

アプリケーションノート 268 : 代謝解析システムとプロパンベースの検証

このアプリケーションノートでは、代謝測定のための従来機の設定を検証します。設定は、被験者の定常状態のみと二酸化炭素の生成の消費量をエミュレートするプロパンベースの燃焼源にさらされています。プロパンベースの燃焼源は、代謝測定システムの性能を検証するのに使用することができる非常に信頼性が高く、正確な代謝ガス発生器です。

代謝解析システムの設定

このアプリケーションノートでは、3つの入力信号がMP150のデータ収集チャンネルに割り当てられています：

- CO₂e** CO2100C モジュールを介する二酸化炭素濃度、ゲインを1ボルトあたり1%のCO₂に設定
- O₂e** O2100C モジュールを介する酸素濃度、1ボルトあたり10%のO₂のゲインに設定
- Fi** DA100C アンプを介するTSD107B トランスデューサからの吸気流量、ゲインを1,000に設定

図1は代謝解析を実行する際の一般的な接続を示しています。

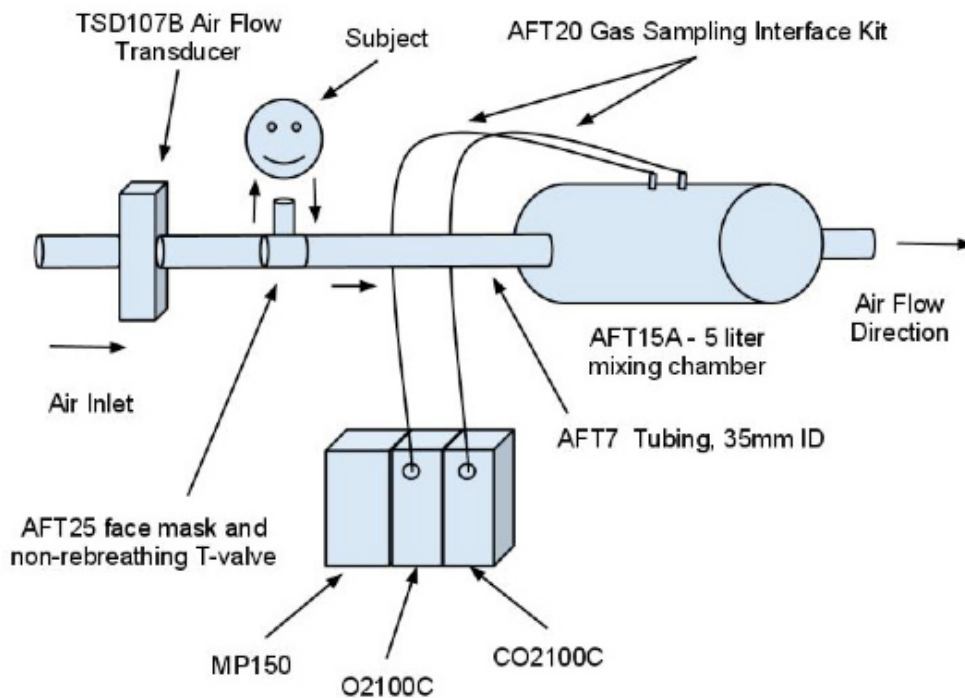


図1 代謝解析実行時の一般的な接続

被験者は、“Tバルブ” フェイスマスク/マウスピース (AFT25) を使用して呼吸します。AFT25 は吸気側のTSD107B 呼吸流量トランスデューサと出力側のAFT15A ミキシングチャンバに直接取り付けられます。

被験者が吸入する際、空気は矢印で示されるようにTSD107Bを通った後、AFT25非再呼吸“Tバルブを”通

過して被験者の肺に吸い込まれます。TSD107B は、呼気の湿度とそれに関する凝縮に関連する影響を取り除くために吸気側に配置されています。

空気は 5 リットルミキシングチャンバ (AFT15A) に向けて吐き出します。CO2100C 及び O2100C ガス濃度サンプリングモジュールは、別々に AFT20 ガスサンプリングインターフェースキットを介してミキシングチャンバに接続します。ガスサンプリングインターフェースキットは、ミキシングチャンバ内にある呼気を (Nafion®チューブを介して) フィルタリング及び除湿するように作用します。

非再呼吸 “T” バルブは、5 リットルミキシングチャンバへの呼気にのみ向けてください。呼気のみがチャンバに向けられることで、ミキシングチャンバが平均呼吸流出量に作用します。この平均化効果は、幾つかの呼気の平均値に応じて変化する CO₂ と O₂ 濃度を引き起こします。ミキシングチャンバのサイズは、平均化効果の範囲を決定します。例えば、被験者の呼気量が (代謝率測定の休止中に) 通常 0.5 リットルと仮定すると、AFT15A ミキシングチャンバは平均で約 10 呼気となります。

TSD107B 呼吸流量トランスデューサの信号は、CO2100C と O2100C モジュールと共に MP150 システムに取り付けられた DA100C アンプによって増幅されます。従って、代謝酸素消費量 (VO₂) および呼吸交換率 (RER) を正確に計算するために取得されたアナログデータのチャンネルは 3 つあります。

AcqKnowledge は、3 つのアナログチャンネルと複数の計算チャンネルに記録するように設定されています。データは、少なくとも数分の収集時間でコンピュータメモリもしくはハードディスクに取得されます。

全ての配管を固定し、取り付けて設定が完了すると、ガス濃度のキャリブレーションを実施することが可能です。気流配管、ガスサンプリングライン配管、もしくはガスメジャメントモジュールのポンプ速度が変更された場合、一般的には、ガスメジャメントモジュールのキャリブレーションを繰り返すことが必要となります。

ガス濃度のキャリブレーション

ソフトウェアの設定後、以下の 3 つの変数のシステムを校正することが重要となります。

- 1) 二酸化炭素濃度 (.04%~4%の CO₂ の範囲で校正)
- 2) 酸素濃度 (20.93%~16%の O₂ の範囲で校正)
- 3) 呼気流量 (0~13 リットル/秒の範囲内で校正)

ガス濃度センサを校正するために、ミキシングチャンバを適切なガスで満たします。まず、被験者のマウスピースに取り付けられているキャリブレーションシリンジによって新鮮な空気(外気)でチャンバを満たし、ミキシングチャンバへ新鮮な空気を循環させます。*AcqKnowledge* を使用してガス濃度の変化を測定します。外気で安定したレベルが表示されたら、最初のキャリブレーションポイント (CO₂ が 0.04% で、O₂ が 20.93%) を取得します。そして、所望のガス混合物 (推奨-BIOPAC 社製の GASCAL および GASREG : 4%の CO₂、16%の O₂、80%の N₂) でチャンバを満たします。レベルが安定して表示されたら、2 つ目のキャリブレーションポ

イントを取得します。この方法で、CO2100C モジュールは 0.04%～4%の間の二酸化炭素で校正され、O2100C モジュールは 20.93%～16%の間の酸素で校正されます。

呼吸流量トランスデューサ (TSD107B) は、出荷時のスケール係数がリットル/秒あたり $90 \mu V$ となります。このスケール係数は 1 リットル/秒の空気が TSD107B を通る際に、 $90 \mu V$ の信号を出力することを意味します。TSD107B は DA100C に直接接続されており、1000 の利得に設定されています。この増幅は、同じ気流条件下で 90mV の信号を生じさせます。

キャリブレーションを以下の手順で行います。

- 1) TSD107B を通る気流がない状態で最初のキャリブレーション値 (値 X) を記録します。
- 2) スケーリングダイアログウィンドウ内で、X ボルトを 0 リットル/秒にマップします。
- 3) 出荷時のスケール係数の逆数を計算します。 $- 1/0.090 = 11.111$ (ボルトあたりのリットル/秒)
- 4) 値 Y を取得するために X へ 11.111 を追加します。
- 5) スケーリングダイアログウィンドウ内で、Y ボルトを 1 リットル/秒にマップします。

2つ目のキャリブレーションポイントは、最初のキャリブレーションポイントによって記録された補正值へ出荷時のスケール係数の逆数を追加することで推定されます。

TSD107B は、呼吸流量トランスデューサを通る空気の比体積を注入するためのキャリブレーションシリンジを用いることで正確に校正することができます。AcqKnowledge で流量信号を記録している間、信号が増加した後、シリンジの動作に合わせて減少することに注意してください。AcqKnowledge の“領域”ポップアップメッセージは、図 2 に示すように流量信号の領域計算を実行するために使用されます。

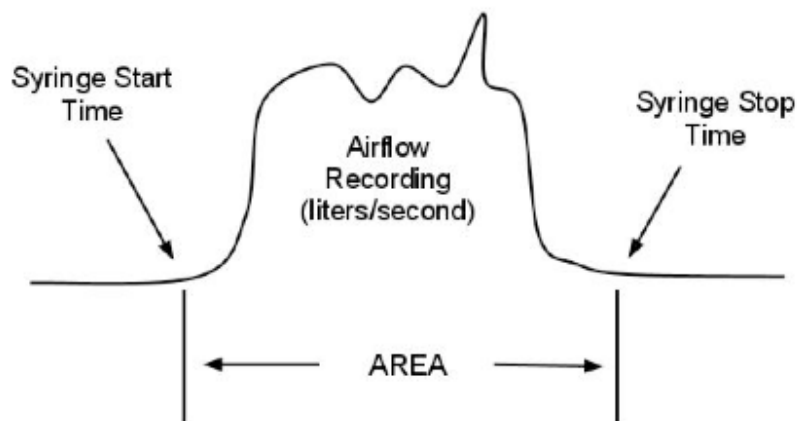


図 2 流量信号領域の計算

2 リットルのキャリブレーションシリンジ (AFT26) が使用された場合、測定領域は 2 リットルでなければなりません。測定領域が異なる場合は、(スケーリングダイアログウィンドウで使用される) 11.111 リットル/秒のスケール係数を領域メッセージが 2 リットルに戻るまで上方または下方に正比例して調節されなければなりません。

手順のために記録される他の係数は以下の通りです：

Ta	周囲温度
Pb	mmHg の周囲気圧
PH₂O	mmHg の周囲温度での水蒸気圧

これらの値は、周囲温度と周囲圧（ATP）で標準状態（STPD）へガスの変換を行う際に重要となります。

VO₂および RER メジャメントの設定解析

二酸化炭素濃度および酸素濃度の両方がわかっているため、次の公式を用いることで呼出窒素の濃度を求めることが可能です：

$$N_2e = 100 - [O_2e + CO_2e]$$

TSD107B が“流入”ラインに配置されてから、式を用いて流量信号を積分することで、呼気の流れを連続で 60 秒間隔にわたって求めることができます。（100Hz のサンプリングレートで 60 秒=6000 サンプル）

Vi = 60 秒間にわたって (Fi) を積分する

ATP で STPD にガスを変換します：

$$Vis = Vi * (273 / (273 + Ta)) * ((Pb - PH_2O) / 760)$$

ここでは Ta は周囲温度（例：標準 24°C）

Pb は周囲気圧（例：標準 745mmHg）

PH₂O は水蒸気の周囲気圧（例：標準 22.4mmHg）

ホールデン変換（窒素係数）を用いることで、吸気量からの呼気量を計算します：

$$Ves = (Vis * 79.03) / N_2e$$

ここでは 79.03 の値は、空気中の窒素の割合になります。

リアルタイムの酸素消費量は、式を用いて求めることができます：

$$VO_2 = (1/100) * [(Vis * 20.93) - (Ves * O_2e)]$$

ここでは 20.93 の値は、空気中の酸素の割合になります。

リアルタイムの二酸化炭素産出量は、式を用いて求めることができます：

$$VCO_2 = (1/100) * [(Ves * CO_2e) - (Vis * .04)]$$

ここでは .04 の値は、空気中の二酸化炭素の割合になります。

最後に、次の式で RER を計算することができます：

$$RER = VCO_2 / VO_2$$

定義

CO₂e 呼気中の二酸化炭素分画濃度

O₂e 呼気中の酸素分画濃度

Fi 吸気流量 (ATP)

N₂e 呼気中の窒素分画濃度

Vi 吸気量 (ATP)

Vis 吸気量 (STPD)

Ves 呼気量 (STPD)

VO₂ 酸素消費量 (STPD)

VCO₂ 二酸化炭素消費量 (STPD)

RER 呼吸交換率

注 積分間隔は 60 秒間を越えているので、全ての量に関する単位は毎分リットルで表されています。

図 3 は、被験者からガス濃度測定および流量測定を行った際に得られる標準値を示しています。CO2100 モジュールは、ボルトあたり 1% の CO₂ の利得に設定されています。また、O2100 モジュールはボルトあたり 10% の O₂ の利得に設定されており、(TSD107B に接続されている) DA100C アンプは 1000 の利得に設定されています。

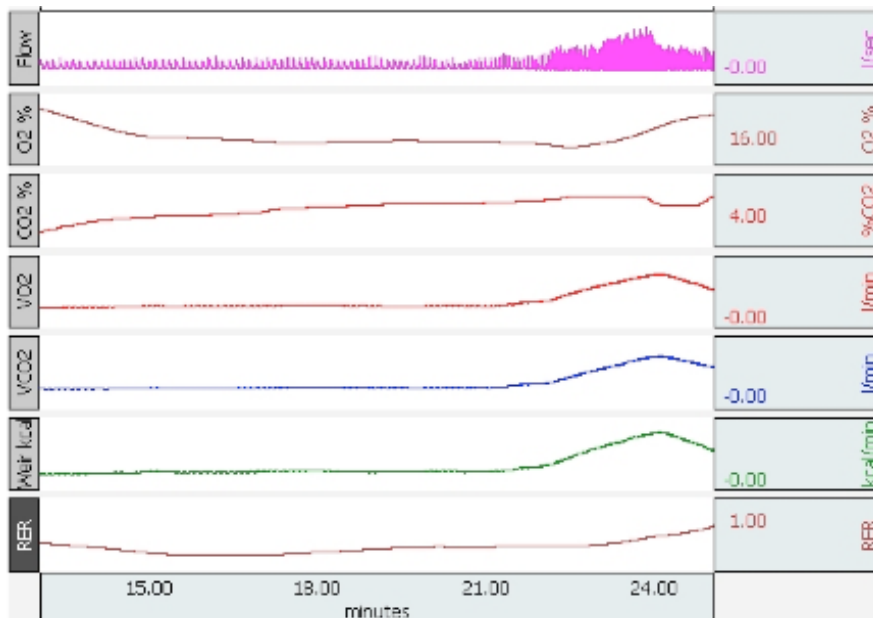


図 3 標準ガス濃度および流量の測定

前述のグラフは、サイクリングマシンに乗った被験者から取込まれた全てのリアルタイム酸素消費量と呼吸交換率の測定を示しています。どちらも生で、計算された波形が表示されます。

V0₂、VC0₂、堰計算、および RER 測定（下の 4 チャンネル）が時間と共に滑らかに変化することに注意してください。この記録と計算方法のグラフィカルで連続的な性質は、時間関数としてこれらの変数の変化に関する重要な情報を提供します。

この測定の設定は、最後の 60 秒で酸素消費量、二酸化炭素産出量、およびそれぞれの呼吸交換率を示す測定値をどの時点においても提供します。従って、酸素消費量が 4.7 リットルの V0₂ 測定値のピーク（24 分）は、前の 60 秒で被験者によって示されています。同一時点での RER は 0.91 に確定され、堰計算は 23.1 kcal/分のピーク値を示します。

ガス濃度センサの応答時間

代謝システムのキャリブレーションに関する非常に重要な事項は、ガス濃度センサの応答時間の事項です。RER は VC0₂/V0₂ に応じて算出されているので、二酸化炭素、酸素センサの応答時間はしっかりと一致していません。

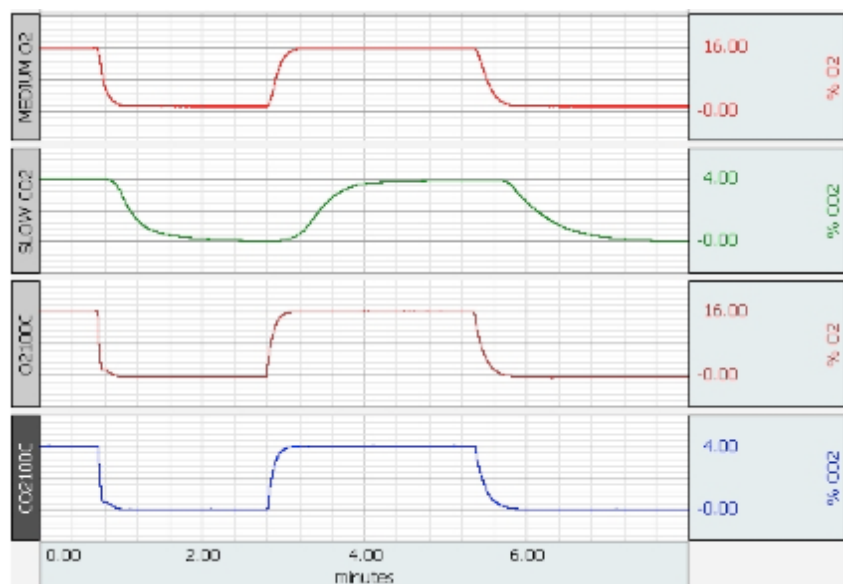


図 4 ガス濃度センサの応答時間

一例として、図 4 ではガスセンサの応答時間を考慮して示されています。この立ち上がり時間と立ち下がり時間のテストでは、CO₂ と O₂ 両方の濃度を 0% の状態にするため、窒素がチャンバを満たすのに使用されています。2~3 分後、チャンバは 4% の CO₂、16% の O₂、および 80% の N₂ (BIOPAC 製 GASCAL) を含むガス混合物で満たされます。

最初の 2 つの波形は、非常に異なる応答時間を有するガスセンサの代表的なものです。これらのセンサが代謝システムで使用される場合、それらはガス濃度で素早く変化した後、約 100 秒の正確な RER 測定値をもたらします。これらのセンサにおいて、CO₂ センサが O₂ センサよりもはるかに遅く応答するので、RER は VC0₂ がすぐに上昇（および V0₂ が下降）することで過小評価され、VC0₂ がすぐに下降（および V0₂ が上昇）することで過大評価されます。

(安静時および基礎代謝率測定と同様に) 定常状態だとしても、RERs は酸素と二酸化炭素センサ間で大きく異なる応答速度のガスシステム上でも正確に伝えられます。これは、ガス濃度の変化速度が非常に遅いので、両方のセンサが同等に追跡することが可能なためです。

下2つの波形は、非常に類似した(および高速の) 応答時間を有するガスセンサの代表的なものです。これらのセンサ (CO2100C と O2100C) は、非常に広い範囲のガス濃度の変化を受けて RER を正確に伝えます。

CO2100C と O2100C の場合、両方の測定単位は非常に高速 (500 ミリ秒以下の応答時間) なので、急速なガス濃度条件の変化を受けたとしても RERs は非常に正確に伝えられます。一般的に使用すると、CO2100C と O2100C からの出力は滑らかに変化する波形を生成するために AcqKnowledge でローパスフィルタ化 (1Hz の LPF) されます。

代謝システムのプロパンベースの検証

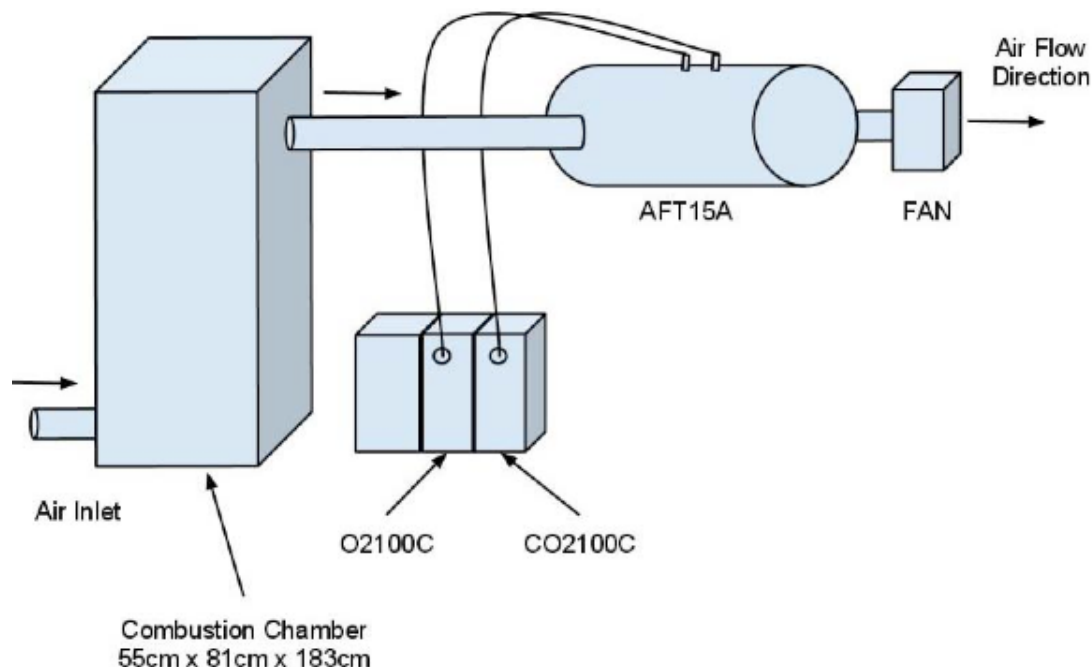


図5 代謝解析システムのプロパンベース燃焼の検証実行時の一般的な接続

この状況では、プロパンベースの燃焼チャンバを被験者と置き換えます。また、送風機を AFT15A の出力と並べて付け加えます。送風機が燃焼チャンバからの空気を引き込んだ後に、AFT15A に生じるガス濃度は CO2100C と O2100C によってサンプリングされます。

燃焼チャンバは 55 cm × 81 cm × 183 cm の大きさで、815, 265 cm³ もしくは約 815 リットルの内部容積を備えています。チャンバ内部は燃焼するプロパントーチです。プロパントーチは適度な炎の大きさに設定されており、そこで生じる炎は高酸素化されます。送風機は AFT15 を通って燃焼チャンバの上部から空気を引き込みます。新鮮な空気は、プロパントーチへの酸素の供給を続けるために燃焼チャンバの下部を通して入ります。

燃焼チャンバの内部には、プロパントーチが 0.1 グラムの分解能で重さを測定する高感度のスケールの上にあります。プロパンが燃焼するにつれ、消費されるプロパンのグラム当たり 11.92 キロカロリーを生成します。スケールは、ある程度の期間にわたってトーチによって消費したプロパンの量を求めます。

プロパンが燃焼するにつれ、0.60 の効果的な RER の状態にします。これは、トーチによって生成される二酸化炭素の量がトーチによって消費される酸素量の 60%であることを意味します。工業用プロパンにおいては、効果的な RER は 0.58~0.60 の範囲となります。計器用品質のプロパンにおいては、RER は 0.60 です。

堰方程式は、燃焼式のキャリブレーションテストで評価することも可能です：

$$\text{kcal} = (3.9 * \text{VO}_2) + (1.1 * \text{VCO}_2) - \text{毎分ごとでの全ての次元}$$

VO_2 と VCO_2 は、酸素消費量および二酸化炭素の生成量それぞれリットル/分の単位です。

図 6 のグラフは、プロパンベースの検査を受けた際の適切な代謝システム反応を示しています。一度安定化すると（約 60 秒後）、 VO_2 は 0.297 リットル/分、 VCO_2 は 0.180 リットル/分、そして堰計算は 1.36kcal/分および RER は約 0.6 となります。

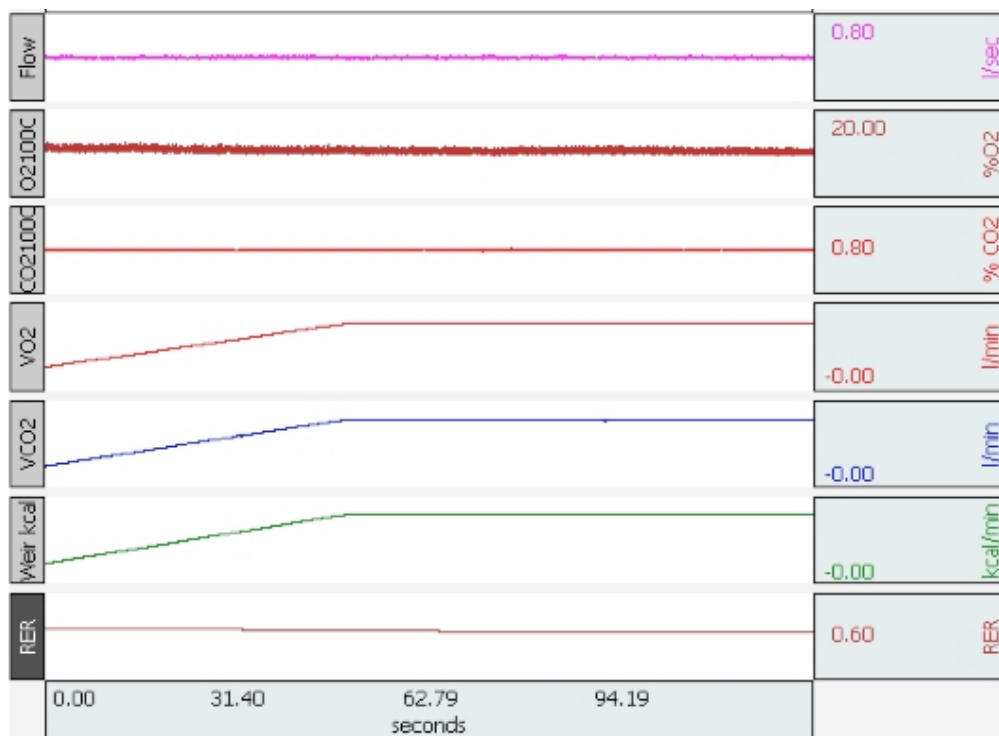


図 6 プロパンベースの検査を受けた際の適切な代謝システム反応

チャンバでの測定は図7に示されています。この場合、図1に示した被験者はプロパンベースの燃焼チャンバに置き換えられています。グラフに示されているように、RERは記録中に気流が著しく変化したとしても、試験期間を通して0.58±0.01の範囲となります。VO₂の最大値は、記録中90秒間で1.645リットル/分となり、園時点での堰計算は7.46kcal/分、RERは0.575となります。

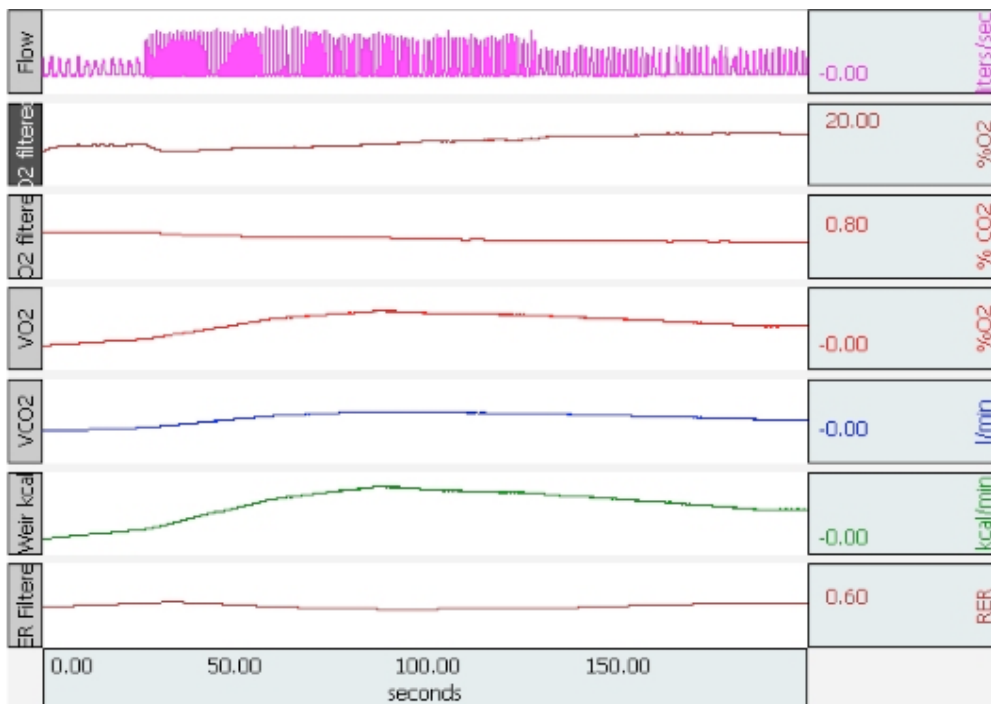


図7 チャンバを使用した測定