

# 高温環境での作業環境を改善する熱遮蔽着衣の開発と実用化

片岡 勲・今井良治・星野照生

熱中症の対策衣料品としては様々なものが開発／実用化されているが、従来のものは冷却効果の持続時間が2時間程度であったり、外気温が高いと効果がない等の問題があった。本製品ではチョッキ内部の給水バッグから散水された水を電動ファンで気化させることでチョッキ内温度を7度前後下げられ、最長40時間の連続使用が可能となった。本報では、本製品の基幹技術である毛細管層と透湿膜を用いた機能性伝熱面の効用、衣服に応用する開発経緯、本製品の实效性と今後について詳述する。

キーワード：熱中症対策、高温、熱遮蔽着衣、衣料品

## 1. はじめに

建設の施工における作業環境のなかで、作業者が置かれる熱的環境は最も重要なものの一つである。人間は、極寒の極地から炎熱の砂漠まで、極めて広範な熱的環境に適応することの出来る唯一の生物であるが、これは人間そのものの身体機能がこのような広い温度範囲に適応出来るからではなく、知能を持った人間が衣服や暖房、冷房等によって熱的な環境を制御し適した結果によるものである。実際には人間は熱には非常に弱い（生物一般がそうであるが）生物である。温度が42～43℃になると人間の細胞は破壊され人間は死に至ると言われている。また、体全体が高温にならなくても、脳、特に温度調整を司る延髄はもっと低い温度で機能を失い人体は重篤な状態に陥る。これは、特に最近夏期において熱中症として社会的な関心を集めているとおりである。

人間の体温は37℃を標準として非常に高精度に制御されている。人間の体温調整の仕組みは、血流や発汗、身体運動等によって非常に巧みに行われている。この機能によって、外界の温度の変化に対してもかなりの範囲で適応することは可能であるが、それでも、人間が実際に生活している温度範囲で人間の身体機能のみで温度調節を行うことは不可能である。

そこで考え出された温度調節のための手段は衣服である。衣服は、外界の温度が体温より低い場合には体温の低下を防ぎ、逆に外界の温度が体温より高い場合には外気による体温の上昇を防ぐ。また、太陽光を直接受ける場合は、衣服によって放射熱を遮蔽して体温

の上昇を防ぐ役割をする。人間は運動をしていない状態では100Wの発熱をしている。作業や運動をしている場合にはこれよりも発熱量は大きくなる。こうした内部発熱と、外気への熱の授受がバランスすることによって人間の体温は約37℃の一定値に保たれている。外界の温度が体温より低い場合、外界への熱の放出は大気への対流熱伝達が主たるものとなる。無風状態では自然対流熱伝達により、風がある場合には強制対流熱伝達により人体から熱が外気に伝わる。この対流熱伝達による熱の放出量は、大気に接する表面の温度と外気との平均温度の差に比例する。衣服の熱的な役割は衣服が体表面と外気との熱抵抗となり、衣服の表面の温度を人間の体の表面温度よりも低くすることである。これによって対流熱伝達による熱放出量を小さくし、体温を保つ。

外気の温度が体温に近づいてくると、熱の放出量は非常に小さくなる。今度は熱が十分に放出出来ないことにより体温が上昇する可能性がある。この場合には衣服を脱ぎ、体表面と外気の温度差を出来る限り大きくしたり、団扇や扇風機等で風を起こすことにより強制対流熱伝達による熱の放出量を増やして体温を保とうとする。これだけでは不十分な場合には人間は汗をかいてその蒸発による熱放出によって体温を保つことになる。

しかし、外気の温度が体温より高い場合には、衣服をつけないことは、却って外気から人体への熱の流入を大きくすることになる。この場合には、衣服をつけることによって、衣服表面の温度を高く保ち、外気からの対流熱伝達による熱の流入を防ぐ必要が出てく

る。また、このような高温環境の場合には、太陽熱の輻射を伴うことが多く、衣服はこの輻射熱の遮蔽にも役立つ。この場合、外部からの熱の流入を防ぐことが出来ても人体そのものの発熱量（100 W）を除去することが出来なければ体温は上昇してしまう。外気温が体表面の温度より高い場合には対流熱伝達での熱放出は勿論不可能である。しかし人体は非常に巧妙な機能を持っており、発汗してそれを蒸発させることによって、熱を放出し体温を保つ事が出来る。外気温が体温より高い場合の人体からの熱放出の手段は汗の蒸発による熱放出のみである。

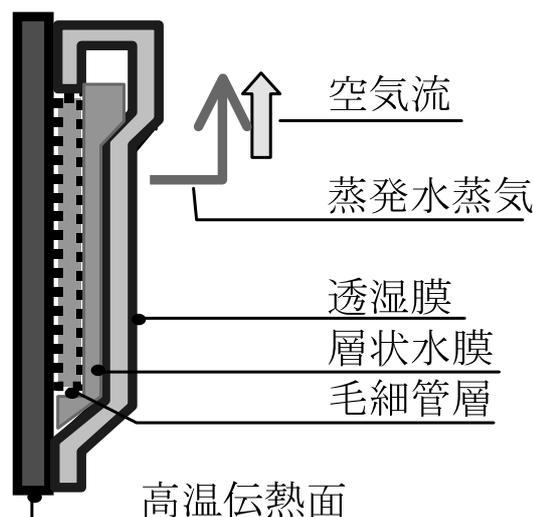
夏期の炎天下での建設作業や工場内で大量の熱を発生する機器があり工場内の気温が非常に高くなる場合等においては、上述の熱の放出を有効に行って体温の上昇を防ぐことが極めて重要となる。また、作業環境の点からは単に熱中症の危険を防ぐだけでなく、作業者がより快適に作業を行えるようにすることが重要である。こうした観点から、従来の衣服の概念と機能をより高度化し能動的な熱放出機能と熱遮蔽機能をもった作業服の開発が強く望まれるところである。こうした技術開発のヒントは実は人体そのものに備わった体温調節機能、すなわち発汗とその蒸発による熱放出機能である。筆者らは、このような蒸発による熱放出熱遮蔽機能を作業服に応用し、高温の作業環境下でも作業者の快適な環境を提供することの出来る熱遮蔽着衣（アクアメッシュ）を開発した。以下にその開発の経緯と機能について簡単に紹介する。

## 2. 透湿膜を用いた機能性蒸発伝熱面

上にも述べたように、人体からの熱放出において汗の蒸発によるものは非常に効果大きい。これは、水が極めて大きな蒸発潜熱を持つからである。沸騰や蒸発等の相変化を用いた熱伝達は単相の流体における熱伝達に比べ極めて大きく効果的であるため、熱交換器等に広く用いられている。また、日本家屋においては古くから打ち水をすることにより、玄関先を涼しくすることが行われていたがこれも蒸発熱伝達を有効に利用したものである。蒸発熱伝達の特徴は、伝熱面の表面の温度を周囲の気体の温度よりも低く保つことが出来ることである。これは、蒸発により伝熱面が冷却され温度が低下するものであり、理論的には湿球温度（乾球湿球湿度計の湿球の温度、空気中の相対湿度により変化する）まで下がりうる。

こうした蒸発熱伝達を利用する場合には伝熱面に常に水を供給する必要がある。工業装置等においてこう

した蒸発のための水が常に十分供給出来る場合には問題はないが、装置の置かれた環境によっては大量の水の供給が困難な場合が少なくない。特に衣服などにおいては、このような水の供給を大量に行うことは極めて難しい。そこで、少量の水を効果的に用いて蒸発熱伝達により熱を除去するため筆者らの一人は図—1のような機能性蒸発伝熱面を考案した。



図—1 機能性蒸発伝熱面

この機能性蒸発伝熱面は高温伝熱面を毛細管層で被覆しそこに水を含ませておく。この毛細管層は蒸気のみを通し水は通さない透湿膜で覆われている。このような伝熱面を用いれば、高温伝熱面からの熱によって水が蒸発し、蒸気のみが透湿膜を通して空気流中に放出され熱が除去される。一方蒸発しない水は毛細管層と透湿膜に保持され伝熱面に保たれる。このような機能性蒸発伝熱面を用いれば、少量の水により伝熱面を水で覆い蒸発伝熱によって大量の熱を除去することが可能となる。蒸発する水の量はわずかであるため補給水タンク等より、毛細管現象や細い管を通して重力により少量ずつ水を補給することが可能であり、水を循環させるポンプ等は必要とならない。

このような機能性蒸発伝熱面は当初、工業的な熱交換器への応用の為に考案された。エアコンを夏期冷房運転する場合に、室外機は通常はファンによる強制対流の熱伝達により冷却される。これは、エアコンからの排熱を空気の顕熱として排出するものであり、夏期外気の温度が高くなると、冷却能力が低下する。また室外機からは高温の空気が環境に放出され、都市のヒートアイランド現象の一因となる。

そこで図—1に示すような機能性蒸発伝熱面をエアコンの室外機に応用することを試みた。図—2に

その概略を示す。これは、高温の作動流体の流れる管群を図-1のような機能性伝熱面で覆い冷却するものである。このような室外機を用いると、蒸発による熱伝達により熱は効果的に除去され、通常の室外機のような大型のファンを回す必要はなく、蒸気は小さなファンによって除去するだけで十分である。また、水の供給も上部に取り付けた補給水タンクから細管を通して重力で毛細管層へ補給され水のポンプを必要としない。このような機能性蒸発伝熱面を用いた室外機の冷却能力を従来の空気の強制対流を用いた室外機の冷却性能と比較した結果が図-3である。機能性蒸発伝熱面を用いた室外機は従来の強制対流のものに比べて3倍の大きな冷却性能を示した。このような試験結果により機能性蒸発伝熱面のエアコンの室外機への適用の有効性が実験室レベルでは確認されたが、現在のところ製品化には至っていない。

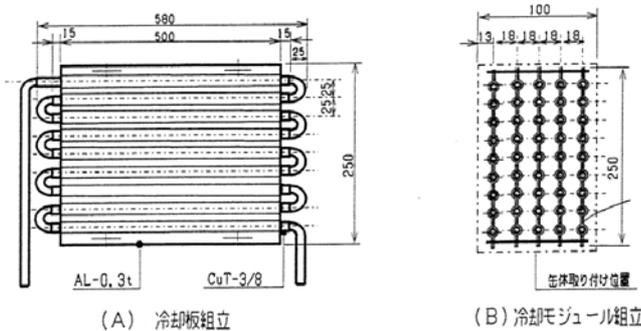


図-2 エアコンの室外機への機能性伝熱面への適用

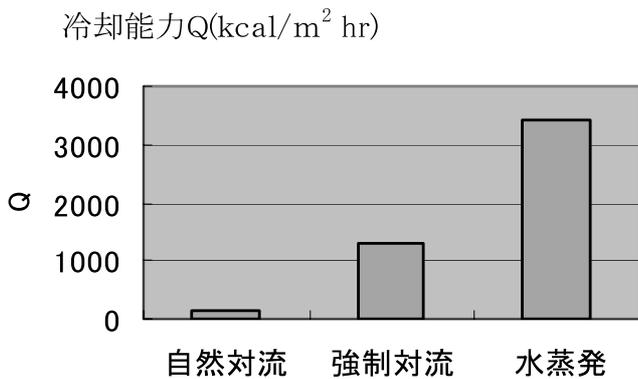


図-3 機能性蒸発伝熱面を用いたエアコン室外機の冷却性能

### 3. 熱遮蔽着衣（アクアメッシュ・アクアブリーズ）の開発

以上のようにして開発した、毛細管層と透湿膜を用いた機能性蒸発伝熱面は少量の水を用いて効果的に蒸発による熱の除去を可能にし、非常に有効な熱伝達特性を有すると共に、工学的にもエアコンの室外機とし

て応用しうる可能性が示された。

このような、機能性蒸発伝熱面の特性は、これを衣服として活用した場合に非常に有効な冷却特性と熱遮蔽特性が得られると考えられる。丁度人間の体が発汗して汗の蒸発熱伝達により熱を放出し体温を保つ機能と類似のものを機能性蒸発伝熱面は有しており、これを有効に活用することにより、人体以上の効果的な冷却特性を発揮することが期待される。また、この機能性蒸発伝熱面は少量の水によって有効に冷却が行えるため、衣服として用いる際に大量の水を装備する必要がなく、重量を抑えることが出来る。

以上のような発想をもとに、機能性蒸発伝熱面を衣服に適用する試みが行われ、株式会社つくし工房・株式会社新晃により図-4のような熱遮蔽着衣（商標名アクアメッシュ）が開発された。この着衣は、図-1に示す機能性蒸発伝熱面を用いたベストであり、人体表面（これが高温伝熱面となる）に接する部分は防水性として、着用する人が不快感を感じないようにしている。首の周りには全面と背面に給水バッグがありここに蓄えられた水が、配水ノズルを通して、毛細管層に浸透していく。ベストの表面（透湿膜）からは蒸発した蒸気のみが排出され、ベスト内部は冷却される。

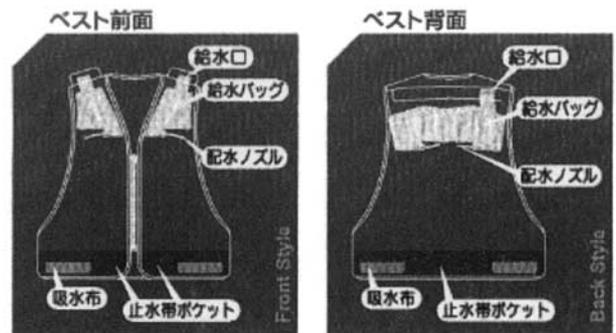


図-4 熱遮蔽着衣（アクアメッシュ）

このアクアメッシュの冷却特性の試験結果を図-5に示す。外気温が40℃の場合にこのアクアメッシュを着用して通水することによって表面温度は30℃程度に冷却される。また太陽光からの輻射熱も水の蒸発熱伝達により外気に放出されるので熱遮蔽の効果もある。

このような性能を持つことにより、熱遮蔽着衣（アクアメッシュ）は炎天下での建設作業またはスポーツ等においても、また工場等の高温の作業環境においても作業者の体温の上昇を防ぎ快適な作業環境を提供することが期待される。

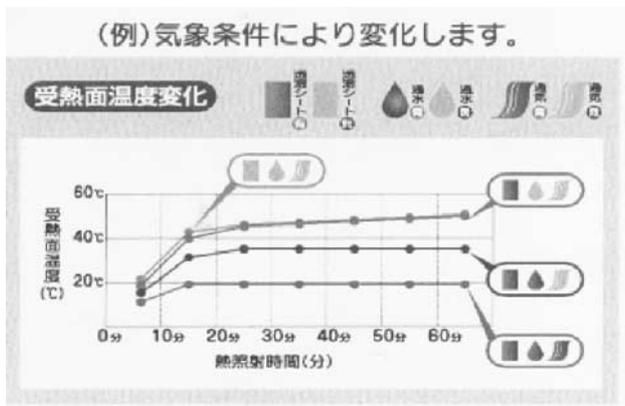


図-5 熱遮蔽着衣（アクアメッシュ）の特性

#### 4. 本製品の実効性と今後について

本製品の試着アンケート調査を行った結果は次のとおりであった。

- ①暑さは緩和出来た 68%
- ②試着して違和感を感じた 56%
- ③給水バックからの水の出方が多い 100%
- ④今後着用したいか 31%

熱遮蔽効果は認められたが、水の供給システムに工夫が必要であることが判明した。これは日向と日陰におけるアクアメッシュからの水の蒸発量の差が、水の供給過剰につながり、中の衣服を濡らしたり、水が滴り落ちると言った着心地の悪さをもたらした。また風が無い状態では気化した蒸気が着衣内にこもることにより蒸し暑いと言う不快感も認められた。

このような不具合を改善するために、水の供給量がある程度調節出来るように、配水のバルブを三段階に

水量調節できるものに取り替えた。また小型のファンを取り付けて、着衣内に外から風を強制的に送り込むことにより、蒸発を促し冷却効果を高めることと、着衣内の湿気除去の効果による着心地の改善を図った。このように改善を加えた熱遮蔽着衣（商標名アクアブリーズ）について現在モニタリング調査を行っている所である。

本製品の高い熱遮蔽効果は認められるが、気象条件や作業環境等によって、その効果のばらつきや着心地と言うデリケートな問題があることは否定できない。本製品の実効性をより高めるためには、簡便な水の供給システムの確立と、アクアブリーズと身体との間の湿気をいかに外部へ放出できるかが今後の課題である。

JICMA

[筆者紹介]



片岡 勲 (かたおか いさお)  
 大阪大学大学院工学研究科  
 機械物理学専攻  
 教授 工学博士



今井 良治 (いまい りょうじ)  
 株新晃  
 取締役営業部長



星野 照生 (ほしの てるお)  
 株つくし工房  
 代表取締役社長