

眼科遠隔診断と診断用ロボットの開発

郷健太郎^{*1}、柏木賢治^{*1}、松田兼一^{*1}、間瀬文彦^{*1}、豊木博泰^{*1}、岩沼宏治^{*1}、八代一浩^{*2}、
中山淳二^{*3}、土屋康久^{*4}、深沢陽一^{*5}

^{*1}山梨大学大学院、^{*2}山梨県立大学、^{*3}株式会社タカギセイコー、

^{*4}有限会社アクトロン、^{*5}有限会社フィッツ設計事務所

概要：情報通信ネットワークを介した遠隔操作型の眼科診療装置を開発・運用することによって、甲府盆地の中核病院に勤務する眼科専門医が、県境周辺の中山間地の眼科患者を診断するというサービスの実現を目指し活動を行っている。これらの実証研究により創出される技術は、山梨固有の社会的問題（内陸県で山間へき地が周辺に遍在、高齢化の進行、高率で存在する専門医師不在の市町村、約87万人の県民をたった2人の眼科医が支える時間外医療の現状）を解決し、地域住民の生活向上に貢献する。本プロジェクトのこれまでの経緯と現状、今後の課題を述べる。

キーワード：地域医療、遠隔診療、眼科、遠隔操作ロボット、グループウェア

1. はじめに

山梨県は、甲府盆地を中心として、四方を富士山と南アルプス、八ヶ岳連峰、奥秩父山地に囲まれた典型的な内陸県である。県域の約8割が山間部だといわれ、県境に近づくほど（東京都との境であっても）中山間地が広がる。その多くが山間へき地であり、住民の高齢化が急速に進み、同時に専門医療の過疎状態が常態化している。

このような背景のもとで本研究では、情報通信技術（Information and Communication Technology, ICT）を活用して、山梨県域に専門医療を提供することを目的とする。具体的には、情報通信ネットワークを介した遠隔操作型の眼科診療装置を開発・運用することによって、甲府盆地の中核病院に勤務する眼科専門医が、周辺の中山間地の眼科患者を、現地に眼科医がいなくとも診断できるというサービスを実現する。眼科の定期健診サービスを提供できれば、失明の可能性もある緑内障や糖尿病網膜症といった自覚症状のない病因を早期発見することも可能になる。また、麦粒腫や結膜下出血などの多くの眼疾患も現地において早期に適切な対応が出来る。これにより専門医療過疎地域にある中山間地域住民の生活向上が期待できる。

一方、休日・夜間（時間外）における救急医療という観点では、山梨県は現在、約87万人の県民を2人の眼科医で担当しているという危機的状況にある。時間外に眼科を受診した場合に山梨県民は、県内のどこに住んでいても、甲府盆地にある中核病院に何らかの移動手段で訪れざるを得ないのである。その背景には、眼科は、他診療科の医師では診断が極めて困難な専門科だという特殊事情がある。

本研究で実現する眼科遠隔診療システムについて、プロジェクトの全体像を付録の図A1に示す。

2. 地域における位置づけ

2.1 地勢的特徴と地域医療の課題

山梨県の総人口は約87万人であり、行政区分における関東地方では最も小さい県である。甲府盆地を中心とし県境に向かって中山間地が広がり、しかもそこに国内の上位2位までの雄峰が含まれるという地勢は、山梨県特有である。それだけに厳しい山間へき地が県境に存在する。また山梨県は、全国平均より高い高齢化率を有している。具体的には、65歳以上の老年人口割合（対総人口）が21.9%であり、これは全国平均20.1%よりも高い。中山間地にも当然、多数の高齢者が居住している。

山梨県の医療施設は59病院と604診療所から構成されている。このうち、眼科は18病院と34診療所で診療が行われている。図1は山梨県内の眼科の分布を示す。円の大きさが大きいほど眼科医が多くサービスを提供していることを意味する。図1からは、多くの眼科が市街部（特に甲府市を中心とした範囲）に集中し、眼科が存在しない市町村が特に県境地域に数多く存在することが分かる。

この分布は、休日・夜間という通常時間外の救急医療においてさらに顕著となる。図2は時間外の救急サービスを提供している眼科の分布である。ここから分かるように、救急外来を受け付けているのは、甲府盆地の2中核病院（山梨大学医学部附属病院、山梨県立中央病院）だけである。ただし、山梨県立中

央病院はオンコール体制を取っており、夜間や休日でも眼科医が常駐する医療施設は、山梨大学医学部附属病院（中央市）のみである。したがって山梨県内で眼科の救急外来を受診する場合には、患者は、県境の市町村でなくても甲府盆地まで何らかの手段で（エネルギー資源を使って）移動しなければならない。このような厳しい医療環境の中で約87万人の県民の眼科診療が行われているのが実態である。

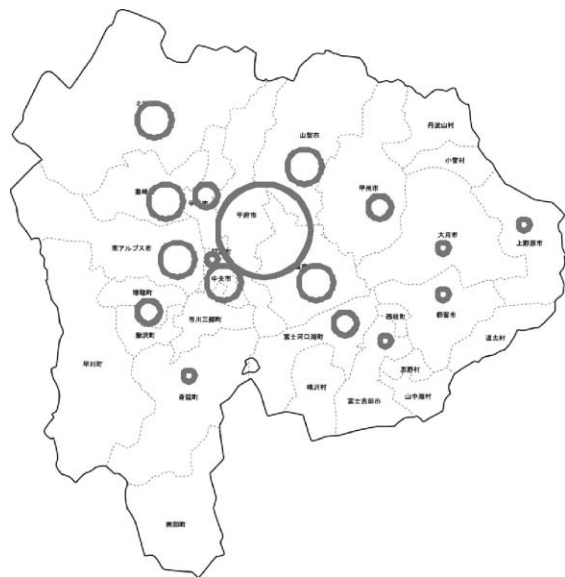


図1. 山梨県内の眼科医分布（通常時）



図2. 山梨県内の眼科医分布（時間外）

それでは、どのくらいの患者が時間外に眼科を受診するのであろうか。平成17年度に山梨大学医学部附属病院に訪れた救急外来受診者は6,314名である。このうち最も多かったのが産婦人科（29.2%：第1位）であった。次いで眼科（12.6%：第2位）、小児科（6.9%：第3位）と続く。眼科は他の診療科と比べても、救急外来の受診者数が多いのである。このことから、眼科の時間外サービスを広く県民に提供することがいかに重要であるかが理解できよう。

一方、眼科は一般の医師によって代替することが極めて困難な診療科である。眼科診療では、まず細隙灯顕微鏡などの特殊な光学機器を用いて基礎的な診断を行う（図3）。細隙灯顕微鏡を用いた診察は、医師が本体を手動で3次元移動させて診察部に焦点を合わせ、さらにそれを微調整して移動させながら行う。したがって使いこなすためには長期間の訓練が必要であり、一般の医師には基礎的な診断にとりかかることすら困難である。このような事情から、短期間で多数の眼科専門医師を養成することも期待できない。また細隙灯顕微鏡を用いた診察の場合、疾患部の異常を数値化することは出来ず、診断は眼科医の定性的な判断で行われるために（図4）、医師間での異常所見の共有化が困難である。このため疾患の改善や悪化の判断が適切に行われないことも発生する。



図3. 細隙灯顕微鏡の利用風景

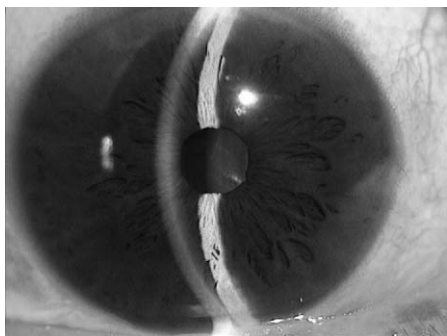


図4. 細隙灯顕微鏡を用いた診断時における医師のビュー

以上のことから、山梨県内の中山間地域の住民、さらには約87万人の県民全体の生活向上のために、これらの社会的問題を解決しなければならない。視覚から得られる情報は、すべての外界から得られる情報の80%以上を占めるといわれている。視覚障害は、本人の生活の質を低下させるのみならず、患者家族の負担や医療費の増大、ひいては社会福祉の低下も引き起こす。すなわち、本研究では、山梨県が抱える緊急の社会的問題を直接取り扱う。

2.2 ICTによる解決

以上のような山梨県が抱える社会的問題を、著者らはICTによって解決することを試みる。情報通信ネットワークを介した遠隔操作型の眼科診療装置を開発・運用することによって、甲府盆地の中核病院に勤務する眼科専門医が、周辺の中山間地の眼科患者を診断するというサービスを実現する（付録図A1）。

本研究における技術的に特有な点は以下の通りである。従来型の遠隔診断サービスは患者の診察を眼科医が行ない、そこで得られた画像情報を静止画像の形で上級眼科医に送り適切な対処法を相談するものである。したがって、本研究で想定しているような患者のいる現地に眼科医が存在しない状況には対応できない。本研究においては、眼科専門医が細隙灯顕微鏡を遠隔操作することによって、患者のいる現地に眼科医がいなくとも病疾患部位に対する精細な観察を行い、静止画像や動画の転送を行なうことで遠隔地のみに眼科医が存在していても正確かつ実情に即した診断を行うことが可能である。

実現シナリオを付録の図A2に示す。ここでは、時間外診療に関する問題点と解決法を示している。

3. システムの実現

システム開発プロジェクトを進めるにあたって、特に著者らは、眼科領域での遠隔診療の技術的実現可能性を模索するだけでなく、開発の初期段階で本質的な要求を抽出し、ユーザビリティ^[1]の高いシステムの開発を目指した。本質的な要求が反映された利用効率の高いシステムを構築できれば、医師が無駄な操作に時間をとられることがなくなり、結果として多くの時間を患者に提供できるからである。このために著者らは、システム開発において、人間中心設計アプローチをとってきた。本節では、眼科遠隔診療システムの設計と実装について、特に設計初期段階で用いた人間中心設計アプローチを詳述する。

3.1 人間中心設計アプローチ

人間中心設計とは、対話的に操作する（インタラクティブな）機器やシステムの開発において、使う人間（ユーザ）の立場や視点に立って設計を行うことをいう。特に、ユーザビリティの高い機器やシステムを設計するために、分析と設計、評価を繰り返すような設計プロセスを基本としている^[2]。

人間中心設計の領域では、開発の初期段階で本質的な要求を抽出し、ユーザビリティの高い製品やシステムを導出するために、多数の手法が提案されている。以下にその代表例を示す。

- ・作業場への訪問：製品やシステムが実際に使われる場となる作業環境の調査
- ・インタビュー：実際のユーザに対する聞き取り調査
- ・ペーパー・プロトタイプ^[3]：紙製のプロトタイプを使ったユーザビリティの評価
- ・ペルソナ^[4]とシナリオ^[5]：具体的なユーザ像と典型的なシステムの利用状況の表現

また、これらの代表的手法に加えて、次の手法を用いてインタビューの支援を行う。

- ・テクノロジー・イマージョン：技術的可能性を示す数多くの事例の提示

これらの手法を使う背景には、分析と設計、評価を繰り返すような設計思想（繰り返しによる設計）がある。

システム設計初期に描いた眼科遠隔診療システムの実現イメージを図5^[7]に示す。シス

テム開発の初期には、眼科医とロボット研究者、細隙灯顕微鏡メーカー技術者が、ICTを用いた眼科遠隔診療の技術的実現可能性を議論した。そして、既存の細隙灯顕微鏡にモーターと制御装置を組み込んで「ロボット化」することによって、遠隔操作を行うという方針をたてた。この基本アイデアをもとに、具体的な設計活動を開始した。

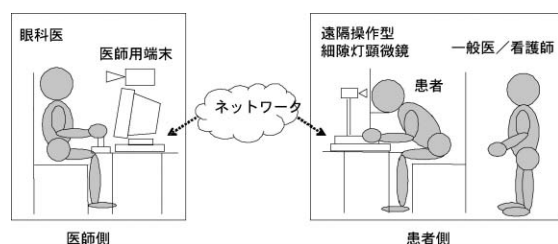


図5. 眼科遠隔診療システムの実現イメージ

3.2 開発初期段階での要求獲得・分析

基本アイデアをもとに著者らは、実際のユーザに対する要求調査を行った^[6]。具体的には、眼科医の作業場（診察室）を訪問し、眼科医が行う診療活動に対するインタビューを行った。さらに、具体的に医師用操作端末を設計するときには、ペーパー・プロトタイプを複数作成して、眼科医に操作してもらい、動作バージョンのプロトタイプを構築する前に、インタフェースの評価を行った。ペーパー・プロトタイプを用いた評価セッションの様子を図6に示す。



図6. ペーパー・プロトタイプピンギ風景

ペーパー・プロトタイプピンギのセッションは、ユーザインタフェース案の評価に加えて、デザインに関する新たなアイデアを模索する場でもあった。そこで我々は、インタフェ

ースを実現する様々な部品を持ち込み（テクノロジー・イマージョン）、タッチ画面とジョイスティック以外の選択肢を検討するように眼科医に促した。ハードウェアのスライダやプッシュボタン、ゲームコントローラ等を検討し、最終的にタッチ画面とジョイスティックを採用することになった。また、ジョイスティックについても、スティックのねじり操作を入力値として扱える製品を利用することになった^[7]。

問題状況を明らかにしてプロジェクトメンバー間で共通理解を形成するために、ペルソナとシナリオを作成した。具体的には、本眼科遠隔診療システムによって恩恵を受ける患者の具体像を描き、またシステムが活用される状況を、文脈を保つように描写した。このようにして得られた成果物が、付録図A2に示したペルソナとシナリオである。

4. プロジェクトの現状と課題

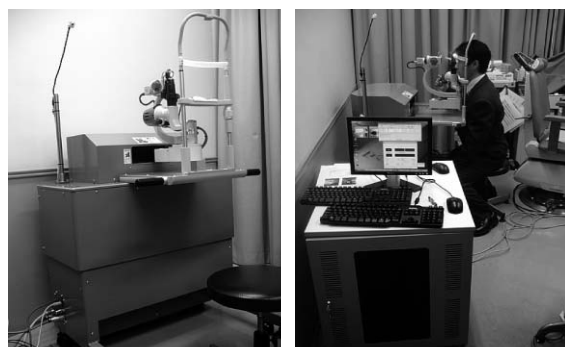
4.1 繰り返しによる設計の推進

本研究では、ペーパー・プロトタイプを開始点とし、複数の動作バージョンの試作機を作成して評価することによって新たな試作機の改善へつなげるという、いわゆる繰り返しによる設計を行ってきた。

図7は、平成19年度に試作した遠隔眼科診療システムである（第2号機に相当する）。この段階では、細隙灯顕微鏡の制御機構とその筐体は大きく、生産工場 で用いられる工作機械に似た形状であった（図7（a））。また、細隙灯顕微鏡部と通信制御装置が別筐体に収納されており（図7（b））、空間的制約のある病院の診察室には、実質的に設置することが難しかった。さらに、医師用端末には遠隔地の患者ととれるコミュニケーションの種類が限られており、患者側の部屋で生じている事象を確認するのが困難であった（図7（c））。

これらの動作バージョンの利用評価をもとに、平成20年度に構築したシステムを図4と図5に示す。細隙灯顕微鏡の制御機構とその筐体のサイズを小さくし、さらに通信制御装置を一体化することによって、病院の診察室に十分に設置できる程度に構築することができた。また、顕微鏡映像と別に、音声と画像による双方向通信チャネルを用意することによって、遠隔地の医師から、患者側の部屋で生じている事象をより詳細に確認できるような機能を追加した。構築時には、車椅子患者

が利用できるサイズを確保し、さらに顕微鏡が稼働範囲内に収まるような安全装置を付与した。平成20年度後半には、構築したシステムに対してLAN内でのテストを繰り返してきた。以上から、本格的に運用が行える基盤が構築できた。



(a) 細隙灯顕微鏡部 (b) 通信制御部 (手前)



(c) 医師用端末

図7. 遠隔眼科診療システム
(動作バージョン：第2号機)

本システム使ったサービスを実際に開始する上で、眼科過疎地域での遠隔診療サービスの実現可能性の確認と、実証実験に基づくネットワーク性能の評価が課題として挙げられる。本課題については平成20年度に評価を開始した。具体的には、著者らが構築した上記の機器を中心に、山梨県南巨摩合同庁舎（南巨摩郡鵜沢町：眼科過疎モデル地域）と山梨大学医学部との実証実験を行った。この実証実験において本システムが、構内LANを超えて広域ネットワーク上においても活用可能であることを確認できた。また予備実験の結果からは、段階的に顕微鏡映像の品質を落とし、5Mbps程度まで帯域を絞った場合においても、医師の診断が可能であることが分かった。



図4. 遠隔眼科診療システム
(動作バージョン：第3号機) 細隙灯顕微鏡部・正面

また、山梨県立中央病院と山梨県庁、山梨大学医学部の間で、ネットワーク状況の調査を行った。この結果をもとに現在、山梨県立中央病院眼科でネットワークを利用できる状況を現在構築中である。

これらの活動と並行して、眼科遠隔診療システムのユーザビリティ評価と細隙灯顕微鏡ロボットの要求要件の抽出を行っている。平成20年度には、非形式的な聞き取り調査、並びに、作業分析を繰り返すことによって、以下の要求要件を新たに抽出した。

1. 患者側における補助者（眼科ではない一般医または看護師）に対して、機器の説明が容易にできなければならない。
2. システム導入の効果を高めるため、他診療科にも対応できなければならない。

以上の新規要件に対応するために著者らは、速やかにシステムの追加修正を行った。具体的には、局所的に用いられるつまみ類を色分けし、名称を説明するラベルを付与した（図6 (a)）。この結果、遠隔操作中における医師からの指示の容易性が格段に向上した。また、他診療科への対応として、本システムの皮膚科への対応可能性を示した。具体的には、細隙灯顕微鏡のカメラ部に接続する専用アタッチメント（グリップつき）を新たに開発し、患者の皮膚疾患部を撮影可能なようにした（図6 (b)）。この新機能により、システム導入のメリットが増え、病院や地方自治体による導入検討の可能性が高まったと認識している。



(a) 細隙灯顕微鏡部・側面



(b) 医師用端末

図5. 遠隔眼科診療システム
(動作バージョン：第3号機)

4.2 課題

山梨県内の眼科過疎地域に対するICTを用いた眼科診断サービスの実現については、遠隔操作型細隙灯顕微鏡の開発により、技術的な準備が整いつつある。また予備実験を繰り返して、健常者による利用評価を積み重ね、実運用に耐えうることを確認している。この結果をもとに現在、実際の患者による実証実験を準備中である。

今後の課題としてまず挙げられるのは、実際の患者の意見を遠隔操作型細隙灯顕微鏡の設計に反映させることである。システムの操作は、主として眼科医が行うが、本システムのステイクホルダには、患者と患者側の医師・看護師が含まれるため、これらのユーザーへの配慮が不可欠である。



(a) 細隙灯顕微鏡部の外装デザイン



(b) 皮膚科対応タッチメント

図6. 遠隔眼科診療システムの改善

同様に、実際のサービスを実現する上で、関連組織の協力は不可欠である。著者らは、山梨大学医学部附属病院救急外来部との連携により、ICTの支援による山梨県内での救急医療体制の整備構築について具体的に検討を開始したが、現時点では完全に構築が完了しているわけではない。多数の組織が関係する

ため容易な作業ではないが、今後も継続して活動と働きかけを行う予定である。

5. おわりに

本プロジェクトでは、ICTを活用して、山梨県域に専門医療を提供することを目的とし、特に、情報通信ネットワークを介した遠隔操作型の眼科診療装置を開発・運用することによって、甲府盆地の中核病院に勤務する眼科専門医が、周辺の中山間地の眼科患者を、現地に眼科医がいなくとも診断できるというサービスの実現を目指している。

本稿では、その背景とその設計段階において我々が取り組んできた実現手法について述べた。現在までに第3号機を使ってLAN上での臨床試験、特に、第3号機と従来型の細隙灯顕微鏡との診断結果の一致性の評価を実施している。これらの知見をもとに、速やかに実運用フェーズへ移行し、地域医療への貢献をしたいと考えている。

謝辞

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）：「甲府盆地を中心とした中山間地を支援する眼科遠隔診療システムの研究開発（2008年～2009年）」により支援を受けている。

また、本研究における実験と調査の活動は、山梨県による地域公共ネットワークならびに合同庁舎施設及び機器類の無償供与により行

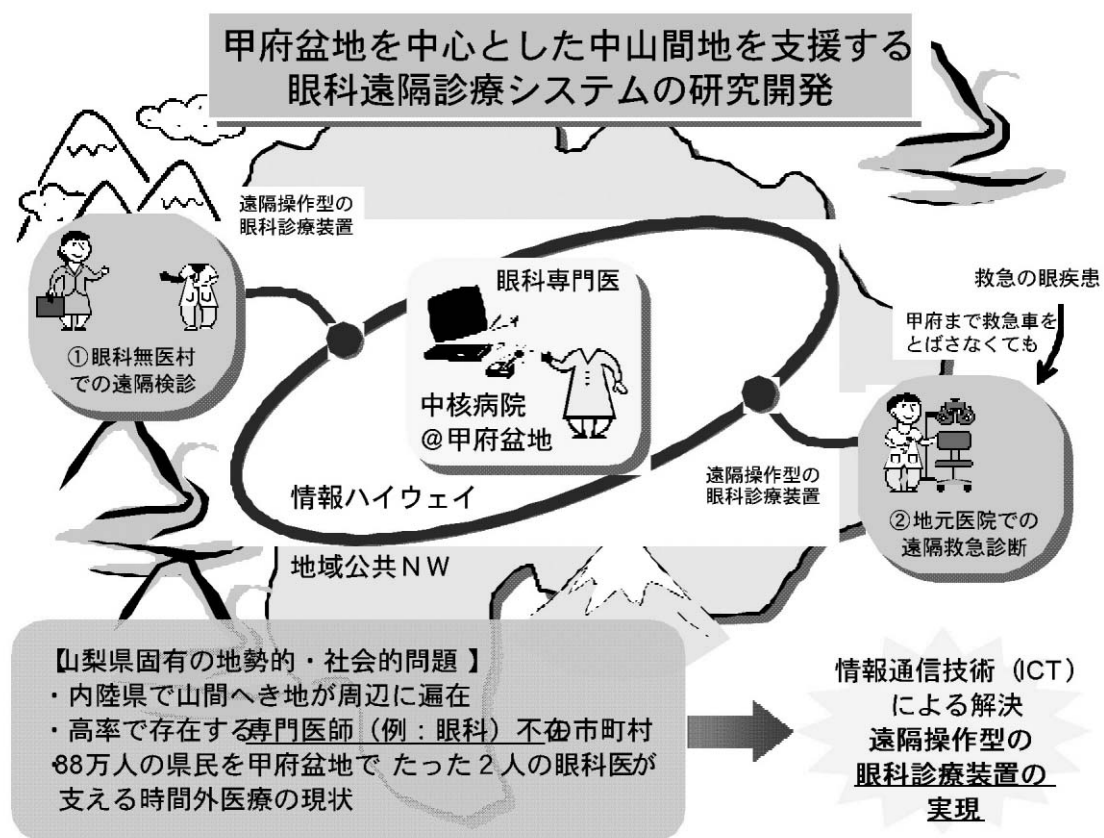
われた。山梨大学には、地域公共ネットワークへの接続回線の費用負担、及び、実験に必要な医学部内ネットワークの工事費を部分的に負担していただいている。

参考文献

- [1] ISO9241-11 Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals. Part 11 : Guidance on Usability, ISO, 1998.
- [2] ISO13407 Human-centred Design Processes for Interactive Systems, ISO, 1999.
- [3] Snyder, C. (2003). Paper prototyping : The fast and easy way to design and refine user interfaces. San Francisco : Morgan Kaufmann.
- [4] Pruitt, J. and Adlin, T. The Persona Lifecycle : Keeping People in Mind Throughout Product Design. Morgan Kaufmann, 2006.
- [5] Carroll, J.M. ed. Scenario-Based Design : Envisioning Work and Technology in System Development. Wiley, 1995.
- [6] Go, K., Ito, Y., Kashiwagi, K. Interaction Design of a Remote Clinical Robot for Ophthalmology. LNCS 2007; 4557 : 840-849.
- [7] 伊藤祐貴, 郷健太郎, 柏木賢治. 遠隔眼科診療ロボットのインタフェース設計, 情報処理学会研究報告, 2006-HI-121 (8), pp. 51-58, 2006.

付録

本研究プロジェクトの全体像を図A1に、想定しているペルソナ・シナリオを図A2に示す。



図A1. プロジェクト全体像：甲府盆地を中心とした中山間地を支援する眼科遠隔診療システム



ペルソナ（望月昌枝さん：過疎地域の独居高齢者）

望月昌枝さんは74歳。鰺沢町の山間に一人で住んでいる。息子夫婦は横浜で忙しく仕事をしているため、鰺沢の実家にはお盆と正月に顔を見せる程度である。年をとったので目や足腰が弱くなり血圧の薬を定期的に飲んでいるものの、幸い大きな病気をすることもなく、元気に過ごしている。老人会の会合にも、なるべく参加するようにしている。

シナリオ（望月さんの目に突然異変が訪れる）

望月さんに今年、老人会の回覧板当番が回ってきた。会長さんに話を聞いた後、初めての資料を仕分けすることになった。

自宅へ持ち帰って、寝る前に少し集中して仕分けの作業をしていると、突然目の前に大きなハエのようなものが飛んでいるのに気づいた。追い払ってみたが、ずっと目の前を飛び続けている。そのうち、それがハエでなく、どうも目の中にゴミが入ったのではないかと思い始めた。あまりに気になり、しかも突然で不安になったので、横浜の息子に電話することにした。

電話先で息子は「心配だから救急で病院に行け」という。しかし外は暗いし、しかも救急車が来ると、近所に迷惑がかかる気もする。

ケース1（救急車を呼んで甲府盆地へ向かう）

電話を切ってしばらくすると、突然救急車がやってきた。横浜の息子が手配したらしい。かなり大げさだし大事だという気がしたが、それだけ息子が遠方で心配しているのだろう。救急救命士が少し目を見てくれたが「念のため、病院へいきましょう」という。望月さんは救急車で、大学病院へ向かうことになった。

大学病院では眼科の当直医が対応してくれた。望月さんは細隙灯顕微鏡を使った基礎的な診察を受けた後、加齢による飛蚊症だと伝えられた。年齢から考えると緊急性を要する症状ではないとのこと。少し安心すると同時に「年をとった」と改めて感じた。

その後、望月さんはタクシーを使って大学病院から鰺沢の自宅へ帰った。

【問題点】

- ・急病人は自ら症状の程度を判断できないため、軽症でも救急車を呼んでしまうことがある（行政の経済的負担増）。
- ・山梨県の場合には、眼科の救急外来の選択肢は、甲府盆地に位置する大学病院しかない（特定小数の病院への負荷集中、患者の交通費の負担増）。

ケース2（眼科遠隔診療システムのある、地域の医院へ向かう）

電話を切って望月さんは、かかりつけの穂坂医院へ行くことにした。穂坂医院までは、歩いてそれほど遠くない距離で、しかも通いながれた道である。眼科が専門ではないのだが、幸い眼科遠隔診療システムが設置してあった。

穂坂医院へ電話をすると、穂坂先生が「それでは、ちょっと診ましょか」と答えてくれた。望月さんはすぐに荷物をまとめて医院へ向かった。

望月さんが到着するまでの間、穂坂先生は大学病院へ電話をかけて、大学病院の当直医と簡単な打ち合わせをした。そして、眼科遠隔診療システムの電源をいれて、準備を開始した。

医院に到着した望月さんに、穂坂先生は簡単な問診を行った。その後、穂坂先生の補助を受けながら、大学病院の眼科当直医による細隙灯顕微鏡を使った基礎的な診察を、遠隔操作で受けた。当直医の先生からは、マイクを通して、加齢による飛蚊症だと伝えられた。「緊急ではないので、急いで眼科にかかる必要はありませんよ。どうしても気になるようであれば、しばらく経ってから近くの眼科を受診してください」そう言って、隣町にある眼科の名前を紹介してくれた。

【ケース1の問題点の解決】

- ・症状の程度を（近くの）かかりつけ医院で判断できる。やみくもに救急車を呼ぶことを防げる（行政の経済的負担の軽減）。
- ・甲府に必ずしも行かなくても、初期診断を受けることができる（病院の負荷分散、患者の交通費の負担軽減）。
- ・緊急性に応じて、眼科専門医の支援を遠隔から受けながら、一般医が初期対応をすることも可能になる（患者への適切な初期対応）。

図A2. 本プロジェクトにおけるペルソナとシナリオ