

# AIと医療：糖尿病網膜症を題材にその課題と可能性を考える



医療と技術

川崎 良\*

AI and Medicine: Challenges and potentials on diabetic retinopathy management

Key Words : Artificial intelligence, AI, 糖尿病網膜症,  
スクリーニング, 画像診断

## 1. はじめに

2016年以降、深層学習を用いた医用画像の自動診断システムへの応用研究の報告が相次ぎ、現在では複数の検診サービスとして商用化が進んでいる。その代表的な対象疾患に糖尿病の眼合併症である糖尿病網膜症がある。本稿では糖尿病網膜症を題材として、人工知能AIがどのようにその予防、診断、治療、管理、また、リハビリテーション・ノーマライゼーションに活用されることが期待されているかを概観したい。

## 2. 世界的な医療課題としての糖尿病網膜症

糖尿病網膜症は糖尿病の細小血管合併症として頻度が高い。2019年のInternational Diabetes Federationの報告では患者数が4億6300万人、2045年には7億人に達すると推計されている。(文献1) 糖尿病を有する患者における糖尿病網膜症の発症率は減っているとする報告がある一方、糖尿病患者が増えている状況を反映し、糖尿病網膜症の患者数もまだ増加していると推定されており、2020年の時点での世界における糖尿病網膜症の患者数は1億312万人、視力を脅かす可能性のある重症度に至っている糖尿病網膜症(重症非増殖糖尿病網膜症/増殖糖尿病網膜症/黄斑浮腫を合わせたもの)は2854万人であり、

2045年までにはそれぞれ1億6050万人、4482万人まで増加すると推計されている。また、低中所得国においては糖尿病及び糖尿病網膜症が増加傾向にあり、糖尿病網膜症の疾病負担が大きい。

## 3. 糖尿病網膜症の予防・診断・管理の進歩

糖尿病網膜症の発症や重症化を予防するためには、高血糖の管理が重要である。持続する高血糖状態は糖尿病網膜症の発症・進展の危険を高めることから、高血糖を是正することでそのリスクを低減できることが臨床試験によって示されている。また、重症低血糖はかえって糖尿病網膜症の発症リスクを高めるため、低血糖を避けながら至適血糖を維持することの重要性も認識されている。高血糖以外には、高血圧に対する厳格管理が糖尿病網膜症の発症リスクを軽減させること、脂質異常症に対する治療による糖尿病網膜症リスク軽減も報告されている。Japan Diabetes Optimal Integrated Treatment study for 3 major risk factors of cardiovascular diseases (J-DOIT3) 研究(文献2)は単独の危険因子に介入するだけでなく、高血糖、高血圧、脂質異常症、そして、食事療法による体重減少や禁煙指導、運動療法などの組み合わせに同時に介入することの効果の評価し、糖尿病網膜症発症リスクが14%減少したことを報告している。

眼科における重症化予防、また、失明予防のための治療においても過去30年の間に大きな進歩があった。増殖糖尿病網膜症や重症非増殖糖尿病網膜症の時期には汎網膜光凝固治療でその後の視力障害のリスクを軽減させることができるようになった。増殖糖尿病網膜症が進行した場合でも硝子体手術によって視力が維持・回復される可能性は高くなった。また、黄斑浮腫は失明には至らないものの視力を低下させる原因となるが、これに対しては抗血管内皮



\* Ryo KAWASAKI

1972年12月生まれ  
ジョンスホプキンス大学ブルームバーグ  
公衆衛生大学院 公衆衛生学修士  
(2007年)  
現在、大阪大学 大学院医学系研究科  
社会医学講座 公衆衛生学教室 教授  
医学博士 MD MPH PhD  
専門/疫学・公衆衛生・眼科  
TEL : 06-6879-3911  
FAX : 06-6879-3919  
E-mail : rkawasaki@pbhel.med.osaka-u.ac.jp

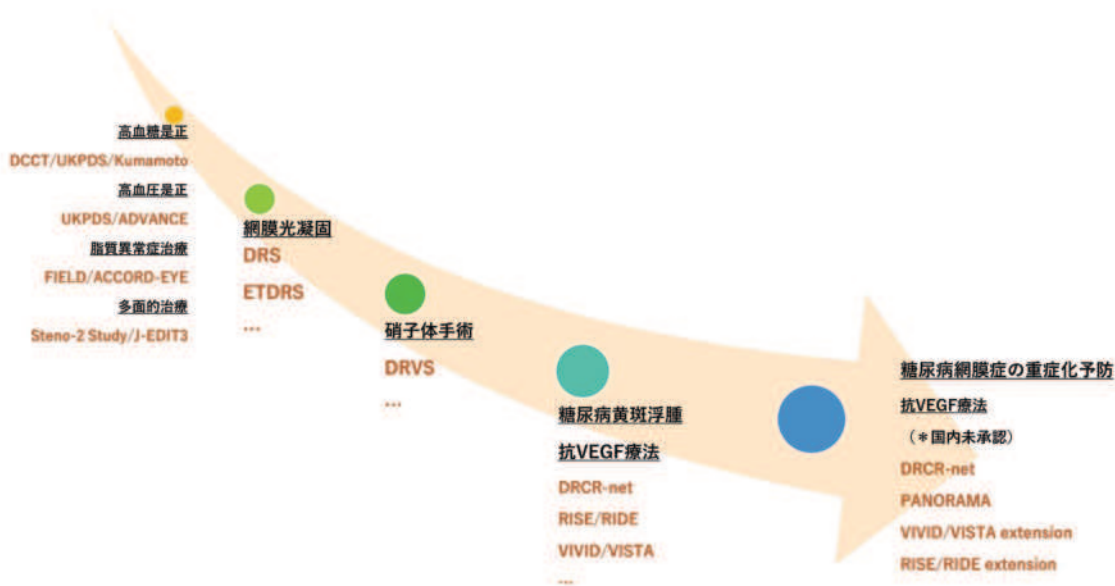


図1. 糖尿病網膜症の治療は過去30年で大きく進歩した。

増殖因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 硝子体注射が広く行われるようになってい  
る。最近では、黄斑浮腫を伴わない中等症非増殖糖  
尿病に対して網膜症の重症化を予防する目的で抗  
VEGF療法を行い、その後の視力低下のリスクを  
軽減させるといった新しい話題も出ている。

このような糖尿病医療の進歩を反映し、我が国で  
視覚障がい者として認定される際の原因疾患を調査  
すると、糖尿病網膜症は年々その順位を下げてい  
ることが明らかとなった (図2) (文献3) や糖尿病網  
膜症を原因として視覚障害認定を受けている実人数  
も減っているということは糖尿病網膜症に関する医

療の進歩により、適時に治療することで失明に至  
るリスクは大きく低減される疾患になったと言える  
(図3)。

#### 4. 残された課題 ①「適時治療のためにはスク リーニングが必要である。」

一方、糖尿病網膜症に関して残された課題として挙  
げられるのは、適時治療を行うためのスクリー  
ングが十分ではないという点である。糖尿病網膜症は  
自覚症状なく発症し、自覚症状が出るのは黄斑浮腫  
や増殖糖尿病など視力を脅かす網膜症と呼ばれる重  
症化した時期である。自覚症状を呈してからの治療

#### 視覚障害認定原因疾患割合の推移

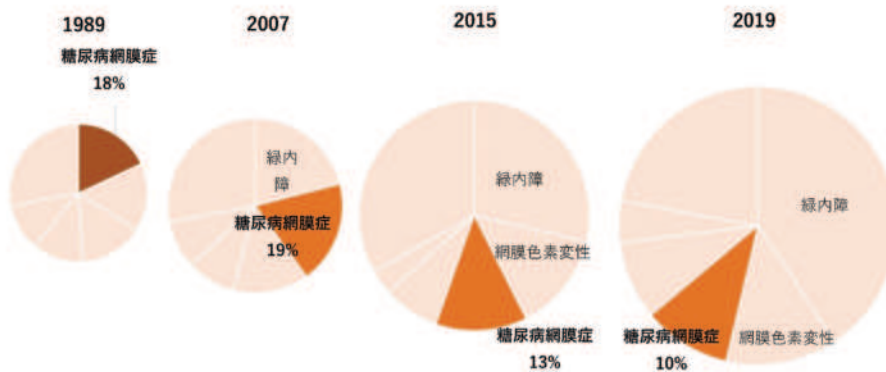


図2. 我が国の視覚障害としての糖尿病網膜症は順位を下げつつある。



図3. 糖尿病網膜症の進展様式

においては視力を完全に回復させることは難しく、治療をもってしても不可逆的な視力低下に至る症例がある。その背景には、診断時期の遅れにより適時治療を受けることができなかつた症例が多いことがある。それゆえ残された課題として、“不可逆的な視力低下を起こすことのないよう、治療時期を逃すことなく早期・適時に診断に至る仕組み”としての糖尿病網膜症スクリーニングが試みられてきた。

#### 4-1. 糖尿病網膜症スクリーニングの二つの戦略

糖尿病網膜症は表1に示すようなスクリーニングに適した疾患であり、適時治療のための契機としてスクリーニングを提供することが試みられてきた。糖尿病網膜症のスクリーニングは国や地域、医療制度によりさまざまであるが大きく opportunistic screening と systematic screening に大別される。

Opportunistic screening は、医療機関を様々な理由で受診した時、あるいは、糖尿病と診断された患

者が自ら、もしくは医療従事者の勧めにより、医療の枠組みの中で眼科を受診し眼底検査を受けるスクリーニングに相当する。わが国の現状は保険診療の中で opportunistic screening を提供していることに該当するが、その順守は十分ではないことが複数報告されている。最も悉皆性の高い形で評価した研究として、National Database (NDB) の診療報酬レセプトによって実態を調査した報告があるが、糖尿病患者において糖尿病網膜症の検査を受けている遵守率は30-50%にとどまっており、また、都道府県レベルでの地域差も存在することが報告されている(文献4)。Opportunistic screening のスクリーニングを有効に機能させるためには、①啓発活動(例：一般、患者、そして、医療従事者のすべてのレベルにおいて疾病の認知度向上、疾患についての理解の深化)、②ガイドライン整備と普及(例：糖尿病および糖尿病網膜症診療ガイドラインにおけるスクリーニングの位置づけと明確かつ統一した勧奨)、③

表1. 糖尿病網膜症はスクリーニングに適した疾患の条件を満たしている

スクリーニングに適した疾患の条件	糖尿病網膜症の特徴
1. 重要で頻度が高い疾患である。	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 糖尿病患者は今なお増加傾向にある</li> <li>✓ 糖尿病網膜症は治療しなければ失明の危険あり</li> <li>✓ 社会的負担も大きい</li> <li>✓ 低所得国における疾病負担も大きい</li> </ul>
2. 非侵襲の検査法で簡便に診断できる。	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 眼底写真で非侵襲的に診断が可能</li> <li>✓ すでに眼底カメラは広く普及しており、比較的安価</li> <li>✓ デジタル画像化で遠隔診断にも適する</li> <li>✓ 眼底画像は AI による自動診断も可能</li> </ul>
3. 診断後の予防法、治療法、リハビリ法が確立している。	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 糖尿病網膜症の治療のエビデンスが確立されている</li> <li>✓ 適切な時期に治療を行うことで失明を防ぐことが可能</li> <li>✓ 適切かつ適時の治療で視力向上も期待できる</li> </ul>
4. スクリーニングによる早期発見と診断後の治療が費用効果的である。	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 医学的效果として失明者の減少効果が示されている</li> <li>✓ 我が国を含め複数の国と地域でも費用効果が確認</li> </ul>



図4. ルールベース・アプローチで作成した糖尿病網膜症の自動診断システムの例  
「出血＝赤色病変で点状・斑状の領域」など特徴を記述するアプローチでは精度向上に限界があった。

受診アクセスの確保（例：医療としてのスクリーニング、地域における内科と眼科の連携）などを推進する必要がある。

もう一つのスクリーニング戦略は systematic screening である。対象となる患者に対して一律に医療機関を受診する以外のスクリーニング機会を提供するもので、その代表と言えるのが英国 National Health Service (NHS) による糖尿病網膜症スクリーニングプログラムである（文献5）。英国を中心に欧州では眼科医不足とコスト高を背景に opportunistic screening から systematic screening への移行が進められ、診療とは別の形で検診センターや検診車を用いたスクリーニングが提供されている。このような取り組みが、本稿の主題の一つである糖尿病網膜症の画像自動診断 AI システムの開発を加速させる背景となっている。

#### 4-2. 糖尿病網膜症のスクリーニングを目指した AI 自動診断システムの試み

Systematic screening の実現、拡充のために英国をはじめとして糖尿病網膜症スクリーニングの自動化を試みるプロジェクトが 1990 年代から多く報告されてきた。初期の自動判定のアプローチは、まず画像上の網膜症病変以外の領域（例：視神経乳頭や血管）の除外、ついで、赤色病変（例：網膜出血）と黄白色病変（例：硬性白斑や軟性白斑）の検出を種々の画像処理フィルタで実現するものであった。感度が 90% を超えるレベルまで達したものの、それと引き換えに特異度は 50-70% 程度に止まっていた（文献6）。私自身も豪州の企業である Predictive Analytics 社と共にそのようなルールベースの糖尿病網膜症画像自動判定システムの開発にかかわった経験があるが、感度 0.88-0.95、特異度 0.69-0.81 の

精度が限界であった（図4）。

そのような状況が大きく変わる節目となったのが、2016 年の Google の研究グループによる報告であった（文献7）。米国やインドで行われてきた systematic screening による検診眼底画像を用い、Inception-v3 を基にした深層学習モデルを用いた自動判定モデルを作成し、感度と特異度が同時に 90% を超えるレベルに達し話題となった。また、IDx-DR（その後、Digital Diagnostics、現在では LumineticsCore に改名 [文献8]）はいち早く FDA 認可を受け、「医師無しで診断を提供する自律型診断システム」として話題となった。実際には、眼底画像を基に「眼科医を受診すべきレベルの糖尿病網膜症があるか」を出力するにとどまるが、開発者である Michael Abramoff は工学博士・医学博士のバックグラウンドを持ち、長く糖尿病網膜症の自動診断システムに取り組んできた医師であることから、システムのブラックボックス化を防ぐために個別の出血や硬性白斑など病変ごとの検出には深層学習を用いているものの、網膜症の重症度の決定には敢えて深層学習を用いずルールベースのアルゴリズムを残すことや、自動撮影機能を装備した眼底カメラとの組み合わせでのみ機能する医療機器として販売することで画像のフォーマットの標準化を容易にするなど、説明可能性や医療機器としての管理の容易さを考慮した造り込みがされている。

糖尿病網膜症は opportunistic screening から systematic screening への移行が先行した国や地域があったため、潤沢な画像と診断結果のデータセットがあり、また、その診断基準や重症度についても画像のみで規定される形に標準化されていたため、深層学習の医療分野での応用例としていち早く研究

表 2. 前向き研究で検証した糖尿病網膜症の AI 自動判定モデル性能検証の結果 (主に深層学習を用いたシステム)

自動診断研究 商用サービス	対象国	対象数	散瞳	目的とする糖尿病網膜症定義	感度	特異度	陽性反応 的中度	陰性反応 的中度
IDx-DR x2.1	米国	819	あり	眼科受診を勧める網膜症	99.3%	68.8%	74.6%	99.1%
				視力を脅かす糖尿病網膜症	99.1%	84.0%	12%	100%
IDx-DR v2.0	オランダ	898	あり	眼科受診を勧める網膜症	68.0%	86.0%	30.0%	97.0%
				視力を脅かす糖尿病網膜症	62.0%	95.0%	14.0%	99.0%
SELENA+	ザンビア	1574	あり	眼科受診を勧める網膜症	92.3%	89.0%	-	-
VoxelCloudRetina	中国	15805	なし	眼科受診を勧める網膜症	83.3%	92.5%	61.8%	97.4%
ARDA/Google/Verily	タイ	7651	あり	視力を脅かす糖尿病網膜症	91.3%	96.3%	79.2%	95.5%
EyeArt v2.1	英国	30405	あり	眼科受診を勧める網膜症	95.7%	54.0%	-	-

が進み、実用化に至ったと考えている。現在までに多くの糖尿病網膜症自動診断プロジェクト、商用サービスが報告されており、その中から実際の症例で前向きに検証したものを表 2 に示した。いずれも現在では多くが感度、特異度ともに高いレベルにあることが分かる。

#### 4-3. 糖尿病網膜症 AI 自動診断システムの社会実装の課題

精度の高い AI 自動診断システムが開発され実用化された一方、実際に医療現場で効果的な利活用がなされていない現状もある。特におそらく現在最も精度が高いと思われる Google 社が開発した自動診断システムをタイの 11 病院において導入し実証研究を行った報告 (文献 12) は非常に示唆に富んでいる。タイでは眼科医の数が限られていることから systematic screening として、糖尿病患者が内科を受診する際に眼底写真を撮影し、眼科医がその画像を判定するという形でスクリーニングを行っていた。そこに AI 自動診断システムを導入することで、検査結果が得られるまでの時間は 2-10 週 (眼科医に送信し判定結果を返信していた期間) から 10 分に短縮された。しかし、実証研究の中で現場ではこのシステムが有効に活用されず、通信インフラの不安定さなどの環境要因よりも、利用する医療従事者、患者双方の人的要因が原因であったことが明らかとなった。従来のスクリーニングの業務フローの中で、「眼底画像の判定タスク」だけを自動化し、高速化しても、システムとして必ずしもうまくいかないことを示唆している。我々はわが国の医療フローの中に AI 自動診断を導入した際の費用対効果検証を行ったが、結果に影響を及ぼす因子として重要であったのが、「AI 検診の受診率」と「診断結果を

もって利用期間を受診する率」であり、その二つが低い条件では精度の高い AI 自動診断システムの導入だけでは費用対効果が高いシナリオにはならなかった。スクリーニングの全体像を見据えた対策が必要であることを示唆していると考えている。

#### 5. 残された課題 ②「定期的なスクリーニングを継続することが必要である。」

自覚症状に乏しい糖尿病網膜症については、症状がなくとも定期的に眼科でのスクリーニングを受ける必要があるが、先に見た通りこの順守率は半数以下にとどまっている。ここで、今や高い精度を持つ AI 自動診断システムを使った方策として、① opportunistic screening から新たに systematic screening に移行し AI 自動診断を活かす、②現状の Opportunistic screening の枠組みのままの AI 技術の活用、という二つの視点から考えてみたい。

##### 5-1. 新たに systematic screening を立ち上げて AI 自動診断を活かす可能性

先に挙げた英国 NHS の糖尿病網膜症スクリーニングプログラム (文献 5) は systematic screening 導入の先駆けとなり、国全体で 12 歳以上の糖尿病患者の 82.4% が年一回の糖尿病網膜症スクリーニングを受けることを達成した。(文献 10) ただ、その背景には日本とは異なっかかりつけ医制度がとられている英国では患者が眼科に直接受診することができないこと、眼科医が少なく予約が数か月先になるといったアクセスが悪いという条件がある。一方で眼科へのアクセスが良好な我が国においてはあえて新たな制度としての systematic screening を立ち上げることは難しいだろう。

わが国で現存する制度を活かした systematic

screening の可能性としては特定健康診査における糖尿病およびその疑いのある者に対する糖尿病網膜症スクリーニングの可能性がある。特定健康診査では主にメタボリックシンドロームに注目した健康診査であることから、眼底検査については当初重要視されていなかった。しかし、2008年からの第三期においては、糖尿病の疑いのある受診者に対して眼底検査を行って良いと緩和され、糖尿病の疑いもしくは糖尿病患者が眼底検査を受ける割合は上昇傾向となりつつある。すでに商用化されている眼底画像のAI自動診断システムはこのような仕組みの中に取り入れることは十分に可能である。現在、特定健康診査については受診率が低いこと、また、集団検診型では眼底カメラを設置した健診機関が多いもの、診療所型では眼底カメラを保有する機関が少ないことなどの課題はあるものの、実現可能性は高い。医師診察もあることから判断の責任の所在も明確にすることができる。現状では特定健康診査で糖尿病が疑われても内科受診につながる割合が低いこと、治療中断があること、さらに内科から眼科への受診を勧められても受診につながっていない等の課題があることからその上流で糖尿病網膜症のスクリーニングを提供できる可能性があると考えており、そこには潜在的に毎年100万人を超える対象者が存在する。

## 5-2. 現状の Opportunistic screening の枠組みのままでの AI 技術の活用

糖尿病網膜症をめぐる AI 技術の応用は画像判別タスク以外でも成果を挙げつつあり、スクリーニング以外にも様々な用途で活用できる可能性がある。図

5には糖尿病の診断、糖尿病網膜症の診断から治療への受療フローを中心に、それにかかわる医療機会と医療従事者、また、課題と AI 活用の可能性を示した。受診の機会を増やすスクリーニング以外に、健診から内科受診、内科から眼科への紹介受診を増やすこと、あるいは、リスクに応じて不必要なスクリーニングを安全に減らす効率化への応用がある。大規模自然言語モデルを用いた生成 AI を用いて、糖尿病網膜症のスクリーニングの受診を促す手紙を書くことを試した例を図6に示す。条件を変えることで全体としての構成はそのままに、個別化されたメッセージを提示することができている。種々のリスクがあることを踏まえつつではあるが、これまではやりたいと思っても時間とコストの制約で実現できなかったような対応ができる可能性を感じている。また、網膜症発症リスク予測モデルへの AI 利用である。従来から、年齢、性別、ヘモグロビン A1c などの臨床情報から網膜症の発症を予測するモデルの提案はあった (文献 11)。近年では、そのような臨床情報を用いず、まだ糖尿病網膜症を発症していない眼底画像から将来の網膜症発症予測の可能性が示されている (文献 12)。糖尿病網膜症のリスクを詳細に評価したうえでスクリーニングの間隔を個別化するという考え方が主流になりつつある中 (文献 13)、精緻で時系列情報を踏まえた AI モデルに期待が集まっている。また、糖尿病網膜症の診断に用いられる眼科画像のノイズ除去や撮影時間短縮にはすでに AI が活用されている他、レーザー治療における自動化・高速化も実用化されている。これまで集団に対して一律の基準で保健医療サービスを

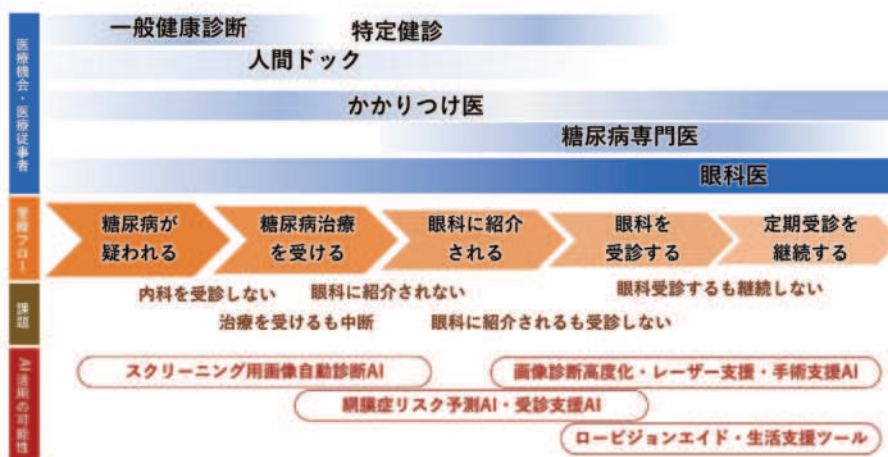


図5. 糖尿病網膜症をめぐるステークホルダー・機会そして課題と AI 活用の可能性

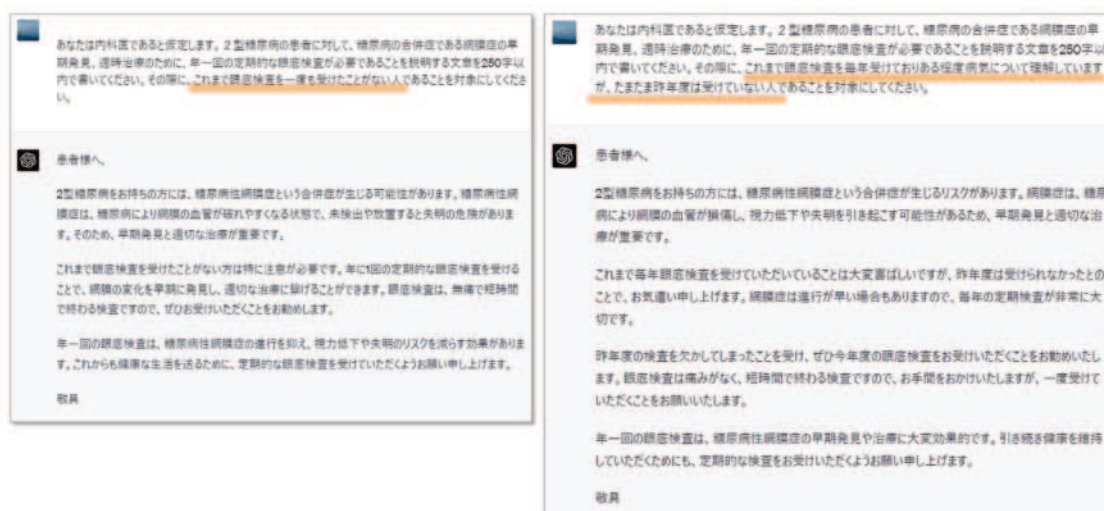


図6. 大規模言語モデルを用いて患者説明を個別化できるだろうか？  
 左：これまで一度も検診を受けたことがないという条件  
 右：毎年検診を受けているが今年を受診していないという条件

提供してきたものは、AIの利活用によって精度向上、質の均霑化、不必要な検査や侵襲のある検査を減らすことなど更なる応用が期待される。また、不可逆的な視力低下に至った患者においては、視覚の補完、生活支援においてもAI活用が恩恵をもたらしている。従来の卓上カメラと音声認識・音声読み上げ技術の組み合わせは今や小型化し眼鏡・耳掛けタイプとして市販されている(文献14)。また、Be My Eyesのようなボランティアによる遠隔音声読み上げサービスも自然言語生成AIによる状況認識とそれに基づいて生成された会話文に置き換えられつつある。

## 6. 終わりに

糖尿病網膜症は画像診断AIの医療分野として話題が先行した面があるが、現在はそのようなAIシステムをどのように使うのが良いかを考える時期に来ていると感じている。

*Technology makes possibilities.*

*Design makes solution.*

*Art makes questions.*

*Leadership makes actions.*

- John Maeda, media artist

これはデザインとテクノロジーの境界線を探求してきたメディアアーティストであるジョン・マエダの

言葉である(文献15)。AIという新しい技術に對峙する医療従事者にとって重要な示唆を与える言葉である。AI自動診断システムという新しい技術は糖尿病網膜症のスクリーニングを広く世界にもたらす可能性がある一方、それを社会課題の解決につなげるためには診断性能以外の多くの要素を考慮したデザインが不可欠である。そして、さらなる未知の課題に取り組む「問いを生み出す力」、また、覚悟をもって行動を起こすリーダーシップこそがAI時代の医療従事者に求められるスキルになるとメッセージとして受けとり、医療、医学にとってAIという新しい技術を使いこなしていくことが重要と考えている。

## 文献

1. Saeedi P, Petersohn I, Salpea P, Malanda B, Karuranga S, Unwin N, Colagiuri S, Guariguata L, Motala AA, Ogurtsova K, Shaw JE, Bright D, Williams R; IDF Diabetes Atlas Committee. Global and regional diabetes prevalence estimates for 2019 and projections for 2030 and 2045: Results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas, 9th edition. *Diabetes Res Clin Pract.* 2019;157:107843.
2. Ueki K, Sasako T, Okazaki Y, Kato M, Okahata S, Katsuyama H, Haraguchi M,

- Morita A, Ohashi K, Hara K, Morise A, Izumi K, Ishizuka N, Ohashi Y, Noda M, Kadowaki T; J-DOIT3 Study Group. Effect of an intensified multifactorial intervention on cardiovascular outcomes and mortality in type 2 diabetes (J-DOIT3): an open-label, randomised controlled trial. *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2017;5(12):951-964.
3. Matoba R, Morimoto N, Kawasaki R, Fujiwara M, Kanenaga K, Yamashita H, Sakamoto T, Morizane Y. A nationwide survey of newly certified visually impaired individuals in Japan for the fiscal year 2019: impact of the revision of criteria for visual impairment certification. *Jpn J Ophthalmol.* 2023 May;67(3):346-352.
  4. Ihana-Sugiyama N, Sugiyama T, Hirano T, Imai K, Ohsugi M, Kawasaki R, Murata T, Ogura Y, Ueki K, Yamauchi T, Kadowaki T. Patient referral flow between physician and ophthalmologist visits for diabetic retinopathy screening among Japanese patients with diabetes: A retrospective cross-sectional cohort study using the National Database. *J Diabetes Investig.* 2023 Jul;14(7):883-892.
  5. Garvican, L., Clowes, J. and Gillow, T. Preservation of sight in diabetes: developing a national risk reduction programme. *Diabetic Medicine*, 2000;17: 627-634.
  6. Nørgaard MF, Grauslund J. Automated Screening for Diabetic Retinopathy - A Systematic Review. *Ophthalmic Res.* 2018;60(1):9-17.
  7. Gulshan V, Peng L, Coram M, Stumpe MC, Wu D, Narayanaswamy A, Venugopalan S, Widner K, Madams T, Cuadros J, Kim R, Raman R, Nelson PC, Mega JL, Webster DR. Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA.* 2016;316(22):2402-2410.
  8. Lumitenics Core ウェブサイト <https://www.digitaldiagnostics.com/products/eye-disease/lumineticscore/> (最終アクセス 2023 年 7 月 10 日)
  9. Beede E, Baylor EE, Hersch F, Iurchenko A, Wilcox L, Ruamviboonsuk P, Vardoulakis L. A Human-Centered Evaluation of a Deep Learning System Deployed in Clinics for the Detection of Diabetic Retinopathy. *Conference on Human Factors in Computing Systems* (<https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3313831.3376718>)
  10. Moreton RBR, Stratton IM, Chave SJ, Lipinski H, Scanlon PH. Factors determining uptake of diabetic retinopathy screening in Oxfordshire. *Diabet Med.* 2017;34(7):993-999.
  11. Stratton, I., Kohner, E., Aldington, S. et al. UKPDS 50: Risk factors for incidence and progression of retinopathy in Type II diabetes over 6 years from diagnosis. *Diabetologia* 44, 156-163 (2001).
  12. Bora A, Balasubramanian S, Babenko B, Virmani S, Venugopalan S, Mitani A, de Oliveira Marinho G, Cuadros J, Ruamviboonsuk P, Corrado GS, Peng L, Webster DR, Varadarajan AV, Hammel N, Liu Y, Bavishi P. Predicting the risk of developing diabetic retinopathy using deep learning. *Lancet Digit Health.* 2021 Jan;3(1):e10-e19.
  13. Scanlon, P.H. Screening Intervals for Diabetic Retinopathy and Implications for Care. *Curr Diab Rep* 17, 96 (2017).
  14. OrCam <https://www.orcam.com/ja-jp/home> (最終アクセス 2023 年 7 月 11 日)
  15. John Maeda, How art, technology and design inform creative leaders. [https://www.ted.com/talks/john\\_maeda\\_how\\_art\\_technology\\_and\\_design\\_inform\\_creative\\_leaders](https://www.ted.com/talks/john_maeda_how_art_technology_and_design_inform_creative_leaders) (最終アクセス 2023 年 7 月 11 日)