

## 接触問題の基礎と最近わかってきたこと

新田 勇

新潟大学 工学部機械システム工学科  
(〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050)

原稿受付 2004年11月2日

“トライボロジスト” 第50巻 第7号 (2005) 493~498

### 1. はじめに

修士の時に与えられた研究テーマが接触面剛性(接触剛性とも呼ぶ)だったことで、筆者はトライボロジーの世界に入った。それ以来、接触面剛性を完全に理解すること、およびその知識を工学的に応用することを目指して研究生活を送ってきた。今回、表題のテーマで解説記事を書くように仰せつかったが、話を主に接触面剛性という分野に限定し、この方面の現状と展望を示したい。

接触面剛性すなわち接触面の荷重と変位の関係<sup>1)</sup>を測定した初期の例を図1に示す。これらの測定値をもとにして実験式を作る努力は、すでに当時から行なわれていた。それは、接触面剛性を機械の設計に組み込むためである。接触面剛性の研究論文<sup>2)</sup>が発表されてから約40年が経過する。しかし、未だにその機構が完全に理解されたわけではない。その証拠に、接触面剛性はいまでも機械の設計に応用できてはいない<sup>3)</sup>。もしも、接触面の形状を測定するだけで、実験をしないうで接触

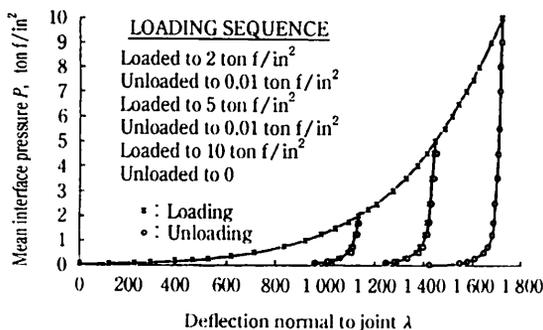


図1 垂直荷重を受ける接触面の変形【出典：文献1】

面剛性が求められれば有益である。

以下に、筆者が考えている接触面剛性の解釈について説明する。

### 2. 接触面剛性とは

最初に接触面剛性について簡単に説明する。図2は接触面の荷重と変位の関係を模式的に示したものである。接触面に荷重を加えると、接触面にある微小突起の弾塑性変形のために、変位は図の負荷曲線に沿って変化する。ここで、変位は接触面が存在することにより余分に生じる変位である。したがって、接触面が存在しなければこの変位はない。ある荷重 $P_1$ で除荷を行なうと除荷・再負荷曲線に沿って変位は減少する。荷重0の点で残った変位は突起の塑性変形のためである。再び荷重を増加させると除荷・再負荷曲線に沿って変位が増加し、 $P_1$ を過ぎると負荷曲線に沿って変位が増加する。 $P_2$ より除荷を行なうと、別の除

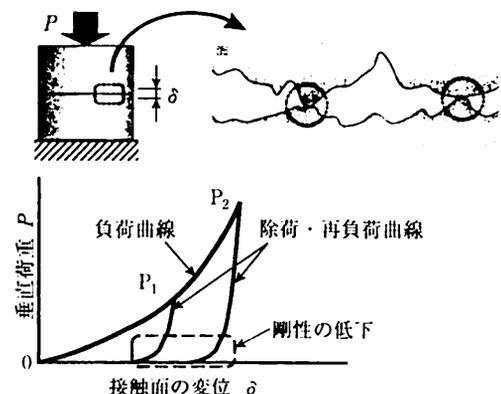


図2 接触面剛性の説明図【出典：文献4】

## Fundamentals and Recent Understanding on Contact Problems

By Isami NITTA, Mechanical and Production Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University (8050, Ikarashi 2-chocho, Niigata-shi, Niigata 950-2181, E-mail: nitta@eng.niigata-u.ac.jp)

Key Words: surface contact, contact stiffness, waviness, roughness

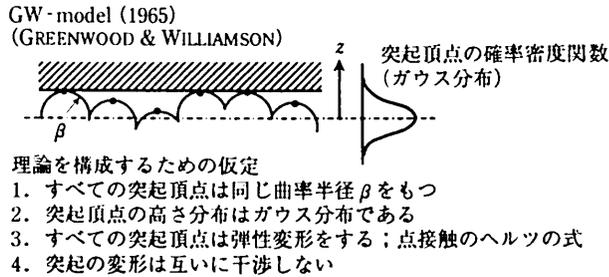


図3 粗面接触のための GW モデル〔出典：文献8〕

荷・再負荷曲線が得られる。特異的なのは、この除荷・再負荷曲線を左へ平行移動させると、先程の除荷・再負荷曲線とほぼ完全に重なることである。

接触面の剛性は図2の荷重-変位曲線より決定することができる。したがって、変位を予測することは、接触面剛性を決定することと同じである。このため、これまで多くの研究者が荷重-変位曲線を予測する式を提案してきた。

### 3. これまでの接触面剛性の考え方<sup>4)</sup>

接触面剛性を理論的に導くためには、突起1個の変形特性と突起頂点の高さ分布形の基本特性を押さえる必要がある。

#### 3.1 表面微小突起の荷重-変位の関係

突起の弾性変形は、ヘルツの接触理論を利用したり、半無限平面に集中荷重が作用すると仮定することで計算できる。突起の塑性変形は、材料の硬さを塑性流動圧力と仮定することや、すべり線場理論を用いることで計算できる。有限要素法などで弾塑性変形問題としての解析も可能である。

#### 3.2 突起頂点の高さの確率密度分布

接触面剛性を計算するうえで、表面微小突起が高さ方向にどのように分布しているのかを決めることは大変重要である。これについては、かなりたくさんの理論的な論文が発表されている。たとえば、ガウス分布やその変形を使用するもの、フラクタルを仮定するものなどである<sup>5)</sup>。それこそありとあらゆる分布形が提案されている。したがって理論的な取扱いは、うんざりするほど複雑になっていった。これが、接触面剛性が敬遠される理由ではないかと考えている。確率統計の手法を

持ち込むことは一見すると妥当なようにも考えられるが、結局は曖昧さを導入することになる。

突き詰めていってしまえば、図3に示すように表面微小突起の変形特性が正確にわかり、またその高さ分布がわかれば、接触面剛性は完全に理解できるはずである。その意味で、GREENWOOD-WILLIAMSON<sup>6,7)</sup>らのモデルでことは済んでしまうのである。また、この考えに沿った優れた解説記事<sup>8,9)</sup>もある。接触面剛性は完全に理解されて当然であるように見える。しかしながら、上述したように未だに接触面剛性は、設計に应用する段階にはない。どうして、接触面剛性の理解が進まないのだろうか。

### 4. どうして接触面剛性が予測できないのか

#### 4.1 非金属の接触面剛性（うねりの重要性）

接触面剛性の研究を始めて10年ぐらいつぎたときに、筆者は岩手大学の岩淵明先生が行っていた、超電導コイルのクエンチ問題を手がけることになった。超伝導コイルの絶縁材としてガラス繊維強化プラスチック (GFRP, Glass Fiber Reinforced Plastics) が用いられるが、GFRPと超電導コイルの接触部の接触面剛性が低いと、変動磁場の影響で両者に相対すべりが生じる。そのすべりが原因で生じる摩擦発熱により温度が上昇し、超電導状態が破れてしまう。そこで、高分子薄膜法で実験的に真実接触点を求め、温度上昇を三次元解析で求めるシミュレーションを行なった<sup>10)</sup>。このときに、GFRPの厚さが不均一であるために、接触点が偏っていることがわかった。

言い換えれば、接触面のうねりが大きく、真実接触面積が均一に分布しない状態だった。

さらに、それらの試験片を用いて、接触面剛性を求める実験を行なった。うねりが大きいので、うねりのみをもとに接触面剛性を求める数値シミュレーションを行なった。表面粗さは無視したにも拘わらず、実験値と計算値は非常に良く一致した。そのときは、これだけうねっていれば実験と数値計算が一致しても当然という感じがした。それからしばらくして、もしかしたら金属表面でも同じことが起こっているのではと思い、きちんと実験を試みることにした。

4.2 金属表面への適用<sup>11)</sup>

実験に用いた試験片の形状を図4に示す。試験片材料は、炭素鋼S45Cとステンレス鋼SUS304、高力黄銅である。紙面の都合でSUS304の結果は割愛する。表面粗さの測定例を図5に示す。試験片の表面は研削仕上げされており、細かな違いはあるが、最大高さ粗さは二つの材質ともに同じような値であることがわかる。この試験片のうねりを測定した例を図6に示す。測定器はナノメトロ630Fであり、その精度を確かめるために平面度64nm程度に仕上げられた直径320mmのオプティカルフラットを測定したところ230nmであった。S45Cの表面は、全体的に平坦であり5~6個の凹凸が見られる。これに対して、高力黄銅は大きく湾曲している。このような形状になったのは、S45Cは磁性材料

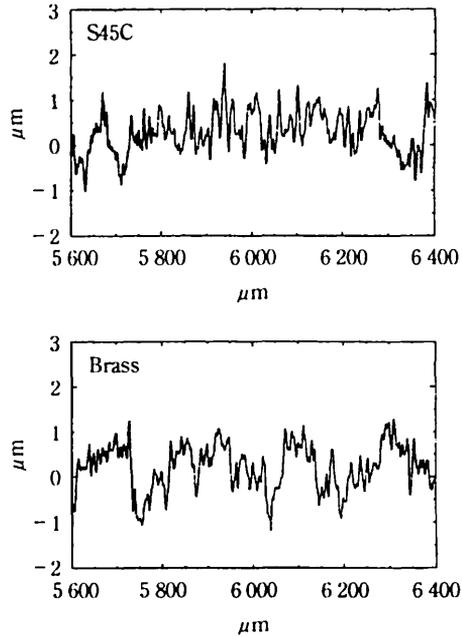


図5 試験片の表面粗さ、S45Cと高力黄銅  
〔出典：文献11〕

で平面研削盤のマグネットに吸着できるのに対して、高力黄銅はマグネットに吸着できないことに起因している。高力黄銅は万力に挟むことで研削を行なった。万力の剛性が不十分であったことが、このような形状になった原因と考えられる。

変位の測定の実験結果を図7に示す。実験では80MPaの接触圧力を加えた後に除荷を行ない、その後2回の再負荷・除荷を行なった。

一方で、うねりをもとにした数値シミュレーションを行なった。図8は使用した有限要素法のメッシュである。接触面剛性では除荷過程の曲線から求められるものが意味をもつことから、除荷過程の曲線との比較を行なった。図7中の太い実線が数値シミュレーションであり、破線が実験値である。これより、両者は良く一致することがわかる。したがって、除荷曲線はうねりを考慮することにより、第一近似的に求まることがわかった。最初の負荷曲線では表面微小突起が塑性変形するが、いったん塑性変形してしまうとそれ以上の荷重をかけなければ弾性変形のみである。上記の結果は、その弾性変形量はうねりの変形が支配的であることを意味している。ここで、重要なのは確

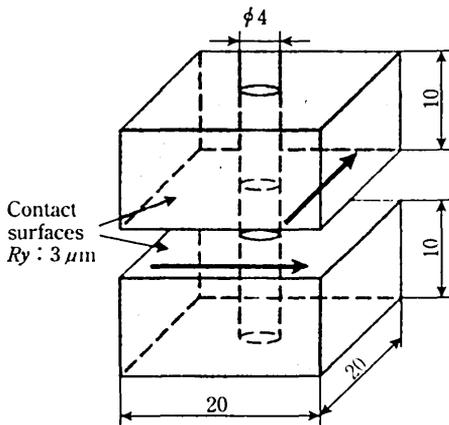


図4 接触面剛性のための試験片〔出典：文献9〕

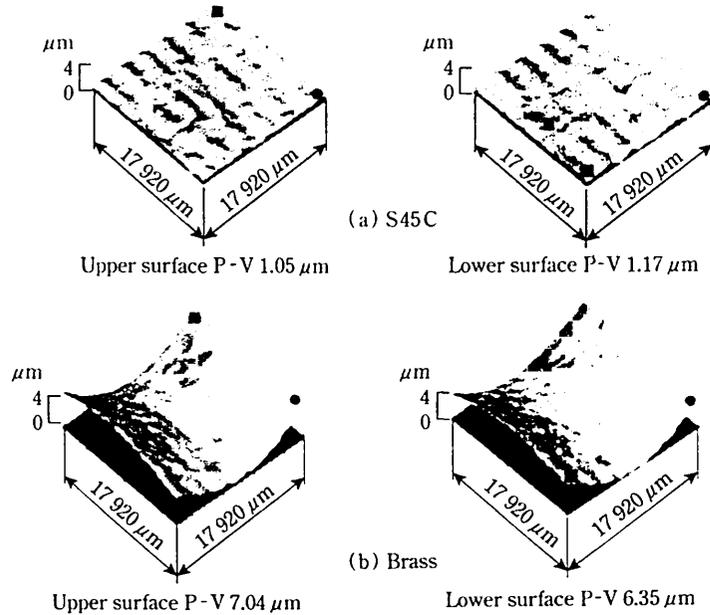


図6 試験片の見掛けの接触面全体のうねり形状, S45Cと高力黄銅〔出典:文献11〕

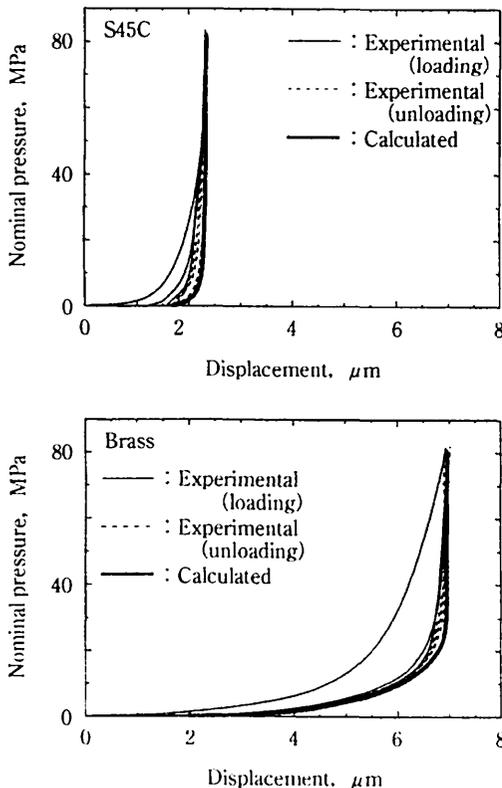


図7 垂直圧力と変位の関係, S45Cと高力黄銅〔出典:文献11〕

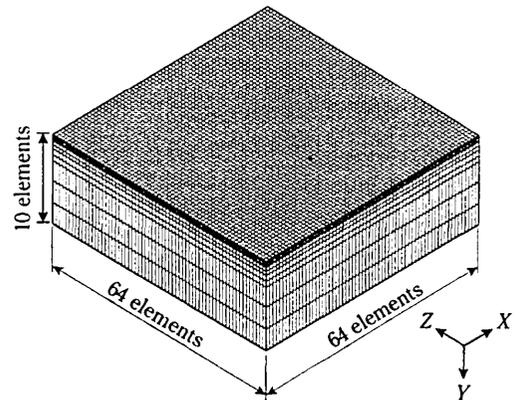


図8 うねりをもとに接触面の変形を解析するための有限要素法メッシュ〔出典:文献11〕

率論などを持ち込むことなく、うねりをもとにすることにより決定論的に変形量が計算できることである。

#### 4.3 どうして表面粗さでは説明できないのか

確率論でうまく接触面の変形を説明できない理由を述べる。確率論では、まず突起頂点の高さ分布を求める。曲率半径の小さい突起の数は多いので、これらが確率密度分布を決定する。うねりの山は数が圧倒的に少ないので、確率密度分布には

ほとんど寄与しない。しかし、うねりの曲率半径は大きいので、変形には大きな影響を及ぼす。このように、確率論では大きな変形をするうねりが無視されるようになってきている。これが確率論ではだめな理由である。

これまでうねりが表舞台に出てこなかったのは、その測定がむずかしいことも理由として挙げられる。通常の触針式粗さ計では、測定に時間がかかり過ぎていた。たとえば上記の試験片を測定するのに3~7時間は必要であった。あまり時間がかかると、熱変形のためにうねりの測定精度は低下する。現状では静圧軸受を有する高価な測定装置がないとうねりは正確に測定できない。

以上の経験を通して、筆者はうねりをもとに接触問題を再整理する必要があるのではないかと考えるようになった。表面粗さの変形を無視することになるので完全な理解ではないが、少なくとも確率論を持ち出す必要がなく、決定論的に議論することができる。これまでは接触面の一部分の表面粗さで、接触問題を理解しようとしていた。「木を見て森を見ず」の諺どおりで、「表面粗さのみを見てうねり（接触面の本当の姿）を見ず」になっていた。「群盲象を評す」のようなことになっていたと、つくづくそう思う。

以下に、接触熱抵抗をうねりをもとに解析した例を示す。

### 5. うねりをもとにした接触熱抵抗の解析

スペースシャトルなど宇宙空間で作業を要する機器では接触熱抵抗が問題となる場合がある<sup>12)</sup>。接触熱抵抗は、これまで確率論に基づいた解析がなされてきた。ここでは、うねりをもとにした解析を行なった<sup>13)</sup>。

図9には使用した試験片を示す。材質は、上部試験片がSUS 304であり、下部試験片はフッ化カルシウム（透明）である。下部試験片が透明なのは、接触面の温度を赤外放射温度計で測定する

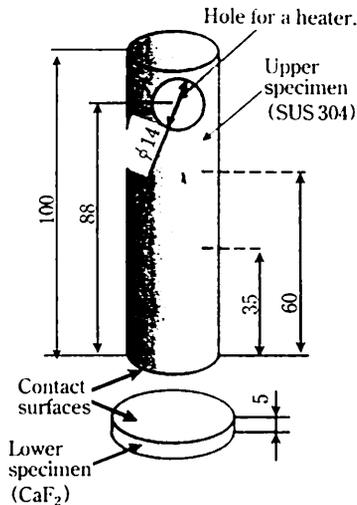


図9 真空中で接触熱抵抗を測定するための試験片（上部試験片：SUS 304、下部試験片：フッ化カルシウム）  
〔出典：文献13〕

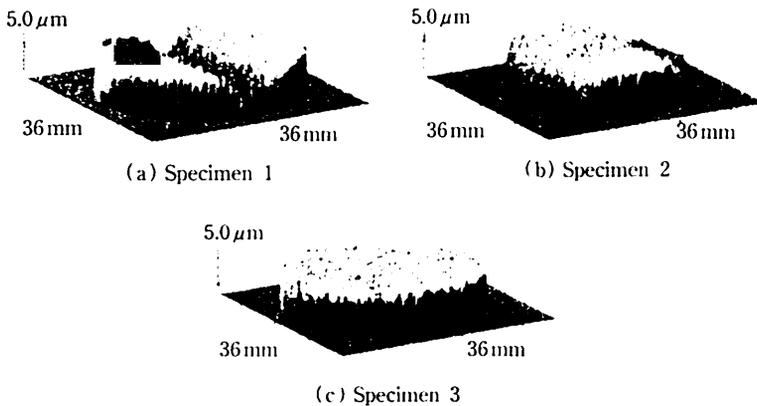


図10 上部試験片の見掛けの接触面の形状〔出典：文献13〕

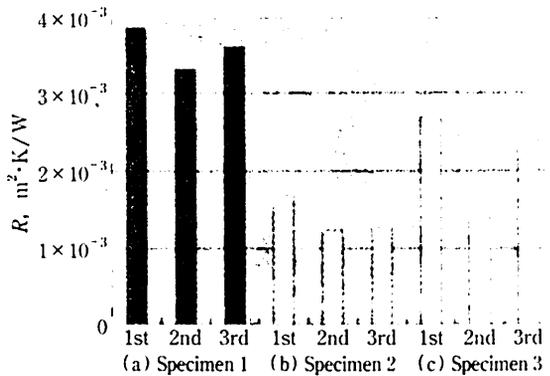


図11 接触熱抵抗の測定結果【出典：文献13】

ためである。図10に上部試験片の表面形状を示す。上部試験片の接触面は最大高さ粗さが $3 \mu m$ となるように研削仕上げを行なった。その後、試験片1は接触面の中央を、試験片2は両端をエメリー紙にて研磨し $3 \mu m$ のうねりをつけた。試験片3は研削したままである。これらの試験片を用いて、ロータリポンプにより排気した真空容器の中で接触熱抵抗の実験を行なった。実験結果を図11に示す。それぞれの試験片で3回実験を繰り返した。試験片1が最も接触熱抵抗が高く、試験片2が最も低くなった。興味深いのは、平坦な試験片3の接触熱抵抗のばらつきが一番大きいことである。これは、試験片の片当たりが原因であると思われる。試験片1と2では、最初からうねりが存在するために片当たりの再現性がよく、接触熱抵抗のばらつきが少ないものと考えられる。

次に、高分子薄膜法で接触面の真実接触面積の分布を測定したが、うねり形状に沿った分布となった。その分布を模擬して有限要素法で接触熱抵抗を求めた。詳細は紙面の都合で割愛するが、計算結果は実験結果と同じ傾向になった。有限要素法のメッシュが真実接触部に比べて粗いので、絶対値まで同じとはならなかった。しかしながら、表面粗さのデータを使用することなく、うねりをもとにした解析でも接触熱抵抗を予測することができる可能性は示せたと考えている。

## 6. おわりに

うねりをもとに考えると、固体表面の接触問題

を確率論抜きに議論することができることを説明したつもりである。これまで、固体接触は確率論に惑わされて理解が進んでいない分野であった。点接触のように接触が局所領域に限定される場合は、確率論を導入しなくても断面曲線のデータを用いることで数値解析ができるが、これは例外である。したがって、これまでの接触理論を、うねりをもとに再構築することで、真に役に立つ理論を築くことができると考えている。この考えに賛同してくれる方がいたら筆者に連絡頂きたい。

簡易に短時間でうねりを測定できる装置の開発も必要であり、現在筆者はその開発を密に行なっている。本解説が何かのお役に立てば望外の幸いである。

## 文 献

- 1) R. CONNOLLY & R. H. THORNLEY: ASME J. of Engineering for Industry, 90 (1968) 97.
- 2) R. H. THORNLEY, R. CONNOLLY, M. M. BARASH & F. KOENIGSBERGER: Int. J. Mach. Tool Des. Res., 5 (1965) 57.
- 3) 伊藤正頼: 機械と工具, 47, 5 (2003) 89.
- 4) 新田 勇・加藤康司: トライボロジスト, 45, 12 (2000) 864.
- 5) 新田 勇: トライボロジスト, 46, 4 (2001) 267.
- 6) J. A. GREENWOOD & J. B. P. WILLIAMSON: Proc. Roy. Soc. London Ser. A, 295 (1966) 300.
- 7) 講習会資料, 新・役に立つトライボロジー—基礎から応用まで—, 日本機械学会, No.99-89 (2000) 21.
- 8) 塚田忠夫: 潤滑, 19, 2 (1974) 135.
- 9) 久門輝正: 潤滑, 23, 6 (1977) 385.
- 10) 新田 勇・岩淵 明・南 正晴・高尾智明: 低温工学, 30, 10 (1995) 457.
- 11) I. NITTA & T. HASEGAWA: Proc. of ITC, Nagasaki (2000) 273.
- 12) J. DOMINQUEZ & C. A. PREBBIA: Computational Methods in Contact Mechanics V, WIT press (2001) 65.
- 13) 新田 勇・星名 雅: トライボロジー会議予稿集, 宇都宮 (2001) 429.

### ■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■

新田 勇 1958年生まれ。1980年、新潟大学工学部機械工学科卒業。1982年東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1990年工学博士(東北大学)。現在、新潟大学自然科学系教授。粗面の接触面剛性に従事して、シュリンクフィッティングを提案し、新潟大学初の大学発ベンチャー企業を立ち上げた。研究開発担当取締役を兼務。最近では広域レーザ走査技術を基に医工連携に挑んでいる。