

製鉄プロセスロールのトライボロジー

溶接溶射技術開発室

加藤 治

Osamu Kato

1 トライボロジーとは何か

トライボロジーは未確立の、境界領域の科学技術である

トライボロジーという用語が英国で生まれて既に28年が経ち、かなり普及したので、その意味をあらためて説明するまでもないと思うが、要するに、物体が接触して相対的に運動、すなわち摩擦した時に生じる摩擦、肌荒れなどの表面現象を取り扱う科学、技術である¹⁾。このように、相手が単に「物体」であるからこの世にあるものは何でもよいし、接触状態は様々であるから、トライボロジーの対象は我々の身の回りに無数にあり、摩擦、摩擦は昔から極めて身近な親しみのある現象である²⁾。また、機械部品が力を伝達する時とか、物を加工する時には必ず表面を介さなければならぬのである。それなのに、トライボロジーを応用して摩擦、摩擦をより少なくしたり、望ましい程度にコントロールすることがこれ程難しいのはなぜであろうか。それはトライボロジーが決して体系化された単独の学問なのではなく、多くの科学、技術を組み合わせて、あるいはそれらを延長してしか存在し得ないからである。いいかえると、まず、機械力学、熱工学、物性科学、そして金属、セラミックスなどの材料学、さらに物理、化学などの基礎科学を十分に知らないとトライボロジーの世界に入ることができない。境界領域科学の最たるものがトライボロジーであろう。このことがこれまで、頭脳優秀な多くの人達が世の期待に応えるべく、トライボロジー理論確立に、あるいはトライボロジー問題の理論的解決に挑戦しては失敗を重ねている所以でもある。

今はまだトライボロジーに期待し過ぎてはいけない

トライボロジーには一時熱い視線が浴びせられたにもかかわらず、その複雑さの故に何時しか誰もが避けて通るような、あるいは片すみに放置されたままで進歩がないような感じになっている。しかし、1昨年には日本トライボロジー学会が発足して、今後他の学会との協調関係が次第に生まれてくることが予測される。また、全国的に研究開発予算の比率が増加しており、有用なテーマ選びに苦慮している情勢にあって、トライボロジー関連のテーマが注目されてトライボロジーが飛躍的な進歩を遂げる日がさほど遠くはないのではないかと、最近では期待がもてるようになった。

本解説では、読者の関心が高い製鉄プロセスロールのトライボロジーを取り上げ、それが誤解されることなく認識

され、かつその進歩のためにはどのように考えれば良いかを著者なりに概説してみようと思う。

2 製鉄プロセスロールの多様性

製鉄プロセスロールは多種類が、様々な使われ方をしている

上に述べたように、トライボロジーは非常に身近な問題であり、当社が作っている溶接、溶射あるいはCPC施工されたロール、ローラなどのほとんどが耐摩擦用途である。しかも、製鉄機械部材が多い。多工程にまたがる製鉄プロセスで用いられるロールを総称して製鉄プロセスロールという³⁾⁻⁵⁾。まずそれらを鋼製品別に見ると、薄板、厚板、条線、溶接管、継目無管があり、機能別では、搬送、支持、案内(ガイド)、グリップング、および加工(圧延、矯正、巻取り、巻戻し)に分けられる。またこれらの使用環境は様々で、熱間、冷間、大気雰囲気、非酸化雰囲気、水蒸気雰囲気、および熔融金属中などがあり、それぞれに低面圧から高面圧まで、低すべり速度から高すべり速度まであり、さらに鋼材の種類が普通鋼からステンレス鋼までであるので、プロセスロールのトライボロジーは極めてバラエティに富んでいる。製鉄プロセスロールの種類を薄板プロセスを例にとり、表-1に示す。

表-1 薄板プロセスロールの種類

機 能	名 称
搬 送	ランナウトテーブルロール
	ハースロール
支 持 案 内	サイドガイドロール、サポートロール
	ラッパーロール、ユニットロール
	形状検出計ロール、ステアリングロール、シンクロール、ポットロール、トップロール
グリップング (張力付与)	ルーパーロール、テンションロール、ディフレクターロール
	ブライドルロール
加 工 (圧延、矯正、 巻取り、巻戻し)	ピンチロール、プレッシャーロール、リンガーロール
	ワークロール(粗、仕上げ、調質圧延用)
	中間ロール
	バックアップロール(粗、仕上げ、調質圧延用)
	スキンパスロール
通 電	レベラーロール、ベンディングロール
	マンドレル、テンションリール、ペイオフリール
	コンダクターロール

製鉄プロセスロールは他産業のプロセスロールに比べて全般的に、接触面圧が高い、高温で使用されることがある、および水、水蒸気などの腐食環境で使用されることがあるなどの点で、トライボ環境としては過酷な状態に置かれており、一般に寿命も短い。そのために、溶接、溶射、メッキ、あるいはライニングなど種々の表面改良材がそれぞれに経験的に探し当てられて用いられていることが多い。

3 トライボ特性の評価

トライボ特性には必ず相手が必要

ある材料のトライボ特性とはそれを他の物体と摩擦した時の摩擦力の大きさおよび、摩擦の結果生じる表面損傷の程度をいう。摩擦力の大きさは通常、垂直荷重との比である摩擦係数で表現される。表面損傷とは摩耗、肌荒れ（焼付きを含む）、およびピッチング、スポーリーングなどの表面疲労の総称である。ここで嚴重に注意せねばならないのは、トライボ特性は材料固有の物性値ではなく、必ず相手材と摩擦条件とを指定せねば決まらないということである。従って、ある材料の摩擦係数が大きいとか小さいとかいうのは誤りであり、正しくは、他のある材料に対する、ある条件下での摩擦係数といわねばならない。相手が変われば、または摩擦条件が変われば摩擦係数は大きく変わるのである。

トライボ特性評価には実験がキーポイント

この摩擦係数というのがまた極めて誤解されやすい用語である。係数と呼ばれるのに定数ではなく、摩擦条件を一定にした場合でさえ摩擦中は常に変動している値なのである。その原因は摩擦力の不確定性にある。摩擦力がなぜ生じるのかという議論は学会で現在も続いていて⁶⁾、両表面の凹凸のかみ合いと変形（プラウイング、カッティング、ウェッジング）⁷⁾、表層の塑性流動または破壊、果ては表面原子、分子間力まで多くの要因が関連すると考えられている。摩擦と摩耗は1対1に対応はせず、摩擦力の一部のみが摩耗に関連しているにすぎない。今までに摩擦力を理論的に求め得た例はない。摩擦中の表面状態は摩擦によって刻々変化するので、摩擦力が変動するのは当然なのである。外見上変化していないような表面でも、マイクロな形状、硬さなどの物性値、および酸化膜の状態などは必ず変わっている。以上のように、摩擦力の大きさは測定により求めるしかなく、しかも、測定条件と測定時点で異なるものであるということが理解できたと思う。

摩擦がこのようなものであるから、その結果生じる種々のトライボ特性を知るのも現在は実験に頼るしかなく、実験方法の選定は重要なポイントなのである。

トライボ実験法は自分で考え出さねばならない

トライボ特性を知るためにシミュレーション実験を考え

るのは適切ではない。というのは実機の摩擦条件をそのまますべて与えられる試験機はなく、厳密にはシミュレーションになっていないからである。そこで、知りたいトライボ特性毎にそれぞれ評価実験法を探し求めねばならない。この時に重要なことは、その特性を支配している要因を抽出することである。

最もポピュラなトライボ特性である摩耗についていうと、これまでに作られた試験機の種類は表-2のように沢山ある。しかし、ほとんどが実際の摩耗がどのようなものかにかまわず、単に摩耗データを出すためのものである。また、結果がもっともらしい数値として出るので、これがその材料の物性値と誤解されることも多いが、前にも述べたように、摩耗は相手材と摩擦条件が変われば大きく変わるのである。結局は、既存の試験機をそのまま希望通りに使えることはまれである。

表-2 摩耗試験機の種類

すべり摩擦方式	ピンオンディスク 大越氏 ファレックス式 チムケン式 アルメン式 パウデンレーベン式
ころがり摩擦方式	西原式 アムスラー式 ASTM式(LFW-1) SAE式 ボールオンディスク 四球式

注) この他にも、研磨紙で摩擦するスガ式など、および油性評価のための摩擦試験機が多数ある。

摩擦の条件とはまず相手材の材質とその摩擦状態、接触面間の力、すべり速度、すべり距離または転動数、摩擦面温度であり、次に雰囲気（環境）である。摩擦状態にはころがりとすべり摩擦があり、その違いは、同じ面同士との摩擦が次々に更新される面との摩擦かという点である。同じ面との摩擦の場合には加工硬化とか表面疲労という現象を考慮せねばならない。そして、ロールの場合にはころがりによる多少のすべりが加わったころがりすべり摩擦がほとんどである。

探し求める試験機がない場合に、上記のことを考えずに手近にある試験機を使用することが何と多いことか。間違ったデータを出すよりは何もしない方がまだましであろう。適合した試験機がないならばそれを自分で作るか改造せねばならない。

4 トライボ材料開発の考え方

トライボ材料の開発は経験、従来知識と勘だけではできない

耐摩耗性材料といえども、使用条件が変われば耐摩耗性を示さなくなる。また、どんな材料でも必ず摩耗するので、ある材料が満足され続けることはなく、人の欲望と同じように、常により摩耗の少ないものが求められる。トライボ材料を開発する時、どのように考えるべきであろうか。それにはまず、現用材料の種類とその使用条件を正確に把握し、次に、使用条件を解析して支配的要因を抽出する。さらに、その要因を織り込んだトライボ実験を考案して、現用材料と新材料の特性を比較評価することである。使用条件を解析するとは、表面温度の分布と時間的変化、表面に加わる力の分布と時間的変化、すべり速度、すべり距離、および、雰囲気である。

この時に重要なことは、2種以上の材料の特性順位が実機における順位と同じでなければならない。

このような手順を踏むには当然ながら相当の時間と費用を要する。数値解析、試験機の製作改造が必要であり、実機テストはチャンスが少ないからである。そこで大抵手抜きをすることになるが、それではトライボロジーの進歩にはつながり難い。

熱延ロールトライボロジーの例

プロセスロールの中でも製品の品質、コストを大きく左右するために特別扱いされることが多い圧延ロール、とりわけホットストリップミル仕上げ圧延機ワークロールのトライボロジーを例に取り上げてみる^{8) 9) 10) 11)}。このような加工プロセスロールは他のプロセスロールに比べてサイズが大きく、かつ接触面圧が一桁以上高いという特徴がある。

圧延ロールは圧延技術の進展および製品品質に対するニーズの変化に伴って材質が移り変ってきた¹²⁾。しかし、材質改善は実機テストにより、トライアンドエラー方式に頼って推進され、ロール特性が実験室で評価できたのは摩耗特性のみであった。当初、この摩耗をシミュレートしようと材料温度、接触面圧、すべり率のみならず、水冷による熱サイクルまでを実条件に合わせようとした試験機が試作された¹³⁾。圧延ロール表面が受ける摩擦条件は模式的に示すと、図-1のようである。ロール表面は圧延材との 10^{-2} ないし 10^{-3} 秒間の接触中に温度が上昇すると同時に、材料から垂直力を受け、さらに材料とのすべりによる摩擦力が正逆両方向に作用する。材料から離れてからは、水による急冷とバックアップロールからの高い接触応力を受け、このサイクルが数千ないし数万回繰り返される。

ここで考察された試験機は図のB点が受ける条件を転がりすべり摩擦で与えるアムスラー式摩耗試験機である。しかしよく考えてみると、材料に新生面がない、正逆のすべりがなく、接触面圧がやや小さい、接触長と接触時間が短

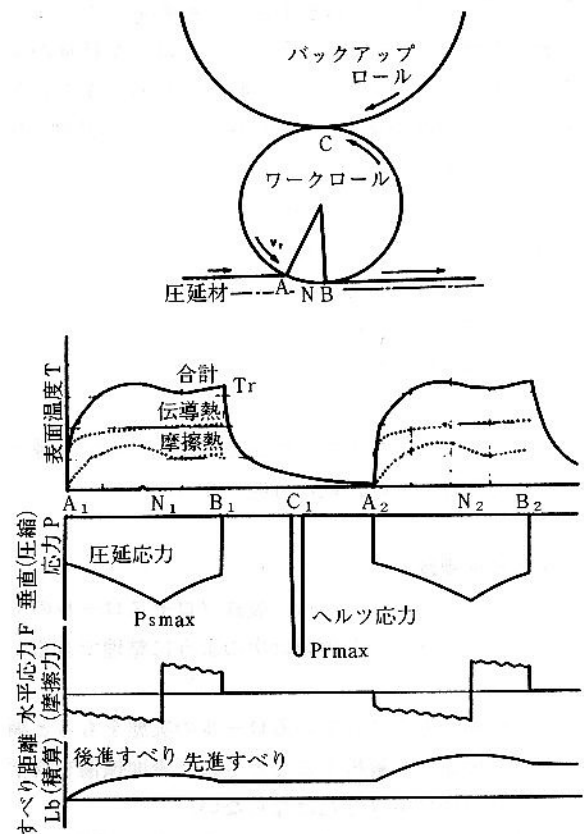


図-1 熱延ワークロール表面のマクロ的摩擦条件 (模式図)

い、など多くの相違点があり、やはり正確にはシミュレーションとはいえないのである。

それにもかかわらずこれが大いに活躍したのは次の事情による。すなわち、試験機の開発と平行して、実ロールの摩耗が詳しく調べられた。その結果、これの多くの実験条件を適当に組み合わせると、実ロールの摩耗がよく再現できることが明らかになったのである。すなわち、何種類かの材質の耐摩耗性が一致し、かつ摩耗表面のモルフォロジーが類似した。一例を図-2¹⁴⁾に示す。

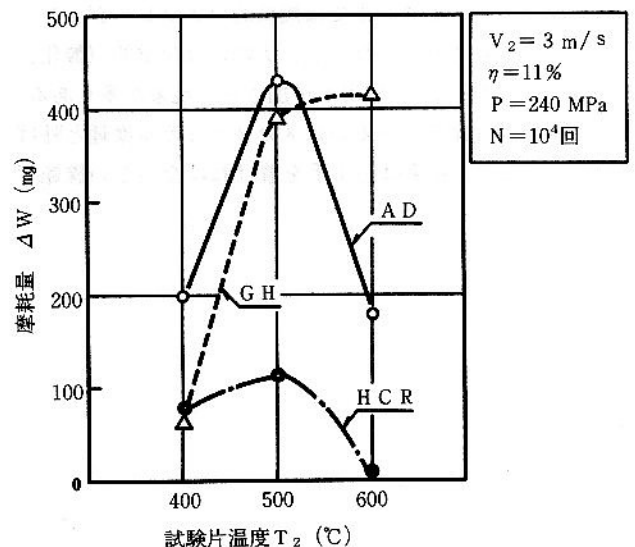


図-2 試験片温度と摩耗量の関係

周速度 v_2 、すべり率 γ 、接触面圧 P 、転動数 N を一定にし、試験片温度 T_2 のみを変えると、これほど摩耗量が変化するのであるが、それが 500°C の時に 3 材質つまり、アダマイト (AD)、高合金グレン (GH)、高クロム鑄鉄 (HCR) の順位が実機と一致した。

これまでにはかなりの年月がかかった。というのは、ロールは圧延スタンドごとに材質が定められており、かつ圧延条件が一定ではないので、異なるロール材質の同条件での耐摩耗性比較は通常困難であるからである。さらに、ロールの耐摩耗性評価は数か月以上使用してみないと正確ではない。

このようにして適正な実験条件が見つかったので、種々の材質の高温摩耗特性の比較が可能となった。

5 今後の技術課題

これまで述べてきたことから、製鉄プロセスロールのトライボロジーに課せられた課題は次のように整理できであろう。

- 1) 様々な使われ方をされているロールの実態をもっと調べ、その摩擦条件を解析するとともに、表面損傷を科学的に、ミクロ的に追求せねばならない。
- 2) その結果を基に、支配因子を抽出し、それを織り込んだトライボ実験法を考案して材料の評価をする。トライボ試験機をもっと色々作るべきである。
- 3) 同じ材質を平行して実機でも評価し、ラボ評価法にフィードバックせねばならない。また、実機データをもっと重要視して、いわゆるデータバンク的に管理するシステムを作るべきである。
- 4) トライボ試験機としてこれまでに摩耗に関する例は多いが、肌荒れ (焼付きを含む) に対するものは極めて少ない。定性的で主観が入りやすい肌荒れ現象の解析に体系的に取り組むべきである。
- 5) 摩耗についてもこれまでは機械的 (アブレーション) 摩耗しか着目されていないが、実際には化学的 (酸化、還元、固相反応など) 作用が付加された現象が多くある。いわゆる腐食摩耗、あるいはメカノケミカル摩耗と呼ばれているが¹⁵⁾、将来は必ず手を着けねばならない課題であろう。

6 まとめ

トライボロジーは科学、技術としてはまだ幼年期にあり、今後、各専門分野と協調して育てていかねばならない。

製鉄プロセスロールのトライボロジーについても、現在はケースバイケースに、ここで延べた基本に忠実に従って積み上げていくべき技術である。早急に成果を期待したり、革新的進歩を望むべきではない。しかし、宇宙さえ支配し得る人類にとってトライボロジーが永遠の課題とはとても思えないから、明るい未来が必ず到来するものと確信する。

参考文献

- 1) たとえば、木村好次、岡部平八郎：トライボロジー概論、養賢堂 (1982)
- 2) 加藤康司：トライボロジスト、34-4 (1989)、P. 231
- 3) 外崎千代司：溶接技術、(1988-4)、P. 75
- 4) 岩崎好孝：高温学会誌、16 (1990)、P. 273
- 5) 笠井 聡、佐藤裕二、柳沢章博、市原 晃、大西 廣：川鉄技報、19 (1987)、P. 64
- 6) 例えば、中野 隆：トライボロジスト、39-5 (1994)、P. 387
- 7) 堀切川一男：トライボロジスト、37-10 (1992)、P. 799
- 8) 添野 浩、玉村建雄、赤堀公彦、末永 允、田中守通：日立評論、50 (1968)、P. 553
- 9) J. J. deBarbadillo: Iron & Steel Eng. (Jan. 1981), p. 63
- 10) 白岩俊男、松野二三郎、田頭 一：鉄と鋼、57 (1971)、P. 823
- 11) Osamu KATO, Hiroyasu YAMAMOTO, Matuo ATAKA, Koe NAKAJIMA: ISIJ Int., 32 (1992), p. 1216
- 12) 木原諄二：鉄と鋼、80 (1994)、P. N386
- 13) 中島浩衛、大貫 輝、蓮香 要：昭和53年度春季塑性加工講演会論文集 (1978)、P. 181
- 14) 加藤 治、山本普康、阿高松男：CAMP-ISIJ, 4 (1991), p. 462, (1989), p. 495
- 15) 大谷南海男：鉄と鋼、65 (1979)、P. 556