

## 1. はじめに

今日の現代社会の問題点として環境汚染、自然災害、異常気象などが挙げられる。その中でも近年、地球温暖化の影響により、地球規模で平均気温が上昇し続け、これまで経験したことのないような豪雨や災害、異常気象による農作物への被害が発生しており、2023年の世界の平均気温の基準値は+0.54℃で、1891年の統計開始以降、2016年を上回り最も高い値となった(1)。地球温暖化がもたらす自然災害や気温の上昇により、人間の生活環境は今後、より劣悪な環境になる可能性が示されている。特に、体温調節機能の低い乳児は、温熱環境の悪化がもたらす人体への健康被害や障害を受けやすい。したがって、これらの被害を予防するために体温調節機能や温熱的生活環境を理解する必要がある。

また、屋外環境では、風速が1 m/s以上となることが多くあり、人体は風の影響を強く受ける。風力とは、気象庁風力階級表による風速の尺度である(2)。屋外では、風速が0.3 m/s以上で1.5 m/sの風力1では、風向は煙がたなびき、風向きがわかる状態の至軽風(微風)である。風速1.6 m/s以上で3.3 m/sの風力2では、顔に風を感じ、木の葉が動く状態の軽風(そよ風)である。風速3.4 m/s以上で5.4 m/sの風力3では、木の葉や細かい小枝が絶えず動く軽風である。4 m/s程度までは少し風がある感覚の軟風だが、風速5 m/s以上になると砂ぼこりがたち、枯れ葉が舞い上がり、少々風が強いと感じる状態となる。よって、屋外環境では、風の影響を受ける可能性があるののでそれらに配慮するには軟風の4 m/s程度までの対流熱伝達を明らかにする必要があると考えられる。

従前の対流熱伝達率に関する研究は、人体の冠状面前方つまり生物の体を腹側と背側(ヒトは前側と後側)に分割する任意の平面からの正対気流を対象としているものが多い。

気流の方向に関する研究は、Colin and Houdas(3)とde Dear et al.(4)、Mayer and Schwab(5,6)、渡邊ら(7)、藏澄ら(8)、Luo et al.(9)などがある。de Dear et al.(4)や渡邊ら(7)、藏澄ら(8)、Luo et al.(9)は、人体の冠状面に対して、前面を中心とした異なる水平方向からの気

流が、人体の対流熱伝達率に与える影響を明らかにしている。また、気流の向きによって人体の対流熱伝達率が有意に変化することが示されている。また、渡邊ら(7)は、人体の冠状面前方からの正対気流に対する補正係数を適用することで、気流の方向の違いに対応できるとされている。そのため、乳児の強制対流時の対流熱伝達率を評価するには、まず冠状面前方からの正対気流を対象にすることが適切と考えられる。しかし、乳児を対象とした研究は稀有である。

Maxell and Kleeman(10)、Hill(11)、Boineau and Lewy(12)によると、乳児の不感蒸泄によって失われる水分と皮膚や気道の粘膜から蒸発する水分は、成人の2.5倍以上とされている。乳児は大人に比べて、水分調整機能が未熟で、体内の水分量や尿量が多く、身体の外に水分が出ていくのが早い。また、新陳代謝が激しく、尿を薄いまま体外へ排出してしまうため、早めに水分を摂取することが不可欠である。また、土川ら(13)によると、屋外へ出かける際に、保護者はベビーカーで乳児を連れ出すことがあるが、ベビーカーに乗車している乳児の日射照射面積率は、大人の立位姿勢と比較して大きくなるため、相対的に日射受熱量が多くなっている。そこで日除けカバーなどを用いるが、直達日射を避けることはできても、風通しが悪くなり、ベビーカー内に熱や湿気がこもりやすくなる。

また、サントリー食品インターナショナル(14)によると地上から1.5 mの温度が31.5℃の時、地上から0.5 mの温度は38.5℃となり約7℃の差があることが明らかになっている。地上から0.5 mというベビーカー乗車乳児と同じ高さになっているので、ベビーカー乗車乳児が劣悪な環境にいることが想像できる。結果として、ベビーカー内は、熱中症になりやすい温熱環境になってしまうため、乳児の熱中症のリスクが高まると考えられる。

そして昨年、藏澄研究室でおこなわれた屋外環境の低風速領域の乳児人体の強制対流熱伝達率の研究(15)によると、低風速域の中でも静穏な領域では、大人と比べて乳児は放射量が低く、放熱しにくいことが述べられている。よって、大人と同じ環境いる場合でも、乳児の温熱

環境の方が劣悪となる。すなわち、低風速域でのベビーカー乗車乳児は放射量が少ないため、鬱熱しやすく熱中症になる可能性が高い。また、低風速域の中でも風速が速い領域では、大人と比べて乳児は放射量が高く、放熱しやすい。さらに風速が上げると、放熱しやすくなり身体冷却が進むと想定された。そして、風速が大きくなると乳児への熱損失の影響が大きくなるため、中風速領域での対流熱伝達率を求め、ベビーカー乗車乳児に対する影響について検討する必要があるという結論を導いている。したがって、乳児の屋外環境の検討には、ベビーカー乗車姿勢の乳児の全身の強制対流時の対流熱伝達率を明らかにすることが不可欠である。また、人体の熱収支を考える際には、裸体の状態を基準とするという考えがある。この考えによって、裸体の人体における対流熱伝達率を、衣服を着た状態の人体にも適用することができる。

そのため、本研究は、標準的なベビーカーのリクライニング角度の姿勢の裸体乳児人体を対象とした、中風速領域の人体全身の対流熱伝達率を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験計画

## 2.1 実験手順

温熱環境の研究に関して、人体の熱収支に基づいた乳児を対象とする被験者実験をおこなうことは極めて困難であり、前例もあまりなく稀である。また、乳児に対する温熱環境の検討には、乳児の人体係数値を明らかにし、人体の熱モデルを使用した実験やシミュレーションをおこなうことが必要だと考えられる。

したがって、本研究では、乳児サーマルマネキンを用いて人体の対流熱伝達率を明らかにする実験の手法をとった。しかし、サーマルマネキン手法には以下の問題点があるため、留意しなければならない。

まず、設定温熱環境条件のサーマルマネキンの放熱制御では、維持することが難しい温度設定が求められる。次に、サーマルマネキンと周囲環境との間で熱平衡が成立し、定常状態が確認された後に実測を始めた。そして、実験中の温熱環境条件とサーマルマネキンの表面温度は一定に保った。

次に、サーマルマネキンに冠状面前方から、風速1.6 m/s-

4.0 m/sまでの面風速を与えて測定した。

サーマルマネキンの各部位の表面温度が34℃で一定となるように、PID制御をおこなった。設定温熱環境条件とサーマルマネキンからの熱損失が時間的に一定して変わらない状態であることを確認した後、サーマルマネキンへの供給熱量とサーマルマネキンの表面温度を測定した。実験終了前の60分は、温熱環境条件とサーマルマネキンの表面温度、供給熱量の実測値を解析に用いた。

## 2.2 実験空間

実験装置を設置した施設の平面図を図1に示す。実験装置は、名城大学の空調された建物の廊下(W3.0 m × H2.7 m × L71.0 m)の床上0.4 mの位置に固定されたサーマルマネキンの周りに空気を流し、人体と周囲の環境との間に熱伝導がなく、空气中にさらされている状態とした。廊下に曝露空間となる風洞(W1.5 m × H1.5 m × L3.8 m)を設置した。風洞は、通気性がよく薄い素材で囲い、整流装置(W1.8 m × H2.0 m × L1.0 m)を備えた吹き出し口を設置した。建物の廊下と風洞には、空調された空気が常に供給されており、気温と風洞の壁の表面温度が同一となるように制御した。

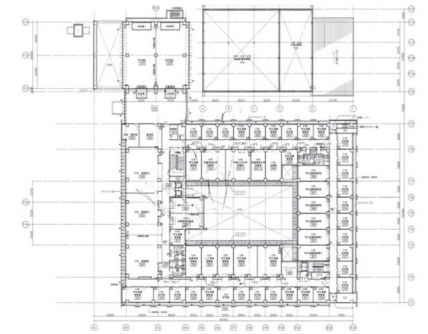


図1 名城大学 平面図

実際に実験装置を組み立てた様子を図2、図3に示す。この装置の特徴としては、風洞を薄い素材で囲むことで気温と壁の温度が均一となり、気温と平均放射温度が等しくなるような環境を作ることができることが挙げられる。

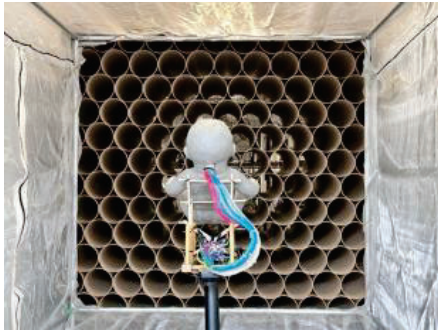


図2 実験装置 後方からの写真



図3 実験装置 側方からの写真

また、実験空間の断面図を図4に示す。

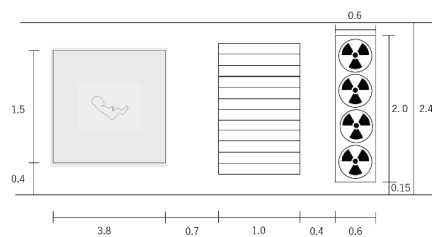


図4 実験空間 断面図

### 2.3 被験者

この実験では、乳児を参加させることは倫理的に難しいので、Kurazumi et al.(16)の手法に基づいて開発された乳児サーマルマネキンにおこなった。表1にサーマルマネキンの特徴を示す。

表1 サーマルマネキンの特徴

Region	Surface area [cm <sup>2</sup> ]	Area ratio [-]	Area ratio [-]	Area ratio [-]
Anterior head	332.2	0.141	0.227	0.227
Posterior head	203.446	0.086		
Ventral trunk	317.364	0.135	0.283	0.283
Dorsal trunk	348.343	0.148		
Right arm	132.79	0.056	0.117	0.164
Left arm	62.08	0.061		
Right hand	143.343	0.026	0.047	
Left hand	50.593	0.021		
Right leg	310.791	0.132	0.258	0.326
Left leg	81.997	0.126		
Right foot	297.749	0.035	0.068	
Left foot	77.84	0.033		

体表の区分は、前頭部と後頭部、軀幹前部、軀幹背部(臀部を含む)、右腕部、左腕部、右手部、左手部、右脚部、左脚部、右足部、左足部の12区分である。厚生労働省の男子の乳児の発育調査(17)より、月齢が1-2か月程度の50%パーセンタイル値データを抽出すると、身長は55.6cmで体重は4.79kgとなる。

サーマルマネキンの構造は、人体形状モデルと発熱部、温度計測部の3層構造とした。3層が電気あるいは熱を通さないようにするために絶縁材を用いてその間に、発熱用のマンガニン線回路、温度計測用のアルメル線回路を挟み込む構造となっている。マンガニン線とアルメル線は表面の全体を等しく網羅するように配置されている。内部側にマンガニン線、表面側にアルメル線を配置されている。

サーマルマネキンは、直流電源から発熱システム回路へ電気を通し、サーマルマネキンの内側に配置したマンガニン線を発熱させている。さらに、マンガニン線に流れる電圧と電流をパソコンで計測することで、マンガニン線の発熱量を常に算出している。発熱システムの回路に通電気を通した直流電源は、AD/DA変換ボードを載せたパソコンで発熱の出力を制御しており、マンガニン線の発熱量の増減をおこなっている。

また、サーマルマネキンの表面直下に配置した、アルメル線回路の電気抵抗の温度依存性を利用する表面温度計測システム回路によって、電圧をAD/DA変換ボードを載せたパソコンで計測し、サーマルマネキンの表面温度を算出している。設定した表面温度を維持するために、サーマルマネキンはPID制御されている。各制御システムは、サーマルマネキンの12の部位ごとに構築されている。

### 2.4 実験姿勢

実験はベビーカーに乗車した姿勢を想定し、リクライニング姿勢でおこなった。ベビーカーのリクライニングの角度を基準化しているのは、CPSA001(製品安全協会)(18)の、CPSA001 SG standard for stroller A型 73のみであり、生後1か月を過ぎたまだ首が座っていない乳児や、乳児を寝かせた姿勢で使用できるベビーカーがある。生後1か月から4か月までの乳児に対するリクライニングの角度は150°以上、生後4か月から48か月までの乳児に対するリクライニングの角度は130°以上としている。よって本研究では、生まれてから1歳ごろまでの乳児を設定しているため、150°に設定した。

サーマルマネキンの姿勢を保ち、全ての表面を気流にさらすために、通気性の良い約5mmの竹材で支持架台を組み立て、木製の架台に直接姿勢をとった。支持架台は熱容量が小さく、乳児サーマルマネキンに接触する部分が少ないため、サーマルマネキンの表面は大気に開放されていると考えられる。また、サーマルマネキンは臍部が実験空間の中央位置になるように設置した。

### 2.5 温熱環境条件

設定温熱環境条件は、自然放熱機構のみのサーマルマネキンの制御を考慮して設定した。サーマルマネキンと実験空間の温熱環境条件を定常状態に保ち、気温23°C程度で実験空間が安定的に運用できるようにした。

熱放射による交換熱量の取り扱いを簡単にするために、平均放射温度と気温が等しい均質で均一な温熱環境条件とした。気流速度は、風洞内で安定化できる面風速を予備実験で探索した結果に基づいて決定した。気流速度は1.5m/sから3.5m/s程度までの範囲で送風速度が安定可能であった7段階とした。いずれの条件とも相対湿度は成り行きとした。

### 3. 実験結果

温熱環境の実測結果を表2に示す。

表2 温熱環境の実測結果

気温[°C]	風速[m/s]	相対湿度[%]	平均放射温度[°C]
23.5±0.1	1.60±0.09	56.0±0.0	23.5±0.1
22.9±0.1	2.07±0.08	62.0±0.0	23.2±0.1
24.1±0.1	2.55±0.11	60.6±0.5	24.3±0.1
23.5±0.1	2.86±0.11	62.0±0.0	23.8±0.1
23.6±0.1	3.09±0.11	56.3±0.5	23.8±0.1
24.5±0.1	3.30±0.11	59.3±0.4	24.8±0.1
22.7±0.1	3.48±0.11	51.8±0.7	22.9±0.1

実験中の気温は±0.1°Cの変動で安定しており、実験中は均一で均質な温熱環境であった。実験中の風速は、風速が速くなると変動幅が少々大きくなっているが、±0.08~0.11m/sの変動で、安定していた。また、相対湿度は52~62%の範囲にあり、その変動は最大でも±0.7%のため安定していた。したがって、各実験中の温熱環境はほぼ安定していたといえる。

実験で得られた熱伝達率のデータは、指数関数で表示され非線形となる。そこで、回帰式を線形で表示した風速と熱伝達率との間の関係を図5に示す。風速と熱伝達率の関係は、風速が速くなるにつれて、熱伝達率も上昇していることが分かる。

この線形回帰式より対流熱伝達率の回帰式を算定した。気流速度1.6m/s < V < 3.48m/sの範囲で、乳児人体の全身の対流熱伝達率の実験式を求めると、実験式(1)となった。

$$h_c = 12.42 V^{0.882} \quad (1.6 \text{ m/s} < V < 3.48 \text{ m/s}) \quad (1)$$

ここで

$h_c$ : 対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$V$ : 気流速度 [m/s]

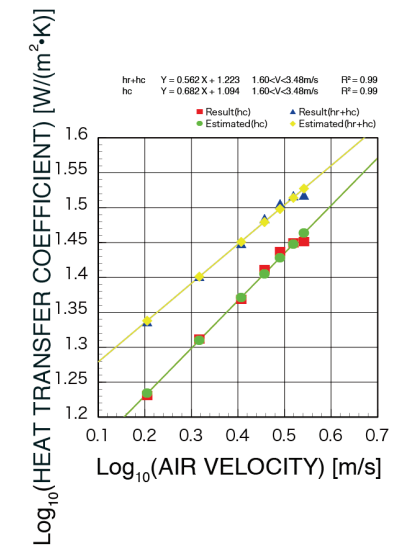


図5 風速と熱伝達率の関係

4. 考察

本研究で明らかにした乳児人体の対流熱伝達率と既往の研究との比較を図6に示す。

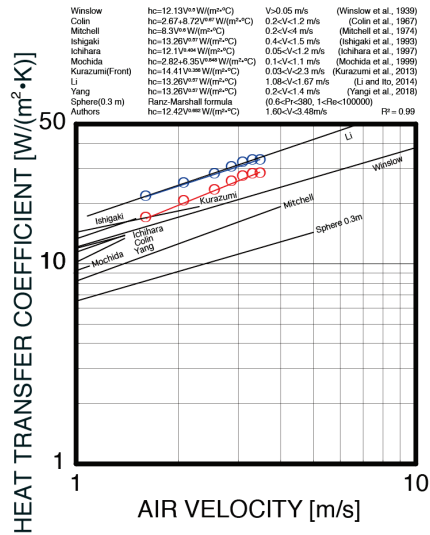


図6 本研究と既往研究の対流熱伝達率の比較

乳児の総合熱伝達率( $h+h_c$ )が青丸、対流熱伝達率( $h_c$ )が赤丸となっている。中風速時における乳児の対流熱伝達率は、風速が速くなるにつれ、高い数値となる傾向を示している。したがって、風速が速くなれば、乳児は熱が奪われやすく、身体冷却が進む可能性があると考えられる。大人と同じ環境下であっても、風速が速くなると乳児は放熱しやすくなるため、留意することが不可欠であるといえる。

本研究結果は、Sphere0.3mの結果(19)と、最も数値に差があることが読み取れる。乳児の対流熱伝達率の数値が高く、球体の対流熱伝達率が最も低い結果となることから、表面に隙間や凹凸がある物体の方が、風速が速くなると対流熱伝達率は大きくなると考えられる。Fujii et al. (20)やHeya et al. (21)は、自然対流境界層は強制対流境界層よりも厚いため、伝熱面の凹凸や粗さは熱伝達に影響を及ぼさないとしている。ただし、局所グラフホフ数 Gr が非常に高い乱流域において、粗さの高さや凹凸が層流底層の厚さよりも大きくなる。したがって、遷移層に達すると、熱伝達が平滑面の場合に比べて高くなるとしている。さらに、

桑原ら(22)は、気流速度が大きくなるほど、形状が複雑になるほど対流熱伝達率は大きくなるとしている。また、高野ら(23)は、表面形状に隙間がある物体は、すまかからの流れの影響によって、対流熱伝達率が大きくなるとしている。すなわち、表面が平滑な物体と比較して、表面が粗くて凹凸がある物体では、風速が速くなると対流熱伝達率は大きくなると考えられる。

5. おわりに

中風速域における乳児人体の強制対流熱伝達率は、風速が速くなるにつれて、大人よりも大きくなる傾向を示すことを明らかにした。そして、経路別の熱収支の観点より、風速が1.5 m/sを超える屋外環境では、乳児は大人と比較して風の影響を受けやすく、対流による熱損失量が多くなることを明らかにした。

本研究の結果から、大人と比較して、乳児は風による対流熱損失量が大きくなる。そのため、相対的に乳児人体の熱損失量が大きくなり、身体冷却が進む危険性があると考えられる。すなわち、乳児の保護者は、限定した要素や温熱感覚、乳児の状態を判断するのは危険であるといえる。

今後は、さらに高い風速域での乳児の対流熱伝達率を求めることで、保護者が乳児の健康状態を正しく把握することにつなげることが不可欠であると考えられる。

参考文献

(1) 国土交通省気象庁: 日本の年平均気温偏差の経年変化. [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_jpn.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html)

(2) 国土交通省気象庁:気象庁風力階級表. [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/yougo\\_hp/kaze.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/yougo_hp/kaze.html)

(3) Colin, J., Houdas, Y. (1967) Experimental determination of coefficient of heat exchanges by convection of human body. Journal of Applied Physiology, 22(1), 31-38.

(4) de Dear, R.J., Arens, E., Hui, Z., Oguro, M. (1997) Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. International Journal of Biometeorology, 40, 141-156.

(5) Mayer, E., Schwab, R. (1988) Direction of low

turbulence air flow and thermal comfort. Proceedings of Healthy Buildings, Stockholm, Sweden, 2, 577-588.

(6) Mayer, E., Schwab, R. (1990) Untersuchung der physikalischen Ursachen. Gesundheits Ingenieur Haustechnik Bauphysik Umwelttechnik, 111(1), 17-30.

(7) 渡邊慎一, 堀越哲美, 石井仁, 宇野勇治, 兼子朋也, 福田明美 (2008) サーマルマネキンを用いた風速と風向が人体対流熱伝達率に及ぼす影響に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, 73(629), 887-893.

(8) 藏澄美仁, 土川忠浩, 大和義昭, 佐古井智紀, Zhecho Dimitrov Bolashikov, 近藤恵美, 深川健太, 飛田国人, 松原齋樹, 堀越哲美 (2013) 気流の方向と姿勢を考慮した人体の熱伝達率の実測. 人間と生活環境, 20(1), 51-61.

(9) Luo, N., Weng, W.G., Fu, M., Yang, J., Han, Z.Y. (2014) Experimental study of the effects of human movement on the convective heat transfer coefficient. Experimental Thermal and Fluid Science, 57, 40-56.

(10) Maxell, M.H., Kleeman, C.R. (1972) Clinical disorders of fluid and electrolyte metabolism 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.

(11) Hill, L.L. (1990) Body composition, normal electrolyte concentrations, and the maintenance of normal volume, tonicity, and acid-base metabolism. Fluid and electrolyte therapy. Pediatric Clinics of North America, 37, 241-256.

(12) Boineau, F.G., Lewy, J.E. (1990) Estimation of parenteral fluid requirements. Fluid and electrolyte therapy. Pediatric Clinics of North America, 37, 257-264.

(13) 土川忠浩, 近藤恵美, 藏澄美仁 (2019) ベビーカーに乗車する乳幼児の日射照射面積率に関する研究. 人間と生活環境, 26(2), 87-92.

(14) サントリー食品インターナショナル: 判明! 真夏日、地面に近い子どもの高さの気温は大人より7°C高い! (※1), 小さな子ども特有の暑熱環境「こども気温」を知ることが子どもの熱中症対策の第一歩! ~GREEN DA・KARAが「こども気温」に注目した熱中症対策啓発活動を開始~, 期間限定の「こども気温 お知らせ自販機」が登場!. <https://www.suntory.co.jp/softdrink/news/pr/article/SBF1397.html>

(15) 鬼頭菜佑, 桐村彩夏, 高田凛花 (2023) 低風速時におけるベビーカー乗車乳児人体の強制対流熱伝達率に関する

研究. 椋山女学園大学生生活科学部生活環境デザイン学科 2023 年度卒業研究.

(16) Kurazumi, Y., Sakoi, T., Yamashita, K., Fukagawa, K., Kondo, E., Tsuchikawa, T. (2019) Thermal manikin of infant. Engineering, 11(11), 735-754.

(17) 厚生労働省 (2022) 乳幼児身体発育調査. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/dl/73-22-01.pdf>

(18) 製品安全協会 (2021) CPSA001 ベビーカーの SG 基準. [https://docs.wixstatic.com/ugd/f19996\\_be389277c3fc49e69147e94c49ebb973.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/f19996_be389277c3fc49e69147e94c49ebb973.pdf)

(19) Ranz, W. and Marshall, W. (1952) Evaporation from Drops: Part II. Chemical Engineering Progress, 48, 173-180.

(20) Fujii, T., Fujii, M. and Takeuchi, M., (1973) Influence of Various Surface Roughness on the Natural Convection. International Journal of Heat Mass Transfer, 16(3), 629-640.

(21) Heya, N., Takeuchi, M., Fujii, T., (1982) Influence of surface roughness on free convection heat transfer from a horizontal cylinder. The Chemical Engineering Journal, 23(2), 185-192.

(22) 桑原浩平, 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實, 中谷貴弘, 松永和彦 (1998) サーマルマネキンの局所および平均対流熱伝達率. 衛生工学シンポジウム論文集, 6, 167-172.

(23) 高野清, 棚沢一郎, 西尾茂文 (1987) 伝熱面との間に間げきのある乱れ促進体による強制対流熱伝達の促進に関する研究. 日本機械学会論文集 B 編, 53(487), 980-983.