

# 負性抵抗を含んだ不均一ネットワークの時空間安定性

吉廣 完治, 片山 翔吾, 桑名 杏奈, 小林 春夫 (群馬大学)

## Study of Spatial and Temporal Stability of Non-Uniform Network with Positive and Negative Resistors

Kanji Yoshihiro, Katayama Shogo, Anna Kuwana, Haruo Kobayashi (Gunma University)

負性抵抗を含む均一抵抗ネットワークは時間安定性と空間安定性の条件が一致することが知られている。そこでこの論文では回路網理論の研究として、不均一な抵抗ネットワークの時間安定性と空間安定性の条件が一致するかどうかをシミュレーションで調べた。その結果、一致するとは限らないが、時間安定になると空間安定になりやすく、時間不安定になると空間不安定になりやすいということが判明した。

**キーワード：** 負性抵抗, 不均一ネットワーク, 時間安定性, 空間安定性  
(Negative Resistor, Non-Uniform Resistor Network, Temporal Stability, Spatial Stability)

### 1. はじめに

現在アナログニューラルネットワーク技術がリバイバルしている。筆者の一人は第2次AIブームの際にこの分野の研究に携わり負性抵抗を含む抵抗ネットワークでの初期視覚(early vision)の問題のアナログLSIの研究に取り組んだ。[1-3] ここでは負性抵抗を含むので時間安定性および空間安定性の2つが問題になる。そこでこの研究結果として負性抵抗を含む抵抗ネットワークの中で均一なもの時間安定性と空間安定性の条件が一致する回路網理論上の定理を導出できた。[4-6] しかしながら、不均一な抵抗ネットワークに関しては詳しく研究していない。

そこで本研究では負性抵抗を含む不均一な抵抗ネットワークの時間安定性と空間安定性の条件の関係を調べた。検討方法はLTspiceを用いて、回路を作成し、シミュレーションを行った。

### 2. 負性抵抗を含む均一抵抗ネットワーク

#### 〈2・1〉 均一、不均一ネットワークの定義

均一ネットワーク(uniform network)は 終端を除いて各ノードからGNDへの抵抗は全て $R_0$ ,

1つ隣同士のノード間結合は全て $R_1$

2つ隣同士のノード間結合は全て $R_2$

$k$ 個隣同士のノード間結合は全て $R_k$

容量がある場合は $R_k$ に並列に $C_k$ の結合のものと定義する。

不均一ネットワークはこれを満たしていないものである。

#### 〈2・2〉 回路とシミュレーション方法

時間応答と空間応答で2つの回路図を使用した。

図1の回路で時間安定性を確認する。2つ隣りノード間の結合抵抗 $R_{2a}$ 、 $R_{2b}$ を交互に、1つ隣りノード間の結合抵抗 $R_1$ 、各ノードからグラウンドへの結合抵抗 $R_0$ で構成する。尚、2つ隣りノード間の中心の抵抗は $R_{2c}$ とした。また、各ノード間に容量をいれることで時間ダイナミクスを実現した。実際のシミュレーションではノード数を161個で実行した。測定方法は中心ノードに時間ステップ電流を加え、そのノード電圧を計測し時間応答を確認する。

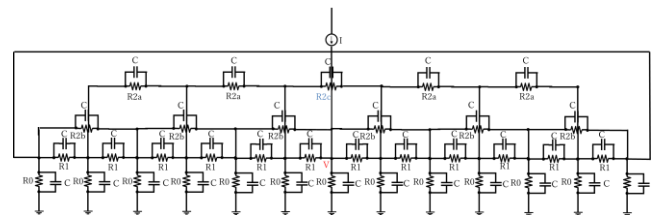


図1 時間安定性を確認するための不均一抵抗ネットワーク

Fig. 1. Resistor network to check temporal stability

図2の回路で空間安定性を確認する。図1に比べてノード間の容量結合はない。測定方法は中心ノードに直流電流を加え、各ノード電圧を全て計測し、Excelを用いてグラフ化して空間インパルス応答を確認する。

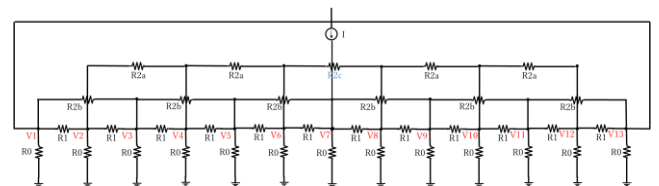


図2 空間安定性を確認するための不均一抵抗ネットワーク

Fig. 2. Resistor network to check spatial stability

〈2・3〉 均一抵抗ネットワークの時空間安定性

本節では、参考文献(1)、(2)で均一な抵抗ネットワークの場合、時間安定性と空間安定性の条件が一致すると記述があるが、これが図1、図2にも同じく当てはまるかどうかを検証する。

まず図1の回路を使って、時間安定と時間不安定の境界を調べる。本節では均一ネットワークを考えるため R2a と R2b と R2c は同じ値で行う。詳しいシミュレーション条件は表1に示した。また、式(1)を満たす値から徐々に R2 を上げていくので始めは R2a,R2b,R2c を-100k [Ω]からシミュレーションを開始する。時間安定と時間不安定の境界を調べた結果を表2に示した。そして、その間の値の時間応答を図3、図4に示した。次に、その間の値の空間応答をグラフ化して図5、図6に示した。詳しいシミュレーション条件を表2に示す。

表1 均一ネットワーク時間安定性シミュレーション条件

Table 1. Simulation conditions for the uniform network (temporal stability)

Parameter	Value
R0	1k Ω
R1	25k Ω
R2a, R2b, R2c	R2a=R2b=R2c
C	1pF
I (step current)	0~1.0us:0A,1.0us~:1.0mA

表2 均一ネットワーク時間安定性シミュレーション結果

Table 2. Simulation results for the uniform network (temporal stability)

R2a=R2b=R2c [Ω]	Temporal stability		
-100k	stable	-3.8k	stable
-50k	stable	-3.75k	stable
-25k	stable	-3.7k	unstable
-10k	stable	-3.5k	unstable
-5k	stable	-3k	unstable
-4k	stable	-1k	unstable

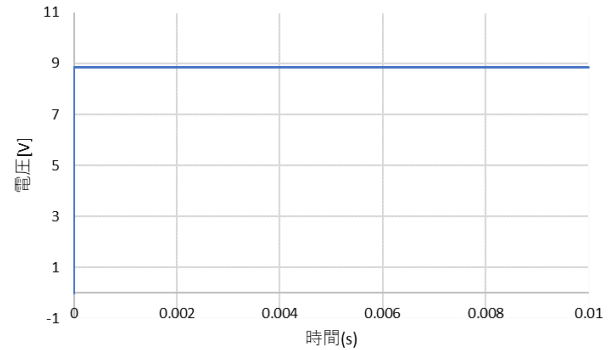


図3 中心ノードでの均一抵抗ネットワーク時間応答 (R2 = -3.75k の時: 安定)

Fig. 3. Temporal response of the uniform resistor network at the center node (R2 = -3.75k: stable).

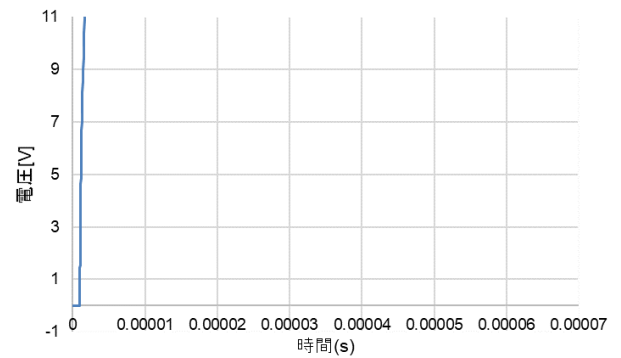


図4 中心ノードでの均一抵抗ネットワーク時間応答 (R2 = -3.7k の時: 不安定)

Fig. 4. Temporal response of the uniform resistor network at the center node (R2 = -3.7k: unstable).

表3 均一ネットワーク空間安定性シミュレーション条件

Table 3. Simulation conditions for the uniform network (spatial stability)

Parameter	Value
R0	1k Ω
R1	25k Ω
R2a, R2b, R2c	R2a=R2b=R2c
I	1mA

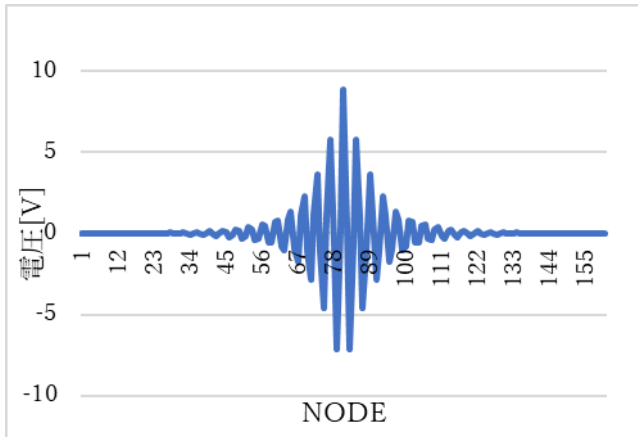


図5 均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_2 = -3.75k$  の時: 安定)

Fig. 5. Spatial impulse response of the uniform resistor network  
( $R_2 = -3.75k$ : stable).

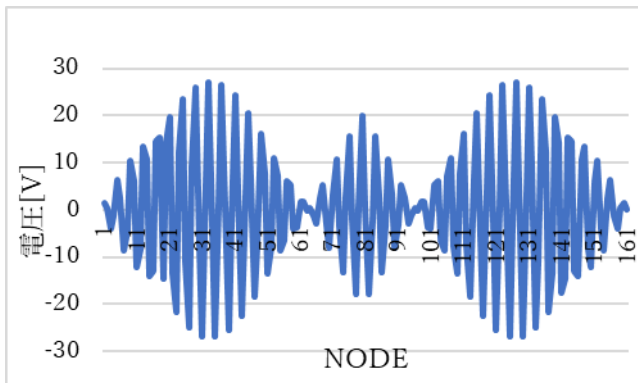


図6 均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_2 = -3.7k$  の時: 不安定)

Fig. 6. Spatial impulse response of the uniform resistor network  
( $R_2 = -3.7k$ : unstable).

図3~図6より均一抵抗ネットワークの時間安定性と空間安定性の条件が一致していることがわかる。

### 3. 負性抵抗を含む不均一抵抗ネットワーク

本節では、不均一な抵抗ネットワークの時間安定性と空間安定性の条件が一致するかを調べる。

前節と同様に図1の回路を用いて時間安定と時間不安定の境界条件を探る。 $R_{2a}$ と $R_{2b}$ は異なる値にする、すなわち $R_{2b}$ の値を $-4k\Omega$ に固定して $R_{2a}$ の値のみ変化さいく。 $R_{2a}$ 、 $R_{2b}$ 共に $-4k\Omega$ の時は時間安定となることが分かっているため[4]、それを利用して $R_{2a}$ を $-4k\Omega$ から徐々に大きくした。尚、 $R_{2c}$ は不均一な抵抗ネットワークのため $0\Omega$ とした。結果を表4に示す。中心のノード電圧の時間応答を図7、図8に示す。

図7、図8に対応するネットワークの空間インパルス応答図9、図10に示す。これらは両方とも空間不安定である。

表4 不均一ネットワーク時間安定性シミュレーション結果

Table 4. Simulation results for the non-uniform network  
(temporal stability)

$R_{2a}$ [ $\Omega$ ]	Temporal Stability		
-4k	stable	-3.695k	unstable
-3.7k	stable	-3.69k	unstable
-3.699k	stable	-3.68k	unstable
-3.6985k	stable	-3.65k	unstable
-3.6984k	stable	-3.6k	unstable
-3.6983k	unstable	-3.5k	unstable
-3.698k	unstable		

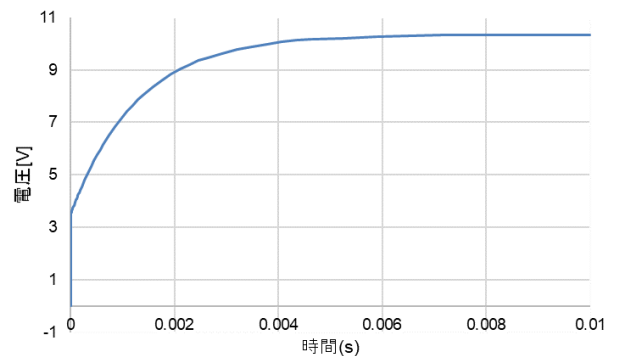


図7 中心ノードでの不均一抵抗ネットワーク時間応答  
( $R_{2a} = -3.6984k$  の時: 安定)

Fig. 7. Temporal response of the non-uniform resistor network at the center node ( $R_{2a} = -3.6984k$ : stable).

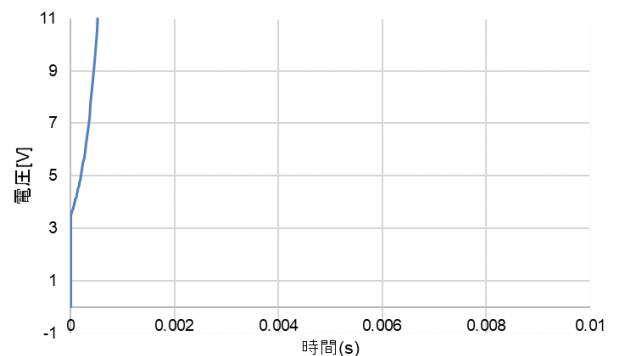


図8 中心ノードでの不均一抵抗ネットワーク時間応答  
( $R_{2a} = -3.6983k$  の時: 不安定)

Fig. 8. Temporal response of the non-uniform resistor network at the center node ( $R_{2a} = -3.6983k$ : unstable).

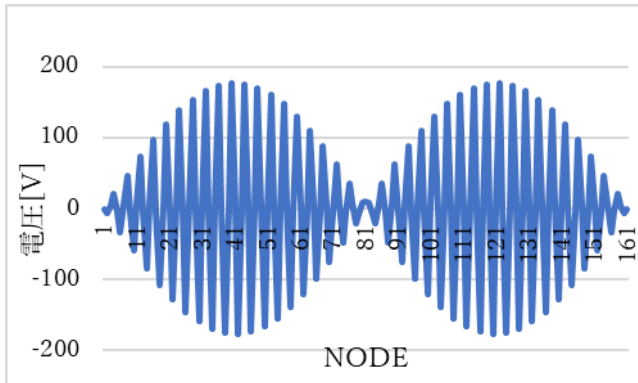


図 9 不均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_{2a} = -3.6984k$  の時: 不安定)

Fig. 9. Spatial impulse response of the non-uniform resistor network ( $R_{2a} = -3.6984k$ : unstable).

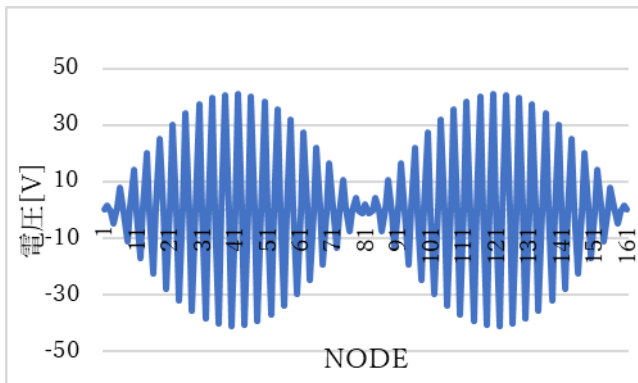


図 10 不均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_{2a} = -3.6983k$  の時: 不安定)

Fig. 10. Spatial impulse response of the non-uniform resistor network ( $R_{2a} = -3.6983k$ : unstable).

図 7～図 10 より不均一ネットワークでは時間安定性と空間安定性の条件が一致していないことが分かる。

また図 11, 12, 13 により空間不安定な場合の応答を示す。

#### 4. まとめ

本論文は、負性抵抗を含む不均一な抵抗ネットワークの時間安定性と空間安定性の条件を検討した。結論として均一な抵抗ネットワークの時空間安定性の条件は一致するが、不均一な抵抗ネットワークの時空間安定性は一般には一致しないことが分かった。今回は 2 つ隣りノード間の結合抵抗  $R_{2a}$ 、 $R_{2b}$  を異なる値にすることで不均一にしたが、2 つ隣りノード間の結合抵抗  $R_1$ 、各ノードからグランドへの結合抵抗  $R_0$  にも変化を加えた場合も調べていく。

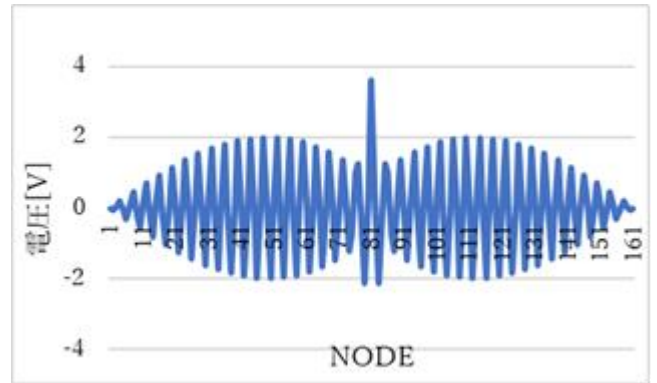


図 11 不均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_{2a} = -3.7k$  の時)

Fig. 11. Spatial impulse response of the non-uniform resistor network ( $R_{2a} = -3.7k$ ).

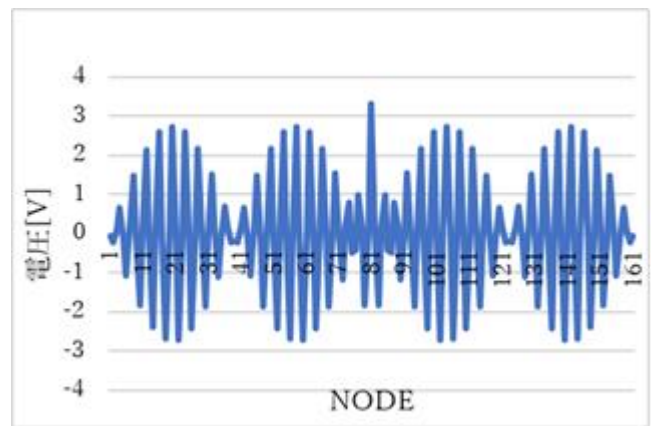


図 12 不均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_{2a} = -3.68k$  の時)

Fig. 12. Spatial impulse response of the non-uniform resistor network ( $R_{2a} = -3.68k$ ).

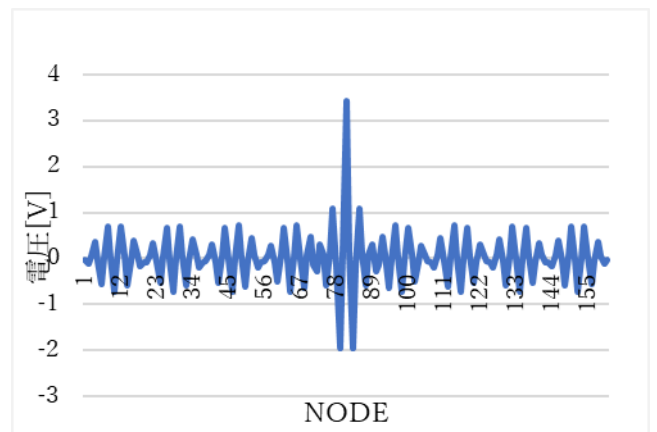


図 13 不均一抵抗ネットワーク空間インパルス応答  
( $R_{2a} = -3.6k$  の時)

Fig. 13. Spatial impulse response of the non-uniform resistor network ( $R_{2a} = -3.6k$ ).

## 文 献

---

- (1) H. Kobayashi, J. L. White, A. A. Abidi, "An Active Resistor Network for Gaussian Filtering of Images", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 26, no. 5, pp.738-748 (May 1991)
- (2) 松本隆、小林春夫、八木哲也「ビジョンチップ (I) -アナログ画像処理用ニューロチップ-」, *電子情報通信学会誌*, vol.76, no.7, pp.783-791 (1993年7月).
- (3) 松本隆、小林春夫、八木哲也「ビジョンチップ (II・完) -アナログ画像処理用ニューロチップ-」, *電子情報通信学会誌*, vol.76, no.8, pp.851-858 (1993年8月).
- (4) H. Kobayashi, T. Matsumoto, and J. Sanekata, "Two-Dimensional Spatio-Temporal Dynamics of Analog Image Processing Neural Networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol.6, no.5, pp.1148-1164 (1995).
- (5) T. Matsumoto, H. Kobayashi, Y. Togawa, "Spatial Versus Temporal Stability Issues in Image Processing Neuro Chips", *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol.3, no.4, pp. 540-569 (July.1992).
- (6) H. Kobayashi, T. Matsumoto, "Spatial and Temporal Stability of Vision Chips Including Parasitic Inductances and Capacitances", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. II 1089-1092, Seattle (May 1998).