

## 確率共鳴を利用したコントラスト分解能の改善

山元 勇輝<sup>\*1</sup> 藤井 啓輔<sup>\*2</sup> 高瀬 郁子<sup>\*2</sup> 遠地 志太<sup>\*3</sup>  
川浦 稚代<sup>\*2</sup> 森 政樹<sup>\*4</sup> 池田 充<sup>\*2</sup> 今井 國治<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup>名古屋大学医学部保健学科 〒461-8673 名古屋市東区大幸南 1-1-20<sup>\*2</sup>名古屋大学大学院医学系研究科 〒461-8673 名古屋市東区大幸南 1-1-20<sup>\*3</sup>大阪大学医学部附属病院 〒566-0871 大阪府吹田市山田丘 2-15<sup>\*4</sup>名古屋大学医学部附属病院 〒466-8560 名古屋市昭和区鶴舞町 65

E-mail: yamamoto.yuuki@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

**あらまし** 近年、確率共鳴と呼ばれる現象が非線形システム内で発見され、これを応用する研究が様々な分野で行われるようになってきた。そこで本研究では、X線CT画像において確率共鳴が発現するのかどうかについて検討した。その結果、White Gaussian Noiseの付加によって、CT画像上で確率共鳴現象が発現することがわかった。さらに、コントラストと付加ノイズとの関係において、コントラスト分解能を最大にするノイズ強度の存在も明らかとなった。

**キーワード** 確率共鳴, コントラスト分解能, ノイズ

## Improvement of Contrast Resolution Using Stochastic Resonance

Yuki Yamamoto<sup>\*1</sup> Keisuke Fujii<sup>\*2</sup> Ikuko Takase<sup>\*2</sup> Yukihiro Enchi<sup>\*3</sup>  
Chiyo Kawaura<sup>\*2</sup> Masaki Mori<sup>\*4</sup> Mitsuru Ikeda<sup>\*2</sup> Kuniharu Imai<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> Department of Radiological Technology, Nagoya University School of Health Sciences  
1-1-20 Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya, 461-8673, JAPAN<sup>\*2</sup> Department of Radiological Sciences, Nagoya University Graduate School of Medicine  
1-1-20 Daiko-minami, Higashi-ku, Nagoya, 461-8673, JAPAN<sup>\*3</sup> Division of Radiological Technology, Osaka University Hospital  
2-15 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, JAPAN<sup>\*4</sup> Division of Radiological Technology, Nagoya University Hospital  
65 Tsurumai, Showa-ku, Nagoya, 466-8560, JAPAN

E-mail: yamamoto.yuuki@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** Recently, phenomenon called Stochastic Resonance was found in a nonlinear system, and has been applied for many researches in various fields. In this study, we have verified that Stochastic Resonance appeared in CT images by adding white-Gaussian noise to CT images. Furthermore, we have also evaluated relationship between contrast and noise intensity added to CT images, and found the suitable noise intensity which maximizes the contrast resolution in CT images.

**Keyword** Stochastic Resonance, Contrast Resolution, Noise

## 1. はじめに

X線 Computed tomography (CT)画像で代表されるデジタルX線画像において、ノイズは画像診断能を低下させる重大な因子であることが広く認知されている。そのため、デジタルX線画像では如何にノイズを低減させるかが重要な課題となり、これに対する技術開

発が現在も活発に推し進められている。

しかし近年、ノイズは必ずしもシステムに有害なものではなく、場合によってはむしろ有効に作用するという結果が生体制御や電子工学の分野で報告されている[1], [2]。このような結論に至った理由として、確率共鳴と呼ばれる現象が大きく関与していると指摘され

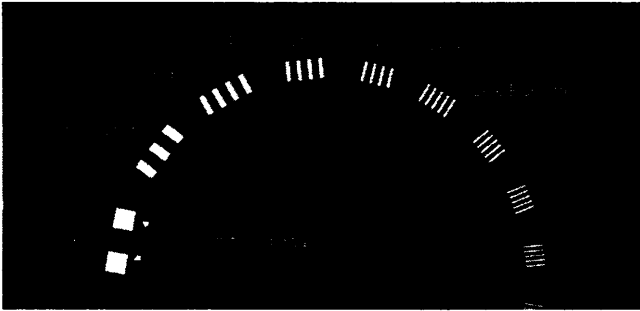


図 1. 解析対象ファントムの構造

Fig.1. Structure of target object (Catphan528 phantom)

ている。確率共鳴現象とは、非線形な時系列現象とノイズとの間で起こる共鳴現象で[1]、この現象が発現すると、信号成分が増幅され、信号検出が容易になると言われている。この観点から、デジタル X 線画像において、この現象が効果的に発現できれば、微弱な病変信号の検出に、大いに役立つのではないかと期待される。しかし現状では、デジタル X 線画像において確率共鳴現象が発現するののかということ自体未だ不明であり、これに関する検討も全く行われていない。

そこで本研究では、X 線 CT 画像において確率共鳴現象が生じるかを検証し、この現象に基づいて信号検出能の改善について検討した。本報告はこれらの結果をまとめたものであり、この現象の有用性について論じている。

## 2. 解析対象画像

本研究では、長方形のアルミニウム片(2mm 厚)が等間隔に配置されている高コントラスト分解能測定用ファントム Catphan528 を解析対象物として使用した(図 1)。このファントムを 64 列 Multi-Detector row CT 装置(GE Healthcare)を用いて、異なる撮像条件でスキャンし(管電圧 140 kV, 管電流 180 mA と管電圧 140 kV, 400 mA), Filtered Back Projection 法(フィルタ関数: Standard(軟部用))を用いて画像を再構成した。その一例を図 2 (a)及び図 3(a)に示す。

## 3. 実験方法

### 3.1. X 線 CT 画像における確率共鳴現象の検証

本研究の解析対象である X 線 CT 画像は、投影データ取得時に対数変換が施されているため、本質的に非線形画像である。このことから、CT 画像上で確率共鳴が発現する前提は満たしていると考えられる。これまでの報告で、確率共鳴は White Gaussian Noise を付加した際に発現しやすいと言われている。[1] そこで、まずは、画像ノイズが確率共鳴現象に影響しないよう

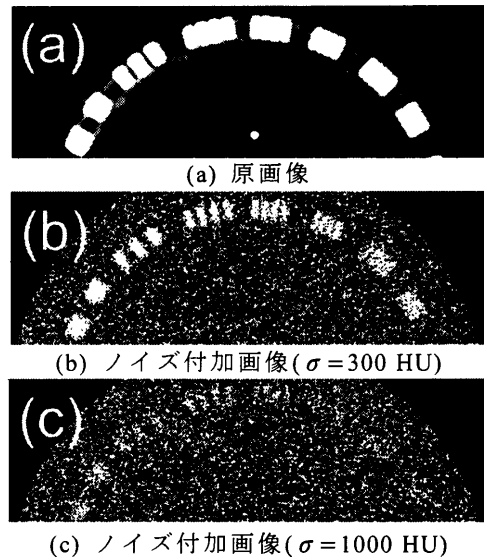


図 2. ノイズ付加による画質変化

(管電圧 140kV, 管電流 400mA)

Fig.2. Original CT image obtained in 140kV, 400mA and the CT images to which noise of various intensity ( $\sigma=300, 1000$  HU) was added

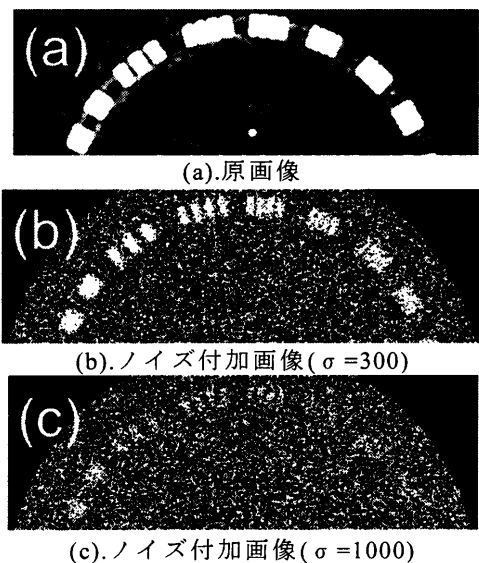
な条件、つまり、画像ノイズが最も小さくなる条件(管電圧 140kV, 管電流 400mA)で得た原画像に White Gaussian Noise を付加して確率共鳴現象が発現するかどうかを検証した。次に、X 線線量の違いによって確率共鳴現象の発現に違いが認められるかどうかを検証するため、管電流のみを設定下限値である 180mA に設定し、この条件の下で撮像を行った。このようにして得られた CT 画像に対しても、確率共鳴現象が発現しやすくなるように White Gaussian Noise を付加した。本研究では、ノイズ強度を CT 値の標準偏差  $\sigma$  と定義し、50~1000 HU の範囲で変化させた。また、ノイズを付加した画像のウィンドウレベルとウィンドウ幅は、臨床条件に準じて(脳梗塞検出) 100HU 及び 40HU とした。

### 3.2. 信号検出能の定量的評価

これまでの研究で、確率共鳴現象が発現した際、Signal-to-Noise Ratio(SNR)の改善や信号増幅が生じると報告されている。そこで本研究では、確率共鳴現象を定量的に解析するため、以下の 2 項目について検討を行った。

1. 解像力の周波数特性(コントラストの周波数特性)
2. White Gaussian Noise の強度とコントラスト分解能(信号検出能)との関係

まず、項目 1 に関しては、Michelson のコントラスト定義式((1)式)を用いて、各空間周波数におけるコントラストを算出し、その周波数特性を評価した。その際、



(a).原画像  
(b).ノイズ付加画像 ( $\sigma=300$ )  
(c).ノイズ付加画像 ( $\sigma=1000$ )  
図 3. ノイズ付加による画質変化  
(管電圧 140kV, 管電流 180mA)

Fig.3. Original CT image obtained in 140kV, 180mA and the CT images to which noise of various intensity ( $\sigma=300, 1000$  HU) was added

各空間周波数におけるコントラストを全て 1 Line Pair (LP)/cm におけるコントラストで規格化した。

$$Contrast = \frac{P_{signal} - P_{background}}{P_{signal} + P_{background}} \quad (1)$$

$P_{signal}$ : 信号領域における平均 Pixel 値

$P_{background}$ : 信号領域と信号領域の間の背景領域での平均 Pixel 値

次に、項目 2 についてであるが、従来、デジタル X 線画像を用いて信号検出能の定量評価を行う場合、コントラスト分解能の評価指標である Contrast-to-Noise Ratio (CNR)を用いた定量解析が、非常に有効であると言われている[3]。そこで、(2)式で定義した CNR をもとに、付加ノイズの強度との関係を検討した。

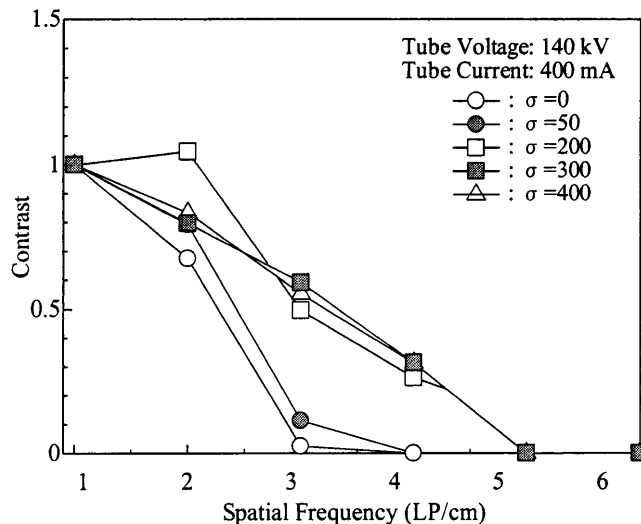
$$CNR = \frac{P_{signal} - P_{background}}{NoiseSD} \quad (2)$$

$NoiseSD$ : 信号領域間の背景ノイズ (背景領域の Pixel 値の標準偏差)

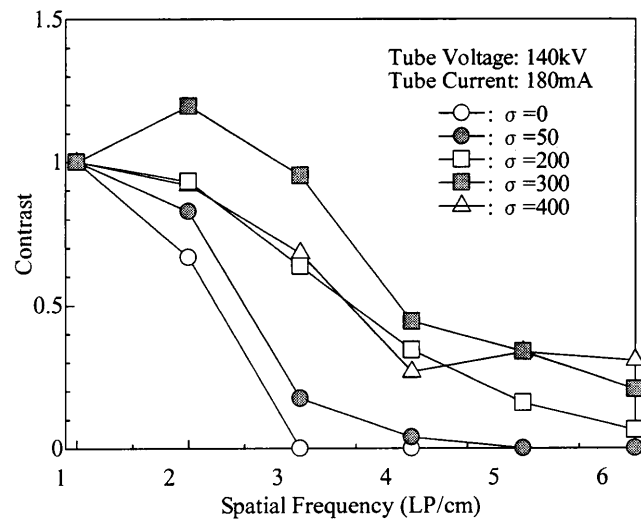
#### 4. 結果および考察

##### 4.1. X 線CT画像における確率共鳴現象の視認

まず、確率共鳴現象の発現が、視認できるか否かを検討するため、様々な強度の White Gaussian Noise をファントム画像に付加した。図 2 に管電流 400 mA で撮像した原画像と、 $\sigma=300$  および 1000 HU のノイズを付加した画像を示す。同図 (b) の 3 LP/cm の信号領域に注目すると、原画像に比べ、画像上の信号が明確



(a) 管電圧 140 kV, 管電流 400 mA



(b) 管電圧 140 kV, 管電流 180 mA

図 4. 解像力の空間周波数特性

Fig.4. Relationship between spatial frequency and contrast on CT images.

に分離されていることがわかる。つまり、原画像に White Gaussian Noise を付加することで、信号検出能が向上することが視覚的に確認された。一方、1000 HU のノイズを付加した場合、同図 (c) に示すように、信号は分離されているもののノイズに埋もれた状態となっており、視認しにくくなっている。このように、適切な強度のノイズを付加すると、画像信号が検知しやすくなったことから、X 線 CT 画像上において確率共鳴現象が発現したと考えられ、White Gaussian Noise との共鳴により、潜在的な画像情報が表れたのだと理解できる。

次に、管電流 180 mA で撮像した原画像と、 $\sigma=300$  HU および 1000 HU の White Gaussian Noise を付加した画像を図 3 に示す。一般に、X 線 CT 画像におけるノイズ (Noise SD) と管電流との間には、 $NoiseSD \propto$

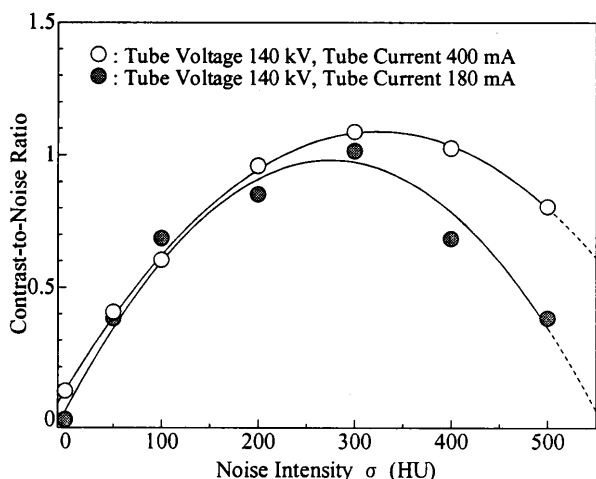
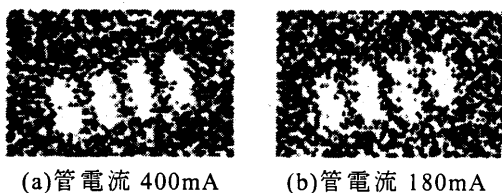


図 5. 付加ノイズ強度と CNR

Fig.5. Relationship between noise intensity and CNR



(a)管電流 400mA (b)管電流 180mA

図 6. ノイズ ( $\sigma=300$ HU)付加画像Fig.6. CT images in (a) 400mA and (b) 180mA to which noise intensity of  $\sigma=300$ HU was added

(mA)<sup>-0.5</sup> という関係が成立している。[3]それゆえ、管電流 180 mA における原画像のノイズは、管電流 400 mA の場合よりも約 1.4 倍程度高くなり、視認しにくくなる。しかし、同図(b)から分かるように、管電流 180 mA 時の原画像に  $\sigma=300$  HU の White Gaussian Noise を付加しても、400mA の場合と同様、信号検出能は向上している。つまり、低線量撮像を行っても、確率共鳴現象は発現することが確認できた。以上の結果から、原画像上のノイズの違いは、確率共鳴現象の発現にほとんど影響しないことがわかった。

#### 4.2. 解像力の空間周波数特性

前節において、CT 画像上で確率共鳴が発現することを確認した。そこで、この現象を定量的に検討するため、各管電流における解像力の空間周波数特性を検討した。その結果を図 4 に示す。付加ノイズの強度に関係なく、空間周波数が高くなるにつれて、解像力が低くなり、原画像に関しては 3 LP/cm でレスポンスは 0 となった。しかし、White Gaussian Noise を原画像に付加すると、その強度に応じて、高周波領域のコントラストが高くなり、解像力特性が改善された。この傾向は、同図(b)に示されているように、管電流を変化させても同様であった。このことから、確率共鳴現象が発現すると、解像力特性が改善されることが示された。

#### 4.3. 付加ノイズ強度とコントラスト分解能の関係

図 5 は、空間周波数 3 LP/cm における CNR と付加ノイズとの関係を示したものである。CNR はノイズ強度に対し、釣鐘型に変化することが示され、その変化の仕方は、管電流に依存しないことがわかった。このことから、コントラスト分解能を最大にするノイズ強度の存在が示された。さらに、最大 CNR の値は管電流に依存せず、ほぼ同じ値を取ることも明らかとなった。そこで、実際に CT 画像を確認してみると、図 6 に示すように、主観的ではあるが、両者にほとんど差異が認められないことがわかった。以上の結果から、管電流の違いによって CNR の改善度合いに大きな違いがないことがわかり、この現象を利用することで CT 検査時の被ばく軽減が図れるのではないかと考えられる。これについては、今後の検討課題としたい。

#### 5. まとめ

本研究では、X 線 CT 画像における確率共鳴現象の発現を検討し、それによる信号検出能の向上について定量的に検討した。その結果を以下に要約する。

1. X 線 CT 画像に White Gaussian Noise を付加することによって、確率共鳴現象が発現し、信号成分のコントラストの向上が視覚的に確認できた。
2. 付加ノイズの強度を大きくすることにより、解像力特性が改善されることが明らかとなった。
3. コントラスト分解能と付加ノイズとの関係において、CNR を最大にするノイズ強度が存在し、本研究においては、 $\sigma=300$  時に CNR が最大となった。さらに、最大 CNR の値は管電流に依存しないことも明らかとなった。

以上の結果から、確率共鳴現象の発現は、病変検出を行う上で、一つの有効な手段になるのではないかと筆者らは考えている。

最後に、本研究は日本学術振興会研究費補助金 (基盤(C))の助成を受けて行われた。

#### 文 献

- [1] 大平徹, “ノイズと遅れの数理,” 共立出版, 2006.
- [2] 大田隆夫, “非平衡系の物理学,” 裳華房, 2000.
- [3] 森政樹他, 電気学会論文誌 C, Vol.131.No11, p1975-1982 (2011).