TSUBAME 共同利用　令和 4 年度　学術利用　成果報告書

揺動電磁気シミュレーションを用いた光放射現象に関する研究
A study of light emission phenomena using fluctuational electromagnetic simulation

櫻井　篤
Atsushi　Sakurai

新潟大学工学部
Faculty of Engineering, Niigata University
http://www.eng.niigata-u.ac.jp/~rad/index.html

本研究では，半導体発光素子（light emitting diode；LED）を用いた 熱フォトニクス(Thermophotonics；TPX)発電システムに注目した．これはエミッタに LED を用いることが特徴である．LED では，電圧を印加して非平衡状態にすることで，プランクの法則による黒体放射とは異なったエレクトロ・ルミネセンスと呼ばれる発光を生じる．そのため，遠方場においても高効率なエネルギー輸送ができる可能性がある．TPX システムは，大きな電力密度を有する発電手法である．また，バイアスのかけ方を工夫することで冷却機としても応用できる．

In this study, we focused on a thermophotonics (TPX) power generation system using semiconductor light emitting diodes (LEDs). This is characterized by using LEDs as the emitter. In LEDs, by applying a voltage to bring them into an unbalanced state, light emission called electroluminescence, which is different from blackbody radiation according to Planck's law, is generated. Therefore, there is a possibility that highly efficient energy transportation can be performed even in a distant field. The TPX system is a power generation method with a large power density. It can also be applied as a cooler by devising how to apply bias.

Keywords: thermophotonics, light emitting diodes, electroluminescence, power generation

背景と目的

現在，世界規模での急速な工業化に伴い，エネルギー消費の増加，化石燃料の枯渇や地球温暖化が大きな問題となっている．更に東日本大震災の発生などにより，脱原子力エネルギーの潮流がある．このような現状から，エネルギー利用の高効率化や自然エネルギーによって生み出される再生可能エネルギーの利用に注目が集まっている．

これらの問題の解決策の一つとして，近接場熱光起電力発電（Near-field Thermophotovoltaic；NTPV）システムがある．NTPV システムでは，太陽光だけでなく工場の排熱など多様な熱源が利用可能である．発電原理は，太陽光発電と大きな違いはないが，波長選択的エミッタによって PV セルの高感度波長域に整合した熱ふく射光を放射することで高効率な発電ができる．しかし，エミッタと PV セル間の距離をナノメートルスケールで維持する必要があり，電力密度が小さいという問題点がある．

そこで本研究では，半導体発光素子（light emitting diode；LED）を用いた 熱フォトニクス(Thermophotonics；TPX)発電システムに注目した．これは NTPV 発電システムと異なり，エミッタに LED を用いることが特徴である．LED では，電圧を印加して非平衡状態にすることで，プランクの法則による黒体放射とは異なったエレクトロ・ルミネセンス(EL)と呼ばれる発光を生じる．そのため，遠方場においても高効率なエネルギー輸送ができる可能性がある．TPX システムは，大きな電力密度を有する発電手法である．また，バイアスのかけ方を工夫することで冷却機としても応用できる．

結果および考察

TPX システムの LED-PV セル間のふく射熱伝達を計算するために，揺動電磁気学シミュレーションを用いた．一般的な電磁波解析手法では，有限温度を持つ物体から生じる電磁波を表現できない．揺動電磁気学の理論では，物体内部でランダムに熱揺動する格子振動を揺動電流としてマクスウェル方程式の電流密度の項に導入される．従来の電磁波解析手法に揺動電磁気学の理論を組み入れることによって，2 物体間の熱ふく

射解析が可能となる.

そこで本研究では，TPX 発電システムの LED と PV セルに用いる半導体材料として，黒リンを用いる．黒リンは中赤外領域にバンドギャップを持つ二次元材料である。図 1 に TPX 発電システムの概要を示す。TPX 発電では、半導体による非平衡熱ふく射を光起電力(PV)セルに照射し、光電変換を行うものである。PV セルで生成された電力のうち一部を非平衡熱ふく射エミッターの駆動電力として使用する。

実際、理想的な黒リン半導体が作製できたと仮定して TPX 発電システムに応用した場合の揺動電磁気学シミュレーションを行った結果を以下に示す。高温側熱源（450 K）に接するエミッターと低温側熱源(300 K)に接する PV セル間におけるエネルギーフラックスに対して、化学ポテンシャルが 0～0.15 eV の範囲にある場合のエネルギーフラックスの計算結果を図 2 に示す。比較のため、黒体のスペクトルエネルギーフラックスも示している。黒リンエミッターに印加する化学ポテンシャルを大きくすると、バンドギャップより短い波長域の遠方場エネルギーフラックスが増加し、黒体限界を超えることが示された。温度が同じであれば、化学ポテンシャルが正の光子は、化学ポテンシャルのない光子（熱放射）よりも光子状態あたりのエネルギーが高くなり、黒体放射を超えるエネルギーフラックスとなることがわかった。

次に、ギャップ距離の影響を調べた結果が図 3 である。通常、ギャップ距離 10 μm 以上あれば、近接場効果の影響はほとんど無いと考えられるが、10 mm 離した場合でもエネルギーフラックスの大きさが維持されることが示されている。この結果はギャップ距離を何 cm と離しても結果は変わらないと考えられるため、かなり遠方場までエネルギーを伝達できる可能性がある。従来技術である、熱電発電や NTPV 発電と比較して、熱源から離れた状況で発電ができれば産業応用上の自由度が格段に上がる。ただし、エミッター・PV セル間の距離を離すとそれらの形態係数が関わってくるため、将来的にはこの非平衡熱ふく射エミッターに指向性を持たせることが必須である

まとめ、今後の課題

本研究では，揺動電磁気学シミュレーションを用いて TPX 発電システムのエネルギー輸送メカニズムについて検討した．今後は異なる半導体材料の活用も視野に入れて新たな光と物質の相互作用に起因するエネルギー輸送メカニズムの解明を目指す.

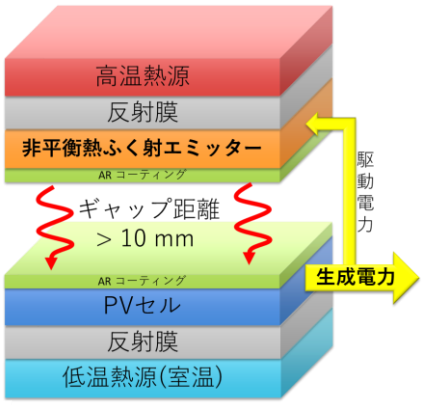

Fig. 1　TPX システムの概要図

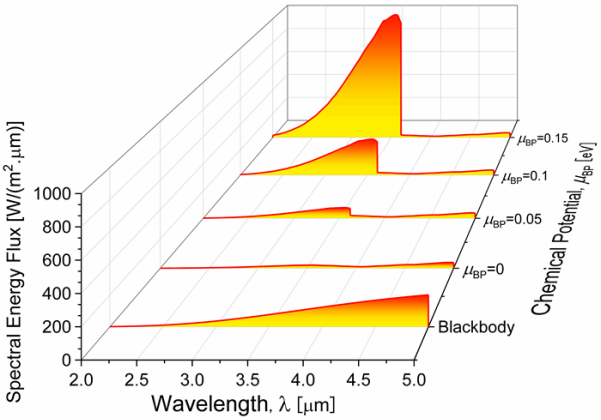

Fig. 2　化学ポテンシャルによる遠方場光放射エネルギーの変化

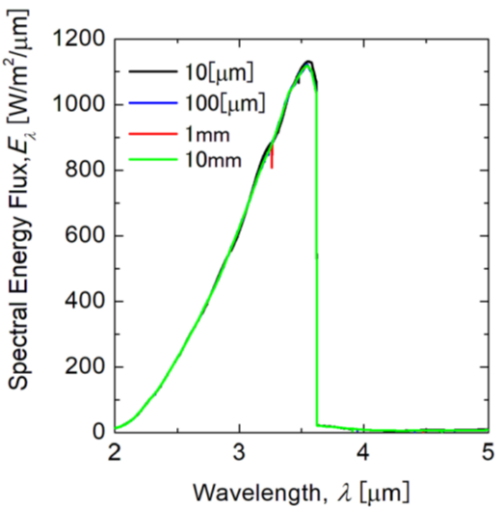

Fig. 3　エネルギーフラックスの距離依存性