

乳幼児用おむつの熱水分移動性能と温熱的快適性

薩本弥生¹⁾, 今朝丸千恵²⁾

1:横浜国立大学教育学部、2:元横浜国立大学教育人間科学部学生

Heat and water-vapor transfer and thermal comfort of diapers for infant

SATSUMOTO Yayoi¹⁾, KESAMARU Chie²⁾,

1: College of Education, Yokohama National University

2. Former student of College of Education and human sciences, Yokohama National University

1. 緒言

着衣の温熱的快適性は着衣の熱水分移動性能に支配されるため着衣の快適性に関わる世界標準の評価装置として1993年にISO11092に着衣の熱水分移動性の評価方法が初めて規定された。これはMecheelsとUmbachの研究開発した装置¹⁾が元になっている。この装置では着衣に用いられる布の熱水分移動系における熱抵抗と蒸発熱抵抗の定常状態における評価が規定されている。一方、発汗マネキンを用いた着衣の熱抵抗、蒸発熱抵抗の定常状態での評価に関してはMcCulloughら²⁾の報告がある。しかし、布の状態での平板装置、着衣の状態でのマネキンの装置の形態に違いはあるが、いずれも蒸発熱抵抗の測定においては環境温度と模擬皮膚温度を等温条件にして測定するように規定している。

熱水分同時移動系において湿性放熱量を精度良く評価するのが困難であるため、等温条件であれば供給熱量のすべてが湿性放熱量となるためである。しかし、等温条件では水分移動だけが生じ、熱水分同時移動系とは言えない。また、熱抵抗に関しては発汗しない条件で評価しているが、実際には同時移動系における対流熱伝達率は水蒸気濃度差による対流が原動力となり同一模擬皮膚温度においては乾性放熱の時より1割増加することが我々の既報³⁾で明らかになっている。そこで、熱水分同時移動系における熱抵

抗、蒸発熱抵抗を評価できる装置を開発することが重要であるが、現状の装置は上記の点で不完全であるといえる。そこで、熱水分同時移動系において熱抵抗、蒸発熱抵抗を定常状態において同時に測定できる装置を試作したので報告する。

ここで、測定する布素材として紙おむつを測定した。紙おむつは、1940年代にスウェーデンで開発されてから、日進月歩で進化し、高分子吸収体の登場により性能も格段に向上し、使い捨ての便利さも後押しし、布おむつよりも使用者が多いのが現状である。しかし、乳幼児用の紙おむつの場合、使用者と購入者が異なり、購入者である保護者が、どの程度子どもの使用感を把握できているかが、鍵になる。そこで、おむつの熱水分移動性を測定し、おむつの温熱的快適性を客観的に把握する判断材料を提示することを目的として測定に当たって紙おむつを選択した。

2. 実験方法

2.1 模擬皮膚装置について

人体による温熱・湿潤感覚量の評価や衣服内気候の計測などでは、再現性が低い、個人差が大きい、人体の疲労による誤差が大きい、特殊環境下での評価ができないなどの問題がある。本実験においても、乳幼児用紙おむつの使用者は年齢が低く長時間の実験には耐えられない。また、被

験者実験は基本的に被験者にインフォームドコンセント(同意)を得てボランティアで協力を要請するが、同意を得るにも自身に判断能力がないため被験者の保護者に同意を得ることになるが、本質的には問題となる可能性がある。このため、被験者実験に代わる熱水分同時移動型の模擬実験として模擬皮膚実験装置を試作し実験を行うことは重要である。

ヒトの体から水分が蒸発する経路は、不感蒸散と汗腺からの発汗と2種類がある。着衣の伝熱模式図を図1に示す。

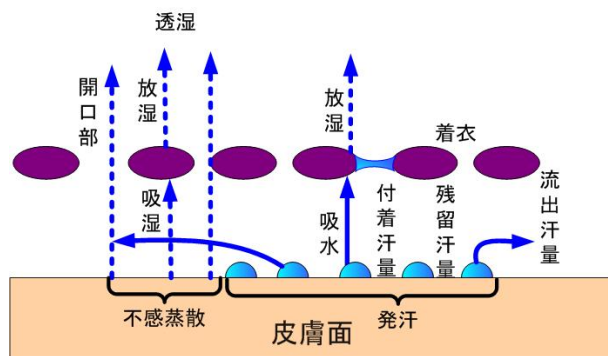


Fig.1 着衣の伝熱模式図

図において温熱性発汗は体熱放散を目的として起こる現象であるが、放熱は汗が蒸発して初めて有効となる。体に流れ落ちる汗(流失汗)や衣服に吸収された付着汗量や皮膚面にそのままどまっている汗(残留汗)、または拭き取られた汗は、いずれも体熱放散のうえから無効である。従来の模擬皮膚装置では、汗として見立てる水分供給が連続的なものではなく、濾紙を初期条件として水で濡らしたりするものだったが、最新の発汗サーマルマネキンでは産熱だけでなく積極的な発汗の制御機構を有するマネキンとしての特性も持っている⁴⁾。しかし、装置自体が大型なため、1gの分解能の精度でしか水分の蒸発による重量変化を正確におさえられない。したがって現状では同時移動系における水分移動量は供給水分量がすべて蒸発に用いられたという仮定をおかざるを得ないようである。しかし、上述のような無効発汗は無視できないレベルで生じる。

そこで、本研究では、熱水分同時移動系で水分を連続的に一定量供給できるポンプを用い液体水を平板上に等間隔にあけた8つの穴から供給し、天秤で同時に重量変化を量ることにより、水分移動の重量変化を把握することもできる装置を試作した。本装置は、小型な発熱平板であり、10mgの分解能で重量を正確に把握することができる。実験装置を図2に示す。

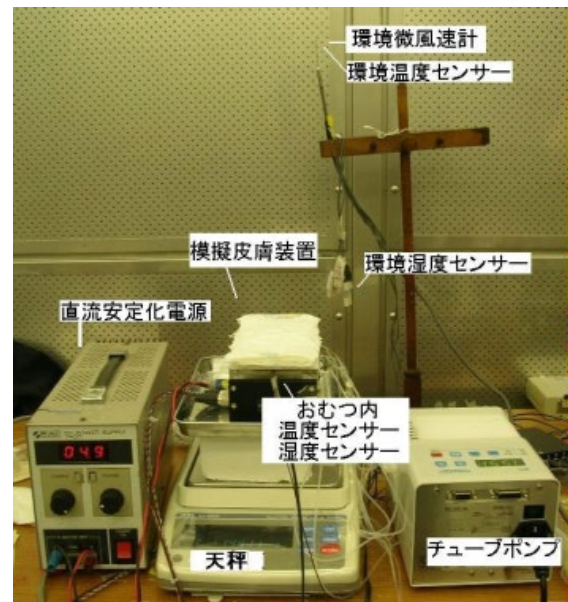


Fig.2 実験装置

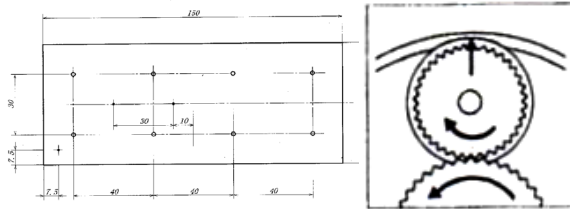
本装置では、供給放熱量を測定することができるとともに、天秤で模擬皮膚上の重量を測定することで、水分変化量を把握することができる。重量測定のために、一時的にセンサーをはずすので、連続的な模擬皮膚の衣服内温湿度の把握は難しいが、蒸発速度を求め、湿性放熱量を算出することができる。1回の実験から乾性放熱量と湿性放熱量を把握できることから、同時に熱伝達率と蒸発熱伝達率を求められるため、水分透過指数も正確に算出することができるという特徴がある。また、近年注目されている人体型の模擬皮膚装置のサーマルマネキンは、装置が大きいため実験誤差も大きくなり、装置の重量の正確な測定が難しい。

a. 模擬皮膚装置(発熱平板)

模擬皮膚として有限会社インタークロス製の発熱平板(図3)を使用した。



a)外観の写真



b)模擬発汗口(8つ穴)とチューブポンプの構造

Fig.3 模擬皮膚(発汗装置付き)

図3のように、8箇所穴から右上に示すチューブポンプにより水を供給することができる。

b. チューブポンプ

イスマテック社製のチューブポンプを用いた。

これは、回転に同期してローラーがチューブ表面を回転しながら移動する構造のプラネタリー作動構造(図3b)参照)を採用した。脈流が少なく、チューブの摩擦抵抗が少ないため、長時間安定した流量を得ることができる。直流安定化電源から供給された電力量によって発熱するヒータである。供給された水が濡れ広がるように、不織布(旭化成製,親水スパンボンドエスタス 373, PA-3020, 20g/s/m)を発熱平板の上に敷き、人間の肌に近い状態にした。図3b)に発熱平板の構造を示す。ヒータ下には、ヒータ温度と放熱量を測定することができるセンサが埋められている。30秒ごとに測定を行った。

2.2 実験条件

実験は、横浜国立大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーの人工気候室で行った。温度26°C、湿度60%RHに設定した。発汗条件は不感蒸散、発汗、排尿の3条件である。図4に各条件での模擬皮膚と試料の位置関係を示す。試料に供給された水分と蒸発した水分の差を把握するため、天秤で、45分おきに重量を測定した。

Table1 模擬皮膚装置への供給水量

条件	8穴排水量 (ml/min)	発汗量 (g/m ² /h)	発汗量 (g/m ² /s)
不感蒸散	0.0214	142.67	0.03963
発汗	0.124	826.67	0.29629
排尿	0.0214	142.67	0.03963

このとき、センサのケーブルやポンプのチューブが測定の誤差になることを考慮して、天秤の上に置かれた模擬皮膚に接続されているセンサなどのケーブルおよび水分供給ポンプ用チューブをはずした。天秤測定後、速やかにセンサやチューブをつけた。重量測定は3時間の実験中、実験の初めと終了時を合わせ、計5回測定した。排尿の場合は、これに加え、尿に見立てた水を注入直後、重量を測った。模擬皮膚ヒータへの供給熱量を400W/m²とした。

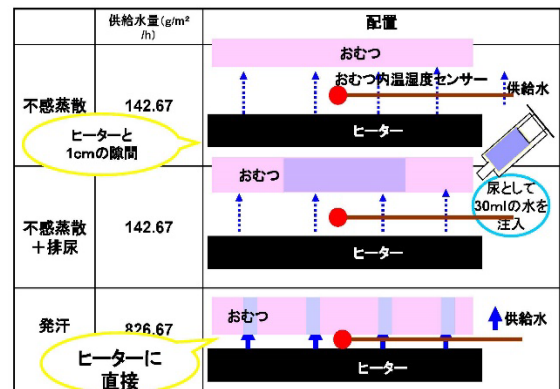


Fig4 各条件の模擬皮膚と試料の配置

2.3. 試料

実験に用いた試料は以下の2種のおむつである。

A: 紙おむつ

B: 布おむつ(毛カバー+綿のさらし8枚重ね)

紙おむつの試料部分は、吸収体が最も多く使用されている股の部分を図5のように切り取った。紙おむつは実験の度に未使用のものを使用した。布おむつは、カバーのみ紙おむつと同様に、股の部分を使用した。さらしは、使用后、洗濯をしたものを試料として用いた。

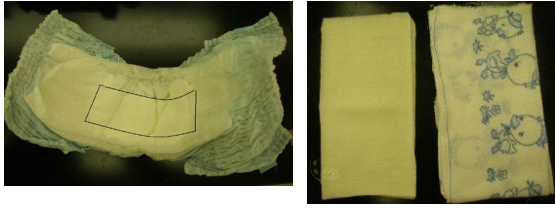


Fig.5 実験おむつ試料

各試料の素材内訳を表2に、諸元を表3に示す。

Table2 おむつ試料の素材内訳一覧

試料	素材	
紙おむつ	表面材	ポリオフィレン ポリエステル不織布
	吸収材	綿状パルプ 吸収紙 高分子吸収材
	防水材	ポリオレフィンフィルム
布おむつ	オムツ カバー*1	裏表地/毛 100%
	さらし*2	綿 100%

Table3 おむつ試料の諸元

試料	水分率 (%)	厚み (mm)	充填率 (%)	透湿 抵抗 (s/m)	熱伝達 率 (W/m/K)
紙 おむつ	18.5	5.05	12.2	3071	0.033
布 おむつ	カバー	12.6	0.71	31.8	638
	さらし	3.8	0.37	18.3	

3.実験結果

3.1 おむつの熱水分移動性の実態把握

a. 紙おむつの各種シミュレーション条件比較

図6に紙おむつの不感蒸散と排尿条件の熱伝達率を示す。排尿条件の方が熱伝達率が高い。これは、排尿を模擬した30mlの水の注入により、紙おむつ内に水が保持されていたからである。つまり、空気よりも約20倍熱を伝え易い水により熱伝達率が高くなったと考えられる。

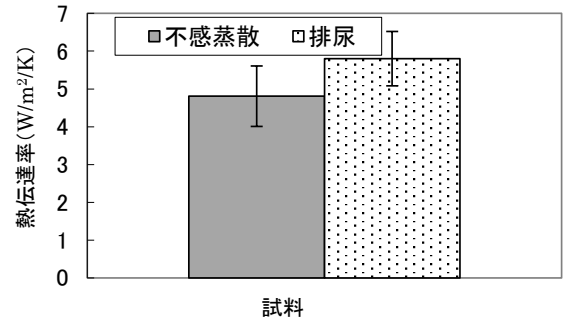


Fig.6 紙おむつの熱伝達率

(不感蒸散と排尿条件)

図7に紙おむつの不感蒸散と排尿条件の蒸発熱伝達率を示す。

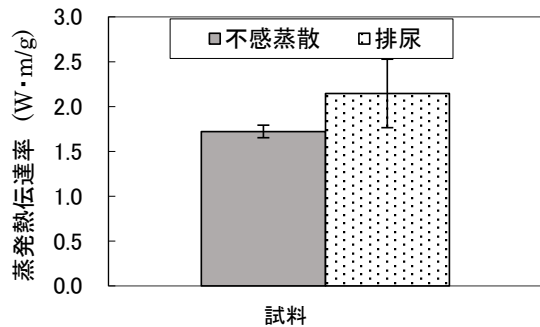


Fig.7 紙おむつの蒸発熱伝達率

(不感蒸散と排尿条件)

不感蒸散条件と比較し、排尿条件では、蒸発熱伝達率が高くなった。おむつの透湿抵抗を水ありと水なしで比較した結果を Fig.8 に示す。

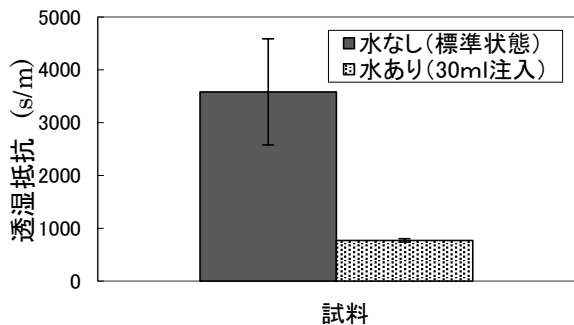


Fig.8 紙おむつの透湿抵抗

濡れることで透湿抵抗が低くなり、蒸発放熱および水分移動がしやすいことがわかった。図9に紙おむつの不感蒸散と排尿条件の熱伝達率と蒸発熱伝達率の関係を示す。

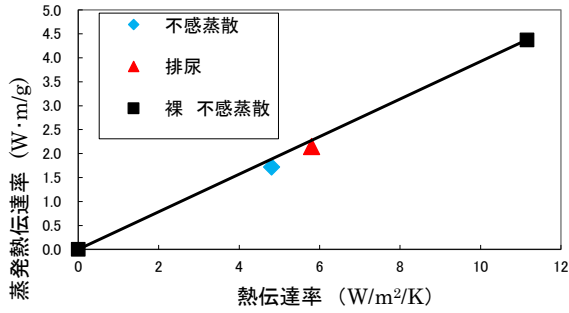


Fig.9 紙おむつの熱伝達率と蒸発熱伝達率の
関係 (不感蒸散と排尿条件)

不感蒸散条件の方が熱と水蒸気の移動がしにくく、排尿条件の方が、熱も水蒸気もやや移動しやすいことがわかった。

図 10 に紙おむつの不感蒸散と排尿条件の水分透過指数を示す。

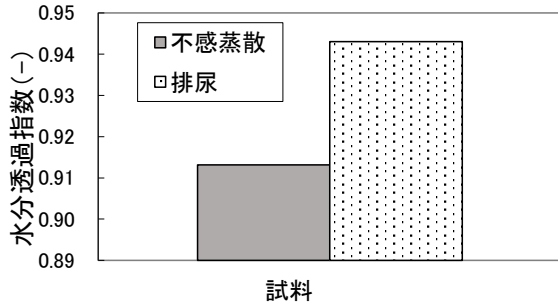


Fig.10 紙おむつの水分透過指数
(不感蒸散と排尿条件)

この指数は着衣の水分透過および潜熱移動の程度を示すだけでなく、着衣が熱と水分のどちらにより遮断効果が大いかに指標化している。

排尿条件において不感蒸散よりも熱移動同一でも水分透過指数は高く、水分透過性が顕著に大きいことを示している。

図 11 に紙おむつの不感蒸散と排尿、発汗条件の蒸発熱伝達率を示す。排尿条件 > 不感蒸散 > 発汗条件の順番に蒸発熱伝達率が大きかった。発汗条件でも、紙おむつ内に水を保持すると考えられるが、蒸発熱伝達率が、不感蒸散条件よりもやや低かった。この理由を図 12 の模式図を用いて考察する。

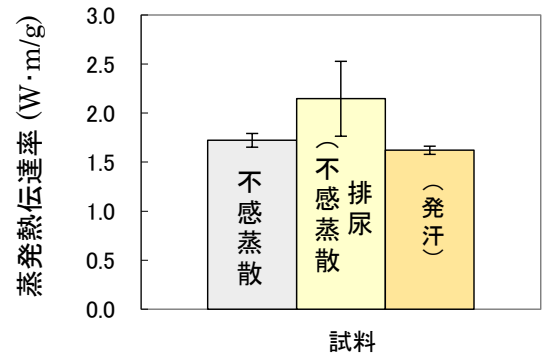


Fig.11 3条件の蒸発熱伝達率の比較

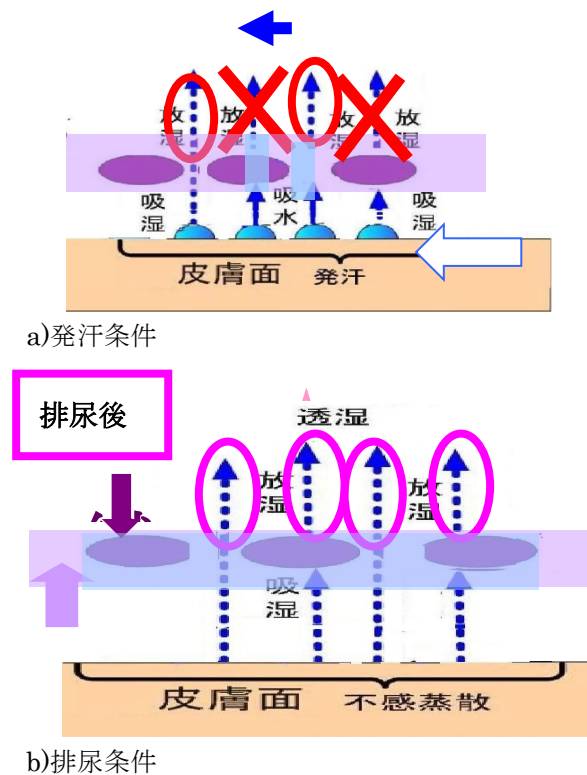


Fig. 12 発汗条件と排尿条件の水分移動性比較

模式図の点線は、水蒸気 (気相の水分) で、実線は水 (液相の水分) である。発汗条件では、液体と気体の水分の両方が存在している状態である。排尿時 (図の b)) では、透湿抵抗が極端に小さくなることから水分を保持することで、その部分が親水性を持ち、水蒸気をそのまま通していると思われる。つまり、皮膚から排出される不感蒸散が、不感蒸散条件と同様に繊維の隙間を通過して移動する経路に加え、尿を保持している紙おむつを通る経路があると考えられる。よ

って、排尿条件の方が水分の移動がしやすくなり、本実験のような結果になったと思われる。

一方で紙おむつの発汗条件では、蒸発熱伝達率が、不感蒸散と比較してやや低かった。発汗条件の場合、汗として供給された水分が、液体と気体が混在した状態で、模擬皮膚と試料の間に存在すると考えられる。特に発汗条件は、模擬皮膚との隙間がほとんどないため初期に液体のまま試料に吸収される(図のa))。よって、水蒸気の水でないため透湿しにくく、そのまま吸収体に保持されてしまい、付着汗として試料内に留まる。今回、実験を行っていないが隙間を保持して発汗条件で実験を行うと直接おむつが濡れにくいため、水蒸気の移動性が保持されやすいと思われる。

このことから、紙おむつはおむつ内に保持された水分を、水蒸気になった汗のみ透過し、液体の汗は透過しにくいと推測される。また、発汗によりおむつが濡れると不感蒸散条件時と比較して頭熱熱伝達率が増大する。おむつが直接皮膚と接触しているため、熱伝導率が増大し皮膚温が低下し易く不快になり易い。紙おむつ内気候は、不感蒸散時では湿度は快適域に属するが、発汗、排尿共に不快領域である水分が蒸発し、おむつ外部に移動すると同時に肌側にも蒸散しているからだろう。

b. 排尿時の紙おむつと布おむつの比較

a. おむつ内気候

図13に排尿条件のおむつ内気候を示す。

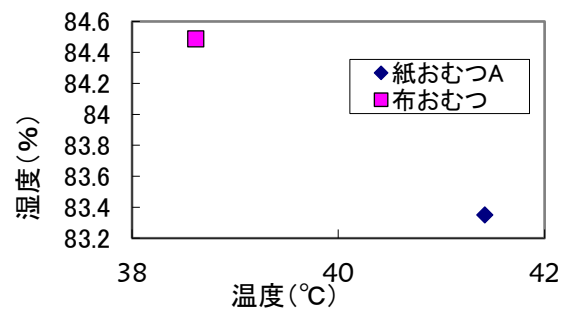


Fig.13 排尿条件のおむつ内気候

布おむつは、紙おむつと比較し、おむつ内温度は低く、おむつ内湿度はやや高いことがわかった。模擬皮膚ヒータの温度の分布でも、紙おむつの方が高い値を示し、布おむつは、ヒータの熱を奪っていることがわかる。

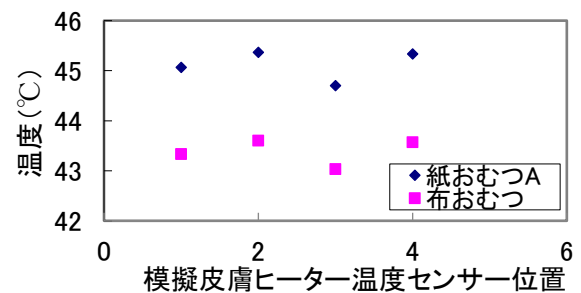


Fig.14 排尿条件の模擬皮膚ヒータの温度分布
よって、排尿後、布おむつは、紙おむつよりも濡れ冷えしやすいことがわかった。

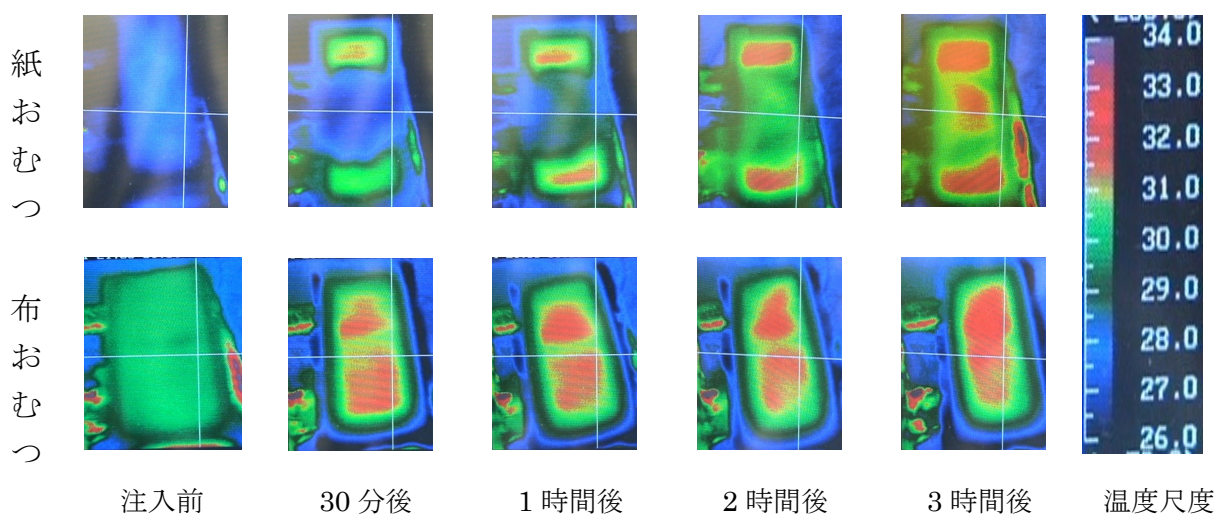


Fig.15 バックシート側のサーモグラフィ画像

1) 紙おむつと布おむつの濡れ冷え比較

濡れ冷えの違いをよりわかりやすく比較するために、排尿シミュレーションの模擬皮膚実験において、サーモグラフィによる温度変化を撮影した。バックシート側のサーモグラフィの画像を図 15 に示す。

ヒータから熱が供給されているが、紙おむつは濡れた部分も含め、表面温度は布おむつに比べて低い。これは、紙おむつが熱を逃がしにくく、保温性が高いことを意味している。一方、布おむつは、ヒータの熱を外部に伝えやすく、保温性が低いことがわかる。

2) 濡れ広がり面積

バックシート側の温度変化では、保温性の違いはわかったが、尿が濡れ広がる面積の違いがわかりにくい。そこで、温度 20°C、相対湿度 65% RH の人工気候室で、紙おむつと布おむつの濡れ広がり面積の比較実験をおこなった。1) の保温性の実験より、保温性の違いから、ヒータ上での実験では、試料による温度の差が影響し、水の濡れ広がり面積サーモグラフィ画像ではわかりにくいため、ヒータによる熱の供給はしなかった。各試料 (9cm×9cm) を熱伝導率の良い金属

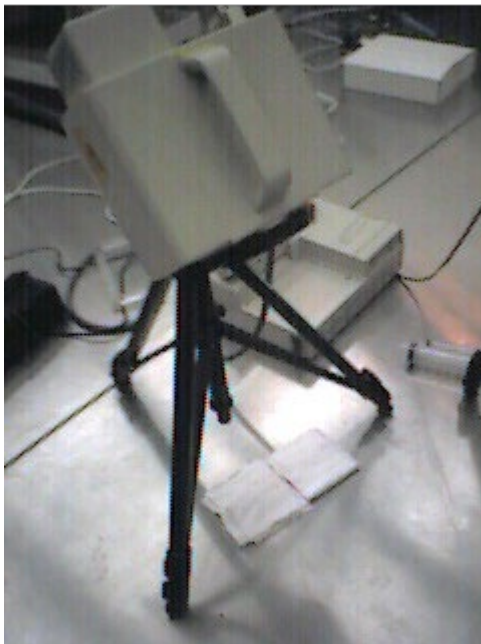


Fig. 16 濡れ広がり面積の比較実験風景

の上に置き、トップシート側に 1 g の水を注入した。その時、サーモグラフィにより温度変化を撮影した。実験風景を図 16 に示す。サーモグラフィの結果を図 17 に示す。

紙おむつと布おむつの濡れ広がり面積の変化の結果を図 18 に示す。

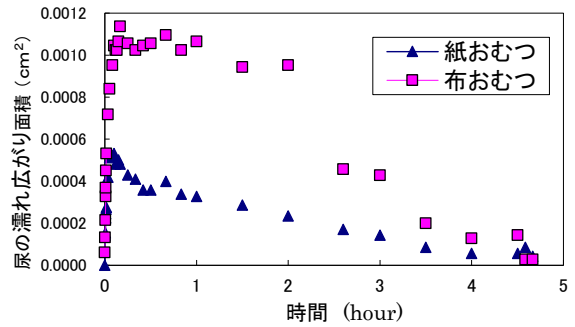


Fig.18 尿の濡れ広がり面積の変化

布おむつは濡れ広がる面積が紙おむつの約 2 倍であることがわかる。その一方、濡れ面積が徐々に減少し、吸収した水を蒸発させやすいことがわかった。紙おむつは、濡れ広がる面積は小さいが、その後、吸収した水を蒸発させるのが遅く、保持する傾向にある。

紙おむつは、尿の濡れ面積が最大になるのが布おむつよりも早く、吸収速度が速いことがわかった。これは、紙おむつの肌に接するトップシートが、水をあまり保持せず尿を素早く吸収体に通し、その吸収体が水を保持しているためである。その中に存在する高分子吸収体は、多少の圧力を加えても離水しない特性をもっているため、尿を保持して水分移動を起こしにくい。一方、布おむつは、肌に接する綿が尿を吸収して濡れ面積が大きいため、おむつの熱伝導率の増大により顕熱放熱を増加させ保温性を低下させ、紙おむつよりも濡れ冷えしやすい。さらに、布おむつは、最大の濡れ広がり面積は紙おむつの約 2 倍で、蒸発面積を稼ぎ蒸発速度が速いため、尿を蒸発させやすい。おむつ内がやや高湿な上、濡れ冷えの状態にあり、紙おむつよりも不快な状況で

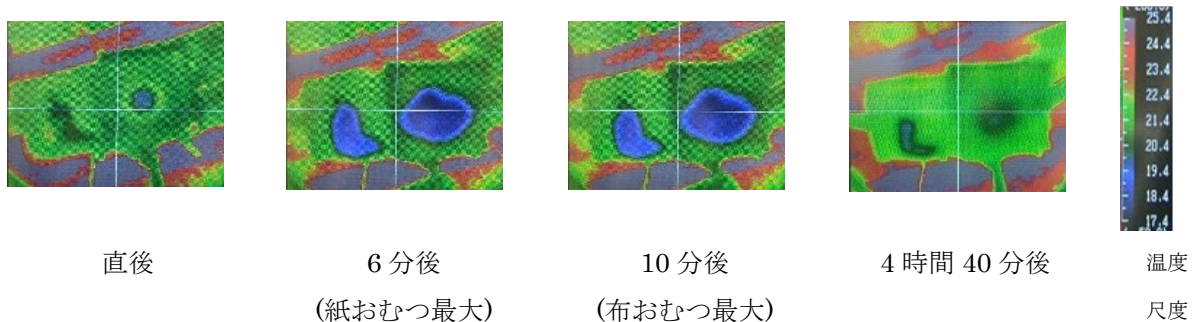


Fig.17 濡れ広がり のサーモグラフィ画像

あると思われるが、排尿後はどちらのおむつ内も高湿になり、そのまま履き続けることは、おむつかぶれを引き起こす原因となりえるため、排尿後はおむつ交換を早めに行うことが望ましいといえる。

4. まとめ

熱水分同時移動系における熱水分移動評価装置を試作し、定常状態での評価が可能であることを確かめた。供給水分量の一部が布に残留する紙おむつの熱水分移動性能を測定し、温熱的快適性を客観的に把握した結果、排尿前の不感蒸散状態では快適ではあるが、発汗や排尿により不快な状況になり易いことが確認できた。保護者はかぶれなど表立った症状が出なくとも、不快な状態であることを認識する必要がある。布おむつは、紙おむつと比較し、おむつ内温度は低く、おむつ内湿度はやや高いことがわかった。

紙おむつは尿の濡れ面積が最大になるのが、布おむつよりも早く、紙おむつの方が吸収スピードが速いことがわかった。最大の濡れ広がり面積も布おむつの約2倍で、紙おむつのトップシートは尿を素早く吸収体に通し、トップシートでは、水をあまり保持せず、吸収体で水を保持しているためである。

一方、布おむつは、肌側に近い綿も、尿を吸収しているため、肌に濡れているおむつが直接接触する面積が大きいため、紙おむつよりも濡れ冷えしやすい。しかし、紙おむつの高分子吸収体は一旦吸水すればポリマー内部に水を保持するこ

とができ、多少の圧力を加えても離水しない特性をもっているため、尿を吸収体で保持して水分移動を起こしにくい。布おむつは、紙おむつに比べて、蒸発速度が速いため、尿を蒸発させやすい。これは、蒸発熱伝達率との一致し、布おむつの方が、水分移動が起こりやすい。

また、紙おむつは布おむつよりも保温性が高く、この点も含めて布おむつの方が濡れ冷えしやすいことがわかる。

布おむつは高湿な上、濡れ冷えの状態にあり、紙おむつよりも不快な状況であると思われるが、紙おむつも布おむつも排尿後は高湿になり、そのままはき続けることは、おむつかぶれを引き起こす原因となりえるため、どちらのおむつも排尿後はおむつ交換を早めに行うことが望ましいといえる。

引用文献

- 1) J. Mecheels, K.H. Umbach, "Thermo - physiological properties of clothing systems" Melland Textilberichte, Part 2 in January (1977)
- 2) E.A. McCullough, B.W. Jones, T. Tamura, "A data base for determining the evaporative resistance of clothing", 3287-3299(1989)
- 3) 薩本弥生、竹内正顯、石川欣造、"模擬皮膚からの熱伝達—模擬皮膚湿潤時と乾燥時の比較—", 日本家政学会誌 48(2)、179-186(1997)
- 4) 森下禄郎、"高性能発汗マネキンによる衣服評価" 織消誌 44(12)774-779(2003)