

特 集

転倒とテクノロジー ～国際標準規格 ISO 31000 に基づいた テクノロジー活用の整理～

大島 賢典

国立研究開発法人産業技術総合研究所

キーワード

転倒 テクノロジー 国際標準規格 ISO 31000 リスクマネジメント 人間中心の活用

I はじめに

高齢者の転倒は、世界的な公衆衛生上の重大課題である。世界保健機関（WHO）によると、毎年およそ1億7,200万人が転倒により短期または長期の障害を被っており、世界全体で年間3,800万件を超える障害調整生存年（Disability-Adjusted Life Years ; DALYs）が転倒に起因している¹⁾。この数字は年々増加傾向にあり、特に60歳以上の高齢者においては、転倒に起因するDALYの規模が交通事故や溺水を上回る深刻な状況となっている。例えば、米国では、2015年時点で転倒による医療費は約500億ドルに上ると推定されており、今後の高齢化に伴い、転倒件数および関連する社会的・経済的負担の増加が強く懸念される^{2) - 4)}。

転倒は長期的な生活機能の低下、自立性の喪失、さらには生活の質（Quality of Life ; QOL）を著しく損なうリスクを内包している⁵⁾。このような状況に対応すべく、近年では転倒予防に資するテクノロジーの研究・実装が加速している。

しかしながら、テクノロジーによる転倒事故の実効的な減少効果は依然として限定的であり⁶⁾、大きな効果として社会実装に至っている例は少ない。その一因として、「どのような技術を」「いつ」「どこで」「誰が」「誰のために」「何の目的で」「どのように」「どの程度の効果をもって」用いるのか、といった活用の構造が体系的に整理されていない点が挙げられる。転倒という複雑な

現象に対して、単一のテクノロジーに過剰な期待を寄せた結果、適切な目標設定がなされず、得られる成果が不明瞭となっている事例も少なくない。

このような背景を踏まえ、本稿では国際標準規格であるISO 31000 リスクマネジメント-原則および指針⁷⁾に準拠し、転倒予防におけるテクノロジー活用の適切な枠組みを再構築する。すなわち、「リスクの特定、リスク分析、評価、対応・介入、モニタリング」といったプロセスに、どのようなテクノロジーがどの段階で有効に機能し得るのかを、近年の国内外研究を踏まえて整理することで、今後の転倒関連プロダクトの開発、研究活動、そして現場導入に向けた実装支援に資する知見を提供することを目的とする。

II テクノロジーとは

本稿における「テクノロジー（technology）」とは、単なる装置や道具の導入にとどまらず、「知識の実用化により得られる能力」や「科学的知識を、特定の分野における実用目的に応用する方法論」そのものを指す概念である^{8) 9)}。すなわち、テクノロジーとは、人間の知識や身体能力を拡張・補完し、あるいは人間の能力を代替するための工学的・数学的アプローチに基づく技術体系である。この観点に立てば、転倒予防におけるテクノロジー活用とは、単なる機器導入ではなく、運用プロセス思考に基づくマネジメント手法として捉えるべきであ

連絡先：国立研究開発法人産業技術総合研究所 大島賢典

〒277-0882 千葉県柏市柏の葉6-2-3 東京大学柏IIキャンパス内

TEL : +81 80-2302-2429 (直通) E-mail : ooshima.kensuke@aist.go.jp

受理日 : 2025. 6. 30

る。

このように、テクノロジーは、「適切な場面で、特定の対象に、妥当な方法で導入し、成果を評価する」ための一連のマネジメントプロセスと不可分な存在である。とりわけ、転倒のように多因子的かつ突発的に生じ得る事故に対しては、国際標準である ISO 31000「リスクマネジメント-原則および指針」に基づいて、テクノロジーをどのリスク管理プロセスとして、どこに配置し、どのような技術でどの程度の効果を得るかを体系的に整理することが必要である。

Ⅲ 国際標準規格：ISO 31000（リスクマネジメント-原則および指針）⁷⁾

転倒予防を含む事故防止策においては、個別の技術導入のみならず、標準化されたリスクマネジメントの枠組みに基づいた体系的な運用が求められる。本稿では、国際的に認められた指針である国際標準規格 ISO 31000 に基づいて、転倒予防におけるテクノロジー活用のあり方を整理する。なお、ISO 31000 について、原則やフレームワーク含め具体的な内容については、本指針の全文をご確認いただきたい。

1. リスクの定義

ISO 31000 において、リスクとは“目的に対する不確かさの影響”と定義されており、さまざまな側面やカテゴリを持つ目的に沿った、対応の効果や失敗として生まれ、期待されていることからの乖離による望ましくない不確実性（正確には好ましい結果も含まれるため影響と表現されている）のことをいう。一般にリスクは、“リスク源”“起こり得る事象”“それらの結果”“起こりやすさ”で表される。

2. リスクマネジメントとは

ISO 31000 が示すリスクマネジメントとは、「価値を創造し、保護することを目的とした、組織的で継続的かつ統合的なプロセス」である。その特徴は、多面的で多層的かつ反復・動的なプロセス指向的な視点が重要である。つまり、テクノロジーの導入は「点」ではなく、「プロセス」の一部として設計・評価・更新される必要がある。これは、技術開発を行う企業の企画・実証段階から、医療・福祉現場での業務運用までを視野に入れた設計が必要であることを意味する。また、複数の転倒予防ガイドラインでも、「リスクアセスメントの枠組みに基づいた多面的・多職種連携による対応」の必要性が繰り返し強調されている^{3) 10)}。

1) リスクマネジメントプロセス

ISO 31000 におけるリスクマネジメントプロセスは、

「マネジメントおよび意思決定と不可分であり、組織の構造、業務、プロセスに統合されるべき」とされており、逐次的ではなく反復的で動的なサイクルとして設計されている。

例えば、リスクの特定、リスクの分析、評価、対応、モニタリングとレビュー、協議という循環型フローを形成することである。そのため、導入時のみならず、運用・評価・改善を視野に入れた継続的マネジメントが不可欠であり、テクノロジーの「適材適所（fit for purpose）」を見極める力がすべてのステークホルダーに求められる。

2) 転倒リスクマネジメントにおけるテクノロジーの整理

転倒リスクに対するマネジメントの体系を、次ページの図に示すように時系列で分類すると、大きく以下の3段階に整理される。

- ①事故発生前（予防フェーズ）
- ②事故発生時（即時対応フェーズ）
- ③事故発生後（再発防止・重症化回避フェーズ）

本稿では、上記3段階に対してテクノロジーが担う役割と導入戦略を整理する。

Ⅳ リスクマネジメントとテクノロジー

1. リスクの特定

転倒予防において最も基本的なステップは、「誰が高リスクなのか」「そのリスク因子は何か」を客観的に特定することである。このリスクの特定と評価に基づく予防的介入が、転倒の発生を未然に防ぐための根幹となる⁵⁾。従来、問診や簡易な運動機能検査（例：Timed Up & Go テストや Short Physical Performance Battery）などによる横断的な転倒リスク評価が主流だったが、近年は計算機資源やセンシング技術の小型化・無線化等の進歩により、客観的かつ低コストで継続的な評価が可能になりつつある。

まず、既存のデータを用いた機械学習アルゴリズムにより転倒リスクを予測するモデルの構築である。近年、医療機関の電子カルテデータ（Electronic Medical Record：EMR）やその他保険会社や介護カルテ等で保存されている（Electronic Health Record；EHR）データなど、既存の収集データを活用し、機械学習手法による転倒予測を試みる研究も盛んに行われている。Seaman らの報告では、2022 年までに 7,000 件以上の本手法に関する研究報告が検索にヒットしており、今後とも増加することが予想されている¹¹⁾。その一方で、いまだ有効な報告が少ないのが現状であり、在宅ケアや介護

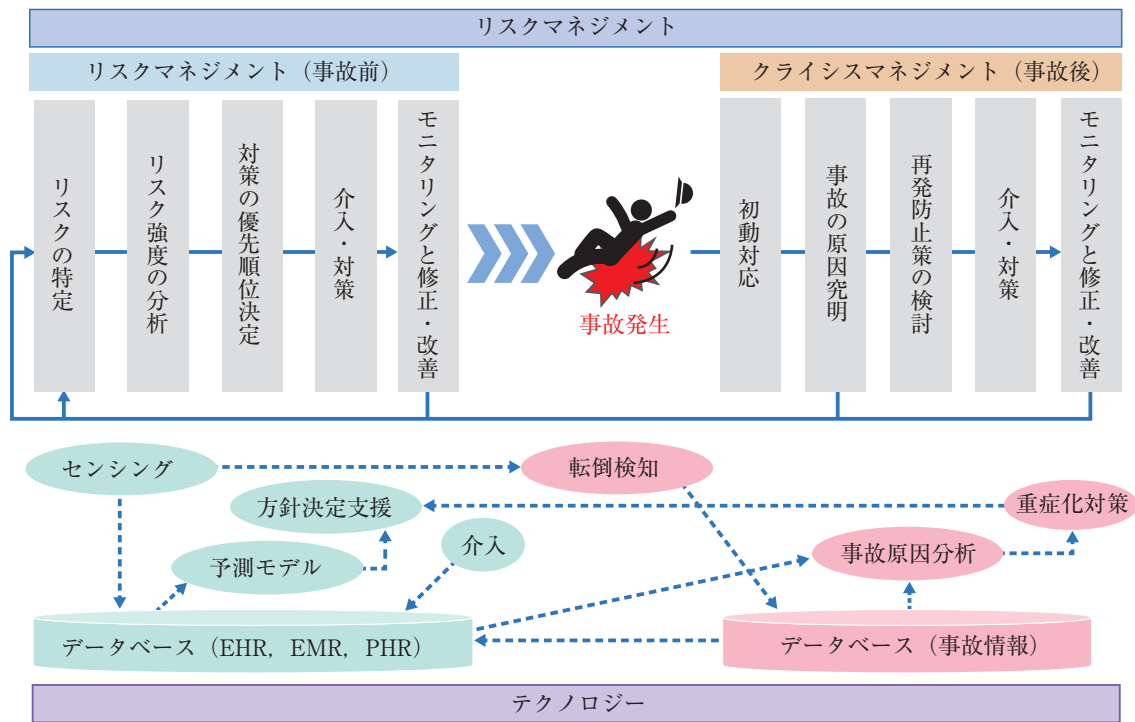


図 転倒対策におけるリスクマネジメントプロセスとテクノロジー

施設利用高齢者を対象に調査した際、わずか4件しか有効な研究が見つからず、その4件の研究報告も普遍的な手法として確立しているわけではないと報告している。

なお、上記の機械学習モデルでは、年齢や性別、既往歴、服薬、過去の転倒歴、身体的能力評価などの多様な予測因子を用いているが、実際に構築されたモデルの妥当性の検証が行われていたのは1研究のみであり、転倒予測のための機械学習モデルの活用はまだ萌芽的段階である。

加えて、近年では電子カルテ（EMR）データだけでなく、個人の健康・医療・介護に関する情報を統合的に記録した Personal Health Record；PHR の活用が注目されている。PHR は、個々人が民間サービス等を通じて保持・蓄積する健康関連データであり、ウェアラブルデバイスによる活動量や睡眠情報、日々のバイタルデータ、服薬履歴、主観的健康評価など多岐にわたる。これらの情報が EMR や EHR と連携・統合されることで、より個別性の高いリスク評価が可能になると期待されている。

このような多元的データを活用することで、個人の転倒リスクをリアルタイムかつ動的に把握・更新できる予測モデルの構築が現実味を帯びてきており、介入の「タイミング」や「対象者の選定」を最適化するリスクマネジメントが可能となる。特に、高齢者の健康状態は加齢や疾病、心理・感情状態^{12) - 14)}によって日々変動するため、動的な転倒リスクモデルの設計こそが今後の予防介

入を最適化する鍵となる。

上記のような既存のデータベースには、主に内的要因データが蓄積・活用されているが、外的要因である環境リスクデータが欠落していることが多い。つまり、「どのような場所で」「どのような状況下で」転倒の危険性が高まるのか、といった生活空間の構造的・物理的リスク（段差や照明、不適切な敷物、家具の配置、扉の開閉、屋外の不整地、傾斜道、障害物、風や雨などの天候による影響）¹⁵⁾を把握するための定量的データは、多くが含まれていない。これはリスク評価の精度を大きく制限している要因の一つである。近年、このような外的要因の可視化に対して、IoT センサーの応用や光や画像データを用いた三次元データ変換技術が応用されつつある。

前者は、スマートホームのコンセプトとして提案されており、単純な家具・家電の使用記録データや、床下や手すりなどに設置した圧力センサーを用いて高齢者の行動パターンや屋内環境をモニタリングし、転倒リスクの高い状況（夜間の頻繁なトイレ移動等）を検知して注意喚起するシステムが研究されている¹⁶⁾。さらに、医療機関内での患者の移動をセンシングしたデータと EMR を組み合わせることで高い転倒予測モデルを構築できたという報告もある¹⁷⁾。

加えて、近年急速に発展しているのが、画像や光学データを用いた三次元環境構造推定技術である。中でも Gaussian Splatting と呼ばれる新しい技術は、二次元映像から点群データを生成し、室内空間の立体的な距離や

形状を客観的に把握することが可能である¹⁸⁾。この技術を活用することで、家具の配置、段差、通行幅といった転倒リスク因子を住環境構造レベルで可視化・数値化できる。これらは空間的転倒リスクマップの作成や、生活動線に応じた個別の環境調整といった高度な介入設計が可能となる。今後は、このような外的環境データと内的健康データの統合的リスクマネジメントが、テクノロジー活用の核心となると考えられる。

次いで、各種センサーを用いた転倒リスクの定量的評価が急速に進展している。近年報告された systematic review によれば、転倒リスク評価に利用されている主なセンシング技術は以下の4種類に大別される¹⁹⁾。これらは、スクリーニング検査の代替手法としてだけでなく、新たな客観的数値によるより詳細な転倒リスクの数値化を目的として研究開発されている。

1) 圧力センサー

圧力感知マットや床面に組み込まれたセンサーが該当する。最も臨床現場で汎用されている機器の一つである。近年では、介護ベッドへの組み込みにより、離床検知に加えて睡眠状態やバイタルのモニタリングとの連携も進んでいる。ただし、使用対象者、使用環境、使用タイミングなどの運用設計が不明瞭なまま導入されている例も多く、業務負荷の増大や非効率な運用が課題とされている。したがって、データの意味づけや使用場面の明確化が必要であり、リスク評価結果をオペレーション設計に活かす循環的プロセスの構築が求められる。

2) レーザーセンサー

対象者とセンサーとの距離変化を検知し、遮断検出や三次元点群データによる動作解析を可能にする技術である。これまでは主に転倒時のアラート用途で用いられていたが、近年では歩行中の脚の振り出し幅や重心軌跡を評価する研究も進んでおり、バランス能力や動作パターンの可視化ツールとしての応用が模索されている。

3) 慣性センサー

腕や腰、または靴に装着し、歩行時の加速度や衝撃。角速度を計測し、歩行の安定性低下や速度低下など転倒リスクの高い歩行パターンを検出する手法として広く使用されている。スマートフォンにも内蔵されており、最も身近なデバイスであるといえる。近年では、センサーの小型化・無線化により、複数のデバイスを靴²⁰⁾や衣服²¹⁾に搭載させ、日常生活のリアルワールドデータとして取得が可能になってきており、歩行時のバランスをモニタリングし、将来の転倒を予測する試みがなされている²²⁾。

4) 深度センサー、RGB カメラ

深度センサー付きカメラや、スマートフォンや通常のデジタルカメラを用いて、動画データから歩行などの動作パターンの特徴を抽出し、バランス能力を評価する手法も近年注目されている。近年一般的になりつつあるのが、RGB データを用いた畳み込みニューラルネットワーク (Convolution Neural Network : CNN) という機械学習手法を用いて人間の関節ランドマーク点を推定する AI モデルである^{23) 24)}。これらの技術は、映像による説明性の高さという特徴をもち、医療・介護現場でのフィードバックや教育的活用にも有用であり、この技術を用いた歩行分析には一定の妥当性がある^{25) -27)}。一方で、プライバシー保護や映像データの取扱いに対する懸念は根強く、現場実装には高い倫理的配慮が求められる。

これらのセンサー技術を用いたアセスメントは主に内的要因（主に運動機能）の可視化を目的に発展してきた。しかし、転倒リスク識別の精度には、研究間で 47.9 % から 100 % と大きな幅が報告されている²¹⁾。これは、センサーの種類、装着位置、解析手法の違いに加え、対象者の属性、転倒の定義、アウトカム指標の違いなど研究間の不均一性に起因すると考えられる。したがって、現時点ではどのセンサーを用いれば将来の転倒を高精度で予測できるかについての標準的手法は確立されておらず、実装にあたっては、対象者の特性、利用目的、使用環境に応じたセンサー選定と評価指標の設定が不可欠である。

従来の評価手法は一時点での「間欠的なアセスメント」に依存していたが、近年では日常生活環境下におけるデータを継続的に収集し、リアルワールドデータとして記録・解析するアプローチが注目されている。このような手法では、歩行・起立・姿勢保持といった日常的な運動機能を連続的に観察することにより、被験者の状態変化に基づいて転倒リスクを動的に更新することが可能となる^{28) 29)}。これは単なる運動機能の定量評価にとどまらず、「通常とは異なる状態 = リスクシグナル」を捉える指標としての役割を担う。加えて、同一システムにより転倒そのものの検出が同時に記録可能であれば、リスクアセスメントと転倒検知を融合した循環的なリスク管理モデルの構築が可能である。

もっとも、これらの技術は依然として研究段階にあり、適切な評価指標の同定やデータ基盤の標準化、システムの受容性・信頼性確保といった課題が残されている。現在は、断続的評価による一時点での高精度な機能計測が可能となっているものの、それらが転倒という複雑で

多因子的なアウトカムに対してどれほど予測妥当性を有するかについては限定的である。

今後は、テキスト、画像、音声、動作など異なる形式のデータを統合処理するマルチモーダル技術の導入、およびそれらをリアルワールドデータとしてリアルタイムに蓄積・解析可能な基盤技術の確立が求められる。これにより、多面的なリスク指標が構築され、臨床的に意味のある予測モデルへの昇華が実現されるかどうか、次世代の転倒予防戦略における重要な論点となる。

2. リスクの分析：データに基づくリスク評価と意思決定支援

前節で述べた通り、各種テクノロジーを活用することで、さまざまな転倒リスク要因を数値化・構造化することが近い将来可能となりつつある。

次のステップとしては、それらのリスクが実際の転倒事故に対して、どの程度寄与しているのか、またどのような要因の組み合わせが事故発生につながりやすいのかといった、リスクの定量的分析と優先度の評価が必要である。事故やリスク発生の起こりやすさや確率、潜在的影響の大きさ（被害の大きさ）を評価し、どのリスクに優先的に対応すべきかを判断するプロセスが求められる。

ISO 31000 ではリスクの優先度判断におけるフレームワークが提示されており、リスクの大きさを「発生可能性（頻度）」と「影響度（被害規模）」の2軸で評価することが推奨されている。転倒予防においては、「年に1回未満の軽微な転倒は容認できるが、骨折や頭部外傷など重大な転倒は回避すべき」といった、対象者や現場によってその定義すべき範囲が変わってくる。その場合、「組織として」、戦略的に意思決定していくためには、テクノロジーから得られた知見をオペレーションの文脈に接続し、優先的な介入領域を判断する力が求められる。

しかし、現実では、リスク評価に際して単に確率や影響度だけでなく、介入の実効性、金銭的成本、人的リソース、対象者の受容性等、多様な評価軸が存在するため、意思決定が複雑化しやすい。

このような状況を受け、近年では、AI技術やデータ解析を活用した意思決定支援システムの導入が試みられている。例えば、入力された患者データアルゴリズムに沿ったテラーメード型の集団介入策の提案や、電子カルテデータから算出されたリスクスコアと、介入オプション（運動療法、環境改善、服薬調整など）のマトリクスをAIが学習し、過去の実績に照らして「このようなデータ特徴にある利用者には、この組み合わせの介入が適している」と推奨するシステムが構想されている。

もっとも、実用化には十分なエビデンスと医療者の信頼が必要である。

その際、重要なのは、データ解析やAIから出力される提案が、エビデンスに基づいた優先度判断における部分的役割を果たす程度の表現が望ましい。なぜなら、出力情報は、基となるアルゴリズムや入力データに依存するため、分析結果を単に鵜呑みにするのではなく、暗黙知を有する専門家や介護者の判断等の臨床知見と統合して総合的に評価することが求められるからである。このようなことから、高度なデータ解析により何らかの転倒リスクが明らかになったとしても、それがどの程度信頼できるか、あくまで現場組織が主体としてかつわかりやすく対策を検討できる仕様になっているか、が求められる。複雑な機械学習モデルが「リスク高」と判定しても、その根拠がブラックボックスでは効果的な対策を立てにくい。このため、近年は説明可能なAI（XAI）の導入が進み、SHapley Additive ex Planations；SHAP 値等を用いたリスク因子の可視化や、生成系AI（Retrieval-Augmented Generation；RAG）による解釈支援が模索されている^{30) 31)}。

また、ダッシュボード機能などリスク分析結果を誰でも理解できる形で可視化し、複数利用者のリスク状態を俯瞰的に把握できるツールの開発も重要である。これにより、現場スタッフは効率的かつ漏れのない判断を下し、適切な介入の優先順位付けが可能となる。

そのためには、データサイエンスと専門知識の融合、現場の運用に即した実装設計、そして高齢者本人・介護者の意向を含めた多層的な意思決定プロセスの構築が必須である。

3. 転倒後の重症化予防対策（クライシスマネジメント）

転倒リスクアセスメントから、介入方針の策定、業務オペレーションへの統合が実現したとしても、現実には予期せぬ事故というものは、完全には防げないことが多い。そのため、万が一転倒が発生した際に、重大事故や二次的被害を最小限にとどめるための備えと対応戦略（クライシスマネジメント）が不可欠である。

高齢者の転倒におけるクライシスマネジメントは、主に後述する1) 事前の備え、2) 早期発見・初動対応、3) 事故発生後の分析・モニタリングの3つの柱に分類される。本節では、これらの技術的対策や課題について概説する。

1) 事前の備えとテクノロジー

転倒は、個々人の身体的・認知的状態（内的要因）と環境・状況要因（外的要因）が複雑に交錯し、偶発的に生じる現象である。そのため、転倒の発生を完全に防

ぐのではなく、「発生を前提とした備え」によって重篤な結果を回避する戦略が現場では必要不可欠である³²⁾。例として、医療・介護現場等において、骨折しないために超低床ベッドでの就寝環境に設定することや床マットを用いた骨折予防が一般的である。ここで重要なのは、下肢の骨折リスクを予防するために集中しすぎて、事故発生日数の増加や頭部外傷など新たに死亡につながる傷害リスクを増加させていないかを、あらかじめ具体的に想定した上で方針を決定することが重要である。

具体例としては、超低床ベッド対策はベッドからの転落を予防するには効果的ではあるが、一定程度起立能力のある対象者の場合、起立難易度を高めることでかえって転倒発生日数を増加させる原因になることや、逆に勢いがついて激しい転倒をしてしまう、起立の途中でバランスを崩した後、着座できずにベッド柵に頭部をぶつけるなどの事例が想定される。このように、保守的な対策に反して、期待すべき効果が得られないだけでなく、逆にリスクを高める対策となってしまう場合がある。

その他、床マットの設置に関しても、歩行が不安定となる要因の一つになる可能性や、つなぎ目のほころぎが気になり掃除しようとするなどのリスクの高い行動を誘因することにもなる。

近年では、これらの課題に対応すべく、技術的改善が進められている。例えば、特殊素材を用いた床マットの中には、立位や歩行バランスに影響を与えず、かつ転倒時の衝撃を効果的に吸収する性能を有する製品が開発されている^{33) 34)}。加えて、ハーネス装着のない持ち手付きのロボットバーが利用者の後方について歩き、必要に応じて身体を支える機器は、屋内の移動を安全にすることを目指している³⁵⁾。このようなロボティクスや素材技術は、転倒発生時の被害軽減から事前の動作支援まで、広範な応用可能性を秘めている。

2) 早期発見とテクノロジー

転倒におけるクライシスマネジメントで最も重要なのは、いち早く事故発生に気付くことである。初動対応の遅れは、褥瘡や低体温症状、後遺症のリスク、別の対象者への二次的被害の発生により事故被害の増大に寄与する。そのため、転倒検知デバイスは数多く研究開発されている³²⁾。なお、転倒を検知するためのセンサーデバイスとしては、設置型と装着型の2種がある。

設置型のセンシングデバイスでは、病室や住宅内にセンサーを配置し、高齢者の行動や環境状況を常時モニタリングして転倒を未然に防ぐ試みである。こうしたスマートホーム技術の効果について、2024年のメタアナリシスではランダム化比較試験13研究・計1,941名

のデータを解析し、スマートホーム技術（Smart home Technology；SHT）の導入群で転倒発生日率が有意に28%低減したことが報告された³⁶⁾。一方でSHTは、対象者の転倒恐怖感には有意な影響を及ぼさず、転倒による入院率への効果も不明瞭だった。この結果は、スマートホーム技術が高齢者の転倒発生を抑制し、自立生活の安全性を高める可能性を示すと同時に、対象者本人の安心感向上には直結していないことを示唆している。現場からは「センサーアラームが頻繁すぎて結局オフにされた」例も報告されており¹⁹⁾、誤警報の低減やシステムの洗練、導入ロジックや活用方法の明確化も今後の課題である。

さらに近年では、ウェアラブルセンサーによって、場所を問わず転倒を検知するためのさまざまな研究がなされている³²⁾。スマートフォンやApple watchに搭載されているInertial Measurement Unit；IMUウェアラブルセンサーは主に、倒れた際に自動で検知し家族や救済サービスに通報する仕組みとして開発されている。その精度について、加速度計や角速度計を内蔵したウェアラブル機器の転倒検知は平均感度93%以上・特異度86%以上と高水準であったとの報告がある³⁷⁾。一方で健常者が車いすを使用し転倒動作を模倣した転倒検出シミュレーションでは、合計転倒タスク300回中、14回しかApple watchでは検出されなかったことが報告されている³⁸⁾。総じて立位・歩行からの転倒の場合は比較的低コストで高い精度の転倒検知と救助要請を実現し得るが、もともと地面に近い位置で動作を行う場合や、動作緩慢な対象者が緩やかに転倒した場合に精度が下がる可能性があるという課題がある。加えて、充電の手間や装着の煩わしさから使用継続率が低下する懸念があり、今後も使いやすさ（UX）の改良と長期的な実証実験が不可欠である。

3) 事故発生後の分析・モニタリングとテクノロジー

いくら予防策を講じようとも、転倒事故は過失なく生じてしまうものである。しかし、生じた転倒事故の情報から学ぶことは多い。同様の事故が二度と起こらないための検討は必須事項である。これはクライシスマネジメントの中核でもあり、事故後の分析と継続的なモニタリングを通じて、予防と介入の質を高めていく必要がある。

クライシスマネジメントのもっとも一般的な例として、インシデント報告書や事故報告書が挙げられる。しかし、実情としては、このような報告書作成において必ずしも転倒予防に貢献しているとは限らない。これらは業務負担になりやすく、主観的・断片的な記述になり、

バイアスの混入が免れない課題を抱え、効果的な再発予防に直結しないケースも少なくない。近年では、このような事故報告書をテキストデータとして分析し、どのような傾向があるのか、適切な対応策や議論すべきポイントを生成する大規模言語モデルを用いた研究も考案されてきている^{39) 40)}。こうした技術はあくまで意思決定を支援するツールの一つであり、最終的には現場のステークホルダーによる熟議と連携が必要である。

さらに、リスクマネジメントやクライシスマネジメントで決定した方針による対策・介入において、さまざまな客観的指標を用いて定期的にテクノロジーの導入効果を評価する必要がある。

モニタリングによる効果判定指標として、直接的にかかわる転倒発生率の低減は、最も単純で重要なアウトカムである。しかし、転倒は多因子的かつ偶発的な事象であり、単一指標のみでは介入効果を適切に評価しきれない。そのため、以下のような多面的・階層的なアウトカム指標の事前設定が求められる。例えば、転倒負傷率 (Injurious falls) や転倒再発率 (Recurrent falls)、夜間や早朝などの特定の時間のみの転倒事故発生率、危険動作の回数等である。

そこで、常時監視システムにより転倒リスクや転倒発生をモニタリングし、必要に応じて介入内容を調整することが理想とされる。現状、カメラ動画によって転倒事故発生後の原因分析に関しては人が行うのが通常であるが、今後は Vision Language Model : VLM のような動画像データからテキストデータに変換し、自動での転倒事故報告書の下書きが生成されるシステムなどが開発されていくことが考えられる⁴¹⁾。

また、テクノロジーを用いた予防策を実施していく中で、介入受容率 (プログラムを完遂した参加者割合) もテクノロジー活用の効果を見る上で重要な指標になる。ICT 技術を活用したヘルスケアサービス (e-Health) において、試験参加へのモチベーションの高い層を対象とし、2年以上の介入で転倒率や転倒による受傷率は有意に低下したものの、約半数の参加者しか継続利用できなかった⁴²⁾。このようにモチベーションの高い対象者でも技術の受容は長期的になると主観的な満足度は低くなる可能性がある。

その他、リスク要因のモニタリングはリスクマネジメントプロセスの重要な一部である。高齢者の状況は時間とともに変化し得るため、一度介入しても新たなリスクが発生する可能性や、初期に比べ後期では介入効果が薄れてくる可能性がある。ウェアラブルセンサーによる継続的データ収集により、ヒヤリハット検知 (転倒には至

らないつまりずきやふらつきの検出) も目指されており、それらのデータを蓄積することで将来の転倒を予測するモデルにフィードバックすることも可能になる。そのためには今後、データの統合・集約と適切な可視化が重要である。

このように、複数の各種センサーからのデータを統合するプラットフォーム上では、介入前後の転倒率や行動指標の推移、ハイリスク者の割合などをダッシュボード形式で表示することで対策の効果判定を一目で判断できるようになる。例えば、介護施設において、複数入居者の転倒や起立回数などをリアルタイムに一覧できるモニターをナースステーションに設置し、その日のリスクが高い入居者を色分け表示する、といった実装例もある。このようなシステムにより、スタッフは日々の重点見守り対象を把握しやすくなり、転倒リスク管理がチームで共有されやすくなる効果が期待できる。これらの実現のためには、医療・介護従事者の暗黙知や業務オペレーションのタスク構造に合わせた現場目線での開発・設計が求められる。したがって、医療・介護施設と開発企業をはじめとする産官学連携が強く求められる。

4. テクノロジーの課題と限界

転倒予防におけるテクノロジーの可能性は広く認識されているが、実装に向けた課題も多く、特に以下の3点が限界として指摘されている。

1) 科学的エビデンス不足

新しいデジタル技術の多くは有望であるものの、無作為化試験や長期追跡研究が十分ではなく、その真の効果や不適応の発生などは未知数な部分が多い。特に認知症や要介護高齢者といった属性の高齢者に対する有効性は実証が乏しく、かつ技術が届きにくく、効果を得るまでの「最後の一里」をどうするかは今後の課題となっている。

2) ユーザー視点の不足

技術開発にはしばしば、開発者の視点や先進的機能の追求に偏重し、高齢者本人や介護者のニーズとの乖離が生じる傾向にある。こうした乖離は、ビジネスモデルに依存しやすい。例えば、医療機関であれば術後せん妄や認知症由来の行動障害によるリスクの高い行動を起こす可能性が高いため、見守りというより監視的なプロダクトが求められる場合がある。一方、介護施設では日常生活の場であるため、施設側の情報把握のために常時見守りとなるシステムの導入にはやや拒絶感がある。したがって、医療・介護機器開発において、対象者や介護者を巻き込んだ共創 (Co-design) の姿勢が欠かせない。

3) 技術導入による倫理的・法的問題の懸念

モニタリング技術の導入においては、プライバシー、データ管理等、強く配慮しなければならない課題である。その上でデータの正確性とノイズを考慮しなければならない。また、誤検知・誤報知が多いと利用者がシステムを無効化してしまう恐れがあるため、機械学習等で精度を高めつつ、多少の誤報は許容する運用設計が必要である。事例として、認知症高齢者を対象とした技術研究では、ケアスタッフが「機器が侵襲的だ」と感じたスタッフが機器の電源を落としてしまう事例も報告されており⁶⁾、ユーザー側の理解と受容なくして技術導入は成功しないことが示唆されている。

実際にカメラ型見守りデバイスの中では、個人を特定する動画そのものではなく、スティックピクチャーでの保存、転倒前後のみ保存などさまざまな対応がなされている。加えて運用面でも収集データのプライバシー保護とセキュリティも重要であり、そのデータを誰が閲覧できるか、どれくらいの期間保存するか、匿名化はどうかなど、運用対策が不可欠である。

これら3つの課題に加え、テクノロジーの活用による失敗例も多くあるのが現状である。さまざまなデジタル介入の概念実証や開発中止等の失敗例から共通して考えられることとして、技術への過度な期待への限界がある。例えば、技術の誤使用（例：見守りシステムを誤解してオフにしてしまう）や不十分なトレーニングによる逆効果（例：機器への過信からかえって不注意になる）といった事例もある。

さらに、転倒事故は多要因が複雑に相互作用する現象であり、高い予測精度のために多量の入力データが求められる。その結果として入力業務の負担が転倒リスクにつながる懸念や、各システムから出力される情報量・複雑性の増大による、ステークホルダーの意思決定に混乱を来すリスクも指摘されている⁴⁴⁾。

したがって、繰り返しになるが、リスクマネジメントは人間のケアに対する補完的な立ち位置として、テクノロジーを活用するということが重要であり、一方に頼りすぎないバランス感が成功のカギとなる。

V 終わりに

本稿では、高齢者の転倒予防におけるテクノロジーの活用を、ISO 31000に基づくリスクマネジメント各段階に沿って概観した。

センシング、機械学習、ロボティクス、材質領域における技術の進展は、転倒リスクの客観的な把握と予測、適切な組織の意思決定、そして介入の最適化に対して新

たな可能性をもたらししている。特に、転倒検知技術は転倒発生率の低減や高精度なリスク検知に一定の成果を示しており、今後の技術進歩によって、現場の対応や判断が大きく変化することが予想される。他方で、どんなに技術が発展しても、高齢者が安全に生活できる社会環境や人とのふれあいを補完できるものではない。技術は転倒予防の万能薬ではなく、組織戦略における手段の一つであるという認識が重要である。そして、さまざまな社会実装事例を増進させ、エビデンスの集積とガイドライン改訂も積極的に進めていくことが必要である。そのためにも、テクノロジーの現場検証では、医療・介護従事者の知識や業務タスク構造との整合性が重要である。これには、ナラティブな暗黙知の可視化・共有、導入効果の可視化ツールの整備、医療・介護現場との協働設計が不可欠であり、産官学民による連携体制の構築が強く望まれる。

テクノロジーには限界もあるが、それを人間中心の視点と科学的根拠に基づいて適切に補完・活用していくことで、超高齢社会における転倒予防の実践が一層深化することが期待される。

● 参考文献

- 1) Stanaway JD, et al. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990-2017 : a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*. 392 (10159) : 1923-94, 2018.
- 2) World Health Organization. Global Health Estimates 2019 : Disease burden by Cause, Age, Sex, by Country and by Region, 2000-2019. Geneva : World Health Organization ; 2020. Available from : <http://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates>
- 3) World Health Organization. Step safely : strategies for preventing and managing falls across the life-course. Geneva : World Health Organization ; 2021.
- 4) Florence CS, et al. Medical costs of fatal and nonfatal falls in older adults. *J Am Geriatr Soc*. 66 (4) : 693-698, 2018.
- 5) Montero-Odasso M, et al. World guidelines for falls prevention and management for older adults : a global initiative. *Age Ageing*. 51 (9) :

- 2022.afac205. doi : 10.1093/ageing/afac205.
- 6) Eost-Telling C, et al. Digital technologies to prevent falls in people living with dementia or mild cognitive impairment : a rapid systematic overview of systematic reviews. *Age Ageing*. 53 (1) : afad238, 2024.
 - 7) International Organization for Standardization. ISO 31000 : 2018 risk management. Geneva : ISO : 2018.
 - 8) Merriam-Webster. Technology [Internet]. Merriam-Webster.com Dictionary. Available from : <https://www.merriam-webster.com/dictionary/technology>
 - 9) Oxford University Press. Technology [Internet]. Oxford Learner's Dictionaries. Available from : <https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/academic/technology>
 - 10) Panel on Prevention of Falls in Older Persons, American Geriatrics Society and British Geriatrics Society. Summary of the updated American Geriatrics Society/British Geriatrics Society clinical practice guideline for prevention of falls in older persons. *J Am Geriatr Soc*. 59 (1) : 148 - 57, 2011.
 - 11) Seaman K, et al. The use of predictive fall models for older adults receiving aged care, using routinely collected electronic health record data : a systematic review. *BMC Geriatr*. 22 (1) : 210, 2022.
 - 12) Kutsuzawa G, et al. Classification of 74 facial emoji's emotional states on the valence-arousal axes. *Sci Rep*. 12 : 398, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04357-7>
 - 13) Kutsuzawa G, et al. Age differences in the interpretation of facial emojis : classification on the arousal-valence space. *Front Psychol*. 13 : 915550, 2022. doi : 10.3389/fpsyg. 2022.915550
 - 14) Oshima K, et al. Development and persistence of fear of falling relate to a different mobility functions in community-dwelling older adults : one-year longitudinal predictive validity study. *Aging Clin Exp Res*. 33 (9) : 2453-2460, 2021.
 - 15) Sawa R, et al. Development and psychometric properties of the Japanese Residential Environment Checklist for Safety (J-RECS) : self-assessment tool for environmental fall risk factors. *Geriatr Gerontol Int*. 2025 May 15. doi : 10.1111/ggi.70075. Epub ahead of print. PMID : 40375610.
 - 16) Konara Mudiyansele SP, et al. Emerging digital technologies used for fall detection in older adults in aged care : a scoping review. *J Am Med Dir Assoc*. 26 (1) : 105330, 2023.
 - 17) Kim DW, et al. Predicting In-Hospital Fall Risk Using Machine Learning With Real-Time Location System and Electronic Medical Records. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2025 Feb ; 16 (1) : e13713. doi : 10.1002/jcsm.13713.
 - 18) Kerbl B, et al. 3D Gaussian splatting for real-time radiance field rendering. *ACM Trans Graph*. 42 (4) : 1 - 14, 2023. doi : 10.1145/3592433
 - 19) Sun R, et al. Novel sensing technology in fall risk assessment in older adults : a systematic review. *BMC Geriatr*. 18 (1) : 14, 2018. doi : 10.1186/s12877-018-0706-6
 - 20) Uno Y, et al. Validity of spatio-temporal gait parameters in healthy young adults using a motion-sensor-based gait analysis system (ORPHE ANALYTICS) during walking and running. *Sensors (Basel)*. 23 (1) : 331, 2023. doi : 10.3390/s23010331
 - 21) Fukuoka T, et al. The relationship between spatiotemporal gait parameters and cognitive function in healthy adults : protocol for a cross-sectional study. *Pilot Feasibility Stud*. 8 (1) : 154, 2022. doi : 10.1186/s40814-022-01122-z
 - 22) Lockhart TE, et al. Prediction of fall risk among community-dwelling older adults using a wearable system. *Sci Rep*. 11 (1) : 20976, 2021.
 - 23) Cao Z, et al. OpenPose : realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 43 : 172 - 186, 2021.
 - 24) Lugaresi C, et al. Mediapipe : a framework for building perception pipelines. *arXiv [Preprint]*. 2019 Jun 19. arXiv : 1906.08172.
 - 25) Oshima K, Asai T, Esaki H, Kameyama S, Yamamoto J. Concurrent validity of the step time and walking speed obtained from the smartphone

- application CareCoaching in independent, community-dwelling older adults. *J Phys Ther Sci*. 33 (9) : 621 – 626, 2021.
- 26) Ota M, Tateuchi H, Hashiguchi T, Ichihashi N. Verification of validity of gait analysis systems during treadmill walking and running using human pose tracking algorithm. *Gait Posture*. 85 : 290 – 297, 2021.
- 27) Yamada S, et al. Quantitative gait feature assessment on two-dimensional body axis projection planes converted from three-dimensional coordinates estimated with a deep learning smartphone app. *Sensors (Basel)*. 23 (2) : 617, 2023.
- 28) Aziz O, et al. Validation of accuracy of SVM-based fall detection system using real-world fall and non-fall datasets. *PLoS One*. 12 (7) : e0180318, 2017.
- 29) Zhao G, et al. Sensor-based fall risk assessment : a survey. *Healthcare (Basel)*. 9 (11) : 1448, 2021.
- 30) Lundberg SM, Lee S-I. A unified approach to interpreting model predictions. *GitHub – shap/shap : a game theoretic approach to explain the output of any machine learning model [Internet]*. 2017. Available from : <https://github.com/shap/shap>
- 31) Lewis P, et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *arXiv*. 2020 May 22. *arXiv* : 2005.11401. doi : 10.48550/arXiv.2005.11401
- 32) Oh-Park M, et al. Technology utilization in fall prevention. *Am J Phys Med Rehabil*. 100 (1) : 92 – 99, 2021.
- 33) 立本ら. 新規の衝撃吸収床材「ころやわ」の高齢者における歩行・立位バランスに及ぼす影響. *日本転倒予防学会誌*. 8 (2) : 128, 2021. Japanese. ISSN : 2188-5710.
- 34) Wang YD, Yoshii T. Development and improvement of a CT finite element analysis model to verify the preventive effect of fall-impact absorbing flooring on proximal femoral fractures in the elderly. *Kotsusetsu*. 46 (1) : 1, 2024.
- 35) Bolli R. Elderly Bodily Assistance Robot (E-BAR) : a robot system for body-weight support, ambulation assistance, and fall catching, without the use of a harness. Presented at : 2025 IEEE Int Conf Robot Autom (ICRA) ; 2025 May 19 – 23 ; Atlanta, USA.
- 36) Yeoh Lui CX, et al. Effectiveness evaluation of smart home technology in preventing and detecting falls in community and residential care settings for older adults : a systematic review and meta-analysis. *J Am Med Dir Assoc*. 26 (1) : 105347, 2025. doi : 10.1016/j.jamda.2024.105347
- 37) Warrington DJ, et al. Are wearable devices effective for preventing and detecting falls : an umbrella review (a review of systematic reviews). *BMC Public Health*. 21 (1) : 2091, 2021. doi : 10.1186/s12889-021-12169-7
- 38) Abou L, et al. Sensitivity of Apple Watch fall detection feature among wheelchair users. *Assist Technol*. 34 (5) : 619 – 625, 2022. doi : 10.1080/10400435.2021.1923087
- 39) Ahmadi E, et al. Automatic construction accident report analysis using large language models (LLMs). *J Intell Constr*. 3 (1) : 9180039, 2025. doi : 10.26599/JIC.2024.9180039
- 40) Liu Q, et al. Accident investigation via LLMs reasoning : HFACS-guided chain-of-thoughts enhance general aviation safety. *Expert Syst Appl*. 269 : 126422, 2025.
- 41) J G, An explainable deep learning model for vision-based human fall detection system. In : 2022 Third Int Conf Intell Comput Instrum Control Technol (ICICICT) ; 2022 ; Kannur, India. p.1223 – 1229. doi : 10.1109/ICICICT54557.2022.9917979
- 42) Delbaere K, et al. E-health StandingTall balance exercise for fall prevention in older people : results of a two year randomised controlled trial. *BMJ*. 373 : n740, 2021. doi : 10.1136/bmj.n740
- 43) Deimazar G, et al. Machine learning models to detect and predict patient safety events using electronic health records : a systematic review. *Int J Med Inform*. 180 : 105246, 2023.