

博士（工 学） 山 崎 高

学位論文題名

森林系木質バイオマスを利用した  
小規模エネルギー化施設における生成物の特性評価

学位論文内容の要旨

地球上で莫大な賦存量を有するバイオマスは、再生可能でかつカーボンニュートラルなエネルギー資源であることから、その利用によって地球温暖化の原因である化石燃料の消費を抑制することが可能である。日本のバイオマス利用においては、資源量が豊富な木質バイオマスへの期待が大きい。しかし現在、木材生産時に発生する末木などの林地残材や間伐されないために発生する樹木などは、収集・運搬コストがかさむためにほとんど利用されていない。この森林系木質バイオマスの利用における運搬コストの負荷を軽減するには、バイオマスの発生場所である林間地域にエネルギー化施設を設置してバイオマスを利用する形態、すなわち小規模分散型での利用システムが一つの選択肢となる。ただしこのような小規模施設でバイオマスを用いて熱電併給を行うことを想定した場合、大規模施設で一般的に用いられているバイオマス燃焼・蒸気タービンシステムの適用は、規模の小さい蒸気タービンの熱効率が低いため、困難である。それゆえ、小規模でも高い熱効率が得られる熱機関の使用が必要となる。

本研究では、化石燃料を用いた熱電併給で実績のある内燃エンジン(ガスエンジン)と、新形式の蒸気スターリングエンジンを用いた木質バイオマス利用エネルギーシステムを評価対象とし、両システムの適用可能性および問題点を明らかにすることを目的として、両システムの運転実験を行い、システムの特性、およびバイオマス利用時に発生する生成物の特性について検討した。

本論文の第一章では、研究の背景として、現状の森林系木質バイオマス(森林バイオマス)の資源量、森林バイオマスを利用するエネルギー化施設の規模、及び適用可能なエネルギーシステムについて概説した。

第二章では、森林バイオマスを利用するエネルギーシステムとして期待される(1)ガス化炉・内燃エンジンシステムと(2)燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムについて、両システムの特性評価を行った。システム評価に先立ち、バイオマス変換技術(燃焼、熱分解、ガス化)の原理を示し、両システムの構成とシステムに用いられる技術について紹介した。両システムの実験機の運転から示された特性およびエネルギーバランスを基に、両システムの比較検討を行

った。ガス化炉・内燃エンジンシステムの熱効率は高く、効率の観点からみれば有望であるが、ガス化時のタール生成や運転時の危険性が問題であることがわかった。一方、新形式の熱機関を用いた燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムは、熱効率が低いため熱機関の改良が不可欠であるが、運転操作性が高いことや危険性が低いことが明らかになった。さらにシステムの特性を考慮して、両システムの利用ケースについて考察した。

第三章では、ガス化炉・内燃エンジンシステムで問題となるタールについて、実験機で用いられたガス化炉(ダウンドラフト型ガス化炉)の空塔速度がタール生成量及び組成に与える影響を調べた。タールは、ガス化の副生成物であり、内燃エンジンなどの機器に悪影響を与えるため、その生成量の低減が必要であるが、これまで空塔速度が総タール生成量に与える影響を調べた研究はあるものの、成分別のタールへの影響を調べた研究はほとんどない。本研究では、タールを Gravimetric タールと GC-detectable タールに分類して、空塔速度の影響を調べ、タールの中で特に問題とされる Gravimetric タールの生成量が空塔速度に依存し、空塔速度による最適化が可能であることを初めて明らかにした。

第四章では、タール中の各成分の迅速かつ高時間分解能な測定方法の開発を行った。タールの紫外吸収(UV)スペクトルを、Partial Least Squares(PLS)法を用いて構築したタール濃度推定用モデルに適用し、タールの UV スペクトルを連続測定することで、タール中の各成分の生成量の変化をモニタリングすることを可能にした。今回開発された本方法は、これまでのタール測定法よりも迅速かつ高時間分解能な測定法であるだけではなく、簡単かつ安価な方法であり、それゆえ、タール生成の挙動の把握はもちろんのこと、タール濃度のルーチン測定も可能な、適用範囲の広い方法である。

第五章では、燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムにおいて、性状の異なる 3 種類の森林バイオマス(枝条チップ、木質ペレット、樹皮ペレット)を燃焼させた場合に排出される大気汚染物質( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , 粒子)の生成量について検討した。その結果、燃料の性状の違いにより燃焼状態が変化し、排出される粒子の粒径分布や炭素成分濃度が変わることを確認した。

以上のように本研究では、(1)ガス化炉・内燃エンジンシステムは、熱効率は高いがガス化時のタール生成や運転時の危険性が課題であること、(2)燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムは、効率面での改善が必要ではあるが、操作性の高さや危険性の低さなどから小規模分散型のシステムに適した特性を備えていること、(3)ダウンドラフト型ガス化炉において、空塔速度を操作することにより Gravimetric タールの生成量を最小化できること、(4)UV スペクトルと PLS モデルを用いることで、タール中の各成分の生成量のモニタリングが可能であること、(5)森林バイオマスの性状の違いが燃焼生成物の特性に大きな影響を与えること、を明らかにした。

## 学位論文審査の要旨

主査教授 太田幸雄

副査教授 窪田英樹

副査教授 林潤一郎

副査助教授 村尾直人

### 学位論文題名

# 森林系木質バイオマスを利用した 小規模エネルギー化施設における生成物の特性評価

地球上で莫大な賦存量を有するバイオマスは、再生可能なエネルギー資源であることから、その利用によって地球温暖化の原因である化石燃料の消費を抑制することが可能である。日本のバイオマス利用においては、資源量が豊富な木質バイオマスへの期待が大きい。しかし現在、木材生産時に発生する末木などの林地残材や間伐されないために発生する樹木などは、収集・運搬コストがかさむためにほとんど利用されていない。この森林系木質バイオマスの利用における運搬コストの負荷を軽減するには、バイオマスの発生場所である林間地域にエネルギー化施設を設置してバイオマスを電熱併給利用する形態、すなわち小規模分散型での利用システムが一つの選択肢となる。ただしこのような小規模施設でバイオマスを用いて熱電併給を行うことを想定した場合、これまで大規模施設で一般的に用いられてきている蒸気タービンは、規模が小さい場合には熱効率が低いため、その利用は不利となる。したがって、小規模でも高い熱効率が得られる熱機関の使用が必要である。

本研究では、これまで化石燃料を用いた熱電併給で実績のある内燃エンジン(ガスエンジン)と、新形式の蒸気スターリングエンジンを用いた木質バイオマス利用エネルギーシステムを対象とし、両システムの適用可能性および問題点を明らかにすることを目的として、両システムの運転実験を行い、システムの特性、およびバイオマス利用時に発生する生成物の特性について検討した。

本論文ではまず、現状の森林系木質バイオマス(森林バイオマス)の資源量、森林バイオマスを利用するエネルギー化施設の規模、及び適用可能なエネルギーシステムについて概説している。次に、森林バイオマスを利用するエネルギーシステムとして期待されるガス化炉・内燃エンジンシステムと、燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムについて、両システムの実験機の運転を行い、

得られたシステムの特性およびエネルギーバランスを基に、両システムの比較検討を行っている。ガス化炉・内燃エンジンシステムの熱効率は高く、効率の観点からみれば有望であるが、ガス化時のタール生成や運転時の危険性が問題であること、一方、新形式の熱機関を用いた燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムは、熱効率が低いため熱機関の改良が不可欠であるが、運転操作性が高いことや危険性が低いことが明らかになった。さらにシステムの特性を考慮して、両システムの利用ケースについて考察している。

タールは、ガス化の副生成物であり、内燃エンジンなどの機器に悪影響を与えるため、その生成量の低減が必要である。そこで本研究では、本システムで用いられているガス化炉(ダウンドラフト型ガス化炉)の空塔速度とタール生成量及び組成について、実験に基づきその関係を明らかにした。これまで、空塔速度が総タール生成量に与える影響については研究がなされているものの、空塔速度とタールの各成分の生成量との関係を調べた例はほとんどない。本研究では、タールを Gravimetric タールと GC-detectable タールに分類して、空塔速度の影響を調べ、タールの中でも特に問題とされる Gravimetric タールの生成量が空塔速度に依存し、空塔速度による最適化が可能であることを、実験により初めて明らかにした。

次に、部分最小二乗法(PLS 法)を適用し、タール中の各成分の迅速かつ高時間分解能な測定方法の開発を行った。タールの紫外吸収(UV)スペクトルを、PLS 法を用いて構築したタール濃度推定用モデルに適用し、タールの UV スペクトルを連続測定することで、タール中の各成分の生成量の変化をモニタリングすることを可能にした。今回開発された本方法は、これまでのタール測定法よりも迅速かつ高時間分解能な測定法であるだけではなく、簡単かつ安価な方法であり、それゆえ、タール生成の挙動の把握はもちろんのこと、タール濃度のルーチン測定も可能な、適用範囲の広い方法である。

本研究ではさらに、燃焼炉・蒸気スターリングエンジンシステムにおいて、これまで燃焼排気成分の定量的な評価が行われていなかったことから、性状の異なる 3 種類の森林バイオマス(枝条チップ、木質ペレット、樹皮ペレット)を燃焼させた場合に排出される大気汚染物質(CO, NO<sub>x</sub>, 粒子)の生成量について検討した。その結果、燃料の性状の違いにより燃焼状態が変化し、排出される粒子の粒径分布や炭素成分濃度が変わることを確認した。さらに、CO 及び粒子(煤)が高濃度に排出されることから、本システムにおいては燃焼炉の大幅な改善が必要であることが明らかとなった。

以上これを要するに、本研究は、地球温暖化対策において有望な森林系木質バイオマスを利用した小規模エネルギー化施設について、生成物の特性および測定法についての新知見を得たものであり、大気環境保全工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。