# ジョセフソン伝送線路におけるブラックホールソリトンの理論

## Theory of black hole solitons in Josephson transmission lines

広大院総科 [1]，旭川医大物理 [2]　○(M1) 片山 春菜 [1*]，畠中 憲之 [1]，藤井 敏之 [2]
Hiroshima Univ.[1], 2. Asahikawa Medical Univ. [2]
○(M1)Haruna Katayama[1*], Noriyuki Hatakenaka[1], Toshiyuki Fujii[2]
*E-mail: halna496@gmail.com

【研究の背景】ソリトンは，媒質の分散性と非線形性が釣り合うことによって形成され孤立波で，ソリトン同士の衝突に対してその波形は崩れることなく安定で，粒子的性質を有する．この特異な性質は，情報通信などに応用されてきた．電子回路においても，戸田格子ソリトンが実現されてきた．Fig. 1(A) は，戸田格子ソリトン（電圧ソリトン）を実現した非線形 LC 回路に双対な電子回路である．電圧ソリトンでは，非線形性の起源が非線形な静電容量に起因していたのに対して，今回考察のシステムでは，非線形なインダクタンスに起因している．この回路は，1990 年代に検討されており，数値計算によって衝撃波型の波動解が存在することが明らかにされている [1]．しかし，その解析解は未だに求められていない．

【研究の目的・概要】本研究の目的は，戸田格子における電圧ソリトンに双対な回路を用いて，そこに潜む波動 (電流ソリトン) を明らかにすることである．これには，回路方程式を出発点として，ソリトン理論における逓減摂動法を用いることで電流の従うソリトン方程式を明らかにする．また，その電流ソリトンの空間的変化が，伝送線路を伝搬する電磁波の性質に与える影響を考察する．

【結論】逓減摂動法を用いて回路方程式に潜む波動が，非収束型変形 KdV 方程式であることを明らかにした．この方程式は，逆散乱法により衝撃波型ソリトン解を有することがわかった．Fig. 1(B) はその衝撃波型の電流ソリトンを表している．これは，先行研究で得られていた数値計算の結果と一致し，初めて電流ソリトンの存在を解析的に明らかにした．

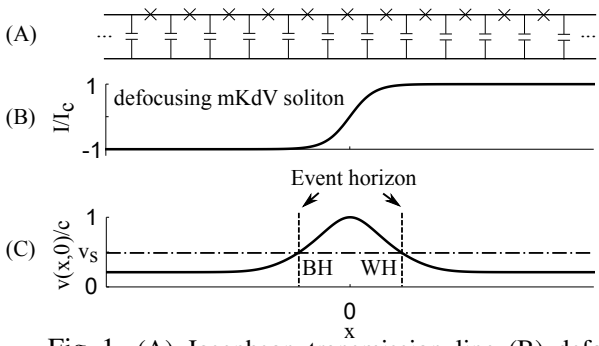


Fig. 1　(A) Josephson transmission line (B) defocusing mKdV soliton (C) spatial dependence of electromagnetic field velocity with $v_s = 0.499c$

また，このソリトンが伝送線路中を伝搬する電磁波に与える影響を考慮することによって，ソリトンがブラックホールとして振舞うことも明らかにした． LC 回路では，電磁波の速度はインダクタンス ($L$) とキャパシタンス ($C$) に依存する ($v = 1/\sqrt{LC}$)．電流ソリトンの形成は，非線形インダクタンスが空間的に変化することを導く．結果として，電磁波に対する速度が空間的に変化することになる．Fig.1 (C) は，光速 $c$ で規格化された電磁波の速度を表している．相対論において，事象の水平線が光速を境に形成されように，“擬似的” 事象の水平線では，背景流体の流速が光速の役割を担う [2]．ジョセフソン伝送線路においては，ソリトンがその擬似的光速を担い, ソリトン速度 $v_s$ を境に電磁波の速度が遅い部分と早い部分に分離された事象の地平線が形成されることになる．以上より，擬似的なブラックホール対 (ブラックホール・ホワイトホール対) が創生できることを明らかにした．

[1] G. J. Chen and M. R. Beasley, IEEE Trans. Appl. Supercond., **1**, 140-144(1991).
[2] P. D. Nation, M. P. Blencowe, A. J. Rimberg, and E. Buks, Phys. Rev. Lett., **103**, 087004 (4)(2009).