

論文内容の要旨

鋼板やアルミ板などの金属材料は自動車や電車などの輸送機械、鉄橋やビルなどの建築物の構造部材、飲料缶や家電製品にいたるまで、さまざまな製品分野で利用されている。例えば、アルミ薄板においてはプレス成形のしやすさや鉄に比べて軽量であるなどの特徴を活かして、飲料缶向けのキャン材やエアコン用熱交換器のフィン材、自動車パネル材などに採用されている。ここで、薄板金属材料に求められる代表的な品質としては、板自体のゆがみの少なさである形状品質、プレス加工や絞り加工などの成形加工時の材料の伸びやすさとしての成形性、また腐食や着霜防止のためのコーティングの塗膜品質などがあげられる。

これらの品質の中で、アルミ薄板の製造プロセスでは形状品質の確保が重要な課題となっており、具体的には圧延工程や熱処理工程において不均一な塑性変形が生じることがあり、板面が凸凹状にゆがむような形状不良（ひずみ）を発生させ、これらのひずみは最終製品の形状品質を悪化させる。このような形状不良が残ったままコーティングラインを通板させると、形状不良の凸凹により板が浮き上がり塗膜厚さにムラが生じる場合がある。また、形状品質を改善するためにテンションレベラと呼ばれるひずみ矯正装置を用いてひずみを矯正することができるが、材料を塑性域まで引き伸ばして平坦度を向上させるため、ひずみ矯正後の材料の伸び代が減少して成形加工時の成形性を低下させるという問題がある。従って、形状品質の確保は成形性や塗膜品質などの他の品質に対しても影響を与えるため、薄板製造プロセスにおいては極めて重要な項目である。そのため、薄板製造分野ではひずみ形状をオンラインで把握し、製造中にできるだけ形状不良を小さくしたいというニーズがある。

製鉄やアルミ圧延などの薄板製造分野では、圧延後の製品に対する高い形状品質の要求に対して形状制御を行える圧延機を設置し、板幅や板厚などの寸法精度だけでなく、断面形状（クラウンと呼ばれる板幅方向の板厚不均一）や平坦度の向上に努めてきた。それにともない、圧延機自体の形状制御能力に加えてひずみ形状計測器の測定性能も重要となり、昭和40年代初頭より多くの鉄鋼メーカーや圧延機械メーカーにより研究されてきた。今日にいたるまで、さまざまな原理の形状測定法が提案されており、本研究と関連のある代表的な測定方法として光切断法、ロール法、振動法の3つの手法がある。

板表面にスポットレーザを板幅方向に走査、またはシートレーザと呼ばれるライン状のレーザ光を照射し、反射光が板表面形状を映した輝線となり、それをカメラで撮影することで薄板の幅方向の形状を把握する方式が光切断法である。光切断法の利点として、非接触計測であるため薄板製品を疵つけることがなく、熱間圧延ラインなどの厳しい計測環境においても適用可能なことがあげられる。しかしながら、光学的な計測方法においては、通板張力によって引き伸ばされて潜在化されたひずみ形状を測定することはできない。

通板ロールにセンサを組み込んで薄板の張力分布を測定することで薄板形状を推定する技術がロール法である。センサロールではロール内部の幅方向に複数の荷重検出器（ロードセル）を配列して埋め込むことで、通板されている薄板の幅方向の張力分布を測定できる機能を付与している。本手法はロードセルによる測定であるため比較的高速な応答の測定信号が得られ、実際の圧延プロセスにおいて圧延機の出側に設置して形状制御に利用されることが多い。しかしながら、加熱帯などの熱処理ラインには適用できず、また測定には比較的大きな通板張力を付加する必要があるため、仕上げラインなど大きな張力を付加できないラインには適用できないなどの制約が多い。

そのような制約を受けない方法として、板振動を利用することで板形状の影響を含めた張力測定方法が提案されている。板のひずみ状態によって生じた張力分布と、その分布に対応する固有振動数と振動モードとの関係に着目し、2つの固有振動数を用いて張力値を算出することで、板のひずみ状態によらず実際の負荷張力に近い値を同定することができる。圧延張力をオンラインで測定するために板の両端側にレーザ変位計を設置して薄板の固有振動数を計測する方法があり、本手法によれば、比較的単純な理論と測定機器構成で非接触の計測が可能であり、実験においてモータによる負荷張力と対応した測定結果が得られている。このような振動法を用いれば装置設置上の制約が少ないという利点があるが、測定できるのは総張力であり幅方向の張力分布の把握はできない。

そこで、本論文では、前述の振動法の長所である制約が少ないことは確保した上で、振動法を大きく発展させ、張力分布が得られる新たな計測法を提案するとともに、それを実機に適用することを目指し以下のことを実施した。

幅方向にひずみ分布を有する薄板に対して長手方向に張力を付加した場合、ひずみ分布に対応した張力分布が発生することに着目し、張力分布をばね分布としてモデル化した簡易モデルを提案した。そして、簡易モデルの運動方程式に基づいて、与えられた固有振動数と幅方向の振動モードより張力分布を同定する理論を導出した。また、有限要素法を用いてひずみ形状を有するアルミ薄板の非線形静解析により張力分布を再現し、続いて振動解析により張力分布に対応した固有振動数と振動モードを算出した。ここで得られた振動特性に張力同定理論を適用して張力分布を同定し、有限要素法により得られた張力分布と理論による同定結果とを比較した結果、提案法が妥当であることが確認できた。

次に、薄板の周囲に存在する空気の付加質量が薄板の振動特性に与える影響について、有限要素法と仮想質量法とを用いて数値解析により検討した。本解析により、空気の付加質量は薄板の見かけの質量を増加させ、振動特性としては固有振動数が低下するだけでなく、幅方向の振動モードも変化すること示し、付加質量の影響を考慮していない張力同定理論では同定精度が大幅に低下することを明らかにした。本課題に対して、仮想質量法により算出された付加質量分布を用いて張力同定理論を付加質量の影響を考慮した理論に発展させ、同定精度を改善する方法を提案した。さらには、構造物の平面上に作用する流体力を簡易的に計算する手法を応用して、仮想質量法に比べて、より簡便で高速な付加質量の簡易計算法を確立し、本技術の実用化に向けた改良を加えた。

また、実際にひずみ形状を有するアルミ薄板と長手方向に張力を付加できる張力負荷装置とを用いて実ラインを模擬した実験装置を構築し、これまでに提案した張力同定理論について、その有効性を実験的に検討した。本実験装置では、板の振動特性を計測するため圧縮空気をパルス状に噴射し、励起された板振動を幅方向に配列した複数のレーザ変位計により計測する構成としており、振動波形から実験モード解析により固有振動数と板幅方向の振動モードを求め張力分布を同定した。また、同定結果の妥当性を検証するために、板表面に貼り付けたひずみゲージの測定値から換算した張力分布と同定値とを比較した。ひずみ形状が異なる3種類のアルミ薄板に対して提案手法を適用し、同定結果とひずみゲージの計測結果とが対応することを示した。

さらに、上記の実験技術に部分空間法の一つである Eigensystem realization algorithm (ERA)法に基づく実験モード解析技術を組み合わせ、短時間の振動データから逐次モード解析を行って張力分布を同定する技術を完成させることで、実ラインにおけるオンラインでの張力分布の測定を実現した。

薄板製造プロセスにおいて適切な支持ロール間隔と通板張力が作用する場所を選定し、レーザ変位計とエアノズルによる張力分布のオンライン測定方法とその実験結果について示した。実験ではひずみ状態の変化を捉えられるか検証するためにテンションレベラと呼ばれるひずみ矯正装置を用い、まずラインに矯正前の薄板を通板して張力分布を測定し、その後テンションレベラでひずみ矯正を行い同じコイルを再通板することでひずみ矯正後の張力分布を測定して両者を比較した。それにより、矯正前の薄板は圧延時の不均一な引き伸ばしによるものと思われる大きな偏張力が発生しているのに対し、テンションレベラによる矯正後は板幅方向の伸び差が緩和されて偏張力が大幅に減少することを明らかにすることができた。

また、これまでに述べた張力分布同定理論を鋼板に適用範囲を拡大するにあたって、張力を付加してもひずみ形状が引き伸ばしきれずに波形状として残ることを有限要素法による解析で示し、その結果、簡易モデルの仮定と異なる剛性値に対して張力分布を同定するため大きな同定誤差が生じることを明らかにした。

このような問題に対し、新たに簡易モデルの曲げ剛性の値を未知数として張力同定理論を再構築し、張力分布と曲げ剛性分布とを一括して同定する理論とすることで、解析において鋼板に対する同定精度が大幅に改善することを示した。最後に、これまでに評価したアルミ薄板の4倍の板厚を有する比較的曲げ剛性の高いアルミ板を用いて張力負荷装置による実験検証を行い、本技術の有効性を示した。

以上のように、本研究では振動法を用いた張力分布同定技術により、薄板の固有振動数と幅方向の振動モードから張力分布を同定できることを明らかにし、解析および実験による有効性の検証と実ラインへの適用により本技術の実用性を示した。

製鉄やアルミ・銅などの金属圧延分野において、板歪形状の詳細な把握とそれによる形状品質の向上は現在においても重要な技術課題の一つであり、本研究はその課題克服に向けての一役を担う研究になり得る。

また、薄板製造分野において、振動技術により形状品質評価技術を実用化した例はほとんどなく、振動法による張力分布同定理論を確立できたことから、金属に限らず製紙や樹脂フィルムなどの帯状体への適用範囲の拡大、帯状体の張力分布と蛇行挙動の解明による通板制御技術の向上など、本分野のさらなる発展が期待される。ただし、本研究で提案した張力同定技術は測定精度の向上や測定値を製造プロセスの改善につなげるシステムの構築など、多くの課題が残されているのが実情である。開発した技術の実ラインへの適用を進め、実製品の品質向上につながる提案につなげていくことが今後の研究課題である。