

令和 3 年 5 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04023

研究課題名（和文）超音波パルスの瞬時振動数変化を利用した歯科インプラントの検査技術

研究課題名（英文）Inspection technique of dental implant with instantaneous frequency of ultrasonic pulse wave

研究代表者

井上 卓見（Inoue, Takumi）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40274485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、申請者が提案した超音波パルスを利用する診断技術を応用し、インプラントねじの締結状態（締付トルク）を定量的に評価する技術を提案した。まず、縦波である超音波パルス波の一部がねじ山を透過する際に横波に変換されることを見出し、この横波の瞬時振動数が締付トルクに従って重要な変化を示すことを明らかにした。次に、締付トルクをねじ山間の接触剛性として間接的に表現、同定する方法を実施した。その結果、推定された締付トルクは実際に与えたトルクよりは若干小さい値ではあるものの、比較的良好な精度で推定できた。これにより、インプラントねじの締結状態の定量評価を可能とする基礎技術が確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

歯周病等により失われた歯に代わり歯科インプラント（人工歯）が広く用いられてきている。一方で、インプラントねじの緩みにより侵入した細菌に感染し、歯槽骨や顎骨が溶けインプラントが脱落する問題が知られている。特に、患者が自覚できない程度の小さな緩みが問題とされ、この緩みを確実に検出する方法は未だ存在しないことから、臨床現場ではインプラントの締結状態を高精度に評価できる検査技術の確立が望まれている。本技術により歯科インプラント治療で懸案となっている大きな問題が解決されるとともに、人工関節など他のインプラント技術への応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a technique to evaluate the fastening torque of implant screw quantitatively was proposed by means of a diagnosis technique with ultrasonic pulse wave, which was devised by the applicant.

Firstly, a conversion of the ultrasonic pulse wave from longitudinal wave into shear wave during the transmission through the screw thread was found. And, the conversion revealed that an instantaneous frequency of the converted shear pulse wave significantly changes according to the fastening torque of the screw. Secondly, indirect expression of the fastening torque as a contact stiffness between internal and external screw thread was employed. Although the evaluated value was slightly lower than the real value, the fastening torque was evaluated in a relatively high accuracy. This study derived a basic technique enable us to evaluate the fastening torque of implant screw quantitatively.

研究分野：機械力学，振動学

キーワード：診断 超音波 信号処理 同定

1. 研究開始当初の背景

図 1.1 は歯科インプラントの模型であり図 1.2 にその断面図を示す。顎骨（アクリル製）にインプラント（人工歯根）を植え込み、その上に人工歯をねじ込む構成である。ねじ緩みは人工歯根および人工歯両方で発生し、侵入した細菌に感染することで歯槽骨や顎骨が溶けてインプラントが脱落する問題がある。患者が自覚できる緩みはすぐに矯正できるものの、自覚できない程度の緩みが症状を感じないまま細菌感染が進行するため問題であると言われている。インプラントをはじめ通常の歯科診察にはエックス線が用いられるが、図 1.3 に示すようにインプラント映像* はかなり不明瞭である。また、人工歯の固有振動数変化から緩みを検出する試みも行われているが、精度は良好ではない。



図 1.1 歯科インプラント模型

工業用のねじでは、歪みゲージを内部や側面に貼り付けて歪みの変化から緩みを検出する方法、あるいはねじの頭部から長手方向に超音波を投射して反射波の時間差を求め、ねじ長手方向の張力変化を推定し間接的に緩みを検出する方法等が採られている。しかしながら、前者は引出線が必要であること、後者はねじ頭部が露出していないことから、ともにインプラントねじの緩み検査への応用は現実的でない。したがって、現時点では問題となるインプラントねじの緩み検出を可能とする技術は存在しない。

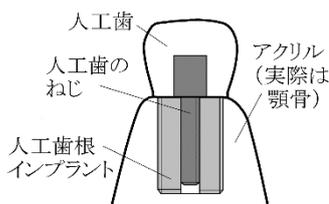


図 1.2 インプラント模型断面



図 1.3 インプラントのエックス線写真

* <http://www2.ha-channel-88.com/soudann/soudann-00028787.html>

2. 研究の目的

歯科インプラント（人工歯）が広く用いられる一方で、上記に指摘したように、インプラントねじには緩みにより侵入した細菌に感染し、歯槽骨や顎骨が溶けインプラントが脱落する問題がある。特に、患者が自覚できない程度の小さな緩みが問題とされ、この緩みを確実に検出する方法は未だ存在しないことから、臨床現場ではインプラントの締結状態を高精度に評価できる検査技術の確立が望まれている。本研究では、申請者が提案した、超音波パルスを利用する診断技術を応用し、インプラントの締結状態を検査・評価する技術を提案する。本技術により歯科インプラント治療で懸案となっている大きな問題が解決されるとともに、人工関節など他のインプラント技術への応用も期待できる。

3. 研究の方法

(1) 透過波の利用

以前着目していた超音波パルスの反射波ではなく、新たにインプラントねじを透過した超音波パルス波に着目する。まず基礎実験として、標準締め付けトルクを基準に数段階の緩みを与え、側面投射による透過超音波パルス波を測定し、締め付けトルクの変化を評価できるかデータ収集を行う。

(2) シミュレーションによる波動伝播経路の調査

実際の超音波パルス波には多くの透過経路が存在すると推測される。これらの経路を正確に知ることが現状の問題に対する鍵となる。そこで、伝播経路を正確に捉えるため超音波パルス波の波動伝播シミュレーションを行う。シミュレーションには購入したソフトウェアを用いる。まずは簡単のため二次元の波動伝播シミュレーションを行う。ねじのピッチを考慮して、入射側のねじ山位置と透過側のねじ山位置は正確にモデル化し、インプラント透過波のあらゆる伝播経路を調査する。

(3) 締結トルクの定量評価

提案手法の実用化に向けては、ねじが締まっている、緩んでいるという相対的な評価だけでなく、定量的な締結トルクとしての評価が望ましい。そこでねじ山フランク間の接触を接触剛性でモデル化し、同定した接触剛性から間接的に締め付けトルクを定量評価する方法を提案する。

4. 研究成果

4.1 超音波パルス透過波におけるモード変換の利用

ねじ山に入射した超音波の挙動と入射後の透過経路を有限要素シミュレーションによって詳細に考察したところ、縦波である入射パルスがねじ山フランクに入射した際、縦波のまま透過する成分だけでなく、横波にモード変換されて透過する成分が存在することがわかった。さらに、この横波にモード変換した透過波が、以下に示す通り締め付けトルクの評価に効果的であることがわかった。

縦波の入射パルスがモード変換せずに縦波のまま透過する経路は、図 4.1 に示す(a), (b)の 2 つに限定される。これらの経路を通るパルスをパルス A と呼ぶ。経路(a) は遊びフランク (Clearance flank) からボルト内へ進入し、圧力フランク (Load flank) から脱出する経路、経路(b) は圧力フランクからボルト内へ進入し、遊びフランクから脱出する経路である。

これらの経路には、ボルトの進入側、脱出側の両方で圧力フランクを透過する伝播経路が存在せず、ボルトの進入側か脱出側のどちらか一方で遊びフランクを通る。ねじの締結状態が遊びフランクに与える影響は小さく、パルス A は締結状態の変化の影響を受けにくいことがわかる。

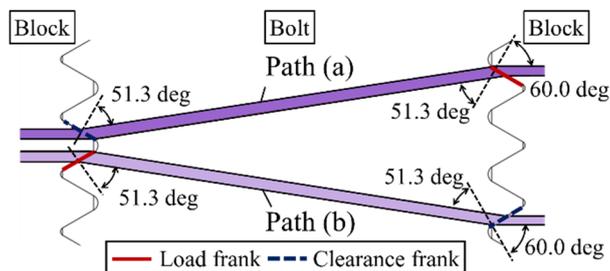


Fig. 4.1 Propagation paths of pulse A. During the propagation along these paths, ultrasonic pulses are longitudinal wave. Both of the paths (a) and (b) pass through a load flank and a clearance flank.

横波へのモード変換を含む透過経路として図 4.2 に示す 4 通りの経路 (c)~(f) が得られる。これらの経路を通るパルスをパルス B と呼ぶ。図 4.2 では縦波での伝播を実線の矢印、横波での伝播を破線の矢印として区別している。横波へのモード変換が生じる位置によって 4 つの経路は経路 (c), (d) および (e), (f) の 2 群に大別できる。

経路 (c), (d) はボルト内へ進入する際にモード変換する経路である。ボルト進入時、経路(c) はまず遊びフランクで反射して横波となり圧力フランクを透過する。次いで再度遊びフランクで反射し縦波に戻る。ボルトからの脱出時には圧力フランクを透過する。一方、経路(d) はボルトの進入時に 2 回圧力フランクで反射し、1 回遊びフランクを透過する。脱出時には遊びフランクを透過する。

これらに対して、経路 (e), (f) はボルトから脱出する際にモード変換する経路である。経路(e) は、まず圧力フランクを透過してボルト内へ進入する。ボルトからの脱出時には、遊びフランクで反射して横波となり圧力フランクを透過する。そして再度遊びフランクで反射して縦波に戻る。一方、経路(f) はボルトへの進入時に遊びフランクを透過した後、脱出時に 2 回圧力フランクで反射し 1 回遊びフランクを透過する。

このように横波にモード変換する経路には、ボルト内へ進入する際と脱出する際の両方において圧力フランクを透過して受信側探触子に到達する経路があることがわかる。ねじの締結状態は圧力フランクの接触状態に直接影響し、遊びフランクへの影響は小さい (ほとんどない) ことから、2 つのパルス A, B のうち、締め付けトルクの大きさに対してパルス B の波形の振幅変化が大きく、締付トルクの変化に敏感であるといえる。

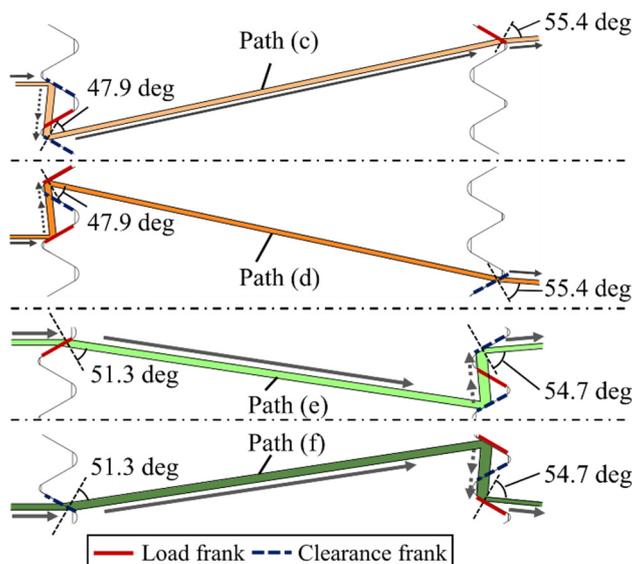


Fig. 4.2 Propagation paths of pulse B. These paths include two times of the mode conversion. These paths pass through two load flank.

4.2 透過超音波パルスと接触剛性を利用したねじ締結力の定量評価

4.1 節の有限要素法を用いた解析結果が示したように、パルス A はフランクを縦波のまま直進する経路、パルス B はフランクでの反射を伴う経路の成分である。これを踏まえ、ボルトの緩みを定量的に評価するための指標としてねじ山フランクの接触剛性を導入する。パルス A, B の瞬時振幅の極大値の大きさから遊び側および圧力側フランクの接触剛性を同定し、同定した接触剛性から締め付けトルクの評価、推定を行う。実験においては、超音波パルスの送信場所によって結果が異なることが予想されたため、5 か所の送信場所から超音波パルスを入射させた。それぞれの送信場所を A~E とする。

圧力側フランクの法線方向とせん断方向の接触剛性 k_n^p , k_t^p , 遊び側フランクの法線方向とせん断方向接触剛性 k_n^c , k_t^c の同定結果を表 4.1~4.5 に示す。それぞれ、送信場所 A~E の結果に相当する。表中の「-」は数値計算において解が存在しなかったことを示す。これは、該当する締結状態のときに、ねじ山表面での横波へのモード変換を妨げている何らかの要因が発生し、パルス B を成す成分の振幅が理論と一致しない値まで小さくなっていたと考えられる。

全体として、締め付けトルクの減少に伴い軸力を受け持つ圧力側フランクの接触剛性 k_n^p , k_t^p の値は減少しており、実際の現象に則している。また、締め付けトルクを 500 Nm としたときの各送信場

表 4.1 接触剛性の同定結果 (送信場所 A)

締め付けトルク(Nm)	k_n^p (MPa/nm)	k_t^p (MPa/nm)	k_n^c (MPa/nm)	k_t^c (MPa/nm)
100	0.1853	0.1019	0.1282	0.0705
200	0.2033	0.1118	0.1728	0.0950
300	-	-	-	-
400	0.2935	0.1614	0.2182	0.1200
500	-	-	-	-

表 4.2 接触剛性の同定結果 (送信場所 B)

締め付けトルク(Nm)	k_n^p (MPa/nm)	k_t^p (MPa/nm)	k_n^c (MPa/nm)	k_t^c (MPa/nm)
100	0.0725	0.0399	0.2281	0.1254
200	0.2899	0.1594	0.0799	0.0439
300	0.3634	0.1999	0.1145	0.0630
400	0.4539	0.2497	0.1415	0.0778
500	0.5245	0.2885	0.1485	0.0817

表 4.3 接触剛性の同定結果 (送信場所 C)

締め付けトルク(Nm)	k_n^p (MPa/nm)	k_t^p (MPa/nm)	k_n^c (MPa/nm)	k_t^c (MPa/nm)
100	-	-	-	-
200	0.3151	0.1733	0.2008	0.1105
300	0.5145	0.2830	0.2520	0.1386
400	0.6164	0.3390	0.2394	0.1317
500	0.7121	0.3917	0.2304	0.1267

表 4.4 接触剛性の同定結果 (送信場所 D)

締め付けトルク(Nm)	k_n^p (MPa/nm)	k_t^p (MPa/nm)	k_n^c (MPa/nm)	k_t^c (MPa/nm)
100	0.2744	0.1509	0.0918	0.0505
200	0.3824	0.2103	0.1013	0.0557
300	0.4088	0.2249	0.0936	0.0515
400	0.6373	0.3505	0.1593	0.0876
500	0.7086	0.3898	0.1920	0.1056

表 4.5 接触剛性の同定結果 (送信場所 E)

締め付けトルク(Nm)	k_n^p (MPa/nm)	k_t^p (MPa/nm)	k_n^c (MPa/nm)	k_t^c (MPa/nm)
100	0.3485	0.1917	0.1383	0.0761
200	0.5509	0.3030	0.1824	0.1003
300	0.9648	0.5307	0.1997	0.1098
400	1.0626	0.5844	0.2184	0.1201
500	0.9149	0.5032	0.2269	0.1248

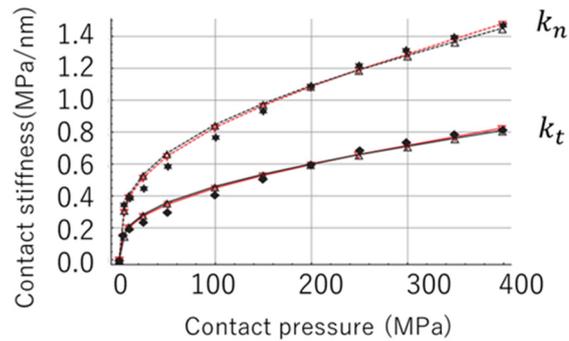


図 4.3 圧力と接触剛性の関係(表面粗さ $2.62 \mu\text{m}$ のとき). Gonzalez-Valadez らによる実験から得られたもの (Raffa et al, 2016)

所に対する圧力側フランク法線方向接触剛性の同定結果に着目すると、 $0.5 \sim 0.9 \text{ MPa/nm}$ の値を示している。

この値の妥当性を調べるため、締め付トルクから圧力側フランクにかかる接触面圧を計算する理論式と図 4.3 の Gonzalez-Valadez らによる実験 (Raffa et al, 2016) から得られた接触剛性と接触面圧の線図を用いる。

法線方向の接触剛性 $0.5 \sim 0.9 \text{ MPa/nm}$ のとき、図 4.3 から接触面圧は $50 \sim 150 \text{ MPa}$ であると推定される。一方で、締め付トルク 500 Nm に対するねじ山圧力側フランクにかかる面圧の理論値は $p = 123.4 \sim 215.2 \text{ MPa}$ であった。このことから、実験から同定された接触剛性の値は理論式で概算された値と比べ小さいものの、オーダーとしては同程度であり現実的な値であると考えられる。締め付トルクの減少に伴い、本実験から同定された圧力側フランクの接触剛性の値が減少していること、その値が現実的な値を示していることから、本研究で提案した透過波の振幅から接触剛性を同定し、締め付トルクを評価する手法は有効であると結論付けられる。

4.3 結 言

ねじ山に入射した超音波の透過経路を有限要素シミュレーションによって詳細に調査し、縦波である入射パルスがねじ山フランクに入射した際、縦波のまま透過する成分と横波にモード変換されて透過する成分が存在することがわかった。さらに、横波にモード変換した透過波が締め付けトルクの評価に効果的であることがわかった。

ボルトの緩みを定量的に評価するための指標としてねじ山フランクの接触剛性を導入した。縦波のまま透過する成分と横波にモード変換されて透過する成分の瞬時振幅の大きさから、遊び側及び圧力側フランクの接触剛性を同定し、締め付けトルクの大きさが概ね評価できることを示した。

文 献

Maria Letizia Raffa, Frédéric Lebon and Giuseppe Vairo, Normal and tangential stiffnesses of rough surfaces in contact via an imperfect interface model, International Journal of Solids and Structures, Vol. 87 (2016), pp245-253.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KADOWAKI Ren, IKEDA Shoki, INOUE Takumi	4. 巻 85
2. 論文標題 Diagnosis of bolt loosening using reflected ultrasonic pulse	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 18-202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ren Kadowaki, Takumi Inoue, Kentaro Kameda, Kazuhisa Ohmura
2. 発表標題 A New Testing Method for Bolt Loosening with Transmitted Ultrasonic Pulse
3. 学会等名 Asia Pacific Vibration Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保 知輝, 井上 卓見, 門脇 廉, 大村 和久
2. 発表標題 超音波パルスの瞬時振動数を用いた機械内部の接触面圧評価
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井林 洗一, 井上 卓見, 門脇 廉
2. 発表標題 超音波エコーの干渉を利用した物体表面近傍の異常診断
3. 学会等名 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川北 直史, 井上 卓見, 門脇 廉
2. 発表標題 超音波パルスを用いたボルトナット締結体の緩み評価 (接触剛性の推定値の改善)
3. 学会等名 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大久保知輝, 井上卓見, 門脇廉, 大村和久, 森健太
2. 発表標題 超音波の瞬時振動数を用いた隙間寸法の計測
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀田健太郎, 井上卓見, 門脇廉
2. 発表標題 瞬時位相の時間周波数表現に基づく重畳超音波エコーのパラメータ同定
3. 学会等名 第18回 評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門脇廉, 亀田健太郎, 井上卓見
2. 発表標題 ねじ山に入射する超音波のモード変換を利用したボルトの緩み診断
3. 学会等名 九州ダイナミクス&コントロール
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森健太, 井上卓見, 門脇廉
2. 発表標題 超音波パルスの瞬時振動数に着目した機械部品間の接触面圧推定
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀田健太郎, 井上卓見, 門脇廉, 大村和久
2. 発表標題 透過超音波パルスの瞬時振動数に着目したボルトの締結力評価
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田凜太郎, 井上卓見, 門脇廉, 大村和久
2. 発表標題 超音波パルスのモード変換を利用したボルト緩み診断手法の開発
3. 学会等名 第17回 評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>1. 歯科インプラントにおけるねじの緩みの問題 http://dynamic.mech.kyushu-u.ac.jp/Research/Re_Dental_inplant.html 超音波瞬時振動数応用例 1 : 歯科インプラント等締結部の評価技術 http://dynamic.mech.kyushu-u.ac.jp/Re_Dental_inplant.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------