

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24年5月17日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560178

研究課題名（和文） 長い管路内を伝播する圧力波における距離減衰変形の遷移現象に関する研究

研究課題名（英文） Research on the transition phenomena of the attenuation with distance on pressure wave propagating in the long tube

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

研究成果の概要（和文）：

急激な圧力変動を伴う圧縮波、衝撃波や膨張波は総称して圧力波と呼ばれ、これらの圧力波が長い管路（パイプラインやトンネル）を伝播する際の急激な圧力変動を制御するには、伝播過程における圧力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、距離減衰変形を正確に知ることが必要である。本研究では、レーザー作動干渉計を用いた詳細な実験を用い、管内を伝播する圧力波の波面変形に関する非定常境界層の遷移現象の詳細な測定を行い有益なデータを得た。

研究成果の概要（英文）：

A compression wave, a shock wave and an expansion wave are generally called a pressure wave. These waves induce rapid pressure fluctuation. In order to control the rapid pressure fluctuation at the time of these pressure waves propagating in a long tube (a pipeline and a tunnel), it is required to get to know correctly attenuation of the strength of the pressure wave and time modification of a wavefront in a propagation process, i.e., the nonlinear phenomenon of propagation and attenuation with distance. In this research, detailed measurement of the changes phenomenon of the unsteady boundary layer about wavefront modification of the pressure wave which propagates in a long tube/tunnel was performed using the detailed experiment which used the laser differential interferometer, and useful data was obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：圧縮・非圧縮流

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題という観点から、鉄道は、環境に優しくかつエネルギー効率の優れた

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応した技術開発が必要で、特に新幹線

などの高速列車走行時に発生する空気力学的な騒音や空気抵抗の低減が、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)がある。この衝撃的低周波騒音は、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放射され、その大きさはトンネル出口に到達した圧力波の波面の圧力勾配が大きいほど大きくなると考えられている。

しかし近年、高速列車用の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)において予測されていた騒音レベルより、予測値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、トンネル出口からの衝撃的低周波騒音のレベルは、トンネル出口に到達する圧力波の波面の圧力勾配だけでなく、トンネル入口圧力波の波面構造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散逸非線形効果を解明する必要がある。

2. 研究の目的

極めて長い管路内を伝播する圧力波における距離減衰・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延長改良し、スケールモデル実験(管路長さと内径の比が5000以上)を行い伝播する圧力波の伝播特性、特に圧力波の距離減衰変形の遷移現象に及ぼす初期圧力波の波面構造の影響を明らかにする。同時に、本研究室で開発してきた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する。

- (1) 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
- (2) 圧力波の距離減衰特性および波面の非線形現象の遷移

3. 研究の方法

(1) 極めて長い管路内を伝播する圧力波における距離減衰・非線形特性を解明するため、本研究室現有の波動シミュレーターを延長し、スケールモデル管路(長さと内径の比が5000以上)を伝播する圧縮波の伝播特性、特

に非線形効果に及ぼす波面構造の影響を明らかにする。

(2) 本研究室で開発してきた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における距離減衰変形の遷移現象に対する圧力波の初期条件の影響を明らかにする。

(3) 本研究室で開発したレーザー差動干渉計を、管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の非定常測定をすることにより、非定常流れ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る。さらに、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により、極めて長い管路内を伝播する圧力波の波動伝播、特に圧力波の距離減衰変形の遷移現象に対する圧力波背後の非定常流れの層流・乱流遷移現象の影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 長い波動伝播管を持つモデル実験を用い、管内を伝播する圧力波の距離減衰変形の遷移現象の詳細な測定を行い有益なデータを得た。

① 圧縮波は、波面形状によらず、初期圧縮波強さが大きいほど急激に減衰する。その距離減衰の割合は、伝播距離により変化する。
② 初期波面の最大圧力勾配が比較的大きい場合、最初圧縮波の波面の切り立ち、その後なだらかに減衰していく。

③ 波面の最大圧力勾配の最大ピーク値は、初期波面の圧力勾配ピーク形状の幅が大きいほど強く、幅の影響は小さくない。

④ 初期圧力勾配が小さい場合、波面の伝播特性の及ぼす初期波面の影響は相対的に小さい。

⑤ 初期圧力勾配が大きい場合、圧縮波の一部は衝撃波に遷移し、圧力波となる。

⑥ 衝撃波の形成距離、及び衝撃波の強さの最大値は、初期波面前面の形状の影響を受ける。

⑦ 衝撃波の消滅する距離は、初期波面の形状には関係なく初期強さが大きいほど長くなる。

⑧ 波面背後の圧力のオーバーシュートにおける圧力の降下量は、伝播に従い増加から減少へと転じ、圧縮波強さが大きいほど大きくなる。

⑨ オーバーシュートは波面背後の非定常境界層の遷移に起因し、圧力が極大となる点が遷移開始点と一致する。

(2) 波動シミュレーター内を伝播する圧力波の距離減衰変形の遷移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、圧力波の距離減衰変形の遷移現象に対する非定常境界層のデータを得ると共に、管内流れの数値解析を行った。

- ① 管内流れにおいて、レーザー差動干渉計にて管内の密度変動の測定を行うことができた。
- ② 管内流れの乱れを測定により、遷移時間を実験的に見積もることができた。
- ③ 遷移レイノルズ数は圧縮波の伝播距離によらず一定の値を示し、境界層理論の遷移開始点と一致する。
- ④ 数値計算で圧縮波の伝播特性を求めることができた。圧縮波の非線形性と散逸性を音響レイノルズ数で表すことができた。
- ⑤ 数値計算での伝播に伴う圧縮波の圧力の減衰係数が、初期圧縮波の圧力が高いほど大きくなるという傾向が過去の実験結果と一致した。
- ⑥ 管内を伝播する圧縮波の拡散率は、波形の形や大きさによって変わることが数値計算からわかった。圧力が大きいほど拡散率は小さくなる傾向がある。
- ⑦ 遷移モデルを使用した数値計算により、圧縮波後流に発達する非定常境界層の分布がオーバーシュートの形成に影響を与えていることがわかった。

(3) レーザー作動干渉計を用いた詳細な実験を用い、管内を伝播する圧力波の波面変形に関する非定常境界層の遷移現象の詳細な測定を行い有益なデータを得た。

- ① 水平方向にレーザーを設置することで、非定常境界層の密度プロファイルの時間的变化を取得できた。
- ② 主流との相対密度の減少する時間と再び上昇する時間より非定常境界層の層流から乱流への遷移現象の開始点と終了点の波頭からの時間を見積もれた
- ③ 非定常境界層内の密度変動の周波数解析によって、遷移の終了する時には 1[kHz]～10[kHz]までの範囲で PSD が上昇する。特に 3[kHz]以下の周波数成分は非常に高い PSD を示す。
- ④ 圧力波形のオーバーシュート、境界層内の空間的な変化、主流との相対密度から導き出した遷移の終了時間は 14[ms]～17[ms]の間であり、その結果を用いて遷移レイノルズ数のデータを得た。
- ⑤ 径の小さい管路を用いた弱い衝撃波の伝播実験において、波面背後の圧力のオーバーシュートにおける圧力の降下量は、伝播に従

い増加から減少へと転じ、圧縮波強さが大きいほど大きくなる

⑥ 弱い衝撃波の管内伝播において、初期の波の強さが大きいほど、波面の距離減衰は大きい。その一方、波面の衝撃波は初期の波の強さが弱いほど、距離減衰は大きい。

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 10 件)

- ① T.Orita, T.Aoki et al, Characteristics of nonlinear effects on the propagating compression wave in a tunnel, Proceedings of inter-noise 2011. 査読無, DVD-1, 2011, 1-6
- ② S.Nakao, T.Aoki et al, A new passive control method of the pressure wave propagating through in a high speed railway tunnel, 14th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels, 査読有, 1, 2011, 227-235
- ③ 青木俊之、ほか 2 名、管内を伝播する圧縮波が誘起する境界層と伝播特性に関する研究、平成 22 年度衝撃波シンポジウム講演論文集、査読無、1、2011、165-166
- ④ 青木俊之、ほか 3 名、レーザー差動干渉計を用いた管内を伝播する圧縮波背後流れの測定に関する研究、日本機械学会九州支部講演論文集、査読無、1、2011、55-56
- ⑤ 青木俊之、ほか 2 名、管内を伝播する圧縮波の数値計算による伝播特性と境界層の関係、日本機械学会九州支部講演論文集、査読無、1、2011、53-54
- ⑥ S. Nakamura and T. Aoki, et al., Attenuation and Distortion of Compression Wave Propagating in Very Long Tube, Proc. of 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Sciences, 査読無, 1, 2010, 283-287
- ⑦ 青木俊之、ほか 2 名、管路内の圧縮波により誘起される非定常流れの伝播波形に及ぼす影響、平成 21 年度衝撃波シンポジウム講演論文集、査読無、1、2010、101-104
- ⑧ 青木俊之、ほか 5 名、極めて長い管路内における衝撃波の伝播特性、日本機械学会九州支部講演論文集、査読無、108-1、2009、179-180
- ⑨ 青木俊之、ほか 2 名、トンネル圧縮波の非線形伝播特性に及ぼす初期波形の影響、2009 年度年次大会講演論文集、査読無、09-1、2009、155-156
- ⑩ Toshiyuki Aoki, et al., Characteristics of Compression Wave Propagating in a Very Long Railway Tunnel, Proc. of International Symposium on Experimental and

Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 査読無, CD-ROM, 2009, 260-263

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 青木俊之、長い管における弱い衝撃波の伝播特性、日本機械学会九州支部総会・講演会集、2012年3月16日、佐賀大学(佐賀県)
- ② 青木俊之、レーザー作動干渉計を用いた管内を伝播する圧縮波背後流れの特性に関する研究、日本機械学会九州支部総会・講演会、2012年3月16日、佐賀大学(佐賀県)
- ③ 青木俊之、長い管内を伝播する圧縮波が誘起する非定常流れと伝播特性に関する研究、平成23年度衝撃波シンポジウム、2012年3月8日、東京大学(千葉県)
- ④ 青木俊之、レーザー差動干渉計を用いた管内を伝播する圧縮波背後流れの測定に関する研究、日本機械学会九州支部第64期総会・講演会、2011年3月17日、九州大学(福岡県)
- ⑤ 青木俊之、管内を伝播する圧縮波の数値計算による伝播特性と境界層の関係、日本機械学会九州支部第64期総会・講演会、2011年3月17日、九州大学(福岡県)
- ⑥ Toshiyuki Aoki, Attenuation and Distortion of Compression Wave Propagating in Very Long Tube, 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Sciences, 11 Sep., 2011, Matsue, Japan
- ⑦ 青木俊之、管路内の圧縮波により誘起される非定常流れの伝播波形に及ぼす影響、平成21年度衝撃波シンポジウム、2010年3月17日、埼玉大学(埼玉県)
- ⑧ 青木俊之、極めて長い管路内における衝撃波の伝播特性、日本機械学会九州支部第63期総会・講演会、2010年3月15日、熊本大学(熊本県)
- ⑨ 青木俊之、トンネル圧縮波の非線形伝播特性に及ぼす初期波形の影響、日本機械学会2009年度年次大会、2009年9月15日、岩手大学(岩手県)
- ⑩ Toshiyuki Aoki, Characteristics of Compression Wave Propagating in a Very Long Railway Tunnel, International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 9 Sep., 2009, Gyeongje, Korea

6. 研究組織

(1) 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