

イオン流によるナノポア発熱現象

Ionic local heating of a nanopore

阪大¹ 名大² 産総研³ ○筒井真楠¹, 有馬彰秀², 横田一道³, 馬場嘉信², 川合知二¹

Osaka Univ.¹, Nagoya Univ.², AIST³ ○M. Tsutsui¹, A. Arima², K. Yokota³, Y. Baba², T. Kawai¹

E-mail: tsutsui@sanken.osaka-u.ac.jp

ナノポアは、液中にある微小な物体を簡単な電流計測により検出できる超高感度なナノセンサである[1]。その構造は、生体や固体の薄膜中に開けられたナノスケールの細孔で構成される。センサとして動作させる場合は、この細孔を電解質液で満たし、電圧を加える。すると、ナノポア内にイオンの流れが生じ、その流れの様子を、電極反応を介したイオン電流の大小で観測することができる。この仕組みを応用すれば、微小な物体がナノポアを通過する過程でイオン流が一瞬阻害される現象を、イオン電流の変化として記録し、その電流波形を解析することで、細胞からゲノムまで広範なサイズの粒子や分子を超高感度に検出することができる。しかし、ナノポアセンサの研究開発が進められる一方で、ナノポアセンサの動作時において、はたしてイオン流によってナノポア内の温度は顕著に変化するのか、という基本的な疑問については、ほとんど調べられてこなかった。水中におけるイオンは水分子を掻き分けて電場方向に進むわけで、その過程でエネルギー散逸が起きているはずである。さらに、1 nm サイズのナノポアの場合でもそのイオン伝導度がマクスウェルのモデルと非常に良く一致することを踏まえると[2]、どんなサイズのナノポアでも、イオン流によってジュール発熱が生じると考えるほうが妥当と予測される。そこで本研究では、ナノポアの極近傍にナノサイズの熱電対温度計を組み込んだ新規ナノ構造を作製し、実際にイオン流によってナノポア温度が変化しているかを調べたので、その内容を報告する[3]。

電子線リソグラフィ等微細加工技術を用いて、窒化シリコンメンブレン上に、白金と金のナノワイヤーで熱電対を作製した。そしてさらにその点接点の数十 nm 近傍に、直径が 10 μm ~100 nm の細孔を加工した。実験では、リン酸緩衝液中で細孔のイオン電流-電圧特性を測定しながら、ナノボルトメータを用いて熱電対の熱起電力を記録した。あらかじめ測定しておいた熱起電力と温度の関係から、電圧掃引時における熱電対温度の変化を調べたところ、ナノポアに加える電圧の 2 乗に比例して、ナノポア温度が上昇していることが明らかになった。さらにその電圧に対する温度上昇率は、細孔の直径に反比例することが分かった。これは、イオン流によってナノポア近傍で生じた熱が、水の熱伝導によってポア外部へと散逸していることを示唆する結果である。以上の結果より、ナノポアセンサはその動作時において、イオン流と溶媒の熱輸送特性に応じた局所的な温度上昇が起こることを明らかにできた[3]。

参考文献：

[1] Y. He, M. Tsutsui et al., NPG Asia Meter. 13, 48 (2021).

[2] S. Garaj et al., Nature 467, 190 (2010).

[3] M. Tsutsui et al., Sci. Adv. In press.