

太陽電池の発電量に及ぼす雪面反射の影響

青木秀敏 *・廣田仲生 **

論文要約

太陽電池の発電量は、日射量が少ない冬は低下する。特に冬が長い北国では降雪も関与し発電量が少ない。しかし、冬季は太陽高度が低いので、晴天時などは雪面による太陽光の反射光が太陽電池に当たり、発電量が増加すると予想できる。そこで、本研究では、屋外に分光感度特性の異なる単結晶太陽電池とアモルファス太陽電池の2種類の実験装置を垂直に設置し、太陽電池の発電量に及ぼす雪面反射の影響を検討した。その結果、単結晶太陽電池(c-Si)の場合、雪面反射によって発電量が約2倍近くも上昇した。太陽高度が低い冬の期間の発電量は少ないとされていたが、太陽電池の傾斜角を大きくすることにより、雪面からの反射光の効果でc-Siに関しては発電量を増加させる事ができると考えられる。

キーワード：太陽電池，反射，雪面，太陽光線，発電電力量

The Effect of Radiation Reflected from Snow Surfaces on the Generated Energy of Photovoltaic Modules

Hidetoshi AOKI* and Nakao HIROTA**

ABSTRACT

In cold, snow-covered regions, the energy generated by photovoltaic modules decreases, during winter owing to the decrease in solar radiation. However, the energy generated by these modules is expected to increase owing to the reflection of solar radiation from snow surfaces; further, generated energy is expected to rise owing to the low surrounding air temperature. In this study, the effect of the radiation reflected from snow surfaces on generated energy was examined experimentally by installing single-crystal silicon photovoltaic modules and amorphous silicon photovoltaic modules vertically.

The results of the study showed that, in the case of single-crystal silicon photovoltaic modules, the generated energy in the presence of snow surfaces increased to twice that in the case without snow surfaces owing to the with the influence of radiation reflected from the snow surface. It was found that an increasing amount of energy was generated when the angle of inclination of the photovoltaic modules was increased; at high angles of inclination, more radiation is incident on the modules owing to the multiple reflections from snow surfaces in cold regions in the northern latitudes.

Keywords : *photovoltaic modules, reflection, snow surfaces, solar radiation, generated energy*

平成 24 年 2 月 29 日受理

* エネルギー環境システム研究所・教授

** 機械システム工学専攻前期課程平成 14 年度修了

1. 緒言

太陽光発電は、天候に左右され、晴天時は良好な発電量が得られるが、雨天・曇天時には雲に太陽光が遮られるので、発電量は低下する。

また、太陽電池の発電量には、季節による日射量も大きく関係し、夏と冬の日射量を比較すると夏の方が多く、冬は少なくなる。特に冬が長い北国では降雪も関与し発電量が少ない。しかし太平洋岸では晴天時に日焼け（雪焼け）してしまう程の雪面からの反射がある。太陽光のうち紫外線の雪面反射率はおよそ90%もあると言われている。しかも、冬季は太陽高度が低いので、晴天時などは雪面による太陽光の反射光が太陽電池に当たり、発電量が増加すると予想できる。

これまで雪面による太陽光の反射率 (albedo) を研究した例はあるが、太陽電池の発電量に及ぼす雪面反射の影響を検討した報告は少ない。中原ら¹⁾ はパネル面への日射スペクトルを直達日射成分、天空散乱日射成分および雪面反射日射成分に分け、雪面反射日射下における太陽電池出力を理論計算している。仲村ら²⁾ は、太陽電池パネル面上へ積雪があった場合とない場合とを比較し、積雪のため発電量が約22%減少することを実測し、冬期間の降雪による発電量の低下を最小限にとどめ、かつ冬期間の雪面反射光を有効に利用するためには、傾斜角を緯度角より大きくした方がより多くの発電量が期待できることを報告している。福島ら³⁾ は、外装・屋根一体型のアモルファス太陽電池を用い、南側壁面に設置した太陽電池の実測発電量は、屋根面日射量から予測した雪面反射を含まない発電量より30%程上回っていることを報告している。

太陽光が雪面で反射する割合 (albedo) について、Zinko⁴⁾ らは、新雪の状態が変化する場合の雪面反射率を晴天日と曇天日に実測し、取得する太陽エネルギーの増加度を予測している。Mochida⁵⁾ らは、雪面で覆われた高い albedo を示す地表からの輻射を加味した輻射温度を地上1.5 mに設置したグローブ温度計で測定し、雪面で覆われた地温が雪面で覆われない場合に比べて約8℃低いにもかかわらず、平均輻射温度は7℃高く、雪面反射の効果は大きいことを明らかにしている。

このように、太陽光が地表で反射する割合 (albedo) は雪面が高い値を示すことから、太陽電池の傾斜角を緯度角より高くすることで、雪面反射の効果により発電量が増大することが明らかになっている。しかし、雪面反射による発電量の増加を同一の気象条件、設置条件でフィールド実験を行って測定した報告はない。また、太陽電池の種類によって分光感度特性が異なるので、雪面反射の効果は太陽電池の種類によって変化することも予想される。さらに雪質によって太陽光の雪面反射率 (albedo) が異なることから、太陽電池の発電量に対する雪面反射の効果も雪質によって変化することも考えら

れる。このような雪面反射に及ぼす種々の因子の影響を検討した報告もない。

そこで、本研究では、屋外に分光感度特性の異なる単結晶太陽電池とアモルファス太陽電池の2種類の実験装置を組み立て、太陽電池の発電量に及ぼす雪面反射の影響を検討した。

2. 実験装置及び方法

図1に実験装置の側面図を示し、雪面反射の状況を模式的に示す。太陽光線の動きは図の矢印により表している。左側の雪面反射無しの場合、太陽電池の前面に黒いシートを敷いて太陽光の反射を無くした状態である。黒いシートは雪面反射による太陽光が太陽電池に届かないように太陽電池の前面10 m四方に敷いた。それにより、太陽電池は太陽光の直達日射あるいは天空散乱日射だけで発電する形となる。

それに対し、右側の雪面反射有りの場合、太陽電池は太陽光の直達日射あるいは天空散乱日射と太陽光の直達日射あるいは天空散乱が雪面で反射する雪面反射日射の両者を受けて発電する仕組みとなっている。実験装置は、約50 m四方に障害物のない本学アーチェリー場の雪面の上に設置した⁶⁾。

図2及び図3に雪面反射有りの場合と雪面反射無しの場合の実験装置を比較して示す。単結晶太陽電池（以下c-Si、地上高657.5 mm）とアモルファス太陽電池（以下a-Si、地上高667.5 mm）を隣り合わせた装置を2組設置し、同時刻に同時に測定し、雪面反射の影響を検討した。装置の方位角は0度（真南）、太陽電池の傾斜角度はすべて90度（地面に対し直角）である。

図中、太陽電池に挟まれる形で設置されているものが日射計（地上高680 mm）である。左側の黒い丸い形の物がグローブ温度計（地上高745 mm）で、雪面からの輻射を加味した輻射温度を測定する。実験は太陽電池の前面に積雪の有る2月の晴天と曇天の日に行った。

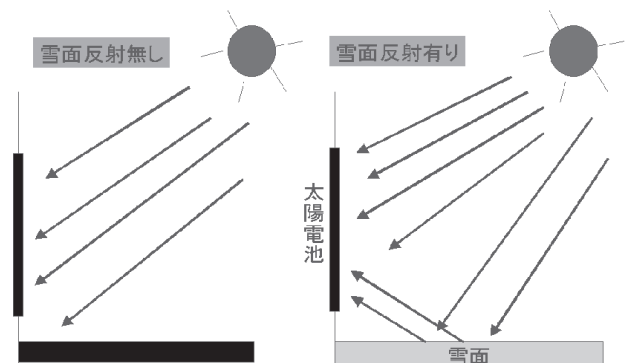


図1 実験装置概要図

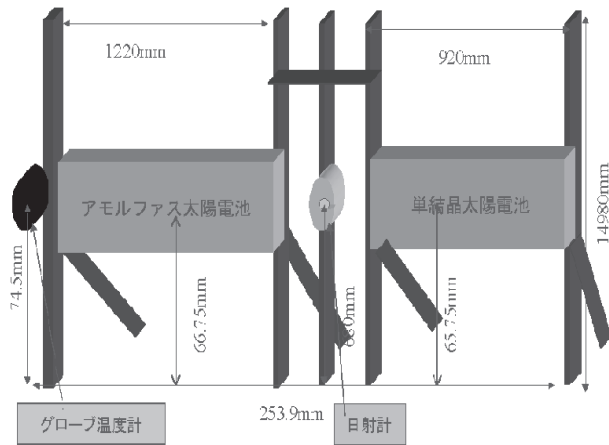


図2 実験装置図（雪面反射有り）

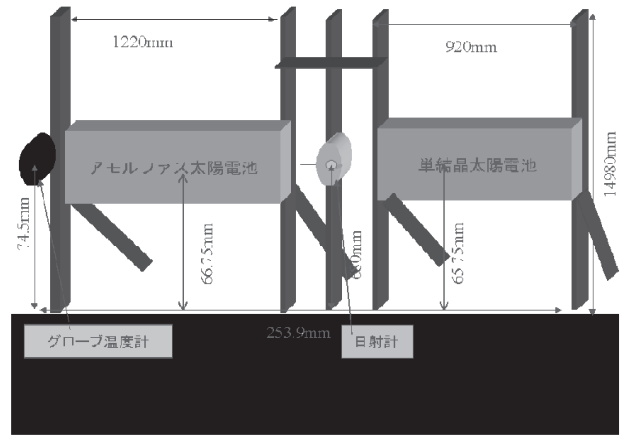


図3 実験装置図（雪面反射無し）

3. 実験結果及び考察

結果の一例として積雪約 200mm、積雪密度 373 kg/m³の晴天の日（2月8日）に計測したデータを図4～7に示す。

図4は、太陽電池面と同じ傾斜角90度面の日射量の経時変化を雪面反射が有る場合と無い場合とを比較して示したものである。両者とも雲による日射量の変化が見取れるが、太陽光と雪面反射光とが合わさる反射有りの場合の方が、日射量は20% (0.15 kW/m²)以上の増加が見られ、雪面反射が生じている事を表している。これらの結果から雪面反射を利用すれば、太陽電池の出力増加は確実に予想できる。

次にグローブ温度計で測定した雪面からの輻射を加味した輻射温度の経時変化に及ぼす雪面反射の影響を図5に示す。外気温が平均7.6℃に対し、反射有りの場合の平均輻射温度は15.9℃、反射無しの場合の平均輻射温度は13.3℃であった。雪面反射有りの場合と雪面反射が無い場合とを比較すると2.6℃の差が見られ、雪面に

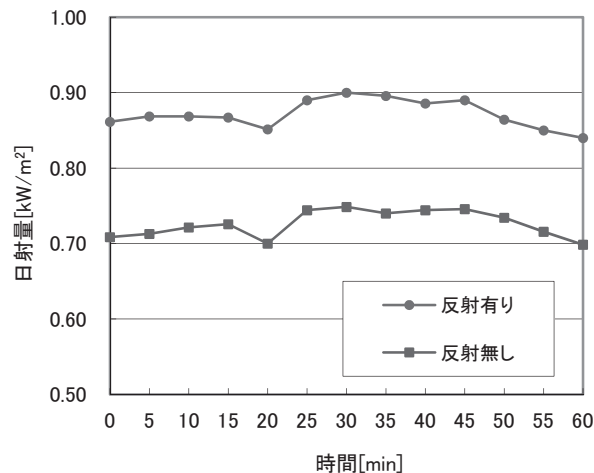


図4 90°面日射量の経時変化に及ぼす雪面反射の影響

より太陽光が反射されて輻射温度が増大している事がわかる。

図6は、c-Si太陽電池の表面温度の経時変化に及ぼす雪面反射の影響を示したものである。太陽電池表面は太陽光の直達日射あるいは天空散乱日射を受けて温度が上昇する。前方に雪面がある場合は雪面反射日射も加わりさらに表面温度が上昇する。このような現象が起きていることから、実験時の外気温が平均7.6℃にもかかわらず、雪面反射有りの場合の表面温度は雪面反射の無い場合より約3℃高く、最高で約23.4℃まで上昇している。c-Si太陽電池は電池本体温度が上がるにつれ発電効率が低下すると言われている。しかし、冬季は外気温が低いため、上記のように太陽電池表面温度はあまり上昇しない。そのため雪面反射による3℃前後の太陽電池表面温度の上昇は、発電効率の低下にはほとんど影響しないと考えられる。

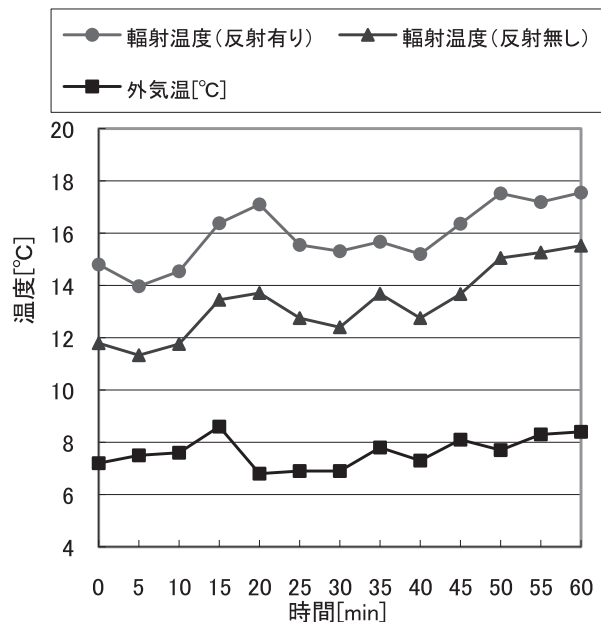


図5 輻射温度の経時変化に及ぼす雪面反射の影響

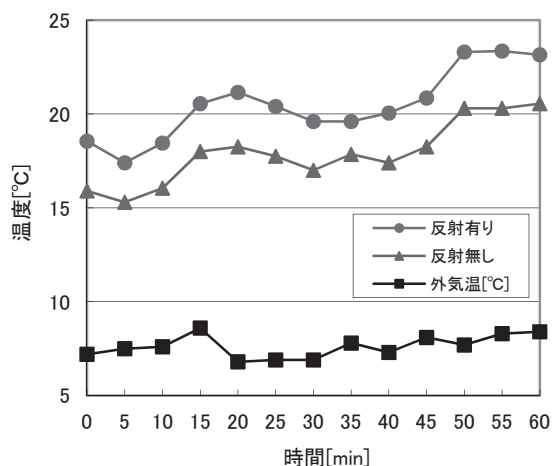


図6 太陽電池表面温度の経時変化に及ぼす雪面反射の影響 (c-Si)

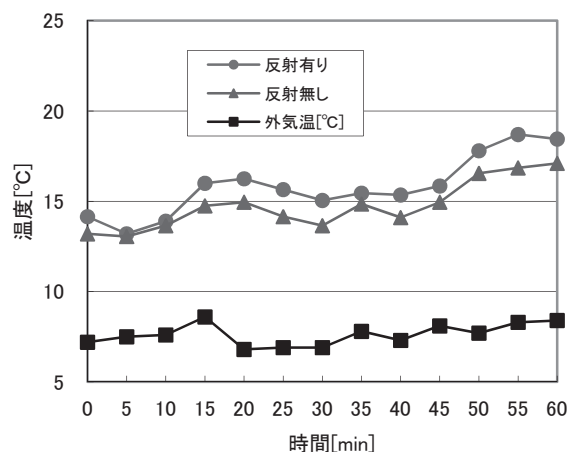


図7 太陽電池表面温度の経時変化に及ぼす雪面反射の影響 (a-Si)

図7は、a-Si太陽電池の表面温度の経時変化に及ぼす雪面反射の影響を比較して示したものである。a-Si太陽電池の場合も雪面反射有りの場合の方が雪面反射の無い場合より表面温度が高く、外気温が平均7.6°Cにもかかわらず、最高で約18.7°Cまで上昇している。しかし、c-Si程の温度差は見られなかった。これは、c-Siの表面が凹凸のある黒色が混じった表面状態であるのに対し、a-Siの表面が凹凸の少ないガラス状であるために、雪面で反射される日射を反射してしまうためと考えられる。

図8に、各太陽電池の分光感度特性⁷⁾を太陽光のスペクトルと対比させて示す。太陽電池は素子の材料により吸収される光の波長が異なり、図8はどの波長の光をどれだけ吸収できるかを最高感度を1.0とした相対感度として表したものである。本研究に用いているc-Siとa-Siは、それぞれ吸収できる波長が異なり、c-Siは感度のピークが約900nm付近の長波長域、a-Siは約580nm付近ピークの短波長域の太陽光に感度良く反応している事がわかる。

このように、雪面によって太陽の日射が反射され、太

陽電池表面温度が上昇するということが明らかにされたが、積雪層表面の状態によって雪面反射状況が異なることが予想される。積雪層表面の状態を表す指標として、さまざまな因子が考えられるが、積雪層の密度が比較的容易に測定できる因子である。そこで、積雪面に日射計を90度に設置し、雪面反射有りの場合の日射量を雪面反射が無い場合の日射量と比較することにより求めた雪面による日射量の増加率とその際の積雪層密度との関係を図9に示す。積雪密度が増えると雪面が滑らかになり、雪面からの反射が増えて日射量が増加する事がわかる。

ところで、雪面で反射される太陽光のスペクトルは積雪層の表面状態によって異なっている。雪密度の違いによる積雪の波長別反射率⁸⁾を図10に示す。乾き雪の場合、c-Si太陽電池の分光波長域(0.3~1.2 μm)では太陽光線の反射率が50~93%以上、a-Si太陽電池の分光波長域(0.3~0.8 μm)では太陽光線の反射率が83~93%と太陽電池の素子の違いによって反射率が異なっている。乾き雪でも湿り雪でも、積雪密度が小さく雪の表面の凹凸があると、乱反射すなわち太陽光の反射

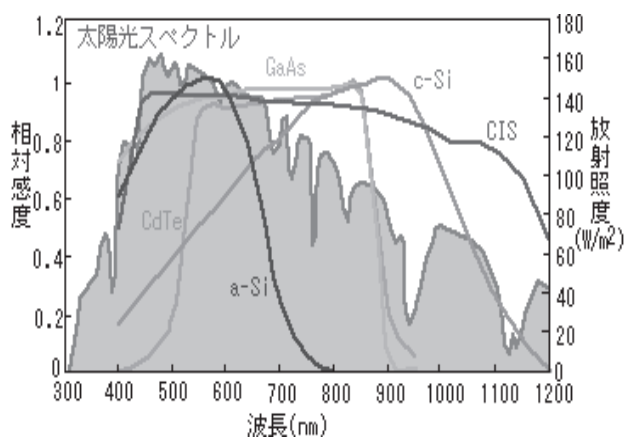


図8 各太陽電池の分光感度特性⁷⁾

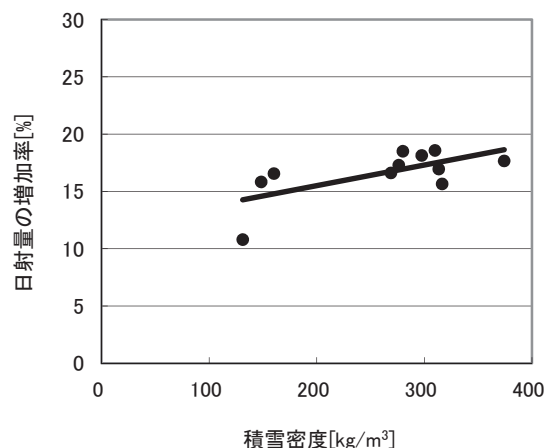


図9 雪面による90度面日射量の増加率と積雪密度との関係

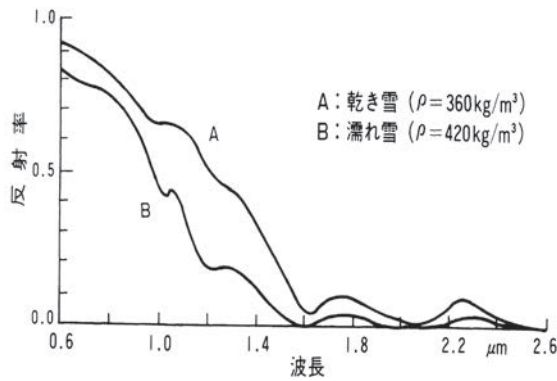


図10 積雪の波長別反射率⁸⁾

量が多くなり、積雪密度が大きく表面に凹凸が少ないと、乱反射が少なくなり太陽光の反射量が減少することを示している。本研究で測定した積雪密度は120～380 kg/m³と小さく、同様な傾向を示していないが、雪質によって雪面反射量が異なる事を表している。

表1は90度面の平均日射量 [kW/m²] および各太陽電池の単位面積出力 [W/m²] と発電効率 [%] に及ぼす雪面反射の影響を比較して示したものである。二種類の太陽電池を比較すると、c-Siの方が雪面反射によって見かけ上の発電効率が大きく増加し、太陽電池素子の違いによって雪面反射の効果に差がみられる。

表2は、雪面反射による発電量の増加倍率を示したものである。c-Siが雪面反射によって発電量が2.27倍増加したのに対し、a-Siは1.21倍しか増加せず、雪面反射の効果が少ない。この理由としては、図8に示した積雪面の波長別反射率のグラフから、a-Siよりc-Siの方が分光感度幅が長波長側にずれ、しかも太陽光のスペクトル

表1 90度面の平均日射量 [kW/m²] および太陽電池の単位面積出力 [W/m²] と発電効率 [%] の変化

| | c-Si | | a-Si | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 雪有り | 雪無し | 雪有り | 雪無し |
| 平均日射量 [kW/m ²] | 0.871 | 0.724 | 0.872 | 0.724 |
| 単位面積出力 [W/m ²] | 95.22 | 41.79 | 46.48 | 38.37 |
| 発電効率 [%] | 10.94 | 5.77 | 5.33 | 5.30 |

表2 雪面反射による発電量の増加倍率

| | c-Si | a-Si |
|----------|------|------|
| 増加倍率 [-] | 2.27 | 1.21 |

ル領域と同じ位の感度幅をもっていること、さらにc-Siの場合、800nm (0.8 μm) 以下の短波長領域は相対感度が小さくなるが、雪面反射率の上昇が発電量の減少を打ち消すこと等の理由が考えられる。一方a-Siの場合、分光感度領域が太陽光のスペクトル領域の約半分と小さいため、雪面反射される日射を効率良く受け止めることができないためと考えられる。

4. 結論

太陽電池の発電効率に及ぼす雪面反射の影響を検討し、以下の結論を得た。

1. 単結晶太陽電池 (c-Si) の場合、雪面反射によって、発電量が約2倍近くも上昇した。これに対してアモルファス太陽電池 (a-Si) の場合、発電量は約1.2倍しか増加せず、雪面反射の効果が表れなかった。これは、両電池の分光感度特性の違いによるものと考えられる。
2. 雪面反射で日射量は10数%増加するが、積雪密度の大きい積雪は雪表面が滑らかである為に太陽の日射を良く反射して、日射量の増加率が大きくなった。
3. 太陽高度が低い冬の期間の発電量は少ないとされていたが、太陽電池の傾斜角を大きくすることにより、雪面からの反射光の効果でc-Siに関しては発電量を増加させる事ができると考えられる。

参考文献

- 1) 中原乾志, 由井尚正, 片岡照栄: 太陽電池の雪面反射日射の効果, 応用物理, Vol.55, pp.1182-1189, 1986
- 2) 仲村宏一, 山城迪: 寒冷地における太陽光発電システムの諸特性 (第4報), 北見工業大学研究報告, Vol.19, pp.47-53, 1987
- 3) 福島明, 吉野利幸, 鈴木大隆, 廣田誠一, 北谷幸恵, 月館司, 谷崎裕則: 積雪寒冷地におけるアモルファス系太陽電池の設置方法と発電効率に関する研究, 北海道立寒地住宅都市研究所調査研究報告, pp.739-748, 2002
- 4) H.Zinko and L.Eriksson: Contribution of Reflectivity of Snow Covered Ground to Solar Energy Production in Northern Climates, Solar World Forum Vol.3 pp.2402-2407, 1982
- 5) H.Mochida, Y.Tominaga, H.Yosino, M.Ohba and M.Hasegawa: Numerical Analysis of Outdoor Thermal Environment in Snowy Region, Proceedings of the Third International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning, pp.53-58, 2000
- 6) 廣田伸生, 青木秀敏, 大内隆央, 高橋直也: 太陽電池の発電効率に及ぼす雪面反射の影響, 太陽/風力エ

エネルギー講演論文集 2002,pp.297-300,2002

- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)
HP <http://www.nedo.go.jp/taiyo/jpn/solar1/index.htm>
- 8) 小野延雄, 新井正, 青田昌秋, 石川信敬, 若土正暁:
「基礎雪氷学講座, 第VI巻, 雪氷水文現象」, 古今書院 ,p.23,1994