# 超音波法によるグラウンドアンカーの緊張力推定手法に関する研究

平成 21 年 2 月 24 日

京都大学工学部地球工学科土木コース

河合 啓介

# 要旨

斜面に導入されている多数のグラウンドアンカーの中には，著しく性能が低下しているものが確認されており，限られた予算制約のもとで，適切に効率よく点検・補修・更新する必要がある。しかし，アンカーの維持管理法は確立されておらず，特にアンカーの性能低下を定量的に評価できる緊張力の測定は十分に行われていないのが現状である。その理由の一つとして，リフトオフ試験による緊張力の測定が高コスト，長時間を要するということが挙げられる。そこで，本研究は簡便なグラウンドアンカーの緊張力推定手法を検討するために，超音波法を用いた。本研究は，鋼棒タイプ，およびより線タイプで，緊張力と超音波特性パラメータの関係を検討することを目的とした。

本研究で得られた成果として，鋼棒タイプの場合，緊張力とよい相関が見られる超音波特性パラメータを確認することができた。また実験結果から，今後の課題をあげることができた。

第 1 章　序論 ..... 1
1.1 研究の背景 ..... 1
1.2 研究の目的 ..... 3
1.3 既往の研究 ..... 3
1.4 本論文の構成 ..... 4
第 2 章　超音波 ..... 5
2.1 概説 ..... 5
2.2 種類 [9] ..... 5
2.3 工学的利用 [10] ..... 6
2.4 超音波計測手法 ..... 6
2.5 超音波波形の特性パラメータ ..... 7
2.5.1 最大振幅比（パーセンテージ表示） ..... 7
2.5.2 到達時間 ..... 7
2.5.3 エネルギー ..... 7
2.5.4 超音波の伝播速度 ..... 8
2.6 超音波波形の周波数領域への変換 ..... 8
2.6.1 離散フーリエ変換 [11] ..... 8
2.6.2 離散フーリエ変換を用いた Partial power ..... 10
2.6.3 ウェーブレット変換 [12] ..... 11
2.6.4 ウェーブレット変換を用いた各周波数の到達時間 ..... 12
第 3 章　超音波法を用いたグラウンドアンカーの緊張力推定実験 ..... 13
3.1 目的 ..... 13
3.2 方法 ..... 13
3.3 概要 ..... 13
第 4 章　実験の結果と考察（鋼棒タイプ） ..... 16
4.1 最大振幅比 ..... 16
4.2 ウェーブレット変換を利用した特定周波数の到達時間 ..... 17
4.3 離散フーリエ変換を利用した Partial power ..... 19
第 5 章　実験の結果と考察（より線タイプ） ..... 21
5.1 最大振幅比 ..... 21
5.2 ウェーブレット変換を利用した特定の周波数の到達時間 ..... 22

5.3 離散フーリエ変換を利用した Partial power ..... 23
第 6 章　まとめと今後の課題 ..... 25
6.1 まとめ ..... 25
6.1.1 鋼棒タイプ ..... 25
6.1.2 より線タイプ ..... 25
6.2 今後の課題 ..... 26
**参考文献** ..... 28
**謝辞** ..... 29

# 第1章　序論

## 1.1　研究の背景

グラウンドアンカー（以下，アンカーと称す）は緊張力を地盤，構造物に伝達するためのシステムで，アンカー体，引張り部，およびアンカー頭頂部によって構成され，自然斜面や切土，構造物等の安定化を図る目的で用いられている。工期の短縮，工事費の節減等の経済性にも優れた工法として，昭和32年頃（1957年）に我国で導入されて以来，広範に利用されるようになった。しかし，近年になり主に長期間供用したアンカーに，その性能が低下したものが多く確認されるようになり，アンカーの引張り材（テンドン）の破断や頭部の落下，浮き上がり，斜面・構造物等の変状などの問題が報告されている[1)]。特に1988年に土質工学会（現：地盤工学会）で制定された「永久構造物として必要な防食に関する性能保証の基準」を満たしていないアンカー（以下，旧タイプアンカーと称す）で，上述の問題が顕在化している[2)]。一方，基準制定後に導入された適切な防食機能を具備するアンカー（以下，新タイプアンカーと称す）に関しても，導入後10年以内に損傷，または破断した例が報告されており，適切な維持管理手法の確立が求められている。現在，アンカーの維持管理は，「グラウンドアンカー維持管理マニュアル」[3)]に基づいて，予備調査，点検，健全度調査，対策の実施という流れで行われている（**図 1.1.1** 参照）。予備調査では既存資料から，旧タイプアンカー，新タイプアンカーの分類，周辺条件の把握などが行われ，点検内容が決められる。点検は，初期点検，日常点検，定期点検，および異常時点検から構成されており，主に目視点検で健全度が評価される。点検で詳細調査が必要と判断された場合に限り，テストハンマー，リフトオフ試験[4)]などにより健全性調査が行われ，最終的に増し打ち，再緊張などの対策が実施される。

アンカー頭頂部や地盤表面の目視点検より，外観からの性能評価はできるものの，アンカー部材の大部分は地中に埋設されていることから，地盤内のアンカーの劣化状態（腐食の進行，断面欠損率の上昇，緊張力の変動など）を把握することは容易ではない。例えばアンカーが既に破断している場合は，アンカー頭頂部の浮き上がりが生じることが多いため，目視点検により検知できる場合もあるが，内部劣化が進行しているものの破断にまで至っていない場合，目視点検で確認で

きるとは限らない。

上述のように地盤内のアンカーは主に腐食の進行，断面欠損率の上昇，緊張力の変動により劣化が進行するものと考えられる。アンカーテンドン部の腐食の発生から緊張力の低下に至るまでのメカニズムを**図 1.1.2** に示す。鋼材に腐食が発生することにより，アンカーのテンドン部の断面欠損率が上昇する。断面欠損率が上昇すると，断面の単位面積あたりに働く緊張力が大きくなるために，ひずみが増大する。ひずみの増大により鋼材のリラクゼーション（鋼材に一定のひずみを与えたままにしておくと応力が時間の経過とともに減少するという現象）が発生し，最終的に緊張力の低下が発生する。ここで，地盤内部のアンカーの腐食の進行，断面欠損率は目視または直接測定することができないので，緊張力を測定することによって，内部の劣化状態を推定・評価することが多い[5)]。

緊張力の測定方法に関して，さまざまな研究がなされているが，実用化に至っているは荷重計とリフトオフ試験による緊張力測定である。荷重計には様々なタイプがあるが，基本的にアンカー導入前にあらかじめ設置されるものである。荷重計は設置後，容易に計測可能であり，緊張力の経時的変化が測定可能である反面，荷重計を設置していない法面，あるいは荷重計の耐用年数が過ぎている場合，緊張力が測定できないという問題がある。また，劣化が顕在化する前に導入された旧タイプのアンカーには荷重計が設置されておらず緊張力が測定できない。このように荷重計が設置されていない場合や新設時にも規定のアンカーの緊張力を確認する目的でリフトオフ試験が行われる。リフトオフ試験は**図 1.1.3** に示すように，油圧ジャッキによりアンカーに緊張力を加え，緊張力と変位の関係から，アンカーに作用している緊張力を推定する手法である。リフトオフ試験は精度よく緊張力を測定することが可能であるが，緊張力の経時的変化をリアルタイムに測定できない。また，測定の際には，大規模な試験装置や測定器機が必要となり，足場の仮設，クレーン等による搬入・撤去，場合によっては道路の通行規制が必要となり，計測は長時間，高コストとなる。以上より，リフトオフ試験の簡略化，ならびに試験で用いる器機の軽量化，リフトオフ試験に比べ簡便に緊張力が測定可能な手法の開発が必要とされている[5)]。

## 1.2 研究の目的

先述のように，アンカーの残存緊張力の測定はアンカーの劣化の進行度，性能の低下を推定・評価する上で重要であるにも関わらず十分に実施されていない現状といえる。そこで本研究は，短いボルトの緊張力測定に応用されており，測定が簡便な超音波による方法（以下，超音波法と称す）に着目して研究を進める（超音波法の詳細は**第 3 章**で述べる）。本研究は，超音波法を用いたアンカーの緊張力推定手法の確立を目的とし，以下のように展開する。各緊張力で，アンカーの軸方向に垂直な方向を伝播する超音波波形を計測，および記録し，時間・周波数領域での信号波形から種々の特性パラメータとアンカーの緊張力との相関を検討する。そして，超音波法の緊張力測定への適用性，および今後の課題を検討する。

## 1.3 既往の研究

本節では，グラウンドアンカーの維持管理，緊張力測定に関する既住研究を概観し，本研究の位置付けを述べる。

大窪ら[5]は，高速道路の斜面に導入されているアンカーの維持管理に関して，リフトオフ試験で用いる試験装置の軽量化，あるいは全く別の簡便な緊張力測定手法の必要性を指摘した。

これを踏まえ，酒井ら[6]は，従来のセンターホール型ジャッキと同等の性能を有し，迅速にリフトオフ試験が実施できる，小型・軽量化を図った SAAM ジャッキの開発を行い，その有用性を示した。この軽量化された SAAM ジャッキを用いることで，リフトオフ試験の効率性は向上するものと考えられる。アンカーの緊張力測定で高い精度を要する場合は，上述の手法が有効であるものと考えられるが，高速道路の斜面だけでも現在12万本以上設置されているアンカーに対し，より多数のアンカーの性能を推定・評価する場合は，時間・コスト面に優れる測定手法が必要になる。

芥川ら[7]は，リフトオフ試験とは全く別の簡便な緊張力測定手法として，緊張力の変動にともなう透磁率の変化を用いた磁歪法を利用した簡便なアンカーの緊張力測定手法を提案している。磁歪法は主に地下空洞に導入されたPSアンカーを

対象に研究が進められているが，アンカーヘッドの形状，材質，寸法（大きさ）の違いにより，緊張力の変動にともなう透磁率の変化傾向に大きな差が生じるという問題を含んでおり，様々なタイプのアンカーに適用するまでは至っていない。

そこで本研究は，リフトオフ試験とは全く別の簡便な緊張力測定手法として，試験装置が軽量で，短時間で測定が可能な超音波法を用いて，アンカーの緊張力測定への適用性を検討する。

大津ら[8)]は鋼材の引張荷重強度比（緊張力測定によって得られる）と断面欠損率の関係，ならびに鋼材の断面欠損率と供用後経過年数の関係を，**図 1.1.4** と**図 1.1.5** に示す回帰線で近似した。同図を用いて，アンカー工の性能低下曲線を設定することにより，斜面のライフサイクルコストを算定し，これを判断指標とした合理的な斜面対策工の補修・補強計画を立案した。

超音波法により多数のアンカーの緊張力を測定することが可能になれば，上述の大津らの研究で，より多くの斜面を対象に，ライフサイクルコストが算定でき，合理的な斜面対策工の補修・補強計画の立案が可能になる。

## 1.4 本論文の構成

本論文は全 6 章から構成される。

第 1 章では本研究の背景，目的，および既要の研究について述べた。

第 2 章では本研究で用いる超音波法について概説するとともに，超音波の特性パラメータ，様々な解析手法について述べる。

第 3 章では超音波法を用いたグラウンドアンカーの緊張力推定実験について，実験の目的・位置づけ，および実験内容を詳述する。

第 4 章と第 5 章では鋼棒タイプとより線タイプについて，それぞれ実験結果と考察を述べる。

第 6 章では第 4 章と第 5 章のまとめとして考察，および今後の課題を述べる。

# 第2章　超音波

## 2.1　概説

超音波とは人間の耳で聞き取ることができない非可聴領域の波動で，一般 JIS の用語辞典では，「正常な聴力を持つ人に聴感覚を生じないほど周波数（振動数）が高い音波」と定義されている。周波数範囲が約 20kHz 以上の音波を示すことが多い。

## 2.2　種類 [9)]

超音波の種類は縦波，横波，および表面波があり，このような波の種類を振動モードという。また試験体の表面，他の物質との境界面，および試験体内の欠陥箇所などで振動モードが変化することをモード変換という。以下に各振動モードについて述べる。

○ 縦波（P 波）

超音波の振動は，伝播しようとする物質を構成している粒子の動きとして模式的に説明できる。縦波は粒子の振動が波の伝播方向と平行な方向すなわち縦方向に起こる波のことであり，粒子が密になっている部分と疎になっている部分が一定の間隔になっている。密と密あるいは疎と疎の間の距離を波長という。縦波は粗密波，P 波，あるいは圧縮波とも呼ばれ，固体，液体，および気体の中で伝播し，超音波の中では音速が最大である。本実験で使用した垂直探触子は主に縦波を入射させるものである。

○ 横波（S 波）

横波は粒子の振動が波の伝播方向と直角（垂直）な方向，すなわち横方向に起こる波をいう。横波は S 波，あるいはせん断波とも呼ばれており，固体中だけに伝播し，液体や気体の中は伝わらない。音速は縦波より遅く，約半分である。

○ 表面波（R 波）

表面波は材料の表面層だけを伝わっていく波である。表面から1波長分の非常に浅い層にエネルギーの大部分が集中しており，表面付近の粒子は，縦振動（粗密）と横振動（横ずれ）を混合したような挙動を示す。

### 2.3 工学的利用[10)]

超音波は光や電波と同じ波動エネルギーであるが，その特徴は光などに比べて伝播速度が遅く，異なる媒質に入射する場合に反射しやすいので，距離計，潜水ソナー，材料の欠陥深さの診断装置などに利用されている。また大きな音響エネルギーを伝播することができるので，種々の加工機，害虫の駆除，殺菌，動物の捕獲などにも利用されている。このように超音波の応用範囲は非常に広く，今後の発展が期待される技術分野の一つである。

超音波の応用分野は情報的応用，動力的応用，その他の応用に大別することができる。情報的応用とは，超音波そのものを情報として利用するもので，ここでは超音波センサが利用される。この場合，単に外界の超音波を受信するパッシブ方式（アコースティックエミッション）だけでなく，装置自身から超音波を発信し，その反響を検知するアクティブ方式がある。一般的な超音波試験法はアクティブ方式であり，本研究はこの手法を用いる。動的応用とは振動エネルギーそのものを動力的に応用するものと，熱に変換して利用するものがある。いずれも超音波エネルギーを優先するもので，強力超音波などがこの部類に属する。

その他の応用は，先ほどの二つに属さない特殊な作用である。これには害虫の駆除，各種治療，殺菌，動物の捕獲などが挙げられる。

### 2.4 超音波計測手法

超音波法には，反射波や透過波を利用し材料内部の不連続部などを調べる探傷法と，超音波の減衰，音速および周波数の変化を利用して，材料組成あるいは弾性係数などの物性や応力状態を調べる方法がある。探触子の配置により，表面法，透過法，反射法，斜角法などに分類される。超音波は検査目的や対象物によって，周波数が数 kHz の低周波域から 1 GHz に及ぶ高周波領域まで広範囲にわたって使用され，各種金属材料，セラミックス，複合材料，半導体，コンクリートなど，

広範な材料に用いられている。

通常，土木分野で行われる超音波探傷試験は，材料中の欠陥（亀裂）の位置，大きさ，程度などの探査が目的とされている。これは材料内部の損傷の程度によって，超音波の透過特性が変化することを利用している。一方，本研究ではこの超音波の透過特性を利用してアンカーの緊張力について検討する。想定されるメカニズムとして緊張力の変動にともない，アンカー頭部の締付け度合いが変化することを利用し，これに敏感な透過超音波のパラメータを検討する。

## 2.5 超音波波形の特性パラメータ

### 2.5.1 最大振幅比（パーセンテージ表示）

送信波の最大振幅値に対する受信波の最大振幅値の比をパーセンテージ（%）で表したものを最大振幅比と定義する。

一般的に超音波の振幅値は伝播距離に反比例し，伝播距離が長くなると，振幅値は小さくなる。これは，試験体内を超音波が伝播すると，伝播にともなう超音波の拡散損失や散乱減衰が生じるためと考えられている。本研究では緊張力が大きくなる程，アンカーヘッドと鋼棒，およびより線の締付け力が大きくなり，境界面で生じる散乱現象が小さくなるメカニズムを期待している。このパラメータは実験で直接得られる超音波の時間—振幅波形データから求められる。

### 2.5.2 到達時間

超音波が送信され，受信されるまでに要する時間を伝播時間といい，受信センサで検出された時間を到達時間という。一般に，伝播距離が既知の場合到達時間から伝播速度が，伝播速度が既知の場合は伝播距離が求められる。

### 2.5.3 エネルギー

計測機器により定義は異なるが，一般に超音波波形が振幅 $A_1$—$A_n$ の離散データの場合，エネルギー E は **(2.1)** のように定義される。

$$E = \sum_{i=1}^{n} (A_i)^2 \tag{2.1}$$

### 2.5.4 超音波の伝播速度

均一な半無限の弾性固体中の波速はヤングの弾性係数E，質量密度ρ，ポアソン比νの関数である。無限固体を伝播するS波とP波の波速は次式で示される。

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{2.2}$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1}{2(1+\nu)}} \tag{2.3}$$

Eはヤングの弾性係数，ρは質量密度，νはポアソン比，$C_p$（$V_p$）はP波の波速，$C_s$（$V_s$）はS波の波速である。

P波は一番速い速度で進行し，S波，R波と続く。理論上，P波，S波，R波の速度の比はポアソン比のみによって決まる。ポアソン比が0.18の場合，S波速度/P波速度は0.62，R波速度/P波速度は0.57となる。

## 2.6 超音波波形の周波数領域への変換

### 2.6.1 離散フーリエ変換[11)]

一般に波動現象が記録された波形に対しての波形解析は，スペクトル分析を示していることが多い。超音波法で用いる波形もスペクトル分析することによって，波形に含まれる周波数成分が判断できる。離散フーリエ変換の概念から任意の連続関数$f(t)$は，以下のような離散フーリエ変換された関数$F(t)$との関係が成立する。

$$F(f)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi ft}dt \tag{2.4}$$

$$f(t)=\int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{i2\pi ft}dt \tag{2.5}$$

式 **(2.4)** は離散フーリエ変換，式 **(2.5)** はフーリエ逆変換の式として知られている。スペクトル分析では，一般に $F(t)$ の絶対値をとった $|F(t)|$ をフーリエスペクトル，$f(t)$ の継続時間を $Td$ として $\frac{1}{T_d}|F(t)|^2$ がパワースペクトルと呼ばれている。波形の記録は，サンプリング間隔 $Td$ の時系列デジタル量として記録され，機器によっては波形の $F_s=\frac{1}{\Delta t}$ としてサンプリング周波数と呼ばれることもある。たとえば，$1\mu s$ のサンプリング時間間隔のことを，サンプリング周波数 1 MHz と表現することもある。

スペクトル分析を行うには，式 (2.4) にしたがって離散フーリエ変換を得ることが必要である。ところが，この場合 $f(t)$ がデジタル量として与えられているので，このようなデジタル量に対する離散フーリエ変換を高速に遂行する手段として開発されているのが FFT (Fast Fourier Transform) 法である。近年では FFT 法は PC により，波形記録装置と組み合わせて容易にスペクトル解析することができる。

FFT 法は，サンプリング間隔 $\Delta t$ ，サンプル数 N（ただし，N は 2 のベキ乗；$N=2^M$）の時系列デジタル量 $x_m=x(m\Delta t)$ に対する有限離散フーリエ変換および逆変換を実行するもので，式 **(2.4)** ，式 **(2.5)** は以下のようになる。

$$C_k=\frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1}x_m e^{-\frac{i2\pi km}{N}} \tag{2.6}$$

$$x_m=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}C_k e^{-\frac{i2\pi km}{N}} \tag{2.7}$$

このとき，フーリエスペクトル，パワースペクトルはそれぞれ $N\Delta T|C_k|$ ，

$N\Delta T|C_k|^2$ で与えられる。ここで，注意すべきは前述のようにサンプル数 N が 2 のベキ乗でなければならないということである。スペクトル各点は，時系列の区間 $\Delta T$ に対して，$\Delta f = 1/(N\Delta t)$ ごとに与えられ，$\Delta f$ のことを基本周波数と呼ぶ。式 **(2.5)** より，$x_m$ の N 個のデータから N 個の複素数 $C_k$ が得られる。複素数は実数部と虚数部より成り立つので N 個のデータから 2N 個の係数が決定されているように見える。これは，$e^{-\frac{i2\pi km}{N}}$ の性質から実際は $C_k$ の実数部は $f_{N/2} = N/2 \times \Delta f$ の N 個の中心周波数に対して対称，虚数部は逆対称となっている。スペクトル $N\Delta T|C_k|$ あるいは $N\Delta T|C_k|2$ では，$f_{N/2}$ はスペクトル分析可能な上限の周波数で Nyquist 周波数と呼ばれる。$f_{N/2} = N/2 \times \Delta f = 1/(2\Delta T)$ であるから，サンプリング間隔により，スペクトル分析の Nyquist 周波数は高くなるが，サンプル数が同じであれば基本周波数は大きくなって分析が粗くなる。

### 2.6.2 離散フーリエ変換を用いた Partial power

超音波波形の離散フーリエ変換結果において，全体の面積に対する，特定の周波数区間における面積を比で表した値である。フーリエ変換結果の周波数 $f_l$—$f_n$ に対応する周波数領域での振幅を $P_1$ — $P_n$ とする。周波数領域 $f_k$—$f_l$ での Partial power(PP) は

$$PP = \frac{\sum_{m=k}^{l} p_m}{\sum_{m=1}^{n} p_m} \tag{2.8}$$

と表される。

送信した超音波の振幅が一定でないときに，特定の周波数域の大きさを相対的に表すことができる。

### 2.6.3 ウェーブレット変換[12)]

ウェーブレット変換は周波数解析手法の一つであり，単位となる関数によって，信号を切り出したときの信号各部の大きさを示すものである。この基底関数としてのウェーブレットをマザーウェーブレット（ウェーブレット基底関数）という。ウェーブレット変換は，解析の対象となる信号 x(t) とマザーウェーブレット ψ(t) によって式 **(2.9)** で定義される。

$$W(b,a)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}x(t)dt \tag{2.9}$$

ここで a はスケーリングパラメータであり，マザーウェーブレットの伸縮比を決定する正の実数である。b は時間シフトパラメータであり，マザーウェーブレットの時間方向へのシフト量を決定する実数である。また，$1/\sqrt{a}$ は正規化のための係数である。さらに，$\overline{\psi}$ は $\psi$ の複素共役を意味する。この式によって求まる W(b, a) を信号 x(t) の連続ウェーブレット変換という。次に，逆ウェーブレット変換の定義式を示す。

$$x(t)=\frac{1}{C_{\psi}}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}W(b,a)\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\frac{da}{a^2}db \tag{2.10}$$

ここで，$C_{\psi}$ は式 **(2.11)** によって与えられるが，この逆変換式が成立するためには，マザーウェーブレット $\psi(t)$ が同式 **(2.11)** で示されるアドミッシブル条件を満たす必要がある。

$$C_{\psi}=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|}d\omega<\infty \tag{2.11}$$

この式は，$\psi(t)$ が大きな $t$ において十分に減衰し，時間平均が 0 となることを意味する。よって，一般的にはこのアドミッシブル条件として，式 **(2.12)** を用いることが多い。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0 \tag{2.12}$$

本実験ではマザーウェーブレット$\psi(t)$として**(2.13)**に示す一般的に使用されることの多いGaborウェーブレットを使用した。

$$\psi(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} e^{-ix} \tag{2.13}$$

離散ウェーブレット変換は以下のようになる。

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j t - k)} x(t)dx \tag{2.14}$$

### 2.6.4 ウェーブレット変換を用いた各周波数の到達時間

超音波が送信されてから特定の周波数成分が受信されるまでに経過した時間である。超音波波形をウェーブレット変換した3次元図を**図2.1**に示す。図の縦軸は周波数(MHz)，横軸は時間(sec)，色の濃淡は振幅を表している。この図の周波数1 MHzにおける時間－振幅の2次元図を**図2.2**に示す。この図から，1 MHzの周波数成分の到達時間が得られる。このようにウエーブレット変換結果を利用することにより，特定の周波数の到達時間が得られる。

# 第3章　超音波法を用いたグラウンドアンカーの緊張力推定実験

## 3.1　目的

本研究の目的は，超音波法などを用いて簡便にアンカーの緊張力を測定できる手法を構築することである。そこで本研究では，超音波ボルト軸力計での応用例がある超音波法に着目し，その適用性を検討する。

## 3.2　方法

超音波法を用いてアンカーの緊張力を推定する場合，第一に考えられる手法はアンカー頭頂部の定着具の上面から軸方向に超音波を送信し，岩盤内のアンカーの先端で反射した超音波を再び同箇所で受信し，その到達時間から直接アンカーの長さを推測するという手法である。このアンカーの長さから，伸び率を求め，最終的に緊張力を得ることが可能になる。この方法は，構造物などに設置されているボルトの軸力測定に利用された例はある。しかし，斜面に導入されているアンカーは比較的長さが長いことから地盤内アンカーの曲率，アンカー先端の平坦性により反射波に優乱などが生じ，精度よく波形初動が読み取れない場合や，推定長が意図した値とならない場合がある。そこで，本研究は短いボルトを対象にすでに研究開発されている超音波ボルト軸力計の測定方法を参照して，アンカー頭頂部のアンカーヘッドに軸方向に対し垂直に超音波を透過させ，間接的に緊張力の推定を試みる。具体的に二つの探触子を，鋼棒タイプおよびより線タイプのアンカーヘッドの側面に対面になるように配置し，一方の探触子から超音波を送信し，もう一方の探触子で受信し，緊張力に応じた超音波波形を計測する。

## 3.3　概要

○実験概略図

**図 3.3.1**，**図 3.3.2** に実験の概略図，および実験の写真を示す。探触子からの受信波形信号を，超音波探傷器（**図 3.3.3** 参照）とオシロスコープ（**図 3.3.4** 参照）に送信し，オシロスコープから波形データをデジタル信号として，コンピュータに送

信し，保存した。使用した器機は，デジタル超音波探傷器 EPOCH 4 PLUS （オリンパス製），デジタルストレージオシロスコープ（日本テクトロニクス製 TDS 2014 ）を使用した。

○ 定着具の形状

鋼棒タイプの形状を**図 3.3.5** に示す。一辺の長さ 37 mm の六角ナットで，高さは 95 mm のものを使用した。

より線タイプのアンカーヘッドの形状を**図 3.3.6** に示す。直径 110 mm ，高さ 60 mm のものを使用した。

○ 載荷方法

アンカーの緊張力は鋼棒，およびより線の一端を支圧板と定着具で固定し，もう一方の端部から油圧ジャッキで最大緊張力 600 kN を与える。ここで，最大緊張力は斜面に設置されているアンカーの 70 % が設定緊張力 500 kN 以下であることから決定した。緊張力は 0 kN ， 200 kN ， 400 kN ，および 600 kN と 200 kN 間隔の単調載荷により与えた。

○ 測定箇所

・鋼棒タイプ

測定箇所は，ナットの側面の中央 1 箇所とした。

・より線タイプ

より線タイプの場合，定着具の形状を考慮し，測定方向は**図 3.3.7** に示すように，A と B の二方向とした。定着具が下面に近づく程，より線を挿入する穴の直径が小さくなることから，この影響も検討できるように測定高さ位置は**図 3.3.8** に示すように，アンカーヘッド上面から 10 mm ， 20 mm ， 30 mm ，および 40 mm の 4 つの位置高さとした。

○ 使用探触子

超音波のいずれの周波数領域に緊張力とのよい相関が得られるか検討できるように，本研究では送受信ともに同種の， 1 MHz ， 5 MHz ，および 7.5 MHz の 3 種類

のコンポジット垂直探触子を使用した。

○探触子の接着条件

探触子の表面が平坦であるのに対し，より線タイプのアンカーヘッドの表面は曲率を有している。そのため，探触子をより線タイプのアンカーヘッド表面に直接取付けると接触状態が線接触となり，感度の高い超音波波形を送信，受信できない可能性があった。そこで，**図 3.3.9** に示すアクリル板を，探触子とアンカーヘッドとの間に設置することで，アンカーヘッド表面と探触子が面接触となるようにした。さらに本実験では，この接触条件による影響を確認できるように，アクリル板あり，なしの 2 種類を計測した。

# 第4章　実験の結果と考察（鋼棒タイプ）

## 4.1　最大振幅比

超音波探傷器で送信，および受信された超音波波形の振幅より，探触子ごとの各緊張力での最大振幅比を得た。その手順を以下に示す。

超音波の最短伝播経路は，超音波を送信する探触子と受信する探触子の線分上で，ナット→鋼棒→ナットの順に伝播することになる。ここで，ナットと鋼棒の隙間が同材質の鋼材で完全に構成されている場合（完全接触）を想定すると，ナットの伝播速度5,920 m/ sec，最短伝播距離 64 mm より，最短到達時間 10.8 μsec が得られる。これより，本実験で励起された超音波は， 10.8 μsec 以降に到達するものと考えられる。したがって，最大振幅比は，この時間以降に得られる超音波波形を抽出し，その最大振幅に基づき求めた。なお，送信波形の最大振幅に対する受信波形に含まれるノイズの振幅値の比は10 %程度である。これより，最大振幅比が10 %以下の場合，有意な受信波形とノイズとの識別ができないので，ここでは最大振幅比を 0 とした。

緊張力と最大振幅比の関係を**図 4.1.1** に示す。まず，アンカーの緊張力測定という観点から考察する。緊張力 200 kN を境界に，それ以上の緊張力で全ての探触子に有意な受信波形が確認できた。したがって受信波形が得られない場合，緊張力は 200 kN 以下であることを示唆している。例えば，設定緊張力が 500 kN のアンカーの残存緊張力を測定し，透過超音波が得られない場合（最大振幅比が10 %以下の場合），残存緊張力が 200 kN 以下であることを意味し，アンカーの性能が著しく低下しているものと判断できる。すなわち，この例のように最大振幅比を利用することで，アンカーの性能が概ね推定・評価できるものと考えられる。

次に，**図 4.1.1** で緊張力 200 kN—600 kN の範囲で，緊張力の増加にともない最大振幅比が増加傾向を示す要因について考察する。ナットと鋼棒の境界面は凹凸を含む曲面状であり，空隙を含んでいるものと考えられる。本実験は，超音波探傷試験のように空隙（きず）に向かって超音波を送信し，その反射波の超音波波形から試験体内部の空隙の位置，および大きさなどを推定することを目的とした実験・手法ではないので，ナットと鋼棒の境界に存在する空隙の位置，および大きさを詳細に推定することは難しい。よって，本実験の結果から，緊張力の増加に

ともない最大振幅比が増加傾向を示す要因の一つとして，境界面に存在する空隙の大きさ，または個数が減少したことが考えられるという考察にとどめる。

次に**図 4.1.1** で，緊張力 400 kN と 600 kN で，超音波が高周波になるほど最大振幅比が増加したことについて考察する。一般に超音波は高周波になるほど，伝播にともなう伝達損失，散乱減衰，ならびに試験体内部の空洞（きず）での反射による減衰が大きくなり，受信される超音波波形の最大振幅は小さくなる[13)]。本実験では垂直探触子を用いたので，超音波が探触子から試験体に入射した直後の超音波は主に縦波であると考えられるが，この縦波がナットの側面やナットと鋼棒の境界面で，反射，および屈折することで波のモード変換が発生し，反射波，および屈折波がさまざまな振動モードで伝播したことが考えられる。すなわち，緊張力 400 kN と 600 kN で，受信された超音波波形には様々な超音波のモードが含まれており，一般に議論可能な特定のモードの周波数と伝播特性の関係が認められなかったものと考えられる。

## 4.2 ウェーブレット変換を利用した特定周波数の到達時間

超音波波形のウェーブレット変換による時間—周波数解析結果から，特定の周波数の超音波の到達時間を得た。その手順を以下に述べる。

1 MHz ， 5 MHz ，および 7.5 MHz の探触子における各緊張力のウェーブレット変換による時間—周波数解析結果を**図 4.2.1** ，**図 4.2.2** ，および**図 4.2.3** にそれぞれ示す。これらの図より 1 MHz ， 5 MHz ，および 7.5 MHz の探触子に対し，各受信波形は 0.5—1.5 MHz ， 4.0—7.0 MHz ，および 6.0—10.0 MHz 付近に周波数領域の卓越が認められる。そこで上述の周波数領域の代表的な周波数として，各探触子の共振周波数である 1.0 MHz ， 5.0 MHz ，および 7.5 MHz に着目して，各周波数での超音波の到達時間を得た。

実験で直接得られる，探触子 1 MHz ，緊張力 200 kN での時間—振幅波形と，ウェーブレット変換による 1.0 MHz の周波数における時間—振幅波形をそれぞれ**図 4.2.4** と**図 4.2.5** に示す。**図 4.2.4** の超音波波形には，超音波の到達以前 0—18.0 μsec に明らかなノイズが認められるため，立上がり時間（初動時間）を精度よく読みとるのは困難である。一方，図 **4.2.5** のウェーブレット変換による周波数 1 MHz の時間—振幅図を用いると明確に初動時刻（ 20.0 μsec ）を読み取ることができる。し

たがって，本研究ではウェーブレット変換を用いて，各探触子の共振周波数である1.0 MHz，5.0 MHz，および7.5 MHzの周波数の超音波の到達時間を求めた。上述の周波数の超音波の到達時間と緊張力の関係を図**4.2.6**に示す。

緊張力600 kNで，1 MHz，5 MHz，および7.5 MHzの探触子の場合，到達時間はそれぞれ，11.0 μsec，11.3 μsec，および11.3 μsecとなる。これらの到達時間は**4.1**で示した最短到達時間10.8 μsecとほとんど同じ値となる。つまり，緊張力の増加にともない，ナットと鋼棒の接着度合いが強くなり，緊張力が600 kNでは，ナットと鋼棒の隙間が同材質の鋼材で完全に構成されている場合（完全接触）とほぼ同じ状態になったといえる。したがって，いずれの探触子を用いても緊張力の増加にともない，到達時間は最短到達時間付近に収束していくものと考えられる。また探触子5 MHzと7.5 MHの場合，緊張力400 kNの段階で到達時間11.3 μsecと最短到達時間とほとんど同じ値になっていることから，400 kN以下の緊張力領域に到達時間の収束点が存在すると推測される。

次に，超音波の伝播経路について考察する。上述のように，いずれの探触子を用いても，緊張力400 kNと600 kNで**4.1**に示した最短到達時間に近い値をとることから，伝播経路は送受信探触子を結ぶ最短経路（ナット→鋼棒→ナット）で伝播したものと推測できる。一方，探触子5 MHzと7.5 MHzで緊張力0 kN，および200 kNの場合，到達時間は，最短到達時間の約2.5倍となった。したがって，ナット→鋼棒→ナットという経路を伝播しているとは考えにくく，ナット部分のみを反射を繰り返し伝播したと推測される。探触子1 MHzで，緊張力の増加にともない，到達時間は急激な変化を示さなかったこと，0 kNと200 kNの到達時間がその他の探触子の場合と比べると小さい値をとっていることから，伝播経路を推察することは難しいと考えられる。今後，ナットの開口部が空洞という条件のもとで実験を行い，0 kN，および200 kNの到達時間と比較し，超音波の伝播経路を詳細に検討する必要がある。

次に，**図 4.2.6**から，アンカーの緊張力測定という観点から考察を述べる。5 MHz，および7.5 MHzの探触子で，緊張力200kN—400kNで，到達時間の大幅な減少傾向が見られるものの，その他の緊張力領域ではほとんど変化が見られない。一方1 MHzの探触子では，緊張力0 kN—600 kN全域において，緊張力と到達時間に線形性の関係が確認できた。今後の実験で緊張力間隔を50 kNと細分化し，本実験と同様に，アンカーの緊張力と1 MHzの超音波の到達時間の関係を求め，再現性を

検討する必要がある。

### 4.3 離散フーリエ変換を利用した Partial power

超音波波形を離散フーリエ変換し Partial power を得るまでの流れを**図 4.3.1** に示す。

まず，離散フーリエ変換の対象となる時間領域は，**4.2**で得られた各周波数の到達時間以降の領域とし，領域幅は受信された超音波波形の初期の時間領域にあたる 20.5 μsec とした。なお，この時間領域幅 20.5 μsec は離散フーリエ変換の対象となるデータ個数 512 個に対応する。上述の時間領域に設定した理由を以下に述べる。受信された超音波波形の後半部分には縦波以外に，横波，表面波，および反射波など様々な波のモードが含まれている。そこで初期の実体波のみの周波数特性を検討するために上述の時間領域を対象に離散フーリエ変換した。

次に，**4.2**に示した超音波波形に含まれるノイズの影響を考慮し，離散フーリエ変換結果を補正した。手順を以下に示す。探触子 5 MHz ，緊張力 200 kN の場合の超音波波形を**図 4.3.2** に示す。**4.2**に示したように，同図にはノイズが含まれていると考えられるため，**図 4.3.2** をウェーブレット変換し（**図 4.3.3** 参照），すべての時間領域で卓越している周波数成分をノイズと判断し，離散フーリエ変換スペクトル解析結果において，ノイズの周波数領域の振幅値を 0 とした（図 **4.3.4** 参照）。この例と同様に，ウェーブレット変換により， 1 MHz の探触子の場合は0—0.2 MHz，5 MHz の探触子の場合は0—0.8 MHz，7.5 MHzの探触子の場合は0—0.8 MHzの周波数成分をノイズと判断し，スペクトル解析結果で振幅値を 0 とした。

探触子ごとの，各緊張力での，離散フーリエ変換によるスペクトル解析結果を**図 4.3.5 ， 図 4.3.6 ，** および**図 4.3.7** にそれぞれ示す。

送信波の最大振幅が一定でなかったため，離散フーリエ変換によるスペクトル解析結果から，相対的に，卓越周波数域の振幅の合計値を Partial power として得た。またウェーブレット変換結果で， 1 MHz ， 5 MHz ，および7.5 MHzの探触子で，それぞれ卓越周波数 0.5—2.0 MHz ， 4.0—7.0 MHz ，および6.0—10.0 MHzが認められたため，この区間の Partial power を求めた。区間による変化も調べるため， 1 MHz ， 5 MHz，および7.5 MHzの探触子に対し，それぞれ，中央値1.0 MHz，中央値5.5 MHz，および中央値8.0と設定し， 5 種類の区間幅とした。

各探触子での上述の周波数域における Partial power と緊張力の関係を**図 4.3.8** に示

す。探触子 1 MHz ，および7.5 MHzで，到達時間と緊張力によい相関は確認できない。一方，探触子5.0 MHzの場合，区間の選び方によらず，緊張力の増加にともなう Partial power の有意な増加傾向が見られた。今後の実験で緊張力間隔を50 kNと細分化し，本実験と同様に，アンカーの緊張力と5.0 MHzの超音波の Partial power との関係を求め，再現性を検討する必要がある。

# 第5章 実験の結果と考察（より線タイプ）

## 5.1 最大振幅比

測定条件として，測定方向をA，およびB，測定高さ位置をアンカーヘッド上面から下面方向に 10 mm ， 20 mm ， 30 mm ，および 40 mm ，探触子とアンカーヘッドの間のアクリル板をある場合とない場合，探触子を 1 MHz ， 5 MHz ，および 7.5 MHz として実施し，得られた緊張力と最大振幅比の関係を検討した。

超音波の最短伝播経路は，超音波を送信する探触子と受信する探触子の線分上で，1つのアンカーヘッドの開口部を伝播するごとに，アンカーヘッド→くさび→より線→くさび→アンカーヘッドの順に伝播することになる。アンカーヘッド，くさび，およびより線の隙間が同材質の鋼材で完全に構成されている場合（完全接触）を想定すると，アンカーヘッドの伝播速度5,920 m/ sec，最短伝播距離（アンカーヘッドの直径）110 mm より，最短到達時間 18.6 μsec が得られる。これより，励起された超音波は， 18.6 μsec 以降に到達するものと考えられる。従って，最大振幅比は，この時間以降に得られる超音波波形を抽出し，その最大振幅に基づき求めた。また，最大振幅比が10％以下の場合，入力波の有無が識別できないので最大振幅比を 0 とした。（**4.1**参照）

測定条件として，探触子 1 MHz ，測定方向B，アクリル板なし場合の緊張力と最大振幅比の関係を**図 5.1.1** に示す。

同図に限らず，いずれの探触子，測定方向，および測定高さ位置においても，また探触子の接触条件に関わらず，緊張力と最大振幅比のよい相関は確認できなかった。

次に，測定条件の違いによる最大振幅比の変化傾向を比較する。**図 5.1.1** のように，測定高さ位置がアンカーヘッドの下面に近づく程，最大振幅比が増加する傾向が確認できた。測定高さ位置 10 mm ，および 20 mm で，超音波波形が到達していない例も認められた。アンカーヘッドの開口の幅が上面に近づく程大きくなっているため（**図 3.3.6 参照** ），測定箇所が上面に近づく程，アンカーヘッド，くさび，およびより線の境界に存在する隙間が大きくなり，超音波波形の透過が困難となることが推察される。

探触子，測定方向，および接触条件の違いによる，最大振幅比の特徴的な変化

傾向は確認できなかった。

## 5.2 ウェーブレット変換を利用した特定の周波数の到達時間

超音波波形のウェーブレット変換による時間—周波数解析結果を**図 5.2.1**— **図 5.2.24**にそれぞれ示す。

まず，励起した超音波の到達の有無を検討する。具体的に，ウェーブレット変換結果より，卓越周波数が確認できれば励起した超音波が到達しているものと考え，卓越周波数が認められなければ励起した超音波が到達していないものと考える。**図 5.2.1**— **図5.2.24**より，測定高さ位置がアンカーヘッド上面から下面方向に 10 mm ，および 20mm の位置で，探触子 5 MHz と7.5 MHzの場合，超音波波形の到達が確認できないケースが多い。これは，**5.1**で述べた通り，アンカーヘッドの開口の幅が上面に近づく程大きくなっているため，測定箇所が上面に近づく程，超音波の透過が困難になること推測される。よって，測定高さ位置は，超音波上面から下面方向に 30 mm 以上の位置が適切であると考えられる。

**図 5.2.1**— **図5.2.24**から，1 MHz ， 5 MHz ，および7.5 MHzの探触子に対し，各受信波形の 0.3—1.0 MHz ， 1.5—4.0 MHz ，および 2.0—6.0 MHz 付近に周波数領域の卓越が認められ，代表的な周波数としてそれぞれ，0.5 MHz，3.0 MHz，および4.0 MHzの周波数の超音波の到達時間を求めた。超音波の到達時間と緊張力の関係の一例を**図 5.2.25**に示す。同図は使用探触子 5 MHz ，測定方向 B ，およびアクリル板無しの条件のもと，測定高さ位置を 20 mm—40 mm で比較した図である。同図より，いずれの測定高さ位置においても，緊張力と到達時間のよい相関は確認できない。また，緊張力，および測定高さ位置の条件を変化させても，到達時間は約 19 μsec となる。この**図5.2.25**に限らず，すべての測定条件において，到達時間は約19.0 μsec—20.0 μsecとなった。これより，緊張力の変化によらず，アンカーヘッド，くさび，およびより線の接触状態は変化していないということ，あるいは変化したとしても到達時間には影響を及ぼさない程度の微小変化ということが推察される。以上より，より線タイプの場合，再度実験を実施したとしても，上述のように到達時間に差が認められない可能性が高く，アンカーの緊張力測定で到達時間は有効でないと推測される。

次に，超音波の伝播経路について考察する。測定条件を変化させても，特定の

卓越周波数の超音波の到達時間は**5.1**に示した最短到達時間と 18.6 μsec とほぼ同じ値となった。よって送信された超音波は，アンカーヘッドの開口部に挿入されているくさび，およびより線を伝播したものと推測される。鋼棒タイプの場合はアンカーヘッド（ナット）部分のみを反射を繰り返し伝播し受信探触子に到達すると推測できる例も認められたが（**4.2**参照），より線タイプの場合，上述のようにアンカーヘッドの上面付近で超音波が到達していない例が認められたことから，アンカーヘッドのみを伝播し受信探触子に到達することはほとんどないと推測される。今後，アンカーヘッドの開口部が空洞という条件のもと超音波を伝播させ，超音波の到達の有無を検討する必要がある。

### 5.3 離散フーリエ変換を利用した Partial power

超音波波形を離散フーリエ変換し Partial power を得るまでの流れは，**4.3**と同様である。

まず，離散フーリエ変換の対象となる時間領域は，**5.2**で得られた各周波数の到達時間以降の領域とし，領域幅は受信された超音波波形の初期の時間領域にあたる 10.2 μsec とした（理由は**4.3**で述べた）。なお，この時間領域幅 10.2 μsec は離散フーリエ変換の対象となるデータ個数 512 個に対応する。

次に，超音波波形に含まれるノイズの影響を考慮し，離散フーリエ変換結果を補正した。**図 5.2.1— 図5.2.24で**，いずれの探触子を用いても 0—0.25 MHz の周波数成分がすべての時間領域で卓越していることが確認できたため，0.25 MHz 以下の周波数成分をノイズと判断し，Partial power を求めるにあたり 0.25 MHz 以下の周波数成分の振幅を 0 とした。送信波の最大振幅が一定でなかったため，離散フーリエ変換によるスペクトル解析結果から，相対的に，卓越周波数域の振幅の合計値を Partial power として得た。またウェーブレット変換結果で，1 MHz，5 MHz，および 7.5 MHz の探触子に対し，卓越周波数 0.3—2.0 MHz，1.5—4.0 MHz，および 2.0—6.0 MHz が認められたため，この区間の Partial power を求めた。それぞれの探触子の上述の周波数域における Partial power と緊張力の関係を**図 5.3.1，図 5.3.2，**および**図 5.3.3** に示す。これらの図では測定方向，測定高さ位置，アクリル板の有無の順で測定条件を表している。例えば，測定方向 B，測定高さ位置上面から 30 mm，アクリル板有りの場合，「B30A」と表記し，無しの場合，「B30」と表記する。

**図 5.3.1 ， 図 5.3.2 ，** および**図 5.3.3** から，ほとんどの測定条件下で緊張力の増加にともなう Partial power の有意な変化傾向は確認できなかった。ただし，7.5 MHz の探触子の場合， B20 ，および B30 で，緊張力の増加にともなう， Partial power の単調増加が認められた。緊張力が 0 kN ， 200 kN ， 400kN ，および 600 kN の 4 種類のみで計測していることと，**5.1**，および**5.2**で述べたように最大振幅比，および到達時間と緊張力とのよい相関が確認できなかったこと，また測定条件 B40 では単調増加を示していないことを考慮すると，実験における測定の精度を上げたうえで，再現性が確認できるか追加検討する必要があるものと考えている。

# 第6章　まとめと今後の課題

本章では，前章までに示した鋼棒タイプ，およびより線タイプにおけるアンカーの各緊張力での超音波透過特性の検討結果について結論を述べる。最後に今後の研究課題について言及し，今後の研究に繋げるものとする。

## 6.1　まとめ

### 6.1.1 鋼棒タイプ

第 3 章で述べた超音波法を用いたアンカーの緊張力推定実験をもとに，第 4 章で鋼棒タイプの実験結果，解析結果，および考察を述べた。得られた結論として以下が挙げられる。

- 緊張力の増加にともない，ナットと鋼棒の接触状態が変化し，超音波の透過特性に影響を与えることが得られた。
- 実験で直接得られた超音波波形から，一般的に使用され，簡易に求めることができる最大振幅比を用いてアンカーの性能を概ね推定できることが確認された。
- 実験で得られた超音波波形をウェーブレット変換，および離散フーリエ変換することにより求められた 1.0 MHz の超音波の到達時間，および探触子 5 MHz の場合の Partial power が緊張力 0 kN—600 kN 全域にわたり，よい相関を示すことが確認された。
- 各緊張力で，励起された超音波の伝播経路を概ね推測することができた。

### 6.1.2 より線タイプ

第 3 章で述べた超音波法を用いたアンカーの緊張力推定実験をもとに，5 章でより線タイプの実験結果，解析結果，および考察を述べた。得られた結論として以下が挙げられる。

- 本研究で検討したパラメータと緊張力とのよい相関は確認できなかった。

- 測定高さ位置がアンカーヘッドの上面に近づくほど，超音波の透過が困難になることが確認できた。アンカーヘッドの上面から下面に向かって 30 mm 以上の位置で超音波の伝播特性に向上が認められた。
- 励起された超音波の伝播経路を概ね推測することができた。

## 6.2 今後の課題

以下に今後の課題を列挙し，追加実験で検討する。

- 本研究では，超音波法のアンカーへの緊張力推定への適用性を検討することに重点をおいたため，緊張力が 0 kN， 200 kN， 400 kN，および 600 kN での測定のみであった。よって，数少ないデータに基づく結果であり，最大振幅比，到達時間，および Partial power と緊張力に，回帰曲線は導入しなかった。今後の追加実験で，緊張力間隔を 50 kN と細分化し，各緊張力で，それぞれのパラメータに再現性が認められるかを確認するとともに，本実験・解析結果と同様によい相関が確認できれば同曲線を導入するつもりである。また，上述の超音波透過特性パラメータ以外のパラメータに関しても，緊張力との相関を比較・検討し，最終的には緊張力測定への有効性が最も高いパラメータ，および周波数を選出する必要があると考えられる。
- 本実験は、設定緊張力 0 kN—600 kN で単調載荷としたが、ヒステリシスの影響も考慮するため、今後の追加実験では除荷過程でも同様の計測を実施する必要がある。
- ナット，およびより線タイプのアンカーヘッドの開口部が空洞の状態で超音波を透過させ，開口部に鋼棒，およびより線を挿入し緊張力を与えた状態での超音波透過特性と比較を行い，伝播経路をより詳細に検討する必要がある。
- 本研究では，一種類の鋼棒，およびより線のアンカーヘッドを用いて実験を行ったが，今後はアンカーヘッドの形状，材質，および寸法（大きさ）の違いによる超音波透過特性の変化を比較・検討する必要があるため，様々なタイプのアンカーを対象に実験を行う。場合によっては，アンカーのタイプにより異なる回帰曲線を導入する必要があると考えられる。

- 本研究ではより線タイプの場合，探触子の設置位置のわずかな違いで，超音波の透過特性が大きく左右されることが問題となった。今後の追加実験で，本手法に有効な設置位置を明らかにするとともに，探触子を冶具などで固定する必要がある。
- 緊張力以外が超音波透過特性に与える影響も検討する必要がある。現場で用いる場合を想定すると，温度変化，水の存在，およびアンカーヘッドの付着したサビの影響なども考慮する必要があるため，様々な条件下での追加実験を行う必要がある。

# 参 考 文 献


1) 土木研究所，日本アンカー協会：グラウンドアンカー維持管理マニュアル，鹿島出版会，pp.13-26, 2008.

2) 山田浩：グラウンドアンカー工法の維持管理と補修補強に関する課題，日本地すべり学会, 2008

3) 土木研究所，日本アンカー協会：グラウンドアンカー維持管理マニュアル，鹿島出版会，pp.19-118, 2008

4) 斜面防災対策委員会ホームページ http://www.jisuberi-kyokai.or.jp

5) 大窪克己，竹本将：高速道路斜面の維持管理について－特にグラウンドアンカーについて－，地盤と調査 2008 年第 1 号，pp.13-18, 2008

6) 酒井俊典，常川義弘，福田雄治，永野正典：SAAM ジャキを用いたアンカーの残存引張り力の調査方法，地盤工学会誌 56─12(611)，pp.42-45, 2008

7) 芥川真一，中森絵美，森本紘太郎，馬場修二，森聡，櫻井春輔：磁歪法によるPSアンカーの軸力推定法の提案と大規模地下空洞における適用例，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集（社）土木学会，pp.91-96, 2008

8) 大津宏康：切土のり面構造物の維持補修計画の立案方法に関する検討，防災研究協会ホームページ　研究報告第28号　http://www4.ocn.ne.jp/~dpr/top.html，2005

9) 日本非破壊協会：超音波探傷試験□，日本非破壊検査協会，pp.6-7, 2006

10) 谷腰欣司　著：超音波とその使い方，日刊工業新聞社，pp.36-37, 1994

11) 塩谷智基：岩盤内破壊評価法へのアコースティックエミッションの適用に関する研究，とびしま技術別冊，pp.69-70, 1998

12) 榊原進　著：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電機大学出版局，pp.1-28, 2003

13) 日本非破壊協会：超音波探傷試験□，日本非破壊検査協会，pp.9-12, 2006，および超音波探傷試験□，日本非破壊検査協会，pp.7-9, 2006

# 謝辞

本研究に取り組んだこの一年は，大学生活で最も充実した一年でした。お世話になった方々に感謝の言葉を述べたいと思います。

京都大学・大津宏康教授には，ご多忙の中，何度も中間発表の機会を与えていただき，ご指導していただきました。また，先生の研究や人に対する姿勢から，非常に多くのことを学ばせていただいたと思っています。心よりお礼申し上げます。

京都大学・塩谷智基准教授には，本研究における実験・解析・論文作成などあらゆる面でご指導していただきました。学部の授業という形でしか研究にふれたことのない私に，研究の面白さ，難しさなどを教えていただきました。深くお礼申し上げます。

京都大学・稲積真哉助教授には，1 回生の頃からチューターとしてお世話していただきました。研究室に配属された後も，研究面，および生活面でさまざまなアドバイスをしていたことを深く感謝致します。

京都大学・西山哲准教授には，副査を務めていただくとともに，数多くの助言をしていただきました。厚くお礼申し上げます。

日特建設株式会社・田中尚氏，宇次原雅之氏，株式会社ジャスト・柳瀬高仁氏，村田光氏には合同で実験させていただくとともに，度重なる質問にも親切に答えていただきました。心から感謝致します。

大津研究室の北村瑞絵秘書，先輩方，同回生のおかげで楽しく，有意義な研究室生活をおくることができました。特に先輩方には中間発表や論文作成にあたり，夜遅くまでお世話して頂いたこともありました。本当にありがとうございました。

最後に，大学で勉強できるという環境を与えていただいた両親，ならびにこれまで人生を支えてくれたすべての方々に，お礼を申し上げたいと思います。本当にありがとうございました。

# アンカーの維持管理

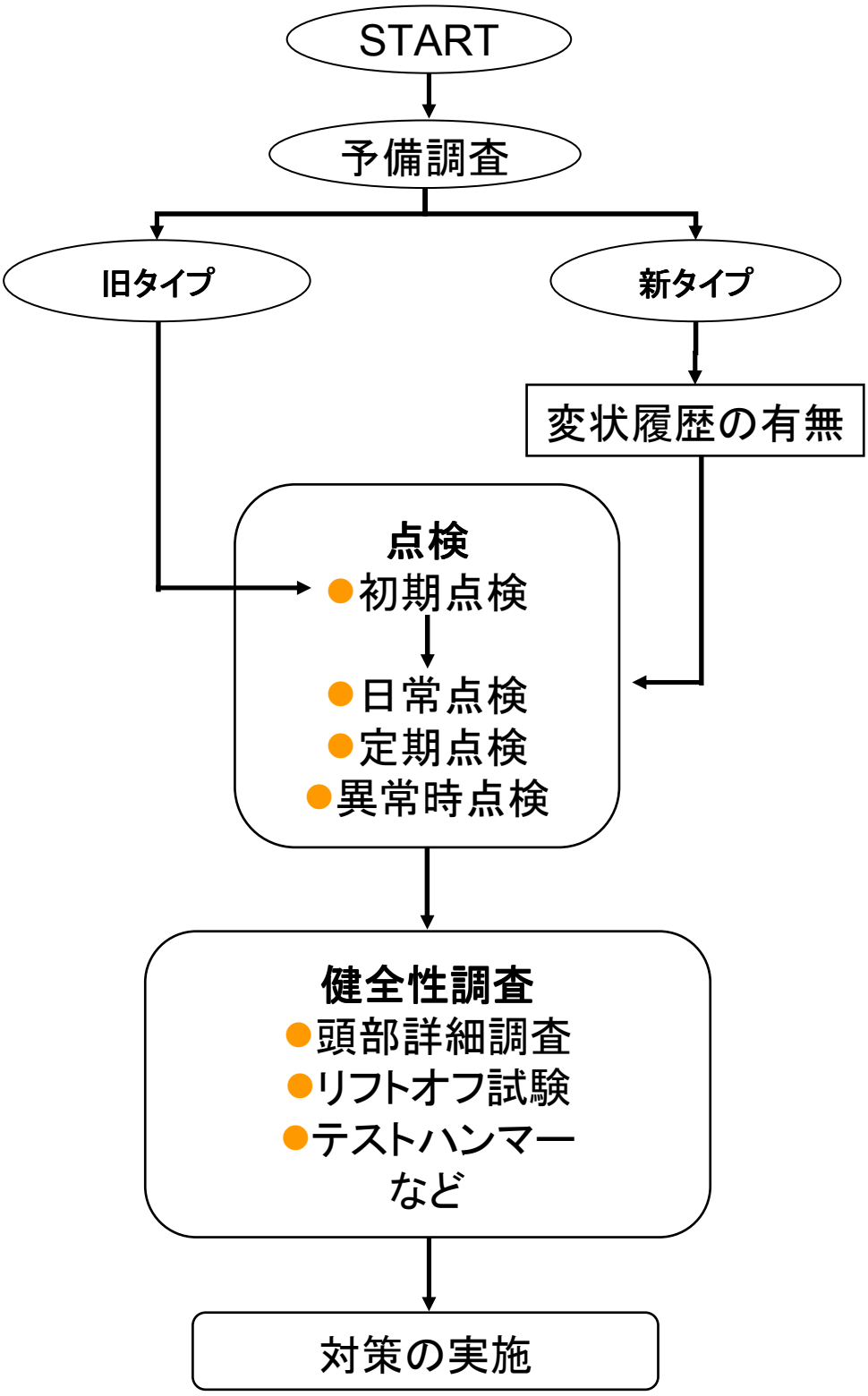



**図1.1.1** グラウンドアンカーの維持管理
出典：グラウンドアンカー維持管理マニュアル　土木研究所　日本アンカー協会

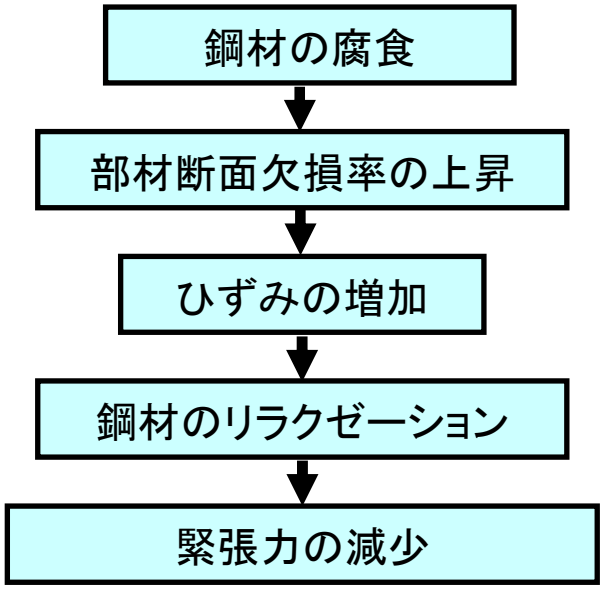
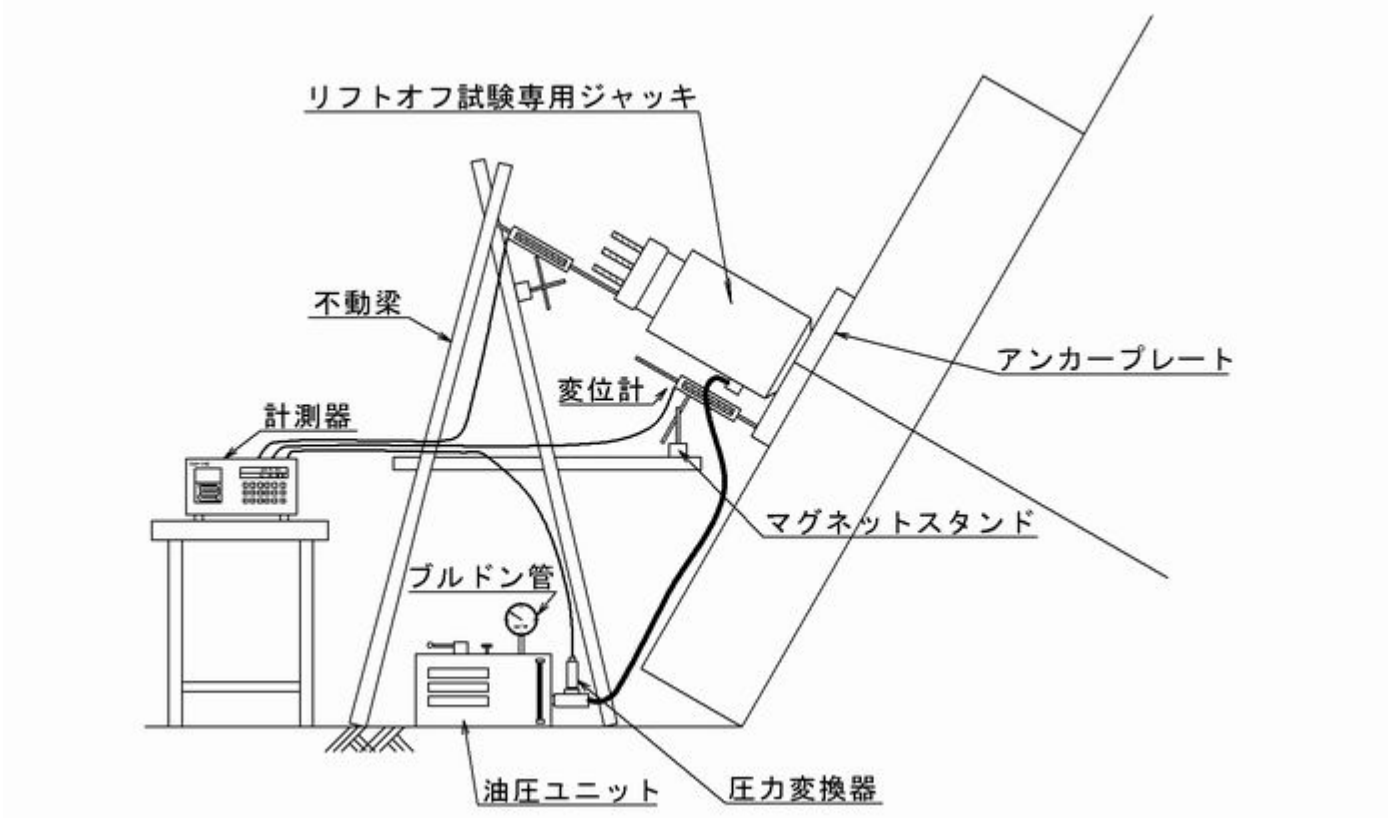



**図1.1.2　アンカーテンドン部の腐食の発生から緊張力低下に至るまでのメカニズム**




出典:斜面防災対策委員会　ホームページ　http://www.jisuberi-kyokai.or.jp

**図1.1.3**　リフトオフ試験

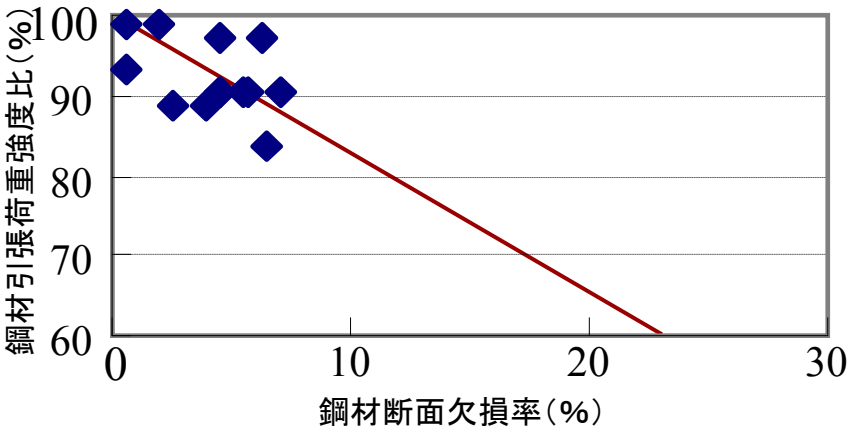



**図1.1.4　鋼材引張荷重強度比と断面欠損率の関係**

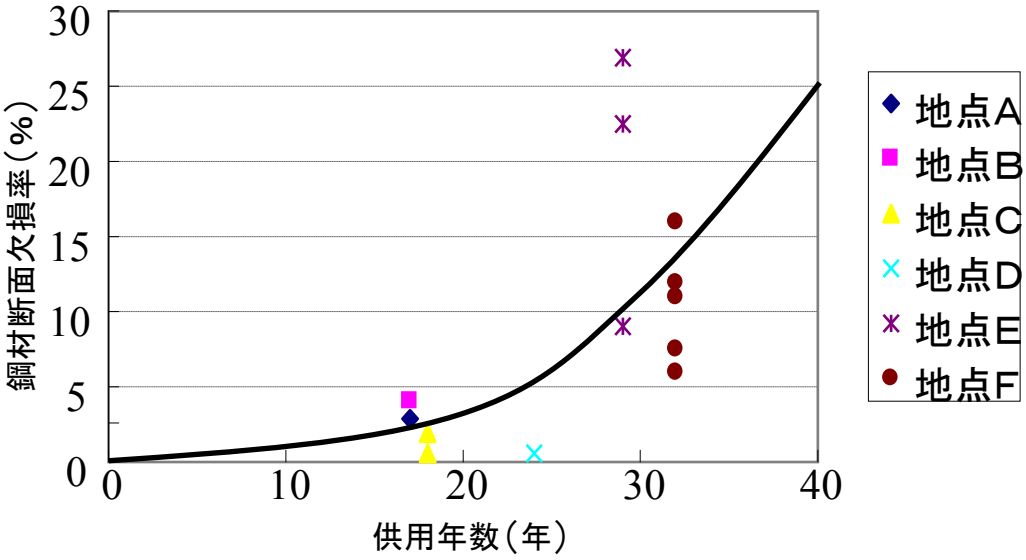



**図1.1.5　鋼材の断面欠損率と経過年数の関係**

出典:切土のり面構造物の維持補修計画の立案方法に関する検討　大津宏康

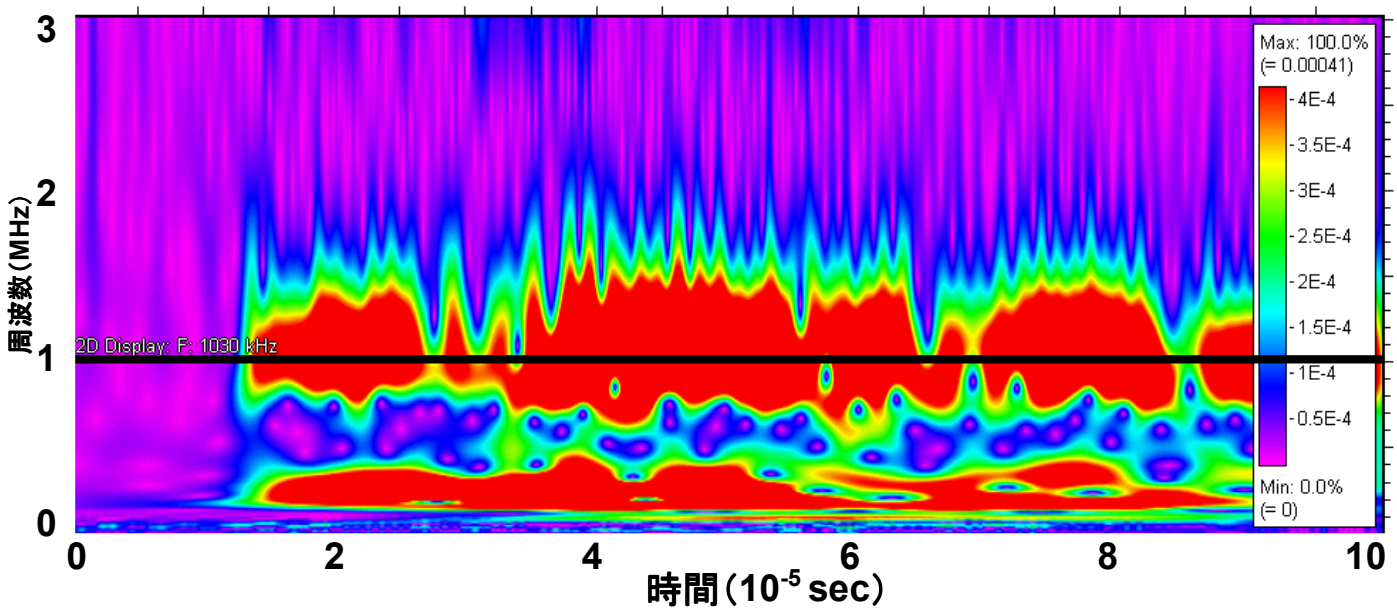



図2.1　超音波波形

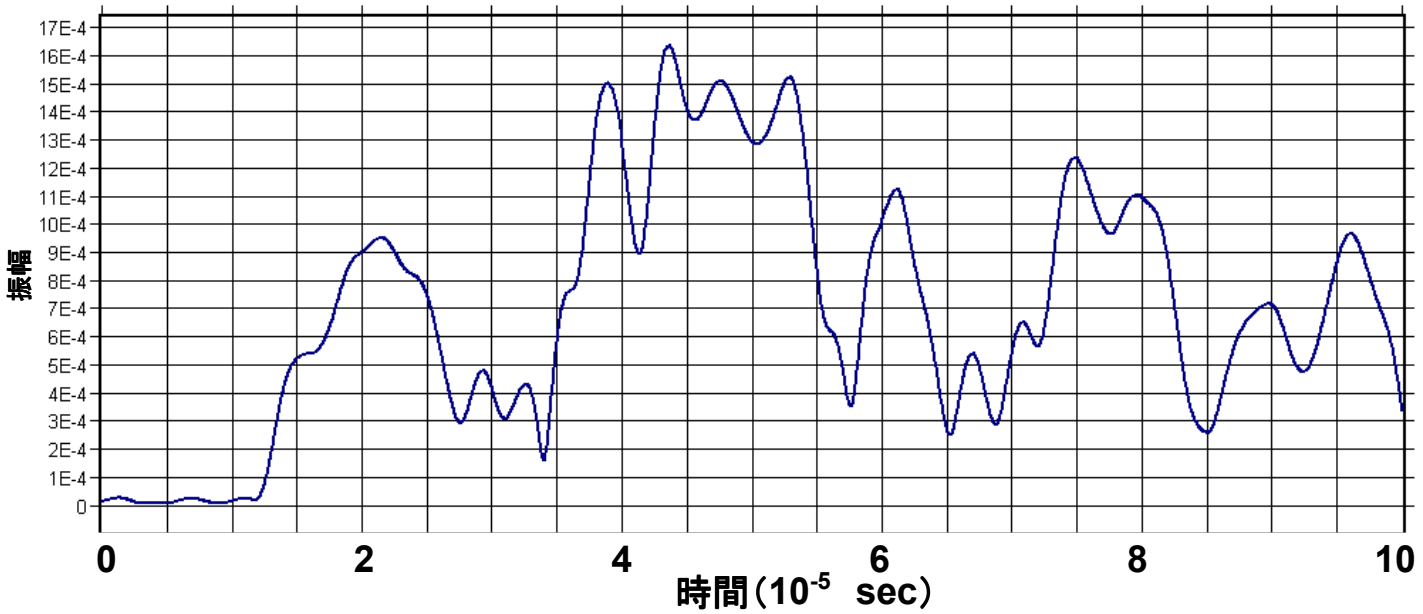



図2.2　ウェーブレット変換後の特定周波数における時間-振幅の図

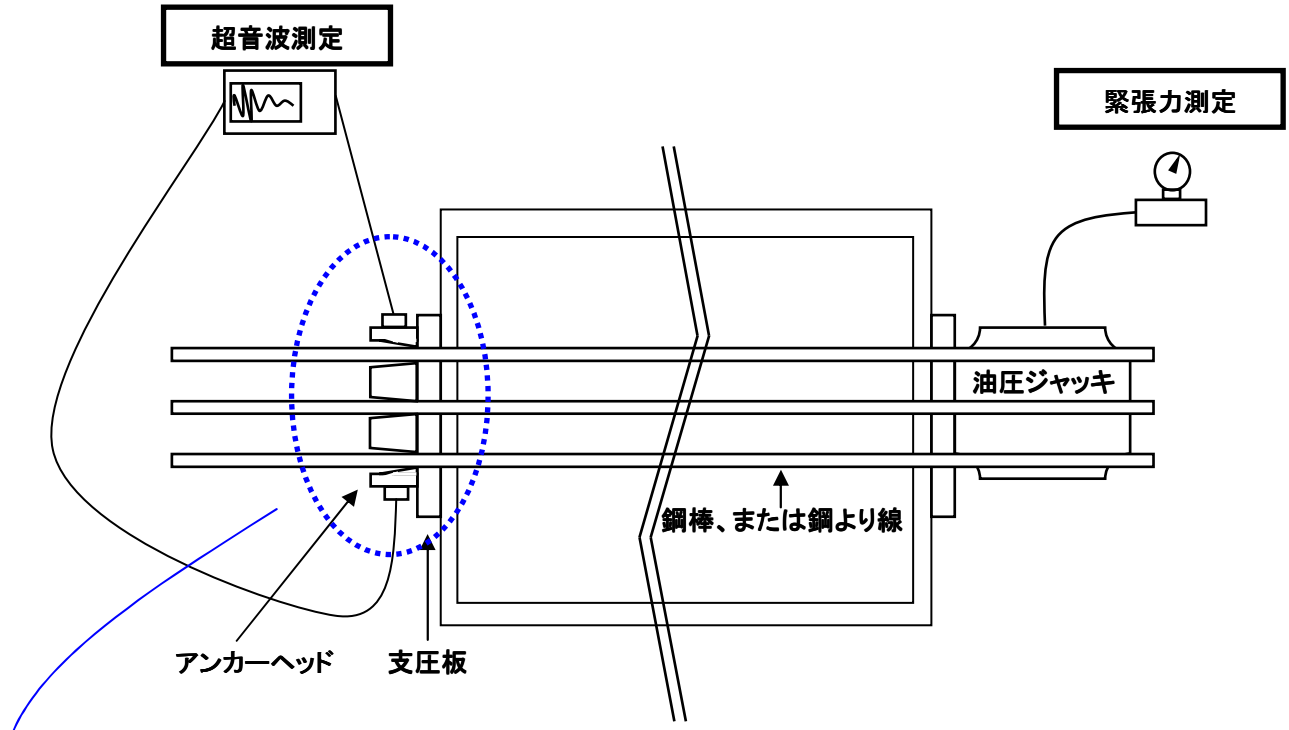



図3.3.1　実験の概略図

図3.3.2　実験の写真

図3.3.3　超音波探傷器

図3.3.4　オシロスコープ

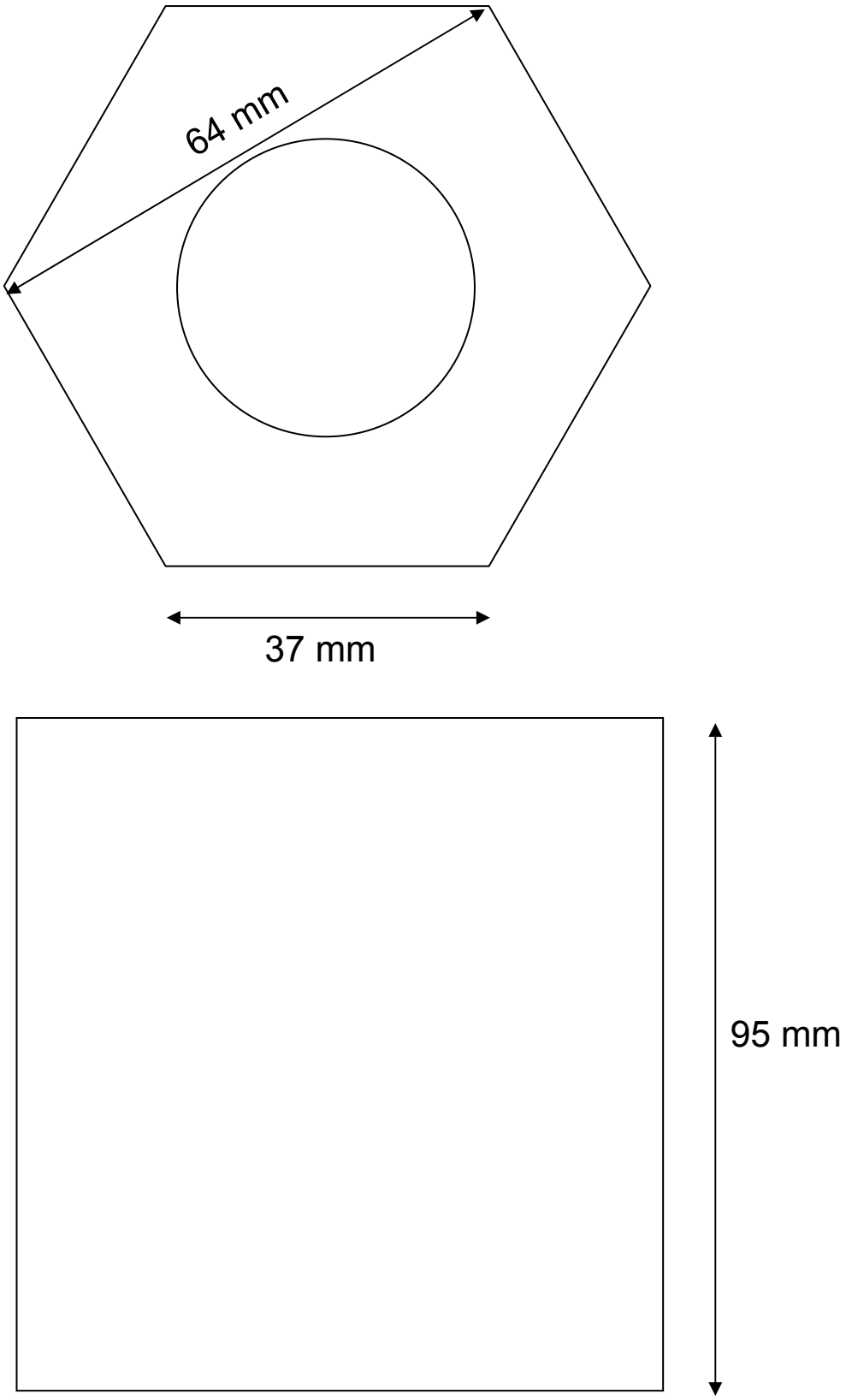



**図3.3.5　鋼棒タイプ　アンカーヘッド（ナット）の形状**

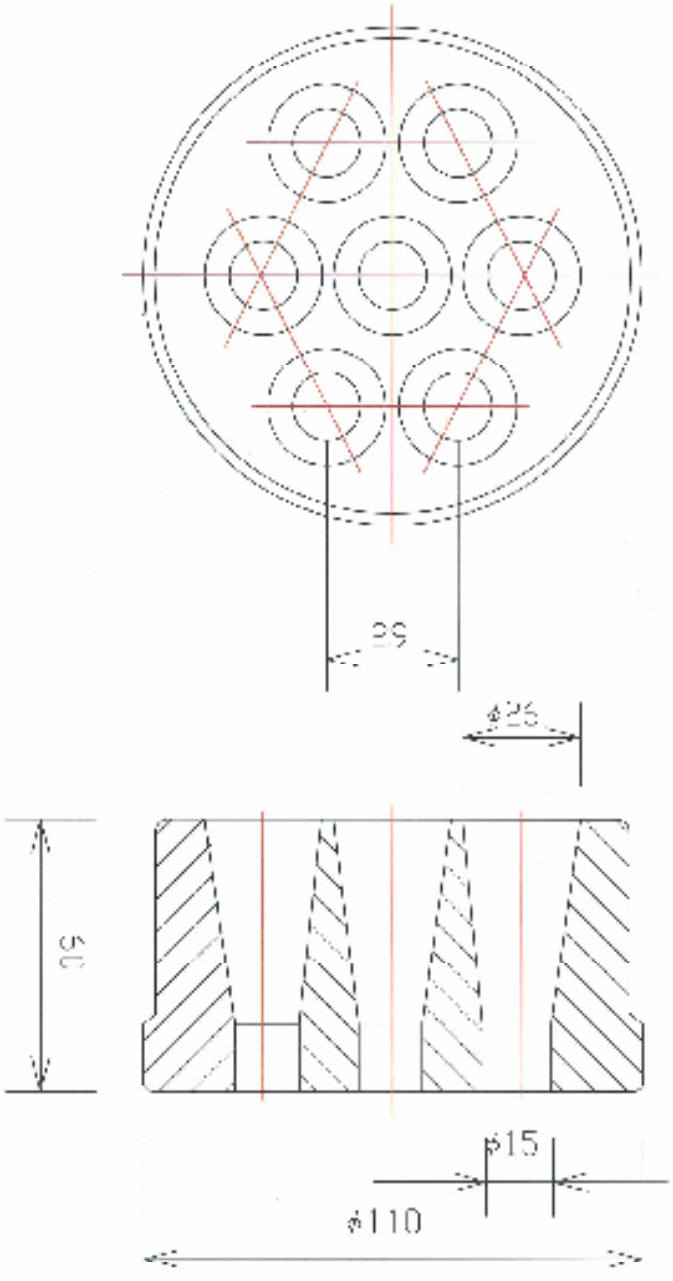



**図3.3.6　より線タイプ　アンカーヘッドの形状**

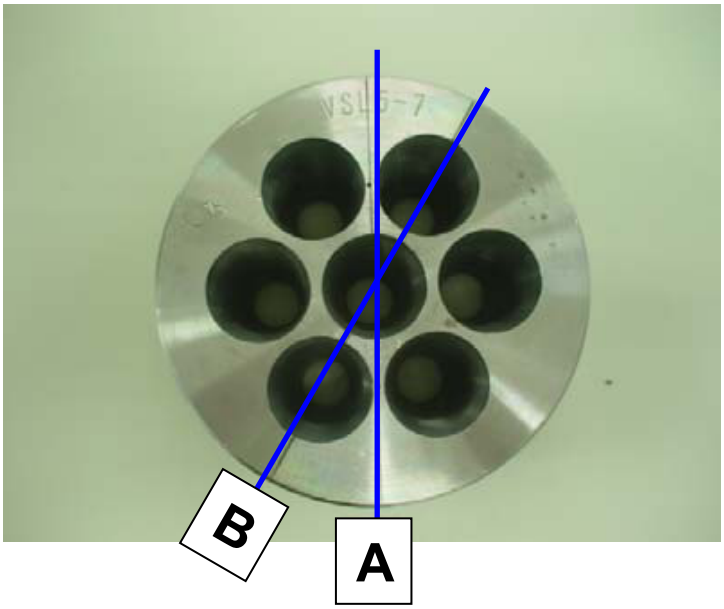



図3.3.7　測定方向

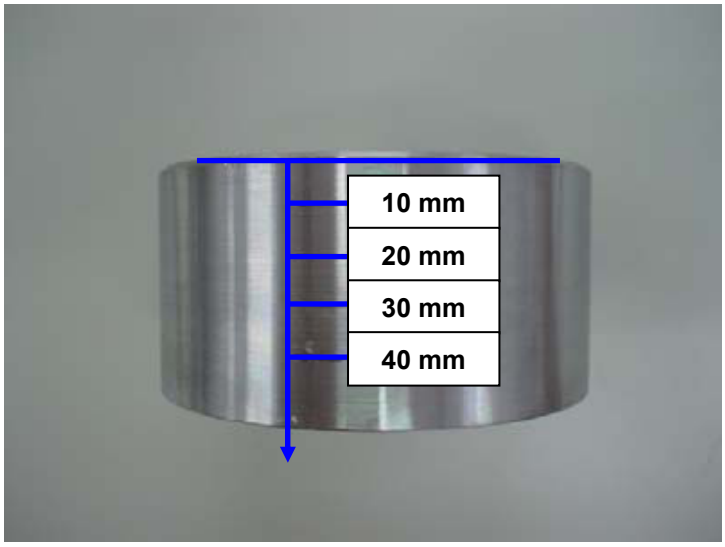



図3.3.8　測定位置

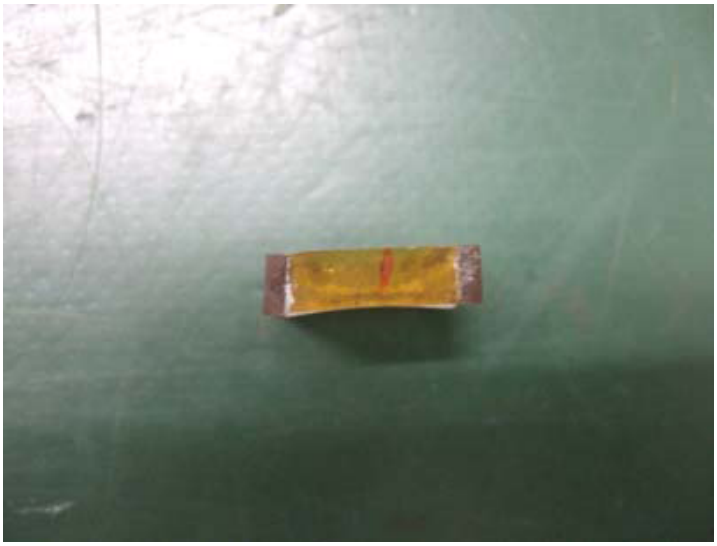


図3.3.9　アクリル板

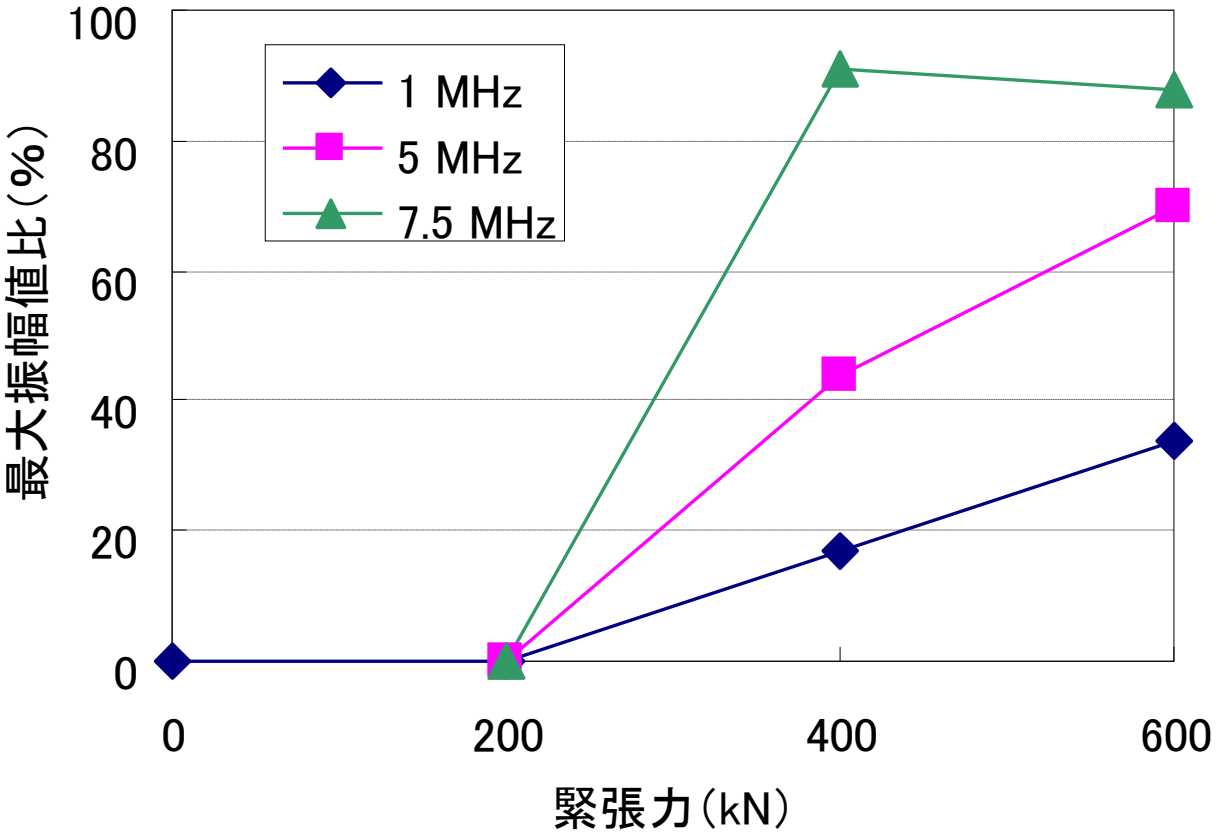



**図4.1.1　緊張力と最大振幅比の関係**

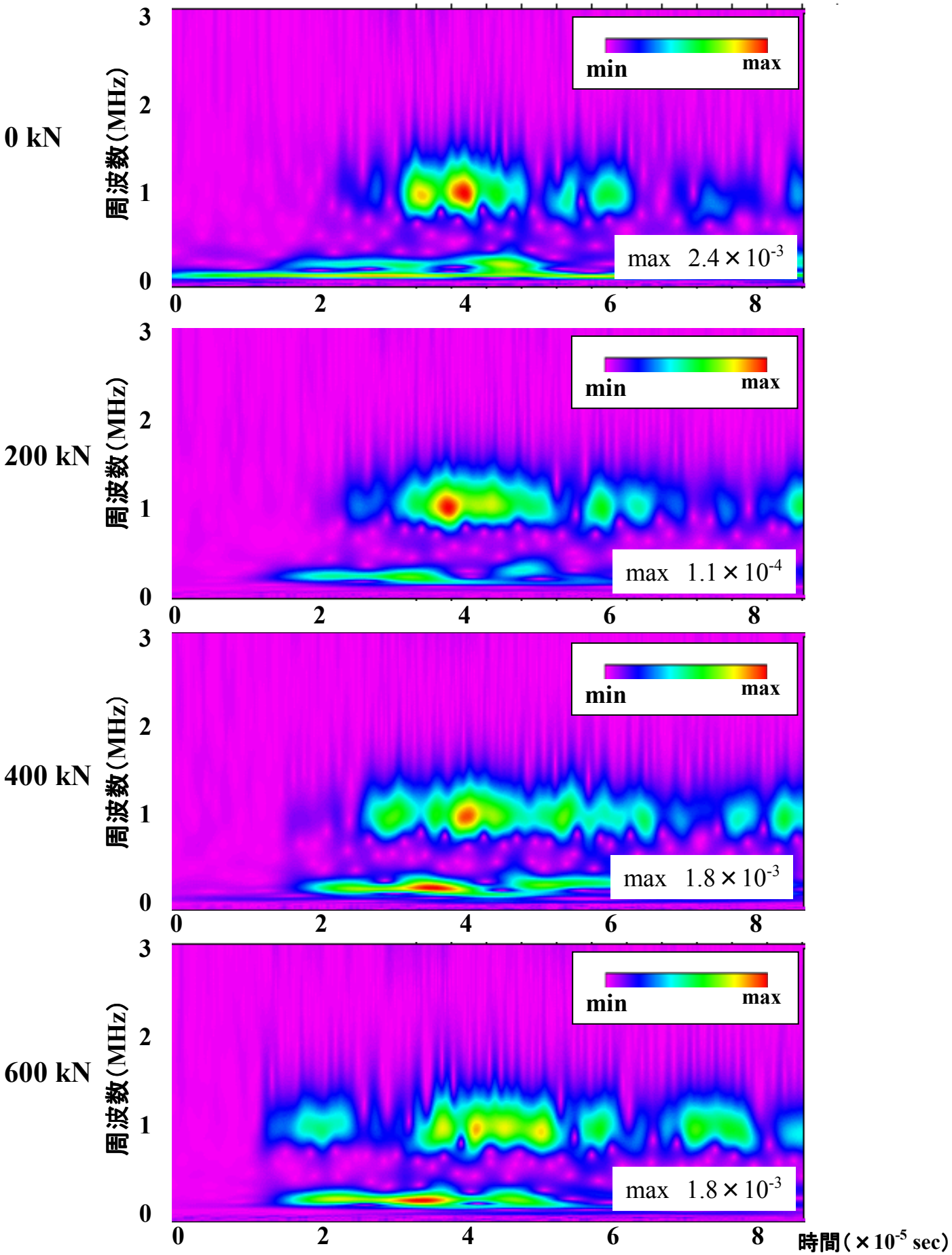



図4.2.1 ウェーブレット変換結果 ナット 1 MHz

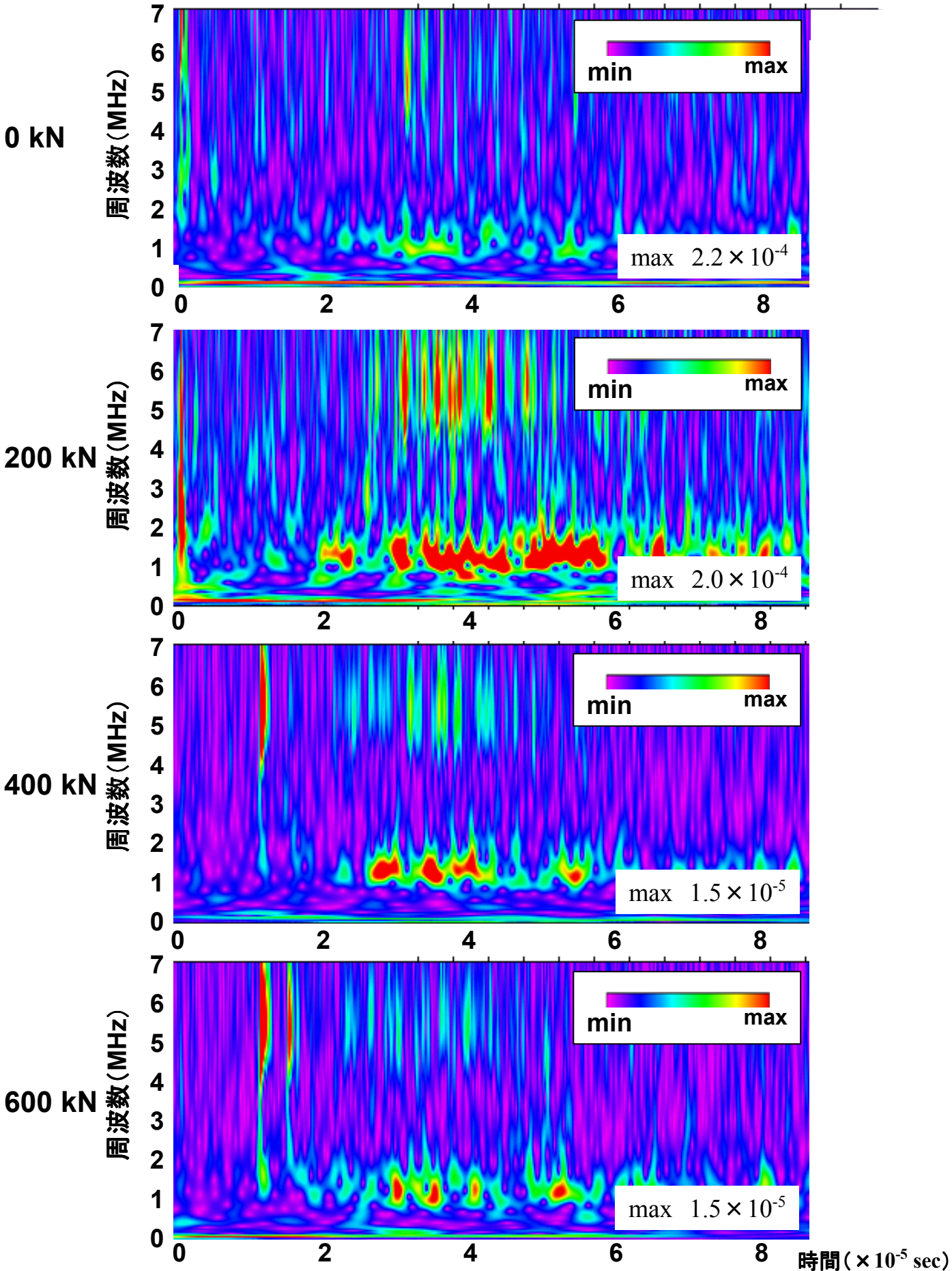



図4.2.2 ウェーブレット変換結果 ナット 5 MHz

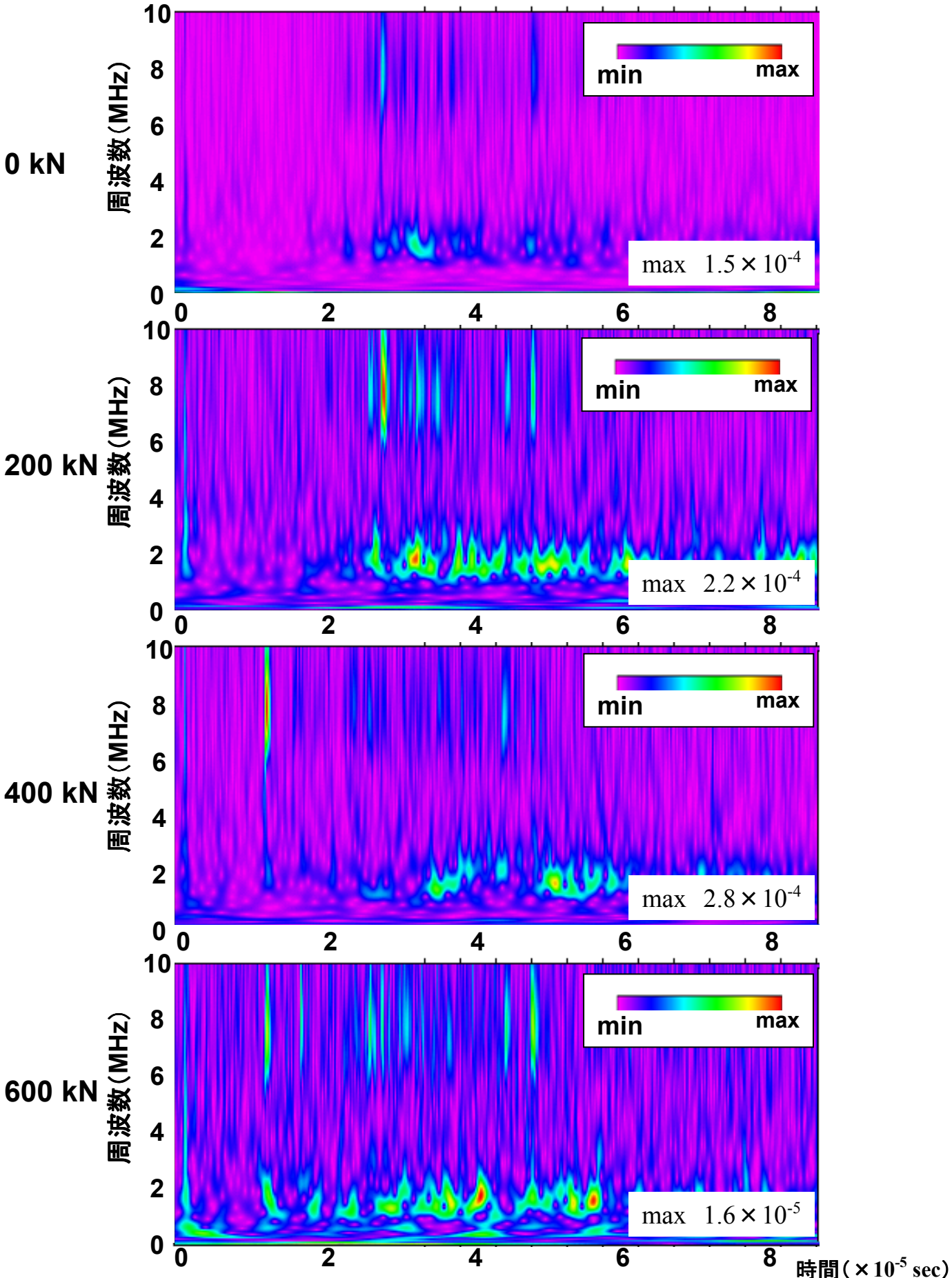



図4.2.3 ウェーブレット変換結果　ナット 7.5 MHz

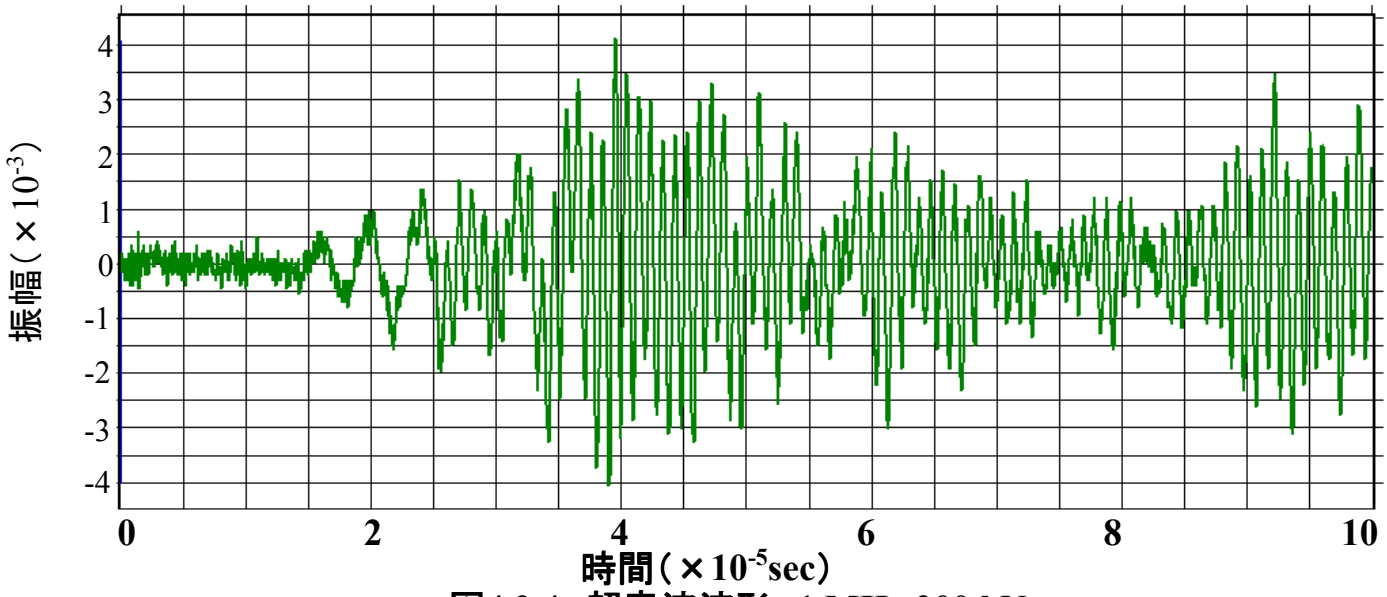



図4.2.4　超音波波形　1 MHz 200 kN

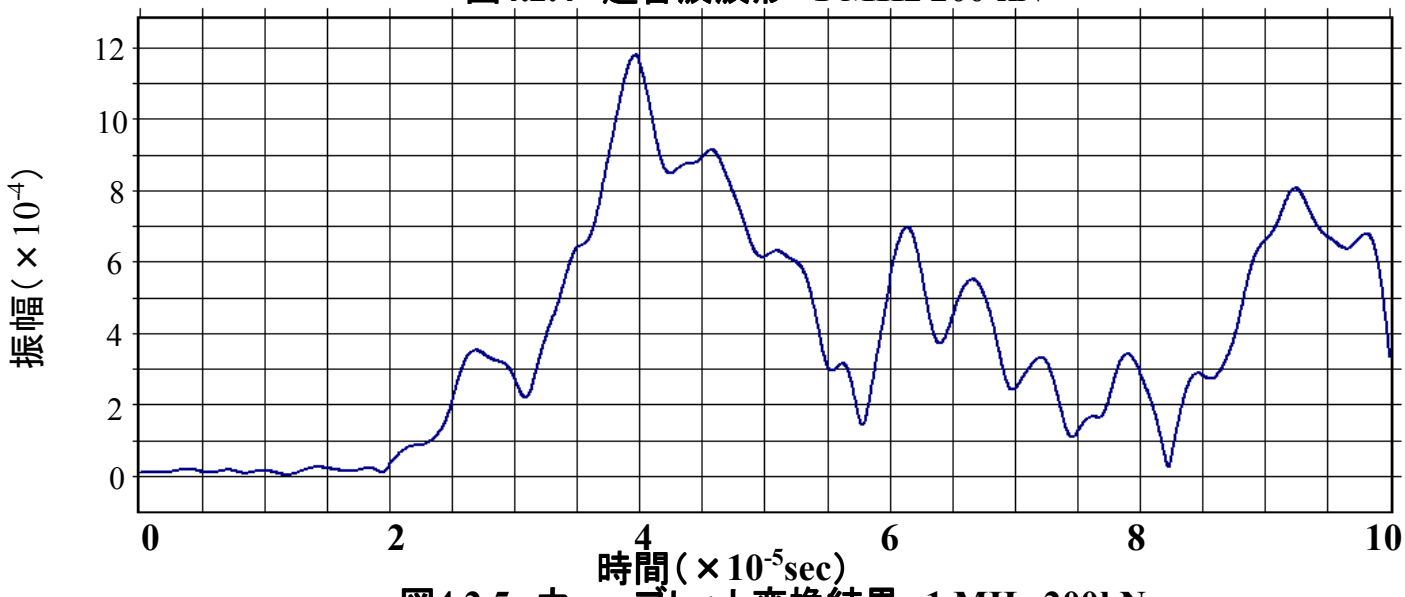



図4.2.5　ウェーブレット変換結果　1 MHz 200kN

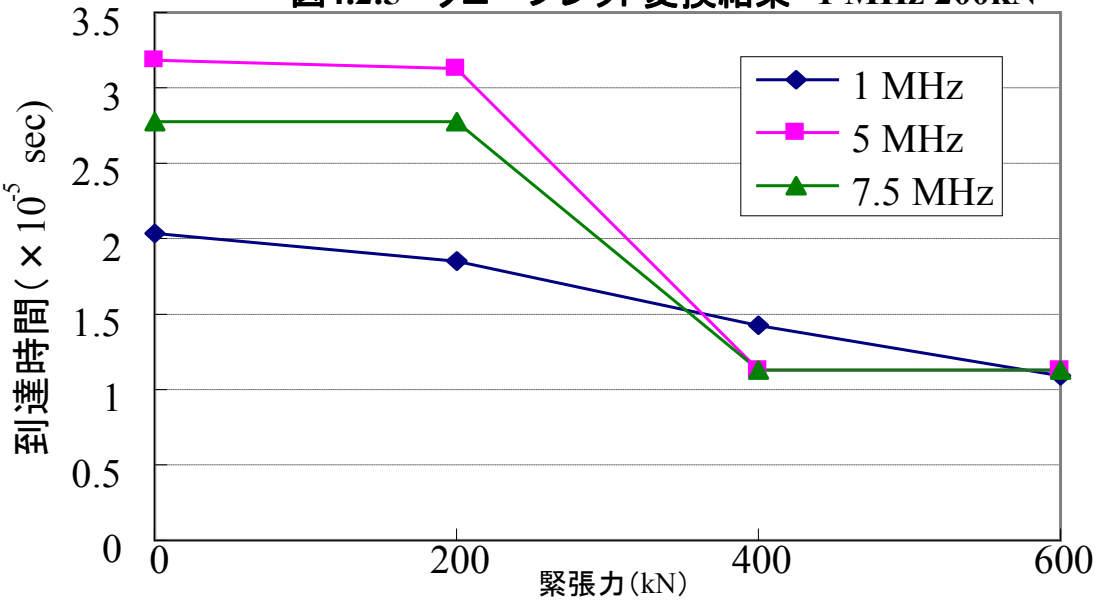



図4.2.6　卓越周波数の到達時間と緊張力の関係

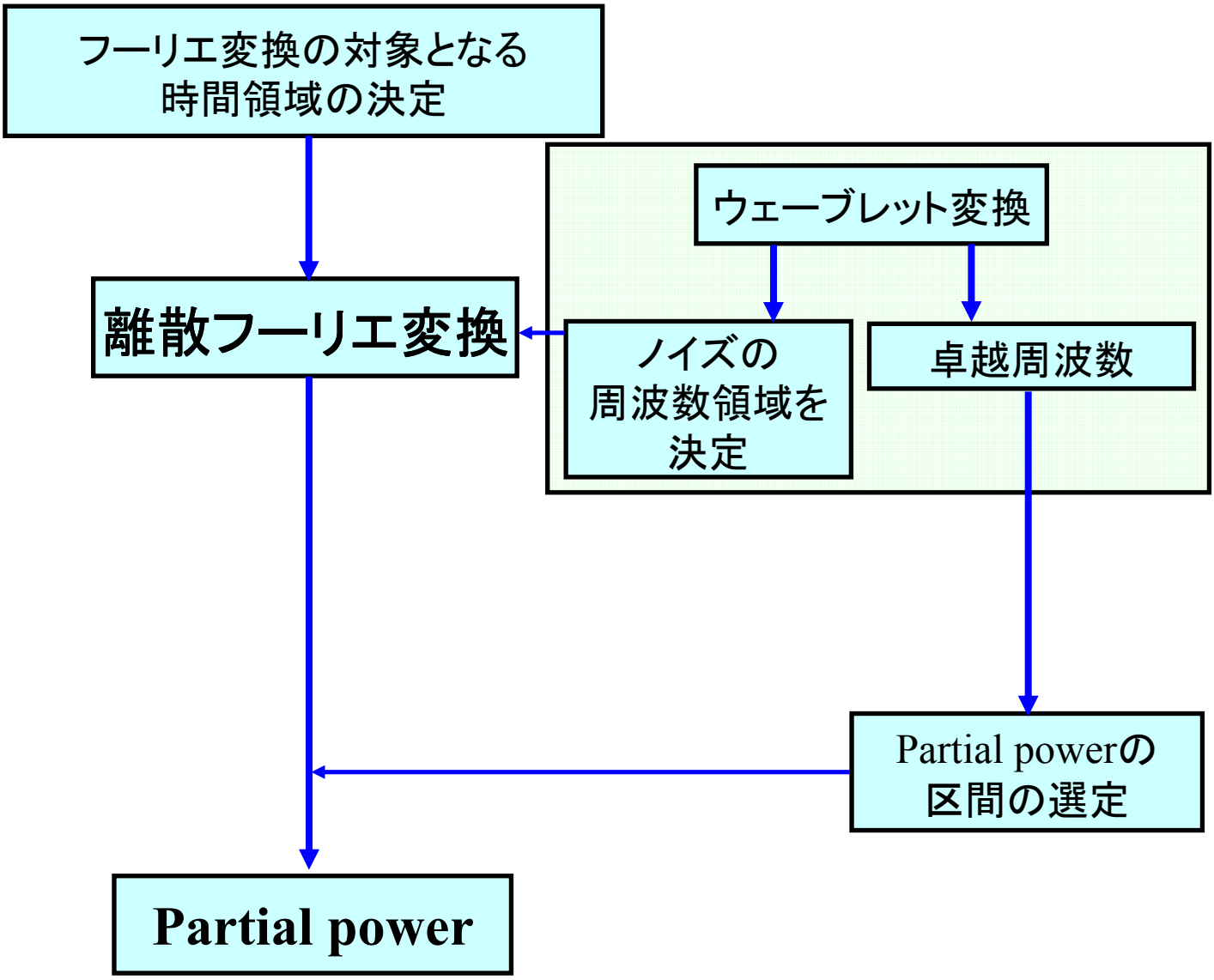



**図4.3.1　フーリエ変換からPartial powerを得るまでの流れ**

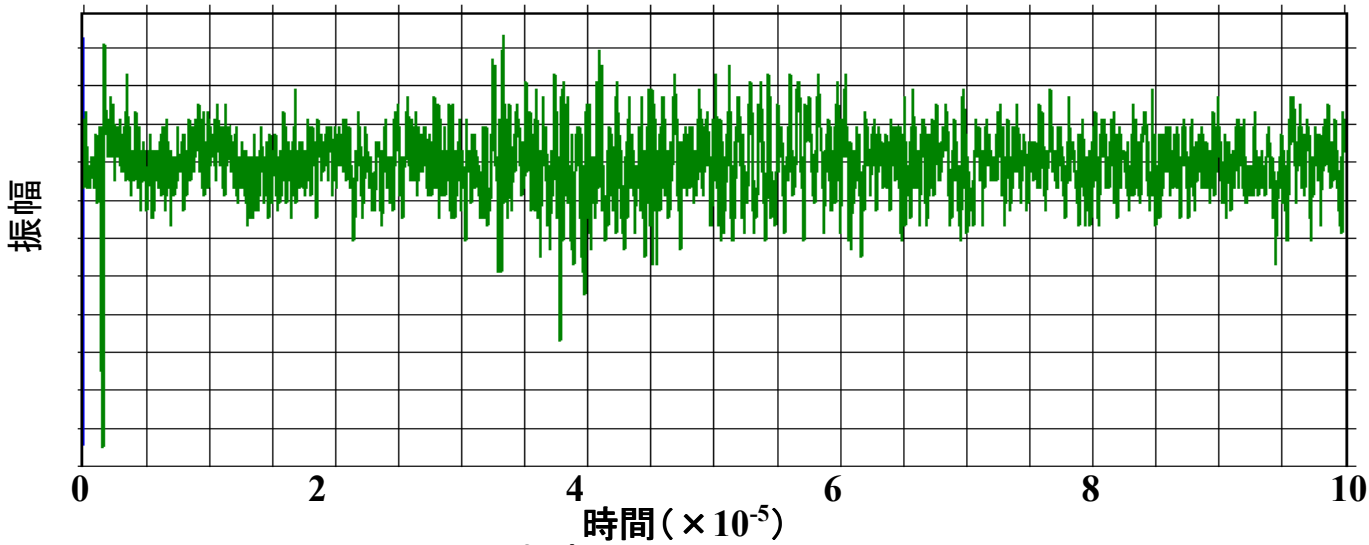



図4.3.2　超音波波形　5 MHz 200 kN

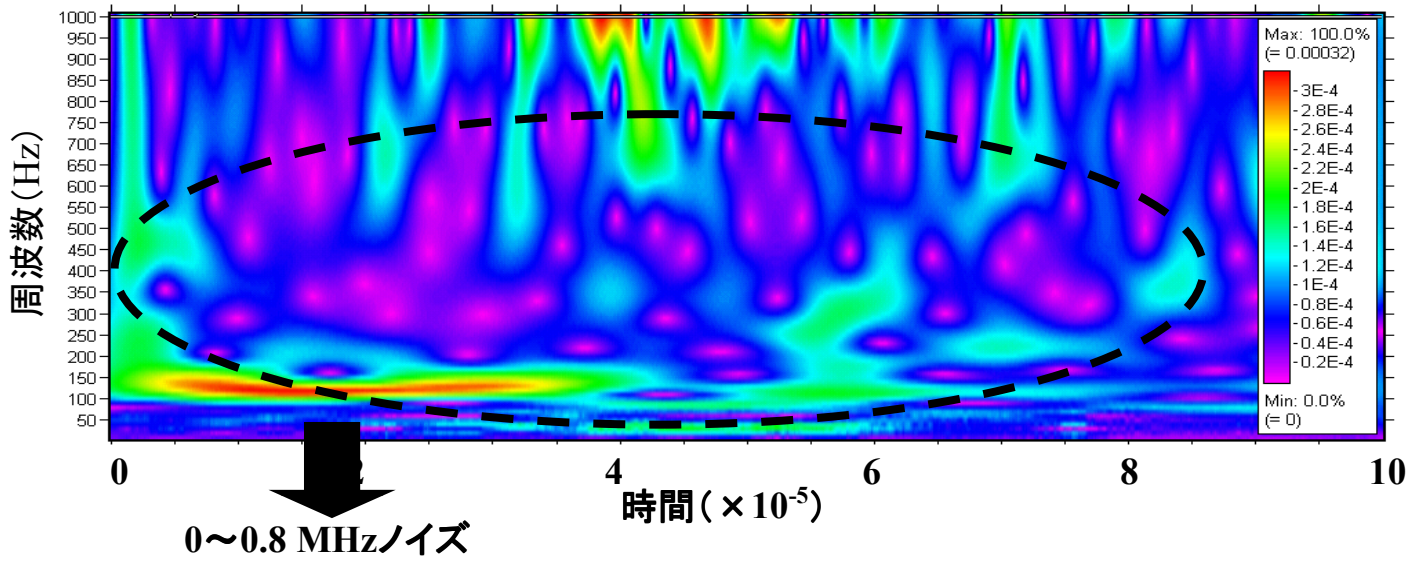



図4.3.3　ウェーブレットt結果　5 MHz　200 kN

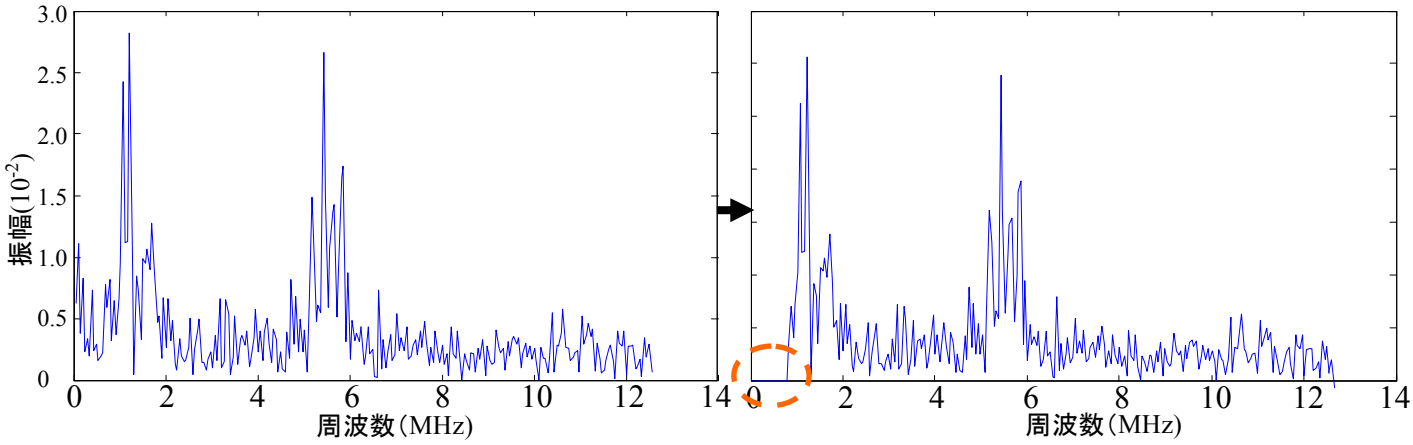



図4.3.4　離散フーリエ変換によるスペクトル解析図

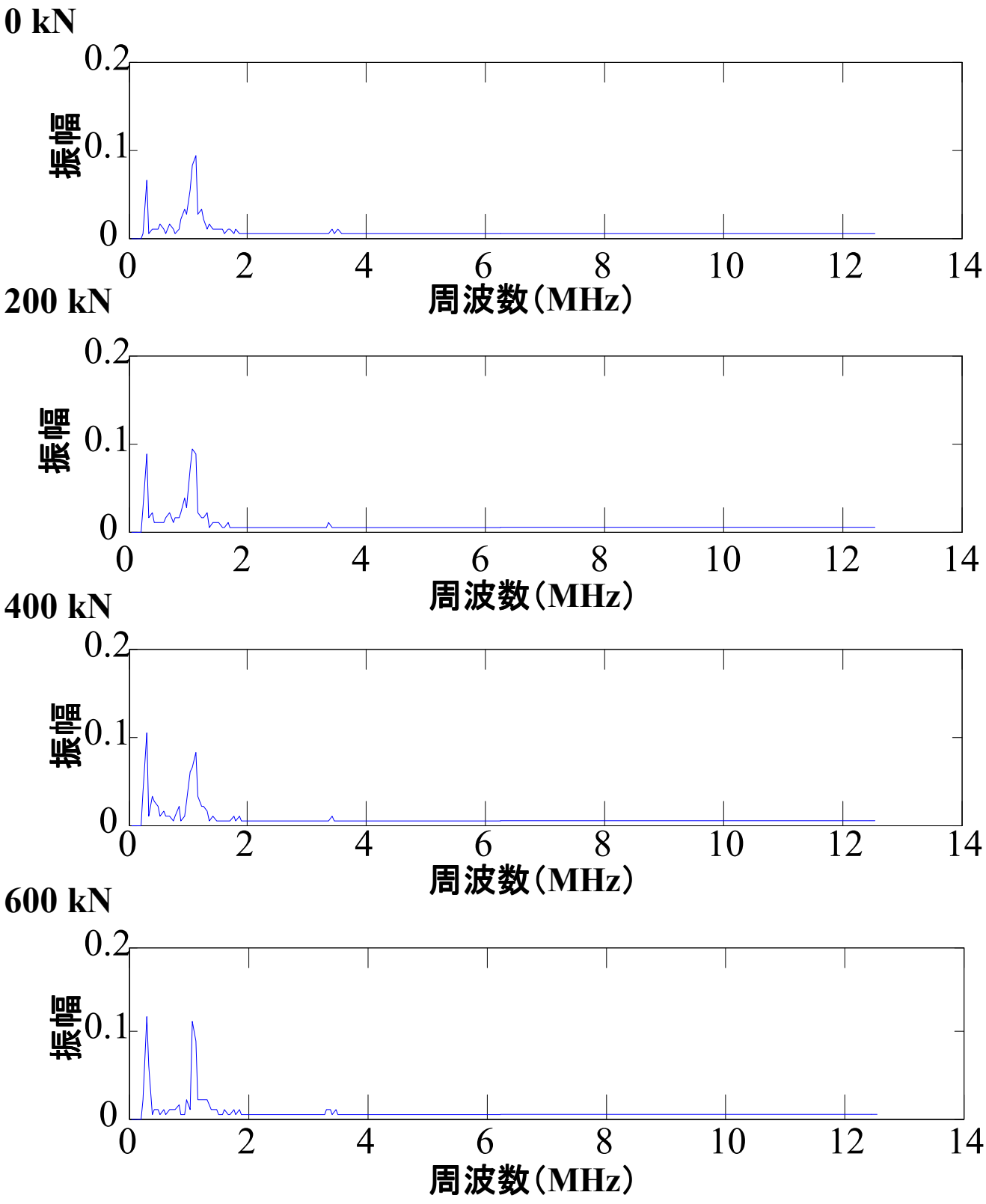



**図4.3.5　フーリエ変換によるスペクトル解析図（1 MHz）**

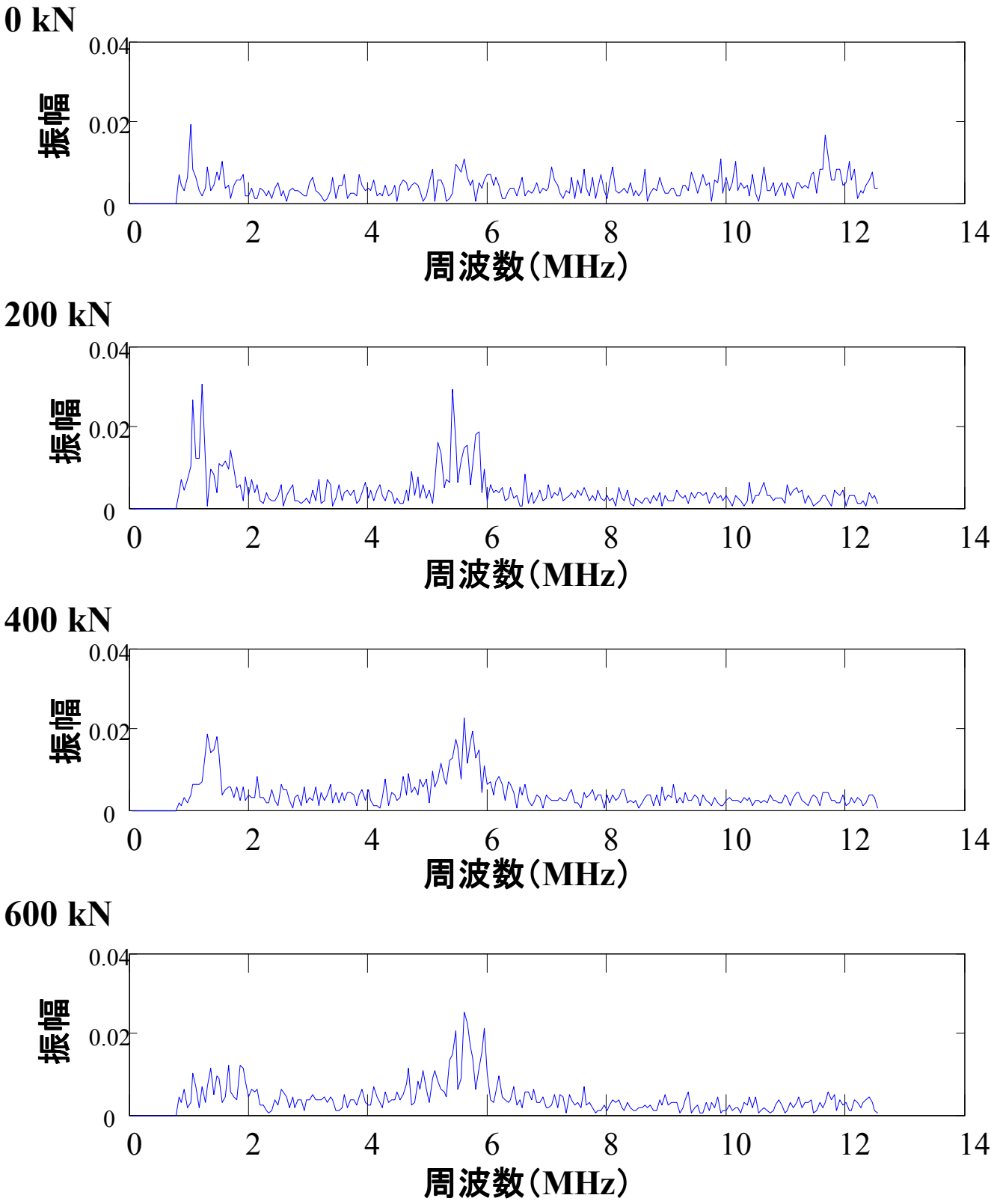



**図4.3.6　フーリエ変換によるスペクトル解析図（5 MHz）**

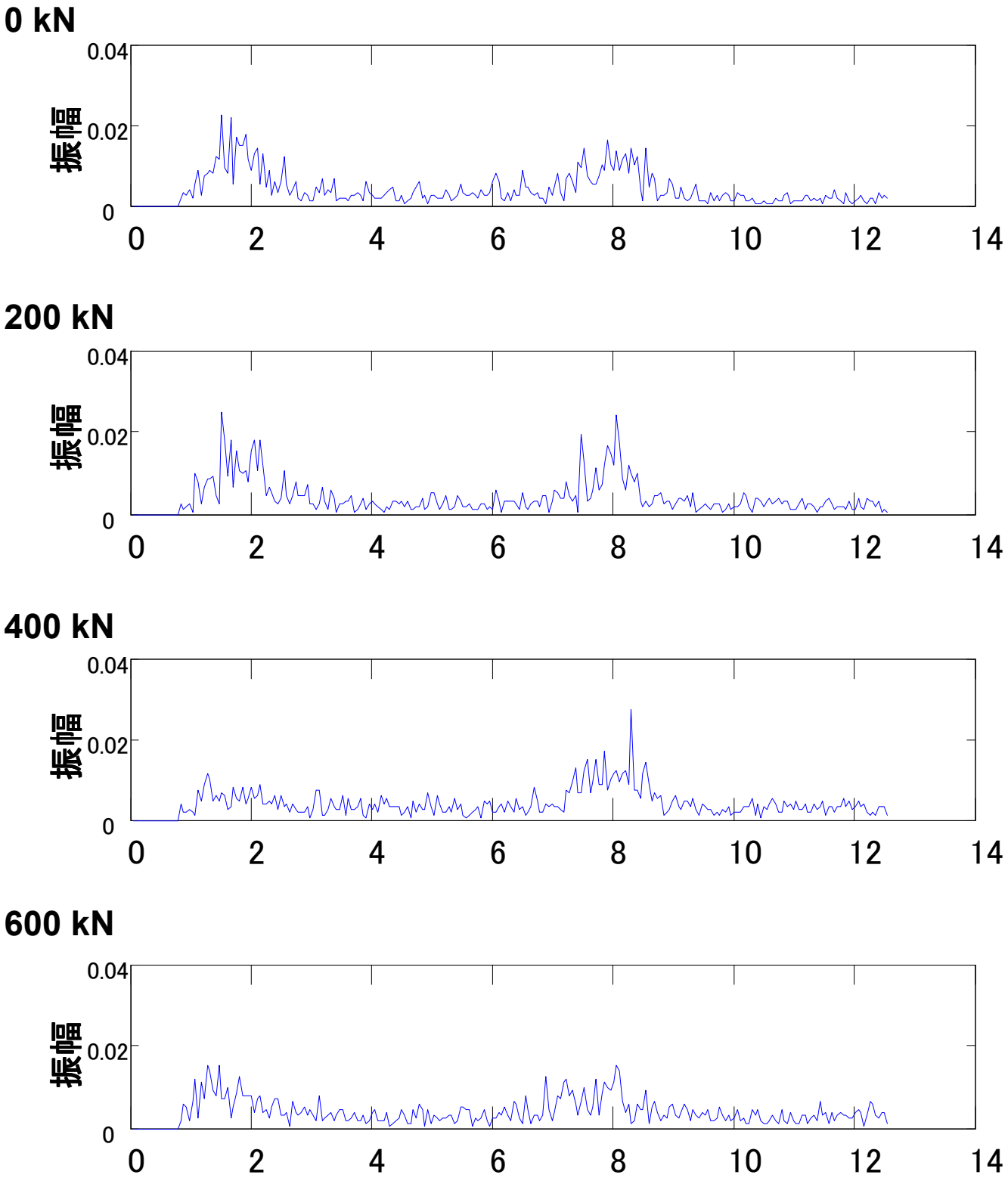
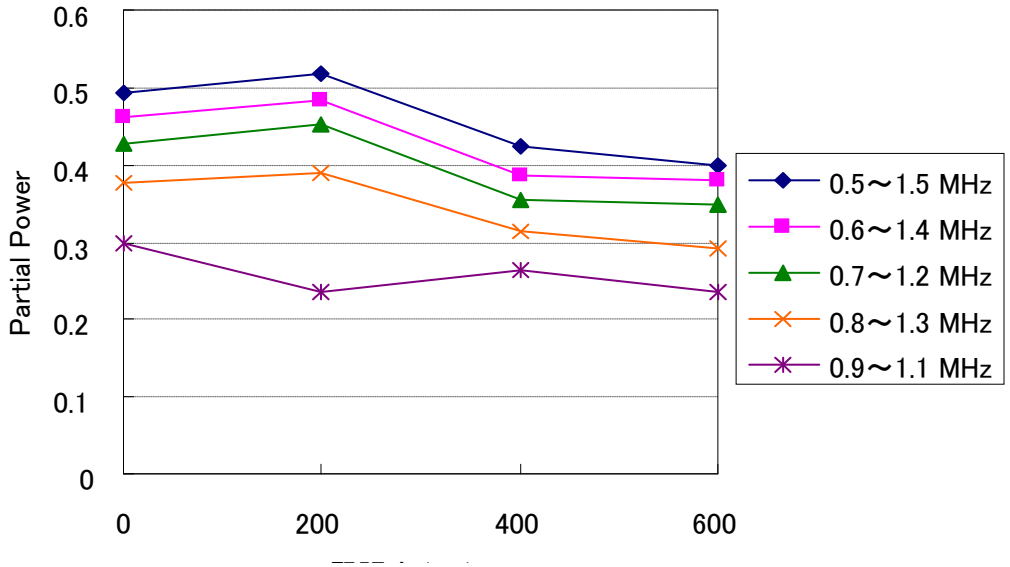
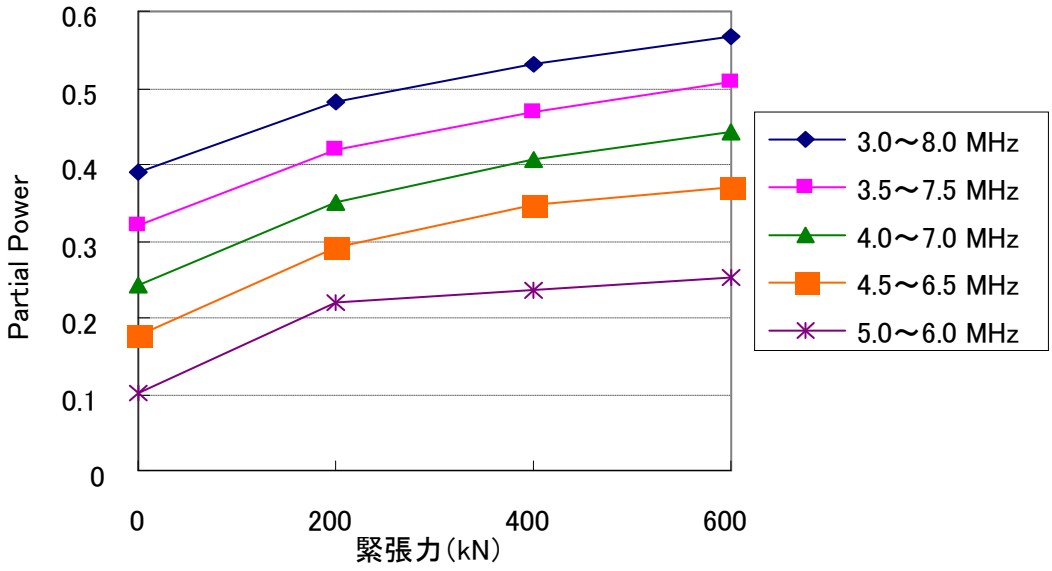



**図4.3.7　フーリエ変換によるスペクトル解析図（7.5 MHz）**

探触子
1.0 MHz




探触子
5.0 MHz




探触子
7.5 MHz

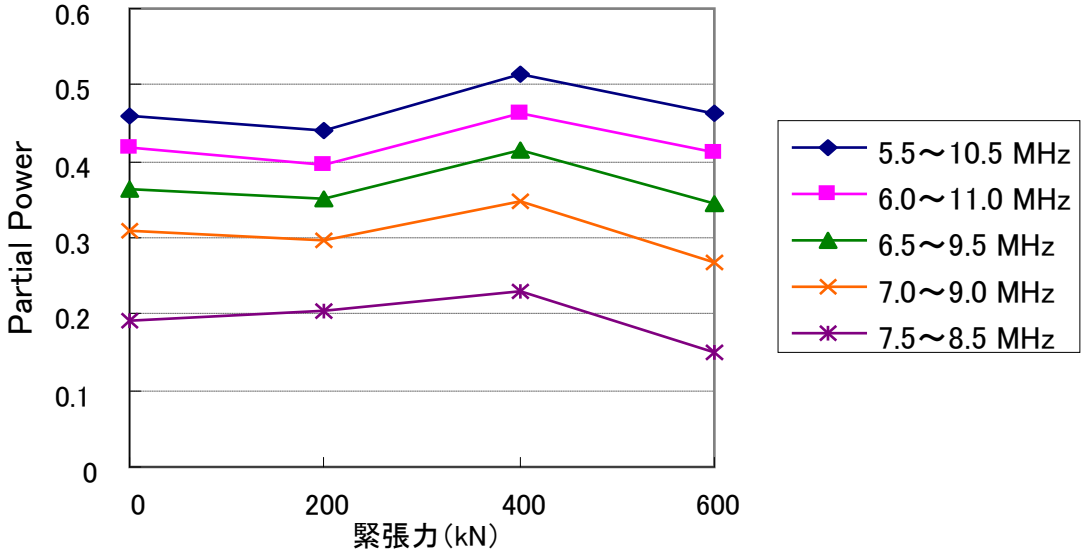



**図4.3.8　Partial powerと緊張力の関係**

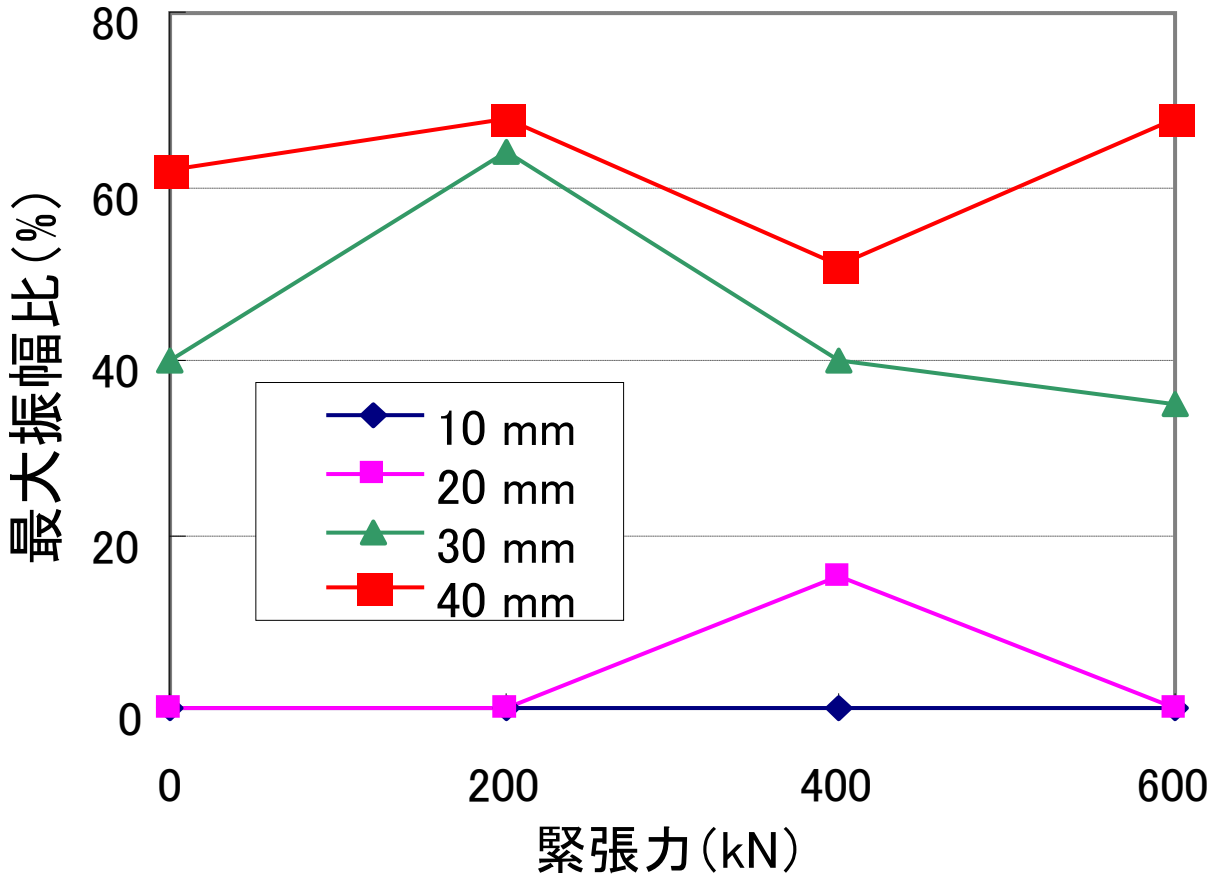



**図5.1.1　緊張力と最大振幅比の関係　1 MHz 測定方向B アクリル板なし**

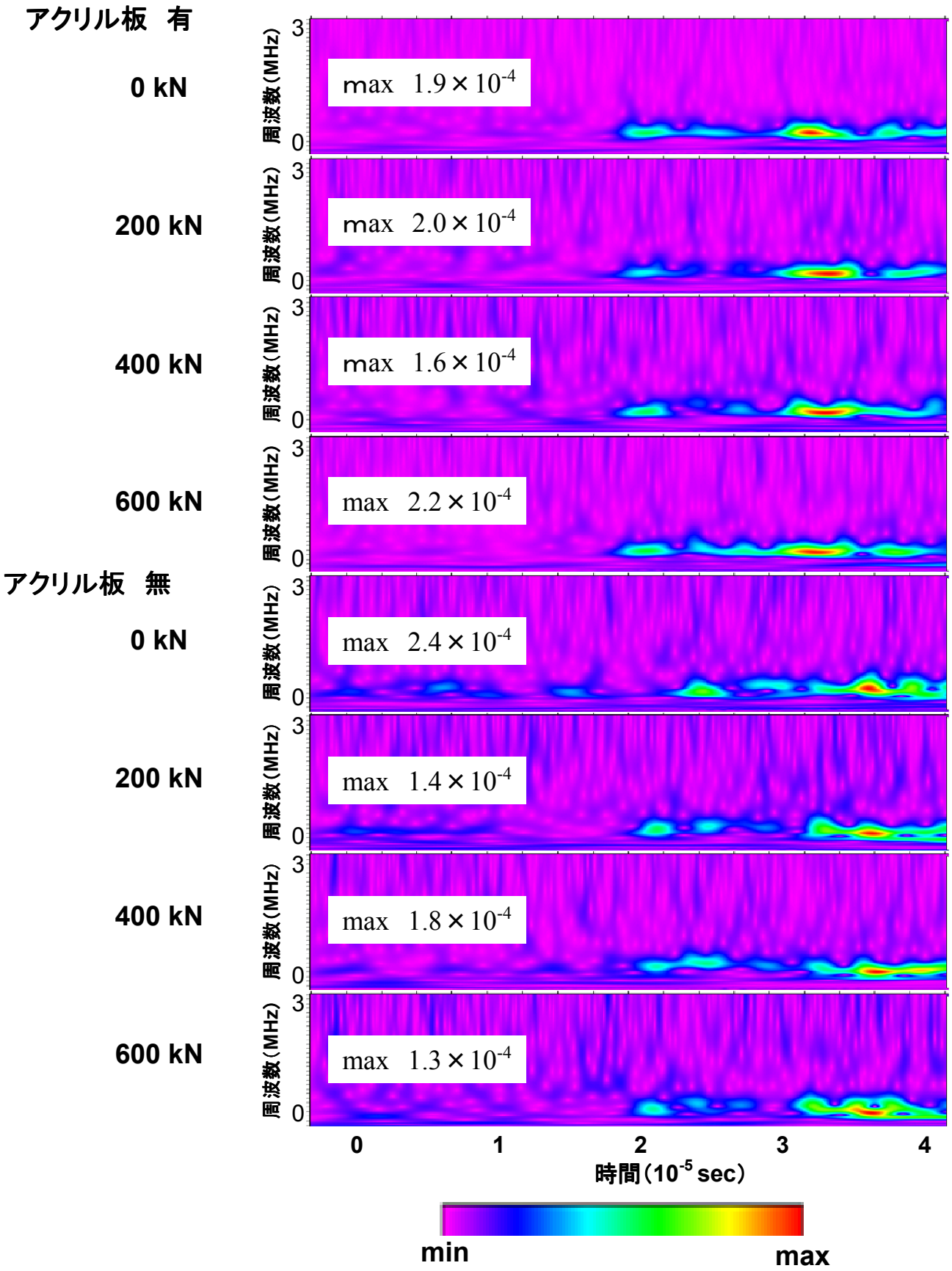



**図5.2.1　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向A　測定位置　10 mm

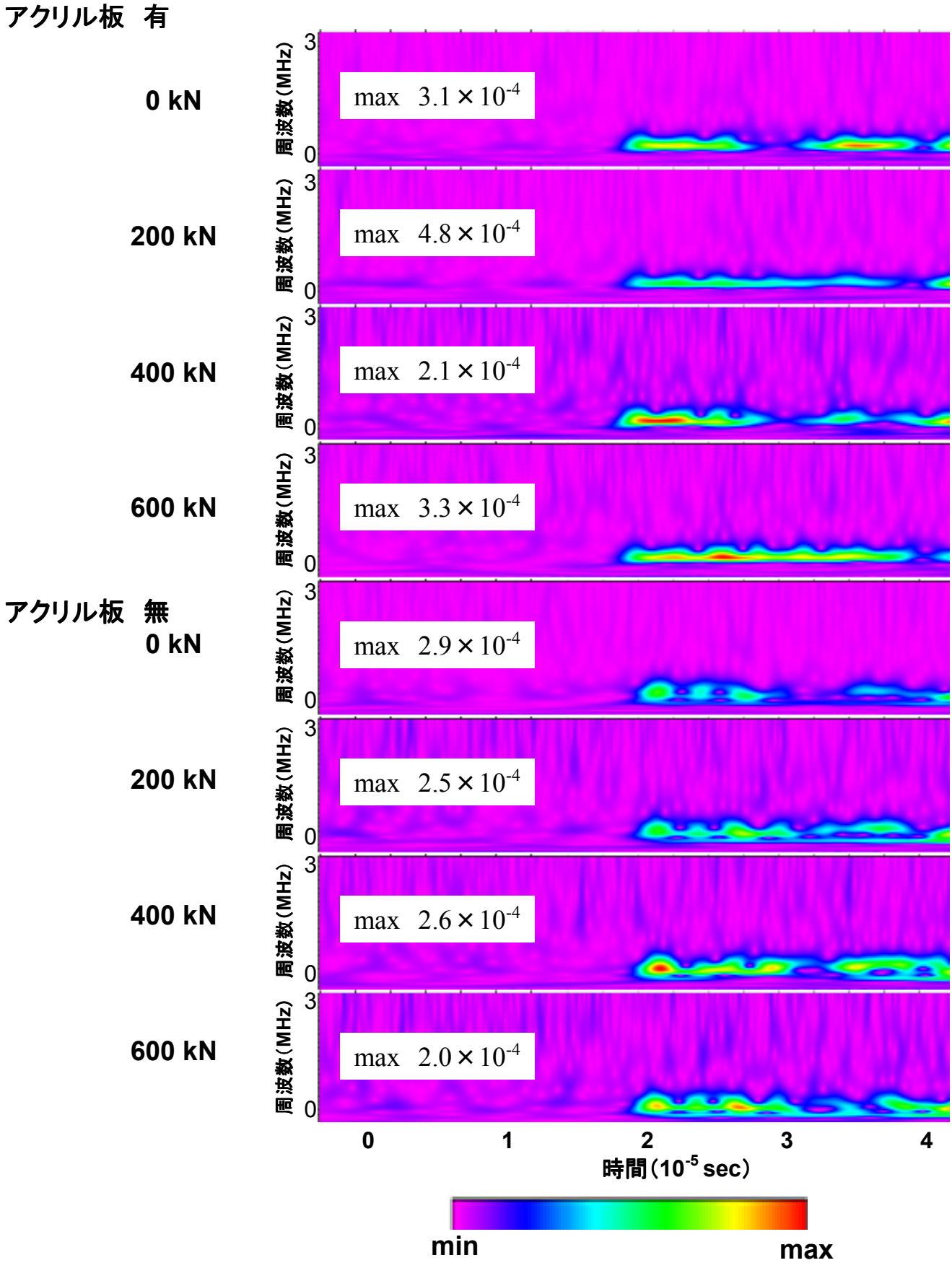



**図5.2.2　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向A　測定位置　20 mm

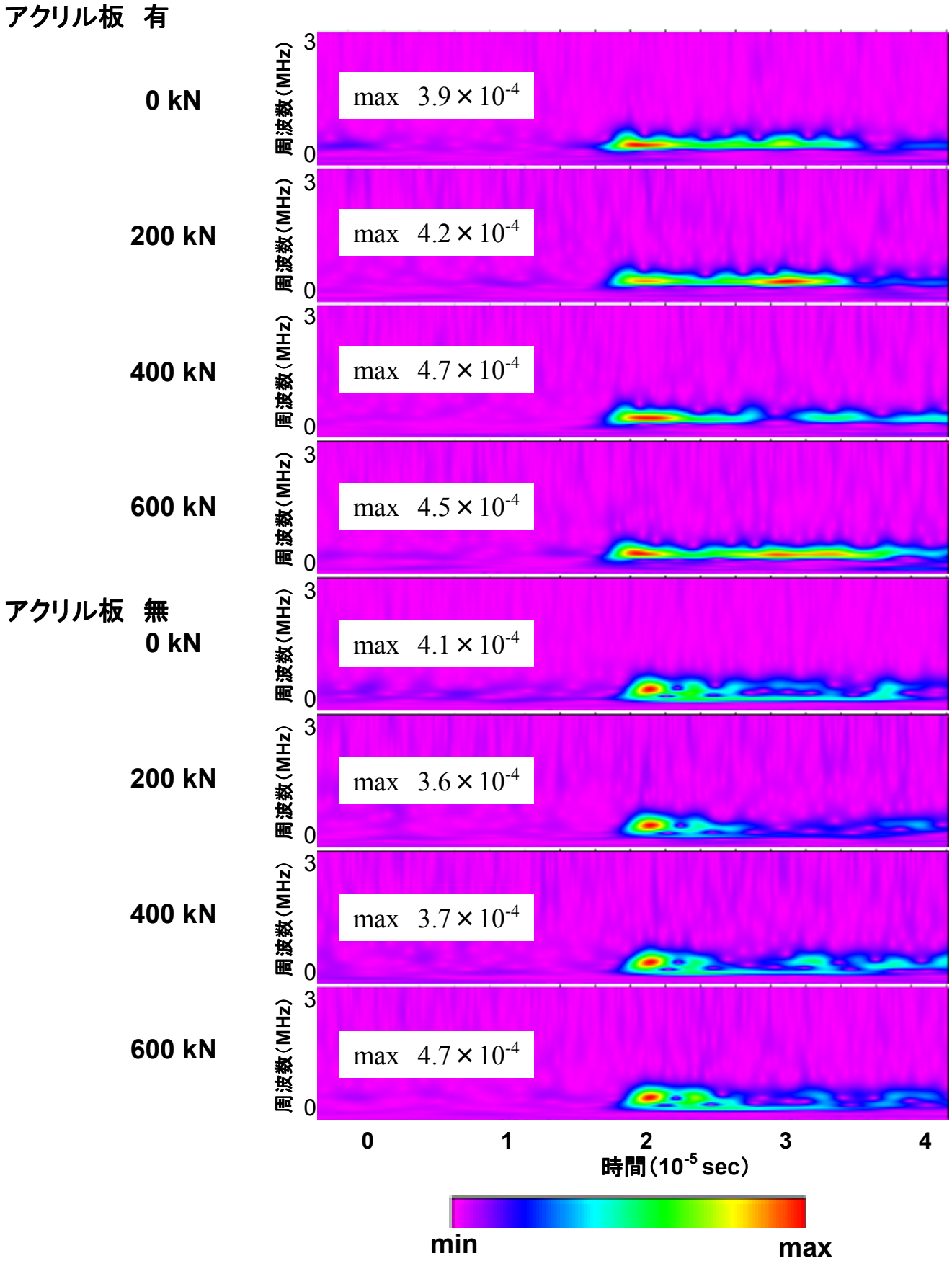



**図5.2.3　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向A　測定位置　30 mm

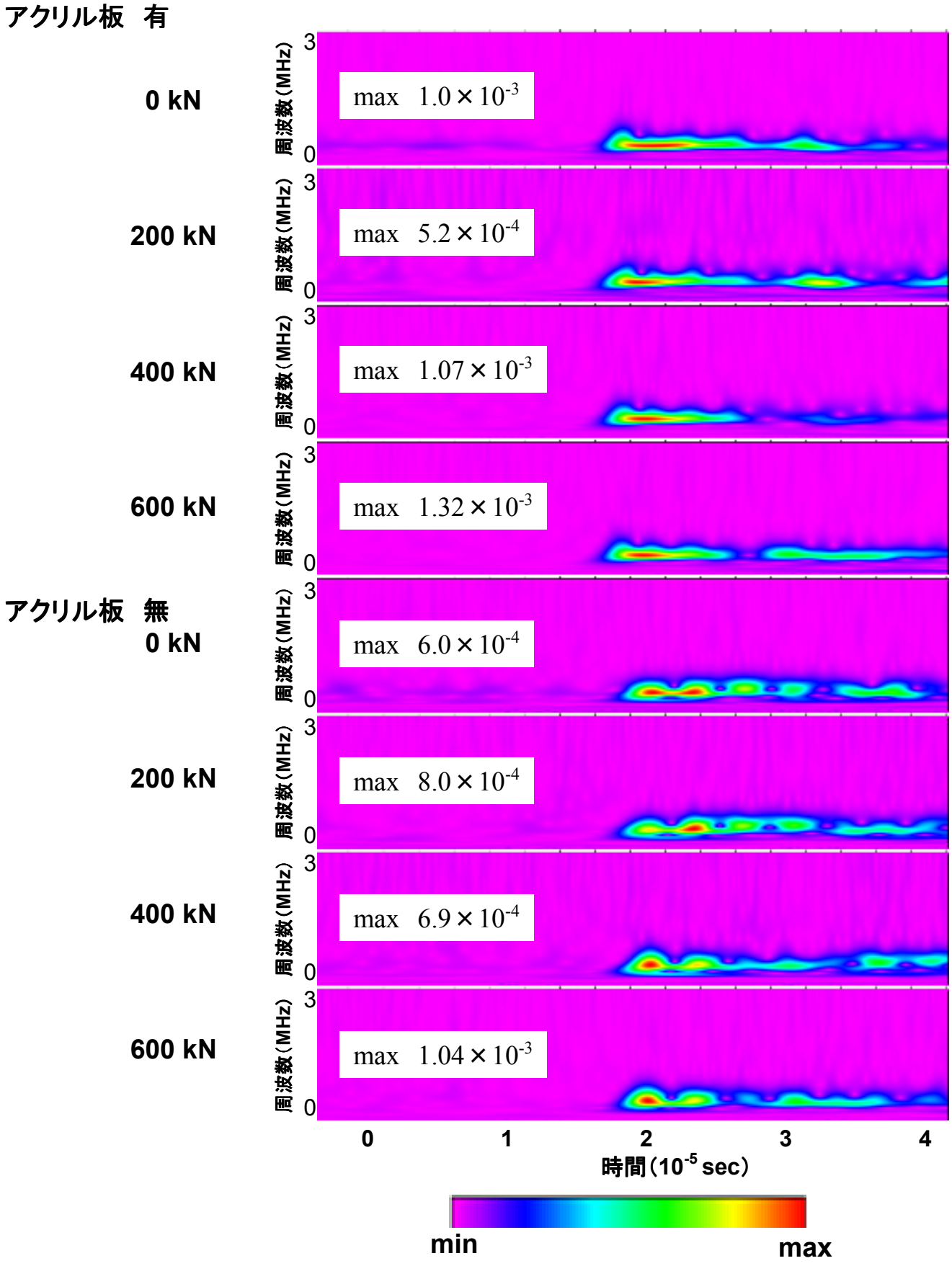



**図5.2.4　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向A　測定位置　40 mm

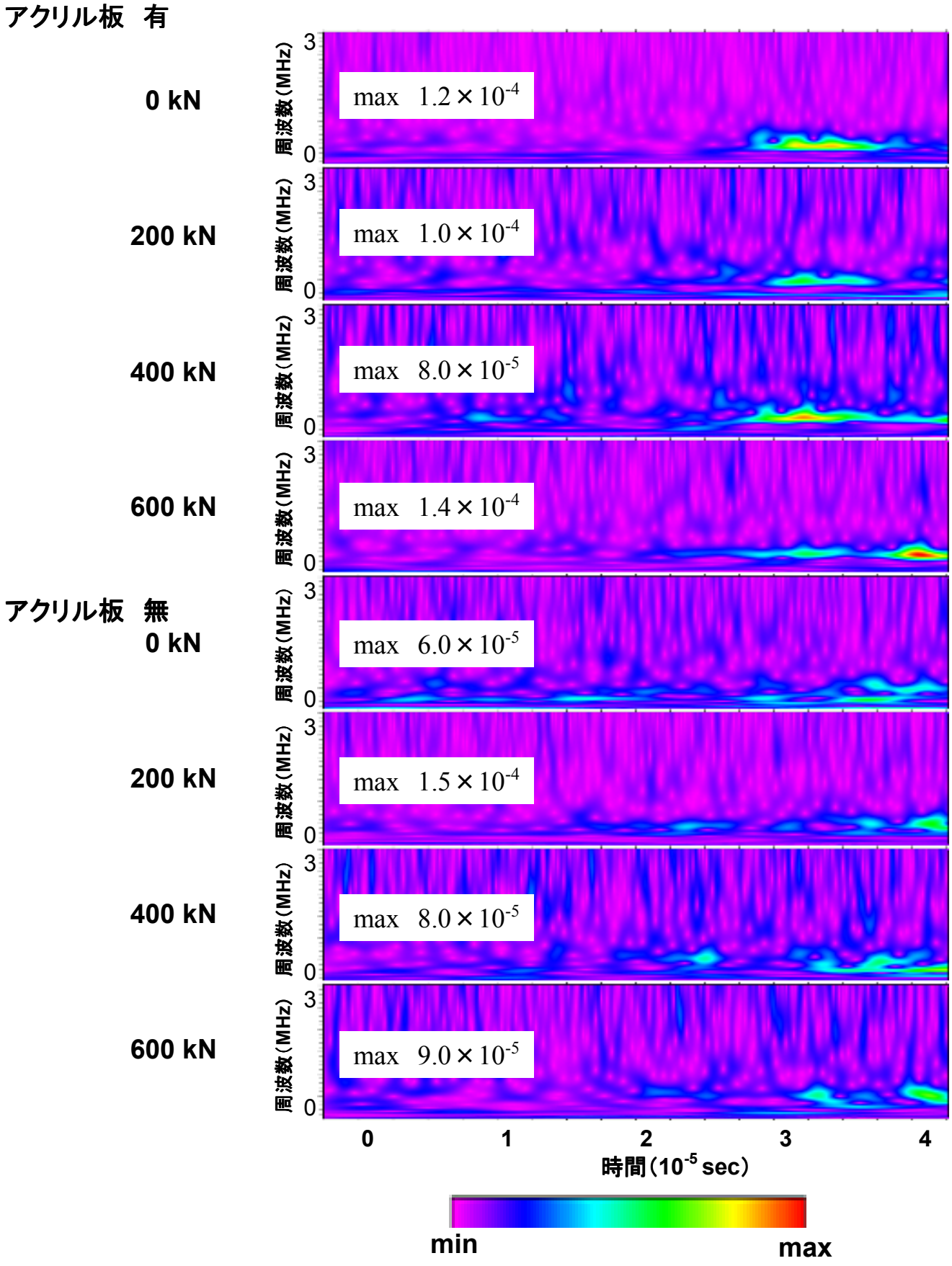



**図5.2.5　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向**B**　測定位置　10 mm

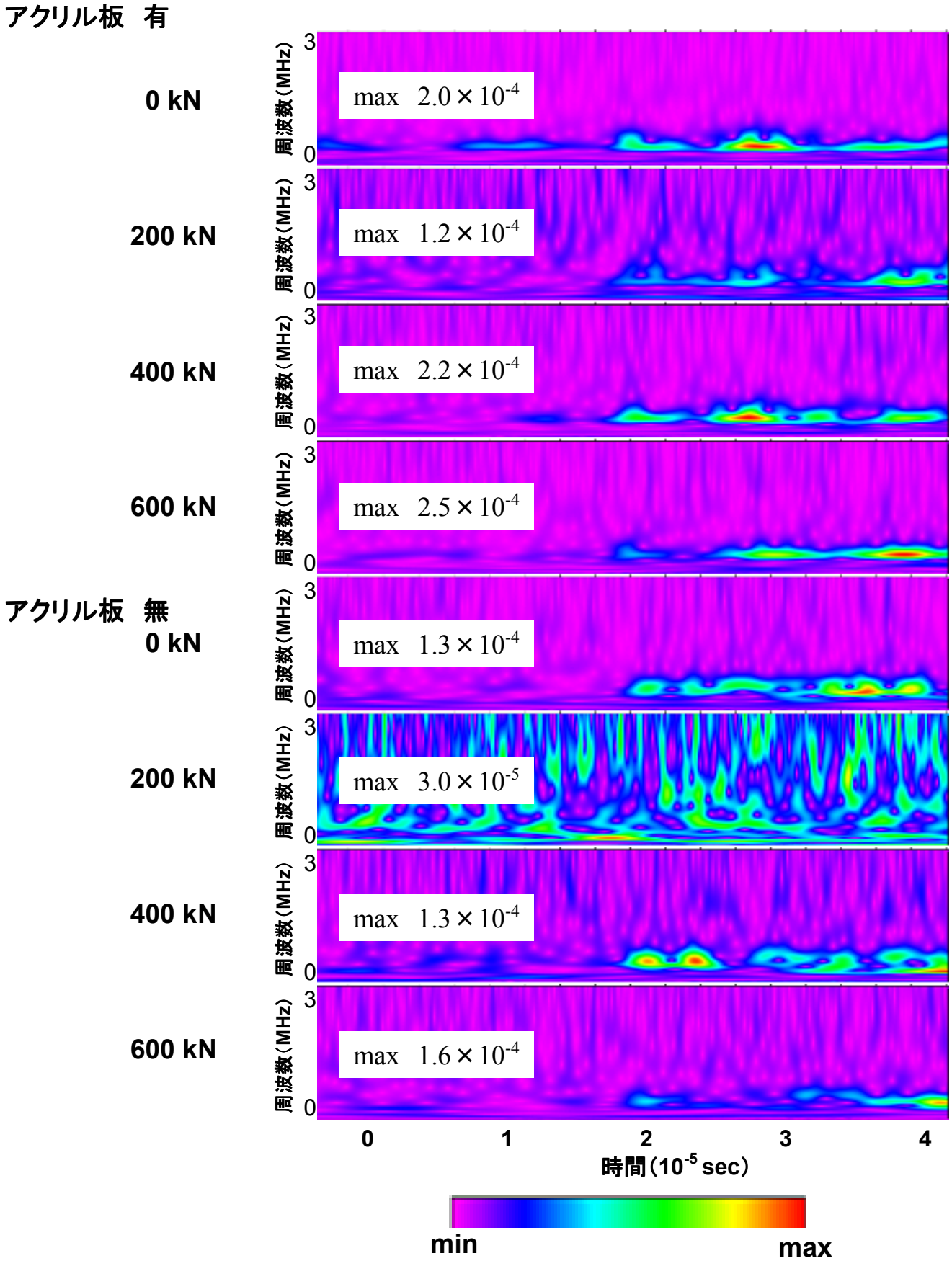



**図5.2.6　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向B　測定位置　20 mm

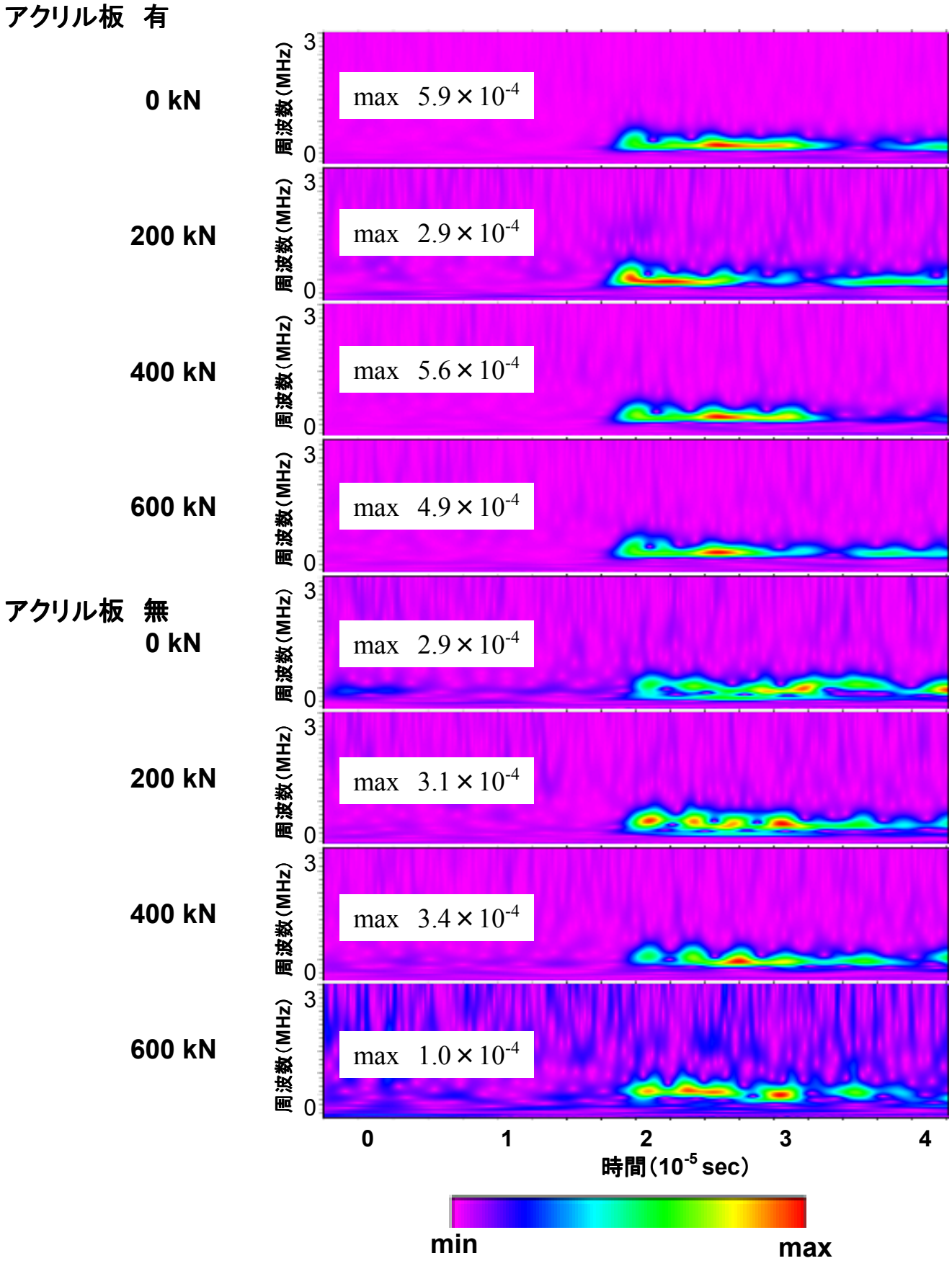



**図5.2.7　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向B　測定位置　30 mm

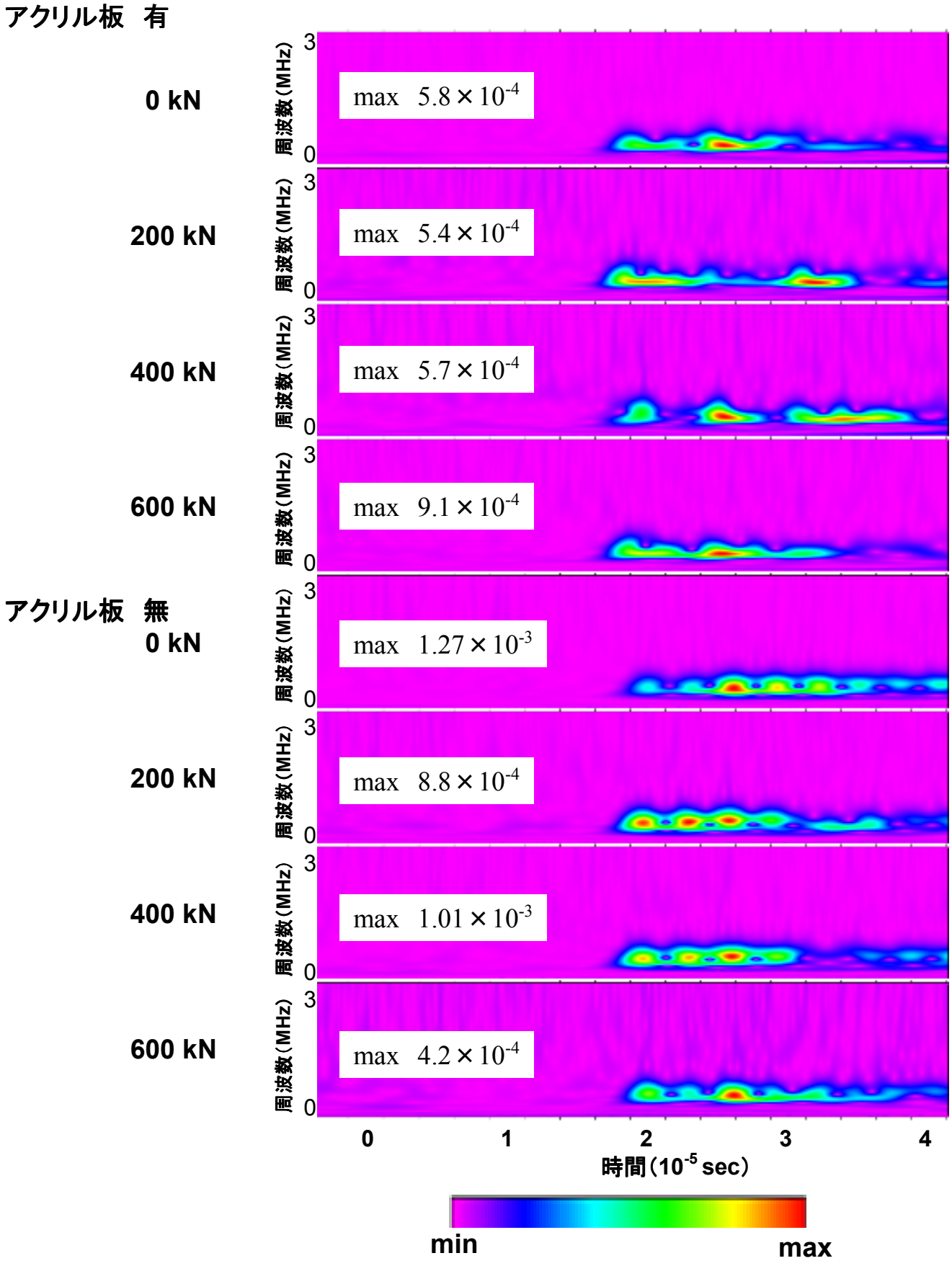



**図5.2.8　ウェーブレット変換結果　　1 MHz**　測定方向B　測定位置　40 mm

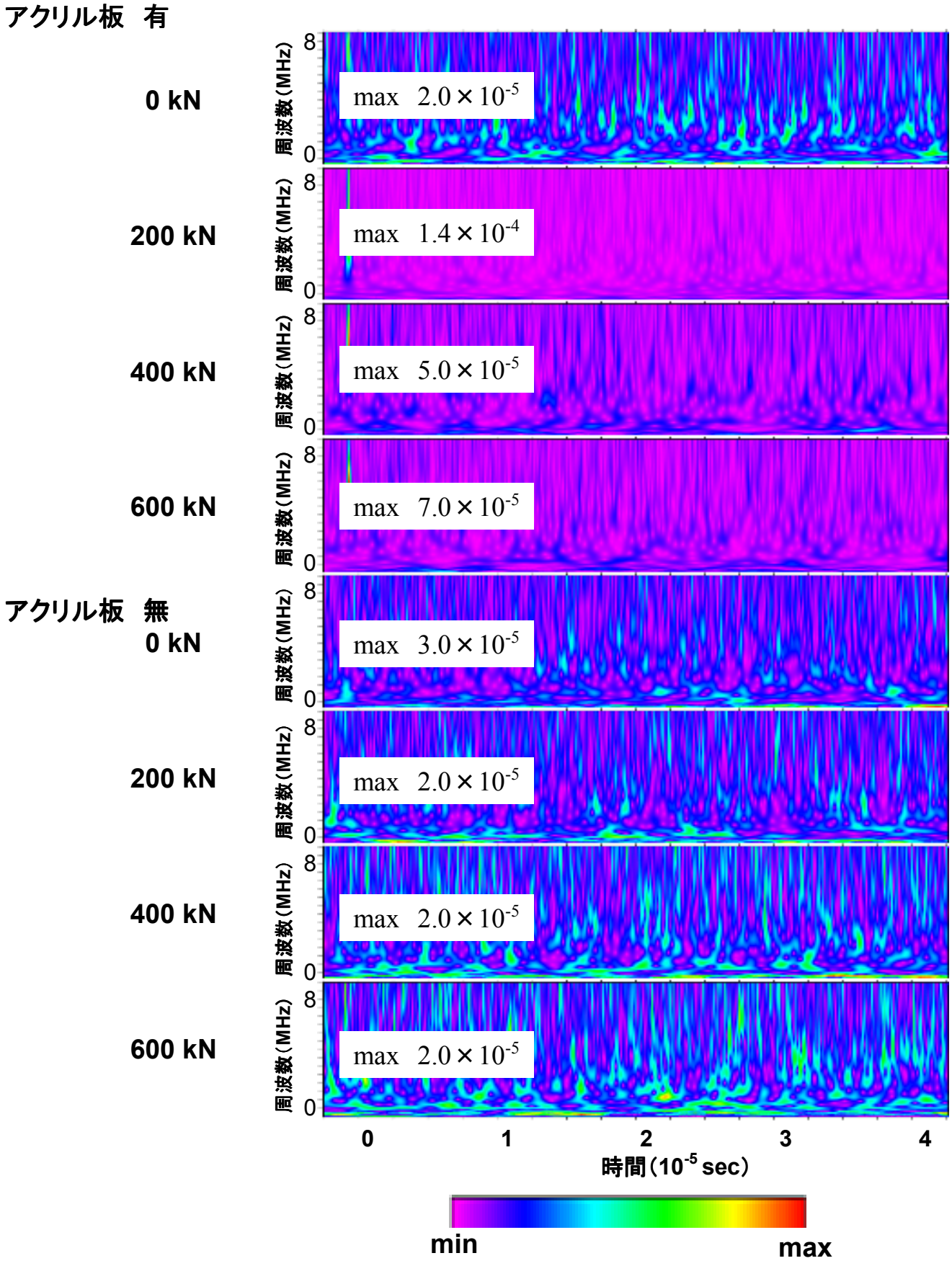



**図5.2.9　ウェーブレット変換結果　　5 MHz**　測定方向A　測定位置　10 mm

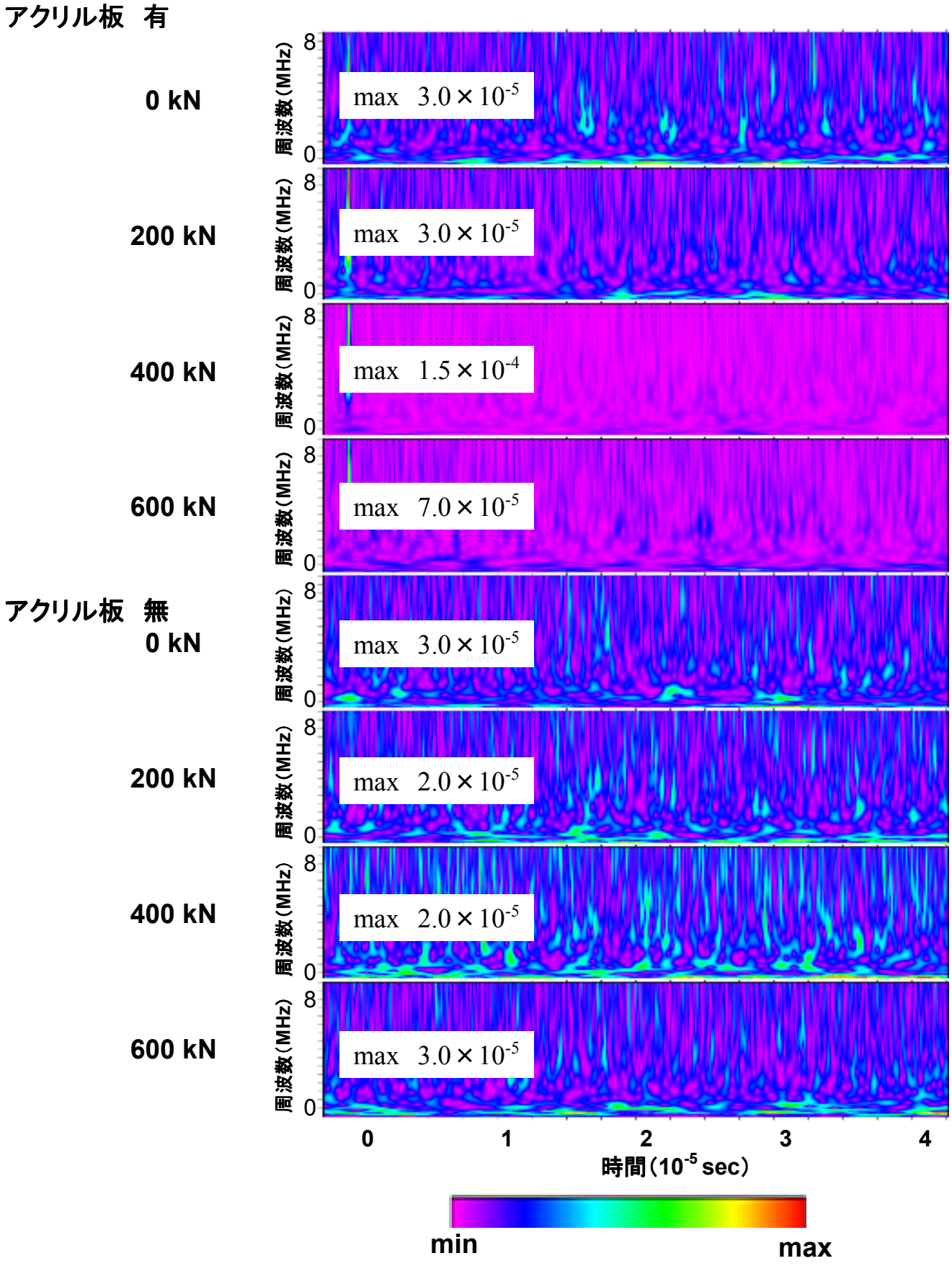



**図5.2.10　ウェーブレット変換結果　　5 MHz**　測定方向A　測定位置　20 mm

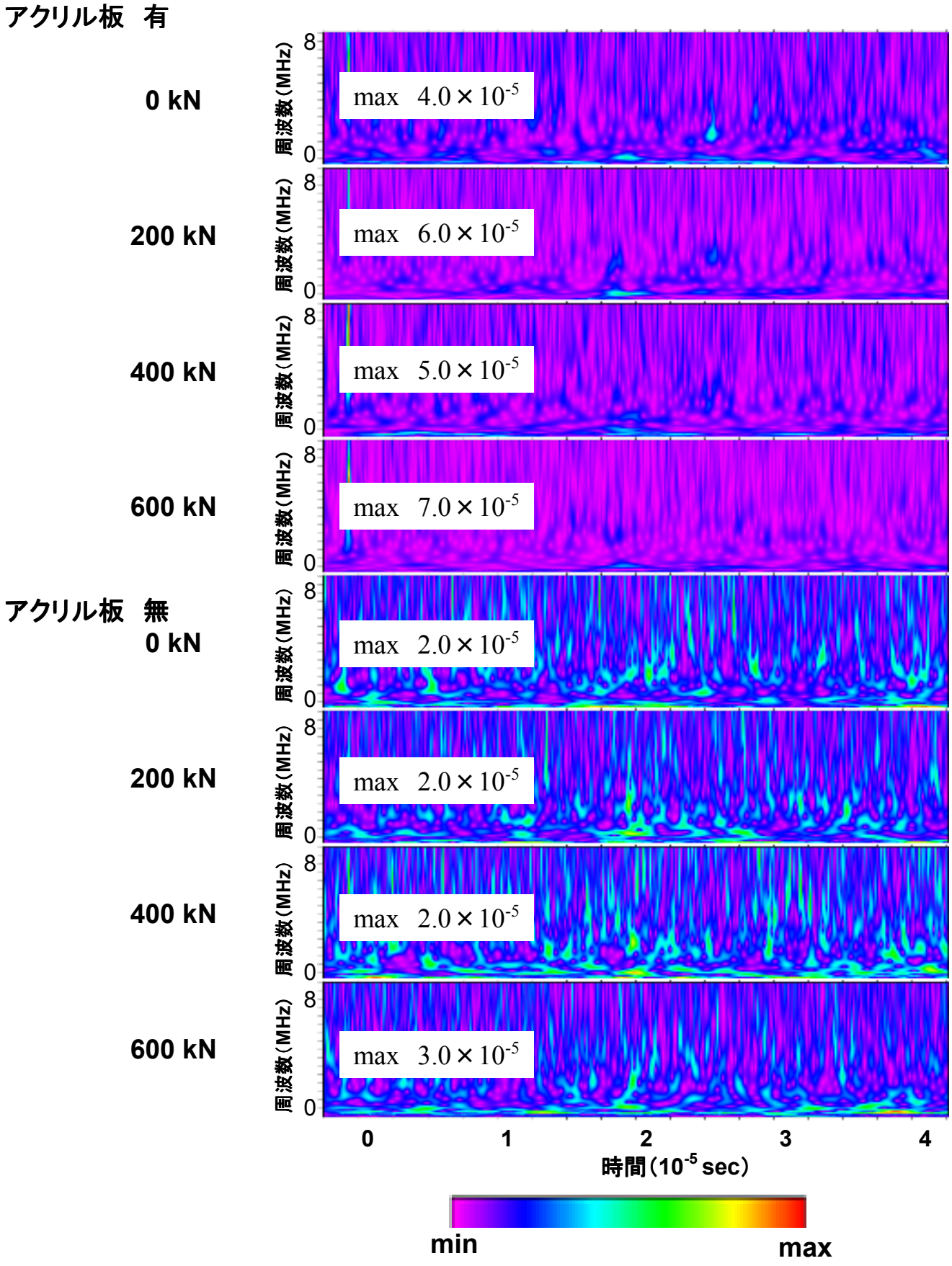



**図5.2.11　ウェーブレット変換結果　　5 MHz**　測定方向A　測定位置　30 mm

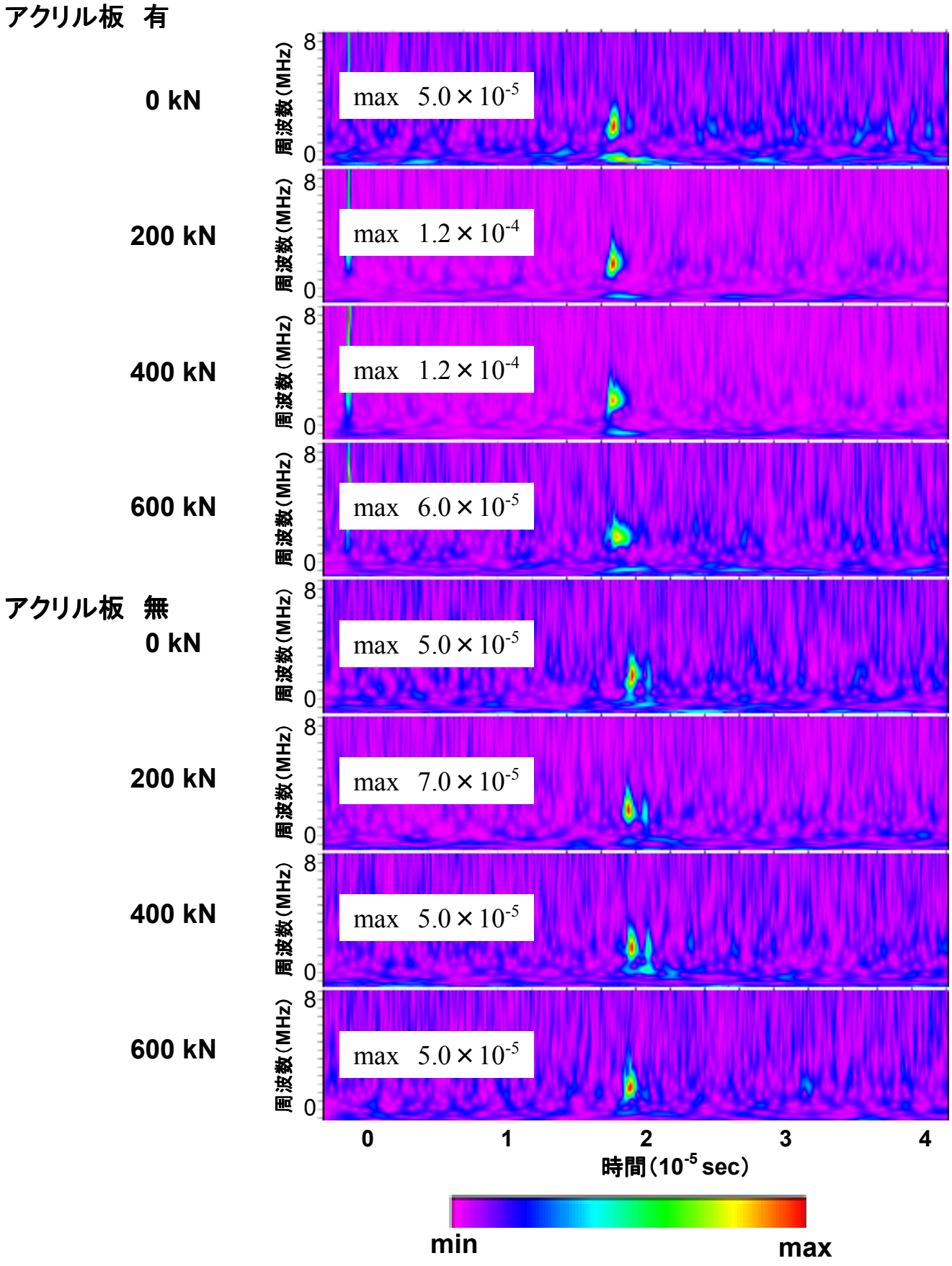



**図5.2.12　ウェーブレット変換結果　　5 MHz**　測定方向A　測定位置　40 mm

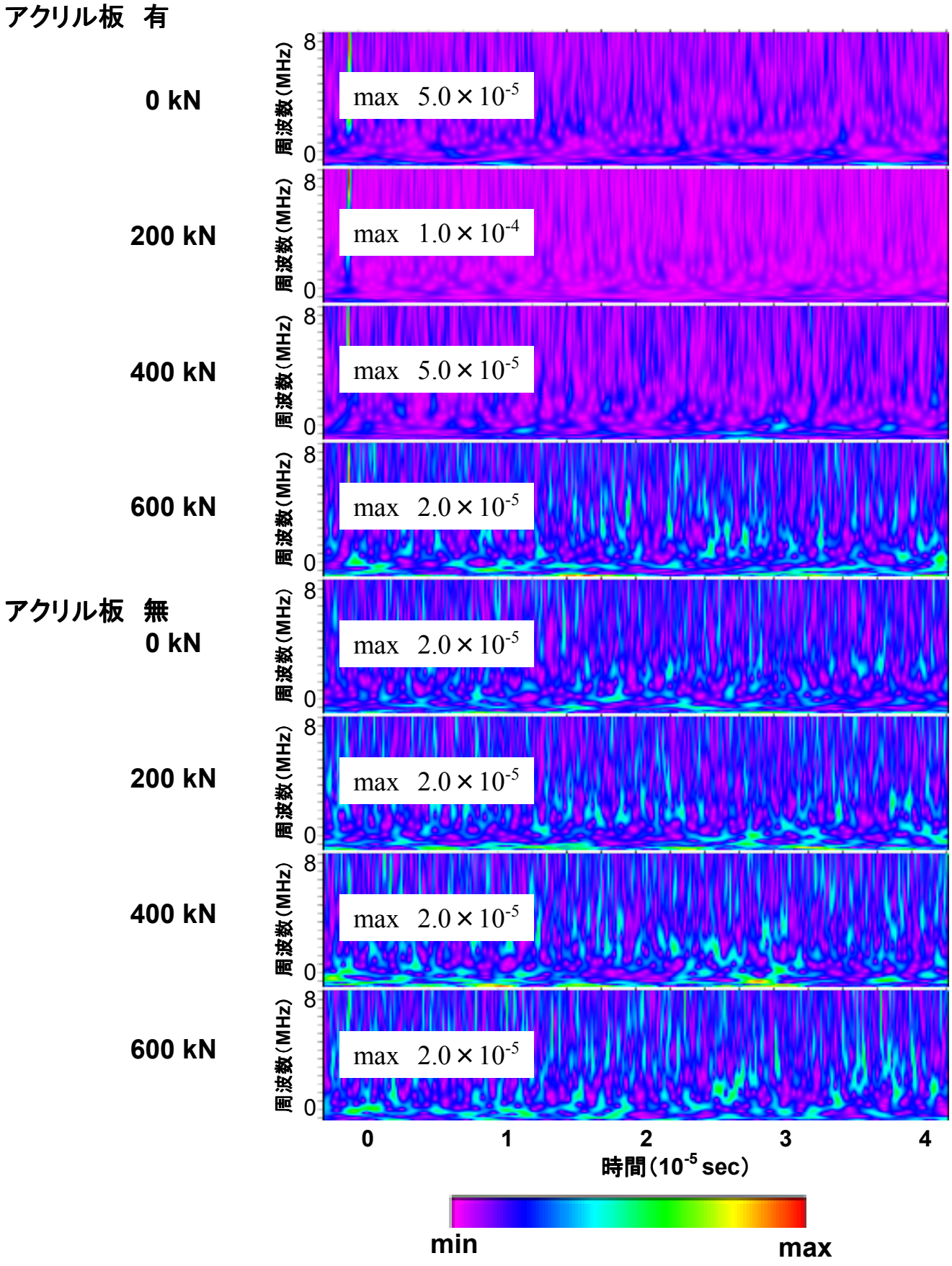



**図5.2.13　ウェーブレット変換結果　　5 MHz**　測定方向B　測定位置　10 mm

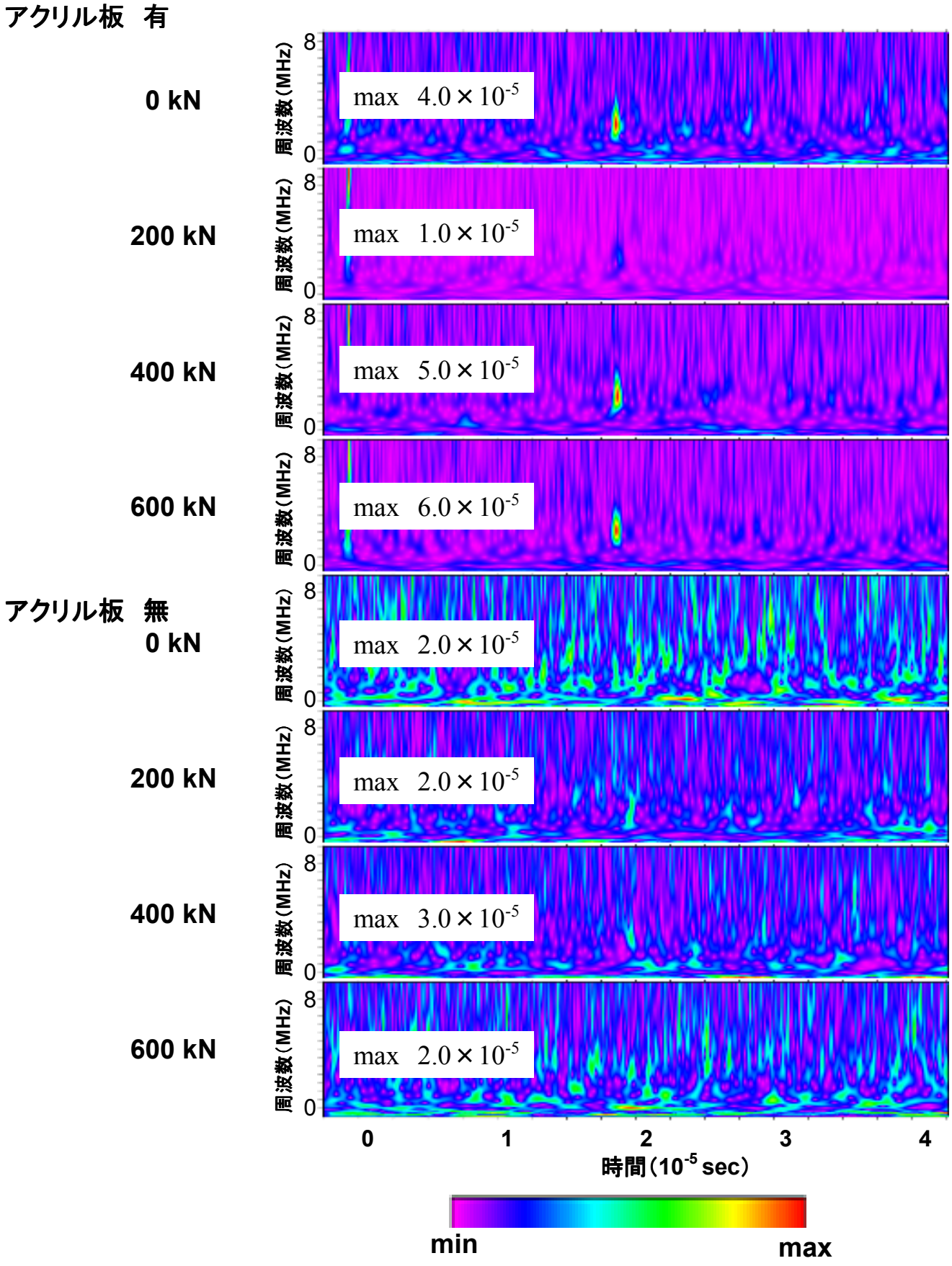



**図5.2.14　ウェーブレット変換結果**　　**5MHz**　測定方向B　測定位置　20 mm

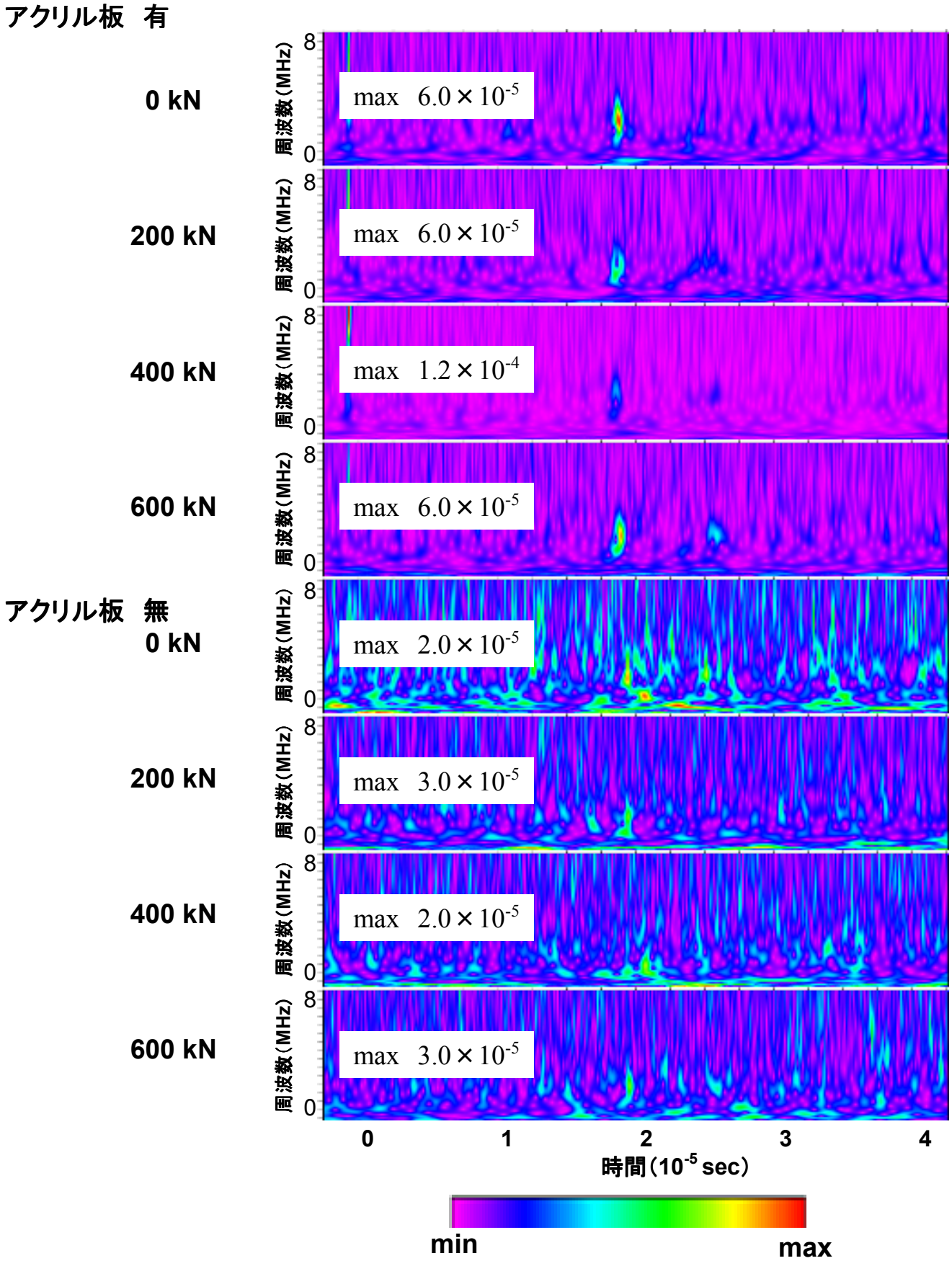



**図5.2.15　ウェーブレット変換結果**　　**5 MHz**　測定方向B　測定位置　30 mm

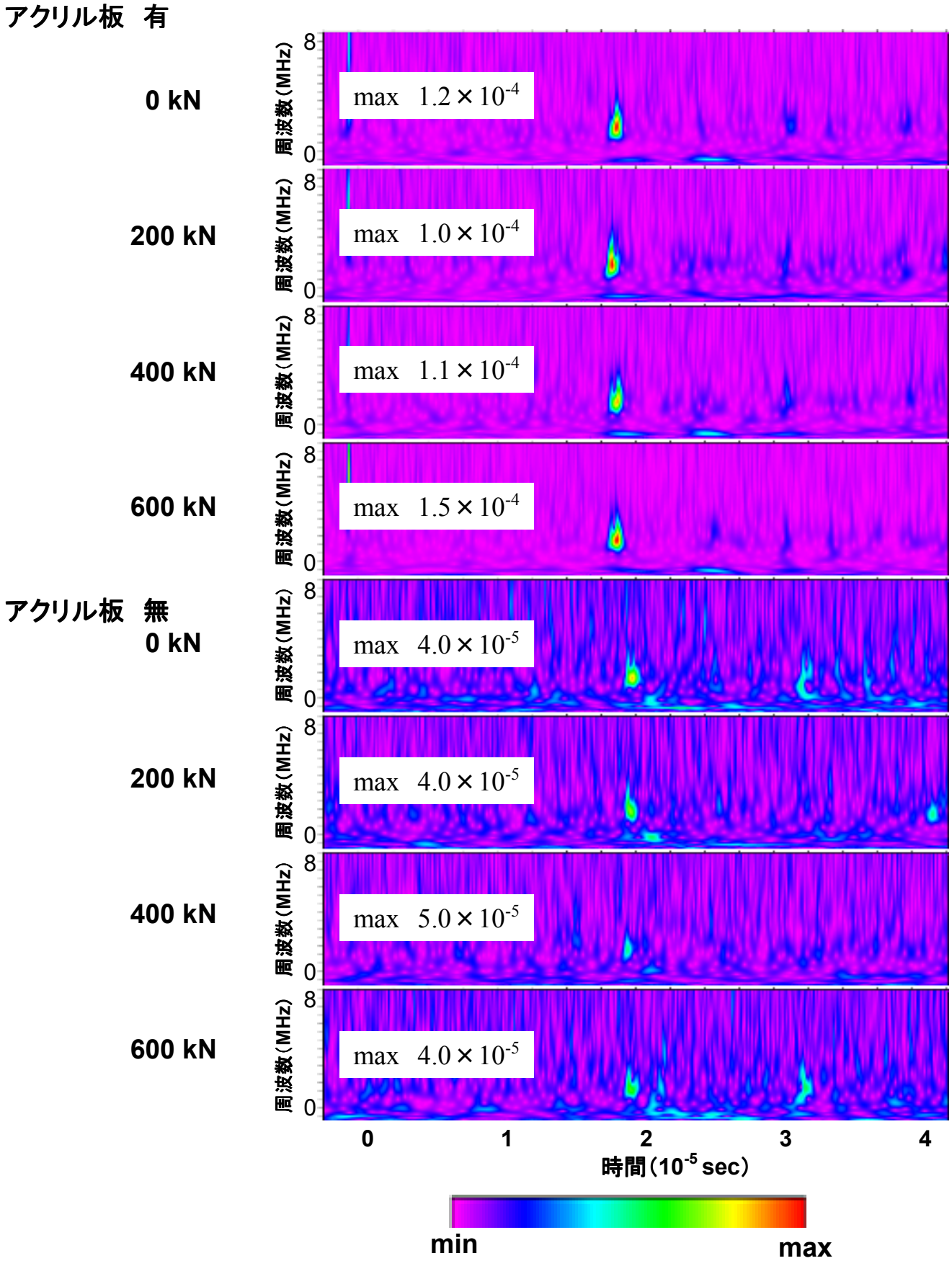



**図5.2.16　ウェーブレット変換結果　　5 MHz**　測定方向B　測定位置　40 mm

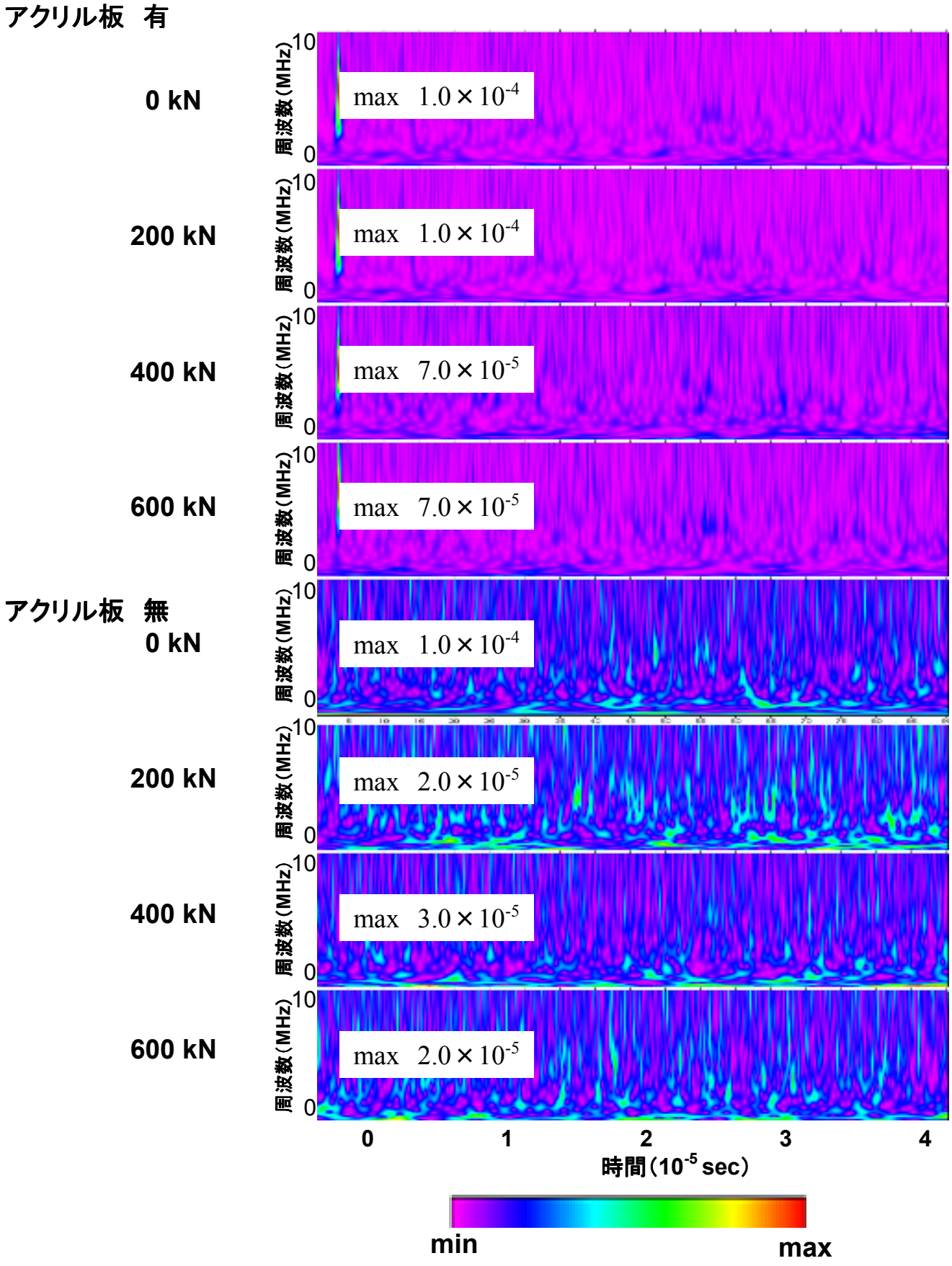



**図5.2.17　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向A　測定位置　10 mm

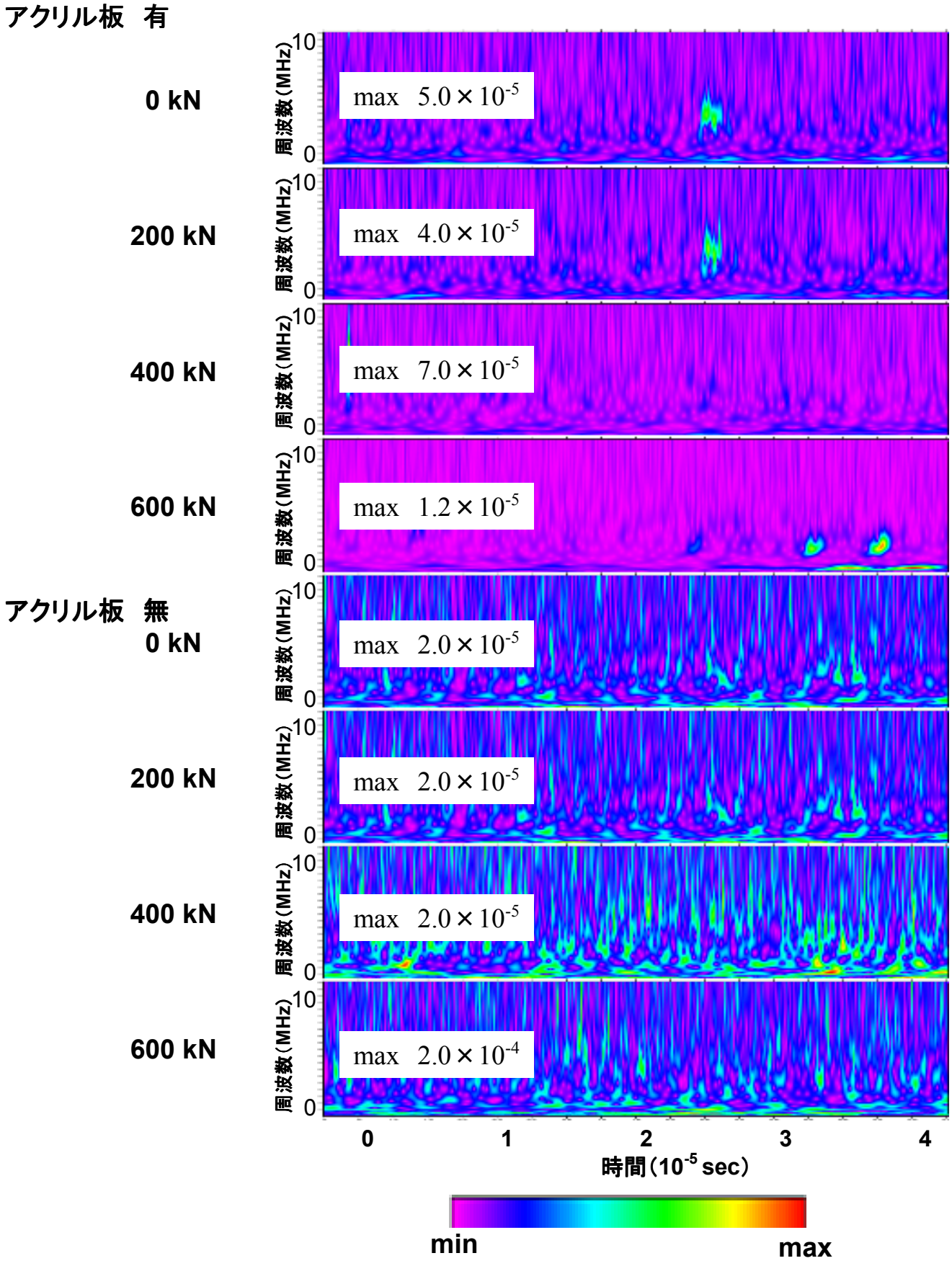



**図5.2.18　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向A　測定位置　20 mm

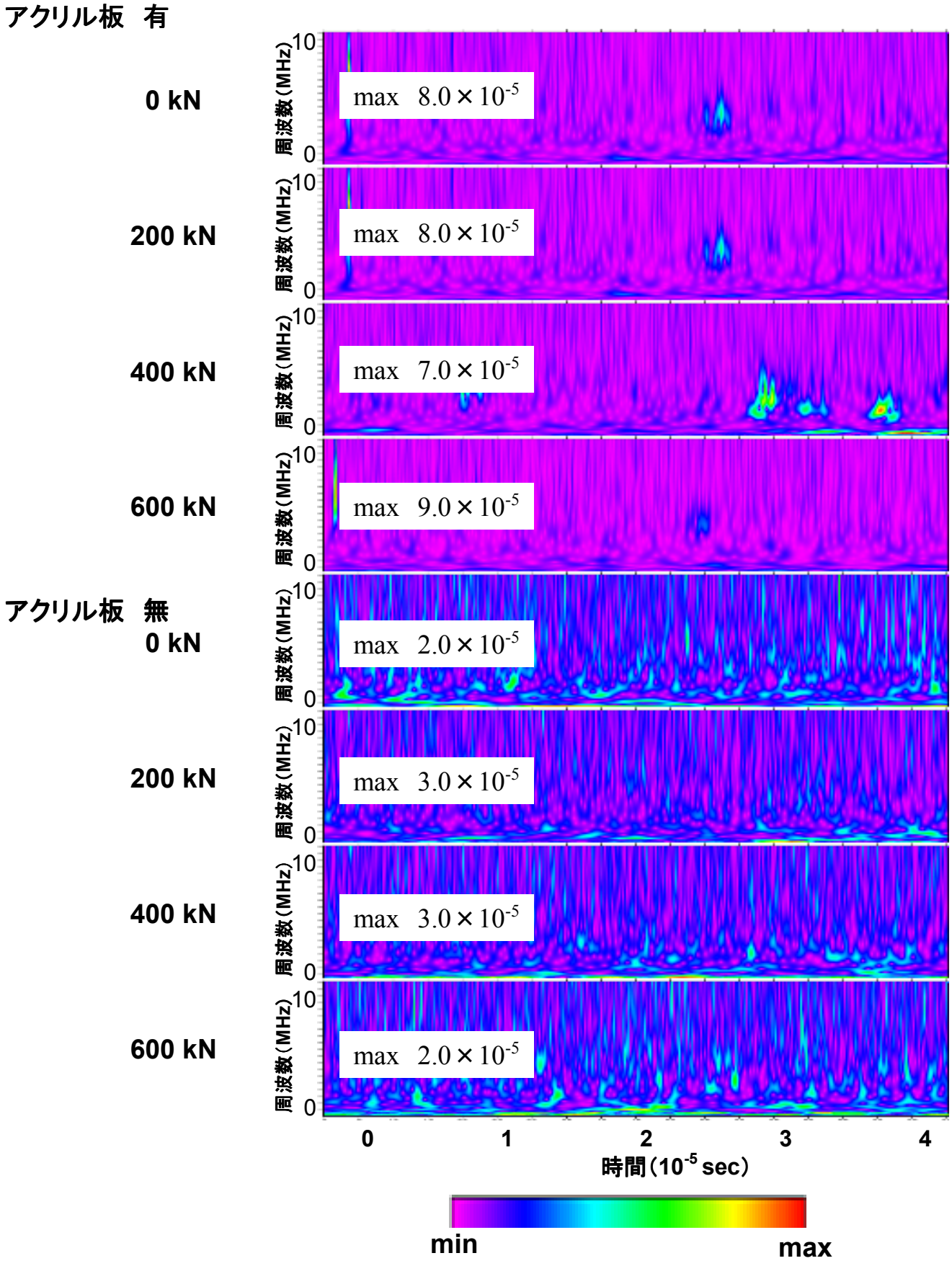



**図5.2.19　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向A　測定位置　30 mm

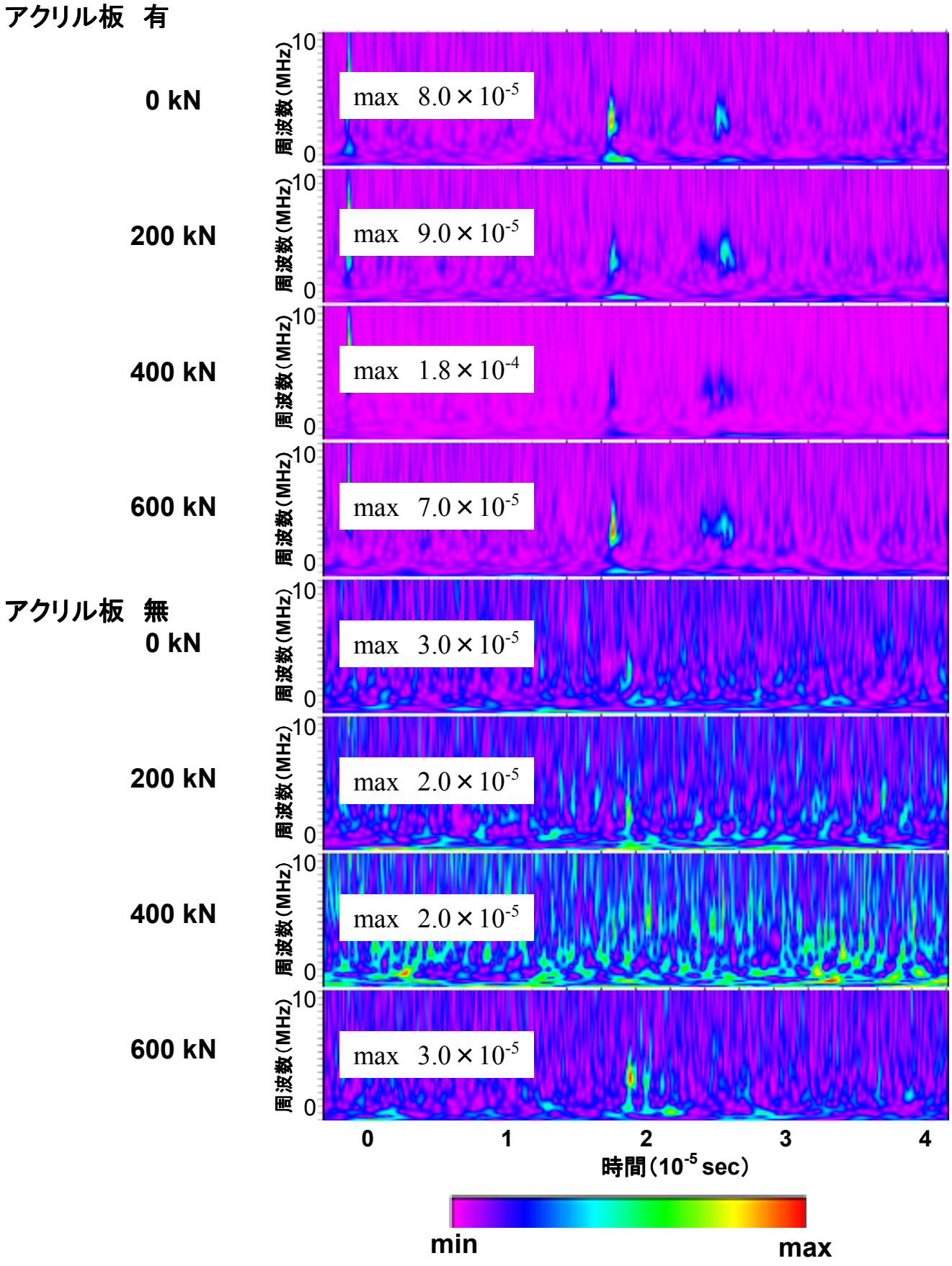



**図5.2.20　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向A　測定位置　40 mm

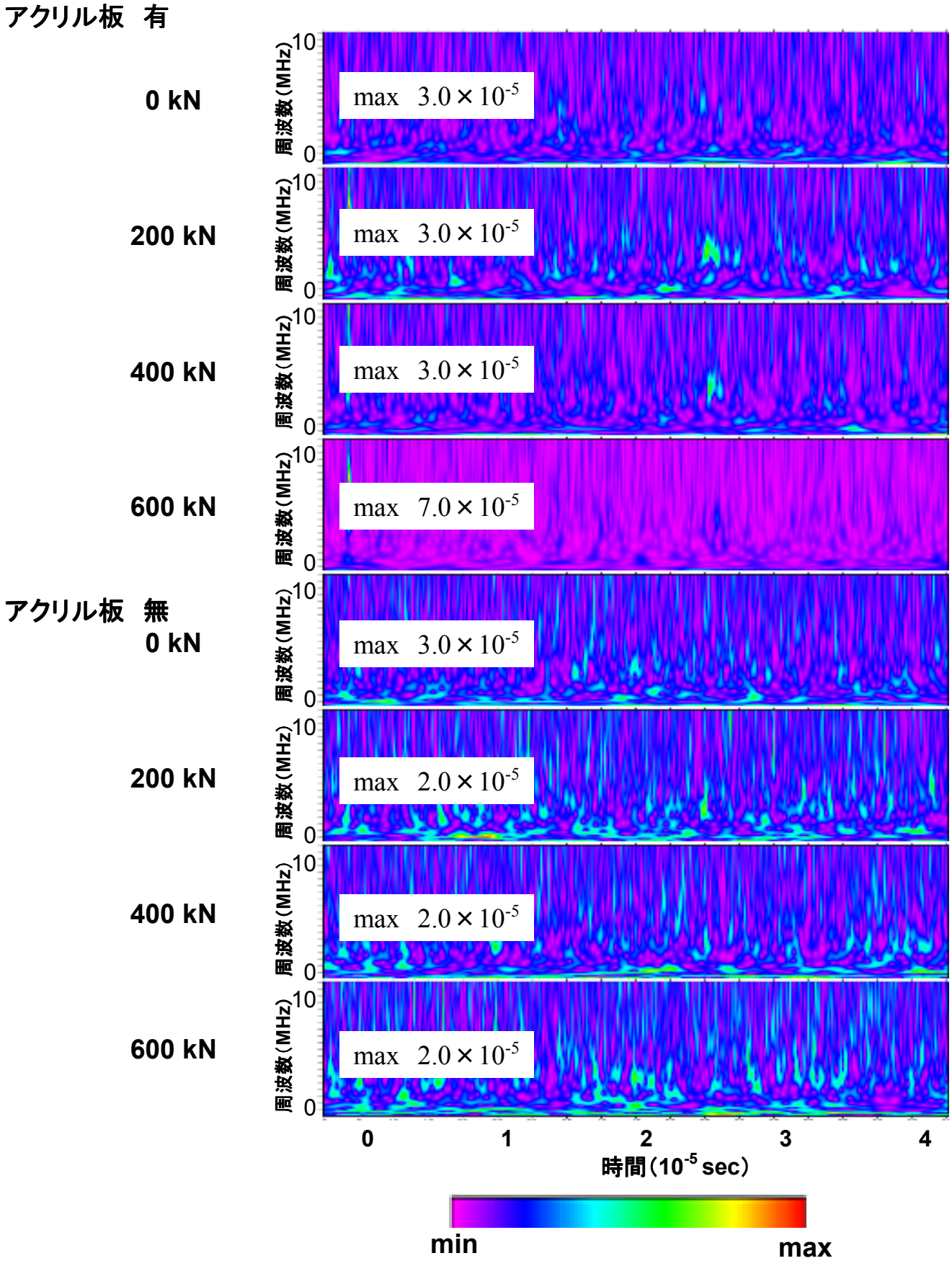



**図5.2.21　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向B　測定位置　10 mm

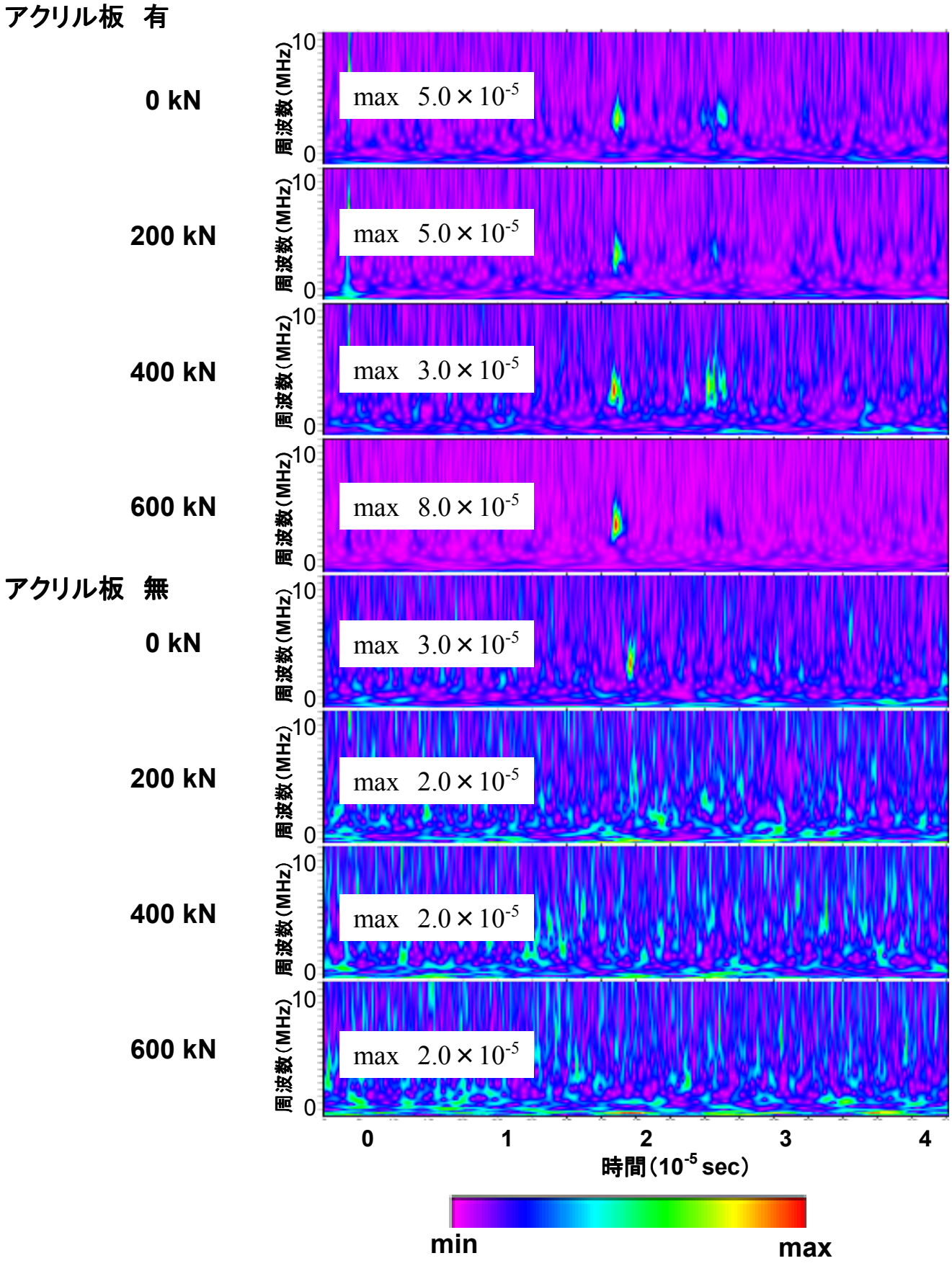



**図5.2.22　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向B　測定位置　20 mm

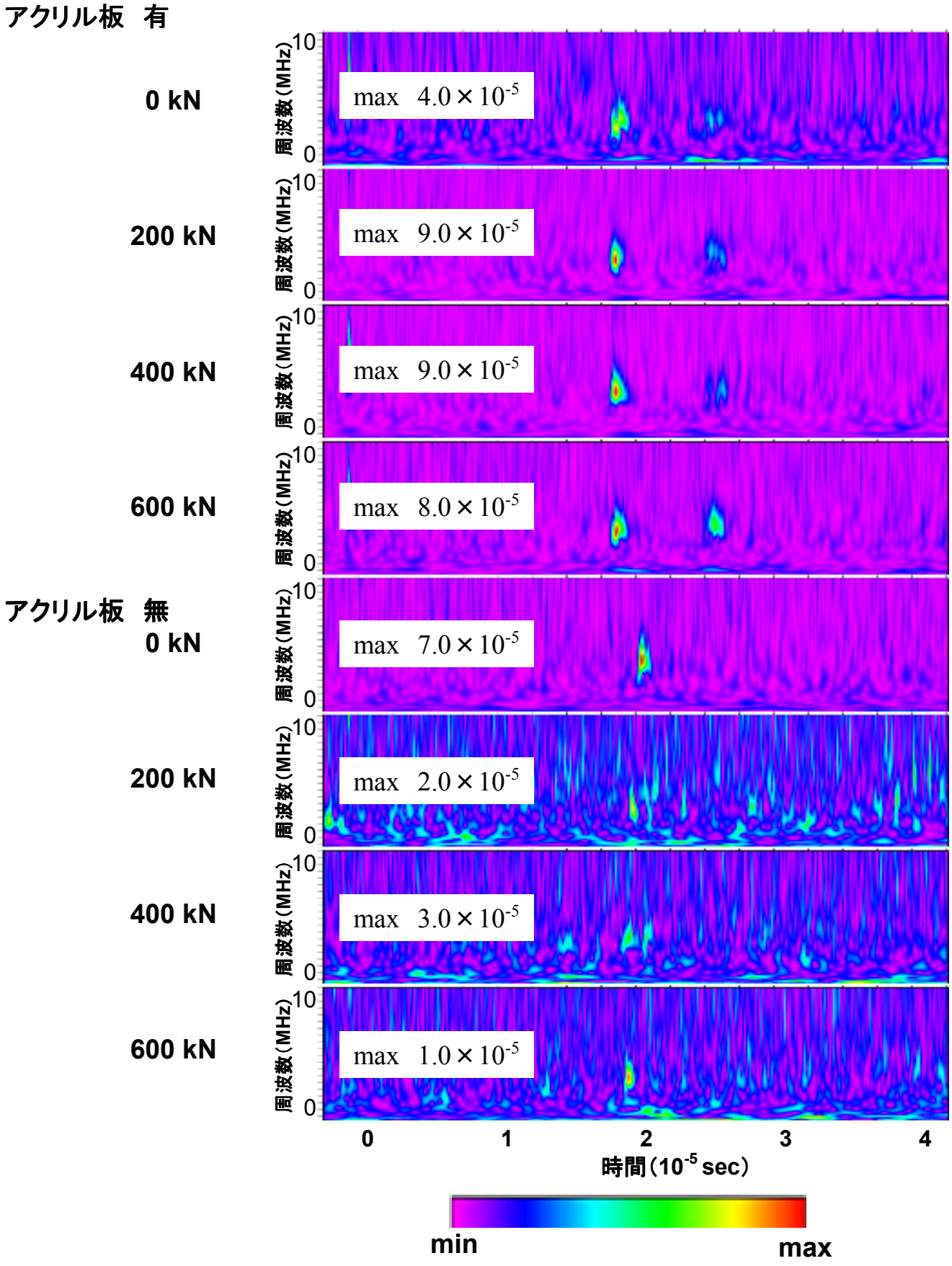



**図5.2.23　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向B　測定位置　30 mm

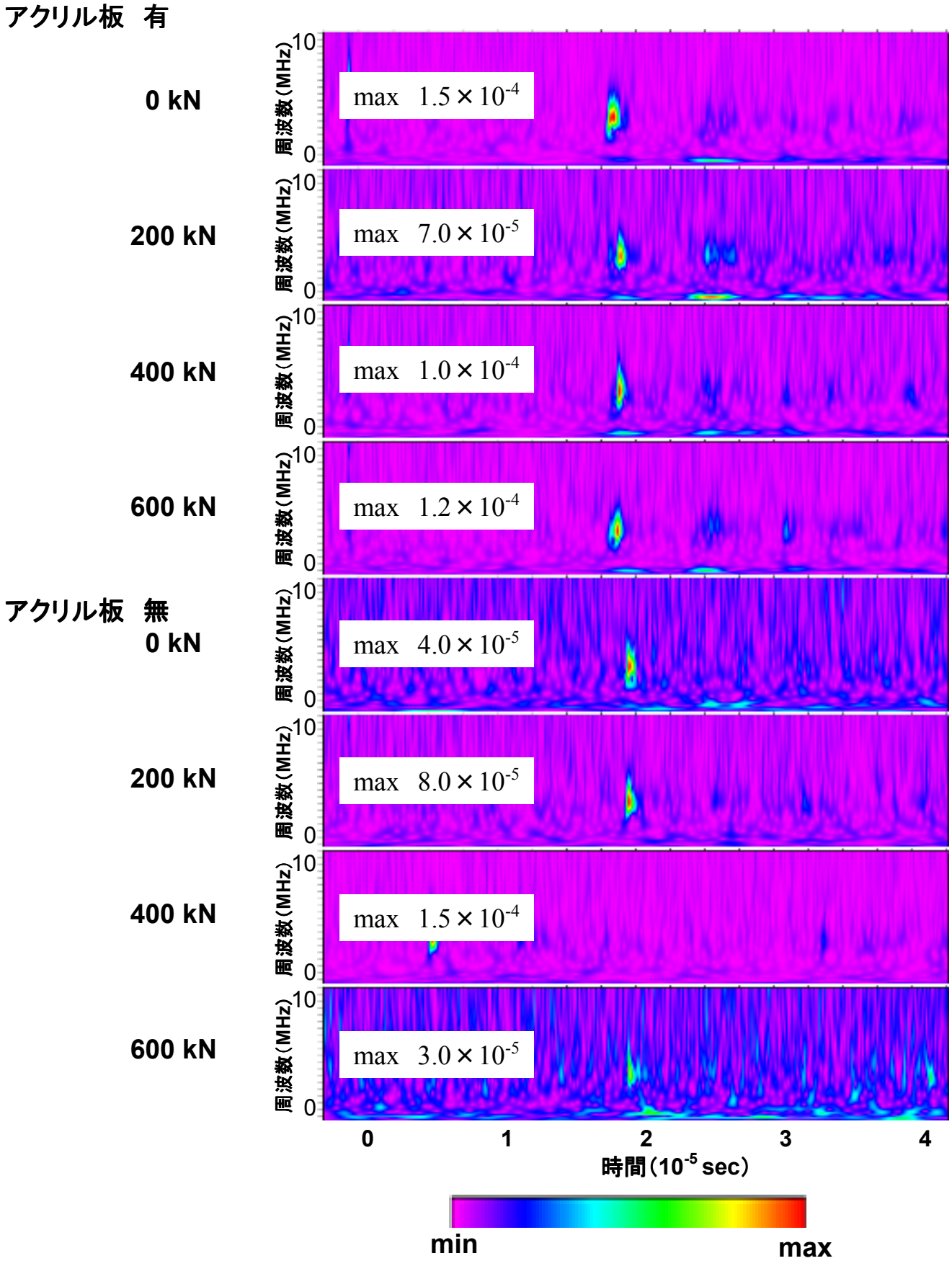



**図5.2.24　ウェーブレット変換結果　　7.5 MHz**　測定方向B　測定位置　40 mm

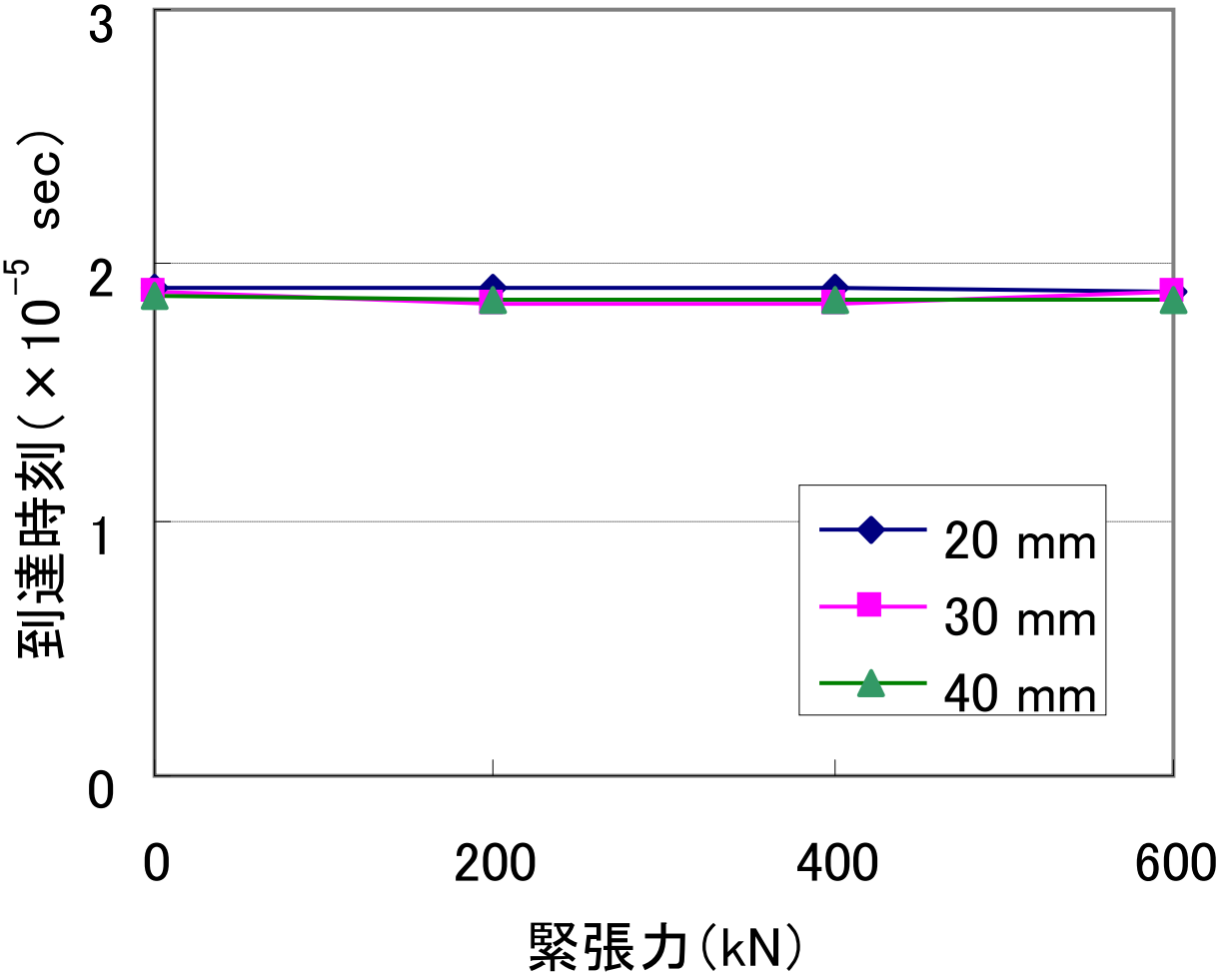
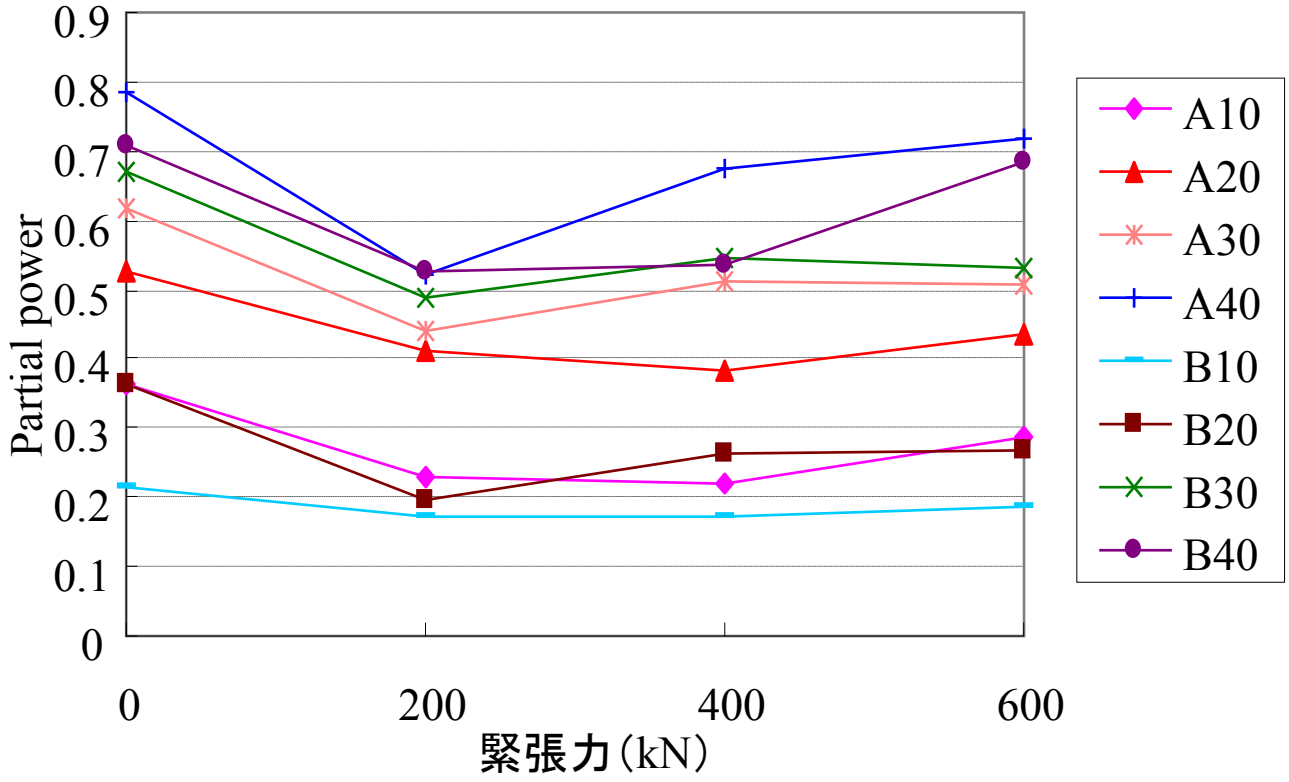
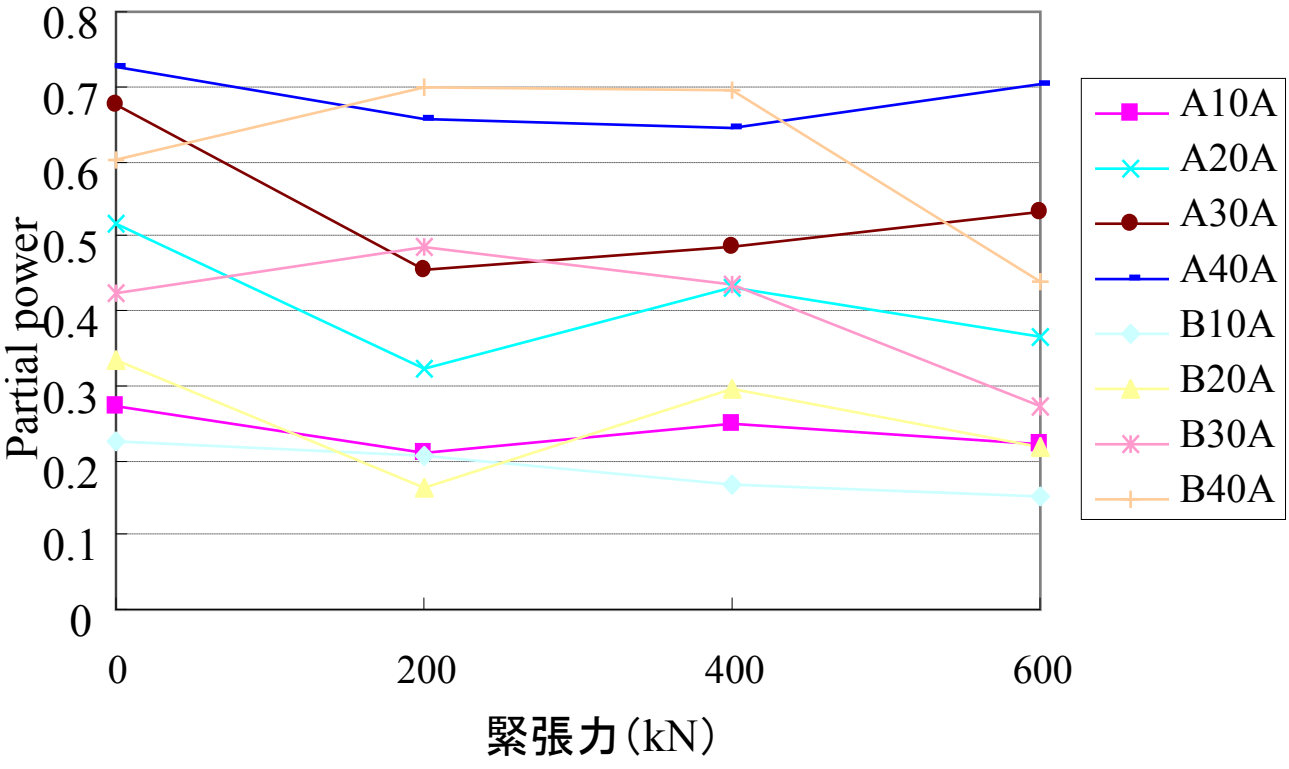


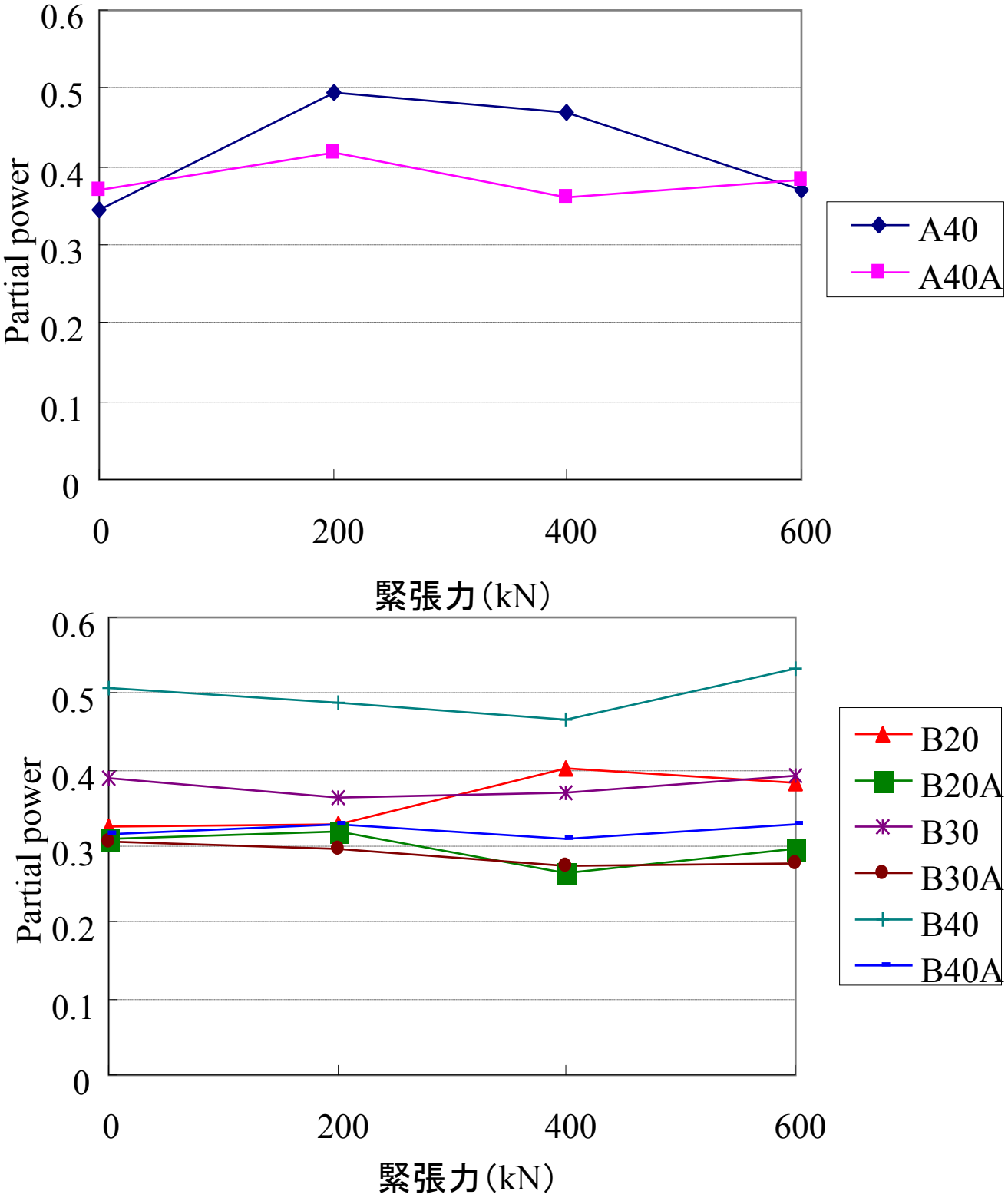

**図5.2.25　緊張力と到達時間の関係　探触子 5.0MHz 測定方向 B アクリル板なし**



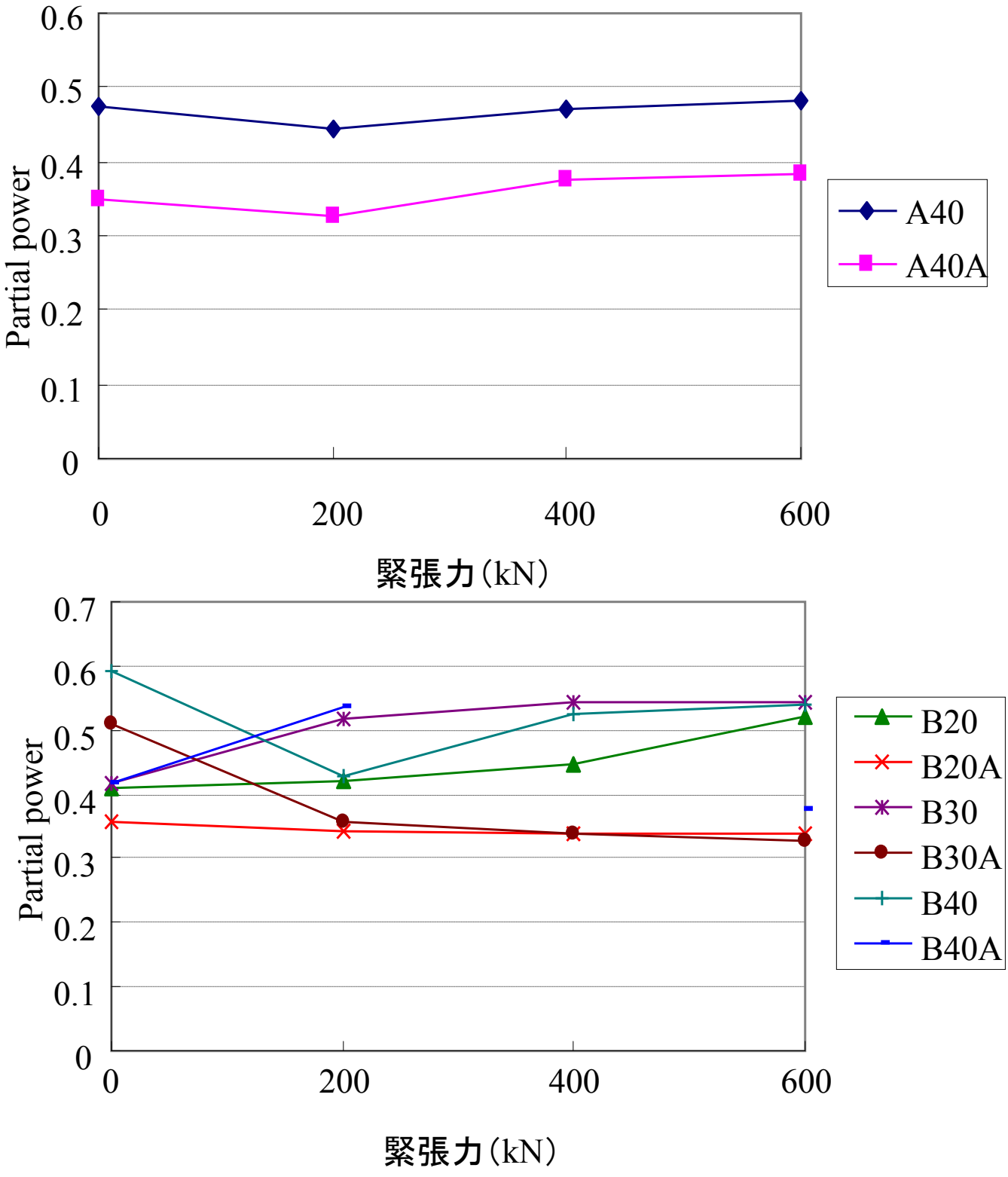

測定方向、測定高さ位置、アクリル板の有無の順に
測定条件を表している。

**図5.3.1　Partial Powerと緊張力の関係　1 MHz**




測定方向、測定高さ位置、アクリル板の有無の順に
測定条件を表している。

**図5.3.2　Partial Powerと緊張力の関係　5 MHz**




測定方向、測定高さ位置、アクリル板の有無の順に測定条件を表している。

**図5.3.3　Partial Powerと緊張力の関係　7.5MHz**