

特集 1

## AI と医療：循環器疾患の外科治療の周辺における現状

森田 茂樹

純真学園大学 副学長

AI and medicine: Current status related to cardiovascular surgery

Shigeki MORITA

Vice-President JUNSHIN GAKUEN University

【要旨】 循環器領域への Artificial Intelligence (AI) の応用は、他の分野と同様に病歴や検査などの医療情報を収集すること、収集した情報を分析し治療法を提案することなどを AI が行うことが現実のものとなり、その範囲やレベルが日々進化している。心臓の聴診データから複雑な先天性心臓病の診断を専門医に近いレベルで行うシステムも現れてきた。早くから発達した心電図の自動解析は言うまでもなく、検査者の技量に依存していた心エコー図検査の精度も AI を関与させることによって、質的な向上を伴う検査の効率化、標準化が可能となった。一方で、患者への介入を必要とする手術などの医療行為への応用は、AI による自律的性という観点からはまだ単純で安全性に問題のない手術手技が動物実験で試されている段階であり、今後の発展が期待される。医療行為の施行者の巧拙が患者の生命の予後に直結する循環器領域の患者において、AI の関与がもたらす医療安全な事例にどのように対応するかは未解決の課題であり、多くの人々の理解に基づく議論の枠組みが必要である。

キーワード：人工知能 (AI)、循環器診療、医療行為、心臓外科、自動診断

人工知能 Artificial Intelligence (AI) の近年における爆発的な発展は医療の分野にも多大な影響を与えている<sup>1)</sup>。ChatGPT の出現を契機として AI の拡大のスピードが指数関数的に増大している。医学への応用という視点からは、臨床研究のデザイン、薬剤の開発や調達<sup>2)</sup>、遺伝情報や医事情報などの様々なビッグデータへのデータサイエンス的なアプローチなど新しい医学知見の発見や創造に貢献している<sup>3)</sup>。本稿では、「AI と医療」という極めて広範な領域にわたるテーマのなかで、患者の診察、検査、治療という基本的な診療行為に AI がどの程度に実用化されているかについて、筆者の専門である循環器と外科の分野に焦点を絞って近年の成果について紹介し、併せて多大な発展が予測される AI 診療における問題点についても言及したい<sup>4)</sup>。

一人の患者が来院してからその患者に施される行為は、要約すると情報の収集（問診、診察、検査）、分析（鑑別診断と実行すべき医療行為の優先順位の決定）、医療行為の実行（入院、投薬、処置、手術）というプロセスの繰り返しである。それぞれの診療プロセスで AI はどのように利用されているだろうか？

### 【診察】

#### 問診

病歴の聴取に関してコンピュータを用いることは10年以上前から試みられており<sup>5)</sup>、わが国でも医師の診察の前に患者がタブレット端末に示された質問項目に答えると AI が病歴の文章を作成し電子カルテにアップロードするというシステムが実用化されている<sup>6)</sup>。さらに現在では、医師と患者の間でかわされている会話を AI が聴取して病歴の文章を作るシステムがすでに試行されており、実用化を目前

にしている段階である<sup>3</sup>。近未来的には、患者が病院を受診する前に病歴やウェアブル端末からの情報を、AIが取得して医療施設を受診するに前に情報を送信するというようなシステムも実現可能であろう。救急医療の領域でこのようなシステムが実用化されれば、患者が来院する前に治療の準備をすることができるので、救命のために一刻を争う状況ではその貢献度は大きい。

### 診察

#### (i) 聴診

聴診器は医師の診察道具の象徴だが、録音された心音から弁膜症や先天性心臓病の診断をAIに行わせる研究が多数報告されている<sup>7-11)</sup>。比較的標準化しやすい成人の弁膜症の診断だけでなく、複雑な先天性の心臓病の診断にもAIのシステムが専門家に迫る診断能力を達成していることが報告されている<sup>9, 10)</sup>。市販されている電子聴診器にAI機能を内蔵させれば、リアルタイムに聴診から鑑別診断を行うシステムの実用化も期待される。

#### (ii) 視診

画像解析はAIの最も得意とする分野であり、皮膚科領域では皮膚病変を撮影した画像から皮膚がんをAI単独で<sup>12)</sup>、あるいは医師と共同して<sup>13)</sup>診断することに関して満足すべき結果が得られたと報告されている。循環器疾患を有する患者の視診は呼吸の観察（呼吸数、呼吸の深淺、起坐呼吸）、経静脈の怒張、顔面や四肢の浮腫の状況など多面的な観察が必要である。このような総合的な観察をAIが行い、それをもとに診断することは画像処理の技術やAIのテクノロジーを駆使すれば可能であると思われるが、今のところ筆者の知る限りでは開発されていないようである。そのようなシステムが必要とされる状況が具体的に提示されれば、それを契機に開発される可能性はあるだろう。

#### (iii) 触診

超音波診断装置が小型化し診察室でも簡便に用いられるようになり、触診から得られる情報の多くは超音波装置によって簡便に得られるようになった。そのためか触診そのものをAIで行うコンセプトで開発されたシステムは見当たらない。ただ腹部の診察に関しては集音器や複数のセンサーを装着して触診だけでなく聴診、打診をAIで再現しようとする意欲的な取り組みもなされている<sup>14)</sup>。また、注射を行ったり、持続静注のためのカテーテルを挿入するAIシステムも開発されている<sup>15, 16)</sup>。皮膚の上におかれた超音波のプロブから得られる画像に現れた静脈をAIが認識し、AIがヒトの皮膚を穿刺して、針先を静脈内に位置させるまでが自動化されていると報告されている。AIがヒトに対して痛みを伴う侵襲的な手技を行うユニークなシステムであり、注目に値する。触診という視点からみると、注射する、あるいは点滴をいれるときには指先で患者の静脈を探る触診を行うことが一般的だが、AIの点滴システムはその意味では触診を代行したシステムとも言えるだろう。

#### (iv) 打診

打診は胸水や腹水の有無、心臓肥大の有無を調べるために行われるが、前述したように超音波検査でも代替できるようになっているので、AIが関与する余地は今のところ少ない。また腱をハンマーで叩いて腱反射の検査を行うようなAIも、今のところ無いようだ。

## **【検査】**

### 画像検査

AIの応用に関しては、他の領域と同じく循環器領域においても画像検査に関する多くの研究がなされており、冠動脈の狭窄度の判定<sup>17)</sup>や経カテーテル大動脈弁植込み術（TAVR）の術前の評価<sup>18)</sup>においては、すでに臨床で実用化されたAIシステムが現れている。CTやMRIなどの画像診断に関しては、AIに関する膨大な研究成果があり、優れた総説が数多くタイムリーに出版されているのでそちらを参照されたい<sup>19-21)</sup>。

### 心電図

心臓の診察道具の象徴が聴診器であるとすれば、心臓の検査装置の象徴は心電計である。心電図の進歩ほどデジタル化の進歩を象徴するものも他にないだろう。1960年の論文には心電図のアナログ信号をデジタル化するための、アナログ信号をテープに記録する装置、それをデジタル信号に変換する装置、変換されたデジタル信号を記録する磁気テープ装置が必要で、それぞれの装置が大人の身長ほどの大きさであることを示す写真が紹介されている<sup>22)</sup>。ポータブルの心電図計に自動診断解析が標準的に装備されている現状と比べると隔世の感がある。心電図の自動分析は1980年代に実用化され始め、心電図のメーカーがそれぞれアルゴリズムを作成してその精度向上に努めてきた<sup>23)</sup>。AI 的なアプローチの心電図への応用には、腕時計などのウェアラブルデバイスから得られる心電図などのビッグデータを利用するプロジェクトが進められている<sup>24)</sup>。心電図が提供するビッグデータを用いて、手術前にとられた心電図から手術後の心房細動の発症を予測するシステムが AI を用いて開発されている<sup>25, 26)</sup>。今後も、心電図から得られる莫大なデータが AI を用いて解析されていくだろう<sup>27)</sup>。

#### 心エコー図検査

心エコー図検査は CT や MRI と違って、patient-sensor interface に検査者（医師や臨床検査技師）が介在するので検査者の巧拙が収集された画像の優劣を左右する。また、収集された画像から計測や診断を行う段階でもその検査者の技量が計測値や診断に大きな影響を及ぼす。筆者の知る限り patient-sensor interface の段階で、人を介さずに AI がロボットを制御して心エコー図の動画を収集するシステムは現れていない。心エコー図検査には以下のような四つのプロセスが重要であり<sup>28)</sup>、それぞれのプロセスに AI が用いられている。4つのプロセスとは①画質分類<sup>29)</sup>、②断面や区域の分類<sup>30)</sup>、③左室駆出率などの計測<sup>31)</sup>、④壁運動などの異常検知<sup>32)</sup>を指す。今まで検査者や評価者の技量の優劣により、困難であった心エコー図検査の標準化が進むことが期待されている。また AI による解析が困難であると思われる胎児の先天性心疾患<sup>33)</sup>や弁膜症の領域<sup>34)</sup>にも AI が応用されている。

### 【治療】

#### 投薬や手術などの治療法の提案

収集された情報から診断に基づいた治療方針をガイドラインに沿って決定するという、いわゆる Evident Based Medicine の一連のプロセスにも AI が応用されている。Chen らは心不全の患者に対し、診察や検査で得られる情報と心不全ガイドラインを AI が照合して日常生活の管理、必要な投薬や介入的治療（冠動脈形成術、バイパス術、人工心臓）などを提案するシステムを構築した<sup>35)</sup>。このようなシステムが発展すれば、心不全の専門家がいらない遠隔地でも必要な情報が収集できればという条件付きだが、適切な治療法の提案をすることが可能になるだろう。

#### 手術

ロボティクスの技術は外科手術に積極的に導入され<sup>36)</sup>、心臓外科の領域でもロボティクスを用いて多くの手術が執刀されている<sup>37)</sup>。しかしここで言うロボティクスとは遠隔手術の技術を可能とするロボット支援下の手術であり、AI による手術の自動化ではない。Yang らは外科手術の自動化のレベル分類（表1）を提唱している<sup>38)</sup>。この分類はシステムがどのくらい自律的に手術を行えるかによってそのレベルを定めている。自律化が最低のレベル1（AI は手術に全く関与しない）から、最高のレベル6（外科医がなんら介在せず自律的にロボットが手術を行う）まで段階分けされている。現在行われているロボティクス手術は、外科医のコンソールでの手の動きをロボットアームが患者の体内で忠実に再現することを究極の目的としているので、分類としてはレベル1でロボットの自律的な関与はゼロである。消化管の吻合に関しては、動物実験で小腸の吻合にレベル3の段階で成功した報告もあり<sup>39)</sup>、今後どのような方向で研究がすすめられるかが注目される。冠動脈バイパス術や弁膜症手術へ AI を応用した動物実験は、筆者の知る限りまだ行われていないようだ<sup>40)</sup>。経カテーテル大動脈弁植込術のように病変のある弁を切除するのではなく、バルーンで押しつぶすという心臓外科医では思いつかなかったような発想

の転換が、冠動脈バイパス術や弁形成術に AI を応用するためには今後必要になるかもしれない。

### 【今後の課題と方向性】

侵襲的に患者に直接介入することがない情報収集や自動診断の領域では、今後も AI は質的にも量的に益々発展することが予想される。近未来的には AI が下した判断に基づいた医療行為というものが出現するだろう。そのことによってもたらされる医療安全的な問題の発生も予見される。AI がこのような医療倫理的あるいは医療安全的な問題にかかわった時の判断の原則や概念はまだ確立されていない。AI の誤った診断により患者が不利益を被った場合、その責任の所在はどこにあるのか。AI のシステムを作成した開発者なのか、それともそのシステムを使うことを決めた医師なのか。以前のようにアルゴリズムを中心にしてシステムが構築されていればアルゴリズムのバグを除去する、あるいはそのアルゴリズムを作成した責任者の関与を問題にすればよかったが、自己学習する AI においてはその判断のプロセスはブラックボックスの中で誰もそれを吟味することができない。今まで想定していなかった問題に対して、万人の納得が得られるような判断の枠組が必要である。

また今後侵襲的なアプローチを伴う手術や血管内治療の領域にも AI の関与は進むことが予想される。その際に AI がレベル 6 までの進化を達成したときに外科医不在の状況で手術を行うことを私たちは許容するだろうか。おそらく誰もがそれを拒否すると予想されるが、仮に AI の手術の精度が外科医より優れていると誰もが認める段階まで進化したとしたら、その判断はどのようにするのか。今までも臓器移植、人工臓器、出生前診断、遺伝子診断など多くの医療技術の進歩が倫理的な問題の解決を迫ってきたが、AI の進歩は未だ遭遇したことのないような課題を私たちに突き付けてくるだろう。新しい技術を生産的に取り入れるためには AI の進化の本質を多くの人々が理解し、その理解の上に立った問題の解決の方向性を示すことが必要であろう。

### 【結語】

手術も含めた循環器領域、特に診察、検査、診断、治療の分野における AI の応用について略述した。AI の応用は非常な速さで進んでおり、循環器診療の臨床のあり方を大きく変えることが今後予想される。好むと好まざるにかかわらず、AI の導入は不可避となるであろう。急速な AI の発展にともなう医療倫理、あるいは医療安全体制の整備が今後の課題である。

表 AI の自律度による手術の分類

レベル 1	No autonomy	Operator performs all tasks including monitoring, generating performance options, selecting the operation to perform (decision making), and executing the decision made.
レベル 2	Robot assistance	Operator maintains continuous control of the system while the robot provides certain assistance.
レベル 3	Task autonomy	Operator maintains discrete control of the system, and the robot can perform certain operator-initiated tasks automatically.
レベル 4	Conditional autonomy	Operator selects and approves a surgical plan, and the robot performs the procedure automatically but with close surgical oversight by human.
レベル 5	High autonomy	Robot is able to make decisions but under the supervision of a qualified operator.
レベル 6	Full autonomy	No human needs to be in the loop, and the robot can perform an entire surgery.

## 【参考文献】

- 1) Beam CH, Semmelweis I, Carter KC. Artificial Intelligence in Medicine, *J Public Health Policy*, **8**, 582, 1987. doi:10.2307/3342284
- 2) Awad A, Trenfield SJ, Pollard TD, *et al.* Connected healthcare: Improving patient care using digital health technologies. *Advanced drug delivery reviews*, **178**, 113958, 2021. doi:10.1016/j.addr.2021.113958
- 3) Haug CJ, Drazen JM. Artificial Intelligence and Machine Learning in Clinical Medicine, *N Engl J Med.*, **388** (13), 1201-1208, 2023. doi:10.1056/NEJMr2302038
- 4) Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, Topol EJ. AI in health and medicine, *Nat Med.* **28** (1), 31-38, 2022. doi:10.1038/s41591-021-01614-0
- 5) Nair V, Kaduskar M, Bhaskaran P, Bhaumik S, Lee H. Preserving Narratives in Electronic Health Records. In: *2011 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*, 418-421, 2011. doi:10.1109/BIBM.2011.101
- 6) Innovation BH 健康・医療 D. AI 自動問診, そのコア技術で病院内外の課題に挑む. Beyond Health | ビヨンドヘルス 健康・医療 Disruptive Innovation. Published November 17, 2020. Accessed December 13, 2023. <https://project.nikkeibp.co.jp/behealth/atcl/feature/00005/111200014/>
- 7) Cathers I. Neural network assisted cardiac auscultation, *Artif Intell Med.*, **7** (1), 53-66, 1995.
- 8) Alkhodari M, Fraiwan L. Convolutional and recurrent neural networks for the detection of valvular heart diseases in phonocardiogram recordings, *Comput Methods Programs Biomed.*, **200**, 105940, 2021. doi:10.1016/j.cmpb.2021.105940
- 9) Lv J, Dong B, Lei H, *et al.* Artificial intelligence-assisted auscultation in detecting congenital heart disease. *Eur Heart J Digit Health*, **2** (1), 119-124, 2021. doi:10.1093/ehjdh/ztaa017
- 10) Ou Y. Can artificial intelligence-assisted auscultation become the Heimdallr for diagnosing congenital heart disease?, *Eur Heart J Digit Health*, **2** (1), 117-118, 2021.
- 11) Thompson WR, Reinisch AJ, Unterberger MJ, Schriebl AJ. Artificial Intelligence-Assisted Auscultation of Heart Murmurs: Validation by Virtual Clinical Trial, *Pediatr Cardiol.*, **40** (3), 623-629, 2019. doi:10.1007/s00246-018-2036-z
- 12) Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, *et al.* Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks, *Nature*, **542** (7639), 115-118, 2017. doi:10.1038/nature21056
- 13) Tschandl P, Rinner C, Apalla Z, *et al.* Human-computer collaboration for skin cancer recognition, *Nat Med.*, **26** (8), 1229-1234, 2020. doi:10.1038/s41591-020-0942-0
- 14) Ryu S, Kim SC, Won DO, Bang CS, Koh JH, Jeong IC. iApp: An Autonomous Inspection, Auscultation, Percussion, and Palpation Platform, *Front Physiol.*, **13**, 825612, 2022. doi:10.3389/fphys.2022.825612
- 15) Leipheimer JM, Balter ML, Chen AI, *et al.* First-in-human evaluation of a hand-held automated venipuncture device for rapid venous blood draws, *Technology*, **7** (3-4), 98-107, 2019. doi:10.1142/S2339547819500067
- 16) Leipheimer J, Balter M, Chen A, Yarmush M. Design and Evaluation of a Handheld Robotic Device for Peripheral Catheterization, *J Med Devices*, **16** (2), 021015, 2022. doi:10.1115/1.4053688
- 17) Moon JH, Lee DY, Cha WC, *et al.* Automatic stenosis recognition from coronary angiography using convolutional neural networks, *Comput Methods Programs Biomed.*, **198**, 105819, 2021. doi:10.1016/j.cmpb.2020.105819
- 18) Blanke P, Weir-McCall JR, Achenbach S, *et al.* Computed Tomography Imaging in the Context of Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI) /Transcatheter Aortic Valve Replacement (TAVR), *JACC Cardiovasc Imaging*, **12** (1), 1-24, 2019. doi:10.1016/j.jcmg.2018.12.003
- 19) Daye D, Wiggins WF, Lungren MP, *et al.* Implementation of Clinical Artificial Intelligence in Radiology: Who Decides and How?, *Radiology*, **305** (3), 555-563, 2022. doi:10.1148/radiol.212151
- 20) Dey D, Slomka PJ, Leeson P, *et al.* Artificial Intelligence in Cardiovascular Imaging, *J Am Coll Cardiol.*, **73** (11), 1317-1335, 2019. doi:10.1016/j.jacc.2018.12.054
- 21) Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, Schwartz LH, Aerts HJWL. Artificial intelligence in radiology, *Nat Rev Cancer*, **18** (8), 500-510, 2018. doi:10.1038/s41568-018-0016-5
- 22) Pipberger HV, Freis ED, Taback L, Mason HL. Preparation of Electrocardiographic Data for Analysis by Digital Electronic Computer, *Circulation*, **21** (3), 413-418, 1960. doi:10.1161/01.CIR.21.3.413
- 23) 岡島光治. 総説 心電図自動診断の論理とプログラム, *心臓*, **10** (8), 773-782, 1978. doi:10.11281/shinzo1969.10.8\_773
- 24) Friend SH, Ginsburg GS, Picard RW. Wearable Digital Health Technology, *N Engl J Med.*, **389** (22), 2100-2101, 2023. doi:10.1056/NEJMe2303219

- 25) 人工知能 AI が拓く循環器医療の未来 | 九大コレクション | 九州大学附属図書館 . Accessed January 2, 2024. <https://hdl.handle.net/2324/7153256>
- 26) Tohyama T, Ide T, Ikeda M, *et al.* Deep Learning of ECG for the Prediction of Postoperative Atrial Fibrillation, *Circ Arrhythm Electrophysiol*, **16** (2), e011579, 2023. doi:10.1161/CIRCEP.122.011579
- 27) Attia ZI, Harmon DM, Behr ER, Friedman PA. Application of artificial intelligence to the electrocardiogram, *Eur Heart J.*, **42** (46), 4717-4730, 2021. doi:10.1093/eurheartj/ehab649
- 28) 楠瀬賢也 . 心エコー図検査における AI 自動診断研究の今, 循環器専門医, **29**, 8-14, 2020. doi:10.1253/jjesc.29.0\_8
- 29) Abdi AH, Luong C, Tsang T, *et al.* Automatic Quality Assessment of Echocardiograms Using Convolutional Neural Networks: Feasibility on the Apical Four-Chamber View, *IEEE Trans Med Imaging*, **36** (6), 1221-1230, 2017. doi:10.1109/TMI.2017.2690836
- 30) Fast and accurate view classification of echocardiograms using deep learning | npj Digital Medicine. Accessed January 2, 2024. <https://www.nature.com/articles/s41746-017-0013-1>
- 31) Ouyang D, He B, Ghorbani A, *et al.* Video-based AI for beat-to-beat assessment of cardiac function, *Nature*, **580** (7802), 252-256, 2020. doi:10.1038/s41586-020-2145-8
- 32) Kusunose K, Abe T, Haga A, *et al.* A Deep Learning Approach for Assessment of Regional Wall Motion Abnormality From Echocardiographic Images, *JACC Cardiovasc Imaging*, **13** (2 Pt 1), 374-381, 2020. doi:10.1016/j.jcmg.2019.02.024
- 33) Day TG, Kainz B, Hajnal J, Razavi R, Simpson JM. Artificial intelligence, fetal echocardiography, and congenital heart disease, *Prenat Diagn.*, **41** (6), 733-742, 2021. doi:10.1002/pd.5892
- 34) Nedadur R, Wang B, Tsang W. Artificial intelligence for the echocardiographic assessment of valvular heart disease, *Heart*, **108** (20), 1592-1599, 2022. doi:10.1136/heartjnl-2021-319725
- 35) Chen Z, Salazar E, Marple K, *et al.* An AI-Based Heart Failure Treatment Adviser System, *IEEE J Transl Eng Health Med.*, **6**, 2800810, 2018. doi:10.1109/JTEHM.2018.2883069
- 36) Davies B. A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng H.*, **214** (1), 129-140, 2000. doi:10.1243/0954411001535309
- 37) Harky A, Chaplin G, Chan JSK, *et al.* The Future of Open Heart Surgery in the Era of Robotic and Minimal Surgical Interventions, *Heart Lung Circ.*, **29** (1), 49-61, 2020. doi:10.1016/j.hlc.2019.05.170
- 38) Yang GZ, Cambias J, Cleary K, *et al.* Medical robotics-regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy, *Sci Robot*, **2** (4), eaam8638, 2017. doi:10.1126/scirobotics.aam8638
- 39) Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, *et al.* Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis, *Sci Robot*, **7** (62), eabj2908, 2022. doi:10.1126/scirobotics.abj2908
- 40) Sardar P, Abbott JD, Kundu A, Aronow HD, Granada JF, Giri J. Impact of Artificial Intelligence on Interventional Cardiology, *JACC Cardiovasc Interv.*, **12** (14), 1293-1303, 2019. doi:10.1016/j.jcin.2019.04.048