

© 1985 ISIJ

マランゴニ効果が関与する界面現象についての最近の研究



向 井 楠 宏*

Recent Studies on the Interfacial Phenomena in which Marangoni Effect Participates

Kusuhiro MUKAI

1. はじめに

グラスにアルコールの度の強いワインを注ぐと内壁に沿ってワインがはい上がり、そこに液滴の列があらわれる。“ワインの涙”として知られるこの現象は 1855 年、イギリスの THOMSON¹⁾ によつてはじめて、局所的な表面張力差が駆動力となつて生じるものであるとの説明が与えられた。以来、表面張力の局所の変化に起因する液体の各種の運動、すなわち、次章で述べるマランゴニ効果によつて誘起される液体の運動が研究対象として取り上げられ、また蒸発、結晶成長、気泡の安定性等から生物学の分野に至る広い範囲の問題に対して、マランゴニ効果との関連性が検討されてきた。

近年、観察手段、解析手法などの発達に伴い、マランゴニ効果により誘起される液体の運動およびそれに伴つて生じる各種の現象がより実証的にまた定量的に取り扱われるようになった結果[†]、マランゴニ効果はさまざまな工学的問題に広いかかわりをもち、ある場合には重要な役割を果たしていることが明らかになつてきた。本稿では主に最近の約 10 年間の研究に焦点を絞り、まずマランゴニ効果との関係で注目を集めている工学的問題、話題を金属工学に関係があると考えられるものを中心に簡単にとりあげ、次に製錬プロセスに関係が深いと考えられるものについて、もう少し具体的に紹介を行つた。

2. マランゴニ効果について

液体表面あるいは液体-液体界面の表面張力あるいは界面張力に何らかの原因で局所の変化が生じると、その差に相当する接線力の作用のため、液体の運動に変化が生じる。このような場合の表(界)面張力の局所の変化をマランゴニ効果と呼ぶ。文献によつてはもつと狭義に「表(界)面張力の局所の変化により液体に流動が誘起される」²⁾ までを含めてその効果をマランゴニ効果とする

† マランゴニ効果により誘起される液体の運動についてのこれまでの研究成果は、文献 2) に詳しい。

ものもあるが、より一般的には、「流体力学において動力的な面に 関与する 表(界)面張力の局所的な変化」⁴⁾ をそれぞれの具体的な場合に対応させてマランゴニ効果と呼んでいる。

表(界)面張力 σ の局所の変化は温度 T か界面活性な溶質の濃度 c の局所の変化、場合によつては電気化学的要因によつて生じる。上述の“ワインの涙”は、濃度差に起因するマランゴニ効果によつて誘起されるものであり、内壁面の液膜のアルコールが蒸発して表面張力が増大する結果、マランゴニ効果により下部のワインが重力に逆らつてひきあげられるからである¹²⁾。

表面の x 方向に沿つて温度勾配、濃度勾配がある場合、表面張力勾配による表面せん断応力 τ_s は次式(1)で示される。

$$\tau_s = \frac{d\sigma}{dx} = \frac{\partial\sigma}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx} + \frac{\partial\sigma}{\partial c} \cdot \frac{dc}{dx} \quad \dots\dots (1)$$

このせん断応力によつて発生する液体の流れは、NAVIER-STOKES の運動方程式と熱伝導の式あるいは拡散方程式とを、表面接線力を与える境界条件のもとで解くことにより求まる。

マランゴニ効果によつて発生する流れすなわちマランゴニ流 (MARANGONI flow) を特徴づける無次元数としてマランゴニ数 Ma が用いられる。温度差 (または温度勾配) に起因する表面張力差 (または表面張力勾配) によつて生じるマランゴニ対流 (MARANGONI convection) は、液体の機械的な運動である流動に伴つて伝達される熱量と、熱輸送現象である熱伝導によつて伝達される熱量の比として

$$Ma = (\partial\sigma/\partial T) \cdot \Delta T \cdot L / \alpha \mu \quad \dots\dots (2)$$

によつて特徴づけられる。 ΔT は温度差、 L は代表長さ、 α は温度拡散率 (thermal diffusivity)、 μ は粘性係数である。 Ma はまた系が自発的に表面对流を生じる傾向を示す値でもある。濃度差に起因する表面張力差によ

¹²⁾ THOMSON の説明は基本的には正しかつたのであるが、なぜか忘れられ、今では 16 年後の 1871 年⁵⁾ の論文で優先権を主張したイタリアの物理学者 MARANGONI の名が冠せられている。

昭和 60 年 1 月 31 日受付 (Received Jan. 31, 1985) (依頼解説)

* 九州工業大学 工博 (Department of Metal Processing Engineering, The Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho Tobata-ku Kitakyushu 804)

つて生じるマランゴニ流についても同様に次式(3)によって Ma が表される。

$$Ma = (\partial\sigma/\partial c) \cdot \Delta c \cdot L / D\mu \dots\dots\dots (3)$$

Δc は濃度差, D は拡散係数である。

3. 工学上のさまざまな研究

3.1 宇宙での材料製造

人工衛星が出現し、無重力下での材料製造の夢が現実のものとなつた。地上では、重力の作用によつて生じる対流が結晶成長におけるストリエーション (striation) 生成の原因になる。無重力下では重力に基づくこのやつかい対流は消滅するが、熔融状態から結晶を製造する場合に生じる温度勾配はさけられないので、それに基づくマランゴニ対流の可能性が依然として存在する。そのため無重力下での材料製造過程におけるマランゴニ対流の研究が、地上での研究と並行して精力的に行われている。無重力下の研究では、例えばドイツが観測ロケット ($10^{-4}g$ 以下) を用いて行つた Texus 計画 (Technologische Experimente unter Schwerklosigkeit) の結果⁶⁾によれば、黒鉛棒で支持された NaNO_3 の浮融帯の両端に温度差を与えると浮融帯の中心部にはつきりとした温度振動 (temperature oscillation) が記録され、銅棒で支持されたシリコンオイルの浮融帯の両端に温度差を与えても明瞭な流れが発生し、マランゴニ対流の存在が確認された。地上においても、 NaNO_3 、シリコンオイル等を液体に用いたモデル実験をもとに、浮融帯法^{7)~10)}、チョクラルスキー法¹¹⁾、オープンボートゾーニング (open boat zoning) 法¹¹⁾による結晶作製時のマランゴニ対流の研究が進められ、一方では浮融帯¹²⁾、自由浮上球¹³⁾¹⁴⁾およびチョクラルスキー結晶成長¹⁵⁾時における融液の運動についての詳細な計算も行われている。地上および無重力下におけるこれらの研究により、マランゴニ対流は無重力下だけでなく地上においても重要な作用力を持つことが明らかになり、さらに一步進めてマランゴニ対流を積極的に利用することにより温度振動をコントロールし、無ドープ結晶の結晶完全度 (crystal perfection) を改善しようとする考え⁸⁾も提出されている。

3.2 潤滑

機械要素の作用面に供給される鉱油系潤滑油にも、潤滑面外においては自由表面上にマランゴニ効果の作用が考えられる。作用面で摩擦熱が発生するとマランゴニ効果により作用面外の低い温度側へ油が逃げる。実験結果によれば潤滑性の優れた分子量の高い成分ほど逃げやすいので、潤滑条件が酷化しますます温度勾配を加速するという循環過程に陥り、熱的不安定が生じると考えられる⁹⁾。前述の宇宙工学に関係する宇宙飛行においても、宇宙飛行機用含油軸受からの油の逸散に関連してマランゴニ効果が注目されている¹⁶⁾。

3.3 溶接

溶接中のメタルプールの温度勾配は大きいので、メタルプールの流動に対するマランゴニ流の寄与は無視できないと考えられている^{17)~22)}。しかしプール中の不純物の寄与を考慮すればマランゴニ流は生じそうもないとする反対の見解^{23)~25)}もあり、最近になつて数値解析によりマランゴニ流の程度を定量的に評価しようとする試み²⁶⁾がはじめられている。

3.4 その他

界面活性剤を含む水溶液の溢流ぜき手前における異常加速現象²⁷⁾は、注湯などにおける溢流時の溶鋼の流れに対しても考慮されるべきものかもしれない。

トビックスとして、赤外-可視光イメージコンバーター (infrared-visible image converter) のアイデア²⁸⁾を紹介しよう。赤外線照射部分の液面は温度差にともなうマランゴニ対流により歪み、その部分にあてられた可視光線の反射光は赤外線照射部分の歪みを忠実にスクリーンに描出する。すなわち、赤外線像から可視光線像への変換である。液晶ではこの歪みがもつと顕著になるといわれている。

このほかにもマランゴニ効果は、液晶の挙動²⁹⁾、液体薄膜の対流現象^{30)†3)}、目の中の涙の挙動³¹⁾などとの関連において広く研究されている。

4. 製錬過程における反応速度

反応表面に表面張力差が自発的に生じるような系ではマランゴニ効果による表面攪乱が生じうる。よく知られた例は水溶液表面から表面活性成分のエーテルが蒸発する場合である。Fig. 1 に示すように、表面近くの気流にうずなどの乱れ(B)が生じると、水溶液表面にエーテルの濃度差が生じ、濃度の低くなつた部分(B')が濃度の高い部分(A')を引っぱり、A'の部分の広がりはじめる。その結果、A'表面にはバルク中のエーテル濃度の高い溶液が補給されてさらに表面張力が低くなり、広がりの運動が促進されてうず(A)が発生するようになる。すなわち表面攪乱の発生である。メタル、スラグの表面張力、スラグ-メタル間の界面張力は大きいので、密度、

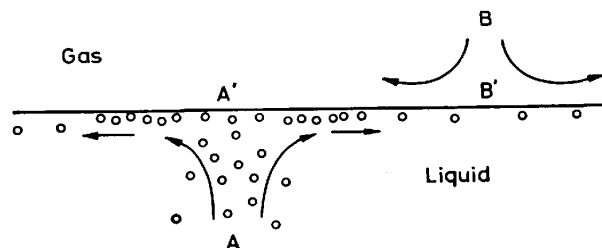


Fig. 1. Schematic diagram illustrating the mechanism of the eddy flow formation of liquid by the MARANGONI effect. See Ref. 32).

†3 BENARD-MARANGONI convection という。

粘性が少々大きくても界面をとおしての反応がある場合、メタル表面、あるいはスラグ-メタル界面でマランゴニ効果による界面攪乱の生じる可能性は高い。ガス-メタル、スラグ-メタル間の反応速度に対しても、近年マランゴニ効果を考慮に入れた研究が見受けられるようになり、いくつかの系では実験、解析の両面からのかなり詳しい報告がなされている。

4.1 ガス-メタル間反応

BRIMACOMBE ら³³⁾はるつぽ内で溶融したすず、銅、鉄表面に酸素ガスを吹きつけると、その直下の表面には点状の酸化物が生成し、半径方向に活発な流れが生じることを見出した。同様な条件下で Ar ガスを吹きつけても表面の流れはほとんど生じない。はん点のへりからるつぽ内壁までは酸化物が存在せず、気相からの酸素の供給が十分でないことを示している。メタル表面での表(界)面張力の関係は、酸化物、メタルの表面張力をそれぞれ σ_O , σ_M , 酸化物-メタル間の界面張力を $\sigma_{O/M}$ とすれば、 $\sigma_O + \sigma_{O/M} < \sigma_M$ であるので、表面がるつぽ周辺方向に引っぱられてマランゴニ流が生じ、酸素の吸収速度が上昇すると考えられる³⁴⁾。たとえば溶銅中の酸素の物質移動係数は、マランゴニ流が観察されない銀の場合に比べると 40 倍以上になると見積もられる³⁴⁾。

LANGE と WILKEN³⁵⁾は溶融純鉄表面で BRIMACOMBE ら³³⁾と同様のマランゴニ流を確認したあと空气中で溶融した 3.5% C の鉄合金表面を観察したが、酸素ガスの吹き付けによるマランゴニ流は見出せなかつた。この場合には表面が酸素で飽和しているため、十分な表面張力勾配が生じなかつたものと推察している。

溶融銀は常圧付近の酸素分圧では酸化物を生成しない。この系の酸素の吸収速度については、まず佐野と森³⁶⁾が高周波誘導加熱した場合について、ある条件のもとでは、誘導攪拌によるメタル表面の運動が停止し吸収速度が低下することを見出し、この吸収速度の低下はマランゴニ効果¹⁴⁾に基づくものであると推定した。HERBERTSON ら³⁷⁾は、窒素-酸素混合ガスの吹き付けによる脱酸速度は、吸収速度に比べて 1.5~3 倍大きくなること、しかし反応容器内を満たした純酸素圧全体を下げることに伴う脱酸では、脱酸速度が吸収速度に等しくなることを見出した。気相のみの条件の変化によつて脱酸速度が変化することから、脱酸速度の増加はマランゴニ流に基づくものであり、MASSON と WHITEWAY³⁸⁾のいう銀中酸素の濃度勾配に伴う密度勾配などによつて生じた自然対流によるとは考えられないと述べている。

山本と加藤³⁹⁾は、溶融 Fe-Sn 合金からのすずの真空蒸発速度を測定し、同時に合金表面を直接目視観察することにより表面流動の存在を見出し、表面活性なすずの蒸発に伴うマランゴニ流によつて物質移動速度が増加すると報告した。

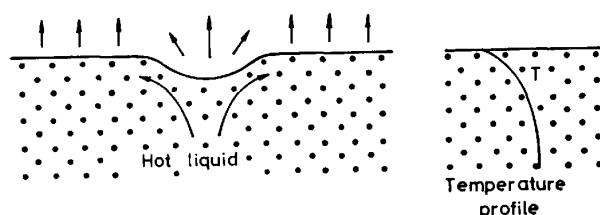


Fig. 2. Schematic diagram illustrating the mechanism of differential vapor recoil. See Ref. 41).

真空下の液体の蒸発に対しては、最近蒸発反動差(differential vapor recoil)過程の効果が注目され、研究が進められている⁴⁰⁾。何らかの原因で生じた乱れにより表面温度が局所的に増大するとその蒸発速度が増加し、表面に対する垂直方向の力が増大する。その結果 Fig. 2 に示すように、表面がへこみそこから放出される蒸気の流れがせん断力となつて液面を引っぱり、その流れにより内部の熱い液体が表面に運ばれる。この液体の温度は高いので蒸発速度は大きく、結局これら一連の過程ははじめの乱れを増幅することになる。この過程にも温度差に伴うマランゴニ効果が関係する。蒸発反動差効果は蒸気相の圧力が低下するほど増大するので、真空下のスプレー製鋼、スプレー脱ガスなどで果たす役割に興味を持たれる。

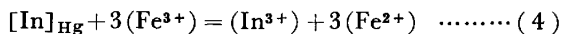
メタルのスプレーにおいては、細孔栓から噴出するメタルジェット長さ(連続してつながっている部分の長さ)がマランゴニ効果によつて影響される可能性がある。空气中への水溶液ジェット⁴²⁾、あるいは液体中への他の液体ジェット⁴³⁾の噴出時に界面をとおしての物質移行がある場合、ジェットの長さが著しく変化することが明らかにされている。液体ジェットがちぎれる先端付近では液体ジェットにくびれが現れ、このくびれが成長していつて液体ジェットはちぎれる。くびれとくびれの間の部分では新しい界面が生成される。それゆえジェットの界面をとおして熱、物質の移行があればジェットの軸方向に温度、組成の変化が生まれてマランゴニ効果が誘起され、くびれの成長速度の増減に大きな影響を与えると考えられるからである。

溶鉄の窒素吸収速度は、表面活性元素である硫黄、酸素の微量の存在によつて著しく低下することが知られており、これは表面に吸着した表面活性元素の表面ブロッキング(surface blocking)⁴⁴⁾等の作用によるものと考えられている。しかし測定条件によつては、たとえば誘導攪拌炉で加熱された小さなるつぽ中の溶鉄への吸収⁴⁵⁾、上昇気泡からの吸収⁴⁶⁾、自由落下滴を用いた場合の吸収⁴⁷⁾では、吸収速度への硫黄の影響の程度が著しく異なる。RICHARDSON³²⁾はこの結果より、上記三つの測定においては流れの条件の相違が吸収速度への硫黄の影響を変化させている可能性が十分に考えられると述べている。

¹⁴⁾ マランゴニ効果はこのように液体の流れを抑制する場合もある。

4.2 スラグ-メタル間反応

冶金系に近いものとしては、まず BRIMACOMBE と RICHARDSON⁴⁸⁾ のインジウム・アマルガム-水溶液系等での研究がある。たとえば希硝酸第二鉄水溶液の界面に注射針で硝酸第二鉄の濃い溶液を注入すると、反応



に伴って界面攪乱が生じ、界面攪乱が観察される条件下では物質移動係数も増大する。LANGE と WILKEN³⁵⁾ はその後実験装置に工夫を加え、注射針による外乱のない状態でも同様の現象が生じうることを確かめた。反応(4)では界面をとおしての電荷の移動が強力に行われるのでこの界面攪乱は界面の局所的電位差に伴うマランゴニ効果によるものである可能性が強いが、強い発熱を伴う反応でもあるので温度差による界面張力差の寄与も考えられると述べている。

LANGE と WILKEN³⁵⁾ はインジウム・アマルガム-水溶液系と同様の装置を用い、すず・インジウム合金-NaCl 系においても両液相界面に活発な運動の生じることを透明 NaCl 相をとおして直接観察した。しかしすず・テルル合金-NaCl 系では界面攪乱は観察されず、両相間の電位差のゆれの幅もすず・インジウム合金の場合より小さかった。この結果よりすず・インジウム合金の場合の界面攪乱は局所的電位差により誘起されたマランゴニ流であろうと述べている。

SAELIM と GASKELL⁴⁹⁾ は、CaO 飽和溶融酸化鉄による溶鉄の脱硫を調べ、脱硫初期の速度が、静止浴での硫黄の拡散律速によるとした計算値よりも著しく大きくなることを見出した。メタルからの硫黄の移行により界面張力は低下するので、Fig. 1 と同様のメカニズムによつて生じるマランゴニ流と、るつぼ近辺ではさらに、系の幾可学的非対称の効果に加わつて生じるマランゴニ流が脱流速度を増大させるものと推察している。

5. 耐火物の局部溶損

近年、鉄鋼製錬で使用される耐火物の品質の向上と使用形態の多様化に伴い、スラグ表面、スラグ-メタル界面、目地付近などにおける耐火物の局所的な溶損が顕著になり、重要な問題になつている。酸化物の局部溶損機構については、これまでに、マランゴニ効果により誘起された界面攪乱によるとする説^{50)~52)}、電気化学的な機構によるとする説⁵³⁾、その他⁵⁴⁾⁵⁵⁾が報告されているが、実証的研究に基づいた具体的な機構の解明という点で十分とはいいがたく、いずれが主因なのか、あるいはそれらの組み合わせによるものなのか、あるいは全く別の機構によるものなのかの間に説得力のある答えは得られていない。最近になつて、この種の系の局部溶損が主としてマランゴニ流に基づく物質移動の促進により生じるものであることが、実験室的研究により実証的に明らかにされつつある。

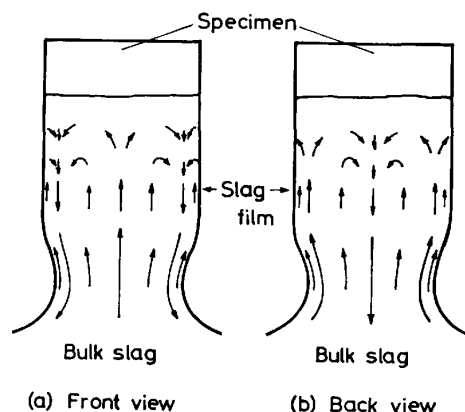


Fig. 3. Typical flow pattern of the slag film on a 6 mm O. D. quartz glass specimen. See Ref. 59).

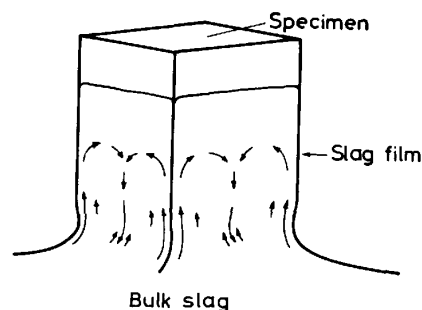


Fig. 4. Typical flow pattern of the slag film on a prism quartz glass specimen with 6 mm square. See Ref. 59).

5.1 スラグ表面における局部溶損

向井ら^{56)~59)} は、PbO-SiO₂ スラグ表面における固体 SiO₂ の局部溶損を直接観察することによつて、マランゴニ流に基づく局部溶損のメカニズムを具体的に明らかにした。スラグ中に固体 SiO₂ を浸漬すると試料表面にスラグがはい上がり、試料表面に形成されたスラグフィルムが活発に動く。局部溶損はおもにフィルムが活発に動く部分で生じ、局部溶損部の大部分がスラグ液面より上方に位置する。フィルム表面の上下方向には SiO₂ の濃度勾配が認められ、表面張力勾配が生じている。フィルムの運動は、フィルム表面の微小気泡の動きを追跡することにより観察でき、Fig. 3, 4 に示すように、基本的には幅の広い上昇流帯と幅の狭い下降流帯よりなるフローパターンを描き、円柱試料では両者の位置が時とともに移動するが、角柱試料では常に稜部が上昇流帯、平面部が下降流帯である。フィルムの運動は前述の“ワインの涙”と同様の機構に基づくものであり、この場合には、試料からの SiO₂ の溶解がアルコールの蒸発にとつてかわる。上昇流帯の局部溶損速度は下降流帯に比べて著しく大きく、局部溶損はおもに上昇流帯で進行する。上昇流帯のフィルムの運動速度および溶損速度の実測値は、流体力学および反応速度論を用いた解析結果とよく一致する。このようにマランゴニ効果は、厚さ数十 μm

の薄いスラグフィルムに活発な上昇流をひきおこし、バルクスラグからの SiO_2 濃度の低い新鮮なしかもフィルム全体が拡散層をなすスラグフィルムで試料表面を洗うことによつて、“拡散層を破る”ともいえる効果的な形で物質移動を促進し、局部溶損をひきおこす。

原田ら⁶⁰⁾は、耐火物の主成分である MgO , Al_2O_3 , SiO_2 と鉄鋼製錬スラグの基本系である $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ スラグ, FeO-CaO-SiO_2 スラグとを組み合わせた系の局部溶損を調べたが、局部溶損が生じる系のメカニズムは、 $\text{SiO}_2(\text{s})\text{-(PbO-SiO}_2)$ スラグ系で明らかにされたのと同様のマランゴニ効果に基づく機構で具体的に説明できた。

向井ら⁶¹⁾は、高炉出銑樋材のスラグ表面における局部溶損も同様のマランゴニ効果に基づくメカニズムで説明できることを実証的に明らかにした。樋材中の SiC が、気相からスラグフィルムをとおして供給される酸素により酸化されて SiO_2 となり、スラグフィルムに溶解することによりフィルムの上下方向に濃度勾配が生まれ、マランゴニ流が誘起される。このマランゴニ流は樋材を洗い流し、局部溶損を生じさせる。それゆえ、気相からの酸素の供給が十分でないとこの系の局部溶損は生じない。

5.2 スラグ-メタル界面における局部溶損

HAUCK と PÖTSCHKE⁶²⁾ は、 Al_2O_3 と黒鉛を主成分とする連铸用浸漬ノズル材のパウダー溶鉄界面における局部溶損を $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ スラグおよび $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ スラグを用いて調べ、凝固後の局部溶損部にはメタル-ノズル材間にスラグが存在し、その局部溶損の形はメタルのメニスカスに類似し、メタルが炭素で飽和するとメタル-ノズル材間のスラグが消滅し局部溶損も生じないことを見出した。そして、浸漬ノズル材-スラグ-メタル3相境界において、スラグに溶解したノズル材の炭素がカーバイトを生成し、また (FeO) と反応して CO ガスを発生し、これらの化学反応がメタル-スラグ-ノズル材間の界面張力勾配を誘起し、そのために界面攪乱が発生して物質移動を増大させ、この部分で局部溶損が生じると推定した。

向井ら^{63)~65)}は、高炉出銑樋材のスラグ-メタル界面における局部溶損を調べ、局部溶損部の樋材-メタル間には局部溶損の進行中常にうすい液体状態のスラグフィルムが存在し、フィルムの組成は上下方向に変化しており、界面張力勾配の存在することを明らかにした。局部溶損はこの界面張力勾配により誘起されるマランゴニ流によりフィルムが活発に動き、物質移動が促進されることによつて進行すると推定した。この系では、メタルへの Si 添加により CO ガスの発生が抑制される条件のもとでは局部溶損が減少することから、フィルムの運動には (SiO_2) と C との反応で発生する CO 気泡による攪乱の効果も部分的に寄与している可能性がある。樋材中

の SiC は (FeO) で酸化されて炭素粒になりフィルム中に懸濁するが、 C 濃度が低い場合は速やかにメタルに溶解する。このような SiC の酸化はフィルムの運動による樋材試料の摩耗損耗を容易にするが、 C 濃度が高くなると炭素粒はフィルム中に残留しフィルムの運動を妨げ、局部溶損速度を著しく減少させる。

向井ら^{66)~67)}はその後、熔融 $\text{Pb-(PbO-SiO}_2)$ スラグ界面での固体 SiO_2 の局部溶損を透明石英ガラス製するつぼを用いて直接観察し、局部溶損部でのスラグフィルムの運動の存在を明らかにし、フィルムの運動がマランゴニ流であることを示した。この系では、局部溶損が最も進行する部分のフィルム厚さは数十 μm で、フィルム-Pb 界面のフィルムの SiO_2 濃度は下方ほど高い。 $\text{Pb-(PbO-SiO}_2)$ スラグ間の界面張力は SiO_2 濃度の増加とともに増大する⁶⁸⁾ので、界面張力勾配によつてフィルムは下方にひっぱられ、“ワインの涙”と同様の機構で下降流と上昇流が発生し、このマランゴニ流によつて溶解成分 SiO_2 の物質移動が効果的に促進され、局部溶損が進行する。

6. おわりに

このようにみえてくると、マランゴニ効果が関係するあるいは関係すると考えられる現象が意外に多いことに気がつく。そのうえ宇宙工学など今日の先端技術にも深くかかわっていることがわかる。各種現象の解明にマランゴニ効果の視点を加えることは、これまで不可解と考えられていた現象の解明への手がかりを与える可能性を多分にもっている。そのためには、マランゴニ効果の生起の事実を説得力のある形で示すとともに、関連する現象の実態を正確にふまえた解析をとおして、各種現象への寄与を評価する姿勢が大切のように思われる。

著者の管見と未熟さから、断片的、断片的な記述が多くなつてしまつたが、これを機会に一人でも多くの技術者、研究者がこの分野に興味をもつようになっていただければ幸いである。

文 献

- 1) J. THOMSON: Phil. Mag., Ser. 4, 10 (1855), p. 330
- 2) Dynamics and Instability of Fluid Interfaces, Proc., ed. by T. S. SØRENSEN (1979) [Springer-Verlag]
- 3) 平野富士夫, 境 忠男: 潤滑, 22(1977), p. 490
- 4) R. BRÜCKNER: Glastechn. Ber., 53 (1980), p. 77
- 5) C. G. M. MARANGONI: Ann. Phys., 143 (1871), p. 337
- 6) H. U. WALTER: ESA J (Eur Space Agency), 7 (1983), p. 235
- 7) D. SCHWABE, A. SCHARMANN, F. PREISSER and R. OEDER: J. Cryst. Growth, 43 (1978), p. 305
- 8) D. SCHWABE and A. SCHARMANN: J. Cryst. Growth, 46 (1979), p. 125
- 9) C.-H. CHUN and W. WUST: Acta Astronautica, 6 (1979), p. 1073
- 10) Ch.-H. CHUN and W. WUST: ESA SP (Eur

- Space Agency) (1979) 142, p. 283
- 11) D. SCHWABE and A. SCHARMANN: *J. Cryst. Growth*, 52 (1981), p. 435
 - 12) C. E. CHANG and W. R. WILCOX: *J. Cryst. Growth*, 28 (1975), p. 8
 - 13) H. F. BAUER: *Ing. Arch.*, 53 (1983), p. 275
 - 14) H. F. BAUER: *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, 7 (1983), p. 274
 - 15) W. E. LANGLOIS: *J. Cryst. Growth*, 56 (1982), p. 15
 - 16) A. A. FOTE, L. M. DORMANT and S. FUERSTEIN: *Lub. Eng.*, 32 (1976), p. 542
 - 17) 石崎敬三, 荒木信男, 村井英夫: 溶接学会誌, 34 (1965), p. 146
 - 18) K. ISHIZAKI, N. ARAKI and H. MURAI: *IIW SG 212, Doc. 212-65* (1965)
 - 19) 石崎敬三, 村井一夫, 神戸良雄: 溶接学会誌, 36 (1967), p. 416
 - 20) K. ISHIZAKI, N. ARAKI and H. MURAI: *IIW SG 212, Doc. 212-77-66* (1966)
 - 21) C. R. HEIPLE and J. R. ROPER: *W. J.* (1981) August, p. 143
 - 22) C. R. HEIPLE and J. R. ROPER: *W. J.* (1982) April, p. 97
 - 23) D. ANDERSON: *IIW SG 212, Doc. 212-217-71* (1971)
 - 24) D. ANDERSON: *IIW SG 212, Doc. 212-277-73* (1973)
 - 25) S. J. BLESS: *IIW SG 212, Doc. 212-235-72* (1972)
 - 26) S. YOKOYA, Y. ASAKO and A. MATSUNAWA: *Trans. Japan Welding Society*, 14 (1983), p. 135
 - 27) 今石宣之, 中村 仁, 庄野 寿, 井野 一, 宝沢光紀, 藤縄勝彦: 化学工学論文集, 8 (1982), p. 136
 - 28) J. C. LOULERGUE, P. MANNEVILLE and Y. POMEAU: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 14 (1981), p. 1967
 - 29) たとえば F. M. LESLIE: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 9 (1976), p. 925
 - 30) たとえば P. CERISIER, J. PANTALONI, G. FINIELS and R. AMARLIC: *Applied Optics*, 21 (1982), p. 2153
 - 31) S. P. LIN and H. BRENNER: *J. Colloid Interface Sci.*, 85 (1982), p. 59
 - 32) F. D. RICHARDSON: *Can. Metall. Q.*, 21 (1982), p. 111
 - 33) J. K. BRIMACOMBE and F. WEINBERG: *Metall. Trans.*, 3 (1972), p. 2298
 - 34) R. G. BARTON and J. K. BRIMACOMBE: *Metall. Trans.*, 8B (1977), p. 417
 - 35) K. W. LANGE and M. WILKEN: *Can. Metall. Q.*, 22 (1983), p. 321
 - 36) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 1432
 - 37) J. G. HERBERTSON, D. G. C. ROBERTSON and A. V. BRADSHAW: *Can. Metall. Q.*, 22 (1983), p. 1
 - 38) C. R. MASSON and S. G. WHITEWAY: *Can. Metall. Q.*, 6 (1967), p. 199
 - 39) 山本正道, 加藤栄一: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 608
 - 40) たとえば H. J. PALMEN: *J. Fluid Mech.*, 75 (1976), p. 487
 - 41) J. BERG: *Can. Metall. Q.*, 21 (1982), p. 121
 - 42) H. C. BURKHOLDER and J. C. BERG: *A. I. Ch. E. J.*, 20 (1974), p. 863
 - 43) R. W. COYLE, J. C. BERG and J. C. NIWA: *Chem. Eng. Sci.*, 36 (1981), p. 19
 - 44) M. BYRNE and G. R. BELTON: *Metall. Trans.*, 14B (1983), p. 441
 - 45) R. D. PEHLKE and J. F. ELLIOTT: *Trans. Metall. Soc. AIME*, 227 (1963), p. 844
 - 46) P. KOZAKEVITCH and G. URBAIN: *Rev. Metall.*, 60 (1963), p. 143
 - 47) L. A. GREENBERG: Ph. D. Thesis, University of Tronto (1973)
 - 48) J. K. BRIMACOMBE and F. D. RICHARDSON: *Trans. Inst. Min. Metall.*, 80 (1971), p. C140
 - 49) A. SAELIM and D. R. GASKELL: *Metall. Trans.*, 14B (1983), p. 259
 - 50) A. SENDT: VII^e Congrès Internationale du Verre, Brüssel (1965), p. 352.1
 - 51) R. BRÜCKNER: *Glastechn. Ber.*, 40 (1967), p. 451
 - 52) T. S. BUSBY: *Glass Technol.*, 20 (1979), p. 77
 - 53) Y. IGUCHI, G. J. YUREK and J. F. ELLIOTT: *Proc. the Third International Iron and Steel Congress, Ohio* (1979), p. 346 [ASM]
 - 54) E. VAGO and C. E. SMITH: VIII^e Congrès Internationale du Verre, Brüssel, Nr. II. 1. 2 (1965), p. 62.1
 - 55) W. F. CALEY, B. R. MARPLE and C. R. MASSON: *Can. Metall. Q.*, 20 (1981), p. 215
 - 56) 向井楠宏, 岩田 章, 原田 力, 吉富丈記, 藤本章一郎: 日本金属学会誌, 47 (1983), p. 397
 - 57) 向井楠宏, 中野哲生, 岩田 章, 原田 力, 吉富丈記, 藤本章一郎: 日本金属学会講演概要(1983.10月), p. 478
 - 58) 向井楠宏, 中野哲生, 岩田 章, 大山秀樹, 原田力, 吉富丈記, 藤本章一郎: 日本金属学会講演概要(1983.10月), p. 479
 - 59) K. MUKAI, T. NAKANO, T. HARADA, J. YOSHITOMI and S. FUJIMOTO: *Proc. 2nd Int. Sympo. Metall. Slags and Fluxes, TMS-AIME* (1984), p. 207
 - 60) 原田 力, 藤本章一郎, 岩田 章, 向井楠宏: 日本金属学会誌, 48 (1984), p. 181
 - 61) 向井楠宏, 増田竜彦, 吉富丈記, 原田 力, 藤本章一郎: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 823
 - 62) M. HAUCK and J. PÖTSCHKE: *Arch. Eisenhüttenwes.*, 53 (1982), p. 133
 - 63) 向井楠宏, 吉富丈記, 原田 力, 古海宏一, 藤本章一郎: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 541
 - 64) 向井楠宏, 古海宏一, 原田 力, 吉富丈記: 鉄と鋼, 65 (1979), S 543
 - 65) 向井楠宏, 古海宏一, 原田 力, 吉富丈記: 鉄と鋼, 66 (1980), S 121
 - 66) 向井楠宏, 増田竜彦, 合田広治, 原田 力, 吉富丈記, 藤本章一郎: 日本金属学会誌, 48 (1984), p. 726
 - 67) 向井楠宏, 合田広治, 藤本章一郎, 吉富丈記, 原田 力: 日本金属学会講演概要(1984.4月), p. 133
 - 68) 向井楠宏, 合田広治, 酒井久敏, 原田 力, 吉富丈記, 藤本章一郎: 日本金属学会講演概要(1983.4月), p. 208