

実験動物施設におけるデマンド・コントロール換気の実践研究

アズビル株式会社 ビルシステムカンパニー 石原 正也

1. はじめに

本稿の内容は、公益財団法人実験動物中央研究所、千代田テクノエース株式会社、アズビル株式会社、3社の共同研究に基づいたものである。

(1) 省エネルギーの必要性

実験動物施設は通常の事務所ビルや商業ビルと比較してエネルギー使用量が非常に多く、施設のランニングコストが高い、という共通の課題がある。そして、施設で使用されるエネルギーの大部分が空調に関する用途であることが知られている^{1) 2)}。実験動物施設が多く空調エネルギーを使用する理由は主に以下の3点である。①運転時間が長い(24時間運転)。②室内環境(温度、湿度、清浄度)の要件が厳格である。③汚染物質の速やかな希釈のため多くの換気が行われている。多くのエネルギーを使用し続けることは、研究施設の経営を圧迫するだけでなく、二酸化炭素排出量の削減という社会的責任にも反することになるため、実験動物施設の省エネルギーは重要な課題として広く認識されている。

(2) 換気回数に関する指針

現在、多くの動物飼育室の換気回数は、主要なガイドラインに記載された推奨値に基づいて設計・施工・運用されている。従来のガイドラインでは、比較的多めの換気回数が推奨値として記載されてきたが、その根拠は明示されて

こなかった。恐らくは臭気やアレルギー対策のために、「少ないよりは多い方が良いだろう」という良心的な配慮がなされた結果、多めの換気回数が記載されてものと推察される。しかし近年では、特に小動物については一方向気流ラックや換気式給排気ラックなどが普及してきていることもあり、「動物の飼育環境が許されるレベルを満たしているならば、必ずしも飼育室の換気回数を多くしておく必要は無いのでは？」という見解も提唱されるようになってきた。2007年の日本建築学会のガイドライン³⁾、および2011年のアメリカ National Research Council (以下NRC)のガイドライン⁴⁾では、これら飼育ラックの給排気方式を考慮し、さらに従来の換気回数推奨値に対する反省も踏まえて、闇雲に多くの換気回数とすることに警鐘を鳴らすような記述に変化してきている。

(3) デマンド・コントロール換気

従来、実験動物施設(特に飼育室)の空調では、動物収容数や室内での作業状況に関わらず、常に一定風量で空調をおこなう定風量システムが用いられてきた。しかし2011年に改定されたNRCのガイドラインでは、「固定風量(CAV)システムが最も一般的に用いられてきたが、熱負荷やその他の変数に応じて適切な換気回数を設定できる可変風量(VAV)システムは、設計や運用の観点で

有利である。これらのシステムは柔軟性と省エネルギーという点で大きな有利性をもたらす。」と記載されており、換気回数を柔軟に変更できるVAVシステムを推奨する内容となっている。そして、VAVシステムの制御方式としては、「デマンド・コントロール換気(Demand Control Ventilation: 以下DCV)」と呼ばれる手法が、動物の飼育環境と人のアレルギー対策の両方を考慮しながら省エネルギーを実現する手法として期待を集めている。これは、飼育室内の状況(室内の空気環境、動物収容数、ケージ交換や清掃などの作業状況)に応じて、その時々々の要求を過不足なく満たすように、換気回数を柔軟に変更していく手法である。

(4) 本研究の目的

DCVのなかでも、飼育室内の空気環境を連続的に計測して、空気環境の計測値に基づいて換気回数を自動的に制御する手法は、人の手を煩わさずに最適な制御ができるという意味で魅力的である。空気環境の計測値に基づくDCVは、近年米国を中心に採用され始めているが、著者の知る限り日本国内での実施事例はまだ公表されていない。また、NRCのガイドラインには、DCVの概念は記載されているものの、具体的な手法については何も記載されていない。室内の空気環境(一般的には汚染物質の空気中濃度)の計測

方法、室内空気環境の良否判定基準、換気回数を増減させるVAVの制御ロジック、などDCVの実施に必要な事柄が全くの未知数であった。そこで、空気環境の計測値に基づくDCVの具体的実施手法の確立を目的として、本共同研究プロジェクトは発足した。

(5) 対象施設

公益財団法人実験動物中央研究所(以下、本施設)では主にマウスとマーモセットを飼育しているが、本共同研究ではそれぞれの飼育室から各一部屋を選択して一連の実践研究の対象とした。図1に各動物飼育室内の写真、表1に各動物飼育室の設計仕様を示す。また、図2に空調システム概念図を示す。特徴は以下2点である。①飼育室へ供給される空気(SA)は55%の外気(OA)と45%の再循環空気(RA)の混合であり、水噴霧式の空調機によって1次温調および汚染物質の除去が図られている。なお、この再循環比率が常に一定となるように、給気と還気の風量計測に基づいてファンインバータの回転数が自動制御されている。②各飼育室はVAV装置によって、給気(SA = OA + RA)基準で6 ~ 15ACH(Air Changes per Hour:換気回数の単位、部屋の空気を1時間あたり何回入れ替えるかという指標で、通常は換気風量を部屋の体積で除して算出する)の範囲で換気回数を柔軟に設定できるようになっている。ただし、空調設備全体の容量としては、全ての飼育室を12ACHとした場合の風量を最大として選定されている。

2. 段階的なアプローチ

本共同研究では、空気環境の計測に基づくDCVの実践を合理的に進めるために、以下のような段階的なアプローチを採用した。(ア)事前準備:DCVの実践を見据えて飼育室の換気回数を柔軟に変更できる空調システムを構築した。(イ)相関調査:空気環境を連続的に計測する装置を設置して、換気回数と室内空気環境の相関を調査した。(ウ)DCVの実践:空気環境の計測に基づく換気回数の自動制御を実施した。なお、並行して動物および人に対する影響の調査も実施された。以降の節で順次詳細を述べる。

3. 事前準備

本施設には2011年2月の竣工当時から、DCVの実践を見据えて各飼育室の換気回数を自在に設定できる空調システムが導入されている。そして、換気回数

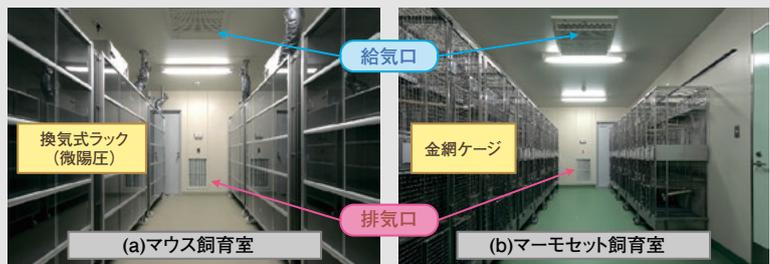


図1 マウスおよびマーモセット飼育室内の写真

表1 マウスおよびマーモセット飼育室の設計仕様

項目	マウス飼育室	マーモセット飼育室
温度	23℃	25℃
湿度	50%	50%
室圧	陽圧or陰圧(可変)	陽圧or陰圧(可変)
清浄度	ISOクラス7(at rest)	条件無し
飼育ケージ	換気式ラック(定風量)	金網ケージ

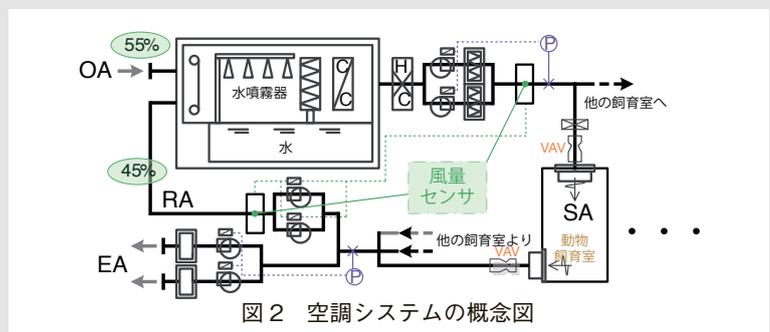


図2 空調システム概念図

を変更しても飼育室の性能要件として重要な、①均一な温度分布、②安定した室圧の維持、の2点が満足できるように空調システムの設計・施工が行われ、引渡前のコミッショニングにおいて実測での性能検証も実施された。なお、ここまでの取り組みは既に別誌にて出版されているため^{5,6)}、本稿では割愛する。

4. 相関調査

(1) 空気環境の計測システム

本研究で用いた空気環境の計測システムを図3に示す。本研究では、①二酸化炭素(CO₂)、②粒径2.5 μm以下の粉塵(PM_{2.5})、③総揮発性有機物質(TVOC)、の3種類の空気中濃度を計測して空気環境の指標とした。この計測システムは、測定箇所を専用チューブとポンプで微量吸引して吸引先を周期的に自動切替することで、1台のセンサーユニットで複数箇所の空気を連続的に計測するのが特徴である。マウスとマーモセット各飼育室での計測箇所の詳細を図4に示す。マウス飼育室では、部屋排気と換気式ラック(以下VCR)排気が合流していたため、室内空気とVCR排気を別々に計測した。マーモセット飼育室では、室内空気の代表指標として部屋排気を計測した。

(2) 事前計測

換気回数と空気環境の相関調査を実施する前に、まず本計測システムでの計測値の特徴を把握するために、約10か月間にわたる長期の事前計測を行った。換気回数は本施設の従来運用と同じ12ACHで固定しておき、飼育動物の匹数やケージ数、飼育室内での作業時刻と作業内容を記録してもらった。計測値の1週間トレンドグラフの一例を図5に示す。ここで特筆すべきはTVOCの計測値である。マウス飼育室VCR排気中のTVOC濃度は、毎週実施される定期的なケージ交換と同期した振る舞いを示しており、ケージから排出されるアンモニア等の汚染物質を計測できていることがわかる。しかし一方で、他の計測箇所のデータに影響を与えてしまうことも読み取れる。なお、これはチューブ共通部へのアンモニア成分の付着残留によるものであることが、別実験によって追加検証された。以上を踏まえて、以降の段階ではTVOC計測値を室内環境の指標から除外することにした。

(3) 換気回数と室内空気環境の相関調査

次に、換気回数を2週間ごとに、6、9、12、15ACHと手動で変更して、換気回数と空気環境の相関を調査した(ただし、マーモセット飼育室は空調設備の容量制約のため15ACHは実施できず)。換気回数以外の影響を排除するために、期間中の動物収容率は、マウス:50%、マーモセット:100%と、それぞれ一定の状態を保持してもらった。

計測データの分析結果を紹介する。各換気回数における二酸化炭素とPM2.5粉塵の空气中濃度の計測値から、給気と室内空気(マウス)、給気と部屋排気(マーモセット)の差分を計算し、その平均値と標準偏差を演算した結果を図6に示す。原理的には、給気と室内空気の空气中濃度の差分は、汚染物質が換気によって希釈されずに滞留している程度を反映するため、換気回数を減らすと濃度差分は増えると思われたが、図6はこの予想を裏付けている。次に、各換気回数におけるVCR排気の空气中濃度の、平均値と標準偏差を演算した結果を図7に示す。ここから、部屋の換気回数を変化させてもVCR排気中の濃度には有意な差が表れないこと

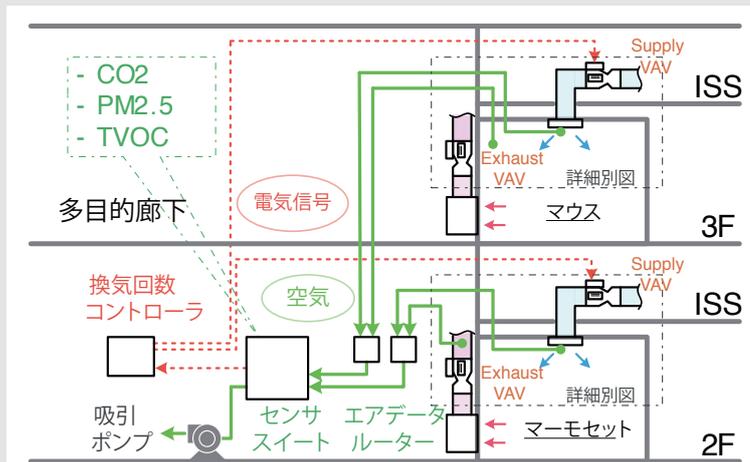


図3 空気環境計測システムの概略

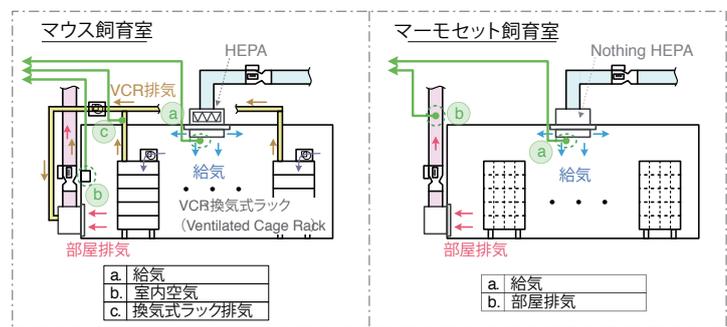


図4 各飼育室での計測箇所の詳細

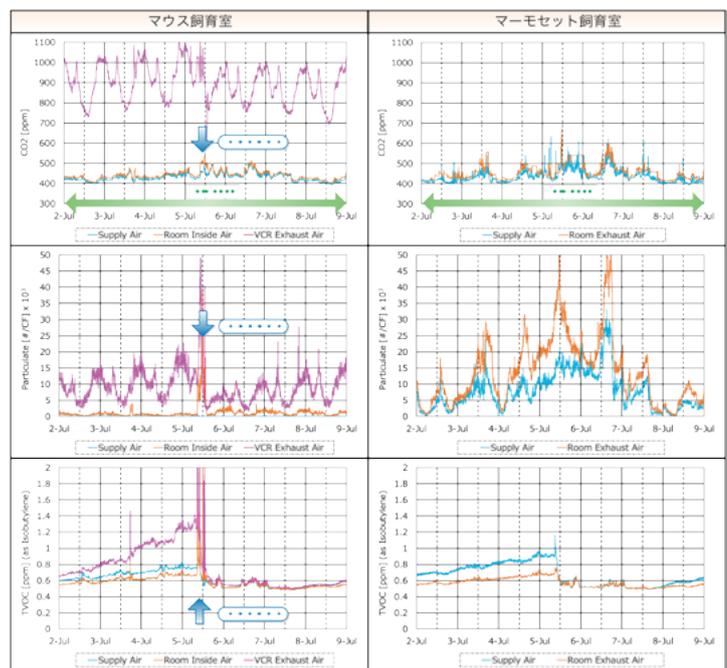


図5 空気環境計測値の1週間トレンドグラフ

が読み取れる。これは、部屋の換気回数がVCR内の飼育環境にほとんど影響を与えないことを示しており、VCRのような飼育器材を用いた場合には、従来の運用よりも部屋の換気回数を下げられる可能性があることを示唆している。

5. デマンド・コントロール換気の実践

(1) 制御ロジック

前節の関連調査を踏まえて、空気環境の計測値に基づくDCVの制御ロジックを開発した。図8にその概要を示す。なお、換気回数の設定範囲を6～12ACHとした理由は以下の通りである。上限(=12ACH)：本施設における従来の換気回数設定であったため。下限(=6ACH)：熱負荷計算による必要最小換気量であり、日本建築学会ガイドラインの下限値でもあるため。

(2) 空気環境の計測値に基づくDCVの実践

冒頭で述べたように、空気環境の計測値に基づくDCVは日本国内初の取り組みであり、制御結果を左右するPID制御の設定値(以下SP)をどうすべきか全くの手さぐり状態であった。そこで本研究では、2週間ごとにPID制御のSPを変更することで3種類のDCVモードをつくり、換気回数の振る舞いや省エネルギー効果について比較した。表2に各DCVモードでのPID制御のSPの算出方法を示す。ここで、 μ と σ はそれぞれ前節の「関連調査」の際に算出した、12ACH運転時における平均値と標準偏差である(図6参照)。

各DCVモードでの、二酸化炭素とPM2.5粉塵の濃度差分および換気回数の1週間トレンドグラフを図9に示す。「SP low」モードでは、換気回数が動物の概日リズム(生体リズム)に合わせて変化していることがわかる。すなわち、夜行性であるマウスの飼育室では夜間に、昼行性であるマーモセットの飼育室では昼間に、それぞれ換気回数が増加している。一方、「SP high」モードでは、ケージ交換や部屋清掃等の室内作業中に換気回数が著しく増加するものの、その他の時間帯ではほとんど増加していないことがわかる。次に、各DCVモードにおける換気回数の出現頻度(1分周期でデータ記録)と、換気風量の積算(従来の12ACH運転での積算値を100%とした場合の比率)を図10に示す。省エネルギー効果としては、「SP low」モードでは20.6～27.5%の換気風量削減、「SP high」モードでは47.5～48.7%の換気風量削減、という結果が得られた。

6. 動物および人に対する影響

手動での換気回数低減やDCVの実践を行っていた期

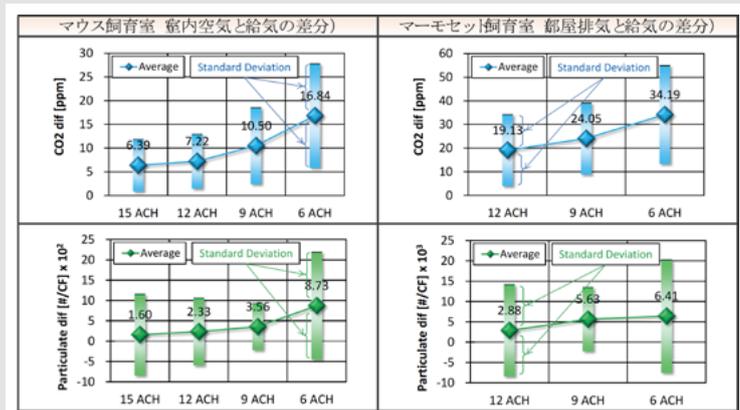


図6 空气中濃度差分の平均値と標準偏差(二酸化炭素とPM2.5粉塵)

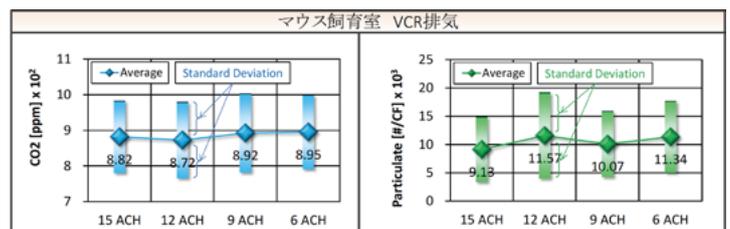


図7 VCR排気中濃度の平均値と標準偏差(二酸化炭素とPM2.5粉塵)

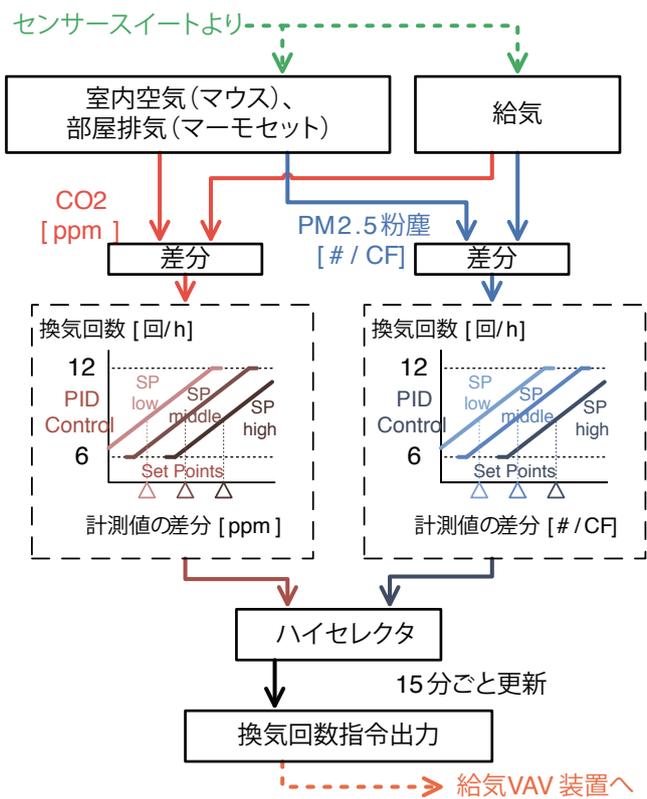


図8 DCVの制御ロジック概要

表2 DCVモードとPID制御の設定値(SP)

DCVモード	設定値(SP)	補足説明
SP low	$\mu + \sigma$	クリーンな空気環境をめざすモード
SP middle	$\mu + 3\sigma$	中間的なモード
SP high	$\mu + 5\sigma$	あまりクリーンでない空気環境を許容するモード

間、これと並行して対象飼育室のマウスについて、繁殖成績の調査(表3)と微生物モニタリング(表4)が実施さ

れた。繁殖成績については従来のアイソレータ飼育方式と比べて著しい変化は見られず、微生物モニタリングの結果は全て陰性であった。

また、人に対する影響の調査として、マウスとマーモセットの飼育管理者へヒヤリングを行った。マウス飼育室では「換気回数を減らした時には少しこもったような感じがしたが、著しい変化では無かった。」、マーモセット飼育室では「部屋には常に臭いがしみついており、ケージ洗浄直後に少し臭いが減るが数日で元に戻る。換気回数を減らした時には臭いが減っている時間が少し短かったが、戻った後の臭いは普段通りだった。」との回答であり、両室とも「換気回数を減らしても室内環境の著しい悪化は無かった。」とのことであった。

7. 結論

実験動物施設における「空気環境の計測値に基づくDCV制御」について3社共同研究を実施した。段階的なアプローチによって、上記制御の一つの具体的な実施手法を示すことができた。DCVを適切に実施することによって、動物や人へ悪影響を与えずに、20～50%程度の換気風量削減を行える可能性があることが示唆された。

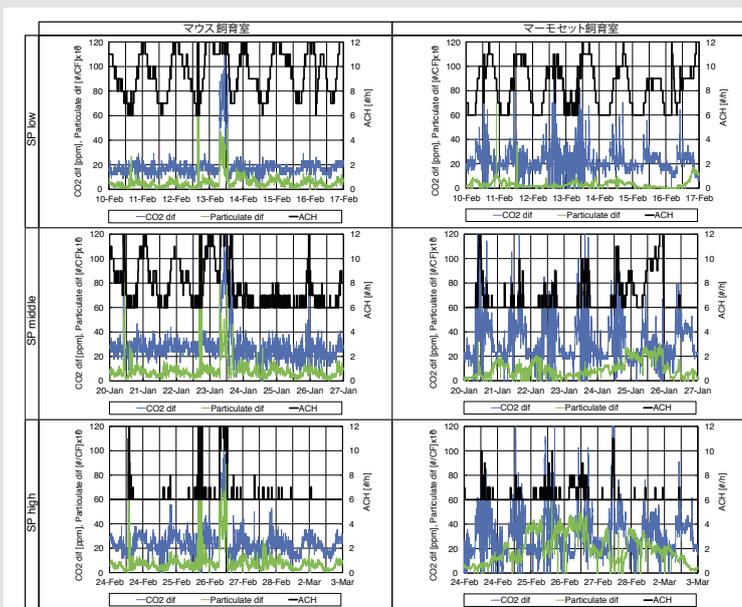


図9 各DCVモードでの二酸化炭素とPM2.5粉塵の濃度差分および換気回数

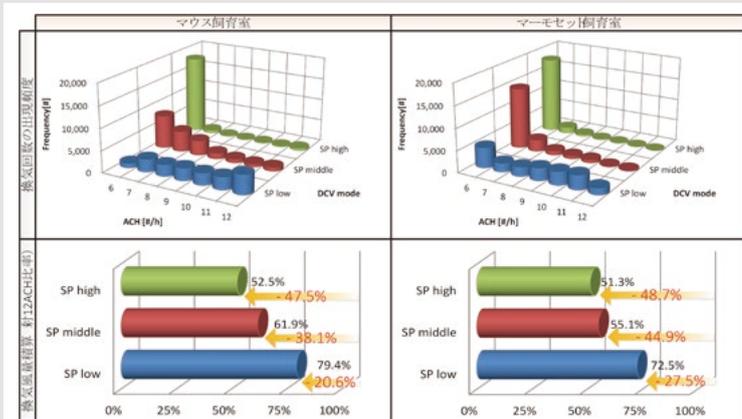


図10 各DCVモードでの換気回数の出現頻度と換気風量積算(対12ACH比率)

表3 マウスの繁殖成績比較 (オス1匹、メス1匹の連続交配)

系統	飼育方式	経産回数	♀親数(匹)	出産数(%)	産子数(平均)	離乳数(%)	生産指数
NOG/Jic	アイソレータ	4産合計	400	275(68.8)	2094(7.6)	2029(96.8)	5.1
	VCR(DCV対象)	4産合計	96	64(66.7)	456(7.1)	418(91.7)	4.3
IQI/Jic	アイソレータ	4産合計	652	432(66.3)	4949(12.2)	4549(91.9)	7.4
	VCR(DCV対象)	4産合計	160	101(63.1)	1061(10.5)	972(91.6)	6.1

表4 マウスの微生物モニタリング

期間・回数	2012年2月～2015年6月：合計40回実施
検査規格	標準規格：免疫不全動物コアセット 追加規格： <i>Bordetella hinzii</i> , <i>Corynebacterium bovis</i> , Murine norovirus 他
結果	全て陰性

【謝辞】

以下の本共同研究メンバー全員に深く感謝いたします(敬称略、五十音順)。公益財団法人実験動物中央研究所/伊藤豊志雄、井上貴史、岡原則夫、小倉智幸、何裕遥、齋藤宗雄、富山香代、日置恭司、水澤卓馬。千代田テクノエース株式会社/須藤芳彦、村木淳也。アズビル株式会社/木原正裕、五所尾康博、三枝隆晴、染谷博行、藤田俊二、藤田雄三

参考文献

- 吉田一也: 設備システムの計画例, 実験動物と環境, Vol.18 (1), 78-82 (2010)
- 原田光朗: 空調省エネの新動向と実験動物施設への適用効果, 実験動物と環境, 21(1), 1-8 (2013)
- 日本建築学会編: 最新版ガイドライン実験動物施設の建築および設備 (2007)
- National Research Council of the National Academies: Guide for the Care and Use of Laboratory Animals 8th edition (2011)
- M. Ishihara and J. Muraki: The First Step of Demand Control Ventilation in an Animal Facility in Japan: Design and Commissioning for Flexible Ventilation (NY-14-C009), 2014 ASHRAE Winter Conference (2014)
- 村木淳也、石原正也: 実験動物施設におけるデマンド・コントロール・ベンチレーション, 空気清浄 Vol.52 No.1 (2014)

(日動協ホームページ、LABIO21カラーの資料の欄を参照)