

光工学技術と人工知能技術がもたらす color-coded surgeryの未来

> た しろ よし ひこ あお き たけ 1. Σ ばやし なお Ш 代 自 彦:青 木 武 士:小 林 直 Yoshihiko TASHIRO Takeshi AOKI Nao KOBAYASHI

くキーワードン

人工知能、AI、術中ナビゲーション、color-coded surgery、ICG 蛍光法

はじめに

近年、解剖構造を可視化することができる光工学 技術が術中 real-time navigation 法として多領域の 手術支援に活用されている。そして現在は、人工知 能技術を利用した術中解剖構造の認識・色分け技術 (color-coding)の開発・導入が進んでおり、colorcoded surgery が新たな real-time navigation として 実現されつつある。本稿では、消化器外科分野にお ける光工学技術と現在発展目覚ましい人工知能技術 を用いた手術の可能性について概説する。

現在、消化器外科手術では腹腔鏡手術に高画質に よる視覚支援、ロボット手術によって精緻な手術が 可能となる技術革新が起きている。しかしながら、 National Clinical Database (NCD)から報告された Annual Report における主要 8 術式の合併症率は、 むしろ増加傾向にある¹⁰。低侵襲化によって、高齢 者化やそれに伴う併存疾患をもつ患者、肥満患者、 高度進行癌に対する薬物療法後の患者などの高リス ク症例に対して手術を行う機会が以前より増えたこ とも一因と考えられるが、技術革新による手術の高 度化もその要因であると考えられる。内視鏡手術や ロボット手術には高度な技術が求められ、習得にも 時間がかかるのが現実である。すべての外科医がエ キスパートであれば合併症を減らせるであろうが、 その域に達するまでは決して容易ではない。 Suliburkらの研究によれば、手術合併症の発生原 因の多くは術中の解剖誤認とされる²⁰。解剖誤認を 少なくし、手術合併症を減らすために、術前シミュ レーション技術や術中ナビゲーション技術が発展 し、現在では安全で精緻な手術を行うための必須な ツールとして汎用されている。しかしながら、術前 シミュレーションに基づいた術前画像診断および解 剖把握、術中ナビゲーションによる術中解剖認識の 最終判断は、いずれも外科医の知識や経験によって 左右される、いわゆる暗黙知の領域であり、常に正 しい判断、認識ができているとは限らない。

近年は、深層学習の登場により、さまざまな分野 でAI開発とその社会実装が進められている。医療 分野も例外ではなく、病理診断や放射線画像診断を はじめとして、人工知能が搭載された医療機器が実 臨床で使用され始めており、現在の医療分野が抱え る問題の解決になることが期待されている。今回、 AI技術を消化器外科領域に応用することによって もたらされる color-coded surgery (色分け手術) の可能性について紹介する。

I. 肝内脈管構造AI認識モデル開発

肝臓外科手術においても腹腔鏡下・ロボット支援 下手術が普及してきており、従来の開腹手術と比較 して安全性や長期予後に遜色ない報告が散見される が、日本内視鏡外科学会の第16回集計結果報告で は、肝臓内視鏡手術においても術中出血は依然とし て頻度の高い術中偶発症の1つであり、術後合併症 に関しては胆汁瘻が最も多いとされる³⁰。

これらの術中偶発症および術後合併症は、いずれ

昭和大学医学部 外科学講座 消化器・一般外科学部門 〒142-8555 東京都品川区旗の台1-5-8 Division of Gastrointestinal and General Surgery, Department of Surgery, Showa University School of Medicine (1-5-8, Hatanodai, Shinagawa-ku, Tokyo, 142-8555, Japan)

255

も肝内脈管構造に関わることから、われわれは、肝 離断中に出現する脈管構造である肝静脈とグリソン 鞘を正確にリアルタイム認識するAIモデルを Anaut社(https://anaut-surg.com/)と共同で開発 を行っている⁴⁵⁾。

モデル作成には、当教室で施行された腹腔鏡下肝 切除術の手術動画から脈管構造が明瞭に描出された 静止画を抽出し、外科医の手で各脈管構造のアノ テーション^{*1}を400枚以上行い、教師データを作 成した。教師データの深層学習後、肝内脈管構造認 識 AI モデルを構築し、新たな手術動画を試験デー タとして用いて解析した。

図1に、肝離断面の脈管構造 AI 認識画像を示す。 AI は、さまざまなサイズの肝静脈およびグリソン 鞘を遅延 1/150 秒、解析スピード 30 フレーム / 秒 以上のリアルタイム性を持って明瞭に強調表示され た。AI モデルは、グリソン鞘と肝静脈をマルチカラー で同時に色分け可能であり、通常では認識が難しい 出血のあるウェットな術野でも AI が着色表示するこ とで、各脈管構造の視認は容易になった(図1)。 精度評価に関しては、IoU^{*2}、Dice 係数^{*3}を用い、 定性評価は5段階評価で行なった。結果作成したア ルゴリズムにおいて、肝静脈・グリソン鞘の精度評 価は、IoU=0.42、Dice=0.53と比較的高い認識精度 が得られた。AI が各脈管構造を正確に認識してい るかを複数の外科医が精度評価(1~5点評価の感 度を問うアンケート)した結果、平均値は 4.10 (range 3.61-4.76) と高い評価を得ることができた⁵。

I. AI解剖構造認識による教育効果について

本 AI モデルの解剖認識、強調表示の教育的意義 について評価を行なった。手術解剖の予備知識がな い研修医を対象とし、肝内脈管視認に AI がどれほ



図 1. 肝切除時の AI による脈管認識、剥離層認識

a: 肝静脈原画像 b: 肝静脈 AI 認識画像。青で表示。 c: グリソン鞘原画像 d: グリソン鞘 AI 認識画像。緑で表示。

(図1は巻末にカラーで掲載しています)

^{*1} テキストや音声、画像、動画などあらゆる形態のデータの1つ1つに、タグやメタデータと呼ばれる情報を付けていく工程。

^{*2 2}つの領域の重なりの程度を表す指標。物体検出やセグメンテーションのタスクで正解領域と予測領域がどれくらい重なっているか表す精度 指標として利用されている。完全に一致すると1.0、全く重ならないと0.0となる。

^{*3} データ解析や情報検索の分野では、複数の集合や文書の類似度を評価する必要があり、そのために用いられる指標の1つ。0から1の範囲で値 を取り、0に近いほど2つの集合は類似していないことを示し、1に近いほど2つの集合は類似していることを示す。

ど有用であったかを定性評価した。10人の研修医 により10個のAI解析動画を0点から2点で評価し た結果、平均1.8という良好な結果が得られた。また、 医学生70人を対象とし、外科解剖の教育としてAI が肝内脈管の理解に与える影響を検討した。AI解 析動画を用いた群と用いない群の2群に分け教育し た後、肝内脈管認識の試験(正解1点/不正解0点) を行うと、0.71vs.0.57(p=0.027)と有意にAI使用 群で正答率が高く、AIの有用性が示唆された。

本 AI モデルは、医学生や手術解剖に馴染みがな い外科修練医に対しては認識力の習熟を高める教育 ツールとしても活用が期待できると考えられる。

Ⅲ. 胆膵疾患に対する内視鏡外科における 手術支援AI解剖認識

胆膵領域の手術は、複雑な局所解剖と多彩な解剖 学的変異により精緻な技術を要求されるため、高難 度手術として認知され、医工学技術の進歩により、 さまざまな医療機器開発が行われ、シミュレーショ ンおよびナビゲーション技術が大きく発展してきた。

しかしながら、胆膵手術に代表される膵頭十二指 腸切除術の合併症発生率(Clavien-Dindo 分類 Grade Ⅲ以上)は約 25%と増加傾向で、他臓器の消化器外 科手術の合併症率を上回っているのが現状である¹⁾。

当教室では、これまで胆膵内視鏡手術の合併症軽 減を目的として、術前シミュレーション技術に関し ては、仮想腹腔鏡技術開発⁶⁰や脾動脈走行解析⁷⁷、 膵硬度分析⁸⁰、術中ナビゲーションに関しては、術 前画像診断に基づく解剖情報を術中にリアルタイム に表示することを可能にする Virtual Real-time CT Guided Volume Navigation 技術を開発してきた⁹。 これらの技術に AI が加わることで、さらに安全な 胆膵手術の施行が可能になることが考えられる。

ここでは、腹腔鏡下膵体尾部切除術における AI 認識画像を示す(図2)。AI による膵臓認識と、そ の周囲の疎性結合織を同時に着色強調表示が可能で あり、膵臓を正確に認識しながら手術を行うことが 可能になる。

N. 消化管手術領域におけるAI活用の可能性

消化器外科領域において、安全な手術を行ううえ で的確に認識しなければならない解剖学的ランド マークが術野には多数存在する。血管、神経、脂肪、 疎性結合組織などの手術領域に広く分布する非特異 臓器、胃外科手術であれば胃や膵臓、大腸外科手術 であれば大腸や尿管などの特異臓器が挙げられる。 消化器癌手術の多くは、切除臓器と温存臓器の間に 介在する疎性結合組織が剝離可能層を構成してお り、同部を的確に剝離することで出血や臓器損傷を 回避しながら、手術の根治性を追求することができ るため、特に重要な解剖構造であると考えられてい る。実際に、剝離可能層を正確に剥離、切離する手 技が手術成績の向上に寄与すると報告する研究は少 なくない^{10.11}。

先出した Surgical AI Eureka は、疎性結合組織を 自動認識し、術中リアルタイムに安全な剝離領域を 術者により認識しやすくしながら提示することが行 える。 本 AI を開発した熊頭らは、外科医の目視に



図 2. 膵切除時の AI による膵臓認識、剥離層認識a:原画像 b:AI 認識画像。膵臓は黄、剥離層は青で表示。

(図2は巻末にカラーで掲載しています)

よる精度評価を併施した結果、0~4 点評価(0点 (Fail, 0~19%)~4 点(Excellent, 80~100%)) でAIが正確に結合組織を認識しているか感度を問 うアンケートに対して、平均感度 3.52 点と高い評 価を得て、9 割の外科医が 60~100%の感度と評 価し、偽陽性は少なかったと報告している¹²⁾。

V. 光工学技術と人工知能技術を統合した 新規術中ナビゲーションの可能性

1. ICG 蛍光法

インドシアニングリーン(以下、ICG)は、血漿 蛋白と結合すると波長 760nm の近赤外線光照射に より励起し、830nm の蛍光発光されることで明確 に可視化される。主に、肝機能評価時に使用されて きたが、近年は ICG の光学特性を利用して術中ナ ビゲーション技術として応用され、多領域の手術で 活用されている。当教室では、肝胆膵領域において は 2008 年に ICG 蛍光法を用いた肝区域同定の有用 性を報告して以降¹³⁾、肝腫瘍同定¹⁴⁾、肝切離面評価 ^{15,16)}、胆道造影^{17,18)}に、消化管領域ではセンチネル リンパ節同定^{19,20)}、腫瘍の術中局在診断²¹⁾に積極的 に活用してきた。現在、ICG 蛍光法は開腹手術、腹 腔鏡手術に止まらず、ロボット支援下手術でも利用 されている。

ICG 蛍光法と AI の融合による色分け手術 (color-coded surgery) への試み

現在、さまざまな蛍光プローブを用いて各解剖構 造や癌組織を特異的に色分けする技術開発が進めら れているが²²⁾、臨床応用され汎用されるには至っ ていないのが現状である。

ICGを利用した蛍光イメージング技術が手術で利 用されて以降、外科領域は大きなパラダイムシフト を迎え、術中ナビゲーション技術として消化器外科、 乳腺、血管外科、形成外科などの多領域の手術支援 に用いられている。しかしながら、術野における局 所解剖の認識とその判断・決定は術者の経験や知識 に委ねられている。術者の経験や知識に基づいた解 剖認識は暗黙知とされ、暗黙知を補う方法の一つと して、解剖学書や手術立案計画で使用される画像解 析ソフトのように、各解剖構造が術野内でリアルタ イムに色分けされることで複雑な解剖構造の理解が 容易になり、合併症軽減に貢献するのではないかと 思われる。

当教室では、ICG 蛍光法と AI による解剖認識能 を融合することで、各解剖構造を色分けする新規ナ ビゲーション手術である color-coded surgery を試 みている⁴⁾。

ICG 蛍光法と AI の融合による 肝胆膵内視鏡外科手術

肝悪性腫瘍に対して、正確な系統的肝切除を行う ためには肝区域同定が必要であり、明瞭に肝区域を 描出するためにはICG 蛍光法が有用である¹³⁾。区 域に沿った正確な肝離断は、ICG 蛍光領域と非蛍光 領域の境界を離断することになり、この離断面に出 現するグリソン鞘や肝静脈を AI が正確に認識、強 調表示し、ICG 蛍光観察下においても同様に視認可 能であり(図3)、ICG 蛍光法と AI の融合は、より 安全性と根治性が担保された肝切除が施行可能であ



図 3. 肝離断中の AI による脈管認識
a: 肝静脈原画像(矢印)。 b: ICG 蛍光観察下における肝静脈 AI 認識画像(矢印)。
(図 3 は巻末にカラーで掲載しています)

ると考えられる。

腹腔鏡下胆嚢摘出術は、現在最も普及している術 式であり、安全に施行するために、Strasberg らに よる critical view of safety が提唱され²³⁾、本邦では 2018 年に急性胆管炎・胆嚢炎診療ガイドライン 2018 (TG18) が作成された²⁴⁾。また、ICG 蛍光法 による胆道造影が術中ナビゲーションとして汎用さ れ、術中合併症回避のために利用されているが、胆 管損傷の合併症率は依然として 0.5%前後の割合で 推移し、ゼロには至っていない³⁾。ICG 静注法を用 いて ICG 胆道造影を行った症例を提示する (図 4)。 胆道と背景である肝臓は ICG により蛍光されている が、AI は ICG 蛍光下においても剥離可能層である 疎性結合織を認識、強調表示することが可能である。 ICG 蛍光観察下で AI が剥離可能層を認識強調表示 することによって、肝損傷や胆道損傷を予防する安 全性の高い手術が可能になることが考えられる²⁵⁾。

ICG 蛍光法と AI の融合による 消化管内視鏡外科手術

先述した通り、消化管領域における ICG 蛍光法 の利用法としてリンパ節同定^{19,20)}、腫瘍の術中局在 診断²¹⁾に対して汎用されている。消化器外科領域 において、根治性の高い手術を行うためには、腫瘍 のステージに応じてリンパ節郭清を確実に行うこと が重要である。当教室では、腫瘍の局在診断を行う ため、腫瘍に3日以内に 0.25%の ICG を 0.5ml 粘膜 下層に局注し、それを利用してリンパ節を同定して いる。今回、ICG 蛍光法によるリンパ節同定と AI による剥離層認識を同時に行い、リンパ節郭清を施 行した手術画像を供覧する(図 5)。ICG 蛍光法に



図 4. ICG 胆道造影と AI による color-coded surgery a:腹腔鏡下胆嚢摘出術原画像。 b:AI 認識画像。剥離層は青で表示。 c:ICG 胆道造影。 d:ICG 胆道造影と AI 認識画像。剥離層は青で表示。

(図4は巻末にカラーで掲載しています)



図 5. ICG リンパ節同定と AI による color-coded surgery a:腹腔鏡下結腸右半切除術 AI 認識画像。剥離層は青で表示。 b:ICG リンパ節同定。リンパ節(矢印)が ICG によって同定される。

よってリンパ節が明瞭に同定可能となり、さらに AI が剥離可能層を認識、強調表示することで安全 性と根治性の高い手術の提供が可能となることが考 えられる。

おわりに

現在、消化器外科領域、泌尿器科、婦人科領域、 眼科領域など、さまざまな分野で術中解剖構造認識 に関する AI 技術開発が国内外で盛んに行われてい る^{12, 26, 27)}。これまで、外科医は視覚と触覚を駆使 して手術を行なってきたが、触覚が欠如した内視鏡 手術やロボット支援下手術においては視覚情報がよ り重要であると考えられる。現在、汎用されている 視覚支援技術である ICG 蛍光法に、近い将来暗黙 知である外科医の知識や経験を可視化する AI 術中 解剖認識が加わることで、より安全性が高い手術の 施行が可能となり、増加傾向である合併症軽減に寄 与することが望まれる。

文 献

- Marubashi S, Takahashi A, Kakeji Y, et al. Surgical outcomes in gastroenterological surgery in Japan : report of the National Clinical Database 2011-2019. Ann Gastroenterol Surg. 2021;5(5) : 639-658.
- 2) Suliburk JW, Buck QM, Pirko CJ, et al. Analysis of human performance deficiencies associated with surgical adverse events. JAMA Netw. Open. 2019;2(7):e198067. doi:10.1001/

jamanetworkopen.2019.8067.

3)日本内視鏡外科学会.内視鏡外科手術に関するアンケート 調査:第16回集計結果報告.日鏡外 会誌.2021;p8-14.

(図5は巻末にカラーで掲載しています)

- 4) Tashiro Y, Aoki T, Kobayashi N, et al.Color-coded laparoscopic liver resection using artificial intelligence: A preliminary study. J Hepatobiliary Pancreat Sci. 2024;31(2):67-68. doi: 10.1002/jhbp.1388. Epub 2023 Oct 25.
- 5) Tomioka K, Aoki T, Kobayashi N, et al. Development of a Novel Artificial Intelligence System for Laparoscopic Hepatectomy. Anticancer Res. 2023;43(11):5235-5243.doi: 10.21873/anticanres.16725.
- 6) Aoki T, Koizumi T, Mansour DA, et al. Virtual reality with three-dimensional image guidance of individual patients' vessel anatomy in laparoscopic distal pancreatectomy. Langenbeck' s Arch Surg.2020;405(3):381–389.
- 7) T. Aoki, T. Koizumi, Mansour DA, et al. Virtual reality with three-dimensional image guidance of individual patients' vessel anatomy in laparoscopic distal pancreatectomy. Langenbeck's Archives of Surgery.2020;405(3):381-389.
- 8) Wada Y, Aoki T, Fujimori A, et al. Intraoperative Shear Wave Elastography as a Quantitative Predictor of Pancreatic Fibrosis and Exocrine Function. Anticancer Res. 2021;41(2):1013–1019.
- 9) Aoki T, Mansour DA, Koizumi T, et al. Laparoscopic Liver Surgery Guided by Virtual Real-time CT-Guided Volume Navigation. J Gastrointest Surg. 2021;25(7):1779–1786.
- 10) Shinohara H, Haruta S, Ohkura Y, et al. Tracing dissectable layers of mesenteries overcomes embryologic restrictions when performing infrapyloric lymphadenectomy in laparoscopic gastric cancer surgery. J Am Coll Surg. 2015;220(6):e81- e87.
- 11) Di Buono G, Buscemi S, Cocorullo G, et al. Feasibility and safety of laparoscopic complete mesocolic excision (CME) for right-sided colon cancer: Short-term outcomes. a randomized clinical study. Ann Surg.2021;274(1):57-62.

- 12) Kumazu Y, Kobayashi N, Kitamura N et al. Automated segmentation by deep learning of loose connective tissue fibers to define safe dissection planes in robot-assisted gastrectomy. Sci Rep. 2021;11(1):21198.
- 13) Aoki T, Yasuda D, Shimizu Y et al. Image-guided liver mapping using fluorescence navigation system with indocyanine green for anatomical hepatic resection. World J Surg.2008; 32(8): 1763-1767.
- 14) Ishizawa T, Fukushima N, Shibahara J et al. Real-time identification of liver cancers by using indocyanine green fluorescent imaging. Cancer.2009; 115(11): 2491-2504.
- 15) Aoki T, Murakami M, Koizumi T, et al. Determination of the surgical margin in laparoscopic liver resections using infrared indocyanine green fluorescence. Langenbecks Arch Surg. 2018;403 (5):671-680.
- 16) Tashiro Y, Aoki T, Hirai T, et al. Pathological validity of using near-infrared fluorescence imaging for securing surgical margins during liver resection. Anticancer Res. 2020; 40(7): 3873-3882.
- 17) Ishizawa T, Tamura S, Masuda K, et al. Intraoperative fluorescent cholangiography using indocyanine green: a biliary road map for safe surgery. J Am Coll Surg.2009;208 (1):e1-4.
- 18) Aoki T, Murakami M, Yasuda D, et al. Intraoperative fluorescent imaging using indocyanine green for liver mapping and cholangiography. J Hepatobiliary Pancreat Sci. 2010;17(5):590–594.
- 19) Kusano M, Tajima Y, Yamazaki K, et al. Sentinel Node Mapping Guided by Indocyanine Green Fluorescence Imaging: A New Method for Sentinel Node Navigation Surgery in Gastrointestinal Cancer. Dig Surg.2008;25(2):103-108.

- 20) Tajima Y, Yamazaki K, Masuda Y, et al. Sentinel node mapping guided by indocyanine green fluorescence imaging in gastric cancer. 2009;249(1):58-62.doi:10.1097.
- 21) Watanabe M, Tsunoda A, Narita K, et al. Colonic tattooing using fluorescence imaging with light-emitting diode-activated indocyanine green: a feasibility study. Surg Today. 2009;39(3):214-218. Doi:10.1007.
- 22) Nishino H, Hollandsworth HM, Amirfakhri S, et al. A Novel Color-Coded Liver Metastasis Mouse Model to Distinguish Tumor and Adjacent Liver Segment. J Surg Res. 2021 Aug; 264:327-333.
- 23) Strasberg SM, Hertl M, Soper NJ. An analysis of the problem of biliary injury during laparoscopic cholecystectomy. J Am Coll Surg. 1995;180(1):101–125.
- 24)日本肝胆膵外科学会 急性胆管炎・胆嚢炎診療ガイドライン改訂出版委員会.急性胆管炎・胆嚢炎診療ガイドライン2018 第3版.医学図書出版.2018.
- 25) Tashiro Y, Aoki T, Kobayashi N, et al. Novel navigation for laparoscopic cholecystectomy fusing artificial intelligence and indocyanine green fluorescent imaging. Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences Early View. 2024.
- 26) Madani A, Namazi B, Altieri MS, et al. Artificial Intelligence for Intraoperative Guidance: Using Semantic Segmentation to Identify Surgical Anatomy During Laparoscopic Cholecystectomy. Ann Surg.2022;276(2):363-369.
- 27) Madad Zadeh S, Francois T, Calvet L, et al. SurgAI: deep learning for computerized laparoscopic image understanding in gynaecology. Surg Endosc. 2020;34(12):5377-5383.

わだい 第5回 医学教育における ICT の活用に関して 光工学技術と人工知能技術がもたらす color-coded surgery の未来 田代良彦:青木武士:小林 直



図 1. 肝切除時の AI による脈管認識、剥離層認識a: 肝静脈原画像b: 肝静脈 AI 認識画像。青で表示。

c:グリソン鞘原画像 d:グリソン鞘 AI 認識画像。緑で表示。



図 2. 膵切除時の AI による膵臓認識、剥離層認識a:原画像 b: AI 認識画像。膵臓は黄、剥離層は青で表示。



図 3. 肝離断中の AI による脈管認識 a:肝静脈原画像(矢印)。 b:ICG 蛍光観察下における肝静脈 AI 認識画像(矢印)。



図 4. ICG 胆道造影と AI による color-coded surgery a:腹腔鏡下胆嚢摘出術原画像。 b: AI 認識画像。剥離層は青で表示。 c: ICG 胆道造影。 d: ICG 胆道造影と AI 認識画像。剥離層は青で表示。



図 5. ICG リンパ節同定と AI による color-coded surgery a:腹腔鏡下結腸右半切除術 AI 認識画像。剥離層は青で表示。 b:ICG リンパ節同定。リンパ節(矢印)が ICG によって同定される。