



〔千葉医学会奨励賞〕

思春期特発性側弯症の病状進行を正確に予測する、 日常診療に応用可能な機械学習モデルとその社会実装

大 山 秀 平

(2025年10月6日受付, 2026年1月16日受理, 2026年3月10日公表)

I. はじめに

思春期特発性側弯症 (adolescent idiopathic scoliosis: AIS) は, 思春期に発症する原因不明の脊柱変形であり, 特に女性に多くみられる疾患である[1]。AISは成長期に進行する三次元的変形を特徴とし, 治療方針の決定においてはコブ角 (Cobb angle) が主要な指標として用いられてきた[2]。臨床現場では, 進行リスクを適切に予測することが診断・治療戦略の根幹を成すが, 個々の患者における将来的な進行を正確に見極めることは容易ではない[3]。これまで, 多くの患者はリスクの有無にかかわらず一定の間隔で通院し, 繰り返しのX線撮影によって経過を観察されてきた。その結果, 患者と家族には身体的負担 (通院回数や被曝量), 精神的負担 (装具治療や手術への不安) が生じており, 医療資源の効率的利用という観点からも課題が存在していた[4,5]。

従来の進行予測に関する研究では, 統計学的手法を用いた予測モデルが報告されている。初期コブ角や骨成熟度指標 (リッサー徴候, 初潮の有無) などが進行に関連する因子として知られているが, これらを単独または単純な組み合わせで用いた場合, 予測精度は十分ではないとされる[3]。さらに, 高精度とされる一部のモデルは, CTや三次元画像といった特殊かつ侵襲的な検査を必要

とし, 日常診療への適応が難しいという問題があった[6,7]。このように, AISの進行予測には「高精度かつ簡便で, 日常診療に適応可能な手法」の開発が求められてきた。

近年, 医療分野においては機械学習 (machine learning: ML) を用いた予測モデルが注目されている。機械学習は, 大量のデータから非線形な関係や複雑な相互作用を抽出できる点に優れ, 従来の統計手法を上回る精度を示すことがある。脊椎外科領域でも応用が進みつつあり, AISにおいても機械学習を用いた進行予測の有用性が期待されている[8]。

本稿では, 筆者がこれまでに発表した二本の英語原著論文と, それらを発展させた研究計画を中心に, AIS進行予測に関する研究成果を紹介する。具体的には, 初診時データを用いた進行予測モデルの構築, 初診と二回目受診データを組み合わせた回帰・分類モデルの検討, さらに初潮と進行リスクの関係を補足的に示した研究を取り上げる。

II. 初診時データを用いた進行予測モデル

筆者らはまず, 初診時に得られる最小限の臨床情報を用いて, AISの進行を予測できるモデルの開発を試みた。対象は, 2011年から2023年までに単一の側弯症集積施設を受診した女性AIS患者

千葉大学医学部附属病院整形外科

Shuhei Ohyama. A machine learning model for accurate prediction of disease progression in adolescent idiopathic scoliosis and its clinical applicability.

Department of Orthopedic Surgery, Chiba University Hospital, Chiba 260-8677.

Phone: 043-226-2117. Fax: 043-226-2116. E-mail: oyama.shuhei@gmail.com

Received October 6, 2025, Accepted January 16, 2026, Published March 10, 2026.

のうち、初診時のコブ角が25度未満であった1,119例である。研究デザインは後ろ向きコホート研究であり、初診時の年齢、身長、体重、初潮の有無、リッサー徴候、各カーブのコブ角、さらに胸椎後弯などを説明変数として収集した。目的変数は、最終受診時に25度以上へ進行したか否かであり、進行の有無を二値分類する機械学習モデルを構築した。

機械学習アルゴリズムとしては、ロジスティック回帰、ランダムフォレスト、勾配ブースティング法、カテブーストなど複数の手法を用いてモデルを作成し、ホールドアウト法および交差検証によって精度を比較した。その結果、いずれのモデルにおいてもAUC (area under the curve) は0.84~0.94と高い値を示し、特に主胸椎カーブ (main thoracic curve) ではAUC 0.89、感度0.85と良好な成績であった。重要因子の解析では、近位胸椎 (proximal thoracic curve) では初診時コブ角、主胸椎では初潮の有無、胸腰椎ではリッサー徴候がそれぞれ最も強く寄与していた。これらは従来の臨床経験で重要と考えられてきた要素でありつつも、統計的に一貫して示された点で大きな意義がある。

また、本研究の特徴は、あえてCTや3次元画像といった特殊検査を用いず、日常診療で必ず行われる単純X線と簡易な問診のみでモデルを構築した点にある。従来報告されてきた高精度モデルの多くは、追加の放射線被曝や特殊装置を必要とし、一般診療への適応性に乏しいとされてきた。これに対し、本モデルは、診療現場のルーチンデータから作成されており、患者負担を増加させずにリスク層別化が可能であることを示した。

さらに重要な知見として、初潮の有無が主胸椎カーブ進行の主要因子として強く寄与した点が挙げられる。AISの進行は成長スパートと密接に関係することが知られており、初潮は骨成熟度を示す重要なマーカーである。本研究により、初潮情報が進行予測モデルにおいても最重要因子として位置付けられたことは、臨床的合理性を裏付けるとともに、診療現場での簡便な予測因子として改めて意義が確認された。

総じて、本研究は「初診時の最小限データから高精度な進行予測が可能である」ことを明確に示

した点で、AIS診療の大きな一歩となった。特に、放射線被曝や診療コストを増加させることなく予測精度を確保できる点は、日常診療における即時応用可能性を強く示唆している[9]。

Ⅲ. 初診+二回目データを用いた回帰・分類モデル

前述の研究では初診時データのみを用いた進行予測が可能であることを示したが、実際の診療においては初診後の経過観察が不可欠である。特に、初診時点では進行の程度を正確に把握できない症例も多く、早期経過情報を加味することが予測精度向上につながると考えられる。そこで筆者らは、初診と二回目受診時の臨床情報を組み合わせ、将来のコブ角そのものを予測する回帰モデルを構築するとともに、進行の有無を判定する分類モデルについても再検討を行った。

対象は同一施設における女性AIS患者887例であり、二回目受診データを含む臨床情報を解析に用いた。結果として、回帰モデルは $R^2=0.61\sim 0.73$ 、MAEは2.3~4.2度と良好な精度を示し、分類モデルも初診時のみの予測を上回る成績を示した。さらにSHAP解析により、二回目受診時の角度そのものや進行速度が主要な因子であることが明らかとなり、成長と進行の相互作用が精度向上に寄与していることが示された。

本研究の意義は、初診と二回目受診時の情報を組み合わせることで予測精度を大幅に向上できる点にある。将来のコブ角を連続値で予測できるため、患者・家族への説明がより具体的となり、治療方針決定に直結する。さらに特殊検査を必要とせず再現性も確認されており、実臨床での応用可能性を強く示している[10]。

Ⅳ. 初潮と側弯症進行の関係性

前述の2研究では、初診時や二回目受診時のデータを用いた機械学習モデルにより、AISの進行を予測する新しい枠組みを提示した。一方で、進行リスクを規定する臨床的因子の基盤を明らかにする研究も重要である。特に骨成熟度を示す指標は古くから注目されており、その中でも初潮の

有無や時期は成長スパートの終盤を示す明確なマーカーとして临床上広く利用されてきた。

本研究では、装具治療の影響を受けない小さなカーブのAIS患者を対象に、初潮前後における自然経過での進行パターンを明らかにすることを目的とした。対象は1,090例の女性AIS患者であり、装具治療を受けなかった症例に限定することで、治療介入によるバイアスを排除した。解析においては、初診時のコブ角が25度未満であった症例を基盤とし、年齢、身長、体重、リッサー徴候などの臨床情報に加え、初潮の有無とその時期を記録した。進行の定義は、観察期間中にコブ角が一定の閾値（25度以上または増加10度以上）に達するかどうかとし、縦断的に評価した。

結果として、初潮前の症例では年間あたりのコブ角進行速度が明らかに大きく、初潮を迎えると進行速度は急速に減速することが示された。特に、初潮前後1年前後の時期に進行が集中する傾向があり、このタイミングがAISの自然経過における「リスクピーク」であることが定量的に裏付けられた。また、初潮後2年を経過すると進行例はほとんど認められず、骨成熟が進むことで自然経過における進行リスクが大きく低下することが明らかとなった。

本研究の知見は、初診時データ予測モデル「主胸椎カーブの進行に初潮の有無が強く関与する」という結果と整合しており、機械学習モデルが抽出した因子の妥当性を裏付けるものである。さらに、初診2回目データ予測モデルにおいても、初潮の有無や初潮からの経過月数は強い寄与因子として組み込まれており、予測精度向上に貢献していた。すなわち、本研究は単なる補足研究ではなく、AIS進行における「成長と骨成熟の関与」を明確に示し、予測モデルの基盤となる臨床的事実を提示した点で重要である。

このように、本研究は予測モデルを直接提示したわけではないが、AIS進行の病態理解を支える重要な基礎的研究であり、機械学習モデルを含む研究群全体の信頼性を補強する役割を果たしている。特に、初潮という日常診療で容易に得られる情報が、進行予測において極めて大きな意味を持つことを明示した点は、本研究群全体の臨床的意義を強調するものである[11]。

V. 今後の展望

本研究群は、初診時および二回目受診時の最小限の臨床情報を用いてAISの進行を高精度に予測できる可能性を示した。しかし現段階での成果は単施設データを基盤としており、外部妥当性や一般化の観点で克服すべき課題が残されている。

今後は、多施設共同研究による外部検証、全国規模でのデータ集積が必要である。さらに、社会実装に向けたアプリケーション開発により、患者データ入力から即時に進行リスクや将来のコブ角を提示できる仕組みを構築することが目標となる。将来的には国際共同研究の枠組みで展開し、日本発のモデルを世界に発信することも期待される。

VI. まとめ

本稿では、AISの進行予測に関する筆者らの研究群を紹介した。初診時データによるモデル、初診+二回目データによるモデル、さらに初潮と進行リスクの関係を通じて、骨成熟度の重要性を再確認した。これらは日常診療データのみで高精度な予測を可能とし、患者負担の軽減や治療戦略の合理化に寄与する。

今後は外部妥当性の検証と社会実装が鍵であり、AIS診療を経験則からデータ駆動型へと転換させる可能性を有している。

財源支援

該当なし。

利益相反

該当なし。

倫理的承認

該当なし。

データの可用性

本研究で使用したデータは、合理的な要請があった場合には対応可能です。

謝 辞

大鳥精司先生には本稿の厳格な校閲を賜り、感謝申し上げます。

文 献

- 1) Kane WJ. (1977) Scoliosis prevalence, a call for a statement of terms. *Clin Orthop Relat Res* 43-6.
- 2) Weinstein SL, Dolan LA, Cheng JCY, Danielsson A, Morcuende JA. (2008) Adolescent idiopathic scoliosis. *Lancet* 371, 1527-37.
- 3) Yahara Y, Tamura M, Seki S, Kondo Y, Makino H, Watanabe K, Kamei K, Futakawa H, Kawaguchi Y. (2022) A deep convolutional neural network to predict the curve progression of adolescent idiopathic scoliosis, a pilot study. *BMC Musculoskelet Disord* 23, 610.
- 4) Schwieger T, Campo S, Weinstein SL, Dolan LA, Ashida S, Steuber KR. (2016) Body image and quality of life and brace wear adherence in females with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* 41, 311-9.
- 5) Asada T, Kotani T, Nakayama K, Sasaki T, Fujii K, Sunami T, Sakuma T, Iijima Y, Akazawa T, Minami S, Ohtori S, Koda M, Yamazaki M. (2019) Japanese adaptation of the bad sobernheim stress questionnaire-brace for patients with adolescent idiopathic scoliosis. *J Orthop Sci* 24, 1010-4.
- 6) Parent EC, Donzelli S, Yaskina M, Negrini A, Rebagliati G, Cordani C, Zaina F, Negrini S. (2023) Prediction of future curve angle using prior radiographs in previously untreated idiopathic scoliosis: natural history from age 6 to after the end of growth (SOSORT 2022 award winner). *Eur Spine J* 32, 2171-84.
- 7) Nault ML, Beauséjour M, Roy-Beaudry M, Mac-Thiong JM, de Guise J, Labelle H, Parent S. (2020) A predictive model of progression for adolescent idiopathic scoliosis based on 3D spine parameters at first visit. *Spine* 45, 605-11.
- 8) Alfraihhat A, Samdani AF, Balasubramanian S. (2022) Predicting curve progression for adolescent idiopathic scoliosis using random forest model. *PLoS One* 17, e0273002.
- 9) Ohyama S, Maki S, Kotani T, Ogata Y, Sakuma T, Iijima Y, Akazawa T, Inage K, Shiga Y, Inoue M, Arai T, Toshi N, Tokeshi S, Okuyama K, Tashiro S, Suzuki N, Eguchi Y, Orita S, Minami S, Ohtori S. (2024) Machine learning algorithms for predicting Cobb angle beyond 25 degrees in female adolescent idiopathic scoliosis patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. DOI: 10.1097/BRS.0000000000004986
- 10) Ohyama S, Maki S, Kotani T, Ogata Y, Sakuma T, Iijima Y, Akazawa T, Inage K, Shiga Y, Inoue M, Arai T, Toshi N, Tokeshi S, Okuyama K, Tashiro S, Suzuki N, Eguchi Y, Orita S, Minami S, Ohtori S. (2025) Machine learning algorithms for predicting future curve using first and second visit data in female adolescent idiopathic scoliosis patients. *Eur Spine J* 34, 3693-701.
- 11) Ogata Y, Kotani T, Asada T, Ohyama S, Okuwaki S, Iijima Y, Sakuma T, Ohtori S, Yamazaki M. (2025) Timeline of curve progression around menarche in small AIS curves without influence of brace. *Spine J* 25, 1708-18.