作物の瓦斯代謝作用に関する研究

V. 赤外線吸収を利用した CO₂ 瓦斯分析計とその測定例*

戸 蒔 義次・武 田 友四郎・丸 田 宏

(東京大学農学部)

緒 言

最近の作物の光合成並びに呼吸作用に関する研究は切り取られた葉についての観察に止まらず、個体全体の、或は更に進んで実際圃場における群落の生理並に生態の問題へと進んでいる。従つて自然環境の変化に対しての作物の同化呼吸作用の微細なる日変化、或は施肥条件又は追肥などの人為的環境変化による、急激なる時間的变化又は緩慢なる長期間の推移或は累積過程の追跡が必要とされる様になつて来た。著者等は夙にこの点を考慮して電気伝導度法を利用した“瓦斯代謝作用の継続的測定装置⁵⁾”を考案し、或程度の継続測定を可能にした。然しその方法は電導度観測においてかなりの疲労を伴い、又高度の熟練を要し、實際上2昼夜以上の連続測定は困難である。これ等の観点から著者等は CO₂ の赤外線吸収性を利用した瓦斯分析装置の作製を企画した。尤も赤外線吸収を利用したこの種装置は McALISTER²⁾、SCARTH³⁾等によつても考案されているが尙実験室的の範囲を出でず又種々の欠陥を有するため、実際圃場での運転には不適當である。又 EGLE¹⁾等により考案されたいわゆる URASは理想的なものであるが、特殊部品の作製が困難で現段階の我が国では製作が不可能であり費用の点でも問題がある。よつて作製に当つては即応性が高く、又精度の優れた、而も運転操作が簡単でその上自動記録機構を組合せ得るものを目標としたのである。

なおこの研究は農林省応用研究費の交附を受け、又本学工学部神山助教授、科学研究所藤岡研究室、京都大学物理学教室内田教授および富士電機製造株式会社技師河栗氏等の協力を得た。

赤 外 線 CO₂ 分 析 計

動作原理： この装置の測定原理は CO₂ ガスが赤外線の特長波長部分を吸収する性質を利用したものである。即ち空気は通常約 80% の N₂ ガス、20% の O₂ ガス、0.03% の CO₂ ガス及びその時の温度に相当した水蒸気から成立っているが、これらのうち N₂、O₂ 等の原素分子は赤外線を吸収せず、CO₂、H₂O 等の化合物分子は夫々赤外線の特長波長部分を吸収する性質がある。植物の同化及び呼吸作用を測定する場合には CO₂ の濃度変化だけを対象とするのであるから、分析計に選択性をもたせ干渉ガス(普通の場合は H₂O だけを考えればよいが、特殊の場合としてメタン、エタンその他の不飽和炭化水素等も考えられる)の影響を取除き、CO₂ の濃度変化による赤外線の増減を測定することになる。換言すれば、赤外線ガス分析計とはガスの赤外吸収スペクトルの波長を弁別して選択性をもたせ、その選択した範囲内で吸収エネルギーを測定して濃度を決定するものである。

構 造： この装置の構造の概略及びその動作原理を第1図に示す。赤外光源より出た赤外線は附図 a の如きエネルギー分布を有している。この光が試料室 A に入射すると A 中にある赤外線吸収性のガス X、Y、Z (この場合夫々 CO₂、H₂O、その他のガスとする)により夫々 λ_x 、 λ_y 、 λ_z の所がそれぞれの濃度に対する量だけ吸収され、A を出る赤外線は附図 b の如きエネルギー分布を有している。この赤外線がネガティブフィルター F₁、F₂ に入射するのであるが、このネガティブフィルターは F₂ 中に 100% CO₂ を封入してあり一方、F₁ 中には赤外吸収を有しない窒素ガスが封入されている。故に F₁ を通過した赤外線は b と等しいエネルギー分布の附図 c の如き形で F₁ を出る。一方 F₂ を通過した赤外線は λ_x の所が相当量吸収され、他は b と同様な附図 d のごときエネルギー分布を有している。この二つの赤外線が夫々 D₁・D₂ なる熱検出器に入射するのであるが、D₁・D₂ は差動熱電堆でできているので入射せる輻射エネルギーの差に比例した電圧が出る。すなわち附図 d の斜線の部分に相当する電圧が出る。この量は A 中にある CO₂ の濃度に関係した量であり、その

* 昭和 30 年 10 月 8 日 第 108 回講演会に於て発表

日本作物学会紀事 第 24 巻 第 4 号 (昭和 31 年 7 月)

Fig. 1. The Infrared CO_2 analyser and glass-covered cabinets suitable for field measurement.

CO_2 濃度のみによつて決定され他成分ガスには無関係である。この電圧は微弱であるから、これを適当に増幅して指示計或は記録計の針を振らせる。次に個々の部品についてやや詳しくのべる。

光源：光源としては酸化皮膜をしたニクロム線を用い輻射特性の経年変化を少くしている。又光源より輻射される赤外線線を能率よく測定に利用するため円錐状の内面金メツキを施した反射鏡と円筒状の反射鏡の組合せにより赤外線の放射を能率よくしている。

試料室・ネガティブフィルター・窓(ウィンドー)：試料室およびネガティブフィルターはガス容器としての目的と同時に赤外線の反射鏡としての作用を備えている。この為内面に金鍍金して赤外線の反射率を高めており、又反射率の経年変化を防いでいる。試料室は長さ1m直径3cm、ネガティブフィルターは長さ4cm 直径3cmであり、共にガス容器として働かせるため夫々管の両端には光のみを通す窓(ウィンドー)を張りつけてあるがこの窓材料としては赤外線をよく透過すること、種々のガスに対して安定であること特に水蒸気に対して侵されにくいこと、機械的に強いこと等の理由から弗化リチウム(LiF)を使用している。

検出器：熱検出器としては前述の如く熱電堆を使用している。熱電堆は感度としてはボロメーターよりも劣っているが精度の点で優れている。この場合はクロメルPとコンスタンタンの細線を放電溶接し10対の熱電堆にし、受光面として金箔に亜鉛蒸着したものを使用しているので構造が非常に丈夫であり感度も相当高い。

増幅器：赤外線 CO_2 分析計の検出器は出力が直流電圧で $100\mu\text{V}$ 前後であるから増幅する必要がある。これに

使用する増幅器は勿論直流増幅器であり、これは一般に交流増幅器に比べて製作困難であるが、“弾性結合・負饋還回路”を応用して特に実験圃場などで使用する場合に保守（真空管の劣化及び取り換え等）及び電源電圧変動に関して何等考慮を払う必要のない理想的な直流増幅器を使用している。その構成を第2図に示す。実際のものは図の点線の所で増幅部と電源部とを隔離し、電源部の整流管、変圧器等より発生する熱が増幅部の入力側の端子間に熱起電力を発生して零点変動の原因となることを防いでいる。入力電圧は負饋還

Fig. 2. Amplifier.

抵抗を介して直流～交流変換器に入り商用周波数の交流に変換される。この交流は入力変成器により増幅されて初段増幅管（6SJ7）のグリッドに入る。入力変成器はパーマロイ磁心使用のもので巻線比は1:20である。またこの変成器は増幅の目的他に初段増幅管のグリッド電流により、グリッド抵抗に発生する直流電圧が測定に悪影響をおよぼさないためにも役立っている。6SJ7二段増幅を経た信号電圧は同期整流管6SN7の両グリッドに同時に加えられる。6SN7の両プレートにはたがいに位相が 180° 異つている交流電圧が加えられているから1サイクルについて右と左の平均電流はグリッドにかかる信号電圧（入力電圧）に応じて変化する。この平均電流によるカソード抵抗の電圧降下の差を出力電圧として取り出している。この出力電圧を第2図の出力計回路の全抵抗Rと R_F に分圧して入力側に負饋還している。出力計はこの負饋還回路中にあるCRフィルター回路中に挿入して負饋還電流を読んでいる。この出力計を含むCRフィルター回路が前記の弾性結合回路で、この作用は出力端子にかかる脈流の饋還電流をフィルターする作用と同時に負饋還抵抗 R_F にかかる負饋還電圧を入力電圧からある時間だけおくらせている。この結果出力端子に接続する記録計の指示おくれが補正され、指示が速応性のあるものとなる。

電源：本装置の動作原理からいつて、光源より発射される赤外線量は常に恒定であらねばならない。従つて光源に供給する電源電圧を一定に保つ必要がある。最近の如く電力事況が悪いと商用交流電圧は甚しい時では70 Voltから110 Volt位の変動を示し、瞬間的に10 Volt程度の昇降をくりかえすことがある。この点は本分析計を作製する際に最も苦心した点の一つであるが、著者等は第3図の如き定電流装置を作製してほぼ満足な結果を得ている。このものは、先ず初段に鉄共振型の定電圧装置を置き入力変動を 100 ± 2 Volt程度におさえ、次に定電流管を配置してこの $\pm 2\%$ の電圧変動を吸収させる。終段に18 Voltの蓄電池を置いて、初段及び次段で

Fig. 3. Automatic Voltage Stabilizer.

かなり安定化した電圧の微少の変動をいわゆるバッテリーフローティング（電池浮動）の方式により蓄電池を充電しながら電流を流す。即ち光源に流出する電流と、電源から流入する電流を略等しくしておけば電池は殆ど消耗せず只電圧変動を吸収する為のみ働くのである。かくの如くしてかなりはげしい電圧変動も殆ど完全に吸収される。

分析ガス源切換スイッチ及び記録計：著者等は1台のガス分析器に3箇所（第1図の如くblank test 1及び同化室から

Fig. 4. Sample section of the recorder chart.

mg の範囲も測定出来る。又増幅器の感度を変えることにより測定範囲をある程度変更することも出来る。

吸引器その他：試料空気は吸引器に吸引されつつ試料室に導入されるが、瓦斯による赤外線吸収は対流や伝導等と異り瞬時に行われるから流量が変ることによるための誤差は無い。この点は従来の吸収液に瓦斯を吸収させる方法にはみられない非常な利点の一つであり、流量監視を必要とせず、実際の使用目的に適した任意の流量でよい。著者等は毎分 700~2000 CC の範囲の流量で運転している。なお本分析計の動作原理は温度差を熱電堆により検出することに基づいているから、増幅器及び記録計を除いた分析器の本体の部分に温度の急変を与えることは測定結果を乱す原因となるから恒温室に入れ恒温に保っている。

分析の精度：この装置による測定の精度は第 4 図に示される。この図は記録紙の Sample を示したもので左側の数字は 1 目盛 1 時間で、図の下側にスケールが併示されている。この記録は試料室に 1 l 中 CO_2 0.550 mg を含有する空気を封入し、そのままで約 6 時間連続記録させたものである。記録は 2 分毎に打点されるのであつて、原理的には点がつながり合つて一本の直線になる筈であるが、種々の原因による誤差が導入され実際には図の如き帯状の記録となる。この帯状の幅が精度を規定するのであつて、この装置では 0.550 mg の空気を記録させると 0.545~0.555 mg の値を示す。即ち $\pm 1\%$ の誤差の範囲である。又長時間測定をさせると、著者等の実験ではこの幅を保ちつつ帯がうねり、言葉をかえていうならば 24 時間で $\pm 2\%$ の零点変動を伴うことが観察された。従つて連続使用の場合には約 5 時間毎に零点調整を行うことにしている。

Fig. 5. Comparison of diurnal courses of gas exchange in the rice plant between isolated and community conditions.

測定例

ポット栽培の稲と水田の実際栽培の稲とでは享受する光の量に違いがあるから同化の様相も異なるであろう⁴⁾⁵⁾⁶⁾という予想のもとに両区の同化の日変化を比較測定した。本学部構内には水田がないので直径 13 cm 高さ 32 cm のトタン製ポットを作り農林 29 号を 1 鉢 1 本植して、169 鉢を植物体の距離を 8 寸間隔に 13 ケ × 13 ケの正方形に配置し土中に埋め水田の群落状態として育成した。同化測定の際このものを掘り上げ同化箱内に 4 ケ宛 8 寸間隔で配置し、Pot 区はボーダー無しで、水田区は同化箱の外側に 3 列のボーダーを配置した⁶⁾。測定は各生育時期にわたり行つたが、代表的な例として 9 月 7 日穂揃期のものをあげた。

第 5 図は両区の同化作用の日変化及び

Fig. 6. Light-curve based on Fig. 5.

その両側において低い。即ち水田区に対しての日射の効果は単に光の照射量のみならず光源と群落の平面とのなす角度、即ち光線の入射角により異なるものであることがわかる。このことは第6図に明瞭に表れており、Light-curve上の種々の点に於てPot区では測定値の変異がわりに少いが水田区ではかなり多いのは、同じ光の強さでも入射角によつて同化量が変わり、その程度は水田区により多いからである。

第5図で、雲により一時的に日射の弱まる点において、40~80 KLux位の中間的な日射の下では水田区の同化の低下率がPot区に比し強く、日射が極端に弱められた場合や、少ししか弱められない場合では、この低下率にそれほど差が認められない。この点は第6図のLight-curveを見るに、Pot区のLight-curve上に分布する点と水田区のLight-curve上に分布する点の距離が、光が比較的弱い場合と強い場合では共に狭く、その中間の強さでは広がっていることから現象的には理解されるが、本質的にはPot状態と水田の群落状態に於ける光の透過率の違いに基くものであつて詳細は次報⁶⁾でのべる。

又両区の間第5及第6図に見られるようにCompensation pointの差があり、この例では水田区では約10 KLux, Pot区では約5 KLuxの点がこれに当る。

前述の如く、この実験に用いた植物体は同じ条件下に育成されてきたものであつて、同化測定のときだけ水田区にはボーダーを置き、Pot区には配置しなかつたのであるから、この測定結果には植物体の前歴の違いは存在しない筈である。従つて両区の測定結果の違いは純粋にPot状態と水田状態の違いに基くものとみなすことが出来る。

結論として、光合成作用はPot区と水田区とでは日変化の様相が夫々梯形型・三角型の如くかなり異り、又前述の如く受ける光の強さの違いにより、水田区とPot区の間では、それに対応する同化力の強さの程度に差があるが、総じて水田区はPot区に比し同化力は低下している。これはPot区では、あらゆる角度からの光を享受し得るが、水田区では隣り合つた植物体の相互遮蔽のため横からの光の享受が少く主として上部からの光のみしか享受出来ないことによるもので、前者ではすべての葉の享受する光の強さの平均値が後者のそれよりも対相対的に高く、前者で光飽和が見られ後者でみられないのは、前者では飽和点以上の日照下では内部に透達する光の強さが、すべての葉のfull capacityを発揮し得る以上であり、後者ではfull sunlight下でも内部に透達する光の強さが、相互遮蔽の結果かなり弱められるため、群落の上部の葉では光は飽和しているが、内部の葉では光が不足し、その結果すべての葉の同化力の平均値が各葉のfull capacityの平均値を下まわる程度にしかなり得ない結果であろう。

引用文献

- 1) EGLE, K. und ERNST, A., Die Verwendung des Ultrarot-Absorptionsschreibers für die voll-automatische und fortlaufende CO₂-Analyse bei Assimilations- und Atmungsmessungen an Pflanzen. Z.f. Naturf. 4b, 351 (1949)

日射の強さ(光線に垂直な位置でのLux)を示したもので、第6図は第5図をもとにして作製した両区のLight-curveである。第5図をみると、時々雲のため日射が弱められる結果、同化力もそれに応じて減少し、若干のフラクチュエーションがあるが、その間を点線でつないで考察すると、Pot区では同化作用の日変化が梯形型となり、光がある程度まで強いほど同化は強くなるが、ある限度を超えると、それ以上光が強くなつても同化は増加しないという光の飽和現象が明かにみられる⁵⁾。ところが水田区では日変化が三角型をとり、日射が強ければ強い程同化は増加する。即ち自然状態では飽和現象がみられない。更に又日射量は10時頃から2時頃までは自然日射の最大量100 KLuxであり、水田区ではこの間同じ強さの直射光線を受けているに抱らず同化力は日射の垂直位置に近い点において極大を示し、

- 2) McALISTER, E. D., Time course of photosynthesis for a higher plant. *Smithsonian Inst. Pub. Misc. Collections*, **95**, No. 24 (1937)
- 3) SCARTH, G. W. Loewy, A., and SHAW, M., Use of the infrared total absorption method for estimating the time course of photosynthesis and transpiration, *Canadian Jour. Res., Sec. C. Bot. Sci.*, **26**, 94, (1948)
- 4) 武田友四郎・丸田 宏：作物の瓦斯代謝作用に関する研究 第3報 照度並びに苗立密度が稲苗の光合成に及ぼす影響, *日作紀*, 24, (1955)
- 5) 戸荻義次・武田友四郎・丸田 宏：作物の瓦斯代謝作用に関する研究 第1報, 作物の瓦斯代謝作用の継続的測定装置について, 第2報, 水稻の生育に伴う同化・呼吸量の消長, *日作紀*, 23, (1955)
- 6) 武田友四郎・丸田 宏：作物の瓦斯代謝作用に関する研究 第6報 照度並に栽植密度が移植後の水稻の光合成に及ぼす影響, *日作紀*, 24, (1956)

Studies on CO₂ Exchange in Crop Plants

V. A newly devised "Infrared CO₂-Analyser", and some of the results obtained by it, comparing the diurnal changes in photosynthetic rate in rice plants under an isolated condition with that under a community condition.

Yoshiji TOGARI, Tomoshiro TAKEDA and Hiroshi MARUTA

(Faculty of Agriculture, Tokyo University)

Summary

In connection with researches of physiology and ecology of crop plants, methods especially effectual for instantaneous and successive analysis of gases exchanged by growing plants have long been wanted by many investigators. Most of the devices hitherto known are more or less inaccurate and tedious though designed ingeniously, and not satisfactory for general uses in such researches.

In the present report a negative type "Infraed gas analyser" newly devised by the authors is described.

A schematic outline of the instrument together with its working principle is represented in Fig. 1. Infrared radiation send from a light source, of which the energy distribution is shown in the figure *a*, enters into the absorption cell, and is partially absorbed at λ_x , λ_y and λ_z by H₂O, CO₂ and other gases contained in sample air in the cell, respectively. Its distribution of energy after absorption is changed as shown in the figure *b*. Then, the ray enters into the negative filter, consisting of two chambers, one containing 100% CO₂ gas and the other N₂ gas. The part of the ray passing through the former is strongly absorbed at the region, λ_x , its energy distribution being changed so as shown in the figure *d*, while the part passing through N₂ gas in the latter chamber is not absorbed here at all, its distribution of energy being unaltered as shown in the figure *c*, which is almost similar in shape as the figure *b*. Each of the two parts of the ray falls finally on each junction D₁ and D₂, respectively, of the thermal detector, a thermopyle of differential type. The potential difference between the two junctions thus measured corresponds to the difference between the amount of energy absorption by 100% CO₂ gas and that by the sample air; that is, to the shaded portion in the figure *d*. The larger the concentration of CO₂ gas in the sample air, the smaller becomes the difference measured, no other gases than CO₂ interfering with the measurement.

The sample air is sucked by a pump alternately through either of the three ways, one for a blank test and the others for two replicated measurements of the air from the assimilation chamber, being turned from one to another by a gas switch which is operated electromagnetically and synchronized with the automatic allocation of the marking pen of a triple-ways recording voltmeter.

Several examples of results obtained by the apparatus concerning the diurnal changes in photosynthetic activity of rice plants growing isolated in pots and of those growing in a community are presented.