

【原著】

Infrared Thermal Imaging Camera を用いた着衣内部の「使いすてかいろ」の検出

右田平八^{1,2)}, 谷口響志朗¹⁾, 福元広行¹⁾, 渡辺 渡^{1,2)}, 吉武重徳²⁾, 灘吉進也³⁾
九州医療科学大学 生命医科学部 生命医科学科¹⁾
九州医療科学大学大学院 保健医療学研究科²⁾
社会医療法人共愛会 戸畑共立病院 臨床工学科³⁾

【要約】

高気圧酸素治 (hyperbaric oxygen therapy : HBO) 前の患者ボディチェックは事故を未然に防ぐために必要で重要である。これは、過去の HBO 事故の教訓から受け継いでいる。特に、1996年2月に発生した HBO 装置の火災爆発事故の原因が装置内へ持込まれた「使いすてかいろ」であり、HBO 環境では異常高温となることが解明された。このことから、患者を HBO 装置内部に収容する前に厳重に持物点検、ボディチェック等が求められている。しかし、「使いすてかいろ」の検出には治療前の患者への注意喚起、持物の問いかけ、ボディチェック (衣類の確認) に加えて金属探知機を用いたチェック以外に有効な探知方法がない。金属探知機での検出は、医療者側から患者に対して強制的に行うので、患者権利や尊厳の観点から問題視される。また、金属探知機は性能に差があり、検出できないこともある。

「使いすてかいろ」の検出に金属探知機以外の新しいデバイスの必要性が求められている。そこで、赤外線ガジェットとモバイルカメラを連動させて感知するデバイス (赤外線温度感知カメラ) を用いて異常温度を可視化した。

キーワード

赤外線温度感知, 保温カイロ, 酸化鉄, 温度の可視化, 火災安全

【Original】

Detection of “disposable body warmers” inside clothing using an infrared camera

Heihachi Migita^{1,2)}, Kyoshiro Taniguchi¹⁾, Hiroyuki Fukumoto¹⁾, Wataru Watanabe^{1,2)},
Shigenori Yoshitake²⁾, Shinya Nadayoshi³⁾

- 1) Kyushu University of Medical Science, School of Medical Life Sciences, Department of Medical Life Sciences
- 2) Kyushu University of Medical Science, Graduate School of Health Sciences
- 3) Tobata Kyoritsu Hospital, Department of Clinical Engineering

【abstract】

A body checks of the patient before hyperbaric oxygen therapy (HBO) is necessary and important to prevent accidents. This is a lesson learned from the past HBO disaster. In particular, the cause of the HBO chamber fire and explosion that occurred in February 1996 was a “disposable body warmers” It has been found that disposable body warmers can reach extremely high temperatures, and patients’ belongings and body checks must be rigorously inspected before being placed in the HBO chamber.

However, there is no effective tool other than a metal detector to detect “disposable body warmers.” Therefore, we visualized the temperature using a sensing device (Infrared Thermal Imaging Camera) that combines an infrared gadget and a mobile camera.

Keywords

infrared temperature sensing, handy warmer, Fe oxide, temperature visualization, fire safety

【背景】

2024年1月15日に高気圧酸素治療 (hyperbaric oxygen therapy : HBO) を施行している施設で HBO 中の患者が熱感を訴えた。直ちに減圧し、大気開放して対処する事例¹⁾が発生した。原因は「使いすてかいろ²⁾」(原理：酸素と鉄の酸化反応による熱源)の酸化発生熱であった。患者を HBO 装置内部に収容する前に厳重に持物点検、ボディチェック等を行っているはずが、身に着けた「使いすてかいろ」が見逃されて高濃度酸素暴露による温度上昇で感知した。このような“使いすてかいろの見逃し”は他でも起きていると推測されるが、今日まで偶然に重傷事故に至っていないだけかも知れない。

患者の安全管理では、装置内へ持込まれた「使いすてかいろ」が高気圧・高濃度酸素下では、異常高温となって火災爆発の原因となることが1996年2月に発生した山梨厚生病院 HBO 装置爆発事故³⁾で解明された。しかし、「使いすてかいろ」の検出には治療前の患者への注意喚起、持物の問い合わせ、ボディチェック(衣類の確認)に加えて Metal Detector (金属探知機)を用いたチェック以外に有効な探知方法がないのが現状である。HBO 室での金属探知機の応用は元来、MRI (核磁気共鳴画像) 室での安全検査用として金属探知機が応用⁴⁾されていることから、山梨の事故後から「使いすてかいろ」の鉄粉探知に使用されたことが始まりである。今日まで HBO 領域で使用効果を報告したものは少ないが、金属探知機での検出⁵⁾は患者を直立挙手(ホールドアップ)させてセンサ部を体へ接近させ、スタッフが強制的に行うため、第三者の目からは患者の尊厳的な容姿が良くない。また、金属探知機の性能に差があり、

過敏に反応するものや反応しないものもある。ストレッチャーに乗じた患者では、架台の金属に反応するので判断に苦慮する。「使いすてかいろ」の検出に金属探知機を応用する限界かも知れない。今後は「使いすてかいろ」発見順路を「鉄」から「鉄粉」、「酸化鉄」から「金属探知」の視点を変える必要がある。そこで、COVID-19 で一般的となった温度感知カメラ⁶⁾に注目し、赤外線ガジェットとモバイルカメラと連動させて感知するデバイス (Infrared Thermal Imaging Camera : ITI カメラ) が有用であるか検証した。

本論文発表に関連して、開示すべき COI 関係にある企業などはない。

【対象および方法】

大気圧下で被験者の着衣内部に位置が外見から分からないように隠した「使いすてかいろ」を対象に、モバイルカメラ (iPhone iOS17) に市販の非接触型 Thermal Imaging Device (FLIR One, made by U.S.) を取付けたものを ITI カメラとして用いた (図 1)。被験者の着衣内部に留置した「使いすてかいろ」が酸化鉄作用で発熱し、その時の温度上昇を ITI カメラで撮影し、熱画像 (infrared ray : IR) として異常温度熱 (hot spot) の発生部位の特定と画像の温度分布および限界値を測定し、IR 解像能の比較は高性能赤外線 IR カメラ (TH9100 NEC 三栄社製) を用いて同時比較した (図 2)。使用後の冷めた「使いすてかいろ」が同様に温度分布画像で検出されるか確認した。臨床使用では、共同研究施設の HBO 患者のべ 100 人に対して撮影を行った。

また、酸素暴露による「使いすてかいろ」の酸化触媒では、赤外線通過可能な紙コップを簡易的



Thermal Imaging Device
FLIR One : made by U.S.A

図 1 : ITI カメラと撮影画像

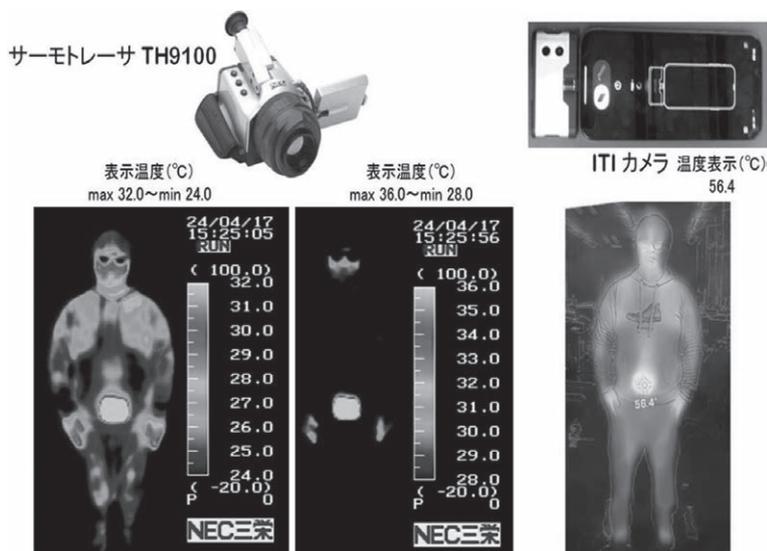


図 2 : 高性能赤外線 IR カメラと ITI カメラの画像比較

な密閉容器として酸素を 10L/min で流し、高濃度酸素 (95%O₂) 暴露として温度上昇を K 型熱電対式簡易デジタル温度計 (DIGITAL THERMOMETER TM-902C) を用いて 1 分間隔で経時的に測

定し、温度分布を可視化して撮影した (図 3)。

【結果】

医療用 IR カメラは 76,800pixel 以上の分解能カメ

ラが使用されている⁷⁾が、ITIカメラのIR解像度はカタログ値80×60[IR分解能4,800pixel]であり、比較カメラは320×240[IR分解能76,800pixel]であった。「使いすてかいろ」なしの画像比較で両方にhot spotは確認されなかった(図4)。大気圧下でのITIカメラ測定は、着衣内部に隠された「使いすてかいろ」表面温度の最高温55℃をhot spot



図3：高濃度酸素（95%O₂）暴露による使いすてかいろの温度計測

として検出し、比較カメラと±2～6℃であった。カタログ値でのIR解像能はストレッチャーに横臥位で部位に関わらず一目瞭然に熱源がhot spotに特定できた(図5)。車椅子に移乗した患者のチェックには、着衣表面が写るようにする必要があり、スポット撮影で死角が出来ないように撮影の工夫が必要であった。車椅子の患者の正面撮影では死角となる部分が少ないが、側面は両脇を挙上して撮影した。車椅子からストレッチャーへ移乗し、患者を保持して背中側の撮影を行った(図6)。温度感知は環境温～200℃程度の範囲で検出が可能であった。

「使いすてかいろ」は大気下で酸素暴露すると平均10分(n=3)で100℃まで上昇し、最高温度は110℃に達した(図7)。酸化鉄反応済みの24時間後の冷めた「使いすてかいろ」は生体と熱伝導による温度差が少なく、ITIカメラで検出されなかった。しかし、冷めた「使いすてかいろ」に同様に酸素暴露すると最高温度57.5℃、平均温度48.5℃で再燃傾向にあった。

【IRカメラの種類と性能】

IRカメラはメーカーによって、検出素子画素数、IR解像度性能と価格が大きく相違する。代表的なIRカメラの機種とスペックの結果を表に示した(表1)。



図4：「使いすてかいろ」なしの高性能赤外線IRカメラとITIカメラの画像比較

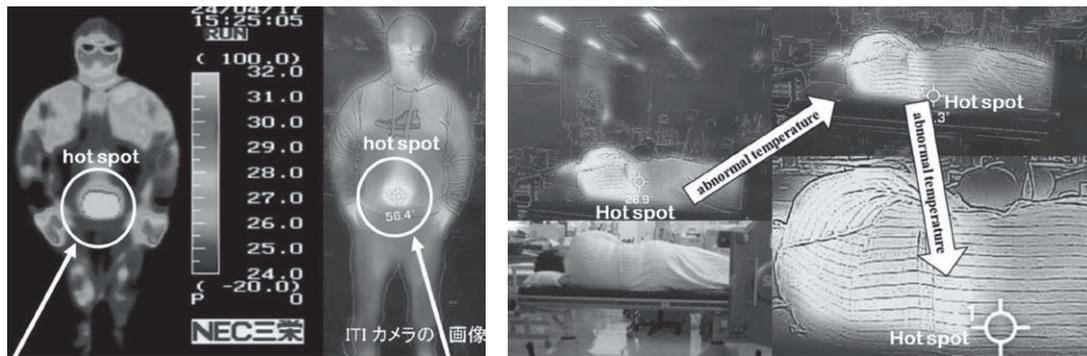


図5：隠して貼付した使い捨てカイロの起立像とストレッチャー上の横臥位での hot spot 検出



図6：車椅子の患者の正面撮影と車椅子からストレッチャーへ移乗時の背中側の撮影 (hot spot 検出なし)

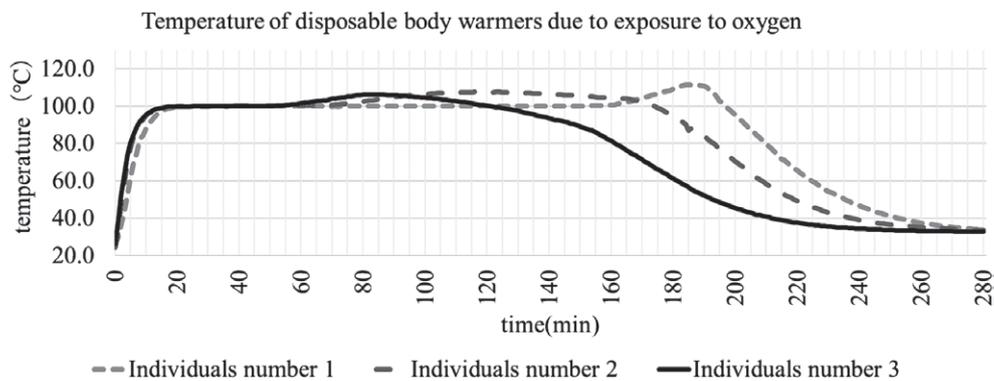


図7：高濃度酸素暴露による使い捨てカイロの温度上昇と経過時間（分）

表 1. IR カメラの種類とスペック (カタログ値)

機種(type)	ハンディ	ハンディ	ハンディ	ハンディ	ポケットサイズ	モバイル取付	モバイル取付	高性能カメラ
メーカー	TESTO	FLIR	カスタム	HIKMICRO	FLUKE	FLIR	HIKMICRO	日本アビオニクス
IR分解能(pixel)	76,800	4,800	1,024	19,200	10,800	19,200	19,200	307,200
検出温度(°C)	-30~650	-20~550	-20~380	-20~550	-20~400	-20~400	-20~350	-40~650
°C分解能	0.04	0.15	0.10	0.04	0.06	0.07	0.04	0.02
参考価格(万円)	50	20	7	5	10	7	3	200

IR 分解能は画像をどの程度鮮明に表示できるかの基準で、縦横の画素数を積にして pixel として表している。pixel が多いほど鮮明な画像となる。°C分解能は検出できる最小の温度差を表し、0.04°Cの場合は0.04°C刻みで温度を測定できるが、0.15°Cの場合は0.15°C刻みでしか温度の測定ができない。°C分解能の値が小さくなればなるほど、質の高い測定が可能になる。

【IR カメラの°C分解能と限界】

汎用 ITI カメラ (FLIR One) の°C分解能は0.5°C程度で表示温度が上下限表示10°C範囲と固定されており、温度差が3°C以上ないと被写体の hot spot が得られ難い。したがって、冷めた「使いすてかいろ」が体温と同程度になると検出が困難となる。しかし、上級機種は°C分解能が0.04°Cで上下限設定が可能であり、冷めた「使いすてかいろ」は異物として描出されるので hot spot の検出は°C分解能に依存する。また、IR カメラは物体の表面から放射されている赤外線を検出しているため、被写体を透過して撮影することが出来ない。また、表面のごく浅い局所の放射赤外線を面として捉えているので、体位変換して着衣表面が写るような体位で hot spot の確認が必要となる。

【考察】

「使いすてかいろ」の発明は米軍の発案から、1975年11月に日本企業によるアイデアによって開発⁸⁾され暮らしの必需品となって一般に流通している。「使いすてかいろ」の発熱原理は、鉄が空気中の酸素 (21%O₂) と反応して水酸化第二鉄に変化する化学反応時の熱 (Fe(OH)₃+96kcal/mol) を有効利用⁹⁾したものである。酸化鉄 (FeO) は他に三酸化鉄 (Fe₂O₃)、四三酸化鉄 (Fe₃O₄) の2種があり、特徴的には Fe₂O₃ は赤鉄鉱 (いわゆる赤サビ) で磁体とならないので金属

探知機に反応しないが、Fe₃O₄ は磁鉄鉱 (いわゆる黒サビ) で金属探知機が反応する。これらは製品の鉄イオンの混じり方が相違する。HBO 従事者の高濃度酸素環境下での「使いすてかいろ」の危険認識が低い原因として、使い捨てカイロの仕組みに関する調査¹⁰⁾では、臨床現場就業前の大学生は鉄の燃焼、鉄の錆びを学習しているので酸化について理解しているが、「使いすてかいろ」の仕組みで、鉄粉、塩類、水、酸素との関係を正しく理解していない者が多く、特殊な酸素環境下に従事する者への心得違いをなくすためにも「使いすてかいろ」の仕組みを HBO 現場教育で行い、鉄粉、塩類、水、高気圧酸素の作用を教授する必要があることがわかった。

金属探知機については、「使いすてかいろ」の使用後に反応する、反応しないは製品の FeO、Fe₂O₃、Fe₃O₄ の成分の相違に起因することが考えられる。FeO 作用の「使いすてかいろ」熱は Fe 成分と量を加減して酸素がかいろ内袋に大量に浸透して高温化しないように表面の膜構造等を調節して空気通過量を制御し、作用時間と最高温度は 60~70°C の範囲で平均温度は 50~60°C の範囲内にとどまるように工夫され、JIS で規定されている。しかし、この成分の詳細は企業秘密で公表されていない。また、「使いすてかいろ」は高濃度酸素の暴露を初期から想定していないので HBO 下での温度についてメーカー側に詳細なデータもない。

HBO理論¹¹⁾からは、酸素輸送は分圧に依存するので圧力が高いほど透過して内袋に拡散する。拡散による酸素供給量が増加すると酸素の拡散スピードは更に速まり、拡散燃焼¹²⁾が大きくなると考えられる。今回の検証では、大気圧下 (PO₂ 159mmHg) で95% O₂ (PO₂ 684mmHg) に暴露すると「使いすてかいろ」の温度は直線的に上昇し、5分で80℃以上となり、ピーク温度110℃以上となった。また、100℃の危険な高温が3時間を維持して緩徐に低下することも分かった。これは、HBO開始直後から「使いすてかいろ」が急速に異常高温となり、内袋の膜構造等を調節してもHBO下では制御不能に陥ることが示唆され、HBOではO₂ partial pressureの上昇と相まって反応時間が早まり、より高温となることが想像できる。もはや、低温火傷の温度レベルを超えて沸騰した熱湯を浴びて重度熱傷を来すレベルになるといえる。皮膚の表面温度と火傷の発症時間¹³⁾は50℃以上で概ね2~3分なので、HBOでは短時間で局所的に受傷すると考えられる。

HBO 2.0ATAではPO₂ 1,560mmHgとなるので拡散燃焼エネルギーも10倍程になると推測される。紙の燃焼温度¹⁴⁾は300℃程度なので、1.0ATA高濃度酸素下では燃焼温度には達せずとも熱傷を来す危険な温度エネルギーを充分に持つ。HBO中にも、「使いすてかいろ」が装置内に持込まれた場合には、HBO開始から10分までが最も注意を要する対応可能な限界時間と考えられることから、オペレータはこの時間は装置内部と患者を最も注視する事をマニュアルに明記する必要がある。燃焼を概言すると、山梨厚生病院事故検証では、「使いすてかいろ」が2.7ATAで420℃に達していることから、燃焼の強弱は酸素濃度(%)ではなく、PO₂の酸素拡散燃焼であると考えられた。

HBO室での「使いすてかいろ」の検出に関する研究開発は2015年に渡邊ら¹⁵⁾が非接触温度センサ(D6T:オムロン製)とマイクロコントローラ、PCモニタを用いて検出を可能としたが、対象者は自力で立位および静止の姿勢を保つことができる患者である要件から実用に至っていない。し

かし、この報告からIR法による赤外線サーモグラフィが注目された。赤外線サーモグラフィを簡易にHBO室で応用・普及するには、装置が簡便で安価が望ましい。1975年代に医用赤外線撮像装置が開発され、医学の基礎的研究および医学の診断に応用¹⁶⁾されたが、冷却器が必要で取扱いが煩雑で高価なITIしかなかった。しかし、情報技術(information technology: IT)が発達して、工業用deviceも軽量小型化され比較的安価で入手できるようになり、今回使用したFLIR oneを熱傷評価に応用した報告¹⁷⁾も散見されるようになった。ITの進歩は目覚ましくAIをはじめとして医療に応用¹⁸⁾されるようになった。

HBO前の安全確認にITIカメラの応用によって確実性が高まると考えられる。それは、「使いすてかいろ」(鉄粉)の検出に現在は金属探知機の応用が一般的となっているが、使用するdeviceの性能とスタッフの技量、環境要因に影響されるので、局所の検出は困難である。この欠点を今回検証したITIカメラがFeOの磁気に依存せず、着衣内部に隠された「使いすてかいろ」のFeOの温度熱を検出して異常温度の可視化によって確度が高まり、ヒューマンエラーを補うことが可能になると期待された。ITIカメラのIR分解能4,800pixel(温度分解能1.0℃)程度であっても着衣に接触することなく「使いすてかいろ」の検出が可能であることから、ボディチェックで「使いすてかいろ」が潜んで有るか否かを温度可視化によって、客観的に無接触で検出することが可能である。加えて季節を問わず「使いすてかいろ」の検出に有用であり、容易に着衣の温度分布が確認でき、「使いすてかいろ」の位置の特定や異常温度の素早い検出に役立つと期待された。

【結語】

「使いすてかいろ」の簡易探索では、Fe成分の検出ではなく、本来の熱源である異常温の検出に切り替える必要がある。ITの普及した現在では、HBO前の患者ボディチェックで「使いすてかいろ」が潜んで有るか否かを温度可視化によって無

接触で検出することが重要であった。

本研究は学内の倫理委員会承認を得て実施し、本論文発表に関連して開示すべき COI 関係にある企業などはない。

参考文献

- 1) 柳下和慶, 灘吉進也:【重要】高気圧酸素治療中のカイロ持ち込みに関する重要な注意喚起. 2024.
<https://www.jshm.net/file/archive/hboreport20240222.pdf> accessed May 15, 2024
- 2) 日本産業規格: 使いすてかいろ. Disposable body warmers JIS S 4100, 1996.
- 3) 山梨厚生病院高気圧酸素治療装置爆発事故原因調査報告書. 日本高気圧環境医学会雑誌 2000; 34: 149-160.
- 4) 大川竜也, 林 則夫, 加藤 裕, 他.: MRI 検査用金属探知機等の実臨床における検出能の評価. 日本放射線技術学会雑誌 2023; 79: 1168-1179.
- 5) 高気圧酸素治療技術部会: 高気圧酸素治療ビデオ講座.
<https://www.juhms.net/gijyutsubukai/course/> accessed Apr 19, 2024
- 6) 太田二郎: 赤外線サーモグラフィによる計測技術. エレクトロニクス実装学会誌 2006; 9: 446-450.
- 7) 宮本聡子, 酒井利奈, 氏平政伸, 馬淵清資: 赤外線サーモグラフィを用いた顔画像による心理状態の評価. 画像電子学会第 221 回研究会. 2006.
- 8) 内藤 理: 九州経済産業局幹部雑感. 九州は携帯カイロの故郷.
<https://samuel-knight.sakura.ne.jp/kan166.htm> accessed Apr 1, 2024
- 9) 若林誠也: 鉄の酸化反応を探る. 化学カイロの分析を通して. 新潟県立教育センター 1983; 64: 17-24.
- 10) 佐藤 博, 山主公彦: 「使い捨てカイロの仕組みに関する調査」. 山梨大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 2017; 22: 75-84.
- 11) 榎原欣作: 高気圧酸素治療の基礎と臨床. 東京; 医学書院. 2009; pp. 2-27.
- 12) 疋田 強: 火の科学. 化学の話シリーズ 3. 東京; 培風館. 1982; pp. 1-182.
- 13) Suzuki T, Hirayama T, Aihara K, Hirohata Y: Experimental studies of moderate temperature burns. Burns 1991; 17: 443-451.
- 14) 鳥井寿夫, 佃 達哉: 物質の引火点. 理科年表 2024. 国立天文台編. 物理/化学部. 東京; 丸善出版. 2023; p. 66.
- 15) 渡邊琢朗, 服部託夢, 前田康治, 塚本壮輔, 戸畑裕志: 高気圧酸素治療における温度センサを用いた単回使用カイロの検出に関する研究開発. 医機学 2015; 85: 327-335.
- 16) 渥美和彦: サーモグラフィの生物学・医学への応用. 一般社団法人映像情報メディア学会誌 テレビジョン 1975; 29: 698-704.
- 17) Jaspers MEH, Carrière ME, Meij-de Vries A, Klaessens JHGM, van Zuijlen PPM: The FLIR ONE thermal imager for the assessment of burn wounds: Reliability and validity study. Burns 2017; 43: 1516-1523.
- 18) 渡部一郎, 渡部朋子: ノルディック杖歩行による手指・足趾の体表温の検討. 日本サーモロジー学会. Biomedical Thermology 2019; 38: 19-25.