 6 \sim 8)} = 0.6 \\ C_R &: \text{雨、雪のとき (雲量 8 \sim 10)} = 0.4 \end{aligned} \quad (2.17)$$

## 2.4 観測点の太陽光パネルに入射する日射量の式

観測点の太陽光パネルに入射する日射量  $J_\beta$  は、太陽光パネルの法線ベクトルと日射光ベクトルの向きがどの程度一致しているかを確認するために、内積をとることにより、最大の日射量～最小の日射量までを計算することができ、日射光と太陽光パネルの入射角の制限も同時に確認することが可能な式である [11]。

$$J_\beta = ((J_D(\cos \Theta_t + R \cos \Theta_r)) + J_{sn})C \quad (2.18)$$

$J_\beta$  [W/m<sup>2</sup>]: 太陽光パネルに照射される日射量の式

$R$  [-]: 地表面のアルベド

$\Theta_t$  [°]: 太陽光パネルと入射する太陽光とのなす角

$\Theta_r$  [°]: 太陽光パネルと反射する太陽光とのなす角

### パネルのベクトル成分の表示

2.2 節、2.3 節により、太陽の位置や大気による日射量の減衰を確認することが出来た。2.4 節では、太陽光パネルの設置方向、傾斜角を考慮し、水平面以外に入射する日射量を求める式を考える [11]。なお本論文での、太陽光パネルの傾斜角は水平面からの基準をとるのではなく、天頂軸からを基準とした角度(天頂角)で定義する。

まず、パネル各ベクトルの成分 ( $N_x, N_y, N_z$ ) 図 2.6 のように球面座標で考えることが出来る。

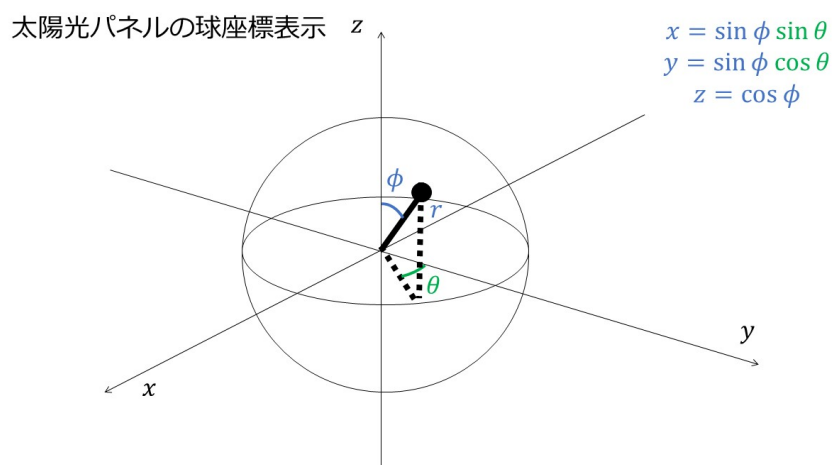


図 2.6 太陽光パネルの球座標表示

## パネルのベクトル成分

パネルの法線ベクトル  $N$  を考えると各ベクトルの成分  $(N_x, N_y, N_z)$  (図 2.7) と方位  $\theta$  と勾配  $\phi$  との関係は

$$\begin{aligned} N_x &= \sin \phi \sin \theta \\ N_y &= \sin \phi \cos \theta \\ N_z &= -\cos \phi \end{aligned} \quad (2.19)$$

となる。図 2.7 のベクトルの向きが数式と異なる点については、パネルの法線ベクトルの正の向きを  $\cos \phi < 0$  としたからである。

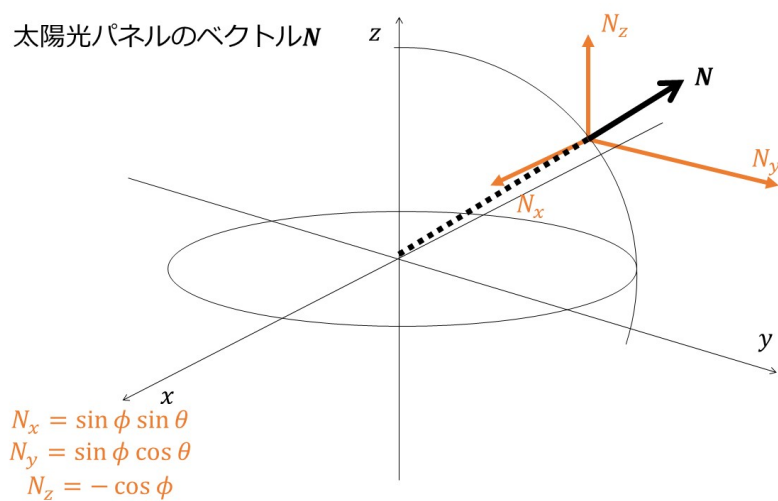


図 2.7 太陽光パネルの球座標表示

## 日射のベクトル成分

次に日射のベクトルに関して考える (図 2.8)。日射については、入射光と反射光の 2 通りに関して求めればよい。

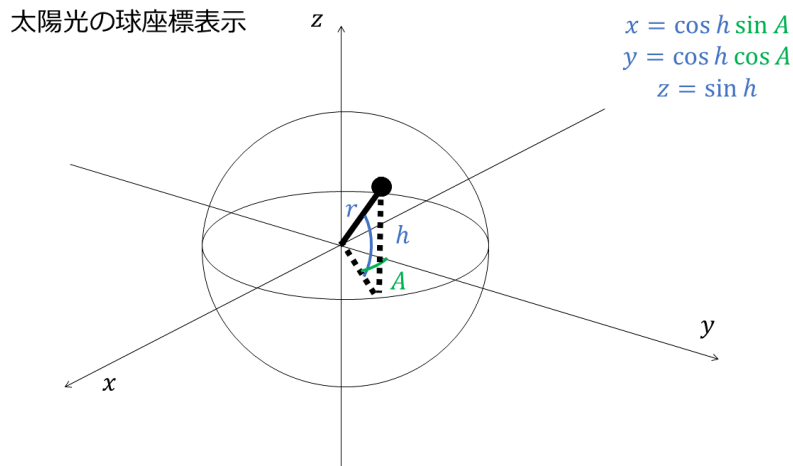


図 2.8 太陽光の球座標表示

### 入射光の幾何定義

まずは入射光について考える。入射光の方向を図 2.9 とすると、このとき入射光の単位ベクトル  $\mathbf{S}_t(S_{tx}, S_{ty}, S_{tz})$  は、太陽方位角  $A$  と太陽高度  $h$  を用いると式 2.20 のようにあらわせる。

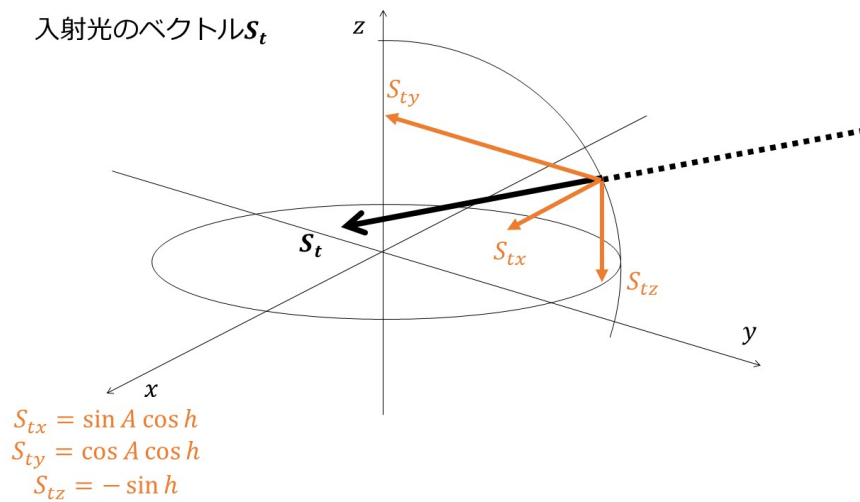


図 2.9 入射光の球座標表示

$$\begin{aligned}
 S_{tx} &= \sin A \cos h \\
 S_{ty} &= \cos A \cos h \\
 S_{tz} &= -\sin h
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

## 反射光の幾何定義

反射光の導入については、青木ら [22] によると、太陽光パネルの半導体にもよるが、A 地面からの反射光によって、最大で 2.2 倍の発電量を確認したとの報告がある。この結果は雪面がある南極地域では大きなアドバンテージとなる。ペネトレータは地面に貫入するときに、垂直に貫入することが望ましいが、機体空力特性などにより、垂直に貫入しないことが多い。そのため、反射の影響により、発電量が増えることが示されれば、貫入角度が与える発電量への影響は大きいといえる。

さて、反射光の成分についての幾何解析を行うと、反射する成分は入射光をスネルの法則によって、z 軸で完全反射する場合を考えればよいので、図 2.10 のように分解することが出来る。

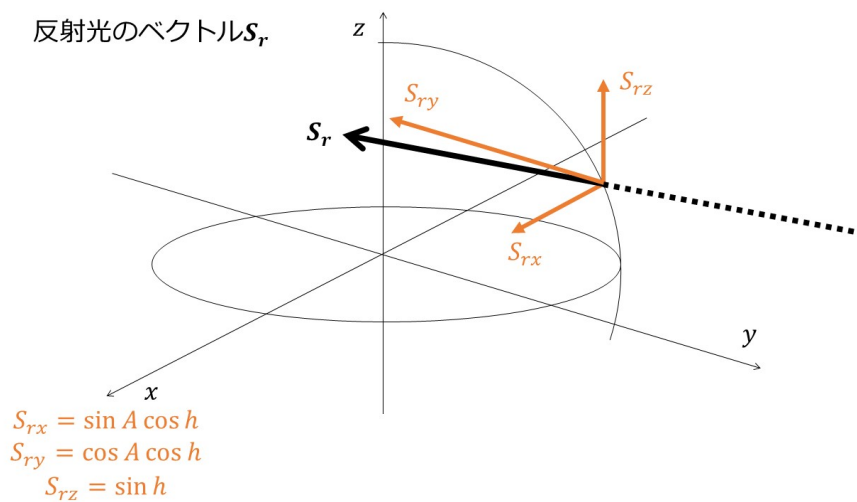


図 2.10 反射光の球座標表示

このとき反射光の単位ベクトル  $S_r(S_{rx}, S_{ry}, S_{rz})$  は、方位  $A$  と高度  $h$  との関係は、

$$\begin{aligned} S_{rx} &= \sin A \cos h \\ S_{ry} &= \cos A \cos h \\ S_{rz} &= \sin h \end{aligned} \tag{2.21}$$

となる。

## 2.5 太陽光パネルと入射光との内積関係

[11] ここまでで、入射光、反射光、太陽光パネル (法線) の 3 次元ベクトルを知ることが出来た。そのため、各合成ベクトルの内積関係を示すことにより、水平面への入射を



考えることが可能となる。入射光と太陽光パネルとのなす角を  $\Theta_t$  として、図 2.11 のような状態を考えると、それぞれのベクトルが単位ベクトルであることから、

$$\cos \Theta_t = \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}_t}{|\mathbf{N}| |\mathbf{S}_t|} = N_x S_{tx} + N_y S_{ty} + N_z S_{tz} \quad (2.22)$$

となる。

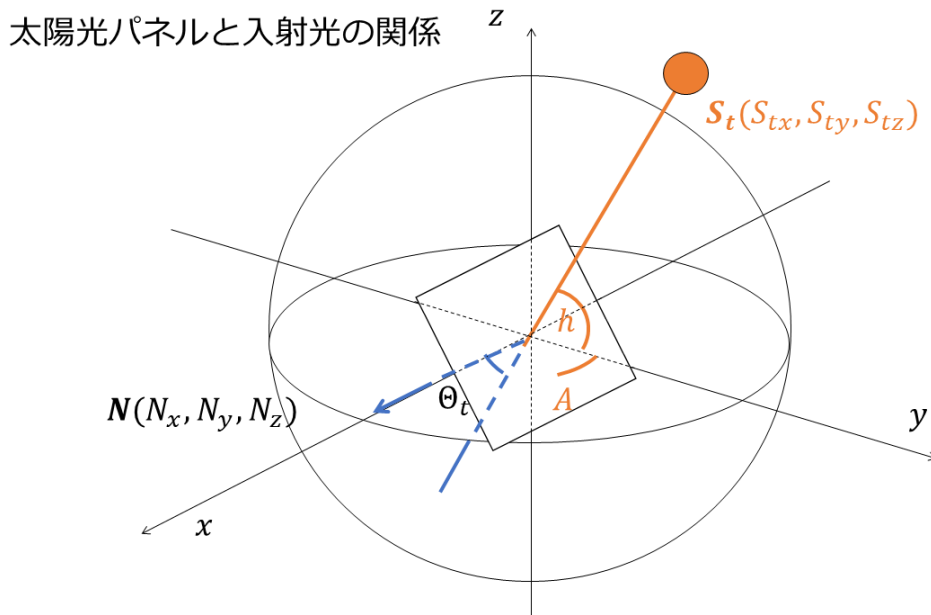


図 2.11 太陽光パネルと入射光との内積

ここで、式 (2.19)、(2.20) を代入し、式 (2.22) をすべて展開すると、

$$\cos \Theta_t = \sin \phi \sin \theta \sin A \cos h + \sin \phi \cos \theta \cos A \cos h - \cos \phi \sin h \quad (2.23)$$

となり、 $\cos \Theta_t$  で入力される変数は、緯度  $\omega$ 、パネルの傾斜角  $\phi$  と方位角  $\theta$  であるとわかる。

### 太陽光パネルと反射光との内積関係

同様に、反射光とパネルとのなす角を  $\Theta_r$  とすると (図 2.12)、

$$\cos \Theta_r = \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{S}_r}{|\mathbf{N}| |\mathbf{S}_r|} = N_x S_{rx} + N_y S_{ry} + N_z S_{rz} \quad (2.24)$$

となる。

ここで、反射光がパネルに入射しない条件を考えると、3次元での角度条件を考慮する必要がある。そこで、パネルの方位と傾斜について内積をとると、(2.25) のとき、反射光が入射しない条件となる。

$$\cos \Theta_r \leq 0 \quad (2.25)$$

となる。

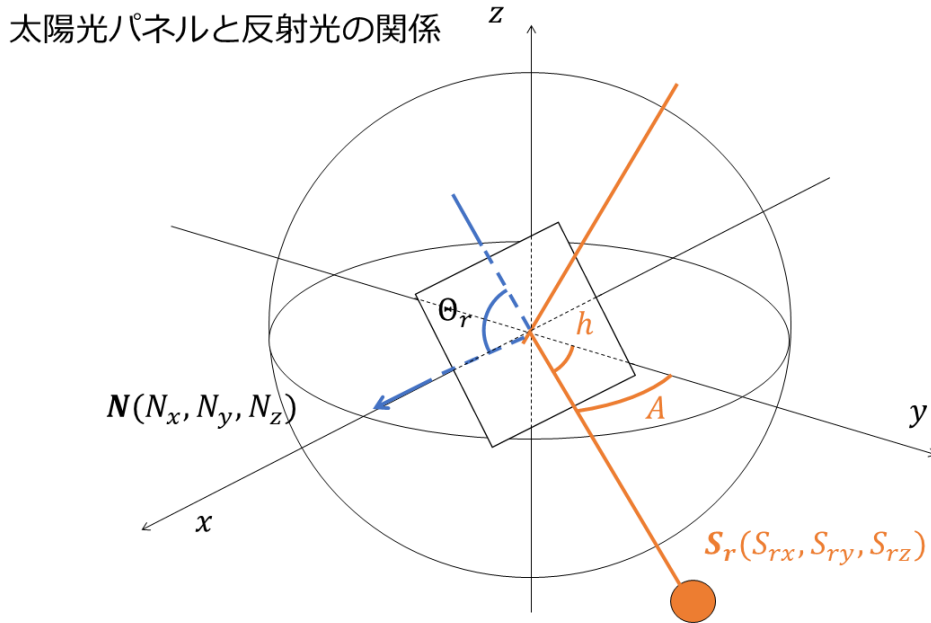


図 2.12 太陽光パネルと反射光との内積

念のため、式 (2.24) をすべて展開すると、式 (2.19)、(2.21) を代入すると、

$$\cos \Theta_r = \sin \phi \sin \theta \sin A \cos h + \sin \phi \cos \theta \cos A \cos h + \cos \phi \sin h \quad (2.26)$$

と書き下せる。

## 2.6 太陽光パネルでの瞬間発電量の式

太陽光パネルに入射されたあとは、太陽光パネルでの効率  $K[-]$  が存在する。そのため、瞬間発電量  $J_\gamma$  は式 (2.27) のようになる。

$$J_\gamma = J_\beta \cdot K \quad (2.27)$$

$J_\gamma$  [Wh/m<sup>2</sup>] : 太陽光パネルでの発電量

$K$  [-] : 太陽光パネルでの発電効率

### $K$ [-] : 太陽光パネルの発電効率

太陽光パネルに日射が入射した後の発電効率を考える。太陽光パネルでの発電効率は [23] を用いた。

$$K = K_H \cdot K_P \cdot K_B \cdot K_C \quad (2.28)$$

$K_H$  : アレイ面入射量補正係数 (傾斜面日射量基準)

$K_P$  : 太陽電池変換効率補正係数

$K_B$  : 蓄電池回路補正係数

$K_C$  : パワーコンディショナ回路補正係数

$$K_H = K_{HD} \cdot K_{HS} \cdot K_{HC} \quad (2.29)$$

$K_{HD}$  : 日射量年変動補正係数

$K_{HS}$  : 日陰補正係数

$K_{HC}$  : 入射光貢献度補正係数

$$K_P = K_{PD} \cdot K_{PT} \cdot K_{PA} \cdot K_{PM} \quad (2.30)$$

$K_{PD}$  : 経時変化補正係数 (汚れ補正係数, 劣化補正係数, 分光応答変動補正係数, 非線形応答変動補正係数)

$K_{PT}$  : 温度補正係数

$K_{PA}$  : アレイ回路補正係数

$K_{PM}$  : アレイ負荷整合補正係数

$$K_B = (1 - \gamma_{BA}) \cdot \eta_{BD} + \gamma_{BA} \cdot \eta_{BA} \quad (2.31)$$

$\gamma_{BA}$  : 蓄電池寄与率

$\eta_{BD}$  : バイパスエネルギー効率 (蓄電池を経由しないで通過する部分の回路効率)

$\eta_{BA}$  : 蓄電池充放電効率

$$K_C = \gamma_{DC} \cdot K_{DD} + (1 - \gamma_{DC}) \cdot K_{IN} \quad (2.32)$$

$\gamma_{DC}$  : 直流負荷取出し率

$K_{DD}$  : DC/DC コンバータ回路補正係数

$K_{IN}$  : パワーコンディショナ回路補正係数 (インバータエネルギー効率, 交流線路エネルギー伝送効率, 補助電源回路エネルギー効率)

## 2.7 太陽光パネルでの発電量の式

最後に年間の発電量を求める (式 (2.33))。

$$I_{\alpha} = \int_0^{2\pi} \int_{\pi}^{-\pi} J_{\gamma} dt d\delta \quad (2.33)$$

$I_{\alpha}$  [Wh/m<sup>2</sup>] : 年間発電量

## 2.8 太陽光パネルの搭載による観測期間

ここまで、太陽光パネルの発電量を求めるためにさまざまな数式展開を繰り返したが、最も重要なのは観測期間をどれだけ長くできるかである。まず、太陽光パネルの面積  $S$  [m<sup>2</sup>] は、式 (2.27) より 1m<sup>2</sup> あたりの発電量が分かっているので、搭載したい太陽光パネルの面積  $S$  [m<sup>2</sup>] を乗ずることで、太陽光パネルの面積と 搭載太陽光パネルの発電量 (式 (2.34)) が決定する。

$$P_{gene} = J_{\gamma} \cdot S \quad (2.34)$$

ここで、電力量の単位変換 ([Wh] → [Ah]) を行うと観測システム入力電圧  $V_{system}$  [V] で割ればよいので、

$$i_{gene} = \frac{P_{gene}}{V_{system}} \quad (2.35)$$

次に観測期間  $T_{Observation}$  は、電源容量  $BT$  [Ah]、観測システムの消費電力量  $P_{LOSS}$  [Ah]、太陽光パネルの発電量  $i_{gene}$  [Ah] から、毎日の残電源容量  $BT_{Stock}$  [Ah] を計算することで、残電源容量が 0 になったとき観測期間の終了とした。

## 第3章 観測期間の計算結果

2章で述べた理論式をもとに Python による計算プログラムを作成して数値計算を行った。まず、計算値と観測値との差を確認し、その後、昭和基地でペネトレータ観測を行うと仮定し、角度と反射を考慮した日射量の計算を行った。最後にペネトレータの観測の際に太陽光発電の有無による観測可能期間の計算を行った。

### 3.1 計算値と観測値との差

理論式があっているかを確認するために、観測値と比較した。まず、簡単のため水平面での日射量を確認した。水平面で比較した理由は、気象庁の日射観測は水平に保たれる全天日射計 (図 3.1) を使用しているためである。

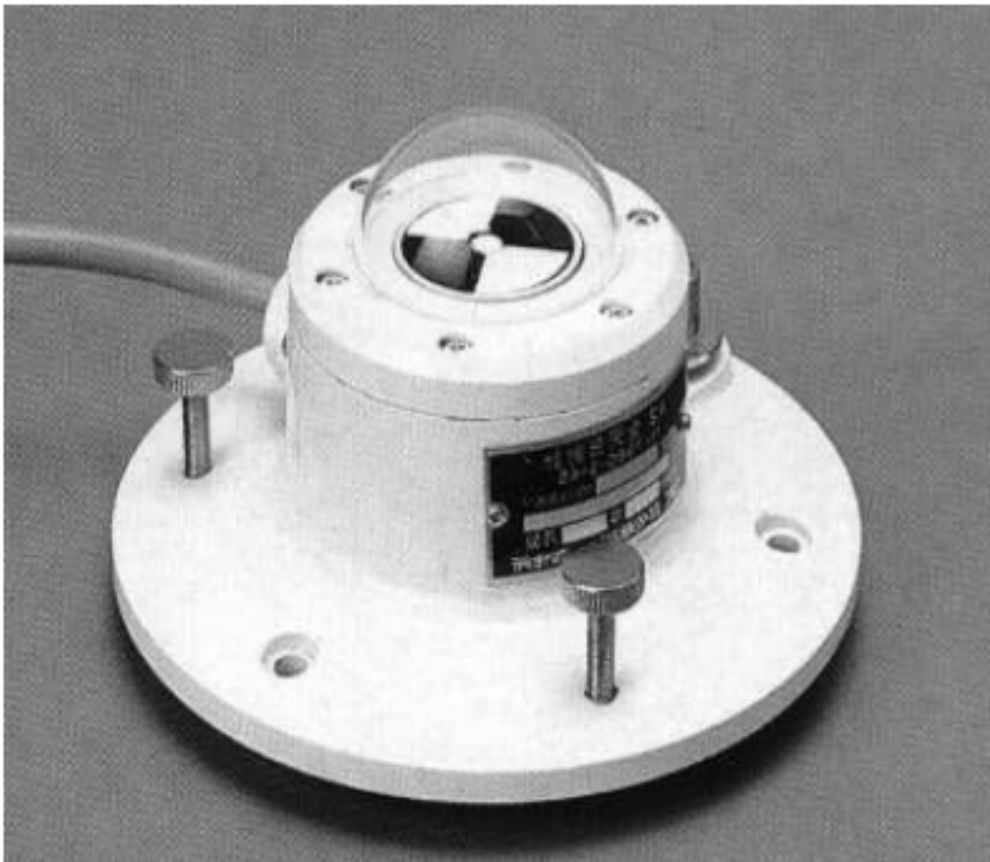


図 3.1 気象庁の全天日射計 [24]。半球状のガラスケースに水平面の熱電対計測器が取り付けられており、黒い面と白い面との温度差を得ることで日射量を計測している。

観測値は気象庁 [5] の 1991 年～2020 年までの観測値の 30 年平均のデータをもとに比較を行った。ここで、地点に関してだが、理論式を見る通り緯度が重要なパラメータとなる。緯度が 1 度程度は変化していないと日射量に大きな変化が見れないため、比較対象の地点として、札幌 (北緯 43°3'6"、東経 141°19'7")、東京 (北緯 35°41'5"、東経 139°45'0")、高知 (北緯 33°34'0"、東経 133°33'1") を選んだ。本研究では南極地域の例は昭和基地 (南緯 69°0'25"、東経 39°35'1") をケーススタディとして計算を行う。それぞれ計算条件は表 3.1 の通りである。以降は気象条件による減衰係数  $C$  は、気象庁 [5] の観測データを確認し、式 (2.17) より、透過係数  $P_0$  は日本では村井 [11]、昭和基地では、石井ら [25] をもとに係数を決定し、議論を進めていく。

表 3.1 計算対象地点のパラメータ

地点	C	P
札幌	0.6	0.75
東京	0.6	0.75
高知	0.6	0.75
昭和基地	0.6	0.75

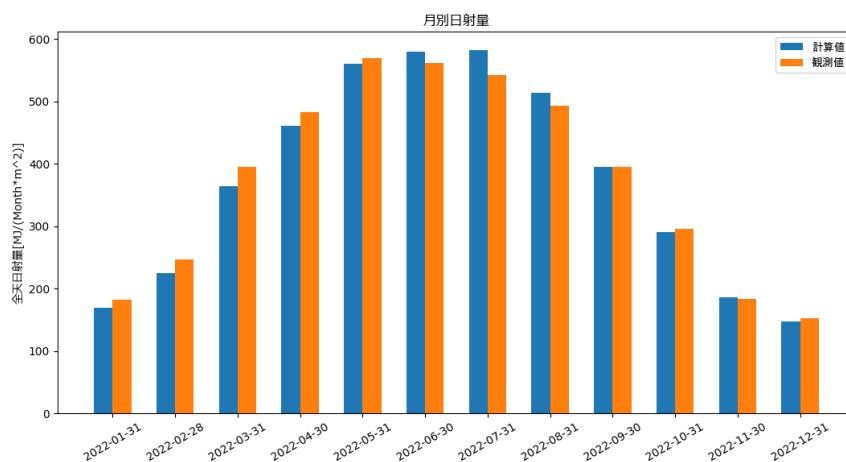


図 3.2 札幌の月別日射量 (計算値と観測値)。札幌の月別日射量は、縦軸月平均日射量  $[MJ/(\text{Month} \cdot \text{m}^2)]$  であり、横軸日付のグラフである。年間日射量の理論値は、 $4569 MJ/(\text{Year} \cdot \text{m}^2)$

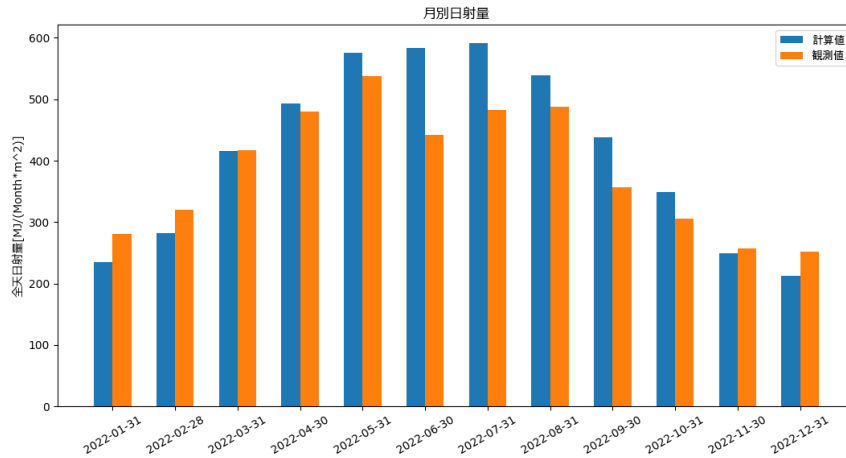


図 3.3 東京の月別日射量 (計算値と観測値)。東京の月別日射量は、縦軸月平均日射量 [MJ/(Month・m<sup>2</sup>)] であり、横軸日付のグラフである。年間日射量の理論値は、5043 MJ/(Year・m<sup>2</sup>)

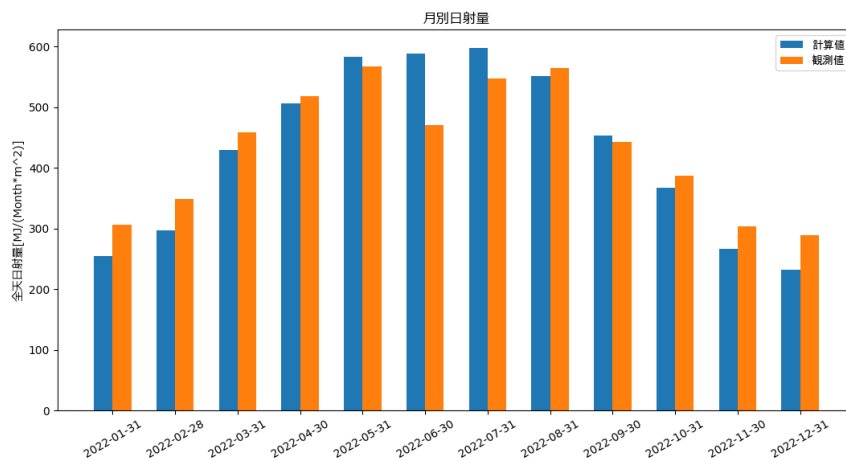


図 3.4 高知の月別日射量 (計算値と観測値)。高知の月別日射量は、縦軸月平均日射量 [MJ/(Month・m<sup>2</sup>)] であり、横軸日付のグラフである。年間日射量の理論値は、5165 MJ/(Year・m<sup>2</sup>) であった。

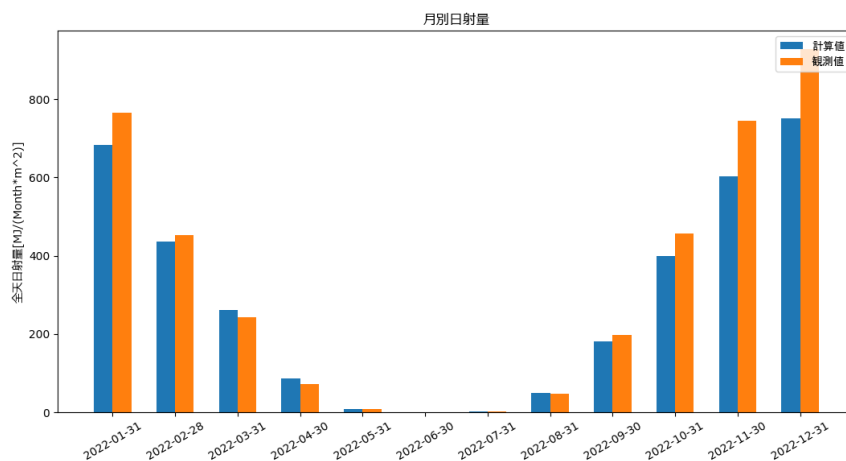


図 3.5 昭和基地の月別日射量 (計算値と観測値)。昭和基地の月別日射量は、縦軸平均日射量 [MJ/(Month・m<sup>2</sup>)] であり、横軸日付のグラフである。年間日射量の理論値は、3465 MJ/(Year・m<sup>2</sup>) であった。

札幌 (図 3.2) は平年値とおおむね同じ傾向を示していることが分かった。東京 (図 3.3)、高知 (図 3.3) では、おおむね平年値と同じであるが、6月の日射量に約  $100 \text{ MJ}/(\text{Month} \cdot \text{m}^2)$  差があることが分かった。昭和基地 (図 3.5) は、1月、10月～12月で平年値と計算値の差が大きいことが分かった。

## 3.2 昭和基地における角度と反射を考慮した日射量の変化

2.4節でも述べたが、南極では地面が雪で覆われているため太陽光発電において反射光の影響は大きい (青木ら [22])。そのため、昭和基地における日射量の変化は、太陽光パネル傾斜角  $\phi$  [rad] と反射係数  $R$  [-] を考慮した数値計算の結果を示す。なお傾斜角  $\phi$  [rad] の角度変化は  $15^\circ$  刻みとし、方位は東～北～西～南を16方位刻みで変化させた。また、反射係数  $R$  は竹内ら [26] を参考に雪の反射係数を0.9とした。

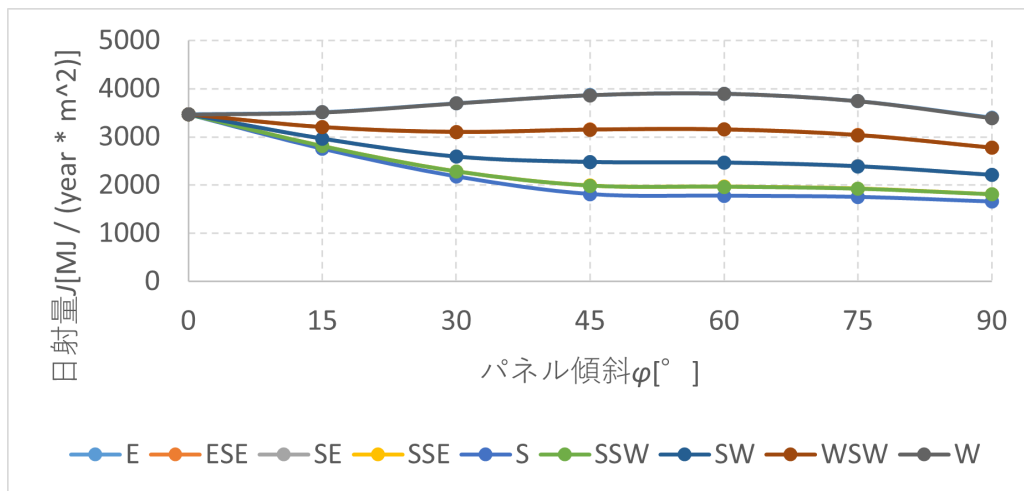


図 3.6 傾斜による日射量の変化グラフ (東～北～西)。図 3.6 は、横軸パネル傾斜  $\phi$  [°] 縦軸日射量  $J$  [MJ/(Year  $\cdot$  m<sup>2</sup>)] で反射を考慮していないグラフある。東～西までの8方位で日射量をみると、東、西向き  $60^\circ$  のときもっとも日射量が多いことが分かる。



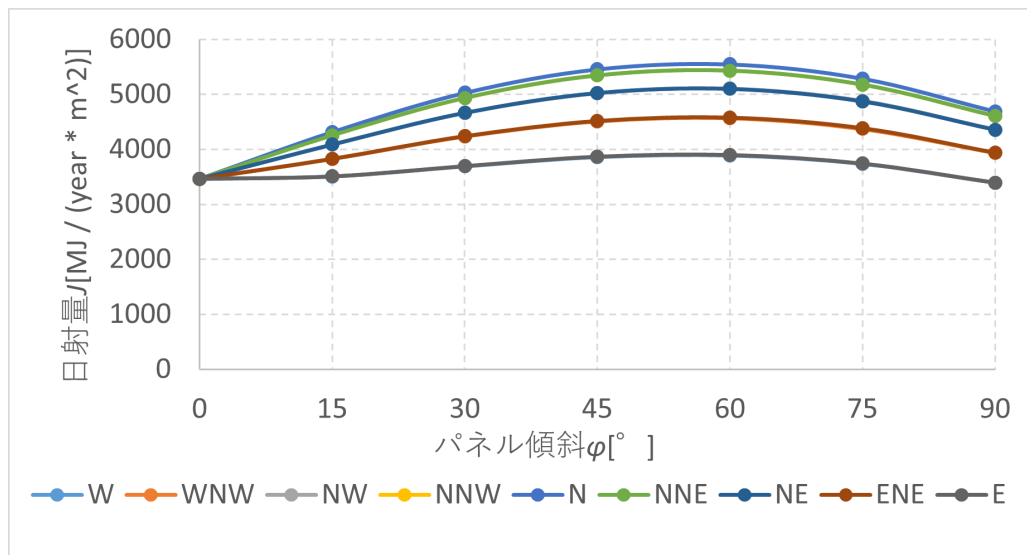


図 3.7 傾斜による日射量の変化グラフ (西～南～東) 図 3.7 は、横軸パネル傾斜  $\phi$  [°] 縦軸日射量  $J$  [MJ/(Year · m<sup>2</sup>)] で反射を考慮していないグラフある。西～南～東までの 8 方位刻みで日射量をみると、北向き 60° のときもっとも日射量が多いことが分かる。

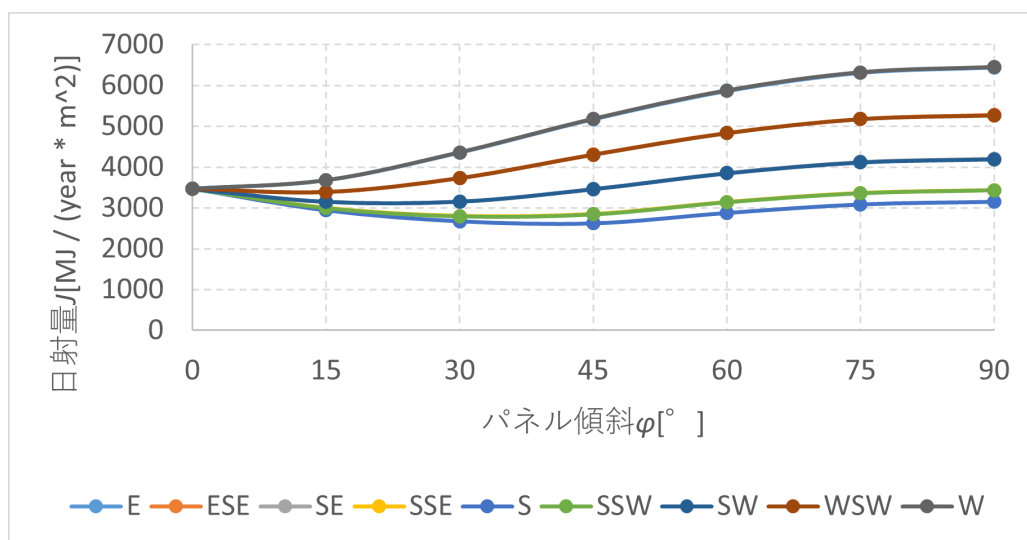


図 3.8 傾斜と反射を考慮した日射量の変化グラフ (東～北～西)。図 3.8 は、横軸パネル傾斜  $\phi$  [°] 縦軸日射量  $J$  [MJ/(Year · m<sup>2</sup>)] で反射を考慮したグラフある。東～北～西までの 8 方位刻みで日射量をみると、東、西向き 90° のときもっとも日射量が多いことが分かる。

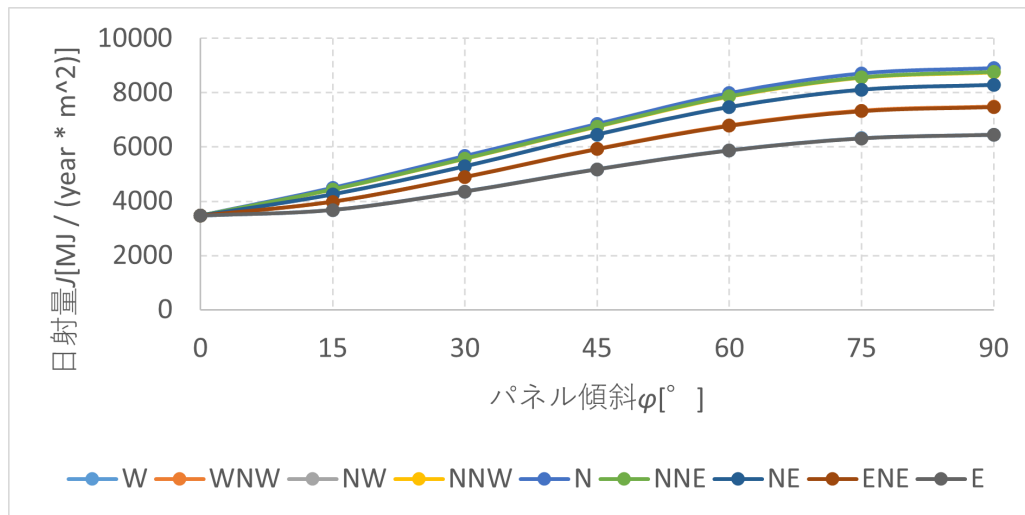


図 3.9 傾斜と反射を考慮した日射量の変化グラフ (西～南～東)。図 3.9 は、横軸太陽光パネルの傾斜  $\phi$  [°]、縦軸日射量のグラフである。傾斜パネルによる日射量の変化グラフ (西～東)。北向き 90° のときもっとも日射量が多いことが分かる。

角度変化の場合のみ (図 3.6, 3.7) で比較すると、北向き 60° のときが最大日射量  $J_{max} = 5546 \text{ MJ}/(\text{Year} \cdot \text{m}^2)$  であり、最小日射量  $J_{min}$  は、南向き 90° のときであり、 $J_{min} = 1656 \text{ MJ}/(\text{Year} \cdot \text{m}^2)$  ことが分かった。反射ありの場合 (図 3.8, 3.9) で比較すると、北向き 90° のときが最大日射量  $J_{max} = 8911 \text{ MJ}/(\text{Year} \cdot \text{m}^2)$  であり、最小日射量  $J_{min}$  は、南向き 45° のときであり、 $J_{min} = 2624 \text{ MJ}/(\text{Year} \cdot \text{m}^2)$  ことが分かった。

### 3.3 昭和基地におけるペネトレータの運用期間

昭和基地における太陽光パネルの有無による観測可能期間の検討を行った (図 3.10)。ペネトレータの内径は 90 mm 程度なので、例えば、INR21700-50G(5000 mAh) [27] が少なくとも 8 本搭載できる。2 並列で用いると、電源容量は最低でも 80 Ah となるが、72 Ah で稼働させるものとした。また、消費電力はシステムを稼働させているモジュール単体毎の消費電力の総和 (観測と無線通信に 1.23 Ah 消費する) をとった。電源容量 72 Ah の 2 次電池を搭載しているペネトレータが、一日おきに消費電力  $P_{LOSS} = 1.23 \text{ Ah}/\text{Day}$  を消費すると仮定して計算した。平面に設置した場合と最大発電量が見込めるパネル傾斜  $\phi = 90^\circ$ 、方位北向きのとときと比較した。

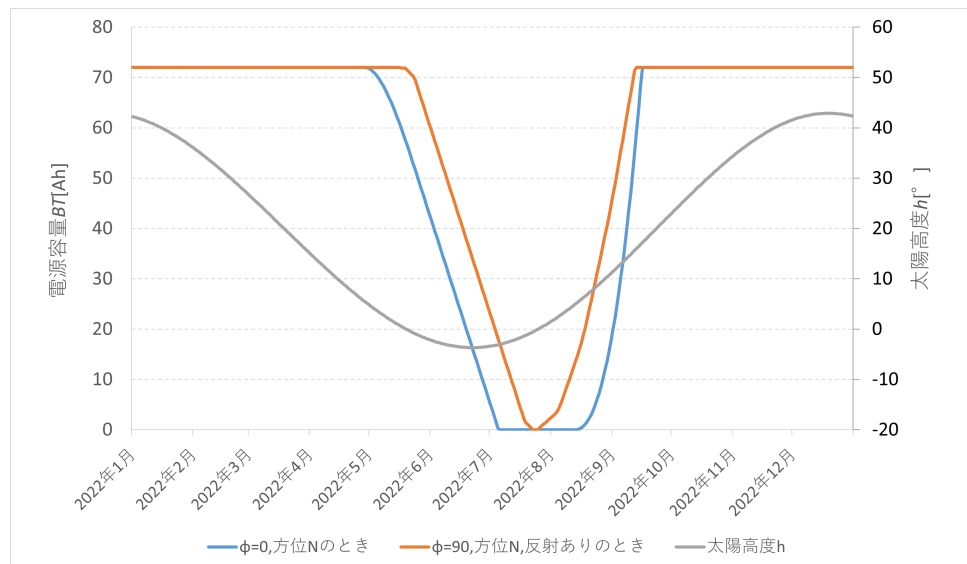


図 3.10 電源容量-日付グラフ。図 3.10 は横軸が日付、縦軸電源容量  $BT[Ah]$ 、第 2 縦軸が 12 時における太陽高度  $h[^\circ]$  のグラフである。青線は  $\phi = 0^\circ$  に  $40 = m^2$  の太陽光パネルを設置したときの電源容量の推移、橙色の線が北向き  $\phi = 90^\circ$  に  $4 = m^2$  太陽光パネルを設置したときの電源容量の推移、灰色の線が 12 時における太陽高度の推移である。

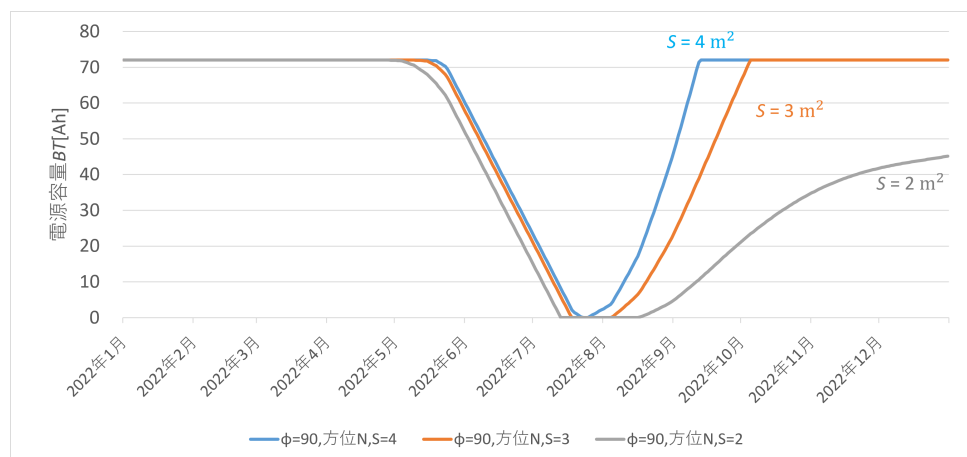


図 3.11 電源容量-日付グラフ。図 3.11 は横軸が日付、縦軸電源容量  $BT[Ah]$  のグラフである。このとき、パネル傾斜角は  $\phi = 90^\circ$  で固定し、青線は  $S = 4 m^2$ 、橙色の線が  $S = 3 m^2$ 、灰色の線が  $S = 2 m^2$  のときの電源容量の推移である。

図 3.10 より、パネル傾斜角  $\phi = 90^\circ$  で、方位北向きのときは、太陽光パネルの面積は  $4 = m^2$  であり、7月下旬に  $1 Ah$  にまで電池容量が減少するものの、通年して観測できることが分かった。一方で、 $\phi = 0^\circ$  の場合は、7月初旬には電池容量が尽きることが判明した。さらに、パネル傾斜角  $\phi = 90^\circ$  を固定し、太陽光パネルの面積を  $S = 4, 3, 2 m^2$  と変化させた(図 3.10)とき、 $S = 3 m^2$  は、7月下旬から8月中旬にかけて電源容量が  $0 Ah$  になっているが、10月ごろに電源容量が最大まで充電可能ということが分かった。 $S = 2 m^2$  のときは、8月下旬までは電源容量が  $0 Ah$  になっているが9月ごろから充電をはじめ12月31日の時点で、 $45 Ah$  まで充電できていることが確認できた。

## 第4章 吟味と検討

まず、理論式の妥当性を確認するために気象庁の観測データと理論式に差があることについて議論し、理論式の妥当性を吟味する。また、理論式によって導かれた最大日射量をもととする太陽光パネルの面積の検討を行い、太陽光発電の有無による観測期間の検討を行う。

### 4.1 計算値と観測値との差

東京、高知での月別日射量について吟味すると、6月の日射量の差が東京で、約 130 MJ/(Month・m<sup>2</sup>)、高知で、約 100 MJ/(Month・m<sup>2</sup>) の差がある。これは、梅雨の時期に雲量が多くなり、日射が大きく遮られることに原因があると考えられる。気象庁の観測値 [28, 29] を確認すると、6月の雲量は東京で 8.5、高知で 8.3 であるため、気象条件による減衰は  $C = 0.4$  となる。東京 (図 4.1)、高知 (図 4.2) における 6 月のみの日射量を再計算したところ、東京で補正前と比較して、約 80 MJ/(Month・m<sup>2</sup>)、高知で約 50 MJ/(Month・m<sup>2</sup>) の補正が確認できた。

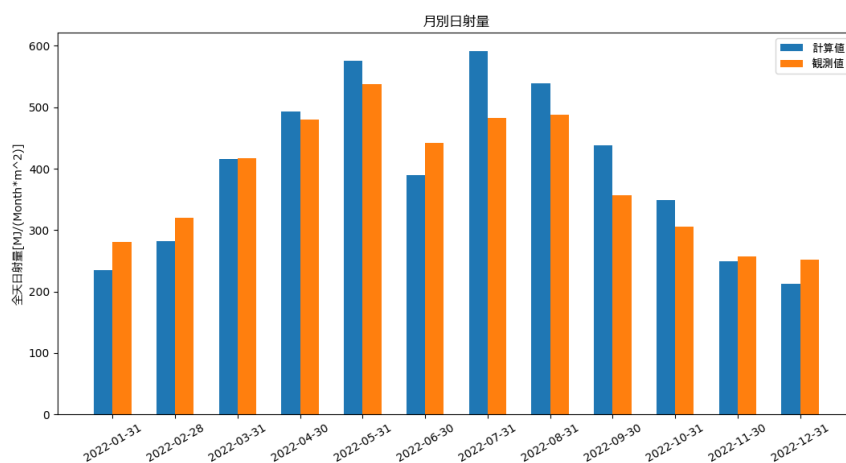


図 4.1 東京の補正後の月別日射量 (計算値と観測値)。縦軸は月平均日射量 [MJ/(Month・m<sup>2</sup>)] であり、横軸は日付のグラフである。6 月における気象条件による損失係数  $C[-]$  は戸田ら [21] を参考に  $C = 0.4$  した。

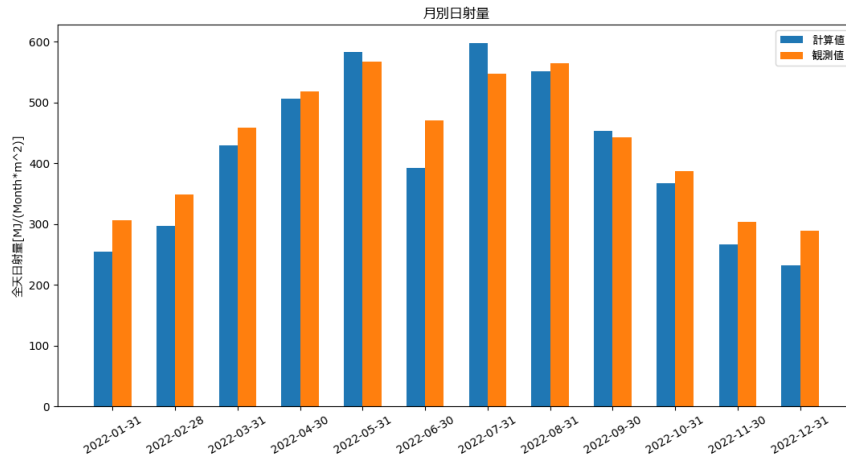


図 4.2 高知の補正後の月別日射量 (計算値と観測値)。縦軸は月平均日射量 [MJ/(Month·m<sup>2</sup>)] であり、横軸は日付のグラフである。6月における気象条件による損失係数  $C[-]$  は戸田ら [21] を参考に  $C = 0.4$  とした。

ここで、年間の日射量について考える。理論値  $J_{calculation}$  と観測値  $J_{observation}$  との相対誤差を式 (4.1) により計算すると、札幌は 1.4%、東京は 8.9%、高知は 0.9%、昭和基地は 12.3% である (図 4.3)。実際には日々の気象変動があり、札幌や高知のように相対誤差が 10% 以内であれば、気象条件による損失係数  $C[-]$  の仮定が十分に適用可能と考えられる。しかし、昭和基地のように相対誤差が 10% 以上であれば、気象条件による減衰  $C[-]$  に関する検討を行う必要がある。そのため、気象条件による減衰を補正行ったあと (昭和基地  $P_0 = 0.95$ ,  $C = 0.7$ ) の相対誤差 (図 4.4) を見てみると、札幌は 1.4%、東京は 4.5%、高知は 4.6%、昭和基地は 2.3% となった。このことから、年間の日射量は年間の平均雲量から計算は可能であるが、太陽光発電を考慮したとき、1日単位の発電量が重要になる。それゆえに、地域特有の気候を把握した気象条件による損失を考える必要がある。しかし、結果として、理論式の妥当性は保証されたといえる。

$$E = \frac{|J_{observation} - J_{calculation}|}{J_{observation}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

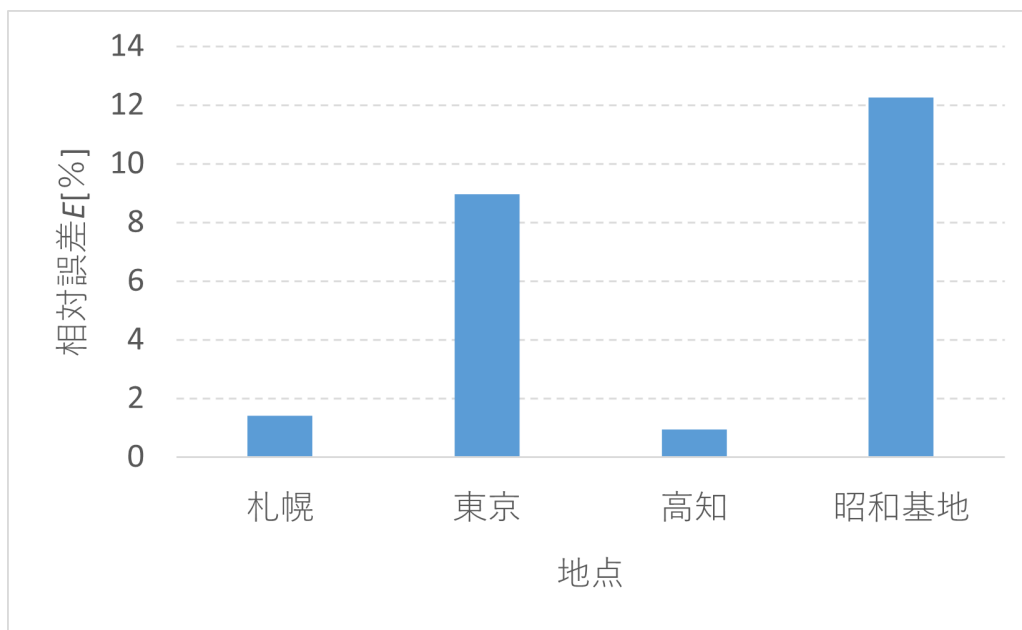


図 4.3 各地点における観測値と計算値との相対誤差。図 4.3 は、縦軸相対誤差  $E$  [%] であり、横軸地点のグラフである。札幌は 1.4%、東京は 8.9%、高知は 0.9%、昭和基地は 12.3% である。

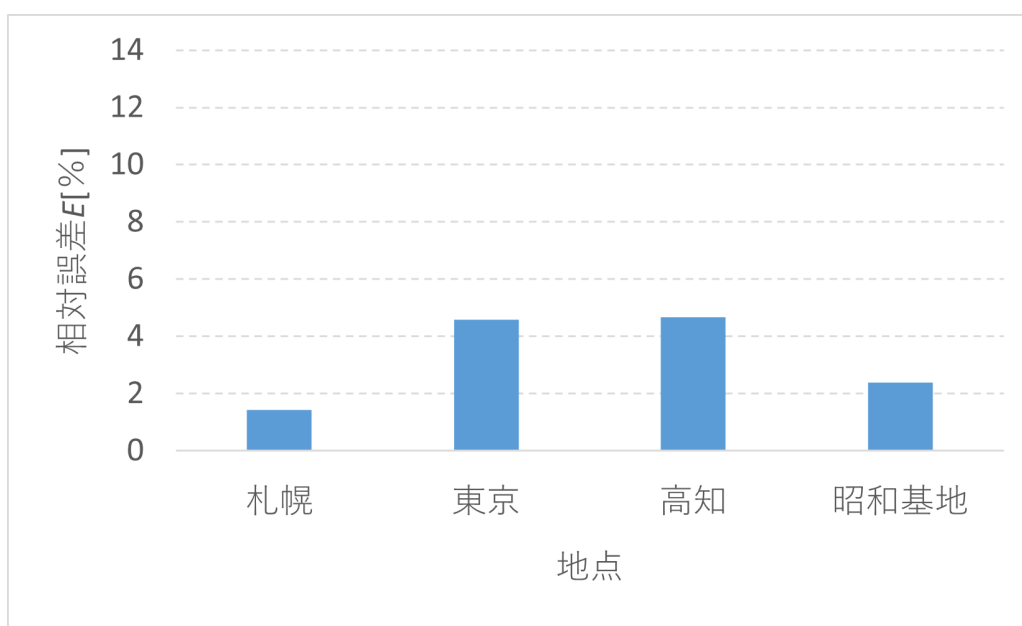


図 4.4 各地点における観測値と計算値との相対誤差 (補正あり)。図 4.4 は、縦軸相対誤差  $E$  [%] であり、横軸地点のグラフである。札幌は 1.4%、東京は 4.5%、高知は 4.6%、昭和基地は 2.3% である。昭和基地における補正後の係数は  $P_0 = 0.95$ 、 $C = 0.7$  である。

## 4.2 観測期間の検討

理論式の妥当性が示せたため、観測期間について吟味することが可能になった。

観測期間の計算では、図 3.10 では、条件を複数変化させたため、どの条件が観測期間

に影響を与えているかが分かりづらい。このままでは、観測可能期間の検討が出来ないため、まず、消費電力の条件を再設定して計算する。消費電力  $P_{LOSS}$  は、1週間の内6日間は観測のみ電力を消費 ( $P_{LOSS_{observation}} = 0.10 \text{ Ah/Day}$ ) して、1週間の内1日通信に電力を消費する条件 ( $P_{LOSS_{com}} = 1.23 \text{ Ah/Day}$ ) で再計算を行う。パネル傾斜角と方位角は、著者らが南極ペネトレータの投下試験を行った際、ペネトレータの貫入角度はおおむね  $30^\circ$  前後の振れ幅であった ([30]) ため、パネルの傾斜角と方位は  $\phi = 30^\circ$  北向き、 $\phi = 30^\circ$  西向き、 $\phi = 30^\circ$  南向きとして設定した。次に、パネル面積  $S = 1.3 \text{ m}^2$  は変化させず、電源容量を  $BT = 36, 72 \text{ Ah}$  の2通りで設定する、観測可能期間 (図 4.5、4.6) は次の通りとなる。

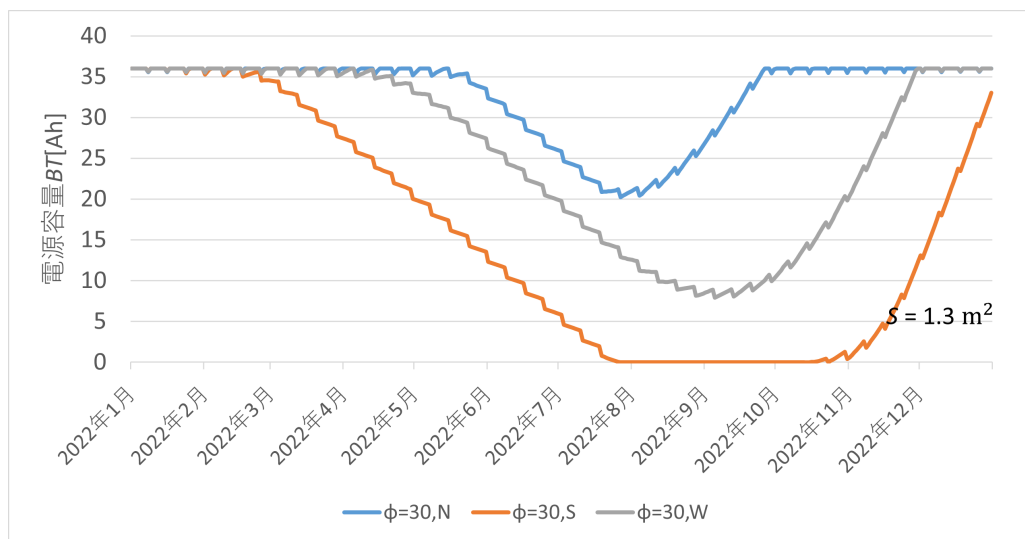


図 4.5 電源容量-日付グラフ。横軸が日付、縦軸が電源容量  $BT[\text{Ah}]$  のグラフである。このとき、1週間の内6日間は観測のみ電力を消費 ( $P_{LOSS_{observe}} = 0.10 \text{ Ah/Day}$ ) して、1週間の内1日通信にも電力を消費する条件 ( $P_{LOSS_{com}} = 1.23 \text{ Ah/Day}$ ) で再計算を行った。青色の線が  $\phi = 30^\circ$ 、北向きのときの電源容量の推移である。橙色の線が  $\phi = 30^\circ$ 、南向きのときの電源容量の推移である。灰色の線が  $\phi = 30^\circ$ 、西向きのときの電源容量の推移である。

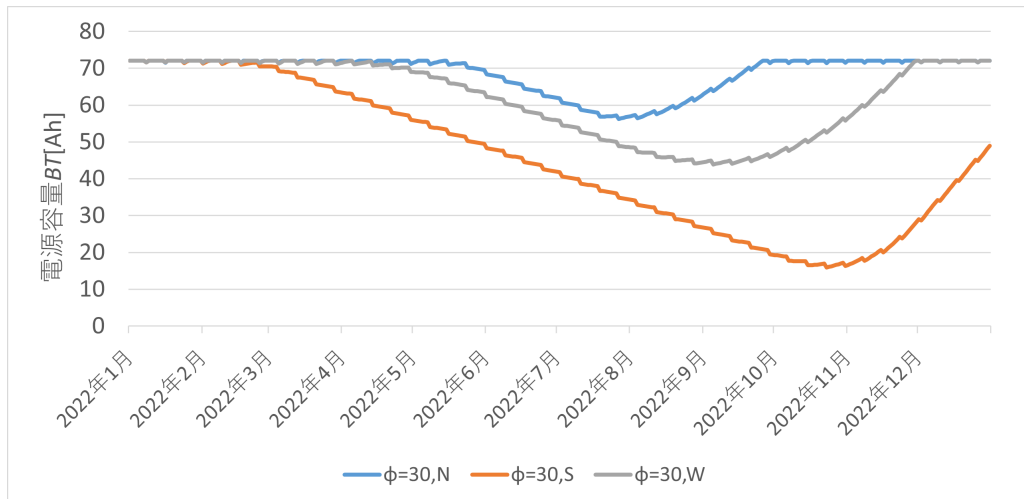


図 4.6 電源容量-日付グラフ。図 4.6 は横軸が日付、縦軸電源容量  $BT[Ah]$  のグラフである。このとき、1 週間の内 6 日間は観測のみ電力を消費 ( $P_{LOSS_{Observe}} = 0.10 \text{ Ah/Day}$ ) して、1 週間の内 1 日通信に電力を消費する条件 ( $P_{LOSS_{Com}} = 1.23 \text{ Ah/Day}$ ) で再計算を行った。青色の線が  $\phi = 30^\circ$ 、北向きのときの電源容量の推移である。橙色の線が  $\phi = 30^\circ$ 、南向きのときの電源容量の推移である。灰色の線が  $\phi = 30^\circ$ 、西向きのときの電源容量の推移である。

最後に、観測可能日数にどのパラメータが一番影響を与えているかを検討を行うために、太陽光パネル面積  $S$ 、消費電力  $P_{LOSS}$ 、電源容量  $BT$  をパターン変化させたときの観測可能日数の差を 8 パターン (表 4.2 ~ 表 4.9) に分類して、それぞれの観測可能日数を確認した。このとき、傾斜角  $\phi$  は  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  で、方位は、北、西 (東と同じ)、南のみとした。また、消費電力のパターン (表 4.1) は 2 つのパターン (A,B) を設定した (図 4.5、4.6 で使用した条件 (P\_LOSS\_A) と 2 倍早く消費する条件 (P\_LOSS\_B) を設定した)。観測日数は 1 月 1 日 (南極の夏) に観測を開始するとして、開始からの日数でカウントしている。水色で示している日数は通年しての観測が可能であり、赤色で示している日数は電源容量が  $0 \text{ Ah}$  になった日までの日数である。

表 4.1 消費電力のパターン

	P_LOSS_A [Ah]	P_LOSS_B [Ah]
1 日目	0.1	0.2
2 日目	0.1	0.2
3 日目	0.1	0.2
4 日目	0.1	0.2
5 日目	0.1	0.2
6 日目	0.1	0.2
7 日目	1.23	2.45



観測日数の差について8パターン(表4.2～表4.9)の比較をしたとき、面積変化について(表4.2、4.4、4.6、4.8に対して表4.3、4.5、4.7、4.9と比較したとき)は、面積の影響は小さく太陽光パネルのサイズを大きくするだけでは、観測日数を大幅に増やすことは出来ないことが言える。

消費電力の変化について(表4.2、4.3、4.4、4.5に対して表4.6、4.7、4.8、4.9と比較したとき)は、観測日数に大きな変化がみられる。例えば、表4.2と表4.6を比較すると、表4.2では6パターンでは通年での観測が可能であるが、表4.6では、9パターンすべてで観測が中断してしまうことが分かる。

電源容量を変化させた場合は、(表4.2、4.3に対して、4.4、4.5を比較し、表4.6、4.7に対して、4.8、4.9を比較したとき)は、観測日数に多少の変化がみられる。例えば、表4.9と表4.7を比較すると、表4.7では1パターンのみ通年での観測できるが、表4.9では、6パターンで通年で観測可能となる。観測可能期間の検討を行ったところ、観測期間を長くするには、消費電力を抑えることが最もよい影響を与えることが示唆された。しかし、パネル面積が大きい場合は、電源容量を大きくすることでパネル傾斜角の依存性を減らすことが可能であると考えられる。補足として、表4.7のようにパネル傾斜角がついているにも関わらず観測日数が増加しているのは、反射光の成分が考慮されているからである。

表 4.2 観測パターン A

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 1.3
0	365	365	365	P_LOSS_A
15	365	365	224	BT = 36
30	365	365	206	

表 4.3 観測パターン B

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 2.6
0	365	365	365	P_LOSS_A
15	365	365	225	BT = 36
30	365	365	211	

表 4.4 観測パターン C

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 1.3
0	365	365	365	P_LOSS_A
15	365	365	365	BT = 72
30	365	365	365	

表 4.5 観測パターン D

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 2.6
0	365	365	365	P_LOSS_A
15	365	365	224	BT = 72
30	365	365	206	

表 4.6 観測パターン E

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 1.3
0	154	154	154	P_LOSS_B
15	183	159	135	BT = 36
30	208	168	119	

表 4.7 観測パターン F

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 2.6
0	176	176	176	P_LOSS_B
15	216	180	147	BT = 36
30	365	189	129	

表 4.8 観測パターン G

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 1.3
0	232	232	232	P_LOSS_B
15	365	240	207	BT = 72
30	365	264	196	

表 4.9 観測パターン H

$\theta \backslash \phi$	N	W	S	
$\phi$				S = 2.6
0	365	365	365	P_LOSS_B
15	365	365	224	BT = 72
30	365	365	208	

## 第5章 結論と今後の展開

### 5.1 結論

本研究では、ペネトレータ観測システムを維持するために日射量の算出から観測期間の検討までを行った。まず、日射量の理論式については、日本と南極での気象庁の観測値をもとに本研究での理論式と比較した結果、年間の日射量については妥当性が取れていると考えられる。しかし、太陽光発電では、1日単位、さらにいうと1時間単位での日射量を正確に予測する必要がある。そのため、気象条件による減衰 $C$ に関しては、さらに多くのパラメータ(例えば、風速や雲画像など)を考慮する必要があることが分かった。観測期間に関しては、南極地域特に、昭和基地でペネトレータ観測を行うと仮定したとき、太陽光パネル面積、消費電力、電源容量の3つのパラメータを変化させたときの観測日数の差を確認したところ(表4.2～表4.9)消費電力による電池容量の消費が一番影響を与えることが示唆された。また、電源容量に関しては、パネル傾斜角と方位角の依存性を抑えることが示唆された。ペネトレータの観測システム上、電源容量の増設や太陽光パネルを大きくすることは、衝撃試験や重さ、サイズによる制限などの様々な問題を解決させる必要があるため、容易に搭載・変更することは出来ない。一方で、消費電力に関しては、ソフトウェア側からの変更することが容易である。本研究における観測期間の検討結果が、今後のペネトレータを使用した観測において観測システムへの一助となれば幸いである。以上ことから本研究での目的である、南極地域におけるペネトレータ観測システム維持のための太陽光発電の可否を数値計算によって判断し、ペネトレータの観測期間の検討を行うことができた。

### 5.2 今後の展望

著者は博士課程に進学予定であり、今後もペネトレータ利用した研究を継続するつもりである。特にアフターボディ方式のペネトレータ開発を主軸に研究を進める予定である。アフターボディ方式とは、観測機器を搭載している「Forebody」と電源系やアンテナを搭載している「Afterbody」でペネトレータが構成されている(図5.1)。アフターボディ方式は太陽光パネルを搭載するには最適な貫入方式と考えられるため、本研究で得

られた結果を生かせる。そのため、本研究で検討を行った観測期間に関して、消費電力、観測点での発電量、太陽光パネルのサイズをシステムの入力としたアフターボディ方式のペネトレータの研究を行う予定である。

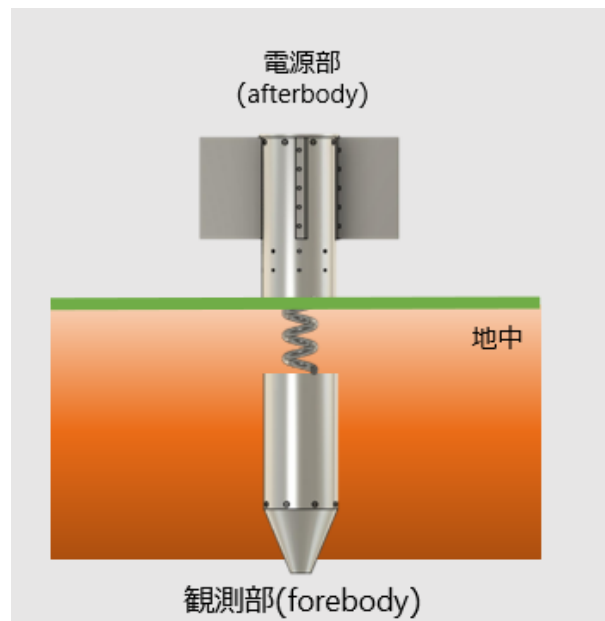


図 5.1 アフターボディ方式による貫入方式。地中には観測機器を搭載している「Forebody」が貫入しており、電源系やアンテナを搭載している「Afterbody」が地上に設置される貫入方式である。

## 謝辞

この論文の執筆に際し、多くの方々からのご指導と励ましを受けました。研究指導、研究議論に非常に多くの時間を割いて指導して下さった山本 真行 教授に感謝します。南極観測隊同行者の話を提供、研究議論に付き合っていたいただいた、宇宙地球探査システム研究室の西川 泰弘 助教に感謝申し上げます。ペネトレータの研究のきっかけを提供いただいた、JAXA 宇宙科学研究所 田中 智 教授に厚く御礼申し上げます。南極地域観測隊への参加を承認して下さった、高知工科大学前学長 磯部 雅彦 名誉教授、電子・光システム光学教室長 橘 昌良 教授に感謝申し上げます。また、第 64 次南極地域観測隊での活動では、たくさんの方にお世話になりました。ペネトレータ実験の調整を行って下さった。夏隊長 伊村 智 教授 (国立極地研究所 生物圏研究グループ 所長補佐)、越冬隊長 樋口 和夫 (国立極地研究所南極観測センター) にお礼申し上げます。ペネトレータ実験を支援して下さった、63 次越冬隊員 岩本 勉之 様 (紋別市産業部)、一般研究観測チーム (AP1002) の栗田 直幸 准教授 (名古屋大学宇宙地球環境研究所)、江刺 和音 様 (名古屋大学宇宙地球環境研究所 博士後期課程)、岡田 拓己 様 (富山大学大学院理工学研究科 修士課程)、一般研究観測チーム (AP1003) の市川光太郎 准教授 (京都大学大学院フィールド科学教育研究センター 海洋生態系部門)、河合 賢太郎 助教 (広島大学大学院統合生命科学研究科)、黒田 充樹 様 (北海道大学大学院環境科学院博士後期課程)、気象観測隊員 西巻 英明 様 (気象庁大気海洋部)、大山 まどか 様 (気象庁大気海洋部)、野外観測支援 久保木 学 様 (国立極地研究所南極観測センター)、通信 戸田 仁 様 (総務省関東総合通信局)、海上自衛隊 しらせ 乗員のみなさまに大変お世話になりました。日射量の議論に参加して下さった平沢 尚彦 助教 (国立極地研究所)、金尾 正紀 准教授 (国立極地研究所 極域環境データサイエンスセンター) に多大なご助言、有用な情報のご協力頂きました。ここに誠意の意を表します。また、宇宙地球探査システム研究室の学生諸氏に研究室での細やかな業務を負担していただきました。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] JAXA, “小型月着陸実証機 slim”, Accessed on Nov. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/current/slim.html>
- [2] Lauretta DS, Balram Knutson SS, Beshore E, Boynton WV, Drouet d' Aubigny C, DellaGiustina DN, Enos HL, Golish DR, Hergenrother CW, Howell ES・他, “OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu”, *Space Science Reviews*, vol. 212, pp. 925–984, 2017.
- [3] 斎藤宏文, 中島俊, “LUNAR-A 計画の概要: ペネトレータによる月探査”, 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス, vol. 94, no. 113, pp. 21–28, 1994.
- [4] S. Smrekar, D. Catling, R. Lorenz, J. Magalhães, J. Moersch, P. Morgan, B. Murray, M. Presley, A. Yen, A. Zent *et al.*, “Deep space 2: the mars microprobe mission,” *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 104, no. E11, pp. 27 013–27 030, 1999.
- [5] 気象庁, “過去の気象データ検索”, accessed on Feb. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [6] R. D. Lorenz, “Planetary penetrators: Their origins, history and future,” *Advances in Space Research*, vol. 48, no. 3, pp. 403–431, 2011.
- [7] 白石浩章, 白井慶, 石原吉明, 早川雅彦, 水野貴秀, 後藤健, 尾崎正伸, 山田和彦, 田中智, 山田竜平・他, “無人航空機を用いた投下型プローブの火山島観測実験”, 日本火山学会講演予稿集 2017 特定非営利活動法人 日本火山学会, 2017, pp. 43–43.
- [8] 松島健, 山下幹也, 安原達二, 堀口浩, 宮町宏樹, 戸田茂, 高田真秀, 渡邊篤志, 渋谷和雄・他, “投下型地震計 (ペネトレータ) の南極・みずほ高原での試験観測-第 43 次夏隊報告”, 南極資料, vol. 47, no. 3, pp. 395–408, 2003.
- [9] 中部電力, “太陽光発電の仕組み”, accessed on Feb. 1, 2024. [Online]. Available: [https://www.chuden.co.jp/energy/ene\\_about/electric/kids\\_denki/tsukuru/tsu\\_solar/](https://www.chuden.co.jp/energy/ene_about/electric/kids_denki/tsukuru/tsu_solar/)
- [10] 村井俊治, “日照, 日射の効果に関する基礎的研究”, 土木学会論文報告集, vol. 1973, no. 215, pp. 49–59, 1973.
- [11] 村井俊治, 大林成行, “斜面の受ける太陽エネルギーに関する基礎的研究”, 生産研究, vol. 25, no. 8, pp. 319–326, 1973.
- [12] 荒木眞之, “太陽視赤緯の略算式”, 日本林學會誌, vol. 63, no. 4, pp. 141–143,

- 1981.
- [13] 小木曾 定彰, 斎藤 平蔵, 松尾 陽, “3006 快晴時の日射について : 日射量に関する研究 2(計画)”, 日本建築学会論文報告集, vol. 66.2, pp. 21–24, 1960.
- [14] 居島修, 鈴木健司, 辰己弘, “気象庁におけるエアロゾルの光学的厚さのトレーサビリティについて”, エアロゾル研究, vol. 29, no. 3, pp. 159–165, 2014.
- [15] 村井, 青島正和, “大気の状態を考慮した景観画像の作成 (光デバイス・光工学 (特集))”, 生産研究, vol. 45, no. 5, pp. 326–333, 1993.
- [16] 鈴木 憲三, 荒谷 登, “日射量計算式の開発”, 日本建築学会論文報告集, vol. 279, pp. 97–105, 1979.
- [17] 永田忠彦, “天空日射に関する berlage の式に対する疑問”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 381–382, 1975.
- [18] 永田忠彦, 沢田康二, “晴天空気による水平面散乱日射の式の試案”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp. 519–520, 1978.
- [19] D. Erbs, S. Klein, and J. Duffie, “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation,” *Solar energy*, vol. 28, no. 4, pp. 293–302, 1982.
- [20] P. Ineichen, R. Perez, R. Seal, E. Maxwell, and A. Zalenka, “Dynamic global-to-direct irradiance conversion models,” *Ashrae Trans*, vol. 98, no. 1, pp. 354–369, 1992.
- [21] 戸田健太郎, 中村彰宏, “全天写真を用いた日射量推定プログラムの開発”, 日本緑化工学会誌, vol. 27, no. 1, pp. 154–159, 2001.
- [22] 青木秀敏, 廣田仲生, “太陽電池の発電量に及ぼす雪面反射の影響”, 八戸工業大学エネルギー環境システム研究所紀要, vol. 10, pp. 29–34, 2012.
- [23] JIS C 8907, “附属書 2 (参考) 設計パラメータの分類”, 2005.
- [24] 気象庁, “気象庁観測ガイドブック”, accessed on Feb. 1, 2024. [Online]. Available: [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku\\_guide/hpc.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/hpc.html)
- [25] S. Ishii, M. Seta, N. Nakai, S. Nagai, N. Miyagawa, A. Yamauchi, H. Motoyama, and M. Taguchi, “Site testing at dome fuji for submillimeter and terahertz astronomy: 220 ghz atmospheric-transparency,” *Polar Science*, vol. 3, no. 4, pp. 213–221, 2010.
- [26] 竹内 渉, 安岡 善文, “衛星リモートセンシングデータを用いた正規化植生, 土壌, 水指数の開発”, 写真測量とリモートセンシング, vol. 43, no. 6, pp. 7–19, 2004. [Online]. Available: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs1975/43/6/43\\_6\\_7/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs1975/43/6/43_6_7/_article/-char/ja/)
- [27] antenna1st, “Inr21700-50g,” accessed Feb. 8, 2024. [Online]. Available: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs1975/43/6/43\\_6\\_7/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs1975/43/6/43_6_7/_article/-char/ja/)

- //www.antenna1st.com/home/product/inr21700-50g
- [28] 気象庁, “高知の平年値”, accessed on Feb. 1, 2024. [Online]. Available: [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml\\_sfc\\_ym.php?prec\\_no=74&block\\_no=47893](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=74&block_no=47893)
- [29] 気象庁, “東京の平年値”, accessed on Feb. 1, 2024. [Online]. Available: [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml\\_sfc\\_ym.php?prec\\_no=44&block\\_no=47662&year=&month=12&day=&view=p1](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=44&block_no=47662&year=&month=12&day=&view=p1)
- [30] 西川 泰弘, 山本 耕大, 田中 智, “第 64 次日本南極地域観測隊におけるペネトレーター観測報告”, 南極資料, Antarctic Record, vol. 68, pp. 1–20, Feb. 2024.



# 付録 A 係数表

## 係数表

計算に使用する予定の係数は表 A.1 の通りである。

表 A.1 係数表

透過係数 $P_0$			
$P_{日本} = 0.75$	$P_{昭和基地} = 0.95$		
気象条件による減衰 $C$			
$C_S = 1.0$	$C_{SN} = 0.9$	$C_{CS} = 0.8$	$C_C = 0.6$
$C_R = 0.4$			
太陽光パネルの減衰 $K$			
$K_{HD} = 0.97$	$K_{HS} = 1.00$	$K_{HC} = 1.00$	
$K_{PD} = 0.95$	$K_{PT} = 0.97$	$K_{PA} = 0.97$	$K_{PM} = 0.94$
$\gamma_{BA} = 0.80$	$\eta_{BD} = 1.0$	$\eta_{BA} = 0.83$	
$\gamma_{DC} = ELDC/EPA$	$K_{DD} = 0.5$	$K_{IN} = 0.90$	
地面の反射係数 $R$			
$R_{conifers} = 0.5$	$R_{broadleaf} = 0.5$	$R_{glass} = 0.5$	$R_{concrete} = 0.38$
$R_{sand} = 0.3$	$R_{silt} = 0.15$	$R_{clay} = 0.2$	$R_{dryclay} = 0.2$
$R_{asphalt} = 0.1$	$R_{water} = 0.05$	$R_{snow} = 0.9$	
ペネトレータ諸元			
$BT = 72 \text{ Ah}$	$P_{LOSS} = 1.225 \text{ Ah/Day}$	$V_{system} = 12 \text{ V}$	