

# 通勤車両内日射環境の実態把握とその温熱快適性への影響調査

遠藤 広晴\* 渡部 貴浩 対馬 銀河 (鉄道総研)  
鳥海 隆浩 (JR 東日本)

A field survey of the characteristics of the solar radiation environment in a commuter vehicle  
and their effects on the thermal comfort

Hiroharu Endoh \*, Takahiro Watanabe, Ginga Tsushima, (Railway Technical Research Institute)  
Takahiro Toriumi, (East Japan Railway Company)

In order to examine the characteristics of the solar radiation environment and their effects on thermal comfort in commuter trains, we conducted a field survey in the summer, autumn and winter. In the survey the thermal environment including solar radiation was measured and subjective evaluation concerning the thermal comfort was conducted in a running vehicle. As a result, we found that the amount of solar radiation inside the vehicle was changed rapidly due to the change of the traveling direction of the vehicle and it could be estimated based on the theory of the diurnal motion of the sun. We also found that the solar radiation affected not only on the local thermal comfort of the radiated body part but also on the whole-body thermal comfort.

キーワード：通勤車両, 温熱環境, 日射, 温熱快適性, 主観評価

(Keywords, Commuter vehicle, Thermal environment, Solar radiation, Thermal comfort, Subjective evaluation)

## 1. 緒言

通勤車両内の温熱環境に対する乗客からの「暑い」、「寒い」といった不満の声は毎年多く寄せられている。より快適な車内温熱環境の実現のためには、乗客の快適性の観点から温熱環境評価を行い、不快となる状況を明らかにすることが重要である。

温熱的な快適性には、気温、湿度、風速、日射などの複数の要素が影響するため、車内温熱環境の快適性評価においては、車内の各温熱要素の特徴を把握したうえで、その乗客の快適性への影響を考慮する必要がある。通勤車両内の気温、湿度、風速環境に関しては、遠藤ら<sup>(1)~(3)</sup>により、各温熱要素の特徴とその乗客の快適性への影響が調べられているが、日射環境に関する調査・研究報告例は極めて少ない。

本研究の目的は、通勤車両内の温熱快適性評価手法の構築に向けた基礎検討として、車内に差し込む日射量（以後、「車内日射量」）の実態を把握すると共に、その温熱快適性への影響に関する知見を得ることである。本研究では、走行中の通勤車両内の日射量、および当該車両の座席に座った被験者の生理・心理状態を測定し、車内日射量の特徴、およびその温熱快適性への影響を調べた。また、車内日射量に関しては、本調査以外の線区・季節・車両に対する推定可能性を検討するために、太陽の日周運動の理論に基づく推定方法について検討し、その推定精度を確認した。

## 2. 方法

### 2.1 調査方法

#### 2.1.1 実施時期・走行線区・車両

車内日射量は、季節による太陽の日周運動の変化や、太陽と車両との位置関係に影響されると考えられる。そこで、測定調査は夏季（2019年7月）、秋季（2018年11月）および冬季（2019年12月～2020年1月）において朝から夕方にかけて実施した。また、太陽と車両との位置関係による影響を把握するため、様々な方向を走行する線区を調査対象とした。各季節で計6日間（全季節で延べ18日間）の測定調査を実施し、様々な方向を走行中の車内日射量を測定した。試験車両の概要を図1に示す。試験車両はロングシートが設置された通勤型車両で、日射は主にロングシート背面の窓から車内に入射する。

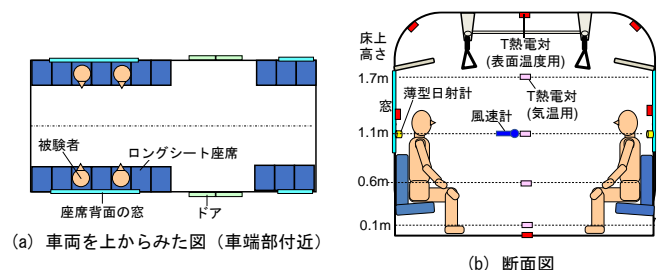


図1 試験車両の概要と測定センサ・被験者配置

2・1・2 測定項目と測定内容

温熱環境に関しては、試験車両中央付近の気温、湿度、風速、表面温度および車内日射量を測定した。車内日射量は座席背後の窓面に薄型日射センサを貼付して測定した。使用した測定機器を表 1 に、試験車両内での測定センサ配置方法の概要を図 1(b)示す。なお、車外の天気や線路沿線の構造物等の状況を記録するため、車窓から見える外の様子をビデオカメラで撮影した。また、GPS を窓際に配置し、走行中の車両位置(経緯度)を記録した。

生理量・心理量に関しては、ロングシートに着座した被験者の皮膚温測定および主観評価を実施した。被験者は 20 代～40 代の男性 6 名で、このうち 1 回の調査あたり 2～4 名が参加した(被験者は別日に複数回参加)。なお、進行方向に対して左右側の各シートに少なくとも 1 名が着座するようにした(図 1(a)参照)。

皮膚温は前額、首背面、胸、上腕、前腕、大腿、下腿の 7 点を 2 秒間隔で測定した。主観評価は、部位別(「頭～首部」, 「肩～腰部」, 「下半身」の前面と背面)、および全身の温冷感、快適度について、予め指定した区間において 5 分間隔で評価した。主観評価の尺度を表 2 に、部位別および全身評価用の主観評価用紙の例(快適度)を図 2 に示す。

表 1 調査で使した測定器/センサ

測定項目	測定器/センサ	型式	メーカー
気温 表面温度	T熱電対	DW-1-DVT-0.32	東洋熱科学
湿度	携帯型 温湿度計	ロガー:LR5001 センサ:LR9504	Hioki
風速	アネモマスター	6501	Kanomax
日射	薄型日射計	ML-02	EKO
列車位置	GPSロガー	GPSMAP 64sc J	GARMIN

表 2 主観評価尺度

温冷感 (9段階)	「-4:寒い」「-3:やや寒い」「-2:涼しい」「-1:やや涼しい」 「0:中立」「+1:やや暖かい」「+2:暖かい」「+3:やや暑い」「+4:暑い」
快適度 (7段階)	「-3:非常に不快」「-2:不快」「-1:やや不快」「0:快でも不快でもない」 「+1:やや快適」「+2:快適」「+3:非常に快適」

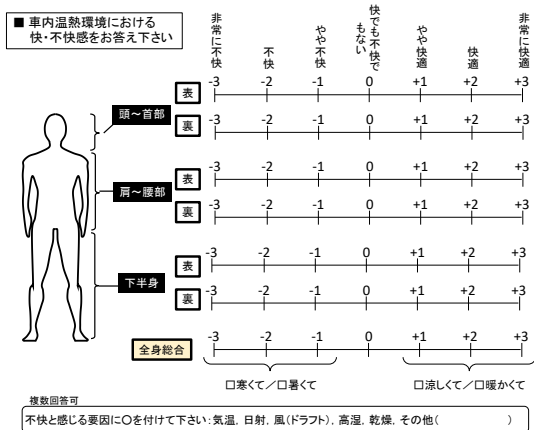


図 2 調査で使した主観評価用紙(快適度評価部を抜粋)

2・2 車内日射量の推定方法

走行中の車両側面(窓面)に到達する日射量 $J_v$  [ $W/m^2$ ]は、大気を直進して平行光線として到達する「直達日射」の鉛直面成分 $J_{dv}$  [ $W/m^2$ ], 日射が大気中で散乱された後に全天空から到達する「天空日射」の鉛直面成分 $J_{sv}$  [ $W/m^2$ ], および線路沿線の構造物や地表から反射されて到達する「反射日射」の鉛直面成分 $J_{rv}$  [ $W/m^2$ ]の和として、下式により求められる<sup>(4)</sup>。

$$J_v = J_{dv} + J_{sv} + J_{rv} \tag{1}$$

$$J_{dv} = J_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \cos h \cos(A - A_v) \tag{2}$$

$$J_{sv} = \frac{1}{4} J_0 \sin h \frac{1 - P^{\frac{1}{\sin h}}}{1 - 1.4 \ln P} \tag{3}$$

$$J_{rv} = \frac{1}{2} \rho_G \left( J_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \sin h + \frac{1}{2} J_0 \sin h \frac{1 - P^{\frac{1}{\sin h}}}{1 - 1.4 \ln P} \right) \tag{4}$$

ただし、 $h$ : 太陽高度 [rad],  $A$ : 太陽方位角 [rad],  $A_v$ : 車両側面の方位角 [rad],  $J_0$ : 大気圏外法線面日射量 [ $W/m^2$ ] (年平均  $1353 W/m^2$ ),  $P$ : 大気透過率 [N.D.],  $\rho_G$ : 地面の日射反射率(アルベド) [N.D.]である。太陽高度  $h$ , 太陽方位角  $A$  は車両の経緯度(GPS ロガーで取得)および時刻から太陽の日周運動の理論を基に算出される<sup>(4)</sup>。車両側面の方位角 $A_v$ は車両の経緯度の時間変化により進行方位を算出し、その垂直方向として導出される。本研究では、大気透過率  $P$  は東京都の月平均(7月:0.59, 11月:0.70, 12月～1月:0.69)<sup>(4)</sup>を使用し、アルベドは都市部での代表値である 0.13 を使用した<sup>(5)</sup>。車内日射量は $J_v$  [ $W/m^2$ ]に窓の日射透過率(試験車両の窓は約 0.43)を乗じることで算出される。

3. 結果および考察

3・1 車内日射量の測定結果および推定結果

測定結果の例として、秋季および夏季において、ほぼ同一時間帯に同一線区(主に南北方向の線区)を走行した際の車内日射量を図 3 に示す。図中には、2・2 の方法による推定結果も併せて示した。また、雲や線路沿線の構造物により日射が継続的に遮蔽された区間(ビデオ画像で確認)や走行中の窓面方位(GPS 情報から算出)も示した。

当該時間帯は、太陽は南西側に位置しているのに対し、車両は南北方向(南→北)を走行していた。この太陽と車両の位置関係により、進行方向右側(東側)は日陰側となるため直達日射は無く、観測された日射量は  $50 W/m^2$  以下であった。一方、進行方向左側(西側)は日向側となるため直達日射が当たり、 $100 W/m^2 \sim 200 W/m^2$  程度の日射量が観測された。ただし、走行方向がカーブにより北東側に変化した際、進行方向左側窓面(窓面方位が西から北西に変化)で観

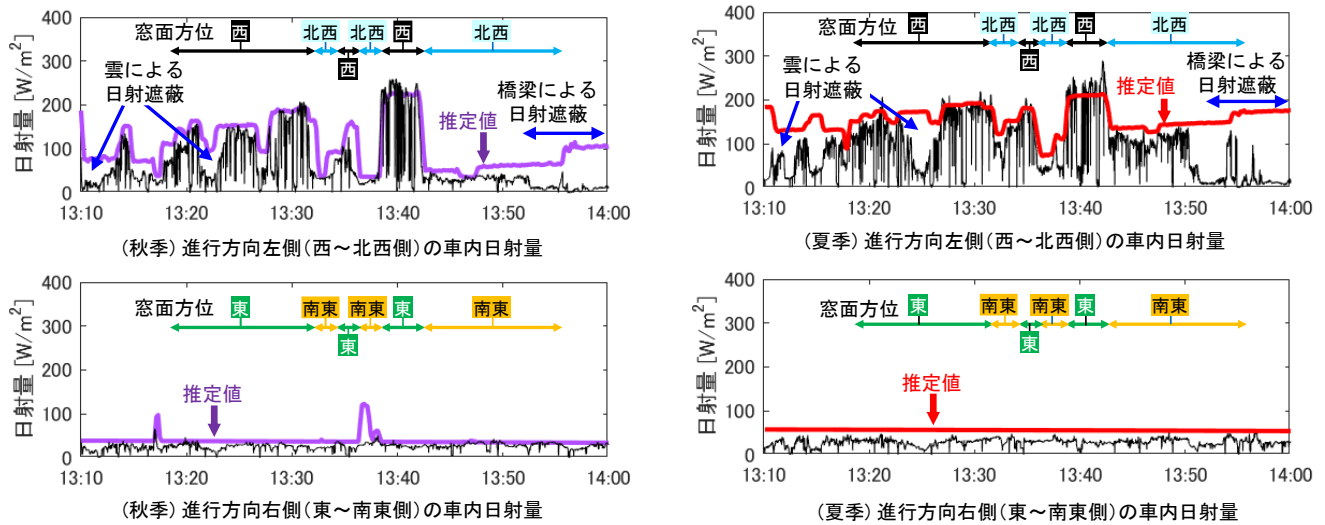
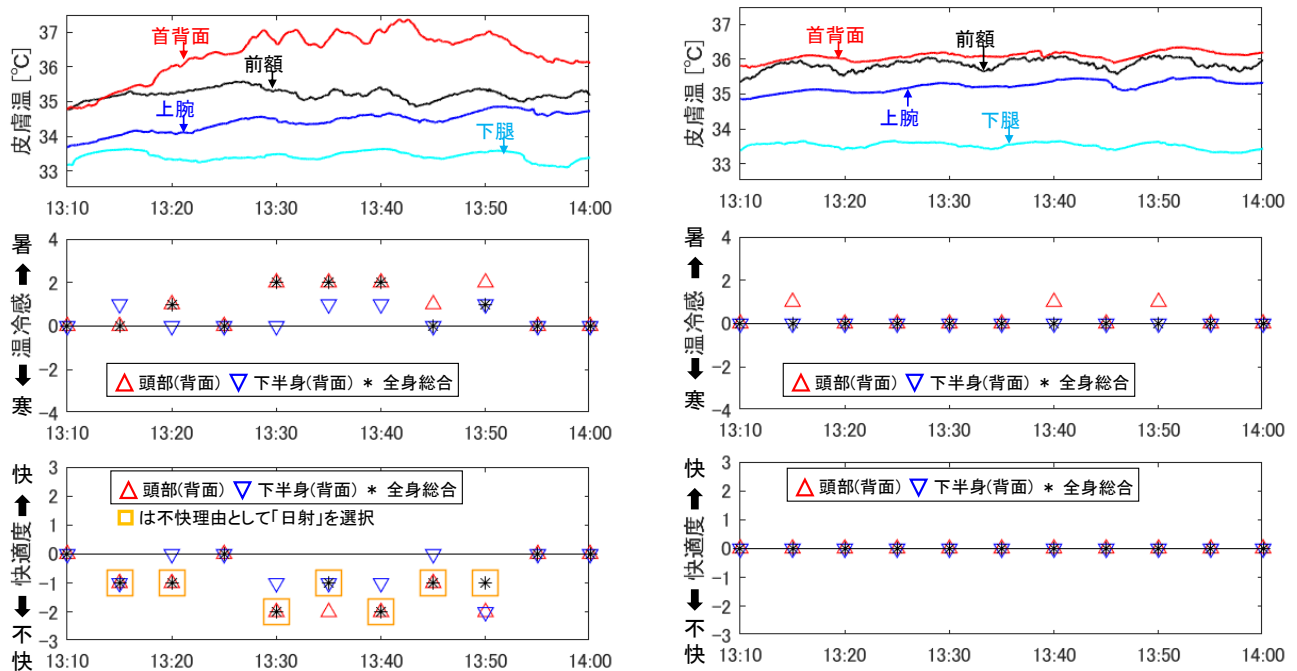


図 3 車内日射量の測定結果例 (秋季調査および夏季調査で南北方向の同一線区を走行した試番)



(a) 進行方向左側 (西～北西側) : 被験者の生理・心理量

(b) 進行方向右側 (東～南東側) : 被験者の生理・心理量

図 4 皮膚温および主観評価結果例 (夏季調査結果)

測された日射量は急激に低下し、その傾向は秋季より顕著だった。この季節による相違は、同一時刻での太陽高度の相違によるもので、秋季は夏季よりも同一時刻での太陽高度が低く、直達日射の北側成分が小さいためと考えられる。2・2の方法による車内日射量推定値は、上述した日陰側・日向側の日射量の特徴をよく捉えていることが確認できる。なお、秋季・夏季・冬季の各季節で観測された車内日射量の最大値は  $300\text{W/m}^2 \sim 400\text{W/m}^2$  であり、最大日射量を観測した時刻や窓面方位は季節により異なったが、これらについ

ても、2・2の方法で推定できることを確認している。

車内日射量の変動成分としては、2・2の方法が対象とする太陽と車両の位置関係の変化による成分の他に、線路沿線構造物の日射遮蔽による変動成分 (同一方向走行中の数秒レベルの変動成分) も観測された。後者には、構造物の高さや構造物間の距離、線路と構造物との位置関係等が影響すると考えられ、それらが車内日射量に及ぼす影響の推定方法については今後の検討課題である。

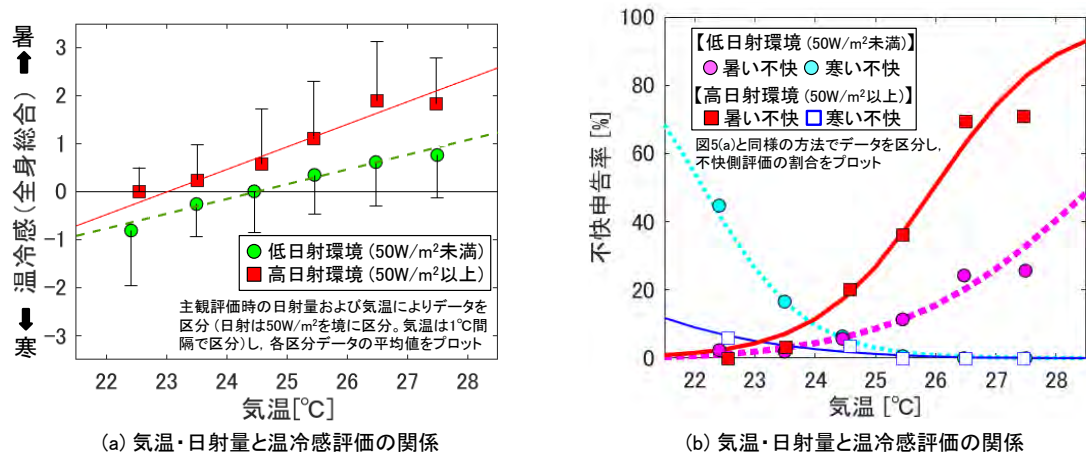


図 5 気温・日射量と主観評価の関係 (夏季調査結果)

### 3.2 生理量・心理量への影響

被験者の皮膚温および主観評価結果の例を図 4 に示す。日陰側である進行方向右側の被験者は、首背面と前額の皮膚温がほぼ同一で、温冷感や快適度はほぼ中立であった (図 4(b))。これに対し、日向側である進行方向左側の被験者は、首背面皮膚温が前額皮膚温と比較して  $1^\circ\text{C}\sim 2^\circ\text{C}$  高い傾向を示し、温冷感は頭部背面および全身総合で暑い側に評価され、快適度は日射が原因で不快側に評価されていた (図 4(a))。

夏季調査を例として、気温・日射量と温冷感 (図 5(a): 全身総合評価の平均値)、および不快申告率 (図 5(b): 快適度評価で不快側に評価した割合) の関係を図 5 に示す。日射に関しては、日陰側でも拡散日射や反射日射により  $50\text{W/m}^2$  程度の日射量が観測されたことを参考に (図 3 の 2 段目参照)、主観評価時の日射量が  $50\text{W/m}^2$  未満の場合を「低日射環境」、 $50\text{W/m}^2$  以上の場合を「高日射環境」として分類したうえで、気温と主観評価との関係を調べた。なお、各図中には、低日射環境および高日射環境の各データに対する回帰分析結果 (図 5(a)の温冷感に対しては線形回帰分析、図 5(b)の不快申告率に関しては多項ロジスティック回帰分析) を併せて示した。

同一気温でも、高日射環境の方がより暑い側の評価となる傾向が確認できる (図 5(a))。また、気温が  $25^\circ\text{C}$  以上では、高日射環境で暑い不快感が増大し、 $24^\circ\text{C}$  以下では寒い不快感が低減する傾向が確認できる (図 5(b))。

以上より、走行車両の窓面を通して直達日射を受けた場合、その受照部位の皮膚温が上昇すると共に、当該部位だけでなく全身の温冷感や快適性にも影響を及ぼすことを確認した。また、日射の快適性への影響の程度は気温により異なり、夏季に関しては、気温  $25^\circ\text{C}$  以上で日射を受けた場合に快適性悪化の強い要因となることが示唆された。

### 4. 結言

本研究では、通勤型車両内の日射環境の実態とその温熱快適性への影響を把握するための測定調査を行った。

車内日射量測定により、車両の走行方向の変化や線路沿線構造物の日射遮蔽により数  $100\text{W/m}^2$  レベルの変動が生じることを確認した。また、車両の走行方向の変化に起因する変動成分に関しては、車両位置や窓の日射透過率の情報と太陽の日周運動の理論に基づく推定値が実測値と良く一致することを確認し、本調査以外の線区・季節・車両に対する車内日射量推定も可能であることが示唆された。線路沿線構造物の日射遮蔽による変動成分の推定方法に関しては今後の検討課題である。

温熱快適性の主観評価により、日射受照部位だけでなく全身の快適性に影響を及ぼすことを確認し、温熱快適性評価において日射影響を考慮することの重要性が示唆された。本研究では  $50\text{W/m}^2$  を境に低日射/高日射環境に分類して日射の快適性への影響を検討したが、日射影響を考慮したより乗客の体感に合う快適性評価を実現するためには、日射量の大きさと快適性の関係に関する詳細な知見が必要である。また、車内日射量は、車両の走行方向の変化や線路沿線構造物の日射遮蔽による変動成分があるため、それら変動成分が温冷感や快適性に及ぼす影響についても把握する必要がある。これらの知見獲得は今後の課題である。

### 文 献

- (1) 遠藤広晴他:「夏季の通勤列車内の温熱環境調査」, 第 37 回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.187-190 (2013)
- (2) 遠藤広晴:「列車内の温熱快適性を測る」, RRR, vol.70, No. 8, pp.24-27 (2013)
- (3) 遠藤広晴他:「夏季の通勤列車内の温熱快適性予測手法」, 鉄道総研報告, vol.29, No.7, pp.27-32 (2015)
- (4) 田中俊六他:「建築環境工学 改訂 3 版」, 井上書院 (2006)
- (5) 森脇亮他:「都市域の陸面パラメータの算定」, 水工学論文集, vol.46, pp.91-96 (2002)