

## 第5章 回路定数の「不純物」とソリトン

前章までは、回路定数が均一な線路上でソリトンの伝搬に関する検討を行ってきたが、この章では、人為的に一部回路定数を変化させた場合のソリトンの伝搬について考察する。線路上で回路定数が他と違った部分があると、格子等物理系では質量やばね定数の違いに相当し、不純物と呼ばれる。ここでは電気回路についても回路定数が他と違う部分あるいは素子を不純物 (impurity) と呼ぶこととし、非線形 LC はしご形回路上で不純物がソリトンの伝搬にどのような影響を与えるかを調べる。

### 5-1. 1つのインダクタンスの値が他の1/2倍である場合

線路上でただ1カ所、不純物としてインダクタンスの値を1/2倍にしたとき、その不純物がソリトンの伝搬にどのような影響を与えるのか伝搬波形を観測する。不純インダクタの存在する段数が  $n_i$  と  $n_{i+1}$  の間にあるとすると、 $n \leq n_i$  においては不純物による反射波の存在が考えられる。一方第1章で述べたように、振動数が遮断周波数より高く、伝搬により減衰する局在振動の存在が考えられる。ここで不純物としてインダクタンスを1/2倍したとき、局在振動はどのようなものかまず推察してみる。

不純インダクタンス  $L_0$  と他のインダクタンス  $L$  の比である  $S$  は1/2だから、式(1-37)より、

$$\alpha = -1/3$$

(1-38)より、

$$\omega = 1.15\omega_c$$

となるから、(1-35)より、局在振動は、

$$V_n = A \left( -\frac{1}{3} \right)^{n-n_i-1} \cos 1.15\omega_c t \quad (5-1)$$

に従うはずである。

実験は、バイアス電圧1.5[V]、入力電圧2.0[V]、入力周波数2.2[MHz]として行った。 $L_0=(1/2)L$ の不純インダクタは、54段と55段の間 ( $n_i=54$ ) に挿入した。伝搬波形の様

子をFig. 5-1に示す。53段に波形の乱れがあるが、55段以降にも同様の乱れが認められるためそれが反射の影響かどうかは判断することができない。局在振動は54段と55段で認められる。56段で局在振動が認められないのは、式(5-1)で  $\cos 1.15\omega_0 t$  の係数が55段ではAなのに対し、56段では  $(-1/3)A$  となるため認識することができないことが原因だと思われる。ただ56段での局在振動は、55段の逆位相であることが想像できる。一方、54段の局在振動は式(1-35)からは明らかにされていないが、前後の段数の局在振動と逆位相なのではないかと考えられる。これは54段と55段の波形を比較することで確認できる。

Fig. 5-1からはわかりにくいですが、54段のソリトンの振幅は、53段および55段の振幅に比べ小さいと認められる。

### 5-2. 1つのインダクタンスの値が他の2倍である場合

次に前節と同様、 $n=54$ に不純インダクタンスとして  $L_0 = 2L$  を挿入しソリトンを伝搬させる実験を行う。このとき式(1-36)に従うならば  $S=2$  となり、式(1-37)、(1-38)を満足することがなく、従ってここでは式(1-35)を用いることはできない。しかし、反射の影響については前節と同様に考えることができると思われる。

実験は、 $L_0$ 以外前節と同様の条件で行った。結果をFig. 5-2に示す。54段および55段において前節のような局在振動は認められず、1-4節での理論はやはり  $L_0 < L$  の場合のみ通用できることが明らかとなった。

一方54段のソリトンの振幅は前節の場合と逆で、53段および55段の振幅に比べ大きいことがFig. 5-2から読みとれる。この性質を利用すれば、非線形LCはしご形回路においてインダクタの不純物を容易に検出し、補正も容易に行えそうである。

### 5-3. 1つのキャパシタンスが他の1/3倍である場合

次に、キャパシタンスが不純物として存在した場合のソリトンの伝搬を考える。この節では不純キャパシタンス  $C_0$  を  $(1/3)C$  とする。5-1節では不純インダクタによる局在振動の存在が明らかになったが、1-4節の理論を修正すれば不純キャパシタの場合でも  $C_0 < C$  のときに応用することができる。ただしこの場合  $S=1/3$  であるために  $\alpha = -1/5$  と

なり、 $n_i$ 以降の段数で局在振動を確認することがさらに難しくなることが予想される。一方、 $n_i$ 以前の段数においては反射波の観測が予想される。インダクタの場合は、 $n_i$ でのソリトンの振幅が $L_0$ の値によって大きく変化したが、不純物がキャパシタになったときはどうなのか確認したい。

実験は、 $C_0 = (1/3)C$ の不純キャパシタを $n = 54$ に挿入し行った ( $n_i = 54$ )。他の条件は前節までと全く同一である。観測波形をFig. 5-3に示す。

図中で54段の波形に局在振動がみられる。1-4節の理論を適用すれば、

$$\omega = 1.34 \omega_c$$

となるが、 $\alpha$ は $-(1/5)$ であることから、局在振動が確認できたのは54段のみである。

一方、 $n > n_i$ におけるソリトンより後ろの波形は、不純インダクタのときと異なり乱れはほとんどない。これは、インダクタンスの変化が前後段の電圧に影響を及ぼすのに対して、キャパシタンスの変化はその段の電圧に影響を及ぼすにとどまるからだと考えられる。

#### 5-4. 1つのキャパシタンスが他の2倍である場合

前節までと全く同じ条件で、54段のキャパシタンスを2倍にしたときのソリトンの伝搬を調べる。観測波形をFig. 5-4に示す。不純物が挿入された54段においても局在振動が存在しない。これは5-2節と同様の結果である。一方前節と同様に49段と53段で反射波を認めることができるが、Fig. 5-3とFig. 5-4を比較すると、反射波の位相が反転していることに気づく。これは、 $C_0$ と $C$ の大小関係によるものだと考えられる。

ここで、Fig. 5-3およびFig. 5-4の53段の波形に着目する。なお比較のため不純物を挿入しないで観測した波形をFig. 5-5に示す。不純インダクタンスを挿入した場合に比べ波形変化は分かりにくいFig. 5-3ではソリトンの振幅が前後段の振幅に比べ大きくなり、Fig. 5-4では小さくなっている。不純インダクタの場合は、ソリトンの振幅が不純物直前の54段で、 $L_0 = (1/2)L$ のときは小さく、 $L_0 = 2L$ のときには大きくなっていった。これは、反射波との相互作用で振幅変化が起こっていると考えられる。このとき不純物のある地点でのインピーダンスによって反射波の位相が決まり、それによって、不純物前段のソリトンの振幅の大小が決まると考えられる。

### 5-5. 一部回路定数 $F(V_0)$ を変えた場合

ここまでの実験では、不純素子を1つだけとしたときのソリトンの伝搬を調べた。ここでは、非線形キャパシタンスの特性電圧である  $F(V_0)$  を一定区間にわたって大きくしたとき、ソリトンの伝搬にどのような影響があるかを調べる。

実験は入力電圧3.5[V]、入力周波数3.0[MHz]、バイアス電圧1.5[V]とし、54段から68段にわたって線形の約200[pF]のキャパシタンスを挿入する。結果をFig. 5-6に示す。68段では分散波形があらわれているが、その分散波形が100段では新たなソリトンとして励起されている。このとき振幅の小さな波が、ソリトンから分離しようとしているが、179段で完全に独立した。このとき観測される分散波から生じた小さな振幅の複数の波もそれぞれがソリトンであると考えられる。

68段で分散波があらわれたのは、式(1-15)の通り  $F(V_0)$  が大きくなると分散性が強くなるためである。100段でのソリトンの励起は、分散領域を抜けて元の  $F(V_0)$  の線路にもどったためである。

伝搬による振幅の変化をあらわしたのがFig. 5-7である。 $F(V_0)$  が一定の線路を伝搬するソリトンの振幅に比べて、50段から90段近くにかけて振幅が落ち込んでいるのがわかる。これは回路を流れる電流が等しく、 $C(V_0)$  が大きくなったために、

$$V = \frac{Q(V_0)}{C(V_0)}$$

に従い電圧が減少したのである。