慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	触覚的身体の最毛端
Sub Title	Tip of hair as tactile body
Author	古川, 正紘(Furukawa, Masahiro) 稲見, 昌彦(Inami, Masahiko)
Publisher	慶應義塾大学アート・ センター
Publication year	2011
Jtitle	Booklet Vol.19, (2011.) ,p.70- 89
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	The optical the haptical 4#図版削除
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA11893297-00000019-0070

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

触覚的身体の最毛端

古川　正紘／稲見　昌彦

1. 裸のサル？

イギリスの動物学者デズモンド・モリスはヒトを「裸のサル」と称した。進化の過程で毛皮を捨てたことで、我々ヒトの触覚はどう変容したのであろうか？

ご存知のようにヒトも個人差はあるものの体表の大部分が体毛によって覆われており、真の意味で裸ではない。しかしながら触覚知覚の多くの研究は掌など無毛部を中心に研究されていた。

著者の一人である古川は、ある日突然足の剃毛（ていもう）を体験したときの驚きを今でも鮮明に記憶している。まるで今までの自分の足のように感じられなかったことに驚いたのだ。それは剃毛直後、ジーンズに足を通した瞬間に生じた。思わず、自分の足がデニム地に触れながら片足ずつ衣服に包まれていく様子に目をやり、本当にこれはデニムなのか？　と自問するほどであった。まるでデニムがビニールに化けたようだったのだ。デニムとはもっと柔らかく感じるものではなかっただろうか。しかしデニムは依然としてデニムのままであり、何一つ変わらない衣服に包まれながら自分の感覚が一変してしまったことで、しばらく戸惑いの渦中にいた。つまり信じきっていた自分の感覚がいかに脆弱であるかということを思い知らされるとともに、自分の体という殻が音を立てて崩れていくようにすら感じられた。

身なりを整え下宿先を出て大学に向かう道中、あまりにも衝撃的な出来事で思わず景色が変わって見えるようにも思われた。自転車にまたがり大学にも近づいてきたとき、いつの間にか左肘（ひじ）が痒くなっていた。いつもならポリポリと爪で軽くひっかけば痒みなどは解消されるはずだった。しかし期待通りにはいかなかった。何やらおかしいぞと腕を器用に操り、左肘を確かめたところ原因がわかった。剃り残したのだ。脛のついでに剃った腕であったが、肘は脛と違い起伏に富んでいるだけでなく肘を曲げたまま

腕を剃るのがなんとも難しく、数本を残して剃るのを止めてしまったらしい。緩い下り坂を進む自転車の上で、肘にある剃り残しが風になびく様子をしばし観察していた。そのうち、世界と自分との境目である身体(からだ)の表面で一体何が起きているのかについて強い興味を持つようになり、そしていつしか魅了されていった。

毛先から考える身体

先に紹介した事例から、我々の感覚は不変なものなのではなく、毛を剃っただけで著しく変貌してしまうような脆弱なものであるということがわかる。この人間の感覚は分類していくと多岐に渡るが、本稿ではその中でも物体に触れた際に皮膚表面に生じる感覚である「触覚」に着目する。そして触覚に着目するとき、自分のものと考えている体の表面は実は皮膚の表面ではなく、より外側にも及ぶ毛の先端なのではないかという「触覚的身体」という考え方を提案する。さらにこの考え方を用いて、毛という構造が自分の身体と世界の境目にどのように関わってくるのかを考えていきたい。この考察は主に、古川が博士課程において進めてきた研究に基づいているため未完成な部分も多い。しかしながらその過程でどのようなことが明らかになり、そして実現されてきたのかを中心に紹介していくことで、少しでもこの研究分野の魅力をお伝えできれば幸いである。

2. 触覚的身体とは何か

触覚的身体を感じよう

冒頭で紹介したエピソードは著者の個人的な体験であるため、もちろん一般的なものではない。しかし今すぐ簡単に試すことができるある体験を通して、著者の疑問は直ちに読者と共有できるのではないかと思われる。それでは早速、手や腕に豊かな体毛をお持ちの方は、毛先に指先で触れてみて欲しい。すぐ目のつくところに体毛をお持ちでない方は、自分のまつげに指先で軽く触れてみよう。もちろん目をついてしまわないように細心の注意を払いながら、まつげの先端に軽く触れてみて欲しい。どうだろうか。毛先に触れた際に「毛先に触れられた感覚」があっただろうか。恐らく毛先に触れた際に痒(かゆ)さに似た感覚が得られたことと思う。これは実に不思議な体験なのではないだろうか。

床屋や美容院に行って散髪してもらう時、悲鳴をあげる人はいないだろう。つまり髪の毛は切られても痛くも痒くもない。これは痛みを感じる神経が髪の毛すなわち毛髪に存在しないことを表している。これは先ほど触っていただいたご自身の体毛についても同じことが言える。もし神経が髭の中に通っていたら、毎朝髭を剃るときに激痛を我慢しなければならないだろう。一方で、指先に怪我をすれば痛みを感じる。神経が通っているか

らである。指先は自分の身体だろうかなどと問う必要がないくらい、自分の指は自分の体と言っていいだろう。では、「痛みを感じる範囲が自分の身体である」と定義するならば、切られても痛みを感じない我々の体毛とは自分の身体ではない、とするのが妥当だろう。しかし、今しがた我々は体毛に触れられたときに「毛先に何かが触れた」と明確に感じた事を確認した。つまり指先に触れられればそれと気づくように、体毛もまた触れられたことに気づけることを確認した。ということは「触れられたら気づける範囲は自分の身体である」と定義すると、毛先まで自分の身体であるといえてしまう。このように感覚に基づいて決定される身体の範囲に着目することで、思わず見過ごされがちな体毛までも明確に身体の一部として感じられることに気づかされる。この感覚のうちでも触覚というものに着目した「触覚に基づいて決定される身体」を、本稿では「触覚的身体」と名付けることにする。果たして、自分の身体はどこまでなのだろうか、この疑問が本稿の出発点である。

自分の体との一体感

体毛が自分の体の一部であることは紛れもない事実であるだろうが、ではいま着ている服や自動車、そして手に持って使う杖などは自分の体の一部だろうかと問われるとどのような印象を持つだろうか。視覚障碍者にとって杖すなわち白杖は視覚の代わりとして重要な役目を果たす。このとき白杖は、あたかも体の一部かのように振舞う。これをヒントに体毛について新しい解釈を加えてみたい。

進化論的な人間の体毛の解釈としては、表皮の物理的保護機能、保温機能、体液の蒸散機能という説明付けが与えられる★1。類人猿から人類へ進化する過程において、これらの機能は衣服に代替されるようになったと考えられる★1★2。しかし、体毛の必要性は触覚受容器官として、すなわち外界と接点として働いている、と考えることはできないであろうか。

体毛は表皮の延長と考えることができる。解剖学的には、求心性神経（感覚神経）が存在しない構造物が皮膚表面から突出し、毛根に存在する即応性受容器で体毛の動きを検出する。入来は、体毛は視覚代行手段としての杖に相当することから、これらは相同性をもつと指摘した★3。すなわち、手に把持した道具からの類推として、体毛が上げられると述べたのだ。感覚神経が内在しない構造を介して触覚を受容する点においての相同性が指摘された。つまり触覚は接触しなければ感覚を得ることができないが、この近接感覚という触覚の欠点を体毛、杖という付帯構造で補うことができるのである（図1）。その結果、触覚を介して知覚可能な空間領域を拡張することができる。

多くの哺乳動物の顔面鼻部隆起部の皮膚には、太いヒゲが整然と生えている。これらのヒゲは、直径が一般の体毛の数倍も太く（ラットやネコで約0.1〜0.2 mm径）、碁盤の目状に整然と配列し、毛根部に大きな静脈洞を持

図１　毛包受容器と道具を持つ手に存在する受容器の相同性★3 を改変して引用

つため洞毛と呼ばれている★4。洞毛の毛根は結合組織性の厚い被膜に包まれ、体毛を包む毛包には、多種多様な感覚神経終末が密に分布している★5★6。なお、男性の口ヒゲ（mustache）は一般毛と呼ばれ、洞毛と異なり区別される。一般毛は毛根に洞毛のような複雑な神経配置がなされておらず、毛包受容器がらせん状に毛根を取り巻いているだけである。にもかかわらず毛先に触れられたことを感じることができる点は大変興味深い。

柔らかいことの効能

「毛繕い」という言葉があるように、サルはグルーミングと呼ばれる行為を通して主従関係の確認や信頼関係を構築することが知られている★7。我々もまた愛情を伝えるために頭髪をなでることがある。言葉を交わしたり表情を用いたりとコミュニケーションの取り方は様々であるが、毛繕いや頭を撫でるという行為においては、お互いの「体毛に触れるという行為そのもの」が大きな意味を持つことになる。これは飼い猫を撫でることで癒されるとよく言われることにも通じる。

一見して柔らかい猫の様な毛並みは、思わず触りたくなるほどに魅力的であることから、触るという行為を自然に促すことができる装置を実現できるのではないだろうか。そこでまず柔らかさはなぜ魅力的に感じるのかという点を考え、柔らかさがどのように我々にとって有益な利用のされ方をしているのかについて述べていきたい。

毛皮は柔らかさを提供するためには適した代表的な素材である。この素材の柔らかさについては、Harlow らは小猿の観察を通して、次の興味深い示唆が得られる★8★9。まず、母猿を模した２つの人形を用意した。片方はワイヤーで形作り、もう片方はタオル地を被せてある。これらの偽物の母猿に対し子ザルはどちらになつくかを観察したところ、タオル地を被った人形が選ばれた。これは、人工物への親しみが姿形だけではなく、柔らかさや温もりといった要因に依存する部分が大きいことを示している★10。

さらに、精神分析の観点からも、素材の持つ柔らかさを用いる利点が指摘できる。例えば、精神分析家 Winnicott の言葉を借りて次のように説明できる。Winnicott は乳幼児の行動を観察することにより、移行現象と呼ばれる成長過程において重要な意味を持つ行動が生じることを見出した★11★12。乳幼児は指しゃぶりのような行動にともない、毛布やぬいぐるみなどの特に柔らかな対象を好み、吸ったり指と一緒に口に入れたりする。この行為は移行現象と呼ばれ、その際に使用される対象は移行対象と呼ばれる。

図２　猫に学ぶ設計論

また、毛皮も同様に柔らかさをもっている。人工毛皮はぬいぐるみの表面素材として頻繁に利用され、人間にとって親和性の高い皮膚感覚を提供する★10。また、天然毛皮は高い保温性といった毛皮独特の機能を持つため、服飾分野で多用されている。身にまとう素材として選ばれているという事実は、天然毛皮は表面素材として好ましい柔らかさをもつ、という裏付けとも言えよう。

柔らかさの作り方と生かし方

被服分野において、動物の毛皮素材は織物にはない風合いを持つ素材として位置づけられている。獣毛素材には軟毛と剛毛があり、羊毛（wool）が最も一般的に用いられている★13。その他の獣毛繊維としては、羊毛、山羊毛、モヘヤ、カシミヤ、アルパカ、ビキューナ、らくだ毛、馬毛、兎毛などがある。特にカシミヤ山羊の柔毛（うぶ毛）は、直径 14.5〜16.5 μm と繊維が細く非常に柔らかくて軽い。このように、毛皮素材すなわち獣毛素材は素材そのものが柔らかいという物性を持つ。この点が、毛皮素材が被服分野において利用される触覚的な側面といえる。一方で、物性としての柔らかさの他に、心理的な柔らかさについて次の興味深い指摘がなされている。Mochiyama らは毛状感覚の錯覚（Velvet hand illusion）を報告している★14。毛状感覚の錯覚とは、テニスラケットのようなガット状の鉄線を両手で挟んで軽く擦ると、両手の間に絹（もしくはベルベット）のような柔らかい布感覚が得られる、というものである。鉄線を利用した場合においても、掌の上で移動する連続的な刺激を行うことにより、柔らかさを知覚できることがわかる。鉄線という獣毛とは物性が大きく異なる構造を用

いても、毛状を想起させる感覚を提示できる点は興味深い。

また哺乳類型のロボットと触れ合うことで精神的安定を図る、アニマトロピーという手法が存在する。例えばShibataらのメンタルコミットメントロボットがアニマトロピーを目的に開発されたロボットである★15。メンタルコミットメントロボットとは、共存することを目的としており、かわいい・心地良いといった人からの主観的な評価を重視している。このようなセラピーを目的としたロボットに毛皮を着せる理由として、動物という見た目を現実のものに近づけるためだけでなく、触り心地を改善するという目的が挙げられている。また同様の事例として、Steve Yohamanらの The Haptic Creature Project が挙げられる★16。柔らかい毛状の表面構造を提供するという観点では、Uekiらの Tabby が挙げられる★17。Tabbyとはコミュニケーションの活性化を狙った照明器具の一種であり、公共空間へ設置することで往来する人々が Tabby に触れることで、会話の糸口を提供する事ができるとしている。これは思わず触りたくなるという毛皮の側面をうまく活用した例といえよう。これらの手法で課題となるのは、注意を持続させられるかという点である。そのために手足を動かすなどの応答している様子をユーザに対して返すことが重要である。

3. 触覚を得るためのメカニズム

触覚とは

では体毛と触覚の関連性について述べる前に、触覚そのものについて説明しておこう。

紀元前4世紀、古代ギリシャの哲学者アリストテレス（Aristoteles）は、感覚とは視覚、聴覚、味覚、嗅覚、そして触覚に分類した★18。これらのうち、視覚、聴覚、味覚、嗅覚はそれぞれの感覚受容をつかさどる受容器が個別に存在していることから、特殊感覚と呼ばれる。現在では感覚全般からこれらを除いたものを体性感覚（somatic sense）と呼ぶ。体性感覚は最も狭義の身体感覚に相当し、「身体の表層組織（皮膚や粘膜）や、深部組織（筋、腱、骨膜、関節嚢、靱帯）にある受容器が刺激された生じる感覚」である。これは特殊感覚、内臓感覚は含まれず、皮膚感覚、深部感覚を含んでいる。皮膚感覚とは触覚、温度感覚、痛覚を指し、筋や腱、関節など運動器官に起こる感覚は深部感覚と呼ばれる。本節では皮膚感覚に含まれる触覚に焦点を当て、生理学的知見についてまとめる。

触覚受容器

本論が対象とする触覚情報は、機械的刺激である。この機械的刺激に対し皮膚内部の触覚受容器が応答し、神経発火電位が生じ求心性神経を経て脳へ伝達されることで、我々人間は触覚を知覚する。我々の全身を包む皮

膚は、毛根の有無により2種類に分類される。毛根のない掌、足の裏、粘膜などは無毛部に、その他の毛根が存在する部位は有毛部に分類される。皮膚に存在する受容器の種類は無毛部・有毛部で差異があることが分かっている。我々が触覚と呼んでいるものはこのうちの機械受容器で受容される。そこでまず、機械受容器の種類について述べる

機械受容器の存在は、非侵襲の心理物理的手法と神経発火電位の計測を行う神経生理学的手法が双方の知見を積み重ね、明らかにされてきた。その結果皮膚内部の触覚受容器は、機械的刺激に対して異なった応答を示すことが分かっており、機械刺激に対する応答性の速さと受容野面積の広さがそれぞれ異なるため、主に4種類の分類が可能である。

無毛部についてまず即応性と呼ばれる受容器は、Rapid Adaptive（RA）およびPacinian（PC）の2種類が存在する。また、遅順応性の受容器は受容野の面積のことなる2種類が存在し、受容の狭いものをSlow Adaptive I（SAI）、広いものをSlow Adaptive II（SAII）とよぶ。機械受容器はRAがMeissner小体、PCがPacini小体、SAIがMerkel盤、SAIIがRuffini終末であると特定されている。

有毛部について

次に有毛部について述べる。有毛部の特徴は毛根を有していることである。また有毛部に特徴的な感覚神経として、C線維が挙げられる。Olaussonらは、次の事実から遅速C線維を原始感覚系に分類した★[10]。同報告では、多発性神経障害により鼻から下の全身にわたり太いC線維が失われた患者に対し、様々な刺激を皮膚に与えて調べた結果が報告された。その結果、ブラシでゆっくりとなでるような刺激だけは、有毛部である前腕と手の甲で知覚できたが、無毛部である掌では知覚できなかったことが分かった。さらに、ブラシの動く方向は識別できなかったことも明らかにされた★[19]。なおC線維が分類された原始感覚系は、触刺激により感情を喚起させる働きを持つとされる★[10]。以上の知見から、ブラシという毛状構造に対し感情を喚起させるという神経構造が生得的に存在していることが示されたといえよう。

無毛部と有毛部の違い

パチニ小体を発火させる振動刺激は一般的に用いられ、携帯電話の振動子として広く普及している。これは着信音という音響信号の代わりにとなる携帯電話からの触覚的な情報提示方法といえよう。この場合に利用される機械的振動には、パチニ小体の共振周波数250 Hzに近い周波数を持つ振動刺激が用いられることが多い。これはパチニ小体の発火には皮膚表面の0.1 μmオーダという微小な振幅量で済むためであり★[20]、人間の知覚特性を生かした望ましい設計といえる。

また、パチニ小体は有毛部・無毛部両方に存在するため★[21]、パチニ小

体を狙った振動刺激は体表面の広い範囲で振動を知覚することができるという利点を持つ。一方でこの例のように皮膚表面を情報提示界面としてみたとき、空間分解能が低いパチニ小体の受容に頼るしかないのだろうか。近年、皮膚に接触させた2つの突起を皮膚に対しせん断方向に回転させ、せん断方向応力を用いた刺激により情報提示が試みられた★22。指先に対し有毛部は一概に空間分解能が低いため、提示位置に情報を付加するのではなく、回転角度を用いて情報提示を試みた興味深い事例といえよう。

体毛の存在する有毛部皮膚

実際に体毛を介してもたらされる感覚について評価を行うために、定量化方針について検討する。皮膚の知覚特性は、異なる周波数応答特性を有する複数の機械受容器にて決定される。従って、広い周波数領域に対する応答を測定し周波数—閾値曲線を求めた場合、複数個の受容器の応答が重畳されながらもそれらの特徴を良く表すことが知られている。しかしながら、先行研究は有毛部皮膚に直接接触させた刺激に長らく注目しており、体毛を介して得た感覚に対して議論が深められているとは言えない。

そこで本章で取り扱う体毛を介した感覚について議論を進めるために、有毛部に関する組織学的、神経生理学的、心理物理学的知見をまとめる。

組織学的な特徴

ヒトの体毛は全て一般毛である。一方で、哺乳類などは毛根部の構造が特徴的な洞毛（触毛）を有する★7。これは顔面部にあるヒゲとしてよく知られている。この洞毛は毛根に多数の神経線維と血管が密集しており、解剖学的な構造はヒトの体毛と異なるものである。またヒトの皮膚を有毛部と無毛部とで比較したとき、有毛部にはマイスナー小体・メルケル細胞が存在せず毛包受容器、触覚盤があるとされる。

神経生理学的な特徴

Vallboらは神経活動パルスの記録により、皮膚有毛部にはSAI（遅順応性type I）、SAII（遅順応性type II）、FAI（速順応性type I）、FAII（速順応性type II）の4種類の神経活動があることを示した★23。さらに、それぞれの活動が触覚盤（SAI）、ルフィニ終末（SAII）、毛包受容器、field unit、パチニ小体（FAII）に由来することを指摘した★23。この対応関係を表2.1にまとめる。

体毛の毛根には毛包受容器が存在し、その神経活動はFAI（速順応性type I）に分類される。このことは単一の毛包受容器に対し電気的に刺激した際に振動感覚を生じたことからも支持される★24。

さらに近年、ヒトの皮膚に存在するC機械受容神経線維（C線維）の役割が解明されつつある★25。C線維は侵害神経とは区別される無髄神経線維である。ヒトの有毛部である前腕部を刺激した際、このC線維は

神経活動の種類	対応する触覚受容器
SAI（遅順応性 type I）	触覚盤
SAII（遅順応性 type II）	ルフィニ終末
FAI（速順応性 type I）	毛包受容器。field unit
FAII（速順応性 type II）	パチニ小体

表 2. 1：Vallbo らの神経活動パルス記録による対応付け★23

2.2 mN というわずかな押し込み力に対しても反応し、受容野も明瞭に記録された。この神経線維の記録は人間の手甲部でも実施されており、遅順応性受容器が 34%、速順応性受容器が 66% を占めているという結果が報告されている★26。

心理物理学的な知見

神経生理学的な知見は心理物理学的知見によっても裏付けが得られてきた。Bolanowski らは、垂直振動刺激を有毛部皮膚に与える心理物理実験を実施し周波数-検出閾値曲線を求めた。有毛部皮膚には P_h（Pacinian, hairy skin）、$NP_{h\ low}$（non-Pacinian, hairy skin, low frequencies）、$NP_{h\ mid}$（non-Pacinian, hairy skin, middle frequencies）の 3 種類の神経活動が存在することを示した★27。これらはそれぞれ、パチニ小体、遅順応性神経（SAII）、速順応性神経（FA）という 3 種類の神経線維により決定付けられていることを示唆するものであるとした。一方で、Miyaoka らは皮膚に対してせん断方向の振動刺激を用いて同様に周波数―検出閾値曲線を求めた★28。

ヒトの体毛に直接刺激を提示し心理物理実験を実施した数少ない例では、腕の有毛部に微小な空気塊を吹き付けた際の検出感度が、体毛を除去することで低下したと報告した★29。最近の興味深い発見に、水に腕をゆっくり入れたときに生じる水面の感覚（水面知覚）が体毛の寄与によるものであるという報告がある★30。しかしこれらの実験で用いられた空気塊や水は、体毛にだけでなく皮膚をも直接刺激しているだけでなく、体毛に実際に生じた機械的振動と検出感度の関連性は明らかにされていない。

4. ヒトの体毛の感度はどれほどか

体毛を介した触覚知覚閾値

本稿では皮膚有毛部上の体毛に着目し、体毛を介した感覚の定量化を行うことで、基礎的な知見を得ることを目的とした。そこで、体毛を直接刺激した際の「絶対検出閾値」を計測する。絶対検出閾値とは、主観的に刺激を検出可能な最小の刺激強度を表す。実験により直接的に得られる絶対検出閾値は、最も敏感な触覚受容器により決定される。それぞれの触覚受容器は異なる周波数応答曲線を描くことが知られている。本章では、体毛

図３　刺激装置の模式図　　図４　外観図

の存在する皮膚有毛部に着目し、体毛を介した振動刺激を与えた際の周波数応答曲線を得ることを目標とする。

今回対象とする範囲は、有毛部のうち実際に体毛が生えている部位である。この体毛による触覚への影響として、振動・圧力・温度などの物理量が挙げられる。ここで日常的な触覚体験を観察するとき、衣服との接触や風による作用もしくは頭を撫でる等の行為により、体毛は機械的な刺激を受けているといえる。そこで体毛への刺激として機械振動を用い、絶対検出閾値を測定し刺激周波数依存性ついて議論を行う。

体毛が外力を受けて振動するときの振動方向について考える。体毛が衣服などと接する際に生じる機械的刺激は、体毛の軸方向ではなく体毛側面方向で受けると考えた方が確率的に妥当である。そこでまず、考えられる体毛の振動方向の中でも皮膚接線方向の振動に着目する。そこで体毛を把持可能な機構をもち体毛の張力を制御可能な装置を開発した。これらの要件を満たす刺激装置の模式図を図３に、外観を図４に示す。振動方向である皮膚接線方向は同図の Vibration として示されている。

主観的な体験

計測後、実験者は被験者から任意の報告を受けた。そこで多くの被験者は、25〜40 Hz の低周波数領域では押されたような感覚である圧覚を、また 80〜600 Hz の領域では振動感覚をそれぞれ内観として報告した。全被験者は把持長さ条件にかかわらず、刺激周波数 160、250 Hz 条件下で腕を固定する台が振動していると報告した。多くの場合、刺激強度の変動に伴い 160 Hz では掌側のみ、もしくは中指側面のみが震えているように感じるという報告がなされた。また毛根に刺激を感じるのではなく、中指全体が振動していると報告する場合もあった。特筆すべきは、２名の被験者が温かさという温度感覚を生起したことである。特に被験者 A は 250, 320 Hz の範囲で暖かさを知覚したと報告している。同被験者は刺激周波数 250 Hz 条件下において、温度感覚は生起されるが振動感覚は感じないと度々回答した。

細すぎる体毛

先行研究で用いられた接触子のうち最も小さい断面積 $8.0\times10^{-3}\,\mathrm{cm}^2$ の

刺激子[★20]で得た絶対検出閾値と比較し、今回の実験で得た結果は周波数全域におよび絶対検出閾値が高い。この点は、体毛の持つ断面積の小ささが原因の1つと考えられる。そこで被験者の体毛の太さを測定した。その結果、直径は約22〜50 μm、断面積 3.8×10^{-6}〜2.0×10^{-5} cm^2 であった。Vallboの用いた断面積 8.0×10^{-3} cm^2 の接触子[★23][★31]、もしくはMiyaokaらの用いた断面積 4.9×10^{-2} cm^2 の接触子[★28]に対し、体毛の断面積は極めて小さいことがわかる。

従来の知見では、これ程までに小さい刺激子を用いた場合、周波数——閾値曲線には皮膚深部に位置する受容器の特性が反映されないことが知られている。これは微小な刺激子を介して提示された刺激は、皮膚深部へ到達する前に減衰してしまうため、皮膚深部の受容器を発火させないためである。

受容器の活動としての理解

Bolanowskiの結果からは、有毛部に対して断面積が 8.0×10^{-3} cm^2 の小さい刺激子を用いて刺激を行った場合、250 Hzで最も閾値が減少するというパチニ小体の応答を観察している。本実験の結果もまた、このような特徴的な閾値の変化が観察された。つまり、体毛を介した振動刺激がパチニ小体へ到達したと考えられるのが妥当である。皮膚内部での機械受容器の配置という観点からは、毛包受容器、触覚盤などと比較してパチニ小体は皮膚深部に位置するため、体毛を断面積が極めて小さい刺激子として考えた場合、前述の通り従来は刺激が到達しないとされてきた。

しかし刺激周波数160、250 Hz条件下で腕を固定する台が振動しているという内観報告を全被験者から得ている。予備実験では、台の振動は生じないことが次の方法により確認されている。つまり、体毛を把持した場合に閾値付近となる刺激強度を、体毛を把持せずに提示した場合、決して掌に振動を感じることがなかった。一方で、十分に強度が大きいために机を伝搬し台自体の振動として掌に感じられるほどの強い刺激強度は、閾値と比して十分にかけ離れていることも確認された。しかしながら、被験者全員が振動提示面は指の背ではなく固定台であると誤認識した。

以上の事実から、体毛を介した機械的刺激が皮膚深部に位置するパチニ小体を刺激していることが示唆された。特に、手掌部に刺激を感じたという内観報告からは手背部から手掌部への刺激伝搬によるものと考えられ、広い受容野を持つパチニ小体によりこれが検出されたものと考えられる。

毛包受容器および触覚盤の応答

実験において、多くの被験者が40〜250 Hzの領域で振動感覚を報告した。これは毛包受容器を個別に電気刺激した際に振動感覚を生じる[★28]。従って、100 Hz以下の周波数領域は、毛包受容器が主に応答したと考えて妥当である。一方で、周波数領域25〜40 Hzでは被験者は圧覚を報告

した。このことから、同周波数領域に対して応答した受容器は、毛包受容器ではなく遅順応性の触覚盤であると考えられる。遅順応性のメルケル小体は主観的な感覚である圧覚と関連が強いと考えられており、触覚盤はこのメルケル小体の集合体であるとされる★32。

C 線維および field unit と温度感覚

有毛部にはC線維や field unit が存在する。0.1 mN という微小な押し込み力を用い神経発火を記録した場合、SAI（Merkel）、C線維、field unit の順に高感度であると報告されている★23★25。このことから、25〜40 Hz という低周波数領域の検出閾値を決定したのは、field unit ではなく、触覚盤である可能性が高いと考えられる。また、field unit 受容野は平均 78 mm^2（最小 52、最大 115 mm^2）である一方で、SAI 受容野は平均 11 mm^2（最小 2.7 mm^2、最大 21 mm^2）と小さい★23。このため、毛根がこの受容野と重複した位置関係にあったか否かが、低周波数領域における閾値の大きな分散を生じさせた可能性があると考えられる。

また温度感覚を生じたと報告する被験者が存在したことを述べた。実験環境としては空調が整った防音室で実施したことから、局所的な温度変化が生じたとは考え難い。ここでC線維は温あるいは冷覚や痛覚を伝達する無髄神経として機能することが確認されている★33。この無髄神経は温冷覚を生じさせる受容体とともに機械的刺激によってもこの受容体が応答することが分かっている。従って本実験で観察された温度感覚の生起は、このC線維の応答によるものであることが示唆された。

体毛刺激して得られたこと

体毛を介した刺激により生起される感覚について定量的に記述することを試みた。そこで一定張力を提示した条件下において体毛に振動刺激を提示し、周波数依存性について心理物理学的手法を用いて計測した。その結果、皮膚に対して水平方向に振幅を持つ機械的振動刺激に対し、160、250 Hz に条件下で絶対検出閾値が有意に減少したことが確認された。一方で、振動刺激の提示位置条件である皮膚表面から 0.3、1.0 mm という違いは、閾値に有意な影響を及ぼさないことがわかった。

また刺激周波数 160、250 Hz 条件下で有意に閾値が減少したことから、皮膚深部のパチニ小体の活動が示唆され、内観報告もまたそれを裏付けるものであった。また 100 Hz 以下の検出閾値は、皮膚表在受容器である毛包受容器、触覚盤により決定される可能性を述べた。さらに振動刺激により温度感覚が生起されたことについて述べた。その結果、従来は極めて微小な断面をもつ刺激子からの刺激に対して応答しないとされてきたパチニ小体が、体毛を介した刺激を提示した場合には応答することを示唆する結果を得た。

毛を逆立てることによる視覚的身体像の拡張

哺乳類は自分の体温を維持するため[★34]、もしくは相手を威嚇するためなどに毛を逆立てる[★35]。つまり、立毛は体温維持という生理機能と、威嚇という社会的機能とを併せ持つ有効な手段なのである[★36]。哺乳類にとって立毛は、威嚇という社会的姿勢の提示のために使われているのである。社会的姿勢とは相手との関係を表す情報の一部である。このことから、哺乳類の体毛は身体を大きく見せるために積極的に使われた身体の一部であるということがわかる。興味深いことに、我々ヒトであっても動物の威嚇姿勢は一見して意味を汲み取ることができる。すなわち、ヒトに対しても意味のある情報を提示できる装置として活用可能といえる。

図５　立毛筋により生じる立毛

具体例を上げる前にまず動物の毛が逆立つ原理を紹介する。立毛は立毛筋により生じることが知られている。立毛筋とは、毛根付近に存在している筋肉の一種である。体毛（Body hair）、表皮（Epitheca）、立毛筋（Arrector Pili Muscle）の位置関係は図５（a）の通りである[★37]。図５（a）の様に立毛筋は通常弛緩しており、副交感神経が活性化すると収縮する[★38]。収縮した立毛筋は毛根を牽引し、結果的に体毛が起き上がる（図５(b)）。これが生物学的な立毛原理である。なお、猫だけでなく人間も立毛が生じることが知られている[★18]。例えば、大きな感動を得た際に鳥肌が立つのは、副交感神経が興奮することで立毛筋が収縮するためであり、毛根に体毛が残存する場合は結果的に立毛が生じる[★38]。人間の体表面には目で見てはっきりわかる体毛がほとんど失われているため、立毛としては観察されることは少ない。

工学的に毛を逆立てる

第一の毛状構造を総合的に制御する手法としては、静電気発生装置として一般的に知られるバンデグラフ起電機を用いた方法がある。バンデグラフ起電機に手を置くと人体が帯電し髪の毛が放射状に逆立つことから、同様の原理により立毛の再現が可能となる。しかしながらバンデグラフ起電機は比較的大がかりな機械的構造を有し、可搬性に富まない。昇圧器を用いた高電圧回路を用いることで小型化は可能となるが、人が手で直接触れる装置として利用することを想定しているため、感電などの危険性が存在し、人が触れる事例に適応するには適しているとは言えない。この具体的な事例として Philips 社の FABRIC DISPLAY が挙げられる[★39]。

第二の毛状構造を１本１本独立に制御する手法としては、Raffle らによる Super Cilia Skin が挙げられる[★40]。また Coelho らによる Sprout I/O が

図６　振動モータの取り付け位置（側面図）

挙げられる★41。これは形状記憶合金を刺入した毛糸やフェルトを用い、変形する突起状の毛糸などを能動的に質感が変化する素材として提案したものである。しかし、これらは突起状剛体の分布密度は動物の体毛と比較し極めて疎であり、一見して動物の毛並みを連想させることは難しい。

従来技術の問題点としては、制御の複雑さと毛並みの密度の低さの２点が挙げられる。制御の複雑さとは、毛状構造を１本１本独立して制御をおこなう必要がある事例では、制御対象となる面積が増加すると制御回路のコストは飛躍的に増加するため、広い面積に適用することが難しかった。また毛状構造を１本１本独立して制御を行うために、それぞれの毛状構造は疎に配置されていなければならず、視覚的な効果として哺乳類の毛皮のような密な毛並みを表現することができなかった。これは同時に、毛並みの持つ柔らかさ、触り心地を表現できないという問題も抱えていた。

そこで我々が提案した方法とは、天然毛皮の皮革表面に円盤型振動モータを貼付し、毛皮を振動させるというものである。予め外力により圧縮されていた毛皮を初期状態と呼ぶ。印加した振動を引き金にして、毛状構造間の見かけ上の静摩擦が急激に減少するため、毛状構造の弾性力により初期状態から立毛状態に遷移させることができる。この状態遷移は可逆性を持ち、振動印加を停止させ再び外力を与えることにより、立毛状態から初期状態へ遷移させることができる。

天然の毛皮は毛根付近に存在する立毛筋はもはや機能しないため、立毛を再現するための代替手段を考案する必要がある。そこで本稿では、体毛が本来持つ弾性力を利用し、予め圧縮状態にある体毛を、皮革部の機械的振動により開放することにより、立毛を再現する手法を提案する。立毛機構および初期状態を図７に示す。立毛機構は天然毛皮と円盤型振動モータから構成される。立毛は次のように再現される。まず天然毛皮を手などで撫でることにより毛並みを圧縮する。その後、毛皮裏面に貼付した振動モータで機械的振動発生させ立毛を実現している。

立毛の再現性の高さを維持しようと考えると、当然ながら人工毛皮の利用が考えられる。工業的に大量生産が可能で、均質な素材を安定して入手できるからである。また動物愛護の観点からも望ましいことである。しかし予備実験の結果から、人工毛皮における再現性は極めて低いことが分か

図７　立毛の発生前後（上図：立毛前、下図：立毛後）

図８　来場者は思わず手を引っ込めることもあった

った。これは前述の議論を踏まえると、静摩擦力の影響が大きいと考えられる。一般的に、人工毛皮は人工の体毛により構成される。成長の痕跡が凹凸として残る天然の体毛と異なり、紡績技術により作られる人工の体毛は毛軸表面がなめらかである。これが静止摩擦力の低下を招き、図６（a）に示した圧縮状態を実現できなかったものと思われる。つまり立毛しなかったのではなく、圧縮状態を作れなかったといえる。

また立毛により生じる視覚的な変化は、十分に大きいものであった。本技術は国際会議における技術展示会場にて、来場者が直接触れられるように展示された。展示者が予め毛を寝かせておき、来場者が手を近づけたことをきっかけに立毛させるという設定で展示を行った。展示の様子を図８に示す。このときの来場者の反応を観察し、立毛の視覚的効果について検討した。

図９　立毛により笑顔を集めるカメラ

展示者が予め毛を寝かせ、来場者対して毛皮に触れるように促した。数多くの来場者の手の速度は一様ではないため、立毛前に手が毛皮に触れることがあった。しかし触れる直前に立毛が生じた場合、来場者は反射的に手を引き戻していた。これは、熱いものに思わず触れた際に生じる反射的な動作に近い動作であった。毛皮に触れることなく反射に近い動作が生じたため、視覚的な効果のみで反射が引き起こされたのだと考えられる。従って、立毛により生じる視覚的変化は十分に人間に伝達可能であることがわかった。

従来動的な演出効果を持つ衣服を構成する素材として、表面色の変化や発光という機能を持った繊維が報告されている。外見上の変化を利用するという観点では、本手法も同様の機能を有しているといえるため合目的的である。また、本手法は可搬性に優れていることから衣服素材として容易に活用可能であるだけでなく、簡素な構造を持つため耐久性を持たせることも可能である。

天然毛皮の毛を一瞬にして立毛させることができるという動的な視覚効果は、哺乳類の立毛を想起させ、人に対して非常に魅力的な情報提示を行うことができる。この天然毛皮は動物特有の柔らかい肌触りを維持し、装飾として用いられる天然毛皮の特徴である視覚的効果も有する。また構造が簡素なため、装飾品として気軽に身につける、室内装飾として用いる、衣服や電子機器へ貼付するなどという応用が可能である。

例えば、図９のように、毛皮で覆われたカメラなどが考えられる。毛皮という目を引きやすい外観をしているだけでなく撮影直前に毛を一気に逆立てることで、より多くの笑顔を引き出すことが可能になるであろう。現在普及しつつある笑顔を検出したらシャッターを切るカメラと併用することで、笑顔をさらに写真に残しやすくなるかもしれない。さらに図10の

図 10　手が触れた瞬間緊張が頂点に達して「バババッ」と毛が逆立つ

ように腕に巻きつけて自分の感情を表に出すための装置として利用することもできる。自分の感情を表に出すことが難しい患者にとって、一種の暴露療法として用いることが可能かもしれない。バババッと毛が逆立つともはや自分の身体のようであり、自分の身体が毛によって拡張されたかのようである。また立毛させることで思わず触れたくなるスイッチを作ることができるかもしれない。

これらの例のように触覚的な印象をうまく設計に用いることで、思わず触れたくなるという外観を持たせることができる。すなわち設計対象の身体に触覚的な拡張を行う事ができるのである。このように触覚的身体という考え方を用いて、人の身体についてだけでなく設計について論じるとき、毛の果たす役割は小さくないといえる。

5. 触覚的身体の最“毛”端

冒頭ではあるエピソードを通して、主観的な体の表面は皮膚上ではなくて毛端であるかもしれないという疑問を述べた。これをきっかけに、触覚に基づいて決定される身体を触覚的身体と名付けた。このような考え方をすることで体毛によって自分の身体が拡張されているだけでなく、触覚の特性を巧妙に生かした設計へと応用できることを述べた。以上のことから、体毛の先端が身体と世界との境界であると捉えたとき、体毛から得る触覚は我々に有益な体験をもたらしているといえる。有毛部の触覚についての研究は着心地の良い服やリラックス法の開発などに繋がるであろう。将来的にはヒトがいったんは退化させた毛皮を新たな機能層として工学的に再現することに繋がることを夢見つつ筆を置きたい。

註

☆ 1 ── 犬塚則久。「退化」の進化学（ブルーバックス）。講談社、2006。

☆ 2 ── Marshall McLuhan、栗原裕（翻訳）、河本仲聖（翻訳）。メディア論 ── 人間の拡張の諸相。みすず書房、1987。

☆ 3 ── 入来篤史。Homo faber 道具を使うサル（神経心理学コレクション）。医学書院、2004。

☆ 4 ── 熊本賢三、榎原智美。洞毛の感覚神経終末：共焦点レーザ顕微鏡の応用。顕微鏡、Vol. 40, No. 1, 2005.

☆ 5 ── S. B. Vincent. The tactile hair of the white rat. *The Journal of Comparative Neurology*, Vol. 23, No. 1, pp. 1–34.
☆ 6 ── F. L. Rice, E. Kinnman, H. Aldskogius, O. Johansson, J. Arvidsson. The innervation of the mystacial pad of the rat as revealed by pgp 9.5 immunofluorescence. *The Journal of Comparative Neurology*, Vol. 337, No. 3, pp. 366–385, 1993.
☆ 7 ── A. S. Ahl. The role of vibrissae in behavior. *A status review*, Vol. 10, No. 1, pp. 245–268, 1986.
☆ 8 ── H. F. Harlow. The development of affectional patterns in infant monkeys. In B.M. Foss（Ed.）*Determinants of infant behaviours*, I. Methuen, 1961.
☆ 9 ── H. F. Harlow, R. R. Zimmerman. Affectional responses in the infant money. *Science*, p. 130, 1959.
☆ 10 ── 山口創。皮膚感覚の不思議（ブルーバックス）。講談社、2006。
☆ 11 ── D. W. Winnicott、橋本雅雄（翻訳）。遊ぶことと現実（現代精神分析双書第 2 期第 4 巻）。岩崎学術出版社、2000。
☆ 12 ── D. W. Winnicott. Transltional objectsand transitional phenomena. *International Journal of Psychoanalysis*, Vol. 34, pp. 89–97, 1953.
☆ 13 ── 大野静枝、山村明子、芦沢昌子、多田牧子、中橋美智子、渡辺聡子、石井照子、工藤千草、棚橋ひとみ。衣生活の科学 ── 衣生活論。建帛社、2000。
☆ 14 ── H. Mochiyama, A. Sano, N. Takesue, R. Kikuuwe, K. Fujita, S. Fukuda, K. Marui, and H. Fujimoto. Haptic illusions induced by moving line stimuli. In Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint, pp. 645–648, 2005. [40] H. Raffle, M.W. Joachim, and J. Tichenor. Super cilia skin: An interactive membrane. In CHI Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2003.
☆ 15 ── K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Tanie. Effects of robot-assisted activity for elderly people and nurses at a day service center. in Proc. of the IEEE Int. Conf. on *Robotics and Automation*, Vol. 92, No. 11, pp. 1780–1788, 2002.
☆ 16 ── S. Yohaman, K. E. MacLean. The Haptic Creature Project: Social Human-Robot Interaction through Affective Touch. *ACM SIGGRAPH* 2007 Emerging Technologies（*SIGGRAPH* 07）, p. 3, 2007.
☆ 17 ── A. Ueki, M. Kamata, M. Inakage. Tabby: designing of coexisting entertainment content in everyday life by expanding the design of furniture. in Proc. of the Int. Conf. on *Advances in computer entertainment technology*, Vol. 203, pp. 72–78, 2007.
☆ 18 ── 岩村吉晃。タッチ（神経心理学コレクション）。医学書院、2001。
☆ 19 ── H. Olausson, Y. Lamarre, H. Backlund, C. Morin, B. G. Wallin, G. Starck, S. Ekholm, I. Strigo, K. Worsley, 1A. B. Vallbo and M. C. Bushnell. Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex. *Nature Neuroscience*, No. 5, 2002.
☆ 20 ── S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 84, pp. 1680–1694, 1988.
☆ 21 ── E. R. Kandel, J. H. Schwartz and T. M. Jessell. *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill Education, 2000.
☆ 22 ── K. Bark, J. Wheeler, G. Lee, J. Savall, M. Cutkosky. A Wearable Skin Stretch Device for Haptic Feedback. in Proc. of Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 464–469, 2009.
☆ 23 ── A. B. Vallbo, H. Olausson, J. Wessberg, and N. Kakuda. Receptive Field

Characteristics of Tactile Units with Myelinated Afferents in Hairy Skin of Human Subjects. *Journal of Physiology*, Vol. 483, No. 3, pp. 783–795, 1995.
☆ 24 —— B. Scharf, J. Hyvarinen, A. Poranen, M. Merzenich. Electrical stimulation of human hair follicles via microelectrodes. Percept. *Psychophys*, Vol. 14, pp. 273–276, 1973.
☆ 25 —— J. Wessberg, H. Olausson, K.W. Fernström, and A. B. Vallbo. Receptive Field Properties of Unmyelinated Tactile Afferents in the Human Skin. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 89, No. 3, pp. 1567–1575, 2003.
☆ 26 —— T. Jarvilehto, H. Hämläinen, K. Soininen. Peripheral neural basis of tactile sensations in man: II. characteristics of human mechanoreceptors in the hairy skin and correlations of their activity with tactile sensations. *Brain research*, Vol. 219, pp. 13–27, 1981.
☆ 27 —— S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo. Hairy Skin: Psychophysical Channels and Their Physiological Substrates. *Somatosensory and Motor Research*, Vol. 11, pp. 279–290, 1994.
☆ 28 —— T. Miyaoka. Measurements of detection thresholds presenting normal and tangential vibrations on human hairy skin. *The 22nd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, Vol. 22, pp. 229–232, 2006.
☆ 29 —— H. A. Hamalainen, S. Warren, E. P. Gardner. Differential Sensitivity to Airpuffs on Human Hairy and Glabrous Skin. *Somatosensory and Motor Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 281–302, 1985.
☆ 30 —— M. Sato, J. Miyake, Y. Hashimoto, H. Kajimoto: Tactile Perception of a Water Surface — Contributions of Surface Tension and Skin Hair, EuroHaptics2010, pp. 58–64, 2010.
☆ 31 —— R. S. Johansson, A. B. Vallbo. Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of Physiology*, Vol. 286, pp. 283–300, 1979.
☆ 32 —— W. D. Willis Jr., R. E. Coggeshall. *Sensory Mechanisms of the Spinal Cord*. Springer, 2004.
☆ 33 —— H. E. Torebjork, R. G. Hallin. Identification of afferent C units in intact human skin nerves. *Brain research*, Vol. 67, No. 3, pp. 387–403, 1984.
☆ 34 —— HT Hammel. Thermal properties of fur. Am. J. *Physiol*, Vol. 182, No. 2, 1955.
☆ 35 —— J.A. Helgren. *Rex cats*: everything about purchase, care, nutrition, behavior, and housing. Barrons Educational Series Inc, 2001.
☆ 36 —— Frans B. M. Waal. Reconciliation and consolation among chimpanzees. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, Vol. 5, pp. 55–66, 1979.
☆ 37 —— C. Porth, K. J. Gaspard, G. Matfin. *Essentials of pathophysiology: Concepts of altered health states*. Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 60, 2006.
☆ 38 —— JH Burn, EH Leach, MJ Rand, and JW Thompson. Peripheral effects of nicotine and acetylcholine resembling those of sympathetic stimulation. *The Journal of Physiology*, Vol. 148, No. 2, p. 332, 1959.
☆ 39 —— Philips Electronics N.V. FABRIC DISPLAY. United States Patent, No. US 7,531,230B2, 2009.
☆ 40 —— H. Raffle, M.W. Joachim, and J. Tichenor. Super Cilia skin; An interactive membrane. In CHI Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2003.
☆ 41 —— M. Coelho, P. Maes. Sprout I/O; A Texturally Rich Interface. Tangible and Embedded Interaction, pp. 221–222, 2008.

（ふるかわ　まさひろ・日本学術振興会特別研究員 PD、電気通信大学
大学院非常勤職員ポスドク／ヒューマンインターフェース）
（いなみ　まさひこ・慶応義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授
／インタラクティブ技術、物理メディア、ロボット、エンタテイメント工学）