

地域環境改善手法を用いた外気温低下による コージェネレーション用熱機関の効率算定

松本 朋弥¹・藤田 壮²・耿 子威¹

¹非会員 東洋大学大学院 工学研究科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail:gd0800011@toyonet.toyo.ac.jp

²正会員 (独)国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
東洋大学 工学部環境建設学科 (同上)

本研究ではコージェネレーション(CGS)用熱機関の外気温上昇による熱効率、出力の変化を熱力学的手法を用いて解析すると共に、GISを用いて都市におけるCGS分布を把握し、外気温変化に伴う将来のCGSエネルギー効率の変化を算定する。また保水性舗装などの地域環境改善技術を導入した際の外気温低下効果を考慮したCGSエネルギー効率を算定することを目的とする。分析の結果、夏季3か月での地域環境改善技術導入によって川崎市既設CGS由来のCO₂発生量は外気温が1℃下がるにつき、1,000t削減されることがわかった。

Key Words : combined heat and power, Geographical Information System, ambient temperature

1. はじめに

コージェネレーションシステム(以下 CGS)に用いられるガスエンジン(以下 GE)、ガスタービン(以下 GT)などの空気を作動流体とする熱機関は、外気温が高くなり空気密度が小さくなると、出力効率が低下する特性がある¹⁾。このため電力需要が最も大きくなる夏季の昼間において CGS の出力が低下することが知られている。近年の都市部でのヒートアイランド現象や、国立環境研究所地球環境研究センター(CGER)や気象庁気象研究所による予測では将来の温暖化によりさらなる都市部の気温上昇の可能性が示されており、CGS 出力の低下を招く恐れもある²⁾。外気温上昇による内燃機関の出力低下は使用する燃料消費量の増大を意味し、都市における人工排熱によるヒートアイランド現象の進行と CO₂排出量増大へつながる。CGS 用内燃機関の吸気冷却技術としては、CGS 排熱を利用した吸収式冷凍機による空調及び冷水と吸気空気の熱交換方式³⁾や、吸気ダクトへのミスト噴霧による吸気冷却⁴⁾などが実用化されている。しかし、CGS 出力を利用するこれらの技術も外気温によって効率が変化する。これに対して、ヒートアイランド対策技術(地域環境改善技術)として開発と普及が進められている、建築物に対する屋上緑化や高反射率塗装、道路等地面に対する保水性舗装なども、外気温低減技術、すなわち吸気冷却技術として評価することができる。

本研究では川崎市を対象とし、CGS の分布と気温分布から現在の CGS 効率の算定を行い、将来(2030 年、2050 年)の気温上昇による CGS 効率変化による影響を算定する。合わせて地域環境改善技術の導入による CGS 本体の熱効率向上効果を算定する。

2. 既存研究

CGSについての研究にはハード及び周辺機器に関するものと運用や導入による都市熱環境のシミュレーション等がある。山下(2004)⁵⁾はGTCCGSに用いられる吸気冷却システムの特徴を比較し、分散型電源としての経済性を評価している。宇多村ら(2000)⁶⁾はGTを対象としたミスト噴霧吸気冷却システムの開発と経済性評価を行っている。小島ら(2008)⁷⁾は都市部に導入されたCGSの都市熱環境に与える影響をメソスケール気象モデルを用いて解析している。また、緑化や保水性舗装等の地表面被覆改善技術や高反射塗料など建物に対する外気温低減技術についても研究されている。成田ら(2004)⁸⁾は保水性舗装の蒸発特性を明らかにし、田村ら(2005)⁹⁾は東京23区を対象に緑化や高反射率塗装などの外気温低減技術の評価を行っている。

3. 外気温変化によるCGS効率算定プロセス

(1) CGSの効率算定式

一般にCGSに用いられる熱機関はGE(ガスエンジン), DE(ディーゼルエンジン), GT(ガスタービン)などの内燃機関であり, 近年では燃料電池も用いられている。それぞれの特徴を表-1に整理する¹⁰⁾。日本の大都市での既設のCGSは都市ガスを燃料としたGE, GTが大半を占めており, DEはCGS用原動機としてはほとんど用いられていない。よって本研究ではGE, GTを対象とし, 算定を進める。実際のCGS原動機では燃焼ガスが作動流体であり, また仕事を行った後には作動流体を環境外に放出するオープンサイクルである。本研究では簡略化のために, 燃焼を加熱過程に置き換え, また比熱比一定の理想気体を作動流体に用いた理想サイクル¹⁰⁾として解析を行った。CGSの性能を示す指標としては, 発電効率及び熱利用を含めた総合効率が用いられるが, 総合効率は業種や用途により熱利用需要に差異があるため¹⁰⁾, 本研究では発電効率と外気温の関係を解析する。以下にGE, GTの理論式を示す。

a) ガスエンジン(GE)の理論式

GEの理論サイクルはオットーサイクルである。オットーサイクルはGEやガソリンエンジンなどの火花点火機関の理論サイクルである。特徴として, 加熱過程が等容状態で行われ, 燃焼が間欠的に行われる往復動機関であるので, サイクルごとに各部を冷却できるため最高温度 T_3 を高めに設定することができ¹⁰⁾, その理論熱効率 η_{th} 出力 W は以下の式で示される¹⁰⁾。

$$W = Q_H - Q_L \quad (1)$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} \quad (2)$$

$$= \frac{C_v M (T_3 - T_2) - C_v M (T_4 - T_1)}{C_v M (T_3 - T_2)} \quad (3)$$

$$= 1 - \frac{1}{\epsilon^{\frac{1}{\kappa-1}}} \quad (4)$$

$$= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (5)$$

W : 出力[kW]
 Q_H : 加熱量[kJ/kg]
 Q_L : 冷却量[kJ/kg]
 η_{th} : 理論熱効率
 C_v : 空気定積比熱[kJ/(kg・K)]
 ϵ : 圧縮比
 T_1 : 外気温[K]
 T_2 : 圧縮後温度[K]
 T_3 : 加熱後温度[K]
 T_4 : 膨張後温度[K]
 M : 質量流量[kg/s]
 κ : 比熱比

b) ガスタービン(GT)の理論式

GTの理論サイクルは発電用ガスタービンや, 航空機用ジェットエンジンと同様にブレイトンサイクルである。その特徴として過熱, 冷却過程が等圧変化であり, 燃焼

が連続的に行われるため, 最高温度 T_3 をGEほど高く取ることができない¹⁰⁾。GTの理論熱効率 η_{th} 出力 W はGE式(3)の定積比熱を定圧比熱に置き換えたものであり, 式(1), 式(2), 式(5)は同様である¹⁰⁾。

$$W = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$$

$$= \frac{c_p M (T_3 - T_2) - c_p M (T_4 - T_1)}{c_p M (T_3 - T_2)} \quad (6)$$

$$= 1 - \frac{1}{\phi^{\frac{1}{\kappa-1}}} \quad (7)$$

$$= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

c_p : 空気定圧比熱[kJ/(kg・K)]
 ϕ : 圧力比

(2) 外気温による空気密度変化と空気質量流量の算定

a) 空気密度の算定プロセス

内燃機関であるGE, GTの出力は吸入空気質量流量に比例し, 空気密度の変化により出力が変化する。外気温による空気密度の算定式を式(8), 及びその関係を図-1に示す¹⁰⁾。

$$\rho_a = \frac{\rho_a}{T_a} \cdot \frac{P_a}{P_0} \quad (8)$$

ρ_a : 外気空気密度[kg/m³]
 ρ_0 : 基準空気密度[kg/m³]
 T_a : 外気温度[K]
 P_a : 外気大気圧[Pa]
 P_0 : 基準大気圧[Pa]
 T_0 : 基準空気温度[K]

	表-1 各CGS原動機の特徴 ¹⁰⁾		燃料電池
運転時間	断続運転可		断続運転可
保守点検	頻繁な点検		少ない
燃料	都市ガス 灯油	軽油 重油	都市ガス 灯油
排気ガス	窒素酸化物	窒素酸化物	問題なし
発電容量(kW)	40~3000		500~30000
発電効率(%)	28~33	32~37	20~25
熱	水蒸気 温水		水蒸気 温水

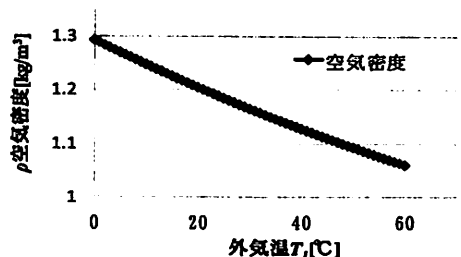


図-1 空気密度と外気温の関係($P_0=1\text{atm}$, $T_0=0^\circ\text{C}$)

b) 空気質量流量の算定プロセス

内燃機関の燃焼に必要な空気量(空気質量流量)は燃料により異なり、燃料が燃焼するために最低限必要な空気量を理論空気量 A_0 と呼ぶ。また、理論空気量に対する空気の過剰度を空気過剰率 μ といい、GEでは1.0~2.4、GTでは3.0~4.0となる¹⁾。GTは前述のように連続燃焼であるため最高温度 T_3 を材料的制約から低く抑える必要があり、過剰に空気を導入することで冷却を行っている。そのため、多量の空気を圧縮する必要があり、外気温変化による空気質量流量変化での出力変動が他の内燃機関より大きい¹⁾。以下に空気密度と空気質量流量の関係式を示す。

$$M_a = \mu A_0 \quad (9)$$

$$M_f = 1 \quad (10)$$

$$M = \left(\frac{M_a}{M_a + M_f} \right) + \left(\frac{M_f}{M_a + M_f} \right) \quad (11)$$

$$M' = \left(\frac{M_a}{M_a + M_f} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_0} \right) + \left(\frac{M_f}{M_a + M_f} \right) \quad (12)$$

M_a : 空気質量流量[kg/s]
 M_f : 燃料質量流量[kg/s]
 A_0 : 理論空気量[(kg-air/kg-fuel)]

μ : 空気過剰率
 M' : 密度影響質量流量[kg/s]

図-1のとおり、気温が低下することで空気質量流量が大きくなり、CGSの出力、効率が增加する。

(3) CGSパラメータの設定

本稿で用いたCGSデータでは熱効率、出力などの明確な値がなく、年間燃料消費量と年間稼働時間から妥当な熱効率 η_h 、最高温度 T_3 などの各パラメータを設定した¹³⁾。また技術進化に伴う将来の各パラメータについても設定を行った。

a) GEのパラメータ設定

GEは圧縮比 ε と最高温度 T_3 を小型、中型、大型と分類し、パラメータを設定した。表-2に詳細を示す。GE圧縮比 ε は0.05/年のペースで上昇しており¹⁴⁾、2030年、2050年に予想される圧縮比 ε' 、 ε'' 、最高温度 T_3' 、 T_3'' に伴った値を将来の η_h として与えた。

b) GTのパラメータ設定

GTは圧力比 φ と最高温度 T_3 を小型、中型、大型と分類し、パラメータを設定した。表-3に詳細を示す。GT最高温度 T_3 は20K/年のペースで上昇しているが¹⁵⁾、材料の耐熱温度から妥当な値を設定した¹³⁾。GEと同様に、2030年、2050年に予想される圧力比 φ' 、 φ'' と最高温度 T_3' 、 T_3'' に伴った値を将来の η_h として与えた。

4. 外気温の将来予測

(1) 対象都市

川崎市を対象としてCGS分布と気温分布から、地域特性を考慮したCGSの効率変化を算定する。川崎市は産業用CGS発電容量が全国の4.2%、民生用は1.2%を占めている。また2010年までの目標を51万kWとしており、導入に積極的に取り組んでいる¹⁶⁾。

(2) 対象都市における外気温の将来予測

現在のCGS発電効率の他に将来の外気温を予測し、2030年、2050年のCGS発電効率を算定するため、広域の平均予測値を用いて川崎市の将来気温を推定する。

気象庁ではIPCCのSRES A2シナリオ¹⁷⁾を用いた2100年の関東地方の夏季、冬季の気温と風向きを水平分解能4kmの都市気候モデルを用いて予測している²⁾。これによると晴れた風の弱い日の関東地方の都市における気温は、現在(1998~2000)と比較して日平均気温で1℃上昇するとしている。

CGERではIPCCのSRES A1Bシナリオを用いた日本の夏季3か月平均気温の将来予測を行っている¹⁷⁾。これによると2030年は2000年と比較して1.5℃上昇し、2050年は2.5℃の上昇、2100年は4.5℃上昇するとしている。

本研究ではA1Bシナリオを用いたCGERの将来予測から、2030年で+1.5℃、2050年で+2.5℃を現在の川崎市の夏季平均気温に加算した外気温を将来のCGS効率算定に用いた。

川崎市に立地するCGSに吸気温度を与えるために、百葉箱観測データなどから川崎市温度分布データを作成する。使用したGISデータを表-4、川崎市の2006年夏季3か月(6,7,8月)の平均気温分布を図-2に示す。またCGS効率算定の際、外気温はCGSポイントでの気温分布の値を用いた。

表-2 GEのパラメータ('2030年, '2050年)

	η_h	ε	ε'	ε''	T_3 [K]	T_3' [K]	T_3'' [K]
小型	0.342	10	11	12	2773	2773	2773
中型	0.398	10	11	12	2773	2773	2773
大型	0.422	10	11	12	2773	2773	2773

表-3 GTのパラメータ('2030年, '2050年)

	η_h	φ	φ'	φ''	T_3 [K]	T_3' [K]	T_3'' [K]
小型	0.248	7	10	13	1273	1473	1673
中型	0.273	10	13	16	1473	1673	1873
大型	0.316	20	25	30	1627	1827	2073

表4 川崎市 CGS 解析に用いた GIS データ

	名称	項目	形式	情報元
CGS分布情報	CGS分布	CGS所在地 年間燃料使用量 年間稼働時間	ポイント	川崎市環境局
気温分布情報	気温分布	百葉箱所在地 年間気温	ポイント	川崎市環境局

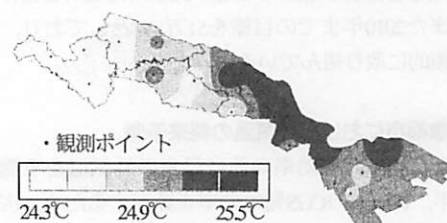


図2 川崎市夏季3か月平均外気温分布

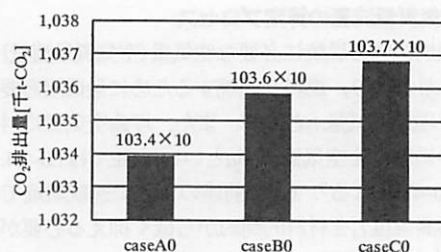
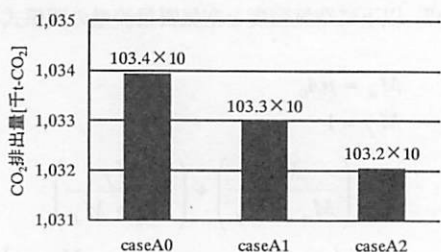
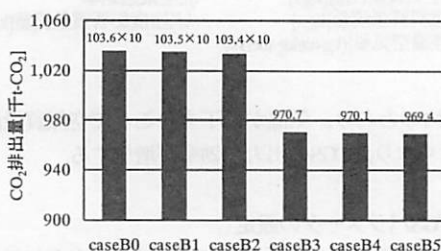
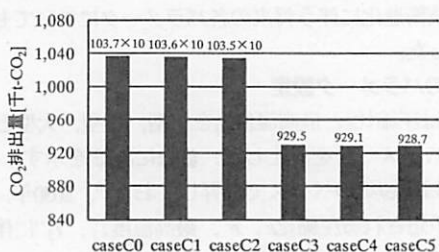
表5 ケース一覧

		現在(A)	2030(B)	2050(C)
技術導入なし		caseA0	caseB0	caseC0
環境改善技術による 外気温低減効果	-1℃	caseA1	caseB1	caseC1
	-2℃	caseA2	caseB2	caseC2
熱効率向上			caseB3	caseC3
熱効率向上及び 環境改善技術による 外気温低減効果	-1℃		caseB4	caseC4
	-2℃		caseB5	caseC5

5. 外気温変化によるCGS効率の算定

CGS効率の変化と外気温の将来予測、地域環境改善技術による外気温低減効果を考慮したケースを設計する(表5)。case0では外気温上昇及び熱機関効率が現在と同等とした。case1,2では外気温上昇を考慮し、地域環境改善技術による外気温低減効果を田村(2005)⁹⁾や成田ら(2004)¹⁰⁾を参考に-1℃、-2℃と設定した。case3では外気温上昇及び熱機関効率向上を考慮した。case4,5はcase1,2とcase3を合わせたものである。

各ケースごとの夏季3か月のCGS効率変化によるCO₂排出量の変化量を示す。現在と2030年、2050年の外気温変化によるCO₂排出量の変化を図3に示す。外気温上昇がCGS効率を低下させ、CO₂排出量が增大していることがわかる。現在の地域環境改善技術がもたらす吸気冷却効果によるCO₂排出量の変化を図4に示す。外気温が1℃低下するごとにCGS効率が向上し、約1,000tのCO₂排出量削減となった。熱機関の熱効率向上と、地域環境改善技術による外気温低減効果を考慮した2030年のケース別CO₂排出量算定結果を図5に示す。熱効率向上によって大きくCO₂排出量が削減できる結果となった。地域環境改善技術導入による外気温低減1℃あたりの削減量は、熱効率が向上しないcaseB0,B1,B2に比べ小さくなることわかった。

図3 ケース別 CO₂排出量(技術導入なし)図4 ケース別 CO₂排出量(現在)図5 ケース別 CO₂排出量(2030年)図6 ケース別 CO₂排出量(2050年)

これはGTの熱効率の向上が大きく、外気温 T_1 と最高温度 T_3 との温度差が大きくなるにつれて相対的に外気温 T_1 上昇による空気密度低下の影響が小さくなるためと考えられる。2050年のケース別CO₂排出量算定結果を図6に示す。図5に比べ外気温が上昇しても熱機関の効率向上による効果が大きくなり、2030年より1℃あたりのCO₂削減量が減少している。

6. おわりに

本研究では、温暖化に伴う気温上昇によるCGS効率への影響算定のプロセスを構築したうえで、川崎市を対象としたCGS効率の算定を行った。

結果として夏季3ヵ月間で1℃低下につき、約1,000t-CO₂の削減効果が得られることを定量的に把握した。外気温低減技術は前述のように多くの技術が提案・実用化されているが、これらの技術がCGS用熱機関の効率向上効果という付加価値を持つことを示すことができた。今後、地域環境改善技術とヒートポンプ、小規模CGSなどの技術インベントリを拡大することを予定している。

本研究は環境省・地球環境研究総合推進費(研究代表: 藤田 壮)の一貫として行われた。

参考文献

- 1) 藤井照重, 中塚勉, 須恵元彦, 小田拓也, 杉本勝美: コージェネレーションの基礎と応用, pp.27-103, コロナ社, 2003.
- 2) 気象庁: 地球温暖化予測情報 第6巻, pp.49-54, 2005.
- 3) 藤本洋, 薬師寺信吾: OS4-05 アンモニアを使用したガスエンジン廃熱利用技術の開発, 動力・エネルギー技術の最前線講演論文集, Vol.2005, No.10, pp.169-172, 2005.
- 4) 柴田貴範, 明連千尋, 幡宮重雄: OS7-05 ガスタービン吸気ダクト内を流れる液滴群の蒸発挙動, 動力・エネルギー技術の最前線講演論文集, Vol.2005, No.10, pp.95-98, 2005.
- 5) 山下誠二: 吸気冷却ガスタービンコージェネレーションシステムの経済性, 動力・エネルギー技術の最前線講演論文集.
- 6) 宇多村元昭, 桑原孝明: ガスタービン増出力用の吸気加温冷却システム・日立WACシステム, 日本ガスタービン学会誌 Vol.28, No.3, pp.249-251, 2000.
- 7) 小島弘, 大岡龍三, 川本陽一, 市川徹: 都市部に導入された大型分散エネルギーシステムの都市熱環境影響評価, 第42回空気調和・冷凍連合講演会, pp.123-126, 2008.
- 8) 成田健一, 三坂育成, 国島武史, 中山兼考, 若林伸介: 蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価, 日本建築学会技術報告集, No.20, pp.187-190, 2004.
- 9) 田村英寿, 石井康一郎, 横山仁, 岩坪哲四朗, 平口博丸, 安藤晴夫, 山口隆子, 市野美夏, 秋山祐佳里, 三上岳彦: 東京23区におけるヒートアイランド対策導入効果の数値予測, 東京都環境科学研究所年報, 2005.
- 10) 齊藤考基, 飛原英治, 畔津昭彦: 新版 エネルギー変換, pp.49-75, 東京大学出版会, 2006.
- 11) 西山智康, 佐々田弘之, 岩崎裕典: 産業用コージェネレーションの運用実態の分析, 三菱総合研究所所報, No.45, 2006.
- 12) 上田政文: 温度と蒸発-基礎から計測技術まで-, コロナ社, 2000.
- 13) 日本コージェネレーションセンター: 新版 コージェネレーション総合マニュアル, pp.727-835, 通産資料出版会, 2003.
- 14) 日本機械学会編: 機械工学便覧 応用システム編 y4 内燃機関, pp.28, 112, 丸善, 2006.
- 15) 川崎市: 新エネルギービジョン(改訂版), 2005.
- 16) 国立環境研究所: 地球環境研究センターニュース, Vol.15, No.6, pp.6-8, 2004.
- 17) 成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本篠毅, 木村圭司, 桑田直也: 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみだし現象, 地理学評論, 第77巻第6号, pp.403-420, 2004.
- 18) 気象庁: IPCC第三次評価報告書の要約(気象庁訳) 排出シナリオに関する特別報告(SRES)の排出シナリオ, http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdrinfo/ipcc_tar/spm/scenario.htm.

CALCULATION OF THERMOMOTOR EFFICIENCY IN COGENERATION DUE TO THE AMBIENT TEMPERATURE CHANGE BY ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES

Tomoya MATSUMOTO, Tsuyoshi FUJITA and Geng ZIWEI

Thermal efficiencies of the thermomotor in cogeneration system(CGS) by the ambient temperature change sure evaluated. Based on the CGS distribution data in a city, Kawasaki in Japan, CGS energy efficiency change in the future according to the ambient temperature change is estimated. CGS energy efficiency increase in alternative future scenarios including those to develop environmental heat control technologies are estimated focusing their ambient temperature change effects. The amount of the CO₂ emission reduction in the city by application environmental technologies are estimated as much as thousand CO₂-t.