

CT画像における確率共鳴の発現とその応用

Appearance of Stochastic Resonance in Computed Tomography and its Application

山元 勇輝† 内藤 啓介† 遠地 志太† 藤井 啓輔†

川浦 稚代† 森 政樹‡ 池田 充† 今井 國治†

Yuki Yamamoto Keisuke Naito Yukihiro Enchi Keisuke Fujii

Chiyo Kawaura Masaki Mori Mitsuru Ikeda Kuniharu Imai

1. はじめに

X線 Computed Tomography (CT) 画像で代表されるデジタル X線画像上のノイズは、病変検出能を低下させる重大な要因として広く認知されている。そのため、ノイズ低減に関する技術開発が、今もなお活発に推し進められている。ところが、近年、確率共鳴という現象が非線形システム内で発見され、ノイズは必ずしも有害ではなく、場合によっては、効果的に作用することが生体制御や電子工学の分野で報告された [1]。この現象は、ノイズと信号が共鳴することにより、システムの応答が増幅するという極めて興味深い現象で、これをデジタル X線画像上で効果的に発現させることができれば、病変検出能を改善させる一手法になるのではないかと期待できる。しかし、確率共鳴自体が、X線デジタル画像上で発現するののかについては不明であり、これに関する検討も全く行われていないのが現状である。

以上の背景から、本研究では、CT 画像を対象に確率共鳴現象の発現について議論し、この結果をもとに病変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、CT 画像上で確率共鳴が発現することを明らかにした上で、その有用性を論じている。

2. 解析対象画像

本研究では、高コントラスト分解能測定用ファントム (Catphan528) を被検体として使用した (図1)。このファントムを 64 列 Multi-Detector row CT 装置でスキャンし、解析対象画像を取得した。その際、管電圧 140kV 一定の下、管電流のみを 180–400 mA に変化させ、Filtered Back Projection 法 (軟部用フィルタ) により画像を再構成した。

3. 実験方法

3.1. CT 画像上での確率共鳴の発現検証

CT 画像は、一般に、ウィンドウ処理による非線形処理を行った上で、モニタ上に表示されている。そのため、CT 画像は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条件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。そこで、確率共鳴を確認しやすくするため、画像自体のノイズが最小となる撮像条件 (管電圧 140 kV、管電流 400 mA) でファントムを撮像し、これに強度の異なる White Gaussian Noise を付加した上で確率共鳴の発現を検討した。(検証1) 次に、X線線量の変化によって、確率共鳴の発現に影響があるのかを検証するため、様々な管電流で取得した CT 画像に対し、検証1と同様の検討を行

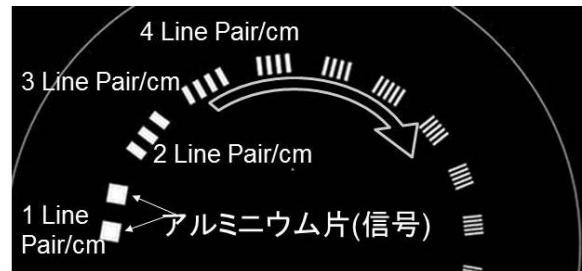


図1. 解析対象ファントム (Catphan528)

Fig.1. Target object (Catphan528)

った。(検証2) これらの検証では、ウィンドウレベルとウィンドウ幅を各々100 HU及び40 HUに設定し、付加するノイズの強度をCT値の標準偏差 σ と定義した上で、50–1000 (HU) の範囲で変化させた。

3.2. 信号検出能の定量的評価

過去の研究において、確率共鳴が非線形システム内で発現すると、信号強度が増幅すると言われている。そこで本研究では、確率共鳴現象を定量的に解明するため、以下の2項目について検討した。

- 1) コントラストの周波数特性に及ぼす付加ノイズの影響
- 2) 付加ノイズの強度と Contrast-to-Noise Ratio (CNR) との関係

項目1) に関しては、Michelson の式 ((1)式) に基づいて、各空間周波数に対するコントラストを算出した。続いて各周波数におけるコントラストを1 Line Pair (LP) /cm のコントラストで規格化し、これをコントラストの周波数特性とした上で、付加ノイズ強度との関係を検討した。

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

P_{signal} : 信号領域の平均 Pixel 値

$P_{\text{background}}$: 信号間背景領域の平均 Pixel 値

次に、項目2) についてであるが、従来、デジタル X線画像の信号検出能を定量的に評価する場合、CNR を用いた解析が、非常に有効であると言われている [2]。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。

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

Noise SD : 信号間背景領域における Pixel 値の標準偏差

4. 結果及び検討

4.1. CT 画像上における確率共鳴現象の視覚的検証

† 名古屋大学大学院医学系研究科

‡ 名古屋大学医学部附属病院

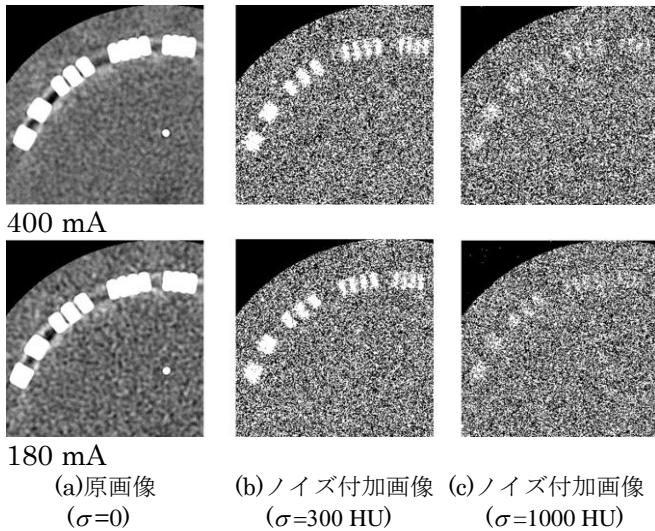


図2. 原画像と確率共鳴画像 (3 LP/cm)

Fig.2. Original CT and stochastic resonance CT images at 3 LP/cm

図2は、本研究で得られた代表的なノイズ付加画像で、比較のため原画像も同図に含めた。 $\sigma=300$ HU のノイズを付加した場合、原画像 (同図(a)) よりも、画像信号がよく分離しており、特に 3 LP/cm 以上の空間周波数領域で顕著であった (同図(b))。これに対し、 $\sigma=1000$ HU のノイズを付加した場合 (同図(c))、信号は分離しているものの、ノイズに埋もれた状態となっており、視認し難くなっている。また、管電流を 400mA から 180mA に低下させても、同様の結果を示した。このように、適切な強度のノイズを付加すると、画像信号が検出し易くなったことから、この現象は確率共鳴であると言え、White Gaussian Noise との共鳴によって、潜在的な画像情報が現れたと考えられる。以上の結果から、White Gaussian Noise を付加することにより、CT 画像上で確率共鳴が起こり、発現自体に X 線線量は影響しないことが明らかとなった。

4.2. コントラストの周波数特性

付加ノイズ強度に対するコントラストの周波数特性を図3に示す。空間周波数が高くなるほど、コントラストは

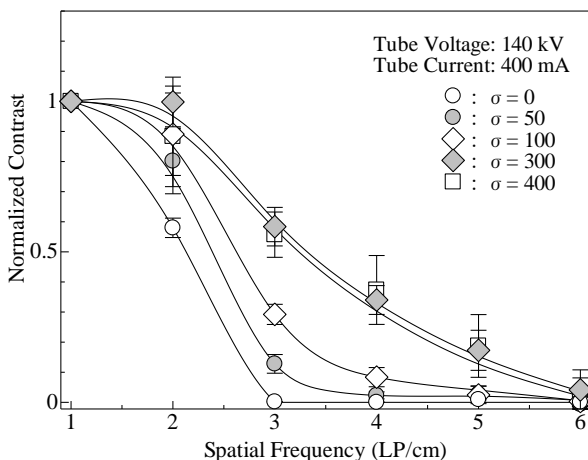


図3. コントラストの空間周波数特性

Fig.3. Spatial frequency dependence of image contrast in stochastic resonance CT images

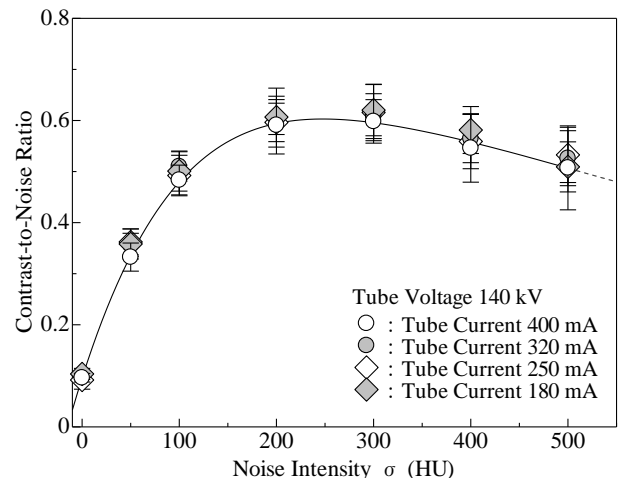


図4. 付加ノイズ強度と CNR の関係

Fig.4. Relationship between noise intensity and CNR

低下し、原画像に関しては、3 LP/cm で 0 となった。しかし、White Gaussian Noise を付加すると、その強度に応じて、各周波数のコントラストは高くなり、 $\sigma=300$ HU 以上ではほぼ一定となった。このことから、確率共鳴の発現によって、解像力が改善されることが示された。

4.3. 付加ノイズ強度と CNR との関係

前節で示したように、空間周波数 3 LP/cm で周波数特性が劇的な変化を遂げた。そこで、この空間周波数における CNR を算出し、付加ノイズ強度との関係を検討した。その結果を図4に示す。CNR は付加ノイズの強度に対し、放物線状に変化し、CNR を最大にする付加ノイズ強度の存在が確認された。この結果は、一般に知られている確率共鳴を示す特性であり、CT 画像上で確率共鳴が発現することが定量的に示された。さらに、この確率共鳴曲線は管電流に依存せず、ほぼ同じであることも示された。この結果から、確率共鳴の発現により、コントラスト分解能の改善が可能であることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、CT 画像における確率共鳴の発現及びこの現象に基づく信号検出能の改善について検討した。その結果を以下に要約する。

- 1) CT 画像に White Gaussian Noise を付加することで、確率共鳴が発現し、画像上の信号成分が検出しやすくなるのが視覚的に明らかとなった。
- 2) 付加する White Gaussian Noise の強度に応じて、解像力が改善されることが認められた。
- 3) CNR と付加ノイズ強度との関係において、CNR は管電流に依存せず、放物線状に変化し、これを最大にする付加ノイズ強度の存在が明らかとなった。

以上の結果から、CT 画像における確率共鳴の発現 (確率共鳴画像) は、画像信号の検出能を改善させるのに、効果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。

6. 参考文献

- [1] 太田隆夫著、“非平衡系の物理”、裳華房(2013)
- [2] M. Mori, K Imai, et al, Electr Commun Jpn, Vol.96, No7, p32-41 (2013)