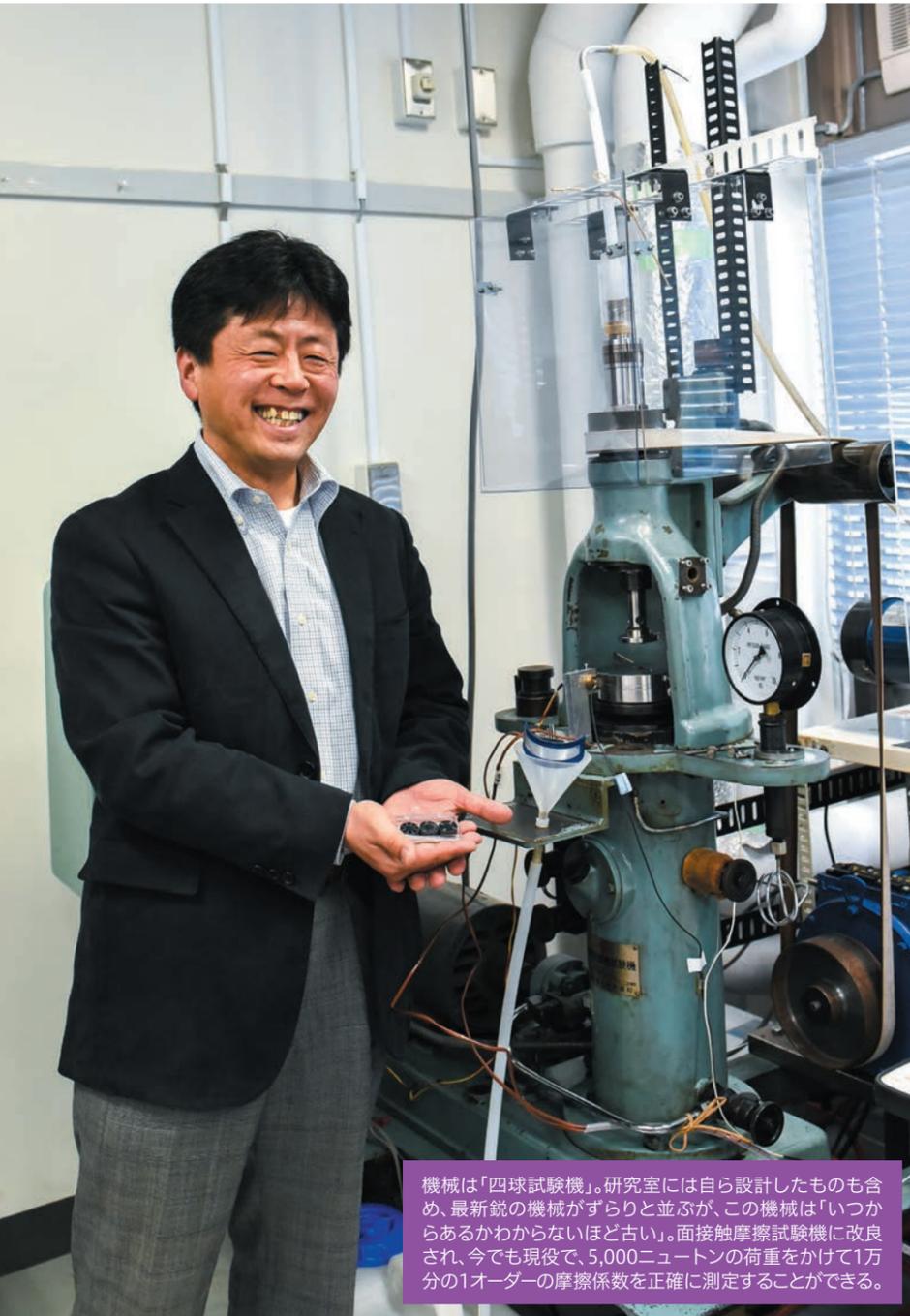


摩擦の科学で支える 日本のものづくり

摩擦を制御する技術は省エネルギーや機械の長寿命化をめざすうえで重要だ。しかし、摩擦や摩耗の詳細なメカニズムには不明な部分も多く、これらを科学的に解明することで、効率的な摩擦制御技術や超低摩擦技術の開発が飛躍的に進むと期待される。摩擦面で起きている現象をナノレベルで解明しようとする、東北大学大学院工学研究科の足立幸志教授の研究を紹介する。



機械は「四球試験機」。研究室には自ら設計したものも含め、最新鋭の機械がずらりと並ぶが、この機械は「いつからあるかわからないほど古い」。面接触摩擦試験機に改良され、今でも現役で、5,000ニュートンの荷重をかけて1万分の1オーダーの摩擦係数を正確に測定することができる。

物と物の接触面で生じる摩擦や摩耗、それらの制御を表す潤滑を扱う学術・技術領域を「トライボロジー」という。東北大学大学院工学研究科の足立幸志教授はトライボロジー研究の重要性をこう話す。「摩擦は快適で安全な生活に必要な不可欠のもので、必ずしも小さければ良いというわけではありません。しかし、摩擦によるエネルギーの損失は大きいので、機械産業分野において摩擦の低減が実現できれば、エネルギー利用の飛躍的な高効率化が期待できます。また、機械機器の故障や寿命の75パーセントは摩擦に伴う摩耗が原因だと考えられます。低摩擦の実現は機械の信頼性を保証し、能力を性能通り発揮させることにもつながるのです」。

ものづくりの現場では、これまでも摩擦を制御する技術の開発が進められ、品質の高い製品がつくられてきた。これらの技術には、技術者の試行錯誤の積み重ねによる経験則に基づいた「詳細な原理は不明だが低摩擦状態が実現できている」という技術も多い。足立さんはその背

あだち こうし 足立 幸志

東北大学大学院工学研究科教授
東北大学機械系トライボベースト
デザイン研究センター長

1990年 東北大学大学院工学研究科修士課程修了、同年 東北大学工学部助手。98年 工学博士。2001年 東北大学大学院工学研究科助教授。准教授を経て11年より現職。02～03年 イギリス・ケンブリッジ大学客員研究員。10年 フランス国立中央理工科大学院リヨン校客員教授。04年 東北大学機械系トライボベーストデザイン研究センター長。13年よりCREST「エネルギー高効率利用のための相界面科学」研究代表者。

景を次のように説明する。「摩擦は材料の特性や形だけでなく、環境や潤滑剤、機械や部品にかかる荷重などさまざまな因子が複雑に絡み合って起こる現象で、ほんの少しの条件の変化で結果は大きく変わります。エンジンの中の摩擦は実際のエンジンの中でしか起きません。エンジンに似せた装置では再現できないので、原理・原則を見いだして理論的に設計することが難しいと考えられてきたのです」。

トライボロジーは、なぜその現象が起きるのかを解明する科学と、問題を解決する手法としての技術が結び付きにくい分野だったのだ。

この状況を打破しようと、足立さんは低摩擦状態の界面のナノスケールでの構造や、摩擦による化学反応(トライボ化学反応)、摩擦により自己形成される界面の発現機構などを解明しようとしている。それにより界面を制御する技術を開発し、超低摩擦を実現するナノ界面層を創成することが目標だ。

「なじみ」を解明し 科学と技術をつなぐ

「経験則で語ることの多かったトライボロ

ジーの技術に、科学の光を当てたいと考えています」。そう話す足立さんが鍵になると考えているのは、「なじみ」と呼ばれる現象だ。身の回りの多くの機械では、はじめのうちは摩擦が大きいですが、接触する面がこすり合わされていくと次第に摩擦が小さくなっていく。このような現象が「なじみ」で、表面が一度なじむと、摩擦が小さい状態が長く続くことが多い。しかし、詳しいメカニズムは謎のままだ。

「従来、『なじみ』は摩擦の初期に、こすることにより表面を滑らかにし、油膜がうまく機能するようにする過程だと説明されていました。表面の形状がつるつるになっていく過程というわけです。しかし、さまざまな実験結果から、単に形状が変化するだけではなく、自ら摩擦の小さい面を形成するような化学変化も起きていると考え、この現象の解明と新しい低摩擦の機械システムの設計をめざすことにしました。トライボロジーの科学と技術とを橋渡しするのが『なじみ』だと考えています」。

共同研究のメンバーである東北大学金属材料研究所の久保百司教授は計算化学シミュレーションを駆使し、摩擦やなじみが起こる際に物質の表面でどのような反

応が起きているのかを理論的に解明していく。九州大学工学研究院の杉村丈一教授は高純度の水素や酸素などの気体が摩擦に及ぼす効果について研究し、物質の周りの環境によるナノ界面の制御を行う。岐阜大学工学部の上坂裕之教授はプラズマ加工技術によって、特殊な機能を持った高精度の薄膜で低摩擦をめざす。それぞれの研究者が得意分野を生かしてチームとして連携することで、摩擦によって物質の表面でどのようなことが起こるのかをナノ(10億分の1)メートル単位で明らかにし、技術開発に生かしていくのだ。「実験や計算の結果をもとにして活発に意見交換し、お互いの研究のヒントを与え合い、摩擦の本質に迫るための刺激し合える関係をつくり上げています」。

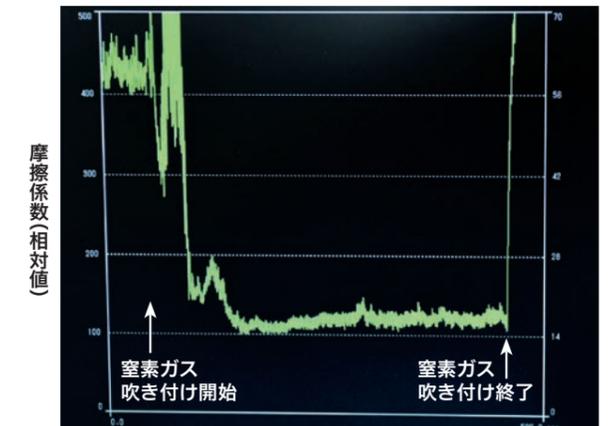
窒素ガス吹き付けで 低摩擦を実現

経験的に、摩擦は物質の表面の形状や接触する物質の流動性などによって小さくなることが知られている。そのため、工業



| 図 1 | 条件 | 摩擦係数(μ) (2,000~10,000回の平均) |
|-----|---|-------------------------------|
| ① | <p>Si₃N₄ 大気 ← Si₃N₄</p> | 0.83 |
| ② | <p>Si₃N₄ 大気 CNx ← Si₃N₄</p> | 0.18 |
| ③ | <p>Si₃N₄ 窒素ガス CNx ← Si₃N₄</p> | 0.02 |

潤滑剤のない状態での摩擦特性を調べた実験結果。摩擦係数の値が低いほど摩擦が小さい。①は窒化ケイ素(Si₃N₄)のボールを固定し、窒化ケイ素のディスクを回転させて摩擦特性を調べたもの。②は回転させるディスクの表面を窒化炭素膜(CNx)で覆ったもので、摩擦係数は大幅に小さくなっている。③は②にさらに窒素ガスを吹き付けたもので、摩擦係数は1桁小さくなっている。



窒素ガスを吹き付ける実験の様子(上)とその時の摩擦係数を映し出したモニター(下)。縦軸は摩擦係数、横軸は秒単位での時間の経過を表す。窒素ガスを吹き付け始めると摩擦係数はすぐに下がり、窒素ガスの吹き付けを停止すると一気に上がる。

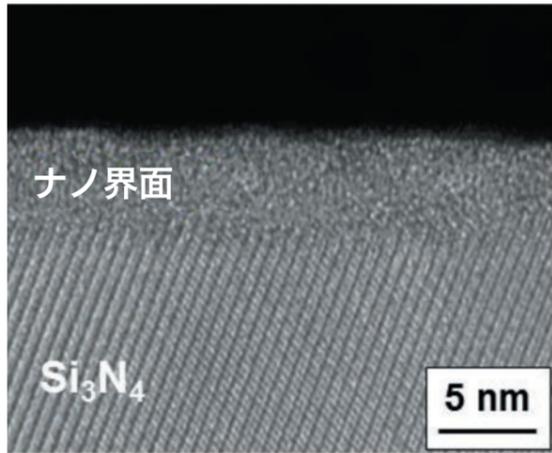


図2 窒化ケイ素(Si₃N₄)のボールを固定し、水素含有窒化炭素膜で覆ったディスクを回転させて摩擦した結果、潤滑剤のない状態で大気中でこすり続けても超低摩擦状態が保たれていた。このときの窒化ケイ素のボールの表面構造を透過型電子顕微鏡で観察したところ、表面に厚さ5ナノメートルの炭素成分を有するナノ界面が自己形成されていた。

的には機械などの摩擦を下げるために、物質と物質の接する境界面に潤滑油を差す方法が主流となっている。潤滑油の原料は原油だ。現在、産出されている原油の約2パーセントが潤滑油として使われる。

足立さんらは潤滑油を使わず、ガスや水を利用した新しい低摩擦の潤滑システムを開発するため、摩擦面の特性に注目した研究に力を注いでいる。潤滑油を使わずに摩擦が低減できれば、地球環境にかかる負荷が大きく減り、省エネルギー、省資源につながる。また、従来にない新しい概念の低摩擦システムが実現できる。

摩擦の特性、および摩擦面で何が起きているのかを調べるため、さまざまな基礎実験と理論シミュレーションを行ってきた。

摩擦や摩耗の実験法の中に、セラミックスや金属などのボールやリングとディスクをこすり合わせて摩擦の大きさを調べたり、摩擦表面を観察したりするものがある。足立さんらは、窒化ケイ素や炭素系硬質薄膜(窒化炭素膜)を用いて摩擦の特性を調べた。窒化ケイ素は高温下でも衝撃に強く、絶縁性が高いなどの優れた特性から、エンジンなどに欠かせないセラミック材料だ。窒化炭素膜は硬くて摩耗しにくいいため、実用化が期待されている。

潤滑剤のない状態での実験では、窒化ケイ素でできたボールとディスクをこすり合わせたときには摩擦は大きい(図1①)、ディスクの表面を窒化炭素膜で覆うと摩擦は小さくなる(図1②)。ボールとディスクの間に窒素ガスを吹き付けると、摩擦はさらに小さくなった(図1③、写真)。摩擦初期のなじみの条件を変えることで、その後の摩擦特性が変わることも見いだした。

界面での反応に水素が重要な役割

同じ素材を用い、ガスを吹き付けずに大気中で行った実験では、表面温度が20度程度ではそれほど小さいとはいえなかった摩擦が、温度を上げていくと70度程度までは摩擦が小さくなっていくなど、摩擦特性に温度が影響することを確認した。また、そのまま温度を上げていくと、湿度条件にもよるが80～100度で摩擦が一気に大きくなる現象が観察された。

低摩擦が実現しているときのボール表面を分析すると、ディスク側の炭素がところどころボールの摩擦面に移り、炭素構造の変化した膜をつくっていることがわかった。また、他の実験やシミュレーションの結果から、大気中の水分子に由来する水素原子(H)やヒドロキシル基(OH)が摩擦面末端の炭素に結合し、発生する水素が界面に影響を与えて低摩擦が実現していると推測できた。温度を上げていったときに摩擦が急激に大きくなるのは、大気中の水がその時点で蒸発し、摩擦面末端に結合するHやOHがなくなるためだと考えられる。

そこで、湿度にかかわらず摩擦面に水素を供給し続けられるよう、ディスクの窒化炭素膜に水素を結合させ(水素含有窒化炭素膜)、摩擦実験をしたところ、温度を上げ続けても摩擦が急激に大きくなることはなく、表面温度が150度に達しても摩擦が低い状態が持続した。実験後に窒化ケイ素のボールの摩擦面を分析、観察すると、表面に炭素が存在し、厚さ5ナノメートルの層(ナノ界面)が形成されていた(図2)。

これら一連の実験から、低摩擦が実現し持続するためには摩擦面での炭素系物質の存在、ナノ界面の形成、および摩擦面末端へのHやOHの結合などが必要だということが見いだされた。

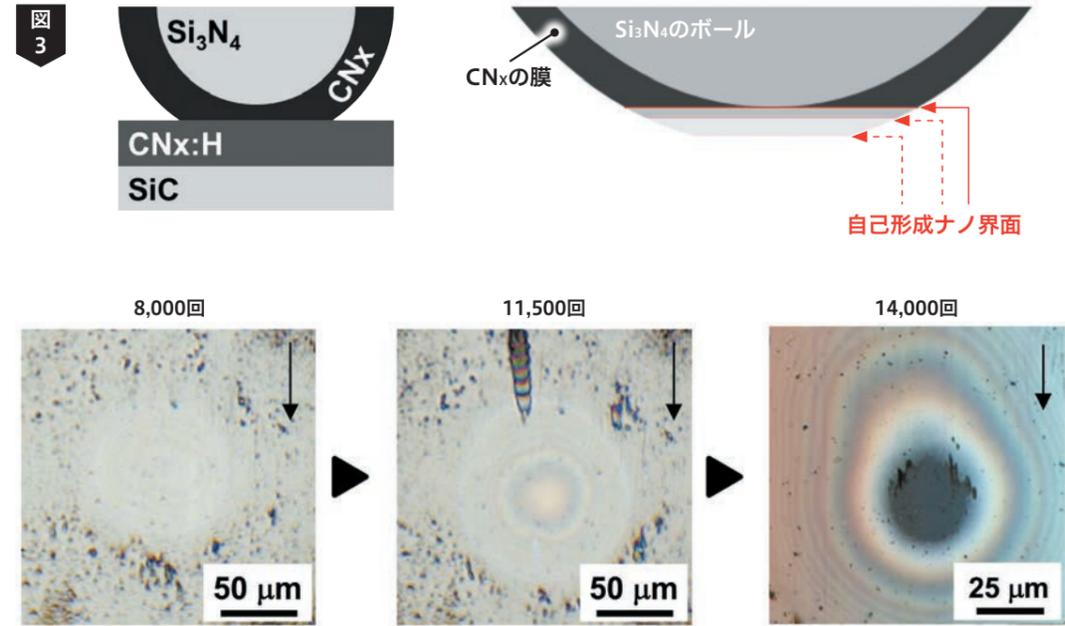
「なじみ」を利用したナノ界面の自己形成

「同様に水素含有窒化炭素膜を用いた別の実験で、表面温度100度の試験片を1,000回程度こすった後、さらに摩擦を続けながら29度まで温度を下げていったところ、摩擦は小さいまま安定していました。また、内部の窒化ケイ素に達するまでボールの摩耗が進んでも、摩擦面を分析すると全体に炭素が存在し、厚さ5ナノメートルのナノ界面が形成されていることがわかりました(図3)。摩擦初期から表面温度の低い試験片をこすり続けてもこのような安定した低摩擦はみられません。この結果は100度の時に形成されたナノ界面が低温時にも強固に維持されているのではなく、むしろなじみにより界面の性質が変わり、低温になっても低摩擦発現ナノ界面が自己形成され続けているとみるのが自然です」。

これまでの研究結果からナノ界面が形成されるためのいくつかの条件が明らかになり、水素を利用することで自己形成し続ける超低摩擦界面を実現できる可能性があることもわかった。「水素ガスは次世代のエネルギー源として注目されていますが、次世代の『潤滑剤』にもなり得ます。酸素と混ざること爆発的な反応を起こすので取り扱いには細心の注意を払う必要がありますが、安全に研究を進められる施設も完成したので、水素ガスを使った潤滑技術の開発を本格化させていきます」。

なじませ方と表面加工で水潤滑が可能に

足立さんは、水を用いたセラミックスの水潤滑システムの研究も進めている。水は潤滑油と比べると粘性が低いので、潤滑油の代わりに用いると摩擦をさらに低くできる可能性がある。反面、耐えられる荷重が小さいため、低い荷重で2つの物質がくっつき(焼き付き)、途端に摩擦が大きくなってしまふ。水潤滑では、低摩擦と



左の図のように、窒化ケイ素(Si₃N₄)を窒化炭素膜(CN_x)で覆ったボールを固定し、水素含有窒化炭素膜(CN_x:H)で覆った炭化ケイ素(SiC)のディスクを回転させて摩擦特性を調べた。上の右側の図は、摩耗が進んでいってもナノ界面が自己形成されていく様子を表したものの。下の画像は、それぞれ8,000回、11,500回、14,000回こすったときのボールの摩擦面を共焦点顕微鏡で観察したもの。ボールの表面がどんどん削られていき、14,000回では中央部に窒化ケイ素が見えているが、分析によりこの部分にも炭素が存在していることがわかった。

耐荷重性の両立が重要なのだ。

足立さんは、摩擦初期のなじみの手法を改善することで、この両立が可能であることを確かめた。さらに摩擦面の表面を加工して大小の凹凸をつけることで、摩擦特性が改善されることを見いだした。凹凸が摩擦により削られていく過程で表面に摩擦の低い界面が自己形成されるためだと考えられる。表面加工の形状を工夫することで、摩擦低減だけではなく耐荷重性の向上につながることも明らかになってきた(図4)。「水は人体や環境に害がありませんから、水潤滑は医療機器や食品などの幅広い産業への応用が期待されます。廃油の問題もなく排水をまた潤滑に利用できるなど非常に重要な技術で、ポンプなどにも使われています。現象の科学的な原理がわかっ

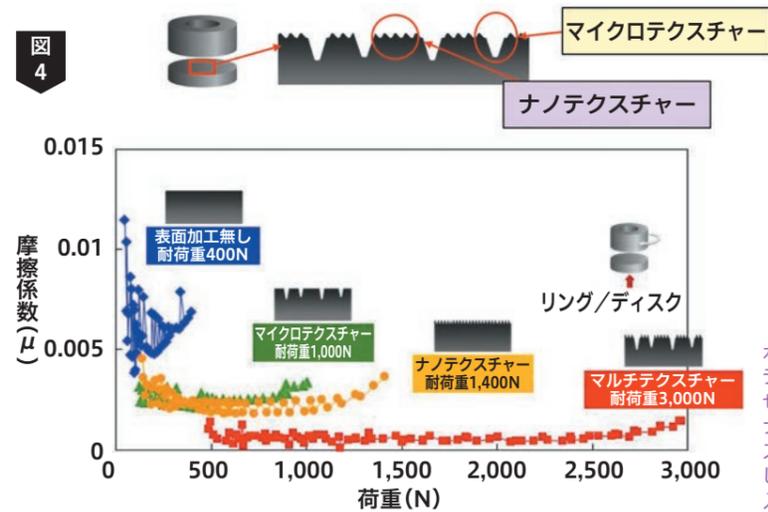
てきたこともあり、高い荷重でも低摩擦を常に維持できるような仕組みをつくりあげつつあります。水潤滑において非常に有効となる新しいコーティング材を開発するなど、研究が進んでいます」。

ものづくりにおけるトライボロジーの潜在力

摩擦の問題は、機械のエネルギー効率や生産性に大きく関係する。接触面での現象が解明され、潤滑油を使わずに超低摩擦な界面を自己形成する技術が広がれば、ランニングコストの低減や寿命の伸びにより、機械システムの省資源、省エネルギーへの貢献がさらに進むだろう。そのような期待感から、企業との共同研究も活発に行っている。

「見えない接触面に少し手を加えるだけで全く異なる結果になるのが摩擦の面白いところです。摩擦初期のなじみを制御して摩擦の中で自己形成、自己修復できる超低摩擦発現ナノ界面を創成するだけでなく、実際に機械が定期的に使われる状態においてナノ界面が自己形成し続けるようなシステムを設計したいと考えています。そうすれば摩耗による機械の故障を減らし、寿命を大きく伸ばすことができます。ある意味『寿命』という概念がなくなり、全く新しい発想の機械システムができるかもしれません。日本は世界的に、『壊れにくいものをつくる国』と評価されています。日本の知見や経験の蓄積を生かして日本のものづくりを支えるのはトライボロジーだと自負しています」。

足立さんの取り組みは摩擦に科学的な視点を持ち込み、経験則を科学的に解説して日本のものづくりを大きく前進させる潜在的な力を持つ。その効果は私たちの身の回りにまで及ぶだろう。安全で故障の心配なく安心して使え、エネルギー損失もない長寿命の機械——そんな「夢」の実現に向けた挑戦が続く。



水潤滑特性に表面加工が及ぼす影響を調べたもの。炭化ケイ素のディスクに表面加工し、水中で炭化ケイ素のリングとこすり合わせた。マイクロテクスチャーはマイクロメートルレベルの表面加工を、ナノテクスチャーはナノメートルレベルの表面加工を、マルチテクスチャーは両方のレベルの表面加工を施したもの。表面加工の施し方により摩擦係数や耐荷重が異なり、マルチテクスチャーを導入することで超低摩擦と耐荷重性が両立していることがわかる。