

令和元年6月7日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06086

研究課題名(和文) 管内波動の長距離非線形伝播における圧力変動現象の解明と予測

研究課題名(英文) Consideration and prediction of pressure fluctuation phenomena in long distance nonlinear propagation of pressure wave in pipe

研究代表者

青木 俊之 (Aoki, Toshiyuki)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：20150922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：管路内を長距離伝播する際の急激な圧力変動を正確に予測するためには、管内波動の長距離伝播過程における波の強さの減衰や波面の時間的変形、すなわち波動伝播の非線形現象や管内流れを正確に知ることが必要である。本研究は、波動シミュレーター内の波動の長距離伝播における管内圧力の変動現象を測定すると共に、レーザー差動干渉計を用いて管内を長距離伝播する圧力波背後に発達する非定常流れの助走部及び発達部における層流から乱流への遷移現象を測定し、圧力波の圧力変動現象に対する非定常境界層の影響を解明し圧力変動の予測方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極めて長い管路において伝播する圧力波の強さの減衰や波面の非定常特性、波面の距離減衰変形の遷移現象、衝撃波の発生・消滅、などの非線形現象に対する圧縮波背後に発達する非定常流れ・境界層の影響を正確に知ることができ、予測が可能になることで、実際の長大スラブ軌道トンネル内を伝播する圧力波の伝播特性などの解明するための有益なデータを収集できた。本研究結果は、長大スラブ軌道トンネルにおけるトンネル内圧力変動の予測レベルを向上させ、新幹線列車の高速度あるいは将来のリニア新幹線列車の実用化にも適用でき、工業上の寄与は極めて大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：In order to accurately predict sudden pressure fluctuations during long-distance wave propagation in a pipe line, It is necessary to accurately know the phenomenon and the flow in the pipe, such as attenuation of wave strength and temporal deformation of wavefront in long-distance propagation process of internal wave. The present study measures the pressure fluctuation phenomenon in the pipe during long distance propagation of the wave in the wave simulator, and also uses the laser differential interferometer to introduce the unsteady flow behind the pressure wave propagating in the pipe for a long distance. And we measured the transition phenomena from laminar to turbulent in the developing part, clarified the influence of the unsteady boundary layer on the pressure fluctuation phenomena of pressure waves, and established the prediction method of pressure fluctuation.

研究分野：流体力学，圧縮性流体力学

キーワード：圧力波 非線形現象 境界層 トンネル騒音 圧縮波 衝撃波 管内伝播

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、工業の発展とともに、健康の保護と生活環境の保全という観点から、環境基準はますますきびしくなっている。特に、二酸化炭素を中心とする温室効果ガスの削減対策が日本でも問題になってきている。その二酸化炭素の発生源としての交通機関の寄与は、全体の約20%も占めておりその大半は自動車によるものである。そこでその対策として自動車から公共交通機関へのモーダルシフトが唱えられている。この流れの中で特に鉄道は、環境に優しくかつエネルギー効率の優れた多量輸送機関として欠かすことのできないものである。新しい鉄道列車の開発には環境に適應した技術開発が必要で、特に在来型新幹線列車や次世代の超伝導リニア新幹線列車の長大トンネル内走行時に発生するの圧力変動の低減や空力学的騒音低減が、重要な学術的研究課題と言える。

この高速鉄道における空気力学的な騒音環境問題の一つに、トンネル出口から放射される衝撃的低周波騒音(トンネル微気圧波)やトンネル内の圧力変動がある。この圧力変動は、列車のトンネル突入により形成された圧力波がトンネル内を伝播し、トンネル出口に達して反射しトンネル内を走行中の列車と波動干渉し生じるものと考えられている。特に近年、長大スラブ軌道トンネル(長さ 10km 以上、スラブ軌道：レールの下がバラストでなくコンクリート板)において、波面の圧力変動が従来よりの予測値よりのばらつきが大きいことが判明し、高速列車における環境問題解決の障害の一つになっている。この原因の一つに、長大スラブ軌道トンネルにおいては、トンネル内の波動の圧力変動は、トンネル入口圧力波の波面構造だけでなく波動が誘起する背後の流れに依存すると考えられているが、その詳細は不明である。一般に、圧力波の波面はトンネル内を伝播する過程において散逸非線形効果により距離減衰変形するため、衝撃的低周波騒音や圧力変動を低減するためには、トンネル内の圧縮波の伝播過程における圧力変動現象を解明する必要がある。また、長大トンネルのひとつである青函トンネルでは高速新幹線列車と低速の貨物列車の共用走行が計画されており、トンネル内波動とこれらの列車の相互干渉の影響を見積もる上でもトンネル内の圧力変動の予測は大変重要である。

2. 研究の目的

急激な圧力変動を伴う圧縮波、衝撃波、膨張波などの圧力波がガスパイプラインや長大トンネルなどの管路内を長距離伝播する際の急激な圧力変動を正確に予測するためには、管内波動の長距離伝播過程におけるこれらの波の強さの減衰や波面の時間的変形、すなわち波動伝播の非線形現象や管内流れを正確に知ることが必要である。本研究は、波動シミュレーター内の波動の長距離伝播における管内圧力の変動現象を測定すると共に、本研究室で開発したレーザー差動干渉計を用いて管内を長距離伝播する圧力波背後に発達する非定常流れの助走部境界層及び発達部における層流から乱流への遷移現象を測定し、管内波動の長距離伝播における境界層の遷移現象の管内圧力の変動現象に対する影響を解明しようとするものである。

3. 研究の方法

極めて長い管路内を伝播する圧力波の距離減衰・非線形特性を解明するために、本研究室で開発してきた波動シミュレーターをさらに改良し、二種類のスケールモデル実験(矩形断面管路の長さとお径の比が 1000 以上、円形断面の長さとお径の比が 5000 以上)を行い伝播する圧力波の伝播特性、特に圧力波の波面の圧力変動現象に及ぼす初期圧力波の強さなどの波面構造の影響を明らかにした。同時に、本研究室で開発してきたの数値シミュレーションを改良し、圧力波の非線形効果、壁面の定常・非定常摩擦、壁面の熱伝達及び壁面の構造を考慮した数値解析を行う。これらを総合して、極めて長い管路内を伝播する圧力波の以下の特性を明らかにした。

- (1) 長距離伝播における圧力波の距離減衰特性および波面の圧力変動現象(矩形断面管及び円形断面管)
- (2) 伝播圧縮波の衝撃波への遷移および逆遷移現象、衝撃波の発生および消滅現象(円形断面管)

さらに、これらの成果を踏まえ、本研究室で開発したレーザー差動干渉計を、矩形断面管路内を伝播する圧力波(圧縮波、衝撃波)の背後に発達する境界層流れの助走部、および管内流れの発達部境界層内の非定常密度測定をすることにより、非定常境界層の層流から乱流への遷移現象あるいは逆遷移現象を測定できるように改良発展させた。次に、波動シミュレーターとレーザー差動干渉計を組み合わせることで、管内波動の長距離伝播における境界層の遷移現象の管内圧力の変動現象に対する影響を明らかにした。

4. 研究成果

- (1) 現有の波動シミュレーターの圧縮波発生用を用いて広い範囲の初期圧縮波および衝撃波(初期強さ 2.58kPa~36.5kPa)が安定的に発生できるように改良制作した。すなわち、圧力波発生用急速開口弁の開口弁加速度、開口時間び開口弁前後の圧力比などの実験条件を変化させ圧縮波を発生する実験を行い、初期条件としての任意の強さの圧縮波波形に関する基礎的資料を得た。
- (2) 極めて長い管路内を伝播する圧力波の距離減衰・非線形特性を解明するために、本研究室で開発してきた波動シミュレーターを、二種類のスケールモデル実験装置(断面 56×56mm の矩

形断面管路の長さ (73m) と内径の比が 1000 以上)、(内径 16mm の円形断面の長さ (100m) と内径の比が 5000 以上)に改良・作成した。特に、矩形断面管路では本研究室で開発したレーザー差動干渉計を、矩形断面管路に適用できるように設定した。

(3) 長い管路内を非線形伝播する圧縮波の減衰と変形を測定し、衝撃波が発生すると距離減衰が影響を受けることを実験的に示した。非定常境界層内の密度プロファイルが層流から乱流へ遷移するときに現れる密度上昇領域を、レーザー差動干渉計によって検出することができた。境界層の遷移開始時間と圧力波形の減衰開始の時間を関係により、非定常境界層の遷移が圧力波形に影響を与えているということが確認できた。波面の圧力変動現象すなわち圧力のオーバーシュートにおける圧力損失が圧力波強さに占める割合は、初期圧力波が強くなるほど大きくなるが、さらに強くなるとほぼ一定値になることがわかった。

(4) 長い管路内における圧力波の伝播特性について、長距離を伝播する圧力波に対して、伝播による圧力の減衰や非線形効果による波面の変形が確認できた。レーザー差動干渉計で管壁高さ方向に測定位置を変えて密度変動を測定することにより、主流との密度差を測定できた。実験結果で得られた密度波形や圧力波形から管壁高さ方向の密度プロファイルや遷移レイノルズ数変化を取得できた。これらを理論値と比較することにより、非定常境界層内の特性が得られた。また、ワークステーションを用いて、圧力波背後に発達する非定常境界層の波面への影響などの数値解析を行い、実験値との比較を行った。

(5) 弱い衝撃波の長い管路内における伝播特性について、管路内において、弱い衝撃波とその背後にある圧力波は非線形変形しながら伝播し、初期衝撃波強さが強くなるほど、衝撃波が消滅する距離が長くなることがわかった。衝撃波の消滅距離を計算する実験式を示し、管内を伝播する衝撃波の減衰係数は初期衝撃波強さが強くなるほど小さくなり、伝播する圧力波の減衰係数は、衝撃波とは逆に初期衝撃波強さが強くなるほど大きくなることがわかった。

(6) 数値解析コード Fluent18.1 を用いて、伝播する圧力波の背後に発達する非定常境界層の特性や圧力波に及ぼす非定常境界層の影響を解析した。実験値と数値解析の比較では、すべての条件で実験値の方が距離減衰が大きくなっていた。また、すべての条件において管内を圧力波が伝播するにしたがって波面の最大圧力勾配が大きくなっており、伝播するにつれて圧力波波面が切り立っていることが確認できた。数値計算では管壁付近において実験値より密度差が大きくなるが、その傾向は伝播する弱い衝撃波の背後の非定常境界層理論と比較することにより境界層の状態を確認できた。非定常境界層における遷移開始時間の遷移レイノルズ数と遷移終了時間の遷移レイノルズ数が共に実験値とほぼ一致した傾向を示していることが分かった。

(7) 波動伝播管の破膜装置を改良し、断面積一定の管内に波面の違う弱い衝撃波を発生させ、長い管内を伝播する衝撃波の伝播特性の違いについて解析した。その結果、初期波面の違いにより波面の変形に変化が生じ、初期衝撃波強さが大きいほど、距離に対する衝撃波の距離減衰は小さくなるが、初期波形に衝撃波部分の後方に圧縮波が存在する場合、同程度の初期衝撃波強さであっても圧縮波が存在する衝撃波のほうが減衰は小さくなる。初期衝撃波強さが強いほど衝撃波の消滅距離は長くなるが、初期波形の衝撃波部分の後方に圧縮波が存在する場合、同程度の初期衝撃波強さであっても圧縮波が存在する衝撃波のほうが消滅距離は長くなる。圧縮波を考慮して初期衝撃波強さを定義することで、ステップ状の衝撃波と同様の傾向を示すことが分かった。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

青木俊之、松尾拓也、原耕成、管路内の圧縮波により誘起される非定常流れと伝播特性に関する研究、平成 28 年度衝撃波シンポジウム講演論文集、査読無、Vol.1、2017、pp.1-4

青木俊之、山内裕太、原耕成、極めて長い管路における弱い衝撃波の伝播特性に関する研究、平成 29 年度衝撃波シンポジウム講演論文集、査読無、Vol.1、2018、pp.1-4

青木俊之、山内裕太、猪頭宏平、長い管路における弱い衝撃波の伝播特性、日本機械学会九州支部講演論文集 NO.188-1、査読無、Vol.1、2018、pp.1-2

山下直城、青木俊之、原耕成、野見山友也、長い管路内における圧力波の伝播特性に関する研究、日本機械学会九州支部講演論文集 NO.188-1、査読無、Vol.1、2018、pp.1-2

野見山友也、青木俊之、長い管路内を伝播する圧力波における非定常境界層の特性、日本機械学会九州支部講演論文集 NO.198-1、査読無、Vol.1、2019、pp.1-5

後藤逸平、青木俊之、長距離伝播実験に用いる弱い衝撃波の生成に関する数値シミュレーション、日本機械学会九州支部講演論文集 NO.198-1、査読無、Vol.1、2019、pp.1-4

〔学会発表〕(計 6 件)

青木俊之、松尾拓也、原耕成、管路内の圧縮波により誘起される非定常流れと伝播特性に関する研究、平成 28 年度衝撃波シンポジウム

青木俊之、山内裕太、原耕成、極めて長い管路における弱い衝撃波の伝播特性に関する研究、平成 29 年度衝撃波シンポジウム

青木俊之、山内裕太、猪頭宏平、長い管路における弱い衝撃波の伝播特性、日本機械学会九州支部第 71 期総会・講演会

山下直城、青木俊之、原耕成、野見山友也、長い管路内における圧力波の伝播特性に関する研究、日本機械学会九州支部第71期総会・講演会
野見山友也、青木俊之、長い管路内を伝播する圧力波における非定常境界層の特性、日本機械学会九州支部第72期総会・講演会
後藤逸平、青木俊之、長距離伝播実験に用いる弱い衝撃波の生成に関する数値シミュレーション、日本機械学会九州支部第72期総会・講演会

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。