

## 表面弾性波ソリトンを用いた単電子輸送の提案

○安西大地<sup>1</sup>, 根本一樹<sup>1</sup>, 胡桃聡<sup>2</sup>, 鈴木薫<sup>2</sup>, 松田健一<sup>2</sup>, 畠中憲之<sup>3</sup>

要約：本研究では、引力的な相互作用をおよぼす表面弾性波を利用した単電子輸送について検討した。表面弾性波として、Korteweg – de Vries ソリトンの性質を持つものを取り上げ、ソリトン型の引力ポテンシャル中に形成される束縛状態の時間発展について調べた。表面弾性波ソリトンの特徴付ける、波数に対応するパラメータ  $\kappa$  を変化させることで、表面弾性波ソリトンの伝播速度と束縛準位の深さを制御することができ、また、それに従って内部に束縛された電子が安定に長距離にわたって輸送される可能を示した。

## 1. 研究の背景と目的

近年、ナノテクノロジーの発展によりナノメートルスケールの構造物が作製可能となった。その結果、例えば単電子トランジスタ[1]や、量子ドット中の電子スピン制御[2]など単電子制御の基礎的な研究が進展している。単電子の状態制御、輸送、検出を可能にする技術は、将来の低消費電力高集デバイスに繋がる技術として注目されている。中でも、単電子を空間的にコヒーレントに輸送する技術は、固体素子による量子通信の実現において非常に重要であると考えられる。

本研究では、単電子の輸送メカニズムとして表面弾性波デバイスに着目した。表面弾性波が作り出すポテンシャルを利用した単電子輸送はすでに実験的に確認されている[3]が、現状では 1.3 K の低温における GaAs/AlGaAs ヘテロ界面の二次元電子系が用いられている。従って、バリスティックな電子移動を前提としたこの方法は、より室温環境に近い状況では利用できないと考えられる。この問題に対し、本研究では表面弾性波としてソリトンの性質を持つもの[4, 5]に着目した。ある種のソリトン型の引力ポテンシャル中には、厳密に一個の電子の束縛準位が形成されることから、それを利用して電子を捕獲することで空間的にコヒーレントな電子輸送を実現するモデルを提案する。また、厳密に求められる電子の波動関数から、電子輸送の軌道を量子力学的な視点から求めることを目的とする。

## 2. 表面弾性波ソリトンによる単電子輸送の原理

本研究で取り上げる表面弾性波は、Korteweg-de Vries 方程式（以下、KdV 方程式）

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - 6u(x,t)\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^3} = 0$$

に従うソリトンの性質を持つものである。表面弾性波ソリトンのポテンシャル  $u(x,t)$  として、電子に対する引力相互作用ポテンシャルを考える。例えば次のよ

うな表面弾性波ソリトンを考える：

$$u(x,t) = -2\kappa^2 \operatorname{sech}^2(\kappa x - 4\kappa^3 t)$$

図 1 に、この引力的表面弾性波ソリトンのポテンシャル

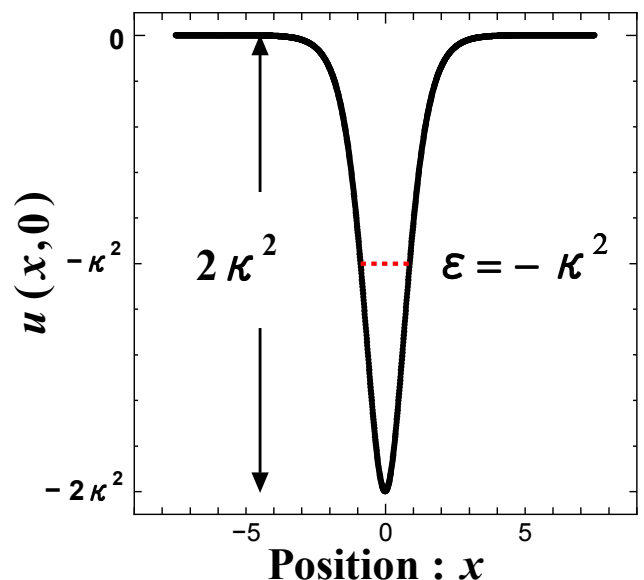


図 1. 表面弾性波ソリトンポテンシャルの時刻ゼロにおけるプロファイル

ルプロファイルを示す。

系のシュレーディンガー方程式は、適当なスケール変換を施すことによって無次元化することができ[6]、次のような形となる。すなわち、

$$\left[ -\frac{\partial^2}{\partial x^2} + u(x,t) \right] \psi(x,t) = \varepsilon \psi(x,t)$$

となる。ここで、 $\varepsilon$  は電子の固有エネルギー、 $\psi(x,t)$  は表面弾性波ソリトン中に形成される束縛状態の波動関数である。この束縛状態のエネルギー準位は、図 1 に示されているように、丁度、深さが 1/2 の位置にただ一つ存在することがわかっている[7]。またその束縛状態の波動関数は

$$\psi(x,t) = \sqrt{\frac{\kappa}{2}} \operatorname{sech}(\kappa x - 4\kappa^3 t)$$

1：日大理工・学部・電気， 2：日大理工・教員・電気， 3：広島大学大学院総合科学研究科・教員

と書くことができる. ここで  $\kappa$  は, ソリトンの波数に対応するパラメータである.

図 2 には  $\kappa = 1$  の場合の, 表面弾性波ソリトン (実線)  $u(x, t)$  と, その中に形成される束縛状態の波動関

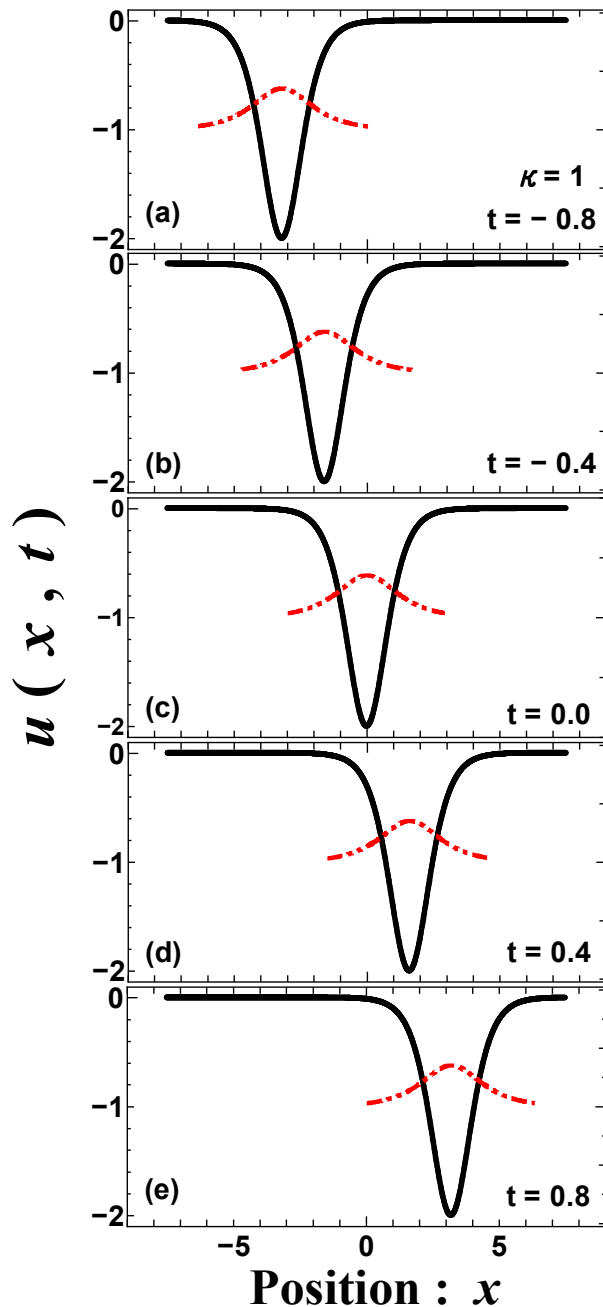


図 2. 表面弾性波ソリトン, および束縛状態の波動関数の時間発展.

数 (鎖線)  $\psi(x, t)$  の時間発展に関するシミュレーション結果を示す. 表面弾性波ソリトンが時間発展に従って空間的に等速度で伝播していくのと同時に, 内部の電子状態も移動していることがわかる. ここで重要なのは, 電子の束縛状態のエネルギーが時間変化の無い保存量である点である. すなわち電子は, ソリトン型

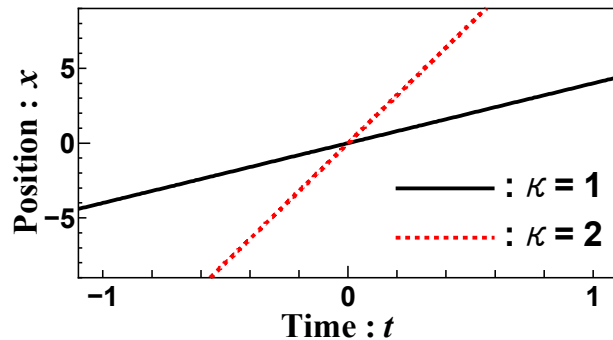


図 3.  $\kappa$  を変化させた場合のポテンシャル中の電子の軌道

引力ポテンシャルによって束縛されながら, エネルギーを変化させることなく空間的にコヒーレントに輸送されることになる.

図 3 に, 電子移動の軌道と, そのパラメータ  $\kappa$  依存性を示す. 軌道は, 束縛状態の波動関数を用いて空間  $x$  の期待値を計算して示している. この図からも, 電子は等速直線運動していることがわかる. またその速度  $v$  は  $v = 4\kappa^2$  となることが分かった. これは元の表面弾性波ソリトンの性質によるものである.

### 3. まとめ.

本研究では, KdV ソリトンの性質を有する表面弾性波を考え, そのポテンシャルによって単電子を輸送することを検討した. その結果, 表面弾性波ソリトンの運動とともに, 束縛状態にある電子も移動し, かつエネルギーが保存されることがわかった. その電子の移動速度は, 表面弾性波ソリトンの性質を反映して,  $v = 4\kappa^2$  となることが分かった.

### 4. 参考文献

- [1] M. A. Kastner, Mod. Phys. Rev., **64**, 849(1992).
- [2] F. H. L. Koppens, et al, Nature., **442**, 766-771(2006).
- [3] V. I. Talyanskii, et al., Phys. Rev., B **56**, 15180 (1997).
- [4] S. Matsuo, et al., Phys. Stat. Sol. (c), **1**, 2769 (2004).
- [5] K. -i. Matsuda, et al., Appl. Phys. Lett., **81**, 2698 (2002).
- [6] K. -i. Matsuda, et al., to be published.
- [7] C. S. Gardner, et al., Phys. Rev. Lett., **19**, 1095 (1967).  
P. D. Lax, Comm. Pure Appl. Math., **21**, 467(1968).