

触覚研究に携わって

—ヒューマンインターフェイスとしての感覚代行研究—

中京大学心理学部 和氣 典二^{注1}

The research of touch and sensory substitution as human interface

WAKE, Tenji (School of Psychology, Chukyo University, Yagoto-honmachi, Showa-ku, Nagoya, 466-8666)

1. まえがき

私が工業技術院産業工芸試験所に入所したのは1967年であり、後に製品科学研究所、産業技術総合研究所と所名が変わったが、ここで本格的な研究生活を送ることになった。産業工芸試験所はデザインの研究所であったが、筆者が入所した頃がデザインの研究から人間工学の研究へと研究所の業務が変換しはじめ、やがて製品科学研究所と所名が変更した。そのとき同時に人間工学部が発足した。入所した当初は人間工学の研究として道路標識の視認性やグレアの評価法の研究にいそしんだ。また、この時代に視覚マスキングについての研究を学位論文としてまとめたりしていた。道路標識の視認性の実験を当時開業前であった中央道の西桂で行なったり、グレアの研究に眼球運動を適用したことなどは懐かしい思い出である。そのうち清水豊氏（現電通大教授）を製品科学研究所に迎え、武市啓司郎氏とともに視覚研究のグループを立ち上げた。これが今日の産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門の一つの出発点であったともいえよう。その後、視環境の快適性、バイオニクス総合研究、住宅照明の快適性などの特別研究で予算を獲得し、組織的に視覚の心理物理学の研究に従事した。このバイオニクス総合研究で、東京大学に在職していた鳥居修晃氏と共同研究を行い、この研究の発展が感覚代行研究に結びついた。

1976年に早稲田大学に在職していた大頭仁氏、鳥居修晃氏、国鉄中央病院内に在職していた市川宏氏（その後、名古屋大学医学部に異動）と今後の研究方向を相談をしているときに、自然発生的にでてき

たテーマが感覚代行の研究である。特に大頭氏が熱心に相談相手になってくれた。また、この研究に理解を示してくれた人に三平和雄氏（当時製品科学研究所人間工学部長、後に東海女子大学学長を務める）がおり、予算面や対外的交渉に力を貸していただいた。いずれにせよ、多くの方の援助協力なしにはこの研究は進まなかったことであろう。以下に感覚代行の研究とヒューマン・インターフェイスとしてのわれわれの触覚研究を紹介する。

2. 感覚代行とは何か

感覚代行とは何らかの原因で衰えたり、失ったりした感覚を健全な感覚系を使って代行することをいう。それでは、どのような感覚系が用いられているのか。表1は視覚代行と聴覚代行でどのような研究がなされているかを今日的に示したものである。

それでは、視覚障害者つまりロービジョン者の保有する視覚を通して情報をどのようにして伝達するか。これは古くから検討されてきた大きな問題である。一つは弱視レンズと呼ばれているもののように保有視覚の機能を拡大しようとするものである。次が人工眼の研究であり、神経生理学の進展と無関係ではない課題である。第三が本論の主題である他の

表1 代行の種類

| | 代行感覚 | 研究の内容 |
|------|------|------------------|
| 視覚代行 | 視覚 | ロービジョンの研究 |
| | 聴覚 | 文字を読み取り、音声で出力 |
| | 触覚 | 画像情報 |
| 聴覚代行 | 聴覚 | 人工内耳 |
| | 視覚 | バイオ・フィードバック |
| | 触覚 | tactile vocorder |

注1 twake@chukyo-u.ac.jp

感覚系を経由して視覚情報を提供しようとするものである。これらの研究が人間自身の機能の拡大、進展を図るものであるのに対して、一定の機能を最大限に活用できるためには、環境はいかにあるべきかという研究方向である。ロービジョン者の場合にはかれらの視覚特性を有効に働かせる視環境はどうあるべきかが問題となる。その一つがTV技術、携帯電話の技術を利用するものである。第二に券売機や銀行のATMなど不特定多数のひとが使用する機器を視覚障害者が利用できるように改善することである。これは個人情報が必要に外部にもれないためにも必要な研究である。第三にはロービジョン者が不都合なく生活するための視環境をどのように整えるかに関するものである。文字を大きくしたり、周囲の照明を明るく、しかもまぶしくなくするなど誰でも考えそうな事柄である。これについての詳細は別の機会にゆずる。

3. わが国における感覚代行研究

話を前に戻して、われわれが感覚代行の研究に着手した頃には Linvill & Bliss (1966) のオプタコンや Bach-y-Rita et al (1972) の TVSS の研究が注目されていた。まもなくオプタコンは盲人用読書器として商品化された。わが国にも輸入され、いろいろな施設で教育訓練がなされるようになった。また、TVSSを用いると、かなりのものが知覚、認知されるということで、視覚障害者あるいはその関係者がTVSSに多くの期待を寄せていた。オプタコンやTVSS以外にも Kay のソニックガイドという名の歩行補助器が開発されつつあった。このような状況にあって和気と清水が手がけたものはTVSSである。何故かといえば、機器開発以外に開発された機器を用いると、比較的容易に触覚の研究ができるという魅力があったからである。当時、触覚の研究は2点弁別閾や定位の誤差、あるいは刺激閾の研究以外に実験的研究はほとんどなされていなかった。研究のきっかけはいろいろあると思うが、研究者の少ない研究領域を選ぶということもあると考え、触覚の心理物理学について新しい観点から研究することにした。

4. 受動触用機器と触覚のパターン認識

図1はわれわれが開発試作したTVSS1号機である。



図1 TVSS 1号機 (和気・清水, 1975)

このシステムはカメラから取り込んだ画像を触覚刺激に変換して被験者の背中に提示するものである。このシステムの触覚ディスプレイは17個×17個の空気圧によって振動する素子から構成されており、直径1.8mmの先端の曲率を有する素子が12mm間隔で配列されている。画像に対応する領域のみの触覚素子は2.5Hzで振動する。その変位は3.8mmであり、白衣をつけて刺激を感じることができる。

このシステムでどの程度のパターンが認知されるかが問題となる。図2は2名の先天盲についてのパターン認知の訓練課程を示したものである。訓練をつむと、われわれの身の周りに存在する線画のパターンの違いをよく区別できることがわかる。だが、すべての人がこのような成績を示すとは限らず、成人してから失明した後天盲のなかにはかなり成績が悪い人もいた。いずれにせよ、触覚を利用すると視覚的情報をかなり良く伝達できることがわかったが、このシステムは大型すぎるという欠点があった。この欠点を解決しようとして小型ソレノイド素子の

| 被験者名 | 訓練前 | 訓練後 | 結果 |
|------|------|------|-----|
| 被験者A | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者B | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者C | △○□◇ | △○□◇ | 85% |
| 被験者D | △○□◇ | △○□◇ | 70% |
| 被験者E | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者F | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者G | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者H | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者I | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者J | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者K | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者L | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者M | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者N | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者O | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者P | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者Q | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者R | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者S | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者T | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者U | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者V | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者W | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者X | △○□◇ | △○□◇ | 75% |
| 被験者Y | △○□◇ | △○□◇ | 80% |
| 被験者Z | △○□◇ | △○□◇ | 75% |

図2 TVSSによる図形認知の訓練過程 (和気典二, 1984)

開発を検討してきたが、容易に開発できなかった。

いろいろ迷っているときサンフランシスコにある Smith-Kettlewell institute of Visual Science に滞在する機会を得た。当時、この研究所には Bach-y-Rita や Collins が感覚代行研究や眼球運動の研究を盛んに行っていた。今でこそ日本でも良く知られている若き日の Ken Nakayama やこの研究所からカリフォルニア大学サンタバーバラ校に移って行ったばかりの Jack Loomis もここで研究していたので、親しく交際した。特に Loomis が触覚の研究をしていた関係上その後もいろいろ世話になった。この研究所で 10×10 個のソレノイド素子からなる TVSS を用いてひらがな文字の読み取りの実験をしようとする研究所の Apkarian-Stearou と計画したが、滞在期間中には実行できなかった。だが、Dr. Collins の好意で小型ソレノイド素子をいただくことができ、帰国後その駆動原理を取り入れた素子を使って腹部用 TVSS (10×10 個) を 2 号機として試作して (図 3)、以下の文字の可読性の研究をおこなった。その頃、感覚代行を中心とする福祉関係の仕事が認められだし、法令改正とともに人間工学部第 3 課が発足した。山下由己男氏 (現九州大学教授)、菊地正氏 (現筑波大学教授)、佐川賢氏、斎田真也氏が加わり、感覚代行以外に視覚と触覚の心理物理学的研究を盛んに行なわれだした。だが、間もなく筆者は雑用の多さに閉口して宇都宮大学に転出した。

TVSS 2 号機を用いてひらがな文字の可読性を測定した結果は図 4 に示されている。静止モードとは一文字全体をディスプレイを通して腹部に提示するモードであり、移動モードは文字を電光ニュースのように右から左に動かすモードである。筆順モードとは文字を筆順に従って提示する。つまり、文字を



図 3 腹部用 TVSS (Saida, S. ら, 1982)

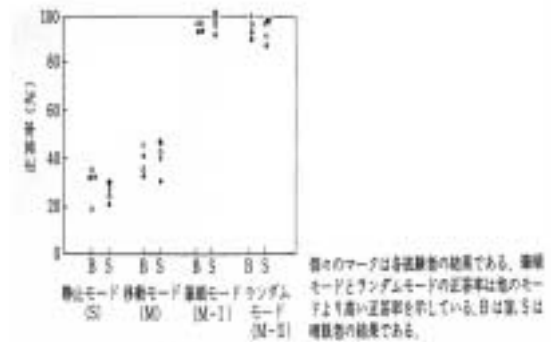


図 4 passive touch による刺激提示モードの効果 (Saida ら, 1982)

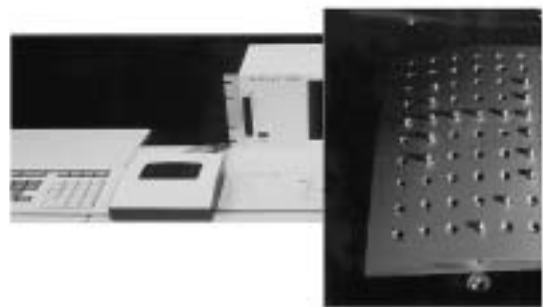


図 5 描画補助 (ソレノイド素子, 10×10 と 10×7, Wake, H. 1986)

構成している素子を少しずつ筆順に従って振動させるモードであり、ランダムモードは筆順どおりでなく文字を構成している素子がランダムな順序で提示されるモードである。文字を構成する素子が少しずつ提示された方が文字全体が一度に提示されるより明らかに高い可読性を示している。これらの知覚モードは受動触であるが、このモードであっても文字が読めるのは興味深い。その後、このタイプの素子をさらに小型化して手掌用として試作したのが図 5 に示す神奈川大学の 10×10 個の TVSS である。特徴的なのはリアル・タイムで自分が描いているものを触覚でモニターしながら文字や図形を描くもので、描画補助器として検討した。似たディスプレイは清水によっても作られている。

5. ウォータ・ジェット装置

受動触を利用する典型的なものはウォータ・ジェット装置であろう。筆者がスミス・ケットェル視科学研究所に滞在しているときに Loomis & Collins (1978) のウォータ・ジェット装置を用いて行った hyper acuity の論文を読み、興味をもったことが



ウォータージェット装置の外観



水流噴射部のクローズアップ

図6 Water jet (schimizu, Y. & Wake, T. 1982)

きついで帰国後にこの装置を完成させた。図6のノズルが上下左右に動くため、ノズルを通して水流が動いて一定のパターンを額に描くことを原理としている。身体がぬれないように図のように薄幕に水流があたる。このさい、温度が影響しないように一定の温度に加温した水を使用している。Hyper acuityは視覚で問題になった事柄であるが、触覚においても2点弁別閾より小さな解像力を示すものをこの名称で呼んだ(Loomis & Collins, 1978)。この装置を用いてどの程度空間的距離を動かせば出発点と異なる位置に動いたことがわかるかという距離を求めると、2点弁別閾や定位の誤差よりかなり小さくなる。この移動距離閾を実際運動の状態で求めた場合と、間歇的に刺激して求めた場合とを比較すると、実際運動の方がより小さい閾を示すというのがわれわれの結論である(Shimizu & Wake, 1982)。また、一筆書きができるひらがな文字の可読性も調べている。

6. 能動触用機器

次に、能動触のための装置も検討された。能動触は触運動知覚(haptic perception)ともいわれ古くから検討されてきた知覚モードである。受動触が皮膚の受容器の興奮に基づくのであれば、触運動知覚は皮膚の受容器の興奮と運動感覚の興奮に基づくものであり、手を動かすことによって対象が何であ

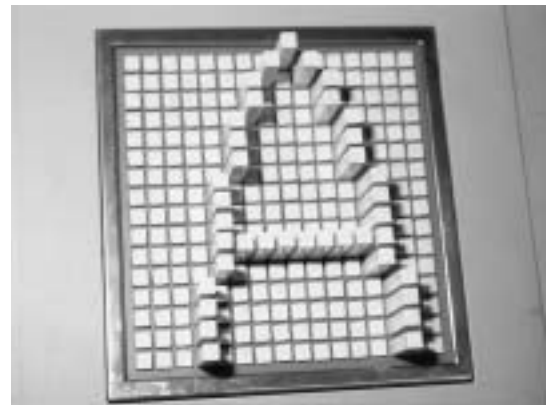


図7 3次元情報提示装置(清水・和氣, 1979)

るかを知る(Gibson, 1962)。対象を探索するとき、いろいろな手の動かし方がある。だからLederman & Klatsky(1996, 1998)が指摘するように具体的事物をいろいろの仕方で探索すればかなり正確に把握できる。だが、これらの事物は触覚ディスプレイ上には2次元パターンとして提示される。そのため、手の動かし方に制約が生じるので、知覚しにくくなることが考えられる。その上、視覚では視線と事物との関係が変わっても自動車なら自動車として知覚されるが、触覚では異なる形として知覚されてしまう。これは知覚学習の程度が視覚と触覚とは異なることによる1種の恒常性が成立しているかいないかと関連するかも知れない。

最初に試作されたものはステッピング・モーターとリリースである程度の高さまで任意に浮き上がり高さを図7のように任意に設定できる。刺激素子は16×16個であり、1個の素子の刺激面の大きさは8×8mmである。一方、高さの変化を無視して、On-offの2値信号でソレノイド素子のピンを浮き上がらせる自己保持型の装置を試作した。この装置は4×6個の小型ソレノイド素子から構成されている。それを用いてドット文字読みの実験を行った。結果は図8に示されている。つまり、提示時間が長くなると正答率は高くなる。この実験に参加した被験者は筆者(当時43歳)を除くと、小学校5年生であった。筆者の成績が低いことは一目瞭然である。これが筆者をして加齢の効果の研究にはしらせかけたのである。このときパターン認識における情報処理の流れを図8に示した。皮膚や手の動きから文字の部分を検出し、その情報を統合して全体としてのイメージを構成する。この統合に記憶系が参画するというのが骨子である。後述するように先天盲の方

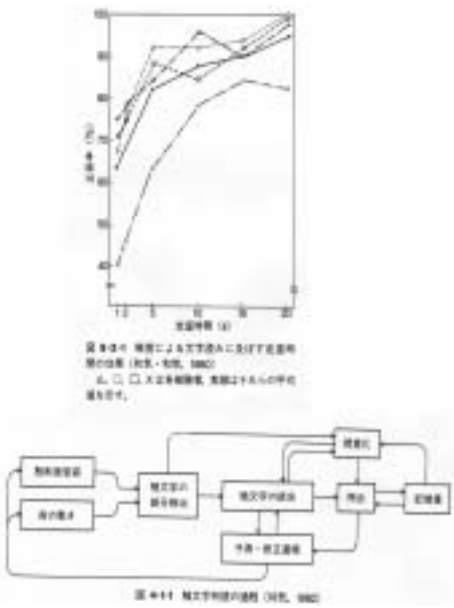


図8 ドット文字読みと触文字可読性の過程 (和氣典二, 1982)

が健常者より優れた成績を示すのは視覚化をするか否かの違いである。視覚化は記憶系に存在するとした点は興味がある。筆者のデータが部分検出のレベルに依存し、うまく検出できないのか、記憶系の低下に依存するか、双方に依存するのか不明であるからである。

この研究に刺激されてドット文字を紙面に打ち出す X-Y プロッタを製作した図9はそれで打ち出された紙面とプロッタを示したものである。文字の大きさが大きくなると、正答率が高くなり、可読時間が短くなるという結果を得た。また、先天盲の成績は他の被験者より良くなることや、漢字かな混じりの文章も読むことができる。この研究の発表を佐川が感覚代行シンポジウムで行ったが、インディアナ大学の Gr. Craig から招待されたときこの研究を NIH の会合で紹介して欲しいと言われたたことを



図9 点字プロッタ



Fig. 8 Hiragana "O" presented on CRT, LED, and Tactile Graphic Display.
図10 自己保持型触覚ディスプレイ

思い出す。その後、Wake. (1986) は 32×32 個ソレノイド素子を機械的に一定の高さに固定するという自己保持型のディスプレイを試作した(図10)。和氣・和氣(1988)はその装置を用いて触文字の可読性について顕著な加齢の効果があることを指摘している(図11)。これら一連の研究は点字コミュニケーションの基礎となって、製品化されるようになった。

7. 能動/受動触モード

和氣は高解像触覚ディスプレイを科学研究費補助金で1990年に試作した。図12は触覚刺激素子の並べ方を工夫してできるだけ密に並べたものである。このときにいくつかのソレノイド素子やピエゾ素子の検討をしていた。この装置の特徴は触覚素子の先端の高さをそろえたディスプレイであり、振動周波数を変えることができる。同時に手や指をディスプレイ上で動かして提示された図形を探索することができる。受動触と能動触の2つのモードを用いて、線分の解像力をみると、明らかに能動触の方が優れていることが指摘された(和氣・和氣, 1990)。

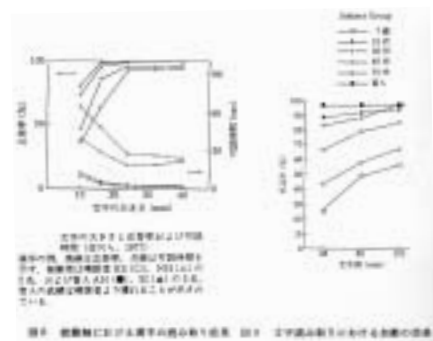


図11 漢字の読み取り 加齢の効果

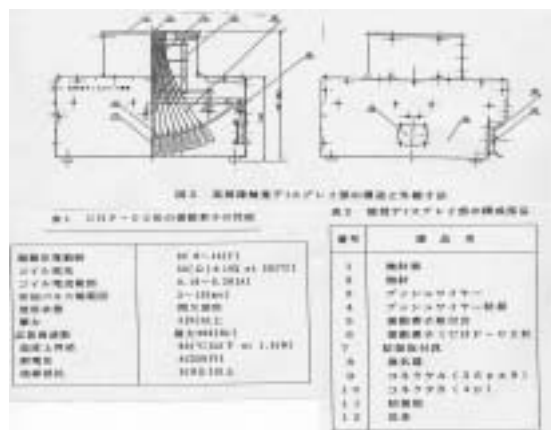


図12 高解像触覚ディスプレイの構造 (和氣典二, 1990)

最近、中京大学で40×56個のピエゾ素子を3mm間隔で並べた触覚ディスプレイを試作し(図12)、触覚探索や触覚のチェンジ・ブラインドネスの研究を行なっている。これらの研究ではディスプレイにいくつかの刺激を提示する。被験者には手掌あるいは指を自由に動かして妨害刺激のなかからテスト刺激(周波数や方向が異なる)を探すようにと教示されている。すると、彼らは手からはみ出している刺激を手あるいは指を大きく動かしながら捉える。これは能動触モードである。だが、ところどころで手の動きを止めて周波数の比較や方向の比較を行っている。このモードは受動触である。このような知覚の仕方がここでいう能動/受動触モードである。これは眼球運動の仕方と似ている。つまり、サッケードと停留との関係であり、サッケード中には情報処理は行わずに停留したときに情報処理を行う。これから類推すると、能動触では位置に関する処理しか行わずに受動触になってはじめて詳細な情報を取り入れ処理するのではないかということになる。今後は眼球運動と比較しながら触覚の研究を進めていこうと考えている。今回はロービジョンの研究を割合したが、別の機会にその成果を報告したいと思う。

最後に、筆者が主催してきた感覚代行シンポジウムも昨年で30回を重ねた。それを記念して30年間の研究の流れを紹介した。今回の内容もそのときの報告に含まれている。最近のわれわれの研究を紹介することは割愛したが、東京理科大学時代の教え子や中京大学の院生、研究生と一緒に楽しく研究を進めている。今後の彼らの発展を祈りたい。

刺激と手続き(触覚)

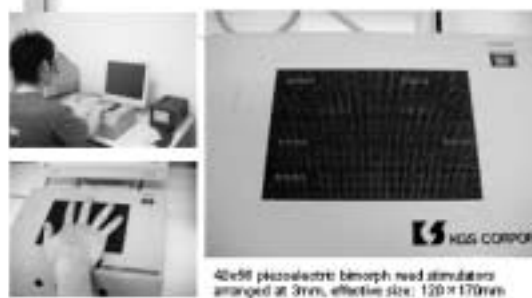


図13 中京大方式触覚の change blindness の実験風景

文献

- Linville, J.C. and Bliss, J.C. (1960) A direct translation reading aid for the blind. *Proceedings of IEEE*, 54, 40-51.
- Loomis, J and Collins, C.C. (1978) Sensitivity to shift of a point stimulus: An instance of tactile hyperacuity. *Perception and Psychophysics*, 24, 487-492.
- Lederman & Klatsky (1996, 1998)
- Wake, H. (1986) On tactile and visual system for visually handicapped individuals. *The journal of Psychology and Education*, Kanagawa University, 4, 47-70.
- 和氣洋美・和氣典二(1990) 高解像触覚ディスプレイによる2線の解像力と触パターン認識: 和氣典二(編) 高解像触覚ディスプレイの試作と精神物理学的評価, 昭和62年度・63年度・平成元年度科学研究費補助金(試験研究(1))研究成果報告書, Pp133-148.
- Bach-y-Rita, P. (1972) *Brain mechanisms in sensory substitution*. Academic Press, New York.
- Gibson, J.J. (1962) Observations on active touch. *Psychological Review*, 69, 477-790.
- 和氣典二・清水豊(1975) 視覚代行システム 計測と制御, 1975, 14, 910-918
- 和氣典二(1984) 知的活動の補助 市川宏, 大頭仁, 鳥居修晃, 和氣典二(編) 視覚障害とその代行技術. 名古屋大学出版会
- Saida, S. Shimizu, Y. and Wake, T. (1982) Computer controlled TVSS and some characteristics of vibrotactile letter recognition. *Perceptual and Motor Skills*, 55, 651-653.
- Wake, H. (1986) On tactile and visual system for visually handicapped individuals. *The Journal of Psychology and Education* (Kanagawa University). 4. 47-70.
- Shimizu, Y. and Wake, T. (1982) Tactile sensitivity to two types of stimulation: continuous and discrete shifting of a point stimulus. *Perceptual and Motor Skills*, 54, 1111-1118.
- 清水豊・和氣典二(1979) 盲人用3次元情報発生装置の開発(1), 製品科学研究所報告, 83, 1-7

- 和氣典二 (1982) 触覚的記憶 小谷津孝明 (編) 記憶, 現代基礎心理学 4, 東京大学出版会
- 和氣典二 (1990) 高解像触覚ディスプレイの試作と精神物理学的评价 昭和 62 年度・63 年度・平成元年度 科学研究費補助金 (試験研究 (1) 研究成果報告書)
- 和氣典二・和氣洋美 (1990) 14. 触覚. 関邦博・坂本 和義・山崎昌広 (編) 人間の許容限界ハンドブック, 朝倉書店