

太陽光発電システム評価における 日射測定のスAMPLING間隔に関する考察

CONSIDERATIONS ON SAMPLING INTERVAL OF SOLAR IRRADIATION MEASUREMENT FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM EVALUATION

黒川 浩 助^{*1}
Kosuke KUROKAWA

To measure solar irradiation and its relating photovoltaic array output energy a measuring accuracy cannot be guaranteed unless data sampling interval is appropriately selected. From this viewpoint, actual irradiance had been measured by comparatively high speed sampling of 1-4 seconds for 44 months at Tsukuba region and the numerical errors of integration operation have been estimated by using 60 kinds of integrating step size. The errors have been studied by the statistical method. Approximation formula expressing relationships between the errors and the step size have been obtained. The probabilities for 1σ to 4σ have been also estimated. The nomograph is shown to decide the sampling interval considering integration errors and their probability. A concluding example is given that an integration error exceeding $\pm 1\%$ can happen once every 2 months ($\pm 3\sigma$) if the integration step size is selected as 54.1 seconds.

Key word : Sampling interval, Solar irradiation, Deviation, Statistics, Photovoltaic system measurement

1. まえがき

地上において、太陽光発電システムの入力エネルギーである日射は、昼夜の基本サイクルと、晴れ、曇り、雨などの気象条件による不規則な時間変動因子を持っている。熱的利用の場合とは異なり、太陽電池の応答速度は充分速く日射の変動はそのまま発電出力に反映され得る。また、太陽光発電の適用対象である負荷の使用条件にも任意な時間変動を持つものが多い。このような性質を持ったパラメータの長期間運転特性値である日射量やシステム発電電力量などのエネルギー計測に当っては、時間変動を考慮してデータのサンプリング間隔やエネルギー積分演算法を決めないと、結果の精度が確保できない恐れがある。現在の光発電研究開発段階では、充分な計測器が用いられており、計測データの品質には問題が少なく見られるが、これからの太陽光発電の普及期を考えると、多くのメーカーや設備業者などが発表するカタログ値を保証するための測定の最低基準を明確にしておくなどの評価・測定体系を整備しておく必要性が指摘されている^{(1), (2)}。

太陽光発電システムの運転特性の測定方法についての基本的な技術課題は以下のものが考えられよう。

- (1) システム運転性能を適切に表すために必要なシステムパラメータとその定義を明確にすること。
- (2) 具体的な測定点・測定量種類および演算処理方法の吟味
- (3) 計測・演算における誤差分析
- (4) 計測システムの測定精度を検証するための校正方法

このうち、本論文では主として(3)のうちの積分演算に基づくものについて論じようとしている。

太陽光発電システムで共通的に計測される基本パラメータは、

- (1) 太陽電池アレイの入力としてのアレイ面日射量
- (2) 太陽電池アレイ出力の電力量
- (3) システム出力の電圧・電流および電力量
- (4) 場合によっては、蓄電池の充放電電力量

などが上げられる。これらはシステム計測上の必要最少限度の項目といえるが、さらに要素機器の動作分析等を目的にした他の多くの項目が実際の研究フィールドでは対象とされている。

これらの測定は、従来の電気機器とは趣を異にした

* 原稿受付 平成4年1月13日

^{*1} 会員、電子技術総合研究所(〒305 茨城県つくば市梅園1-1-4)

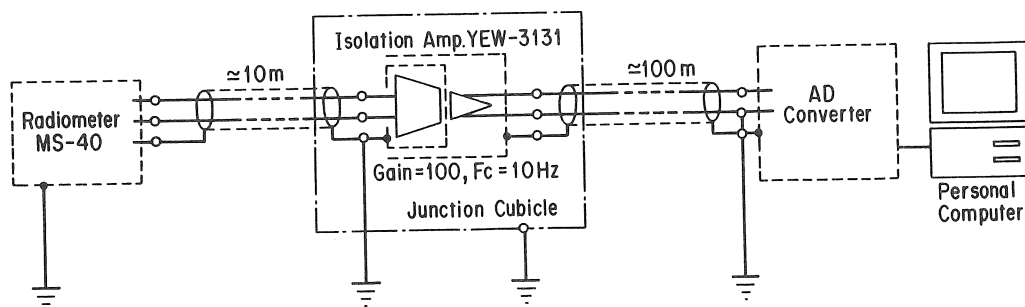


図1 原データの測定系の構成

日射量とこれに連動するアレイ出力電力量を含んでいる。他のパラメータについてもシステム構成や負荷の種類によっては連動することがあるが、そうでなければ通常の電子式計測器による測定方法を準用すれば良い。日射量の測定では、通常の場合、日射計により時々刻々の日射強度を測定し、これを積分することによりエネルギー量として日射量を得ることが多い。また、アレイ出力電力量の場合は、出力電圧・電流を測定しそれらの積を積分演算して電力量を得ている。これらの処理のためには一般的にパソコンにA/D変換器等を組み合わせたシステム計測装置を用いることが多い。

このような構成・手順による測定・演算系を用いて、時々刻々不規則に変動する日射等の積分値を得るには、データサンプリングにおいて積分刻みを決めているサンプリング間隔の選び方が結果の精度を支配する。このような検討を行うためには、実際の日射条件がどのように変化し、これがサンプリング間隔との関係でどのような測定・演算誤差を生じさせるかを知らなくてはならない⁽¹⁾。現在研究用のシステムでは一般に、データのサンプリングを10秒毎としている例が多く、十分な精度は得ていると推測されるが、これについても必ずしも明確な根拠が示されている訳ではない。

このような問題を検討するために、筆者は先ず、十分に短い間隔のサンプリングにより実際の日射強度の変化を長期間測定して原データを得た。次に、これを用いて種々の積分刻みにより数値積分を適用して日積算値を求め、これにより生ずる誤差を統計的に吟味し、サンプリング間隔決定のための指針を得た。これらの結果について報告する。

2. 原データの取得

本考察では、現行で広く行われている10秒サンプリングについても誤差分析の対象に加えたかったので、

できれば1秒程度の短いサンプリング間隔のデータを取得したかった。このようなデータを長期にわたって計測・保存している例はないと思われるので、自ら計測することとした。測定場所はとりあえず、筑波（北緯36° 03' 35", 東経140° 08' 19"）とし、図1に示す測定系を用いた。

本測定では、後で吟味する積分誤差の評価に変動成分の方が大きな影響を与える可能性があるため、雑音の抑制に特に留意した。そのため、シグナルコンディショナとして10Hzのローパスフィルタの付いた絶縁型高安定度直流増幅器を用い、図示の複数の位置でローカルな接地をとった。さらに、使用したA/D変換器が10 μ sの高速サンプリングが可能なタイプであったので、商用周波の周期20msの整数倍の時間幅の平均値をサンプリング毎に計測するようにした。これにより雑音レベルは顕著に減少し、非同期の場合に比べて1桁から2桁減少することを夜間計測等で確認した。最終的には40msの間の平均値を測定値とした。この場合の不規則雑音瞬時値の標準偏差は換算値で10⁻⁴ kW m⁻² オーダーであった。

使用した日射計はサーモパイル形の全天日射計で傾斜角を年間最適傾斜角度近傍とするために、緯度角 $\times 0.8$ ⁽³⁾により29度とし、方位角は正南面である。本日射計の時定数は3.8秒⁽⁴⁾であり、以下に述べる最短のサンプリング間隔に比較して若干遅目であるが、使用可能と判断した。

図2の測定フローに示すように、基本サンプリング間隔を1秒として測定をする。しかし、ここでは示していない他の測定量と時刻データの合計3データを2HDのフロッピーディスクに記録するために、夏季の長日条件になると、ディスクの容量不足を来すことがある。これを避けるために、変動の少ない安定した日射条件の時には、4秒まで記録間隔を延ばすようにした。この場合の日射強度の変化率のしきい値は経験的に5.6 $\times 10^{-4}$ kW m⁻² s⁻¹とした。データディスク

表 1 分析対象とした積分刻み

Number	Integration Intervals (s)				
h_0	1 - 4				
$h_1 - h_{10}$	10,	20,	30,	40,	50,
	60,	70,	80,	90,	100
$h_{11} - h_{20}$	120,	140,	160,	180,	210,
	240,	270,	300,	330,	360
$h_{21} - h_{30}$	390,	420,	450,	480,	510,
	540,	570,	600,	660,	720
$h_{31} - h_{40}$	780,	840,	900,	960,	1020,
	1080,	1140,	1200,	1300,	1400
$h_{41} - h_{50}$	1500,	1600,	1700,	1800,	2100,
	2400,	2700,	3000,	3300,	3600
$h_{51} - h_{60}$	3900,	4200,	4500,	4800,	5100,
	5400,	5700,	6000,	6600,	7200

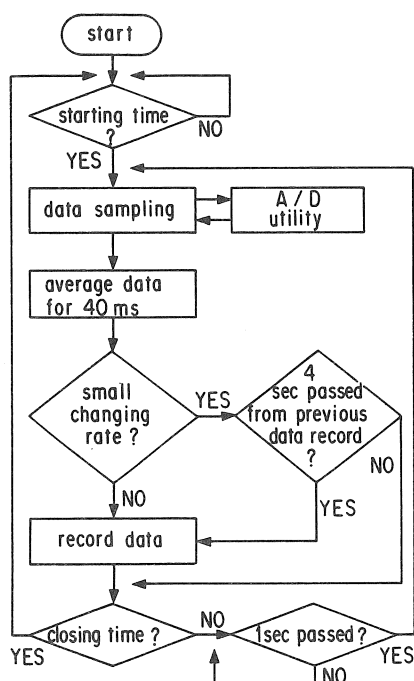


図 2 原データの測定フロー

は 1 枚/日なので、常時 3 台のドライブを用い、休日などに備えた。

原データの計測は、1986 年 9 月より開始し、1990 年 4 月までの合計 44 か月間継続された。

3. 積分誤差の計算

太陽光発電システムの計測に当たっては、パソコンなどを用いているために、エネルギー量としての日射量などは、日射計などの瞬時出力をそのままパソコンに取り込み、内部で数値積分演算して求める場合が多い。数値積分には、ほとんどの場合、台形公式または階段関数による計算が採用される。両者は、両端のデータが 0 であるならば、等価であるので、以下の検討は台形公式の場合のみを取り扱う。

測定開始時刻からサンプリング時刻 t_i までに得られる日射の積分値 s_i (kWsm^{-2}) は、

$$s_i = s_{i-1} + \frac{1}{2} \cdot (X_i + X_{i-1}) (t_i - t_{i-1}) \quad (1)$$

で示される。ここで、 t_{i-1} は前回サンプリング時刻、 X_{i-1} および X_i は時刻 t_{i-1} および t_i における日射強度の

測定値 (kW m^{-2}) である。 s_{i-1} (kWsm^{-2}) は、 t_{i-1} までの積分値を表す。また、積分刻み $h(s)$ は $t_i - t_{i-1}$ で定義される。この演算を測定終了時間まで繰り返して得られた最終積分結果である日積算値を $S(\text{kWsm}^{-2})$ とする。

本論文においては、これらの演算は特に断らない限

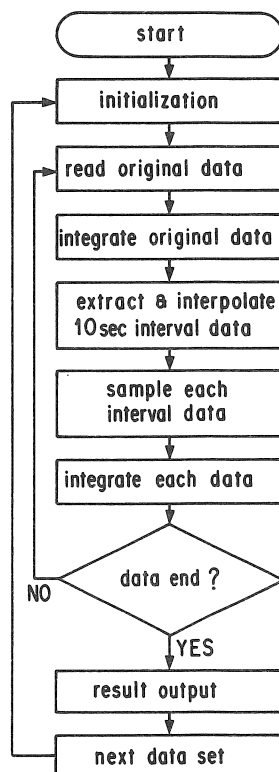


図 3 各積分刻みに対する積分誤差率算出のフロー

りパソコンの内部で有効数字7桁（出力6桁）の浮動小数点演算により実行される。ところが(1)式の加算の場合には、原データの数が40000個程度になることがあるので、桁落ちによる演算誤差を防ぐために倍精度演算（16桁）としている。

本論文では、積分刻みが異なる場合に、演算結果がどのような影響を受けるかを吟味することが目的であるから、原データの中から、各種の積分刻み h_i 毎の測定値を抽出して、積分結果 S_i を得ればよい。

実際に評価した積分刻み h_i は、表1のように10秒から2時間までの60種（ $j=1\sim60$ ）とした。ここで、 $j=0$ は原データを示している。

積分刻み h_i を使用した時に生ずる日積算値の積分誤差率 e_i （%）は次式の定義による。

$$e_i = (S_i - S_0) / S_0 \times 100 \quad (2)$$

S_0 は本来は真値であるが、ここでは分らないので、原データを全部使用したもので代用している。実際のデータ処理手順は図3のフローによった。なお、前述したように変動の少ない条件では原データのサンプリング間隔が可変になっているので、10秒毎の測定値を抽出するときに、必要な場合には原データに直線補間を施している。

この様にして得られた積分誤差の結果の例を以下にのべる。図4(a)の快晴の日射データに対して得られ

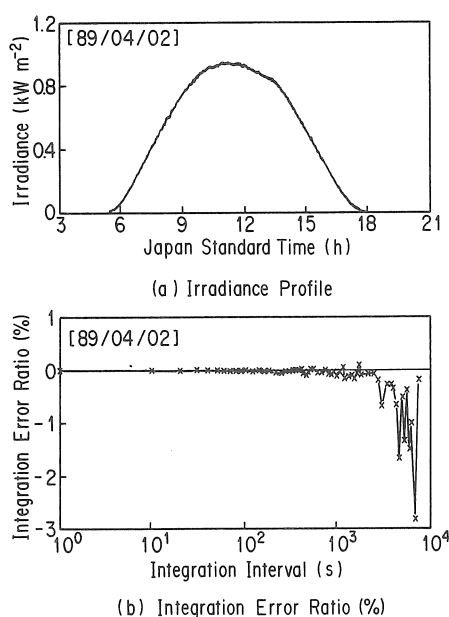


図4 各積分刻みに対する積分誤差率の例
（快晴の場合）

た積分誤差の計算結果を同(b)に示す。図5は日射の変動の激しい場合である。2例の誤差のオーダーは異なるが、いずれの場合も積分誤差曲線の全体的な傾向は類似している。すなわち、積分刻みが大きくなっても、積分誤差は一樣に大きくはならず、不規則に変動している。しかし、この不規則な誤差曲線の包絡線を想定すれば、それは積分刻みの増加に伴って増加の傾向を示している。なお、この包絡線の性質については別の報告^{(5)・(6)}がある。

4. 積分誤差の統計

誤差曲線が不規則になるのは、たまたまサンプリングされる場所が例えばピークまたはディップに合致するかどうかで、大きめの正または負の積分誤差を示すことが大きな原因である。通常はこのようなことが1日にわたって種々雑多な相互関係で生ずる。その結果トータルとして確率的に積分誤差が変動することになる。このように日射変動とサンプリングタイミングの偶発的な関係を含めて捉えるには、シミュレーション関係で試みられることのある日射変動の周波数分析や級数展開の手法では難しさが感じられる。

そこで直接的な統計を行うためにまず、日々に得られる積分誤差曲線を重ね合わせて表示すると、図6の散布図が得られる。この例では1か月分の結果を表示

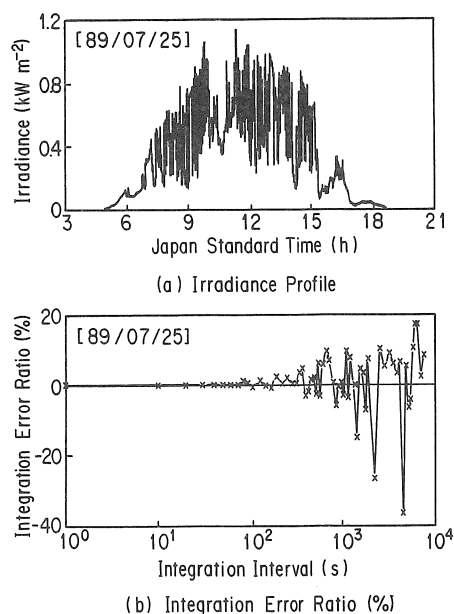


図5 各積分刻みに対する積分誤差率の例
（日射変動の激しい場合）

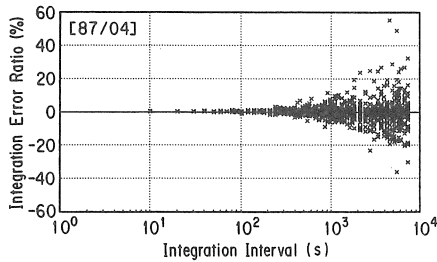


図6 各積分刻みに対する積分誤差率散布図の例

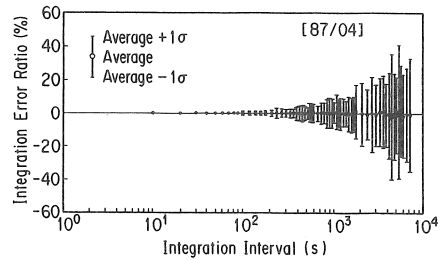


図7 各積分刻みに対する積分誤差率統計値の例

している。これを用いて、60個の積分間隔毎に、平均値、標準偏差、最大・最小値を計算し、積分誤差率の度数分布をとった。

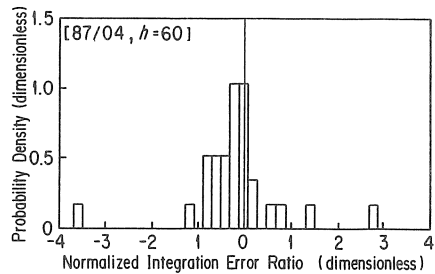
日数 $n(d)$ の期間の h_i に対する積分誤差率の平均値 m_i (%), 標準偏差 σ_i (%) はそれぞれ次式で与えられる。

$$m_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n e_{ik} \quad (3)$$

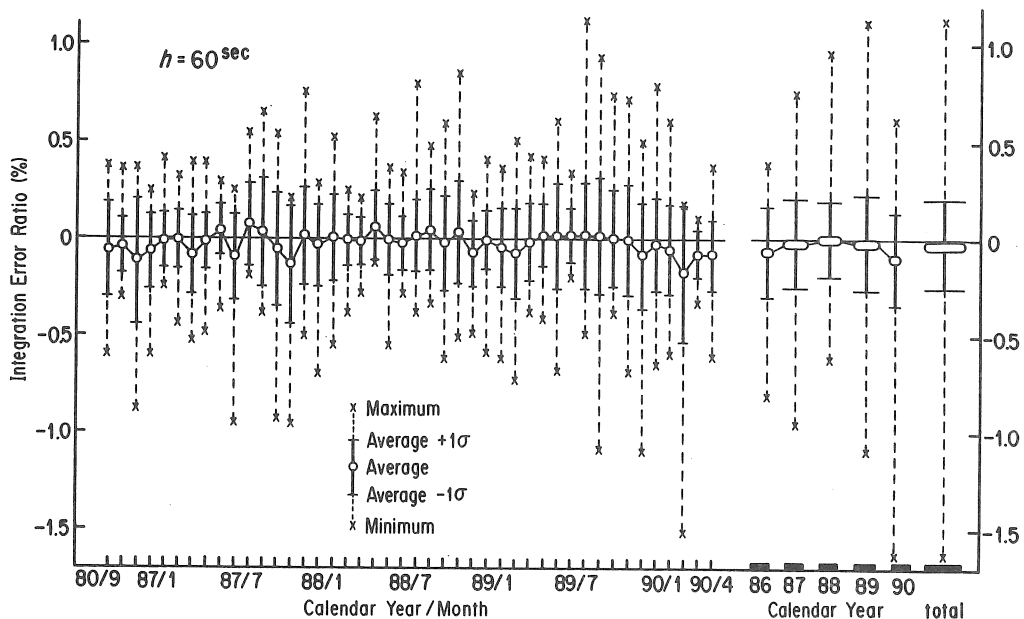
$$\sigma_i = \left\{ \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (e_{ik} - m_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 e_{ik} は h_i を用いて k 日目に得られた積分誤差率を表している。

図6の例に対応した平均値、標準偏差を図7に示した。


 図8 積分誤差率の度数分布の例 ($h=60^*$)

同じく度数分布については、積分刻みが60秒の場合を図8に示す。横軸は、平均値を0にシフトし、標準偏差で規格化した積分誤差率の階級を示している。積分誤差率の階級は 1σ を5等分した。縦軸は、[階級ごとの度数/度数の総和/規格化積分誤差率の階級幅]


 図9 全期間の統計値の推移の例 ($h=60^*$)

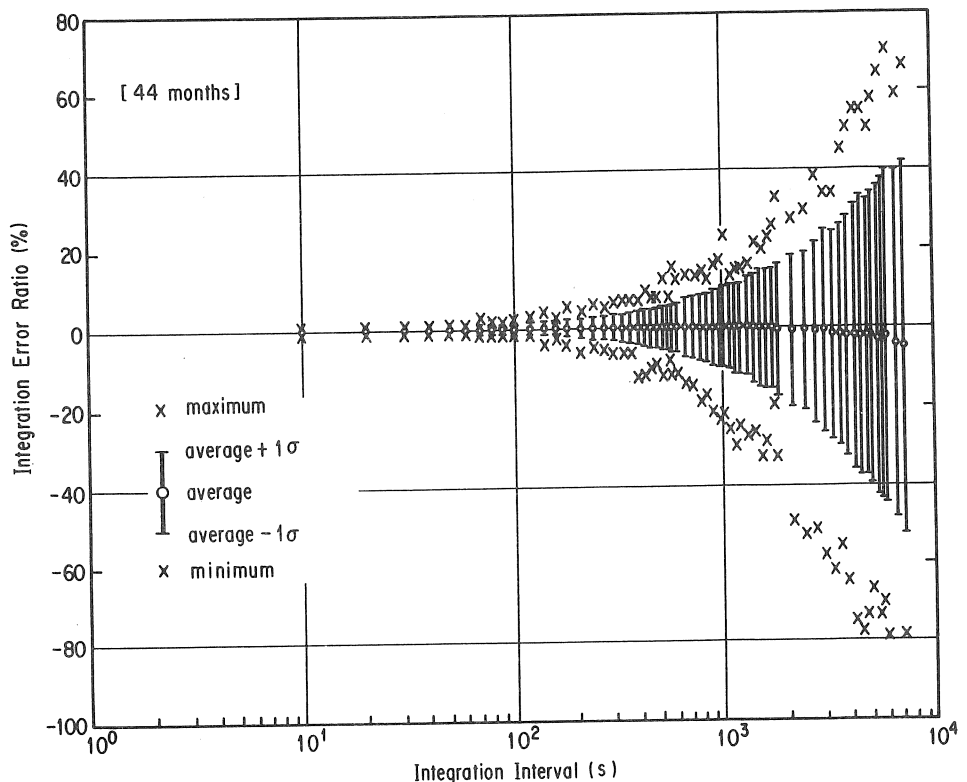


図10 積分刻みと積分誤差率統計値の関係（全期間）

の演算により、確率密度の次元で表している。このため、図にはみ出し部分がなければ棒グラフの総面積は当然1になる。

5. 統計結果

前章で示した例のように、1か月間のデータで統計をとれば、平均値や標準偏差はいくぶん平滑化されるが、まだ不規則な傾向を示している。従ってある程度の長期にわたって測定を継続することとした。以下に示すのは、1986年9月から1991年4月までの44か月間の統計結果である。

図9に平均値、標準偏差、最大・最小値の結果の一例として、積分刻みが60秒の場合を示す。同図には各月毎の結果の他、年別および全期間トータルの結果をも示している。これにより、60秒であれば例えば1%以下の積分誤差率に収めることはほとんどの場合で保証できそうなが大まかな結論として得られる。同図に相当する結果は他の積分刻みでも得られているがここでは省略する。

全期間に対する平均値、標準偏差、最大・最小値と積分刻みの関係を図10に示す。全体の傾向はほぼ平滑化されていて、統計対象としてデータ数が充分であることをうかがわせる。

この結果を近似式で表すために、積分刻みに対し平均値と標準偏差を各々プロットしたものが図11および図12である。これらに対し関数形を Ch^a として最小自乗法を適用し係数 C および指数 a を定めると平均値 $m(\%)$ および標準偏差 $\sigma(\%)$ の近似式は次のような結果が得られた。

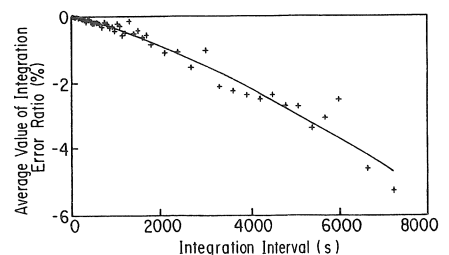


図11 積分刻みと積分誤差率平均値の近似

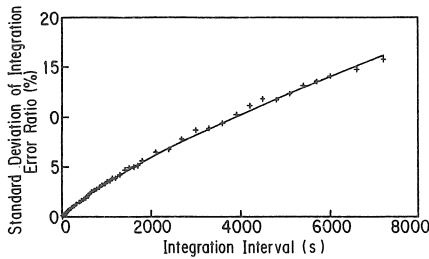


図12 積分刻みと積分誤差率標準偏差の関係の近似

$$m = -4.23 \times 10^{-5} \cdot h^{1.31} \quad (5)$$

$$\sigma = 1.39 \times 10^{-2} \cdot h^{0.796} \quad (6)$$

これらは両図の実線により示される。両者を比較すると、平均値に比べて標準偏差の方が大きい。積分刻みの大きい領域では数倍の違いであるが、小さい領域になる程標準偏差の方が支配的になる。つまり、サンプリング間隔を決定するときには、変動成分を対象とした統計の評価が不可欠であることを裏付ける結果ともいえる。

ところで、標準偏差は上記のように明らかになったが、さらに詳細な評価を行うには積分誤差の出現確率の分布を把握しておく必要がある。そこで図8と同様の方法で44か月全期間に対する度数分布を各積分刻みに別で作成した。その結果、すべての積分刻みで生ずる積分誤差の度数分布の形の特徴がほぼ同じであったので、すべての積分刻みに対して積分誤差の分布は相似であるという仮定の下に、すべての度数分布を重ね合わせたものを算出した。図13にこれを示す。破線表示された曲線は正規分布に相当する。

これらの結果から、次のようなことがいえる。

- (1) 確率密度分布の形は左右対称に近い形である。
- (2) 積分誤差の平均値（図では横軸0）における確率密度は、0.772であり、正規分布に比べて平均

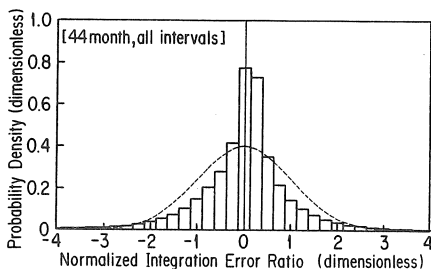


図13 全期間・全積分刻みに対する積分誤差率の出現確率

値で2倍程度のピークを示す。

- (3) $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$, $\pm 4\sigma$ に包含される確率は、それぞれ0.816, 0.948, 0.983, 0.994である。（正規分布では、0.683, 0.955, 0.997, 0.9999）

正規分布に比較すると、積分誤差の出現確率は平均値付近でかなり高く尖っている。中間領域ではいったん確率密度は下がるが、大きくばらつく領域の確率もまた高い。正規分布では $\pm 4\sigma$ を越える確率は非常に小さいが、本例の場合では $\pm 3\sigma$ で0.017, $\pm 4\sigma$ で0.006の外側確率が残っている。

現実的な指標としていい直せば、 $\pm 1\sigma$ をサンプリング間隔選択の指標として用いるならば、これを越えた積分誤差は30日間に5.52日観測される可能性がある。同様に $\pm 2\sigma$ では1.56日、 $\pm 3\sigma$ では0.51日、 $\pm 4\sigma$ では0.18日となる。

以上の結果を用い、5%程度までの積分誤差率変動分を目標指標としたときに、これを確保するに必要な積分刻みとその場合の積分誤差率平均値を、 $1\sigma \sim 4$

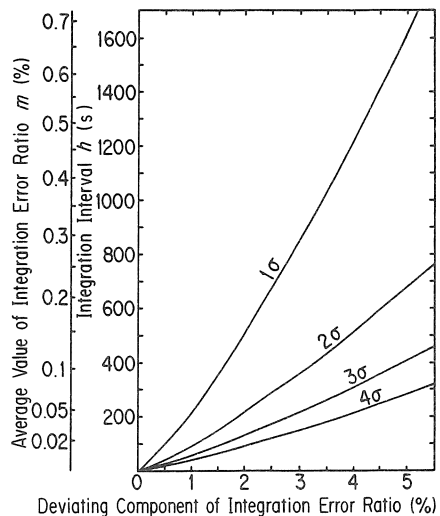


図14 積分刻み決定のための計算図表

σ に対応して与える計算図表を図14に示す。同図では、横軸の目標とする積分誤差率指標から垂直線を上げ、曲線にぶつかった所から水平線を引けば、2本の縦軸と交差した点から、積分刻みとこれに対応した積分誤差率平均値を与える。

これを用いて例えば1%の積分誤差率変動分を 3σ 対応で求めれば、54.1秒の積分刻みとなり、積分誤差

率平均値は 0.00789% となる。つまり、この刻み幅を用いれば、筑波の場合、ほぼ $\pm 1\%$ の誤差率を越えてしまうようなケースは 2 か月に 1 日程度しか発生しない、ということになる。

6. ま と め

本論文では、太陽光発電システムの長期運転特性値である日射量やシステム発電電力量などの計測に当って、日射の変動によって生ずる積分誤差と積分刻みの大きさの関係をj知ってサンプリング間隔を決定するために、筑波で44か月の実測を行い、これに基づいた統計的分析により、根拠となり得る計算図表を作成した。これらの検討により以下の結論を得ることができた。

- (1) ある程度の長期間の統計により、積分誤差率と積分刻みの関係は滑らかな関係を示したので、近似式を導出できた。これを用いて積分刻みを決定する計算図表を作成した。
- (2) 積分誤差率の度数分布をとったところ、積分刻みの大小に関係なくおおむね相似な分布形を示したので、すべての積分刻みに共通なものとして確率密度分布を計算した。これにより、前項計算図表で求めた積分刻みが目標の計測精度を保証できる確率を明らかにすることができた。
- (3) 今回の検討は、とりえず筑波での実測のみに基づいているので、論文の中で示している数値は単に一例であり、各地に対する一般的な結論とはなり得ないが、このような手法でサンプリング間隔を吟味できることを示したことの意味は大きいと考えられる。また、他の地域での同様の分析結果が得られるまで、概略の指標とはなり得よう。今後、他の地域での検討が望まれる。

本研究は、サンシャイン計画の一環として行われた。本研究は工業技術院による新発電システム標準化調査研究のために日本電機工業会に設けられた同研究委員会においても有益な助言を得た。関係の諸氏に感謝する。

本研究の遂行に当たり、機械電子検査検定協会嶺久一氏からデータ整理の協力を得た。ここに謝意を表す。また、本研究の機会を与えられた当所エネルギー情報技術研究室伊原征治郎博士、元太陽エネルギー研究室長谷辰夫博士（現東京理科大学教授）に深謝する。

参考文献

- (1) 清水：「太陽光発電の標準化」，太陽光発電システムシンポジウム，

平2.5.29-3, p.3-31

- (2) 黒川：「太陽光発電技術の標準化の動向」，電経研彙報，53巻 5号（1989），p.71
- (3) H. Takakura, Y. Kita, M. Murozono & Y. Hamakawa, Optimization consideration of tilt angle and azimuth angle of solar photovoltaic arrays, Techn. Digest Intn. PVSEC-3, Tokyo, Japan, 1987, p.359-362
- (4) 英弘製機。ネオ日射計取扱説明書
- (5) 黒川・嶺：「太陽光発電システムのエネルギー計測におけるデータサンプリング速度に関する考察」，昭63太陽エネルギー学会等合同研究発表会，No. 8
- (6) K. Kurokawa & H. Mine, Consideration on data sampling speed for energetic measurement of photovoltaic power generating system. ISES Solar World Congress 1989 Kobe, Sept. 4-8, 1989, Kobe, 2. P2. 12