

非線形 LC 梯子回路中の電圧パルス伝搬とその応用

○中村祐貴¹, 黒田将吾¹, 胡桃聡², 鈴木薫², 松田健一², 畠中憲之³
 Y. Nakamura¹, S. Kuroda¹, S. Kurumi², K. Suzuki², K. Matsuda² and N. Hatakenaka³

概要: 本研究では, 非線形 LC 梯子回路を作製し, 長距離にわたる電圧パルス伝搬の可能性を検証した. 非線形性の導入のために, 適当な電圧-容量特性をもつ容量可変ダイオードを採用し 40 段までの非線形 LC 梯子回路を作製した. パルス電圧を入力信号とし, そこからの距離に依存したパルス波形の変化を観測したところ, ソリトンの性質を持つ電圧波形を観測することができた. このことから, 今回作製した非線形 LC 梯子回路が, いわゆる戸田格子として振る舞うことが確認された.

1. はじめに

LC 梯子回路は良く知られた電気回路であるが, その中の容量 C を, 適当な電圧-容量特性をもつ素子に変えて非線形性を導入することで, 非常に安定的に電圧パルスが長距離にわたって伝搬することが 1970 年に R. Hirota 等によって報告されている[1]. この時, 非線形 LC 梯子回路は, 非線形格子モデルの, いわゆる戸田格子となっていることが知られており[2], 従って, 非線形 LC 梯子回路中の電圧パルスの伝搬は, 戸田格子中の電圧ソリトンに対応すると考えられている. 本研究では, このシステムを応用した情報伝達システム[3]やヘルスマonitoringシステムの創出を目指し, 実際の 40 段非線形 LC 梯子回路中の電圧ソリトンの観測を試みた. 特に, 各段での波形変化と, 入力信号の大きさや形に対する依存性を詳細に測定した.

2. 非線形 LC 梯子回路の作製

今回作製した非線形 LC 梯子回路の構成は, 図 1 に示すようになっている. 非線形性の導入のため,

$$\frac{1}{C} = aV + b$$

という容量 (C) - 電圧 (V) 特性を持つものを選んだ. これにより, この回路はいわゆる「戸田格子」の性質を持つことが予想される. 回路を駆動する際には適当な直流電圧 (V_{DC}) を加えながら, 発振器を用いてソリトンの形状に近いパルス状の電圧を入力した[4]. この際, 反射成分を低減する為に回路の終端に抵抗 R と C による終端処理を施した.

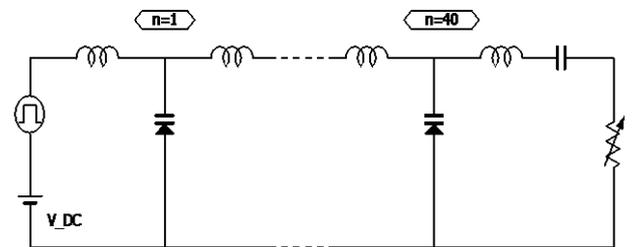


図 1 : 非線形 LC 梯子回路の回路図.

3. 電圧ソリトン伝搬の観測

図 2 に, 入力信号の波形と, そこから 10 段目, 20 段目, 30 段目, 40 段目の各場所で観測された電圧波形を示す. この時の入力波形は, 振幅が 3 V, パルス幅が約 $1 \mu s$ になるように調節してある. 一見してわかるように, 入力波形に近い形を保持しながら 30 段目までは電圧パルスが伝搬していることがわかる. 一方 40 段目ではかなり波形が異なっている. この原因は, 現在までのところ, 回路終端の影響によるかと考えている.

パルスの高さや幅に着目すると, 入力波形が 3 V であるのに対して, 観測された波形の高さは若干高くなっている. 一方, パルス幅は若干狭くなっている. これは, 入力波形自体が厳密に電圧ソリトンの形をしていないことと, 回路自体に含まれる, 意図的ではない非線形性や分散性の結果として, 生じたものと考えられる. パルス以外の成分が見られることも, 回路自体に存在する分散性が原因の「さざ波成分」とであると推測される.

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

4. 電圧パルスの振幅と伝搬速度

観測された電圧パルスの伝搬が、戸田格子における電圧ソリトンであることを確認するために、いくつかの振幅の異なる入力パルスを用いて、波形の伝搬速度の違いを測定した。図3に示すのは、入力段から40段目に到達するまでに経過した遅延時間と、入力パルスの振幅との関係である。1~2 μs. 程度の測定誤差はあるが、全体として入力パルスの振幅が大きいほど遅延時間が短い（すなわち、電圧パルスの伝搬速度が速い）ことを示している。このような振幅に対する速度の変化が見られることは、ソリトンに特徴的な性質であることから、この電圧パルスの伝播は、戸田格子における電圧ソリトンであることを強く示唆する。

5. まとめ

本研究では、簡便な伝送線路による情報伝達システムや、構造物のヘルスマonitoringシステムの創出を目指し、非線形 LC 梯子回路における電圧パルスの伝播特性を評価した。LC 梯子回路に対して非線形性を導入するために、容量可変ダイオードをCとして採用した。インダクタLとして1 mHのものを採用した。回路全体は40段構成のものを作製した。この回路に対して振幅が3 V、パルス幅が1 μsの電圧パルスを入力し、各段における電圧波形を観察した。その結果、電圧パルスがほとんど波形を崩さずに伝播していくことを確認した。また、入力電圧パルスの振幅と、パルスの伝播速度には依存性があり、振幅が大きいほど伝播速度が速くなり、小さいほど伝播速度が遅くなるのが観測された。これらの結果より、今回作製した非線形 LC 梯子回路は、いわゆる「戸田格子」となっていること、また、測定した電圧パルスは戸田格子における電圧ソリトンであると考えられる。

5. 参考文献

- [1] R.Hirota and K.Suzuki : J. Phys. Soc. Jpn. **28**, 1366 (1970).
- [2] M. Toda: J. Phys. Soc. Jpn. **22**, 431 (1967). *Ibid.* **23**, 501 (1967).
- [3] Yoji Kubota and Takashi Odagaki: Advances in Applied Physics, **1**, 29 (2013).
- [4] 渡辺慎介: 「ソリトン物理入門」, p.181, 培風館(1985).

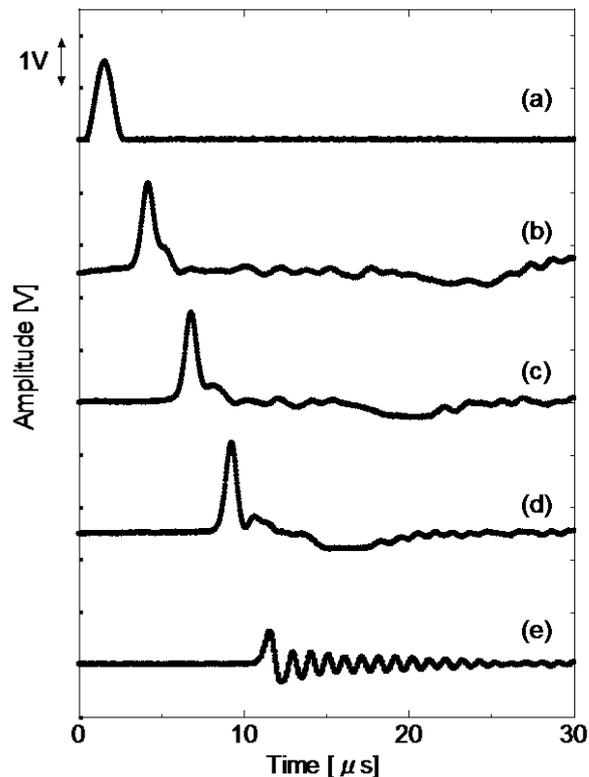


図2:非線形 LC 梯子回路の各段における電圧パルス伝搬の様子. (a) 入力波形, (b) 10 段目, (c) 20 段目, (d) 30 段目, (e) 40 段目の各波形.

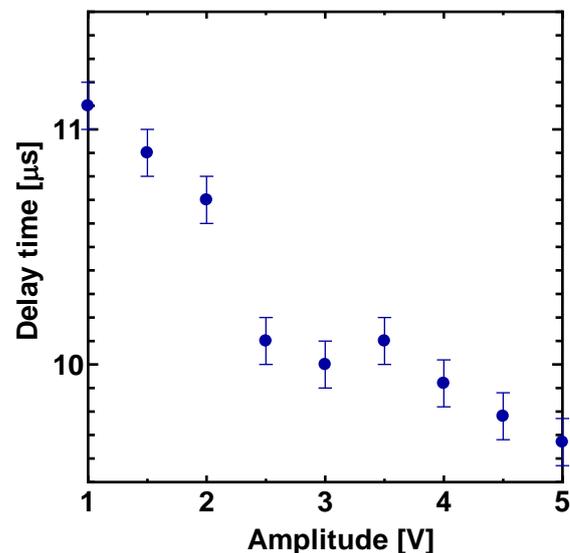


図3: 電圧パルスの遅延時間の様子.