

研究論文

マイクロガスタービンの性能試験に基づく コージェネレーションシステムの導入評価

Evaluation of Cogeneration System Based on Performance Test Results of a Micro Gas Turbine

奥田英信*・君島真仁****・浜名芳晴**・笠木伸英***
Hidenobu Okuda Shinji Kimijima Yoshiharu Hamana Nobuhide Kasagi

(原稿受付日2002年7月5日, 受理日2003年8月22日)

Abstract

Cogeneration systems (CGS) are penetrating power generation markets because of their potential of higher energy utilization efficiency with waste heat recovery process. Cost saving merit helps the promotion of CGS, however, this does not always lead to energy saving. We investigate the energy cost minimum operation of CGS using our performance test results of a micro gas turbine (μ GT) as well as typical demand patterns of hotels, office buildings and apartments. We also calculate the fuel consumption associated with proposed modes of operation. It is found that we can achieve considerable cost saving of 44% for hotels, but the fuel consumption increases simultaneously. However, if the power generation efficiency of μ GT is improved to 35%, we can achieve energy saving with the energy cost minimum operation.

1. はじめに

二酸化炭素排出量削減を目標に多様な取り組みが展開される中で、我が国においてもエネルギーの有効利用推進が急務となっている。特に、需要地において発電を行い、排熱を給湯や空調に利用する小型分散エネルギーシステムの普及が、省エネルギー技術の一つとして有望とされている¹⁾。その健全な普及のためには発電機器をはじめとする様々な構成機器の特性を反映させたシステム全体のエネルギー消費量削減効果や経済性に関する十分な評価が必要である。

現在、小型分散エネルギーシステムの基幹発電設備として、マイクロガスタービン (μ GT) に大きな期待が寄せられており²⁾、 μ GTを用いたコージェネレーションシステム (CGS) の導入評価が報告されている³⁾。分散システムでは、ユーザーのニーズに応じた柔軟な運用が可能であることが要請されることから、幅広い作動条件下での μ GTの運転性能を反映させた導入評価が不可欠である。しかし、これまでの報告例において μ GTの部分負荷特性を考慮したものはわずかに見られる程度であり⁴⁾、 μ GTの稼働状態を含めてCGSの導入効果を詳細に評価した例は少ない。

筆者らは、2000年より μ GTの性能評価試験を継続して実施しており、詳細な運転データの蓄積を行っている⁵⁾。それと並行して、 μ GTの性能評価試験の結果ならびに典型的な建物のエネルギー需要パターン (電力, 給湯, 暖房, 冷房) に基づいてCGSの導入評価シミュレーションを行っている。

本論文では、 μ GTの部分負荷特性を考慮し、最適化手法により年間エネルギーコストまたは燃料消費量を最小化するようなCGSの運用方法を決定する方法を示す。さらに、導入対象としてホテルを採り上げ、 μ GT-CGSの運用状況について詳細に検討する。また、CGS導入によるコスト削減効果を示すとともに、燃料消費量削減効果の評価を行い、 μ GTの発電効率向上による経済性と省エネルギー性の両立について事務所ビルと集合住宅への導入を想定した計算結果を含めて考察を加える。

2. マイクロガスタービン・コージェネレーションシステムの導入評価モデル

2.1 システム構成

本研究において対象とするCGSの構成を図1に示す。実線は熱の流れを、破線は電力の流れを示す。 μ GTからは電力と熱を供給し、系統電力、ガスボイラ (GB) からはそれぞれ電力、熱を供給する。図1に示すように電力需要 (E) は電力のみ、給湯需要 (W) は熱のみで賄われ、暖房需要 (H) および冷房需要 (C) は電力、熱の併用が可能である。本システムにおける電力および熱の総需要量 (P_{net} , Q_{net}) は次式で表される。

* 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (現在関西電力株)

** 〃 〃 機械工学専攻技術官

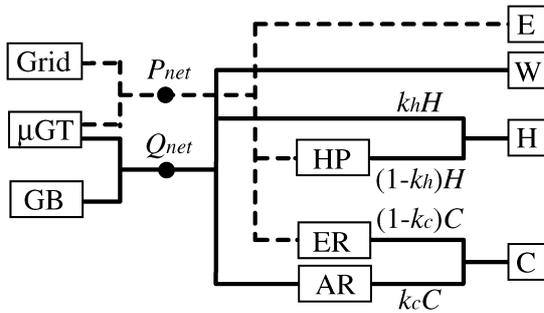
*** 〃 〃 教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

**** 芝浦工業大学システム工学部機械制御システム学科講師

E-mail: kimi@sic.shibaura-it.ac.jp

〒337-8570 さいたま市見沼区大字深作307



GB : Gas Boiler
 HP : Heat Pump
 ER : Electric Refrigerator
 AR : Absorption Refrigerator
 E : Electric Demand
 W : Hot Water Demand
 H : Heating Demand
 C : Cooling Demand

図1 コージェネレーションシステムの構成

$$P_{net} = E + \frac{(1 - k_h)H}{COP_{AR}} + \frac{(1 - k_c)C}{COP_{ER}} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{net} = W + k_h H + \frac{k_c C}{COP_{AR}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、COPは電動ヒートポンプ (HP) および冷凍機 (ER), 吸収冷凍機 (AR) の動作係数を表しており, 冷暖房需要の電力および熱への内訳は排熱利用率 k_h, k_c を用いて表される。また, μ GT未導入で電力により空調を行う ($k_h = 0, k_c = 0$) システムを従来システム (CONV.) として比較対象とする。

2.2 エネルギー供給方法

エネルギー供給方法としては, μ GT群からの電力供給を賄えない時は系統電力を購入し, 過剰な時には売電を行う。一方, μ GTからの排熱を賄えない時はガスボイラ (GB) を稼働させ, 過剰なときには余剰分を廃棄する。

3. コージェネレーションシステムの最適運用問題

3.1 定式化

(1) 決定変数

決定すべき変数は, μ GTの稼働台数 N, μ GTの負荷率 x ($0 \leq x \leq 1$), 排熱利用率 ($0 \leq k_h, k_c \leq 1$), 逆流の有無 δ_p (有: $\delta_p = 1$, 無: $\delta_p = 0$), μ GT排熱の廃棄の有無 δ_o (有: $\delta_o = 1$, 無: $\delta_o = 0$) の6個である。エネルギーコストを目的関数とする場合には, これらに電力とガスの契約量 (\bar{P}, \bar{F}) を加える。

(2) 目的関数

年間エネルギーコスト

本研究では, 初期投資は考慮せず, また, 運用に伴う保守費用, 人件費等も含めない。すなわち, 運用に必要なエネルギーコストのみを採り上げ, これを目的関数とする。年間エネルギーコスト $Cost_{year}$ は, 電力・ガスの基本料金および従量料金より次式で計算される。ただし, 余剰電力を

売電する場合はその売電電力料金を差し引く。

$$Cost_{year} = \sum_{day\ hour} [\Psi_G + \Psi_E \bar{P} + \Psi_G \bar{F} + \phi_E P_{buy} - \phi_{sell} P_{sell} + \phi_G (F_{\mu GT} + F_{GB})] \dots (3)$$

Ψ_G : 1時間あたりのガスの定額基本料金。
 Ψ_E, Ψ_G : 1時間あたりの電力, ガスの従量基本料金。
 $\phi_E, \phi_{sell}, \phi_G$: 買電従量料金, 売電従量料金, ガス従量料金。
 P_{buy}, P_{sell} : 1時間あたりの買電量, 売電量。
 $F_{\mu GT}$: マイクロガスタービンの燃料消費量。
 F_{GB} : ガスボイラの燃料消費量。

年間燃料消費量

年間燃料消費量 F_{year} は次式で計算される。

$$F_{year} = \sum_{day\ hour} (F_{\mu GT} + F_{PP} + F_{GB}) \dots\dots\dots (4)$$

F_{PP} : 購入した電力を得るために必要な燃料消費量。

最適運用モード

本研究では, μ GT-CGSの運用モードとして (3) 式で計算される年間エネルギーコストあるいは (4) 式より求めることができる年間燃料消費量のいずれかを最小化するような運転モードを考えている。前者を「エネルギーコスト最小化モード」, 後者を「燃料消費量最小化モード」とする。(3) 制約条件

μ GT群, 系統電力, ガスボイラからの電力または熱の供給量が需要量以上であることを制約条件とする。したがって, μ GT群からの供給量が十分でない時に, 系統電力購入あるいはGBによるバックアップを行う。

・電力側

$$\delta_p = 0 \rightarrow P_{net} \geq P_{\mu GT}, P_{buy} = P_{net} - P_{\mu GT}, P_{sell} = 0$$

$$\delta_p = 1 \rightarrow P_{net} < P_{\mu GT}, P_{buy} = 0, P_{sell} = P_{\mu GT} - P_{net} \dots\dots\dots (5)$$

・熱側

$$\delta_o = 0 \rightarrow Q_{net} \geq Q_{\mu GT}, Q_{GB} = Q_{net} - Q_{\mu GT}$$

$$\delta_o = 1 \rightarrow Q_{net} < Q_{\mu GT}, Q_{GB} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで, $P_{\mu GT}, Q_{\mu GT}$ はそれぞれ μ GT群からの電力および熱の供給量であり, Q_{GB} はGBによる供給熱量である。

3.2 計算方法

上述のように定式化された問題は, 連続変数 (x, k_h, k_c), 整数変数 ($N, \bar{P}, \bar{F}, \delta_p, \delta_o$) を含む混合整数線形計画問題に帰着される。このような問題に対して, 伊東ら⁶⁾によって分枝限定法とシンプレックス法を組み合わせた解法が提案されているが, ここでは, 整数変数については需要に対して十分大きな数まで列挙し, 連続変数についてはシンプレックス法を用いて求解を行った。本モデルでは蓄熱槽のように, ある時刻の状態が過去の履歴に依存する要素がないことから, 各時刻毎に変数を最適化することで年間の最適化が可能である。

4. 計算条件

4.1 構成機器の性能

(1) マイクロガスタービン

μ GTの性能特性には、既報⁵⁾の試験結果を適用する。図2は試験結果を負荷率と燃料供給熱量、排熱量との関係として整理したものであり、 μ GTの性能特性は1次式にて近似可能であることを確認することができる。

現状マイクロガスタービン

図2の実線が試験結果に基づく μ GTの部分負荷特性の近似式である。実際には図2の近似式に吸気温度補正を加えたものを用いる。 N 台の μ GT群としての性能特性($P_{\mu GT}$, $Q_{\mu GT}$, $F_{\mu GT}$)は近似式による値を N 倍することで計算される。これは台の μ GTが全て同じ負荷率で稼働していることを仮定しているためである。本研究では部分負荷特性を1次式近似していることから N 台の μ GTがそれぞれ異なる負荷率で稼働していても、負荷率の平均値が上述の負荷率と同じであれば N 台の μ GT群としてのエネルギー出力は同じである。

高効率マイクロガスタービン

μ GTの発電効率向上の影響を明らかにするために、発電効率が35%まで向上した高効率マイクロガスタービン(A- μ GT)を想定した計算を行う。A- μ GTの部分負荷特性は現状 μ GTの部分負荷特性から推定する。推定の方法⁷⁾としては、まず、発電容量を現状 μ GTと同量に保ったまま、サイクルパラメータを調整し発電効率が35%となるようにサイクル計算⁸⁾を行う。その結果と現状 μ GTを比較し、必要な燃料消費量の減少比および排熱量の減少比を計算する。これらの比が全ての負荷率で保持されると仮定し、A- μ GTの部分負荷特性を推定した(図2の破線)。A- μ GTを用いたCGSをACGSとする。

(2) 系統電力

系統電力の需要端効率(η_{PP})は、火力発電所の発電端効率および送電ロス considering して0.38とする。購入した系統

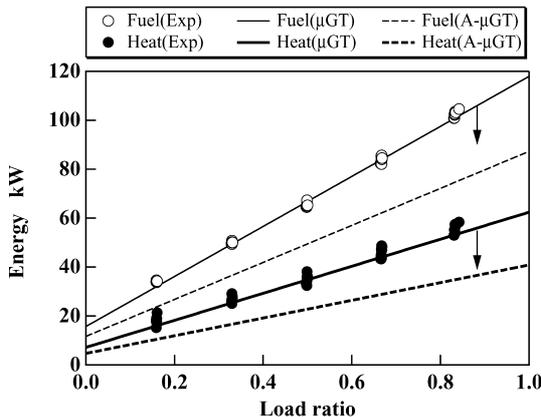


図2 μ GTの部分負荷特性

表1 熱源機器の成績係数

Ambient temp.	Electrically driven heat pump	Electrically driven refrigerator	Absorption refrigerator
	COP _{HP}	COP _{ER}	COP _{AR}
4 ~ 30 °C	4.5~6.7	6.0~3.4	0.77~0.73

電力(P_{buy})を得るための燃料消費量(F_{PP})は次式で計算できる。

$$F_{PP} = P_{buy} / \eta_{PP} \dots \dots \dots (6)$$

(3) ガスボイラ

GBのボイラ効率(η_{GB})は0.9で一定とする。 Q_{GB} の熱供給のために要する燃料消費量(F_{GB})は次式で計算できる。

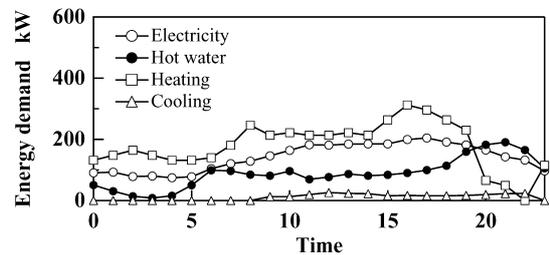
$$F_{GB} = Q_{GB} / \eta_{GB} \dots \dots \dots (7)$$

(4) 空調用熱源機器

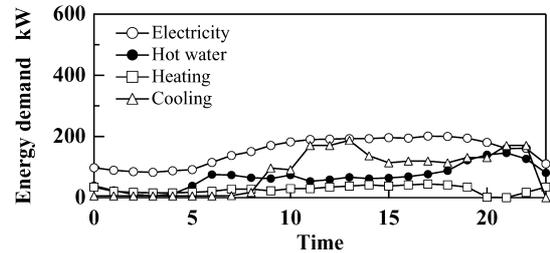
ヒートポンプ、電動冷凍機、吸収冷凍機の特性については、東京の外気温度・相対湿度⁹⁾のデータに基づいてサイクル計算^{10), 11)}を行い、COPを推定した。その結果は表1に示す通りである。

4.2 導入対象

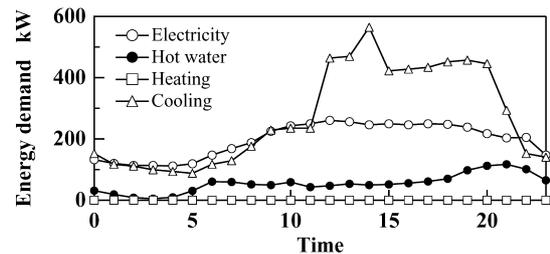
CGSの導入対象としてホテルを採り上げ一年間の各月における1時間毎の電力、給湯、暖房、冷房の需要パターン



(a) 冬期 (1月)



(b) 中間期 (5月)



(c) 夏期 (8月)

図3 ホテルのエネルギー需要パターン

表2 電力および都市ガスの料金体系

Utility	Unit Cost		
	Customer Charge yen	Demand Charge yen/kW	Energy Charge yen/kWh
Purchased Electricity	-	1560	14.6 (Jul.-Sep.)
			13.27 (Jan.-Jun., Oct.-Dec.)
Reversed Electricity	-	-	6.7 (8-22h in Jul-Sep.)
			6.1 (8-22h in Jan.-Jun., Oct.-Dec.)
			3.1 (0-8h, 22-24h)
Town Gas (Case 1)	21500	86.5	3.29
Town Gas (Case 2)	1200	-	6.87 (Jan.- Mar., Dec.)
			5.58 (Apr.- Nov.)

を用いた¹²⁾。床面積は中規模建物を想定し7,000m²に設定した。図3はホテルの一日のエネルギー需要パターンの例である。冬期、中間期ならびに夏期の代表月としてそれぞれ1月、5月、8月における一日の電力、給湯、冷暖房の各需要の時系列変化を示している。ホテルでは、年間を通じて安定した電力需要、給湯需要があり、電力需要の日変化も小さい特徴がある。これに加えて本研究では、事務所ビルおよび集合住宅のエネルギー需要パターンを用いた解析を行っており、それらの時系列データはホテルの場合と同一の文献¹²⁾に基づいている。また、床面積はホテルと同様に7,000m²に設定している。

4.3 電力・都市ガスの料金体系

本研究で用いた電力と都市ガスの料金体系を表2に示す。都市ガスは、CGS、ACGS導入需要家に対しては、CGSに適用される料金単価の低いCase 1を、CONV.には

Case 2を適用する。CGSを導入する場合には自家発補給電力契約を結ぶことが考えられるが、これについては考慮していない。この自家発補給電力契約や初期投資、運用に要する保守費用、人件費等を考慮するためには、年価法⁶⁾を適用し基本料金に上乘せ分があるとして評価することが可能である。この場合、上乘せ分のコストに応じて年間燃料消費量あるいは年間エネルギーコストの削減量が減少することになる。

5. 計算結果

5.1 最適運転パターン

(1) エネルギーコスト最小化モード

図4にホテルを対象とした5月の一日の従量料金を示す。仮想的に1時間毎のエネルギー消費量に対して課金される料金を示している。CGSとACGSのいずれでもμGTにより全電力が供給されており、売電は行われず。すなわち、都市ガスによる発電電力は自ら消費した方が、経済性の観点から有利である。また、GBがほとんど稼働しないことから、P_{net}の供給のために稼働しているμGTで排熱の供給量が十分であると言える。この時のμGTの稼働状況を図5に示す。いずれの時刻においても、おおむね80%以上の負荷率で運転され、最大稼働台数は7台である。この傾向はCGSとACGSの両者に共通である。

(2) 燃料消費量最小化モード

図6にホテルにおける5月の一日の燃料消費量を示す。エネルギーコスト最小化モードと異なり、CGSでは系統電力がエネルギー供給の大部分をしめており、ACGSでも部分的に系統電力からのエネルギー供給があることが分かる。図7はμGTの稼働状況を示しており、CGSでは、エ

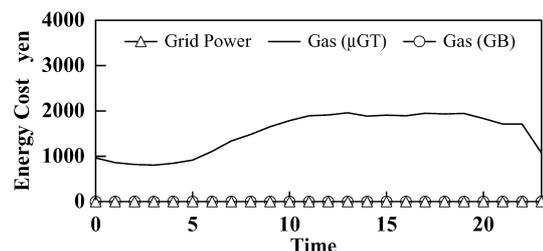
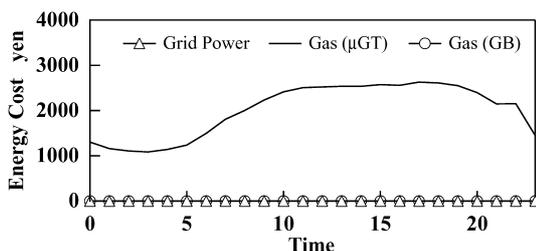


図4 エネルギーコスト最小化モードにおけるエネルギーコストの日変化特性

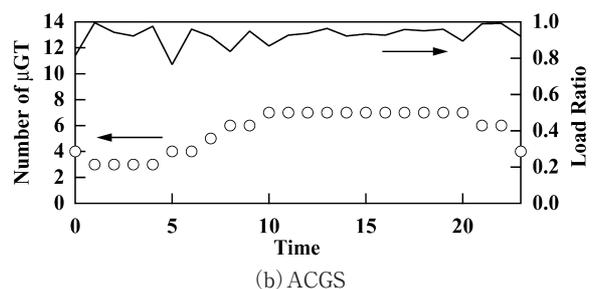
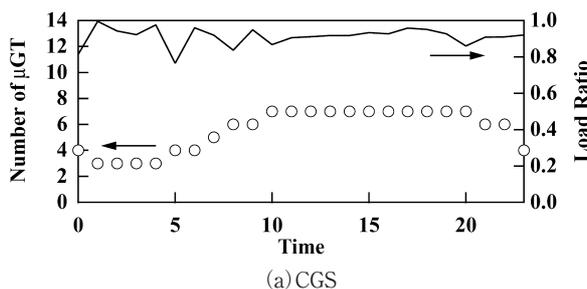


図5 エネルギーコスト最小化モードにおけるマイクロガスタービンの運転状況

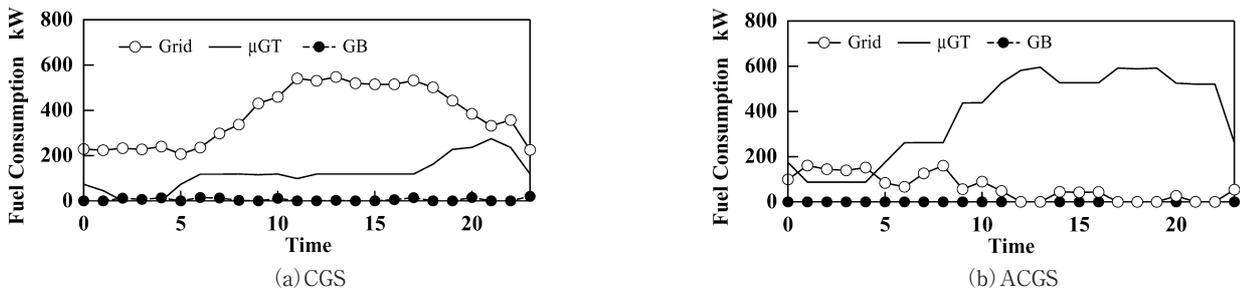


図6 燃料消費量最小化モードにおける燃料消費量の日変化特性

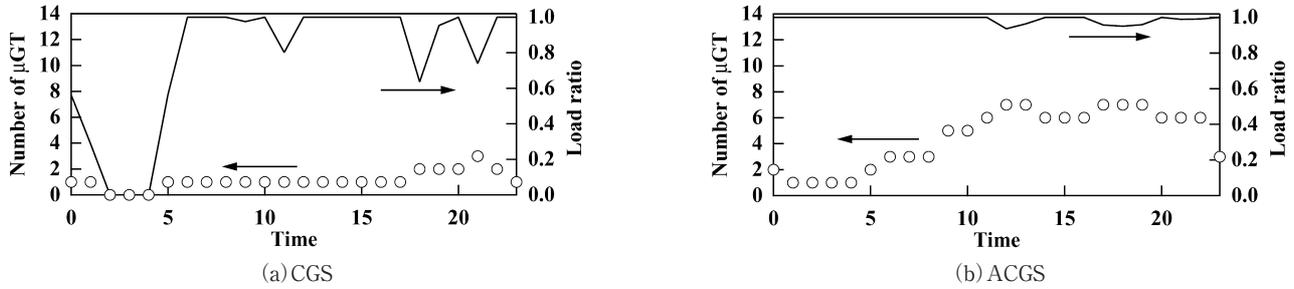


図7 燃料消費量最小化モードにおけるマイクロガスタービンの運転状況

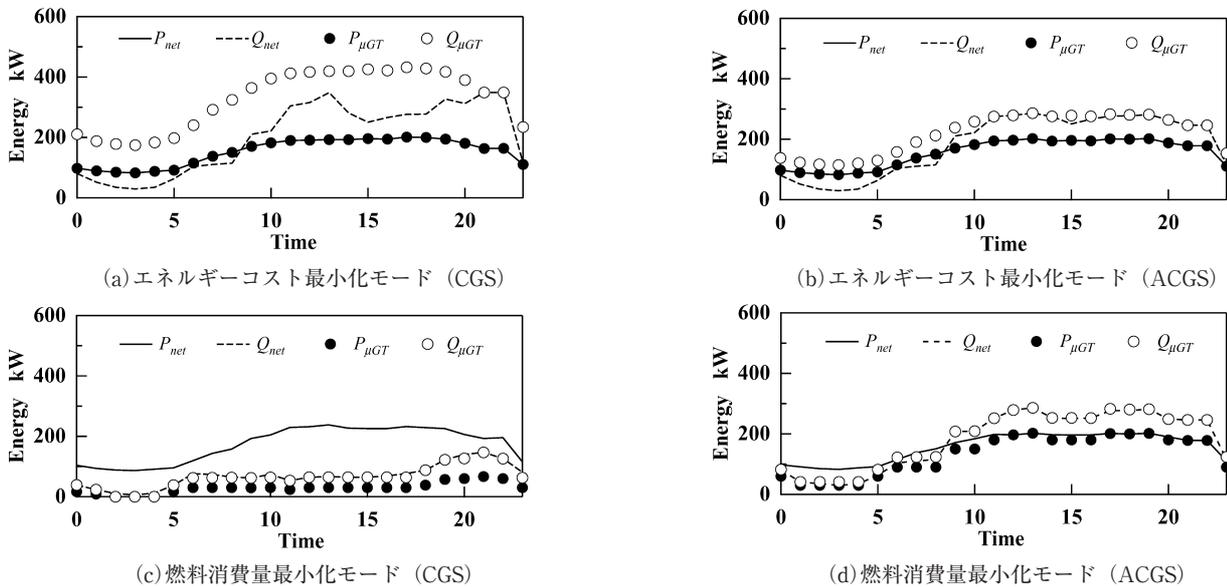


図8 総電力供給量 (P_{net}), 総熱供給量 (Q_{net}) ならびに μ GTによる電力供給 ($P_{\mu GT}$), 排熱供給量 ($Q_{\mu GT}$) の日変化特性

エネルギーコスト最小化モードと比較して稼働台数が減り、 μ GTが稼働しない時間帯も現れる。ACGSでは、全体的に負荷率が高くなる傾向を示す。

(3) マイクロガスタービンのエネルギー供給量

図8はホテルにおいて P_{net} , Q_{net} に占める μ GTからのエネルギー供給量を示している。図8(a), (b)はエネルギーコスト最小化モードである。CGSでは μ GTの排熱が、 Q_{net} に対して過剰となり(図8(a)), 一方、ACGSでは、 μ GTからの電力と排熱が、 P_{net} , Q_{net} の両者に各々追従可能となる時間帯が現れ、廃棄する排熱量もCGSに比して減少する(図8(b))。

図8(c), (d)は燃料消費量最小化モードである。この運転では μ GTの排熱が、 Q_{net} に追従する運転となる。ACGSでは排熱利用率が調整された結果、 P_{net} , Q_{net} への両追従と

なる時間帯が現れる。図8(b)と図8(d)の主な相違点は0時～5時に見られ、図8(b)では、 μ GTの発電出力に追従し、排熱が廃棄されるのに対し、図8(d)では、 μ GTの排熱に追従するので廃棄する量が大幅に減少する。

(4) マイクロガスタービンの部分負荷運転の影響

これまでの報告例では、全ての μ GTを全負荷で運転し、負荷変動に対しては運転台数を変えることで対応するような制御(全負荷台数制御)を想定した検討³⁾が行われている。このような運用では、部分負荷運転による μ GTの発電効率低下を避けることが可能である。これに対して、本研究では実測に基づく μ GTの部分負荷特性を考慮している。図5から分かるように、燃料消費量最小化とエネルギーコスト最小化のいずれの運用モードにおいても、最適化を行った場合には負荷率の高い運転形態が選択される。全

負荷台数制御では、細かい出力調整が出来ないことから、需要と供給を一致させることが困難であり、それによりロスが生じる場合がある。しかし、部分負荷運転を許容すると、細かい出力調整により需要と供給を一致させることが可能になり、ここに部分負荷運転を許容することの意義がある。このことは、おおむね70~100%の出力範囲であれば、部分負荷運転を行っても発電効率の低下が小さいという μ GTの特性⁹⁾に起因していると考えられる。従って、最適化された運用形態が可能な限り高負荷率を目指したものになるという傾向は、 μ GTの単機定格出力には依存しないと考えられる。

5.2 省エネルギーとの両立

図9に年間エネルギーコスト最小化モードにおける年間エネルギーコストおよび燃料消費量を示す。CONV.を100とした場合の比を各棒上に示している。図9には、エネルギー需要パターンの異なる建物として事務所ビルと集合住宅への導入を想定し、ホテルの場合と同様の計算を行った結果を併記している。ホテルでは、CGSを導入した場合には、CONV.に比べ、4割程度のエネルギーコスト削減が可能である(図9(a))が、燃料消費量はCONV.に比べ増加する(図9(b))。ACGSを導入した場合には、さらにエネルギーコストが削減されると同時に燃料消費量削減も同時に達成されることが分かる。

図10に年間燃料消費量最小化モードにおける年間エネルギーコストおよび燃料消費量を示している。棒上の数字は図9と同様である。また、図9と同様に事務所ビルと集合

住宅を対象とした計算結果を併記している。ホテルにおいてCGSを導入した場合には、省エネルギーが達成される(図10(b))のと同時に、年間エネルギーコスト最小化モードより効果は小さいが、エネルギーコストも削減されている(図10(a))。ACGSになると省エネルギー効果がさらに増大し、併せてエネルギーコスト削減効果も増加することが分かる。

また、図9と図10のACGSを比較すると、 μ GT発電効率が向上するといずれの運転モードでも燃料消費量削減と年間エネルギーコスト削減の効果が同程度となることが分かる。

5.3 エネルギー需要パターンの相違の影響

図9(a)から分かるように、事務所ビルと集合住宅のいずれにおいても現状の μ GTを導入しエネルギーコスト最小化モードで運用することで大幅な年間エネルギーコストの削減が可能である。しかし、事務所ビルでは従来システムと比較して年間燃料消費量が22%増加し、ホテルの場合の8%増と同様に省エネルギー効果は得られない(図9(b))。これは、事務所ビルにおいては給湯需要が小さく、排熱を有効に利用できないことに起因している。これに対して、集合住宅では時間帯は夕方に限定されるが、給湯需要が比較的多いことから省エネルギー効果は得られるものの年間燃料消費量削減量は1%程度にとどまる(図9(b))。ACGSの場合には、いずれの建物においても年間エネルギーコストと年間エネルギー消費量の両者を同時に削減することができる。

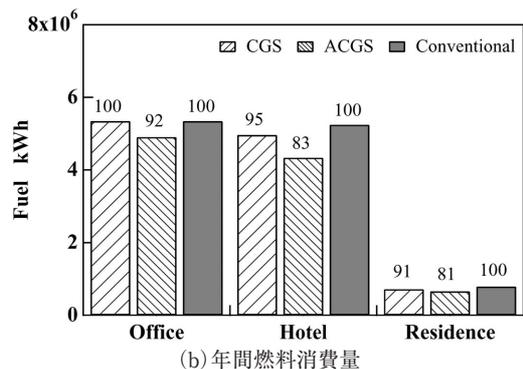
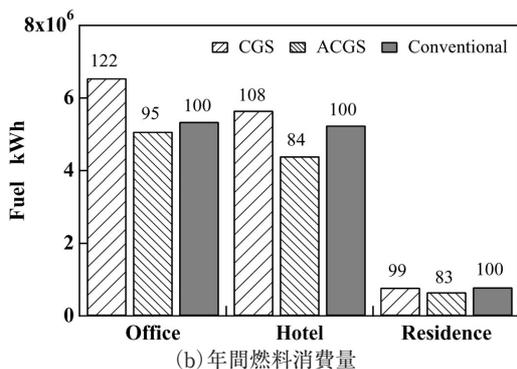
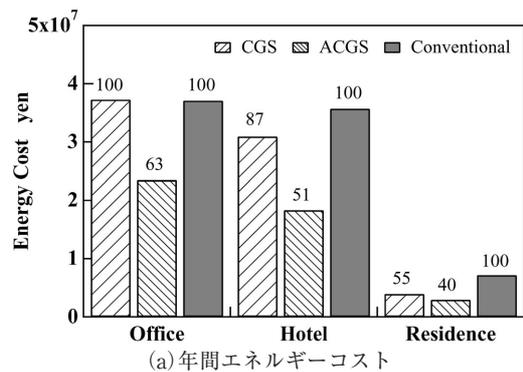
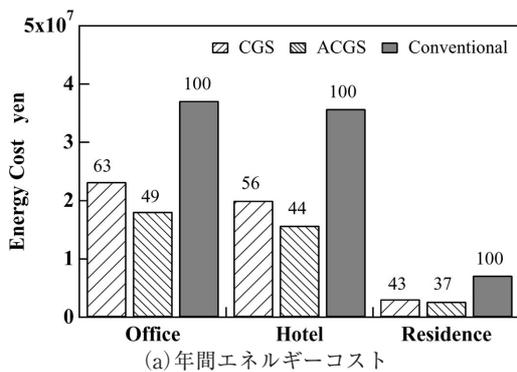


図9 μ GT-CGS導入の効果 (エネルギーコスト最小化モード)

図10 μ GT-CGS導入の効果 (燃料消費量最小化モード)

事務所ビルにおいて燃料消費量最小化モードにて運用した場合には、図10(b)から分かるように燃料消費量削減効果を期待することができない(削減量が0.013%程度のため図10(b)ではこれを無視している)。この時、表2の料金体系では年間エネルギーコストが僅かに増加する(増加量が0.48%程度のため図10(a)ではこれを無視している)。このことは、省エネルギー効果を優先すると、給湯需要の少ない事務所ビルでは排熱を有効に利用できないことから μ GTがほとんど稼働しないことを示しており、現状性能の μ GTでは事務所ビルへの導入は困難であると言える。これに対して集合住宅では、9%の年間燃料消費量削減効果が得られるとともに45%程度の年間エネルギーコストの削減が期待できる。ACGSの場合には、いずれの建物でも年間エネルギーコスト最小化モードと同様に省エネルギー性と経済性の両立が可能である。

6. まとめ

本論文では、定格出力28kWの μ GTの性能試験結果に基づき、ホテルを対象としてシステムの運用状況に関する詳細な検討を行った。さらに、CGSの導入効果について表2に示した電力と都市ガスの料金体系を用いて、ホテルならびに事務所ビル、集合住宅を対象とした経済性と省エネルギー性の評価を試みた。得られた知見を要約する。

- (1) 現状性能の μ GTでも、エネルギーコストを最小化する運用を行えば、エネルギーコストを削減できる。例えば、ホテルでは44%の年間コスト削減が可能である。
- (2) エネルギーコスト削減を目標とした運転では省エネルギーとの両立が必ずしも達成されない。
- (3) 燃料消費量削減を目標とした運転では、給湯需要の見込める需要家の場合、コスト削減も同時に達成される。
- (4) 年間エネルギーコストおよび年間燃料消費量削減効果は導入対象のエネルギー需要パターンに依存しており、現状の μ GTの発電効率では、給湯需要の割合が小さい建物への導入は困難である。
- (5) μ GTの発電効率が35%まで向上すると、いずれの運

転モードにおいても、同程度の燃料消費量削減効果と年間エネルギーコスト削減効果が得られる。

- (6) 現行の料金体系下では、いずれの運転モードにおいても、売電が生じないような運用形態となる。

謝辞 本論文は、科学技術振興機構との間で戦略的基礎研究推進事業の一環として契約された「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」研究領域内の「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」研究の成果である。

参考文献

- 1) 平田賢；21世紀「水素の時代」を担う分散型エネルギーシステムの展望，コージェネレーションシンポジウム2001（第17回）発表抄録集，（2001），3-18.
- 2) 笠木伸英；マイクロガスタービン小型分散エネルギーシステム，高圧ガス，38-6（2001），544-552.
- 3) 今村栄一，浅野浩志；業務用需要家におけるマイクロガスタービン導入規模に対する各種技術・コスト要因の影響分析，エネルギー・資源学会 第20回研究発表会講演論文集，（2001），245-250.
- 4) 上甲勝弘，伊東弘一，横山良平，蒲生恵司；多目的最適化手法に基づくマイクロガスタービン・コージェネレーション・システムの導入可能性分析，第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，（2001），543-548.
- 5) 笠木伸英，浜名芳晴，奥田英信，三輪潤一，君島真仁；28kWマイクロガスタービンの性能評価試験，第29回ガスタービン定期講演会講演論文集，（2001），83-88.
- 6) 伊東弘一・横山良平；コージェネレーションの最適計画，（1990），産業図書.
- 7) 伊藤高根・中野学・宮入武；マイクロガスタービンを用いた家庭用コージェネレーションシステムのエネルギー利用向上に関する試算，日本機械学会 第7回動力・エネルギー技術シンポジウム2000講演論文集，（2000），194-199.
- 8) 福永茂和・上地英之・笠木伸英；サイクル解析用GUIソフトウェア開発とマイクロガスタービン概念設計，第28回ガスタービン定期講演会講演論文集，（2000），141-146.
- 9) 気象庁；気象年報，（1993），104.
- 10) 井上宇市編；空気調和ハンドブック（改訂4版），（1996），179-185，丸善.
- 11) 君島真仁・笠木伸英；28kWマイクロガスタービンの排熱による吸収冷凍機の駆動に関する一考察，平成13年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集，（2001），85-88.
- 12) 空気調和・衛生工学会編；都市ガスによるコージェネレーションシステム 計画・設計と評価，（1994），137-142，丸善.