

## 6. 走行車両による路面温度測定と航空機による熱画像撮影

### Measurement of Road Temperature by Car and by Aircraft with Thermography

技術支援課 小作好明、峰岸順一

#### 1. はじめに

ヒートアイランド現象は、都市化の進展に伴い、人工排熱の増加や建物の凹凸による風の通りにくさに加えて、舗装やコンクリートで地表面が被覆されたことが原因の一つといわれている。東京都ではヒートアイランド対策を重点事業の一つとして位置づけており、建設局ではヒートアイランド現象を抑制する取り組みとして、水分を含むことができ、水分が蒸発する際の気化熱で舗装の温度上昇を抑制する保水性舗装や、近赤外領域の波長の日射を反射して舗装温度の上昇を抑制する遮熱性舗装を施工している。

保水性舗装や遮熱性舗装を施工するにあたり、その効果が発揮できる適用箇所について選定手法を検討するため、走行車両による路面温度の測定と、航空機（ヘリコプター）による上空からの熱画像撮影を行った。また、測定値の精度を確認するため、定点観測も実施した。これらの測定結果について報告する。



写真-1 路面温度測定車

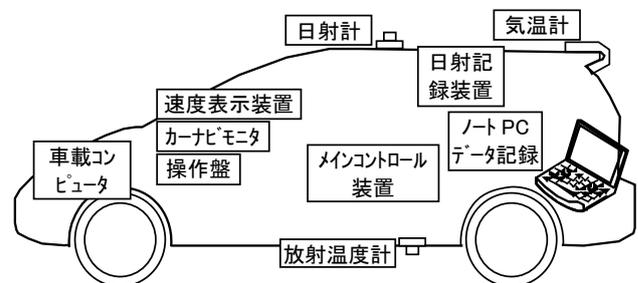


図-1 路面温度測定車装置概念図

#### 2. 測定方法

##### (1) 路面温度測定車

走行車両による路面温度の測定は、路面温度測定車を使用した。写真-1 に路面温度測定車を示し、路面温度測定車の装置概念図を図-1 に示す。路面温度測定車には放射温度計(写真-2)が車体の下に装備されており、これにより、走行車線の路面温度を測定する。気温計(写真-3)は、前に向けた通風管の中にあり、走行時には空気が流入して気温が測定できる。日射計(写真-4)は、天井に設置しており、走行時の日向と日陰を判別することができる。



写真-2 放射温度計(車体下)



写真-3 気温計



写真-4 日射計



写真-5 使用ヘリコプター

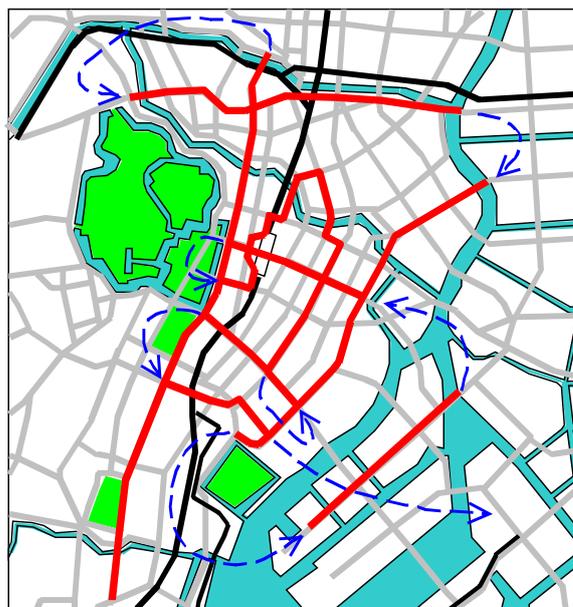


図-2 飛行経路

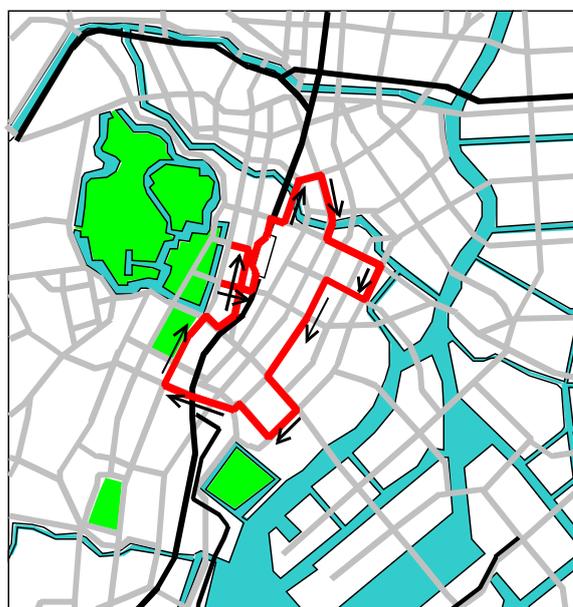


図-3 路面温度測定車調査路線

## (2) 熱画像撮影

写真-5 に熱画像撮影と可視画像撮影に使用したヘリコプターを示す。自重 374 kg、定員 2 名の小型ヘリコプターである。航続距離は 500km で、飛行時間は 3 時間程度である。撮影高度は、2000 FT (約 610m) とし、熱画像の解像度は約 2m、可視画像の分解能は約 36cm となっている。

撮影時刻は、平成 21 年(2009)8 月 12 日 12:35～13:11 である。夜間撮影も実施したが、低高度に雲があったため、日比谷通りと靖国通りの一部飛行した後、撮影を中止した。飛行経路を図-2 に示す。

## 3. 路面温度測定車による測定

### (1) 路面温度測定車による調査

路面温度測定車による調査路線を図-3 に示す。路面温度測定を複数回実施するため、信号待ち等も考慮に入れて 1 時間以内で 1 周できる調査路線を設定した。調査路線の総延長は保水性舗装や遮熱性舗装を含む約 10 km である。

測定車線は第 2 走行車線を基本とし、最高速度 50km/hr 以下で走行させて路面温度等を測定した。測定日、測定時刻、データのサンプリング間隔は以下の通りである。

- ・測定日：  
平成 21 年(2009) 8 月 12 日～13 日
- ・測定時刻：  
昼間 (12、13、14 時の 3 回)  
夜間 (22、23、0、1、2、3 時の 6 回)
- ・データのサンプリング間隔：  
路面温度および気温 0.5 秒、日射量 1 秒

### (2) 路面温度測定車と定点での測定値の確認

調査実施前に車載された路面温度計 (放射温度計) と走行通過地点(定点)での接触型温度計の測定値の比較を行った。路面温度測定車の速度を 50km/hr と 30km/hr の 2 通りで実施している。定点測定は、路面温度測定車通過直後に接触型温度計で路面温度を測定している。日射量と気温については、写真-6 に示すように、路面温度測定車が通過したときの日射量と気温を道路沿道で測定している。

路面温度の測定結果を表-1 に示す。車載放射温度計と接触型温度計の路面温度測定結果は、大きな差がなく、路面温度測定車が路面温度を精度よく測定していることを確認した。表-2 に気温の測定結果を示す。路面温度測定車の気温が 3 度以上も高く、気温の値は参考値扱いにした。表-3 に日射量の測定結果を示す。日射量は 150W/m<sup>2</sup> 程度の差があったが、定点測定の値が低めとなっていると考えられ、車載の日射計の応答速度には問題がなかったため、日向と日陰の判別には特に支障にはならなかった。

### (3) 定点観測

埋設温度計の設置例を写真-7 に示す。また、調査路線内の定点観測地点 (埋設温度計) の位置を図-4 に示す。埋設温度計は夏期の間、10 分間隔で 24 時間連続測定しているが、このうち、路面温度測定車が通過した時刻のデータを抽出している。

表-4 と表-5 に路面温度の測定結果を示す。昼間の場合、路面温度測定車の測定値と定点観測の値を比べると、概ね路面温度測定車の測定値の方が定点観測の温度よりも低くなっている。これは、路面温度測定車が常に車両が通過する位置で測定しているため、走行

表-1 路面温度測定結果(調査実施前)

測定機器	走行速度 (km/hr)	
	50	30
路面温度測定車 (車載放射温度計)	53.5	53.4
定点測定 (接触温度計)	52.2	53.9
温度差(deg)	1.3	-0.5

表-2 気温測定結果(調査実施前)

測定機器	走行速度 (km/hr)	
	50	30
路面温度測定車 (車上気温計)	38.1	39.3
定点測定 (自然通風気温計)	35.1	35.7
温度差(deg)	3.0	3.6

表-3 日射量測定結果(調査実施前)

測定機器	走行速度 (km/hr)	
	50	30
路面温度測定車 (車上日射計)	743	814
定点測定 (日射計)	600	664
差(W/m <sup>2</sup> )	143	150



写真-6 事前確認状況

車両の陰が影響しているのに対して、埋設温度センサーが必ずしも走行車線に設置されていないためである。特に、新常盤橋、西新橋の定点観測地点で温度差が 11 度にもなっているが、このときは渋滞があり、車両に

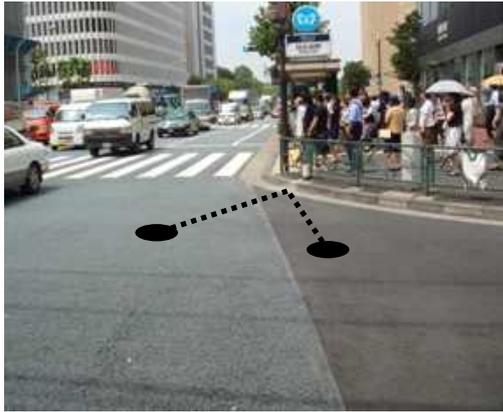


写真-7 埋設温度計(有楽町1丁目)



図-4 埋設温度計の位置

表-4 路面温度測定結果(昼間)

測定場所	舗装種別	測定時間帯	昼間路面温度(°C)		差
			測定車	定点観測	
丸の内2丁目	保水性	12時	37.4	45.6	-8.2
		13時	41.5	48.8	-7.3
		14時	40.4	45.7	-5.3
新常盤橋	保水性	12時	46.2	46.8	-0.6
		13時	39.0	50.3	-11.3
茅場町1丁目	遮熱性	12時	39.7	45.4	-5.7
		13時	43.0	47.4	-4.4
京橋	保水性	14時	43.4	47.4	-4.0
		12時	45.6	43.3	2.3
		13時	47.6	45.3	2.3
築地4丁目	遮熱性	14時	45.8	38.9	6.9
		12時	42.0	46.7	-4.7
		13時	42.6	48.0	-5.4
西新橋	遮熱性	14時	47.4	47.7	-0.3
		12時	40.2	38.6	1.6
		13時	40.1	42.3	-2.2
内幸町	遮熱性	14時	36.5	47.5	-11.0
		12時	49.2	46.7	2.5
		13時	46.6	48.5	-1.9
有楽町1丁目	遮熱性	14時	49.7	47.7	2.0
		12時	43.2	47.2	-4.0
		13時	42.9	48.6	-5.7
		14時	38.4	45.8	-7.4

よって陰になる時間が長くなったため、路面温度測定車の路面温度が低くなったと考えられる。逆に京橋の定点観測地点では、13時の周回時点と14時の周回時点で45.3°Cから38.9°Cに温度が下がっており、定点観測地点のセンサ部分が日陰になったため、路面温度測定車の測定値の方が高くなっている。夜間の場合では、路面温度測定車の測定値と定点観測地点の温度差は-3.4から4.3度までであるが、平均化してしまうと、温度差は0.4度となり、概ね路面温度測定車の測定値と定点観測地点の温度差は少ないものとなった。

表-5 路面温度測定結果(夜間)

測定場所	舗装種別	測定時間帯	夜間路面温度(°C)		差
			測定車	定点観測	
丸の内2丁目	保水性	22時	34.6	31.6	3.0
		23時	32.8	31.0	1.8
		0時	33.5	30.7	2.8
		1時	26.8	30.2	-3.4
		2時	29.9	29.5	0.4
		3時	30.5	29.3	1.2
新常盤橋	保水性	22時	31.4	32.7	-1.3
		23時	31.4	32.0	-0.6
		0時	30.2	31.4	-1.2
		1時	29.3	30.7	-1.4
		2時	31.0	30.1	0.9
		3時	29.5	29.8	-0.3
茅場町1丁目	遮熱性	22時	32.8	31.5	1.3
		23時	30.0	30.9	-0.9
		0時	30.0	30.5	-0.5
		1時	28.0	29.8	-1.8
		2時	27.9	29.5	-1.6
		3時	29.5	28.6	0.9
京橋	保水性	22時	31.8	30.0	1.8
		23時	31.6	29.5	2.1
		0時	31.4	29.2	2.2
		1時	31.1	28.9	2.2
		2時	29.2	28.5	0.7
		3時	32.1	27.8	4.3
築地4丁目	遮熱性	22時	28.5	30.9	-2.4
		23時	30.5	30.3	0.2
		0時	30.7	29.9	0.8
		1時	29.4	29.5	-0.1
		2時	25.6	29.1	-3.5
		3時	26.8	28.1	-1.3
西新橋	遮熱性	22時	31.0	30.6	0.4
		23時	28.7	30.2	-1.5
		0時	29.8	29.5	0.3
		1時	28.2	29.4	-1.2
		2時	29.7	29.1	0.6
		3時	28.3	28.8	-0.5
内幸町	遮熱性	22時	32.7	29.6	3.1
		23時	32.2	29.4	2.8
		0時	33.3	29.1	4.2
		1時	33.0	28.9	4.1
		2時	30.1	28.6	1.5
		3時	30.3	27.5	2.8
有楽町1丁目	遮熱性	22時	27.7	29.9	-2.2
		23時	29.6	29.6	0.0
		0時	30.5	29.3	1.2
		1時	28.5	28.9	-0.4
		2時	27.9	28.6	-0.7
		3時	26.8	27.2	-0.4
平均値					0.4

#### (4) 路面温度と日射量マップ

路面温度測定車の測定結果をもとに、路面温度マップおよび日射量マップを作成した。路面温度測定車の各測定時間帯での走行位置は異なるため、測定距離は、測定区間毎のマーキング位置（交差点間）で補正して整理している。マップには、測定した上下車線がわかるように記入し、着色は片側車線だけを着色している。路面温度マップでは測定された路面温度を5℃毎に色分けし、日射量マップでは測定された日射量を4つの範囲に分けて色分けした。色分けの凡例を図-5に示す。測定時間毎にマップを作成したが、ここでは一例として、図-6に12時測定の日射量マップと図-7に路面温度マップを示す。

#### (5) 時刻毎の日射量と路面温度マップ

調査路線のうち、一例として永代通りの区間について、図-8に位置図、図-9に日射量マップ、図-10に昼間の路面温度マップ、図-11に夜間の路面温度マップを示す。日射量マップと昼間の路面温度マップを見比べると、日向日陰と路面温度の対応関係がよいことが分かる。しかし、夜間になると、日向日陰による温度差が小さくなるため、均されてしまい、対応関係が分からなくなっている。

凡例 日射量

	600W/m <sup>2</sup> 以上
	360W/m <sup>2</sup> 以上～600W/m <sup>2</sup> 未満
	120W/m <sup>2</sup> 以上～360W/m <sup>2</sup> 未満
	120W/m <sup>2</sup> 未満

凡例 路面温度

	55℃以上
	50℃以上～55℃未満
	45℃以上～50℃未満
	40℃以上～45℃未満
	35℃以上～40℃未満
	30℃以上～35℃未満
	25℃以上～30℃未満
	25℃未満

図-5 日射量マップと路面温度マップの凡例

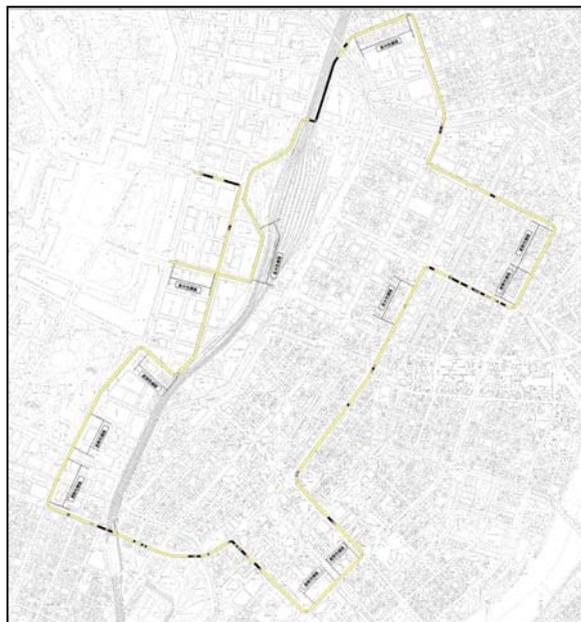


図-6 日射量マップ  
(平成21年8月12日 12時頃測定)

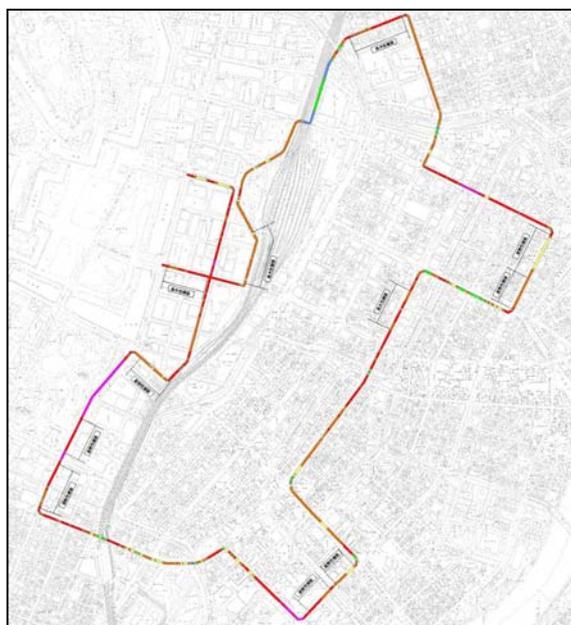


図-7 路面温度マップ  
(平成21年8月12日 12時頃測定)



図-8 永代通り区間の位置図

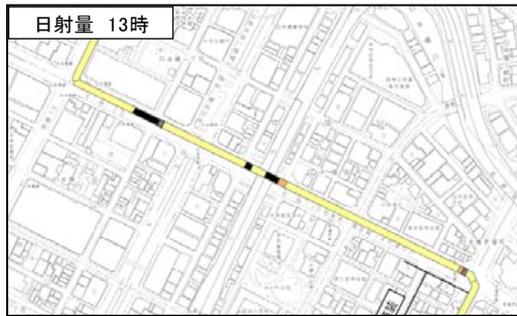
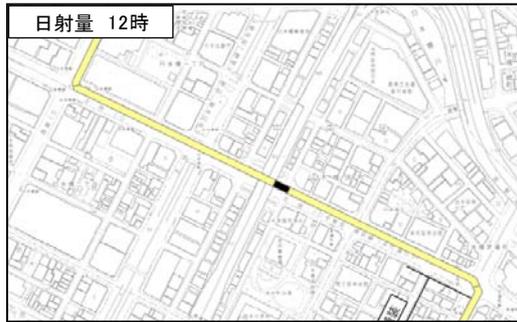


図-9 日射量マップ (永代通り)

図-10 路面温度マップ (昼間 永代通り)



図-11 路面温度マップ (夜間 永代通り)

#### 4. 航空機撮影熱画像

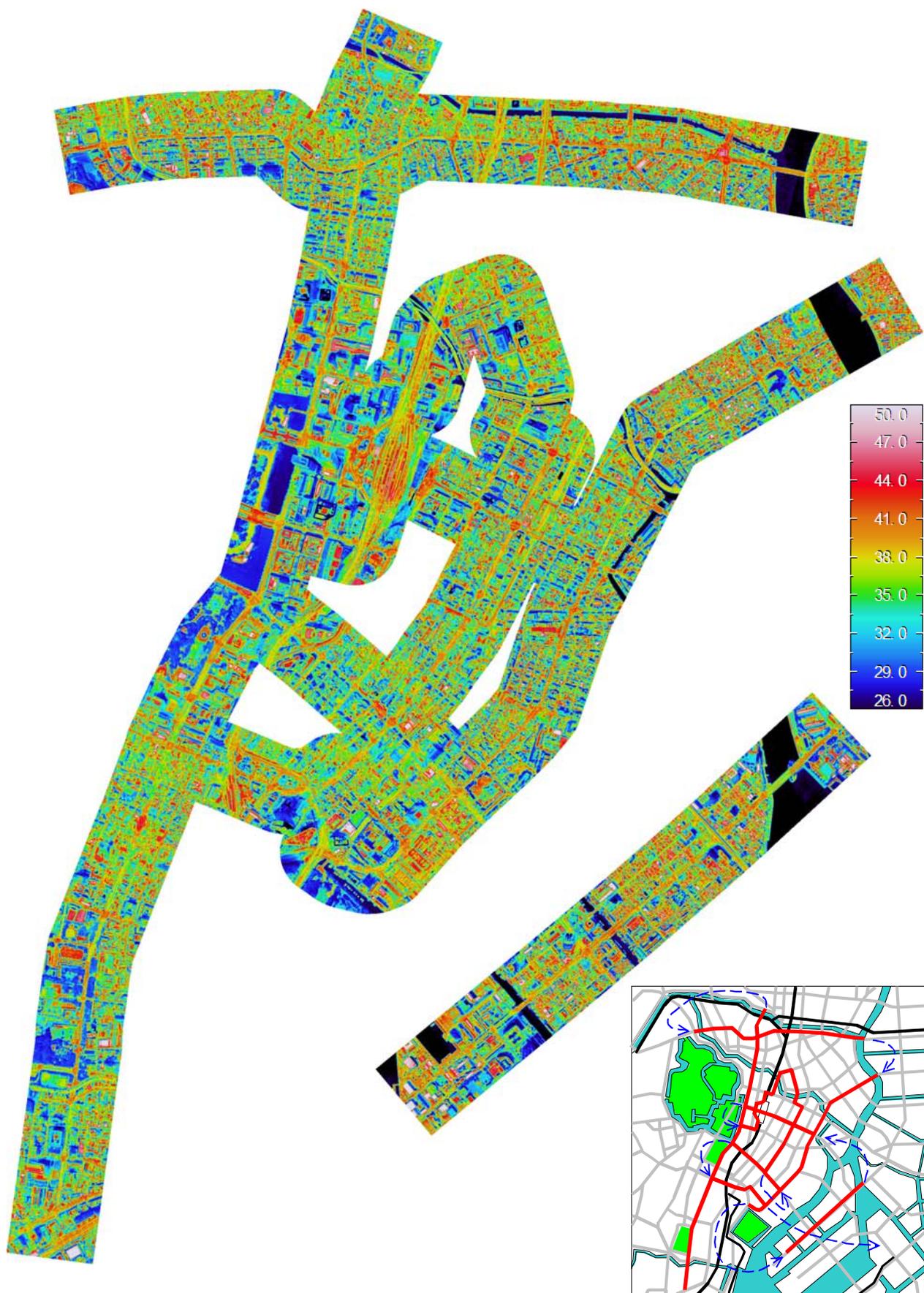


図-12 熱画像（平成 21 年 8 月 12 日 12:35~13:11 撮影）

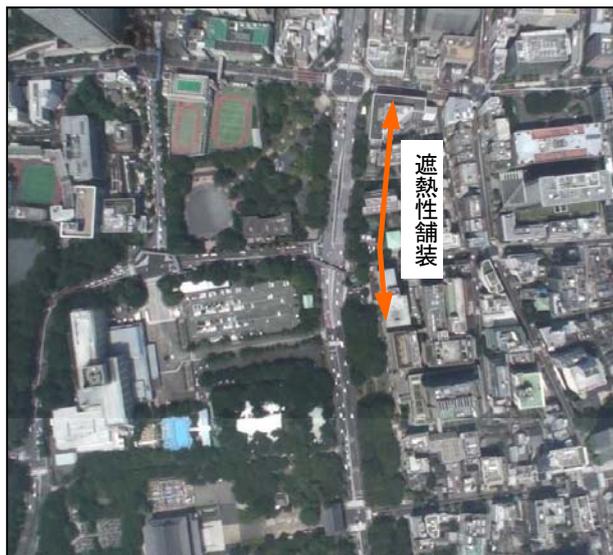


図-13 可視画像(芝公園付近)

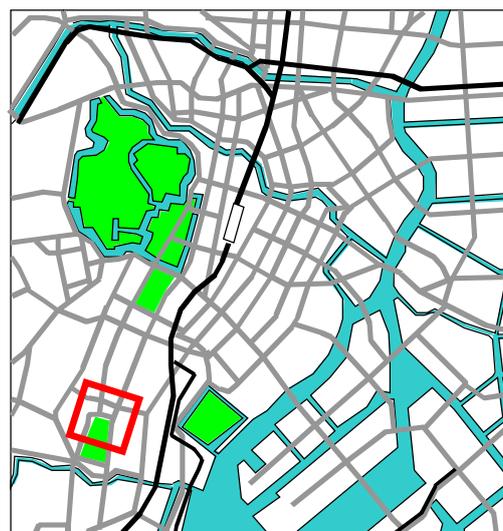


図-14 位置図(芝公園付近)

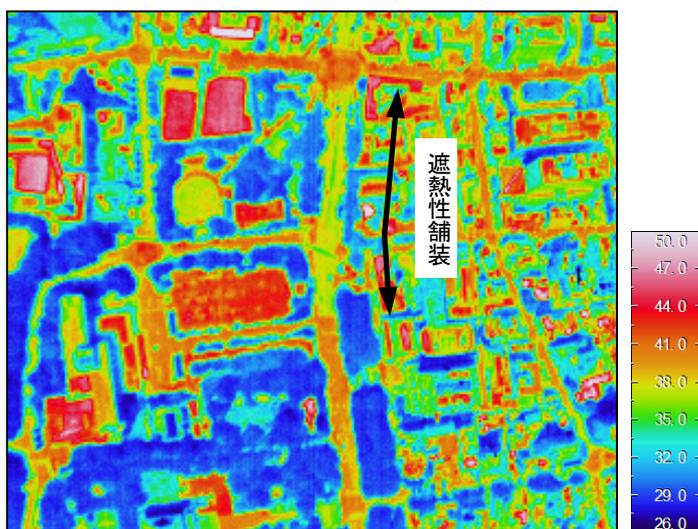


図-15 熱画像(昼間)  
平成 21 年(2009) 8 月 12 日 12:37 頃撮影

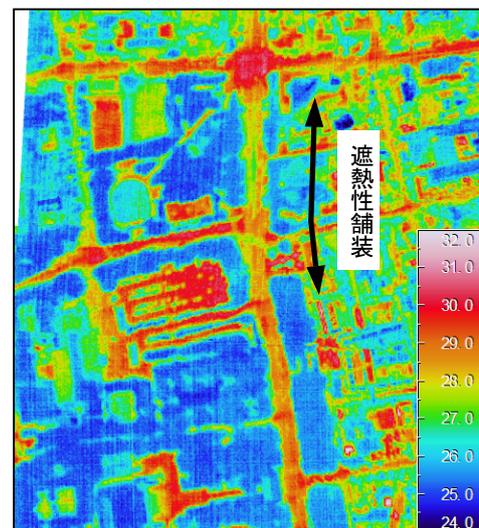


図-16 熱画像(夜間)  
平成 21 年(2009) 8 月 12 日 21:06 頃撮影

ヘリコプターによって撮影した熱画像全体を図-12に示す。調査路線の上空を飛行しているため、撮影範囲に入らない部分は空白となっている。飛行時刻は、路面温度測定車が地上で測定することから、その時刻に合わせて、平成 21 年 8 月 12 日 12:35~13:11 に飛行している。なお、熱画像撮影の際、測定器のパラメータである放射率は 1.0 で設定している。

熱画像全体では、詳細が見にくいので一例として図-13 から図-16 に芝公園付近の可視画像、位置図、昼間の熱画像、夜間の熱画像を示す。

図-13 の可視画像でもわかるように、図示した灰色に見える道路が遮熱性舗装である。同じ箇所を昼間の熱画像(図-15)を見ると明らかに遮熱性舗装の路面温度が低いことが分かる。また夜間 21 時頃の場合でも遮熱性舗装の路面温度が低い状態を維持している。これに対し、交差点部や広い駐車場、グラウンドを見ると、日射を遮るものが少なく、一日中日向になっているため、路面温度が高くなっている。

なお、夜間の熱画像の場合、低空に雲があったため、熱画像が不鮮明になっている。この撮影の後、撮影を中止している。

## 5. 路面温度測定車と航空機測定の比較

図-17 に日比谷公園付近における路面温度測定車による 12 時の日射量マップと路面温度マップを示し、図-18 にヘリコプターによって撮影した可視画像と熱画像を示す。路面温度測定車は 12:26 から 12:29 に走行しており、ヘリコプターは 12:35 頃の数十秒間で飛行している。この区間は日あたりがよく、測定時間では日陰がほとんどないことがわかる。可視画像で図示した灰色に見える道路が遮熱性舗装である。路面温度マップと熱画像でも遮熱性舗装の路面温度が低いことがはっきりとわかる。

図-19 に路面温度測定車による日射量（日射と表示）と路面温度（測定車と表示）、熱画像から抽出した路面温度（空撮と表示）を示す。熱画像から抽出した路面温度（以後、空撮温度という）と路面温度測定車による路面温度（以後、測定車温度という）を見ると遮熱性舗装の区間だけが温度が低くなっている。ただし、空撮温度は、測定車温度より 10 度以上も低く、空撮温度は、実際の路面温度よりも低く測定されている。

次に対象範囲を明示するため、図-20 に位置図を示す。図-21 から図-23 に茅場町付近の日射量マップ、路面温度マップ、可視画像、熱画像、路面温度を示す。路面温度測定車は 13:15 頃走行し、ヘリコプターは 12:45 頃飛行している。図-22 の可視画像で灰色に見える道路が遮熱性舗装である。熱画像を見ると北側や南側の延長上は遮熱性舗装ではないため、温度が高くなっている。また、この区間では、北東から南西方向の路線であるが、平行の位置にある路線を見ると、遮熱性舗装ではないため、温度が高くなっていることがわかる。ただし、ここでも、空撮温度は、測定車温度より低く測定されている。

図-24 から図-26 に丸の内付近の日射量マップ、路面温度マップ、可視画像、熱画像、路面温度を示す。路面温度測定車は 13:00 頃走行し、ヘリコプターは 12:54 頃飛行している。図-24 の日射量マップを見ると保水性舗装の場所では日陰が多くなっている。図-25 の可視画像でも同じ場所を見ると日陰になっており、路面温度測定車は、日向日陰を正確に判別していることがわかる。

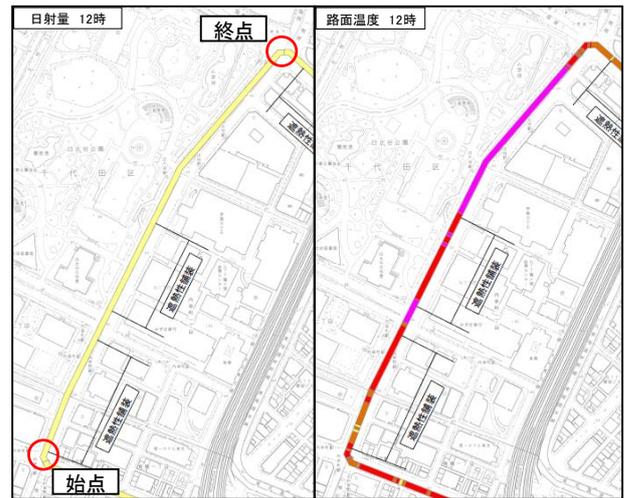


図-17 日射量マップ(左)と路面温度マップ(右)  
(日比谷公園付近 12時)

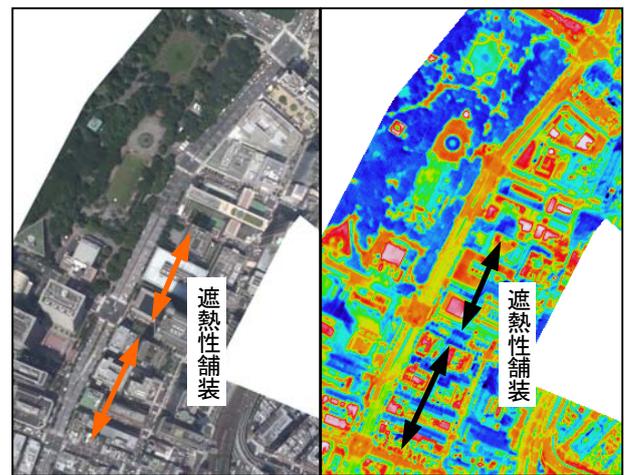


図-18 可視画像(左)と熱画像(右)  
(日比谷公園付近)

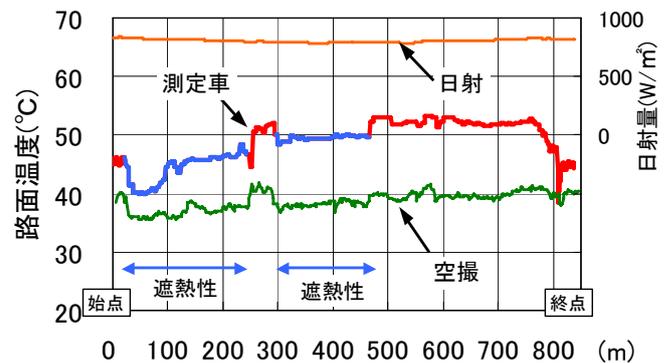


図-19 路面温度 (日比谷公園付近)

また、図-24 の日射量マップで距離 300m 以降では日向になっているにもかかわらず、測定車温度が上下している。図-25 の可視画像を見ると、幅の広い横断歩道があることがわかる。日向の部分で測定車温度が急激に下がる場合、白線の可能性があるかと推測できそうである。つまり、路面温度測定車では、日向日陰や白線までも判別しており、感度や精度がよいといえる。



図-20 位置図

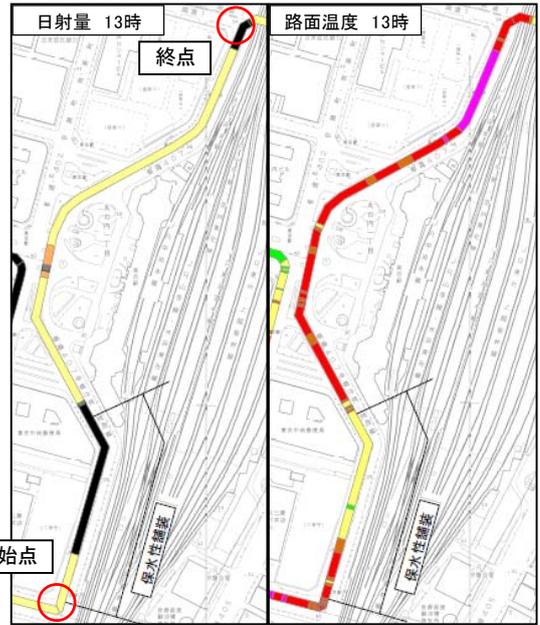


図-24 日射量マップ(左)と路面温度マップ(右) (丸の内)



図-21 日射量マップ(左)と路面温度マップ(右) (茅場町)

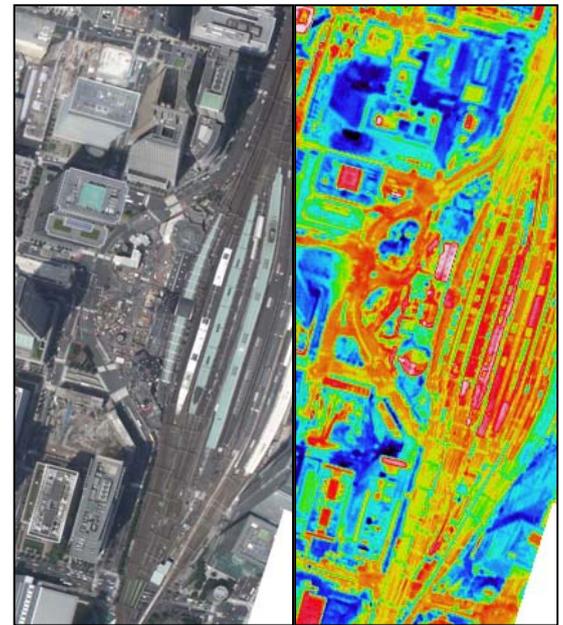


図-25 可視画像(左)と熱画像(右) (丸の内)

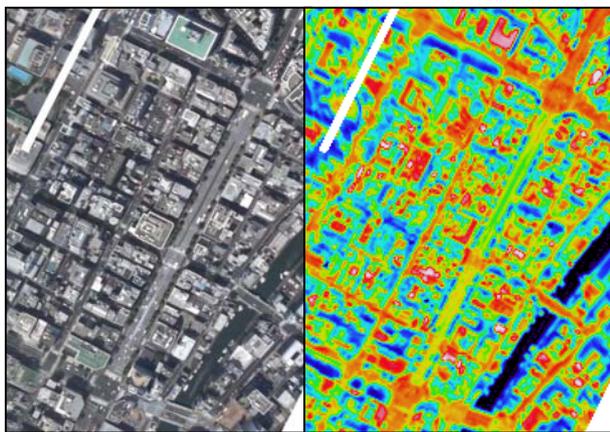


図-22 可視画像(左)と熱画像(右) (茅場町)

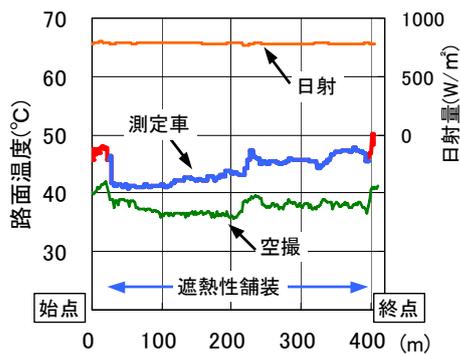


図-23 路面温度 (茅場町)

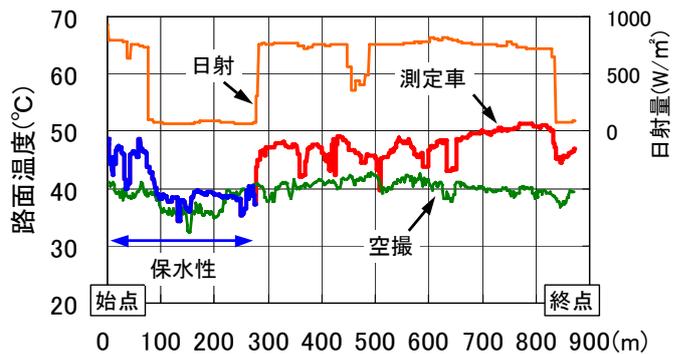


図-26 路面温度 (丸の内)

## 6. 測定値の比較

測定車温度と空撮温度について、日向かつ路面温度が比較的一定に推移する 50m 区間のデータを抽出して平均した値と測定車温度と空撮温度の温度差、測定車温度を路面温度の真値とした場合の放射率を表-6 に示す。測定車温度と空撮温度では、平均で差が 10 度もあった。放射率の平均値は 0.881 となった。

図-27 に測定車温度と空撮温度の関係を示す。測定車温度と空撮温度の値には、ばらつきがあり、相関性がそれほどよくない。図-28 に測定車温度と空撮温度の温度差と路面温度との関係を示す。路面温度が高くなると温度差も大きくなり、温度依存性がある。これは、図-29 に示すように放射率が温度依存性をもっているためと考えられる。

そこで、測定車温度を真値と仮定して、空撮温度を補正する方法を 2 通り検討した。表-7 に 2 通りの補正

値を示す。まず、放射率の平均値は 0.881 だったので、この値を用いて補正した。表-6 の測定車温度と空撮温度の差の標準偏差が 1.94 であるのに対し、表-7 の平均放射率で補正した場合、標準偏差が 1.93 になるので、この補正方法では、ばらつきがそのままとなる。しかし、図-30 の平均放射率で補正した補正值と測定車温度の関係を見ると、平均放射率の値が 48℃付近の値であり、放射率に温度依存性があるため、48℃付近を境に高温側で補正值が過少評価され、低温側で過大評価されてしまう。

次に図-27 に示した近似式で補正した補正值と測定車の路面温度の関係を図-31 に示す。高温側で補正值が過少評価され、低温側で過大評価されることは解消されるが、近似式で補正した場合、標準偏差が 2.50 となって、ばらつきは大きくなった。

ただし、平均放射率、近似式のいずれの補正方法で

表-6 測定車温度・空撮温度・温度差・放射率

番号	区間	舗装種別	距離 (m)	測定車路面温度	空撮路面温度	差	算出放射率
1	区間02		660~710	49.5	40.2	9.3	0.889
2	区間02		710~760	50.1	39.6	10.5	0.876
3	区間02		760~810	51.0	39.6	11.4	0.866
4	区間11		40~90	49.7	39.2	10.5	0.876
5	区間14		210~260	51.7	41.6	10.1	0.881
6	区間17		600~650	52.5	39.5	13.0	0.849
7	区間17		650~700	51.8	39.3	12.5	0.855
8	区間17		700~750	52.1	40.2	11.9	0.861
9	区間01	保水	250~300	50.2	38.8	11.4	0.866
10	区間10	保水	250~300	46.5	39.0	7.5	0.910
11	区間08	遮熱	250~300	45.4	38.0	7.4	0.910
12	区間08	遮熱	340~390	47.1	38.0	9.1	0.892
13	区間13	遮熱	50~100	44.2	36.7	7.4	0.910
14	区間13	遮熱	250~300	44.4	38.5	5.9	0.928
15	区間17	遮熱	150~200	45.9	37.2	8.8	0.895
16	区間17	遮熱	300~350	49.2	37.7	11.4	0.865
17	区間17	遮熱	350~400	49.3	38.2	11.1	0.869
18	区間17	遮熱	400~450	49.8	38.5	11.3	0.868
平均				48.9	38.9	10.0	0.881
標準偏差						1.94	

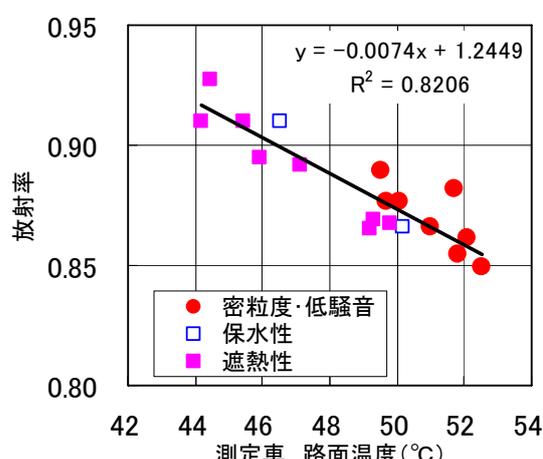
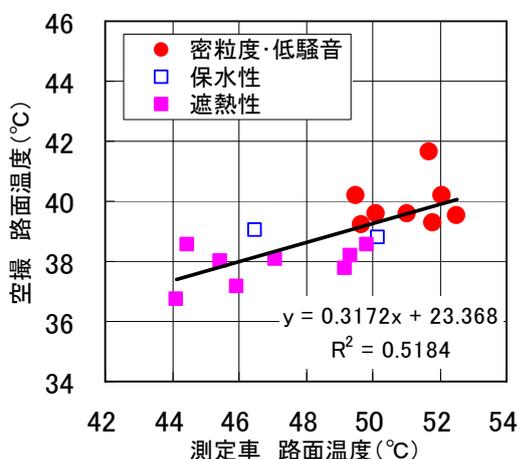
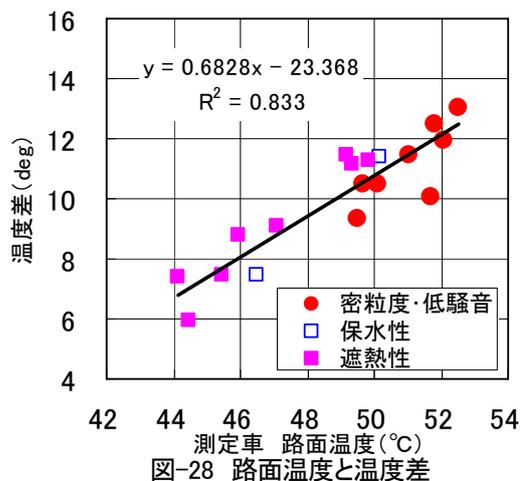


図-27 空撮と測定車の路面温度

図-29 放射率と路面温度

表-7 補正值

番号	舗装種別	測定車 路面温度 (°C)	空撮 路面温度 (°C)	平均放 射率で 補正	補正值 との差	近似式 で補正	補正值 との差
1		49.5	40.2	50.2	-0.7	53.0	-3.5
2		50.1	39.6	49.6	0.5	51.2	-1.1
3		51.0	39.6	49.6	1.4	51.2	-0.1
4		49.7	39.2	49.2	0.5	49.9	-0.2
5		51.7	41.6	51.7	0.0	57.5	-5.8
6		52.5	39.5	49.5	3.0	50.9	1.7
7		51.8	39.3	49.3	2.5	50.2	1.6
8		52.1	40.2	50.2	1.9	52.9	-0.9
9	保水	50.2	38.8	48.8	1.4	48.5	1.6
10	保水	46.5	39.0	49.1	-2.6	49.4	-2.9
11	遮熱	45.4	38.0	48.0	-2.5	46.1	-0.7
12	遮熱	47.1	38.0	48.0	-0.9	46.3	0.8
13	遮熱	44.2	36.7	46.7	-2.5	42.2	2.0
14	遮熱	44.4	38.5	48.5	-4.1	47.8	-3.3
15	遮熱	45.9	37.2	47.1	-1.2	43.5	2.4
16	遮熱	49.2	37.7	47.7	1.5	45.3	3.9
17	遮熱	49.3	38.2	48.2	1.2	46.7	2.6
18	遮熱	49.8	38.5	48.5	1.3	47.8	2.0
平均		48.9	38.9	48.9	0.0	48.9	0.0
標準偏差					1.93		2.50

も±2~4 度程度の誤差は残るが、路面温度を概略的に検討する上では十分に有効な補正值と考えられる。

## 7. まとめ

- 1) 走行車両による路面温度の測定は、放射温度計が車体下に装備されている路面温度測定車を使用した。天井には日射計を設置して走行時の日向と日陰を判別した。上空からの熱画像撮影には、ヘリコプターを使用し、飛行時刻は、路面温度測定車が地上で測定している時刻に合わせた。
- 2) 路面温度測定車の測定結果をもとに、路面温度マップおよび日射量マップを作成した。路面温度マップは路面温度を5°C毎に、日射量マップは日射量を4つの範囲に色分けして、一目で路面温度の状況と日向日陰の状況が分かるものとした。
- 3) ヘリコプターによって路線上空を飛行し、熱画像と可視画像を作成した。遮熱性舗装の施工区間を見ると付近の道路より路面温度が低いことが確認できた。

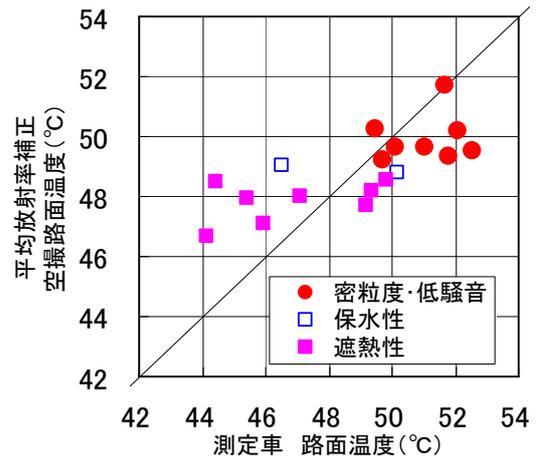


図-30 補正值(平均放射率を使用)

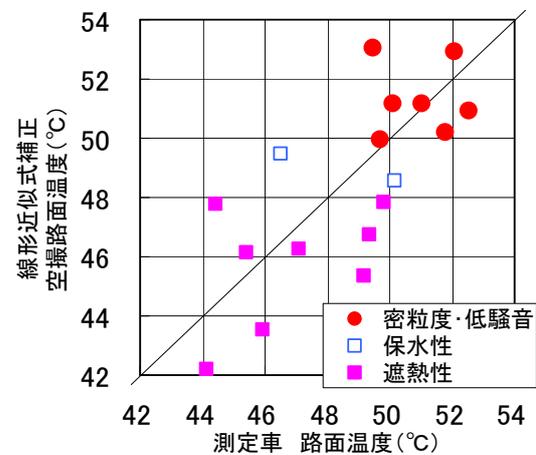


図-31 補正值(近似式を使用)

- また、路面温度測定車による測定では日向日陰や白線までも判別しており、測定値の感度や精度がよかった。
- 4) 熱画像から抽出した路面温度は、路面温度測定車による路面温度より 10 度以上も低い場合があり、実際の路面温度よりも温度が低く、誤差が大きかった。
  - 5) 熱画像から抽出した路面温度を補正することを試みた。補正を行っても±2~4 度程度の差が残るが、路面温度を概略的に検討する上では十分に有効な値に補正できた。