

## 各報告書の要約

### ①アメリカにおける吸引通気式堆肥化技術・暑熱対策技術

#### 報告書要約

中久保委員

ふん尿処理と暑熱対策，日本酪農の懸案となって久しいこれらの課題について，アメリカでの取り組みを調査する機会をいただいた。アメリカの吸引通気式堆肥化およびフロリダ州の暑熱対策の現状を探り，日本酪農の発展に資する技術情報を調査した。

### 吸引通気式堆肥化

通常の強制通気式堆肥化では，発酵槽床面から積み上げられた堆肥に向けてブローアで空気を圧送して堆肥化を担う好気性菌の活性を高め，また乾燥を促進させるが，吸引通気式堆肥化では発酵槽上部から床面に向けて空気は負圧で吸い込まれる。通常の堆肥化では大気中に拡散させざるを得ないアンモニア等の悪臭や発酵熱を処理・利用しやすいことが吸引通気式堆肥化の特徴である。本調査では，Agrilab Technologies 社 (<http://agrilabtech.com/homepage>) とコンタクトをとることができ，同社の吸引通気式堆肥化システムを導入したニューハンプシャー州立大学付属有機酪農研究農場の視察をコーディネートしていただいた。

ニューハンプシャー州立大学付属有機酪農研究農場は，商用酪農家の所有地・施設を引き継ぐ形で 2005 年にスタートした有機酪農場である。

堆肥舎は幅 29m×奥行 15m×天井高さ 6.7m で，発酵槽は 8 つである。コンクリート床は 1.2m もの厚さの断熱材の上に施工されており，冷帯に属するニューハンプシャーのような気候での堆肥化では非常に効果が高いとのことである。牛ふん、敷料、残飼等からなる CN 比 30 の発酵原料が 1 日あたり 3.3ton 処理される。床には吸引通気用のパイプが発酵槽あたり 2 本，8 槽で計 16 本埋めこまれており，30cm ごとに直径 1.3cm の通気穴が開けられている。通気用パイプは 15cm ごとに直径 1.9cm の通気穴を開けた木板で通気管を覆い，さらに木板を高さ 30cm のウッドチップで覆うことで閉塞対策がなされていた。

堆肥舎への原料投入は非常に独創的な方法がとられていた。マニユアスプレッダを使用して，発酵原料を細かく叩き飛ばしながら積込むことで，フロントローダーでの積込みと比較して膨軟に堆肥原料を積込むことができ，吸引通気が容易になる。通常，4 週間の吸引通気の間には切返しは行わないとのことであった。

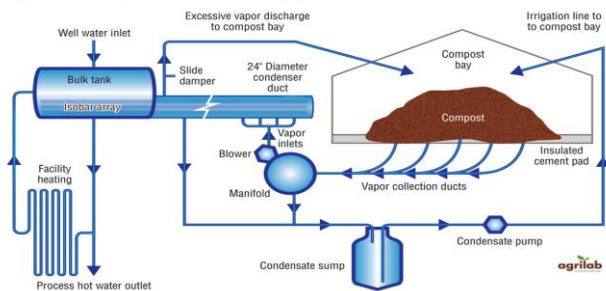
吸引通気システム自体は日本の吸引通気式堆肥化と同様であるが，優れた通気制御システムが導入されていた。吸引通気式堆肥化に限らず日本の一般的な強制通気式堆肥化施設では，発酵槽ごとに複数の通気ブロワが設置されている。ここでは 1 馬力 (0.75kW) のターボブローア 1 台で 8 槽の発酵槽を順番に通気する間欠通気システムがとられており，堆肥舎全体がエアコンプレッサ 1 台とブロワ 1 台のみで駆動するシステムであった。間欠通気の間欠時間は堆肥温度や温度ピークをパラメータとして決定されるが，原料投入直後は 2 時間毎に 30 分の間欠通気を行うとのことである。吸引通気では高いアンモニア濃度の空気がブローアに流入するため，薬剤耐性の高い高価なブローアを採用するのが一般的であるが，アンモニアの多くが熱交換の際に結露で除去されるため，熱交換器の後段にブローアを取り付けることで通常のブローアでの運用が可能となった。そのため，1500 ドル程度のブローアを使用しているとのことである。また，発酵槽からブローアまでの配管長が長くなることからパイプの通気抵抗も考慮しており，直径 25.4cm の PVC 管が採用されていた。

ヒートパイプ式熱交換器で得られた温湯は 76m の地下配管を経て搾乳パーラーで洗浄水として使用されているとのことであった。なお，剪定枝、雑草等の有機性廃棄物を原料とした場合では，50 トンの発酵原料から 54～60℃の温湯として 1 時間あたり 63MJ (灯油換算 1.72L に相当) の熱量を回収可能とのことである。

当該施設は研究施設を兼ねているため 538,000 ドルの建設費がかかっているが，同様の仕様 (処理容積 7650m<sup>3</sup>) を 300,000 ドル程度で建設可能とのことである。また，ランニングコス

ト（電気料金、木材チップ、人件費、燃料費等を含む）は1 m<sup>3</sup>あたり5ドルとのことであった。シンプルかつスマートなシステムとなっており、日本の吸引通気式堆肥化にも取り入れるべき点が多いと考えられた。

Figure 1. Flow diagram of UNH heat recovery system



システムの概要（但し現在、フロアは熱交換器後段に取り付けられている）

発酵槽の様子 発酵槽奥壁にはマニユアプレッダによる発酵原料積込みの形跡が伺える。



通気パイプに設置されたエアコンプレッサ駆動のバルブ 通気は発酵槽ごとに制御される。



ヒートパイプ式熱交換器 断熱材で覆われている大径パイプの中に複数のヒートパイプが格納されている。

### フロリダ州における酪農暑熱対策技術

フロリダ州は亜熱帯・熱帯気候に属しており、本来、酪農には適さないが、約 123,000 頭の乳牛が飼養されており、アメリカ南東部においては乳牛飼養頭数が最も多い州である。経産牛 1 頭あたり乳量は年間 8600kg と、不利な気候条件であるにもかかわらず日本全国平均 8,316kg に劣らない成績であり、また平均飼養頭数は 880 頭と大規模経営を特徴とする。本調査にあたりフロリダ州の暑熱対策を牽引している農業工学コンサルタント Joseph G Martin 氏およびフロリダ州立大学教授 Ray A Bucklin 氏に案内していただいた。

### LPCV 牛舎

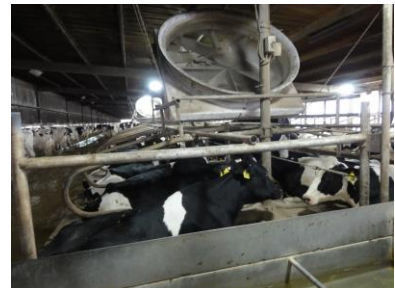
筆者は新規性の高い暑熱対策技術として Low Profile Cross Ventilation (LPCV) と呼ばれる牛舎構造に注目していた。これは、ファンとクーリングパッドを妻面ではなく平面に配置して横断強制換気を行うものである。妻面から棟方向に換気を行うトンネル換気の横断バージョンといえるが、ファン・クーリングパッドの設置スペースが出入口のために制限されるトンネル換気と比較して、暑熱対策の自由度が高いという特徴を持つ。

しかし、フロリダ州には LPCV 牛舎が導入された実績はなく、また、Martin 氏、Bucklin 教授ともクーリングパッドによる冷却効率の問題から亜熱帯での暑熱対策としてはトンネル換

気牛舎の方が優れているとの考えであった（なお、Martin氏はLPCV牛舎の設計経験を有している）。Martin氏は日最高気温が20℃以上となる期間を暑熱対策の判断材料としている。LPCV牛舎が導入されている比較的寒冷なミネソタ州やサウスダコタ州の天気のみをみると、日最高気温が20℃を超え、万全の暑熱対策が必要となると考えられるのはミネソタ州で4ヶ月、サウスダコタ州で5ヶ月弱である。この間の露点温度は18℃を以下であり、クーリングパッドによる気化冷却が十分期待できると考えられる。一方、酪農が盛んなフロリダ州ゲインズビル周辺では日最高気温が20℃を超える期間が10ヶ月もある。また、その間の5ヶ月は日最高露点温度が20℃を上回っておりクーリングパッドによる気化冷却では十分な暑熱対策にはならない。このような環境下では、クーリングパッドをより多く配置できるというLPCV牛舎のメリットはなくなり、同じ消費電力で換気をした際により速い風速を得られるトンネル換気の方が暑熱対策を行いやすいとのことであった。日本酪農へのLPCV牛舎のマッチングを考えた場合、ミネソタ州やサウスダコタ州と類似した気温、露点温度である北海道では非常に優れた暑熱対策になり得ると考えられる。なお、フロリダ州の気温、露点温度は那覇と類似しており、非常に厳しい暑熱環境であることが伺える。

### トンネル換気牛舎

フロリダ州においてはトンネル換気とスプリンクラーによるソーキングとのセットが暑熱対策としては最も優れているとのことであった。前述のようにフロリダ州ではクーリングパッドによる気化冷却の暑熱対策効果は限定的である。このような環境下では、ミスト噴霧・フォギング等と呼ばれる気化冷却によって空気を冷却する暑熱対策の効果も限定的である。このため、スプリンクラー散水によって直接牛体を濡らし、大風量の送風で蒸発を促すことで気化熱によって牛体を直接冷却するソーキングが暑熱対策の要となる。例えば20℃で送風機はフル稼働となり、フォグによる気化冷却が始まる。25℃を超えるとフォグが止まりスプリンクラーによる散水（10分毎に1分散水）が始まる、といった制御が一般的とのことであった。また、ミスト噴霧制御用に湿度センサーを使用する場合もあるが、温度制御のみの場合が一般的であり、同様に、THI（Temperature humidity index）やET（Effective temperature）等の暑熱指標は重要視されておらず、簡素な制御系で暑熱対策が行われていたことは意外であった。なお、ソーキングは湿度上昇の有無に関わらず気温が高い間は稼働させ続け、牛体を濡らすことを優先させるとのことである。



**左図：**500頭を飼養する6列のトンネル換気牛舎 換気回数は毎分1.5回で設計されている。

**中図：**採食通路にはソーキングのためのスプリンクラーが設置されている。視察時は22℃程度であったため、ソーキングは行われていなかった。飼槽上の間仕切りは飼料の濡れを防ぐとともに、風を整流するためだと考えられる。

**右図：**大型のファンがストールのすぐ上に設置されていた。設計風速を単純計算すれば秒速3.6mとなるが、実際には牛のいる場所の風速は弱くなるため、ストール頭上にファンを設置することが重要となる。強風によるストレスの影響は考慮する必要はないとのことで、実際横臥している牛が多かった。



**左図：**ミスト噴霧はサンドベッドを濡らすリスクが少ないためストール上に設置される。

**中図：**ミスト噴霧ノズルは風上側の妻面と風下側中間点ストール上に設置されていた。気温上昇により、妻面のミスト噴霧がまず始まり、次に風下側が稼働する。

**右図：**別のトンネル換気牛舎では換気量を確保するためにファンを設置する妻面のみ軒高を高くして3段でファンを設置していた。妻面の出入口により、ファン6つ分のスペースが無駄になっているが、LPCV牛舎であればこのような問題を解決できる。

### 自然換気牛舎

自然換気牛舎においても基本的な暑熱対策はトンネル換気牛舎と同様で、大風量の送風とソーキングであった。トンネル換気牛舎と異なり常に一定の換気量を確保することが不可能であるため、冷却効果が湿度に依存するミスト噴霧は自然換気牛舎では積極的に使用されておらず、この点が日本酪農とは異なった。また、牛舎内には多くのファンが設置されており、日本の自然換気牛舎と比較して送風量は大きいように感じた。

前述のように暑熱対策としてはトンネル換気牛舎が優れているものの、フロリダ州の酪農家の95%は自然換気牛舎を採用している。また、牛舎立替えの際にトンネル換気牛舎を選択する場合も少ないとのことである。これはトンネル換気牛舎のデメリットに起因する。トンネル換気牛舎の建設費は自然換気牛舎と比較して25%高くなるが、通常は乳量に大きな差がなく、数年に一度の猛暑の際にのみ乳量に差がでるとのことである。一方、停電のリスクは大きいため非常用電源を確保する必要がある。また、日々のオペレーションにおいてもミスト噴霧のためのミストノズル、コンプレッサ等の保守メンテナンスの手間は、低圧のスプリンクラーを使用する自然換気牛舎と比較して非常に大きい。Martin氏、Bucklin教授の両名ともに、必ずしも先進的な強制換気牛舎が優れていると考えているわけではない点が印象的であった。

### ソーキング

ソーキングは古くから日本でも使用されている技術であり、目新しいものではないが、牛床が濡れることによる衛生環境の悪化等の懸念から、酪農家はミスト噴霧を好む傾向がある。一方、フロリダ酪農ではトンネル換気牛舎・自然換気牛舎を問わず、大風量のファンとソーキングとの組み合わせが必須の暑熱対策となっていた。これは飼養方式の違いに起因するところが大きいと考えられる。フロリダ酪農はフリーストールが一般的であるため、採食通路でソーキングを行うことで、ストールの濡れを極力抑えていた。さらにフロリダ州は多くが砂質土壌であり、農場内で敷料となる砂を調達できることからサンドベッドが一般的である。サンドベッドは有機物含有量が少なく微生物も少ないため、牛床が濡れることによる乳房炎等のリスクを抑えられる。また、たとえ牛床が濡れて乳房炎等のリスクが増えたとしても、暑熱ストレスで免疫系が弱るよりはリスクが少ないという考えが基本にあるとのことであった。

### フロリダ州の暑熱対策から考える日本酪農

亜熱帯・熱帯気候に属し、日本では沖縄に匹敵する暑熱環境であるフロリダ州においても、

自然換気フリーストール牛舎が一般的に使用されていた。もちろん LPCV 牛舎やトンネル換気牛舎等の強制換気は暑熱対策の点では優れているが、経済性等を総合的に判断する場合、自然換気牛舎も酪農家の選択肢の一つとなっていた。日本の気候を考えれば、沖縄のような亜熱帯気候でない限り、トンネル換気牛舎等の強制換気が必ずしも最良の暑熱対策ではなく、自然換気牛舎でもほぼ同等の暑熱対策が可能なのではないだろうか。ただし、これはソーキングが可能なフリーストールを前提とした話であり、ソーキングが難しいスタンションストールの多い日本では単純な模倣ではない独自の暑熱対策技術を考えるべきである。この点でフロリダ酪農と日本の暑熱対策で決定的に異なっており、参考にすべきだと感じたのは送風である。訪問したある牧場では、1.1kW、直径 1.3m の巨大なファンがストール上に 18m 置きに設置されており、どのストールにおいても毎秒 3.6m 以上の風速が確保されていた。また、気温が 15.5°C を上回るとファンはフル稼働する設定となっていた。このような送風条件を確保している酪農家は日本には少ないのではないだろうか。また、日本の自然換気牛舎では湿度上昇を抑えるためにミスト噴霧の間欠運転が一般的であるが、フロリダ州の暑熱対策の視点で考えれば、間欠ミスト噴霧では冷房効果は不十分であり、送風機を増設して換気量をあげ、湿度上昇を抑えた上で連続噴霧を行うべき、ということになるだろう。

フロリダ酪農とは規模も飼養方式も異なる日本酪農において、フロリダ州の暑熱対策をそのまま模倣することは困難である。しかし、日本酪農の暑熱対策には改善の余地があり、強制換気牛舎等の先進システムに頼らずともまだまだ暑熱ストレスに対応可能だと考えられた。



**上段：** 6 列の自然換気フリーストール牛舎 外気温 15.5°C で 1.1kW の大型ファンが稼働し、21°C でスプリンクラーによるソーキングが 10 分毎に 1 分稼働する。27°C でソーキングは 10 分毎に 2 分の稼働となる。

1.1kW のファンを使用しているため、ファンの間隔は 18m と比較的大きい。

**下段左・中：** 牛が密集した状態となるパーラー待機場は最も暑熱ストレスを受けやすい場所である。20°C 以上で 6~7 分毎に 1~3 分のソーキングが推奨されている。コストの問題からファンかソーキングのいずれか一方しか選ぶことができない場合は、ソーキングの導入が推奨されていた。

**下段右：** クーリングpondによる暑熱対策については多くの研究が行われているが、乳房炎等のリスクマネージメントに課題が残っており、搾乳牛では行われていなかった。