

学 位 論 文 題 名

寒冷地酪農用メタンガス生産施設の設計に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、6章で構成され、図65、表26、写真12、引用文献118を含む195頁の和文論文である。

北海道酪農は府県に比べ飼料自給率が高く、経営内での糞尿の圃場還元は比較的容易であった。しかし、近年、1戸当り飼養頭数が100頭を越える酪農家が現れ、排出される糞尿はミルクング・パーラの排水とともに膨大な量となり、その取り扱いが問題となっている。また近年は、自然環境、地域環境の保全の立場から生態系に基づいた家畜糞尿処理の重要性が再確認され、その処理方法としてメタン発酵に対する関心が高まっている。

しかし、農場規模での大型メタンガス生産施設はまだ研究段階にあり、一般に実用化されていない。特に寒冷地における乳牛糞尿を原料としたメタンガス生産施設は冬期間の運転維持が困難なため北海道での周年運転の実績はない。

本研究は室内実験とベンチサイズの発酵槽による実験、さらに小型プラントによるランニングテストを行い、寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計指針を得ることを目的としている。

第1章緒論には、国内および国外における研究の動向、エネルギーとしての可能性、さらに利用の利点と問題点について述べられている。

第2章では1槽式発酵法を用い発酵温度、固形分濃度、平均滞留時間とメタンガス生産量の関係、さらに乳牛糞尿の流動特性と消化液の肥料成分などメタン発酵原料としての乳牛糞尿の特徴について述べられている。結果を要約すると、(1)発酵温度35～45℃で20日間の回分式試験を行った結果、42.5℃のメタンガス生成量が最大となった。(2)原料当りのメタンガス生成量は、9%原料が最も高い値を示した。(3)有効発酵槽容積当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が短くなるに従い増加し、有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加した。(4)Chen & Hashimoto モデルの予測値は平均滞留時間が長くなるに従いやや高く、平均滞留時間が短くなるに従いやや低くなる傾向が認められたが、全体として非常に高い精度でメタンガス生成量が予測できた。(5)乳牛糞尿は固形分濃度11～3%，原料温度5～42.5℃において非ニュートン擬塑性流動を示した。(6)投入原料の有機態窒素はメタン発酵によってアンモニア態窒素に変

化し、肥料価値が増加した。

第3章では2相式発酵法の効果、特に低温原料の投入の影響について1槽式発酵法との比較を行い、寒冷地酪農への適応性が述べられている。実験の結果は以下に要約される。(1)酸発酵槽では、pH値の下降と揮発性有機酸量の上昇は、おおむね2日間で完了することから、酸発酵槽の平均滞留時間を2日間とした。(2)2日間滞留による酸発酵連日投入試験では、35℃に加温した原料と5℃に冷却したものとはpH値ならびに揮発性有機酸量では有意な差は見られず、低温原料を投入した場合でも2日間の滞留で十分に原料を昇温させ、酸発酵が促進された。(3)1槽式メタン発酵槽の場合、投入原料の温度はメタン発酵槽の温度に直接影響を与え、メタンガス生成量は低温原料の投入が増加するに従い減少したが、2相式メタン発酵槽の場合、酸発酵槽は酸生成とともに加温も同時に行いメタン発酵槽内の液温変化は極めて小さかった。(4)1槽式メタン発酵槽の場合、有機物負荷が $10\text{ g} / \ell / \text{day}$ を越えると分解率は急激に低下したのに対し2相式発酵法は高い有機物分解率を維持した。(5)相分離の程度を各発酵槽内の有機酸量およびpH値より間接的に推定すると、酸発酵槽内で揮発性有機酸は増加し、メタン発酵槽内で分解され、pH値は酸発酵槽で低下し、メタン発酵槽で上昇し、酸発酵槽とメタン発酵槽の相違及び特徴が現れた。上記の結果より、2相式発酵法は低温原料投入に対する緩衝性が高く、寒冷地での使用に有効であることが明らかとなった。

第4章では開発試作した小型プラントについて、無希釈糞尿を用い高負荷運転を行った場合の供試プラントの運転特性について述べられている。結果は以下の通りである。(1)供試施設のメタンガス生成量は有機物負荷 3.19 から $11.0\text{ g} / \ell / \text{d}$ 、平均滞留時間7から20日の範囲で有機物負荷と正の相関にあり、有機物負荷 $8\text{ g} / \ell / \text{d}$ 以上の高負荷運転が可能であった。(2)発酵槽保温熱量すなわち発酵槽からの放熱量は外気温と発酵槽の温度差が大きくなる冬期ほど増大した。厳冬期のプラントからの放熱量は盛夏期の約35%増であった。供試メタン発酵槽の総括伝熱係数は発泡ウレタンによる吹き付け断熱の効果により年間を通して低い値を示し、平均で $0.60\text{ W} / \text{m}^2 / ^\circ\text{C}$ であった。また、熱交換槽の設置によって原料加温熱量は夏期で約50%冬期で約30%減少し、1日当たり約 16.7 MJ の原料加温熱量が節減された。年間を通して消費熱量に占める原料加温熱量は約44%と従来のプラントに比べ低い値となり熱交換槽による原料加温の効果が明らかとなった。正味消化ガス生成量は生成ガス量の平均48.7%でその内冬期は約30%、夏期は約60%と年間を通してメタンガス生産が可能であることが明らかとなった。原料の投入、移送、攪拌、温水の循環、制御等に用いた電力量は月によりややバラツキが見られたが、平均で $6.1\text{ kWh} / \text{d}$ であった。(4)投入原料の固形分濃度が高くなるに従い、メタンの基質となる揮発性総有機酸量が増加す

ることが明らかとなった。総揮発性有機酸量は熱交換槽でやや増加し、メタン発酵槽で急激に減少した。これは熱交換槽が酸発酵槽としても機能したためでメタン発酵槽との相分離が起こり、2相式による発酵が行われたことを裏付ける結果であった。排出消化液の揮発性総有機酸量は1,500mg/kg以下が全体の80%で酢酸の蓄積は認められなかった。総揮発性有機酸に占める酪酸の割合は投入有機物当りのメタンガス生成量と正の相関にあり、総揮発性有機酸に占める酪酸の割合が増すに従い投入有機物当りのメタンガス生成量が増加した。これらの結果より、供試プラントを実用規模にスケールアップした際、寒冷地においてもメタンガス生産施設の周年運転が可能であることが明らかとなった。

第5章ではこれらの結果をまとめ実用規模の寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計諸元を提示し、100頭規模の寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計を行い、熱収支の試算を行っている。(1)実用プラントは排出消化液の排熱を利用し、投入原料の加温と酸発酵を行う2相式発酵法としている。発酵槽の形式はプラグフロー方式とし、未分解の固形分やメタン菌の流失を少なくするために隔壁を設け前段の槽から越流した糞尿を後段の下層部に流入させるバッフル方式を採用している。(2)設計した実用プラントの熱収支の試算の結果、寒冷地においても投入熱量を必要としない周年運転の可能なメタンガス生産施設の稼働が可能であり、生産されたメタンガスは牛舎で用いるミルクやバルククーラの動力源として供給可能であるという結論が述べられている。

第6章総括では、第2章から第5章までの各章毎の要約が述べられている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	伊藤和彦
副査	教授	寺尾日出男
副査	教授	堀口郁夫
副査	助教授	松田従三

本論文は、図65、表26、写真12、引用文献118を含む195頁の和文論文で、別に参考論文14編が添えられている。

北海道酪農は府県に比べ飼料生産圃場が広く、経営内での糞尿の圃場還元は比較的容易であっ

た。しかし、近年、多頭飼育と集中化により、排出される糞尿はミルク・パーラの排水とともに膨大な量となり、その取り扱いが問題となっている。また環境保全、エネルギー資源の点から、糞尿を集中処理し、酸性雨の原因となるアンモニアを発生せず、さらに高いエネルギーが利用できるメタン発酵に対する関心が高まっている。

しかし、農場規模での大型メタンガス生産施設はまだ研究段階にあり、一般に実用化されていない。特に寒冷地における乳牛糞尿を原料としたメタンガス生産施設は冬期間の運転維持が困難なため北海道での周年運転の実績はない。

本研究は室内実験とベンチサイズの発酵槽による実験、さらに小型プラントによるランニングテストを行い、寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計指針を示し、実用プラントの設計を行っている。

第1章緒論には、国内および国外における研究の動向、エネルギーとしての可能性、さらに利用の利点と問題点について述べられている。

第2章では1槽式発酵法を用いて発酵温度、固形分濃度、平均滞留時間とメタンガス生成量の関係、さらに乳牛糞尿の流動特性と消化液の肥料成分などメタン発酵原料としての乳牛糞尿の特徴について述べられている。回分式試験を行った結果、42.5℃のメタンガス生成量が最大となり、原料当りのメタンガス生成量は、固形分濃度9%原料が最も高い値を示すことを明らかにした。また、有効発酵槽容積当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が短くなるに従い増加し、有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加し、Chen & Hashimotoモデルの予測値は、全体として非常に高い精度でメタンガス生成量が予測できることを示した。

第3章では2相式発酵法の効果、特に低温原料の投入の影響について1槽式発酵法との比較を行い、寒冷地酪農への適応性が述べられている。実験の結果、1槽式メタンガス発酵槽の場合、投入原料の温度はメタン発酵槽の温度に直接影響を与え、メタンガス生成量は低温原料の投入が増加するに従い減少したのに対し、2相式メタン発酵槽の場合、酸発酵槽は酸生成量とともに加温も同時に行いメタン発酵槽内の液温変化は極めて小さく、2相式発酵法は寒冷地での使用に有効であることを明かにした。

第4章では開発試作した小型プラントについて、無希釈糞尿を用い高負荷運転を行った場合の供試プラントの運転特性について述べられている。供試施設のメタンガス生成量は有機物負荷3.19から11.0 g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で有機物負荷と正の相関にあり、有機物負荷8 g/ℓ/d以上の高負荷運転が可能であることを明らかにした。また、熱交換槽の設置による原料加温の効果が明らかとなり、正味消化ガス生成量は生成ガス量の平均48.7%と年間を通

してメタンガス生産が可能であることを明らかにした。また、総揮発性有機酸量は熱交換槽でやや増加し、メタン発酵槽で急激に減少したことから熱交換槽が酸発酵槽としても機能しメタン発酵槽との相分離が起こり、2相式による発酵が行われたことを裏付ける結果となっている。

第5章ではこれらの結果をまとめ実用規模の寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計諸元を提示し、100頭規模の寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計を行い、熱収支の試算を行っている。実用プラントは排出消化液の排熱を利用し、投入原料の加温と酸発酵を行う2相式発酵法としている。発酵槽の形式はプラグフローのバッフル方式を採用している。また、設計した実用プラントの熱収支の試算結果から、寒冷地における投入熱量を必要としない周年運転の可能なメタンガス生産施設の稼働が可能であり、生産されたメタンガスは牛舎で用いるミルクやバルククーラの動力源として供給可能であるという結論が述べられている。

以上のように、本論文は乳牛糞尿を原料としたメタン発酵に関する広範囲にわたる研究の結果と寒冷地の酪農現場で使用可能なメタンガス生産施設の設計指針を示したものでその成果は学術的に高い評価を得たとともに、とくに実用面に寄与するところ多大である。

よって審査員一同は、別に行った学力確認試験の結果とあわせて、本論文の提出者 梅津一孝は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。