

特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis) による非定常脳波の分解
次世代麻酔深度モニタリング手法の開発

本研究成果のポイント

- 全身麻酔の導入、維持、そして覚醒という時相において、意識レベルが変化して、それに応じて脳波 (EEG) も変化します。この脳波の変化パターンの特徴を抽出する技術は、麻酔深度を客観的に評価する機械学習アルゴリズムの開発につながります。
- 本研究では、セボフルラン全身麻酔における EEG データを解析するために、線形代数理論に基づく特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis, SSA) という新しいモード分解技術を用いた脳波の周波数解析を開発しました。
- 既存の技術である変分的モード分解法 (VMD) や経験的ウェーブレット変換 (EWT) と比較した結果、SSA によって分解された固有モード関数 (Intrinsic Mode Function, IMF) にヒルベルト変換を行うことで得られる瞬時周波数 (Instantaneous Frequency, IF) や瞬時トータルパワー (Instantaneous Total Power, TP) の経時的変化から、重回帰分析によって予測される麻酔深度指標が、全身麻酔から覚醒に至る反応を最もよく追跡することが示されました。

市立福知山市民病院 麻酔科 医師 木田春香 (京都府立医科大学大学院医学研究科 (博士課程) 統合医科学専攻 (麻酔科学) 大学院生)、京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 助教 山田知見、同 助教 矢持祥子、同 教授 天谷文昌、京都府立医科大学附属病院 病院長 佐和貞治、淀川キリスト教病院 麻酔科 医師 小畑友里江らは、「特異スペクトル解析を用いた脳波モード分解による麻酔深度の評価」に関する研究成果をまとめました。本成果は、オープンアクセス科学ジャーナル『Sensors』に 2026 年 2 月 13 日付でオンライン掲載されました。

本研究では、新しい線形数学アルゴリズムを用いて全身麻酔中の脳波を解析し、麻酔深度の測定につながる技術を開発しました。

【論文基礎情報】

掲載誌情報	雑誌名 Sensors 発表媒体 <input checked="" type="checkbox"/> オンライン速報版 <input type="checkbox"/> ペーパー発行 <input type="checkbox"/> その他 雑誌の発行元国 スイス オンライン閲覧 可 (https://www.mdpi.com/1424-8220/26/4/1212) 掲載日 2026 年 2 月 13 日
論文情報	論文タイトル (英) Assessment of Anesthetic Depth Through EEG Mode Decomposition Using Singular Spectrum Analysis 筆頭著者 市立福知山市民病院 麻酔科 木田春香 (京都府立医科大学大学院医学研究科 (博士課程) 統合医科学専攻 (麻酔科学) 大学院生)

研究情報	代表著者 京都府立医科大学附属病院 佐和貞治 共同著者 京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 山田知見 京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 矢持祥子 淀川キリスト教病院 麻酔科 小畑友里江 京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 天谷文昌		
	研究課題名 全身麻酔中の脳波信号解析のためのモード分解法の開発 代表研究者 京都府立医科大学附属病院 佐和貞治 主たる共同研究者 京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 山田知見 京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 矢持祥子 京都府立医科大学大学院医学研究科 麻酔科学 木田春香 (現 市立福知山市民病院 麻酔科) 淀川キリスト教病院 麻酔科 小畑友里江 資金的関与 (獲得資金等) 特に該当なし		

【論文概要】

全身麻酔中の脳波モニタリングは、患者の意識状態を把握し、安全を確保するために不可欠です。しかし、従来の「フーリエ変換」に基づく解析手法には課題がありました。脳波は刻一刻と変化する「非定常」な信号であるにもかかわらず、従来の解析は信号が安定していることを前提としています。さらに、「 α 波」や「 β 波」といった固定的な周波数帯に当てはめるため、個体差や遷移期の微妙な変化を見落とすリスクがあります。

本研究チームは、こうした限界を克服するため、特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis, SSA) とヒルベルト変換を組み合わせた新しいフレームワークを開発しました。これにより、セボフルラン全身麻酔中の複雑な脳波信号を精密に分析できます。10名の患者の脳波データを解析した結果、事前設定なしに脳波を6つの固有モード関数 (IMF) へ柔軟に分解することで、麻酔維持期の α スピンドル活動から覚醒直前の高周波成分の増加まで、生理学的に重要な特徴を鮮明に抽出できました。

この手法で抽出された中心周波数や総パワーなどのパラメータを用いて重回帰モデルを構築した結果、麻酔深度の指標である BIS 値 (Bispectral Index) を高精度 (決定係数 $R^2 \approx 0.88$ 、平均絶対誤差 MAE < 4) で予測できることが判明しました。本手法は従来の解析よりも優れた時間分解能を持ち、維持期から覚醒期への移行といった急激な意識状態の変化を安定かつ迅速に捉えられます。あらかじめ決められた周波数帯域に縛られず、患者一人ひとりの脳活動をリアルタイムに反映できるこの革新的なアプロー

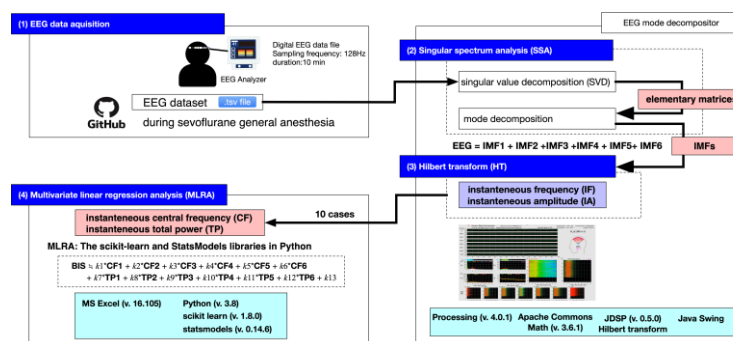


図 1. セボフルラン全身麻酔中の脳波 (EEG) データ取得から、信号分解、重回帰分析 (MLRA) に至る一連の解析プロセス。

チは、過剰麻酔や術中覚醒を防ぎ、より安全で個別化された全身麻酔管理の実現に大きく貢献することが期待されます。

1. 研究の背景と目的: 全身麻酔下では、脳波は意識レベルの変化に伴いダイナミックに変化します。現在、BIS モニターなどの商業的デバイスが広く普及していますが、これらが採用している高速フーリエ変換 (FFT) には限界があります。FFT は信号が定常的であることを前提としているため、刻一刻と変化する麻酔中の非定常な信号を正確に捉えることができません。また、ウェーブレット変換などの手法も、解析パラメータの設定に試行錯誤を要するという課題がありました。

本研究では、事前設定なしに非定常信号を分解できる特異スペクトル解析 (SSA) とヒルベルト変換を組み合わせた新しい解析手法を提案しました。この手法を用いて、セボフルラン麻酔下における脳波解析と麻酔深度予測の有用性を検証しました。

2. 解析手法の概要: 本手法は以下のプロセスで脳波を解析します (図 1)。

- 1. 特異値分解 (Singular Value Decomposition, SVD):** 3 秒間の脳波データを「ハンケル行列 (軌跡行列)」に変換し、SVD を用いて「トレンド」「周期成分」「ノイズ」に分解します。
- 2. 固有モード関数 (IMF) の抽出:** 分解された成分をグループ化し、6 つの固有モード関数 (IMF1~6) として再構築します。
- 3. ヒルベルト変換:** 各 IMF に対してヒルベルト変換を適用し、瞬時周波数 (IF) と瞬時振幅 (IA) を算出。これを特徴量 (中心周波数 CF および総パワー TP) として抽出します。

3. 主な研究結果:

解析 1) セボフルラン全身麻酔の維持期・移行期・覚醒期における SSA

解析例として、54 歳女性患者の全身麻酔における各フェーズ (維持期・移行期・覚醒期) の脳波データ、密度スペクトル配列 (DSA)、SSA 法による固有モード関数 (IMF)、およびヒルベルト・スペクトログラムをまとめたものです (図 2)。

- **維持期 (Maintenance Phase)**
 - 特徴: セボフルラン麻酔特有の α 波の増強 (約 12 Hz 付近のパワー増加) が DSA で確認されました。
 - 波形: 生の脳波波形には、 α 波の増強を示す紡錘波 (Spindle waves) が見られました。
 - 解析: IMF の 1 ~ 4 層は、主に 15 Hz 以下の周波数帯域に集中していました。
- **移行期 (Transitional Phase)**
 - 特徴: 維持期の α 波増強が持続しつつも、新たに 15~47 Hz の高周波成分が増加しました。
 - 波形: 維持期と比較して、脳波の振幅が減少し、速波成分が出現していることが確認されました。
- **覚醒期 (Emergence Phase)**

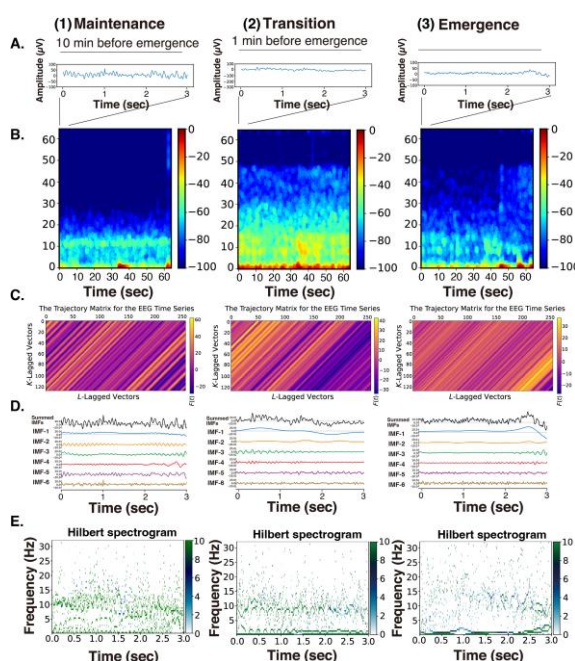


図 2. 全身麻酔 (GA) の 3 つのフェーズ (1: 維持、覚醒の 10 分前、2: 移行、覚醒の 1 分前、3: 覚醒) における 3 秒脳波の解析 (症例 1、54 歳女性)

(A) 生脳波 (EEG) データ (3 秒)、(B) 密度スペクトル配列 (DSA) (64 秒、3 秒間の生の脳波データセグメントから開始)、(C) 脳波時系列の軌道行列画像、(D) SSA 法により 3 秒間にわたって得られた固有モード関数 (IMF)、および (E) SSA によって得られた IMF に対するヒルベルト・スペクトログラム。

- α 波増強の消失: 維持期・移行期に見られた α 波の増強が消え、全体的なパワー(エネルギー)が減少します。
- 波形の変化: 脳波波形は、主に低振幅の β 波活動によって構成されるようになります。

結果をまとめると以下ようになります。

① 全身麻酔の維持から覚醒に至る全体としての変化

SSA (特異スペクトル解析) によって抽出された各成分の変化は以下の通りです。

- 維持期: IMF-2 と IMF-3 に、 α 増強に伴う紡錘波 (Spindle waves) が確認されます。
- 移行期: IMF-2 から紡錘波が消失します。
- 覚醒期: IMF-1 から IMF-3 はほぼ平坦な波形となり、代わりに IMF-5 と IMF-6 に速波活動が顕著に現れます。

② ヒルベルト・スペクトログラム

- 維持期(約 10 Hz) や移行期(約 8-10 Hz) に見られた特徴的な周波数帯域(バンド)が、覚醒期には完全に消失します。

解析 2) セボフルラン全身麻酔: 維持から覚醒に至る 10 分間の連続 SSA (図 3)

10 名のセボフルラン麻酔患者のデータ(麻酔維持期から覚醒までの 10 分間)を解析した結果、以下の知見が得られました。

- **麻酔維持期:** IMF-2 および IMF-3 において、セボフルラン特有の α スピンドル活動(約 12 Hz) が鮮明に捉えられました。
- **覚醒期:** 覚醒に近づくにつれ、低周波成分(IMF1-2)の周波数が低下する一方で、高周波成分(IMF5-6)の周波数と活動が増加する「周波数再分配」が確認されました。

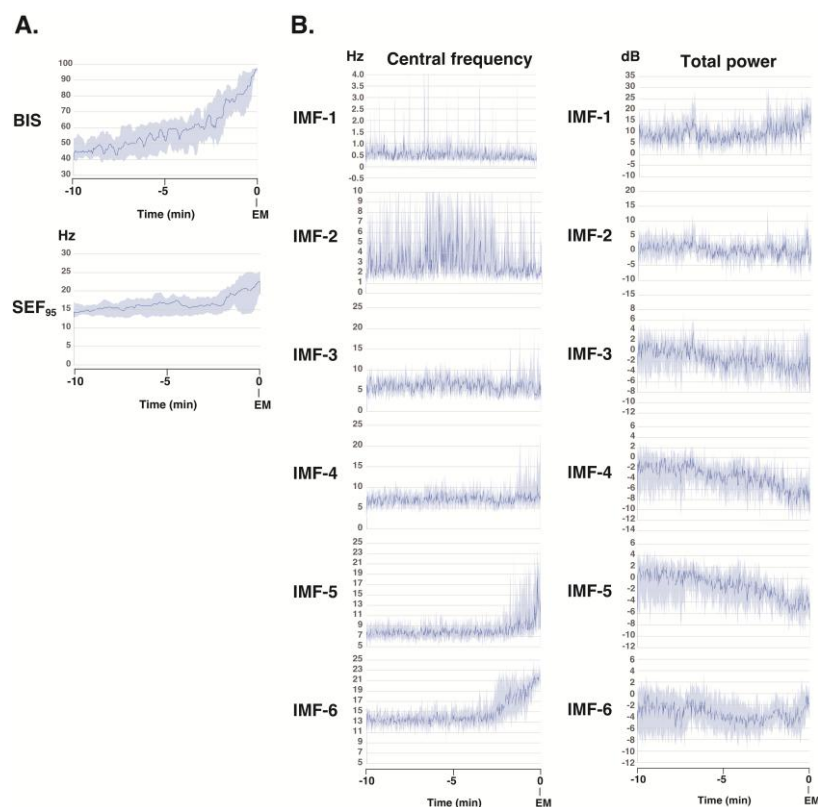


図 3. 患者 10 名における全身麻酔からの覚醒前 10 分間の、(A) 算出された脳波パラメータ (BIS 値、SEF₉₅)、(B) 特異スペクトル解析 (SSA) による固有モード関数 (IMF) の中心周波数、および (C) 総パワーの経時的変化。

解析 3) BIS 値の高度な予測

抽出した 12 個のパラメータ (6 つの IMF の CF と TP) を用いて重回帰分析 (MLRA) を行ったところ、麻酔深度の指標である BIS 値と極めて高い相関を示しました (図 4)。

- 決定係数 (R^2): 0.880
- 平均絶対誤差 (MAE): 3.629

特に IMF-1、2、5、6 の周波数成分と、IMF-1、3、4、5 のパワー成分が BIS 値の強力な予測因子であることが特定されました。

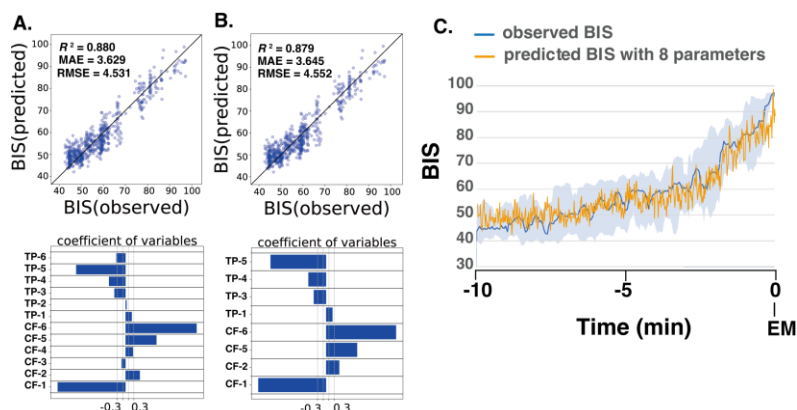


図 4. 10 名の患者の覚醒前 10 分間において、BIS モニターから得られた BIS 値を目的変数、SSA 分解により抽出された IMF-1~IMF-6 の統計的に有意な中心周波数 (CF) および総パワー (TP) の中央値を説明変数として実施した重回帰分析。

解析 4) 従来手法との比較

SSA を用いた手法は、このように VMD (変分モード分解) や EWT (経験的ウェーブレット変換) といった既存の解析手法を越える予測精度を維持しながら、同じく我々が開発した 8 秒のエポックを解析する WMD (ウェーブレットモード分解) と概ね同等の予測精度で 3 秒という短いエポックでリアルタイム解析が可能な安定性を示しました。

表 1. BIS 値と IMF パラメータの重回帰分析: VMD、EWT、WMD、および SSA 手法の比較

A. 12 IMF Parameter Model				
	VMD	EWT	WMD	SSA
n of parameters	12	12	12	12
R^2	0.837	0.618	0.898	0.880
MAE	2.909	3.957	2.394	3.629
RMSE	3.751	5.33	3.128	4.531
B. Significant IMF Parameter Model				
	VMD	EWT	WMD	SSA
n of parameters	7	6	7	8
R^2	0.827	0.608	0.897	0.879
MAE	2.974	4.081	2.388	3.645
RMSE	3.865	5.394	3.148	4.552

今後の展開と社会へのアピールポイント

【今後の展開：技術の社会実装に向けて】

本研究で確立された SSA フレームワークを基盤に、以下のステップを目指します。

- **リアルタイム監視システムの製品化：**3秒という極めて短いエポックで解析可能な特性を活かし、手術室で医師が即座に判断を下せる次世代脳波モニター用ソフトウェア開発を進めます。
- **AI・機械学習との統合：**SSAによって抽出された高精度な特徴量をAIの学習データとして活用し、意識消失や覚醒の予兆を事前に検知する予測モデルの構築を目指します。
- **多様な症例・薬剤への適応拡大：**セボフルラン以外の麻酔薬や、高齢者・小児といった脳波パターンが異なる患者層に対しても個別に最適化された解析アルゴリズムを検証・展開します。

【社会へのアピールポイント:安心・安全な医療の実現】

本技術は、手術を受ける患者さんと医療現場の双方に以下の価値を提供します。

- **「麻酔の効きすぎ・術中覚醒」を防ぐ精密医療：**従来の「平均値」による管理から、患者一人ひとりの脳の反応に合わせた「個別最適化された麻酔管理」へと転換し、術中覚醒の恐怖や過剰投与による術後合併症のリスクを低減します。
- **高齢化社会における安全な手術の鍵：**脳波が非定常になりやすく管理が難しい高齢患者に対しても、高い時間分解能で安定したモニタリングを提供し、術後せん妄の防止や早期回復をサポートします。
- **医療DXを加速させる基盤技術：**従来の定型的な周波数解析の限界を突破した本手法は、手術の自動化や遠隔医療における客観的で信頼性の高い「意識の指標」として、医療の質を底上げします。

＜取材等に関する問い合わせ先＞

事務局企画課

電 話：075-251-5804

E-mail：kouhou@koto.kpu-m.ac.jp