

## 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 6 月 6 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010 年度 ～ 2012 年度

課題番号：22560728

研究課題名（和文）非線形超音波を利用したフランジ締結圧力評価

研究課題名（英文）Estimation of surface pressure on a flange connection using non-linear ultrasonics

研究代表者 長 秀雄 (CHO HIDEO)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：60296382

研究成果の概要（和文）：フランジ接合部の接触界面の密着状態を評価することを目的として非線形超音波および透過超音波の周波数応答を計測した。非線形超音波の計測では、入力超音波のエネルギーの一部が界面で反射の際に入力超音波の 2 倍の周波数成分を有する高調波に変換され、その変換効率が密着圧力に依存することを確認した。また、その変換効率から比較的低い密着圧力の分布を評価できることを示した。また、接触界面を透過する超音波は、接触圧力が低くなるほど高周波成分が小さくなることを確認し、周波数応答から広い範囲の圧力を評価できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：For estimating surface pressure on a flange connection, non-linear ultrasonics and transmission coefficient of longitudinal wave propagating through an contacting interface were utilized. In a non-linear ultrasonic measurement on which double frequency of the incident longitudinal waves (second harmonic waves) to an interface was obtained, it is confirmed that a generation coefficient of the second harmonic waves related to surface pressure on a contacting interface. Distribution of the surface pressure can be estimated by using generation coefficient of the second harmonic waves. On the other hand, it is confirmed that the transmission coefficient on higher frequency component decreased as the surface pressure decreased. With frequency dependence of the transmission coefficient, the surface pressure can be obtained in a wide pressure range.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 材料加工・処理

キーワード：非破壊検査

## 1. 研究開始当初の背景

非線形超音波は、従来の超音波検査では発見ができない微小なき裂や疲労や腐食損傷

の先端部に存在すると予想される閉じたき裂などの評価ができる方法として期待されており、設備の高度な安全性の担保手段とし

て検討されている。接触界面での超音波の非線形現象は材料自身が有する弾性定数の非線形とは異なり、界面部での不連続な接触によって発生する現象で弾性定数の非線形効果より大きく、1990年代になって多く研究がされている。たとえばスポット溶接部や拡散接合部の検査への適用などが検討されている。しかし、これらは同種金属の接合に関する研究が主で、異種金属や金属とガスケットのような弾性体に対する適用はなく、フランジ締結部の評価は行われていない。一方、フランジ締結部は石油精製や化学プラントでは無数に存在しており、締結部から漏洩を未然に防ぐための簡便検査もしくはスクリーニング手段が必要である。現在までは締結ボルトのトルク・軸力の管理が主な評価手段であるが、トルクや軸力は摩擦や配管のミスアライメントの影響を受け、必ずしも面圧を正確に評価できないという問題があった。

## 2. 研究の目的

金属と弾性体（ガスケット）界面での接触力分布を評価するために非線形現象の発生機構を明らかにするとともに非線形超音波の発生強度の界面接触圧力依存性を利用して接触圧力を定量的に簡便に評価することを目的とする。また、いわゆる接触による非線形だけでなく、接触状態に依存した透過超音波の周波数応答による評価も行った。

## 3. 研究の方法

図1に界面からの非線形超音波を計測するための実験装置図を示す。試験片として2枚のSUS304板(厚さ9mm,幅100mm)にガスケット(バルカー社製 No.6500,厚さ3mm,幅80mm)を挟んだものを用意し、インストロン圧縮試験機を用いて所望の接触圧力を与える。探触子は試験片表面に対向して取付け、それぞれバネを使用して固定した。計測は送信用探触子をファンクションジェネレータとパワーアンプを用いて異なる電圧のバースト波(5cycle)を印加して縦波を励起し、透過波は反対側に取り付けた探触子で、界面か

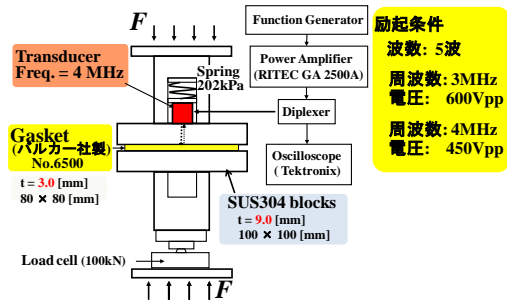


図1 圧縮試験機を用いた SUS304/ガスケット界面での非線形超音波計測実験装置

らの反射波は励起した探触子を用いて検出した。また、反射波の計測ではダイプレクサを用いて入力信号と反射信号を分離した。なお、あらかじめ界面における超音波変位をレーザ干渉計によって測定したところ、その変位と応力成分を評価したところ、3MHzでは変位 12.7nm、応力 6.42 MPa、4MHzでは変位 8.2 nm、応力 4.42 MPa であった。

次に、実際のフランジ締結部を模擬した実験では図2に示すように試験片としてSUS304製フランジ(5K15A, 直径80mm, 内径22mm, 厚さ9.0mm)を用いてガスケットの接触界面での接触応力分布を高調波振幅比から評価した。なお軸力測定のためSUS304製の締結ボルト(M12)に軸力用ひずみゲージをボルト内部に埋込んだ。測定は、トルクレンチを用いて軸力3.14kNでフランジ/ガスケット接触界面が3MPaとなるようにフランジを締結した後、共振周波数4MHzの探触子を202kPaで押し付けて励起周波数3MHzで600Vppと4MHzで450Vppを用いて界面からの反射高調波を計測した。また、接触圧力を測定するため計測側とは反対側のフランジ/ガスケット界面に圧力測定フィルムを挿入した。

一方、縦波超音波の界面透過率の周波数依存

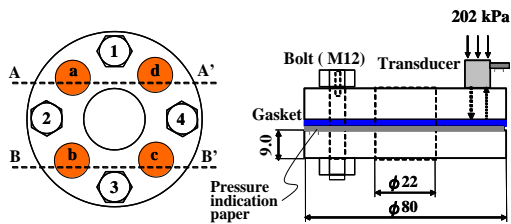


図2 フランジ締結体における接触面圧分布評価

性の計測は図3に示す様な装置を用いた。音源には、パルス YAG レーザによるグリースのアブレーションを利用することで広帯域の周波数成分を有するパルス波を用いた。また、検出にはレーザドップラ振動計を用いて音源真裏の面外変位速度の計測を行った。この試験では試験片として厚さ15mmのアルミニウム合金を用いた。

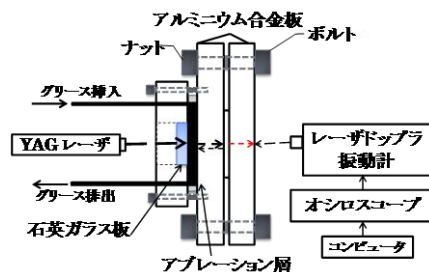


図3 透過超音波による界面接触状態の評価試験装置

## 4. 研究成果

図 4 に図 1 の実験装置を用いて接触圧力 1.0 MPa 時の透過波形とそのパワースペクトラムを示す。スペクトルには、入射超音波（基本波）の周波数である 3MHz の他に 6MHz にもピークが観察されており、高調波成分が基本波と比べて-28dB の強度で検出されていることが確認できる。

図 5 に各接触圧力での高調波振幅比を示す。

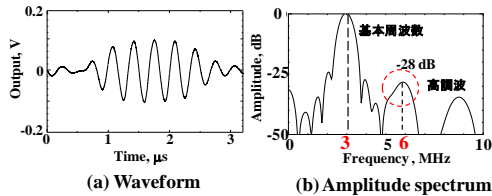


図 4 検出波形とその振幅スペクトラム

高調波振幅比は低接触圧力領域から接触圧力増加とともに単調減少しており、低接触圧力領域では-2.5dB/MPa で低下し、超音波の有する応力(図中の破線)以降は傾きが-0.8 dB/MPa に減少し、10MPa 近傍では予め測定した探触子/試験片面での高調波振幅比(-46dB)に収束した。図中のシンボルは負荷および除荷過程で計測した結果を示している。

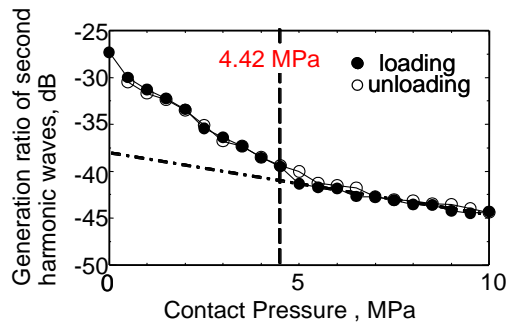


図 5 接触圧力と高調波振幅比

次に図 2 に示したフランジ締結体を用いて同様に手法を用いて非線形超音波の計測を行った。この実験では故意にフランジ面の圧力分布を作るために図 2 中の 4 番ボルトの軸力

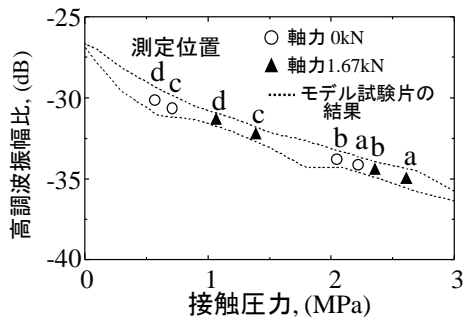


図 6 各測定位置での高調波振幅比とモデル試験片での測定結果(点線)

を故意に 0kN および 1.67kN とした。図 6 に各測定箇所の高調波振幅比とインストロン圧縮試験機での各接触圧力における高調波振幅比(▲を点線で連結)を示す。4 番のボルト軸力 0kN の場合(a), 高調波振幅比は各位置において (a)-34.0dB (b)-33.8dB (c)-30.7dB (d)-30.1dB であり, ボルト軸力 1.67kN(b) では (a)-35.4dB (b)-34.6dB (c)-32.3dB (d)-31.2dB であった。いずれの場合も高調波振幅比は軸力を低下させた 4 番ボルト近傍の測定位置(c),(d)で大きく, 4 番ボルトの軸力が低いほど大きい。モデル試験片での高調波振幅比から各測定位置における接触圧力を推定したところは 4 番ボルトの軸力 0kN の場合, 測定位置(a)(b)では 1.8~2.2MPa 測定位置(c)(d)では 0.5~1.0MPa、軸力 1.67kN では (a)(b)2.2~2.6MPa, (c)(d)0.9~1.4MPa であった。次に 4 番ボルト軸力 0kN 時の圧力測定フィルムでの接触圧力測定結果を図 7 に示す。図中の網掛け部は探触子の接触領域を示している。探触子設置領域内で応力はばらついているが最大圧力は(a),(b)では約 2.2MPa, (c)1.2MPa, (d)0.7MPa であった。また軸力が 1.67kN は (a),(b)約 2.2MPa, (c)(d)1.5MPa であり高調波振幅比での推定結果と概ね一致しており界面での高調波振幅比を利用することでフランジ/ガスケット界面での接触圧力分布が推定できた。

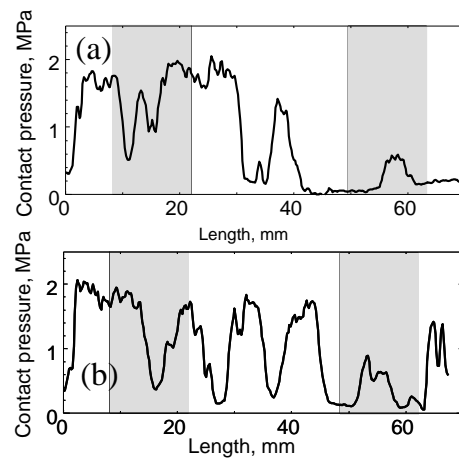


図 7 図 2 中の A-A'(a)および B-B'(b)線状の感圧紙で計測した応力分布

次に縦波の透過率の周波数依存性から接触圧力を推定した結果について示す。測定は図 3 に示した装置を用いて、レーザエネルギー 125 mJ, 接触圧力を 0.97 MPa から 1.98 MPa に変化させて、その時の透過波形を計測した。図 8 に各圧力における透過波形と振幅スペクトラムを示す。透過波の振幅は接触圧力とともに大きくなっていった。一方、最大強度を示す周波数(周波数ピーク)は接触圧力が 0.97MPa では 0.61MHz であったのに対し、

接触圧力が高くなると高周波側にシフトしており、接触圧力 1.98MPa では 3.38MHz と約 2 倍であった。

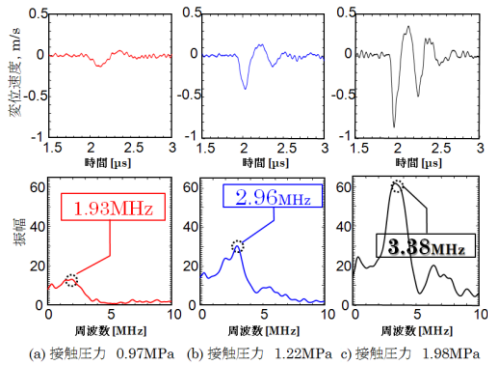


図 8 各接触圧力における透過波形 (上段) とその周波数応答 (下段)

次に接触圧力とピーク周波数の関係における入射振幅依存性評価をするために、接触圧力 0.35MPa, 1.15MPa, 1.84MPa においてレーザーエネルギーを 45~161mJ で変化させた時の透過振幅(Peak to peak 値)とピーク周波数との関係を計測した(図 9). 各接触圧力において透過振幅によらずピーク周波数はほぼ同じであり、ピーク周波数は接触剛性のみ依存している。

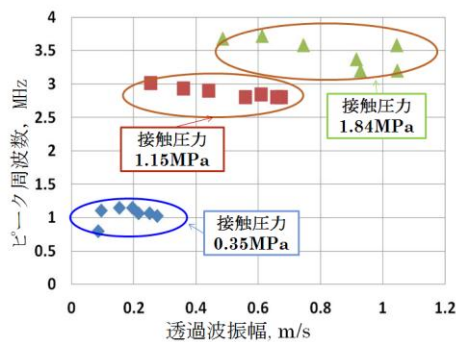


図 9 透過波振幅とピーク周波数の関係

次に界面の表面粗さ(接触剛性)との関係を検討した。図 10 に接触界面の表面粗さが異なる試験片で構成された界面を透過した時のピーク周波数と接触圧力の関係を示す。中抜きのシンボルの表面粗さは  $Ra=0.16\mu m$ ,  $0.18\mu m$ , 塗りつぶしのシンボルの表面粗さは  $Ra=0.16\mu m$ ,  $0.77\mu m$  での結果である。なお粗い表面は #180 のエメリー紙で研磨して作製した。表面粗さの異なる 2 つの試験片では接触圧力とピーク周波数はいずれの場合も直線関係にある。しかし表面粗さの粗い試験片 ( $Ra=0.16\mu m$ ,  $0.77\mu m$ ) では傾きが小さい。表面粗さが粗い場合、同じ接触圧力でも真実接触面積が小さくなるため接触剛性が低くなる。よって、接触剛性が小さいため傾きが小さくなったと考えられることができる。したがって、接触圧力を定量評価するためには表面粗さをあらかじめ知る必要が

あるが現実の構造では不可能である。しかし、表面粗さがほぼ均一と予想される同一接触面内の圧力分布の定量的な評価をすることは可能と考えている。また配管のフランジ締結部のように界面にガスケットが挿入される場合、固体-ガスケットの界面では弾性率の低いガスケットだけが主に変形することからフランジ表面の粗さの影響は受けにくいと予想される。そのためガスケットを含んだフランジ締結部での接触剛性は、ガスケットの剛性のみが影響するため、ピーク周波数から接触圧力を評価することが可能であると考えている。

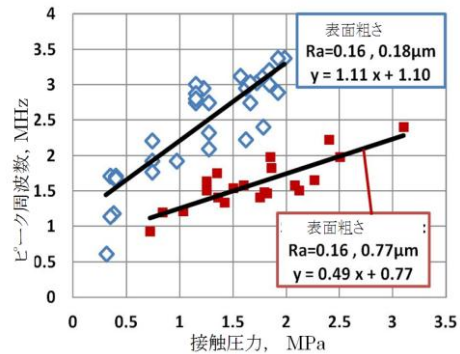


図 10 界面粗さの異なる試験片での計測結果

次に透過波の振幅スペクトルから圧力分布の評価が可能か検討した。すなわち、接触界面に故意に圧力分布にばらつきを生じさせるため 4 本中 1 本のボルトの締付トルクを低下させて透過超音波から面圧分布の評価を行った。このとき、接触界面には厚さ  $90\mu m$  の圧力測定フィルムを 2 枚(ツーシートタイプ)挿入して面圧分布を測定した。図 11 に 1 本のボルトの締付トルクを  $7.5N \cdot m$  (他の 3 本は  $10N \cdot m$ ) とした時の圧力測定シートで計測した界面圧力分布を示す。圧力は約  $1.00MPa \sim 12.75MPa$  の範囲でばらついており、ボルトの締結トルクを低下させた x 軸の負の領域の圧力が著しく低下している。

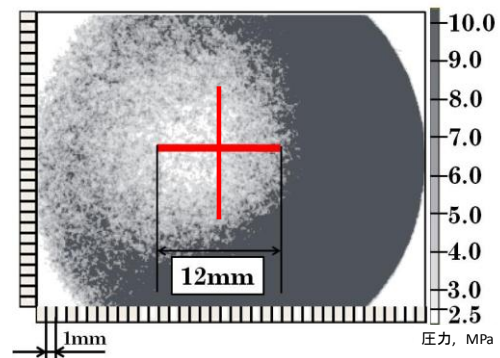


図 11 感圧紙で計測した面圧分布

次に図 11 中に 2 本の赤線上を 1mm ステップ

で透過波のピーク周波数を計測した結果を図 12 に示す。また、感圧紙で計測した圧力分布も合わせて示す。なお左軸はピーク周波数を、右軸は接触圧力を示している。いずれの直線においても接触圧力とピーク周波数の挙動は一致しており、同一界面においてはピーク周波数が接触圧力の分布を評価できることが分かった。

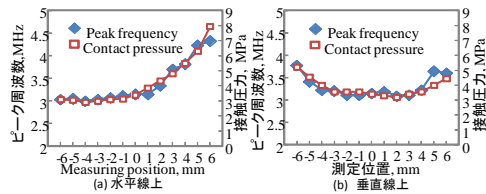


図 12 水平(a)および垂直(b)線上のピーク周波数と接触圧力の関係

図 13 には図 12 で示した透過波振幅スペクトルのピーク周波数と接触圧力との関係を示す。直線は線形近似直線である。接触圧力とピーク周波数には高い相関関係があることが確認できた。また、本手法では接触圧力約 2.50 MPa ~8.00 MPa の範囲において線形関係があることから、広い範囲での接触圧力の評価が可能である。

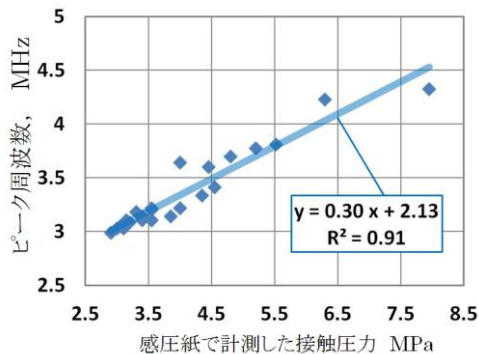


図 13 ピーク周波数と感圧紙で計測した接触圧力の関係

上記 2 種類の方法については学術雑誌および学会等で報告を行っている。今後はこれらの成果をもとに簡便な計測法を検討するとともに実フランジ接続部の評価を試みたいと思っている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 長 秀雄, 山田直紀, 松尾卓摩, 2 次高調波を用いたフランジ/ガスケット界面の接触圧力の推定, 超音波 techno, 24(5), pp.66-70 (2012) (査読無し)

- ② 長 秀雄, 山田直紀, 松尾卓摩, 高調波超音波を用いたフランジ面接触圧力の計測, 非破壊検査, Vol.60, No.6 (2011) pp.333-334 (査読あり)

1. [学会発表] (計 2 件)

- ① H.Cho, R.Hosaka and T.Matsuo, "Estimation of Contact Pressure of Solid-Solid Interface by Pulse Waves", 3rd Asian Symposium on Materials and Processing 2012, India, August 2012, NDTC3 pp.1-2(CD-ROM)

- ② H. Cho, N. Yamada and T. Matsuo, "Evaluation of surface pressure of flange connection by second harmonic waves", Proceeding for international conference on experimental mechanics (2010,11) Paper No.1473 in USB, Malaysia

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者 長 秀雄 (CHO HIDEO)  
青山学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号：60296382

