

光ファイバーを用いた宇宙用太陽集光加熱 微小重力材料実験炉の開発

(研究課題番号 09450366)

平成9年度～平成11年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2)一般)
研究成果報告書

平成12年3月

東北大学図書



00010140261

附属図書館

研究代表者 湯上 浩雄
(東北大学 大学院工学研究科 助教授)

はじめに

現在、建設が進められている国際宇宙ステーションの日本実験モジュール曝露部において、太陽熱を用いた材料実験やエネルギー実験が提案されている。宇宙環境下で、集中太陽エネルギーを利用したエネルギー変換に関する研究を行う場合、高温発生部が集人工衛星の姿勢制御などの外部擾乱により時間的に空間位置が変動し、 μ -g環境の実現の上で問題となることが予想される。そこで本研究では、放物面太陽集光鏡の焦点に光ファイバーを設置して、高密度太陽エネルギーを光ファイバー伝送することにより、任意の場所で、外部擾乱から隔離した状態で高温領域における太陽エネルギー変換・利用が可能なシステムの開発を目的として研究を行った。また、ファイバーによる太陽光の伝送システムは、月資源の利用を想定したときに高温場所を任意に発生できるため、装置の信頼性の向上や単純化を行う上で有用である。

本研究では、太陽光自動追尾機構を付加した口径 0.7m、焦点距離 700mm 放物面鏡を試作し、最大取り込み角 12° で直径 0.3mm の光ファイバーを 1540 本束ねてファイバー束径 17mm としたものを伝送用ファイバーとして採用した。また、複合放物面集光器 (CPC) と楕円面鏡からなる材料実験炉を試作し、その性能評価を行った。CPC により熱流速は約 11 倍までエンハンスされた。この値は設計値の約 90% であり、CPC によるファイバー伝送光の再高密度化が有効である事が分かった。

これらの太陽集光・伝送システムと材料実験炉を用いて月面のレゴリスを模擬したレゴリスシュミラントを用いて、実太陽によるレゴリス還元・溶解実験を行った。実太陽光による還元実験では、レゴリスシュミラント中の酸化鉄 (Fe_2O_3) 中の約 70-90% が還元されていることが分かり、月資源利用のための太陽熱利用システムとして有効であることが分かった。

研究組織

研究代表者：嵐 治夫 (東北大学 大学院工学研究科 教授
平成 9 年 10 月 27 日逝去)

研究代表者：湯上 浩雄 (東北大学 大学院工学研究科 助教授)

研究分担者：内山 勝 (東北大学 大学院工学研究科 教授)

研究分担者：圓山 重直 (東北大学 流体科学研究所 教授)

研究分担者：内藤 均 (東北大学 大学院工学研究科 助手)

(平成 10 年 10 月 1 日より)

科学技術庁 航空宇宙技術研究所)

研究経費

平成 9 年度	7,900 千円
平成 10 年度	3,000 千円
平成 11 年度	2,500 千円
計	13,400 千円

研究発表

(1)学会誌等

1. HIGHLY CONCENTRATED SOLAR ENERGY TRANSMISSION THROUGH AN OPTICAL FIBER COUPLED WITH CPC
Proc. of 32nd Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference (IECEC1997), (1997), 1871-1876.
Haruo Arashi, Hitoshi Naito, Hiroo Yugami, and Toshiharu Oka
2. FIELD EXPERIMENT OF LASER ENERGY TRANSMISSION AND LASER TO ELECTRIC CONVERSION
Proc. of 32nd Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference (IECEC-97), (1997), 625-630.
H. Yugami, Y. Kanamori, H. Arashi, M. Niino, A. Mori, K. Eguchi, Y. Okada, and A. Endo
3. Uniform Heating of an Emitter for a Thermionic Converter Using Concentrated Solar Radiation
Proc. of ISES 1997 Solar Energy Congress, **2** (1997) 253-259.
H. Naito, T. Umeoka, H. Yugami and H. Arashi
4. Development of Indirect Solar Pumped Laser Driven by PV Cells
Proc. of ISES 1997 Solar Energy Congress, **3** (1997) 253-259.
Y. Kanamori, H. Yugami, H. Naito, and H. Arashi
5. Efficiencies of Photovoltaic Cell Receivers for Laser Power Transmission under the Lunar Environment
Proc. of 33rd. Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference, (IECEC-98), (1998), Paper No. 378 (CD-ROM) .
H. Yugami, Y. Kanamori, H. Naito, H. Itagaki
6. DEVELOPMENT OF CO₂ RECOVERY SYSTEM USING INTEGRATED STATIONARY EVACUATED SOLAR CONCENTRATORS
Proc. of 33rd. Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference, (IECEC -98), (1998), Paper No. 379 (CD-ROM) .
Hitoshi Naito, Fumiki Hosho, Hiroo Yugami
7. 太陽集光加熱技術の研究
石川島播磨技報 **38** 卷, 第 6 号 (1998) 380-384.
岡 利春, 和住 光一郎, 湯上 浩雄, 内藤 均

8. Concentration of fiber transmitted solar energy bu CPC
for solar thermal utilization
Journal de Physique IV **9**, (1999) 545-549.
9. CO₂ Recovery from Alkañol-Amine Solution Using Integrated Stationary
Evacuated Concentrators
Journal de Physique IV **9**, (1999) 349 - 354.
Hitoshi Naito, Fumiki Hoshō, Hiroo Yugami, Haruo Arashi
10. Development of a Solar Heat Receiver and Its Application to High-
Temperature Vapor Electrolysis
submitted to JSME International Journal, B.
H. Naito, H. Yugami, H. Arashi, and Y. Yamauchi

(2)口頭発表

1. 太陽光間接励起型半導体レーザーの開発
第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム, 1997 年 2 月, 相模原.
湯上 浩雄, 金森 義明, 内藤 均, 嵐 治夫
2. JEM 暴露部初期利用に向けた太陽熱エネルギー利用実験の提案
第 13 回宇宙ステーション講演会, 1997 年 4 月, 東京.
荻原 斐千男, 江口 邦久, 藤原 勉, 岡 利春, 下平 久代, 山田 明
3. 熱電変換システム用超高温太陽受熱器の開発と最適化
第 7 回環境工学総合シンポジウム, 1997 年 7 月, 東京.
内藤 均, 梅岡 貴志, 湯上 浩雄, 嵐 治夫
4. Development of a Solar Heat Receiver and Its Application to High-
Temperature Vapor Electrolysis
Solar Chemistry, October, 1997, Villigen, Switzerland.
H. Arashi, H. Naito, H. Yugami, and Y. Yamauchi
5. 太陽光励起レーザーの熱負荷低減に関する研究
平成 9 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会, 1997 年 11 月, 豊橋.
志水 浩三, 湯上 浩雄, 内藤 均, 嵐 治夫
6. 太陽エネルギーを利用した CO₂ 分離回収システムの開発
平成 9 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会, 1997 年 11 月, 豊橋.
寶正 史樹, 内藤 均, 湯上 浩雄, 嵐 治夫
7. 月面レーザーエネルギー伝送における受光素子効率
第 17 回宇宙エネルギーシンポジウム 1998 年 2 月, 宇宙科学研究所.
湯上 浩雄, 金森 義明, 内藤 均, 板垣 春昭

8. 月面小電力レーザ伝送システム
第 17 回宇宙エネルギーシンポジウム 1998 年 2 月, 宇宙科学研究所.
木下 貴博, 板垣 春昭, 宇田川 悟, 油谷 崇志, 江口 邦久,
湯上 浩雄, 磯辺 昭彦, 岡田 康弘, 大石 克己, 池田 妙子,
平田 晋吾, 寺菌 淳也
9. 据置型低倍率太陽集熱器を利用した CO₂分離回収技術の開発
第 17 回エネルギー・資源学会研究発表会, 1998 年 4 月, 大阪.
内藤 均, 實正 史樹, 湯上 浩雄
10. 化学吸収法による CO₂分離回収技術への太陽エネルギーの適用
第 8 回環境工学総合シンポジウム'98, 1998 年 7 月, 川崎.
内藤 均, 實正 史樹, 湯上 浩雄
11. 太陽集熱器 CPC を利用した CO₂分離回収システムの開発
日本機械学会大 76 期全国大会, 1998 年 10 月, 仙台.
内藤 均, 實正 史樹, 高橋 潤也, 湯上 浩雄
12. ワイヤレスエネルギー伝送地上基礎実験
日本機械学会大 76 期全国大会, 1998 年 10 月, 仙台.
秋山 裕寛, 金森 義明, 湯上 浩雄, 新野 正之
13. 宇宙太陽熱利用のための集光受熱技術の基礎研究
(第 1 報 ; 集光受熱系の検討)
平成 10 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会, 1998 年 12 月, 那覇.
内藤均, 藤原勉, 江口邦久, 湯上 浩雄, 田中耕太郎, 山田明, 中島昭二
14. 宇宙太陽熱利用のための集光受熱技術の基礎研究
(第 2 報 ; 潜熱蓄熱部の予備検討)
平成 10 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会, 1998 年 12 月, 那覇.
田中耕太郎, 内藤均, 藤原勉, 江口邦久, 渡辺晋也, 大谷雄一
15. 高密度太陽光の光ファイバー伝送と月資源利用
第 18 回宇宙エネルギーシンポジウム 1999 年 2 月, 宇宙科学研究所.
湯上 浩雄, 矢野 征紀, 内藤 均
16. JEM曝露部搭載太陽熱利用研究—集光受熱系の検討—
第 18 回宇宙エネルギーシンポジウム 1999 年 2 月, 宇宙科学研究所.
内藤 均, 藤原勉, 星野健, 江口邦久, 湯上 浩雄
17. 集中太陽光による均一加熱方式の件等
第 3 回スターリングサイクルシンポジウム 1999 年 10 月, 東京.
内藤 均, 星野健, 藤原勉, 江口邦久, 湯上 浩雄
18. 15. 高密度太陽光の光ファイバー伝送と月資源利用 II
第 19 回宇宙エネルギーシンポジウム 2000 年 2 月, 宇宙科学研究所.
湯上 浩雄, 矢野 征紀, 内藤 均

研究成果

1. はじめに

近年、宇宙開発の分野において、宇宙ステーションの建設や月探査などの様々な計画が進められている。将来的にエネルギー需要の増大が見込まれるため、これらの計画を実行するにあたって、宇宙空間活動のためのエネルギーを全て地球上からの輸送によって供給するのは不可能である。したがって、これらのエネルギー問題を解決するための手段として、宇宙空間において容易に得ることが可能で、かつ枯渇の心配のない太陽エネルギーを利用した太陽光（熱）発電システムや太陽熱利用システムの開発が重要となる。地球外での太陽光が、吸収や散乱によって減衰された地球上でのそれよりも高いエネルギーを持つことから、宇宙空間での太陽エネルギー利用は有用であると言える。

太陽エネルギー利用の1つとして、宇宙ステーションや月基地での材料実験炉の熱源としての利用が考えられている。高温の材料実験炉を実現するためには、回転放物面鏡などを用いて太陽光を高密度に集光する必要がある。

しかし、回転放物面鏡を使用した直達式の太陽集光システムを用いて太陽光の集光を行うと、高温発生点となる集光器の焦点の位置が太陽追尾のために移動してしまい、“宇宙空間での μ -g環境に対する擾乱”や“高温発生部の構造の複雑化”の原因となる。これに対して、集光された高密度太陽光を光ファイバーに取り込み、伝送することによって、その可塑性を利用し、光ファイバーの一端として“空間的に固定された高温発生点を得る”と共に“高温発生部の構造の単純化”が可能となる。光ファイバーを使用する場合、集光器と光ファイバーの接続のために光の集中度が低下してしまう。このため、光ファイバーの出射口に2次集光器として複合放物面集光器（Compound Parabolic Concentrator : CPC）を接続することによって再集光を行い、低下した集中度を上げると共に更なる高密度化が有効である。

本研究では、宇宙ステーションや月基地での使用を考慮した集中太陽熱を利用した材料実験炉の開発を主目的として、そのための基礎研究として、光ファイバー伝送光学系の設計・製作および複合放物面集光器による光ファイバー出射端での

再集光に関する研究, および月面表土 (レゴリス) の高温水素還元に関する研究を行った。

月資源利用に関しては, レゴリスと月面に存在するといわれる氷を利用して, F 図 1 に示すようなサイクル (①~⑤) が考えられる。

- ①太陽エネルギーによる水分解。
- ②生命維持系への酸素供給。
- ③太陽エネルギーによるレゴリスの高温水素還元。
- ④生成金属 (Fe, Si, etc) の月基地建設への利用。
- ⑤水電気分解システム及び生命維持系へ供給。 →→→ ①へ

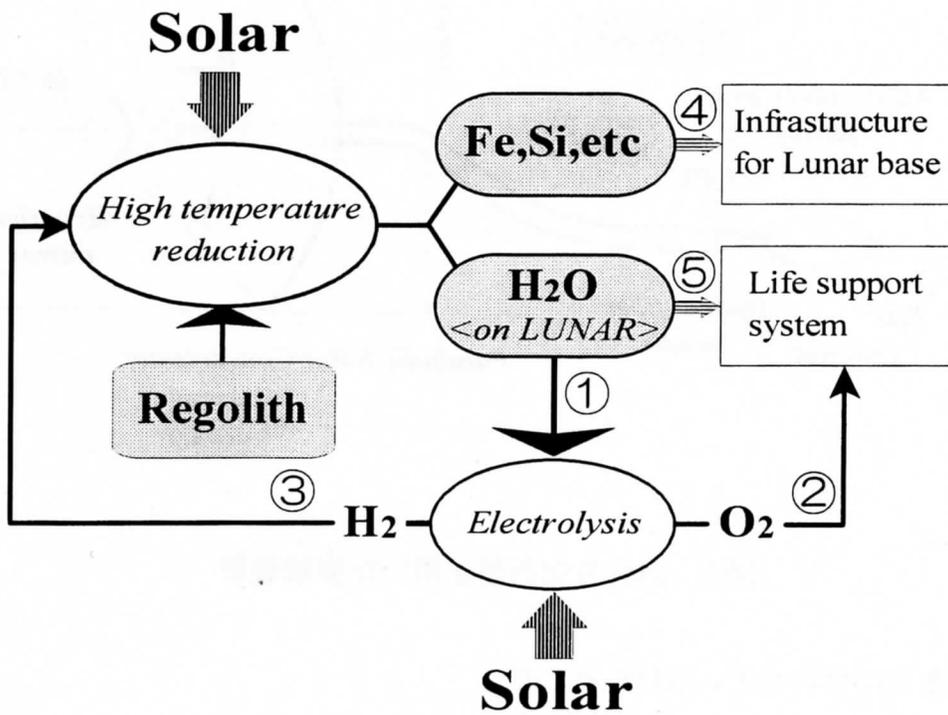


図 1 月ステーションでのエネルギー・資源利用サイクル

2. 集中太陽熱利用材料実験炉

2.1 集光および伝送光学系

図2に集中太陽熱を利用した材料実験炉の概略図を示す。1次集光器である回転放物面鏡は CCD カメラによる太陽の自動追尾機構を備えている。

回転放物面鏡のパラメータを決定するために集中度とコストの計算を行った。計算に際して、回転放物面鏡の口径は、宇宙ステーションの曝露実験ペイロード

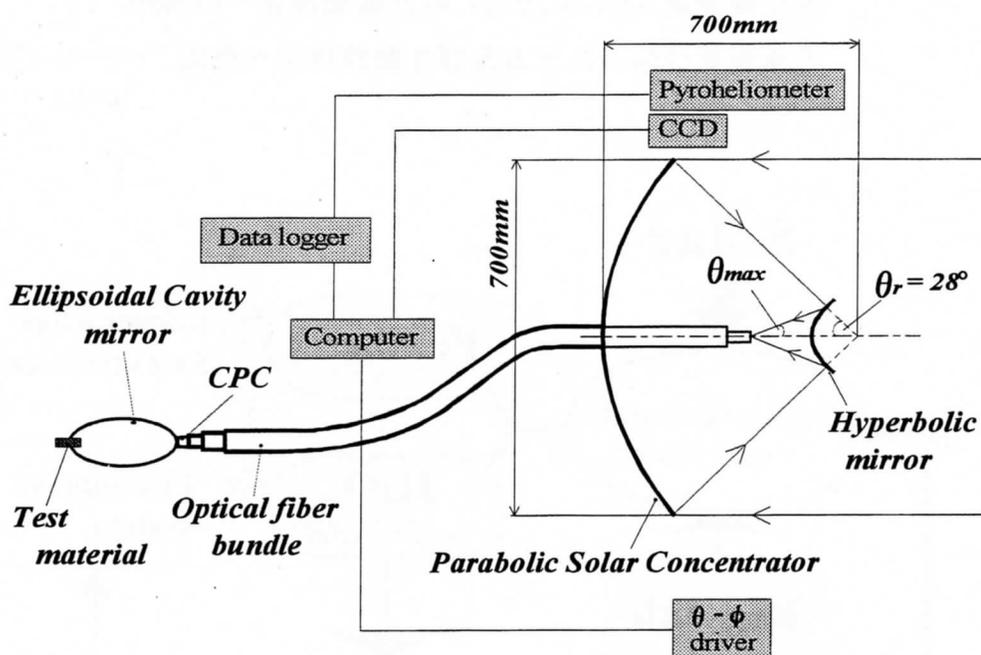


図2 回転放物面鏡を用いた実験装置

の大きさに合わせて、700mmとした。

図2に計算結果を示す。それぞれ回転放物面鏡の焦点距離の変化による回転放物面鏡単体の集中度の変化、CPCを加えたシステム全体の集中度の変化、回転放物面鏡の表面積の変化を表している。ここで、コストは、表面精度などは均一とし、単純にその表面積（材料費）に比例すると考えている。

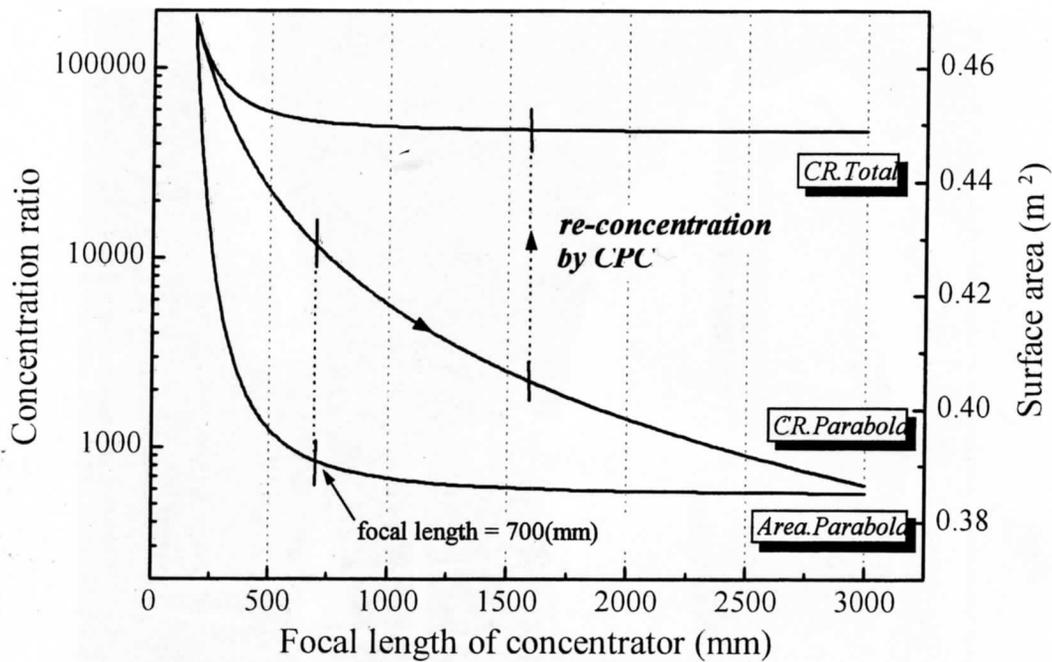


図2 太陽集中度および集光器表面積の焦点距離依存性

図2から、コストが安く集中度が高くなる値として、焦点距離を700mmと決定した。このとき回転放物面鏡の集中度は約10000となり、回転放物面鏡のリム角は $\theta_r=28^\circ$ となる。これに対し、本研究では最大取り込み角 θ_{max} が 12.7° の光ファイバーを用いているため、リム角と θ_{max} を整合させる必要がある。

そこで、図1のように副鏡として回転双曲面鏡を用いたカセグレン光学系とした。回転双曲面鏡のパラメータについては後方焦点と回転放物面鏡の焦点が一致するように配置したときに、回転双曲面鏡で反射された太陽光が、光ファイバーの最大取り込み角 θ_{max} と一致するような角度で集光されるように設計した。しかし、このように回転双曲面鏡を使用することによって、焦点距離が長くなり集中度が低下してしまう。したがって、2次集光器としてCPCを用いることによって再集光を行い集中度の低下を補う。CPCの許容角 θ_a は θ_{max} との整合性と製作誤差を考慮して 14.0° とした。

実際に測定に使用した装置の写真を図3に示す。図4にファイバー束の入射部分の断面図を示す。

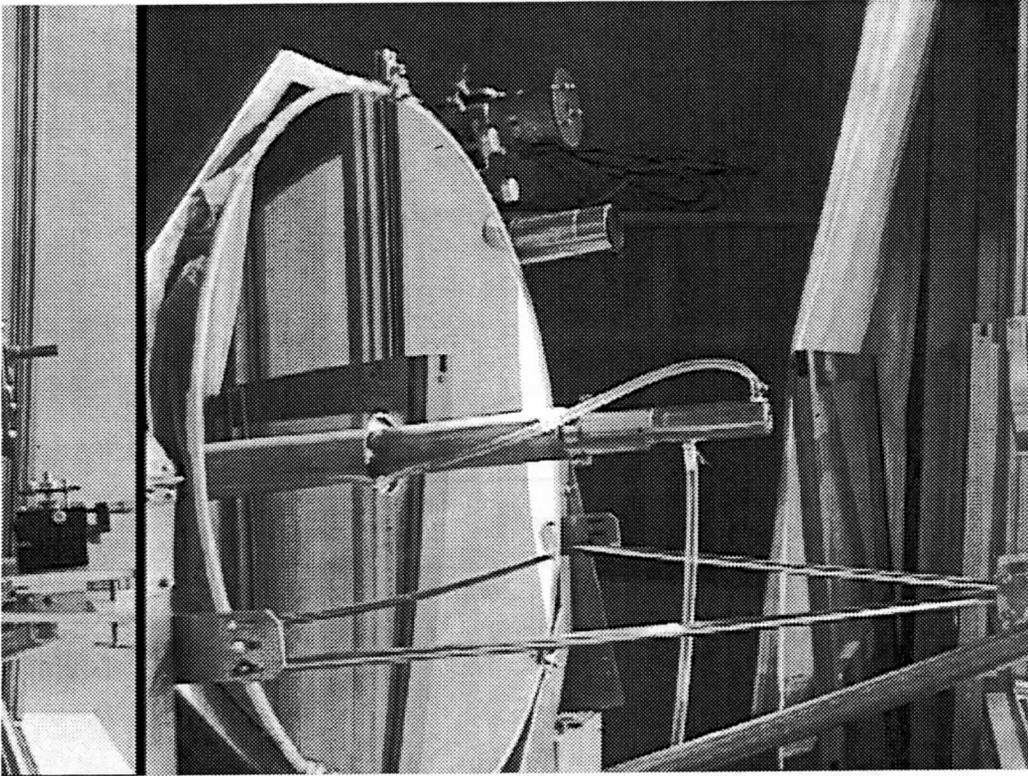


図3 ファイバー束を合成焦点位置に設置したカセグレン型太陽集光器

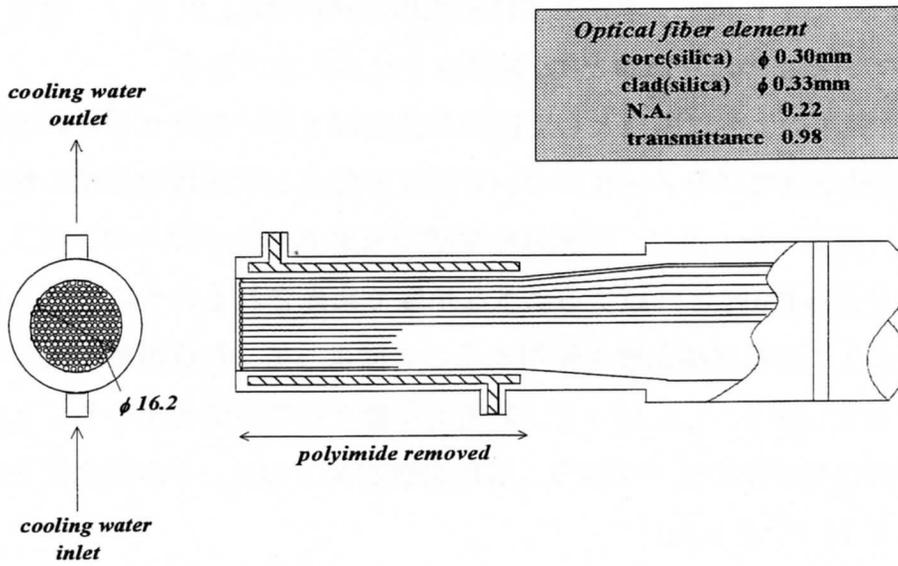


図4 光ファイバーバンドル断面図

2.2 楕円型材料実験炉

図5, 6に集中太陽熱を利用した楕円型材料実験炉の概略図および写真を示す。2次集光器であるCPCをこの図のように光ファイバー束の出口に取り付けることによって、回転放物面鏡によって集光され、光ファイバー伝送された高密度太陽光を再集光し、更に高密度化する。また、CPCの出口を楕円型材料実験炉の第1焦点に一致するように接続することによって、CPCから出射される高密度太陽光を第2焦点に設置した試験材料に再集光し、楕円型材料実験炉の熱源とする。

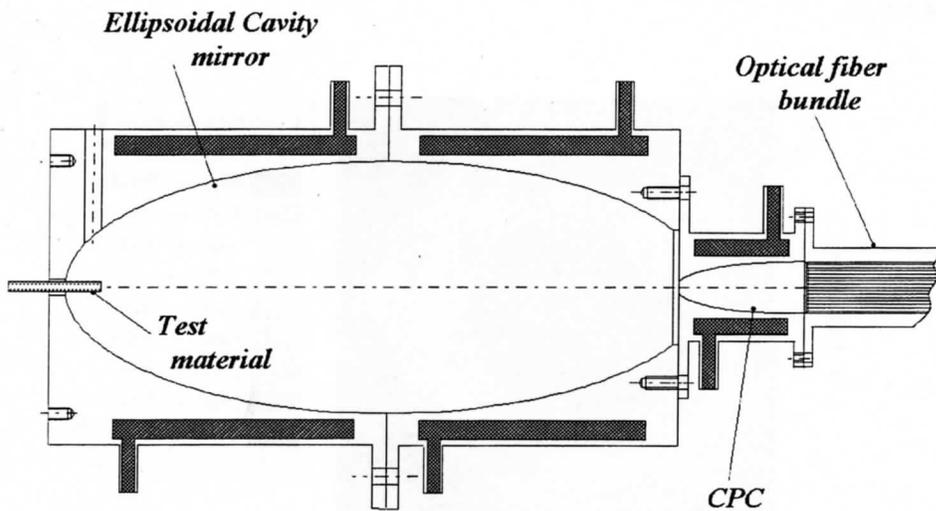


図5 CPC再集光器を設置した双楕円面材料実験炉

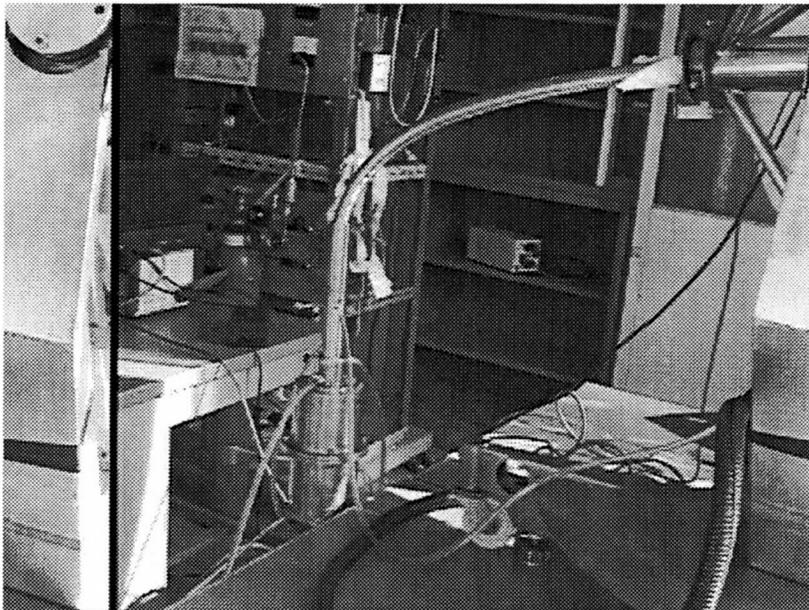


図6 ファイバーを接続した材料実験炉

3. 回転放物面鏡の評価

回転放物面鏡の集中度分布を評価するために、熱量計を用いて、その焦平面におけるエネルギー密度分布を測定し、そのときの直達日射の強度から集中度分布を求めた。測定結果を図7に示す。焦平面におけるエネルギー密度分布の測定結果は焦点を中心にほぼ同心円を成している。その中心からの距離ごとに集中度の平均を取ったものと計算によって求めた理論的な集中度分布との比較を図8に示す。この図から、集中度、太陽像径共に、ほぼ理論値通りの結果が得られていることがわかる。

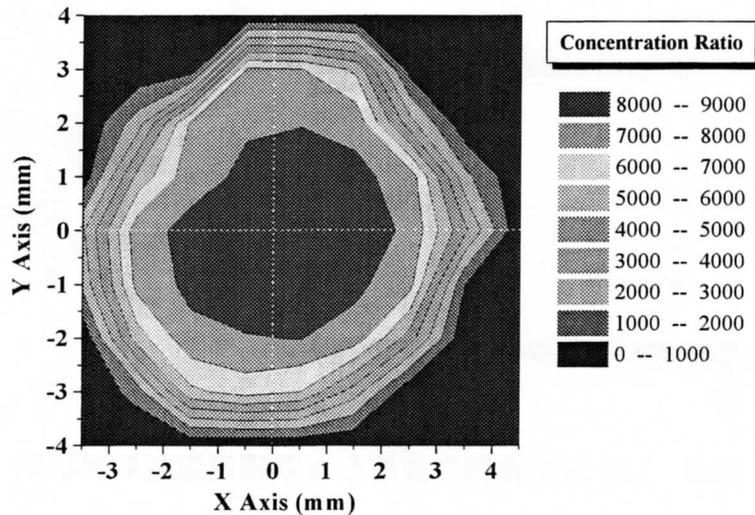


図7 焦平面でのエネルギー分布

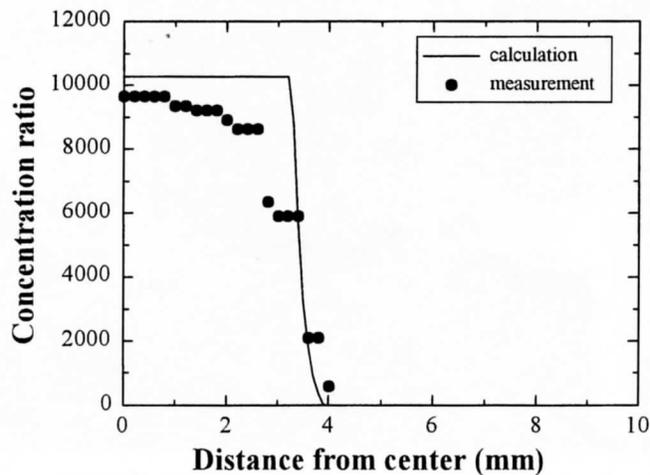


図8 焦平面での集中度の空間分布

4. 光ファイバー伝送効率の評価

光ファイバー束の性能評価のため、熱流束計を用いて、光ファイバー束の出射端でのエネルギー密度分布の測定を行った。測定結果を図9に示す。

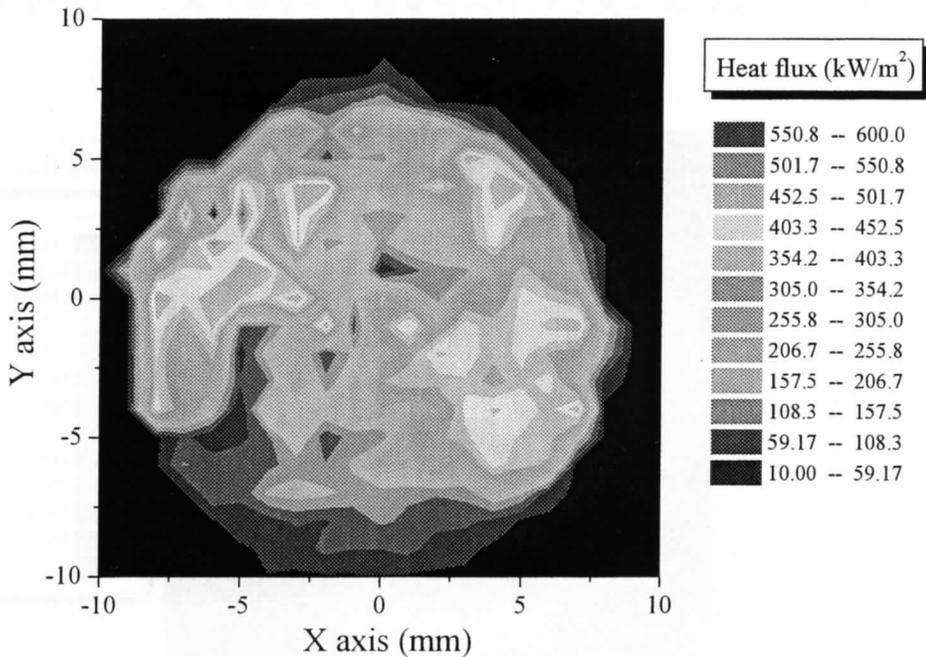


図9 光ファイバー出口での熱流速の空間分布

この測定では、熱流束計を移動させながら出力を測定しており、各側定点で直達日射強度が変化してしまうので、直達日射強度の値が $800\text{W}/\text{m}^2$ となるように全測定値を補正してある。測定値と光ファイバー束断面積を掛けて伝送後の全エネルギーを、同時に測定した直達日射強度に回転放物面鏡の面積と集光器の反射率を掛け、伝送前の全エネルギーを求めた。各側定点について、伝送前後の全エネルギーの比を計算し、その平均を光ファイバー束の伝送効率として求めた。その結果、この光ファイバー束の伝送効率として0.31が得られた。

光ファイバー束の理論伝送効率は、透過率0.98、端面反射率0.92²、バンドル充填率0.53から、0.44と計算される。したがって、実際の伝送効率として、理論値の70%の値が得られたといえる。

5. CPC の性能評価

CPC の性能を評価するために、前述の回転放物面鏡の評価と同様に熱量計を使用して、CPC 出口でのエネルギー密度分布を測定し、CPC 入り口の熱流速分布と比較した。図 10 に CPC 出口でのエネルギー密度分布の測定結果を示す。

エネルギー密度の値に見られる大きなばらつきは、光ファイバー束を構成する

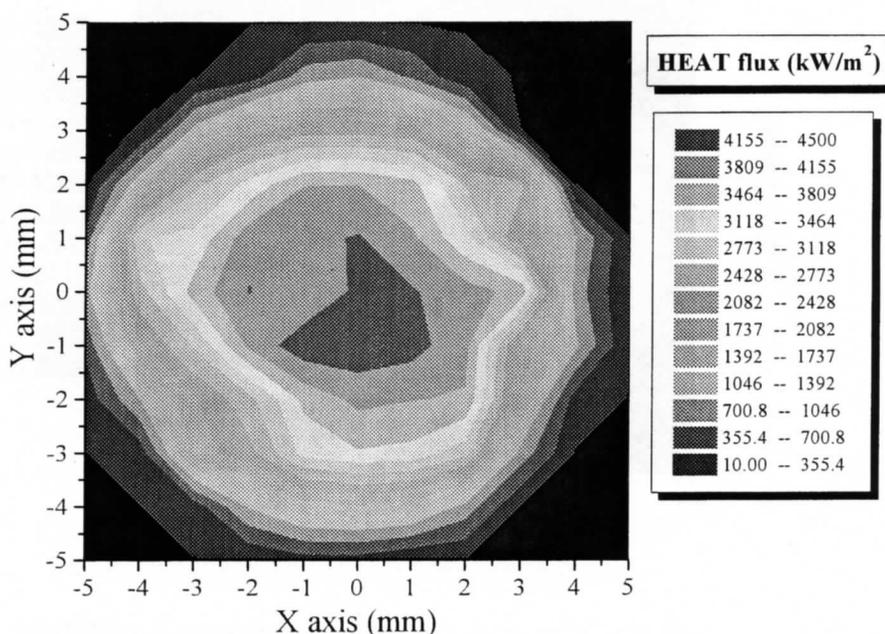


図 10 CPC 出口での熱流速分布

光ファイバー素線一本々々の端面の精度などから来る透過率の違いが、主な原因であると考えられる。

CPC の入口と出口それぞれのエネルギー密度分布の平均値から、この CPC の集中度を計算した。

CPC の集中度の実測値と理論値の比較を Table 1 に示す。ここで、理論集中度の上段は、CPC の幾何学形状のみによるものであり、次式によって算出される値である。

$$C.R. = \left(\frac{1}{\sin \theta_a} \right)^2$$

しかし、実際には反射によるエネルギーの損失が存在するので、それを考慮した正味の値を求めるため、レイトレース法によるシミュレーションを行い、CPC表面での光線の平均反射回数を算出した。また、He-Ne レーザによってCPC表面の反射率を測定した。その結果、CPC内での光線の反射は平均1.67回、表面の反射率は0.85~0.90となった。したがって、CPC表面での反射損失を考慮した理論集中度は約13.49となり、測定によって得られた集中度11.86は理論値に非常に近いものであると考えられる。

Table 1 Concentration Ratio of CPC ($\theta_a=14^\circ$)

	<i>Experimental</i>	<i>Theoretical</i>
<i>Concentration Ratio</i>	11.88	15.36
<i>Ratio</i>		13.49

5. 材料実験シミュレーション

5.1 光線追跡シミュレーション

設計した光学系に対して、レイトレース法によって回転放物面鏡に入射した光の光線追跡シミュレーションを行った。なお今回のシミュレーションでは、簡単のため、太陽光の広がり角を無視し、レイ本数17420本の完全平行光線とした。

図11にCPCを使用しない場合の、図12にCPCを使用した場合の結果を示す。

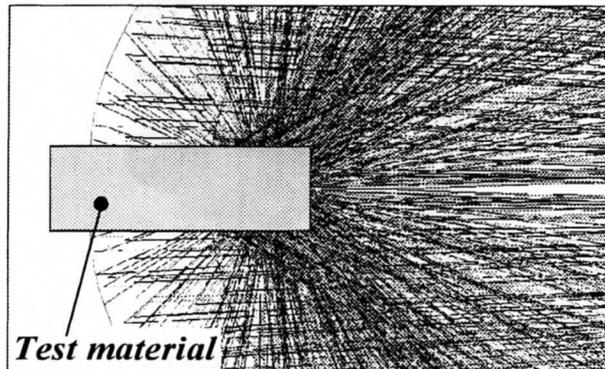


図11 CPCを使わない時の試料位置での光線トレース

それぞれ試験材料を設置した楕円型材料実験炉の第2焦点部分の拡大図である。CPC を使用しない場合、光線が材料表面全体に分布しているのに対して、CPC を使用した場合、試験材料先端部分により多くの光線が入射することが予想出来る。

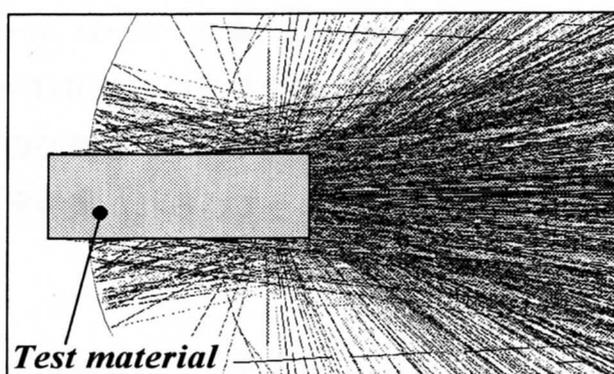


図 12 CPC を用いたときの試料位置での光線トレース

5.2 有限要素法による温度解析

前述のレイトレース法による光線追跡シミュレーションを行い、試験材料に吸収される光線の空間分布データを求め、この光線データをもとに試験材料各部に吸収されるエネルギー密度を決定し、有限要素法によって試験材料の温度分布解析を行った。

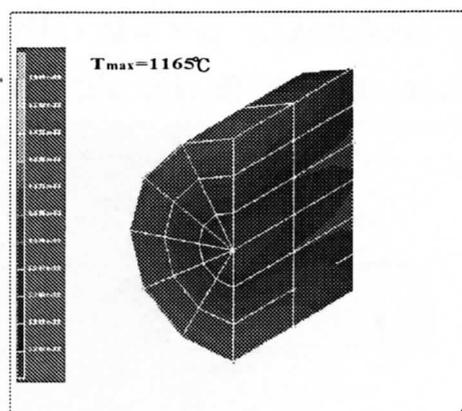


図 13 CPC を使わない時のレゴリス温度分布

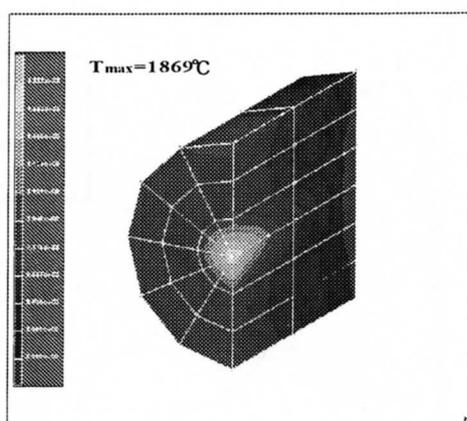


図 14 CPC を用いたときのレゴリスの温度分布

解析の条件としては、試験材料の形状を直径 4mm、長さ 12mm の円柱状とし、これを軸方向に 6 分割、円周方向に 12 分割、半径方向に 3 分割し、合計 216 の要素に分割した。材料はグラファイトと月表面に存在するレゴリスを想定して、それぞれに対して CPC ($\theta_a=14^\circ$) を使用した場合と使用しない場合について、1 秒間光を照射したとして温度分布解析を行った。

レゴリスに関する解析結果を図 1 3、図 1 4 に示す。CPC を使用しない場合、光が広い範囲に分布し、温度は 1165°C までしか上がらなかった。一方、CPC を使用した場合は、材料先端に光が集中し最高温度 1869°C まで上昇し、CPC を用いた再集光が有効であることがわかった。

4. レゴリス(シミュラント)の高温還元実験

月資源利用サイクルの一部として、集中太陽熱を利用したレゴリスの高温水素還元があり、その予備実験として、シミュラントを用いた還元実験を行った。実験方法としては、低酸素分圧 (1.0×10^{-20} atm) の還元ガスが流れるガラスセル内にシミュラント (1g) をセットし、赤外線ランプを用いて約 900°C まで加熱を行った。また、ガラスセルに酸素センサーを接続し、キャリアガスと共に放出されるガスの酸素分圧変化のその場観察を行った。

図 1 5 に酸素分圧変化の測定結果から計算した生成水の分圧の時間変化を示す。図 1 5 と還元ガス流量から生成水量を計算すると 0.034g となる。

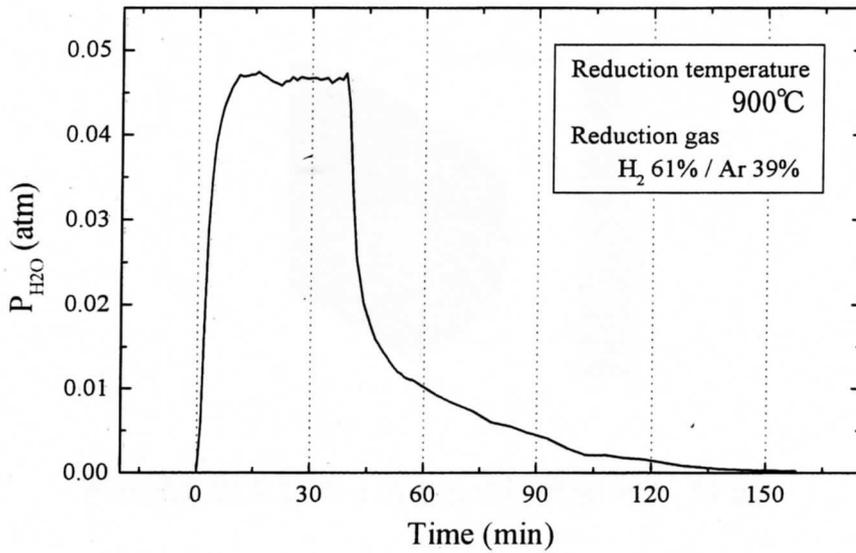


図 1 5 高温還元状態のレゴリスから発生した水蒸気量の時間依存性

シミュラントの構成成分の中で、1000°C付近で最も還元され易い物質はFeOとFe₂O₃であり、実際に実験後の試料のX線回折によって、Feの存在が確認された。シミュラント1gに含まれるこれらの成分が全てFeに還元されると、理論上0.037gの水が発生する。したがって、光加熱によってシミュラントに含有する酸化鉄の約92%が還元されたことがわかった。

6. まとめ

高密度太陽エネルギーを利用した材料実験炉の開発を目的として、高密度太陽光の光ファイバー伝送を行うためのカセグレン光学系の設計製作を行った。太陽の自動追尾機構を有する口径700mmの回転放物面鏡からなるシステムを製作し、2次集光器であるCPCの集中度について測定値と理論値を比較することによって、性能の評価を行った。また、レイトレース法と有限要素法を組み合わせたシミュレーションによって、2次集光器にCPCを使用した場合と使用しない場合について試験材料の温度分布解析を行った。この結果、CPCを使用することによっ

て、より高い温度を得ることができ、CPCによる再集光の有効性を確認した。

光ファイバー束の性能評価を行い、理論値の70%の伝送効率を得られることを確認した。また、レゴリスの還元実験によって、含有酸化鉄の92%が還元され、X線回折により、Feの生成を確認し、月エネルギーシステム構築のための資源利用技術として本システムが有効であることを確認した。

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。