



ビームダウン式太陽集光装置の集光部熱流束計測の研究(二次元熱流束分布計測)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 菊永, 拓馬, 長瀬, 慶紀, 友松, 重樹, 河村, 隆介, Kikunaga, Takuma, Kawamura, Ryuusuke メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5580

ビームダウン式太陽集光装置の集光部熱流束計測の研究 （二次元熱流束分布計測）

菊永 拓馬^{a)}・長瀬 慶紀^{b)}・友松 重樹^{c)}・河村 隆介^{d)}

Study on Heat Flux Measurement at Collecting Part of Beam-Down Solar Concentrator (Measurement of Two-Dimensional Distribution of Heat Flux)

Takuma KIKUNAGA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU, Ryuusuke KAWAMURA

Abstract

A purpose of this paper is measurement of the heat flux at the collecting part of beam-down solar concentrator. The thin film type heat flux sensor that we made is used to measure a heat flux. The sensor can measure a heat flux at unsteady state. Therefore the sensor can measure a heat flux in a short time. That is a merit of this measurement system. The measurement in a short time enables a measurement at the operation time of the receiver. Seven heat flux sensors are used to obtain the distribution of heat flux at the collecting part of beam-down solar concentrator. The traverse device is used to move the sensors passing through the collecting part. The amplification circuits are used to amplify the output from the sensors 10,000 times individually. As results of measurements the two-dimensional distributions of heat flux were obtained using the measurement system in a short time. However the absorption factor of the heat flux sensors are used the value obtained in past study. So the absolute value of the output data is not correct. It is necessary to demand the absorption factor of heat flux sensor to know the accurate value.

Keywords: Solar Concentrator, Heat Flux, Beam-Down Solar Concentrator, Measurement

1. 緒論

化石燃料の枯渇、地球温暖化、原発の安全性等の問題を背景に近年再生可能エネルギーが注目されている。その中でも太陽エネルギーはエネルギー量が膨大であるため、有効に活用することができれば諸問題の解決につながると考えられる。太陽エネルギーの利用方法としては太陽電池による太陽光発電が一般的に良く知られているが、太陽光を熱に変換して利用する方法も研究¹⁾されている。

太陽熱利用において高温が必要な場合は集光装置による太陽光の集光が行われる。宮崎大学では2012年にビームダウン式太陽集光装置を学内に設置し太陽熱に関する研究を行っている。集光装置において、光を熱に変換する部分をレシーバと呼ぶ。集光装置を利用した太陽熱発電や太陽炉の研究においてこのレシーバでどれだけの熱量を得ているかを明らかにすることが求められる。レシーバで得られる熱量は集光部の熱流束分布から算出することができる。しかし、集光部の熱流束分布は太陽の位置、直達日射量、雲等の影響を受け時々刻々と変化してしまう。したがって、レシーバで得られる熱量をより正確に求めるためにはレシーバ稼動中に計測を行うことが

望ましい。

レシーバ稼動中に集光部の熱流束分布を計測するためには、計測によるレシーバへの影響が少なくなるよう短時間で計測を完了する必要がある。しかし、集光装置の熱流束計測に広く使用されているガードン式熱流計は計測時にセンサ部温度が定常状態である必要があるため、短時間での計測が行えない。したがって現在、時々刻々と変化する集光部の熱流束分布を瞬時に計測することは困難である。

一方、薄膜型熱流束計は非定常状態の熱流束の計測が可能である。薄膜型熱流束計はエンジン燃焼室壁面の熱流束を計測するために開発されたもので、短時間の照射で熱流束の計測を行うことができる。本研究では以前この薄膜型熱流束計1本を用いてビームダウン式太陽集光装置集光部の熱流束計測²⁾を行ったが、計測点が少なく詳細な熱流束分布を得ることができていない。

よって本研究では薄膜型熱流束計複数本を用いたビームダウン式太陽集光装置集光部の瞬時二次元熱流束分布の計測を目的とする。

2. 実験装置

2.1 ビームダウン式太陽集光装置

図1にビームダウン式タワー型太陽集光装置の概略を示す。まずヘリオスタットで太陽光を楕円鏡の第一焦点に集光させ、次に楕円鏡で第二焦点に再反射させ集光を行う構造となっている。本研究ではこのビームダウン式

a)機械システム工学専攻大学院生

b)機械設計システム工学専攻准教授

c)機械設計システム工学専攻助教

d)機械設計システム工学専攻教授

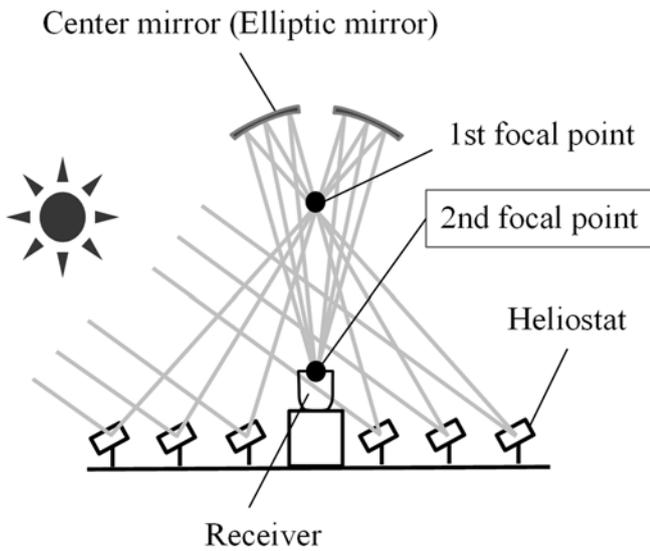


図1. ビームダウン式太陽集光装置.

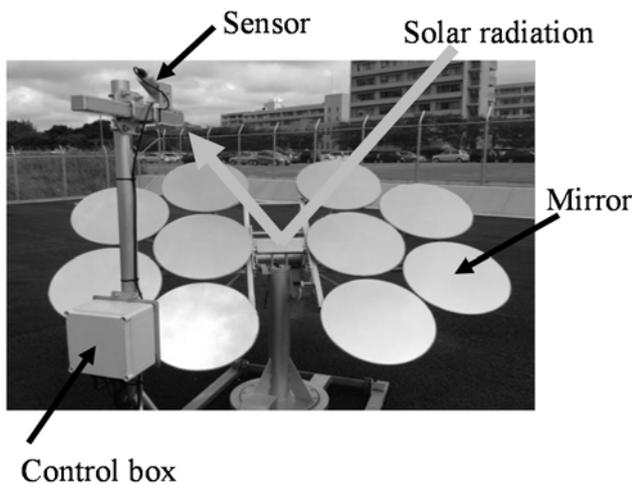


図2. ヘリオスタット.

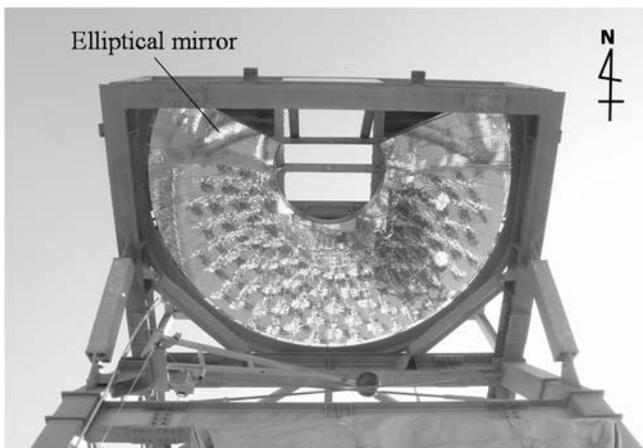


図3. 中央楕円鏡(下方より撮影).

タワー型太陽集光装置の第二焦点に形成される集光面の二次元熱流束分布を薄膜型熱流束計によって計測する。

ヘリオスタットを図2に示す。駆動方式は二軸制御の経緯台式である。位置制御方式はセンサ制御式であり、中央の鏡で反射した光をセンサで検出している。センサは 30W/m^2 以上の光を検出する。ミラー構成はマルチミラー式であり、直径 500mm のミラー10枚で成り立っている。ミラーは凹面鏡を用いており集光スポットが平面鏡を用いた場合に比べ小さくなっている。また、風の影響を受けにくいクラスター型に配置されている。ヘリオスタットの配置方法はスリークォータ配置でありビームダウン式タワー型太陽集光装置の周囲 60m に88基設置されている。なお反射鏡の総数は880枚である。

中央反射鏡を図3に示す。中央反射鏡はタワー上部 16m の位置に設置されており、大小異なる 20000 枚の平面鏡で楕円鏡を構成している。ヘリオスタットの配置方法が南側にヘリオスタットの無いスリークォータ配置であるため中央反射鏡は北側が欠けた形状をしている。

2.2 薄膜型熱流束計

本研究で使用する薄膜型熱流束計を図4に示す。薄膜型熱流束計はT型熱電対2組で成り立っており、熱流束に関して表面接点は非定常成分、内接点は定常成分をそれぞれ計測できる。表面接点は熱流束計表面の薄膜に形成されているため高い応答性を有している。本研究では表面接点の出力から集光部の熱流束を算出する。内接点は温度のモニタリングに使用することができる。

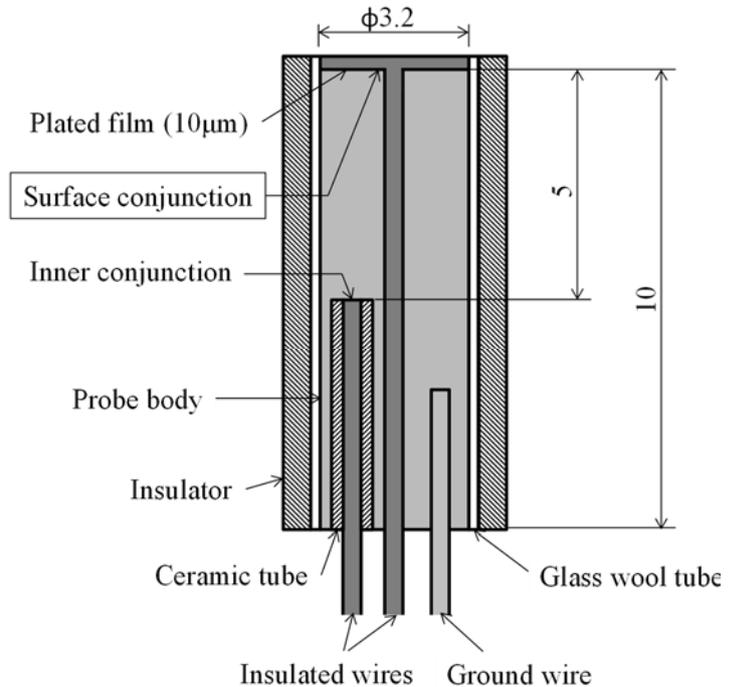


図4. 薄膜型熱流束計.

薄膜型熱流束計はφ3.2mmのコンスタンタン製母材に貫通穴をあけ表面接点用の素線を挿入している。熱電対のもう一方の金属となる素線は銅製で、母材と表面接点以外で導通しないように周囲は電氣的に絶縁されている。母材表面と素線の先端は電解銅めっきによる薄膜で表面接点を形成している。

母材にあけた深さ5mmの穴に表面接点と同様に周囲が絶縁された素線を挿入し、素線先端を母材と点溶接することで内接点を形成している。点溶接時の絶縁の為、素線はセラミックで覆っている。

母材にあけた深さ3mmの穴に素線を挿入し接触させることでアースを形成している。アース用の素線は、出力に影響を与えないように母材と同じコンスタンタンを使用する。

熱流束計表面での熱の移動現象は一次元の非定常熱伝導であると仮定し、次式(1)の基本的な非定常熱伝導方程式から求められる。ただし、 $T[K]$ を温度、 $t[s]$ を時間、 $x[m]$ を深さとし、熱拡散率を $\alpha[m^2/s]$ とする。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

また、熱伝導が半無限大の壁でおこなわれていると仮定し、どの位置においても温度が時刻 $t[s]$ に関して一定の傾き $k[K/s]$ で変化する場合、深さ x における温度 $T_w(x, t)$ は次式(2)で求められる。

$$T_w(x, t) = kt \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2at} \right) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - \frac{x}{2\sqrt{at}} \exp \left(-\frac{x^2}{4at} \right) \right\} \quad (2)$$

上式から熱流束計表面 ($x=0$) における熱流束 $q[W/m^2]$ は次式(3)で表すことができる。ただし、熱伝導率を $\lambda[W/(m \cdot K)]$ とする。

$$q = \left(-\lambda \frac{\partial T_w}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi a}} k \sqrt{t} \quad (3)$$

ここで、温度変化を微小区間ごとの折れ線の集合として考えることで次式(4)を得ることができる。ただし、 t_j は $t=0$ から j 番目までの微小区間までにかかる時間であり、 k_j は t_j と t_{j+1} 間の温度こう配を表し、 n は総接点数を表す。

$$q_{t_n \leq t \leq t_{n+1}} = \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi a}} \sum_{j=0}^n (k_{j+1} - k_j) \sqrt{t - t_j} \quad (4)$$

本研究では上式(4)を用いて熱流束の算出を行う³⁾。

2.3 薄膜型熱流束計用トラバース装置

ビームダウン式タワー型太陽集光装置集光部の熱流束分布を計測するためには、集光面の熱流束を複数本の熱流束計によって同時に計測する必要がある。そのため、

薄膜型熱流束計用トラバース装置を用いて、7本の薄膜型熱流束計に集光部を通過させることで集光部の二次元熱流束分布を計測する。トラバース装置概略図を図5に示す。

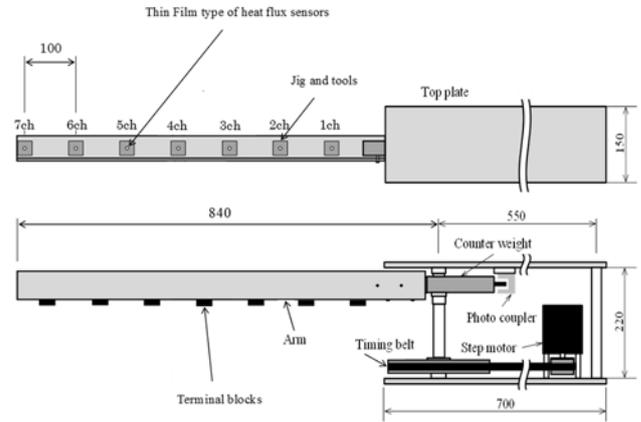


図5. 薄膜型熱流束計用トラバース装置.

薄膜型熱流束計は電氣的絶縁のためベークライト製の治具を用いてアームに固定する。アームには熱流束計が7つ取り付けられており、計測結果が風の影響を受けないように風よけが設けられている。風よけの高さに関しては光を遮らないように考慮されている。さらに、熱流束計の取り外しが容易に行えるように端子台がアーム裏面に取り付けられている。

トラバース装置にはフォトカプラが取り付けられておりアームが所定の角度での時刻を知ることが出来る。フォトカプラの信号とステッピングモータのステップ数から計測結果の位置情報が分かる。

アームの駆動はステッピングモータによって制御しており、脱調しないように駆動信号のディレイを変化させることで加減速を行い、計測区間では薄膜型熱流束計は等速運動を行う。

2.4 信号増幅装置

計測に使用するデータロガーの計測レンジの関係からより高い精度で計測を行うために熱流束計の出力は増幅後記録する。本研究ではオペアンプを用いた増幅度100倍の非反転増幅回路を二段組み合わせた増幅装置を使用して薄膜型熱流束計の出力を10000倍増幅している。

3. 熱流束分布計測実験

3.1 実験方法および実験条件

計測システムの概略を図6に示す。図5のトラバース装置はアルミフレーム製の土台に固定され、図1のビームダウン式太陽集光装置の第二焦点付近に設置される。薄膜型熱流束計、増幅装置、データロガー、PC、ドライバ、コントローラは図6にしたがって接続される。コン

トローラからのトリガ信号がドライバとデータロガーへ送られることでアームの駆動と同時にデータ収録が開始される。

計測条件を表 1 に、トラバース装置の設置位置を図 7 に示す。計測は 4 c h が集光部中心を通過する条件 (a) と、3ch が集光部中心を通過する条件 (b) に分けて行った。設置位置をずらしたのは、各薄膜型熱流束計表面の吸収率が判明しておらず、異なる条件の計測結果の比較から吸収率の影響を評価しようと考えたためである。

計測時の分解能について、最も低いのは最も周速度が速い 7ch である。アームの回転速度、回転中心からの距離、サンプリング間隔、移動平均区間、センサ部直径より 7ch の計測結果は 11mm の区間の平均値となる。集光部直径 800mm と比較するとこの値は十分小さく、この間に生じる熱流束の変動も非常に小さいと考えられる。よって、計測時の分解能は問題ない。

表 2. 計測条件.

	(a)	(b)
集光部中心位置	4ch	3ch
日付	2014/1/15	2014/1/15
計測時刻	12:00	12:55
集光台数	77 台	77 台
直達日射量	875.64W/m ²	894.04 W/m ²
計測レンジ	±5V	
サンプリング間隔	50μs	
サンプリング点数	60000	
移動平均区間	31 点	
増幅度	10000	
フィルタ	なし	
アーム回転速度	360deg/s	
南中時刻	12:24	
南中高度	36.97 度	

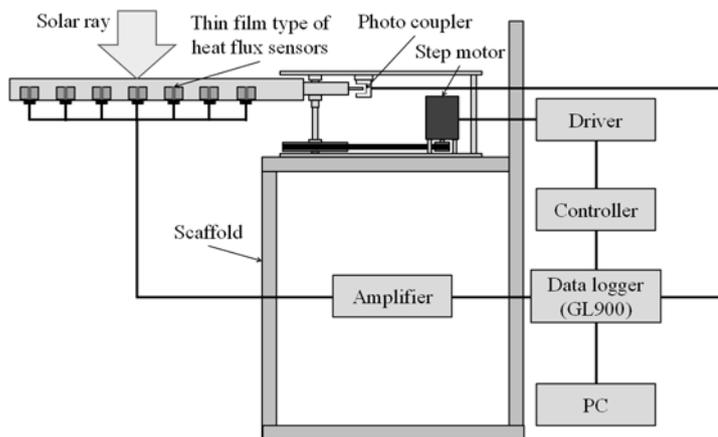


図 6. 計測システム概略図.

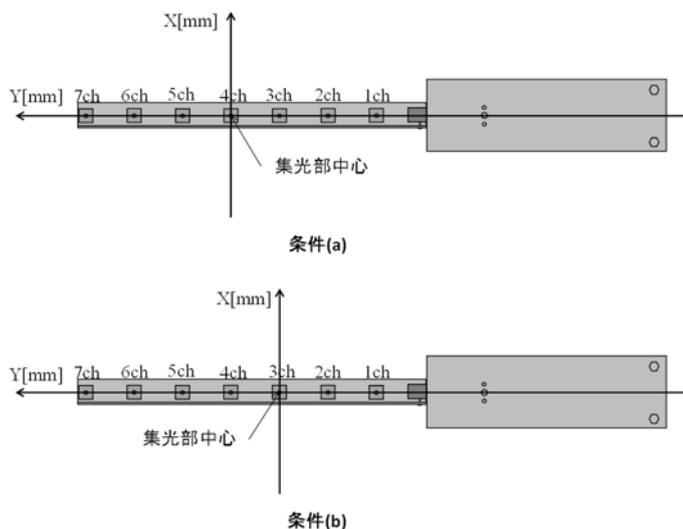


図 7. トラバース装置設置位置.

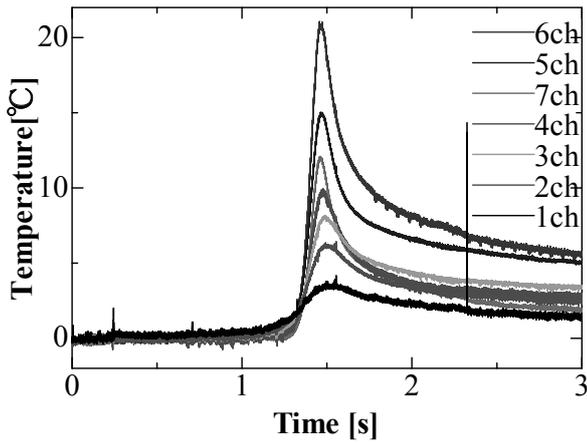
3.2 結果と考察

ビームダウン式タワー型太陽集光装置集光部の熱流束分布計測の結果を図 8、図 9 に、条件 (a) の熱流束分布を三次元表示したものを図 10 に示す。ここで熱流束計表面の吸収率は銅が短時間酸化した場合の文献値⁴⁾から 0.57 としている。また、三鷹光器(株)によるガードン式熱流束計での集光部熱流束分布計測⁵⁾の結果を図 11 に示す。なお計測に約 3 分間必要なガードン式熱流束計に比べ、本計測システムは約 0.3 秒間という非常に短い時間で集光部の熱流束分布の計測を完了することができた。

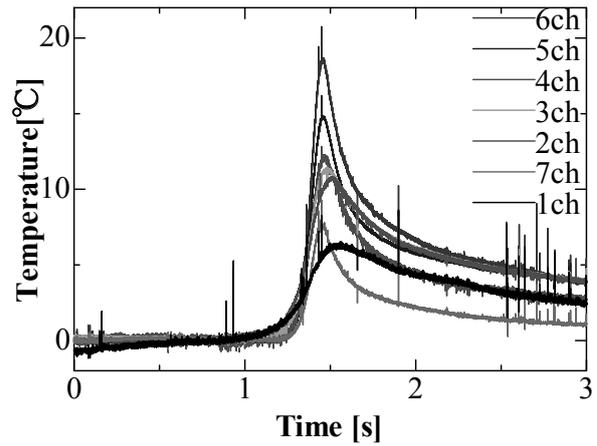
まず、図 8、図 9 より条件 (a) と条件 (b) を比較する。なお凡例はピーク値の高い順に示してある。条件 (a) の 6ch と条件 (b) の 5ch は集光部内のほぼ同様の軌道を通るため熱流束のピーク値は同程度の値を示すと考えられたが、計測結果では条件 (a) の 6ch の方がはるかに大きい値を示した。これは薄膜型熱流束計表面の吸収率の差が原因だと考えられる。このことから、薄膜型熱流束計表面の吸収率は計測結果に大きく影響することがわかる。したがって、定量的な評価をするためには吸収率の算出が不可欠であると考えられる。

次に、図 10 より集光部の熱流束分布を確認する。集光装置の設計上正確に集光が行われていればピークは集光部中心に来ると考えられるが、計測結果では熱流束のピークが集光部中心より北西にずれている。各熱流束計の吸収率が求まっていないため各チャンネルの出力の定量的な比較はできない。したがってピークの南北方向へのずれに関しては判断できない。しかし、ピークの東西方向へのずれに関しては、すべて計測結果でフォトカプラの信号の後にピークが来ていることからピークが集光部中心より西にあると判断できる。

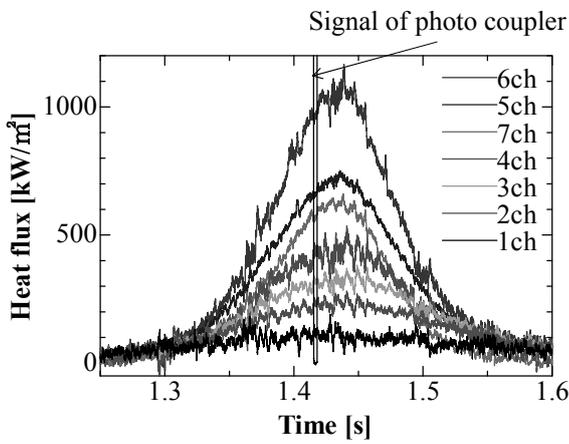
三鷹光器(株)のガードン式熱流束計による計測結果である図 11 においてピークは西にずれており、今回の計測



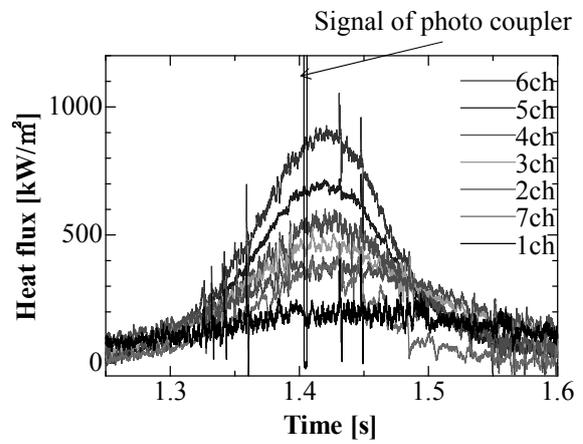
(i) 温度変化



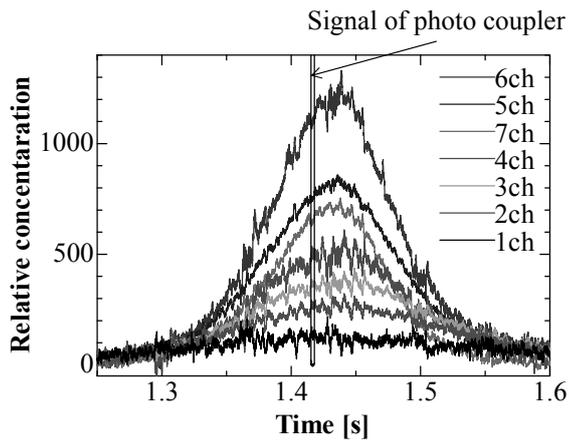
(i) 温度変化



(ii) 熱流束

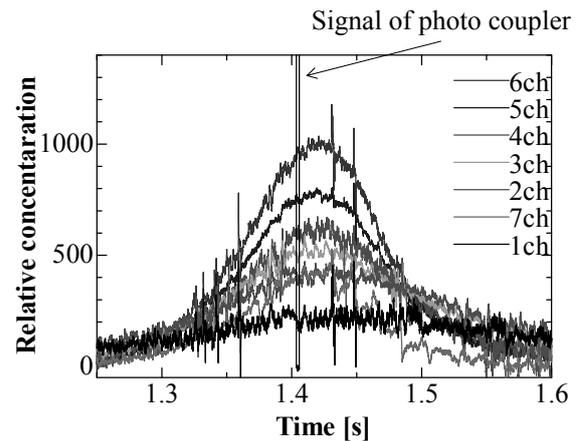


(ii) 熱流束



(iii) 集光倍率

図8. 計測結果 条件(a).



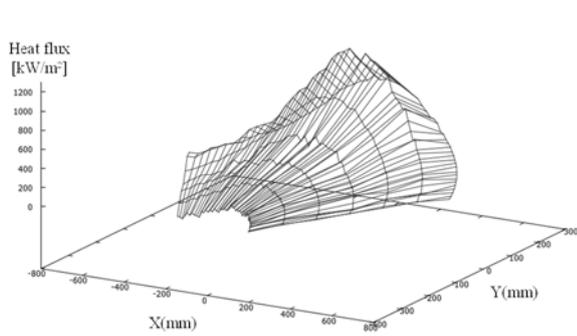
(iii) 集光倍率

図9. 計測結果 条件(b).

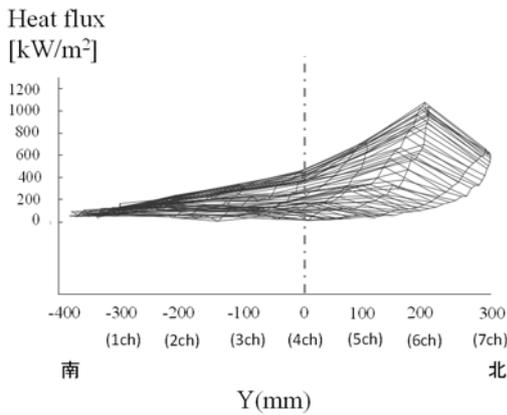
4. 結論

ビームダウン式タワー型太陽集光装置集光部の瞬時二次元熱流束分布計測について以下の結論を得た。

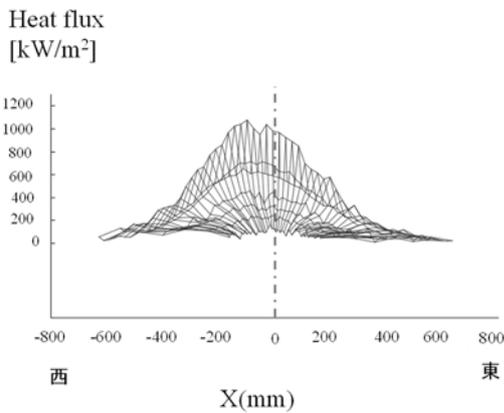
結果図10と似た傾向を示していることが分かる。この比較から今回の計測結果と三鷹光器(株)のガードン式熱流計での計測結果は定性的に同じであると考えられる。



(i) 全体図



(ii) 東から見た場合

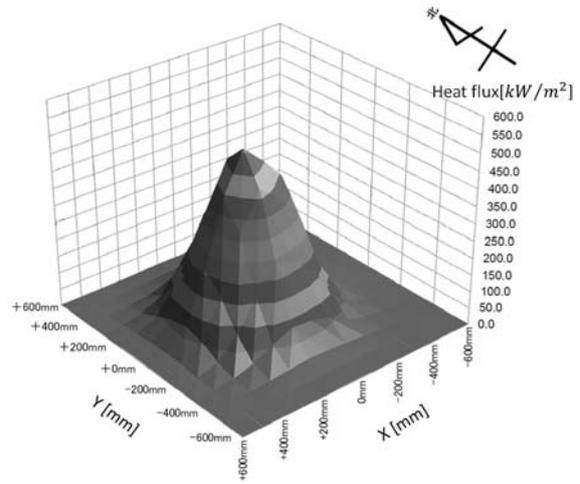


(iii) 南から見た場合

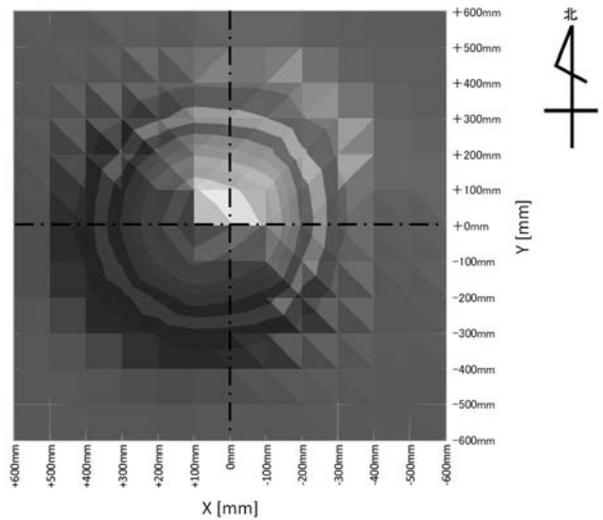
図 10. 熱流束分布 条件(a).

1. 薄膜型熱流束計を用いたビームダウン式タワー型太陽集光装置集光部の瞬時二次元熱流束分布計測システムの設計、製作を行った。
2. 約3分間で計測を行うガードン式熱流計に比べ約0.3sという非常に短い時間で、集光部の熱流束分布の計測を行うことが出来た。
3. 実験結果は三鷹光器のガードン式熱流計で計測した熱流束分布と定性的に一致した。

ただし、計測に使用した熱流束計の吸収率が求められていないため計測結果の定量評価が行えなかった。今後、正確な熱流束分布及び総熱量を求めるために熱流束計の吸収率を求めることが必要である。



(i) 全体図



(ii) 上空から見た場合

図 11. ガードン式熱流計での計測結果.

参考文献

- 1) William B. Stine and Michael Geyer, Power From The Sun Chapter6 Flat-Plate Collector
- 2) N. Yoshinori, 2014, Heat flux measurement without cooling on the light condensing spot of a beam-down solar concentrator, Grand renewable energy 2014 proceedings, O-Th-4-3
- 3) 一色尚次, 密閉容器内の燃焼による熱伝達, 日本機械学会論文集第2部 39 巻 328 号, (1973), pp3760-3770
- 4) 田坂英紀 伝熱工学 森北出版株式会社 pp.129
- 5) T. Kodama, 2013, Flux measurement of a new beam-down solar concentrating system in Miyazaki for demonstration of thermochemical water splitting reactors, Energy Procedia 49 (2014) 1990-1998

謝辞

本研究を進めるにあたり、宮崎大学工学部技術職員の木村正寿氏、三宅琢磨氏、濱畑貴之氏の協力を頂いた。記して感謝の意を表す。