

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：32619

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14549

研究課題名(和文) 太陽光照明のためのエレクトロウェットिंग効果を用いた高機能採光器の開発

研究課題名(英文) Development of sunlight collector using electrowetting phenomenon for day lighting system

研究代表者

田中 耕太郎 (Kotaro, Tanaka)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：60278215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：エレクトロウェットिंग(EW)効果による液界面形状変化を利用して太陽光を追尾・集光する太陽光採光器の開発が本研究の目的である。プリズムのように光を曲げる効果とレンズのように集光する効果を併せ持つEW光学セルを特徴とする。3～10mmの矩形ならびに四角錐台容器に透明液体(水, シリコンオイル, イオン液体)を封入するセルの光学特性を解析し, セル形状, 液種類と充填比率等の設計パラメータを明らかにした。液3層セルにおいて幾何学的集光比25の時, 入射角度25°までの光伝送ファイバー到達率は20%, 入射角15°までの到達率は40%程度が得られた。簡素な追尾機構の太陽光採光器への応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光を変換せずに直接光として利用する太陽光照明の技術的課題を解決し進展させることができれば, オフィスビル, 地下施設, 植物工場など多くの用途への太陽光照明の普及が期待できる。特に, 太陽自然光と電気照明人工光のハイブリッド照明の研究が最近進展して注目されている。ビル省エネルギー化を目指すZEB技術の1つとして, 太陽光照明の開発の注目度が高まっている。EWOD光学セルによる太陽光採光方式は, 現状の光ダクトと機械式追尾装置による光ファイバー伝送方式の間に位置し, 簡素で中距離伝送が可能な点を特徴とする。エレクトロウェットिंग効果の新たな応用先の1つとして, 技術的開発が期待される研究目標といえる。

研究成果の概要(英文)：Two types of EWOD(Electrowetting-on-dielectric) sunlight collector cell have been proposed. One is a rectangular type and the other is a quadrangular frustum type. In order to introduce sunlight into the transmission optical fiber, it is necessary to have two effects of refracting as a prism and concentrating as a lens. In the rectangular type, two effects are performed by the interface shape deformation by the EWOD effect. In the truncated pyramidal type, the effects are performed both the container wall and the EWOD effect. Optical characteristics of the two type cells in which transparent liquid (water, silicone oil, ionic liquid) are enclosed in containers have been analyzed and design parameters such as cell shape, liquid type and filling ratio have been evaluated. The analysed results show that in a three-layer liquid cell, when the concentrating ratio is 25, the sunlight reach ratio to the optical fiber up to the incident angle of 25° is 20%, and 15° is about 40%.

研究分野：エネルギー変換工学

キーワード：太陽光照明 太陽光採光器 エレクトロウェットिंग 太陽光直接利用

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽光は太陽電池により電気に変換して照明として利用することが可能である。しかし、太陽電池とLEDの変換効率はそれぞれ20%、30%程度であり、組み合わせ変換効率は6%程度である。太陽光を直接変換せずに利用する太陽光照明の技術的課題を解決し進展させることで、オフィスビル、地下施設など多くの用途への普及が今後期待できるといえる。

太陽光照明には多くの方式がある。窓面プリズムで太陽光を屈折させる方式、光ダクト方式、光ファイバー伝送方式が主に現状研究、開発されている方式である。窓面プリズム屈折方式と光ダクト方式は簡素な構造が特徴で、短い光伝送距離に適している。光ファイバー伝送方式は中距離光伝送に適しており、植物工場等への導入も期待できる。特に、太陽自然光と電気照明人工光のハイブリッド照明の研究が最近進展して注目されている。ビル省エネルギー化を目指すZEB技術の一つとして、太陽光照明の注目度が高まる背景となっている。

一方、現状技術ではいくつかの課題が残されている。窓面プリズム屈折方式と光ダクト方式は、伝送距離と設置場所が限定され、必要なダクト設置体積の大きくなるのが課題となっている。光ファイバー伝送方式に関しては、光ファイバー集光のための太陽追尾採光器の装置サイズとコストの高くなるのが課題である。なるべく簡素な構造で、比較的長い光伝送が可能な太陽光採光器の開発は、太陽光照明の普及に貢献する要素技術である。新たな開発が期待されている状況が研究の背景にある。

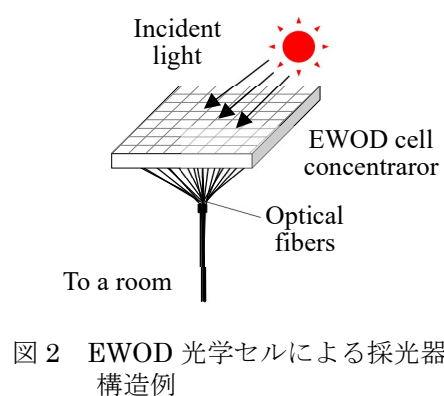
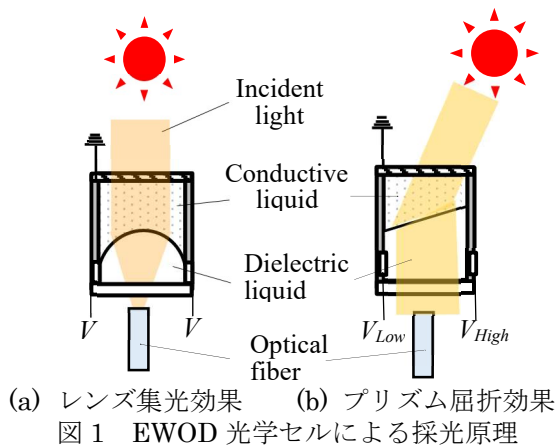
2. 研究の目的

本研究では、EWOD(Electro Wetting-on-Dielectric)現象を利用して液界面形状を変化させ、太陽光を光ファイバーや光ダクトに有効に導入する太陽光採光器の開発を目的としている。ここでEWOD現象は、誘電膜に接触する液体と誘電膜裏面電極間に外部電場を与えることで静電エネルギー変化を生じさせ、液界面形状を変化させる現象である。液界面形状の変化を制御することで、天空を移動する太陽からの入射光を集光し、光伝送用ファイバー開口角内に収めることが可能となる。

本研究の具体的な研究目標は、太陽光採光器に適するEWOD光学セルの基本性能を明らかにすることである。EWOD現象による液界面形状の数値解析と光学系設計手法を連成させる解析手法を導入し、採光器設計パラメータ情報の集積を行うことである。光伝送用ファイバーに導くEWOD現象を利用した屈折・集光方式はこれまで提案がない。新たな方式により、現状の光ダクト方式と機械追尾光ファイバー伝送方式の間に位置する、簡素でコンパクトな太陽光採光器の開発が目標である。

3. 研究の方法

EWOD光学セルによる太陽光採光の原理を図1に示す。EWOD光学セルはEWODで変化させた液界面移動を利用し光軸を制御する装置である。このセルを用いて太陽光を光ファイバーに導く際に、EWODによる自由界面変化を利用して二つの効果を同時に発揮させる必要がある。すなわち、図1(a)のように液界面を湾曲させて凹レンズや凸レンズとして集光する効果、(b)のように液界面を傾けてプリズムとして入射射出角を変化させる効果の2つである。移動する太陽光を下部設置の光ファイバー許容角内に収めるために、これらの両者の効果を複合化して使用可能とするセル開発が本研究の特に注目した点で特徴である。実際に利用する際には、図2のようにEWOD光学セルを複数個並べての利用が想定される。



本研究では、EWOD現象によるセル内液界面形状を求める計算プログラムを作成した。液3相界面形状の計算は、丹下ら⁽¹⁾の計算手法を基に、新たに図3に示す円筒座標系モデルを導入した。界面形状は、次式のヘルムホルツの自由エネルギー F を半径 $r_{i,j}$ 変化させて最小化する計算手順とした。

$$\frac{\partial F}{\partial r_{i,j}} = \sigma_{ow} \frac{\partial A_{ow}}{\partial r_{i,j}} + \sigma_{w1} \frac{\partial A_{w1}}{\partial r_{i,j}} + \sigma_{w2} \frac{\partial A_{w2}}{\partial r_{i,j}} + \sigma_{w3} \frac{\partial A_{w3}}{\partial r_{i,j}} + \sigma_{w4} \frac{\partial A_{w4}}{\partial r_{i,j}} + \frac{\partial U}{\partial r_{i,j}} \quad \dots (1)$$

ここで、 σ_{ow} , A_{ow} は気液または液液界面張力とその面積、 σ_{wi} , A_{wi} は壁液間の界面張力とその面積、 U はセル内液体の位置エネルギーを示す。

また異なる相間の界面張力 σ_{ab} と壁液間の固液界面張力 σ_{wi} は以下の式より求めた。

$$\sigma_{ab} = \sigma_a + \sigma_b - 2\sqrt{\sigma_a\sigma_b} \quad \dots (2) \quad \sigma_{wi} = \left(\sigma_{wi}^0 - \frac{\varepsilon_0\varepsilon}{2d}V_i^2\right) - \sigma_{oi} \quad \dots (3)$$

ここで、 σ_{wi}^0 は印加電圧 $V_i = 0V$ の時の界面張力、 σ_{oi} は電極壁面-上層の液間の界面張力、 ε_0 は真空の誘電率、 ε は誘電膜の比誘電率、 d は誘電膜の厚さである。

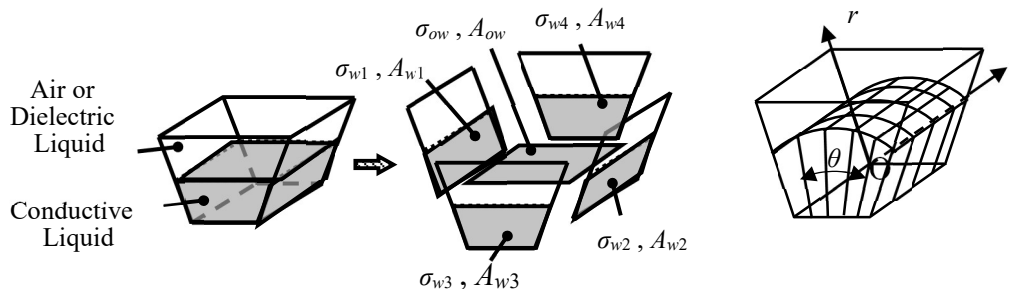


図3 EWOD 四角錐台光学セル内の界面と解析座標系

セルは矩形型と四角錐台型の2種類とし、セルに収める液は、純水、シリコンオイル(KF-96-50cs)、イオン液体(IL16)の3種の組み合わせとした。図4は、矩形型容器内でEW効果により界面が変形している例である。下相が水、上相がオイルの場合で、(a)は電位差のない場合、(b)は左側側面に電位差を与えて界面が傾いて上昇している様子である。

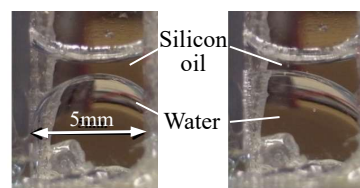


図4 セル内の界面移動の様子

液界面と液内の屈折光線追跡はモンテカルロ法ソフト (Simulator CAD, ベストメディア(株))を使用した。図5は計算例である。計算条件の全般を述べれば、矩形、四角錐台ともに隣接セルの影響を考慮するため2セル並べて解析した。セルへの入射光はセル上面に対し $0\sim 60^\circ$ の間を 10° 刻みで入射し、波長は d 線(589.3 nm)とした。セル上面寸法は $5\times 5\text{mm}$ を基準とし、セル下部に固定する光ファイバー入射面は $1\times 1\text{mm}$ とし、その全角許容受光角は 60° と設定した。容器材厚みによる効果を見捨てるため、セル上面およびセル底面の厚みは $1.0\times 10^{-5}\text{m}$ とセル高さに比べて十分小さく設定した。

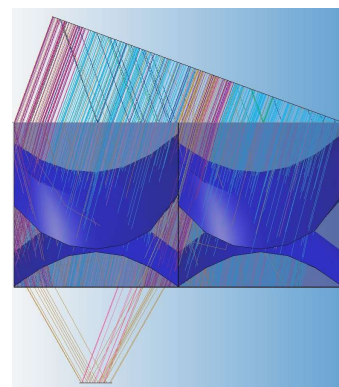


図5 光線追跡の解析例

光ファイバー採光特性を評価するための指標として、到達率とエネルギー集光率を考慮した。到達率 ξ_r [%]は、容器上面に入射する光線数を100として光ファイバー有効入射光の光線数の比として定義した。またエネルギー集光率 ξ_e は、到達率に幾何学的集光比を掛けたものとした。ここで、幾何学的集光比は容器上面積に対する光ファイバー受光面積の比である。また今回の解析のエネルギー集光比には、液相等による光吸収の効果は考慮されていない。

表1 矩形型EWOD光学セルの計算条件

4. 研究成果

(1) 矩形型EWOD光学セルの性能

矩形型セルに関する形状パラメータを表1に示す。15通りのセル形状に関する計算結果により、充填液の組み合わせ、液充填量比の影響、壁面による効果、セル高さとの比、の効果の検討結果を得た。

① 充填液の組み合わせ

図6に示すように、純水だけ(Case1-1)、純水とオイル(Case1-2)、純水、オイル、イオン液体(Case1-3)の3種類を検討した。図7はその計算結果で、横軸はセル上面への入射角 θ 、縦軸は光ファイバーへの光線到達率 ξ_r である。結果より到達率が高いのは3層構造Case1-3で、到達率は入射角 20° 以内で約10%である。一方、Case1-1, 1-2は入射角 20° 以上でも到達率の減少が小さい。

これらの理由は、Case1-3は界面が2つであり、メニスカスレンズ効果がより大きく影響すると考察できる。以降の計算では、入射角 θ は狭い範囲となるが図6(c)の3層構造を計算対象とした。

Case	Volume [%]			Height : Width [mm]	Wall condition
	Water	Oil	IL		
1-1	50	-	-	5 : 5	Reflective
1-2	50	-	-	5 : 5	
1-3	33	34	33	5 : 5	
1-4	33	34	33	5 : 5	
1-5	25	25	50	5 : 5	Thru-beam
1-6	36	36	28	5 : 5	
1-7	48	24	28	5 : 5	
1-8	24	48	28	5 : 5	
1-9	33	34	33	5 : 2.5	
1-10	33	34	33	5 : 3.33	
1-11	33	34	33	5 : 4	
1-12	24	48	24	3 : 1.5	
1-13	24	48	24	5 : 2.5	
1-14	24	48	24	7 : 3.5	
1-15	24	48	24	9 : 4.5	

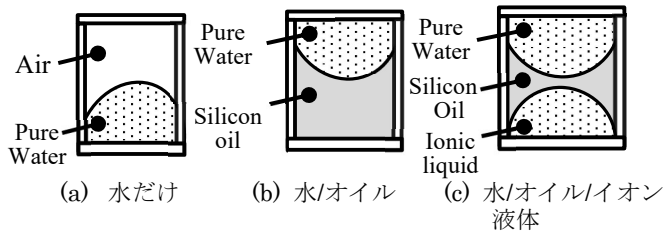


図6 充填液の組み合わせ

② 液充填量比の影響

イオン液体(IL)の比率を変化させた際、28%(Case1-6), 33%(Case1-4), 50%(Case1-5)を図8により比較すると、イオン液体の比率の大きいCase1-5の到達率が低い。イオン液体の比率を28%とした(1-6), (1-7), (1-8)を比較するとシリコンオイルの比率の小さいほうが到達率が低い。これらの結果と光線追跡の様子より、到達率は水/オイル, オイル/イオン液体の2つの界面位置に関係し、特に2界面の距離に影響しているといえる。2界面が近いと液界面が重ならない印加電位の範囲が限られ、焦点距離が長くなり到達率低下の原因となると考察された。これらの結果は容器高さの影響も考慮に入れる必要はあるが、以降の計算ではイオン液体の比率は小さく、オイル比率を比較的大きくして焦点距離を短くする条件を選択することが有利である結果を得た。

③ セル高さと幅の比率の影響

セル底面一片の大きさを2.5mm, 3.3mm, 4mm, 5mmと変化させた際の計算結果を図9と図10に示す。図9の到達率で比較すると、高さ:幅が2:1(5mmと2.5mm)のCase1-9が一番高い性能を示す。これはセル入射面積とファイバー入射面積の比が小さくなった理由といえる。一方、集光エネルギー比で比較すると、Case1-9は最大値ではなく、他のCaseが入射角20°で優っているが、その他の角度ではほぼ同程度の集光エネルギー比を示す結果が得られた。この結果より、セル容器の高さと幅の比2:1が有利な形状であると判断した。

④ セル大きさの影響

EWODセル内で液変形の形状は、容器大きさには比例しない。小さな容器内では液滴半径は小さくなり、大きな容器では逆の効果が予想される。最適な容器サイズの検討結果を図11と図12に示す。この計算では、セル高さと幅の比率は一定値2:1に固定し、セル容器高さと幅を変更した。Case1-12からCase1-15が相当する。予想されるように、容器が小さいと液界面の曲率半径が小さくなり到達率は高くなる。一方、集光エネルギー比は小さな値となる。集光エネルギー比に関しては、Case1-12は低い値を示すが、その他のCase1-13, 14, 15では大きな差は見られないことが結果として得られた。これらの結果より、Case1-12は到達率では優れるが、光ファイバー本数とセル容器数が増すことを考慮すると、9mm:4.5mmのCase1-15が実用的なセルであるといえる。セルサイズに関しては、最終的には実際のセル容器作製方法、設置方法等も検討された上で考察される設計要素である。

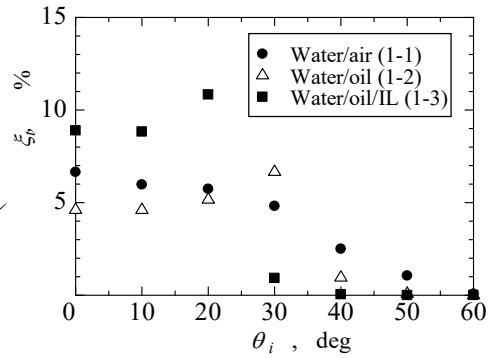


図7 充填液の組み合わせの効果

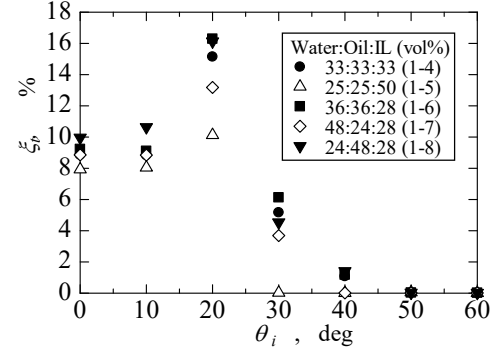


図8 液充填比率の影響

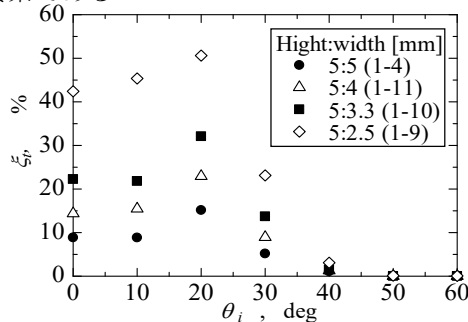


図9 セル高さと幅の比の到達率への影響

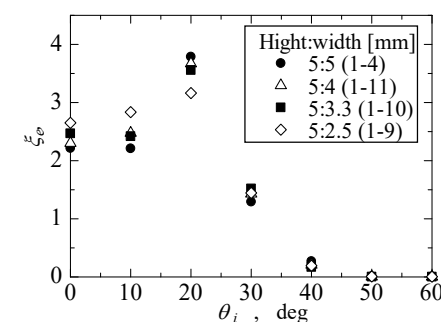


図10 高さ:幅比の集光エネルギー比への影響

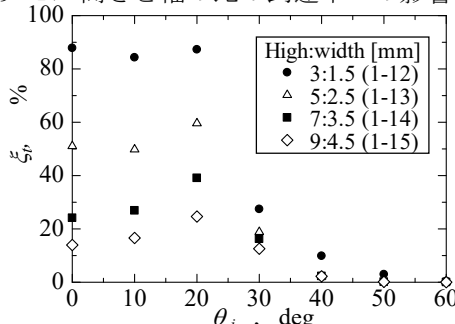


図11 セル大きさの到達率への影響

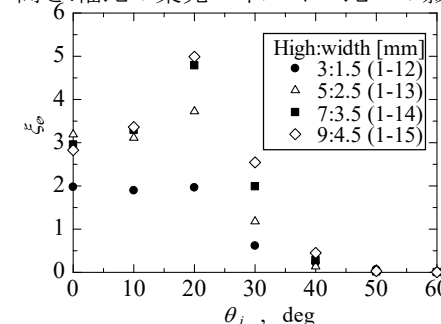


図12 セル大きさの集光エネルギー比への影響

(2) 四角錐台型EWOD光学セルの性能

① 傾斜角とセル大きさの影響
セル傾斜面の角度65°(2-4), 75°(2-1), 85°(2-5)を比較した。このとき射出面の長さは2.3mmで一定とした。図13より角度が85°と大きいCase2-5の場合、入射角が大きくなってても到達率の減少が小さい。これは壁面での反射で光が上方方向に反射せず、射出面への進行割合が増す効果による。

壁面の傾斜角を85°として、セル高さを変化させた際の影響は、Case2-5, 2-6, 2-7, 2-7の比較により理解される。高さが大きい方の到達率が大きく改善されていることが理解できる。セル高さ20mm(Case2-8)の時、入射角度10°程度まで到達率50%が可能である。

② 液充填量比の影響

壁面角85°として四角錐台型セルの場合、EWODレンズ効果に加えて傾斜壁面においても集光が行われる。液界面位置と液充填量比、集光特性の関係は複雑である。図14は液充填量比を変化させた際の影響である。矩形の場合と比較して傾向は掴みにくいが、水の割合が低く、イオン液体の割合が40%と大きい際に高い到達率が得られる傾向にあることを明らかにした。

(3) 選択されるEWOD光学セルの結果とセル設置

矩形容器と四角錐台容器の検討結果より、高いエネルギー集光比に注目すると、矩形でCase1-15, 四角錐台でCase2-13, 2-15が選択される。Case1-15では開口部4.5×4.5mmに対して高さに9mm, Case1-13では5×5mmに対して20mmといずれも高さ寸法が大きい。採光器として厚さ方向寸法が大きくなることは好ましくなく、今後は採光器体積あたりの性能も考察の必要があるといえる。

到達率を優先して選択すると、入射角±20°以内でCase1-12が85%, Case1-9と1-13が50%以上である。入射角±30°以内で、Case1-4, 1-5, 1-12, 1-13が20%以上可能である。逆に述べれば、今回のEWOD光学セルでは、入射角±30°以上で到達率が20%以上のセルは設計できないことが明らかとなった。入射角±30°は60°の入射角まで許容可能を示している。

実際の太陽採光器として設置する場合、季節による太陽の高度差は小さく、例えば東京の夏季と冬季の南中時高度は70°と30°の±20°で許容内である。一方、1日の東西方向の入射角度の変化は大きい。60°の入射許容角は4時間に相当するため、朝から晩までの追尾には対応できない。その際は、午前と午後用に別けた2つの採光器を傾けて設ける方法が適当といえる。セル数とファイバー数は増加するが、太陽光の利用可能時間は増加する。図15は東京の直達日射量を天空方向別として日平均値とした計算結果である。今回の結果より、セル1つで±30°の場合は、全日射量の約5割、東西を分けてセル2つで±60°とした場合は、約7割が使用可能な日射量であり、この日射量に到達率20%をかけた値が光ファイバーに伝送されることになる。

今回得られた計算結果により基本的EWOD光学セルの性能が明らかになった。今後の簡素な太陽光採光器の設計指針となることが期待できる結果である。

<参考文献> (1)丹下学, 山田広大, Electrowetting 現象を用いたメニスカス形状制御と光学素子への応用, 混相流, Vol.28, No.1, (2014) 47-54.

表2 四角錐台型EWOD光学セルの計算条件

Case	Volume [%]			Height [mm]	Surface dimension [mm]		Angle of inclined wall[°]
	Water	Oil	IL		Top	Bottom	
2-1	24	48	28	5.0	5.0×5.0	2.3×5.0	75
2-2	24	48	28	6.5	5.0×5.0	1.5×5.0	75
2-3	24	48	28	7.5	5.0×5.0	1.0×5.0	75
2-4	24	48	28	5.0	7.0×7.0	2.3×7.0	65
2-5	24	48	28	5.0	3.2×3.2	2.3×3.2	85
2-6	24	48	28	8.6	3.0×3.0	1.5×3.0	85
2-7	24	48	28	14.3	4.0×4.0	1.5×4.0	85
2-8	24	48	28	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-9	24	73	3	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-10	24	66	10	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-11	24	56	20	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-12	24	46	30	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-13	24	36	40	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-14	36	24	40	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-15	12	48	40	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85
2-16	48	12	40	20.0	5.0×5.0	1.5×5.0	85

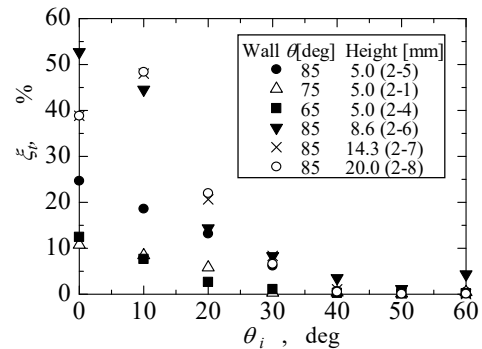


図13 斜面傾斜角とセル大きさの影響

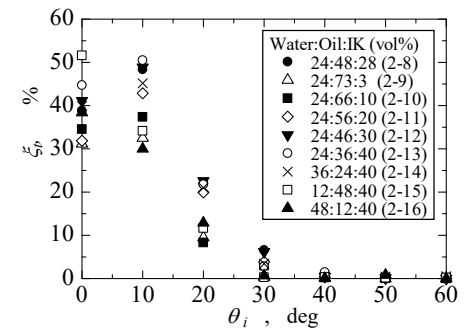


図14 液充填比率の到達率に対する影響

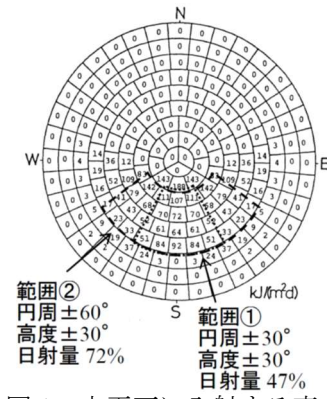


図15 水平面に入射する直達日射の天空分布計算値(東京, 日平均値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yusei Nakagawa, Subaru Furuya, and Kotaro Tanaka
2. 発表標題 Proposal of Sunlight Illumination System using Optical Fiber by Electrowetting Phenomenon
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2018 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中耕太郎、中川祐盛
2. 発表標題 エレクトロウェットング効果を用いた太陽光照明用集光装置の開発
3. 学会等名 日本太陽エネルギー学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----