

# 論文内容要旨 (和文)

平成 15 年度入学 大学院博士後期課程 システム情報工学専攻 エレクトロメカニカル工学講座

学生番号 03522304

氏 名 高橋 徹



論文題目 ボルト締めランジュバン型振動子の最適設計に関する研究  
—締め付けによる圧電素子への圧縮与圧の最適化について—

現在、超音波は様々な分野において応用されている。その応用はおおまかに分類すると、①情報的な応用、②動力的な応用の 2 つに分類することが出来る。超音波が用いられ始めたのは①の情報的な応用が最初である。情報的な応用例としては、SONAR(SOUND Navigation And Ranging)や魚群探知機、超音波センサ、超音波を用いた非破壊検査などがある。次に確立したのが②の動力的な応用である。これは、超音波振動のエネルギーそのものを利用するもので、強力超音波技術とも呼ばれている。この動力的な応用例は、超音波加工、超音波洗浄、超音波溶接、超音波モータなどがある。①の情報的な応用分野では、大きなパワーを必要とする場合はそれほど多くない。ただ、主に幅の狭いパルス状の信号を扱う事が多いため、広帯域な周波数特性を持つ必要がある。そこで、この場合には、超音波を発生させる振動子として圧電材料単体が用いられる事も珍しくない。圧電材料単体では、大きなパワー(振幅)を得る事は難しいが、共振周波数が高くなる事で、より解像度の高いセンサ等を作ることが出来る。

逆に、②の動力的な応用の場合、超音波振動そのもののパワーを利用し、加工や洗浄を行うので、大きなパワーを出せる事が必須条件になる。周波数特性は、大きなパワーを取り出せる共振周波数付近でのみ駆動させるため、広帯域な周波数特性を持たせる必要は無い。この場合は、圧電材料単体では求められる特性を満足することが出来ないため、現在一般的に用いられているのは、ボルト締めランジュバン型振動子(以下 BLT)と呼ばれる振動子である。

様々な分野にわたり使用されているこの BLT であるが、応用される目的が違えばおのずと求められる特性も変わってくる。一例を挙げればプラスチック接合がある。プラスチック接合に用いる BLT には高周波かつ共振尖鋭度 Q の高いという特性を持つ BLT が望まれる。最も簡単な BLT の高周波化は、その全体を小さくしてやればよい。しかし、安易に BLT を小型化すると、圧電材料の体積も小さくなり、大きな出力パワーが得られなくなってしまう。従って、圧電材料の体積を確保したまま、BLT の全長のみを短くしてやる必要がある。BLT の全長に比べて外径が大きくなる事により、金属ブロックと圧電材料との界面に生じる締め付けによる接触応力(圧縮与圧)が、外周部において著しく不足してしまい、振動時に界面が剥離してしまう。剥離が生じると機械的損失が増え、BLT 自体が発熱し、熱応力による破壊や経時的な圧電材料の劣化を引き起こす。そこで、界面の外周部にも適切な圧縮与圧がかかるように、全長と径の大きさを適切に設計する必要がある。この圧縮与圧の見積もりを正確に行うためには、異方性のある圧電材料の圧電性をも考慮に入れた極めて複雑な弾性接触問題を解く必要がある。そこで足立らの研究では、この弾性接触問題を解き、BLT の設計を行うために、有限要素法が用

いられてきている。これまで行われてきた研究より、BLTの設計に関して様々な知見が得られているが、未だに任意の特性を持たせたBLTの設計方法が確立されていない。前述しているように、大振幅振動可能なBLTの設計には、締め付けによる圧縮と圧の最適化が必要不可欠であり、それを確実に実現する手法がまだ確立されていないのである。

そこで、本研究では、締め付けによって金属ブロックと圧電材料との界面に生じる圧縮と圧に着目した。圧縮と圧の見積もりを圧電性を考慮に入れた有限要素法解析にて行い、その妥当性を実際にBLTを製作し、確かめた。実際には圧縮と圧をそのまま測定することが困難であるので、締め付けによってボルトに生じるひずみをひずみゲージを用いて測定し、その実測値と数値解析で求めた値と比較する事で数値解析の妥当性を評価した。また、BLTに用いられるねじ山の形状についても検討を行った。通常、BLTに用いられるねじは三角ねじである。そこで、三角ねじを用いた場合での数値解析とひずみの実測を行った。その結果、解析はある程度までは妥当であること、また、ねじ山で塑性変形が起きてしまっているのではないかという事が分かった。この結果は、ねじピッチが細かいものを使用すると、塑性変形を起こしやすいとも言える。そこで、より大きな力がかかっても大丈夫である台形ねじの形状を採用した。しかし、台形ねじでは、細かいピッチのものはJIS規格には存在せず、ピッチ1.5mmのものが最小である。ピッチが違ってしまうので、締め付け角度で比較するのではなく、締め付け変位で三角ねじと比較した。その結果、ピッチが違っても、台形ねじを用いる事で三角ねじに比べ優位な点がある事が数値解析上で確かめられた。同じ締め付け変位を与えたと仮定すると、台形ねじを用いると、極細目の三角ねじに比べ、締め付けに用いるねじ山から一番遠いPZT外周部では圧縮と圧が不足しがちになる傾向が見られた。しかしながら、その他の場所では台形ねじを用いた方が三角ねじを用いた圧縮と圧に比べ、同程度もしくはそれ以上の与圧が加わっている事が分かった。さらに、十分な圧縮と圧を与える締め付け変位を実現する角度だけ締め付けても、台形ねじのねじ山部では塑性変形がおきにくいことも明らかになった。結果として、台形ねじの形状を採用する事の優位性が数値解析上で確認された。実際に台形ねじを採用したBLTを試作し、ひずみゲージを用いた測定を行った所、この数値解析を裏付ける結果が得られた。ここまでの成果をまとめ、これまでになかった新しいBLTの構造提案を行った。

# 学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成20年 2月20日

理工学研究科長 殿

## 課程博士論文審査委員会

主査 足立 和成

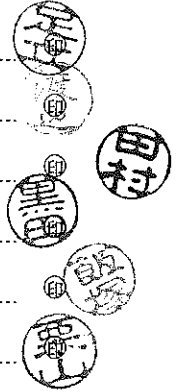
副査 渡辺 一実

副査 田村 安孝

副査 黒田 充紀

副査 飯塚 博

副査 栗山 卓



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

## 記

### 1. 論文申請者

専攻名 システム情報工学 専攻  
氏名 高橋 徹

### 2. 論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

ボルト締めランジュバン型振動子の最適設計に関する研究  
— 締め付けによる圧電素子への圧縮与圧の最適化について —

### 3. 審査年月日

論文審査 平成20年 2月 1日 ~ 平成20年 2月20日  
論文公聴会 平成20年 2月20日  
場所 山形大学ベンチャービジネスラボラトリー・セミナーホール  
最終試験 平成20年 2月20日

### 4. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入すること。)

- (1) 学位論文審査 合格  
(2) 最終試験 合格

### 5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200字程度)

別紙のとおり

### 6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

## 別紙

専攻名	システム情報工学専攻	氏名	高橋 徹
学位論文の審査結果の要旨			
<p>本論文はその序章で、超音波工学、わけても強力超音波の工業的応用においてボルト締めランジュバン型振動子 (BLT) が広く使用されてきた歴史と現状について述べ、未だに所望の性能を実現するその系統的な設計手法が確立されていないことを指摘している。著者はその理由として、BLT の構造におけるボルト締めによる金属ブロックと PZT セラミックスなどに代表される圧電素子との界面における静的接触応力 (圧縮与圧) の定量的把握に圧電性を考慮した複雑な弾性接触問題を解かねばならないことをあげ、研究の目的がこの圧縮与圧分布の最適化にあることを述べている。その上で第 1 章では、研究対象となった BLT の構造、設計手法における要諦、製作工程の詳細を説明し、第 2 章ではこうした研究のために開発された二次元有限要素解析システムの概要、解析時の要素分割、各種境界条件、界面における圧縮与圧を評価するための指標としての「応力比率」、即ち、振動時の動的振動応力に対する圧縮与圧の比の導入、金属ブロックの締め付け角度 (金属ブロックの回転角度) の定義などについて説明している。第 3 章では、締め付けボルトのネジ山に三角ネジを採用した場合の上記弾性接触問題の解析結果を示し、その結果の妥当性を、中空の締め付けボルト内外表面の歪みの歪みゲージによる実測することで確認し、一定以上の締め付け角度ではネジ山の塑性変形による現象の非線型が顕著になることを指摘している。第 4 章では同様の解析とその妥当性の実験的確認を、台形ネジを採用した場合について行い、当該界面における振動時の動的せん断応力に抗する十分な静的接触応力を確保する上での台形ネジの優位性について述べている。第 5 章では、それまでの解析並びに実験結果を基に、当該界面における圧縮与圧を最適化する BLT 構造に関して提案し、実際にその BLT を試作して特性の確認を行なうとともに、実際にそうした BLT を製作する上での技術的問題について論じたうえで、第 6 章では本論文全体を纏めた上で、本研究成果が BLT の大量生産技術の確立に繋がるものであり、それが広く用いられている強力超音波の技術の応用範囲大きく広げることにも貢献するものであることを主張している。</p> <p>本論文の内容に関してはその大部分が、以下に掲げる有力な学会論文誌上で、論文申請者を筆頭もしくは第 2 著者として、印刷公表済みかあるいは印刷公表が決定されている。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. J. Acoust. Soc. Am. Vol.116, No.3, pp.1544-1548 (2004)、(第 2 著者として)</li> <li>2. 日本音響学会誌 60 巻 8 号 441-450 頁(2004)、(筆頭著者として)</li> <li>3. Jpn. J. Appl. Phys. [平成 20 年 2 月 4 日掲載決定通知]、(筆頭著者として)</li> </ol> <p>また、本論文の内容でまだ公表されていない一部に関しても現在、有力な学会論文誌への投稿を論文申請者自身が準備中であることを申し沿える。</p> <p>以上を要するに、本論文は、ボルト締めランジュバン型振動子の設計に関して新規性が高く重要な知見を与えている点において、工業的・工学的に極めて大きな価値を有することから、博士 (工学) の学位論文として相当なものと認められるので、合格と判定する。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>公聴会直後に博士 (工学) の学位の授与認定に係る最終試験のための口頭試問を行い、当該博士候補者がその学位論文の内容のみならず、関連分野である超音波工学全般に関する十分な知識と見識を、有していることが確認された。また上述したように、学位論文の内容に関して筆頭著者として英文で原著論文を公刊していること、2006 年にハワイで行われた日米音響学会ジョイントミーティングで口頭発表を行っていること、並びに韓国国立ソウル大学との共同研究に参画した際に、ソウル大学内で 1 週間にわたってその共同研究者らと英語での意思疎通を図っていることなどから、当該分野の研究を独立して行っていくのに必要な最低限度の英語の運用能力を有していることが確認されたので、上記最終試験に合格したものと判定する。</p>			