

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6725154号  
(P6725154)

(45) 発行日 令和2年7月15日(2020.7.15)

(24) 登録日 令和2年6月29日(2020.6.29)

(51) Int.Cl. F I  
**GO 1 N 21/64 (2006.01)** GO 1 N 21/64 Z  
**AO 1 G 7/00 (2006.01)** AO 1 G 7/00 6 0 3

請求項の数 5 (全 15 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2017-536761 (P2017-536761)                  (86) (22) 出願日 平成28年8月15日 (2016.8.15)                  (86) 国際出願番号 PCT/JP2016/073845                  (87) 国際公開番号 W02017/033792                  (87) 国際公開日 平成29年3月2日 (2017.3.2)                  審査請求日 令和1年7月11日 (2019.7.11)                  (31) 優先権主張番号 特願2015-167581 (P2015-167581)                  (32) 優先日 平成27年8月27日 (2015.8.27)                  (33) 優先権主張国・地域又は機関                  日本国 (JP)</p>	<p>(73) 特許権者 504173471                  国立大学法人北海道大学                  北海道札幌市北区北8条西5丁目                  (74) 代理人 100088155                  弁理士 長谷川 芳樹                  (74) 代理人 100124800                  弁理士 諏澤 勇司                  (74) 代理人 100195811                  弁理士 秋元 達也                  (72) 発明者 加藤 知道                  北海道札幌市北区北8条西5丁目 国立大                  学法人北海道大学内                   審査官 伊藤 裕美</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 クロロフィル蛍光測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

太陽光を受光して、太陽光の第1の波長帯域における放射照度である第1の放射照度を取得する第1の測定部と、

太陽光を受光して、太陽光の第2の波長帯域における放射照度である第2の放射照度を取得する第2の測定部と、

太陽光が植物によって反射された反射光と、太陽光を受けた前記植物から放射されたクロロフィル蛍光と、を含んで前記植物から放射される植物からの光を受光して、前記植物からの光の前記第1の波長帯域における放射照度である第3の放射照度を取得する第3の測定部と、

前記植物からの光を受光して、前記植物からの光の前記第2の波長帯域における放射照度である第4の放射照度を取得する第4の測定部と、

前記第1、第2、第3及び第4の測定部からそれぞれ前記第1、第2、第3及び第4の放射照度を取得し、前記第1、第2、第3及び第4の放射照度に基づいて、前記クロロフィル蛍光の放射照度である第5の放射照度を算出する演算部と、を備え、

前記第1の波長帯域は、所定のフラウンホーファー線に対応する波長を含む波長帯域であり、且つ、前記クロロフィル蛍光の波長範囲内に含まれる波長帯域であって、760nmの中心波長を有する幅が10nmの波長帯域であり、

前記第2の波長帯域は、750nmの中心波長を有する幅が10nmの波長帯域である、

クロロフィル蛍光測定装置。

【請求項 2】

前記演算部は、前記第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度を演算式に代入して前記第 5 の放射照度を算出する、

請求項 1 記載のクロロフィル蛍光測定装置。

【請求項 3】

前記演算部は、前記第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度を下記式 (1) ;

【数 1】

$$F_s = \frac{L_1 - \frac{E_1 \cdot L_2}{E_2}}{1 - \frac{E_1}{E_2}} \dots (1)$$

10

(但し、 $E_1$  は前記第 1 の放射照度、 $E_2$  は前記第 2 の放射照度、 $L_1$  は前記第 3 の放射照度、 $L_2$  は前記第 4 の放射照度、 $F_s$  は前記第 5 の放射照度を表す。)

に代入して前記第 5 の放射照度を算出する、

請求項 2 記載のクロロフィル蛍光測定装置。

【請求項 4】

太陽光を受光して、太陽光の第 1 の波長帯域における放射照度である第 1 の放射照度を取得する第 1 の測定部と、

20

太陽光を受光して、太陽光の第 2 の波長帯域における放射照度である第 2 の放射照度を取得する第 2 の測定部と、

太陽光が植物によって反射された反射光と、太陽光を受けた前記植物から放射されたクロロフィル蛍光と、を含んで前記植物から放射される植物からの光を受光して、前記植物からの光の前記第 1 の波長帯域における放射照度である第 3 の放射照度を取得する第 3 の測定部と、

前記植物からの光を受光して、前記植物からの光の前記第 2 の波長帯域における放射照度である第 4 の放射照度を取得する第 4 の測定部と、

前記第 1、第 2、第 3 及び第 4 の測定部からそれぞれ前記第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度を取得し、前記第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度に基づいて、前記クロロフィル蛍光の放射照度である第 5 の放射照度を算出する演算部と、を備え、

30

前記第 2 の測定部は、太陽光の互いに異なる 2 つの前記第 2 の波長帯域における 2 つの前記第 2 の放射照度を取得し、

前記第 4 の測定部は、前記植物からの光の互いに異なる 2 つの前記第 2 の波長帯域における 2 つの前記第 4 の放射照度を取得し、

前記演算部は、

2 つの前記第 2 の放射照度に基づいて、太陽光の前記第 1 の波長帯域における吸収前の放射照度である第 6 の放射照度を推定し、

2 つの前記第 4 の放射照度に基づいて、前記植物からの光の前記第 1 の波長帯域における吸収前の放射照度である第 7 の放射照度を推定し、

40

前記第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度の放射照度を用いて前記第 5 の放射照度を算出し、

前記第 1 の波長帯域は、所定のフラウンホーファー線に対応する波長を含む波長帯域であり、且つ、前記クロロフィル蛍光の波長範囲内に含まれる波長帯域であって、760 nm の中心波長を有する幅が 10 nm の波長帯域であり、

2 つの前記第 2 の波長帯域のうち的一方は、750 nm の中心波長を有する幅が 10 nm の波長帯域であり、2 つの前記第 2 の波長帯域のうち他方は、780 nm の中心波長を有する幅が 10 nm の波長帯域である、

クロロフィル蛍光測定装置。

50

## 【請求項 5】

前記演算部は、前記第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度を下記式 (2) ;

## 【数 2】

$$F_s = \frac{L_1 - \frac{E_1}{E_3} \cdot L_3}{1 - \frac{E_1}{E_3}} \dots (2)$$

(但し、 $E_1$  は前記第 1 の放射照度、 $L_1$  は前記第 3 の放射照度、 $E_3$  は前記第 6 の放射照度、 $L_3$  は前記第 7 の放射照度、 $F_s$  は前記第 5 の放射照度を表す。) 10

に代入して前記第 5 の放射照度を算出する、  
請求項 4 記載のクロロフィル蛍光測定装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、クロロフィル蛍光測定装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、植物のクロロフィル(葉緑素)における光合成量を推定する方法として、植物から放射されるクロロフィル蛍光を用いることが知られている。一般に、植物は、太陽光のエネルギーの内の 20 ~ 80 % 程度しか光合成に利用できない。植物は、その光合成に利用できなかった太陽光のエネルギーの一部をクロロフィル蛍光(SIF: Sun-Induced Fluorescence)として放射する。クロロフィル蛍光は、植物の光合成量に関する情報を含んでおり、光合成量を推定する方法に用いられる。例えば、特許文献 1 には、クロロフィル蛍光の強度から推定される植物の光合成量に基づいて、植物の健康状態を診断する方法が記載されている。 20

## 【0003】

クロロフィル蛍光を用いて光合成量を推定する方法は、個葉や小規模な植物群に限らず、生態系レベルの大規模な植物群にも適用される。このため、上記方法によって、例えば生態系の光合成量を観測することで温室効果ガスである  $CO_2$  の吸収量を正確に把握し、気候変動の予測精度を向上させることが期待されている。 30

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0004】

【特許文献 1】国際公開第 2012 / 063455 号

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

しかしながら、従来の方法では、クロロフィル蛍光を含む光の放射照度が広い波長範囲に亘って測定され、その広い波長範囲の一部よりクロロフィル蛍光の放射照度が取得される。このため、高機能な分光放射計が必要となり、例えば野外の森林等において分光放射計を多数用いた多点同時観測を行うためには、測定装置の構成が複雑化する場合がある。 40

## 【0006】

また、従来の方法では、背景に強い太陽光がある場合に、微弱なクロロフィル蛍光のみを検出することが非常に困難である。

## 【0007】

本発明の一形態は、上記課題に鑑みて為されたものであり、装置構成を簡素化することができ、且つ、太陽光の影響下であっても使用することができるクロロフィル蛍光測定装置を提供することを目的とする。 50

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

上記課題を解決するため、本発明の一形態のクロロフィル蛍光測定装置は、太陽光を受光して、太陽光の第1の波長帯域における放射照度である第1の放射照度を取得する第1の測定部と、太陽光を受光して、太陽光の第2の波長帯域における放射照度である第2の放射照度を取得する第2の測定部と、太陽光が植物によって反射された反射光と、太陽光を受けた植物から放射されたクロロフィル蛍光と、を含んで植物から放射される植物からの光を受光して、植物からの光の第1の波長帯域における放射照度である第3の放射照度を取得する第3の測定部と、植物からの光を受光して、植物からの光の第2の波長帯域における放射照度である第4の放射照度を取得する第4の測定部と、第1、第2、第3及び第4の測定部からそれぞれ第1、第2、第3及び第4の放射照度を取得し、第1、第2、第3及び第4の放射照度に基づいて、クロロフィル蛍光の放射照度である第5の放射照度を算出する演算部と、を備え、第1の波長帯域は、所定のフラウンホーファー線に対応する波長を含む波長帯域であり、且つ、クロロフィル蛍光の波長範囲内に含まれる波長帯域であり、第2の波長帯域は、第1の波長帯域から所定の波長範囲内に含まれる波長帯域である。

10

## 【0009】

このようなクロロフィル蛍光測定装置によれば、太陽光について、所定のフラウンホーファー線に対応した第1の波長帯域における吸収ピークでの第1の放射照度が、第1の測定部によって測定される。また、太陽光について、所定のフラウンホーファー線に対応していない第2の波長帯域における第2の放射照度が、第2の測定部によって測定される。また、植物からの光について、所定のフラウンホーファー線に対応した第1の波長帯域における吸収ピークでの第3の放射照度が、第3の測定部によって測定される。また、植物からの光について、所定のフラウンホーファー線に対応していない第2の波長帯域における第4の放射照度が、第4の測定部によって測定される。第2の波長帯域は、第1の波長帯域から所定の波長範囲内に含まれる波長帯域である。従って、第2の波長帯域では、第1の波長帯域に比較して、植物における反射率、透過率及び吸収率が略同一である。このため、演算部は、測定された第1、第2、第3及び第4の放射照度に基づいて、クロロフィル蛍光の放射照度である第5の放射照度を算出できる。よって、装置構成を簡素化することができ、且つ、太陽光の影響下であっても使用することができる。

20

30

## 【発明の効果】

## 【0010】

本発明の一形態によれば、装置構成を簡素化することができ、且つ、太陽光の影響下であっても使用することができるクロロフィル蛍光測定装置を提供することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0011】

【図1】図1は、本発明の実施形態に係るクロロフィル蛍光測定装置を示す概略構成図である。

【図2】図2は、太陽光及び植物からの光の放射照度を示すグラフである。

【図3】図3は、図2の要部を拡大して模式的に示すグラフである。

40

【図4】図4は、図1のクロロフィル蛍光測定装置の動作を示す図である。

【図5】図5は、実施例に係るクロロフィル蛍光測定装置によって測定されたクロロフィル蛍光の放射照度の一例を示すグラフである。

【図6】図6は、微気象学的手法によって測定された生態系光合成速度の一例を示すグラフである。

【図7】図7は、図5に係るクロロフィル蛍光の放射照度と図6に係る生態系光合成速度との相関を示すグラフである。

【図8】図8は、変形例に係るクロロフィル蛍光測定装置における放射照度の算出方法を説明するための図である。

## 【発明を実施するための形態】

50

## 【0012】

以下、図面を参照しつつ本発明に係る観察システムの好適な実施形態について詳細に説明する。

## 【0013】

図1は、本発明の実施形態に係るクロロフィル蛍光測定装置を示す概略構成図である。図1に示すように、クロロフィル蛍光測定装置1は、太陽Sからの太陽光H1を受光した植物Pが放射するクロロフィル蛍光の放射照度を測定する装置である。クロロフィル蛍光測定装置1は、地表から上方へ立設されたタワー2と、タワー2の上部から側方へ延びるアーム3と、アーム3の先端側に設けられた第1、第2、第3及び第4の測定部4, 5, 6, 7と、第1、第2、第3及び第4の測定部4, 5, 6, 7に対して電氣的に接続された演算部8と、を備える。クロロフィル蛍光測定装置1の測定対象となる植物Pとして、本実施形態では、森林が例示されている。なお、植物Pは、クロロフィルを有し太陽光H1によって光合成を行うものであれば特に限定されず、例えば個葉や小規模な植物群であってもよく、生態系レベルの大規模な植物群であってもよい。

10

## 【0014】

タワー2は、第1、第2、第3及び第4の測定部4, 5, 6, 7を植物Pよりも鉛直方向に関して高い位置に配置するためのものである。タワー2は、特定の材料や構造に限定されるものではなく、例えば金属製、木製等の骨組みによって構成されていてもよい。

## 【0015】

アーム3は、第1、第2、第3及び第4の測定部4, 5, 6, 7を、植物Pの上方に配置するためのものである。アーム3は、先端側が植物Pの上方に位置するようにタワー2から延びている。

20

## 【0016】

第1の測定部4は、太陽光H1を受光して、太陽光H1の第1の波長帯域B1における放射照度である第1の放射照度 $E_1$ を取得する。第1の測定部4は、第1の波長帯域B1における放射照度のみを測定可能な放射照度計である。一例として、第1の測定部4は、バンドパスフィルタ、フォトダイオード等の光検出素子、及び、オペアンプ等を含む回路を備える構成である。このような第1の測定部4は、バンドパスフィルタを介してフォトダイオードに入射した太陽光H1を電気信号に変換し、当該電気信号をオペアンプ等で構成された回路に入力することによって、第1の波長帯域B1における放射照度のみを測定可能な構成を有している。

30

## 【0017】

第1の測定部4は、植物Pの上方に配置されている。また、第1の測定部4は、その受光面がアーム3の先端側において鉛直方向上向きに配置され、水平方向の光よりも上方からの光に対する感度が大きい。つまり、第1の測定部4は、上方からの太陽光H1を受光する一方で、下方からの植物Pから放射される光(植物Pからの光H2)を受光しない。植物Pからの光H2とは、太陽光H1が植物Pによって反射された反射光H2aと、太陽光H1を受けた植物Pから放射されたクロロフィル蛍光H2bと、を含んで植物Pから放射される光である。

## 【0018】

図2は、太陽光及び植物からの光の放射照度を示すグラフ、図3は、図2の要部を拡大して模式的に示すグラフである。図2及び図3において、破線は、太陽光H1の放射照度のスペクトルを示し、実線は、植物Pからの光H2の放射照度のスペクトルを示す。図1~図3に示すように、植物Pからの光H2の放射照度のスペクトルは、太陽光H1が植物Pによって反射された反射光の放射照度のスペクトルと、太陽光H1を受けた植物Pから放射されたクロロフィル蛍光の放射照度のスペクトルと、を含む。太陽光H1及び植物Pからの光H2の放射照度のスペクトルは、フラウンホーファー線に対応する波長において吸収ピークを有しており、例えばフラウンホーファー線の内のO<sub>2</sub>-A線に対応する波長である760nmに吸収ピークを有している。

40

## 【0019】

50

第1の波長帯域B1は、フラウンホーファー線の内のO<sub>2</sub>-A線に対応する波長を含む波長帯域であり、より具体的には760nm波長帯域である。また、第1の波長帯域B1は、クロロフィル蛍光の波長範囲(すなわち、650nm~900nm程度の波長)内に含まれる波長帯域である。なお、図3中に示す第1の波長帯域B1は、実際には、760nmを中心波長として、例えば10nmの波長の幅を有している。

【0020】

第2の測定部5は、太陽光H1を受光して、太陽光H1の第2の波長帯域B2における放射照度である第2の放射照度E<sub>2</sub>を取得する。第2の測定部5は、第2の波長帯域B2における放射照度のみを測定可能な放射照度計である。一例として、第2の測定部5は、第1の測定部4と同様な構成を採用することによって、第2の波長帯域B2における放射照度のみを測定可能とされる。

10

【0021】

第2の測定部5は、植物Pの上方に配置されている。また、第2の測定部5は、その受光面がアーム3の先端側において鉛直方向上向きに配置され、水平方向の光よりも上方からの光に対する感度が大きい。つまり、第2の測定部5は、上方からの太陽光H1を受光する一方で、下方からの植物Pからの光H2を受光しない。

【0022】

第2の波長帯域B2は、第1の波長帯域B1から所定の波長範囲内に含まれる波長帯域である。具体的に、クロロフィル蛍光測定装置1においては、第1の波長帯域B1が760nm波長帯域であることから、第2の波長帯域B2は、例えばその波長帯域から10nm離れた750nm波長帯域とされる。なお、図3中に示す第2の波長帯域B2は、実際には、750nmを中心波長として、例えば10nmの波長の幅を有している。

20

【0023】

第3の測定部6は、植物Pからの光H2を受光して、植物Pからの光H2の第1の波長帯域B1における放射照度である第3の放射照度L<sub>1</sub>を取得する。第3の測定部6は、第1の波長帯域B1における放射照度のみを測定可能な放射照度計である。一例として、第3の測定部6は、第1の測定部4と同様な構成を採用することによって、第1の波長帯域B1における放射照度のみを測定可能とされる。

【0024】

第3の測定部6は、植物Pの上方に配置されている。また、第3の測定部6は、その受光面がアーム3の先端側において鉛直方向下向きに配置され、水平方向の光よりも下方からの光に対する感度が大きい。つまり、第3の測定部6は、下方からの植物Pからの光H2を受光する一方で、上方からの太陽光H1を受光しない。

30

【0025】

第4の測定部7は、植物Pからの光H2を受光して、植物Pからの光H2の第2の波長帯域B2における放射照度である第4の放射照度L<sub>2</sub>を取得する。第4の測定部7は、第2の波長帯域B2における放射照度のみを測定可能な放射照度計である。一例として、第4の測定部7は、第1の測定部4と同様な構成を採用することによって、第2の波長帯域B2における放射照度のみを測定可能とされる。

【0026】

第4の測定部7は、植物Pの上方に配置されている。また、第4の測定部7は、その受光面がアーム3の先端側において鉛直方向下向きに配置され、水平方向の光よりも下方からの光に対する感度が大きい。つまり、第4の測定部7は、下方からの植物Pからの光H2を受光する一方で、上方からの太陽光H1を受光しない。

40

【0027】

演算部8は、クロロフィル蛍光の放射照度である第5の放射照度F<sub>5</sub>を算出するためのものである。演算部8は、物理的には、CPU及びメモリを内蔵したパーソナルコンピュータ、マイクロプロセッサ等を含む演算装置等で実現される。演算部8は、タワー2の上部に配置され、第1、第2、第3及び第4の測定部4、5、6、7とケーブルで接続されている。なお、演算部8は、タワー2の上部に配置されていなくてもよく、例えば、タワ

50

ー 2 の下部に配置され、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の測定部 4, 5, 6, 7 からタワー 2 の下部まで延びるケーブルによって第 1、第 2、第 3 及び第 4 の測定部 4, 5, 6, 7 と接続されていてもよい。

【 0 0 2 8 】

演算部 8 は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の測定部 4, 5, 6, 7 からそれぞれ第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度  $E_1, E_2, L_1, L_2$  を取得し、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度  $E_1, E_2, L_1, L_2$  に基づいて、クロロフィル蛍光の放射照度である第 5 の放射照度  $F_s$  を算出する。演算部 8 は、第 1 及び第 2 の波長帯域 B 1, B 2 における太陽光 H 1 の放射照度である第 1 及び第 2 の放射照度  $E_1, E_2$  の比を用いて、第 5 の放射照度  $F_s$  を算出する (比演算)。演算部 8 は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度  $E_1, E_2, L_1, L_2$  を演算式に代入して、第 5 の放射照度  $F_s$  を算出する。具体的に、演算部 8 は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度  $E_1, E_2, L_1, L_2$  を下記式 (1) ;

【 数 1 】

$$F_s = \frac{L_1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot L_2}{1 - \frac{E_1}{E_2}} \dots (1)$$

に代入して第 5 の放射照度を算出する。

【 0 0 2 9 】

続いて、クロロフィル蛍光測定装置 1 の動作について説明すると共に、クロロフィル蛍光測定装置 1 を用いたクロロフィル蛍光の測定方法について詳述する。

【 0 0 3 0 】

図 2 及び図 3 に示すように、太陽光 H 1 の放射照度は、フラウンホーファー線に対応する波長で吸収されている。これにより、太陽光 H 1 の放射照度のスペクトルには、フラウンホーファー線に対応する波長に吸収ピークが存在している。第 1 の波長帯域 B 1 は、フラウンホーファー線に対応する波長を含む波長帯域であることから、第 1 の放射照度  $E_1$  は吸収ピーク上の放射照度となる。

【 0 0 3 1 】

これに対し、第 2 の波長帯域 B 2 は、フラウンホーファー線に対応する波長を含む波長帯域から所定の波長範囲内に含まれる波長帯域であり、特に、フラウンホーファー線に対応する波長とは異なる波長 (本実施形態においては、フラウンホーファー線に対応する波長よりも 10 nm 短い波長) を含む波長帯域である。このため、第 2 の放射照度  $E_2$  は、吸収ピーク上の放射照度ではない。

【 0 0 3 2 】

植物 P からの光 H 2 は、太陽光 H 1 が植物 P によって反射された反射光 H 2 a を含んでいる。この反射光 H 2 a では、太陽光 H 1 と同様に、第 1 の波長帯域 B 1 における放射照度は放射照度のスペクトルの吸収ピーク上の放射照度であり、第 2 の波長帯域 B 2 における放射照度は放射照度のスペクトルの吸収ピーク上の放射照度ではない。また、植物 P からの光 H 2 は、太陽光 H 1 を受けた植物 P から放射されたクロロフィル蛍光を含んでいる。このクロロフィル蛍光は、第 1 及び第 2 の波長帯域 B 1, B 2 において、波長に関わらず略一定の値である。以上により、植物 P からの光 H 2 全体としても、太陽光 H 1 と同様に、第 1 の波長帯域 B 1 における第 3 の放射照度  $L_1$  は吸収ピーク上の放射照度となり、第 2 の波長帯域 B 2 における第 4 の放射照度  $L_2$  は吸収ピーク上の放射照度とはならない。

【 0 0 3 3 】

図 4 は、図 1 のクロロフィル蛍光測定装置の動作を示す図である。図 1 ~ 図 4 に示すように、まず、第 1 及び第 2 の測定部 4, 5 が太陽光 H 1 を受光して、それぞれ第 1 及び第

10

20

30

40

50

2の波長帯域B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>における第1及び第2の放射照度E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>を取得すると共に、第3及び第4の測定部6、7が植物Pからの光H<sub>2</sub>を受光して、それぞれ第1及び第2の波長帯域B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>における第3及び第4の放射照度L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>を取得する(ステップS11)。

【0034】

続いて、演算部8は、ケーブルを介して、第1、第2、第3及び第4の測定部4、5、6、7からそれぞれ第1、第2、第3及び第4の放射照度E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>を取得し、式(1)に基づいて演算を行うことにより、第5の放射照度F<sub>5</sub>を算出する(ステップS12)。

【0035】

続いて、演算部8は、算出した第5の放射照度F<sub>5</sub>を、例えば演算部8に接続されたディスプレイに出力する。なお、演算部8は、算出した第5の放射照度F<sub>5</sub>を、他のコンピュータ等に電子データとして出力してもよく、演算部8に接続されたプリンタ等を用いて紙媒体に印刷して出力してもよい(ステップS13)。

【0036】

本実施形態に係るクロロフィル蛍光測定装置1では、太陽光H<sub>1</sub>について、所定のフラウンホーファー線に対応した第1の波長帯域B<sub>1</sub>における吸収ピークでの第1の放射照度E<sub>1</sub>が、第1の測定部4によって測定される。また、太陽光H<sub>1</sub>について、所定のフラウンホーファー線に対応していない第2の波長帯域B<sub>2</sub>における第2の放射照度E<sub>2</sub>が、第2の測定部5によって測定される。また、植物Pからの光H<sub>2</sub>について、所定のフラウンホーファー線に対応した第1の波長帯域B<sub>1</sub>における吸収ピークでの第3の放射照度L<sub>1</sub>が、第3の測定部6によって測定される。また、植物Pからの光H<sub>2</sub>について、所定のフラウンホーファー線に対応していない第2の波長帯域B<sub>2</sub>における第4の放射照度L<sub>2</sub>が、第4の測定部7によって測定される。第2の波長帯域B<sub>2</sub>は、第1の波長帯域B<sub>1</sub>から所定の波長範囲内に含まれる波長帯域である。従って、第2の波長帯域B<sub>2</sub>では、第1の波長帯域B<sub>1</sub>に比較して、植物Pにおける反射率、透過率及び吸収率が略同一である。このため、演算部8は、測定された第1、第2、第3及び第4の放射照度E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>に基づいて、クロロフィル蛍光の放射照度である第5の放射照度F<sub>5</sub>を算出できる。よって、装置構成を簡素化することができ、且つ、太陽光の影響下であっても使用することができる。

【0037】

また、演算部8は、第1、第2、第3及び第4の放射照度E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>を演算式に代入して第5の放射照度F<sub>5</sub>を算出する。これにより、演算部8は、第1、第2、第3及び第4の放射照度E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>を用いて容易に第5の放射照度F<sub>5</sub>を算出することができる。このため、演算部8における演算量を削減することができる。

【0038】

また、演算部8は、第1、第2、第3及び第4の放射照度E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>を上記式(1)に代入して第5の放射照度F<sub>5</sub>を算出する。これにより、演算部8は、クロロフィル蛍光測定装置1による上記作用効果を好適に奏することができる。

【0039】

また、第1の波長帯域B<sub>1</sub>は、フラウンホーファー線の内のO<sub>2</sub>-A線に対応する波長を含む波長帯域である。O<sub>2</sub>-A線に対応する波長ではO<sub>2</sub>-A線以外の線に対応する波長に比較して、太陽光H<sub>1</sub>及び植物Pからの光H<sub>2</sub>の放射照度のスペクトルにおける吸収ピークの幅が狭い。従って、第1及び第3の放射照度E<sub>1</sub>、L<sub>1</sub>のスペクトルにおける吸収ピークの裾に第2の波長帯域B<sub>2</sub>が重なり難い。よって、第5の放射照度F<sub>5</sub>を精度良く取得することができる。

【0040】

また、第1の波長帯域B<sub>1</sub>は、760nm波長帯域であり、第2の波長帯域B<sub>2</sub>は、750nm波長帯域である。760nm波長帯域はフラウンホーファー線の内のO<sub>2</sub>-A線に対応する波長を含む波長帯域であり、O<sub>2</sub>-A線に対応する波長ではO<sub>2</sub>-A線以外の線に対

10

20

30

40

50



応する波長に比較して、太陽光 H 1 及び植物 P からの光 H 2 の放射照度のスペクトルにおける吸収ピークの幅が狭い。従って、第 1 及び第 3 の放射照度  $E_1$ 、 $L_1$  のスペクトルにおける吸収ピークの裾に第 2 の波長帯域 B 2 が重なり難い。また、第 2 の波長帯域 B 2 は、第 1 の波長帯域 B 1 から 10 nm の波長範囲内に含まれる比較的近い波長帯域であるため、第 1 の波長帯域 B 1 に比較して、植物 P における反射率、透過率及び吸収率が略同一である。以上により、第 5 の放射照度  $F_5$  を精度良く取得することができる。

#### 【0041】

以下、本実施形態のクロロフィル蛍光測定装置の実施例を示す。本実施例において、クロロフィル蛍光測定装置は、第 1 の波長帯域 B 1 をフラウンホーファー線の内の  $O_2-A$  線に対応する 760 nm を中心とした波長帯域としており、第 2 の波長帯域 B 2 を 750 nm を中心とした波長帯域としている。また、クロロフィル蛍光測定装置は、測定対象である植物 P を、水田の稲としている。

10

#### 【0042】

図 5 は、実施例に係るクロロフィル蛍光測定装置によって測定されたクロロフィル蛍光の放射照度の一例を示すグラフである。図 5 の横軸は時刻（日本標準時）を表し、縦軸は水田の稲が放射するクロロフィル蛍光の放射照度を表している。図 5 には、6 月から 9 月までの各月において、毎日 30 分置きの同時刻にクロロフィル蛍光測定装置によって測定されたクロロフィル蛍光の放射照度を、時刻毎に平均した結果が示されている。クロロフィル蛍光の放射照度は、各月において放物線を描くように南中時刻をピーク位置として上昇・下降している。

20

#### 【0043】

図 6 は、微気象学的手法によって測定された生態系光合成速度の一例を示すグラフである。ここでは、本実施例に係るクロロフィル蛍光測定装置によって測定されたクロロフィル蛍光の放射照度との比較対象として、生態系光合成速度を測定している。図 6 の横軸は時刻（日本標準時）を表し、縦軸は水田の稲における生態系光合成速度を表している。図 6 には、図 5 と同時に、同じ水田において測定された生態系光合成速度が示されている。すなわち、図 6 には、6 月から 9 月までの各月において、毎日 30 分置きの同時刻に測定された生態系光合成速度を、時刻毎に平均した結果が示されている。生態系光合成速度は、各月において放物線を描くように南中時刻をピーク位置として上昇・下降している。

30

#### 【0044】

図 7 は、図 5 に係るクロロフィル蛍光の放射照度と図 6 に係る生態系光合成速度との相関を示すグラフである。図 7 の横軸は、図 5 に係るクロロフィル蛍光の放射照度を表し、縦軸は、図 6 に係る生態系光合成速度を表している。図 7 において、クロロフィル蛍光の放射照度と生態系光合成速度とが互いに強い正の相関を持つことが示されている。従って、クロロフィル蛍光測定装置が微気象学的手法によって測定された生態系光合成速度を高精度に再現可能であることが確認された。このことから、クロロフィル蛍光測定装置が、生態系光合成速度を代表する指標として非常に有用であるといえる。

#### 【0045】

以上、本発明の一実施形態について説明したが、本発明は、上記一実施形態に限定されるものではない。例えば、第 1 の波長帯域 B 1 は、フラウンホーファー線の内の  $O_2-A$  線に対応する波長に代えて、フラウンホーファー線の内の  $O_2-A$  線以外の線に対応する波長を含む波長帯域としてもよい。例えば、第 1 の波長帯域 B 1 は、フラウンホーファー線の内の  $O_2-B$  線に対応する波長を含む波長帯域であってもよく、この場合、第 1 の波長帯域 B 1 は、680 nm 波長帯域であってもよい。

40

#### 【0046】

また、演算部 8 は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の測定部 4、5、6、7 からそれぞれ第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  を取得して記憶するデータロガーと、当該データロガーから第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  を取得して、クロロフィル蛍光の第 1 の波長帯域 B 1 における第 5 の放射照度  $F_5$  を算出する計算機とに分かれていてもよい。

50

## 【 0 0 4 7 】

また、図 8 は、変形例に係るクロロフィル蛍光測定装置における放射照度の算出方法を説明するための図であり、図 8 に示すように、クロロフィル蛍光測定装置 1 は、例えば以下のような構成であってもよい。すなわち、クロロフィル蛍光測定装置 1 において、第 2 の測定部 5 は、太陽光 H 1 の互いに異なる 2 つの第 2 の波長帯域 B 2 a ( B 2 ) , B 2 b ( B 2 ) における 2 つの第 2 の放射照度 E 2 a ( E 2 ) , E 2 b ( E 2 ) を取得する。そして、演算部 8 は、2 つの第 2 の放射照度 E 2 a , E 2 b に基づいて、太陽光 H 1 の第 1 の波長帯域 B 1 における吸収前の放射照度である第 6 の放射照度 E 3 を推定する。例えば、演算部 8 は、2 つの第 2 の放射照度 E 2 a , E 2 b を線形内挿することによって、第 6 の放射照度 E 3 を推定する。具体的に、第 6 の放射照度 E 3 は、図 8 中において、太陽光 H 1 の放射照度のスペクトルと、第 2 の波長帯域 B 2 a , B 2 b を示す各線と、の交差する 2 点を直線で結んだ場合において、この直線と、第 1 の波長帯域 B 1 を示す線と、の交差する点における放射照度とされる。同様に、第 4 の測定部 7 は、植物 P からの光 H 2 の互いに異なる 2 つの第 2 の波長帯域 B 2 a , B 2 b における 2 つの第 4 の放射照度 L 2 a ( L 2 ) , L 2 b ( L 2 ) を取得する。そして、演算部 8 は、2 つの第 4 の放射照度 L 2 a , L 2 b に基づいて、植物 P からの光 H 2 の第 1 の波長帯域 B 1 における吸収前の放射照度である第 7 の放射照度 L 3 を推定する。例えば、演算部 8 は、2 つの第 4 の放射照度 L 2 a , L 2 b を線形内挿することによって、第 7 の放射照度 L 3 を推定する。具体的に、第 7 の放射照度 L 3 は、図 8 中において、植物 P からの光 H 2 の放射照度のスペクトルと、第 2 の波長帯域 B 2 a , B 2 b を示す各線と、の交差する 2 点を直線で結んだ場合において、この直線と、第 1 の波長帯域 B 1 を示す線と、の交差する点における放射照度とされる。そして、演算部 8 は、第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度 E 1 , L 1 , E 3 , L 3 を用いて第 5 の放射照度 F 5 を算出してもよい。

10

20

## 【 0 0 4 8 】

ここで、例えば、第 1 の波長帯域 B 1 としては、7 6 0 n m が設定され、互いに異なる 2 つの第 2 の波長帯域 B 2 a , B 2 b としては、それぞれ 7 5 0 n m 及び 7 8 0 n m が設定される。この場合、第 1 及び第 3 の放射照度 E 1 , L 1 のスペクトルにおける吸収ピークの裾に第 2 の波長帯域 B 2 a , B 2 b が重なり難い。このため、第 5 の放射照度 F 5 を一層精度良く取得することができる。

## 【 0 0 4 9 】

また、演算部 8 は、第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度 E 1 , L 1 , E 3 , L 3 を下記式 ( 2 ) ;

30

## 【 数 2 】

$$F_s = \frac{L_1 - \frac{E_1}{E_3} \cdot L_3}{1 - \frac{E_1}{E_3}} \dots (2)$$

に代入して第 5 の放射照度 F 5 を算出する。

40

## 【 0 0 5 0 】

この場合、第 7 の放射照度 L 3 が取得される波長帯域は、第 1 の放射照度 E 1 が取得される波長帯域である第 1 の波長帯域 B 1 と同一である。このため、第 1 の波長帯域 B 1 に比較して、植物 P における反射率、透過率及び吸収率が同一となる。よって、演算部 8 は、第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度 E 1 , L 1 , E 3 , L 3 に基づいて、第 5 の放射照度 F 5 を精度良く算出できる。

## 【 0 0 5 1 】

ここで、演算部は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度を演算式に代入して第 5 の放射照度を算出してもよい。この場合、演算部は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度を用いて容易に第 5 の放射照度を算出することができる。このため、演算部における演算量

50

を削減することができる。

【 0 0 5 2 】

また、演算部は、第 1、第 2、第 3 及び第 4 の放射照度を下記式 ( 1 ) ；

【 数 3 】

$$F_s = \frac{L_1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot L_2}{1 - \frac{E_1}{E_2}} \dots (1)$$

( 但し、 $E_1$  は第 1 の放射照度、 $E_2$  は第 2 の放射照度、 $L_1$  は第 3 の放射照度、 $L_2$  は第 4 の放射照度、 $F_s$  は第 5 の放射照度を表す。 )

に代入して第 5 の放射照度を算出してもよい。この場合、演算部は、上記作用効果を好適に奏することができる。

【 0 0 5 3 】

また、第 2 の測定部は、太陽光の互いに異なる 2 つの第 2 の波長帯域における 2 つの第 2 の放射照度を取得し、第 4 の測定部は、植物からの光の互いに異なる 2 つの第 2 の波長帯域における 2 つの第 4 の放射照度を取得し、演算部は、2 つの第 2 の放射照度に基づいて、太陽光の第 1 の波長帯域における吸収前の放射照度である第 6 の放射照度を推定し、2 つの第 4 の放射照度に基づいて、植物からの光の第 1 の波長帯域における吸収前の放射照度である第 7 の放射照度を推定し、第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度の放射照度を用いて第 5 の放射照度を算出してもよい。この場合、第 6 の放射照度が取得される波長帯域は、第 1 の放射照度が取得される波長帯域である第 1 の波長帯域と同一であるため、第 1 の波長帯域に比較して、植物における反射率、透過率及び吸収率が同一である。同様に、第 7 の放射照度が取得される波長帯域は、第 1 の放射照度が取得される波長帯域である第 1 の波長帯域と同一であるため、第 1 の波長帯域に比較して、植物における反射率、透過率及び吸収率が同一である。このため、演算部は、第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度に基づいて、第 5 の放射照度を精度良く算出できる。

【 0 0 5 4 】

また、演算部は、第 1、第 3、第 6 及び第 7 の放射照度を下記式 ( 2 ) ；

【 数 4 】

$$F_s = \frac{L_1 - \frac{E_1}{E_3} \cdot L_3}{1 - \frac{E_1}{E_3}} \dots (2)$$

( 但し、 $E_1$  は第 1 の放射照度、 $L_1$  は第 3 の放射照度、 $E_3$  は第 6 の放射照度、 $L_3$  は第 7 の放射照度、 $F_s$  は第 5 の放射照度を表す。 )

に代入して第 5 の放射照度を算出してもよい。この場合、演算部は、上記作用効果を好適に奏することができる。

【 0 0 5 5 】

また、第 1 の波長帯域は、フラウンホーファー線の内の  $O_2$ -A 線に対応する波長を含む波長帯域であってもよい。 $O_2$ -A 線に対応する波長では  $O_2$ -A 線以外の線に対応する波長に比較して、太陽光及び植物からの光の放射照度のスペクトルにおける吸収ピークの幅が狭い。従って、第 1 及び第 3 の放射照度のスペクトルにおける吸収ピークの裾に第 2 の波長帯域が重なり難い。よって、第 5 の放射照度を精度良く取得することができる。

【 0 0 5 6 】

また、第 1 の波長帯域は、760 nm 波長帯域であり、第 2 の波長帯域は、750 nm 波長帯域であってもよい。760 nm 波長帯域はフラウンホーファー線の内の  $O_2$ -A 線に

10

20

30

40

50

対応する波長を含む波長帯域であり、O<sub>2</sub>-A線に対応する波長ではO<sub>2</sub>-A線以外の線に対応する波長に比較して、太陽光及び植物からの光の放射照度のスペクトルにおける吸収ピークの幅が狭い。従って、第1及び第3の放射照度のスペクトルにおける吸収ピークの裾に第2の波長帯域が重なり難い。また、第2の波長帯域は、第1の波長帯域から10nmの波長範囲内に含まれる比較的近い波長帯域であるため、第1の波長帯域に比較して、植物における反射率、透過率及び吸収率が略同一である。以上により、第5の放射照度を精度良く取得することができる。

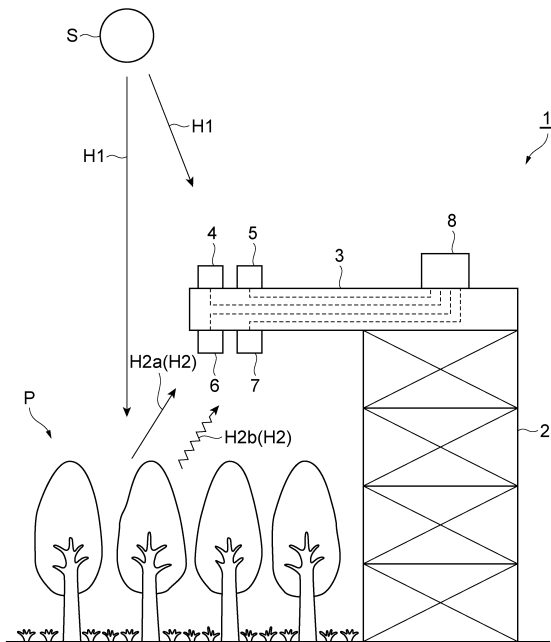
【符号の説明】

【0057】

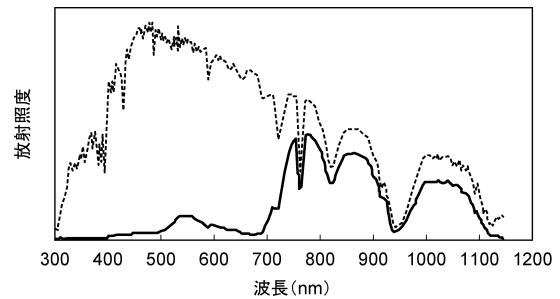
1...クロロフィル蛍光測定装置、4...第1の測定部、5...第2の測定部、6...第3の測定部、7...第4の測定部、8...演算部、H1...太陽光、H2...植物からの光、H2a...反射光、H2b...クロロフィル蛍光、P...植物、S...太陽。

10

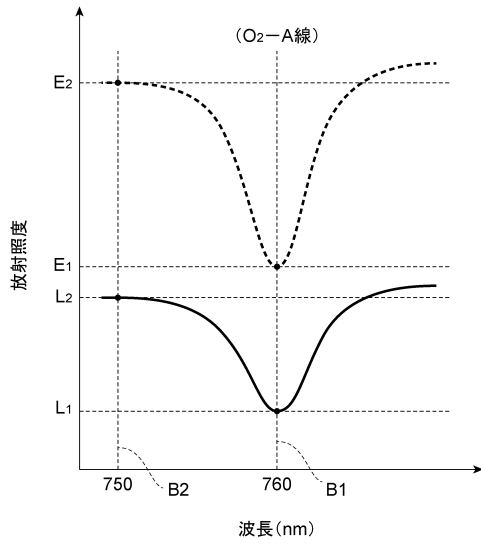
【図1】



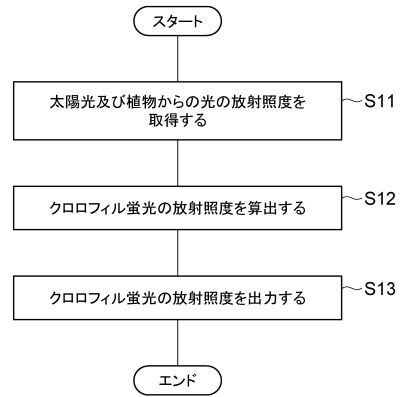
【図2】



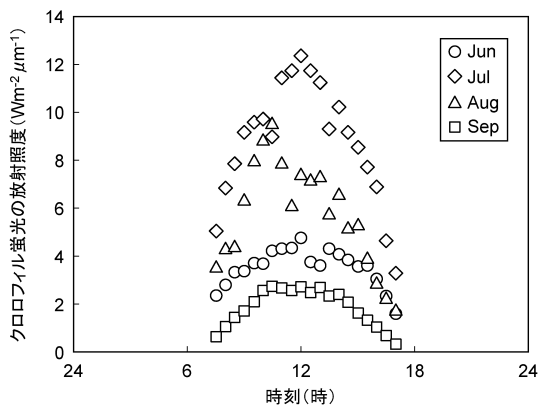
【 図 3 】



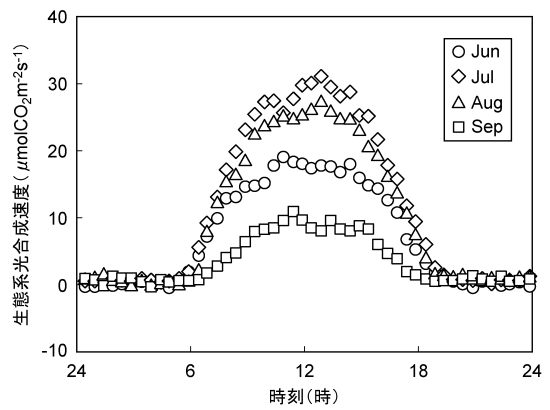
【 図 4 】



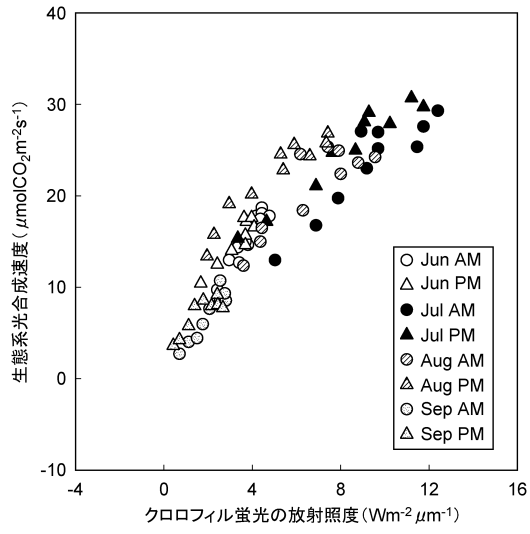
【 図 5 】



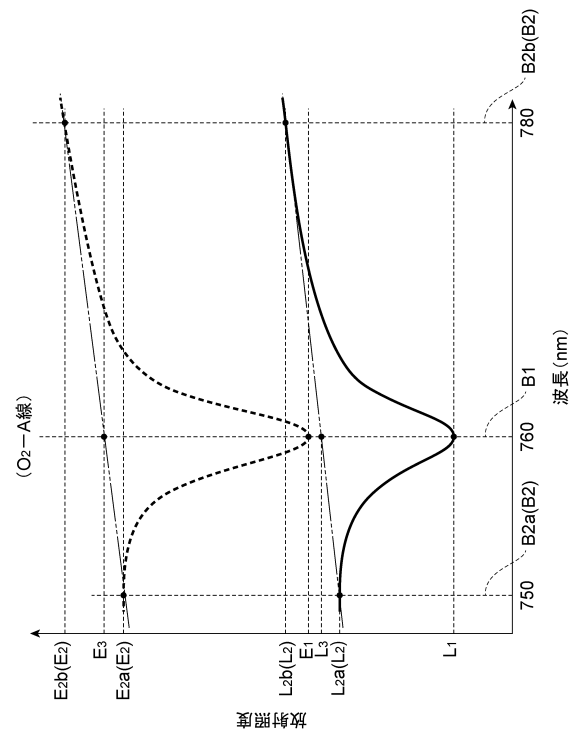
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 GUANTER,L., et al , Journal of geophysical research , 2 0 1 0 年 , 115 , D19303  
LIU,Liangyun et al , IEEE transactions on geoscience and remote sensing , 43/4 , 827-832  
栗山健二他 , 第39回リモートセンシングシンポジウム講演論文集 , 2 0 1 3 年 1 1 月 1 5 日 , 第  
9-12頁  
増田健二 , 北海道大学総合技術研究会報告集 平成26年度(CD-ROM) , 2 0 1 4 年 , 06-01

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G 0 1 N 2 1 / 6 4

A 0 1 G 7 / 0 0

J S T P l u s / J S T 7 5 8 0 ( J D r e a m I I I )