

# ニワトリのエネルギー代謝測定用間接熱量測定装置の作製と性能試験

神 勝紀・大島裕治・富田くるみ・唐澤 豊

信州大学農学部 食料生産科学科

**要 約** 開放型の間接熱量測定装置を作製した。この装置は体重 2 kg 以下のニワトリにおけるエネルギー代謝研究に使用するものであり、給餌後の急速な熱産生反応にも対応できる応答速度を持たせるように設計した。作製後に装置の応答速度および O<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の回収率を測定し、さらに実際にニワトリを用いて HP を測定した。O<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の濃度変化に対する応答の遅れはいずれも 2 分程度であり、O<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の回収率はそれぞれ 99.2% と 96.2% であったが、この程度の応答の遅れや CO<sub>2</sub> 回収率の低さは、HP を求める上では影響はほとんどないと考えられた。ニワトリを用いた試験では、絶食時と自由摂取時の HP および給餌後の HP パターンとも過去の報告と類似した結果が得られた。以上から、本研究で作成した装置はニワトリの HP を測定するに十分な性能を持つと考えられた。

**キーワード**：間接熱量測定装置，エネルギー代謝，ニワトリ

## 緒 言

動物のエネルギー代謝量は屠殺試験法、直接熱量測定法および間接熱量測定法によって測定され得る。屠殺試験法は特殊な装置を必要としないためよく用いられているが、短期間のエネルギー代謝量を測定し得ないことから使用条件は限られる。一方、直接および間接熱量測定法はいずれも特殊な測定装置を必要とするが、短期間のエネルギー代謝量を測定することができる。この 2 つの方法を比較すると、間接熱量測定法は装置のコストと使いやすさの点で有利であること、さらに呼吸商も測定し得ることから、今日ではこの方法が主流となっている。

間接熱量測定に必要な装置は間接熱量測定装置であり、この装置はラットやマウス用を除いては市販されていないので、他の動物を対象とするときには研究者が自ら製作する必要がある。数十年前の装置は多くの部分を手で制御していたため測定に多大な労力を要したが、今日ではコンピューター、測定機器および電子制御機器の発達、さらにそれらの低価格化によって、高精度で自動化の進んだ装置を比較的安価に製作できるようになってきた。そこで著者らはニワトリのエネルギー代謝研究に用いるために、Lundy<sup>8)</sup>、MacLeod<sup>10)</sup> および菅原と久保<sup>14)</sup> の装置を参考にして開放型の間接熱量測定装置を作製した。作製にあたって、ニワトリにおける給餌後の

急速な熱産生量 (HP) の変化に追従し得る性能を備えることに留意した。本研究ではまず装置の構成を説明し、次に装置の性能試験とニワトリを用いた動物実験の結果を示して、本装置の性能を評価した。

## 材料および方法

### 1. 装置の構成

間接熱量測定装置の概略を図 1 に示した。本装置は 2 台の呼吸チャンバー、3 台の三方電磁弁、2 台のダイヤフラムポンプ (DM-747H-ST, 最大吐出流量 16 l/分, 榎本マイクロポンプ製作所, 東京)、2 台のマスフローコントローラー (MFC1 と 2) (いずれも 5896 形電源ユニットと 5850E 型本体の組み合わせ, 日本エマソン・ブルックス事業部, 東京)、3 台の流量計 (6-1350AV, 日本エマソン・ブルックス事業部, 東京)、1 台の電子除湿機 (ECU) (DH-206, 露点温度 4°C に設定, 小松エレクトロニクス, 神奈川)、1 台のガス分析計 (NGA2000 プラットフォームと MLT 分析計の組み合わせ, O<sub>2</sub> 分析計と CO<sub>2</sub> 分析計を内蔵する, 日本エマソン・ローズマウント, 東京) から構成された。

**1. 1. 呼吸チャンバー**：呼吸チャンバーは透明アクリル製 (6 mm 厚) で、大きさは内寸で幅 44 cm, 奥行き 27 cm, 高さ 50 cm (容積 59.4 l) とした。ニワトリの出し入れを容易にするために、このチャンバーにはニワトリを個体ケージ (幅 34 cm, 奥行き 23 cm, 高さ 47 cm, ただし金網の床を地面から 7

受理日 2005年10月27日

採択日 2005年12月6日

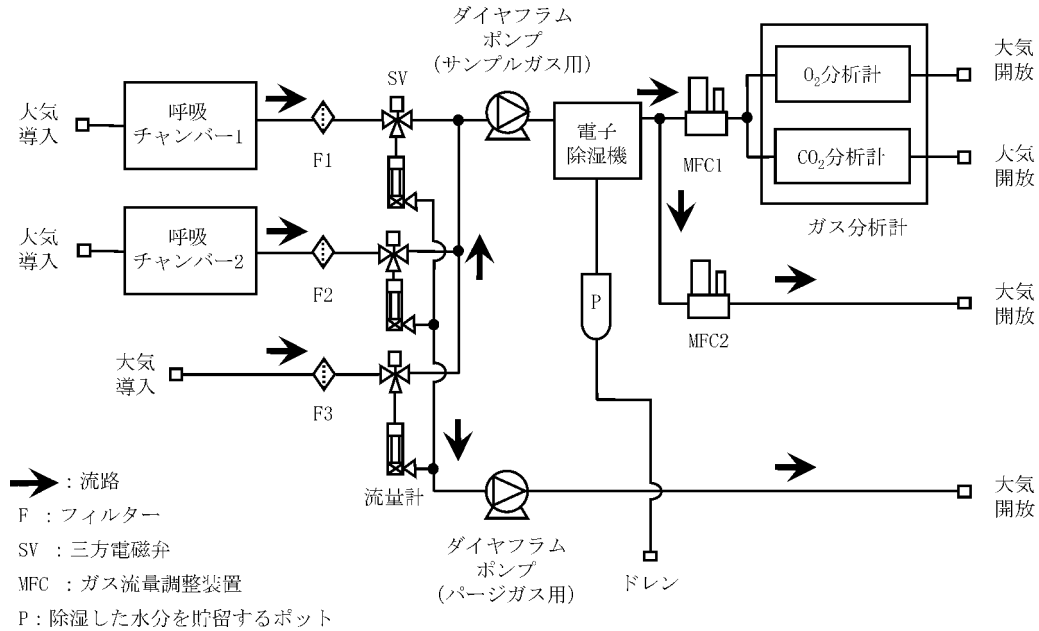


図1. 間接熱量測定装置の概略

cm のところに設置したのでニトリが利用できる高さは40cm) に入れたまま収容することにした。このケージのサイズは体重2 kg 以下のニトリを収容することを前提にして決定した。蓋は呼吸チャンバー上面の全面積とし、蓋と本体とが接する部分には気密性を保つために発泡シリコンゴム製のガスケットを設置した。蓋と本体とはねじ式クランプで6箇所を締め付けて固定するようにした。呼吸チャンバー内の空気の滞留を防ぐために壁面に攪拌翼(アルミニウム製4枚羽ファン、直径20cm)を取り付け、電動モーターで1分間に約200回転させた。このチャンバー内にニトリを収容すると内部の湿度が極めて高くなる場合があり、このときニトリの羽毛が湿るとともに呼吸チャンバーから排気される空気を電子除湿機で露点温度4°Cまで除湿し得なかった。この場合、ニトリに悪影響を与えると同時にガス分析計の測定値に影響を与えられたことから、チャンバーの壁面に屈曲した銅管(外径6 mm、長さ150cm)を設置し、その管に2°Cに冷却したポリエチレングリコール溶液を流して、呼吸チャンバー内の水蒸気を銅管に結露させてある程度除去した。これによって、ニトリを収容しても呼吸チャンバー内の湿度は常に70%以下に保たれた。呼吸チャンバーは気温調節可能な恒温室内に設置し、恒温室の気温を変化させることによってチャンバー内の気温を調節した。

1. 2. 通気系: 本装置の空気の流れを図1の矢印で示した。ガス分析計は呼吸チャンバー1と2から

の排気および大気の3種類を測定する必要があるが、ガス分析計はO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の分析計を各1台しか持たないため、ガスの流路を切り替えて測定するようにした。すなわち、3台の三方電磁弁とその開閉を制御するパーソナルコンピューターによって、3種類のガスのうち1つをガス分析計に導入し(サンプルガス)、残余の2つを大気へ放出(パージガス)するようにした。測定するガスが2種類以下の場合を考慮して、任意の2種類のガスを交互に、および任意の1種類のガスを連続的にガス分析計に導入することも可能とした。流路切替の時間間隔、すなわちガス分析計へのサンプルガスの導入時間は任意に設定できるようにした。ガス分析計への通気量は1 l/分に指定されているので、これはMFC1を用いて調節した。したがって、呼吸チャンバーの通気量が1 l/分のときはMFC1だけを作動させ、それ以上に通気させるときはMFC2を作動させて任意の量を大気へ排出した。サンプルガスとパージガスの通気量を同じにするために、パージガスの流路に流量計を設置して通気量を制御した。この理由は、もし両者の通気量が同じでない場合、呼吸チャンバーからの排気がガス分析計に導入されている時と大気へ排出されている時とで、呼吸チャンバー内の空気置換速度が異なるからである。パージガスの通気量を正確に調整するために、流量計はマスフローメーター(CMQ 0020, 株山武, 神奈川)で校正した。以上、本装置の通気系を要約すると、サンプルガスの場合、呼吸チャンバー—電磁弁(流路切替装置)—

サンプルポンプ—電子除湿機—MFC1を経てガス分析計に導入され（一部はMFC2を通過してから大気へと放出され）、一方パージガスは呼吸チャンバー—流量計—パージポンプを経て大気へと放出されるという流れになる。以上の通気系の各装置は軟質ナイロンチューブ（外径6.35mm，内径4.57mm，㈱ニッタ・ムアー，大阪）で接続した。

1. 3. ガス分析計：サンプルガス中のO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>濃度はそれぞれガス分析計に内蔵された磁気式O<sub>2</sub>分析計と赤外線CO<sub>2</sub>分析計によって測定した。ガス濃度の分析において大気圧の影響を排除するためにオプションの大気圧補正装置を組み込んだ。室温の影響を受けないように、この分析計の検出部をオプションのヒーターで加温した。

## 2. 計算

ガス分析計によって測定されたサンプルガス中のO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>濃度に関するデータはコンピューターへ送信され、任意の時間ごとに表計算ソフト（Excel 2000, Microsoft）ワークシート上に保存されるように設定した。このO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>濃度から、測定期間中のO<sub>2</sub>消費量とCO<sub>2</sub>産生量を算出するために以下の計算式を使用した。この計算式はLundy<sup>8)</sup>とMacLeod<sup>10)</sup>の装置において使用されているものであり（MacLeod私信）、O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の濃度からO<sub>2</sub>消費量とCO<sub>2</sub>産生量をほぼリアルタイムで計算できることが示されている。なお、本実験では気体の体積は0℃，1気圧状態における体積として計算した。

2. 1. O<sub>2</sub>消費量の算出：O<sub>2</sub>産生量は以下の計算式で算出した。

$$V'O_{2,n} = V'O_{2,F,n} - V'O_{2,S,n} + V'O_{2,C,(n-1)} - V'O_{2,C,n}$$

$V'O_{2,n}$  = n分間に消費されるO<sub>2</sub>量

$V'O_{2,F,n}$  = n分間に呼吸チャンバーに流入するO<sub>2</sub>量。

$V'O_{2,S,n}$  = n分間に呼吸チャンバーから流出するO<sub>2</sub>量

$V'O_{2,C,(n-1)}$  = 測定開始時，呼吸チャンバー内に存在するO<sub>2</sub>量

$V'O_{2,C,n}$  = 測定終了時，呼吸チャンバー内に残存するO<sub>2</sub>量

2. 2. CO<sub>2</sub>産生量の算出：CO<sub>2</sub>産生量は以下の計算式で算出した。

$$V'CO_{2,n} = V'CO_{2,S,n} - V'CO_{2,F,n} + V'CO_{2,C,n} - V'CO_{2,C,(n-1)}$$

$V'CO_{2,n}$  = n分間に産生されるCO<sub>2</sub>量

$V'CO_{2,S,n}$  = n分間に呼吸チャンバーから流出する

CO<sub>2</sub>量

$V'CO_{2,F,n}$  = n分間に呼吸チャンバーに流入するCO<sub>2</sub>量

$V'CO_{2,C,n}$  = 測定終了時，呼吸チャンバー内に残存するCO<sub>2</sub>量

$V'CO_{2,C,(n-1)}$  = 測定開始時，呼吸チャンバー内に存在するCO<sub>2</sub>量

2. 3. HPの算出：HPの算出には以下の計算式<sup>13)</sup>を用いた。

$$HP(kJ) = 16.18 \times O_2 \text{消費量}(l) + 5.02 \times CO_2 \text{産生量}(l)$$

## 3. O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の濃度変化に対する装置の応答速度およびO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の回収率の測定

CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>混合ガス（5.26% CO<sub>2</sub>と94.74% N<sub>2</sub>の混合ガス，以下混合ガスという）はCO<sub>2</sub>を含むがO<sub>2</sub>を含まないので，これを呼吸チャンバー内に導入するとO<sub>2</sub>濃度の減少とCO<sub>2</sub>濃度の増加が生じ，呼吸チャンバー内で動物が呼吸したときと同じ状況となる。そこで，図1に示した呼吸チャンバーの1つに混合ガスを注入してO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の濃度変化に対する本装置の応答速度と回収率を調査した。

3. 1. 応答速度の測定：呼吸チャンバーに外気を通気させておき，数値が安定した時点で，外気の通気を遮断すると同時に混合ガス10.5lを呼吸チャンバー内に導入した。この混合ガスの全量を2.3分かけて導入し終わった直後に，再び外気を通気させた。この一連の操作の間，通気量はすべて4.5l/分とし，O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>濃度は混合ガス注入開始時から1分間隔で34分間測定した。この操作は10回繰り返した。

3. 2. 回収率：O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の回収率測定は上記の応答速度測定で得られた数値を以下の式に代入して算出した。

$$O_2 \text{回収率}(\%) = (O_2 \text{消費量}(l) \div O_2 \text{除去量}(l)) \times 100$$

O<sub>2</sub>消費量(l) = 実測したO<sub>2</sub>消費量(l) (計算式は前述)

O<sub>2</sub>除去量(l) = 混合ガスの通気によって呼吸チャンバーから除去されたO<sub>2</sub>量

$$CO_2 \text{回収率}(\%) = (CO_2 \text{産生量}(l) \div CO_2 \text{導入量}(l)) \times 100$$

CO<sub>2</sub>産生量(l) = 実測したCO<sub>2</sub>産生量(l) (計算式は前述)

CO<sub>2</sub>導入量(l) = 混合ガスの通気によって呼吸チャンバーに導入されたCO<sub>2</sub>量

## 4. ニワトリを用いた実験

装置の応答速度と回収率を測定した後、実際にニワトリを用いて絶食時と自由摂食時の HP および給餌後の HP 変化パターンを測定した。常法で育成した21日齢のプロイラーを環境調節室 ( $24 \pm 1^\circ\text{C}$ , 23 L:1D) 内のケージに収容して少なくとも27日齢まで環境に順応させ (順応期間), その後28日齢から32日齢になった時点で HP 測定に供した。このように測定日の日齢には5日の幅があったが, 測定日における体重はほぼ均しくなるようにした。

絶食時の HP は以下のように測定した。すなわち, 順応期間の最後の36時間絶食させたニワトリを呼吸チャンバーに収容して, 絶食状態のまま24時間にわたって HP を測定した。自由摂食時の HP は以下のように測定した。すなわち, 順応期間の最後の12時間絶食させたニワトリを呼吸チャンバーに収容して, その後不断給餌で24時間にわたって HP を測定した。ニワトリを12時間絶食させた理由は, HP 測定前に短時間絶食させると HP 測定期間中に必要量の飼料を残さず摂取するからである。またニワトリを12時間程度絶食させても絶食状態にはならない。給餌後の HP 変化パターンは以下のように測定した。すなわち, 順応期間の最後の36時間絶食させたニワトリを呼吸チャンバーに収容して, チューブ給餌法によって代謝体重当たり23gの飼料を与え, 18時間にわたって HP を測定した。以上の測定条件はいずれの場合も, 測定間隔15分, 通気量4.5 l/分, 気温  $24 \pm 1^\circ\text{C}$ , 明暗周期23L:1Dとした。全実験期間を通じて, 飼料はすべてプロイラー後期用飼料

(CP18.5%, ME13.6MJ/kg) とし, 絶食, 摂食にかかわらず水は常に給与した。

### 結果および考察

**O<sub>2</sub>の濃度変化に対する装置の応答速度:** 図2は10回反復して行なった実験の1例であるが, いずれの場合もパターンはこれとほとんど同じであった。混合ガスはO<sub>2</sub>を含まないので, これを呼吸チャンバー内に注入したときO<sub>2</sub>濃度が減少した。O<sub>2</sub>濃度は, 混合ガス注入開始時から3分目まで急激に, 3分目から4分目まではわずかに減少し, その後緩やかな増加に転じたが, 実験終了時 (混合ガス注入開始時から34分目) においても大気中のO<sub>2</sub>濃度にまで回復しなかった。この濃度変化に基づいてO<sub>2</sub>消費量を求めるとき, 従来の方法, すなわち入・排気O<sub>2</sub>濃度差と換気量の積から求める方法では, O<sub>2</sub>濃度パターンを上下反転したパターンが得られるだけである。O<sub>2</sub>消費量は理論的には混合ガス注入中, すなわち0分目から2.3分目の間だけ増加を示す必要があることから, 従来 of 計算方法ではきわめて遅い応答速度しか得られないことは明らかである。そこで, 前述の計算式を使用して計算したところ, O<sub>2</sub>消費量は混合ガス注入開始時から1分目まで著しく急激に, 1分目から2分目まで急激に増加したが, 2分目と3分目はほぼ同じ値で, 3分目から急激に減少して5分目にほぼ0になり, その後も実験終了時までほぼ0のままであった。このように, O<sub>2</sub>消

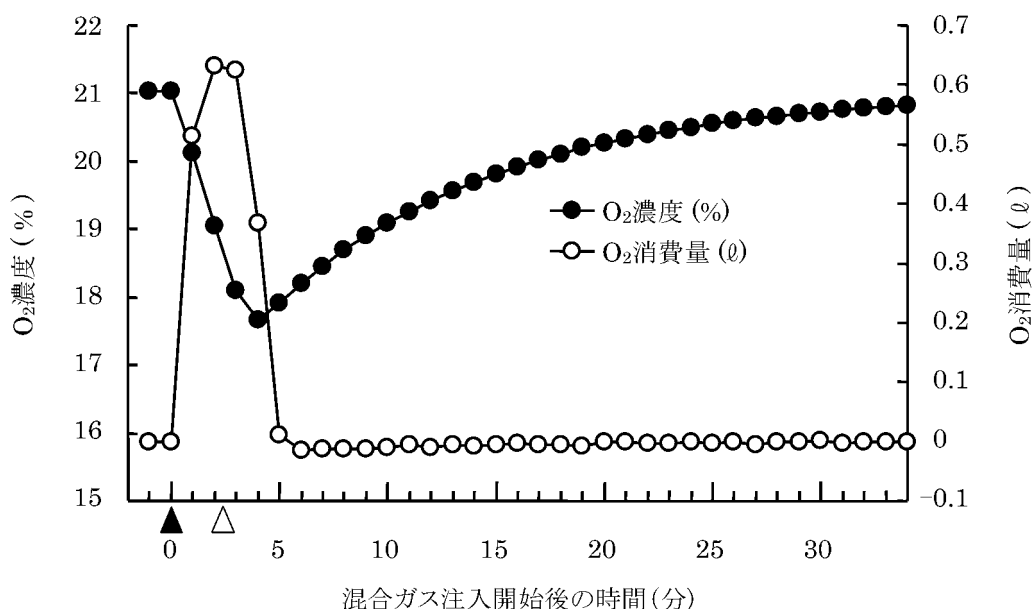


図2. O<sub>2</sub>濃度とO<sub>2</sub>消費量の関係

▲ 混合ガス注入開始, △ 混合ガス注入終了

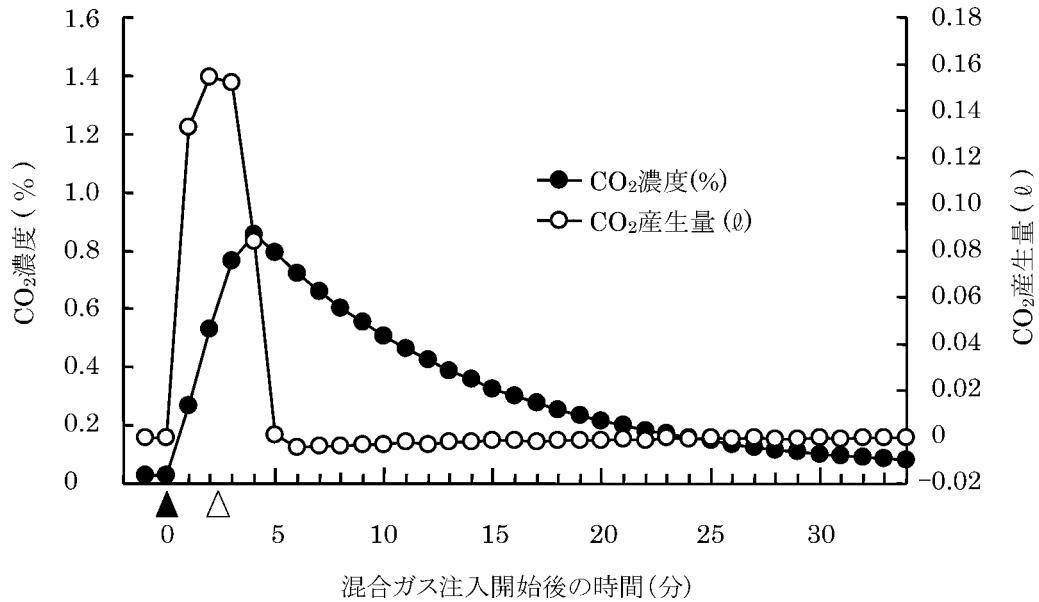


図3. CO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>産生量の関係

▲ 混合ガス注入開始, △ 混合ガス注入終了

費量は理論値の2.3分目ではなく5分目に0になり、2分程度の遅れがあるものの、この式の使用によって本装置はO<sub>2</sub>の濃度変化に対して良好な応答速度を示すことが明らかになった。

**CO<sub>2</sub>の濃度変化に対する装置の応答性：**図3は10回反復して行なった実験の1例であるが、いずれの場合もパターンはこれとほとんど同じであった。混合ガスはCO<sub>2</sub>を含むのでこれを呼吸チャンパー内に注入したとき、CO<sub>2</sub>濃度が増加した。CO<sub>2</sub>濃度は、混合ガス注入直後から3分目まで急激に、3分目から4分目まではわずかに増加し、その後緩やかな減少に転じたが、実験終了時（混合ガス注入開始時から34分目）においても大気中のCO<sub>2</sub>濃度にまで低下しなかった。O<sub>2</sub>消費量の場合と同様に、CO<sub>2</sub>産生量を入・排気CO<sub>2</sub>濃度差と換気量の積から求めると応答はきわめて遅いが、前述の計算式を用いると2分程度遅れるだけで、きわめて良好な応答速度を示した。したがって、本装置はCO<sub>2</sub>の濃度変化に対して良好な応答速度を示すことが明らかになった。

O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の濃度変化に対する応答の遅れは、ニワトリにおけるHPの経時的変化においても同様の遅れが生じることを示している。しかしながら、過

去の報告ではニワトリにおけるHPの経時的変化は30分<sup>1)</sup>、45分<sup>12)</sup>、1時間<sup>5,15)</sup>、約1時間<sup>9)</sup>の間隔で測定されている。中には11分<sup>7)</sup>や12分<sup>3)</sup>の間隔で測定された例もあるが、このように短い間隔で測定しても新たな情報は得られていない。したがって、本装置の2分程度の応答の遅れはニワトリのHP測定においてほとんど影響しないと判断された。

**回収試験：**応答試験で得られた数値を用いてO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の回収率を求めたところ、前者は99.2%で問題のない数値であったが、後者は96.2%とやや低かった（表1）。両者の回収率に差異が生じる原因については明らかでないが、O<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の測定において分析計以外は全く機器を使用しているため、分析計におけるO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の測定精度の差異による可能性が高い。このようにCO<sub>2</sub>回収率はやや低かったが、この程度の測定誤差はニワトリのHPの算出においてほとんど影響しない。なぜなら、Romijn and Lokhorst<sup>13)</sup>の計算式を用いるとCO<sub>2</sub>産生量測定誤差の影響は少なくなるからである。例えば、呼吸商が1のときCO<sub>2</sub>産生量が4%低く見積もられても、HPは0.95%しか低く見積もられない。次に、回収したO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>量からRQを求めたところ0.243であ

表1. チャンパーに混合ガスを注入したときのO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の回収率およびRQ

| O <sub>2</sub> 回収率 (%) | CO <sub>2</sub> 回収率 (%) | RQ          |
|------------------------|-------------------------|-------------|
| 99.2±0.5               | 96.2±0.3                | 0.243±0.001 |

数値は10回の平均値±標準誤差

表2. 約4週齢の絶食プロイラーにおけるHPとRQ

| 日・週齢   | 環境温度<br>(°C) | HP<br>(kJ/kgBW <sup>0.75</sup> /d) | RQ        | 出典・その他                                 |
|--------|--------------|------------------------------------|-----------|--|
| 28-32日 | 24           | 532±16                             | 0.76±0.01 | 本実験, 10羽の平均値±標準誤差                      |
| 5週     | 25           | 512                                | —         | Geraert ら <sup>4)</sup> , 遺伝的に痩せ型のニワトリ |
| 5週     | 25           | 543                                | —         | Geraert ら <sup>4)</sup> , 遺伝的に肥満型のニワトリ |
| 29-36日 | 20           | 582                                | 0.72      | MacLeod <sup>11)</sup> , 絶食前は低蛋白質飼料を給与 |
| 29-36日 | 20           | 608                                | 0.72      | MacLeod <sup>11)</sup> , 絶食前は高蛋白質飼料を給与 |
| 33日    | 22           | 520                                | —         | Koh と MacLeod <sup>6)</sup> , 図から推定    |
| 30-32日 | 24           | 528                                | —         | Koh と MacLeod <sup>7)</sup>            |
| 4週     | 22           | 685                                | 0.72-0.79 | Buyse ら <sup>2)</sup> , 高飼料効率系統のニワトリ   |
| 4週     | 22           | 722                                | 0.72-0.79 | Buyse ら <sup>2)</sup> , 高成長速度系統のニワトリ   |

表3. 約4週齢の摂食プロイラーにおけるHPとRQ

| 日・週齢   | 環境温度<br>(°C) | HP<br>(kJ/kgBW <sup>0.75</sup> /d) | RQ        | 飼料のCP<br>(%) | 飼料のME<br>(MJ/kg) | 出典・その他                                 |
|--------|--------------|------------------------------------|-----------|--------------|------------------|--|
| 28-32日 | 24           | 901±64                             | 0.97±0.01 | 19.0         | 13.6             | 本実験, 4羽の平均値±標準誤差                       |
| 5週     | 25           | 780                                | 1.01      | 19.5         | 11.5             | Geraert ら <sup>4)</sup> , 遺伝的に痩せ型のニワトリ |
| 5週     | 25           | 778                                | 1.01      | 19.5         | 11.5             | Geraert ら <sup>4)</sup> , 遺伝的に肥満型のニワトリ |
| 29-36日 | 20           | 921                                | 0.95      | 21.0         | 12.1             | MacLeod <sup>11)</sup>                 |
| 29-36日 | 20           | 871                                | 0.88      | 21.1         | 13.4             | MacLeod <sup>11)</sup>                 |
| 4週     | 22           | 1058                               | 0.97-1.07 | 22.5         | 13.6             | Buyse ら <sup>2)</sup> , 高飼料効率系統のニワトリ   |
| 4週     | 22           | 1197                               | 0.97-1.07 | 22.5         | 13.6             | Buyse ら <sup>2)</sup> , 高成長速度系統のニワトリ   |

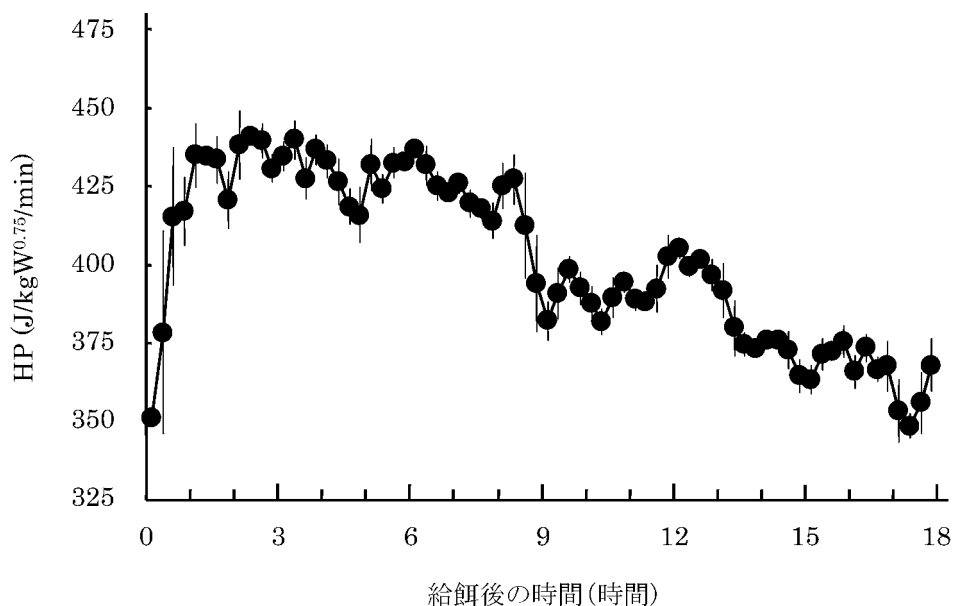


図4. 飼料をチューブ給餌したプロイラーにおけるHPの経時変化  
各点は3点の移動平均値 (n = 4羽), 縦線は標準誤差

り, これは理論値の0.250に近似した値であった。  
**動物試験:** 本実験においてプロイラー (28-32日齢) の絶食HPは532kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/d, RQは0.76であった (表2)。本実験とほぼ同条件で行われた過去の研究では, 絶食HPは512kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/dから722kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/dまで幅があったものの, 8例

中6例が512-608kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/dの範囲内であった (表2)。このとき, RQは必ずしも絶食時の理論値である0.70ではなく, 0.68から0.79まで幅があった。本実験で得られた絶食時のHPとRQの数値はいずれも過去に報告された数値の範囲内であったことから, これらは妥当な数値と判断された。

一方、本実験でブロイラーに自由摂取法で飼料を摂取させたときの HP は901kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/d, RQ は0.97であった(表3)。本実験とほぼ同条件で行われた過去の研究では数値のばらつきが大きく、778kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/d から1,197kJ/kgBW<sup>0.75</sup>/d とかなりの幅があった。この理由は明らかでないが、使用したニワトリの系統や飼料栄養素の多少の相違による可能性がある。本実験で得られた HP は MacLeod<sup>11)</sup> の値に類似しており、RQ は理論値の1.0に近い値であったことから、これらも妥当な数値と判断された。

自由摂取量の23%をチューブ給餌したブロイラーにおける給餌後の HP 増加パターンを図4に示した。HP は給餌後1時間目まで急速に増加し、その後6時間目まで一定の高さを保って徐々に低下し始め、17時間目以降は給餌前の値に戻った。これは、Koh and MacLeod<sup>7)</sup> が報告したパターンと類似していた。以上の動物実験の結果から、本装置は動物実験に使用可能であると考えられた。

以上要約すると、本研究で作製した間接熱量測定装置はニワトリの O<sub>2</sub>消費量と CO<sub>2</sub>産生量を実用に耐える反応速度と精度で測定し、HP を求め得ると判断された。

## 謝 辞

本研究の遂行において、英国ロスリン研究所の MG MacLeod 主任研究員にご協力いただいた。また、本研究は部分的に日本学術振興会科学研究費基盤研究(C(2)14560232)の補助を受けた。記して謝意を表す。

## 引用文献

- 1) Buyse, J., Adelsohn, D. S., Decuyper, E. and Scanes, C.G.: Diurnal-nocturnal changes in food intake, gut storage of ingesta, food transit time and metabolism in growing broiler chickens: a model for temporal control of energy balance, *British Poultry Science*, **34**, 699-709, 1993.
- 2) Buyse, J., Michels, H., Vloeberghs, J., Saevels, P., Aerts, J.M., Ducro, B., Berckmans, D. and Decuyper, E.: Energy and protein metabolism between 3 and 6 weeks of age of male broiler chickens selected for growth rate or for improved food efficiency, *British Poultry Science*, **39**, 264-272, 1998.
- 3) Gabarrou, J.F., Geraert, P.A., Francois, N., Guillaumin, S., Picard, M. and Bordas, A.: Energy balance of laying hens selected on residual food consumption. *British Poultry Science*, **39**, 79-89, 1998.
- 4) Geraert, P.A., MacLeod, M.G. and Leclercq, B.: Energy metabolism in genetically fat and lean chickens: Diet- and cold-induced thermogenesis. *Journal of Nutrition*, **118**, 1232-1239, 1988.
- 5) Koh, K. and MacLeod, M.G.: Circadian variation in the heat production and respiratory quotient in growing broilers maintained at different food intakes and ambient temperatures, *British Poultry Science*, **40**, 353-356, 1999.
- 6) Koh, K. and MacLeod, M.G.: Effects of ambient temperature on heat increment of feeding and energy retention in growing broilers maintained at different food intakes, *British Poultry Science*, **40**, 511-516, 1999.
- 7) Koh, K. and MacLeod, M.G.: Effects of food intake and temperature on the pattern of heat production in growing broilers fed by crop intubation, *Proceedings of 21st World Poultry Congress (Montreal, Canada)*, CD-ROM, 2000.
- 8) Lundy, H., MacLeod, M.G. and Jewitt, T.R.: An automated multi-calorimeter system: preliminary experiments on laying hens, *British Poultry Science*, **19**, 173-186, 1978.
- 9) MacLeod, M.G., Tullett, S.G. and Jewitt, T.R.: Circadian variation in the metabolic rate of growing chickens and laying hens of a broiler strain, *British Poultry Science*, **21**, 155-159, 1980.
- 10) MacLeod, M.G., Lundy, H. and Jewitt, T.R.: Heat production by the mature male turkey (*Meleagris gallopavo*): preliminary measurements in an automated, indirect, open-circuit multi-calorimeter system, *British Poultry Science*, **26**, 325-333, 1985.
- 11) MacLeod, M.G.: Energy and nitrogen intake, expenditure and retention at 20 in growing fowl given diets with a wide range of energy and protein contents, *British Journal of Nutrition*, **64**, 625-637, 1990.
- 12) 西堀正英・李 玉芝・藤田正範・伊藤敏男・山本禎紀: 23°Cおよび35°C恒温環境下における産卵鶏の熱産生量, 心拍数, 呼吸数および体温の日内変動について, *日本畜産学会報*, **60**, 529-533, 1989.
- 13) Romijn, C. and Lokhorst, W.: Some aspects of energy metabolism in birds, in *Energy Metabolism of Farm Animals*, EAAP Publication No. 10, 1961.
- 14) 菅原邦生・久保辰雄: 鶏用開放型自動呼吸試験装

置, 日本畜産学会報, **62**, 135-141, 1991.  
15) Zhou, W.T. and Yamamoto, S. : Effects of environmental temperature and heat production due to

food intake on abdominal temperature, shank skin temperature and respiration rate of broilers, *British Poultry Science*, **38**, 107-114, 1997.

---

## **An Indirect, Open-circuit Calorimeter System for Studies on the Energy Metabolism of Chickens**

Katsuki KOH, Yuji OHSHIMA, Kurumi TOMITA and Yutaka KARASAWA

Department of Food Production Science,  
Faculty of Agriculture, Shinshu University

### **Summary**

1. An indirect, open-circuit calorimeter system which can measure not only daily heat production (HP), but also rapid changes of HP after feeding, was constructed for studies on the energy metabolism of growing or adult chickens weighing less than 2kg body weight. After confirming the performance of the system, biological experiments using growing broilers were performed.

2. Responses to changes of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration in the air were delayed by only about 2 min and the recoveries of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> were 99.2% and 96.2%, respectively. The delays of responses and relatively low recovery of CO<sub>2</sub> were recognized to have little effect on measuring HP in chickens.

3. The results of biological experiments, such as HP and respiratory quotient in fasted and fed birds, and the HP pattern in tube-fed birds, were in accordance with those in previous studies performed under similar experimental condition.

4. In conclusion, the system constructed in the present study was sufficient for measuring daily HP and rapid changes of HP in chickens after feeding.

**Key word** : Indirect calorimeter, Energy metabolism, Chicken