

学 位 論 文 題 名

バイオガスの農用小型ディーゼル機関への応用

学位論文内容の要旨

第1章 緒 論

近年地球温暖化防止のための二酸化炭素排出量削減や、再生産可能な自然エネルギーの必要性が経済界を含めて主張され始めている。農業の分野では大量のバイオマスが扱われ、これを嫌気性発酵によりバイオガスとしてエネルギー化可能である。その際には発酵だけでなく、発生したガスの2次エネルギーへの有効な変換方法の研究も併せて行う必要がある。デンマークでは大規模な集中型バイオガスプラントが約20基稼働しており、環境面からの優遇政策により経済的にも自立可能な状態に近づいている。このプラントにはエネルギー発生だけでなく、発酵残渣の有機肥料としての還元、廃棄物処理などの効果もあり、今後有望なバイオマスエネルギー源である。

第2章 実験装置の改造

実際に発酵させて得たバイオガスは大量入手が困難で、また性状を任意に設定することも難しい。バイオガスの成分は大部分がメタンと二酸化炭素であり、燃焼特性に関してはこの二成分のみの影響を考慮すれば良い。そこでボンベをメタンと二酸化炭素の供給源とし、PCからマスフローコントローラで流量を計測・制御して、両ガスの混合により疑似的なバイオガスを供給する装置を製作した。本装置は任意のメタン濃度を持つバイオガスを生成し、また発酵槽からの時系列のガス発生パターンをシミュレートすることが可能である。

供試ディーゼル機関は単気筒の小型水冷直接噴射式を用いた。ディーゼル機関を用いる理由は、経済性・耐久性の点で農・工業用にはディーゼル機関の使用が多いためである。機関へのバイオガス供給方式は予混合方式とし、バイオガスは機関の吸気管に供給する。この結果ガスは吸入空気と混合されてシリンダに入り、軽油が噴射されて着火したときバイオガス中のメタンにも引火して燃焼が行われる。この方式は簡単な改造で機関をバイオガスによる運転可能とできるが、着火を軽油で行うため必ず軽油とバイオガスの二燃料で運転する必要がある。しかしバイオガス発生量が減少しても軽油による運転が可能のため、ガス供給が不安定となっても対処が容易である。また本供試機関は電子的に軽油噴射量・噴射時期を制御可能なように改造されている。

第3章 バイオガス・軽油二燃料運転の基本特性

まずディーゼル機関を軽油とバイオガスの二燃料で運転した場合の基本的な特性を調べた。燃料経済性は機関にとって最も重要な性能の一つであるが、バイオガス供給率を大きくすると燃料消費率は増加する特性を示した。しかしメタン供給量を増やした場合は燃料消費率は増加するが、二酸化炭素を増やした場合は顕著な増加は認められない。このため燃焼しにくいメタンが完全に燃焼せずに排出されて効率が低下していると推測できる。しかし高負荷で運転する場合は、一定以上のバイオガスを供給するとかえって燃料消費率が減少し高効率な運転が可能であった。これは空気とバイオガスの混合比が可燃範囲に近づいたことが原因と考えられる。この性質を利用し、機関運転状態に合わせてバイオガス供給量を調節することでより効率の高い運転が可能であると推測された。

またバイオガスの供給により排気中の有害成分である NO_x（窒素酸化物）や煙の排出量が減少した。バイオマスエネルギーの持つ、燃焼しても大気中の二酸化炭素を増加させない CO₂ ニュートラルという特性と併せ、バイオガスが環境汚染防止の点で望ましい燃料であることを示している。

第4章 バイオガス二燃料運転の最適化

前章で効率的なバイオガス運転は高負荷・高供給率という特定の条件で可能ことが判明した。そこで発生したバイオガスをタンクに貯蔵し、ここから機関への供給を最適にスケジュールすることで高効率な運転を可能とする、最適供給スケジュールリングを行った。24 時間を 1 サイクルとし、30 分ごとに 48 期に分割する。供試機関の負荷・ガス供給率に対する燃焼特性を調べ、24 時間のバイオガス発生パターン、機関負荷パターンを設定した。

最適化手法として動的計画法を用い、軽油消費量や NO_x 排出量の最小化を目的としたガス供給率のスケジュールを作成した。動的計画法とは 1 種の総当たり法であるが、「最適性の原理」を利用して最適になりうる計算のみを行い、計算量を大幅に減少させる方法である。本スケジュールリングの場合、1 サイクルが 48 期あり、各期ごとにガス供給率は 0~20L/min の 21 段階を取り得る。したがって取り得るスケジュールの総数は 21 の 48 乗、つまり約 2.93×10^{63} 乗にも達する。しかし動的計画法を用いると 21 の 2 乗 $\times$ 47、約 2 万種類の組み合わせとなり、PC を用いて 1 秒以内に計算可能であった。

得られた最適スケジュールでは、予測されたように低負荷期はガスを貯蔵し、高負荷期に大量供給する傾向にあった。タンク容量に制約を与えずに最適なスケジュールを行うと、7,600L のバイオガスの供給により軽油消費量を 29% 節減可能であった。最適化を行わずに発酵槽から直接供給すると節減量は 16% であり、節減量は約 2 倍となった。検証実験を行った結果、ほぼ予測通りの軽油節減効果を認めた。

第5章 最適スケジュールの条件変動への耐性

最適供給スケジュールリングでは、24時間のバイオガス発生パターン、機関負荷パターンがスケジュールリング時と変化しないことが前提であった。しかし実際にはこれらは変化すると予測され、その際に最適スケジュールがどの程度有効性を保つか検証を行った。

ガス発生パターン・負荷パターンとも、乱数による変動などを与えてスケジュールリングに用いたものとは異なるパターンを作成した。元のパターンに対するスケジュールを、これらの変動した条件に適用して軽油消費量の変化を検討した。性能低下を生じ易いのは機関負荷の変動で、ガス発生率変動はほとんど軽油消費に影響はなかった。しかしほとんどの場合変動による軽油消費の増加は小さく、運転条件が多少変動しても最適スケジュールは有効であり、実験結果もこれを裏付けた。

第6章 バイオガス二燃料機関のコジェネレーション化

バイオガス機関の廃熱を回収・利用してエネルギー効率を向上させるため、実験装置をコジェネレーションシステムへ改造した。製作の簡易化・シミュレーションとの整合の取り易さなどからシンプルな並流二重管式の排気熱交換器を製作し、機関のウォータージャケットからの冷却水をここに導いて廃熱を回収する。

シミュレーションでは熱交換器を軸方向に微小要素に分割し、各要素における排気から冷却水への伝熱量を計算し、全要素の伝熱量を合計して総回収熱量を計算した。計算に必要な値の内、熱交換器へ入る排気温度は過去の実測値を用い、排気ガスの比熱は仮定を立てて計算した。シミュレーションによると、熱勘定にして約10%の熱量を排気から回収可能と予測された。

完成した装置を用いた実験の結果、排気熱交換器はシミュレーションを上回る熱量を回収し、また副次効果として排気抵抗の減少による機関熱効率の向上も認められた。廃熱の総回収量は熱勘定にして、ウォータージャケットから25%前後、排気熱交換器から15%前後で、合計約40%、機関出力と合わせた総エネルギー効率は65%前後に達した。

第7章 総括

第2章から第6章までに得られた知見の要約である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 寺 尾 日出男

副 査 教 授 松 田 従 三

副 査 助教授 野 口 伸

学 位 論 文 題 名

バイオガスの農用小型ディーゼル機関への応用

本論文は図57, 表13を含む117ページからなる和文で, 7章より構成され, 他に参考論文3編が添えられている。

本研究は畜糞などを嫌気性発酵させて得られる可燃性ガスであるバイオガスを, エネルギー源として有効活用することを目的としている。バイオガスをエネルギーとして利用すると, 化石燃料の代替エネルギーとなるほか, 二酸化炭素排出の抑制, 発酵残渣の有機肥料としての利用など, 環境面で多くのメリットを持つ。発生したバイオガスの効率的利用について, ソフトウェアとハードウェアの両面から改善を試みたものである。

第1章は緒論で, 地球環境問題の観点からバイオマスエネルギー実用化の必要性を解説している。

第2章は実験装置の改造である。実際に発酵させて得たバイオガスは大量入手が困難である。バイオガスの成分は大部分がメタンと二酸化炭素であるため, 両ガスをボンベから供給し, 混合して疑似バイオガスを供給する装置を製作した。また供試ディーゼル機関へのバイオガス供給方式は予混合方式とし, バイオガスを機関の吸気管から供給する。シリンダ内に軽油が噴射されて着火したとき, バイオガス中のメタンにも引火して燃焼が行われる。この方式はバイオガス発生量が減少しても軽油による運転が可能のため, ガス発生が不安定となっても対処が容易である。

第3章はバイオガス・軽油二燃料運転の基本特性である。バイオガス供給率を増加させるほど燃料消費率は増加する。メタンは燃焼しにくいため, 一部が燃焼せずに排出されてしまうことが原因と考えられた。しかし高負荷で運転する場合は, 一定以上のバイオガスを供給するとかえって燃料消費率が減少し高効率な運転が可能である。このことから機関の運転状態に合わせてバイオガス供給を調節することで, より効率の高い運転が可能であると示唆された。またバイオガスの供給により排気中の有害成分であるNO_x (窒素酸化物) や煙の排出量が減少した。

第4章はバイオガス二燃料運転の最適化である。前章で効率的なバイオガス運転は高負荷・高供給率という特定の条件で可能なことが判明した。そこで発

生したバイオガスをタンクに貯蔵し、ここから機関への供給を最適にスケジュールすることで高効率な運転を可能とする、最適供給スケジュールを行った。24 時間を 1 サイクルとし、供試機関の負荷・ガス供給率に対する燃焼特性を調べ、24 時間のバイオガス発生パターン、機関負荷パターンを設定した。動的計画法を用いて 30 分ごとのガス供給率をスケジュールした。この結果、スケジュール無しでは軽油消費量が 16% しか減少しなかった条件で、最適化により 29% の軽油節約が可能となった。検証実験を行った結果、ほぼ予測通りの軽油節減効果を認めた。

第 5 章は最適スケジュールの条件変動への耐性である。最適供給スケジュールリングでは、24 時間のバイオガス発生パターン、機関負荷パターンがスケジュールリング時と変化しないことが前提であった。しかし実際にはこれらの運転条件は変化すると予測され、その際に最適スケジュールがどの程度有効性を保つか検証を行った。ガス発生パターン・負荷パターンとも、乱数による変動などを与えてスケジュールリングに用いたものとは異なるパターンを作成した。元のパターンに対するスケジュールを、変動した条件に適用して最適性の劣化を検討した。シミュレーションでは多くの場合、運転条件が多少変動しても最適スケジュールは有効であり、実験結果もこれを裏付けた。

第 6 章はバイオガス二燃料機関のコジェネレーション化である。バイオガス機関の廃熱を回収・利用してエネルギー効率を向上させるため、実験装置をコジェネレーションシステムへ改造した。製作・シミュレーションの容易さからシンプルな並流二重管式の排気熱交換器を製作し、機関の冷却水をここに導いて廃熱を回収する。実験の結果、排気熱交換器はシミュレーションを上回る熱量を回収し、また副次効果として排気抵抗の減少による機関熱効率の向上も認められた。廃熱の総回収量は熱勘定にして、ウォータージャケットから 25% 前後、排気熱交換器から 15% 前後で、合計約 40%、機関出力と合わせた総エネルギー効率は 65% 前後に達したと述べている。

第 7 章は総括であり、本研究で得られた知見を要約している

以上のように、酪農施設などから発生したバイオガスをエネルギーとして効率的に利用することを目的に、ソフトウェアとハードウェアの両面から改善を試みた本成果は、学術的にも高く評価できる。よって審査員一同は、石井耕太が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格あるものと認めた。