

直達日射量に基づく太陽エネルギー 利用のための日射特性

Characteristics of Insolation for Solar Energy Utilization Based on Direct Insolation

馬場 弘*
Hiromu BABA

金山 公夫*
Kimio KANAYAMA

遠藤 登*
Noboru ENDOH

Abstract

In order to utilize solar energy, it is important to evaluate exactly the daily global and direct insulations in various regions. For this purpose, the global and direct insulations in Kitami measured by the authors for nineteen years, and the global and direct insulations observed by the meteorological agencies at seven place for from thirteen to seventeen years, such as Sapporo ('78 to '94), Nemuro, Miyako, Akita, Matsumoto, Shionomisaki('81 to '94) and Tatenosho('82 to '94), were processed. Consequently, the regional characteristics of the global insolation and the direct insolation of the fine days on which solar energy is useful and the cloudy days on which solar energy is useless, and its frequency of the fine day's occurrence for each month were made clearly in every season.

キーワード；全天日射量，直達日射量，晴天日，曇天日，晴天日発生頻度

Key Words；Global insolation, Direct insolation, Fine day, Cloudy day, Frequency of Fine day's occurrence

1. まえがき

太陽エネルギーを利用する場合，年間および月間の総日射量，全天，直達および散乱日射量の値とそれらの季節，日時による変化等，その地点の日射特性を明らかにすることは重要である．このために多くの地点の日射データが必要であるが，気象庁で行っている日射量の観測地点は全天日射量が67地点，法線面直達日射量の測定地点は14地点しかなく，これに代わるものとして日照時間からの全天日射量の推定^{(1)~(3)}，全天日射量に占める直達日射成分の算出のための直散分離^{(4)~(6)}，および傾斜面日射量の計算^{(7)~(9)}等に関する多くの研究が行われてきた．最近，二宮ら⁽¹⁰⁾は日照時間に基づく時間単位の日射量を推定する方法を発表している．

ところで太陽エネルギーを利用する立場から見れば，全天日射量の年間および月間総量または平均値は，単にその期間における日射量の期待値に過ぎない．周知のように，太陽エネルギーを熱として利用する場合，

簡単な平板型集熱器を用いたとしても毎日の集熱量と集熱効率はその日の日射量によって異なり，特にその日の直達日射量がいかに多かったかと言うことが極めて重要な要因となる．直達日射量の重要性は古くから知られておりそのための直散分離の研究が行われてきたが，複雑な天候変化に対応するためには必ずしも十分とは言えず，直達日射量の長期観測によるデータの集積と，太陽エネルギー利用の観点に添った整理が必要である．著者ら^{(11)~(15)}がこれまで行ってきた一連の研究から，太陽エネルギー利用のために最も有効な整理法は，1日当たりの全天日射量をその中に含まれる法線面直達日射量が一定のしきい値に達しない日のデータを除くことによってクラス分けし，各クラスの平均値とその発生頻度の形で求めておくことである．

本研究では北見市における日射量の測定値と，直達日射量を測定している7地点の気象台の日射量観測値を基に，法線面直達日射量で区分した1日当たりの全天日射量と法線面直達日射量の月別平均値とその発生頻度を，データ処理によってまとめたので以下に報告する．

* 会員 北見工業大学工学部機械システム工学科
(090-8507 北見市公園町 165)
(原稿受付 平成9年11月6日)

Department of Mechanical Engineering
Kitami Institute of Technology

2. 直達日射量と集熱量および集熱効率の関係

平板型集熱器の集熱量および集熱効率と法線面直達日射量の関係を明らかにするために、1983年5月から1984年8月まで行った北見市の温水プール・ソーラーシステムの測定実験¹⁶⁾の結果を、法線面直達日射量(D.I.)に対して整理したものを図1に示す。システムの集熱面積は241m²あり集熱量は単位集熱面積当たりの量で表している。稼働状況は週1回休館日がありその翌日は前日の影響が現れることから、これらの日のデータを除外した。図1(a)は集熱量 Q_c とD.I.の関係を示す。全体のデータ数 N_{all} は295個で、その内、D.I.が3MJ/(m²d)未満の日数 $N(C)$ は90日であった。ここで N および $N(C)$ はデータ数を示す。D.I. < 3MJ/(m²d)の日の集熱量 $Q_c(C)$ は5MJ/(m²d)以下で、その内70日は $Q_c(C)$ が0~2MJ/(m²d)の範囲 C_1 にあり、20日は $Q_c(C)$ が2~5MJ/(m²d)の範囲 C_2 にあって、D.I. < 3MJ/(m²d)の日の平均集熱量 $Q_{cm}(C)$ は1.14MJ/(m²d)であった。一方、D.I. ≥ 3MJ/(m²d)の Q_c はD.I.の増加に伴って増加し、平均値 $Q_{cm}(F)$ は6.85MJ/(m²d)であった。このようにD.I. < 3MJ/(m²d)に属する日の集熱量はD.I. ≥ 3MJ/(m²d)に属する日の平均集熱量の1/6以下であり、しかも前者に属する日の集熱温度は、その日の日中の平均外気温度より高々5~6°C上昇する程度である。以上のことから季節を問わずD.I. < 3MJ/(m²d)を太陽エネルギーの利用に適さない曇天日、D.I. ≥ 3MJ/(m²d)を利用に適する晴天日として区別することができ、この場合3MJ/(m²d)をしきい値とすることが出来る。一般に集熱器によって利用出来る集熱量は集熱器への入射量から一定量の集熱器損失を差し引いた量であり、それはまた採湯温度等の利用条件によって集熱量が変化することが知られている¹⁷⁾。こうした集熱量の違いは主としてD.I.の大小に帰因する。このように、D.I.は極めて重要な要因であるので、1日当たりの全天日射量の質を区別するために、D.I.が10および15MJ/(m²d)をしきい値としてクラス分けも行った。以下、表示を簡単にするために曇天日をクラスC、晴天日をクラスFで表わし、さらにしきい値としてのD.I.が10MJ/(m²d)以上の晴天日をクラスF1、15MJ/(m²d)以上のほぼ快晴の晴天日をクラスF2で表す。F1およびF2の晴天日は夏期の吸収式冷凍機による冷房を行う場合や、集光型集熱器の稼働率等を予測するのに好適である。

図1(b)は集熱効率 η_c とD.I.の関係を示す。曇天日の

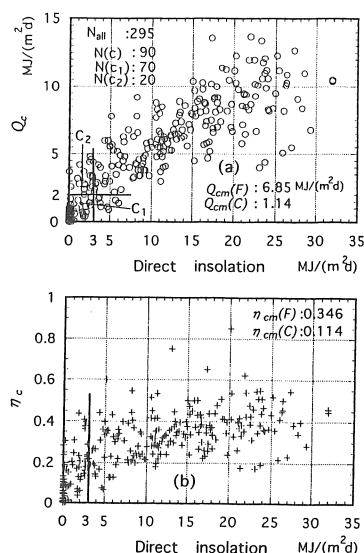


図1 平板型ソーラーシステムによる日法線面直達日射量と日集熱量および集熱効率の関係。

Fig. 1 Relationships between the daily normal direct insolation and the daily collected energy by a flat-plate type solar system, and its collector efficiency.

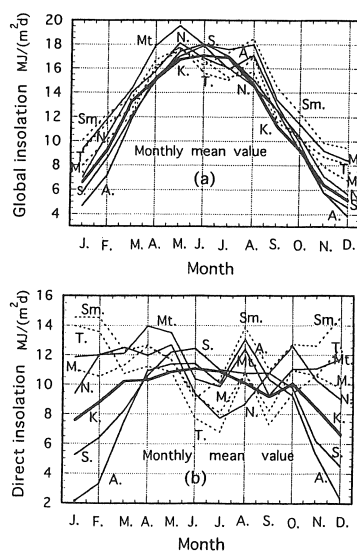


図2 観測地点の各月の月平均日射量

Fig. 2 Monthly averaged insolation in each month at eight locations.

平均効率 $\eta_{cm}(C)$ は0.114、晴天日の $\eta_{cm}(F)$ は0.346であった。

3. 結果および考察

図2は対象とした全国8地点の全天および法線面直達日射量の月平均値を示す。地点は北見(K.), 札幌(S.), 根室(N.), 宮古(M.), 秋田(A.), 館野(T.), 松本(Mt.)および潮岬(Sm.)で、図中の記号はそれぞれ対応する地点名を示す。これらの地点を選定した理由は、北海道を中心とした寒冷地における太陽熱利用のため、および大気環境問題の観点から地域区分を代表する地点と見なせることによる。観測期間は北見が1978年から1996年までの19年間、他の地点は全て1994年までのデータを入手したが、各地の気象台において法線面直達日射量の観測が開始された時期が異なることから、札幌が17年間、松本および潮岬が15年間、館野が13年間で、残りの3地点は14年間である。図2(a)の全天日射量(G.I.)の月平均値は、12月は秋田の $3.8\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ から潮岬の $9.5\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ まで約 $6.0\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ の地域差が見られ、夏期の6月は館野で $15.5\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 、札幌、秋田および松本で $18\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ と約 $2.5\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ の地域差が見られる。松本と潮岬のG.I.は他の6地点と比較して6および7月を除いて各月とも $1\sim 2\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 大きい。北見、札幌および根室のG.I.の季節変化は5~8月にかけて季節の太陽高度の変化に追従している。これに対して本州の5地点は6月および7月は梅雨の影響が現れG.I.は減少し、梅雨明け後の8月は5地点の全てでG.I.が大きくなる。図2(b)の法線面直達日射量(D.I.)は、季節と地域によって大きく変化している。冬期の12月および1月のD.I.は、秋田、札幌、北見、根室、宮古、松本、館野および潮岬の順に大きくなり、その地域差は秋田の $2.1\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ から潮岬の $14.5\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ まで約 $12.4\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ と非常に大きい。一方、根室、宮古、松本、館野および潮岬のD.I.は夏期の6月および7月は梅雨や海霧の影響で大きく減少する。6月のD.I.は、館野、潮岬、宮古、根室、松本、北見、秋田および札幌の順に大きくなり地域差は $5.2\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ と小さい。D.I.はG.I.と異なり、各地の天候の違いによってこうした大きな変動が生じる。なお、北見のD.I.は図中の太線で示したように年間を通して季節変動が最も少ない。

一般に天候の影響を除外すれば、5~7月のG.I.は8地点において緯度の影響はほとんど無いが、冬期には12月を中心に緯度が増すに伴ってG.I.は減少する。これに対しD.I.は夏期には緯度の増加に伴ってD.I.は増加し、3月と9月を境に冬期には減少する⁽¹⁵⁾。

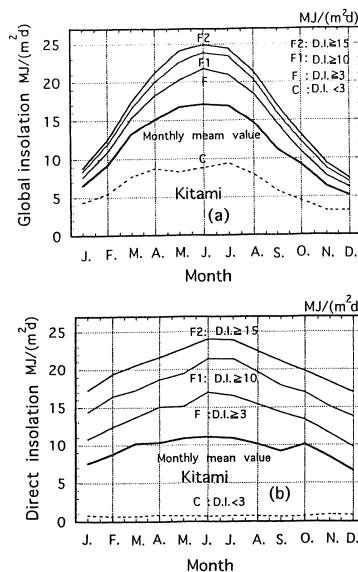


図3 クラス分けされた日射量の各月平均値 (北見)
Fig.3 Monthly average in each month of classified insulations (KITAMI).

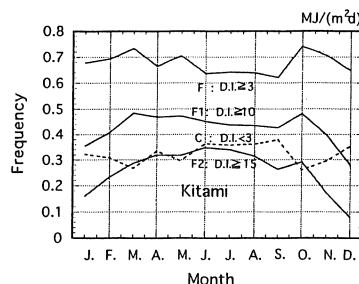


図4 クラス分けされた日射量の各月晴天日発生率 (北見)
Fig.4 Frequency of fine day's occurrence in each month of classified insolation (KITAMI).

図3(a)はD.I.でクラス分けした北見のG.I.を示す。曇天日のクラスCでは、G.I.は1月の $4.2\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ から7月の $9.5\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ をピークに12月の $3.1\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ まで季節とともに変化するが、G.I.のほとんど全てが散乱日射量であり、熱エネルギーとしては利用出来ないものである。G.I.の月平均値は図2に示したものと内容は同じである。晴天日のクラスFの値は各月のCの日射量を除いた日の平均値であり、12月で約 $6.2\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ で月平均値よりも $1.2\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 大きく、6月には $22\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ で月平均値よりも $6\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 大きい。F1の場合、12月は $7.0\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 、6月は $24\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ で、Fの場合と比較し

て、 $1 \sim 2 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ 大きくなり、F2のG.I.はF1のそれに比べて各月ともさらに $0.5 \sim 1.0 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ 増加している。図3(b)に示すD.I.の場合、曇天日Cの月平均値は各月ともほぼ一定の $1 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ を示す。FになるとD.I.は急に大きくなり、12月の $9 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ から6月の $17 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ まで変化する。F1では12月の $13.8 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ から6月および7月の $22 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ まで変化する。F2では12月の $17 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ から6月の $24 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{d})$ までF1の場合に相似して変化する。この傾向は大気圏外におけるD.I.の季節変動とも相似である。

図4は、図3に示した各区分の日射量の日のデータ数を、各月の総データ数で割った発生頻度で示す。Fの発生頻度は $0.62 \sim 0.74$ で夏期の6月～9月の値が小さく、10月～3月の値が大きい。発生頻度の季節による差は小さく、年間を通してほぼ一定しており、各月平均して18～21日は太陽エネルギーの利用が可能である。Cの発生頻度はFの逆であり、 $0.26 \sim 0.38$ は太陽エネルギーの利用は期待出来ない。FとCの頻度の和は1.0である。F1の発生率は年間を通して $0.28 \sim 0.48$ であり、これらの日は各月9～14日程度期待出来る。しかしF2の日は $0.08 \sim 0.32$ で2～9日期待出来るに過ぎない。図3に示したD.I.のしきい値の増加に伴う日射量の増分と比較して、発生頻度の減少割合は極めて著しい。

次に、各クラスの平均日射量を月総平均日射量で割って無次元化することによって、図2や日射マップ⁽²⁾等入手し易い月総平均全天日射量から、太陽エネルギー利用に必要な日射量データを推定出来ることを示す。

図5は8地点のFに対する無次元全天日射量 K_f および無次元法線直達日射量 K_d を示す。図中の上辺に示す数字は秋田の12月、1月等縦軸をスケールアウトした K_f および K_d 値を示す。図5(a)に示すクラスFの日の K_f は、冬期の秋田を除いて、月平均値と比較して10～38%大きく、全体を通して約20%増加する。 K_d は各クラスの月平均値が小さい地域および季節で大きく、北見および札幌を除いて6月から9月にかけて大きな変動が見られる。これは本州の梅雨と根室の海霧の影響および冬期の秋田は季節風による降雪の影響によると思われる。図5(b)はFの日の K_d を示す。冬期の秋田を除いて、 K_d は1.2～1.8の範囲あり全体として月平均値より40%程度増加するが、地域的および季節による変動は K_f より大きい。冬期の秋田は1月が3.55、12月が3.25と非常に大きくなる。

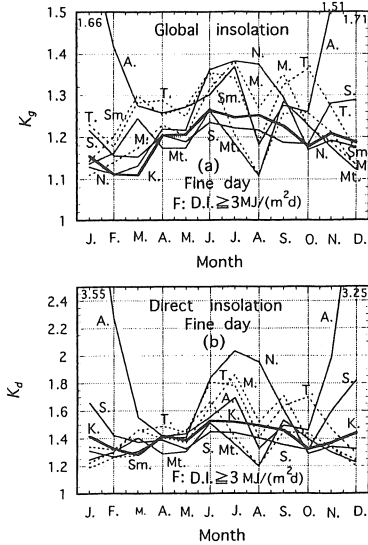


図5 8観測地点の各月晴天日(F)の K_f および K_d .
Fig. 5 Fine (F) day's K_f and K_d in each month at eight locations.

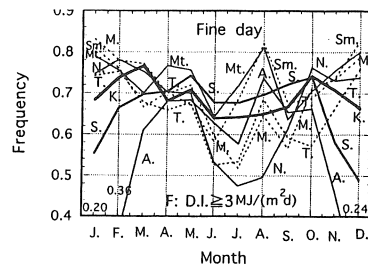


図6 8観測地点の各月晴天日(F)の発生率.
Fig. 6 Frequency of Fine (F) day's occurrence in each month at eight locations.

図6は各地の晴天日Fの日の発生頻度を示す。晴天日の各地の発生頻度はその地点の気象状況によって異なるものである。冬期の発生頻度は日本海に面した秋田および札幌で小さく、根室、宮古、潮岬等太平洋沿岸の値は大きい。しかし、夏期には秋田、札幌、松本等の発生頻度は大きく、根室、宮古等の発生頻度は小さい。潮岬を始め館野、秋田等本州各地は梅雨の影響が顕著に現れており、根室は6月から9月にかけて海霧の影響により発生頻度は小さい。館野は冬期の発生頻度は大きい6月から9月にかけて他の全ての地点より小さい。館野に見られるこうした現象は単に自然の気象現象ではなく、隣接する都市の影響および霞ヶ浦の湖

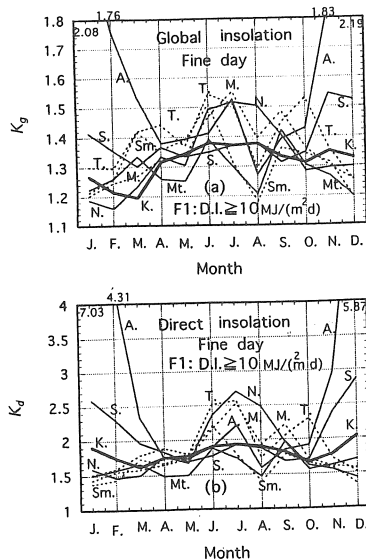


図7 観測地点の各月晴天日 (F1) の K_p および K_s .
Fig. 7 Fine (F1) day's K_p and K_s in each month at eight locations.

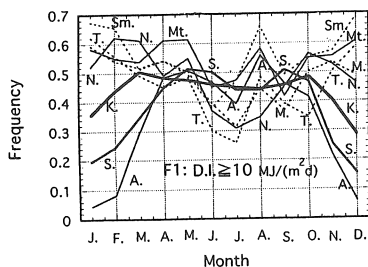


図8 観測地点の各月晴天日 (F1) の発生率.
Fig. 8 Frequency of Fine (F1) day's occurrence in each month at eight locations.

面からの蒸発の影響があるものとする。このように晴天日の発生頻度は地域と季節によって大きく変化するが、概略0.3～0.7の範囲で晴天日を見積もることが可能と思われる。

図7は晴天日F1の日の K_p および K_s を示す。このクラスの全日射量 K は図5(a)に示したFと同様に冬期間の秋田を除いて、 K_p は1.16から1.54の間にあり平均して1.36で、Fの場合より K_p は約15%大きくなる。図7(b)の K_s は秋田を除いて1.3～2.8の間にあり、平均値は1.8で K_p と比較して地域および季節的変動は大きいが平均値も大きくなる。このように冬期の秋田の日射量が小さく

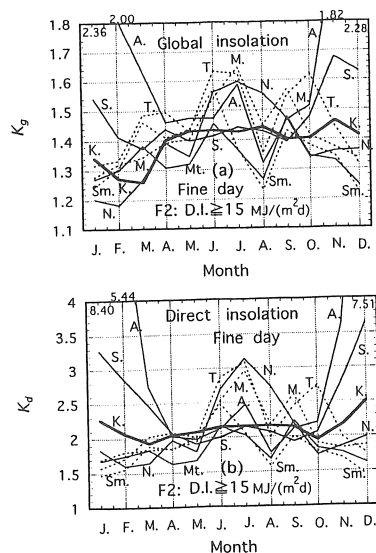


図9 観測地点の各月晴天日 (F2) の K_p および K_s .
Fig. 9 Fine (F2) day's K_p and K_s in each month at eight locations.

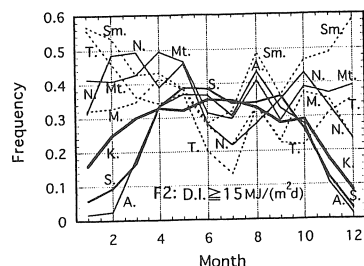


図10 観測地点の各月晴天日 (F2) の発生率.
Fig. 10 Frequency of Fine (F2) day's occurrence in each month at eight locations.

なるのは季節風によって日本海に発生する雲によるもので北海道西部から北陸地方にかけて広く裏日本一帯に見られる気象現象によるものである。

図8はF1の日の発生頻度を示す。冬期の松本、湖畔、館野等Fの頻度が大きい地点の発生頻度は0.58～0.68でFの場合と比較して0.1～0.15程度小さくなるが、全体として発生頻度はおよそ0.2～0.6の範囲にある。これは17月のうちF1の日が6～18日程度期待出来る事を示すが、1月の秋田では約1.5日、7月の館野や根室では9日以下しか期待出来ないことがわかる。

図9(a), (b)は晴天日F2の日の K_p および K_s を示す。

K は1.2~1.6、 K_d は1.5~3.0であるが、F1の場合よりも平均値で K が0.04、 K_d が0.02大きくなるに過ぎない。地域および季節の特徴はF、F1の場合と同様である。

図10はクラスF2の発生頻度を示す。この区分の全般的な発生頻度は0.1~0.5と見積もることが出来る。

以上8地点の全体を通して、太線で示した北見の全天および直達日射量は中位の値であるが、各クラスの晴天日の発生率は年間の変動が最も小さく季節変化が少なく、北国にもかかわらず全国的に見ても太陽エネルギー利用の適地と言える。

4. むすび

太陽エネルギーを利用するための日射特性として法線面直達日射量の重要性を示すために、平板型集熱器の1日毎の集熱量と法線面直達日射量との関係を整理するとともに、全国8地点の13~19年間の全天日射量および法線面直達日射量のデータを、法線面直達日射量によって区分した晴天日、曇天日の区分別日射量とその発生頻度を算出してまとめ、地域ごとおよび季節ごとの変化について明らかにした。

1) 法線面直達日射量が $3\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 未満の日は、平板型集熱器の平均集熱量は $1.14\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ で、その大部分(70/90)は $0\sim 2\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ の範囲にあり、太陽エネルギーの利用が期待できない曇天日であり、一方法線面直達日射量が $3\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 以上の日は集熱量が $5\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 以上で、平均集熱量は $6.85\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ あり、太陽エネルギーを利用出来る晴天日に区別出来ることを明らかにした。

2) 晴天日に属する日射量を直達日射量の値として $3\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ のほかに10および $15\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ をしきい値に用いて晴天日をF:D.I. $\geq 3\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ 、F1:D.I. $\geq 10\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ およびF2:D.I. $\geq 15\text{MJ}/(\text{m}^2\text{d})$ の3クラスに区分して各クラスの平均値と発生頻度を求めた。

3) 北見の日射量測定値と、法線面直達日射量の観測を行っている7地点の気象庁の日射量データを上記の方法によって整理し、太陽エネルギー利用のために重要な全天日射量の質を考慮した日射特性を、月総平均日射量から推定する実用的な方法を提示した。

本研究の一部は平成8~10年度NEDO提案公募型プロジェクトによるものである。付記して謝意を表する。

参考文献

- (1)日本気象協会、「昭和51年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書」,(1978-3)。
- (2)吉田作松・篠木賢一,「日射量全国マップその1」,太陽エネルギー,7-2(1981),37。
- (3)近藤純正・中村亘・山崎剛,「日射量および下向き大気放射量の推定」,天気,38-1(1991),41。
- (4)Berlage H.P. & Batavia O., "Zur Theorie der Beleuchtung einer Horizontalen Fläche durch Tageslicht", Meteorologische Zeitschrift, 45(1928), 174。
- (5)Liu B.Y.H. & Jordan R.C., "Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct and Total Solar Radiation", Solar Energ, 4-3(1960), 1。
- (6)宇田川光弘・木村健一,「水平面全天日射量観測値より直達日射量の推定」,日本建築学会論文集, 267(1978), 83。
- (7)吉田作松・篠木賢一,「月平均全天日射量を散乱および直達成分に分離する方法」,日本太陽エネルギー学会講演論文集(1980), 9, 東京。
- (8)Liu B.Y.H. & Jordan R.C., "Daily Insolation on Surfaces Tilted toward the Equator", ASHRAE J. (1961), 53。
- (9)篠木賢一・吉田作松,「傾斜面日射量の研究一第1報」,太陽エネルギー, 14-1(1988), 24。
- (10)二宮秀興・松尾陽・赤坂裕・曾我和弘,「AmeDASのデータを用いた時刻別日射量の推定法」,空気調和・衛生工学会論文集, 65(1997-4) 53。
- (11)馬場弘・金山公夫,「日射量の測定および算定に関する研究一第1報」,機論, 51-467, B (1985), 2191。
- (12)馬場弘・金山公夫,「日照時間による水平面全天日射量および法線面直達日射量の推定と連続曇天日の発生率」,機論, 53-496, B (1987), 3780。
- (13)馬場弘・金山公夫,「太陽エネルギー利用のための日射特性」,第27回日本伝熱シンポジウム講演論文集II, (1990-5), 754, 名古屋。
- (14)馬場弘・金山公夫,「日照時間に基づく各地の日射特性」,太陽/風力講演論文集(1990), 77, 川崎。
- (15)馬場弘・金山公夫・遠藤登,「1日当たりの日照時間と1日当たりの日射量の関係」,第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集I, (1997), 333, 仙台。
- (16)金山公夫・馬場弘・北見市委託研究報告書,「北見市民温水プール・ソーラーシステムの性能測定(I)」,(1984-2), 及び 同(II), (1985-2)。
- (17)田中俊六,太陽熱冷暖房システム (1977), 68-71, オーム社, 東京。