

塗装鋼板の太陽熱反射性に及ぼす塗膜と基材の影響

高橋 通泰*・迫田 章人*・壺岐島 健司*²・友弘 実*²・塩田 俊明*³

Effects of Coatings and Substrates on Reflectiveness of the Solar Radiation for Pre-painted Steel Sheets

Michiyasu TAKAHASHI, Akito SAKODA, Kenji IKISHIMA, Minoru TOMOHIRO and Toshiaki SHIOTA

Synopsis : Exteriors made of steel sheets for architectural applications have many superior features compared with ceramics, for example, lightness, good formability and so on, however, have large heat conductivity. As a result, in the summer daytime, the solar radiant heat transfers into the interior of structures easily, then, it occurs high interior temperatures, and the energy required for cooling increases.

Therefore, pre-painted steel sheets which can restrain the solar radiant heat, reduce or omit heat insulators and conserve the energy for cooling, moreover, which can be also colored without restraint, were required.

In this report, guidelines for pre-painted steel sheets with reflectiveness of the solar radiation were given for conserving energy, especially, by evaluating the effects of coatings and substrates.

Key words : precoated product; solar radiation; reflectiveness; conserving energy.

1. 緒言

塗装鋼板とは、あらかじめ塗装が施された鋼板を指し、現在では、建材・家電用途に広く適用されている。このうち建材用途では、屋根・外壁・シャッター等の外装材としての使用が大半である¹⁾。Table 1に、鋼板を用いた外装材の特徴を示す²⁾。例えば鋼板屋根は、日本瓦に比べて重量が約1/10、新窯業系に比べても約1/3と軽量であり、耐震性向上等を推進する上で好ましい材料である。しかしながら、鋼板は窯業系に比べ熱伝導性が高いため、外装材とした場合、夏季の日射時には太陽熱が屋内に容易に侵入し、屋内温度が高くなりやすく、また冷房負荷が増大するという問題があった。

一方、近年、循環型社会、環境汚染物質排出規制強化等が進む中で、“地球環境に優しい”商品が求められるようになり、塗装鋼板の分野においても有害物規制への対応を中心に、Crフリー等の課題が取り組まれてきた。しかしながら、環境対応のキーワードの一つである「省エネルギー性」については、従来、塗装鋼板そのものに機能を付与する試みはされてこなかった。

省エネルギーに関する規制としては、地球温暖化防止京都会議(COP3)が挙げられ、我が国には、2010年度における温室効果ガス排出量を、1990年比で約6%削減することが求められている。Fig. 1に、COP3達成に向けた民生部門の省エネルギー割り当てを示す³⁾。この中で建材分野では、住宅・建築物の省エネルギー性能向上等により、全体の約

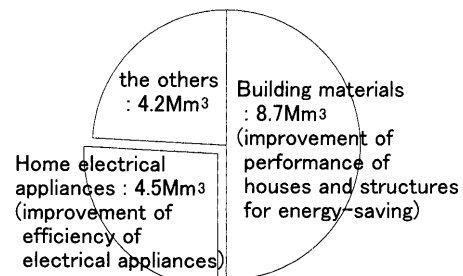
1/2が期待されている。

以上の観点から、省エネルギーに寄与する次の特徴を有する塗装鋼板を検討した。

(1) 屋根・外壁等の外装に適用することで、日射による太陽熱の侵入を抑制し、断熱材の低減・省略、更には冷房負荷の抑制が可能。

Table 1. Features of exteriors made of steel sheets for architectural applications.

advantage	disadvantage
<ul style="list-style-type: none"> • lightness • economical • good formability • good workability • maintenance workability • stability of supply • water-proof 	<ul style="list-style-type: none"> • toughness • nonflammable • large thermal conductivity • poor sound-proof • poor corrosion resistance



*numbers in this figure show conversion amount into petroleum

Fig. 1. Energy-saving quota for the accomplishment of COP3.

平成14年5月10日受付 平成14年9月26日受理 (Received on May 10, 2002; Accepted on Sep. 26, 2002)

* 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Labs., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660-0891)

* 2 住友金属建材(株) 堺製造所 (Sakai Manufactory, Sumitomo Metal Steel Products Inc.)

* 3 住友金属建材(株) (Sumitomo Metal Steel Products Inc.)

(2) 客先要求に合わせて、任意に着色が可能。

その設計方法のうち、塗料については太陽熱反射率の大きな原料の選択が重要との提案があるが⁴⁾、本報告では、特に太陽熱反射性に及ぼす塗膜と基材の影響について報告する。

2. 太陽熱反射性塗装鋼板の設計の考え方

日射による太陽熱の侵入を抑制する方法としては、まず太陽熱そのものをできるだけ吸収し難いこと（すなわち、反射しやすいこと）、また吸収してしまった太陽熱が屋内に伝搬し難いこと、更にいったん吸収した太陽熱を逆に屋外に放散しやすいこと、が挙げられる。しかし、塗装鋼板においては、これらの個々の寄与が整理されておらず、本報で改めて考察したので後述する。

次に、塗装鋼板に太陽熱反射性を付与するための原理を述べる。Fig. 2に、JIS A 5759に示される太陽光の分光エネルギー分布を示す。太陽光は、約6000Kの黒体の分光エネルギー分布を有し、そのおよそ1/2が可視域、残りの大半が赤外域にある。ところで、色調は可視域の反射性で決定されるから、ある色調を得ようとする、可視域での分光反射スペクトルはその色調固有のものとなる。従って、太陽熱を反射し、かつ任意に着色する場合、太陽光エネルギーの約40%を占める赤外域での反射性を向上させるのが有効である。本報告では、赤外域で効率良く高い反射性を得るために、特に塗膜と基材の影響について調査したので報告する。

3. 実験方法

3.1 供試材

3.1.1 伝熱全体に及ぼす放射性的影響調査

日射を受けた塗装鋼板における定常状態の熱収支は、後述のFig. 5および式(1)~(3)となる。日射による太陽熱の侵入を抑制するには、式中の屋外から屋内への熱貫流率(H_1, H_2)を小さくすれば良い。すなわち、塗膜→鋼板→屋

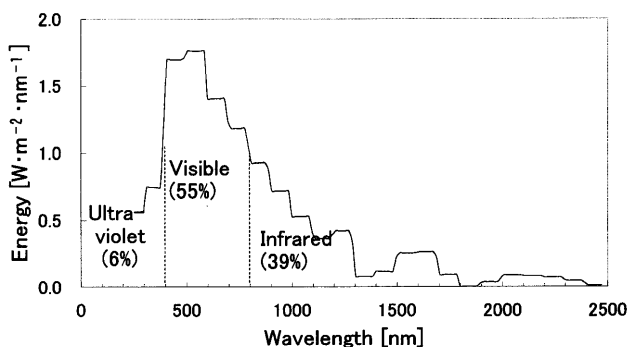


Fig. 2. Spectral energy density distribution of the solar radiation.

内へと熱が伝搬する伝導が小さく、また日射時に太陽熱の吸収が小さく、更に塗装鋼板の表面から熱を伝導または放射により屋外に放散できれば、太陽熱の侵入を抑制できる。

このうち、式(1)中の放射の項は、放射を受ける物体の温度や、放射体や放射を受ける物体の形状や面積などによって決まる係数を含み、計算で推定するのは難しい。そこで、Table 2に示す放射性に優れた塗装と劣るもの（それぞれ放射率が、 $\approx 1, \approx 0$ ）および後述のFig. 3に示す装置を用いて、放射性が伝熱全体に及ぼす影響を実験的に評価した。それぞれの塗装の、JIS R 3106に規定される方法で測定した放射率をTable 2に合わせて示す。

3.1.2 太陽熱反射性に及ぼす顔料濃度、塗膜厚の影響調査

ポリエステル樹脂（東洋紡製バイロン23CS）とメラミン樹脂（三井サイアナミド製サイメル303）を固形分換算で85/15となるように混合して、これに所定の濃度になる量だけ白色顔料としてのチタニア（石原産業製CR-50）を添加し、ガラスビーズを用いて分散させた。このようにして得られた塗料を、無処理の溶融亜鉛めっき鋼板（めっき付着量は片面あたり135g/m²、以下GI）に、Table 3に示すチタニア濃度、塗膜厚（いずれも乾燥塗膜）で、いずれも単位面積あたりのチタニア付着量が同一となるようにバーコータを用いて塗装し、鋼板の最高到達温度が230℃となるように熱風型オープンを用いて乾燥させた。これらの分光反射率を、後述の方法で測定した。

3.1.3 太陽熱反射性に及ぼす黒色顔料の影響調査

前述の通り、建築物の外装材として用いる場合には、客先要求に合わせて任意の色調に着色できることが必要である。色調のうち明度の調整には、黒色顔料として一般的にカーボンブラックが用いられる。しかし、カーボンブラックは、太陽熱の吸収性が高いことが知られている。そこで、Table 4に示すカーボンブラックを始めとする各種の黒色顔料とチタニアを、前述の方法で種々の割合で塗料化し、これらをGIに乾燥膜厚でいずれも20μm塗装したものを用いて明度と反射性の関係を調査した。なお、塗膜中の顔料濃度は、いずれも合計で24mass%とした。明度は、スガ

Table 2. Coatings for evaluating the effect of emission.

coating	emissivity [%]
• black coating (black lacquer, 10μm)	94
• no coating (tin plated steel)	7

Table 3. Coatings for evaluating the effects of pigment content and coating thickness.

No.	resin	TiO ₂ content [mass%]	coating thickness [μm]
1	polyester	6	40
2	polyester	12	20
3	polyester	24	10

Table 4. Black pigments for evaluating the relationship between brightness and reflectivity.

<ul style="list-style-type: none"> • carbon black • Fe-Cr composite oxide • azo compound

Table 5. Substrates for evaluating the effect of these on reflectivity of coated steel sheets.

<ul style="list-style-type: none"> • Galvanized steel sheet (GI) • Hot dipped 55% Al-Zn alloy steel sheet (AZ)
--

試験機製SMカラーコンピューターを用いて、L値として測定した。また反射性は、白熱灯を光源とする照射装置により、照射時の最高到達温度で評価した。

3.1.4 太陽熱反射性に及ぼす基材の影響調査

(1) 反射部位と反射性

塗装鋼板の塗膜厚は、可視域で下地を隠蔽することを必要条件として決定されるが、一般的に10~30 μ mであるため、太陽光が塗膜を透過して基材に到達している可能性がある。

そこで、Table 3の2に示す塗装をGIに施したものを10%塩酸に浸漬し、垂鉛めっき層を溶解させることで単離した塗膜の分光透過率を測定した。なお、同一の塗装垂鉛めっき鋼板に端面シールを施したものを、塗膜の単離に要する時間だけ同様の塩酸に浸漬した前後で、分光反射率が変化しないことを確認した。すなわち、この塗膜を単離する方法で、塗膜の透過率は変化しない。

次に、塗装鋼板のどの部位でどれだけ反射しているのか、評価を試みた。この方法として、Table 3の2に示す塗装を無反射層を想定した黒色塗装に施したもの、およびGIに施したもの（を作成し、これらの）の分光反射率を測定した。この無反射層は、Table 2に示す黒色塗装をGIに施したものであり、200~2500nmのすべての波長で反射率は5%以下であった。

(2) 基材の種類と塗装鋼板の反射性

黒色顔料としてTable 4に示すFe-Cr系複合酸化物とチタニアを、前述の方法で分散させてグレー塗料を作成し、Table 5に示す溶融垂鉛めっき鋼板(GI)と55%Al-Zn溶融めっき鋼板（めっき付着量は片面あたり75g/m²、以下AZ）に、いずれも乾燥膜厚で20 μ m塗装したものの分光反射率を測定した。なおTable 5に示すめっき鋼板は、いずれも無処理のものである。

3.2 評価方法

3.2.1 放射性的の評価

評価は、Table 2に示す塗装を外面に施した鋼製容器と無塗装のものに熱湯を注ぎ、23°Cの恒温槽に設置したFig. 3に示すボックス内で、鋼製容器の表面温度を測定することで行った。この鋼製容器は、外面で空気と接する面積、すなわち伝熱面積が約500cm²の蓋のついた円筒状のもので、

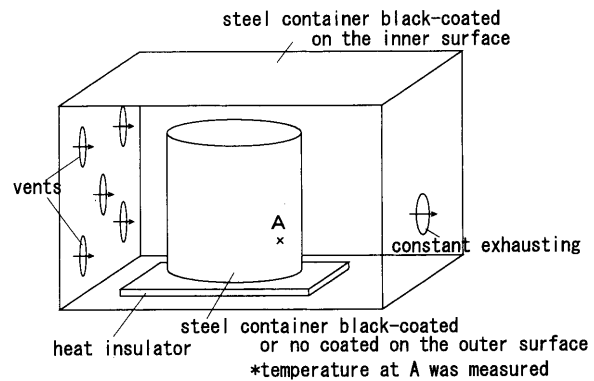


Fig. 3. Equipment for evaluating the effect of emission.

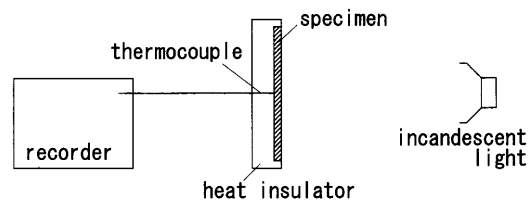


Fig. 4. Irradiation equipment.

これに1kgの熱湯を注入し、評価中は内部を十分に攪拌した。なおボックス内面には、Table 2の黒色塗装が施してあり、十分に大きい放射性（すなわち、十分に大きい吸収性）を有する。またボックスには、1回/3分の割合でボックス内空気の全量が置換され、平均流速が3mm/secとなるような通気が施されている。この条件では、実際の建築物の場合に比べ、放射の影響が発現しやすいと考えられる。

3.2.2 分光反射率、分光透過率の測定

両者とも、積分球を設置した島津製作所製UV-3101PC型自記分光光度計を用いて、太陽光の波長範囲である200nmから2500nmまでの反射率、透過率を測定した。

3.2.3 白熱灯による昇温測定

Fig. 4に示す白熱灯を光源とする照射装置により、照射時の最高到達温度を測定した。ただし白熱灯は、約3000Kの黒体の分光エネルギー分布を有し、ピークが1 μ m近傍にあって、太陽光に比べ赤外域のエネルギー比が大きくなっていることや、照射エネルギーの全量も異なるので、必ずしも正確な評価とは言えないが、太陽光とこの照射装置による最高到達温度には、相関があることを確認している。

3.2.4 太陽光下での昇温測定

前述のFe-Cr系複合酸化物とチタニア、およびカーボンブラックとチタニアを分散させて黒色塗料を作成し、それぞれAZとGIに、いずれも乾燥膜厚で20 μ mとなるように塗装した(Table 6)。これらのL値は、いずれも12であった。これらを、裏面に断熱材を貼付した状態で、夏季の晴天日（1999年7月18日）に、尼崎市の住友金属工業（株）総合技術研究所の屋上に設置し、太陽光下での温度変化を測定

Table 6. Specimens for measuring temperature of these under the solar radiation.

	resin	pigments	substrate
Sample A	Polyester	TiO ₂ , Fe-Cr composite oxide	AZ
Sample B	Polyester	TiO ₂ , Carbon Black	GI

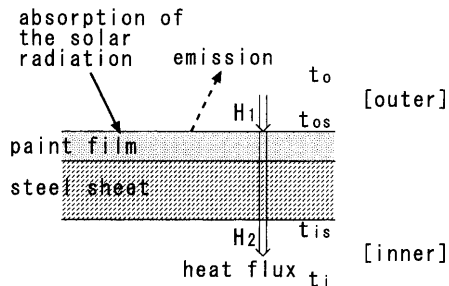


Fig. 5. Heat balance of the coated steel sheet under the solar radiation.

した。

4. 結果と考察

4.1 伝熱全体に及ぼす塗膜の断熱性と放射性的の影響

日射を受けた塗装鋼板における定常状態での熱収支を、Fig. 5および式(1)~(3)に示す。

$$H_1 = \alpha_o(t_o - t_{os}) + \kappa_{re}J + \kappa_{ra}\sigma A(t_{os}^4 - t_p^4) \dots\dots\dots(1)$$

伝導 吸収 放射

$$H_2 = (t_{os} - t_i) / (d_p/\lambda_p + d_s/\lambda_s + 1/\alpha_i) \dots\dots\dots(2)$$

伝導

$$H_1 = H_2 \dots\dots\dots(3)$$

- H_1, H_2 : 熱貫流率 (W/m²·K)
- κ_{re} : 日射吸収率 (-)
- κ_{ra} : 放射率 (-)
- σ : ステファン・ボルツマン定数 (W/m²·K⁴)
- A : 面積等を含む係数 (-)
- J : 日射量 (W/m²)
- $\alpha_{o(i)}$: 屋外側(屋内側)表面熱伝達率 (W/m²·K)
- $\lambda_{p(s)}$: 塗膜(鋼板)の熱伝導率 (W/m·K)
- $d_{p(s)}$: 塗膜(鋼板)厚 (m)
- $t_{o(i)}$: 屋外(屋内)温度 (K)
- t_r : 放射を受ける物体の温度 (K)
- $t_{os(is)}$: 塗装鋼板屋外(屋内)側表面温度 (K)

まず、塗膜の断熱性について考察する。式(2)の分母に代表的な数値 ($d_p=30 \times 10^{-6}$ m, $\lambda_p=0.15$ W/m·K, $d_s=0.5 \times 10^{-3}$ m, $\lambda_s=53$ W/m·K, $\alpha_i=12$ W/m²·K⁵)を適用すると、 $d_s/\lambda_s \ll d_p/\lambda_p \ll 1/\alpha_i$ となり、塗膜の熱抵抗(断熱性)は、表面熱伝達抵抗(表面熱伝達率の逆数)に比べ十分に小さく、従って、塗膜の断熱性は太陽熱の侵入抑制には寄与しな

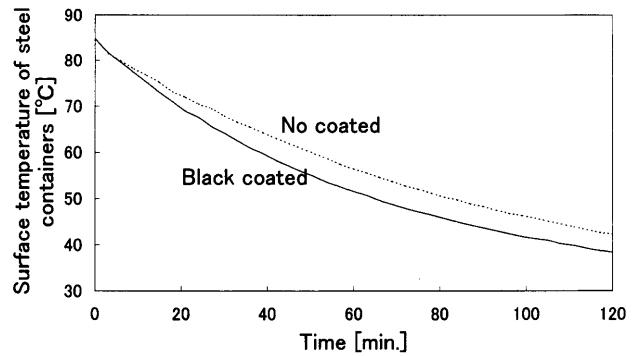


Fig. 6. Effect of coatings on decreasing rate of surface temperature of steel containers.

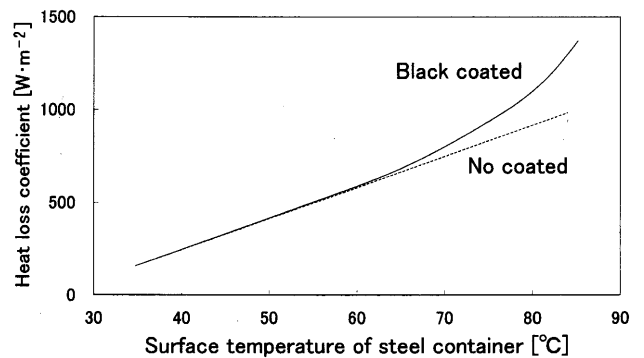


Fig. 7. Effect of coatings on heat loss coefficient every temperature.

い。

次に、伝熱全体に及ぼす放射性的の影響を考察する。Fig. 6に、Fig. 3の装置を用いた場合の、鋼製容器表面の温度変化を示す。塗装を施したものでは、無塗装のものに比べて温度低下が大であった。これは、塗装により放射による熱損失が増大したためと考えられる。

Fig. 6で、ある時間におけるグラフの傾きは、その時間の温度における鋼製容器の降温速度を表している。これと鋼製容器の熱容量および伝熱面積から、各温度における単位時間あたり、単位面積あたりの熱損失量を算出し、結果をFig. 7に示す。塗装を施したものと無塗装のもの熱損失は、いずれも「空気への伝導による熱損失」と「ボックス内面への放射による熱損失」の和であるが、無塗装の場合、放射率がTable 2に示したように十分小さいことから、放射による熱損失を無視することができ、従って、Fig. 7の両者のグラフの乖離が、塗装を施したものからの放射による熱損失を表すことになる。

塗装鋼板が太陽熱を吸収しても、その表面から熱を伝導または放射により屋外に放散できれば太陽熱の侵入を抑制できるが、前述のように、今回の評価条件が実際の建築物の場合に比べ放射の影響が発現しやすいと考えられるにも拘わらず、Fig. 7から、伝導に比べて放射の効果は、およそ70°Cを越えないと発現しないことがわかる。後述のように、太陽熱反射性の塗装鋼板では、黒色であっても

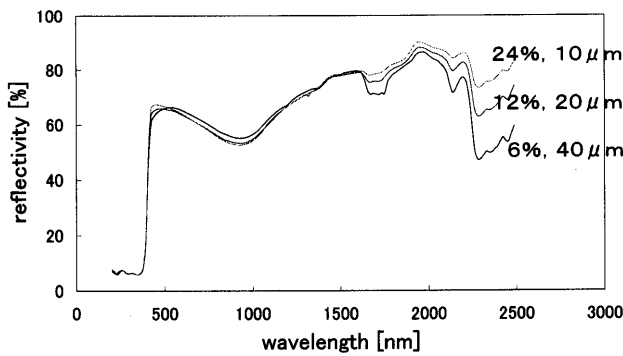


Fig. 8. Effect of pigment content and coating thickness on reflectivity.

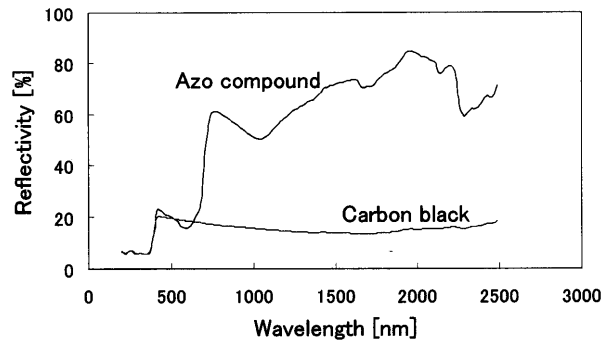


Fig. 10. Effect of black pigments on spectral reflectivity.

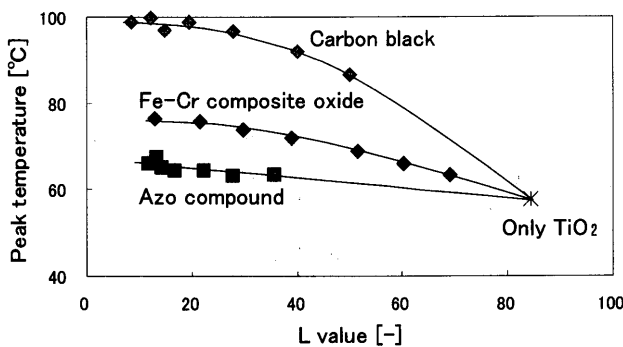


Fig. 9. Relationship between brightness (L value) and peak temperature.

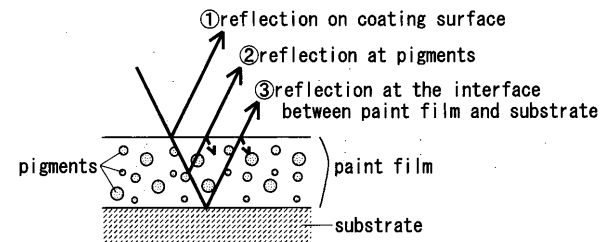


Fig. 11. Portion of reflection in coated steel sheet.

70°C程度までしか昇温しないことから、伝熱全体に及ぼす放射の効果はほとんど期待できないことになる。

以上より、日射による太陽熱の侵入抑制は、ほぼ反射性能だけで決まると言える。

4.2 太陽熱反射性に及ぼす顔料濃度、塗膜厚の影響

Fig. 8に、Table 3の塗装を施したものの分光反射率を示す。いずれもほぼ一致しており、すなわち、塗装鋼板のこの波長域での反射性は、基材および顔料の種類と単位面積あたりの顔料付着量で決まる。なお、1600nmおよび2300nmで、膜厚が大きいもので反射率が小さくなっているのは、この波長で樹脂が吸収を有し、膜厚が大きい分、吸収が大きくなったためと考えられる。

4.3 太陽熱反射性に及ぼす黒色顔料の影響

Fig. 9にTable 4に示した3種の黒色顔料を用いた場合の、明度 (L 値) と最高到達温度の関係を示す。これから、同じ明度 (L 値) であっても、アゾ系顔料を用いた場合は最高到達温度が低く、カーボンブラックを用いた場合には高いことがわかる。

Fig.10に明度 (L 値) がほぼ同じ $L=40$ 近傍の、カーボンブラックとアゾ系顔料を用いたものの分光反射率を示す。可視域では、両者とも反射率が小さく、従ってグレー色を呈しているが、赤外域では、カーボンブラックを用いたもので可視域と同様に反射率が小さいのに対し、アゾ系顔料を用いたものでは反射率が高い。太陽光下では、同じ明度のものであっても、カーボンブラックを用いたもので鋼板

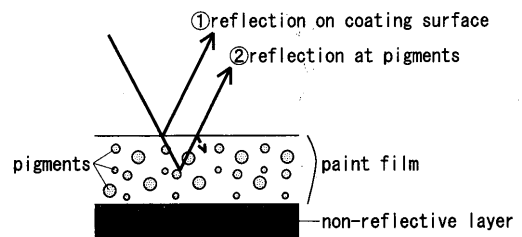


Fig. 12. Portion of reflection in paint film on non-reflective layer.

温度が高くなることが予測される。

4.4 太陽熱反射性に及ぼす基材の影響

4.4.1 反射部位と反射性

Fig.11に示すように、塗装鋼板における反射部位は3ヶ所考えられる。このうち、塗膜表面での反射と塗膜中の顔料での反射の和 (Fig.11中、①と②の和) は、Fig.12に示すように、無反射層に塗装した場合の反射率として測定することができる。

また、塗膜と基材界面での反射は、所定の基材に同一の塗装を施したものの反射率と、無反射層に塗装した場合の反射率との差として求めることができる。

Fig.13に部位ごとの反射率を示す。波長が長くなるのに伴い、塗膜表面や塗膜中の顔料での反射率は低下するが、逆に、塗膜と基材界面での反射率が增大している。これは、Fig.14に示すように、塗膜の透過率が、波長の増大とともに大きくなることから推測できる。従って、赤外域で反射性に優れる基材を用いると、塗装鋼板としての反射性も向上する。

4.4.2 基材の種類と塗装鋼板の反射性

Fig.15に、Table 5に示した基材の分光反射率を示す。

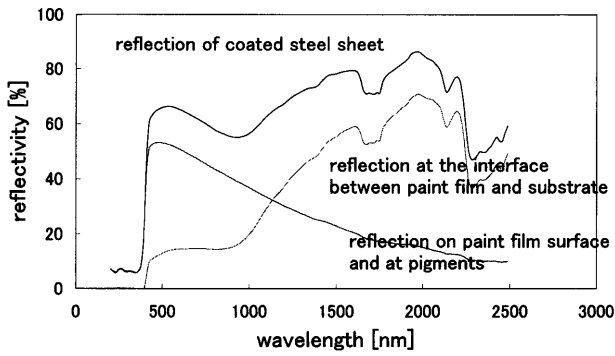


Fig. 13. Reflectivity of every portion.

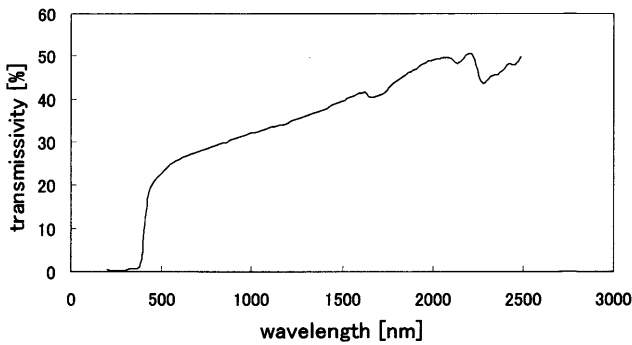


Fig. 14. Spectral transmissivity of the paint film.

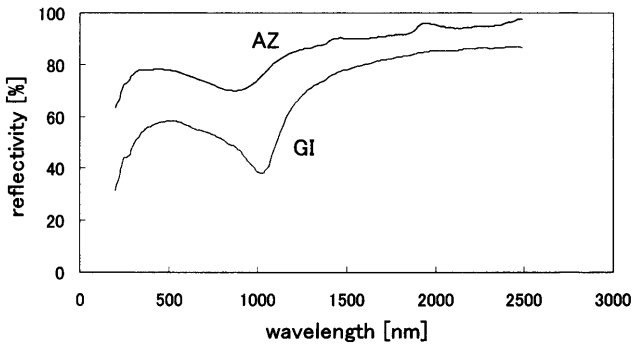


Fig. 15. Spectral reflectivity of substrates.

AZはGIに比べて、この波長域で反射性に優れる。

Fig.16に、これらを基材とした場合の、塗装鋼板としての分光反射率を示す。可視域では、反射性に差異は認められないものの、赤外域では、反射性に優れるAZを用いた場合に、塗装鋼板としての反射性も高くなっている。これは、前述のように、塗膜の透過性が高くなる赤外域で、反射性に優れる基材を用いると、塗装鋼板としての反射性も向上することを示している。

4.5 太陽光下での昇温測定

Fig.17に、Table 6に示す試験体の分光反射率を示す。可視域では、両者とも低い反射率を示し、すなわち黒色を呈するが、赤外域では、サンプルAで反射率が高い。

Fig.18に、夏季の太陽光下での実測例を示す。サンプルAは、サンプルBに比べて、明らかな昇温抑制効果が認め

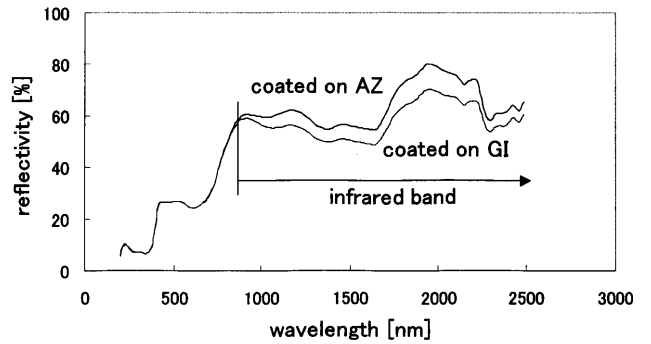


Fig. 16. Effect of substrates on spectral reflectivity of coated steel sheets.

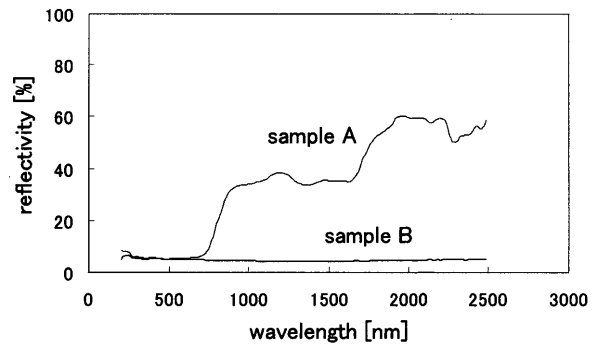


Fig. 17. Spectral reflectivity of specimens for measuring temperature under the solar radiation.

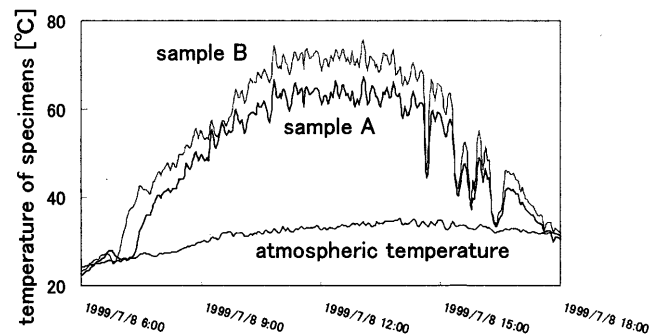


Fig. 18. Changes of temperature of specimens under the solar radiation.

られた。

5. 結言

太陽熱反射性を有する塗装鋼板の構成を検討し、以下の知見を得た。

(1) 太陽熱の侵入を抑制するには、太陽光を反射させるのが最も有効である。塗膜の断熱性は塗膜厚が小さいため無視でき、放射性も70°C程度にまで昇温しないと寄与しない。

(2) 太陽熱反射性は、顔料の種類と単位面積あたりの顔料付着量が同一の場合、塗膜中の顔料濃度や塗膜厚にはほとんど影響されない。

(3) 黒色顔料としては、塗装鋼板とした場合に赤外域で反射性を示すものであることが好ましい。

(4) 太陽光の波長域では、波長が長くなるのに伴い塗膜の透過性が増大する。従って、赤外域で塗膜と基材界面での反射が増大するため、赤外域で(の)反射性に優れた基材を用いることで、太陽熱反射性に優れた塗装鋼板とすることができる。

(5) 夏季の太陽光下での昇温測定により、55%Al-Zn 溶融めっき鋼板に複合酸化物系の黒色顔料を用いた(含有

する)黒色塗装を施した試験体で、明らかな昇温抑制効果が認められた。

文 献

- 1) カラー亜鉛鉄板統計, *Aenteppan*, **46** (2002)1, 24.
- 2) 建築用鉄鋼製品の知識第2版, 鉄鋼製品普及委員会編, 鋼材倶楽部, 東京, (1994), 198.
- 3) T.Miyamoto: *Kagaku Kogaku*, **63** (1999), 134.
- 4) T.Murase and T.Tsuji: *Jpn. Finish.*, **39** (2000) Dec., 98.
- 5) 断熱建材ハンドブック, 断熱建材協議会編, 養賢堂, 東京, (1994), 272.