

〈原著〉

熱流束測定装置を用いた動物被毛の断熱保温機能の解析

岡崎 登志夫¹⁾、岩崎 哲巳²⁾

Analysis of heat retention and heat insulating functions of animal fur using a heat flux meter

Toshio Okazaki¹⁾ and Tetsumi Iwasaki²⁾

Summary The heat transfer (heat flux) on the surface of the back and abdomen of human, canine and feline was analyzed using a heat flux meter, and it was lower on the surface with much hair. A measure of canine or feline hairs put on the sensor of the heat flux meter was heated by an incandescent lamp, and the heat flux between the sensor and hairs was analyzed. The heat shielding rate of feline white hairs was higher than canine hairs, and the heat absorption by canine black hairs was larger than that by white hairs. The canine white hairs with more cavities exhibited slightly higher heat retention ability than those with fewer cavities. The light microscopic aspect of feline hairs showed that their surface readily reflects the light, and feline hairs had large cavities in their medulla to be useful for a thermal barrier.

Key words: Animal, Hair, Heat flux, Heat retention

I. 緒言

動物は外部環境に適応するために、進化の過程で表皮を様々に変化させてきた^{1,3)}。昆虫や甲殻類などの節足動物は外骨格を発達させ、哺乳動物は被毛を、鳥類は羽毛を発達させた。哺乳動物の被毛や鳥類の羽毛は外界からの光を反射したり、吸収したりして遮断し^{4,5)}、その一方で、

透過によって集光したり、さらに放熱を防ぐ役割を担ったりする⁶⁾。ヒトは、被毛が少ないために、衣服をまとうことによって太陽光を遮断したり、衣服の断熱、吸熱、保温機能によって寒冷に対応したりしている。今回我々は、特に哺乳動物の外部環境温度適応における被毛の役割を評価する目的で、ペルチェ素子を組み込んだ熱流束測定装置（ケージーエス株式会社）を用

¹⁾ヤマザキ学園大学動物看護学部動物看護学科
〒192-0364 東京都八王子市南大沢4-7-2

²⁾相模原市立市民・大学交流センター 補完医療研究会
〒252-0300 神奈川県相模原市南区相模大野3-3-2
受領日 平成27年1月24日
受理日 平成27年3月16日

¹⁾Yamazaki Gakuen University
4-7-2 Minami-osawa, Hachioji, Tokyo 192-0364, Japan
²⁾The Society for Complementary Medicine, Uni-Com
Plaza Sagamihara
3-3-2 Minami-ku, Sagamiho, Sagamihara, Kanagawa
252-0300, Japaan

いて、一定温度に設定された同装置の端子を体表面に接触させたときの端子—体表面間の熱の移動を経時的に測定し、解析した。ちなみに熱流束 (q) とは、単位時間に単位面積を横切る熱量で、フーリエの法則から、 $q = -\lambda \cdot dT/dx$ と表され、熱伝導率 (λ) や遮蔽固体の厚さ (dx) の影響を受ける温度変化量 (dT) で測定され、単位には W/m^2 が用いられる⁷⁾。本研究ではさらに、その熱流束測定装置の端子上に一定量のイヌやネコの被毛を載せ、光照射したときの端子—被毛間の熱流束を測定し、それぞれの被毛の集熱、断熱、保温機能を評価した。さらに光学顕微鏡及び偏光顕微鏡観察によって、その構造的特徴と熱流束データとの間の関係についていくつかの興味ある知見を得ることができたので報告する。

II. 材料と方法

1. 検査対象動物及び動物被毛材料の採取

体表面の熱流束は、健康な成犬 (チワワ：茶色直毛 3 歳♀) 及びネコ (雑種：白色 16 歳♀) の背、腹部で測定した。対照として健康成人男子 (63 歳) の背、腹体表面の熱流束も測定した。被毛の熱流束測定には、健康な成犬 (プー

ドル：黒色巻毛、プードル：白色巻毛、ピジョン・フリーゼ：白色巻毛) からグルーミングでカットされた黒、白色被毛を用い、ネコ被毛は、雑種ネコ (16 歳♀) から採取された白色被毛を用いた。本研究は、「ヤマザキ学園大学研究倫理指針、I 動物を対象とした研究倫理指針 (動物実験指針)」に従い実施した。

2. 検査対象動物体表面の熱流束測定

検査対象動物体表面の熱流束には、熱流束測定装置 (ケージーエス株式会社、小川町、埼玉) を用いた。熱流束測定装置は、20 mm×20 mm の測定端子を有し、その表面温度を 0~50℃ の範囲で任意に設定することが可能である。その端子を 25℃ に設定し、あらかじめ室温 25℃ の環境下に 30 分以上静置したイヌ、ネコの体表面に接触させ、約 30 秒間熱流束測定を行った。比較のために、ヒトについても同条件で測定した (Fig. 1 a, b)。

3. 被毛の熱流束測定

イヌ、ネコ被毛の熱流束測定は、熱流束測定装置と白熱燈照明装置 (100 V、75 W) を組み合わせて行った (Fig. 1 a, c)。本実験では、測定端子温度を室温と同じ 25℃ に設定し、その端

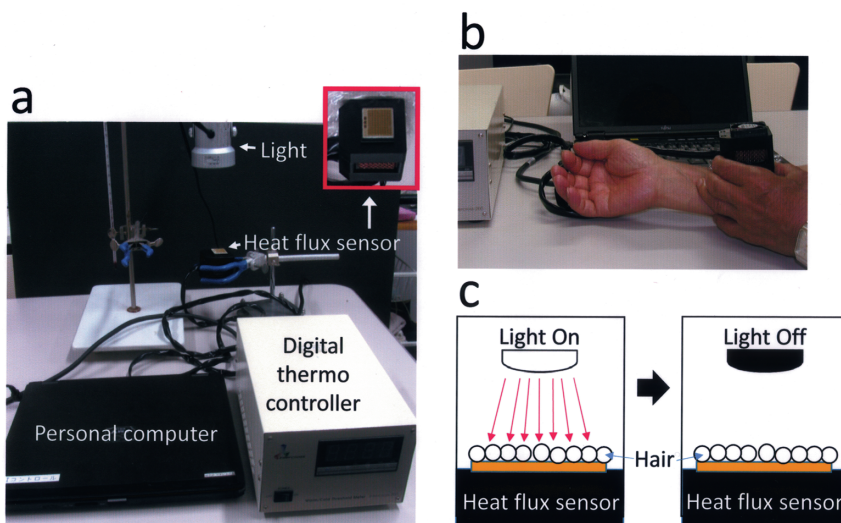


Fig. 1 Heat absorption experiment using a heat flux meter.

a: photograph of the heat flux meter; b: analytical method of the heat transfer on the human body surface; c: conceptual diagram of the experiment for monitoring the heat flux between the hair and the thermal sensor of the heat flux meter.

子上に一定量 (50 mg) の動物被毛を載せた。端子に向けて、高さ150 mmの位置から白熱燈点灯照射5分間、さらに、消灯後3分間、合計8分間連続して熱流束を測定した。

4. イヌ、ネコ被毛の光学顕微鏡観察とイヌ被毛髓質の3D化

イヌ、ネコ被毛を、青色または赤色インクに一晩浸して、インクの被毛髓質への浸透状態を観察した。次に×100倍で得られたイヌ被毛髓質画像をもとに、ImageJソフトを用いて、髓質壁面構造の3D化を試みた。

5. イヌ、ネコ白色被毛の光透過性観察

特にイヌ、ネコ被毛の重なり部に注目して、光学顕微鏡及び偏光顕微鏡を用いて観察を行った。光学顕微鏡観察に際しては、被毛の集光機能を明らかにするために、青インクに浸した状態で、背景の光量を落として観察した。偏光顕微鏡観察は、×60倍または×100倍のクロスニコルで行った。

Ⅲ. 結果

1. 動物体表面の熱流束測定

熱流束測定装置の端子を、環境温度と同じ25℃に設定したときの、イヌ (チワワ)、ネコ

(交雑種) 体表面の背部と腹部の熱流束を測定し、ヒト背部、腹部の結果と比較した。ヒトの熱流束は、端子接触直後、背部、腹部ともに急上昇した。これはヒト体表面温度が端子初期設定温度 (25℃) よりはるかに高いことに起因する。その後、熱流束は次第に低下し、30秒を過ぎると平衡状態に近づき、僅かに体表面から端子に熱が移動する状態となった。イヌ (チワワ) の腹部では、ヒトと同様の変化が認められたが、背部では、端子接触直後の熱流束の上昇は小さく、速やかに平衡状態となった。ネコでは背部、腹部とも端子接触直後の熱流束の上昇は、イヌ背部よりさらに低く、速やかに平衡状態となった (Fig. 2)。

2. 光照射による端子-イヌ、ネコ被毛間の熱流束の変化

熱流束測定端子の上に一定重量のイヌ、ネコ被毛を載せ、一定時間光照射し、その間の熱流束を測定した。対象として端子上に何も載せなかったとき (non hair) の熱流束を測定したが、点灯開始後急速に上昇し、消灯後速やかに低下した。ネコ白色被毛を載せた時の熱流束の上昇の程度は、イヌ被毛を載せた時と比較して小さかった。イヌ被毛のうち、黒色被毛を載せた場合、点灯によって熱流束の値は急速に増加したが、消灯後は、急速に低下した。白色被毛では、光

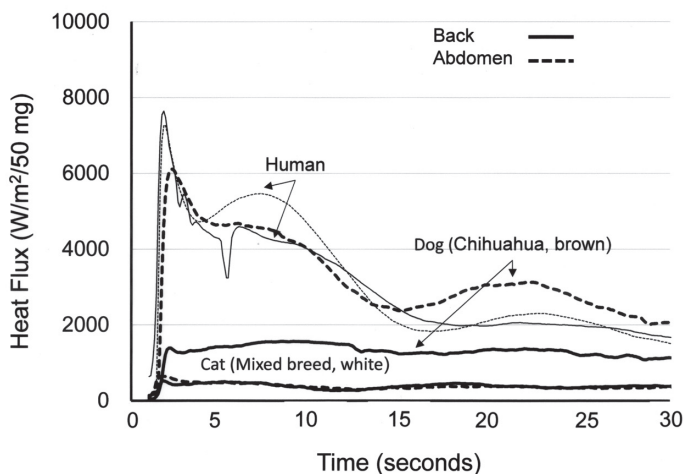


Fig. 2 Heat flux (heat transfer) on the animal body surface. Solid line: back; broken line: abdomen

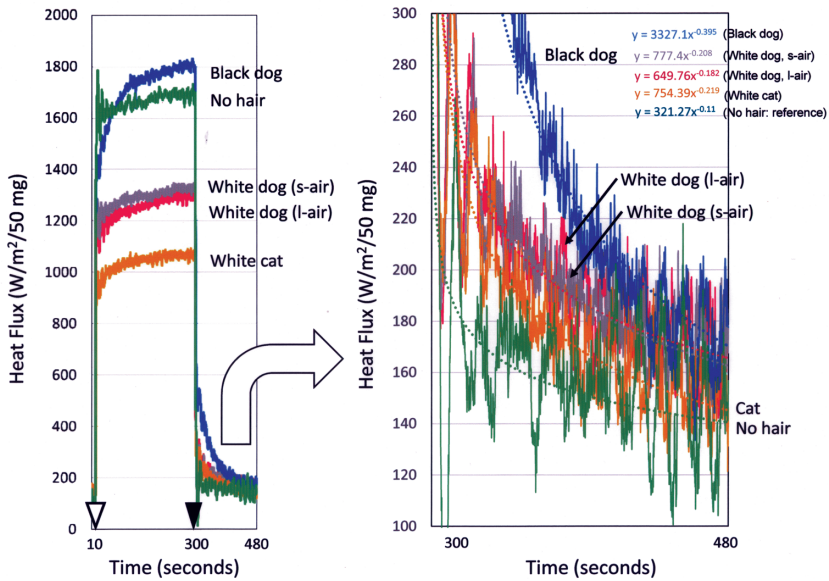


Fig. 3 Canine and feline white hair heat absorption and propagation experiment using a heat flux meter. The figure on the right enlarges the heat flux data in the figure on the left for after the light was turned off. The formula of regression curve of heat flux was shown on the upper right in figure. ▽: light on; ▼: light off; non hair reference: without hair sample; s-air: hair with small air volume; l-air: hair with large air volume.

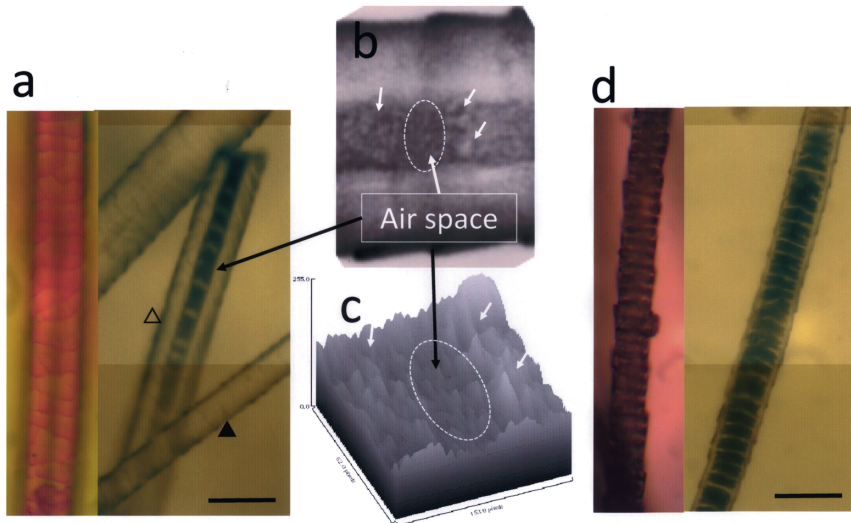


Fig. 4 Optical microscope observation of canine and feline white hairs. a: canine white hair cuticle scale pattern (left: epiillumination) and medullary cavity with injected pigment (right: transillumination), ▽: hair with cavity injected pigment, ▼: hair without cavity; b: enlarged photo of canine white hair cavity (dotted oval with arrow); c: 3D image of canine white hair cavity (dotted oval with arrow); d: feline white hair cuticle scale pattern (left: epiillumination) and medullary cavity with injected pigment (right: transillumination). Scale bar=100 μm

照射時、空洞の少ない方 (s-air) が多い方 (l-air) より熱流束の値が高かった (s-air: $1247.5 \pm 76.6 \text{ W/m}^2$; l-air: $1289.1 \pm 51.2 \text{ W/m}^2$)。消灯後は、いずれも熱流束の値は急速に低下したが、空洞の多い方が空洞の少ない方より熱流束の値はわずかに高く保持された (l-air: $197.4 \pm 34.7 \text{ W/m}^2$; s-air: $197.0 \pm 32.4 \text{ W/m}^2$)。消灯後の熱流束低下の程度をそれぞれの回帰曲線式の指数係数で比較すると、イヌ黒色被毛が最も小さく-0.395、次いでネコ白色被毛で-0.219、イヌ白色被毛は、空洞の少ないものが-0.208、多いものが-0.182であった (Fig. 3)。

3. イヌ、ネコ白色被毛表面及び毛髄質観察

イヌ、ネコ白色被毛を青色または赤色インキに一晩浸して、光学顕微鏡観察した。その結果、イヌ被毛の外殻表面のクチクラは滑らかで、髄質部には空洞があるもの (Fig. 4a▽) とないもの (Fig. 4a▼) が確認された。髄質部に空洞がないものは一般に細かったが、その割合は、犬

種や採取した体の部位によって異なっていた。イヌ被毛の空洞の内壁面は複雑な構造を呈していた。その様子を可視化するため、得られた写真から、3D画像化したところ、壁面に突起が多い構造であった (Fig. 4 b, c)。ネコ被毛の外殻表面のクチクラは鱗片状で表面に突出し、複雑な構造をしていた。内部にはインクが広く入り込み、イヌに比べて、より広い空洞域が確認された (Fig. 4 d)。

4. イヌ白色被毛皮質部の集光

イヌ、ネコ白色被毛の透過照明による光学顕微鏡観察に際して、被毛を青色インキに浸して背景を暗くして集光状態を観察したところ、イヌ白色被毛では、皮質部が光を透過し、凸レンズのように集光作用を発揮し、重なり部分が明るく見えた。一方、ネコ白色被毛では、被毛に占める空洞の割合が高く、かつ皮質部の構造が複雑で、凸レンズ様の集光作用を示さなかった。イヌ白色被毛の光透過、屈折現象は、偏光顕微

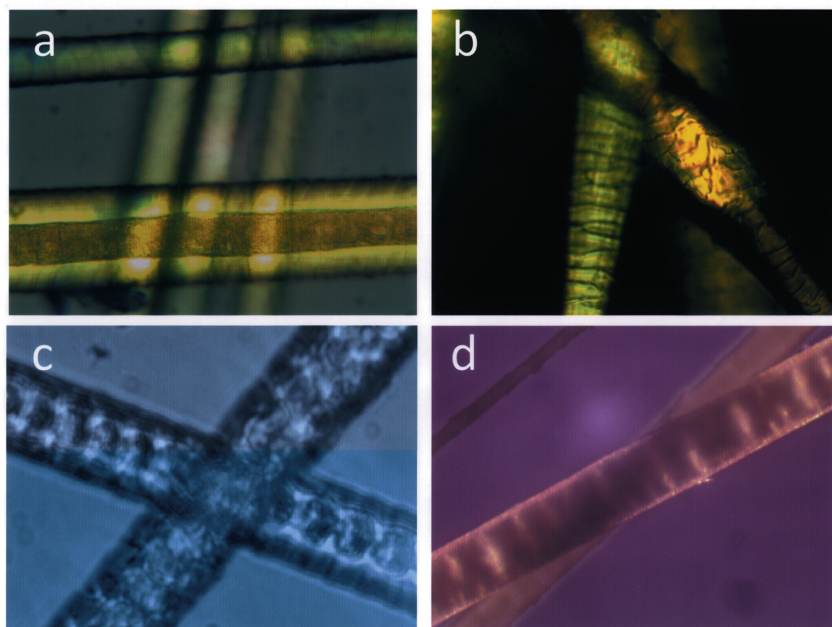


Fig. 5 Optical and polarized light microscope observation.

a, c: optical microscope observation of hairs soaked in blue ink; b, d: polarized light microscope observation; a, b: canine hair; c, d: feline hair.

鏡による観察でも確認された。すなわち、イヌ白色被毛では、特に被毛同士が重なっている部分で光の複屈折による偏光現象や、凸レンズ様に下の被毛の拡大像が観察されたが、ネコ被毛ではこのような現象は観察されなかった (Fig. 5)。

IV. 考察

さまざまな生物がさまざまな方法で厳しい地球の温度環境に適応していることはよく知られている¹⁻⁶⁾。しかし、生物のからだを形作るさまざまな構造の環境温度適応機能が必ずしも正しくは評価されていない。今回、我々は、熱流束測定装置を用いて、一定温度に設定された測定端子と動物体表面間のエネルギー移動の違いや光エネルギーに対する動物被毛の機能について検討した。被毛の少ないヒトの背部、腹部やチワワの腹部表面に比べて、被毛の多いチワワの背部やネコの背、腹部表面の熱流束の値が著しく低いことから、被毛は断熱機能を有することが明らかとなった。特にネコ白色被毛は、光照射実験で熱流束の値が最も低かったが、その被毛の表面構造は複雑で光を反射しやすく、髄質部には広い空洞があり、空洞の空気が暖まるのに時間を要し、断熱機能が極めて高いものと考えられた。ネコは中央アジアが発祥とされる

が⁹⁾、その地域の高温に対する適応能が高くなっていると考えられた。イヌ被毛のうち黒色のものは、点灯直後、熱流束が急増し、消灯すると急激に低下した。イヌ黒色被毛の吸熱能や熱伝導率はきわめて高いと考えられた。一方、白色被毛では、点灯時の熱流束は、黒色被毛とネコ白色被毛の中間の値を示したが、消灯後は黒色被毛やネコ白色被毛より高くなった。また、点灯時、空洞の多い被毛では少ない被毛に比べてやや低い値を示し、空洞内が暖まるのに時間を要するものと考えられたが、回帰曲線式の指数係数から、消灯後の熱流束の低下率はなだらかで、3分後には熱流束の値は僅かに高くなっていた。これらのことから、イヌ白色被毛の熱伝導率はネコ白色被毛の熱伝導率より高く、空洞スペースは熱エネルギー保持機能を有するものと考えられた (Fig. 6)。光学顕微鏡及び偏光顕微鏡観察によれば、イヌ白色被毛ケラチンタンパク質は光をよく透過し、被毛髄質部に空洞を有する場合、凸レンズのように光を屈折させることによって、集光機能を発揮し、空洞の空気を暖め、保温効果を発揮するものと考えられた。極地方に生息するホッキョクグマは、空洞のある白い被毛と黒いメラニンを含む表皮を持つことが知られている^{9,10)}。イヌの白色被毛も、ホッキョクグマのように、被毛のケラチンレンズで太陽光エネルギーを集め、髄質部の空洞の空気

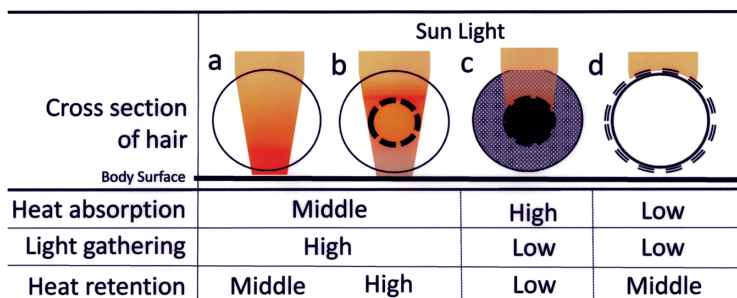


Fig. 6 Sunlight energy and heat absorption, light gathering, and heat-retention capacity of various canine and feline hairs. Heat absorption and retention were resulted from Figure 2. Light gathering was resulted from Figure 2 and 5. a: cavity-less canine white hair; b: canine white hair with cavities; c: canine black hair with melanin in the medulla and cortex; d: feline white hair.

を暖めて保温効果を発揮したり、メラニン豊富な被毛で吸光、吸熱したりして、例えば樺太犬のように極寒の地にも適応できるからだの作りになっているのではないかと考えられた。

V. 結語

熱流束測定装置を用いて動物体表面の熱流束を測定した結果、被毛が断熱機能を有することが明らかになった。特にネコ白色被毛は表面のクチクラ構造が複雑で、髄質部の空洞域が広く、断熱機能がイヌ被毛よりも高かった。イヌ白色被毛は、皮質部のケラチンタンパク質は、凸レンズのように集光能があり、髄質部に空洞がある被毛では、その中の空気が暖められ保温機能を有すると考えられた。一方、黒色被毛は吸熱能が高かった。

謝辞

イヌ被毛の採取等にご協力いただいたヤマザキ学園大学 福山貴昭助教、堀井隆行講師に感謝いたします。

文献

- 1) Adams RI, Hadly EA: Genetic diversity within vertebrate species is grater at low latitudes. *Evol Ecol*, DOI 10.1007/s10682-012-9587-x, 2012.
- 2) Brenner M, Hearing VJ: The protective role of melanin against damage in human skin. *Photochem Photobiol*, 84: 539-549, 2008.
- 3) Cho S, Shin MH, Kim YK, Seo Jo-E, Lee YM, Park Chi-H, Chung JH: Effect on infrared radiation and heat on human skin aging in vivo. *J Invest Derm Symp P*, 14: 15-19, 2009.
- 4) Babor H, Okab AB, Samara EM, Abdoun KA, AL-Tayib O, Al-Haidary A: Adaptive thermophysiological adjustments of Gazelles to survive hot summer conditions. *Pakistan J Zool*, 46: 245-252, 2014.
- 5) McCafferty DJ, Gilbert C, Thierry A-M, Currie J, Maho YLe Ancel A: Emperor penguin body surfaces cool below air temperature. *Biol Lett*, 9: 20121192, 2013.
- 6) 岡崎登志夫, 福山貴昭, 石野淳嗣, 堀井隆行, 川添敏弘: 紫外可視分光光度計を用いた動物被毛, 羽毛の簡易吸光度分析. *生物試料分析*, 38: 139-145, 2015.
- 7) 佐藤 実: 宇宙エレベーターの物理学. オーム社, 278-285, 2011.
- 8) O'Brien SJ, Johnson W, Driscoll C, Pontius J, Pecon-Slatery J, Menotti-Raymond M: State of cat genomics. *Trends Genet*, 24: 268-279, 2008.
- 9) He JH, Wang QL, Sun J: Can polar bear hairs absorb environmental energy? *Therm Sci*, 15: 911-913, 2011.
- 10) Rattal M, Balhamri A, Bahou Y, Deraoui A, Mouhsen A, Harmouchi M, Tabyaoui A, Oualim EM: Study of the optical properties of polar bear hair in the infrared range and their microscopic structures for passive control of temperature. *J Sci Arts Year*, 11: 217-222, 2011.