

研究論文

雪エネルギーによる発電

木村 浩一・兼古 悟*

The snow electrical generation system

KIMURA Koichi and KANEKO Satoru

Abstract: We have demonstrated that a low temperature difference (LTD) Stirling engine could be a beneficial electric generator providing the method of reducing urban heat island effect and global warming accompanied by the efficient snow management. In our plan, snow in winter would be stored in underground space and used as a heat sink. A high temperature road surface in summer would be used as a heat source. Our experimental model engine, which harnesses 52.8 cm² of a model road panel surface, generated electricity of 0.37 mW under the condition of ice water as a heat sink, and the model road panel up to 50°C as a heat source. The temperature of the model road panel was decreased at about 4°C by running the engine. Though the LTD Stirling engines have been intended for demonstration purposes only because of their low efficiency, the system proposed here suggests the LTD Stirling engine to be effective for power generation without emission of CO₂ and with reducing global warming.

【緒言】

地球温暖化が問題になる以前から、都市の中心部が郊外と比較して常に気温が高いということは、ヒートアイランド現象として知られていた。近年エネルギー使用量の増加に伴い、ヒートアイランド現象による局地的気温上昇が原因と思われる大都市での異常気候が報告されるようになった。また、この気温上昇のため、冷房の使用量が増加し、それに伴う排熱増加がさらにヒートアイランド現象を加速するという悪循環に陥っている。さらに、冷房使用量増加に伴う電気使用量の増加が、CO₂排出増大の一因ともなっており、地球温暖化防止を目的とした京都議定書に定められたCO₂排出削減義務の達成を目指す上でも、看過出来ない問題となっている。ヒートアイランド現象による高温の路面を、路面に設置した熱電素子

によってエネルギーとして活用しようという試みが発表されているが¹⁾、現在の熱電素子の効率では、路面と地中の温度差から有効な電力量を得る事は困難である。

一方、雪国では道路の除雪や、除雪した雪の「捨て場所(堆雪場)」確保に多額の費用を要し、また、堆雪場までの雪運送にも多額の出費を強いられている。札幌市の場合、平成21年度の雪対策に143億円もの費用がかけられており、このうち除雪に43億円、堆雪場管理に15億円、運搬・排雪に54億円が費やされている²⁾。運搬・排雪には多数の大型車が使用されてCO₂を排出しており、他にも、融雪槽や大型融雪車など、わざわざエネルギーを使って融雪をする装置の設置や開発までもが行われている状況である。

平成14年より「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法(新エネ法)」に、雪氷エネル

ギーが新エネルギーとして追加された。これを受け、積雪地帯では、夏場の冷房や農作物の保存などに利用しようという試みがさかんに行われ、一定の効果が示されている³⁾。しかし、現時点では、これを利用できるのは貯雪施設に近接した地域に限られてしまうこと、またある程度の規模を持った貯雪設備が必要であることなどが、本格的な普及への障害になっている。

我々は、雪のさらなる活用方法として、ヒートアイランド現象による高温の路面と、雪との温度差を利用したスターリングエンジンによる発電システムを提案する。このシステムでは、都市部の道路地下に貯雪空間を設け、冬期に除雪した雪を貯蔵することで、雪の運搬にかかわる費用とエネルギー消費を軽減する。夏期、表面温度が50℃以上にも達する都市部での舗装路面を高温部とし、地下に貯蔵した雪を低温部とした低温度差スターリングエンジンを設置し、発電を行う。雪を電気という形に変換するため、システム設置場所からの距離に関係なく、また、冷房以外の用途にも雪エネルギーを利用することが可能となる。本システム稼働の副作用として路面温度が低下するため、ヒートアイランド現象の対策としても有効であり、CO₂も排出しないので地球温暖化対策としても有用である。今回、このシステムの有用性を確認するために実験用試作品を作製し、検討を行った。

【方法】

1. スターリングエンジン

温度差で電気を起こすには、前述の様にゼーベック素子の様な熱電素子で直接発電する方法や、液体を高温側で蒸発させ、タービンを回して発電機を動かす方法⁴⁾ などがある。しかし、ゼーベック素子は、実用的な起電力を得るために数百度の温度差が必要で、タービンを回す方式は大がかりな設備が必要となる。

スターリングエンジンは、スコットランドの牧師ロバート・スターリングが1816年に発明した

エンジンで、海上自衛隊の最新型潜水艦「そうりゅう」にも採用されており、その最大の特徴は、構造が簡単であること、熱効率が非常に良いことである。二つの異なる温度を利用してエネルギーを取り出す場合、理論的に導き出される最大の効率は、カルノーサイクルと呼ばれる熱機関⁵⁾ で得ることが出来るが、カルノーサイクルは実際には実現不可能で、唯一スターリングエンジンのみが、カルノーサイクルに限りなく近い高効率の熱機関として存在している。夏の道路路面と雪との温度差は60℃程度のため、ゼーベック素子やタービンを使用した発電では、有効な発電量を得るのが困難である。

スターリングエンジンの主要部分は、空気の加熱と冷却を行う容器からなり、この容器を一種の断熱材(ディスプレイサ)が仕切っている(図1)。断熱材の周囲は空気が自由に行き来可能な隙間が十分あり、この断熱材を移動させることで内部の空気が高温側あるいは低温側に移動し、その結果生ずる空気の膨張・収縮によりピストン(パワーピストン)を上下させる動力としている。

実験に使用したスターリングエンジンは、直径8.2cm、工程長2.3cmのディスプレイサ部を持つ低温度差スターリングエンジンである。エンジンの高温部は路面部に直接接しており、低温部には雪貯蔵槽に達するヒートシンクを装着した(図2)。高温部を50℃、低温部を0℃とした場合、本エンジンの計算上の最高軸出力は1.7Wである。

2. 発電装置

スターリングエンジンのフライホイール(直径7.8cm)に、パソコン用ハードディスクのヘッド位置制御に用いられているネオジウム磁石を回転対称位置に2個接着した。発電用誘電コイルは、直径4cm、軸長0.5cmで、0.06mmのマグネットワイヤーにより作製した(図3)。コイルをフライホイール上の磁石面から5mmの距離に取り付け、発電装置とした。さらに、パワーピストンが中間位置になる位相で、磁石がコイル中心を通るよう、フライホイールの角度を調節した。

図1 スターリングエンジンの作動原理

容器内の断熱材（ディスプレイサ）を下（低温側）に移動させると、中の空気は上（高温側）に移動して加熱されるため、膨張して容器に付いているピストン（パワーピストン）を下に押し下げる。逆に断熱材を上（高温側）に移動させると、今度は中の空気が冷却されて収縮し、ピストンを上に引き上げる。スターリングエンジンは、ピストンと断熱材をエンジンの様にクランクでつなげ、連動して動くようにしたものである。

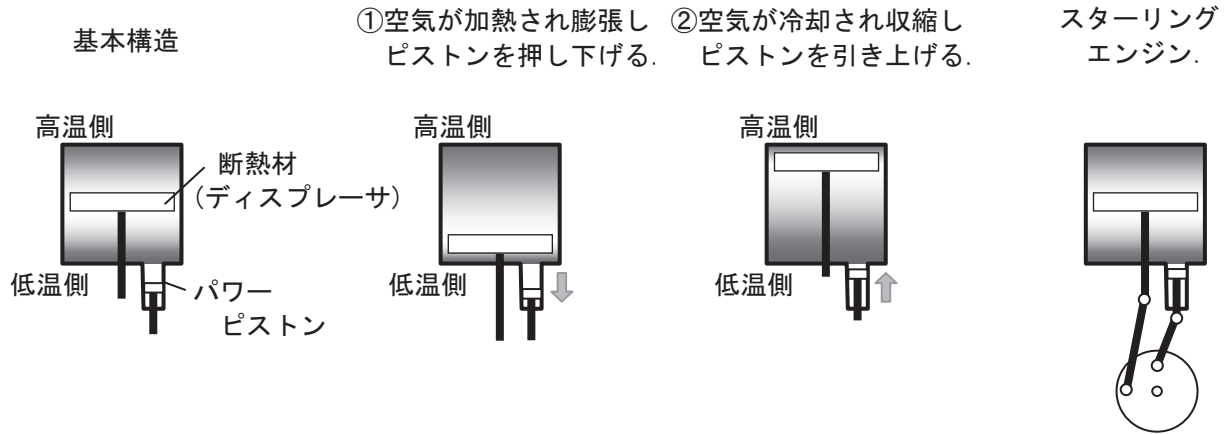


図2 試作したスターリングエンジ

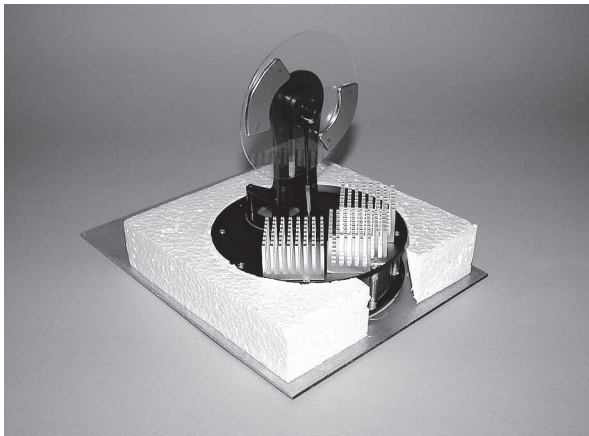


図3 発電用誘電コイル（左）とフライホイール（右）

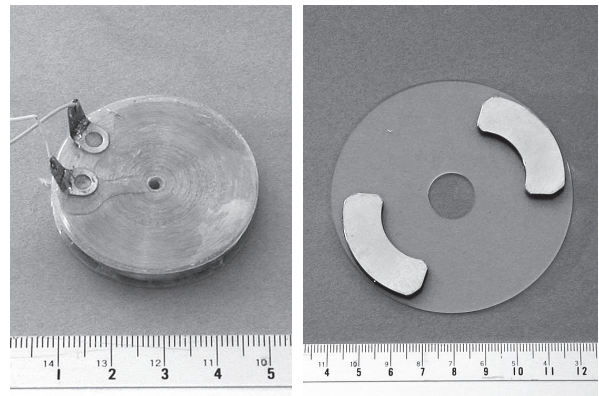
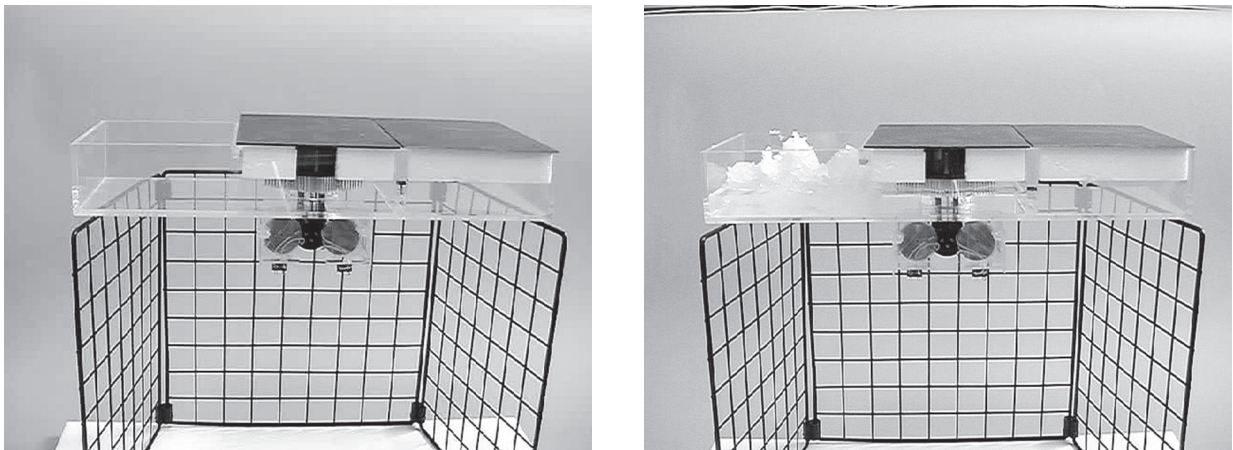


図4 作製した発電システム全体

システム稼働前（右）と、貯雪槽に雪を入れた稼働準備状態（左）。



3. スターリングエンジンの稼働

エンジンを稼働させるため、路面と雪貯蔵槽を持つ模型を製作した。雪貯蔵槽は、14cm (縦) × 29cm (横)、深さ5cmで、その半分を路面部分とし、残りを投雪口とした。貯蔵槽路面部分の底部には、エンジンのクランク軸等を通過させる円筒を取り付けた。また、コントロールとして、雪貯蔵槽を持たない路面模型を設置する部分も取り付け付けた。システムを組み上げた状態を図4に示した。貯雪部に水を入れ、さらに雪あるいは砕氷を入れた。路面部は赤外線熱源により加熱し、その温度変化をスターリングエンジンの有無で計測した。路面部の温度は放射温度計により測定した。発電装置には抵抗負荷を接続し、発電電力を測定した。

【結果】

1. 発電量

作製したスターリングエンジンは、高温部50℃、低温部0℃の条件で、無負荷時、約254rpmの回転数が得られた。実際に計測した発電量は、負荷の程度によって異なったが、最高で約0.37mWを得ることができた(表1)。

2. 路面冷却効果

スターリングエンジンの設置・稼働により、最大で約4℃の温度低下が観察された(データは示していない)。

【考按】

スターリングエンジンは、高温部と低温部があれば、あらゆる温度レベルの熱源を利用できるのが特徴で、理論的には1℃の温度差でも稼働させることが可能である。しかし、温度差が小さくなるほど熱効率が低下するため、実用化の研究は、主として温度差1,000℃程度の高温度差スターリングエンジンを対象に進められて来た。米国では、太陽熱を集熱した高温を利用し、スターリングエンジンによる300～500MW級の発電施設の建設も計画されている。これに対し、低温度差スターリングエンジンは、高い熱効率が望めないこと、低い温度の熱源から十分な熱量をエンジン内に取り入れるための大型な熱交換器が必要になる等の理由から、これまでは模型や教育用機器としての用途に限定されていた。しかし、地球温暖化の問題が顕在化して以降、CO₂排出量減少のため、内燃機関や工場から出る排熱の利用や、自然エネルギーの利用手段が注目されており、低温度差スターリングエンジンの将来性は極めて有望と言える状況となった。

スターリングエンジンの理論熱効率は、あらゆる熱機関の中で最も高効率なカルノーサイクルの熱効率に一致するが、その値は、雪(T_C=273°K)と高温路面(T_H=323°K)の温度差を利用した場合、

表1 抵抗負荷による発電量、エンジン回転数の変化

Resistant load (Ω)	Engine rotation (r.p.m)	Electric power generation (mW)
1 M	250	0.027
200 k	240	0.129
100 k	219	0.195
51 k	206	0.296
10 k	145	0.366
1 k	103	0.102
100	98	0.011

$$\eta_{\text{car}} = 1 - T_C/T_H = 1 - 273/323 = 0.154$$

にしかない。しかも、実際のエンジン内において、高温空間のガス温度は高温熱源の温度よりも低く、低温空間のガス温度は低温熱源の温度よりも高くなるため、理論熱効率はさらに低下すると考えられる。この熱効率の低さを補うには装置の大型化が必要であり、設置場所の問題などから低温度差スターリングエンジンの実用化を阻害してきた最大の要因である。

しかし、本研究で提案した様に、道路表面を高温部として利用した場合、装置は道路地下に設置するため、その大きさは大きな阻害要因とはならない。例えば、道路の10m×10mを利用した場合、理論上、34.4kWの出力を得る事が可能となる。あらゆる道路のすべてにスターリングエンジンを設置することは不可能であろうが、その一部を利用するのみで、巨大な発電システムを構築し得ると期待される。

本研究では、ヒートアイランド現象による高温路面をスターリングエンジンの高温部として使用した場合、その副作用として路面温度が低下することを示した。いわば、冷房によって発電するというシステムであり、ヒートアイランド現象を軽減させることで建物内の冷房に使用される電気消費量を減少させ、同時に発電も行うという画期的なシステムである。また、本システムをヒートアイランド現象対策として捉えた場合、低温度差スターリングエンジンの欠点とされてきた理論的熱効率の低さは、逆にメリットとなる。なぜなら、エンジン稼働のために、大きな入熱量および冷却熱量が必要となり、それだけ路面温度低下に寄与する割合が高くなるからである。

降雪対策としての本システムの有意性は、除雪した雪の運搬にかかわる費用と除排雪用大型車両からのCO₂排出量の削減、さらに堆雪場の維持管理費軽減にある。道路の除雪は、路面の雪を道路の両側にかき寄せる作業であるため、積雪の増大

に伴ってかき寄せられた雪が道路幅を狭小化させ、極端な交通障害を来たしてしまう。このため、特に交通の集中する都市中心部では、かき寄せられた雪を排雪する作業が必要となる。排雪にはパワーショベルやロータリー車を用い、ダンプカーに大量の雪を積み込んで、郊外の堆雪場まで運搬している。札幌市の場合、冬季間には多くのダンプカーが排雪のために集められ、さながら街中で道路工事が行われているのごとく様相を示している。都市中心部にしろ、住宅地にしろ、堆雪場としての広大な空き地を確保することが困難であるため、雪の運搬は不可欠であり、毎日のように大量のCO₂を排出しながら除排雪にかかわる大型車両が走り回っているのが現状である。

本システムでは、除雪した雪をそのまま道路地下に設けた貯雪槽に堆雪することを想定している。このため、排雪に伴うダンプカーの使用や、郊外の堆雪場が不要となる。実際に、排雪作業や堆雪場の確保が完全に不要になるかどうかは、建設可能な貯雪槽の規模によるが、少なくとも交通の集中する都市中心部での排雪作業が不要になる程度の規模の貯雪槽が望まれる。

地中の温度は、通常16℃前後とされており、道路地下に貯雪槽を設置した場合、夏期まで雪が残らないのではないかと懸念もある。実際、冷房用途での雪貯蔵施設には断熱設備が必要であり、それでもなお一定の融雪が見込まれるため、大量の雪を貯蔵しておく必要がある。前述した通り、このことが、雪を冷房として利用するシステムの普及を阻害している要因になっている。このため、雪をより簡便に効率良く夏期まで保存するための研究も開始されている⁶⁾。しかし、本システムにおいては、予算や道路地下部分の使用状況等から、除雪したすべての雪を処理する規模の貯雪槽を建設することが不可能であることを考えれば、貯雪槽内での融雪は、むしろ歓迎すべき現象と言える。融雪によって生じた水を下水に排水するよう設計されていれば、貯雪槽の容量を超えた雪処理が可能となる。さらに、融雪に伴う潜熱によって周囲

の地下が冷却されるため、いずれ融雪が殆ど起こらない程度に地中温度が低下し、それ以降は古くからある氷室と同じ状態になり、断熱設備が無くとも雪の保存に最適の環境となる。

本研究では、雪とヒートアイランド現象を利用した発電システムを提案した。しかし、逆に、冬の凍結路面と、最近問題になっている下水の排熱を利用して発電するシステムも理論的には可能である。この場合、発電の副作用として、路面温度の上昇が見込まれるため、ロードヒーティングによって発電をするという、やはり画期的なシステムになり得ることが期待される。

今回、ヒートアイランド現象と雪を利用し、ヒートアイランド現象軽減効果を持つ発電システムの検討を行ったが、これまで低温度差スターリングエンジンの実用的な研究があまり行われてこなかったため、我々の試作したエンジンも模型の域を越えないものであった。そのため、発電効率の面で、さらなる改良の余地があることを認めざるを得ない。今後、高効率の低温度差スターリングエンジンの試作のため、ディスプレイサや、高温部および低温部の形状について、検討を続けたいと考えている。

国土交通省東京航空局 (2007)

(2010年1月26日受稿)

【文献】

- 1) 特許公開2004-39966
- 2) 札幌市ホームページ「雪対策予算」
<http://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/jigyoubudget.html>
- 3) エネルギー白書2007年版 資源エネルギー庁 p176～177 (2007)
- 4) 対馬勝年：雪と付き合う 雪を利用する発電技術. 日本エネルギー学会誌, 76 (2), 113-118 (1997)
- 5) S.L.Soo : Thermodynamics of Engineering Science. Prentice-Hall, Inc, pp.367-370 (1958)
- 6) クールプロジェクト ～新千歳空港におけるエコエアポートの新たな取り組みについて～