

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：22604  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560145  
 研究課題名（和文） 超極細ワイヤーを用いたマイクロ機械要素およびマイクロ機械システムの研究  
 研究課題名（英文） Development of micro machine elements and micro mechanical systems utilized extra fine wires  
 研究代表者  
 本田 智（HONDA SATOSHI）  
 首都大学東京 大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号：90219238

### 研究成果の概要（和文）：

本研究では、線径が数十 $\mu\text{m}$ 以下の超極細ワイヤーを用いて、極小のマイクロ機械要素と、これらを組み合わせたマイクロ機械システムの試作を行った。その結果、線径が20 $\mu\text{m}$ の錫メッキモリブデン線を用いてピッチ40 $\mu\text{m}$ のマイクロねじと、これに嵌るマイクロナットを試作し、製造法の確立および解析・評価を行った。この外にマイクロ曲がり歯かさ歯車／マイクロ送り機構／マイクロタービン／マイクロ多針フィルタを試作・評価した。

### 研究成果の概要（英文）：

In this research, some micro mechanical elements and some micro mechanical systems were developed by using the extra fine wires which diameter is less than several tens of micrometers. The developed micro-screws and the micro-nuts were made by coiling two molybdenum wires closely around a pin and by soldering the wires onto the pin or a narrow tube, and by peeling one wire of the soldered wires. Diameter of the wires is 20 micrometers and pitch of the micro-screw and micro-nut is 40 micrometers, and the micro-screw is screwed in the micro-nut smoothly. Additionally, several mechanical micro-parts, for example, micro spiral bevel gears, micro positioning mechanisms, micro turbines, micro-pin array filters, were developed and estimated.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	100,000	30,000	130,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

### 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学／設計工学，機械機能要素，トライボロジー

キーワード：マイクロマシン，MEMS，超極細ワイヤー，機械要素，マイクロねじ，マイクロナット，マイクロ歯車，マイクロタービン

#### 1. 研究開始当初の背景

マイクロマシンは、1966年に製作された、映画「ミクロの決死圏」の中で極小の潜水艇

が映像化されて以来、精密機械技術者がその製作を目指す夢の機械の一つとなり、また、その学術的研究は、1980年台後半に半導体製

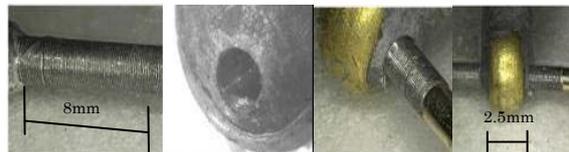
造装置を用いて超小型歯車が製作されたことから始まり、現在、多くの研究が行われている。そして現在では、大きさが極小で、かつ、ある機能を果たす“もの”であれば、それら全てを MEMS と呼び、大きさが数mmの流量センサーや加速度計などが、MEMS 製品として市販され、MEMS がマイクロマシンと同義語のように用いられている。しかし、ルロー (Franz Reuleaux) による機械の定義では、機械とは①複数の部品で構成され、②その部品はその部品に作用する力に耐える強度を持ち、③部品同士が相対的に運動し、④外部からのエネルギーで部品を運動させ、その運動によって有用な仕事(力×距離)を出力するものであり、上記の MEMS 製品は、複数の部品で構成されてはいるが部品が相対的に運動しないものや、外部からの振動エネルギーによって部品が振動し、その振動を検出することはできるが、外部に仕事を出力しないものなど、通常の世界における機械の定義には当てはまらないものが多い。また、通常の世界における機械要素を寸法的に縮小しただけでは、部品間の摺動面の摩擦により、部品が運動しないことが推測され、同じ機能を果たす小さな世界の機械要素には何らかの工夫が必要であり、小さな世界の機械の特性を学術的に解明すること、および、小さな世界における機械の定義を改めて定めることが必要である。しかし、マイクロマシンの特性および定義を検証・考察するためには、多く種類の、多数のマイクロマシンが試作され、それらを比較検討することが必要であるが、現状のマイクロマシンの主要な製造法は、次に述べる3つの方法が開発されているだけで、この方法によって試作されたマイクロマシンの数は多くないのが現状である。

ここで従前の研究で考案・開発されたマイクロ部品の製造法を説明すると、それは、①半導体製造装置や、②LIGAプロセスを用いる方法、③超精密研削盤を用いる方法などがあり、①②の方法では、マイクロ部品を大量に製作できるが、製作できるマイクロ部品は平面的な形状で、材質も限られている。また、③の方法では、様々な材質のブロックを3次的に切削・研削することで立体的な部品を製作することはできるが、製作できる個数は毎回1個であり、生産性は非常に低いという短所がある。そして、どちらの方法も多額の設備費と高額な機械を必要とするため、これら設備と機械を取得できた研究機関の研究者だけが、マイクロマシンの研究開発に従事し、多くの研究者によって多数のマイクロマ

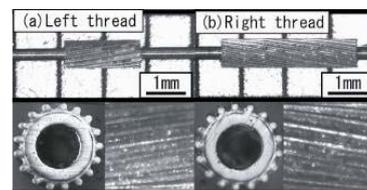
シンが開発・製造される状況にはなく、これらの高額な装置を用いて工業的にマイクロマシンを大量に製作しても、製造コストが高くなり、工業製品として広く普及する状況に至っていない。

そこで、筆者らは上述の問題を解決するため、高額な装置を必要とせず、安価で、簡便な製造プロセスで、かつ、3次的なマイクロ機械要素を製作できる方法として「超極細ワイヤーを用いたマイクロパーツ製造法」を考案し、今までに、図1に示すような、①線径が  $20\mu\text{m}$  の金メッキ真鍮線を用いてピッチが  $40\mu\text{m}$  のねじ/ナット、②線径が  $50\mu\text{m}$  の錫メッキ銅線を用いて歯数 20、モジュール  $32.5\mu\text{m}$ 、ねじれ角  $11.4^\circ$  のはす歯歯車、③線径が  $100\mu\text{m}$  の錫メッキ銅線を用いて半径流タービン翼を試作してきた。

そして本研究によって、様々なマイクロ機械要素およびマイクロ機械システムを製作することを目指した。



①マイクロねじ/マイクロナット



②マイクロはすば歯車



③半径流マイクロタービン翼

図1. 2008年までに試作した機械要素

## 2. 研究の目的

本研究では、「超極細ワイヤーを用いたマイクロパーツ製造法」を発展させ、線径が  $10\mu\text{m}$  以下の超極細ワイヤーを用いて、マイクロねじ/ナット/歯車/タービン翼の試作を試みた。また、様々なマイクロ機械要素とマイクロ機械システムを試作し、これらを機構学的に解析し、実験的に性能を評価し、実用的な製造法を確立することを研究の目的とした。そして、多数のマイクロ機械要素およびマイクロマシンの試作によって、マイク

ロマシンの学術的定義の検討を目指した。

研究目的の詳細および数値目標は、以下の通りとした。

- (1) 線径が  $0.5\sim 10\mu\text{m}$  の超極細ワイヤーを用いて、ピッチが  $1\sim 20\mu\text{m}$  のマイクロねじ/マイクロナット、モジュールが  $0.6\sim 6.4\mu\text{m}$  のマイクロはす歯歯車、直径が  $1\text{mm}$  以下のマイクロタービン翼を試作する。
- (1-1) この試作において、使用する超極細ワイヤーは、タングステン線やステンレス線など、切れ易いが、これらを巻き付ける時に弾性的な戻りがあるので、超極細ワイヤーをピンに密着させて巻き付け、かつ、ワイヤー同士も密着整列させる巻き線技術が必要であり、これを開発する。また、巻き付けたワイヤーが緩まないようにワイヤー端を固定する技術も開発する。
- (1-2) タングステン線、ステンレス線をピンに強固に接合し、また、接合した2本のワイヤーの内、1本を容易に取り除く必要があるため、ワイヤーを選択的に接合・剥離する技術を開発する。
- (2) 試作したマイクロねじ/ナット/歯車/タービン翼を用いて、ステージの移動量が  $5\text{mm}$ 、送り精度が  $0.5\mu\text{m}$  以下のマイクロステージ、直径が  $1\text{mm}$  で減速比が  $1/10$  のマイクロ遊星歯車減速機、回転数  $10\text{万rpm}$  のマイクロタービン発電機の製作を試みる。
- (3) 超極細ワイヤーを用いて、マイクロ曲がり歯・かさ歯車/マイクロラック/マイクロ静圧軸受/マイクロ動圧軸受け/DNA捕獲マイクロ剣山/マイクロ細管/蜂の巣マイクロ定盤/マイクロ板フレーム/マイクロ圧縮機など、様々なマイクロ機械要素の試作を試みる。また、金属ワイヤー以外の合成繊維(フロロカーボン線)やセラミック線を用いて、医療用の管用ねじ付きマイクロパイプや高温環境で使用するマイクロねじ/ナットの試作を試み、超極細ワイヤーを用いたマイクロマシンの可能性の探求と、小さな世界における機械の定義を検討・考察する。
- (4) 超極細ワイヤーを用いたマイクロねじ/ナットのねじ山の強度解析および嵌め合い精度の解析を行う。また、マイクロ歯車の歯形の機構学的かみ合い解析とかみ合い理論の構築を行う。そして、超極細ワイヤーを整列・接合する技術の確立を目指し、「超極細ワイヤーを用いたマイクロパーツ製法」の有効性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

研究では、まず、線径が  $10\mu\text{m}$  以下の様々な超極細ワイヤーを、ピンに密着整列させて巻き付けるねじ用の巻き線機および歯車用の巻き線機を設計・製作し、超極細ワイヤーを密着させて巻きつける方法を検討する。また、様々なロウ材を用いて、ワイヤーを選択的に結合・剥離させる方法を検討する。そして、様々な超小部材にワイヤーを巻き付け/接合することでマイクロ機械要素を試作し、その形状的/強度的特性を実験で求め、機構学的解析結果と比較検討する。さらに、試作したマイクロ部品を用いてマイクロ機械システムを構成し、実験的にその性能を明らかにする。

研究では、市販されている超極細ワイヤーと接合剤を用いなければならない制約と、製作可能な巻き付ける部材を用いる必要があるため、マイクロ機械要素およびマイクロ機械システムを系統的に試作を行うことは難しく、①マイクロねじとマイクロナット、②マイクロ歯車、③マイクロ精密ステージの試作に重点を置き、これらに近い種々のマイクロ機械要素を試作することにする。

- (1) 2010年度は、マイクロねじとマイクロナットについて、巻き線機を製作し、密着巻き線方法と接合方法を検討する。そして、様々なワイヤーと接合剤を用いてマイクロねじおよびマイクロナットを試作し、形状的/強度的性能を実験的に求める。

また、マイクロナットを製作する時に使用する巻き付け用のピンの直径を変えて試作し、マイクロナットがマイクロねじにガタなく嵌るための巻き線用のピンの直径を実験的に求める。

さらに、他のマイクロ機械要素として、マイクロピッチラックやマイクロタービン翼について試作を試みる。

- (2) 2011年度は、マイクロ歯車について、巻き線機を製作し、密着巻き線方法と接合方法を検討する。そして、様々なワイヤーと接合剤を用いてマイクロ歯車を試作し、ピッチ精度などの形状・寸法特性と歯の強度特性を実験的に求める。

また、マイクロねじ/マイクロナットの製法に改良を加え、マイクロナットを製作する時に使用する巻き付け用のピンの最適直径を幾何学的解析から求める。

さらに、他のマイクロ機械要素として、マイクロ曲がり歯かさ歯車とマイクロ多針フィルタについて試作を試みる。

(3)2012年度は、試作したマイクロピッチを用いて、マイクロ精密ステージの試作を試み、マイクロ機械システムとしての諸特性を実験的に求め、評価する。

また、超極細ワイヤーで製作できる様々なマイクロ部品を試作し、超極細ワイヤーを用いたマイクロ部品の可能性を検討する。さらに、マイクロマシンの学術的定義の検討を行う。

#### 4. 研究成果

(1)2010年度は、線径が $10\mu\text{m}$ の金メッキタングステン線を2本1組として、直径が $0.3\text{mm}$ でニッケル下地金メッキを施したピンに密着して巻き付け、ワイヤーをピンに接合した後、1本のワイヤーを取り去ることで、ピッチ $20\mu\text{m}$ のマイクロねじおよびマイクロナットの試作を試みた。しかし、密着巻きした線径 $10\mu\text{m}$ のワイヤーとピンの間の狭窄部に浸透させワイヤーとピンを強く接合できる接合材および接合方法を見いだすことができなかった。

このため研究では、線径が $20\mu\text{m}$ の金メッキ・モリブデン線を用い、これを直径 $0.5\text{mm}$ のニッケル下地金メッキを施した真鍮ピンに巻き付け、接合材として熔融時に粘性の低い銅系の鉛フリー半田を使用し、また、半田の毛管現象を利用することで、ワイヤーをピンに接合したピッチ $40\mu\text{m}$ のマイクロねじ(図2①)を試作した。

また、試作したマイクロねじに嵌るマイクロナットを製作するためには、ナットを製作する時に使用する巻き付け用のピンの直径を $\pm 1\mu\text{m}$ の精度で精密に加工したピンを用いる必要があること、また、この精密ピンは工業的に製造されていることが分かった。そして、ピッチ $40\mu\text{m}$ のマイクロねじに嵌るマイクロナット(図2②)を試作した。

この外に、(ア)線径 $0.1\text{mm}$ の錫メッキ銅線を用いた、直径 $4.8\text{mm}$ 、長さ $20\text{mm}$ の双翼軸流タービン(図2③)、(イ)線径が $50\mu\text{m}$ のウレタン被膜銅線と同じ線径のステンレス線を用いて、ピッチが $100\mu\text{m}$ 、長さ $30\text{mm}$ のマイクロピッチラック(図2⑤)を試作した。

(2)2011年度は、マイクロねじの製法について改良を行い、線径が $20\mu\text{m}$ の錫めっきモリブデン線を2本1組として、直径 $0.5\text{mm}$ のニッケル下地金メッキ真鍮ピンに、自動巻き線機を用いて斑なく均一に密着させて巻き付け、その後、これを粘性が低く間隙高さが高い鉛フリー半田の熔融槽に徐々に浸漬させることで、ワイヤーを全ての巻き線部分

でピンに半田接合できることを見出した。

また、外径が $d$ のマイクロねじに適正に嵌るマイクロナットを製作するためには、製作の途中で使用するピンの直径 $D1$ を $D1=d-1.4642d$ で求め、この直径のステンレスピンを用いることが有効であることを明らかにした。

この外に、(ウ)線径が $0.32\text{mm}$ の錫メッキ銅線を38本用いて、歯数19、円錐角 $40^\circ$ のマイクロ曲がり歯かさ歯車(図2⑥)試作し、製作法を確立した。(エ)線径 $0.176\text{mm}$ のポリウレタン被膜導線とナイロン線を用いて、穴径 $0.176\text{mm}$ 、穴数51個のマイクロ多針フィルタ(図2⑦)を試作した。

(3)2012年度は、マイクロ曲がり歯かさ歯車の試作について、多数本のワイヤーを円錐軸に密着させて巻き付けるための幾何学的解析を行い、かさ歯車用の巻き線機を製作し直し、マイクロ曲がり歯かさ歯車を容易に製作する方法を見出した。

この外に、(オ)直径が $0.31\text{mm}$ ステンレスピンに、線径が $0.21\text{mm}$ の錫メッキ銅線を螺旋状に巻き付けることで、翼径が $0.74\text{mm}$ の軸流マイクロタービン(図2④)を試作し、実験的に性能を評価した。また、線径 $97\mu\text{m}$ のステンレス線105本と同径の錫メッキ銅線31本を六角形の頂点と中心にそれぞれ密着させて配列し、銅線を硝酸で溶解することで、孔径が $97\mu\text{m}$ 、深さ $1\text{mm}$ のマイクロ多針フィルタ(図2⑧)を試作し、ワイヤーの配列を逆にして、 $97\mu\text{m}$ の錫メッキ銅線63本と同径のステンレス線15本を六角形の頂点と中心にそれぞれ密着させて配列し、銅線を硝酸で溶解することで、ステンレス線が剣山のように立った高さ $2.88\text{mm}$ の多針ニードル(図2⑨)を試作した。

さらに、2010年に試作したピッチ $60\mu\text{m}$ のマイクロピッチラックとマイクロピッチ歯を尺取り虫方式で噛み合わせることでステージを1ピッチずつ移動させる精密ステージの製作を行った。そして、マイクロピッチ歯を尺取虫方式でマイクロピッチラックに噛み合わせるために、三角カム機構と変位縮小機構を組み合わせ、マイクロピッチ歯が一辺 $60\mu\text{m}$ の四角軌跡を描いて変位する新しい機構を考案した。しかしステージの実製作には至らなかった。今後研究を続ける予定である。

(4)研究では、数種類の超極細ワイヤーを用いたマイクロ機械要素を試作したが、①マイクロねじでは、螺旋状に変形したワイヤーがねじ山となり、機構学的にねじ山が「ねじ対偶」を構成していることは分かったが、螺旋状に変形したワイヤーの断面形状を理論的に解析することは難しく、ねじ山同士の接触

点（接触曲線）を理論的に求めること、および、接触点で作用する力について理論的に解析することはできなかった。また、②マイクロ歯車では、同様に、ワイヤーが歯となり、ワイヤー同士が引っかかり歯車が回転することは実験的に確認できるが、歯同士の接触点（接触曲線）および接触点で作用する力について理論的に解析することはできなかった。引き続き研究を進める予定である。

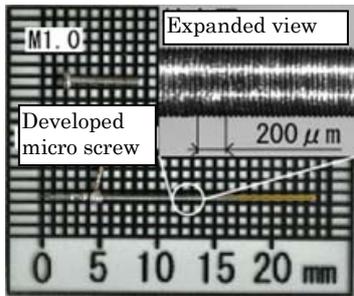


図 2① マイクロねじ

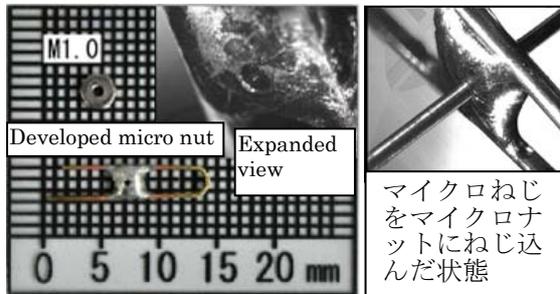


図 2② マイクロナット

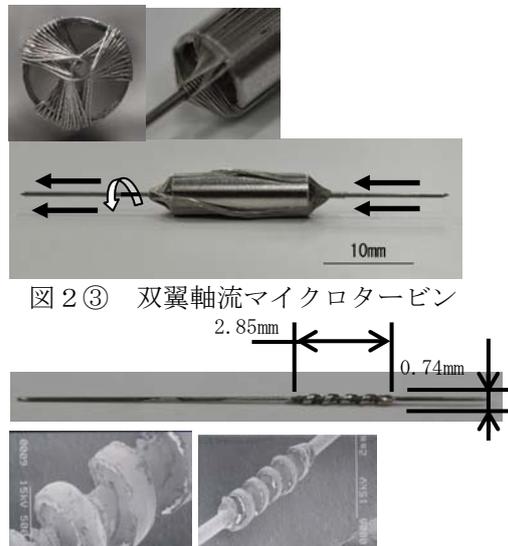


図 2④ 軸流マイクロタービン

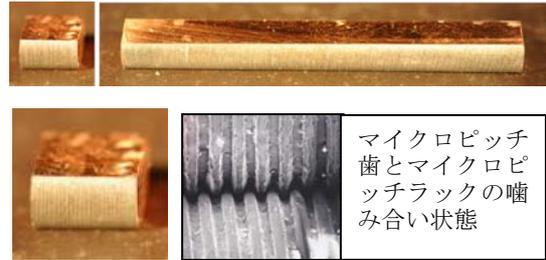


図 2⑤ マイクロピッチ歯とマイクロピッチラック

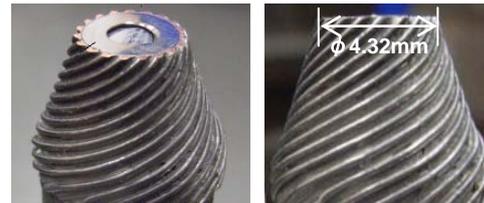


図 2⑥ マイクロ曲がり歯かさ歯車

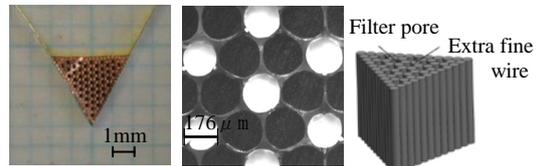


図 2⑦ マイクロ多針フィルタ(2011年)

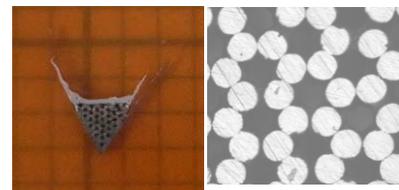


図 2⑧ マイクロ多針フィルタ(2012年)

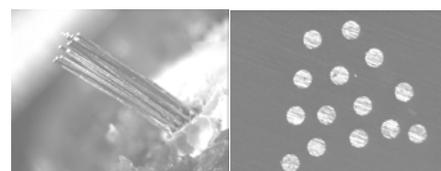


図 2⑨ マイクロ多針ニードル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 本田 智：マイクロマシン (MEMS) 開発，自動化推進，査読無し，Vol. 41, No. 2, pp2-3. 2012. 5. 1.

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 大倉義弘，本田 智：マイクロピッチラックを用いた精密ステージの研究，2013 年度精密工学会春季大会学術講演論

- 文集, L62, pp807-808. 2013. 3. 15, 東京工業大学.
- ② 本田 智, 今林拓也: 超極細ワイヤを用いたマイクロ曲がり歯かさ歯車の研究(第2報), 2013年度精密工学会春季大会学術講演論文集, C16, pp149-150, 2013. 3. 13, 東京工業大学.
- ③ 座間雄大, 本田 智: 超極細ワイヤを用いたマイクロ多針フィルタの研究(第2報), 2012年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, 045, pp991-992, 2012. 9. 15, 九州工業大学.
- ④ 本田 智: マイクロマシン「超極細ワイヤを用いたマイクロ送り機構/マイクロ歯車機構の開発」, 2012 ポジショニング特別セミナー講演予稿集, PE-4, 2012. 4. 27, パシフィコ横浜.
- ⑤ 座間雄大, 本田 智: 超極細ワイヤを用いたマイクロ多針フィルタの研究, 2012年度精密工学会春季大会学術講演論文集, I20, pp711-712, 2012. 3. 14, 首都大学東京.
- ⑥ 三浦宗宏, 本田 智: 超極細ワイヤを用いたマイクロ斜歯歯車の研究, 2012年度精密工学会春季大会学術講演論文集, I19, pp709-710, 2012. 3. 14, 首都大学東京.
- ⑦ 本田 智: マイクロマシン(MEMS)の開発, 2012年度精密工学会春季大会学術講演論文集, I01, pp683-684, 2012. 3. 14, 首都大学東京.
- ⑧ 本田 智: 超極細ワイヤを用いたマイクロ機械要素の研究, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, K13, pp591-592, 2011. 9. 20, 金沢大学.
- ⑨ 本田 智: 機構的マイクロマシンの動向, 2011 ポジショニング特別セミナー講演予稿集, PE-1, 2011. 4. 20, パシフィコ横浜.
- ⑩ 本田 智, 石田寿樹: 超極細ワイヤを用いた軸流マイクロタービンの研究(第2報), 2011年度精密工学会春季大会学術講演論文集, L06, pp875-876, 2011. 03. 14, 東洋大学.
- ⑪ 本田 智, 林 博規: 超極細ワイヤを用いたマイクロねじ・マイクロナットの研究(第2報), 2011年度精密工学会春季大会学術講演論文集, L05, pp873-874, 2011. 03. 14, 東洋大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本田 智 (HONDA SATOSHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 90219238