合金化溶融亜鉛めっき鋼板の摺動特性に及ぼす めっき層 Fe 濃度と潤滑皮膜の相互影響

平 章一郎^{1)*}・恒川 裕志²⁾・星野 克弥¹⁾・山崎 雄司³⁾・櫻井 理孝⁴⁾・吉見 直人¹⁾・杉本 芳春⁵⁾

Effect of Both Iron Content and Lubricated Layer on the Sliding Performance of Galvannealed Steel Sheet

Shoichiro TAIRA, Hiroshi TSUNEKAWA, Katsuya HOSHINO, Yuji YAMASAKI, Michitaka SAKURAI, Naoto YOSHIMI and Yoshiharu SUGIMOTO

Synopsis : The effect of iron content of zinc layer and lubricated layer on sliding performance of the galvannealed steel sheets (GA) was investigated.

The effect of iron content on friction coefficient for lubricated GA was dependent on the sliding condition. For the condition in which the contact pressure is high, the friction coefficient increased with the increase of iron content of GA. However, for the condition in which the pressure is low, the friction coefficient decreased with the increase of iron content. This tendency of the friction coefficient was also observed in the fender model press forming test.

When the contact pressure is high, more oil pockets were formed on the surface due to the increase of the plateau area. Therefore, the friction coefficient decreased since the partial pressure was sustained in the oil pockets. Since the GA coating with low iron content is softer than that with high iron content, the friction coefficient of lubricated GA increased with the increase of iron content.

On the other hand, when the contact pressure is low, the oil pocket was not formed on the surface. In addition, the lubricated layer is easily worn since the tool length is long and the lubricant surface is more damaged than in the case of short length tool. Therefore, the friction coefficient is affected by the adhesion between tool and GA surface. This is why the tendency of iron content on friction coefficient for GA and lubricated GA is similar.

Key words : galvannealed steel; friction; press forming; lubricated film.

1. 緒言

自動車の防錆要求が高まるのに伴い亜鉛めっき鋼板が使用されるようになって久しい。中でも、国内自動車メーカーでは合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (GA : Galvannealed Steel Sheet) を用いる場合が多く自動車用鋼板の主流となっている。この理由は、同じ亜鉛系のめっき鋼板でも、電気めっきと比較すると溶融亜鉛めっきでは厚めっき化が容易であることから防錆機能と低コストを両立できること、さらに加熱合金化処理を施さない溶融亜鉛めっき鋼板は、スポット溶接での電極寿命が短く生産性に課題があるが、GAはその電極寿命が十分に長く、車体生産性の観点では有利なためである。また、塗装技術の向上により、良好な塗装外観が得られるようになったことも、GAが自動車用鋼板の主流となっている理由の1つである。

しかしながら、亜鉛めっき鋼板は、冷延鋼板と比較する

と動摩擦係数が高く摺動特性に劣る欠点があり、GAも例外ではない。このため、GAをプレス成形する際には、めっき皮膜構造が原因となるプレス割れが発生することがあり、これらを防止するため、GAの摺動特性に関する基礎的研究がこれまでも行われてきた。例えば、皮膜中のFe濃度の増加による摩擦係数の低下¹⁾、めっき皮膜構造の $\alpha \rightarrow \delta$ 相変化による摩擦係数の低下²⁾により、プレス成形時の割れを抑制できることが報告されており、加えて表面粗さの観点では、めっき表面うねりの高さを低減することで、摺動工具によるうねりの山を変形させるエネルギーが低下するため、低摩擦係数化が可能³⁾であることが示されている。

一方、摺動特性を向上させるために皮膜中のFe濃度を高く制御したものでは、皮膜の脆化により加工時にめっき層が剥離する現象、いわゆるパウダリングを発生する危険性がある⁴⁾ため、特に複雑な形状のプレス成形においては、

平成27年3月20日受付 平成27年7月13日受理 (Received on Mar. 20, 2015 ; Accepted on Jul. 13, 2015)

1) JFEスチール(株) スチール研究所表面処理研究部 (Coated Products Research Dept., Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1 Kokan-cho Fukuyama Hiroshima 721-8510)

2) JFEスチール(株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation)

3) JFEスチール(株) スチール研究所薄板加工技術研究部 (Forming Technology Research Dept., Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation)

4) JFEスチール(株) 西日本製鉄所薄板商品技術部 (Products Design and Quality Control for Sheet and Strip Dept., West Japan Works, JFE Steel Corporation)

5) JFEスチール(株) 知的財産部 (Intellectual Property Dept., JFE Steel Corporation)

* Corresponding author : E-mail : sh-taira@jfe-steel.co.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2015-027>

GA単体として割れを防止することが困難な場合がある。このような難成形部位でのプレス成形を可能にするため、各種潤滑皮膜を付与したGA鋼板の開発・実用化も進んできており、Mn-P系酸化皮膜⁵⁾、Ni系皮膜⁶⁾、P系皮膜⁷⁾などが報告されている。しかしながら、これらの報告の中では、潤滑皮膜の摩擦係数低下効果については述べられているものの、下地となるめっき層構造と潤滑皮膜の組み合わせによる摩擦係数低下効果やプレス成形性への影響について詳細に調べた例はないのが実態である。

本研究では、Fe濃度を变化させたGAに対して潤滑皮膜の有無による摺動特性、およびモデル型部品を用いたプレス成形性との関連を調査し、特に潤滑皮膜を有する場合において、摺動条件とFe濃度の違いによる摺動メカニズムについて考察することを目的とした。

2. 実験方法

2・1 供試材

評価に用いたGA鋼板は、板厚0.75 mm、引張強度：270 MPaクラスで、実機の溶融亜鉛めっきラインで合金化加熱温度を变化させて製造した皮膜中のFe濃度が異なる材料である。なお、潤滑皮膜を表面に有するGA鋼板（潤滑GA）は、溶融亜鉛めっきラインの後処理工程においてナノメートルスケールの表面改質処理⁸⁾を施したものを使用し、その摩擦係数は、これまでに報告されている潤滑皮膜⁵⁻⁷⁾と同等であった。

2・2 摩擦係数測定

摩擦係数の測定は、Fig.1に示す平板摺動試験装置を使用し、押し付け力の平均値 (N) と引き抜き力の平均値 (F) から、 $\mu = F/N$ の式にて摩擦係数を算出した⁹⁾。なお、測定の前には、鋼板表面の防錆油を溶剤により脱脂した後、洗浄油（スギムラ化学工業製、プレトンR352L）を塗油した。

摩擦係数の測定は、Table 1に示す2種類の試験条件にて行った⁹⁾。これら2種類の試験条件は、摩擦係数の測定における面圧を变化させることを目的としており、条件Aは、工具長が短く、面圧が高いことが特徴であり、一方の条件Bは、工具長が長く、面圧が低いことが特徴である。なお、本来は、接触面積一定のまま押し付け力を変化させるほう

Fig. 1. Schematic drawing of the flat sliding test equipment for measuring the friction coefficient of steel sheet.

が面圧の影響のみの考察が容易であるが、本研究で用いた装置では、押し付け力の変化で面圧を極端に変化させることは、剛性上困難であるため、押し付け力を一定とし、接触面積を变化させることにより面圧を变化させた。

2・3 モデル型によるプレス成形性評価

自動車外板パネルとしての成形性と摩擦係数の関係について詳細に調査することを目的に、実機部品スケールのフロントフェンダーモデル金型に対して、11800 kNシングルアクションメカニカルプレス機にて成形試験⁹⁾を行った。なお、成形試験は、しわ押さえ力条件を1000～1500 kNの範囲で变化させて実施した。なお、成形試験時には、摩擦係数の測定に使用したのと同じ洗浄油を塗布した。

Fig.2には成形品の外観形状を示したが、図中の矢印で示した部分について、材料の流入量 (mm) をノギスを用いて測定し、図中の●部のパンチ頂上部について、超音波板厚測定計を使用して測定した板厚をもとに、板厚減少率 (%) を算出した。

3. 結果および考察

3・1 GAおよび潤滑GAの摩擦係数に及ぼすめっき層Fe濃度の影響

Fig.3およびFig.4に、GAおよび潤滑GAの摩擦係数について、めっき層のFe濃度との関係を示す。Fig.3より、GAの場合、条件A、条件Bのいずれの摩擦係数も、めっき層中

Table 1. Schematic drawing of tools for flat sliding test and test conditions.

	Condition A	Condition B
Geometries of tools
Sliding direction	→	→
Contact area	3 mm × 10 mm	50 mm × 10 mm
Sliding length	100 mm	100 mm
Contact pressure	130.4 MPa	7.8 MPa
Tool material	SKD11 (JIS)

Fig. 2. Appearance of the fender model for the 11800 kN scale press trial.

のFe濃度の増加にともない低下する傾向を示していることが分かる。この傾向は、パウデン法の改良により測定されたGAの摩擦係数とFe濃度の関係¹⁾と同様である。一方、Fig.4より、潤滑GAの場合には、同一Fe濃度のGAと比較すると、摩擦係数は低くなっているものの、下地めっき層のFe濃度に対する摩擦係数の変化の挙動は、条件によって異なっていることが分かる。すなわち、条件Bでは、GAと同様にFe濃度の増加にともなう摩擦係数の低下が認められるのに対して、条件Aでは、逆にFe濃度の増加とともに摩擦係数も増加する傾向が認められた。

このように、潤滑GAの摩擦係数も、下地となるGAのFe濃度にとまなない変化する傾向がある一方で、潤滑GAの摩擦係数のFe濃度に対する変化は、摩擦係数の測定条件によって、下地のGAの挙動とは異なる場合があることが分かった。

3・2 プレス成形時の流入量に及ぼすめっき層Fe濃度の影響

前節で示したように、GAと潤滑GAの場合に、摩擦係数のFe濃度依存性が異なる傾向が認められたことから、これらの摩擦係数の傾向とプレス成形における材料流入量との相関について調査を行った。この評価は、Fe濃度が最も低い7.8%の場合と、Fe濃度が最も高い12.0%に対して実施し、材料の流入量の測定は、前述したFig.2中の矢印の部分

Fig. 3. Relationship between friction coefficient and Fe content for GA steel sheet.

Fig. 4. Relationship between friction coefficient and Fe content for lubricated GA steel sheet.

に対して行った。その結果をFig.5に示す。

Fig.5は、材料流入量をしわ押さえ力に対してプロットしたものであり、この流入量が多いほど、しわ押さえの役割を果たす絞りビード部での材料のすべり性が高いことを示している。なお、図中では、材料によって測定を行ったしわ押さえ力の範囲が異なっているが、それぞれの材料に対して、この範囲より低いしわ押さえ力では形状不良（しわ）が発生し、またこの範囲より高いしわ押さえ力では割れが発生したため、測定が不可能であったことによるものである。

図より、いずれの材料に対しても、しわ押さえ力が増加すると流入量は減少する傾向を示していることが分かる。このことは、しわ押さえ力が増加すると、絞りビード部における材料の拘束力が増加するため、材料が動きにくくなることに対応すると考えられる。一方、材料の違いに着目すると、GAでは、Fe濃度の高い場合に流入量が多くなっているのに対して、潤滑GAでは、逆にFe濃度が低い場合に流入量が多くなっており、絞りビード部における材料のすべり性に対して、両者のFe濃度との相関が異なることが分かる。

このような傾向、すなわち、GAではFe濃度が高い場合に材料のすべり性が高く、逆に潤滑GAではFe濃度が低い場合に材料のすべり性が高い傾向は、Fig.3に示した条件Aの摩擦係数で認められたものと同じであり、このことから、プレス成形時の材料の流入については条件Aの摩擦係数の傾向との相関が強いと考えられる。

3・3 プレス成形時のパンチ面厚減少率に及ぼすめっき層Fe濃度の影響

Fig.6には、前節と同じ2種類の材料を使用し、Fig.2に示したパンチ底面での板厚減少率をしわ押さえ力に対してプロットしたものを示す。なお、板厚減少率は、元の板厚から減少した割合を百分率で示しているが、この絶対値が大きいほど、パンチ面に対して材料がすべることで、均一に延びていることを示している。

図より、いずれの材料においても、しわ押さえ力が増加

Fig. 5. Relationship between the amount of material flow and blank holding force for the fender model press forming.

すると板厚減少率が増加する傾向を示していることが分かる。このことは、しわ押さえ力が増加すると、ダイフェースからの材料の流入が少なくなり、替わってパンチ底部での材料が伸びるようになることを示している。また、潤滑GAとGAを比較すると、潤滑GAはパンチ底での板厚減少がより大きい傾向であり、潤滑皮膜による摩擦係数低下が影響していると考えられる。

さらに、GAでは同じしわ押さえ力においてより高Fe濃度の皮膜が大きな板厚減少を示し、同様の傾向が潤滑GAでも認められており、両者ともにFe濃度が高い皮膜の場合にパンチ底部での摩擦係数が低くなっていることを示唆している。これは、Fig.4に示した条件Bの摩擦係数で認められたものと同じであり、このことからプレス成形時におけるパンチ底のすべり性については条件Bの摩擦係数の傾向との相関が強いと考えられる。

3・4 摺動試験時の表面形態の変化に及ぼすめっき層Fe濃度の影響

これまでの結果から、潤滑GAの場合には、摺動条件により下地GAのFe濃度にもなる摩擦係数の増減挙動に違

Fig. 6. Relationship between the thickness reduction ratio of punch area and blank holding force for the fender model press forming.

いが認められ、またプレス成形における材料の流入量の変化やパンチ底での板厚減少率の変化に対応することが分かった。

そこで、この摺動条件による潤滑GAの摩擦係数のFe濃度依存性に関する考察を深めるため、Fe濃度の異なる潤滑GAの条件AとB双方で摺動試験を行った前後の表面についてSEM観察を実施した。その結果をFig.7に示す。

図より、摺動試験を行う前の潤滑GA鋼板には、いずれも暗く平坦化されて見える部分が存在するが、これは下地のGA製造工程において調質圧延を施した際に、圧延ロールとの接触により表面が潰された部分であり、周囲より凸部として存在する。この平坦化された部分の面積に着目すると、下地のFe濃度の違いによらず同じ調質圧延荷重にて製造を行ったものであるにも関わらず、Fe濃度が低い場合に、平坦化された面積の割合が多い傾向であることが分かる。これは、Fe濃度が低い場合は、下地のGA層に軟質な δ 相が存在するのに対して、高Fe濃度の皮膜では、硬質な δ 相が主体となる¹⁰⁾ためであると考えられる。さらに、摺動試験を行った後では、暗く平坦化された部分が増加しており、この面積の増加は、工具と接触することで鋼板の凸部が変形を受けたことによるものであると考えられる。

このような摺動試験による表面の平坦化が認められたことから、Fig.7に示したSEM画像を二値化し、潤滑GAの摺動前後の平坦部面積率変化について、下地のFe濃度や摺動条件の違いによる比較を行った。

Fig.8は、摺動試験前、さらに各条件での摺動試験後の平坦部の面積率を下地のGAのFe濃度に対して示したものである。図より、摺動試験の前後ともに平坦部の面積率はFe濃度の増加に対して減少する傾向を示しており、また、下地GAのFe濃度の違いによらず、条件Aの場合に、条件Bよりも平坦部が多くなっていることが分かる。この摺動条件による平坦部面積率の違いは、両者の面圧の違いによるものであると考えられる。

Fig. 7. SEM images of the lubricated GA surface for both before and after the sliding.

そこで、次に、摺動前後の平坦部面積率の変化量に着目し、各条件の摩擦係数の変化との対応についてプロットした。その結果をFig.9に示す。図より、条件Aの場合には、平坦部面積率の変化量が大きい領域にあり、かつこの変化量の増加に対して摩擦係数が減少するのに対して、条件Bの場合には、平坦部面積率の変化が全体的に小さく、またこの面積率の変化が大きくなると摩擦係数が増加する傾向を示していることが分かる。このことは、各条件での摺動メカニズムに違いがあることを示唆していると考えられる。

3・5 摺動条件および下地GAのFe濃度による潤滑GAの摺動メカニズム

これまで述べてきたように、潤滑GAの摩擦係数に対して、下地GAのFe濃度による変化は摺動条件により異なり、また、下地GA自体のFe濃度による摩擦係数変化挙動とも異なる場合があることが分かった。

Yamasakiら¹¹⁾は、冷延鋼板および各種表面処理鋼板を対象とし、面圧変化に伴う摩擦係数の変化について論じており、摺動時の面圧が増加すると表面の平坦化がより進行し、その際に平坦化されなかった凹部に潤滑油がトラップされ、潤滑油の封じ込め効果が発生することで、面圧増加による摩擦係数の低下が生じることを示している。

Fig. 8. Relationship between plateau area ratio and Fe content for lubricated GA both before and after the sliding.

Fig. 9. Relationship between friction coefficient and increase of the plateau area ratio for lubricated GA.

本研究で使用した条件Aでは、面圧が高い領域であり、またFig.9に示した平坦部面積率の増加も多いことから、潤滑油がトラップされるような凹部が形成され、潤滑油の封じ込め効果が得られる面圧であったことが考えられる。このため、下地のGA層を構成する硬度の違い（ ζ : 200 Hv¹²⁾, δ : 284~300 Hv¹²⁾）により、 ζ 相が主体の低Fe%の皮膜で、より平坦化が生じるため、低い摩擦係数を示していたと考えられる。一方の条件Bの場合には、面圧が低い領域であり、平坦部面積率の増加も少ないため、潤滑油の封じ込め効果が得られない面圧領域であったと考えられる。加えて、条件Aと比較すると工具長が長く、このことは、鋼板表面のある1点に着目すると、その1点を通る工具の長さが長くなることと同じであり、著者らの一部が過去に述べている¹¹⁾ように、工具長が長いほど、より多くの工具表面が摺動していくことにより、鋼板表面がダメージを受け、表面の磨耗が早く進行することを示している。すなわち、工具長が長い場合には、表面に付与した潤滑皮膜が削り取られることが考えられる。このため、潤滑皮膜効果が小さくなり、下地GAの表面と工具との凝着力による摩擦力が発生し、GAと同じ摩擦係数のFe濃度変化を示したと推定できる。

以上のことをまとめると、潤滑GAの各摺動条件における摺動機構は、Fig.10のような模式図で示すことができる。

本研究で用いた条件Aの摺動では、工具の長さが短いために、工具により表面が擦られる際に、表面の潤滑皮膜が削り取られることはなく、常に潤滑皮膜と工具が接触している状態であることが推定できる。このため、工具と表面の間で発生する凝着力は潤滑皮膜によるものであり、下地のGAが原因となる凝着力は発生しないと考えられる。加えて、面圧が高いために表面の平坦化が進行しやすく、表面上に孤立した凹部が形成され、この部分に潤滑油がトラップされるために、より平坦化が進行しやすい低Fe濃度の潤滑GAの場合に摩擦係数が低くなったと考えられる。

Fig. 10. Schematic drawing of the sliding mechanism of lubricated GA.

一方、条件Bの摺動では、面圧が低いために表面の平坦化が進みにくく、潤滑油がトラップされる凹部が十分に形成されないことで、潤滑油の封じ込め効果が得られず、主として表面の凝着力が支配的となる摩擦力が発生すると考えられる。加えて、工具の長さが条件Aと比較すると約17倍の長さがあり、摺動時の表面層の磨耗は条件Aの場合よりも大きいと考えられる。すなわち、条件Bの摺動においては、部分的には潤滑皮膜が削り取られ、下地のGA層の一部が露出した状態である可能性が予想できる。このため、潤滑皮膜による凝着抑制効果が小さくなり、下地のGA層と工具との凝着力が発生し、潤滑GAの場合にも、下地のGAの摩擦係数の傾向と同じく、Fe濃度の増加にともなう摩擦係数の低下が得られたと考えられる。

4. 結論

めっき層のFe濃度を変化させたGAに対して、潤滑皮膜の有無による摺動特性の変化について調査を行い、以下の結論を得た。

- (1) 工具長が短く高面圧の条件Aでは、めっき層Fe濃度の増加に伴い、GAの摩擦係数は減少するのに対して、潤滑GAの摩擦係数は増加する傾向を示した。一方、工具長が長く低面圧の条件Bでは、GA、潤滑GAともに、摩擦係数はめっき層Fe濃度の増加に伴い減少する傾向を示した。
- (2) フェンダーモデルを用いた実プレス成形試験の結果、潤滑GAにおける材料流入は、低Fe濃度皮膜のほうが高Fe濃度皮膜よりも多く、条件Aの摩擦係数の大小傾向と同様であったのに対し、パンチ底の材料の伸びは高Fe濃度皮膜のほうが低Fe濃度皮膜よりも大きく、条件Bの摩擦係数の傾向に類似していた。
- (3) 摺動時に表面が潰されることによる平坦部面積率の増加は、面圧の高い条件Aの場合に、条件Bに比較して大きく、また同じ摺動条件で比較すると、低Fe濃度皮膜のほうがより平坦化が進むことが分かった。

- (4) 以上の結果より、条件Aの場合には、工具長が短いために潤滑皮膜が削り取られることなく残存するために工具と表面の凝着の影響が非常に小さいこと、また面圧が高いために潤滑油がトラップされる凹部を形成しやすくなるため、より平坦化が進む低Fe濃度の場合に潤滑油の封じ込め効果が大きく、Fe濃度が低い皮膜ほど摩擦係数が低かったと推定した。これに対して、条件Bの場合には面圧が低いために平坦化が進みにくく、前述したような潤滑油の封じ込め効果が小さいこと、また工具長が長いために、潤滑皮膜が一部削り取られ下地のGA表面が露出している可能性があり、工具と表面の凝着の影響がより支配的となり、GAの場合と同様に、摩擦係数がFe濃度の増加に伴い減少したと推定した。

文 献

- 1) Y.Hayashi, T.Sudo and M.Sakane: *CAMP-ISIJ*, **3**(1990), 402.
- 2) Y.Numakura, M.Nakayama, S.Kanamaru, M.Yamada, Y.Umezu, S.Hayashi and M.Eshima: *CAMP-ISIJ*, **2**(1989), 1701.
- 3) T.Nomoto and T.Horita: *CAMP-ISIJ*, **2**(1989), 1698.
- 4) J.Inagaki, S.Nakamura, M.Yoshida and A.Nishimoto: SAE Technical Paper Series, No.890349, (1989).
- 5) S.Suzuki, T.Kanamaru and K.Arai: *CAMP-ISIJ*, **6**(1993), 1545.
- 6) M.Sakurai, A.Hiraya, S.Hashimoto, T.Urakawa, J.Inagaki and M.Yamashita: *CAMP-ISIJ*, **9**(1996), 1295.
- 7) H.Irie, T.Yamamoto, N.Nakano and M.Shimizu: Proc. 4th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '98), ISIJ, Tokyo, (1998), 614.
- 8) N.Yoshimi, H.Masuoka, S.Taira, T.Imokawa, M.Nagoshi, Y.Yamasaki, Y.Sugimoto and S.Fujita: Proc. 7th Int. Conf. on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (GALVATECH '07), ISIJ, Tokyo, (2007), 504.
- 9) Y.Yamasaki, K.Sato, M.Sakurai, S.Nomura and Y.Hosoya: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **45**(2004), No.519, 255.
- 10) M.Arai, T.Nakamori, Y.Adachi and T.Usuki: *CAMP-ISIJ*, **5**(1992), 1649.
- 11) Y.Yamasaki, A.Azushima and Y.Tokita: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **46**(2005), No.537, 957.
- 12) 大和康二：第138・139回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1985)，15.