

博士論文

論文題目 高速列車通過時に全覆上家駅で発生する圧力変動評価
および階段・エスカレーターで発生する列車風評価に関する研究

氏 名 原口 圭

目次

第1章 序論

1.1 背景	1
1.2 圧力変動および列車風の概要	2
1.2.1 列車風圧	2
1.2.2 圧力変動の概要	2
1.2.3 列車風の概要	5
1.3 本研究の目的	6
1.4 既往の研究	7
1.4.1 圧力変動に関する既往の研究	7
1.4.2 列車風に関する既往の研究	15
1.5 本研究の構成	18

第2章 全覆上家駅で発生する圧力変動評価

2.1 圧力変動の特性	19
2.1.1 はじめに	19
2.1.2 測定位置および駅の諸元	19
2.1.3 測定方法	28
2.1.4 圧力変動の波形の特徴	29
2.1.5 駅舎内の圧力変動分布	30
2.1.6 圧力変動の基本評価式および速度の影響	31
2.1.7 開口率および断面積の影響	32
2.2 圧力変動の一次元成分と三次元成分の分離	34
2.2.1 はじめに	34
2.2.2 圧力変動の一次元成分と三次元成分の分離方法	34
2.2.3 測定方法	36
2.2.4 測定結果の分析	38
2.2.5 圧力変動最大値の算出方針	45
2.3 圧力変動の評価	47
2.3.1 はじめに	47
2.3.2 一次元成分の評価	47
2.3.3 三次元成分の評価	51
2.3.4 一次元成分および三次元成分の圧力分布比較	55
2.3.5 圧力変動最大値の評価	57
2.4 まとめ	63

3章 階段・エスカレータで発生する列車風評価	
3.1 階段部等の列車風の特徴	64
3.2 高架下駅における圧力差積分値および管路長さの階段部等列車風に与える影響	68
3.2.1 はじめに	68
3.2.2 測定方法	68
3.2.3 圧力差積分値と管路長さの影響	78
3.3 風対策シェルター設置時の列車風予測手法の検討	82
3.3.1 はじめに	82
3.3.2 風対策シェルター設置および測定方法	82
3.3.3 風対策シェルター設置後の測定結果	85
3.3.4 圧力損失の影響	87
3.3.5 管路長さの影響	90
3.3.6 列車風の評価	93
3.3.7 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較	96
3.3.8 列車速度の影響	98
3.4 列車風の安全性評価	99
3.4.1 はじめに	99
3.4.2 安全性評価手法および測定方法	99
3.4.3 安全性評価結果	101
3.5 まとめ	103
第4章 結論	
4.1 本研究の結論	104
4.2 本研究成果の導入	106
4.3 今後の課題	107
付属資料	
付属資料1 対面測定時の圧力変動波形	108
付属資料2 風対策シェルター設置前後の列車風波形	113
付属資料3 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較	136
参考文献	147
謝辞	149

第1章 序論

1. 1 背景

列車が通過する際には列車風圧が発生し、駅ホーム空間や駅舎内の内装材の割れや落下等を引き起こす場合がある。列車風圧は特に高速で列車が通過する新幹線駅舎で問題となることが多い。

列車風圧は列車が通過する度に繰り返し発生し、長期間継続するため、内装材の割れやビスの緩み、落下などの非構造部材の不具合につながっている¹⁾。また、エスカレータの断面が絞られている箇所では、列車風が発生している駅もあることから、列車風圧対策の検討は旅客の安全確保上も必要不可欠である。

一方、現在、国内の営業最高速度は 320 km/h であるが、さらなる高速化に向けて、特に高速走行中の沿線騒音の低減および地震発生時の高速走行からの停止時間の短縮を課題として、次世代の新幹線に向けた技術開発も推進されている²⁾。320km/h で走行する車両の特徴の1つは、ロングノーズタイプ（先頭長 15m）の先頭形状であるが、この先頭形状は列車風圧の低減ではなく、トンネル微気圧波の抑制を目的として開発されたものである²⁾。そのため、今後の高速化に伴い、列車風圧はさらに増大することが想定される。

列車が高速化される場合には列車風圧が増大し、不具合につながることを想定されるため、事前に非構造部材の耐久性や旅客の安全性を検証する必要がある。従って、耐久性や安全性を検証し、地上側で効果的な対策工事を行うためにも、駅舎内の列車風圧の大きさ、非構造部材の耐力、階段・エスカレータでの風速等を適切に評価する必要がある。そのため、それらの手法の確立が不可欠であるが、特に駅舎内の列車風圧の大きさや階段・エスカレータでの風速などの外力の評価に着目した研究はほとんど無い状況である。

1. 2 圧力変動および列車風の概要

1. 2. 1 列車風圧

列車通過時には列車風圧が発生するが、列車風圧は圧力変動と列車風に分類することができる。圧力変動は静圧、つまり、空気が静止した状態で周囲におよぼす力であり、列車風は動圧、つまり、風の速度によって生ずる力である。

1. 2. 2 圧力変動の概要

高速列車が駅部を通過する際には圧力変動が発生し、特に、図 1-1 に示すホーム階が全て屋根と壁で覆われた駅（以下、「全覆上家駅」という）では、図 1-2 に示す軌道上の屋根が一部開放された駅（以下、「半覆上家駅」という）と比較して、圧力変動はさらに増大する。図 1-3 に示すように JR 東日本管内には 19 駅的全覆上家駅がある。圧力変動は、内壁や天井などの非構造部材に繰り返し荷重として作用し、ビスの緩み、仕上げ材の割れや脱落などの劣化を促進させる原因となっている¹⁾。また、ホーム階で発生した圧力変動は非構造部材に外力として作用するだけでなく、コンコース階との間で圧力差を生じ、それに起因してホーム階とコンコース階を接続する階段やエスカレータでは列車風が発生する。



図 1-1 全覆上家駅



図 1-2 半覆上家駅

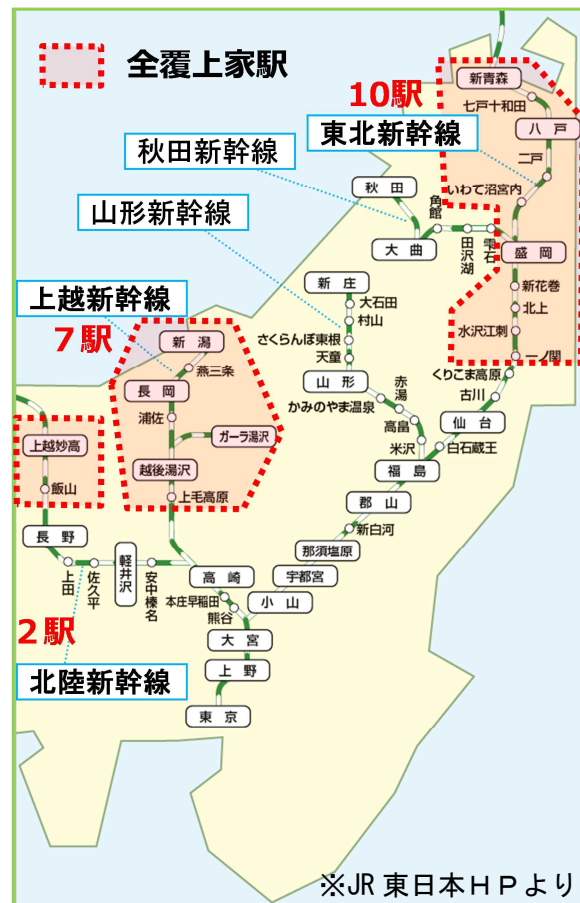


図 1-3 JR 東日本管内の全覆上家駅

圧力変動は大きく 2 種類に分けることができる。1つは空気の粘性によって列車周りに生成される列車通過時圧力変動で、1962年に東海道新幹線で初めて測定され、当時は列車風風圧と呼ばれた³⁾。走行する列車の周りでは、**図 1-4**に示すように列車の先頭部で正圧、先頭肩部で負圧が生じ、後尾部では負圧と正圧の圧力場が生じる。この圧力場が列車とともに移動するため、通過列車の近傍では、先頭部通過時に正→負の圧力変動、後尾部通過時に負→正の圧力変動が測定される。全覆上家駅で発生するのは主に列車通過時圧力変動である。もう1つは**図 1-5**に示すように列車先頭部がトンネル等の閉鎖空間に突入する際に発生する圧縮波であり、トンネル坑口に到達した時には微気圧波が放射される。後尾部突入時にも膨張波が発生し、圧縮波、膨張波とも音速で伝播し、トンネル出入口で反射を繰り返す。圧縮波は開口量が少ない全覆上家駅においても測定されている。

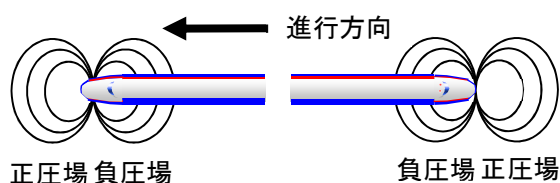


図 1-4 列車通過時圧力変動



図 1-5 圧縮波

地上側の条件によって、列車通過時圧力変動は大きさや変化の様相が異なり、明かり区間、トンネル区間、そして、シェルター区間に分類することができる⁴⁾。**図 1-6**に示すように駅間の高架橋や半覆上家駅は明かり区間、トンネル内や開口の少ない全覆上家駅はトンネル区間、側面に連続したスリットを有するスノーシェルターや一般的な全覆上家駅はシェルター区間に相当する。



図 1-6 地上側の条件と列車通過時圧力変動波形の分類

図 1-7 に明かり区間の圧力変動波形を示す。明かり区間の特徴として、先頭部が通過する際に正→負の圧力変動、後尾部が通過する際に負→正の圧力変動が発生し、中間部ではほぼ大気圧に近い状態であることが挙げられる。

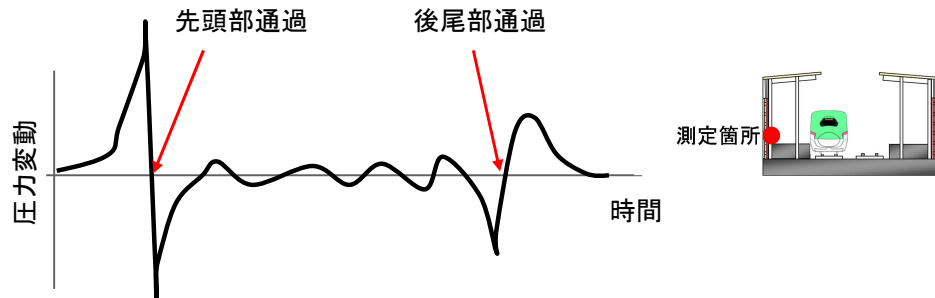


図 1-7 明かり区間の圧力変動波形模式図

図 1-8 にトンネル区間の圧力変動波形を示す。トンネル区間の特徴として、列車通過時圧力変動に加えて圧縮波や膨張波も発生し、列車通過時圧力変動に圧縮波や膨張波が重なり、複雑な波形となることが挙げられる。また、先頭部通過時の圧力変動の立ち上がりが緩やかになるなどの特徴も有する。列車通過時圧力変動は列車速度で伝播し、圧縮波や膨張波は音速で伝播するため、場所によって圧力変動最大値の大きさが変わる。

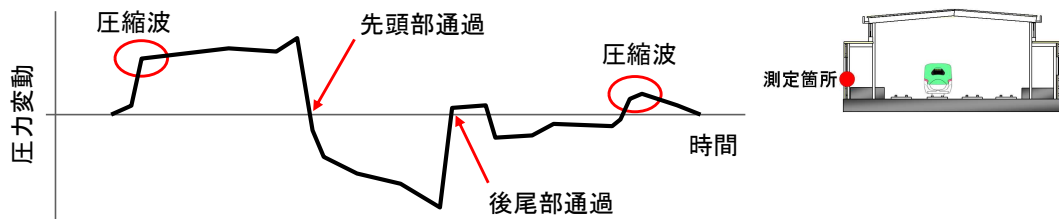


図 1-8 トンネル区間の圧力変動波形模式図

図 1-9 にシェルター区間の圧力変動波形を示す。特徴として、先頭部が通過する際に正の圧力変動、後尾部が通過する際に負の圧力変動が発生し、中間部ではほぼ大気圧に近い状態であることが挙げられる。なお、列車通過時圧力変動のみが発生し、圧縮波は発生しない。

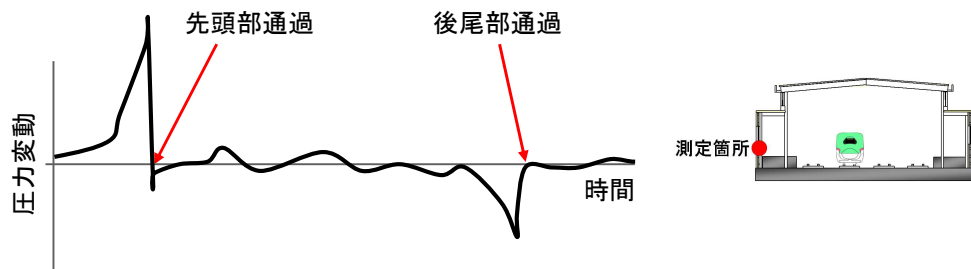


図 1-9 シェルター区間の圧力変動波形模式図

1. 2. 3 列車風の概要

列車走行に伴う風は列車近傍で発生する列車風と圧力差によって発生する列車風に分類することができる。

ホーム上で通過する列車近傍に立っていると突風を感じる。列車近傍で発生する列車風は列車周りの圧力変動勾配や空気の粘性により発生し、模式的に図 1-10 のように表される。列車先頭部で押しつけられる風、列車中間部では列車に沿って流れる風、列車後尾部の通過直後に車両側に引き込まれるような風が吹き、それぞれ、湧出流、境界層流、判流と呼ばれている⁵⁾。

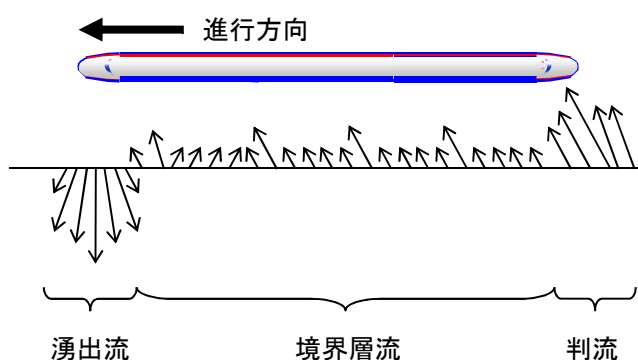


図 1-10 列車近傍で発生する列車風の模式図

また、エスカレータ・階段で断面が絞られている箇所において、図 1-11 に示すように列車通過時に上下端の圧力差に起因して列車風が発生する。特に、図 1-12 に示すコンコースが軌道上にある橋上駅のエスカレータ・階段では列車風は大きくなる。

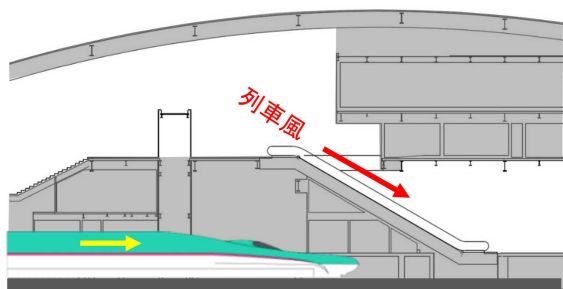


図 1-11 圧力差に起因して発生する列車風



図 1-12 橋上駅

1. 3 本研究の目的

今後の列車速度向上に伴い、列車通過時圧力変動に伴う内壁や天井などの非構造部材の耐久性評価が不可欠となる。非構造部材の耐久性評価に必要なのは、作用荷重および繰返し数であり^{6),7)}、列車通過時圧力変動の最大値を予測することができれば、非構造部材への作用荷重が算出でき、列車通過本数から非構造部材の耐久性評価が可能となる。一方、シェルター区間の列車通過時圧力変動の評価に関する研究としては簡易評価式の提案⁸⁾や数値解析⁹⁾、CFDによる解析¹⁰⁾がある。しかし、簡易評価式⁸⁾の変数は列車速度と駅舎断面積だけであり、シェルター区間特有の開口率の影響が加味されていない。そのため、開口率が大きい駅では(3%程度)、実測値よりも3倍以上過大に評価してしまう。また、文献9)では列車通過時圧力変動を評価するには、一次元解析および三次元ポテンシャル流解析による数値解析が必要であり、実用的でないことに加え、文献8)の簡易評価式同様、開口率が大きくなると(3%程度)、列車通過時圧力変動を3割程度過大に評価してしまうことが確認されている。CFDによる解析については、開口部の風速計算値と実験値で全体的に一致する結果が得られているが、全覆上家の開口部の局所的な流れの解析¹⁰⁾にとどまっている。そこで、本研究では、数値解析上の理論および圧力変動測定結果から、シェルター区間である全覆上家駅における列車通過時圧力変動(以下、「圧力変動」という)の最大値を予測するために簡易な評価式を構築することを目的とする。

また、今後の列車速度向上に伴い、階段・エスカレータ部(以下、「階段部等」という)で発生する列車風に対しての旅客の安全性評価も不可欠となる。列車風に関しては、駅間やホーム上など列車近傍で発生する列車風に着目した研究¹¹⁾¹²⁾が多く、圧力差によって発生する列車風も地下鉄に関する研究¹³⁾等が主である。地下鉄で発生する列車風は継続時間が長く、さらに、列車風対策に関する研究については、バイパスを設置することによって、階段部が担う流量自体を減らすことに主眼が置かれている¹³⁾。そのため、高速列車通過時の階段部等で発生する短時間で大きく変化する列車風に関するものや階段部等のみを対象とした局所的な対策に関するものはほとんど無い。そこで、本研究では、既存駅の階段部等を対象とし、安全性評価¹⁴⁾をする上で必要となる列車風を予測するために、圧力変動測定結果を用いて評価することを目的とする。特に列車風が大きい橋上駅を対象として列車風低減対策を提案し、対策時の列車風の予測手法についても検討する。また、安全性評価¹⁴⁾の際には列車風の時刻歴データが必要であるが、列車風最大値から安全性を評価する方法についても検討する。

1. 4 既往の研究

1. 4. 1 圧力変動に関する既往の研究

明かり区間については、壁等の地上構造物に対する影響を確認するために東北新幹線で圧力変動測定が実施された¹²⁾。その後、速度向上に伴い、圧力変動によって沿線近傍の家屋の窓ががたつく現象が生じ、この圧力変動を予測し、低減させるために、ポテンシャル理論に基づく簡単な流体力学モデル¹⁵⁾等や三次元境界要素法¹⁶⁾等を用いた解析が実施されている。文献 16)では、式(1-1)により圧力変動を評価しており、圧力変動は列車速度の 2 乗に比例する。文献 16)では、圧力変動は列車中心からの距離の 2 乗に反比例して減衰することを条件として数値計算が実施されている。

$$p = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \dots (1-1)$$

p : 圧力変動 (Pa)

C_p : 圧力係数

ρ : 空気密度 (1.226kg/m³)

V : 列車速度 (m/s)

また、列車先頭部の設計に使用できるような式(1-2)に示す簡易な数値計算法¹⁷⁾も提案されており、明かり区間の圧力変動は列車断面積にも比例する。

$$p(x,t) = -\frac{\rho_0 U^2 A_0 \cos(x, -Ut)}{2\pi R^2(x, -Ut)} \quad \dots (1-2)$$

$P(x,t)$: 圧力変動

ρ_0 : 空気密度

U : 列車速度

A_0 : 列車断面積

R : わき出し (列車中心) から観測点 x までの距離

海外においても、高速列車が線路沿線の様々な環境下における構造物に及ぼす空気力学的な影響について研究されているが¹⁸⁾、何れも明かり区間に関するものである。

高速列車がトンネル内を走行するときには大きな圧力変動が発生し、この圧力変動がそのまま車内に侵入すると乗客に不快感(「耳つん」)を与えるので、「耳つん」を発生させないための車内の圧力変動軽減対策が必要となる。この対策として、車体の気密構造化が図られたことから、車両構体応力の増大について検討する必要が生じた¹⁹⁾²⁰⁾。車両に関する問題以外にも、トンネル内作業環境、トンネル内走行時の空気抵抗等を検討する上でも重要な要素となり、これらを検討するためにトンネル内の圧力変動を予測する研究が始めら

れた¹⁹⁾²⁰⁾。その後、すれちがいがある場合の圧力変動の予測手法²¹⁾等について検討され、最近は、三次元的な分布にまで着目し、模型実験と現地試験結果との比較や圧力波の影響を調べたものがある²²⁾。さらに、列車先頭部形状とトンネル断面形状の影響および列車からの距離依存性について明らかにされ²³⁾、それを加味した数値シミュレーション手法が提案されている²⁴⁾。文献²³⁾ではトンネル内における圧力変動について、**図 1-13**に示すように三次元（列車からの距離に依存する）成分を抽出し、明かり区間における圧力変動波形と類似の形状をしていることや**図 1-14**に示すように列車中心からの距離の2乗に反比例することを確認している。

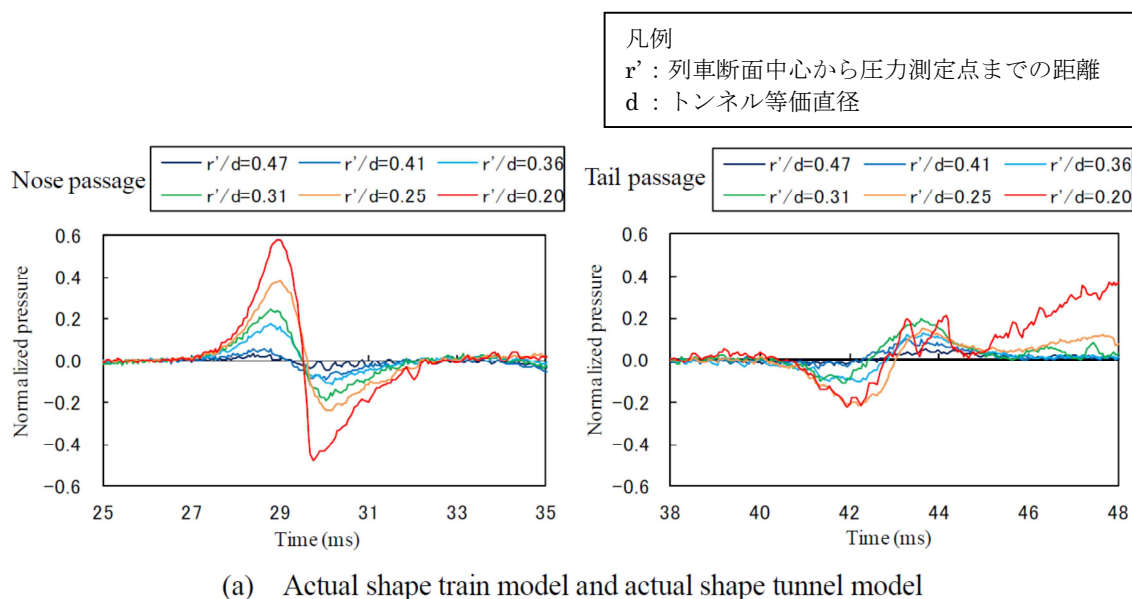


図 1-13 トンネル内における列車通過時圧力変動の三次元成分²³⁾

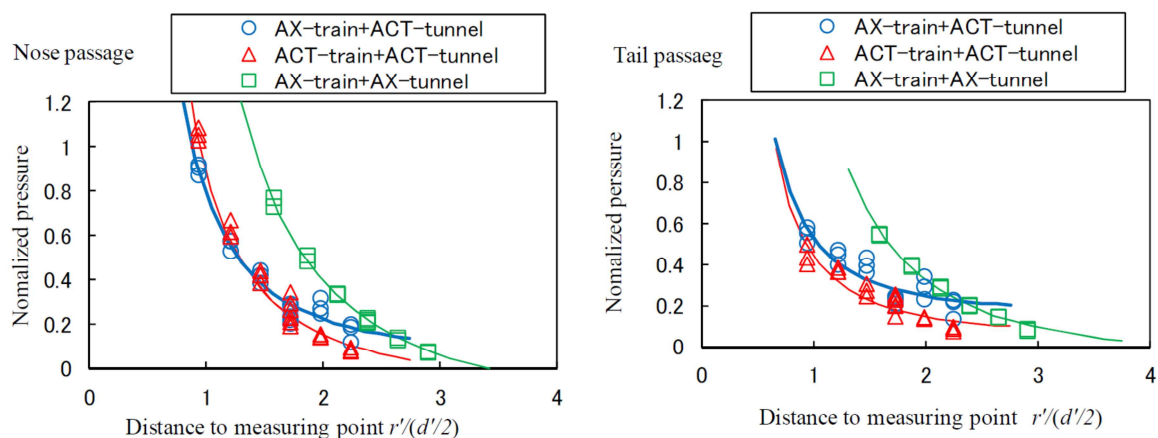
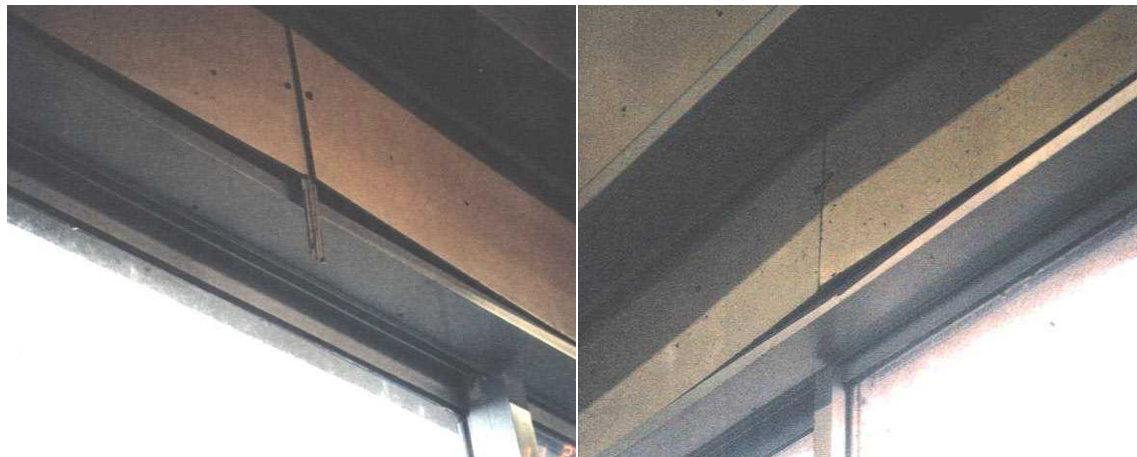


図 1-14 列車中心からの距離と三次元成分の関係²³⁾

一方、シェルター区間については、通過線を有さない軌道 2 線の駅において、内壁仕上げ材のひび割れやビスの抜け出しなどの不具合が発生した¹⁾。不具合状況を図 1-15 に示す。



【ボードの浮き】



【ボードの割れ】

【ビスの緩み】

図 1-15 内装仕上げ材の不具合状況

圧力変動がその原因として考えられたことから、実態を把握するために圧力変動測定が実施された¹⁾。さらに、得られた圧力変動最大値から載荷荷重を算出し、仕上げ材の劣化促進試験を行い、不具合の再現や対策工法の効果の確認を行っている。文献 1)の方法は、ある一定の荷重で劣化促進試験を行うため、載荷荷重と繰り返し回数の関係が分からない。そこで、文献 6)では、載荷荷重と繰り返し回数の関係に着眼した非構造部材の耐久性評価方法を提案している。基本的に試験装置は文献 1)と同じであり、図 1-16 に示すように内装仕上げ材試験体を装置に取り付け、試験体の両面からトーナメント方式で 2 点載荷方式により加力を行っている。

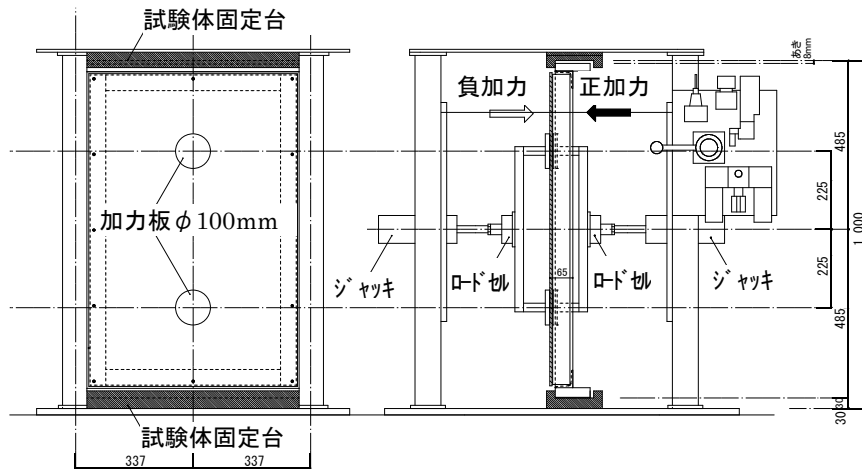


図 1-16 疲労試験装置⁶⁾

図 1-17 には金属板の剛性低下率と载荷回数との関係を示す。文献 6) では、剛性が初期剛性の 1 割以上低下した回数を疲労損傷回数と定義しており、载荷荷重と疲労損傷回数の関係を図 1-18 に示す。図中の繰返し回数 1 回の値は、静的载荷試験結果を示している。横軸を対数目盛り、縦軸を線形目盛りとすることによって、载荷荷重と疲労損傷回数は概ね線形関係を示すことが確認されている。

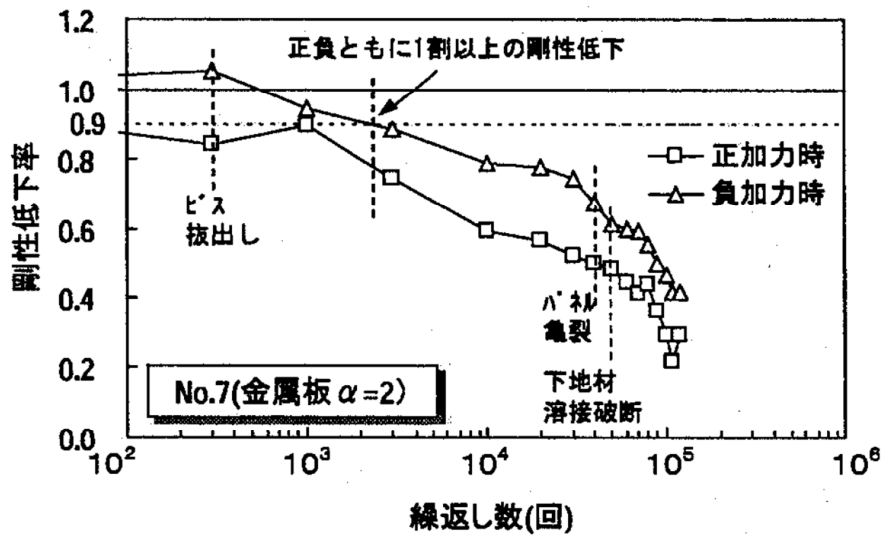


図 1-17 剛性と载荷繰返し回数の関係⁶⁾
(材料：金属板 载荷荷重：432N)

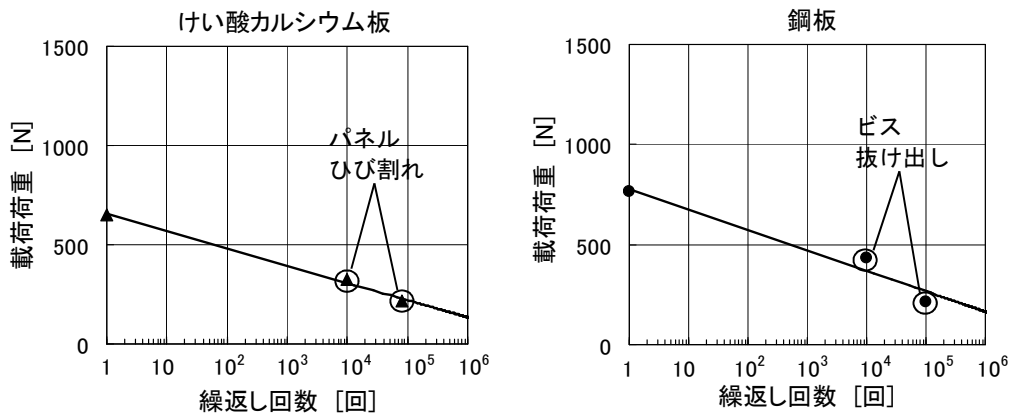


図 1-18 疲労試験と S-N 曲線⁶⁾

その後、ホームへ通ずる階段部分の天井材約 25 m² 全面が列車通過時に落下する事象が発生した⁷⁾。天井材落下状況を図 1-19 に示す。

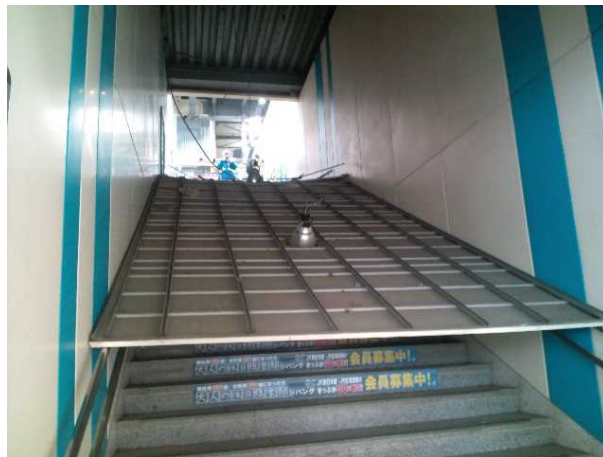


図 1-19 天井材落下状況

この際に、原因を確認するために、文献 6) で提案されている耐久性評価方法を適用し、天井クリップの劣化促進試験を実施している⁷⁾。図 1-20 に試験装置を示す。試験体への加力は、試験体を取付けた鋼製フレームを試験体固定台にセットし、図に示すように加力部に直結したアルミバーにプレートを用いて試験体の野縁を固定して加力を行っている。疲労損傷状況としては、クリップのフックが大きく変形して野縁から外れている。疲労損傷した試験結果を用いて作成した疲労曲線を図 1-21 に示す。文献 6) 同様に、横軸を対数目盛り、縦軸を線形目盛りとすることによって、載荷荷重と疲労損傷回数は概ね線形関係を示すことが確認されている。また、得られた疲労曲線から圧力変動による繰り返し載荷によって天井クリップが損傷し、天井が落下したと推定している。

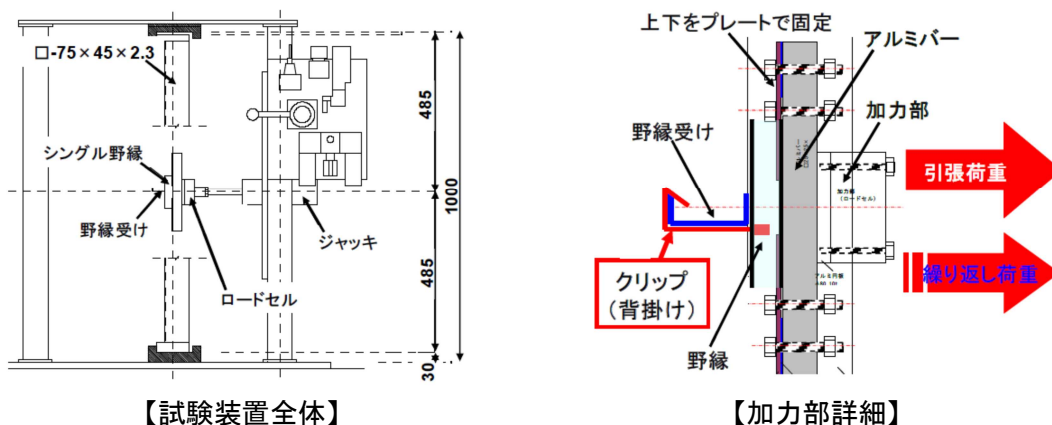


図 1-20 疲労試験装置⁷⁾

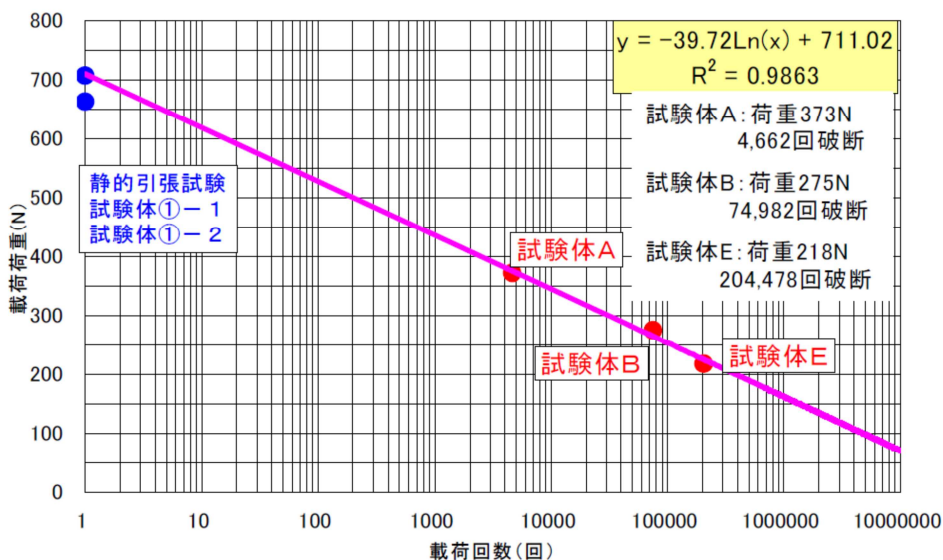


図 1-21 天井クリップの疲労曲線⁷⁾

圧力変動の評価方法に関するものとしては、式(1-3)に示す圧力変動最大値の簡易評価式⁸⁾がある。本評価式は、開口率を考慮していないため、駅断面積 150 m²、列車速度 260km/h の場合、750Pa 程度となり、開口率が 3.7%の駅での実測値 200Pa と比較すると、3 倍以上過大に評価することになる。

$$P = \pm 150 \times \left(\frac{V}{260}\right)^2 \times \left(\frac{A_0}{A}\right) \quad \dots (1-3)$$

P : 風圧 (kg/m²)

V : 列車速度 (km/h)

A_0 : 基準内空断面積で 75 m²

A : レールレベル以上の内空断面積 (m²)

また、式(1-4)（先頭部前後の領域）および式(1-5)（後尾部前後の領域）に示す一次元定常流解析と式(1-6)に示す三次元ポテンシャル流解析の重ね合わせによる数値解析⁹⁾が提案されており（図 1-21、22 参照）、模型実験とよく一致する結果が得られている。ただし、前述の通り、開口率が 3% の場合、3 割程度過大に評価してしまう。

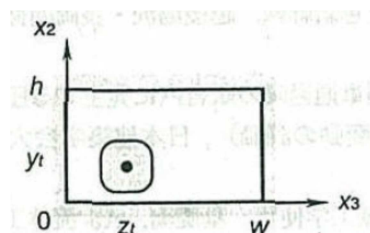
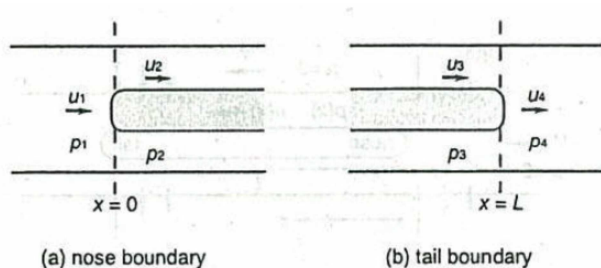


図 1-21 先頭部、後尾部における不連続境界⁹⁾

図 1-22 三次元ポテンシャル流解析モデル⁹⁾

$$u(x) = \begin{cases} V, & (x \leq -\Delta x_n, 0 \leq x), \\ V \sin(-\beta_0 x + C_n), & (-\Delta x_n < x < 0), \end{cases}$$

$$p(x) = \begin{cases} 0, & (x \leq -\Delta x_n, 0 \leq x), \\ \frac{1}{4} \rho V^2 \{1 + \cos 2(-\beta_0 x + C_n)\}, & (-\Delta x_n < x < 0), \end{cases}$$

$$\beta_0 = \frac{\sigma \varphi S}{A}$$

$$u_1 = (1 - R)V, \quad u_2 = V,$$

$$p_1 = \Delta p_n, \quad p_2 = 0,$$

$$\Delta p_n = \frac{1}{2} \rho V^2 R(2 - R),$$

$$C_n = \sin^{-1}(1 - R),$$

$$\Delta x_n = \frac{\cos^{-1}(1 - R)}{\beta_0}$$

・・・(1-4)

$u(x)$: チューブ内の流速

$p(x)$: チューブ内の圧力

σ : 縮流係数

φ : 開口率

S : チューブ断面周長

A : チューブ断面積

V : 列車速度

R : 閉塞率

$$\begin{aligned}
u(x) &= \begin{cases} V, & (x \leq L - \Delta x_t), \\ \frac{V}{2} \{ \cosh(\sqrt{2}\beta_1 x + C_t) + 1 \}, & (L - \Delta x_t < x < L), \\ \frac{(1-R)V}{\alpha}, & (L \leq x), \end{cases} \\
p(x) &= \begin{cases} 0, & (x \leq L - \Delta x_t, L \leq x), \\ \frac{-1}{8} \rho V^2 \{ \cosh 2(\sqrt{2}\beta_1 x + C_t) - 1 \}, & (L - \Delta x_t < x < L), \end{cases} \\
\beta_1 &= \frac{\sigma \varphi S}{(1-R)A} \\
u_3 &= \frac{V}{\alpha}, \quad u_4 = \frac{(1-R)V}{\alpha}, \\
p_3 &= -\Delta p_t, \quad p_4 = 0, \\
\Delta p_t &= \rho V^2 \frac{1-\alpha}{\alpha^2}, \\
C_t &= \cosh^{-1} \left(\frac{2-\alpha}{\alpha} \right) - \sqrt{2}\beta_1 L, \\
\Delta x_t &= \frac{1}{\sqrt{2}\beta_1} \cos^{-1} \left(\frac{2-\alpha}{\alpha} \right) \\
\alpha &= \frac{2-2R+R^2+\xi R^2}{2}, \quad \dots (1-5)
\end{aligned}$$

ξ : 圧力損失係数

$$\begin{aligned}
p(x, t) &= -\frac{\rho V^2}{4\pi} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \times \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - y_1) F_{jk}(x, y_1) \frac{\partial A_T}{\partial y_1}(y_1 + Vt) dy_1, \\
F_{jk}(x, y_1) &= \frac{1}{|x - (y_1, y_t + 2jh, z_t + 2kw)|^3} + \frac{1}{|x - (y_1, -y_t + 2(j+1)h, z_t + 2kw)|^3} \\
&+ \frac{1}{|x - (y_1, y_t + 2jh, -z_t + 2(k+1)w)|^3} + \frac{1}{|x - (y_1, -y_t + 2(j+1)h, -z_t + 2(k+1)w)|^3} \\
&\dots (1-6)
\end{aligned}$$

$p(x, t)$: チューブ内の圧力

A_T : 列車先頭部・後尾部の断面積分布

x : 圧力評価点の座標

1. 4. 2 列車風に関する既往の研究

列車風の測定は昭和 30 年代から行われ²⁵⁾等、その後の在来線高速運転に向けての資料とされた。駅間での列車風については、式(1-7)に示す経験的な算定式が提案されており、列車風は列車速度に比例して増大し、列車側面から離れるほど減少する傾向を示すことが確認されている¹¹⁾。

$$u = U \left\{ 1 - \left(\frac{y}{aX^m} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \quad \dots (1-7)$$

- u : 列車風速
- U : 列車速度
- y : 列車よりの離れ
- a : 常数 (車種により異なる)
- X : 先頭部からの距離
- m : 常数 (車種により異なる)
- n : 常数 (車種により異なる)

海外においても、高速列車周りの流れを測定したり²⁶⁾、高速で走行する模型列車を用いて伴流の現象を解明しようとする研究²⁷⁾がなされている。

列車の速度向上に伴い、列車風はホーム上の旅客に対する安全性に影響を及ぼすことから、特に、新幹線においてホーム上での測定や安全性評価に関する研究がなされてきた。旅客の安全に対する指標として、ビューフォート風力階級 4~5 程度 (風速 6~9m/s 程度) に基づき、風速がこれを超えないよう、1980 年代にホーム縁端からの退避幅の確保やホーム安全柵の設置などの検討がなされてきた¹²⁾。その結果、山陽新幹線では列車速度 250 km/h に対して、列車風を 9m/s 程度に抑えるために、退避幅は 2.5m とされた¹²⁾。また、東北新幹線では、構造上退避幅が 2.15m となる駅について、240 km/h の営業運転開始前に安全柵の形状に関する試験が行われ、高さ 1.3m の全面密閉型の柵がホーム上の列車風低減に効果的であることが示された¹²⁾。東北新幹線での高速走行試験列車による 350 km/h 程度の通過速度でも、指標を概ね満足することが確認されている²⁸⁾。

圧力差に起因する列車風は列車から離れた階段部等でも発生し、主として地下鉄で研究がなされてきた。地下鉄では、駅出入口間が 1 本の流路となり、列車のピストン効果によって列車風が発生する¹³⁾。そのため、地下鉄で発生する列車風は、高速列車通過駅の階段部等で発生する列車風と比較して、継続時間が長くなり、列車・トンネル断面積比が大きいほど、階段部等の断面積が狭いほど、階段個数が少ないほど、列車風は大きくなる¹³⁾。また、列車風対策としては、**図 1-23** に示すように緩和連絡坑や緩和立坑、駅端バイパス、駅構内緩和坑などの列車と駅階段部の間にバイパスを設けて階段部が担う流量を減らすこ

とが効果的であることが示されている¹³⁾。また、階段部の床面と天井面を平行に近づけたり、階段部の側方には床面から壁を設けたりするなど、断面が狭まる箇所の形状を空気がスムーズに流れるように改良することなども効果が期待できる¹³⁾。実際に地下鉄出入口の天井をドーム型にして、断面形状を滑らかにすることによって、列車風の緩和効果が確認された事例もある²⁹⁾。

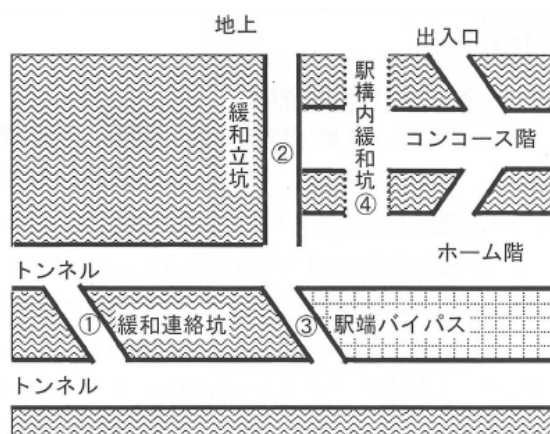


図 1-23 地下鉄における列車風緩和対策¹³⁾

一方、自然風の人体に対する風の影響に関する研究としては、力学的影響に関するもの³⁰⁾等、風環境評価に関するもの³¹⁾等がある。文献 30)では、風洞実験において風速 15m/s を超えると「意志通り歩けない」、超高層建物周辺における歩行実験において最大瞬間風速 10～15m/s で「歩調が乱れる・歩行軌跡が乱れる」との結論を得ている。また、文献 31)では、高層集合住宅周辺の商店街におけるアンケート調査より、日最大瞬間風速約 10m/s を超えると、強風に対する不満が急増するという結果を得ている。しかし、何れの研究も自然風を対象としており、短時間で大きく変化する列車風に対する安全性評価に用いるのは適切でない。そこで、列車風の許容レベルについて、姿勢安定性評価、主観評価を行い、風速との関係を調査して、階段部で発生する列車風を受ける場合の許容範囲が提案されており、風速 9m/s 程度が許容レベルと推定している³²⁾。更に、列車風の特徴を模擬した風に対する風洞実験および駅での列車風の現地試験により、人間工学的な見地から列車風により人体が受ける力学的影響を加味した列車風の安全性評価法が提案されている¹⁰⁾。文献 10)では、人の姿勢が不安定になり転倒したりする危険があるかどうかに着目し、床荷重水平成分（踏ん張る力）を風速に対する抗力として評価している。床荷重による評価方法では、図 1-24 に示すように床荷重水平成分のピーク値が 30N を超えると床荷重垂直成分の変動が大きくなり上下方向の動き（踵が浮く動き）が生じることから、床荷重が 30N に達する風速を列車風に対する基準値としている。具体的な評価は図 1-25 に示すように、測定により得られた風速に対して、同一の風速に対して不利となる体格の小さい人（身長 155.6cm、体重 44.7kg、投射面積 0.47m²）が受ける荷重を得られるフィルタ処理を行い、その荷重を基準値 30N と比較する方法で行われる。

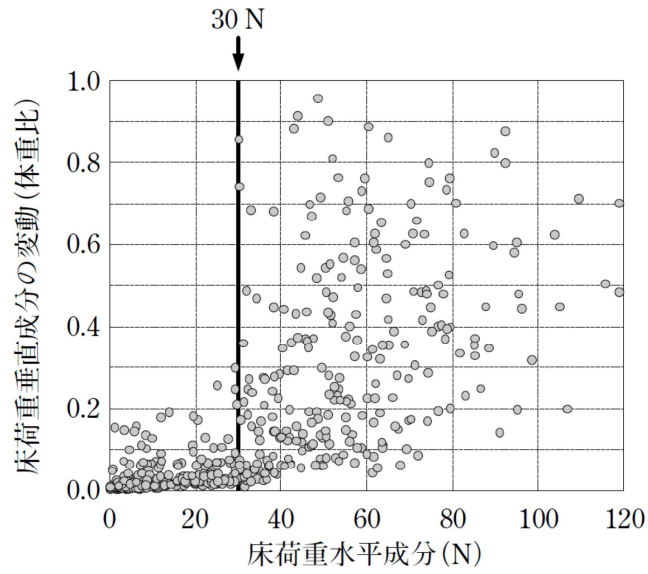


図 1-24 床荷重水平成分と垂直成分の変動¹⁰⁾

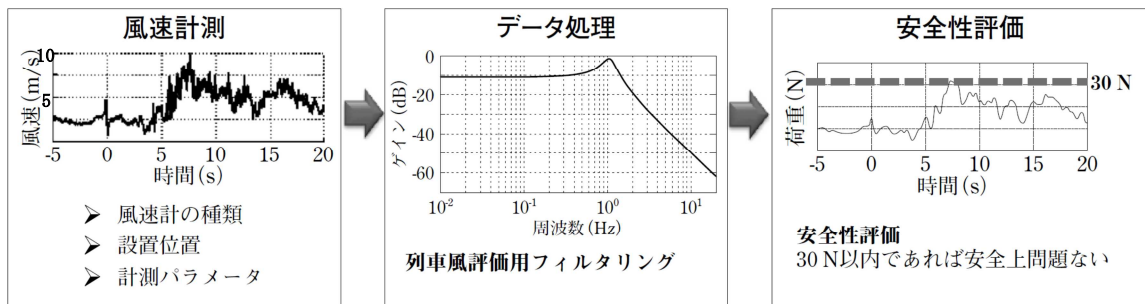


図 1-25 人間工学的列車風評価法¹⁰⁾

1. 5 本研究の構成

本研究は、第1章「序論」から第4章「結論」まで、合計4章から構成されている。

第1章「序論」では、本研究の対象とする全覆上家駅で発生する圧力変動評価および階段・エスカレータで発生する列車風評価の必要性について述べるとともに、既往の研究を整理して本研究の目的および位置づけを明らかにしている。

第2章「全覆上家駅で発生する圧力変動評価」では、以下の3節から構成されている。

2.1節「圧力変動の特性」では、圧力変動の測定を実施し、波形の特徴、列車速度や開口率などの影響を把握している。

2.2節「圧力変動の一次元成分と三次元成分の分離」では、対面で圧力変動の測定を実施し、断面内で様な一次元成分と列車からの距離に依存する三次元成分との分離を試みている。

2.3節「圧力変動の評価」では、2.2節で得られた一次元成分、三次元成分について、実測から得られた開口率の影響や数値解析上の理論を踏まえ、両者の単純和となる圧力変動最大値の評価式を提案し、適用性について検証している。

なお、2.1節は一部共同研究、2.2節および2.3節は単独研究である。

第3章「階段・エスカレータで発生する列車風評価」では、以下の4節から構成されている。

3.1節「階段部等の列車風の特性」では、階段部等で発生する列車風のメカニズムについて説明し、様な太さの管路の非定常流と仮定した評価式を提案している。

3.2節「高架下駅における圧力差積分値および管路長さの階段部等列車風に与える影響」では、管路構成部分が明確な高架下駅の階段部等にて測定を行い、評価式の適用について検証し、列車風低減対策について提案している。

3.3節「風対策シェルター設置時の列車風予測手法の検討」では、列車風の大きい橋上駅において、列車風低減対策として、風対策シェルターを階段部等に設置し、管路設置時の列車風予測手法を検討している。

3.4節「列車風の安全性評価」では、列車風最大値から安全性を評価する手法について検討している。

なお、3.1節および3.3節、3.4節は一部共同研究、3.2節は単独研究である。

第4章「結論」では、本研究で得られた結論および本研究成果の導入、今後の研究課題をとりまとめている。

第2章 全覆上家駅で発生する圧力変動評価

2.1 圧力変動の特性

2.1.1 はじめに

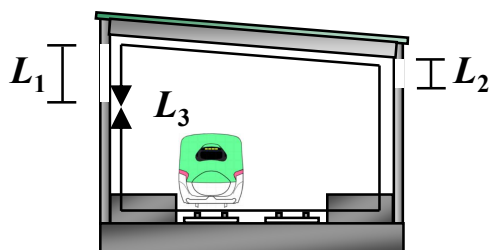
本節では、全覆上家駅で圧力変動の測定を行い、圧力変動波形の特徴や駅舎内の圧力変動分布、列車速度の影響、開口率および断面積の影響などの圧力変動の特性を把握した。

2.1.2 測定位置および駅の諸元

圧力変動の測定は、通過線側のホーム上壁際で実施した。また、D駅については、駅端部付近の圧力変動分布を把握するために、複数点で測定を実施した。今回測定を実施した全覆上家駅の諸元を表 2-1 に示す。全覆上家駅は前述の通り連続した開口を有しているのが特徴であり、図 2-1 に示すように駅舎断面の周長に対する開口長さの比率を開口率と定義する。また、表中の列車中心からの距離は通過線から最も近い壁面までの距離である。測定位置図を図 2-2～2-9 に示す。全覆上家駅は、通過線を有さない軌道 2 線の小断面駅と、通過線を有する軌道 4 線又は 5 線の大断面駅に大別でき、小断面駅の方が開口率は大きく、列車中心からの距離は小さい。

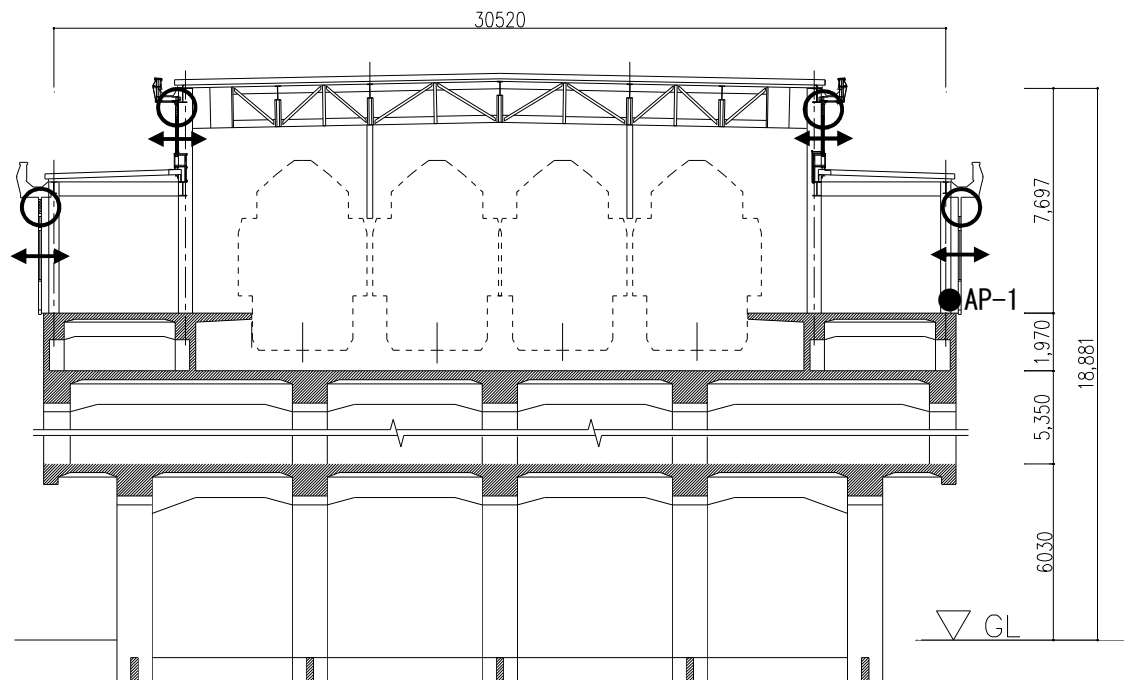
表 2-1 駅諸元

駅	開口率	列車中心からの距離(m)	軌道数	駅舎断面積(m ²)
A	0.008	13.1	4	246
B	0.010	6.1	2	147
C	0.004	13.1	5	367
D	0.011	6.1	2	147
E	0.037	6.4	2	150
F	0.015	6.8	2	138
G	0.018	6.5	2	167
H	0.007	14.2	4	259



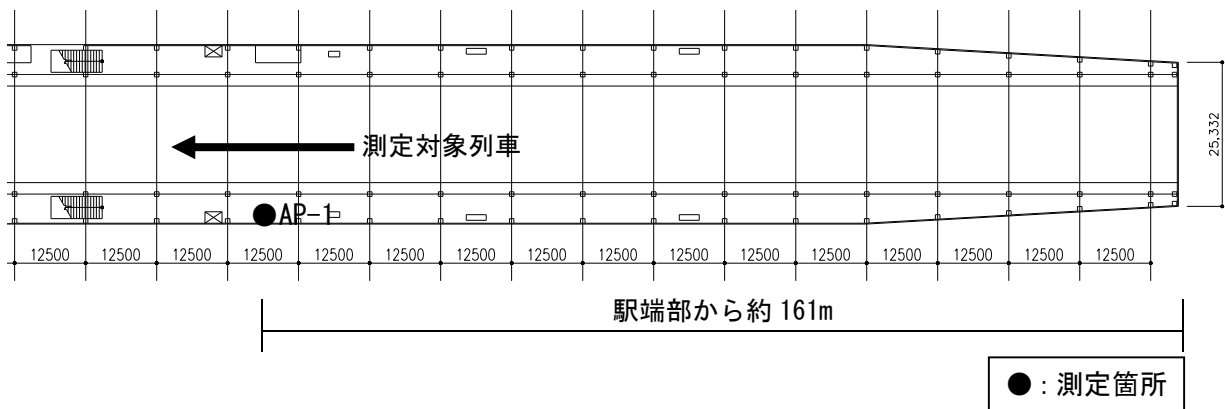
$$\text{開口率} = \frac{\text{開口長さ}(L_1 + L_2)}{\text{断面周長}(L_3)}$$

図 2-1 開口率の定義



○ : ガラリー ↔ : 引違い窓

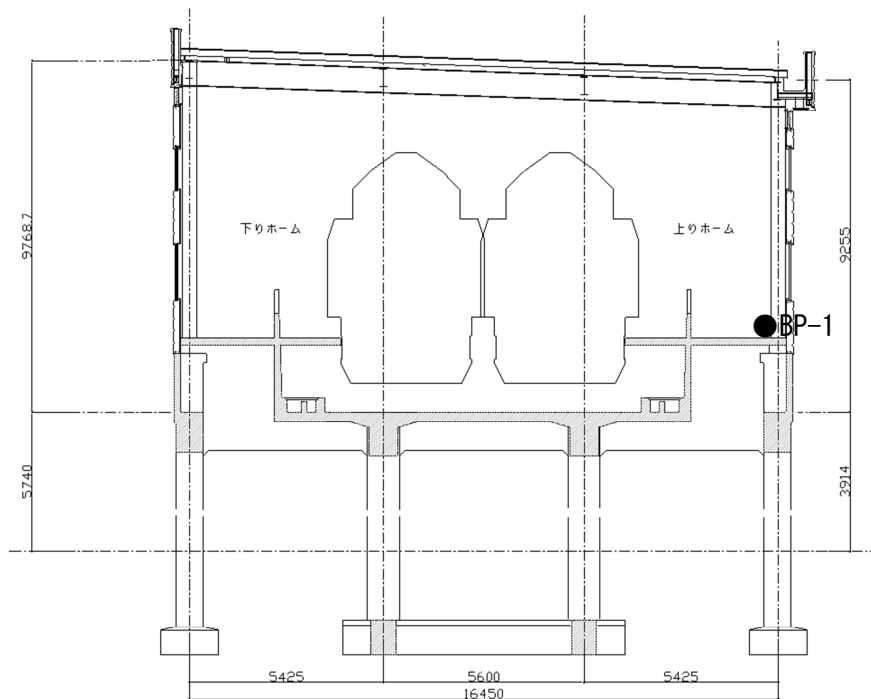
【断面図】



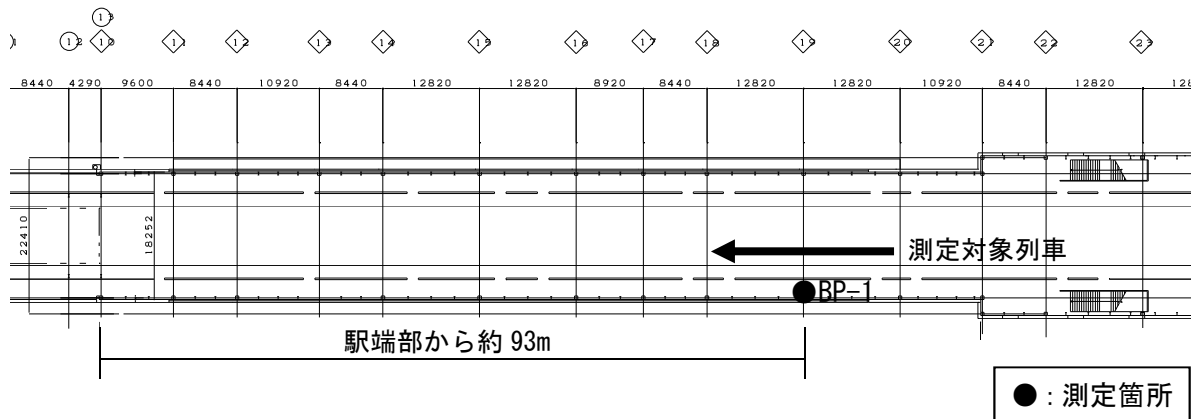
● : 測定箇所

【平面図】

図 2-2 圧力変動特性把握時の A 駅測定位置図

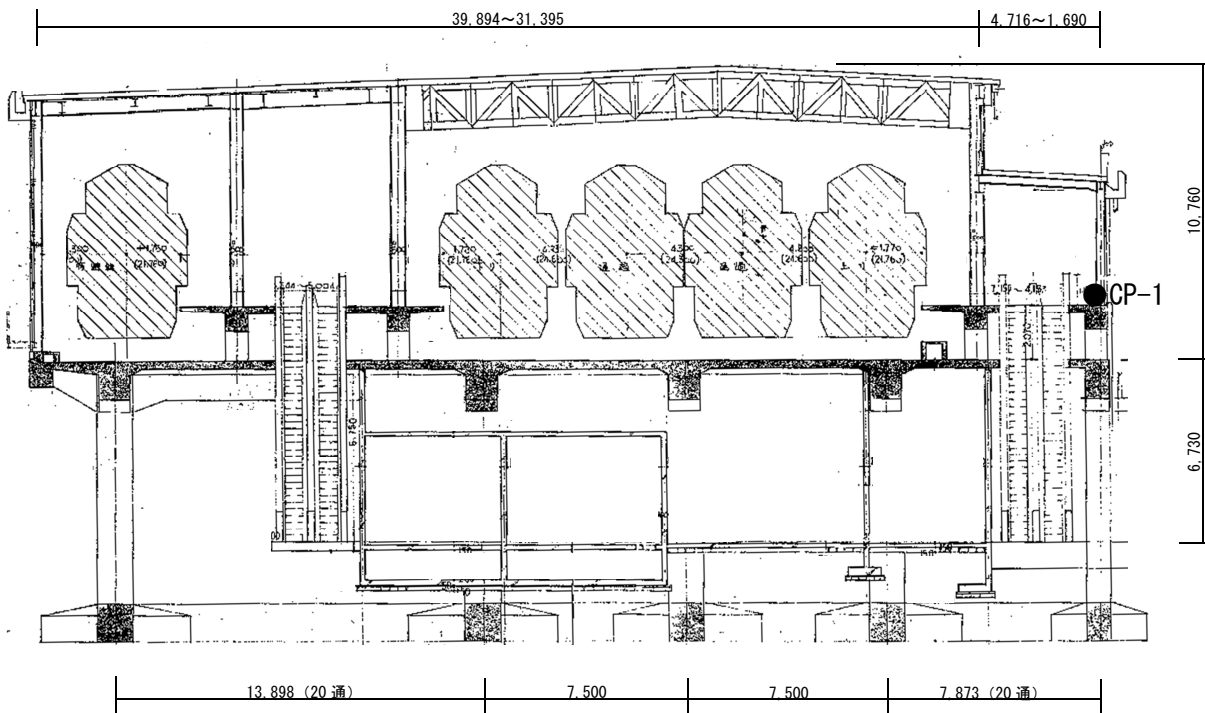


【断面図】

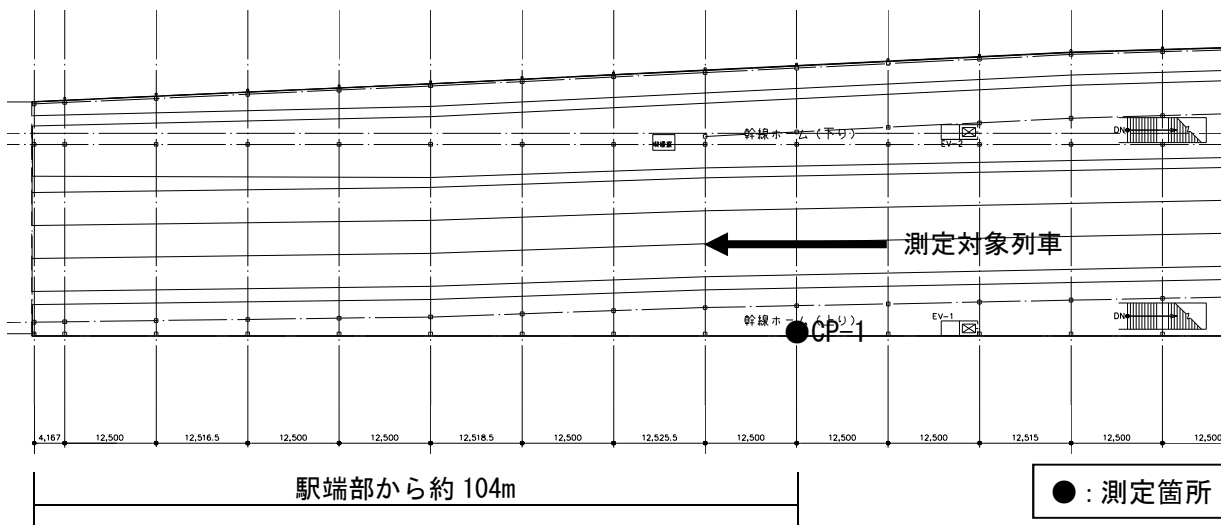


【平面図】

図 2-3 圧力変動特性把握時のB駅測定位置図

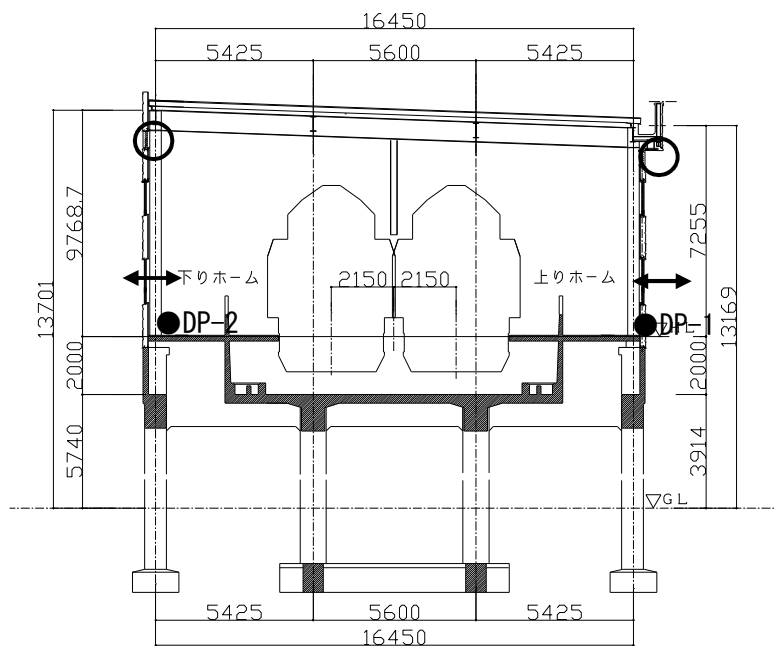


【断面図】



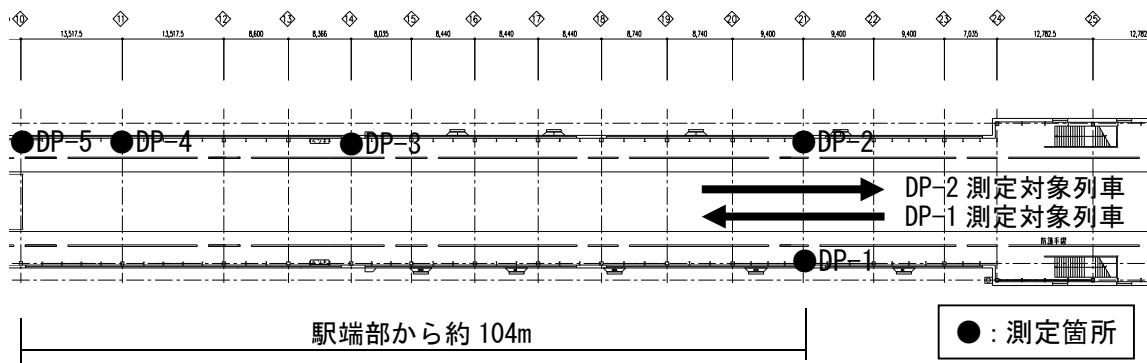
【平面図】

図 2-4 圧力変動特性把握時の C 駅測定位置図



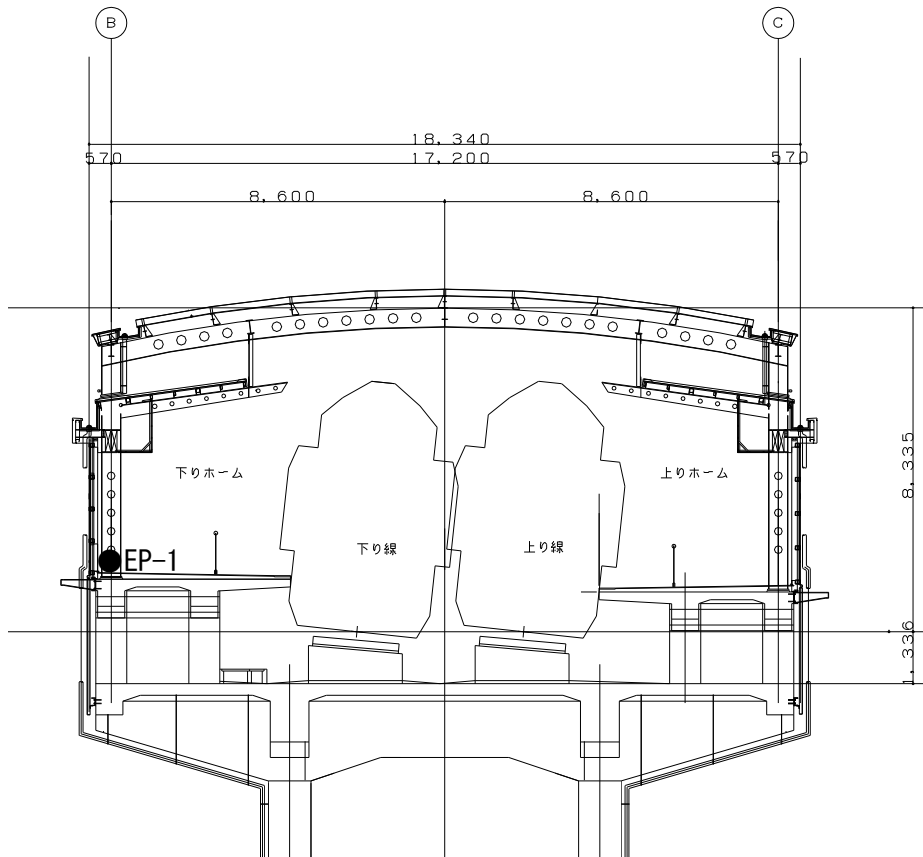
○ : ガラリ ↔ : 引違い窓

【断面図】

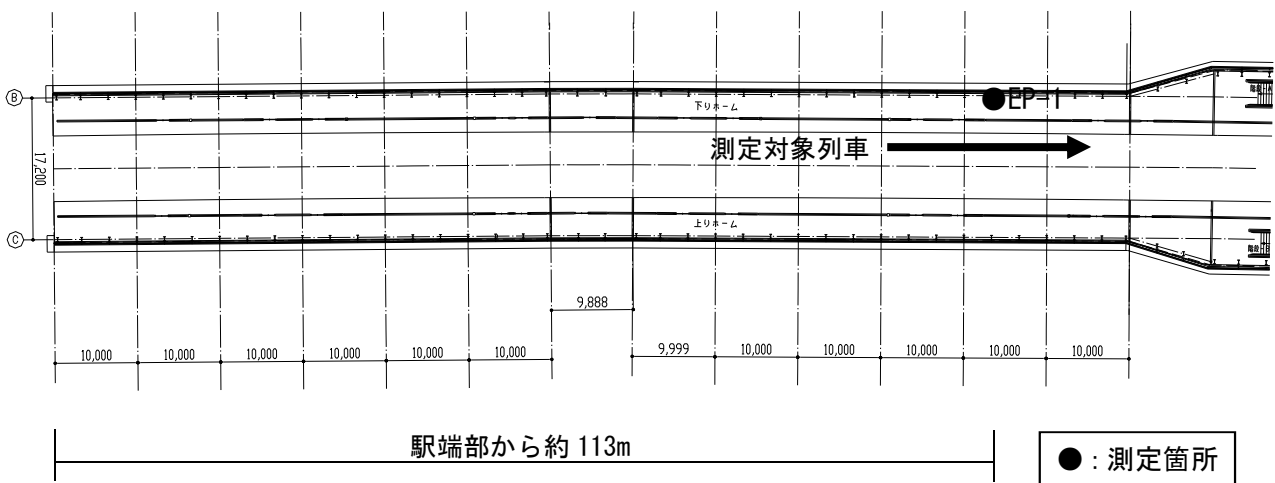


【平面図】

図 2-5 圧力変動特性把握時のD駅測定位置図

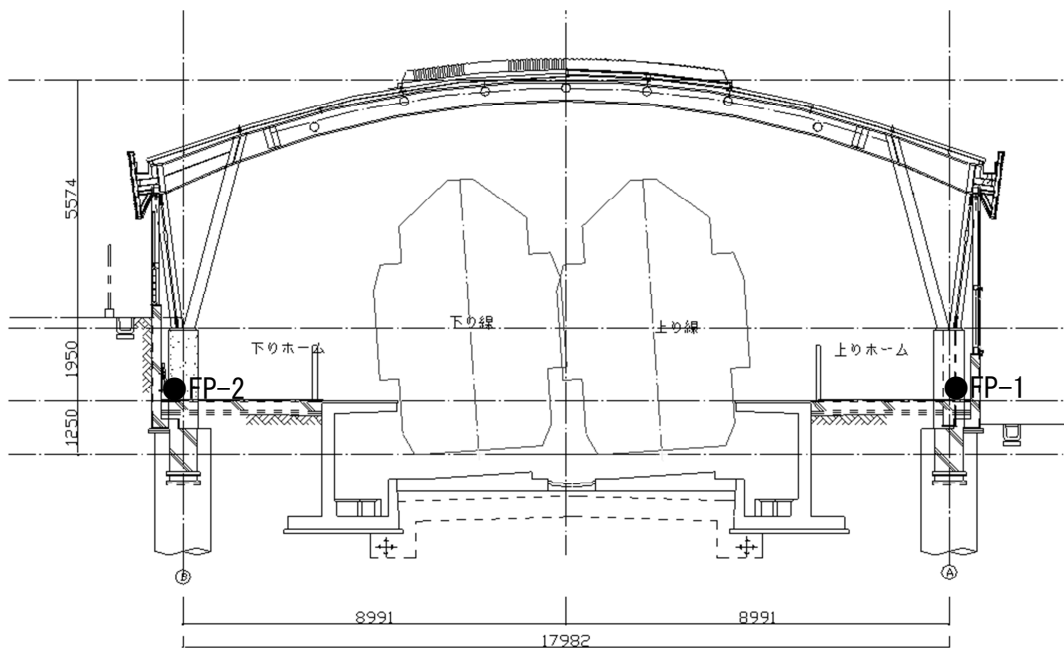


【断面図】

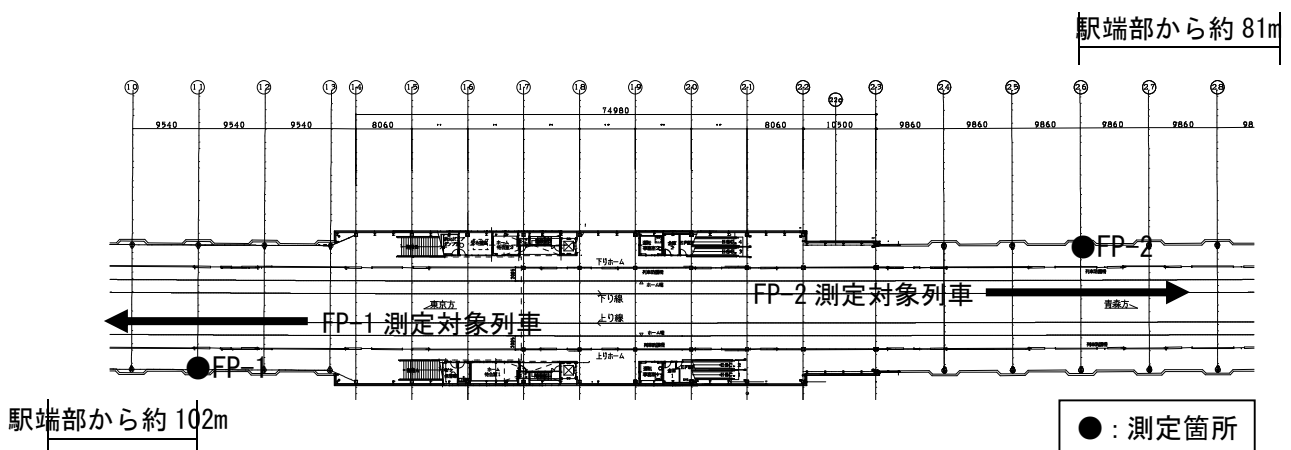


【平面図】

図 2-6 圧力変動特性把握時のE駅測定位置図

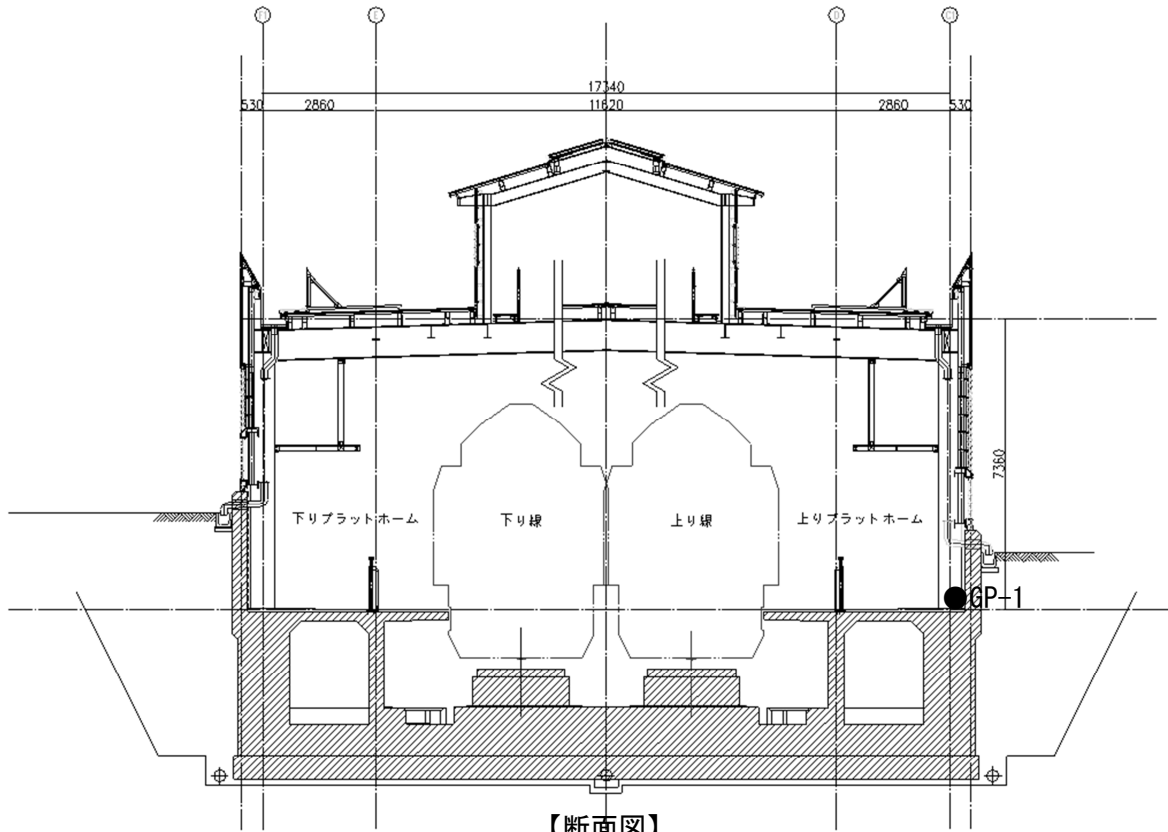


【断面図】



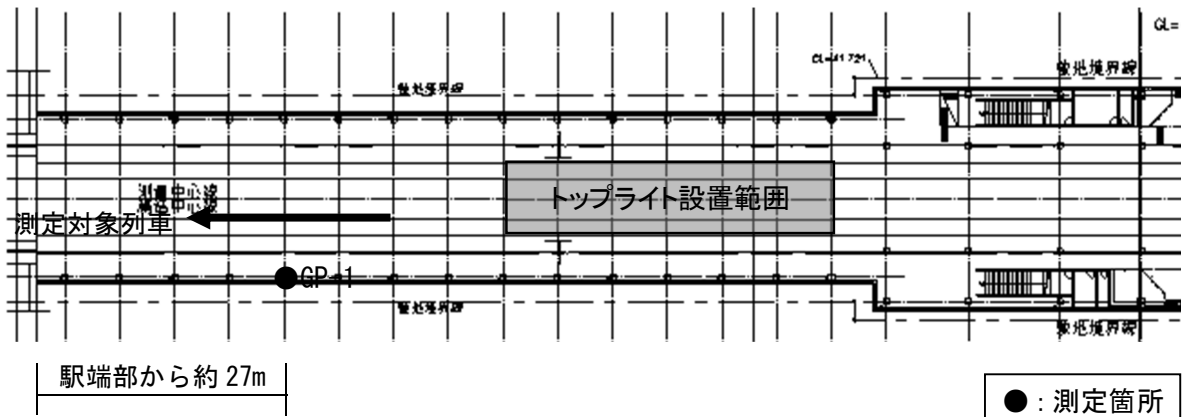
【平面図】

図 2-7 圧力変動特性把握時の F 駅測定位置図



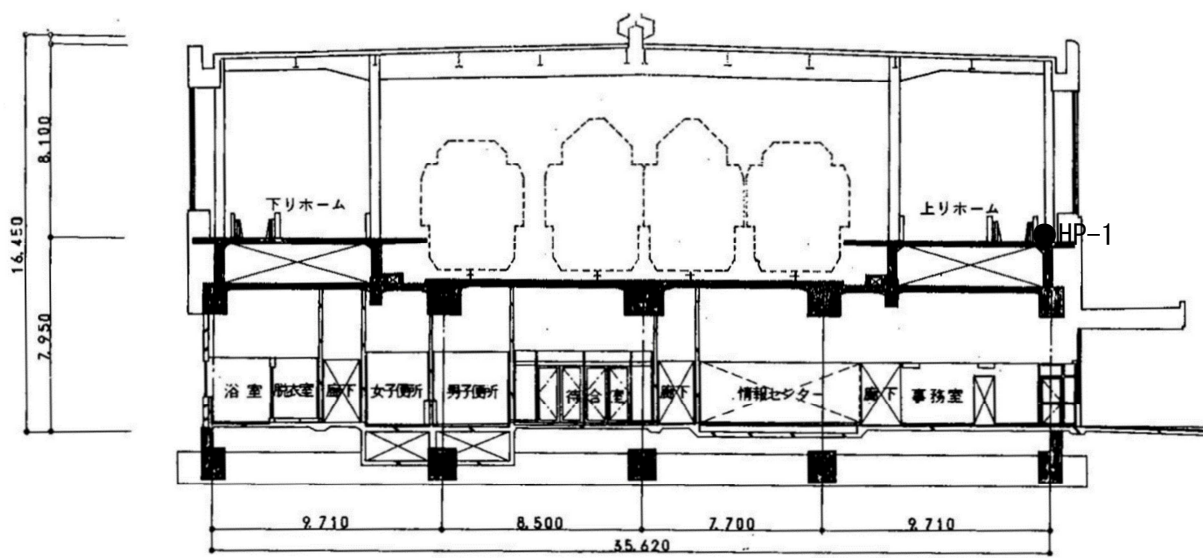
【断面図】

※測定箇所はトッライト無し

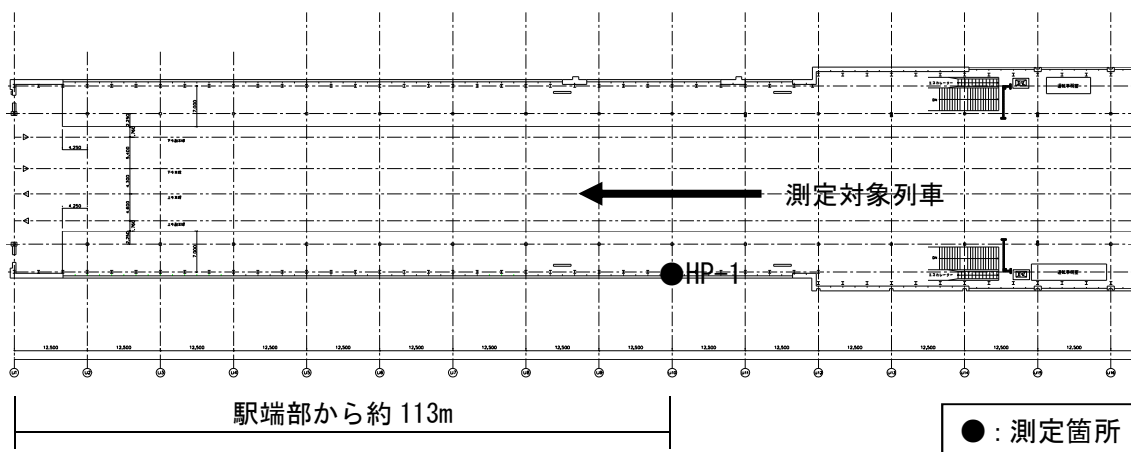


【平面図】

図 2-8 圧力変動特性把握時の G 駅測定位置図



【断面図】



【平面図】

図 2-9 圧力変動特性把握時のH駅測定位置図

2. 1. 3 測定方法

圧力変動の特性を把握するために各種測定を行ったが、共通する条件を以下に示す。圧力変動の測定は、通過線側のホーム上壁側床面に図 2-10 に示す微差圧計（SSK、DP8-100 又はテス、差圧計）を設置して実施した。列車速度の測定にはスピードガンを使用し、空気密度を算出するために、気温と気圧も測定している。測定はデータレコーダにより収録し、収録データをサンプリング周波数 100Hz で AD 変換した。



【SSK DP8-100】



【テス 差圧計】

図 2-10 微差圧計

2. 1. 4 圧力変動の波形の特徴

走行する列車の周りでは、圧力場が生じ、この圧力場は列車とともに移動するため、通過列車の近傍では圧力変動が観測される。A 駅で測定された圧力変動波形の一例を図 2-11 に示す。全覆上家駅では、図に示すように先頭部通過時に正圧、後尾部通過時に負圧が発生する。このように、列車が通過する度に圧力変動が発生し、仕上げ材に繰返し荷重として作用する。また、図 2-12 は全覆上家駅 7 駅（A 駅～G 駅）における先頭部通過時と後尾部通過時の圧力変動最大値の絶対値の比較を示す。H 駅については、トンネル区間特有の音速で伝播する圧縮波が発生しており、先頭部通過時と後尾部通過時の圧力変動を分離して比較することができなかつたことから除いている。図に示すように、後尾部通過時よりも先頭部通過時の方が大きいことから、圧力変動最大値の評価式は先頭部通過時を対象とする。先頭部通過時の圧力変動の方が大きい理由としては、後尾部では、流れが表面から剥離し、流れが乱れることが一因として考えられる⁸⁾。

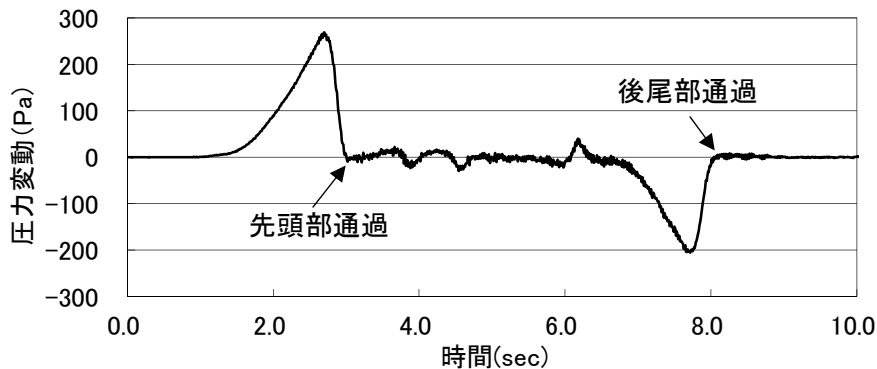


図 2-11 A 駅圧力変動波形

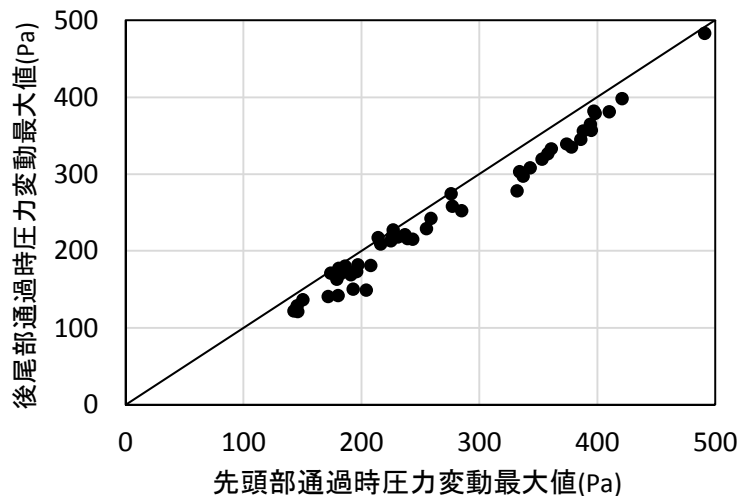


図 2-12 先頭部通過時と後尾部通過時の圧力変動最大値比較

2. 1. 5 駅舎内の圧力変動分布

全覆上家駅の場合、全長が長く、駅舎の断面積や開口量が一定であれば、圧力変動は場所によらず一定値となる。しかし、実際には駅端部に大きな開口があったり、断面積や開口率が途中で変化したりすることもあるため、場所によって圧力変動の大きさは変化する。そこで、駅端部付近の圧力変動分布について確認することとした。図 2-13 は D 駅下りホーム DP-2~5 における先頭部通過時の圧力変動最大値の分布を示したものである。X 軸の正方向が下り方、負方向が上り方になっている。図より下り列車通過時、上り列車通過時ともに駅端部では圧力変動が駅舎内部よりも小さくなっているが、圧力変動の低減率は上り列車通過時の方が大きく、駅端部から離れた箇所でも圧力変動が低減しているのが確認できる。これは、上り通過列車の場合、駅舎端部の開口部が前方に位置することから、圧力変動は列車前方の影響を受けやすいと考えられる。そこで、圧力変動測定時は特に駅舎端部からの距離や通過方向に留意して測定箇所を決める必要がある。

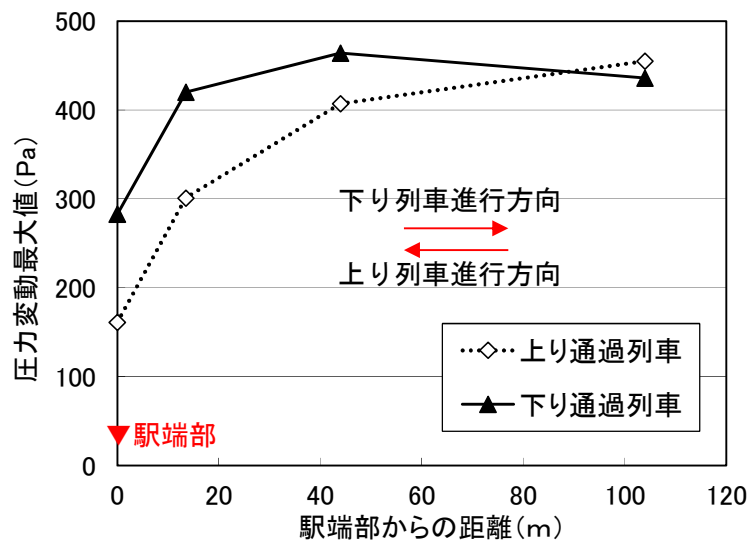


図 2-13 駅端部付近の圧力変動分布 (D 駅)

2. 1. 6 圧力変動の基本評価式および速度の影響

明かり区間での圧力変動は、列車速度の2乗に比例する傾向を示すことが分かっており、式(2-1)で表すことができる¹⁶⁾。

$$P(t) = C_p(t) \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \dots (2-1)$$

$P(t)$: 圧力変動 (Pa)

$C_p(t)$: 圧力係数

ρ : 空気密度 (kg/m³)

V : 列車速度 (m/s)

明かり区間においては、圧力係数は車両種別によって異なり、列車中心からの距離の2乗に反比例する¹⁶⁾。空気密度は式(2-2)で表すことができる。

$$\rho = 1.2931 \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{P_{AT}}{1.013 \times 10^5} \quad \dots (2-2)$$

T : 空気温度 (°C)

P_{AT} : 大気圧 (Pa)

図 2-14 には速度向上試験が実施された F 駅と I 駅で測定された列車速度の2乗値と圧力変動最大値の関係を示す。F 駅では 2 種類の車両種別で速度向上試験が実施されており、①と②では車両種別が異なる。図より圧力変動はほぼ列車速度の2乗に比例していることが分かる。そのため、全覆上家駅においても式(2-1)式が成り立ち、圧力係数最大値を評価することができれば、圧力変動最大値を評価することが可能となる。

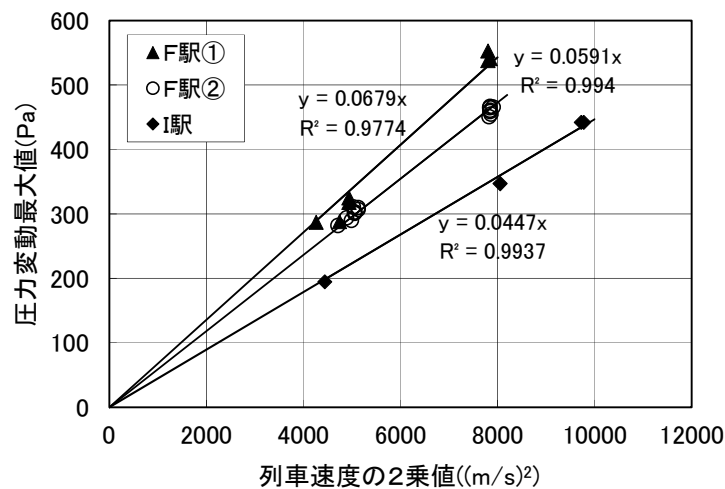


図 2-14 列車速度の2乗値と圧力変動最大値の関係

2. 1. 7 開口率および断面積の影響

全覆上家駅では、圧力係数は列車断面積、列車先頭部形状、駅舎断面積、列車中心からの距離、開口率に依存する⁹⁾。全覆上家駅の圧力変動を評価する上で、開口率は特徴的な影響因子であるが、文献⁹⁾において圧力係数最大値との関係は定式化されていないことから、圧力係数最大値と開口率の関係を把握することとした。全覆上家駅7駅について、開口率と圧力係数最大値の関係を図2-15に示す。同じ車両種別で比較するため、D駅はDP-1のデータを使用し、G駅は除いている。図より駅舎断面積約150 m²の駅では、開口率が大きいほど圧力係数は小さくなっていることが分かる。また、駅舎断面積が小さくなると、圧力係数が大きくなることも分かる。そこで、通過線のある大断面積のA駅と通過線の無い小断面積のD駅の2駅について、窓の開閉により開口率を変化させて圧力変動を測定し、開口率と圧力係数最大値の関係を把握した。

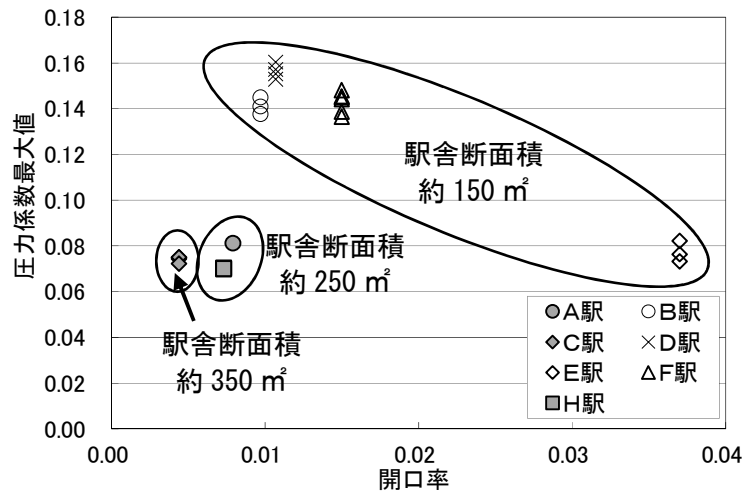


図 2-15 開口率と圧力係数最大値の関係

A駅は図2-2、D駅は図2-5に示すように、既存の開口部はガラリのみで、図中の引き違いの窓を開閉することで、開口率を変化させた。ガラリの開口率は有効開口を開口長さとし、引き違い窓の開口率は連続して同じ面積の開口があると想定した場合の高さ（全開口面積／線路方向駅舎長さ）を算出した。A駅の測定ケースを表2-2、D駅の測定ケースを表2-3に示す。図2-16に開口率と圧力係数最大値の関係を示す。図より両駅とも開口率と圧力係数最大値には線形関係があることが分かる。

表 2-2 A 駅測定ケース

開口率	測定列車 本数(本)	列車速度 (km/h)	備考
0.0079	1	271	窓全閉鎖
0.0161	1	272	上部窓一部開放
0.0209	1	273	上部窓全開放
0.025	1	272	下部窓全開放

表 2-3 D 駅測定ケース

開口率	測定列車 本数(本)	列車速度 (km/h)	備考
0.0107	3	270~273	窓全閉鎖
0.018	4	244~273	窓一部開放
0.0253	2	273	窓全開放

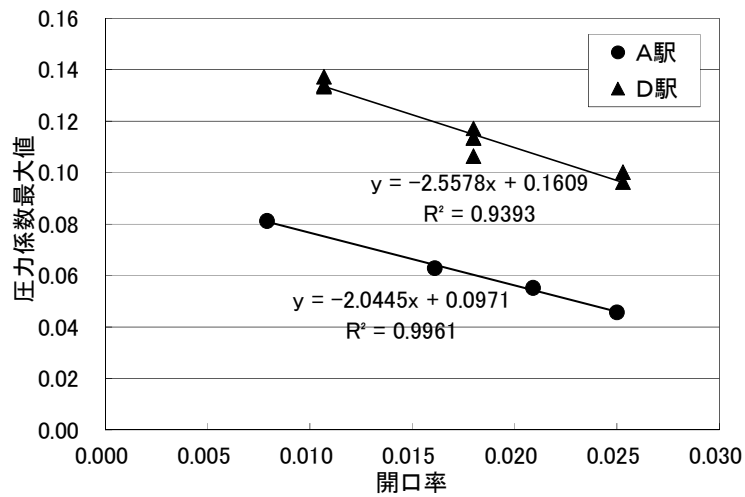


図 2-16 開口率と圧力係数最大値の関係 (A 駅、D 駅)

2. 2 圧力変動の一次元成分と三次元成分の分離

2. 2. 1 はじめに

本節では、全覆上家駅において、対面で圧力変動の測定を行い、断面内で一様な一次元成分と列車からの距離に依存する三次元成分との分離を試みた。

2. 2. 2 圧力変動の一次元成分と三次元成分の分離方法

全覆上家駅の圧力変動は、**図 2-17** に示すように断面内で一様な一次元成分と列車からの距離に依存する三次元成分の重ね合わせで評価することができる⁹⁾。一次元成分は先頭部通過時に正圧、後尾部通過時に負圧が発生することが特徴である。一方、三次元成分は先頭部通過時に正圧・負圧、後尾部通過時に負圧・正圧が発生することが特徴的であり、明かり区間と類似した波形である。両者は影響する要因が異なることから、評価式を構築するためには両者を分離することが必須となる。複線トンネル内の列車通過時圧力変動については、内壁対面で測定された圧力変動波形の差から三次元成分を近似的に抽出できることが確認されている²³⁾。また、抽出された三次元成分は明かり区間同様¹⁶⁾に列車中心軸からの垂直距離の2乗にほぼ反比例することも確認されており²³⁾、トンネル区間の圧力変動については、一次元成分と三次元成分の分離が可能である。

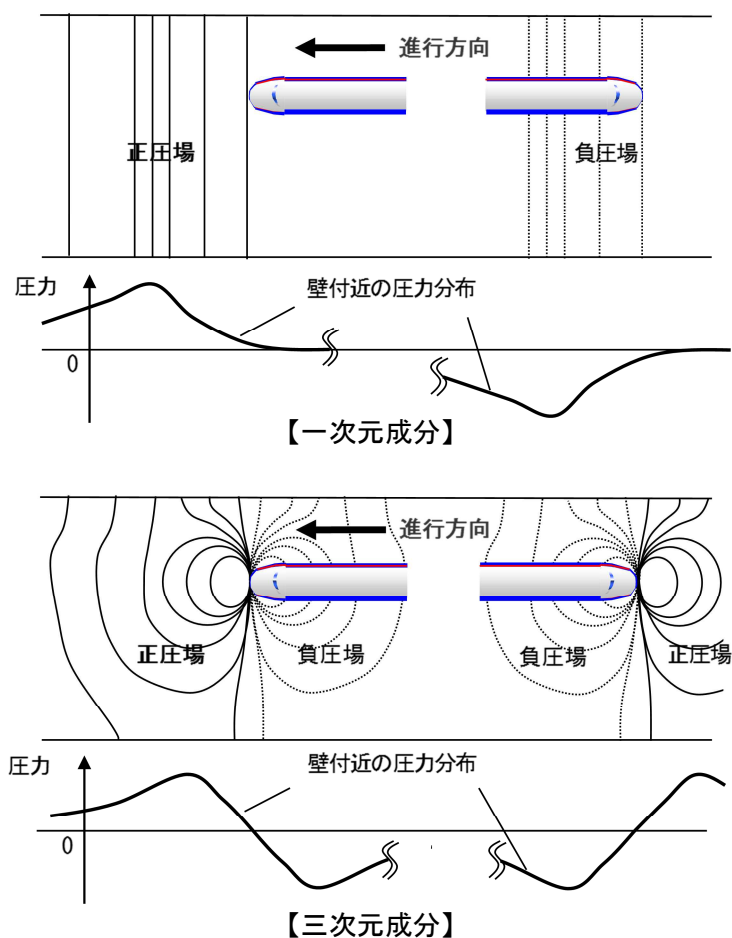


図 2-17 一次元成分と三次元成分の模式図

全覆上家駅でも三次元成分は列車中心からの距離の 2 乗に反比例すると仮定すると、三次元成分は式(2-3)、一次元成分は式(2-4)で評価することができる (図 2-18 参照)。式(2-3)からも分かるように、近接側列車中心からの距離 r_N と遠隔側列車中心からの距離 r_F が異なることが大前提である。そこで、全覆上家駅においても、対面で圧力変動の測定を行い、一次元成分と三次元成分の分離を試みた。なお、実際に取り扱うのは平面上における列車中心から壁面までの距離であるため、二次元成分となるが、ここでは三次元成分と称する。

$$P_{N3}(t) = (P_N(t) - P_F(t)) \times \left(1 - \left(\frac{r_N}{r_F}\right)^2\right)^{-1} \quad \dots (2-3)$$

$$P_1(t) = P_N(t) - P_{N3}(t) \quad \dots (2-4)$$

$P_1(t)$: 一次元成分 (Pa)

$P_{N3}(t)$: 近接側三次元成分 (Pa)

$P_N(t)$: 近接側圧力変動 (Pa)

$P_F(t)$: 遠隔側圧力変動 (Pa)

r_N : 近接側列車中心から壁面までの距離 (m)

r_F : 遠隔側列車中心から壁面までの距離 (m)

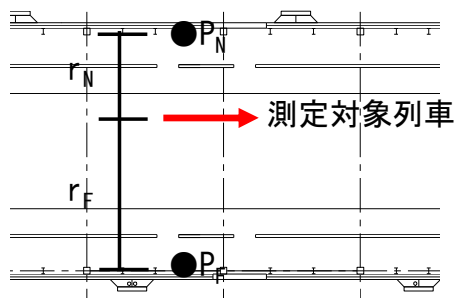


図 2-18 測定位置関係

2. 2. 3 測定方法

表 2-4 に圧力変動測定を実施した各駅の概要、測定対象列車を示す。閉塞率は列車断面積と駅舎断面積の比である。一次元成分と三次元成分を分離し、圧力変動最大値の評価式を構築する際に、圧力変動の大きい小断面駅の予測精度を上げるため、何れの駅も通過線を有さない軌道 2 線の駅を対象とし、開口率が分散するように駅を選定した。また、複線トンネル同様に線路を軸として非対称であり、列車中心から内壁までの距離が近接側と遠隔側で異なる。測定対象列車は先頭長の異なる 2 車種を対象とし、3 駅で測定を行った。測定位置図を図 2-19~2-21 に示す。図に示すように、圧力変動の測定は壁際対面で行った。これは、非構造部材の検討が主目的であり、三次元成分は壁を対称軸とした列車の鏡像からの距離にも依存するためである⁹⁾。なお、G 駅については、図 2-21 に示すようにトップライトが部分的に設置されている。その影響を最小限にするために、駅端部とトップライト端部の間で測定しており、駅端部からの距離が他の駅と比較して小さくなっている。使用した測定機器、測定機器の設置位置、データ処理等は「2. 1. 3 測定方法」と同様である。

表 2-4 各駅の概要、測定対象列車

駅	開口率 ϕ	r_N (m)	r_F (m)	測定対象 列車※	閉塞率 R	測定列車 本数(本)	列車速度 (km/h)
E	0.037	6.4	11	車種A	0.075	3	257
				車種B	0.072	5	243~257
F	0.015	6.8	11.1	車種A	0.081	6	243~256
				車種B	0.078	3	318~348
G	0.018	6.5	10.8	車種B	0.065	5	256~319

※先頭部長さ: 車種A(9.1m) < 車種B(16m)

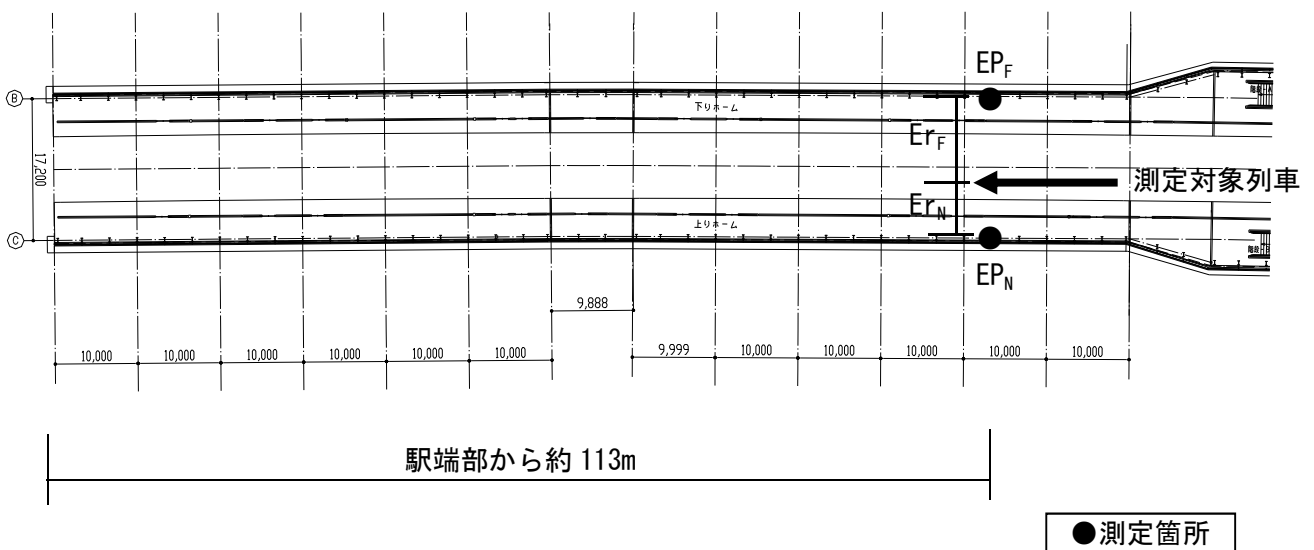


図 2-19 一次元成分と三次元成分分離時の E 駅測定位置図

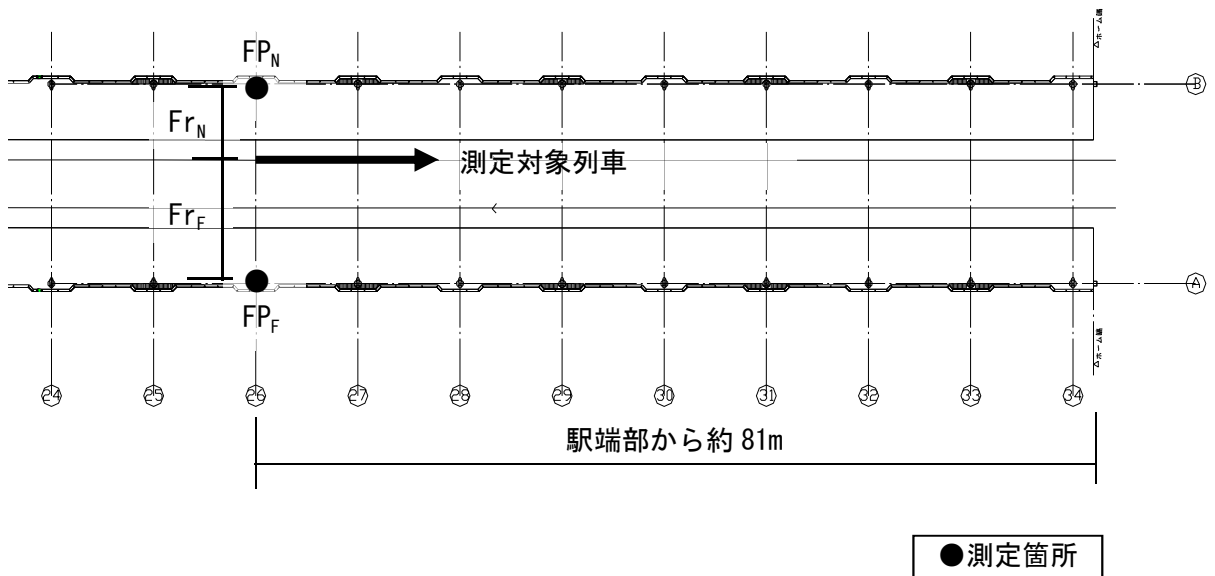


図 2-20 一次元成分と三次元成分分離時の F 駅測定位置図

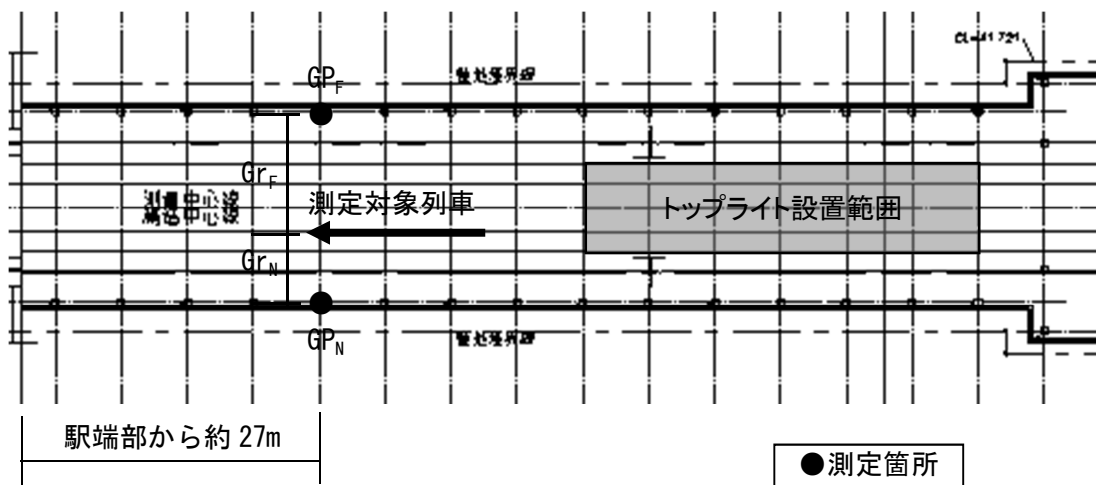


図 2-21 一次元成分と三次元成分分離時の G 駅測定位置図

2. 2. 4 測定結果の分析

各駅について式(2-3)、式(2-4)を用いて、一次元成分と三次元成分との分離を試みた。図 2-22～2-26 に近接側と遠隔側の圧力変動の時刻歴波形を示す（付属資料 1 に圧力変動の全時刻歴波形を示す）。図より一次元成分は図 2-17 上図と、三次元成分は図 2-17 下図と波形が同様であり、式(2-3)、式(2-4)により全覆上家駅についても一次元成分と三次元成分とに分離できることを確認した。また、遠隔側については、圧力変動波形と一次元成分波形とはほぼ一致していることも分かる。一方、一次元成分は開口率が大きくなると先頭部通過時に負圧、後尾部通過時に正圧が発生している。文献 9)では、開口率が大きくなると明かり区間の三次元的な流れに近づくため、一次元流れを仮定した解析は誤差が増大すると考察している。そのため、実現象としては、開口率が大きくなると先頭部通過時に負圧、後尾部通過時に正圧も発生すると考えられる。

図 2-27 には開口率と圧力変動最大値に対する一次元成分最大値の比率の関係を示す。図より遠隔側の方が一次元成分の比率は大きいこと、近接側、遠隔側ともに開口率が大きくなるほど一次元成分の比率は小さくなること、同じ開口率で比較した場合、車種 B の方が一次元成分の比率は小さいことが確認できる。遠隔側の方で一次元成分の比率が大きい理由としては、遠隔側は列車中心からの距離が大きいため、近接側と比較して三次元的成分が小さくなることが考えられる。また、開口率が大きくなるほど一次元成分の比率が小さくなる理由としては、開口率の与える影響が、三次元成分よりも一次元成分の方が大きいためと考えられる。図 2-28 には開口率と圧力変動最大値発生時の一次元成分比率の関係を示す。図 2-27 と傾向としては大きく変わらないが、近接側の方で一次元成分の比率が若干下がっている。一方、遠隔側はほとんど変わらず、一次元成分の比率も 8 割を超えていることから、遠隔側では三次元成分の影響はほとんど無いことが確認できる。何れにしても、遠隔側の方が近接側よりも一次元成分の比率が大きくなるものの、近接側においても圧力変動最大値を評価する上で、一次元成分が支配的であることが分かる。

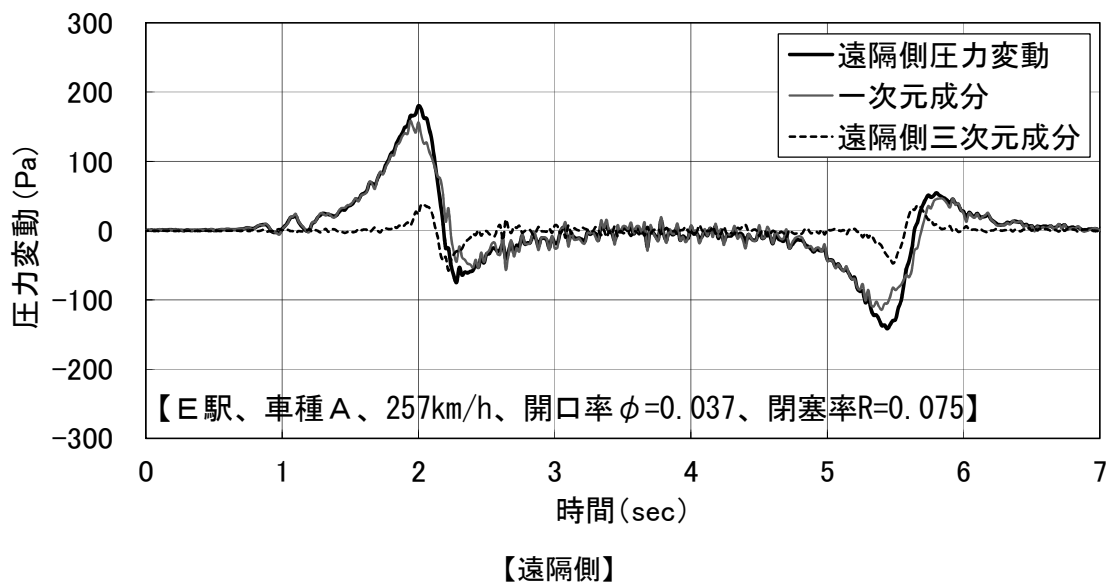
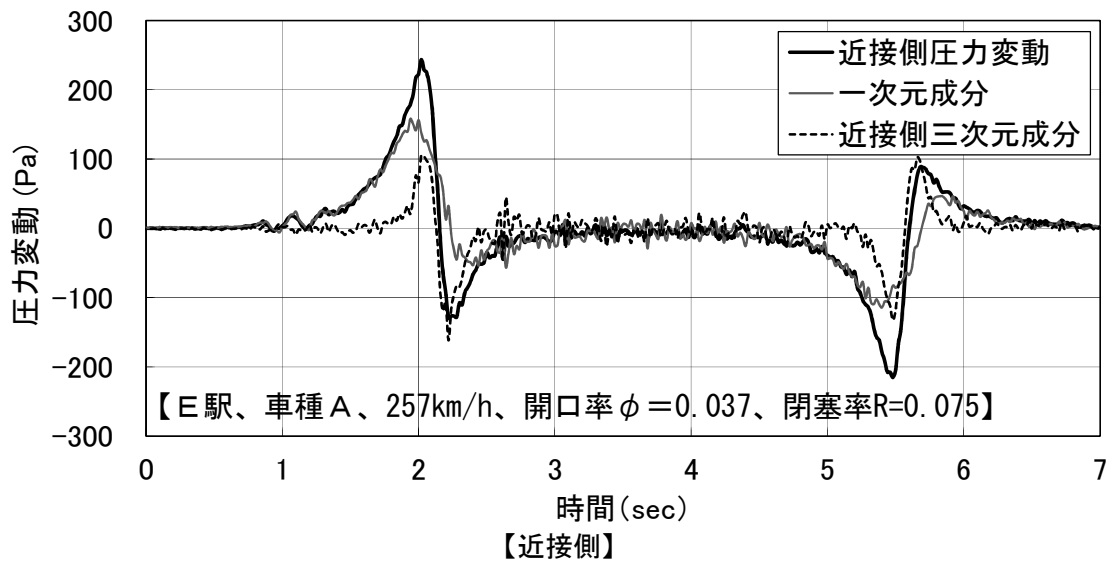
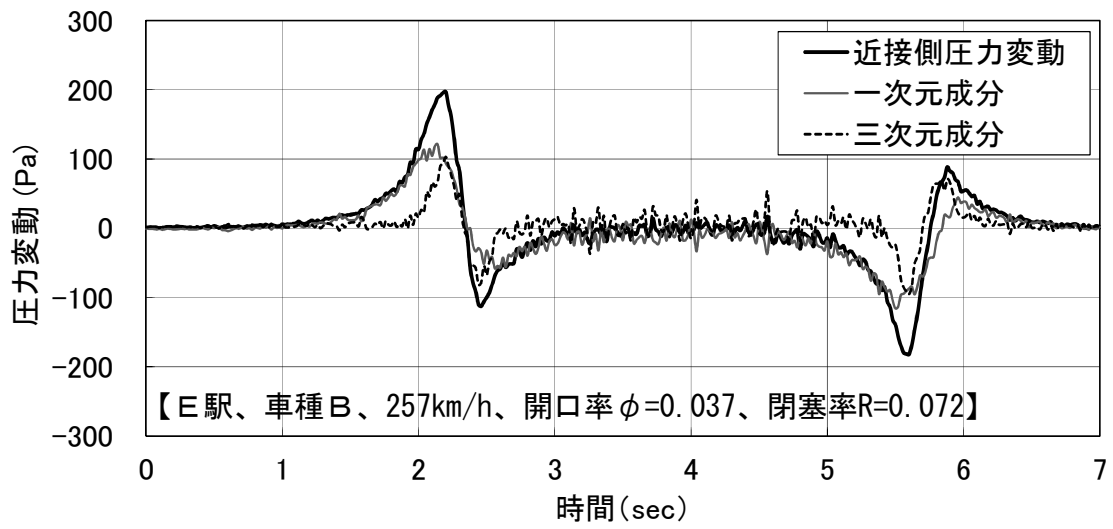
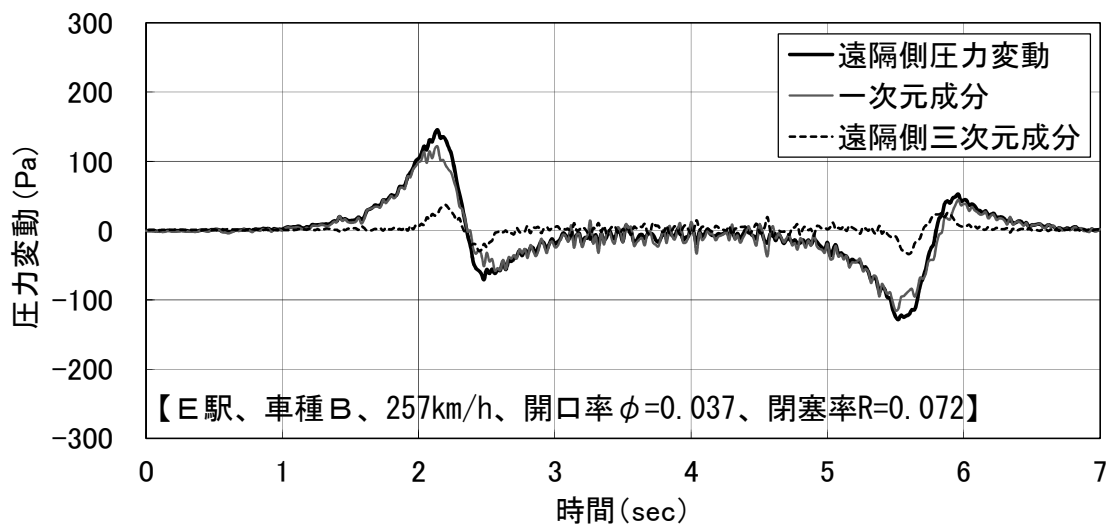


図 2-22 E 駅一次元成分、三次元成分、圧力変動波形 (車種 A)



【近接側】



【遠隔側】

図 2-23 E 駅一次元成分、三次元成分、压力變動波形（車種 B）

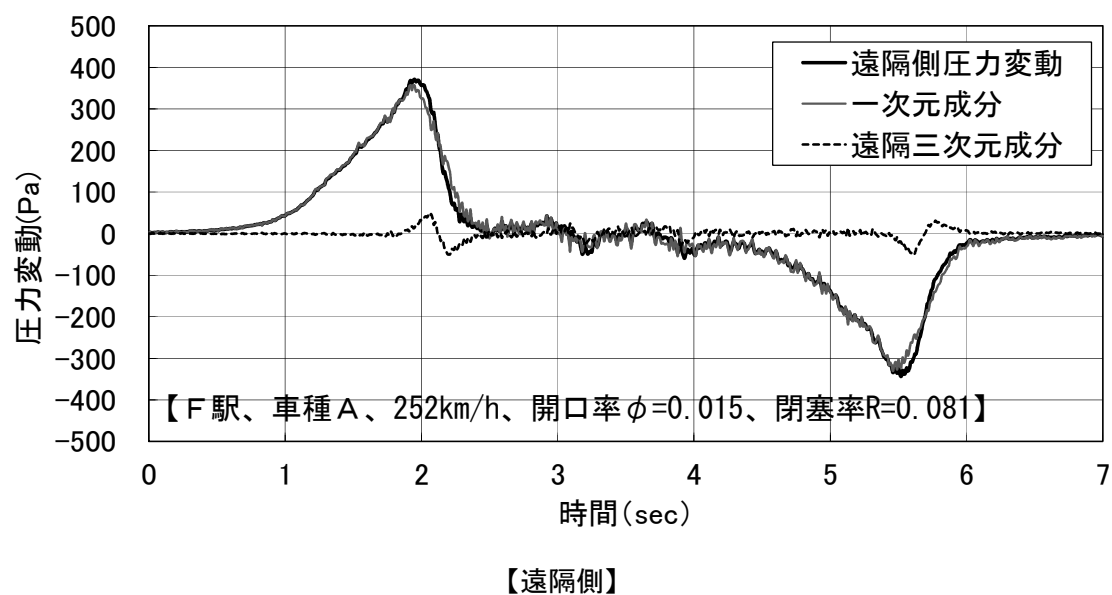
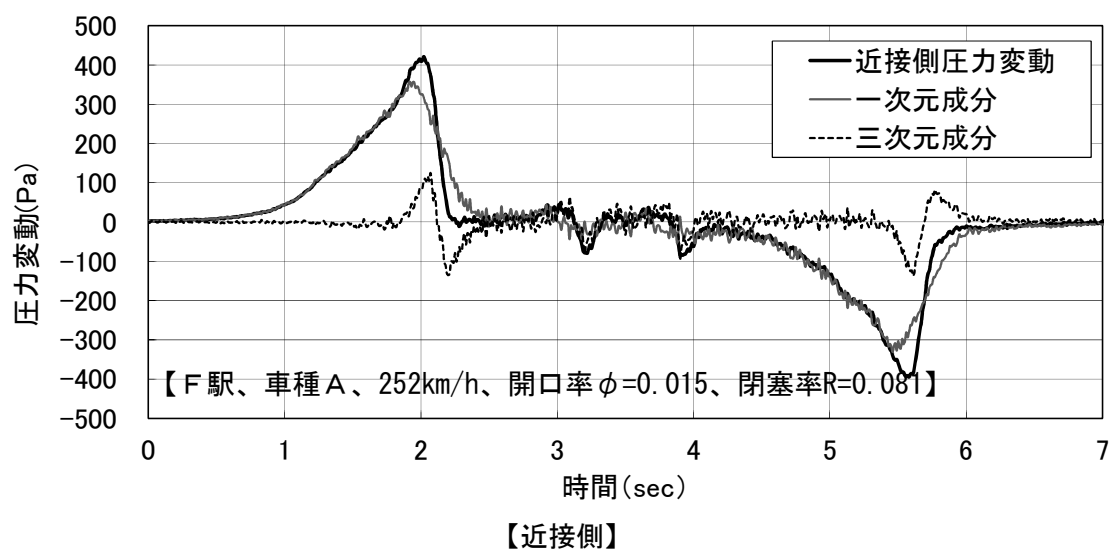
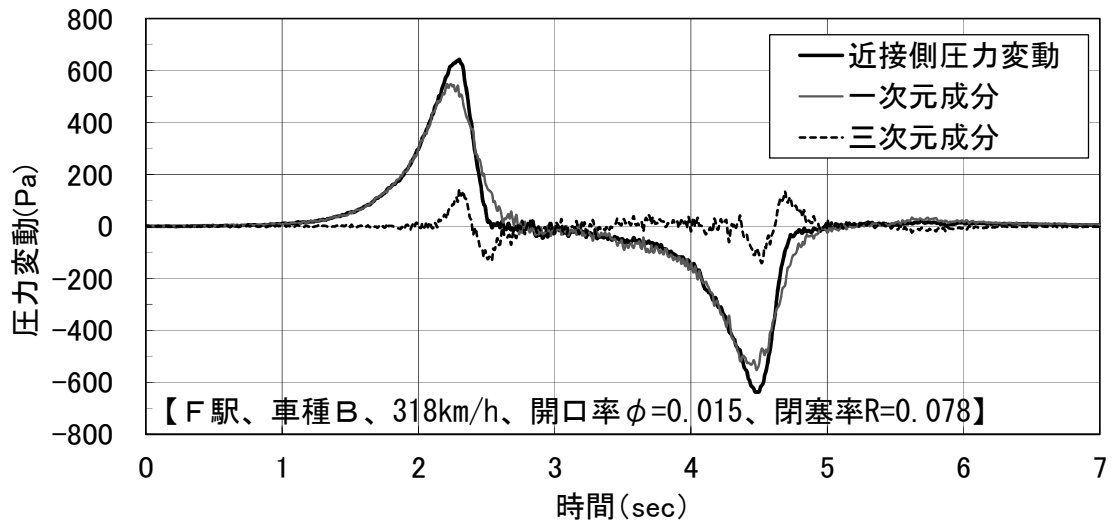
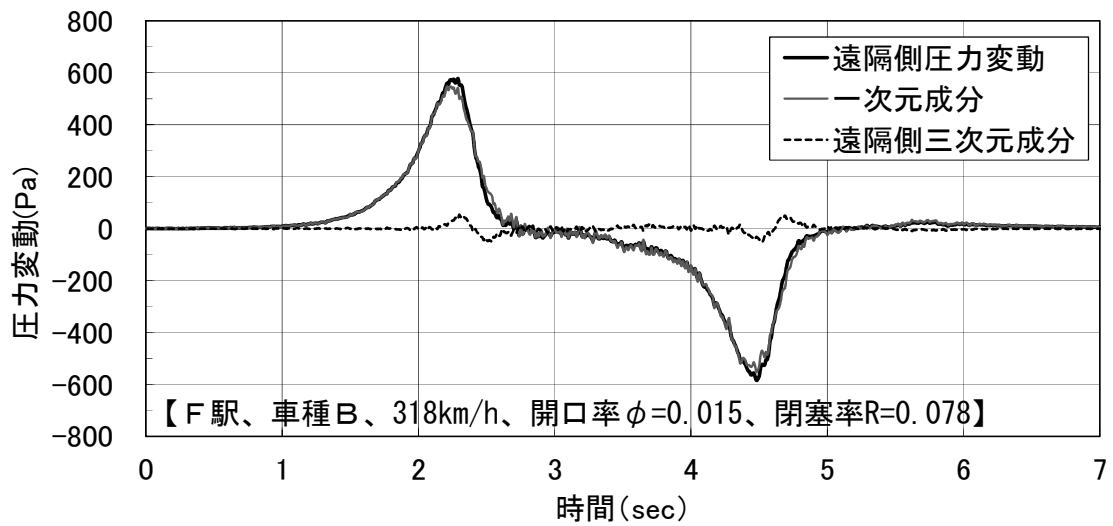


図 2-24 F 駅一次元成分、三次元成分、压力變動波形（車種 A）

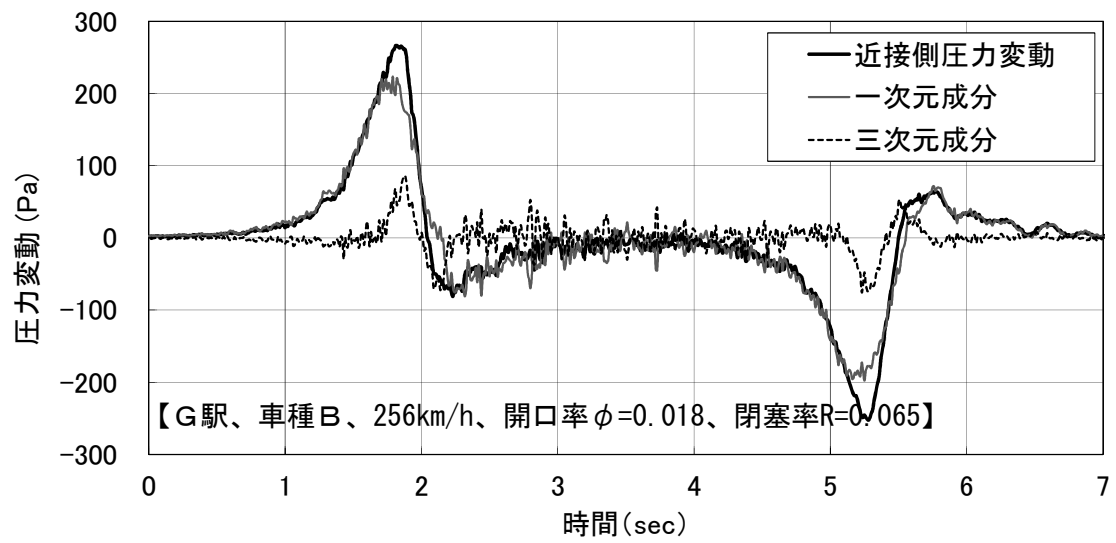


【近接側】

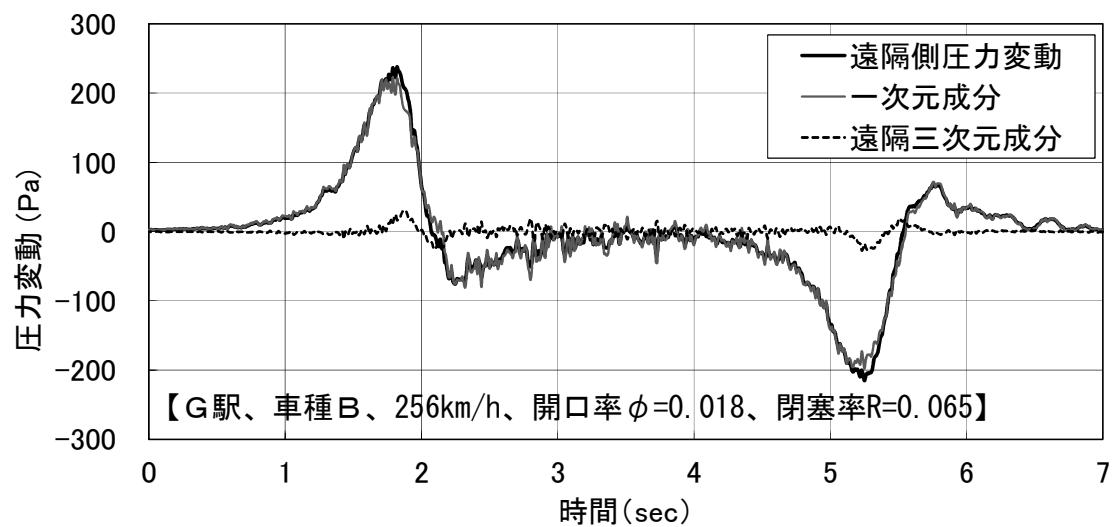


【遠隔側】

図 2-25 F 駅一次元成分、三次元成分、圧力変動波形 (車種 B)



【近接側】



【遠隔側】

図 2-26 G 駅一次元成分、三次元成分、压力變動波形 (車種 B)

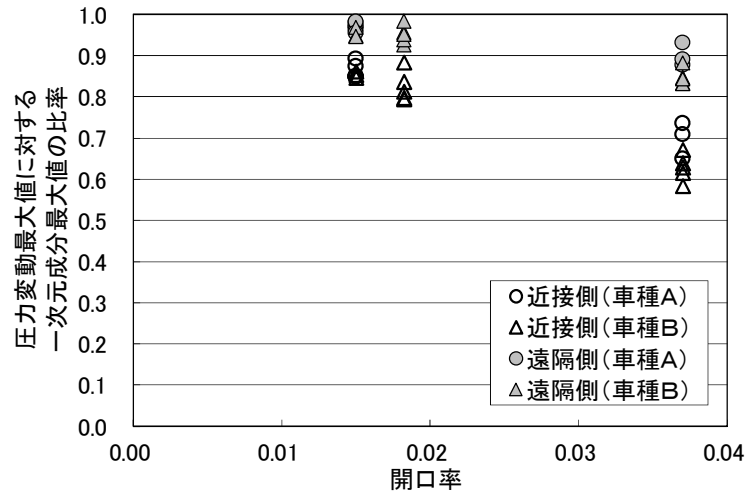


図 2-27 開口率と圧力変動最大値に対する一次元成分最大値の比率との関係

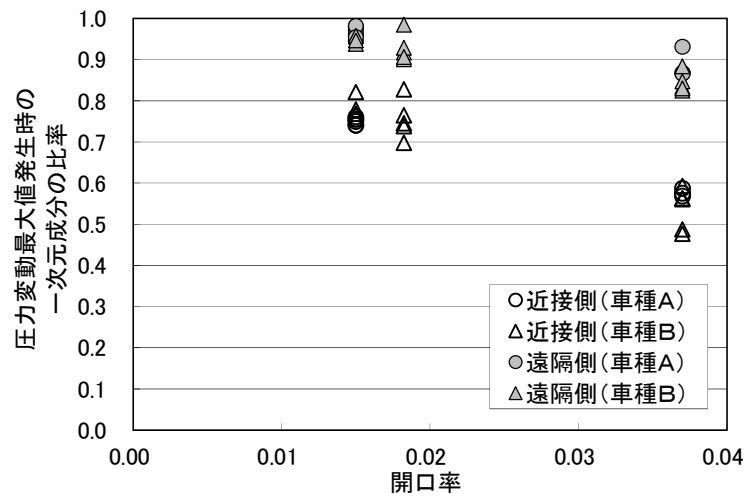


図 2-28 開口率と圧力変動最大値発生時の一次元成分比率との関係

2. 2. 5 圧力変動最大値の算出方針

全覆上家駅の圧力変動は一次元成分と三次元成分とに分離でき、それぞれについて評価式を構築することができれば、圧力変動評価が可能となる。ただし、**図 2-29** に示すように圧力変動と一次元成分および三次元成分でピークの発生時刻がずれており、圧力変動最大値を算出する際には、時刻歴で評価する必要がある。そこで、圧力変動最大値を一次元成分と三次元成分の単純和で算出するために、式(2-5)で評価することとした。

$$P_{max} = P_{max_1} + P_{max_3} \quad \dots (2-5)$$

$$P_{max_1} = \alpha \cdot P_{1max} \quad \dots (2-6)$$

$$P_{max_3} = \beta \cdot P_{3max} \quad \dots (2-7)$$

P_{max} : 圧力変動最大値 (Pa)

P_{max_1} : 圧力変動最大値発生時の一次元成分 (Pa)

P_{max_3} : 圧力変動最大値発生時の三次元成分 (Pa)

P_{1max} : 一次元成分最大値 (Pa)

P_{3max} : 三次元成分最大値 (Pa)

α : 一次元成分補正係数 (圧力変動最大値発生時の一次元成分/一次元成分最大値 : **図 2-29** 参照)

β : 三次元成分補正係数 (圧力変動最大値発生時の三次元成分/三次元最大値 : **図 2-29** 参照)

なお、一次元成分と三次元成分でピークの発生時刻がずれている要因について、一様流れの中のわき出し³³⁾として扱い考察する。遠隔側圧力変動は三次元成分の影響がほとんど無く、一次元成分にほぼ等しいとみなせることから、一次元成分は列車中心軸から「遠隔側面」までの鉛直距離に対応する成分となる。一方、三次元成分は列車中心軸から「近接側面」までの鉛直距離に対応する成分となる。つまり、近接側については、一次元成分の方が、三次元成分よりもわき出しから遠い圧力分布に対応する。わき出しからの鉛直距離が大きいほど、圧力分布の空間幅は大きくなることから³³⁾、一次元成分の最大ピークの方が、三次元成分のピークよりも列車先頭部から線路方向に離れた位置に存在し、時間的にピークの時期が早くなると考えられる。つまり、三次元成分は列車中心からの距離に依存することも加味すると、 α および β は列車中心からの距離に依存することとなる。一方、圧力分布については列車速度には依存せず³³⁾、例えば、列車速度が遅くなった場合は、グラフが時間軸方向に引き伸ばされるだけで波形は変わらない。なお、車種や開口率の影響については次節で検証する。

以上より、一次元成分最大値、三次元成分最大値、 α および β について、それぞれ評価

式を構築し、その際、特に α および β について、列車中心からの距離や車種、開口率の影響が確認できれば、全覆上家駅の圧力変動最大値は単純和で算出することが可能となる。

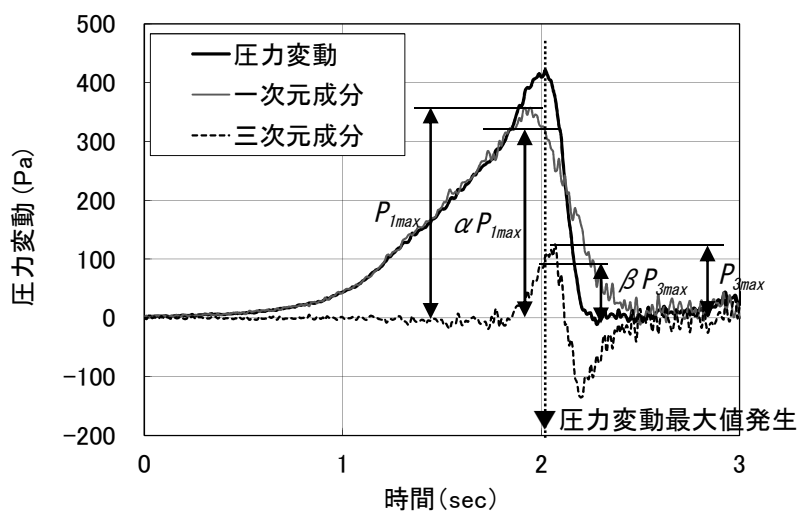


図 2-29 圧力変動最大値、一次元成分最大値、三次元成分最大値の関係

2. 3 圧力変動の評価

2. 3. 1 はじめに

本節では、前節で得られた一次元成分最大値、三次元成分最大値、 α および β について、評価式を構築し、圧力変動最大値の評価式を提案し、適用性について検証した。

2. 3. 2 一次元成分の評価

一次元成分は、列車中心からの距離に依存せず、閉塞率と開口率に依存する⁹⁾。また、一次元成分最大値は閉塞率を R とすると $R(2-R)$ に比例すること⁹⁾、実測結果から特定の駅においては開口率と圧力係数最大値とは線形関係が確認されていることから、開口率と一次元成分の圧力係数最大値/ $(R(2-R))$ の関係を把握した。なお、圧力係数は式(2-1)から算出しており、両者の関係を図2-30に示す。全データおよび各駅の車種別平均値をそれぞれプロットしており、図中の回帰直線は平均値から算出している。図より車両種別に関わらず、実測結果同様に、開口率と一次元成分の圧力係数最大値/ $(R(2-R))$ とは線形関係が確認できる。なお、開口率0.18のG駅において、他の駅よりも回帰直線から若干離れているが、これは駅端部からの距離が小さく、その影響で圧力変動が若干低減したことが一因として考えられる。一次元成分の圧力係数最大値は式(2-8)で表すことができる。

$$C_{p1max} = (-18.1\varphi + 1.01) \cdot R(2 - R) \quad \dots (2-8)$$

C_{p1max} : 一次元成分の圧力係数最大値

φ : 開口率

R : 閉塞率

図2-31には一次元成分の圧力係数最大値について、実測値(式(2-4)による算出値)と式(2-8)による計算値との比較を示す。図より1割程度の誤差で評価できることが確認できる。

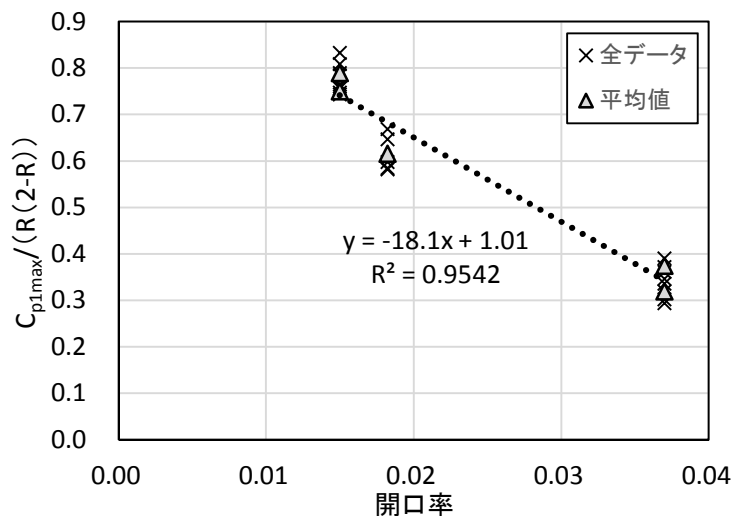


図2-30 開口率と一次元成分圧力係数最大値/ $(R(2-R))$ の関係

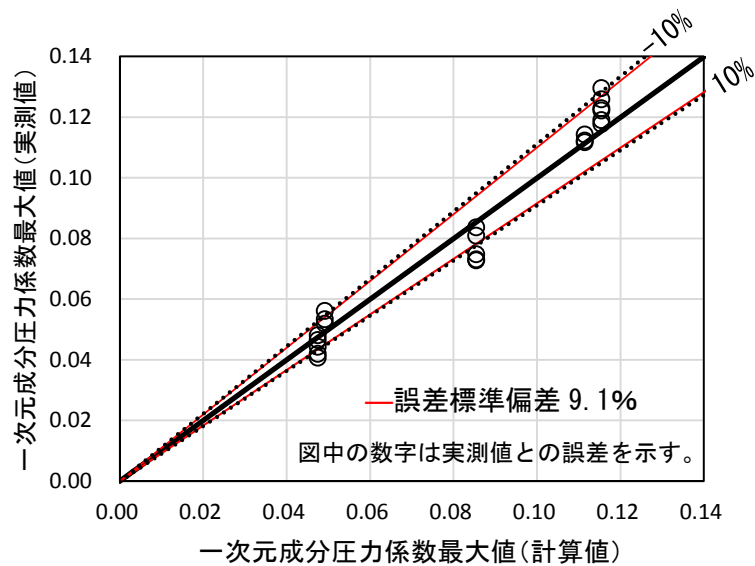


図 2-31 一次元成分圧力係数最大値の計算値と実測値の比較

続いて、一次元成分補正係数 α を評価した。文献 9) の一次元定常流解析では、開口率は先頭部通過時の正圧領域の大きさに影響を与えることが確認されており、 α は開口率の影響を受けると想定されることから、開口率と α の関係を把握することとした。また、 α は「2.2.5 圧力変動最大値の算出方針」記載の通り、列車中心からの距離に依存することから、近接側と遠隔側それぞれについて開口率と α の関係を把握した。近接側における開口率と α の関係を図 2-32、遠隔側における開口率と α の関係を図 2-33 に示す。図には全データおよび各駅の車種別平均値をそれぞれプロットしており、図中の直線は平均値の平均である。図より α には開口率や車種の影響は見られず、ほぼ一定値を示すことが分かる。また、遠隔側では α はほぼ 1.0 であり、圧力変動が最大値となる時間と一次元成分が最大となる時間がほぼ一致することが分かる。以上より、圧力変動最大値発生時の一次元成分圧力係数は式(2-9)で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 C_{pmax_1} &= \alpha \cdot C_{p1max} \\
 &= \alpha \cdot (-18.1\varphi + 1.01) \cdot R(2 - R) \quad \dots (2-9)
 \end{aligned}$$

C_{pmax_1} : 圧力変動最大値発生時の一次元成分圧力係数
 α : 一次元成分補正係数 (近接側=0.88、遠隔側=0.99)

圧力変動最大値発生時の一次元成分圧力係数について、図 2-34 には近接側、図 2-35 には遠隔側における実測値 (式(2-4)による算出値) と式(2-9)による計算値との比較を示す。図より 1 割程度の誤差で評価できることが確認できる。

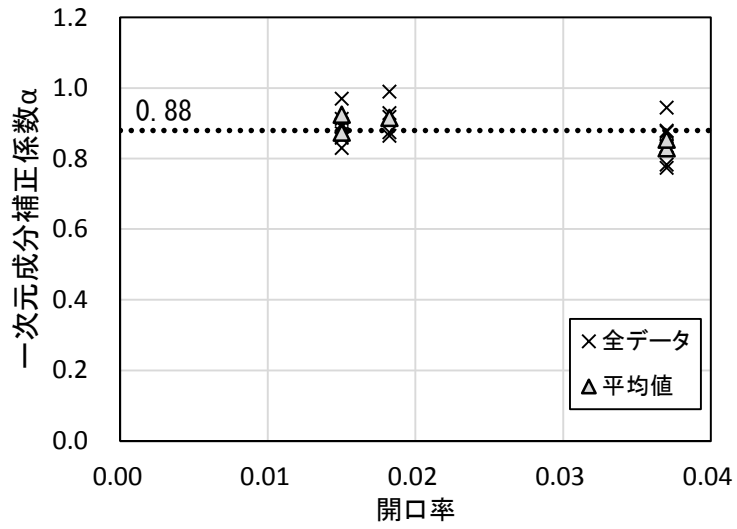


図 2-32 近接側における開口率と一次元成分補正係数 α との関係

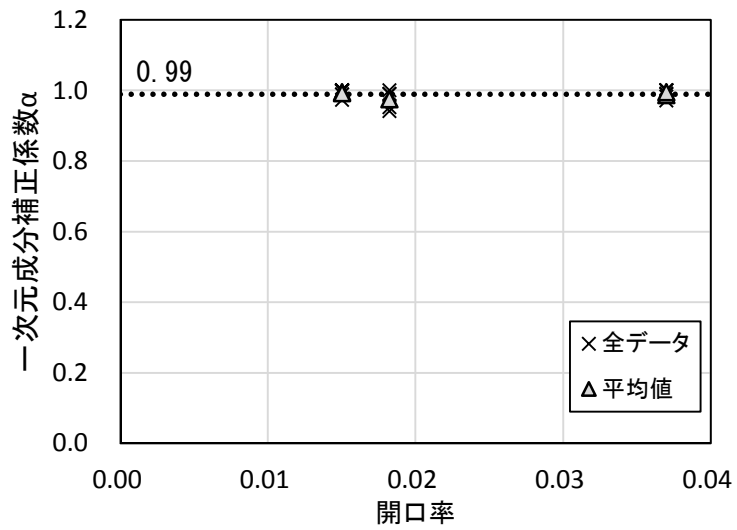


図 2-33 遠隔側における開口率と一次元成分補正係数 α との関係

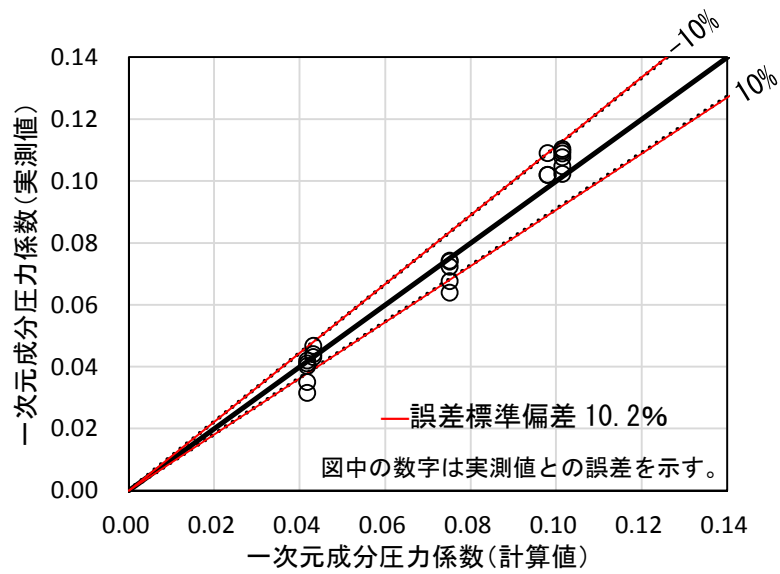


図 2-34 近接側における圧力変動最大値発生時の一次元成分圧力係数の計算値と実測値の比較

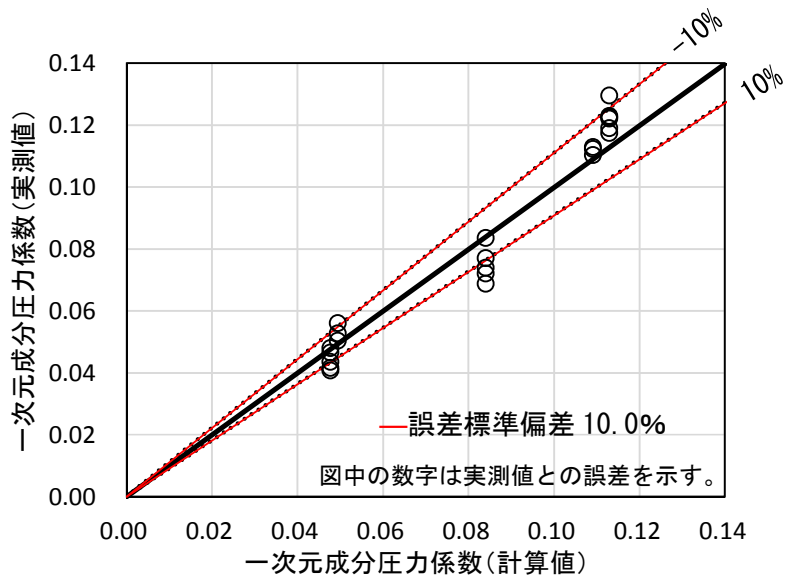


図 2-35 遠隔側における圧力変動最大値発生時の一次元成分圧力係数の計算値と実測値の比較

2. 3. 3 三次元成分の評価

三次元成分は、列車中心からの距離 r と列車先頭部形状に依存する⁹⁾。文献⁹⁾では三次元成分について開口部の影響を無視しているが、本研究では開口率と三次元成分の圧力係数最大値 $\times r^2$ の関係を把握した。両者の関係について、車種Aについて図 2-36、車種Bについては図 2-37 に示す。全データおよび駅ごとの平均値をそれぞれプロットしており、図中の直線は平均値の平均である。車両Aは2駅分のデータしか無いが、3駅分のデータを有する車両Bについては開口率の影響が見られなかったことから、車両Aも開口率の影響が無いと判断した。全体的に先頭長さが長い車種Bの方が圧力係数最大値は小さいことが確認できる。開口率に影響しないのは、三次元成分は列車中心から壁面までの距離に大きく依存すること、開口部が上部に設置されていることなどが一因として考えられる。つまり、三次元成分の圧力係数最大値は式(2-10)で表すことができる。

$$C_{p3max} = \frac{k}{r^2} \quad \dots (2-10)$$

C_{p3max} : 三次元成分の圧力係数最大値

k : 車両種別による係数 (車両A=1.74、車両B=1.38)

r : 列車中心から壁面までの距離をm単位で表した無次元量

図 2-38 には近接側の三次元成分の圧力係数最大値について、実測値 (式(2-3)による算出値) と式(2-10)による計算値との比較を示す。図より2割程度の誤差で評価できることが確認できる。

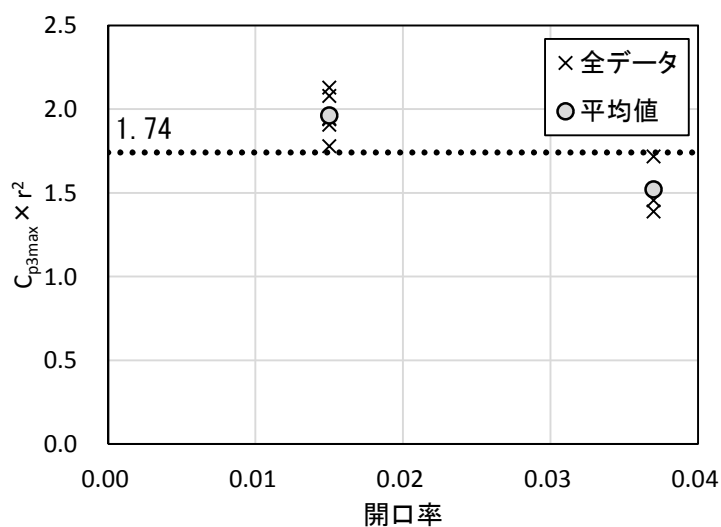


図 2-36 開口率と三次元成分圧力係数最大値 \times 距離²の関係 (車種A)

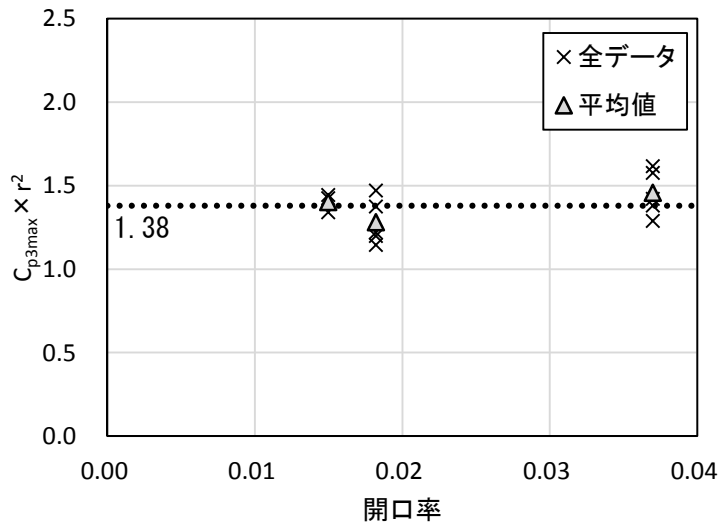


図 2-37 開口率と三次元成分圧力係数最大値×距離²の関係（車種B）

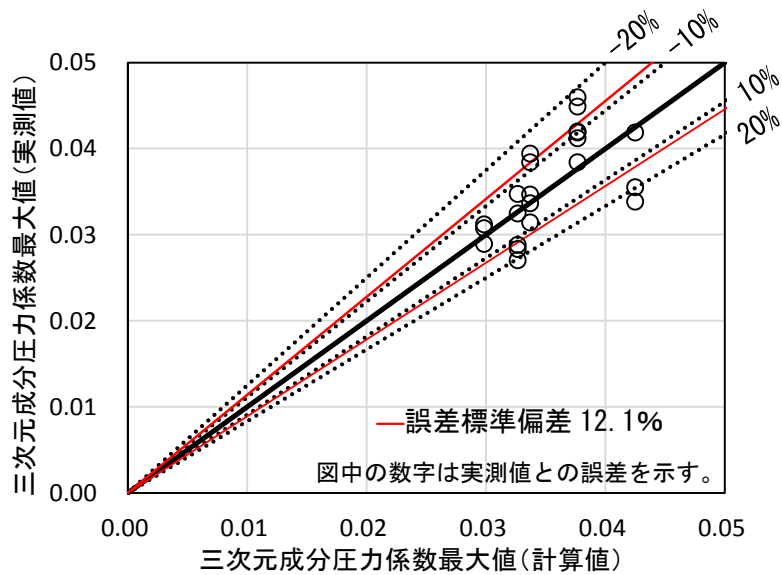


図 2-38 近接側の三次元成分圧力係数最大値の計算値と実測値の比較

続いて、三次元成分補正係数 β を評価した。 α 同様に開口率と β の関係を近接側および遠隔側それぞれについて把握した。近接側の開口率と β の関係を図 2-39 に、遠隔側の開口率と β の関係を図 2-40 示す。図には全データおよび各駅の車種別平均値をそれぞれプロットしており、図中の直線は平均値の平均である。なお、遠隔側については、一部 β が小さな値となったが、安全側に評価するために、当該データを除いた平均とした。図より β には開口率や車種の影響は見られず、ほぼ一定値を示すことが分かる。つまり、圧力変動最大値発生時の三次元成分圧力係数は式(2-11)で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 C_{pmax_3} &= \beta \cdot C_{p3max} \\
 &= \beta \cdot \frac{k}{r^2} \qquad \dots (2-11)
 \end{aligned}$$

C_{pmax_3} : 圧力変動最大値発生時の三次元成分圧力係数
 β : 三次元成分補正係数 (近接側=0.88、遠隔側=0.58)

圧力変動最大値における三次元成分圧力係数について、図 2-41 には近接側、図 2-42 には遠隔側における実測値 (式(2-3)による算出値) と式(2-11)による計算値との比較を示す。図より近接側については2割程度の誤差で評価できることが確認できる。遠隔側は誤差が大きいが、安全側の評価であること、「2. 2. 4 測定結果の分析」で記載した通り、一次元成分が支配的であり、三次元成分の影響は小さいことから、実用上は問題ないと考えられる。

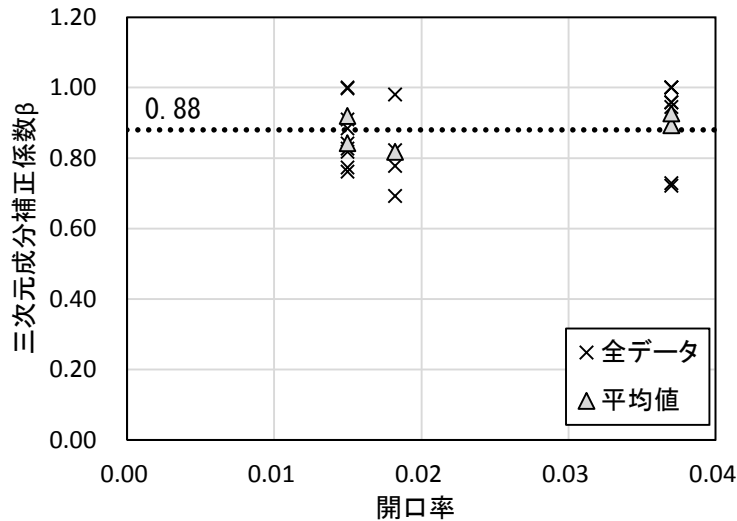


図 2-39 近接側における開口率と三次元成分補正係数 β との関係

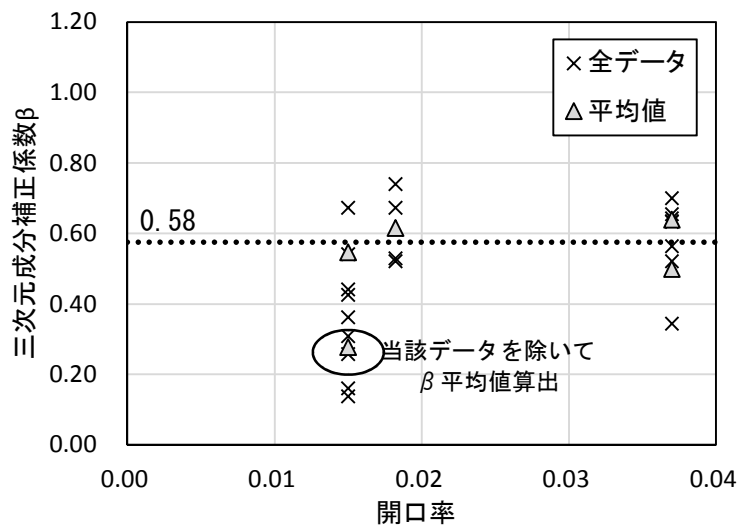


図 2-40 遠隔側における開口率と三次元成分補正係数 β との関係

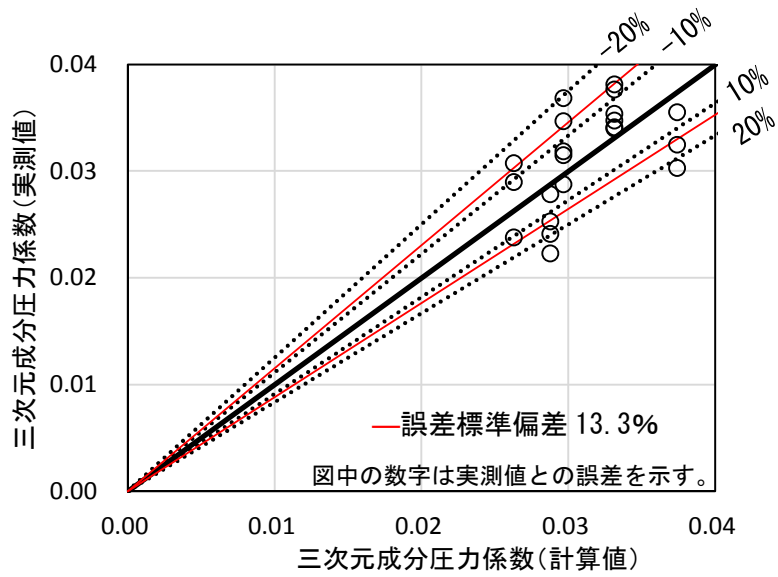


図 2-41 近接側における圧力変動最大値発生時の三次元成分圧力係数の計算値と実測値の比較

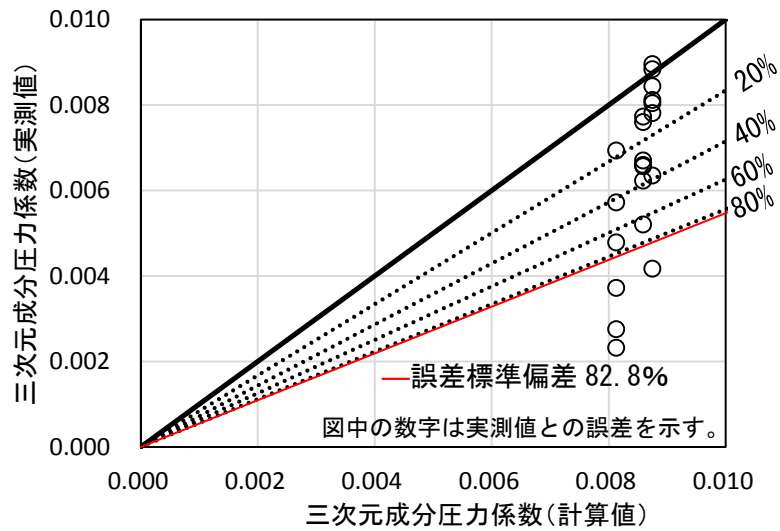


図 2-42 遠隔側における圧力変動最大値発生時の三次元成分圧力係数の計算値と実測値の比較

2. 3. 4 一次元成分および三次元成分の圧力分布比較

一次元成分の圧力係数最大値は $R(2-R)$ で除すことによって、同じ駅での測定データであれば、車種による違いが見られなかった。そこで、圧力分布についても比較した。横軸を距離（列車速度×時間）、縦軸を圧力係数 / $(R(2-R))$ として、E 駅における車種 A と車種 B の一次元成分の圧力分布を比較したものを図 2-43 に示す。図より両者は最大値だけではなく、圧力分布も同じであることが分かる。一方、図 2-44 には三次元成分の圧力分布を比較したものを示す。横軸は一次元成分同様に距離、縦軸は圧力係数としている。図より三次元成分については、両者は最大値だけではなく、ピークの位置が異なり、圧力分布も異なることが分かる。

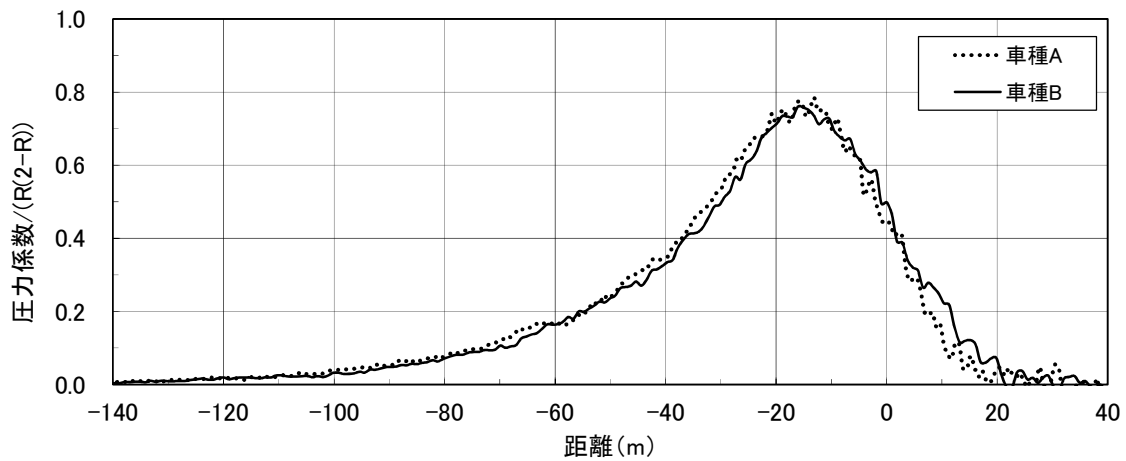


図 2-43 車種 A と車種 B との一次元成分圧力分布比較（E 駅）

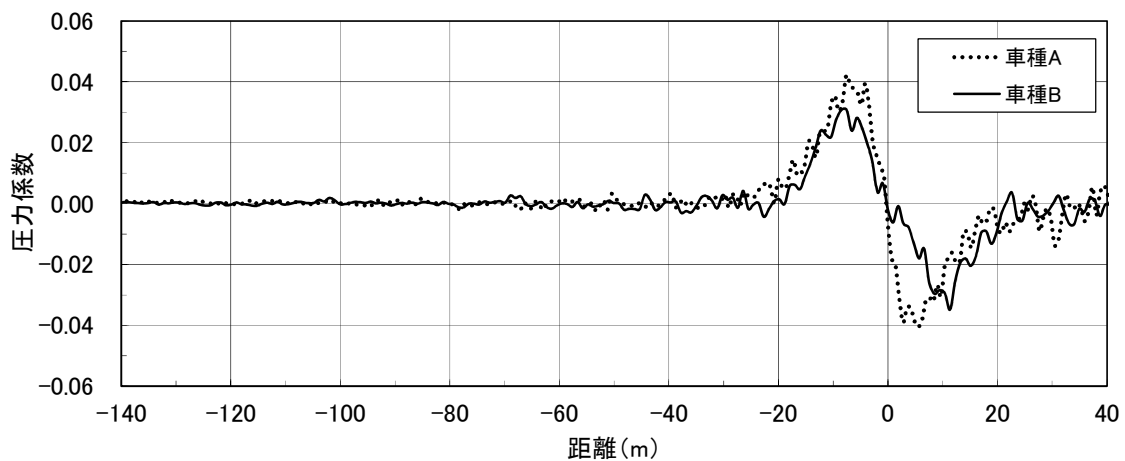


図 2-44 車種 A と車種 B との三次元成分圧力分布比較（E 駅）

また、**図 2-45**には車種A、**図 2-46**には車種Bについて、E 駅の一次元成分および三次元成分圧力分布と列車位置との関係を示す。圧力分布のピークについて、一次元成分は先頭部および後尾部の前方 20m 付近に、三次元成分は先頭部および後尾部の前方・後方 10m 付近にあることが確認できる。また、先頭部および後尾部において三次元成分は 0 となっており、既往の研究¹⁵⁾¹⁶⁾とも傾向が一致する。

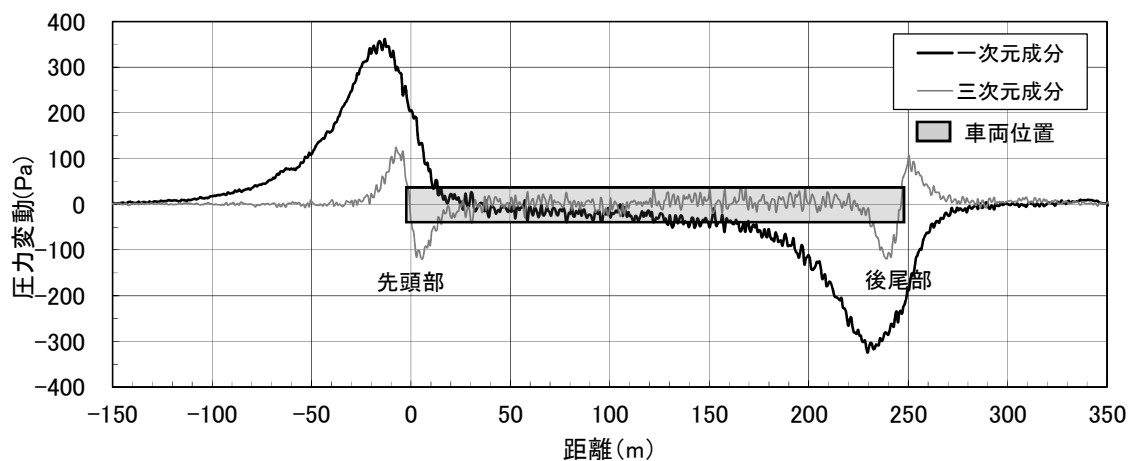


図 2-45 車種 A 圧力分布と列車位置の比較 (E 駅)

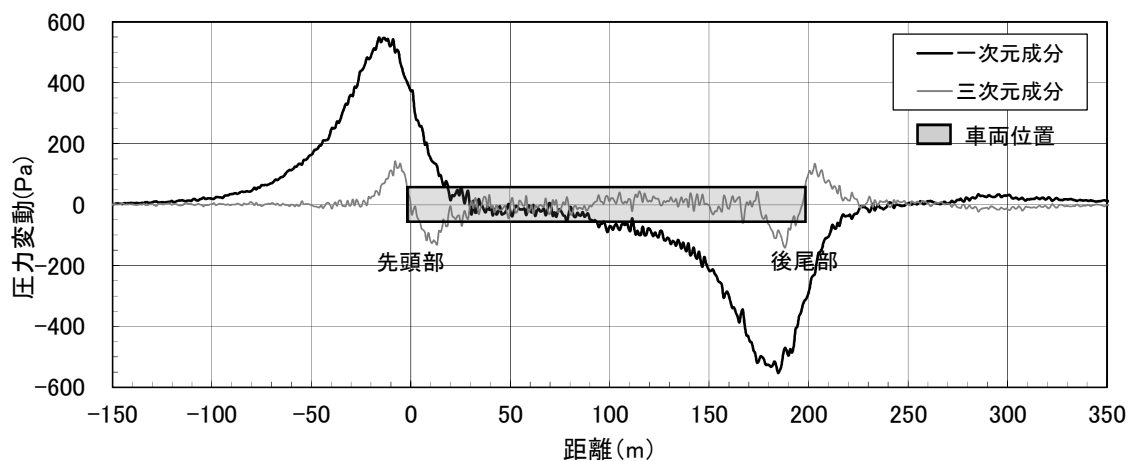


図 2-46 車種 B 圧力分布と列車位置の比較 (E 駅)

2. 3. 5 圧力変動最大値の評価

以上より、全覆上家駅の圧力変動最大値は、一次元成分と三次元成分の単純和である式(2-12)、式(2-13)で表すことができる。式(2-13)における左側の項が一次元成分であり、右側の項が三次元成分である。また、 α 、 ϕ 、 β 、 k を含む項は測定結果から算出したものであり、 R 、 r を含む項は数値解析の理論に基づくものである。なお、大断面駅における列車中心から壁面までの距離は、通常、小断面駅の遠隔側よりも大きくなる。列車中心から壁面までの距離が大きくなるほど一次元成分が支配的になるが、小断面駅の遠隔側 α はほぼ1に等しいことから、大断面駅の近接側・遠隔側ともに α 、 β は遠隔側を使用すれば問題ないと考えられる。

$$P_{max} = C_{pmax} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \dots (2-12)$$

$$C_{pmax} = \alpha \cdot (-18.1\phi + 1.01) \cdot R(2 - R) + \beta \cdot \frac{k}{r^2} \quad \dots (2-13)$$

P_{max} : 圧力変動最大値 (Pa)

C_{pmax} : 圧力係数最大値

ρ : 空気密度 (kg/m^3) ((2-2)式参照)

V : 列車速度 (m/s)

α : 一次元成分補正係数 (近接側=0.88、遠隔側=0.99) ※大断面駅は遠隔側を使用

β : 三次元成分補正係数 (近接側=0.88、遠隔側=0.58) ※大断面駅は遠隔側を使用

ϕ : 開口率

R : 閉塞率

k : 車両種別による係数 (車両A=1.74、車両B=1.38)

r : 列車中心から壁面までの距離をm単位で表した無次元量

図 2-47 には圧力変動最大値について、実測値と式(2-12)による計算値との比較を示す。車両種別による違いはみられず、図より 1 割程度の誤差で評価できることが確認できる。近接側の三次元成分は誤差が 2 割程度、遠隔側は更に誤差が大きかったが、前述の通り、一次元成分が支配的であることから、1 割程度の誤差で評価できたと考えられる。また、図 2-48 には実測値と一次元成分のみで評価した計算値の比較を示す。図より遠隔側は 1 割程度の誤差で評価できているが、近接側は 3 割程度の誤差となっており、特に開口率の大きい駅での誤差が大きく、遠隔側は三次元成分の影響は小さいが、近接側は三次元成分の影響は無視できないことが分かる。

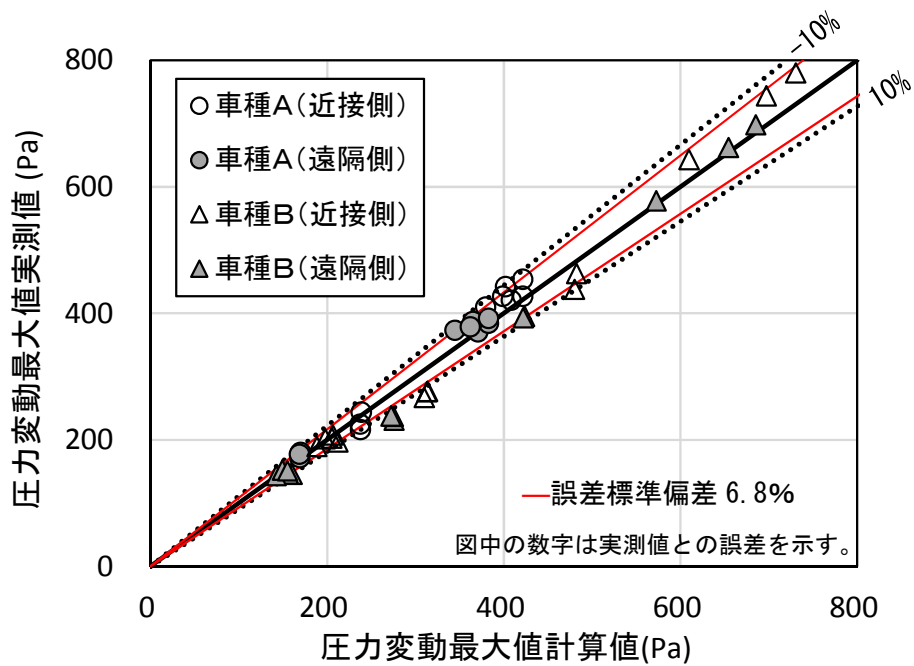


図 2-47 圧力変動最大値の計算値と実測値の比較

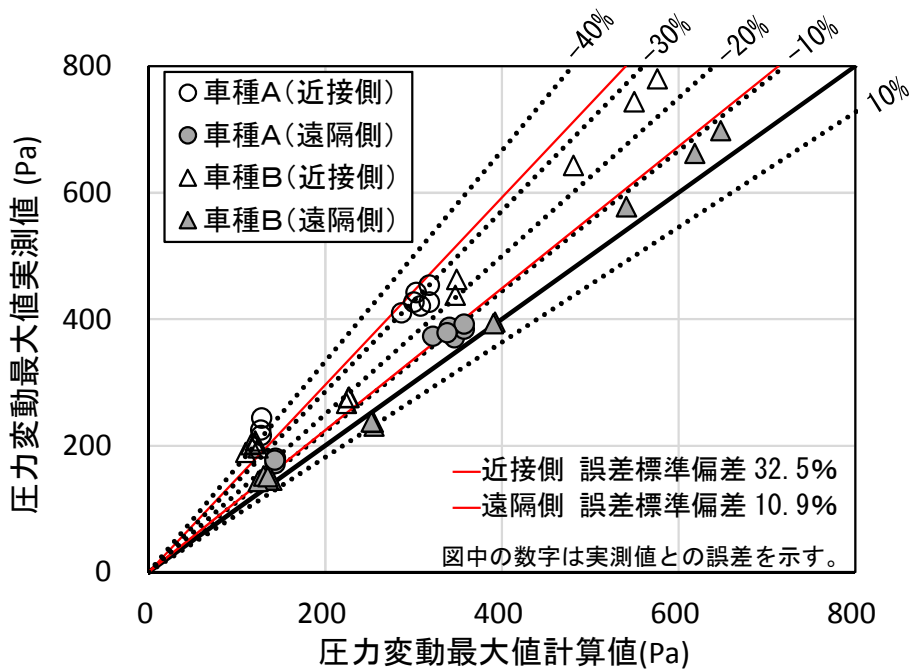


図 2-48 圧力変動最大値の一次元成分のみで評価した計算値と実測値の比較

今回、圧力変動最大値を評価する上で、表 2-4 に示す駅の実測結果から評価式を構築した。これらの駅は全て通過線の無い小断面駅であることから、その他の小断面駅および通過線を有する大断面駅での適用性についても検討した。それらの駅の概要を表 2-5 に示す。図 2-49 に小断面駅、図 2-50 に大断面駅の圧力変動最大値について、実測値と式(2-12)による計算値との比較を示す。大断面駅の α 、 β は前述の通り、遠隔側を使用した。図より小断面駅は表 2-4 に示す駅同様に 1 割程度、大断面駅は 2 割程度の誤差で評価できることが確認できる。大断面駅の方で誤差が大きくなった理由として、小断面駅は通過線が無いことからホーム柵が設置されているのに対し、大断面駅にはホーム柵が設置されておらず、小断面駅では遮蔽効果によって特に三次元成分の分布が大断面駅と異なること、駅舎断面形状が小断面積と比較して細長いことなどが一因として考えられる。なお、大断面駅では、一部で誤差が大きいデータもあるが、これらは何れも遠隔側、つまり、通過線から遠い側のホーム上での測定結果である。ただし、近接側、つまり、通過線に近い側のホーム上の方が圧力変動は大きく、何れの駅でも誤差は 2 割程度に納まっていることから、実用上は問題ないと考える。なお、非構造部材の留め具が主な対象となることから、2 割程度の誤差で圧力変動が算出できれば、コストへの影響として十分な精度であると考えられる。また、図 2-51 に小断面駅、図 2-52 に大断面駅の圧力変動最大値について、実測値と一次元成分のみで評価した計算値との比較を示す。小断面駅については、図 2-48 と同様に近接側での誤差が大きくなるが、大断面駅については三次元成分の影響が小さいことから、図 2-50 と大きく傾向が変わらない。

以上より式(2-12)の適用範囲は $\phi : 0.04 \sim 0.037$ 、 $R : 0.029 \sim 0.081$ 、 $r : 6.1 \sim 6.8\text{m}$ (近接側)、 $10.4 \sim 14.2\text{m}$ (遠隔側) と考えられる。なお、開口率に下限値があるのは、開口率が小さくなるとトンネル区間の波形となり、圧縮波や膨張波の影響を受けるためである。

表 2-5 各駅の概要、測定対象列車

駅	開口率 ϕ	r (m)	測定対象 列車※	閉塞率 R	測定列車 本数(本)	列車速度 (km/h)
A	0.008	13.1	車種A	0.046	1	271
	0.016				1	272
	0.021				1	273
	0.025				1	272
	0.015	13.1 17.4	車種B	0.044	5 5	274~319 274~319
B	0.010	6.1	車種A	0.076	3	270~272
		10.4			4	271~273
C	0.004	13.1	車種A	0.031	4	269~273
			車種B	0.029	1	271
D	0.011	6.1	車種A	0.076	4	272~274
		10.4			7	272~273
H	0.007	14.2	車種A	0.043	3	220~229
		18.5			3	220~229

※先頭部長さ: 車種A(9.1m) < 車種B(16m)

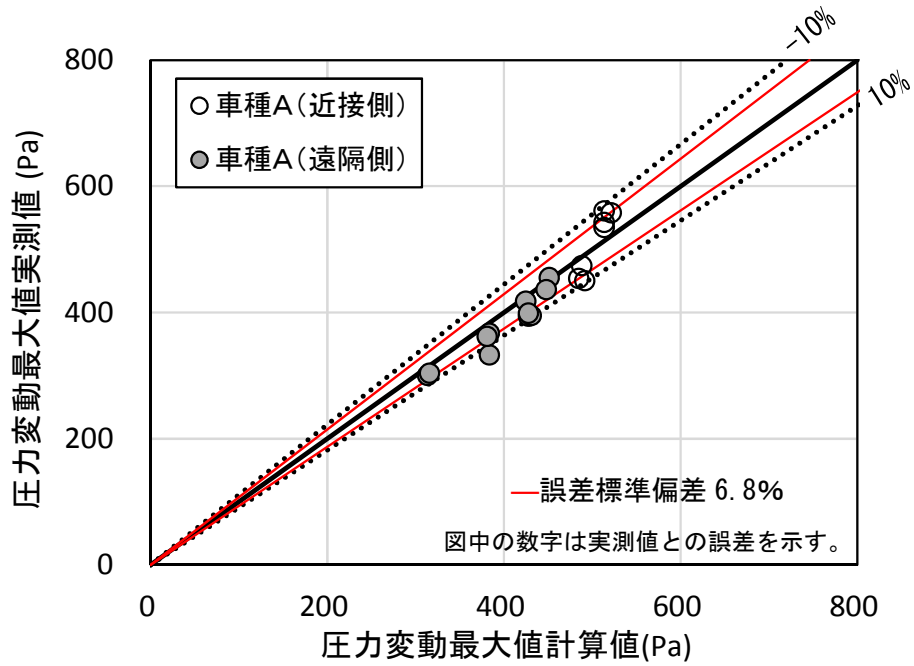


図 2-49 圧力変動最大値の計算値と実測値の比較（小断面駅）

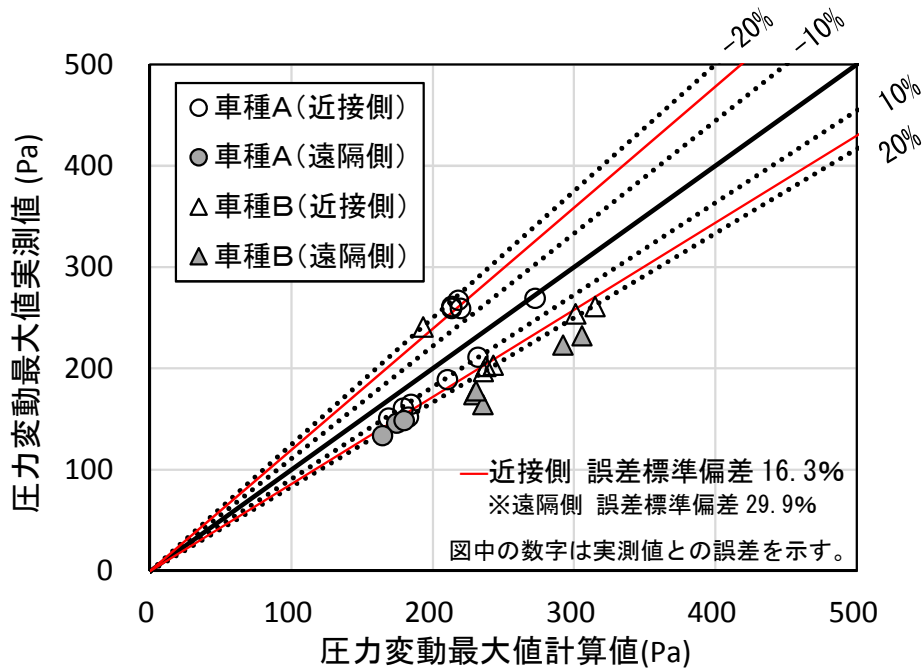


図 2-50 圧力変動最大値の計算値と実測値の比較（大断面駅）

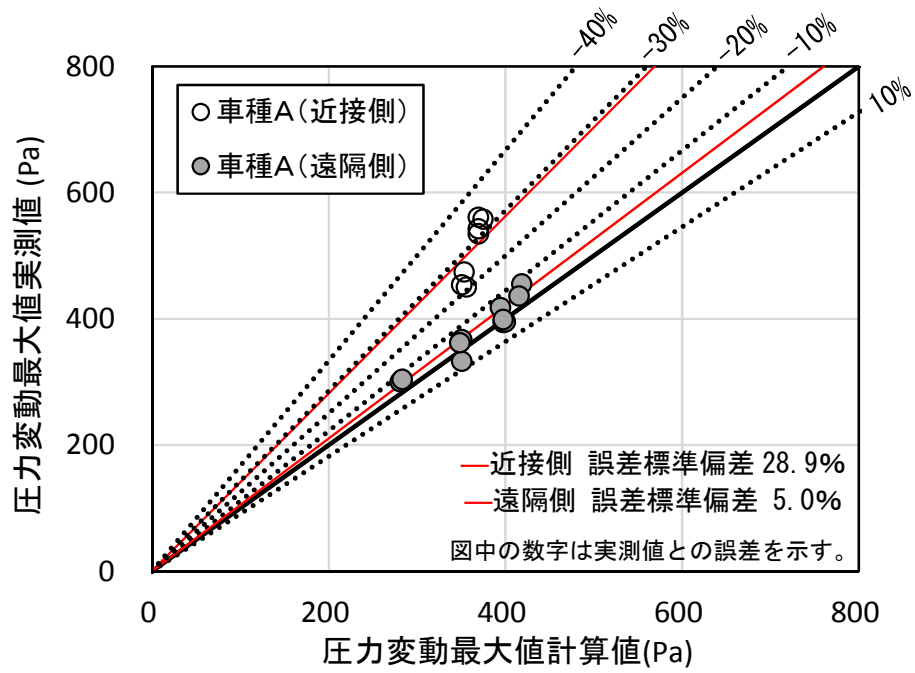


図 2-51 圧力変動最大値の一次元成分のみで評価した計算値と実測値の比較（小断面駅）

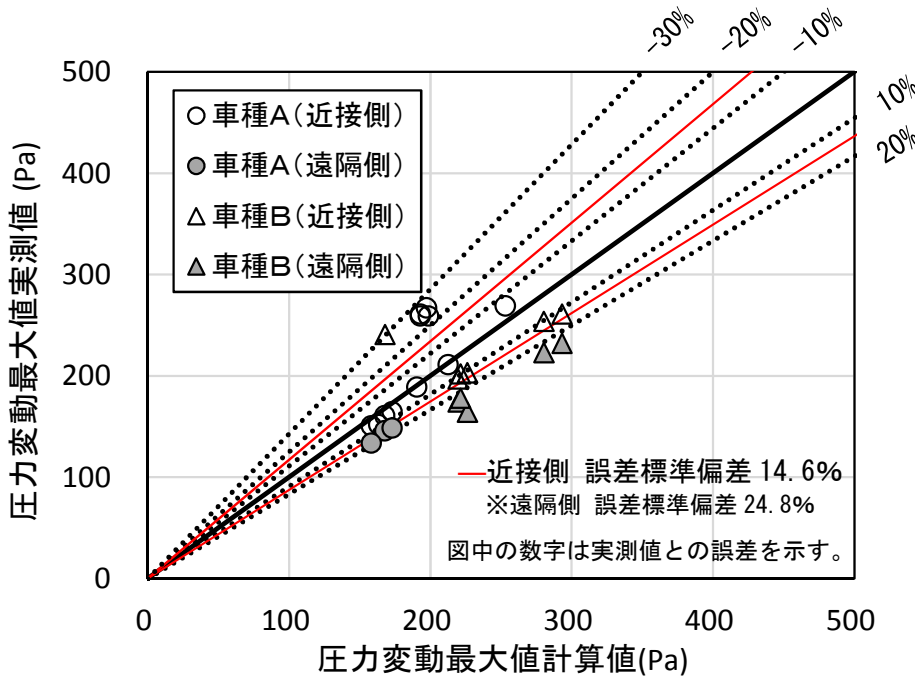


図 2-52 圧力変動最大値の一次元成分のみで評価した計算値と実測値の比較（大断面駅）

2. 4 まとめ

第2章では、全覆上家駅の圧力変動について、一次元成分と三次元成分とに分離して評価する方法について検討し、圧力変動最大値の評価式の提案を試みた。その結果、一次元成分と三次元成分の単純和からなる圧力変動最大値の評価式を構築し、小断面駅については1割程度、大断面駅では2割程度の誤差で評価できることを確認した。

第3章 階段・エスカレータで発生する列車風評価

3.1 階段部等の列車風の特徴

全覆上家駅を走行する列車の周りには、「2.1.4 圧力変動の波形の特徴」で示したように、ホーム上では先頭部通過時に正圧、後尾部通過時に負圧の圧力変動が発生する。そのため、列車通過時にホーム階とコンコース階では圧力差が生じ、階段部等で列車風が発生する。ホーム階が高架上にあり、その下にコンコース階がある駅（以下、「高架下駅」）における列車通過時の階段部等上下端での圧力変動と階段部等での列車風の発生状況を図3-1に示す。また、ホーム階（階段部等上端付近）およびコンコース階（階段部等下端付近）の圧力変動測定結果、両者の圧力差を図3-2、階段部等における列車風の測定結果を図3-3に示す。風速は熱線式風速計（日本カノマックス、6141）による測定であり、風向は測定していないが、吹流しによる目視観察では、一度目と二度目の列車風の風向は逆向きとなる。列車通過時には①～④のフェーズが存在し、各フェーズにおける圧力変動の大小関係により風速と風向が決定される。以下では、図3-1におけるエスカレータでの列車風発生メカニズムについて説明する。①では図3-2に示すようにホーム階で正圧の圧力変動が大きくなり、一部がコンコース階にも伝播されるが、ホーム階の圧力変動の方が大きいことからホーム階からコンコース階方向への列車風が発生する。②では図3-2に示すようにホーム階は先頭部通過後で圧力変動がほぼ0となるのに対して、コンコース階には、階段を介して正圧の圧力変動が伝播することから、ホーム階よりも圧力変動は大きくなるが、図3-3に示すように①と風向は同じであり、風速は低減する。③、④では図3-2に示すようにホーム階で発生する圧力変動が負圧となることから、風向が①、②と逆になる。

階段部等で発生する列車風を、一様な太さの管路の中の非定常流と仮定し、管路両端の圧力をホーム階とコンコース階の圧力として、1次元の運動方程式を管路全長に渡って空間積分することによって式(3-1)を導くことができる³⁴⁾。なお、式(3-1)では、圧力損失を考慮し、ホーム階とコンコース階の圧力は静圧とする。

$$\rho aL = (p_2 - p_1) - p_r \quad \dots (3-1)$$

ρ : 空気密度(N・sec²/m⁴)

a : 変動風の加速度(m/sec²)

L : 管路の長さ(m)

p_1 : ホーム階の圧力(Pa)

p_2 : コンコース階の圧力 (Pa)

p_r : 圧力損失(Pa)

ここで、管路全体の圧力損失 p_r として、摩擦損失、入口損失および出口損失を考慮すると式(3-2)で表すことができる³⁵⁾。

$$p_r = \frac{1}{2} \rho u^2 \left(\lambda \frac{L}{d} + \zeta + \xi \right) \quad \dots (3-2)$$

- u : 風速(m/sec)
- λ : 摩擦係数
- d : 管路の等価直径(m)
- ζ : 入口損失係数
- ξ : 出口損失係数

式(3-1)の左右の項を入替え整理すると式(3-3)で表すことができる。

$$a = \frac{(p_2 - p_1) - p_r}{\rho L} \quad \dots (3-3)$$

両辺を時間 τ で積分すると時刻 t における風速を式(3-4)で表すことができる。

$$u(t) = \frac{1}{\rho L} \int_0^t \{(p_2(\tau) - p_1(\tau)) - p_r(\tau)\} d\tau \quad \dots (3-4)$$

つまり、圧力損失の影響が無ければ、風速と圧力差積分値は比例することになる。図 3-2 に示す圧力差の積分値を算出したものの絶対値を図 3-4 に示す。図より図 3-3 の列車風測定結果とピークの発生時刻が概ね一致しており、波形も相似であることが確認できる。つまり、式(3-4)における積分値のピーク発生時刻は圧力差に起因し、圧力損失の影響は小さいと想定される。以上より、フェーズ①において、ホーム階の圧力変動がコンコース階の圧力変動よりも大きい間、風速は増大し続け、ホーム階の圧力変動とコンコース階の圧力変動が等しくなった時に風速は最大となる。一方、圧力変動の大きさが逆転するフェーズ②において、圧力差積分値は低減することから風速も低減するが、圧力差積分値の正負が逆転しない限り、風向は変わらないことが分かる。

以上より、階段部等の列車風は、ホーム階とコンコース階の圧力差に起因した、一様な太さの管路の中の非定常流と仮定できる。また、式(3-4)からは、階段部等の列車風を小さくする方法として、各階の圧力差の絶対値を小さくする方法、管路を長くする方法の二つが有効であることが分かる。圧力変動の絶対値を低減する方法としては、外壁に開口部を設ける方法^{36)~38)}があるが、雪、雨のホームへの吹込みや屋外への騒音を増大させずに開口部を設けることは難しい。さらに、ホーム階またはコンコース階の一方のみに開口部を設けた場合、圧力差が低減できるとは限らない。そこで本研究では、管路延伸による列車風

低減効果に着目し、図 3-5 に示すように管路構成部分が明確な高架下駅で実測を行い、圧力差積分値および管路長の影響を確認した。また、列車風の大きい橋上駅の階段部等に風対策シェルターを設置して管路を構成し、その効果や圧力損失の影響を確認するとともに、風対策シェルター設置後の列車風予測手法を検討した。

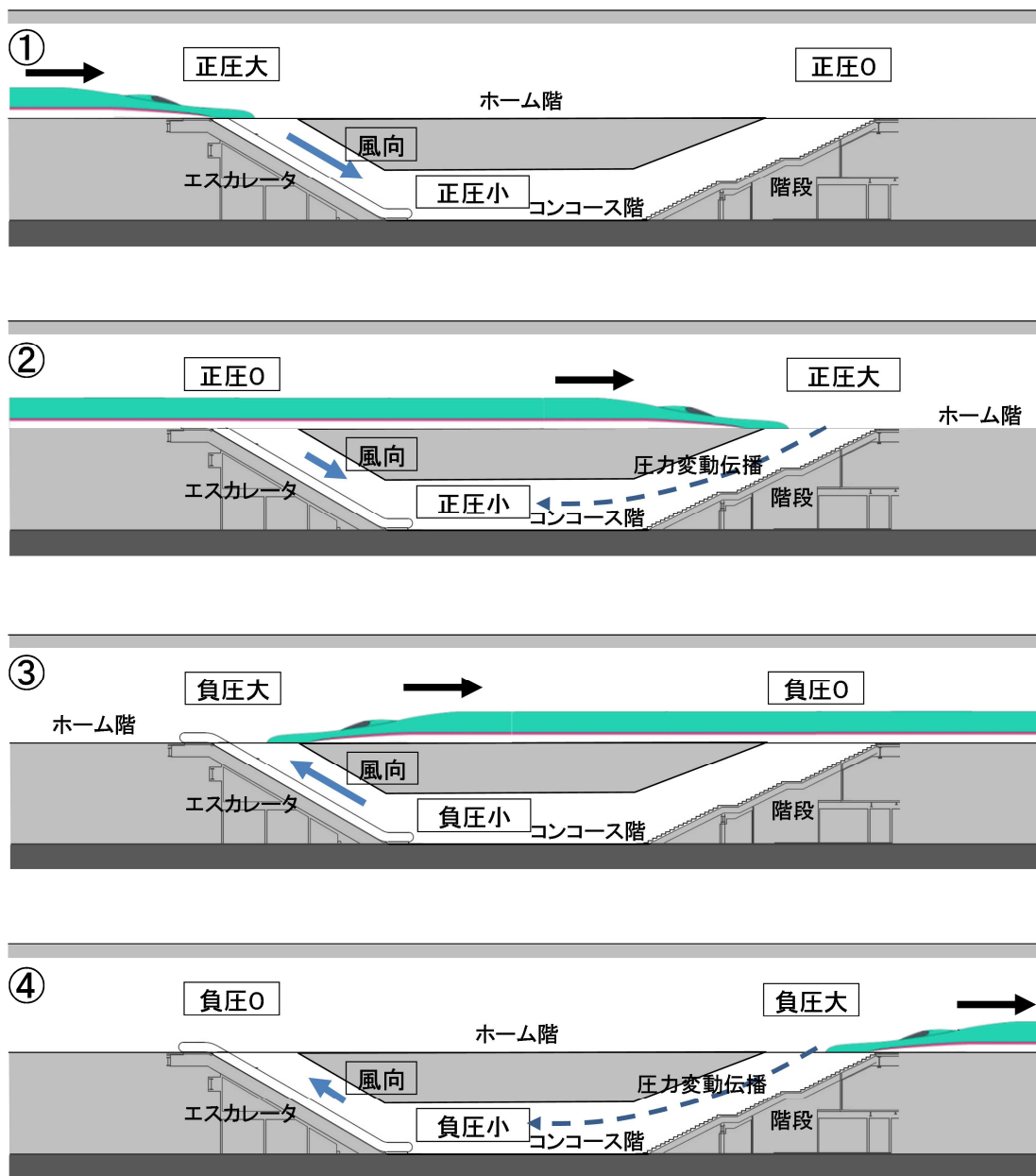


図 3-1 列車通過時の階段部等上下端圧力変動と階段部等列車風の発生状況模式図

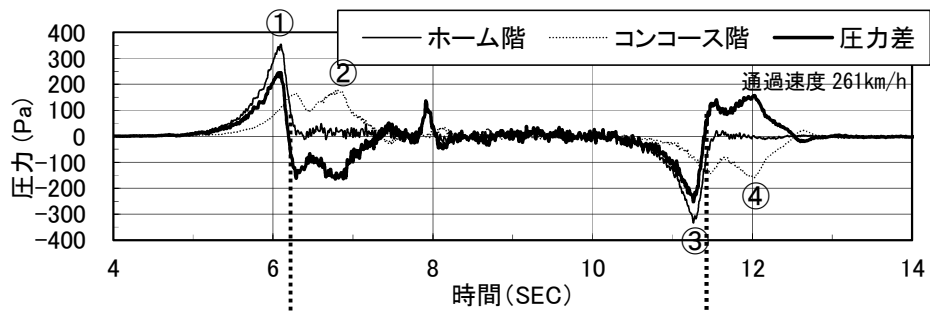


図 3-2 階段部等上下端圧力変動および圧力差

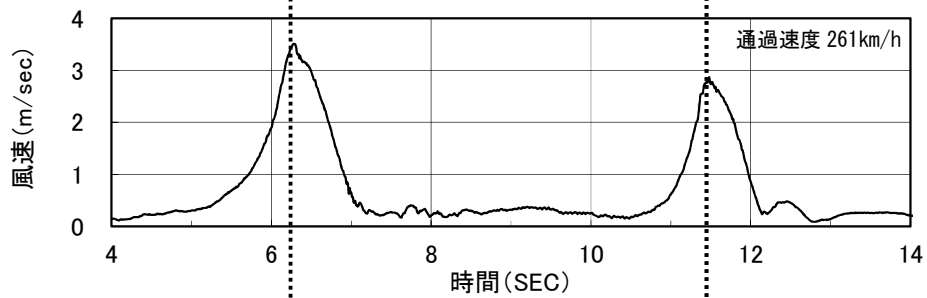


図 3-3 階段部等列車風

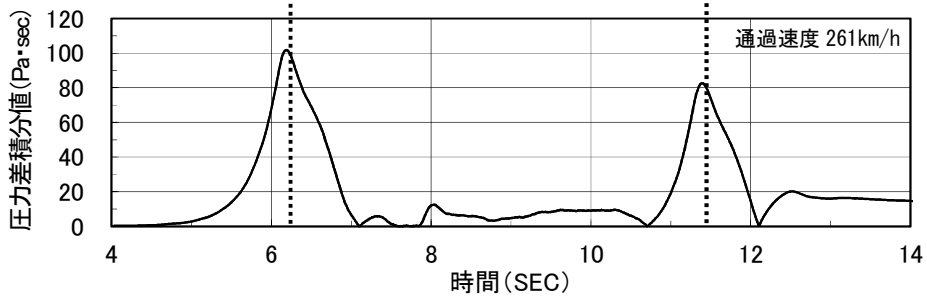


図 3-4 階段部等上下端圧力差積分値

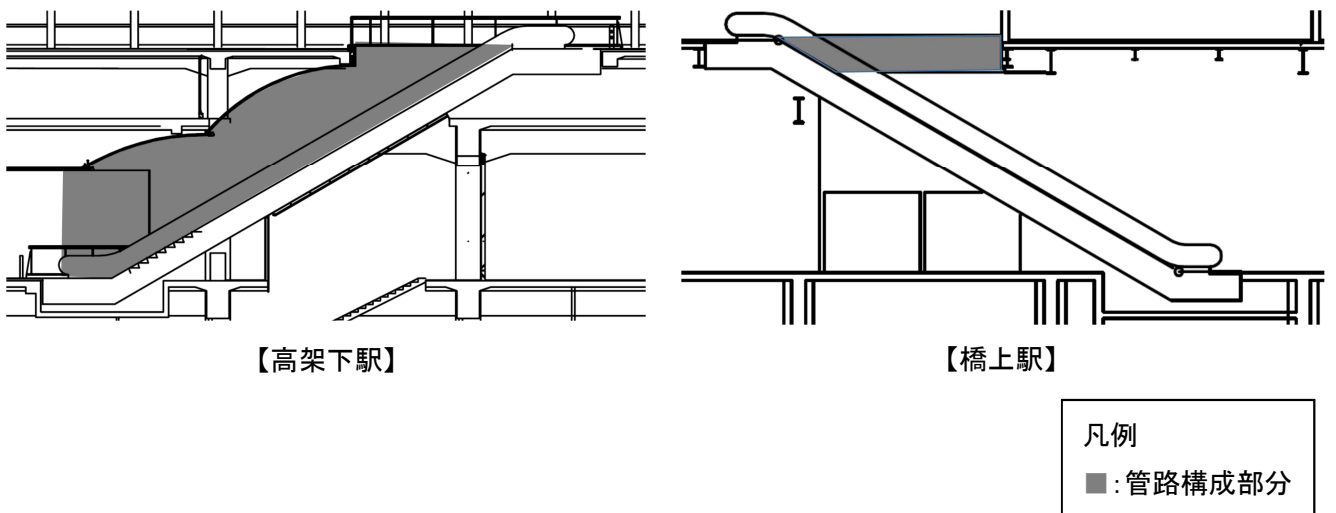


図 3-5 高架下駅および橋上駅の管路構成部分

3. 2 高架下駅における圧力差積分値および管路長さの階段部等列車風に与える影響

3. 2. 1 はじめに

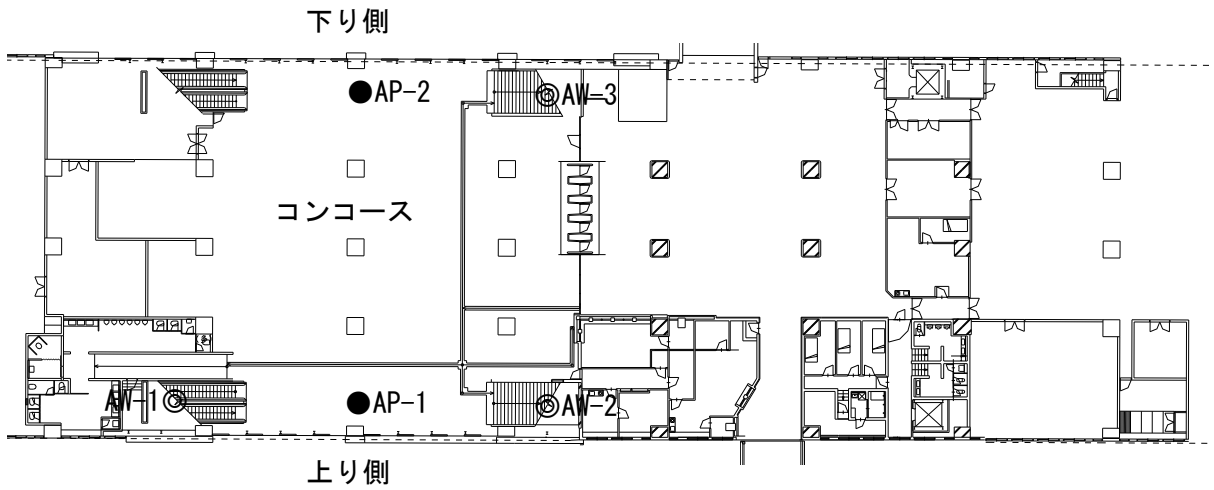
本節では、管路構成部分が明確な高架下駅の階段部等で圧力変動と風速の測定を行い、圧力差積分値や管路長さが階段部等列車風に与える影響を把握した。

3. 2. 2 測定方法

表 3-1 に各駅の概要および測定箇所、測定対象列車を示す。測定位置図を図 3-6~3-9 に示す。なお、管路長さは、図に示すように階段部等端部の開口部中心間距離とした。列車風は階段部等で断面が絞られる箇所を、圧力変動は圧力差を算出するため階段部等の上下端部をそれぞれ測定し、列車風が大きくなる、図 3-10 に示す階段部等と対向する通過列車を対象とした（図 3-6~3-9 では矢印方向の通過列車を対象）。列車風の測定は図 3-11 に示す熱線式風速計（日本カノマックス、6141）を使用し、階段では三脚に固定し、エスカレータではアングル材に取付け、手すり上部に固定した。圧力変動の測定は微差圧計（SSK、DP8-100）を使用し、静圧を対象とするため動圧の影響を受けないように床面に設置した。列車速度の測定にはスピードガンを使用し、空気密度を算出するために、気温と気圧も測定している。測定は圧力変動、列車風を同時にデータレコーダにより収録し、収録データをサンプリング周波数 100Hz で AD 変換した。

表 3-1 各駅の測定概要

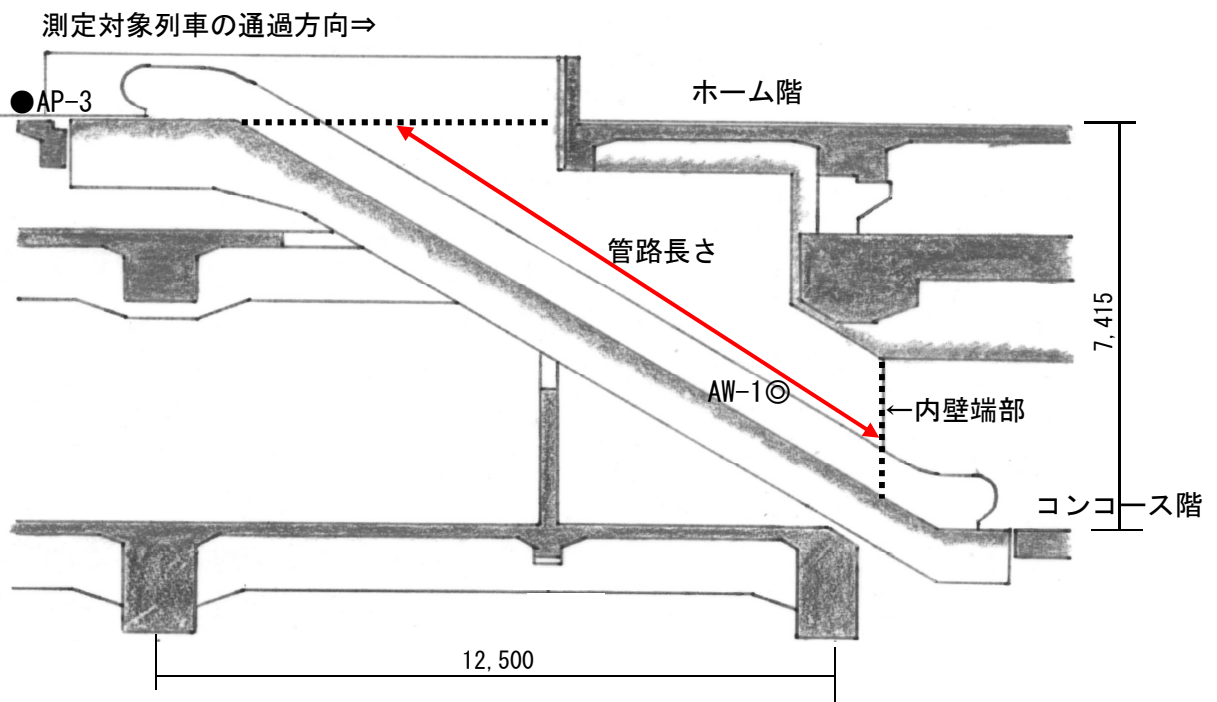
駅名	測定箇所	管路長さ (m)	測定対象列車	測定列車 本数(本)	通過速度 (km/h)
A	上りホームエスカレータ	10.6	下り通過列車	31	237~367
	上りホーム階段	10.3	上り通過列車	12	270~274
	下りホーム階段	9.9	上り通過列車	15	269~275
B	上りホームエスカレータ	13.4	上り通過列車	9	267~272
	上りホーム階段	11.9	下り通過列車	6	201~272
C	下りホームエスカレータ	11.7	上り通過列車	7	260~274
	下りホーム階段	21	下り通過列車	7	239~273
D	下りホームエスカレータ	17.2	上り通過列車	7	248~321
	下りホーム階段	14.3	下り通過列車	8	235~317



【平面図】

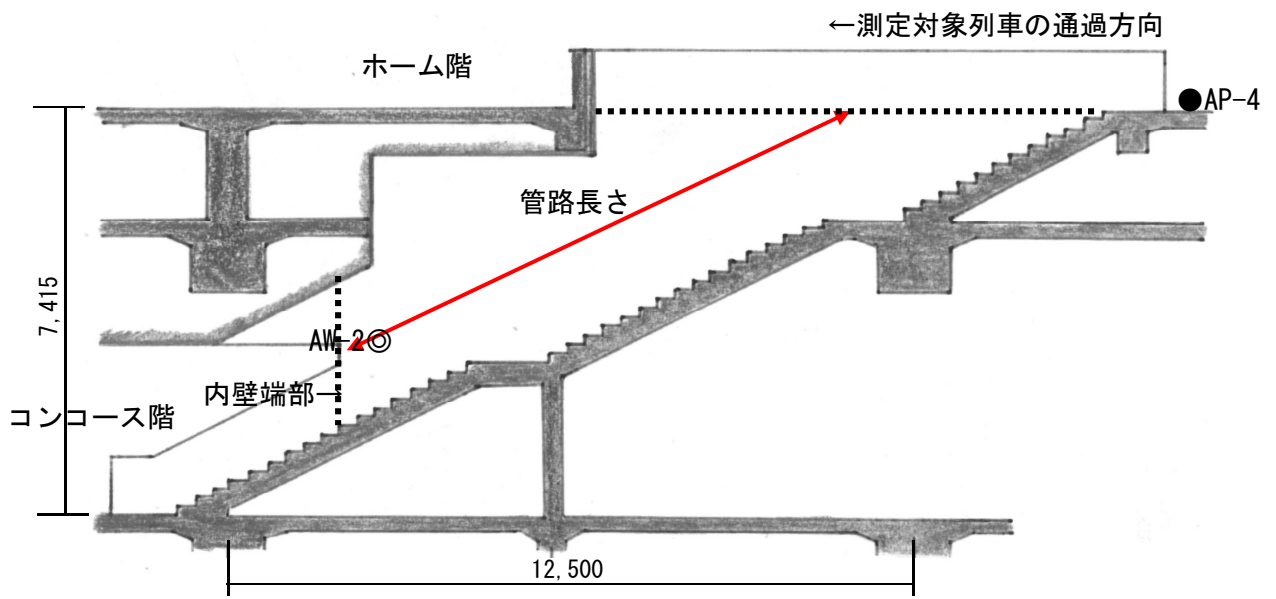
凡例

- 微差圧計
- ◎ 風速計



【上りホームエスカレータ断面図】

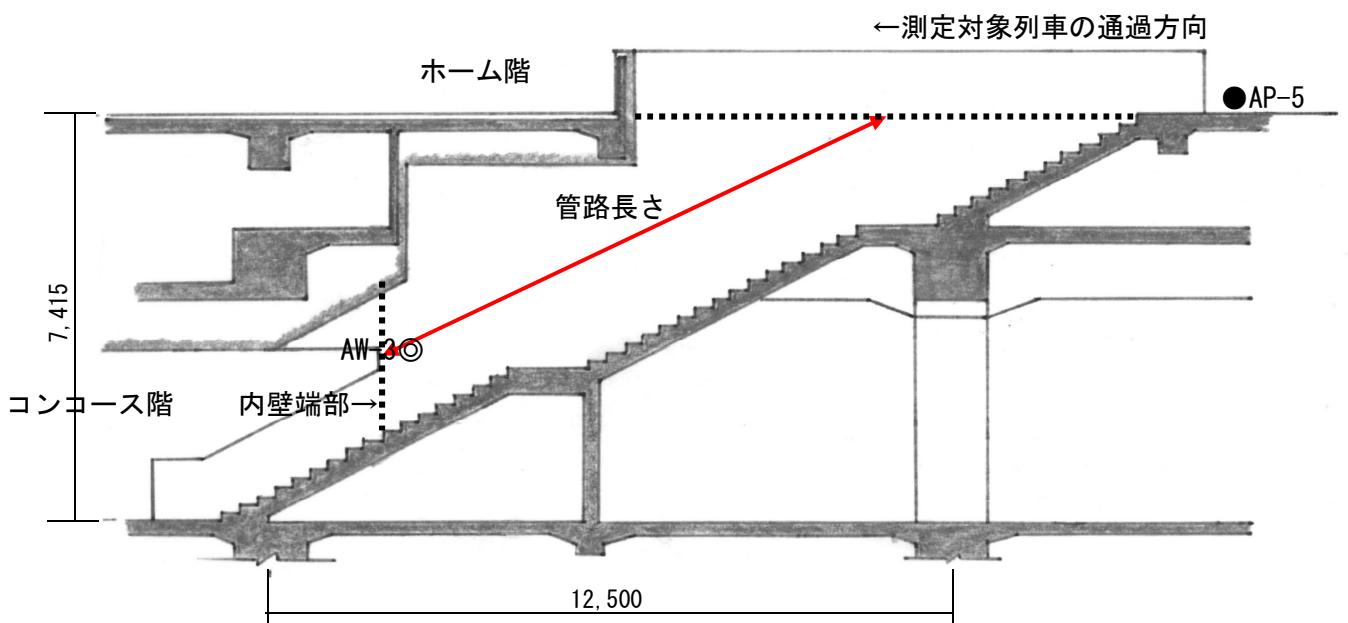
図 3-6① A 駅測定位置図



【上りホーム階段断面図】

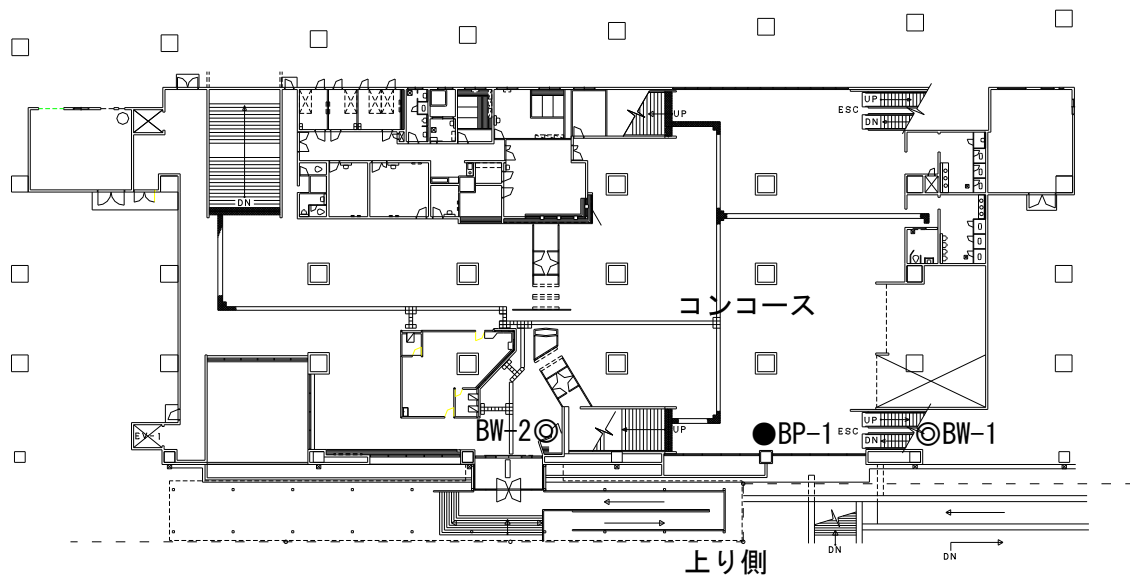
凡例

● 微差圧計 ◎ 風速計



【下りホーム階段断面図】

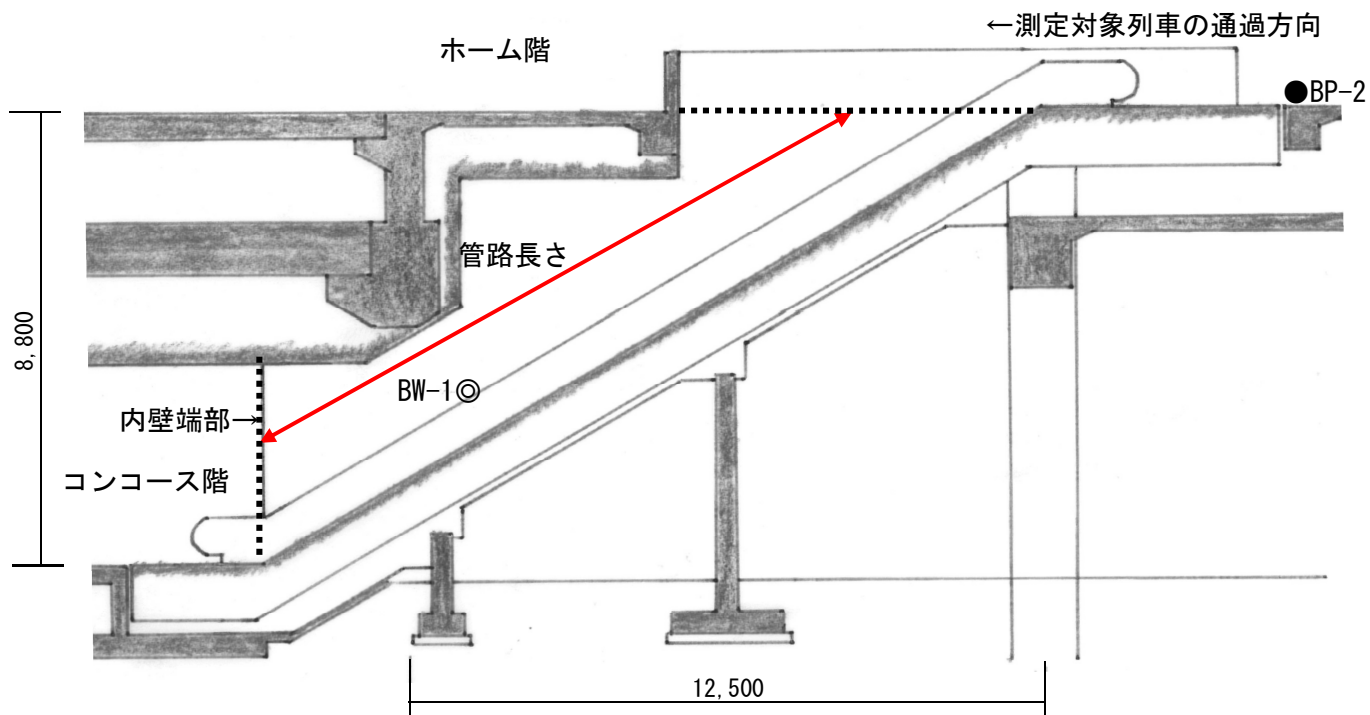
図 3-6② A 駅測定位置図



【平面図】

凡例

- 微差圧計
- ◎ 風速計



【上りホームエスカレータ断面図】

図 3-7① B 駅測定位置図

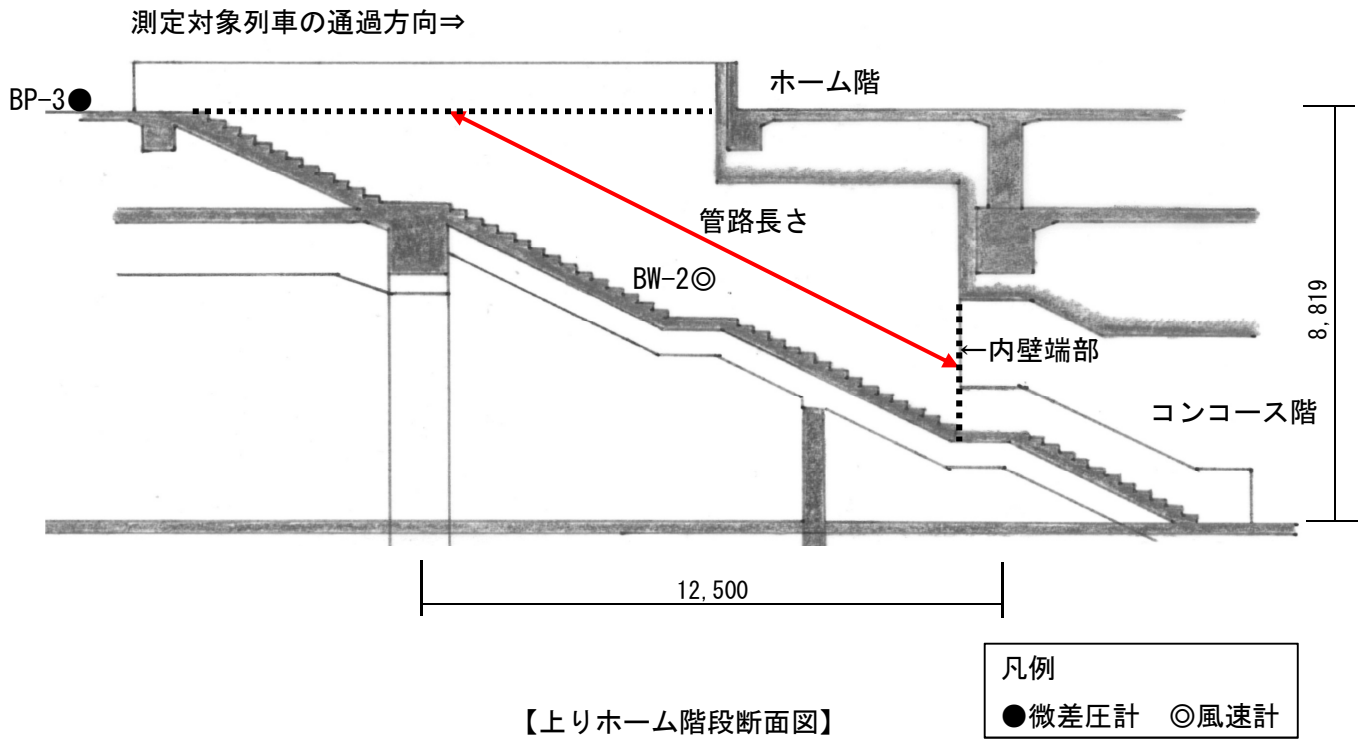


図 3-7② B 駅測定位置図

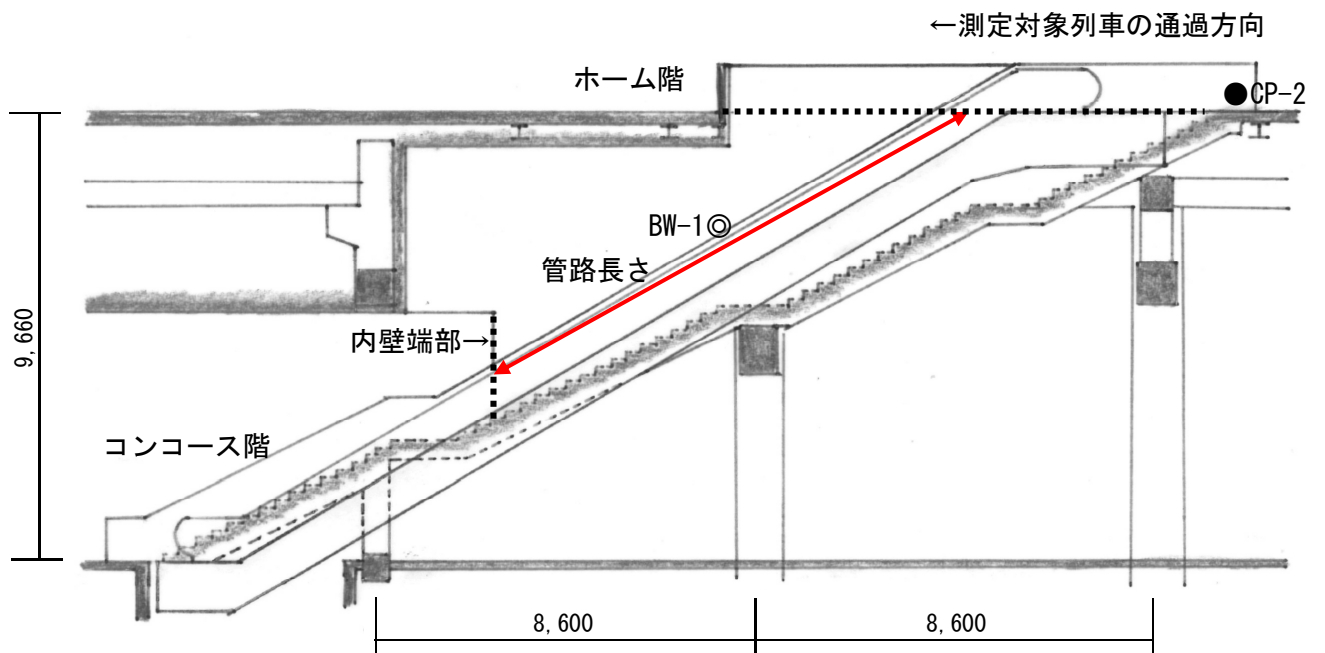
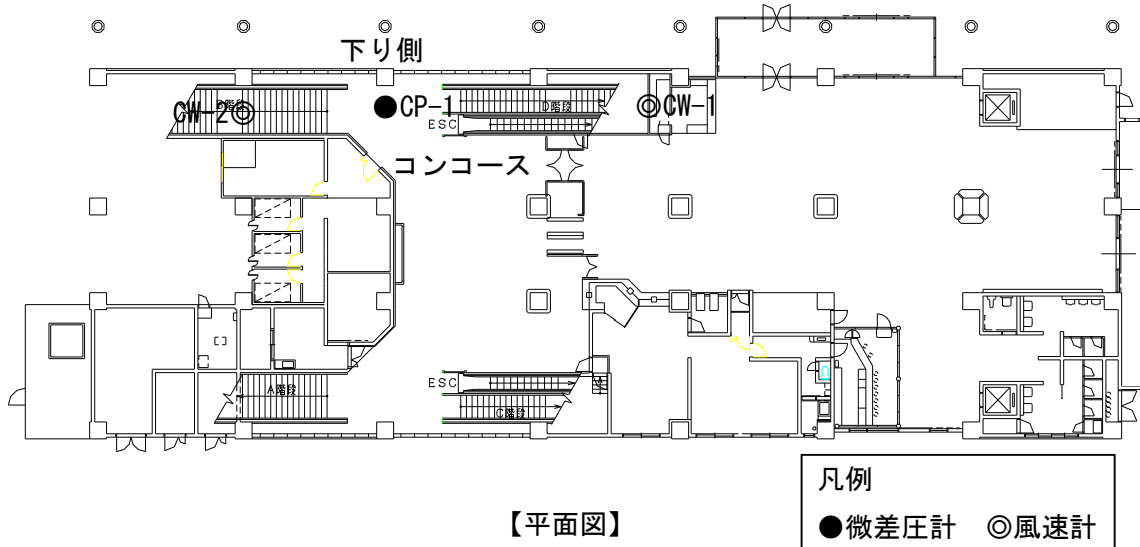
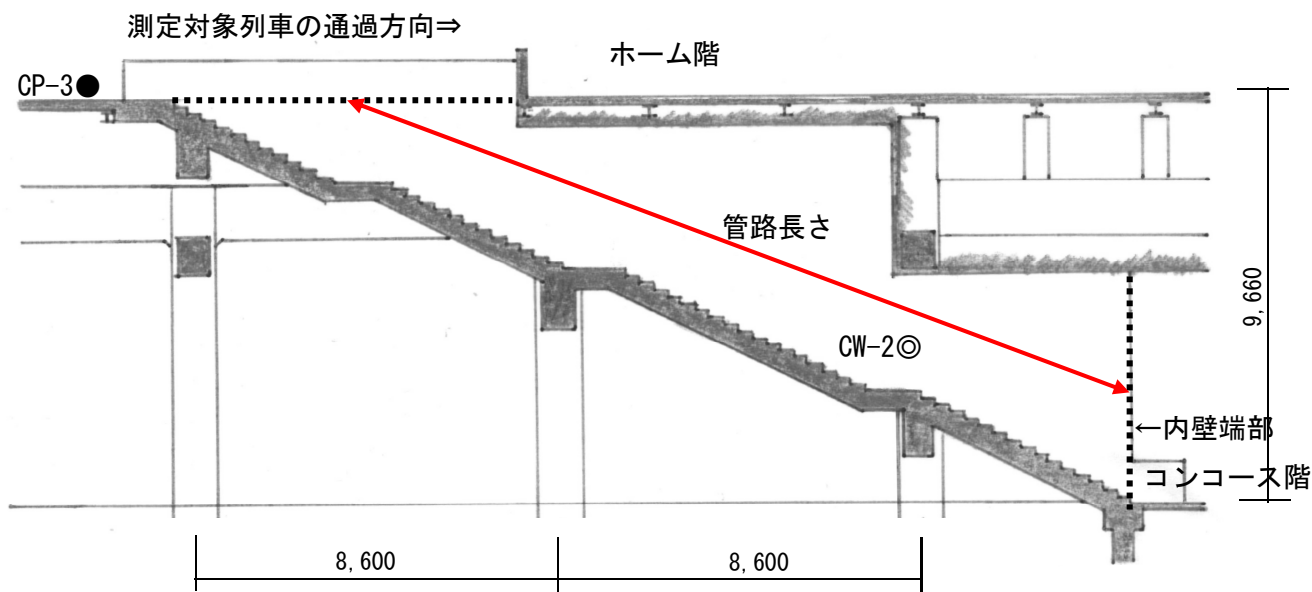


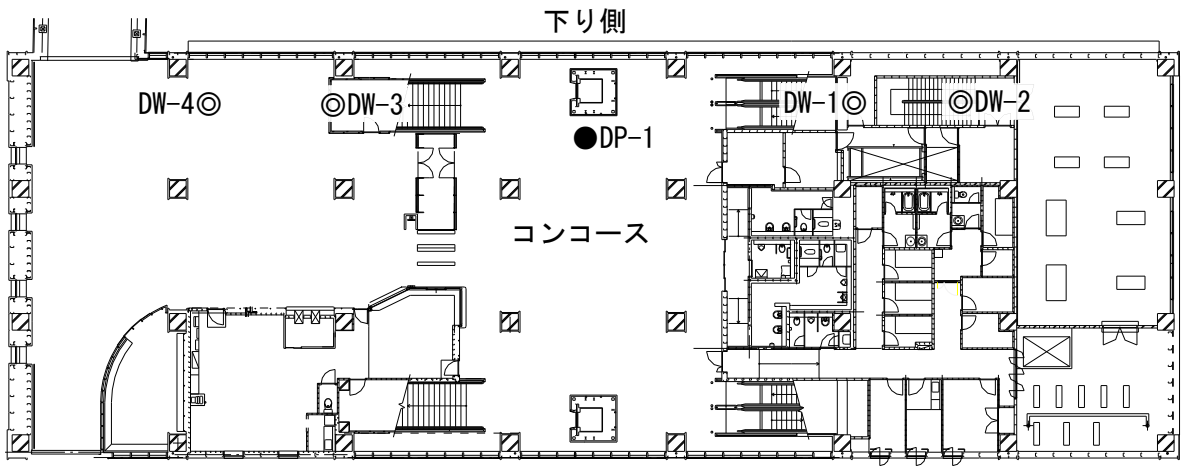
図 3-8① C 駅測定位置図



【下りホーム階段断面図】

凡例	
●	微差圧計
◎	風速計

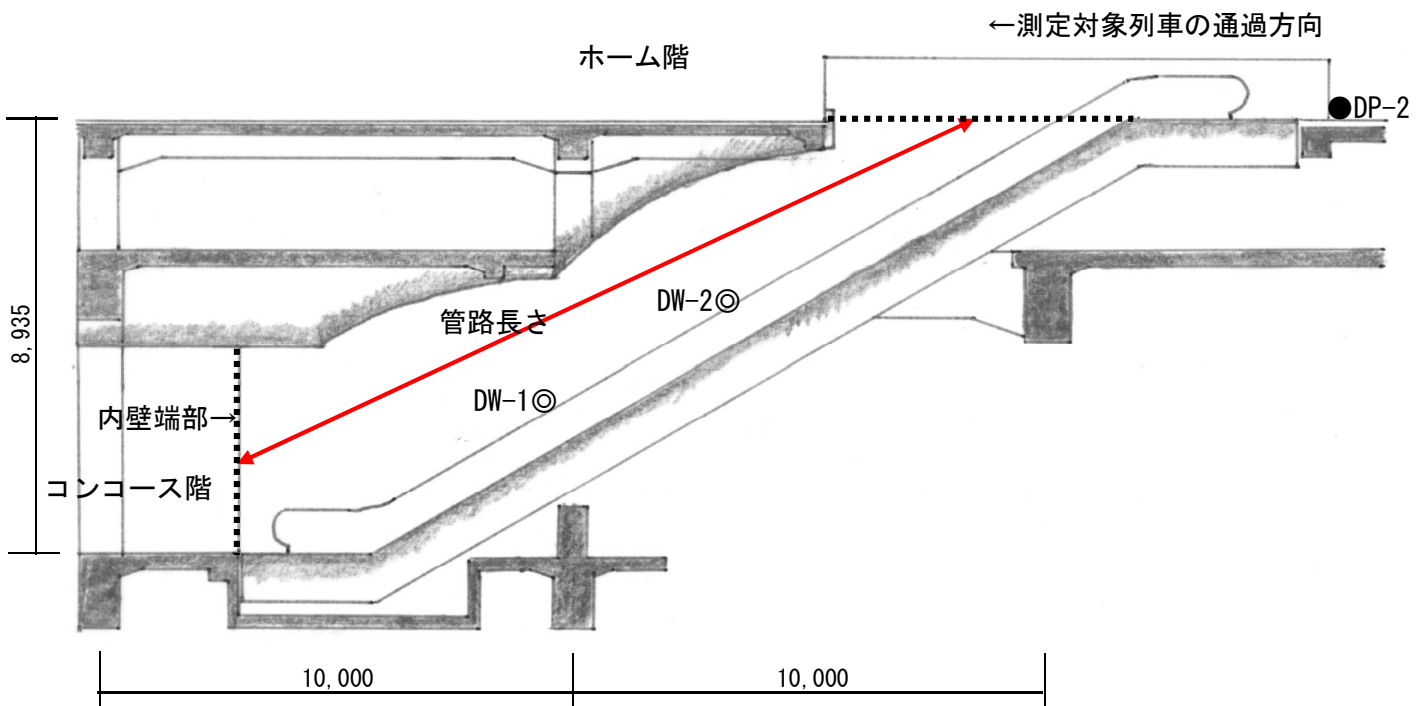
図 3-8② C 駅測定位置図



凡例

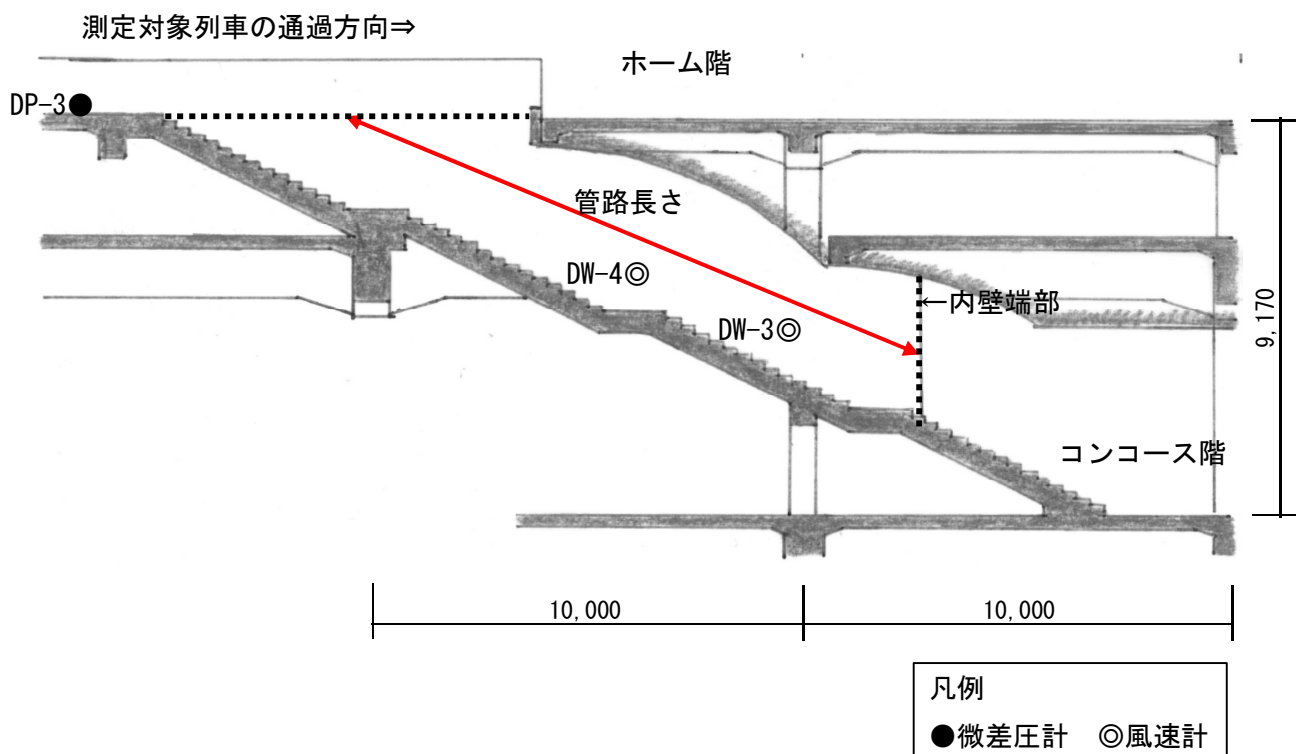
●微差圧計 ◎風速計

【平面図】



【下りホームエスカレータ断面図】

図 3-9① D 駅測定位置図



【下りホーム階段断面図】

図 3-9② D 駅測定位置図

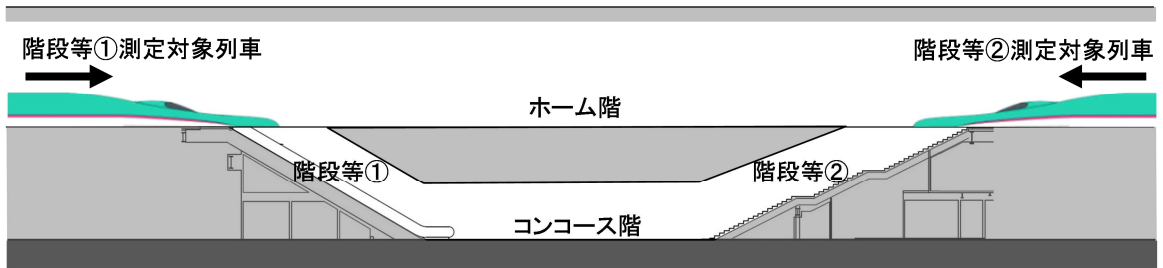


図 3-10 測定対象列車



図 3-11 風速計

3. 2. 3 圧力差積分値と管路長さの影響

各駅の列車風と圧力差積分値の時刻歴を図 3-12 に示す。図より各駅について、両者はピークの発生時刻が概ね一致しており、波形も相似であることが確認できる。また、各駅の風速最大値実測値と圧力差積分値最大値の関係を図 3-13 に示す。図より、先頭部通過時の風速最大値実測値は圧力差積分値最大値と概ね比例関係であることが確認できる。一方、後尾部通過時の風速最大値実測値については圧力差積分値最大値との相関は小さい。これは、圧力損失の影響や、圧力差積分値は時間で積分していることから時間が経過するほど測定圧力の積算誤差が大きくなることなどが考えられる。

次に、先頭部通過時の風速最大値実測値と式(3-4)で算出した風速（圧力差積分値最大値 / (管路長さ×空気密度)）との関係を図 3-14 に示す。なお、圧力損失の影響は無いと仮定し、空気密度 ρ は式(3-5)で算出した。

$$\rho = 1.2931 \times \frac{273.15}{273.15 + t} \times \frac{P}{1.013 \times 10^5} \quad \dots (3-5)$$

t : 空気温度 (°C)

P : 大気圧 (Pa)

図より風速最大値実測値と圧力差積分値 / (管路長さ×空気密度) とは比例関係にあることが確認できる。ただし、式(3-4)で算出した風速は風速最大値実測値よりも大きく評価しており、その要因としては、圧力変動のホーム階測定箇所が管路の端部から離れていたことや管路長さの評価方法、圧力損失の影響などが考えられる。

以上より、高架下駅の階段部等において、管路長さが同じ場合、風速最大値実測値は圧力差積分値に比例することを確認した。また、風速最大値実測値は圧力差積分値 / (管路長さ×空気密度) にも比例することから、管路長さに反比例することが分かる。従って、列車風低減対策として、管路延伸は有効であると考えられる。一方、階段部等の風速を評価する際に、圧力損失を無視できない可能性があることも分かった。

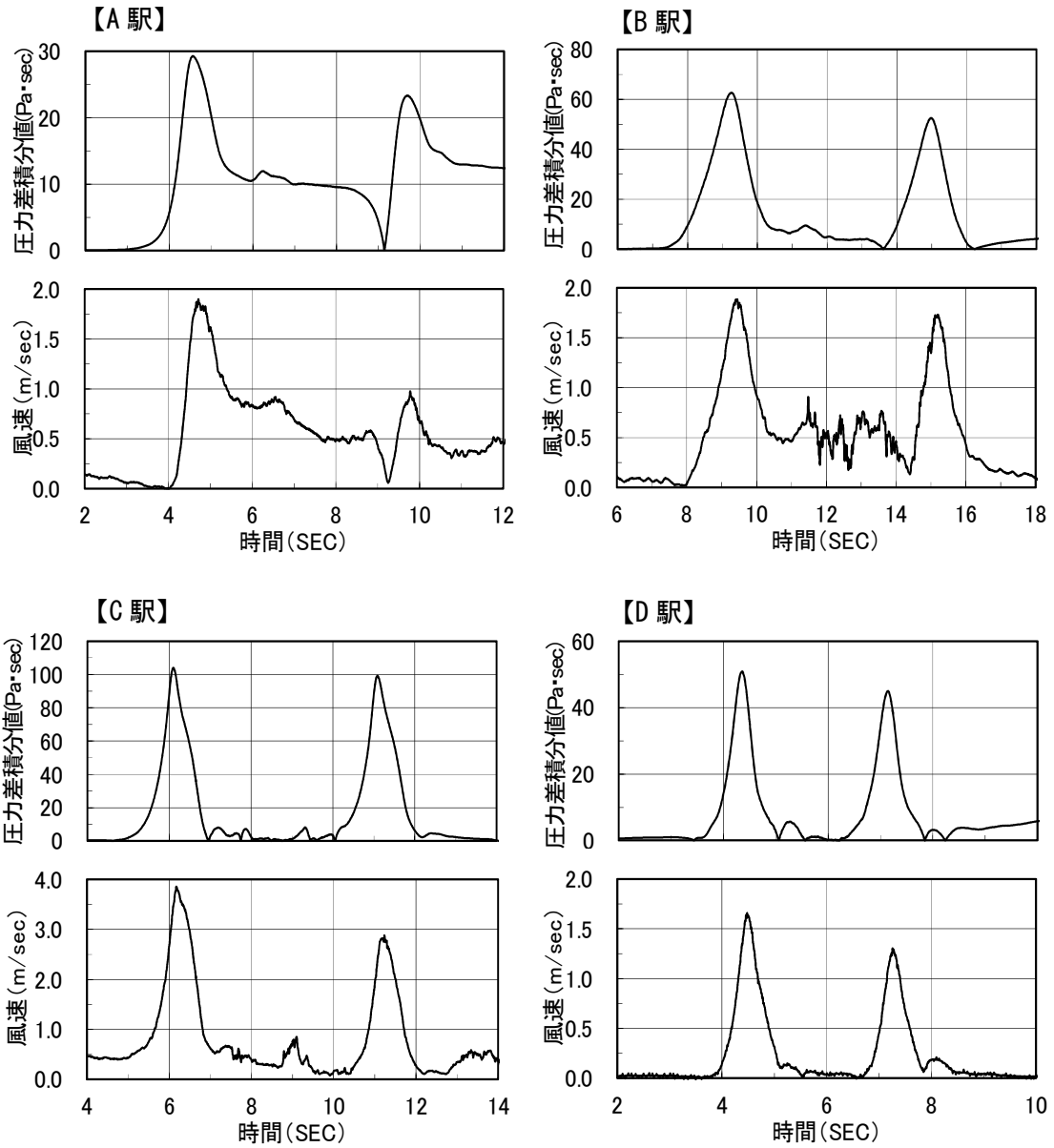


図 3-12 列車風および圧力差積分値の時刻歴

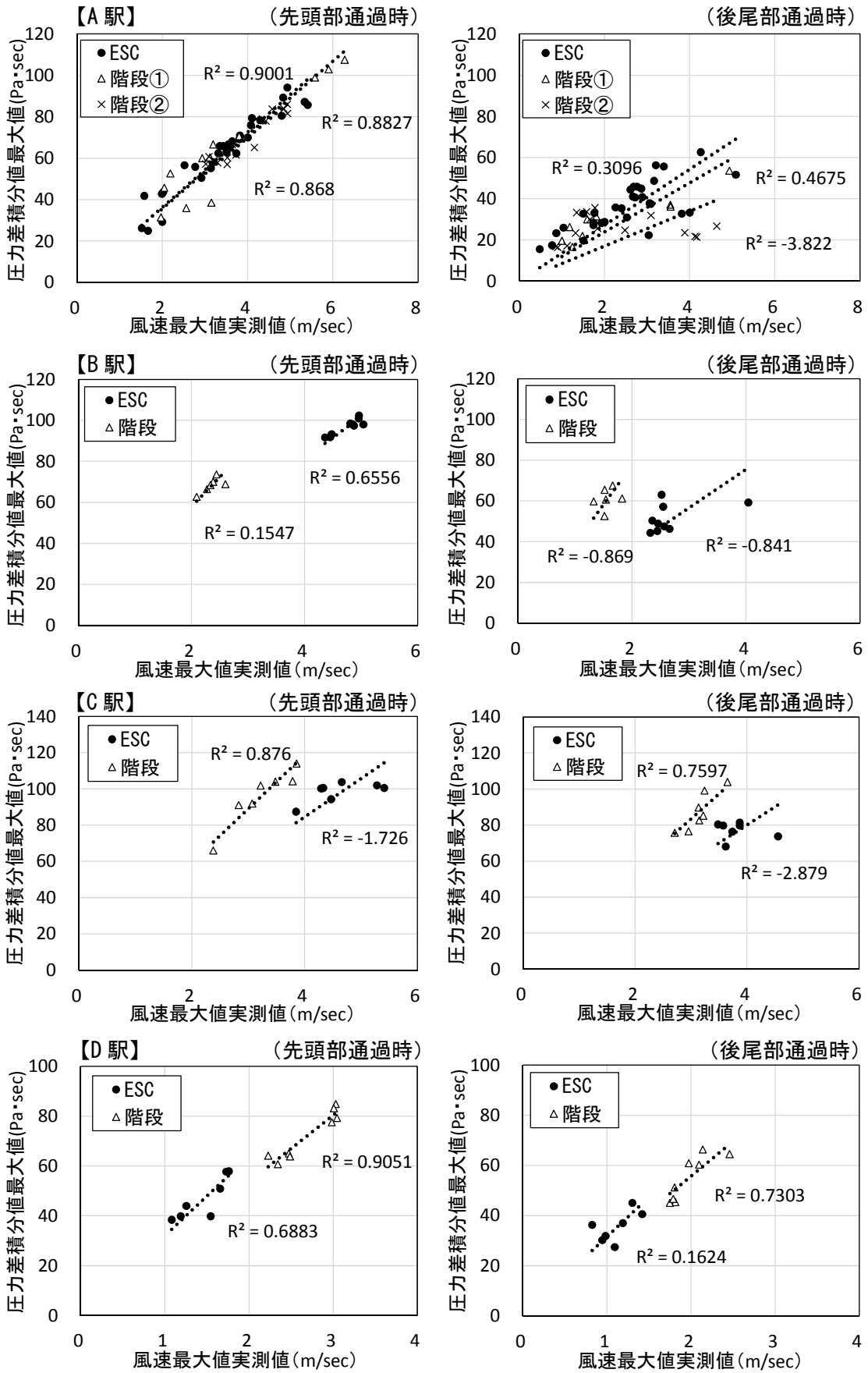


図 3-13 風速最大値実測値と圧力差積分値最大値の関係

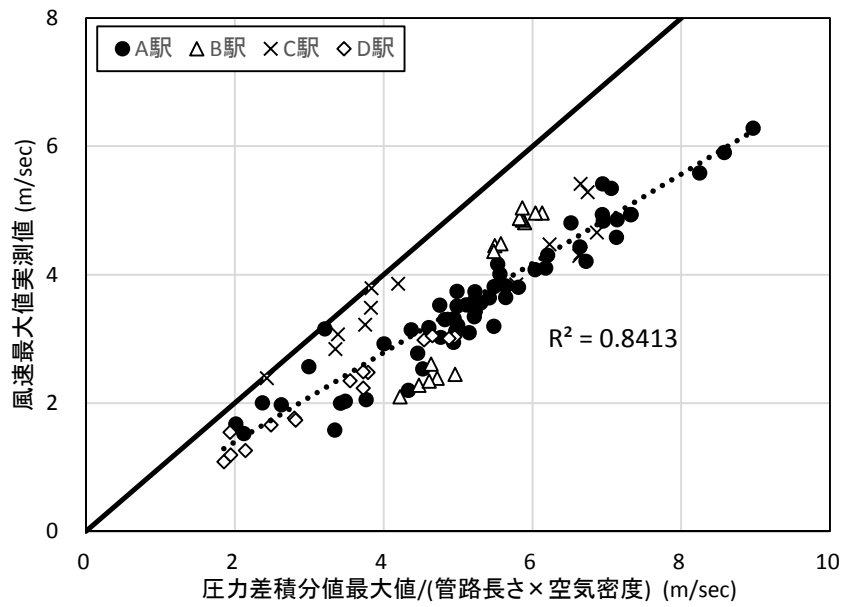


図 3-14 圧力差積分値最大値/(管路長さ×空気密度) と風速最大値実測値の関係

3. 3 風対策シェルター設置時の列車風予測手法の検討

3. 3. 1 はじめに

本節では、列車風の大きい橋上駅において、エスカレータにシェルターを設置し、管路の効果を確認することが可能な橋上駅（E 駅）において、圧力損失や管路長さの影響、管路設置後の列車風予測手法を検討した。

3. 3. 2 風対策シェルター設置および測定方法

風速と管路長さの関係を確認するために、風対策シェルター長さの異なる「シェルター無し」「シェルター一部(シェルター延長 7.7m)」「シェルター全長(シェルター延長 14.6m)」の 3 ケースで測定を行った。最初にシェルター設置前に測定を行い、その後、仮設の壁と天井で構成されるシェルターをエスカレータ全長に渡り設置して測定を行った。最後にシェルターの下部を撤去して測定を行った。図 3-15 に風対策シェルターの設置状況、図 3-16 に測定位置図を示す。測定は風速が大きい上りホームエスカレータで行った。微差圧計は、全ケース 3 箇所（P-1、2、3）に設置し、風速計も全ケース 4 箇所（W-1、2、3、N）に設置した。微差圧計について、P-1 はシェルター設置時の上端、P-2 はシェルター一部設置時の下端、P-3 はシェルター全長設置時の下端に設置した。風速計については、シェルター全長を 4 分割する箇所（W-1、2、3）およびシェルターを設置しない場合に風速が最も大きくなると思われる断面が絞られた箇所（W-N）に設置した。表 3-2 に各ケース測定概要を示す。シェルター無しの営業列車を対象とした測定について、P-2 のみ通過本数は 2 本である。測定対象列車としては、図 3-16 に示すようにエスカレータに対向する通過列車とした。なお、試験列車と営業列車の車種は同じであり、通過速度のみが異なる。使用した測定機器、測定機器の設置位置、データ処理等は「3. 2. 2 測定方法」と同様である。

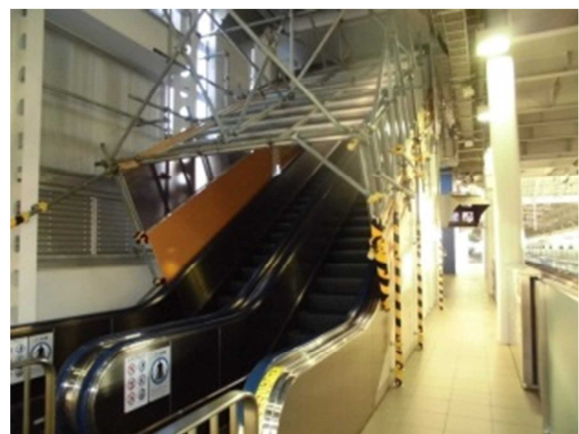
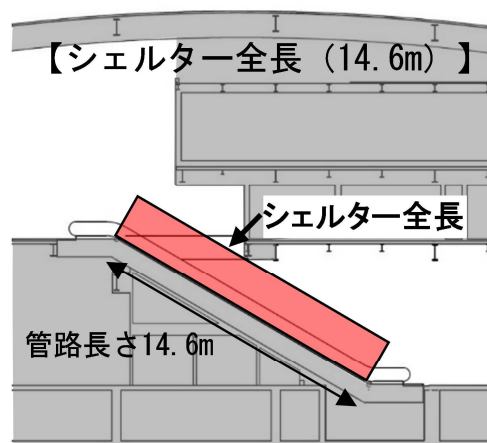
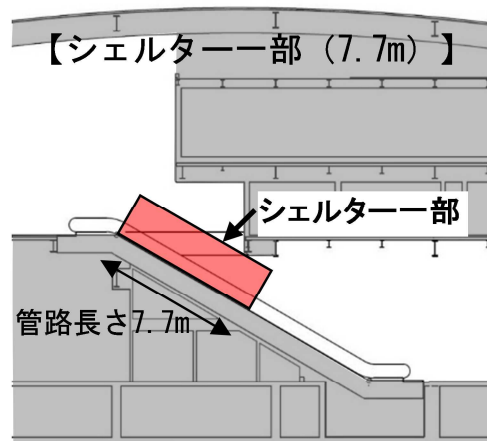
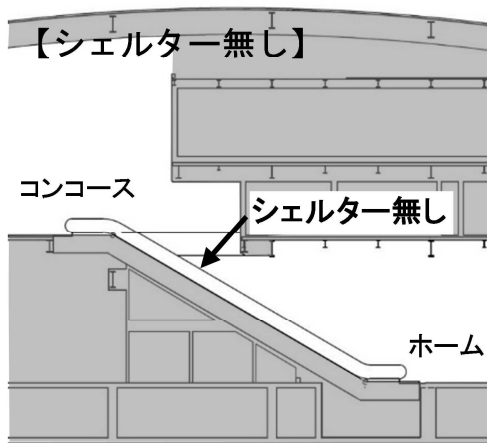


図 3-15 E 駅風対策シェルター設置状況

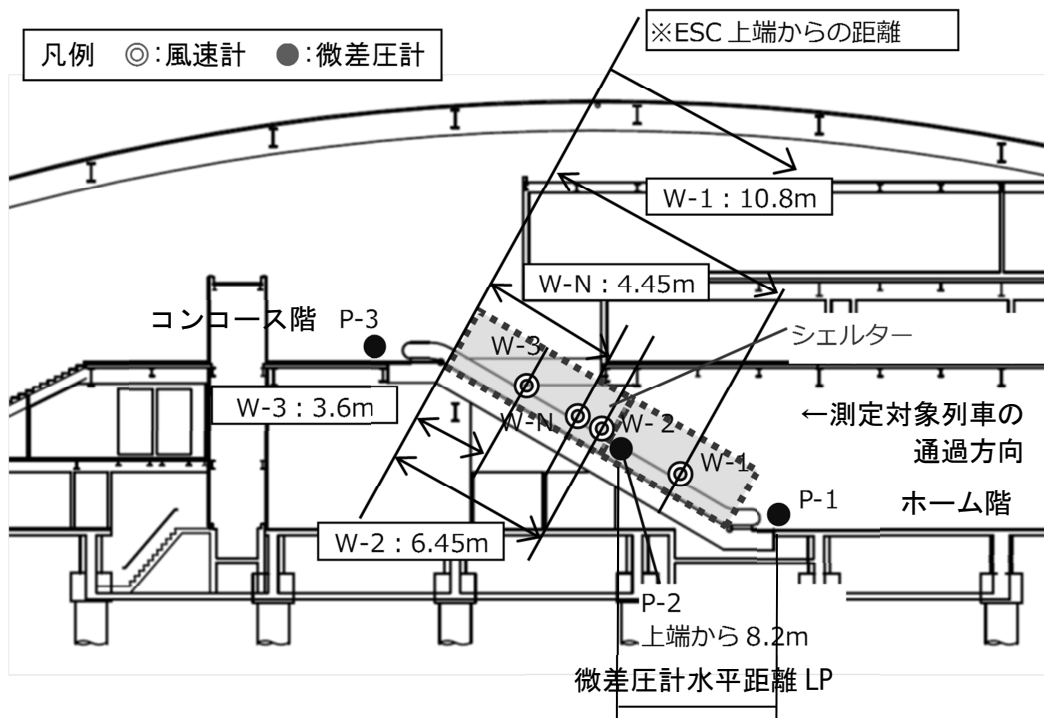


図 3-16 E 駅測定位置図

表 3-2 各ケース測定概要

ケース	管路長さ (m)	測定対象列車	測定列車本数(本)	平均通過速度 (km/h)	備考
シェルター無し	—	上り営業列車	6	256	P-2測定は通過本数2本
		上り試験列車	3	319	
シェルター一部	7.7	上り営業列車	5	251	平均通過速度は速度の遅かった1本を除いた4本の平均
		上り試験列車	2	319	
シェルター全長	14.6	上り営業列車	3	255	
		上り試験列車	4	318	

3. 3. 3 風対策シェルター設置後の測定結果

W-3 における試験列車通過時の列車風代表波形を図 3-17 に示す（付属資料 2 に全列車風波形を示す）。管路が長いほど風速は低減しており、管路長さの効果を確認することができる。さらに、風対策シェルター設置後、先頭部通過後および後尾部通過後に発生する列車風も低減している。これは、コンコース階の圧力変動の方がホーム階圧力変動よりも大きく、図 3-1 のフェーズ②において、圧力差積分値の正負が逆転し、逆向きの列車風が発生したためと考えられる。測定位置と先頭部通過時の風速最大値の関係を図 3-18 に示す。各データは通過速度がほぼ同じ列車の風速最大値平均値をプロットしている。図より管路が長いほど風速が低減し、7.7m のシェルターを設置すれば、約 320km/h での高速走行時に、営業列車通過時よりも列車風を抑えられることが確認できる。また、風対策シェルター内の風速は概ね一定となっているのに対し、風対策シェルターを設置しない場合については、断面が絞られた箇所（W-N）の前後を含めた一定の区間で風速が大きくなっている。

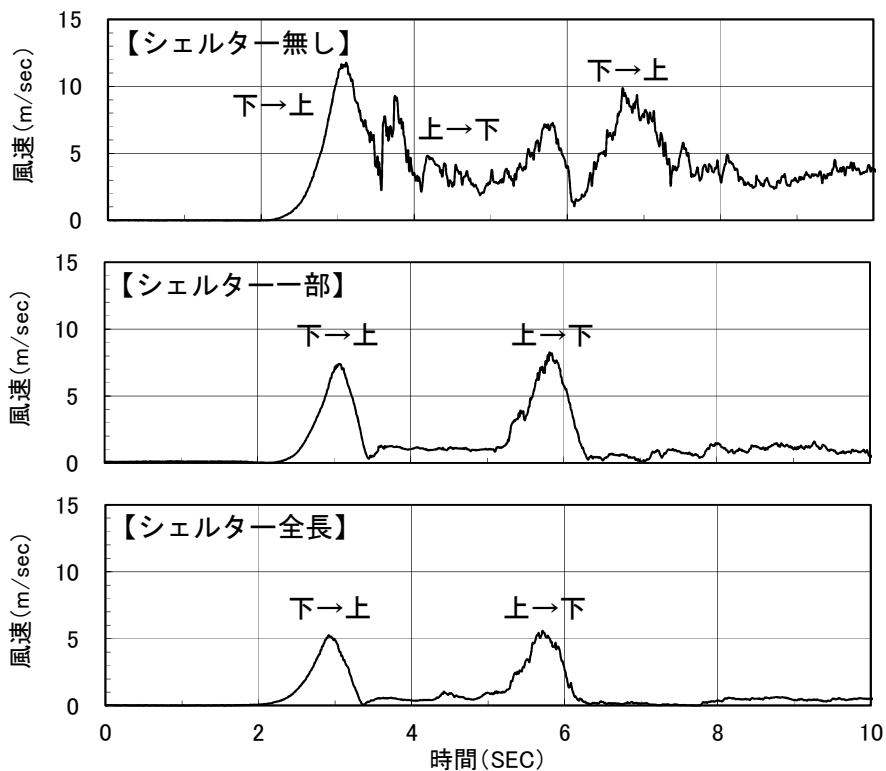


図 3-17 列車風代表波形の比較（W-3、試験列車通過時）

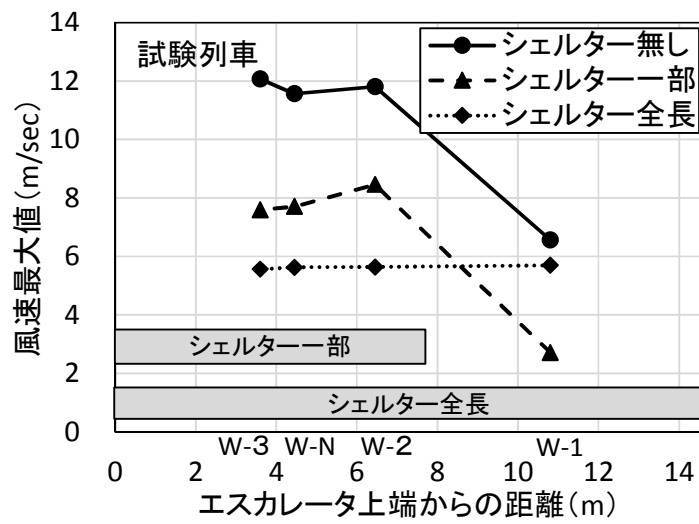
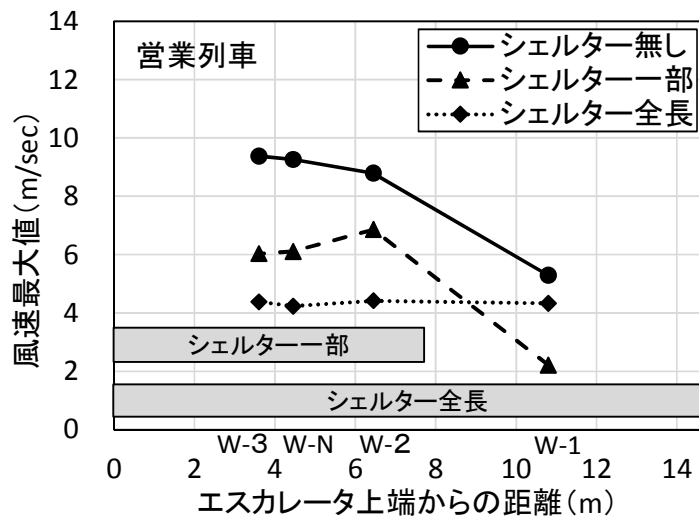


図 3-18 測定位置と風速最大値

3. 3. 4 圧力損失の影響

圧力損失の影響を確認するために、式(3-1)における非定常項 ρaL 、圧力差 $p_2 - p_1$ 、圧力損失 p_r を時刻歴で比較した。非定常項の加速度 a については、風速を微分して算出した。圧力損失を算出する際には、摩擦係数 λ は管路内の流れを乱流と仮定し、壁面の凹凸の高さを 10 mm としてムーディ線図³⁵⁾から 0.07 とした。管路の等価直径 d については式(3-6)により算出した³⁵⁾。

$$d = \frac{4A}{s} \quad \dots (3-6)$$

A : 管路断面積 (m²)

s : 管路周長 (m)

以上より、式(3-2)における $\lambda L/d$ を算出するとシェルター一部で 0.24、シェルター全長で 0.46 となる。また、入口損失係数 ζ は 0.5、出口損失係数 ζ は 1.0 とした³⁵⁾。従って、摩擦損失は全圧力損失に対して、シェルター一部で 1 割程度、シェルター全長で 2 割程度となる。

図 3-19 に先頭部通過時の圧力差、非定常項、圧力損失の時刻歴を示す。全体的に非定常項が支配的であり、圧力差のピーク発生時刻もほぼ一致している。一方、圧力損失は非定常項と比較すると小さく、圧力差や非定常項よりもピークが遅れて発生する。圧力差と比較するとシェルター一部は圧力差のピークまでは非定常項と概ね一致しており、ピーク以降は非定常項+圧力損失と概ね一致しているのが特徴的である。それに対して、シェルター全長は圧力差が増大し、かつ、風速は低減するため圧力損失の影響は小さく、非定常項と非定常項+圧力損失はほぼ等しくなり、圧力差とも全体的に概ね一致している。加速度が増大している時に圧力損失の影響が小さい理由として、その間は風速が最大値に達する前で、風速そのものが小さく、風速の 2 乗に比例する圧力損失が小さいこと、静止状態から突然吹き始める風のため、剥離渦の発達が遅れ、同じ風速での定常流よりも圧力損失が小さいこと(翼の出発渦と類似の現象。例えば、文献 35)「9 章 9.4.2 翼」p.148 参照)などが考えられる。

次に、風速は積分値で評価することから、圧力差、非定常項、圧力損失の積分値を比較した。図 3-20 に先頭部通過時の各積分値を示す。圧力差と比較するとシェルター一部については、非定常項と最大値が概ね一致し、一方、シェルター全長については、非定常項+圧力損失の最大値と概ね一致する。シェルター一部の方で、圧力差と非定常項+圧力損失とが大きく異なる理由としては、前述の通り、加速度が増大する時は圧力損失の影響は小さいが、シェルター全長と比べて風速が大きく、圧力損失が大きくなることが一因として考えられる。また、シェルター全長において、非定常項の最大値は、非定常項+圧力損失

の最大値よりも小さくなるが、最大値の比率は 9 割程度であり、圧力損失を考慮しなくても風速最大値評価に及ぼす影響は小さいと考えられる。参考までにシェルター一部においても、非定常項+圧力損失に対する非定常項の最大値の比率は 8 割程度であり、非定常項が支配的であることが分かる。

以上より、階段部等で発生する列車風については、非定常項が支配的であり、圧力損失の影響は小さいことから p_r を考慮せず、先頭部通過時においては式(3-7)にて評価すれば問題ないことが確認できた。

$$u(t) = \frac{1}{\rho L} \int_0^t (p_2(\tau) - p_1(\tau)) d\tau \quad \dots (3-7)$$

- u : 風速(m/sec)
- ρ : 空気密度(N・sec²/m⁴)
- L : 管路の長さ(m)
- p_1 : ホーム階の圧力(Pa)
- p_2 : コンコース階の圧力 (Pa)

さらに、圧力損失を考慮しなかった場合、その分風速を大きく評価することにつながるため、安全側の評価となり、実用上も問題は無いと考える。

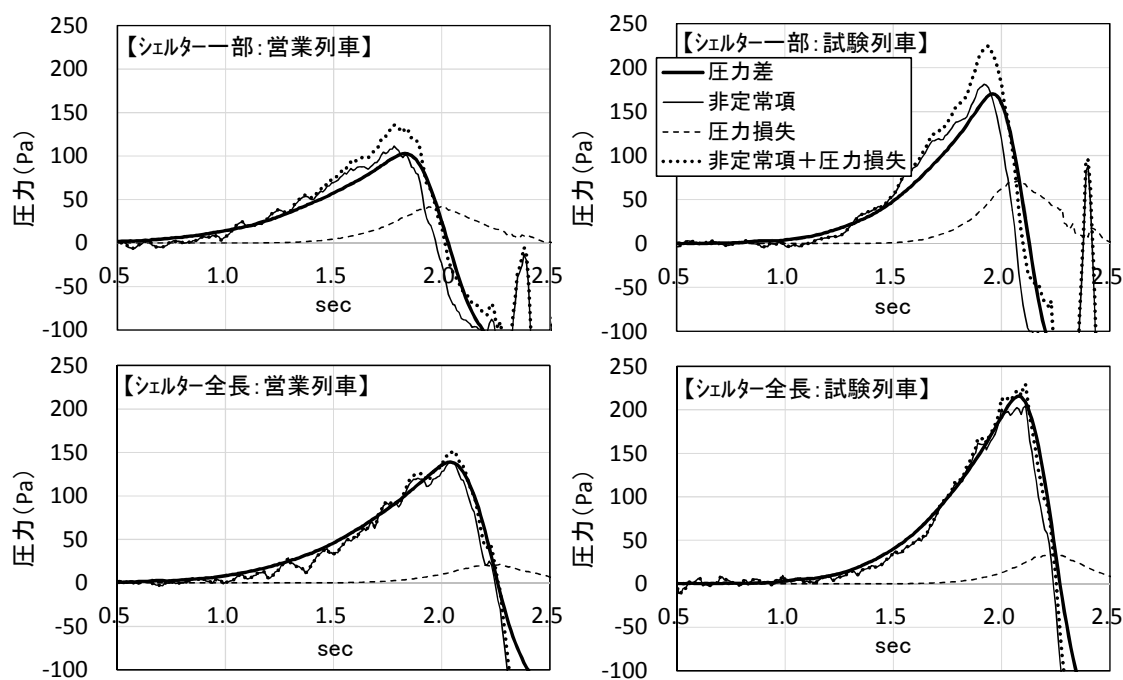


図 3-19 先頭部通過時の圧力差、非定常項、圧力損失時刻歴

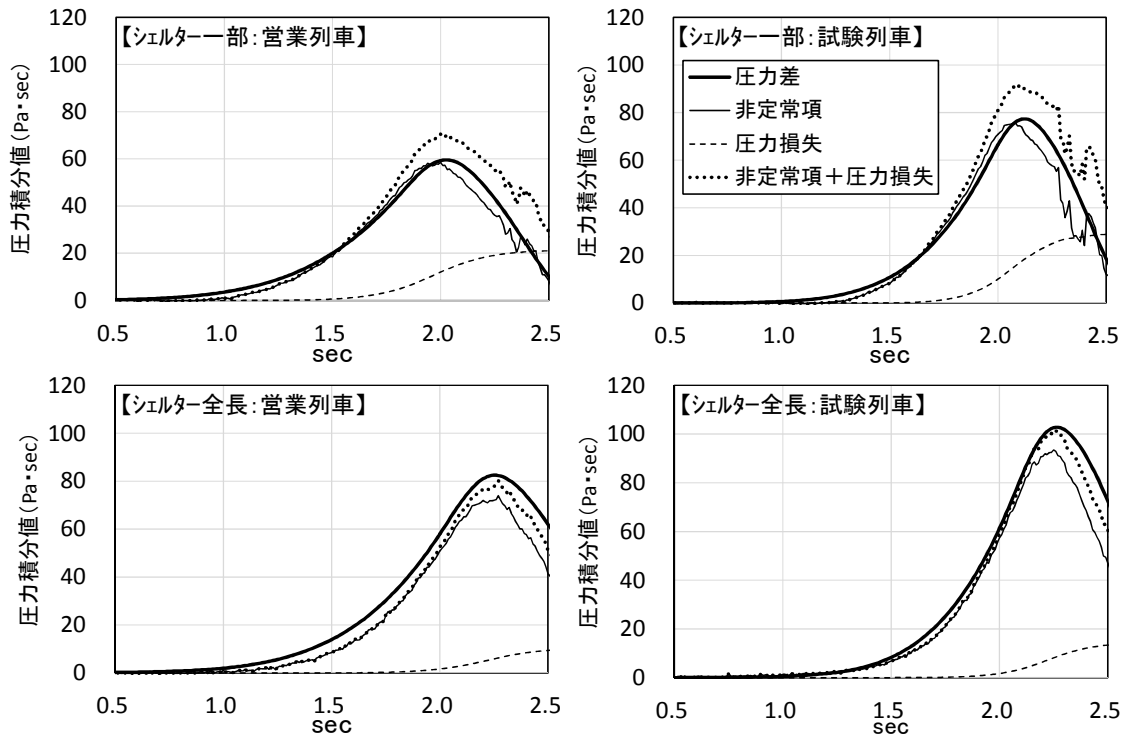


図 3-20 先頭部通過時の圧力差、非定常項、圧力損失積分値時刻歴

3. 3. 5 管路長さの影響

図 3-21 には、シェルター全長とシェルター一部との先頭部通過時の風速最大値比率を示す。風速最大値は風速が最大となる測定箇所の値である。図より管路長さに反比例すると想定した風速比率（ $7.7/14.6=0.53$ ）までは低減していないことが分かる。これは、シェルター一部とシェルター全長の下端の圧力計設置位置は図 3-16 に示す「微差圧計水平距離 LP」だけ離れており、列車周りの圧力場は列車速度で伝播することから、シェルター上端の圧力変動と比較するとシェルター全長では LP を列車速度で除した時間だけ圧力変動発生時刻のずれが生じる。そのため、圧力差積分値を算出した際にシェルター全長の方が大きくなることに起因していると考えられる。シェルター一部は P2、P3、シェルター全長は P1、P3 より先頭部通過時の圧力差積分値最大値を算出し、その比率を図 3-22 に示す。シェルター全長とすることによって、圧力差積分値最大値は 3 割程度増大する。先頭部通過時の風速最大値比率と圧力差積分値最大値比率／管路長さ比率の関係を図 3-23 に示す。概ね両者は等しい。つまり、風速を低減するために管路を長くしても、列車通過時間に起因して圧力差積分値は増大するため、管路長さに反比例すると想定した風速までは低減しないことが分かる。

そこで、管路長さを 7.7m～14.6m 間で連続的に変化させ、圧力差積分値/管路長さとの関係を把握した。図 3-24 に示すようにシェルター一部の P-1 と P-2 はほぼ等しいことから、図 3-25 に示す仮想シェルター下端の圧力変動 P-2' を式(3-8)より算出し、シェルター上端の圧力変動 P-3 との圧力差積分値を算出した。

$$P-2'(t) = P-1(t - T) \quad \dots (3-8)$$

$$T = (14.6 - L) \cdot \cos \frac{\pi}{6} / V \quad \dots (3-9)$$

T : P-1 と P-2' の時間のずれ(sec) (図 3-25 参照)

L : 管路長さ(m)

V : 列車速度(m/sec)

図 3-26 に管路長さと圧力差積分値最大値/管路長さの関係の一例を示すが、管路長さの概ね 0.7 乗に比例している。つまり、橋上駅のエスカレータに風対策シェルターを増設する場合、列車風は管路長さに反比例せず、管路長さの概ね 0.7 乗に比例することを確認した。

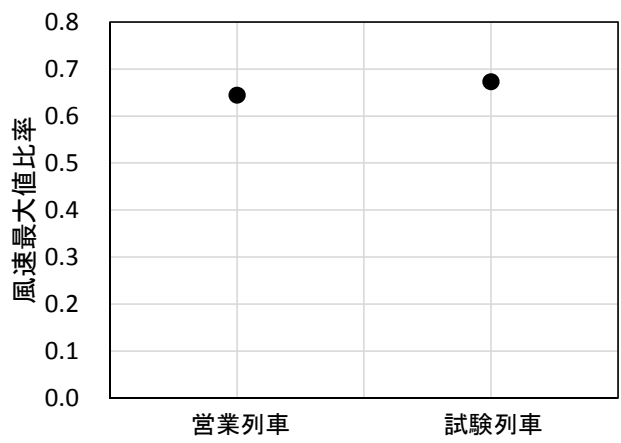


図 3-21 風速最大比率 (シェルター全長/シェルター一部)

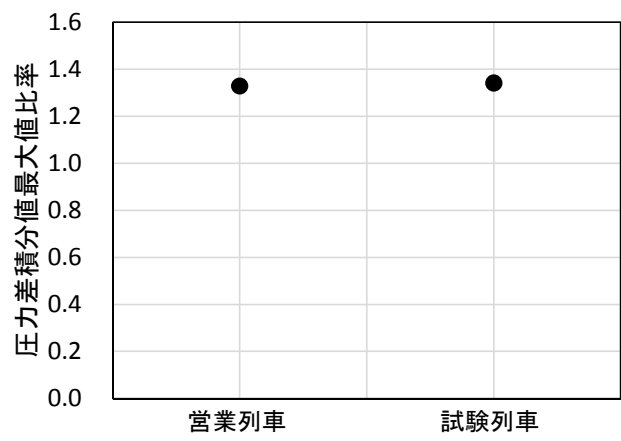


図 3-22 圧力差積分値最大比率 (シェルター全長/シェルター一部)

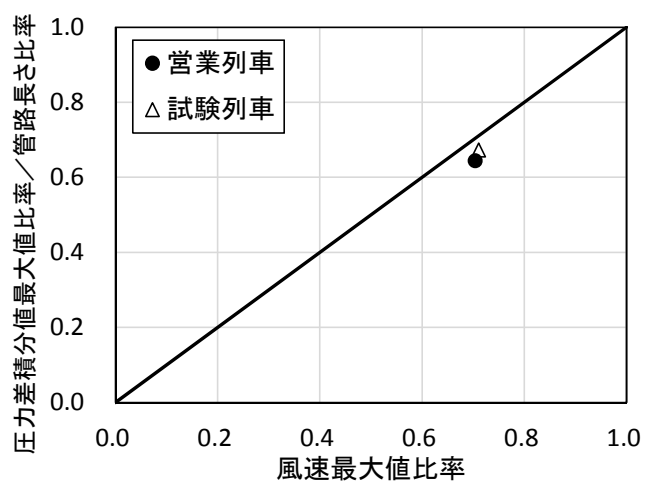


図 3-23 風速最大比率と圧力差積分値最大比率/管路長さ比率の関係

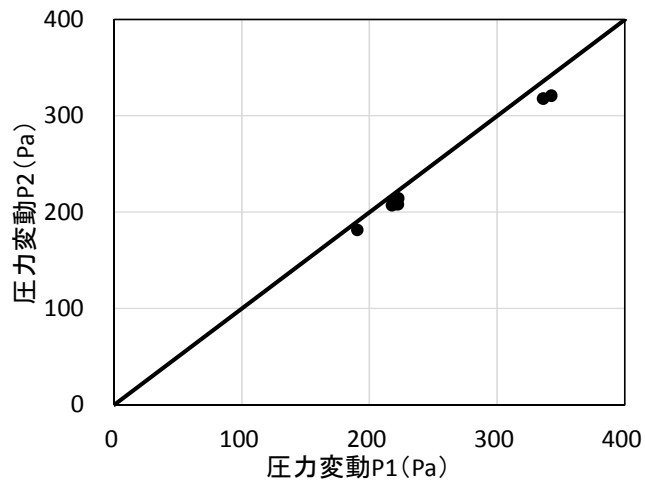


図 3-24 シェルター一部における P1 と P2 の比較

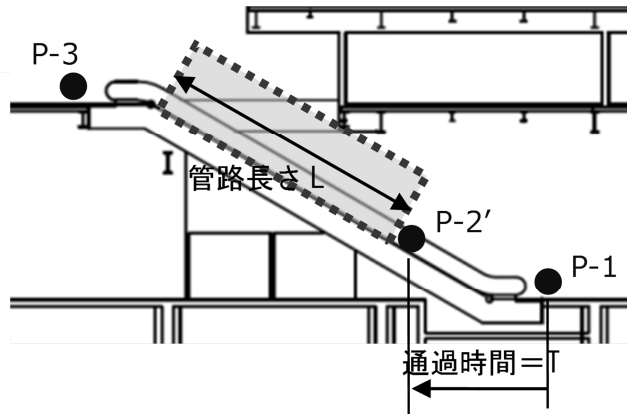


図 3-25 仮想シェルター断面図

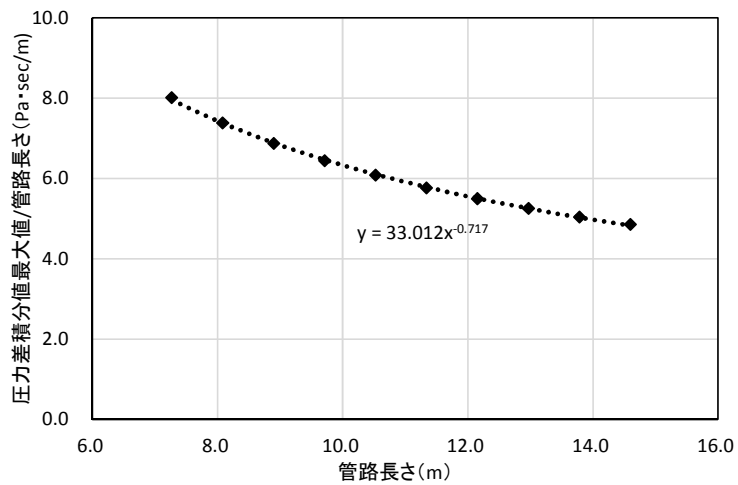


図 3-26 管路長さと圧力差積分値/管路長さの関係

3. 3. 6 列車風の評価

先頭部通過時および後尾部通過時について、それぞれ式(3-7)で評価した風対策シェルター設置時の風速最大値予測値と風速最大値実測値との比較を行った。なお、圧力差積分値を算出する際に使用した微差圧計はシェルター一部では P2、P3、シェルター全長では P1、P3 とした。図 3-27 に両者の比較を示す。図より、先頭部通過時については、風速最大値予測値の誤差は 1 割程度であり、シェルター端部の圧力変動から式(3-7)を用いてシェルター設置時の列車風を概ね予測できることを確認した。シェルター全長の方が実測値よりも大きく評価している傾向がみられるが、これは前述の通り、圧力損失の影響と考えられる。一方、後尾部通過時についてはばらつきが大きい。これは、「3. 2. 3 圧力差積分値と管路長さの影響」でも考察しているが、圧力損失の影響を考慮していないこと、圧力差積分値は時間で積分しており、時間が経過するほど測定圧力の積算誤差が大きくなることなどが考えられる。ただし、図 3-28 に先頭部通過時風速最大値と後尾部通過時風速最大値の比較を示すが、風速最大値は先頭部通過時の方が後尾部通過時よりも大きく、風速最大値を評価する上で、先頭部通過時の列車風が予測できれば問題ないと考えられる。

次に、シェルター無しでの圧力変動測定値から風対策シェルター設置時の列車風を予測する手法について検討した。風速最大値予測値、風速最大値実測値を比較する際には、通過速度がほぼ等しい列車のみを対象とし、それぞれ先頭部通過時の平均値を算出した。圧力差積分値を算出する際に使用した微差圧計はシェルター一部では P2、P3、シェルター全長では P1、P3 を用いた。図 3-29 にシェルター無しでの圧力変動測定値から算出した風速最大値予測値と風対策シェルター設置時の風速最大値実測値の比較を示す。風速最大値予測値の誤差は 1 割程度であり、両者は概ね一致している。なお、風対策シェルターの構築が主な対象であることから、2 割以下の誤差で風速最大値が算出できれば、コストへの影響として十分な精度であると考えられる。つまり、風対策シェルターが無い状態でも、シェルターを設置した際に端部となる位置で圧力変動を測定すれば、その圧力差積分値とシェルター長さからシェルター設置時の列車風を概ね予測できることが分かる。

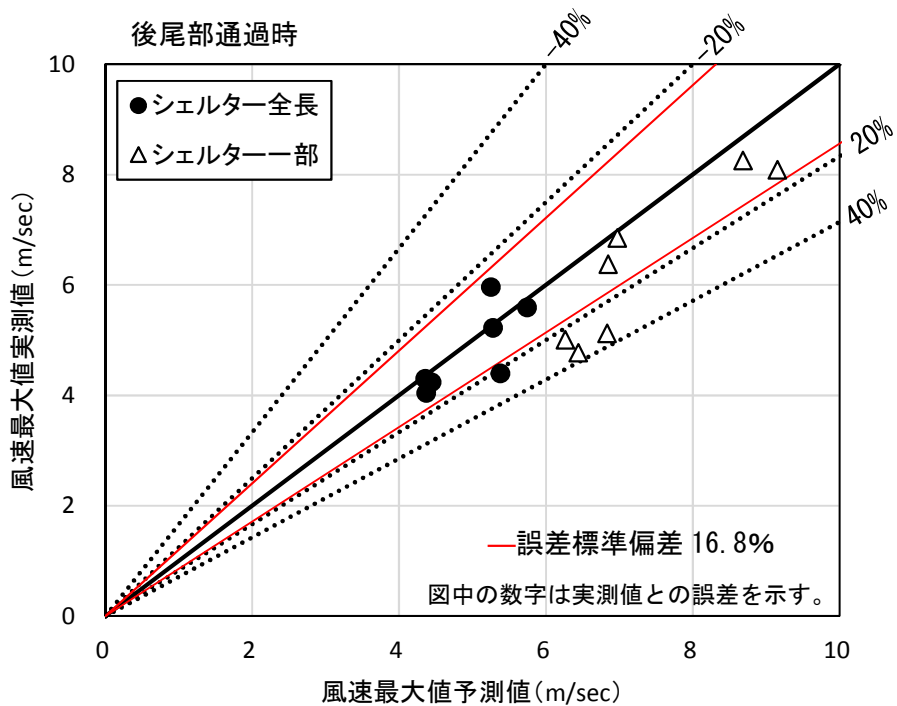
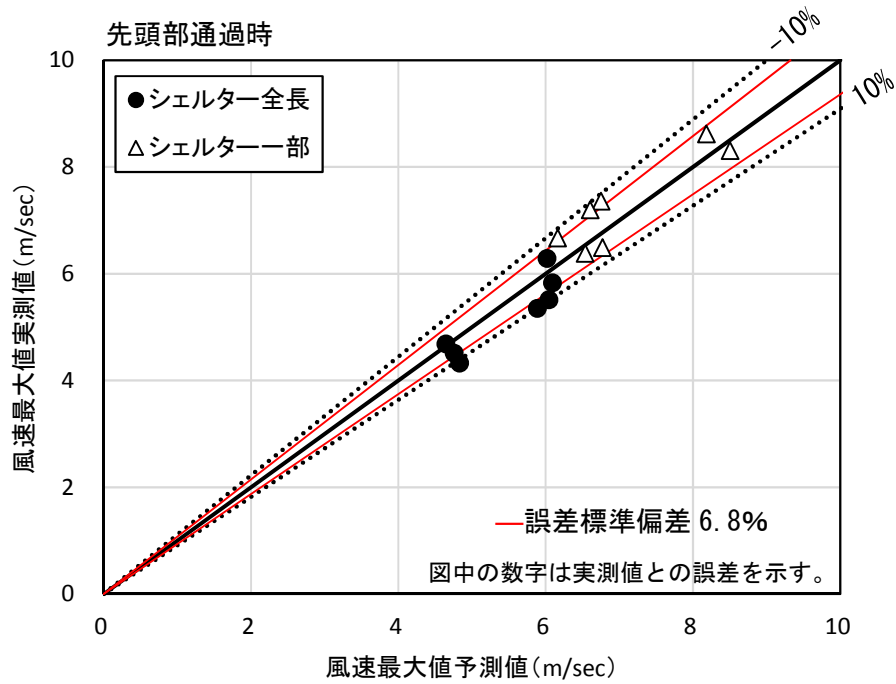


図 3-27 風対策シェルター設置時の風速最大値予測値と風速最大値実測値の関係

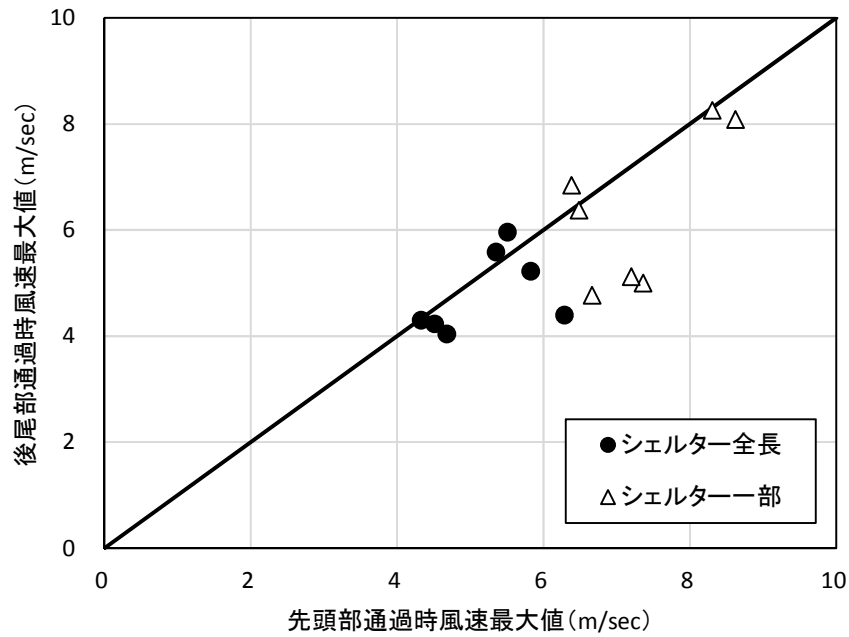


図 3-28 先頭部通過時風速最大値と後尾部通過時風速最大値の比較

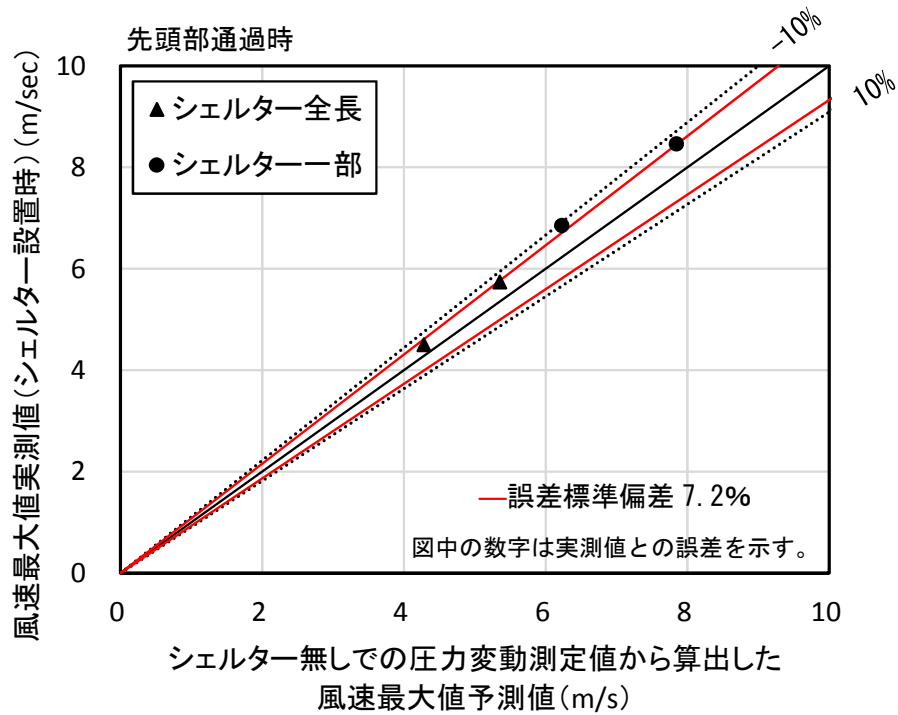


図 3-29 風対策シェルター無しでの圧力変動測定値から算出した風速最大値予測値と風対策シェルター設置時の風速最大値実測値の関係

3. 3. 7 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較

風対策シェルター端部の圧力変動から式(3-7)を用いてシェルター設置時の列車風を概ね予測できることを確認した。そこで、実測値と予測値とで列車風時刻歴波形を比較した。両者を比較した代表波形を図 3-30 に示す(付属資料 3 に全列車風時刻歴波形の比較を示す)。図より先頭部通過時について、両者の波形形状はほぼ同じであることが分かる。また、風対策シェルターが無い状態でも、シェルターを設置した際に端部となる位置で圧力変動を測定すれば、その圧力差積分値とシェルター長さからシェルター設置時の列車風を概ね予測できることを確認した。そこで、実測値と風対策シェルターが無い状態での圧力変動測定結果から算出した予測値とで列車風時刻歴波形を比較した。両者を比較した代表波形を図 3-31 に示す。図 3-30 同様、先頭部通過時について、両者の波形形状はほぼ同じであることが分かる。

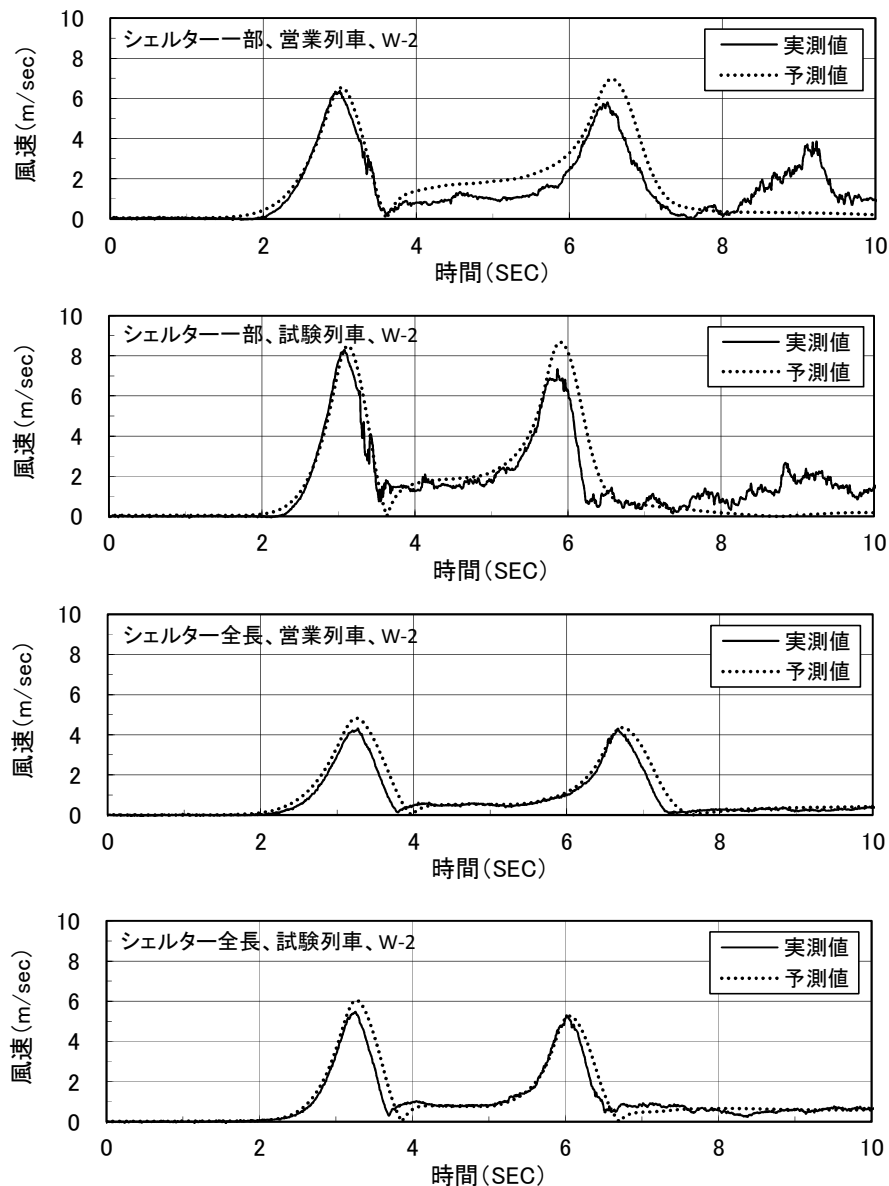


図 3-30 実測値と予測値との列車風時刻歴比較

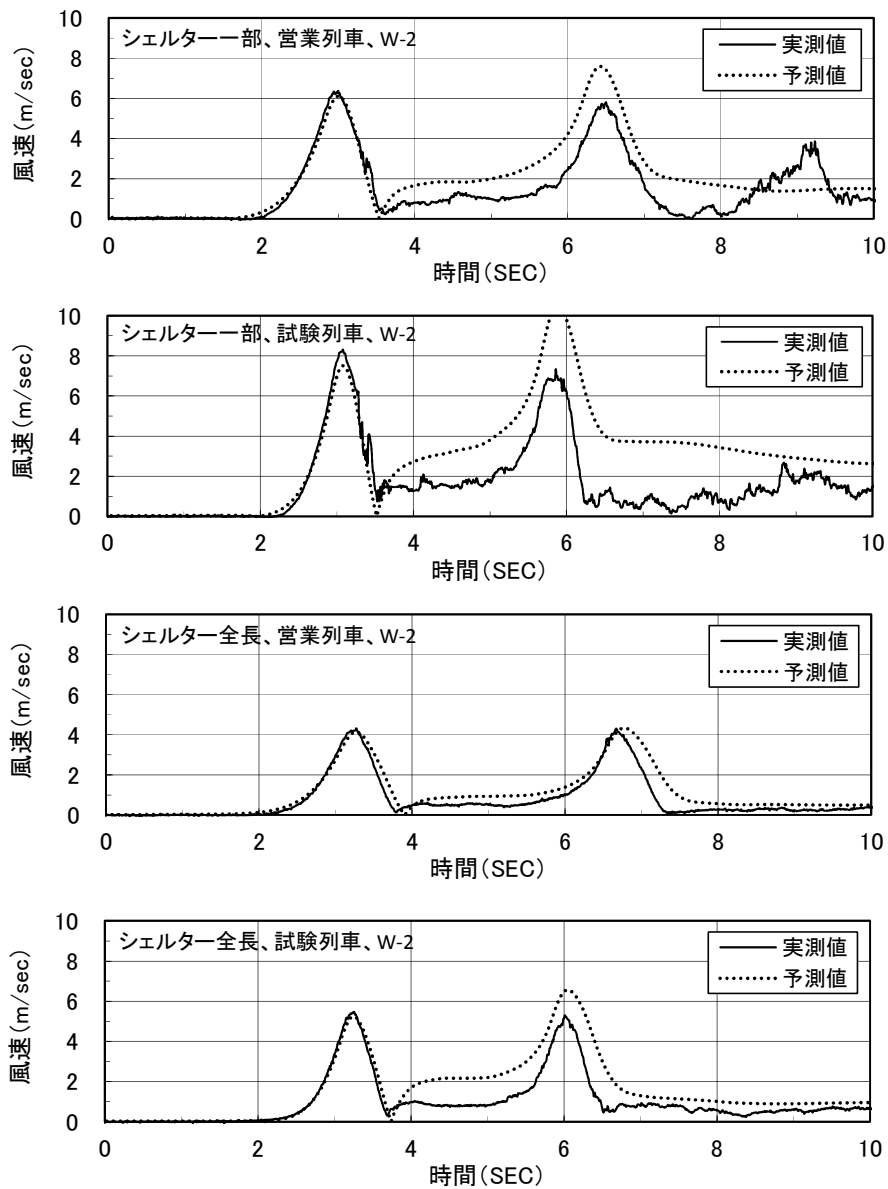


図 3-31 実測値と風対策シェルターが無い状態での圧力変動測定結果から算出した予測値との列車風時刻歴比較

3. 3. 8 列車速度の影響

本測定では、高速走行する試験列車の測定データが得られたので、営業列車の測定データから速度向上時の列車風を予測する手法について検討した。図 3-32 には各ケースにおける試験列車と営業列車との列車速度比率と先頭部通過時の風速最大値比率との関係を示す。各比率は、通過速度がほぼ等しい列車のみを対象とし、列車速度と先頭部通過時の風速最大値の平均値からそれぞれ算出した。図より列車速度比率と風速最大値比率はほぼ等しく、営業列車の測定データから速度向上時の列車風を予測することが可能であることが分かる。これは列車近傍で発生する列車風とも傾向が一致する¹¹⁾。

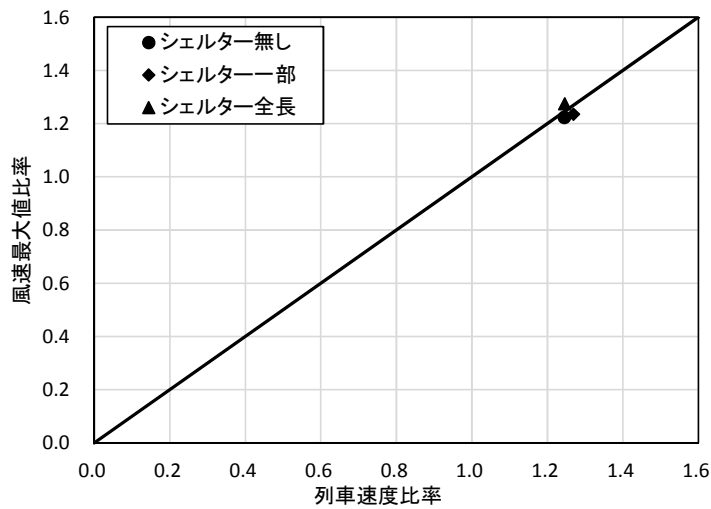


図 3-32 列車速度比率と風速最大値比率の関係（試験列車/営業列車）

3. 4 列車風の安全性評価

3. 4. 1 はじめに

前節において、圧力変動測定結果から階段部等における風速最大値を予測できることを確認した。そこで、本節では風速最大値から安全性を評価する方法について検証した。

3. 4. 2 安全性評価手法および測定方法

人間工学的な見地から列車風により人体が受ける力学的影響を加味した安全性評価法が提案されている¹⁴⁾。文献¹⁴⁾では、人の姿勢が不安定になり転倒したりする危険があるかどうかに着目し、床荷重水平成分（踏ん張る力）を風速に対する抗力として評価している。床荷重水平成分のピーク値が 30N を超えると床荷重垂直成分の変動が大きくなり上下方向の動き（踵が浮く動き）が生じることから、床荷重水平成分が 30N に達する風速を列車風に対する基準値としている。そこで、風速最大値と式 (3-10)¹⁴⁾を用いて算出した床荷重水平成分最大値の関係について、階段部等での風速が大きくなる橋上駅で検証した。

$$F(s) = K \frac{(2\pi f_n)^2}{s^2 + 4\zeta\pi f_n s + (2\pi f_n)^2} U_2(s) \quad \dots (3-10)$$

F : 荷重水平成分のラプラス変換

U_2 : 風速の二乗のラプラス変換

K : ゲイン (=0.28)

ζ : 減衰比 (=0.17)

f_n : 固有周波数 (=1.07) (Hz)

測定を実施した橋上駅は前節のE駅に加えて、F駅とG駅である。図 3-33 にF駅の測定位置図、図 3-34 にG駅の測定位置図を示す。各駅、上りホーム、下りホーム2箇所のエスカレーターで測定を行い、測定対象列車は上下通過列車とした。測定方法は「3. 2. 2 測定方法」と同じである。

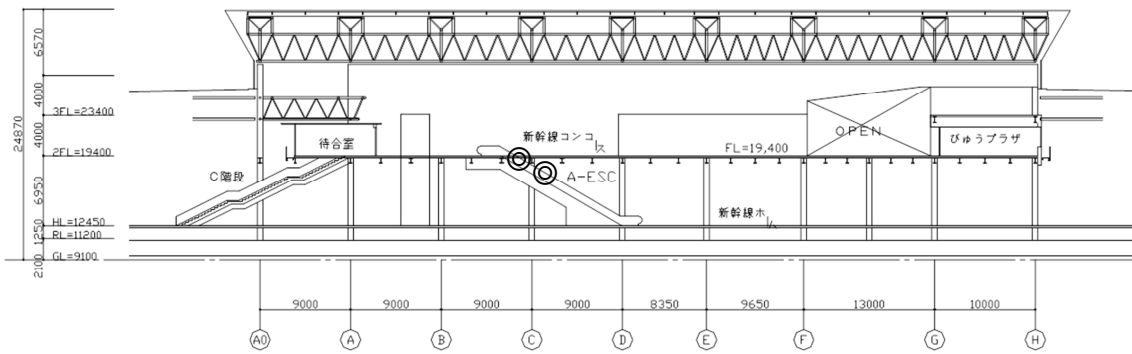


図 3-33 F 駅測定位置図

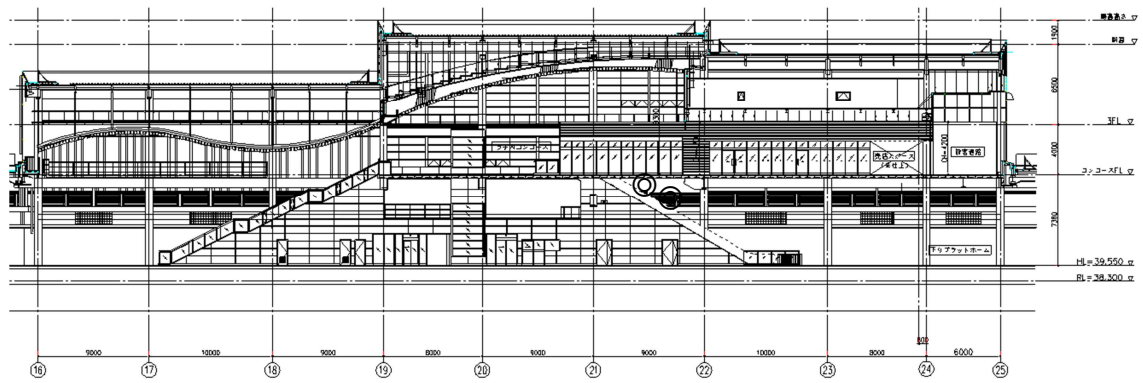


図 3-34 G 駅測定位置図

凡例
 ◎風速計

3. 4. 3 安全性評価結果

図 3-35 に風速最大値および床荷重水平成分最大値の代表波形、図 3-36 に風速最大値と床荷重水平成分最大値の関係を示す。図より、風速最大値が 9m/s 以下であれば床荷重水平成分最大値が基準値 30N 以下となるが、例えば基準値付近に風速最大値 9m/s~12m/s のデータが分布しており、データが広範囲に分布していることが確認できる。これは、測定サンプリングが 0.01 秒であり、風速が瞬間的に大きくなっている場合は人体へ影響しないことが要因として考えられる。そこで、平均風速を算出する時間（0.05 秒、0.1 秒、0.2 秒、0.5 秒の 4 ケース）をパラメータとして、平均風速最大値と床荷重水平成分最大値の関係を把握することとした。それを図 3-37 に示す。図中の近似曲線は放物線であるが、図より、0.2 秒平均時にばらつきが最も小さく、平均風速最大値（0.2 秒平均）が 8.5m/s 以下であれば、床荷重水平成分最大値が基準値 30N 以下となることが確認できる。これは既往の研究³²⁾とも傾向が一致する。

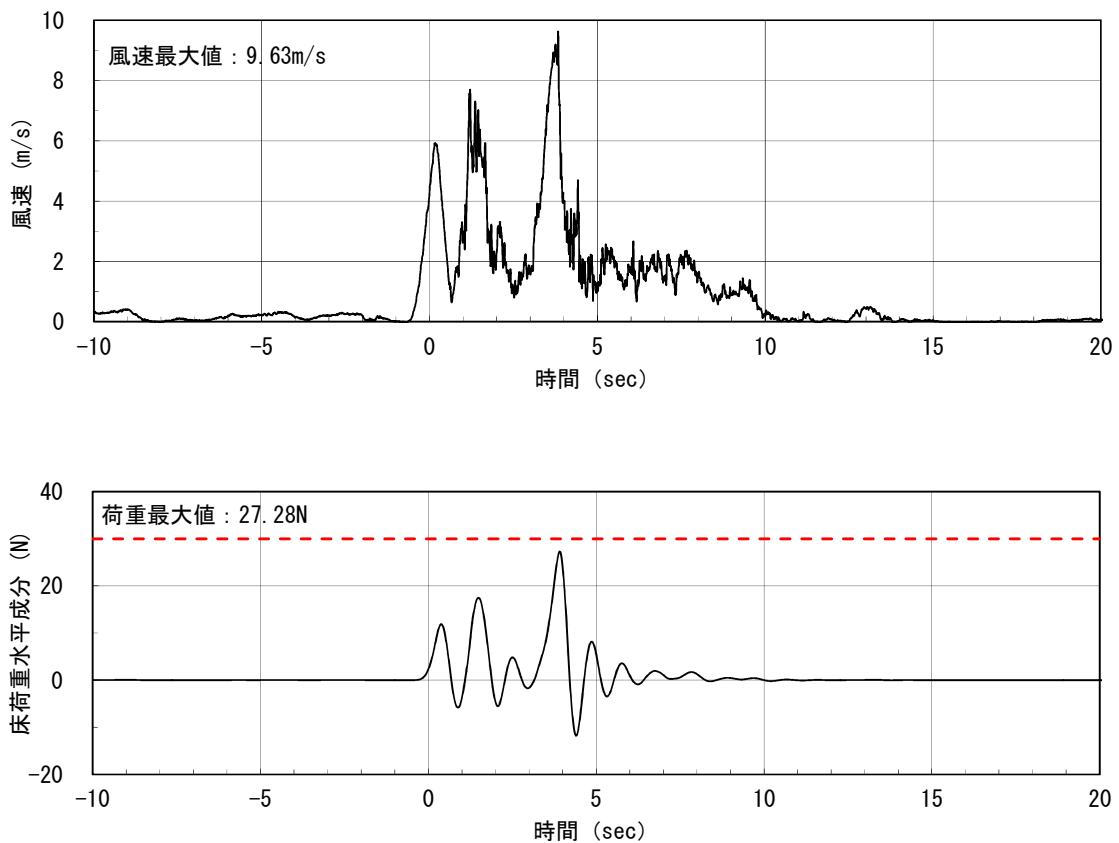


図 3-35 風速実測値と床荷重水平成分の代表波形（E 駅）

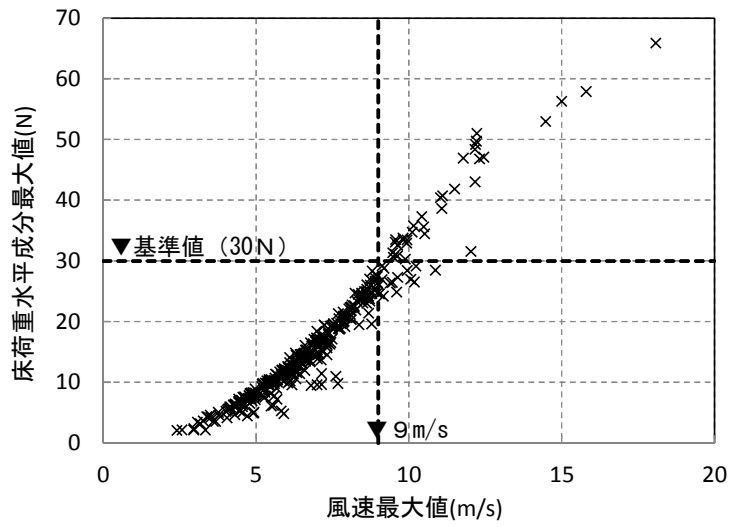


図 3-36 風速最大値と床荷重水平成分最大値の関係

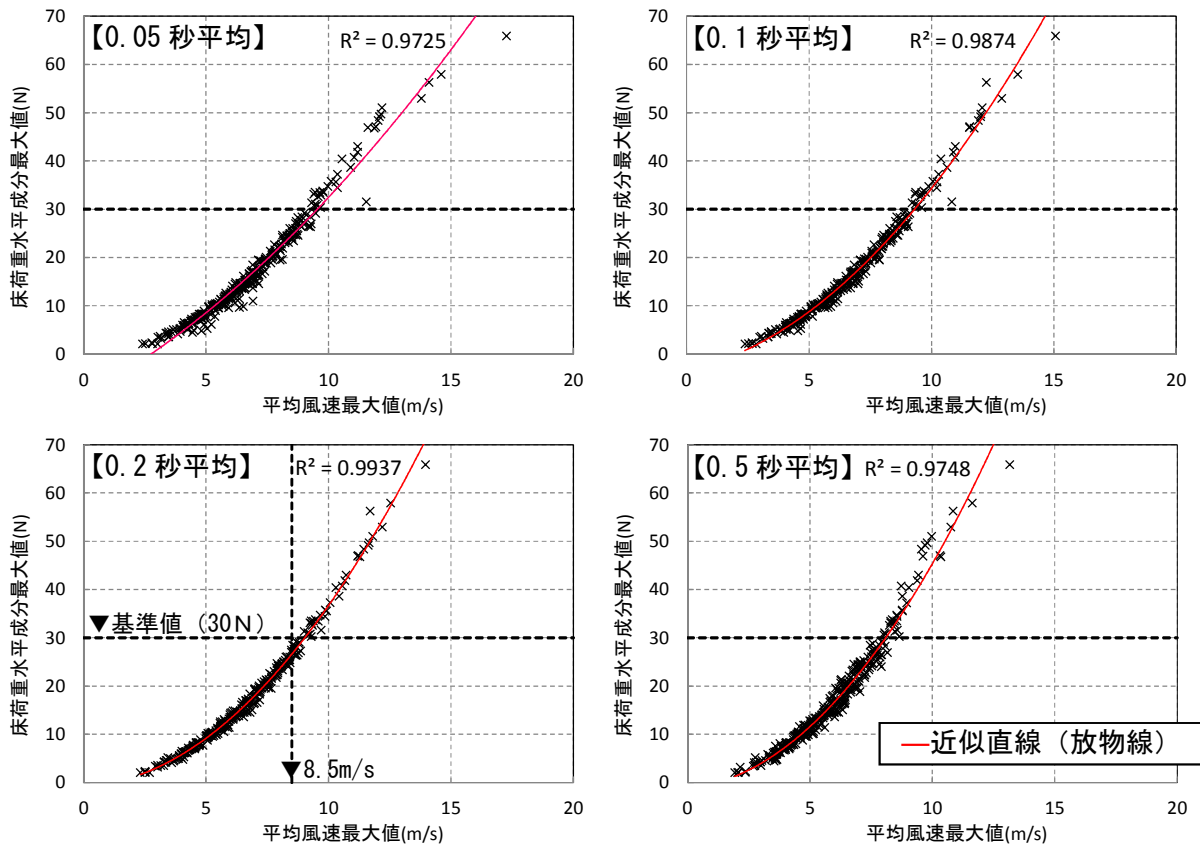


図 3-37 平均風速最大値と床荷重水平成分最大値の関係

3. 5 まとめ

第3章では、既存駅の階段部等で発生する列車風について、圧力変動測定結果から評価するとともに、列車風低減対策を提案し、対策時の列車風を評価することを試みた。その結果、一様な太さの管路の中の非定常流と仮定した評価式に着目し、列車風低減対策として管路長さの延伸を提案した。提案した評価式を適用することにより、管路を設置することなく、1割程度の誤差で対策時の列車風最大値を予測できることを確認した。また、安全性評価法による検討を行い、平均風速最大値（0.2秒平均）が8.5m/s以下であれば基準値以下となることを確認した。

第4章 結論

4.1 本研究の結論

本研究では、全覆上家駅の圧力変動について、一次元成分と三次元成分とに分離して評価する方法について検討し、圧力変動最大値の評価式を提案した。また、既存駅の階段部等で発生する列車風について、圧力変動測定結果から評価するとともに、列車風低減対策を提案し、対策時の列車風を評価することを試みた。以下に、本研究で得られた知見を示す。

【全覆上家駅で発生する圧力変動評価】

- 1) 全覆上家駅の圧力変動の特性として、後尾部通過時よりも先頭部通過時の方が大きいこと、特定の駅において、開口率と圧力係数最大値は線形関係であること、駅舎断面積が小さくなると圧力変動は大きくなるという知見を得た。また、圧力変動は速度の2乗に比例し、明かり区間同様の評価式を適用できることを確認した。
- 2) 小断面の全覆上家駅の圧力変動について、対面で測定することによって、断面内で一様な一次元成分と列車からの距離に依存する三次元成分の分離を試みた。その結果、波形の形状から両者に分離できること、圧力変動最大値を評価する上で、一次元成分が支配的であり、遠隔側は近接側よりもより支配的であること、開口率が大きくなるほどその影響は小さくなるという知見を得た。
- 3) 圧力変動最大値を単純和で評価するために、圧力変動最大値発生時の一次元成分および三次元成分との和からなる評価式の構築を試みた。一次元成分最大値については、開口率と一次元成分の圧力係数最大値/ $R(2-R)$ とは線形関係になるという知見を得た。その関係から評価式を導き、その結果、車両種別に依存しないこと、1割程度の誤差で評価できることを確認した。また、圧力変動最大値発生時の一次元成分と一次元成分最大値との比率 α は車種や開口率に依存せず、ほぼ一定値になることを確認した。ただし、 α は列車中心から壁面までの距離に依存し、小断面駅では近接側と遠隔側で異なり、遠隔側では圧力変動の最大値と一次元成分の最大値の発生時間は等しく、ほぼ1.0になることを確認した。
- 4) 三次元成分最大値について、列車中心から壁面までの距離の2乗に反比例すると仮定して車両種別ごとに評価式を導いた。その結果、開口率の影響は小さいこと、2割程度の誤差で評価できることを確認した。また、圧力変動最大値発生時の三次元成分と三次元成分最大値との比率 β は車種や開口率に依存せず、ほぼ一定値になることを確認した。ただし、 α 同様に β は列車中心から壁面までの距離に依存し、小断面駅では近接側と遠隔側で異なることを確認した。
- 5) 車種の違いによる一次元成分と三次元成分の波形を比較した結果、一次元成分の圧力係数を $R(2-R)$ で除したものは、最大値だけではなく、波形の形状も同じであることを確認した。一方、三次元成分の圧力係数は最大値に加えて、波形形状も異なるこ

とを確認した。

- 6) 一次元成分と三次元成分との和からなる圧力変動最大値の評価式について、小断面駅については1割程度、大断面駅でも2割程度の誤差で評価できることを確認した。ただし、大断面駅の遠隔側では誤差が大きくなり、列車中心からの距離は14m程度が適用限界であることを確認した。

【階段・エスカレータで発生する列車風評価】

- 1) 階段部等で発生する列車風を評価するにあたり、一様な太さの管路の中の非定常流と仮定した、圧力差と管路長さをパラメータとする評価式に着目した。管路構成部分が明確な高架下駅で圧力変動と風速の実測を行い、風速の時刻歴波形と圧力差積分値の時刻歴波形について、波形が相似していることを確認した。また、階段部等の風速最大値は圧力差積分値最大値に比例し、管路長さに反比例する傾向を確認し、列車風低減対策として管路長さの延伸を提案した。
- 2) 列車風の大きい橋上駅のエスカレータに風対策シェルターを設置して管路を形成し、圧力損失を考慮しなくても実用上問題ないこと、管路が長くなるほど列車風が低減すること、管路端部の圧力変動から評価式を用いて先頭部通過時の列車風最大値を1割程度の誤差で予測できることを確認した。一方、後尾部通過時は誤差が大きくなった。ただし、先頭部通過時と後尾部通過時の列車風最大値を比較すると先頭部通過時の方が大きく、列車風最大値を評価する上で先頭部通過時が予測できれば問題ないことを確認した。
- 3) 橋上駅のエスカレータに風対策シェルターを増設する場合、列車風最大値は管路長さの概ね0.7乗に比例することを確認した。
- 4) シェルターが無い状態でも、シェルターを設置した際に端部となる位置で圧力変動を測定すれば、圧力差積分値最大値とシェルター長さからシェルター設置時の列車風最大値を1割程度の誤差で予測できることを確認した。また、列車風最大値は列車速度に概ね比例することを確認した。
- 5) 人間工学的な見地から列車風により人体が受ける力学的影響を加味した列車風の安全性評価法を橋上駅3駅の風速測定結果に対して適用した。その結果、平均風速最大値(0.2秒平均)が8.5m/s以下であれば、床荷重水平成分最大値が基準値である30N以下となることを確認した。

4. 2 本研究成果の導入

【導入済】

A 駅において、開口率と圧力係数最大値の関係を利用し、高速化時に現状と同程度の圧力変動となるように目標開口率を設定し、**図 4-1** に示す開口部を増設する改修工事を実施した。なお、A 駅については、改修工事計画時に開業後 20 年を超えていたが、これまで非構造部材について不具合が発生していなかったことから、現状と同程度の圧力変動に抑えれば問題ないと判断した。



図 4-1 A 駅開口部増設状況

【導入予定】

今後の高速化時において、非構造部材の耐久性評価時および改修時の目標開口率の設定時、列車風予測時および風対策シェルター長さの検討時に本研究成果を導入予定である。

なお、高速化時は、列車速度の向上と新しい車種の影響について検討する必要がある。速度向上時の影響については、本研究にて圧力変動は速度の二乗、列車風は速度に比例するという知見を得たことから、それらを加味して予測すれば問題ないと考える。一方、新しい車種の影響については、更なる高速化に向けて、先頭部形状はトンネル微気圧波の抑制を目的として、圧力変動が低減される方向に改善されることが想定される。そのため、車種 B のデータを使用して予測すれば安全側の評価となる。厳密に評価するためには、実測データが必要であるが、先頭部形状の影響は三次元成分のみであり、発生する圧力変動に対して大きな影響は無いと考えられる。

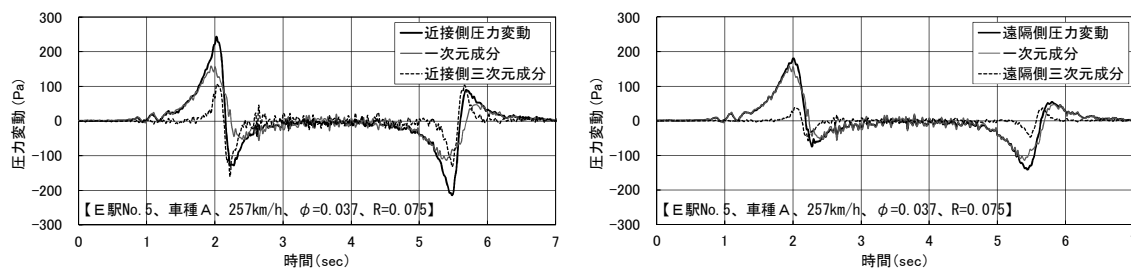
4. 3 今後の課題

本研究により全覆上家駅で発生する圧力変動や階段・エスカレータで発生する列車風の簡易評価が可能となった。しかしながら、本研究により課題を全て解決できているわけではなく、以下に示す課題を今後検討していくことにより、汎用性の拡大又は精度向上を図ることができると考えられる。

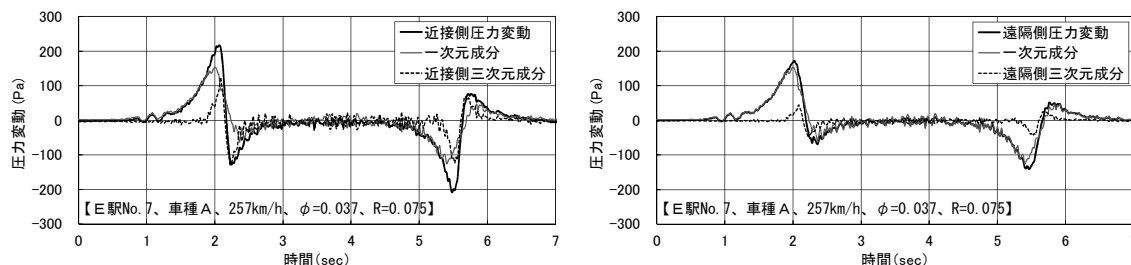
- 1) 本研究では、一次元補正係数 α および三次元補正係数 β と列車中心から壁面までの距離 r との関係性までは解明できなかったことから、汎用性の拡大を図るためには両者の関係を定式化する必要がある。
- 2) 本研究では、小断面駅を対象として測定を行い、簡易評価式を提案しているため、大断面駅では小断面駅と比較して誤差が大きくなる。そのため、対面での測定事例を増やすなどして、大断面駅での圧力変動評価式の精度を向上させる必要がある。なお、精度を向上させるためには、一次元成分の精度向上が必須であり、一次元成分圧力係数最大値と開口率の関係を深度化する必要がある。その際、開口率を分散させる必要があること、厳密に開口率を再現できることから、模型実験を実施するのが望ましい。
- 3) 本研究では、開口部が対称に設置されている駅を対象として圧力変動評価式を提案している。改修工事では開口部を非対称に設置した事例もあることから、汎用性の拡大を図るためには開口部を非対称に設置した場合の圧力変動評価式を構築する必要がある。
- 4) 本研究では、既設駅の改修を対象とし、ホーム階やコンコース階の圧力変動は実測により既知であることを前提にして列車風を評価している。実測データが無い新駅の設定へも適用拡大を図るためには、ホーム階やコンコース階の圧力変動の予測手法を確立する必要がある。
- 5) 本研究では、駅舎内での通過列車のすれ違いを考慮していない。すれ違いによって圧力変動は更に増大する可能性があるが、減多に起こらない現象であることから、繰り返し载荷に伴い非構造部材の不具合を誘発する圧力変動の評価の際には加味する必要は無いと考えられる。一方、階段部等で発生する列車風は旅客の安全確保につながることから、減多に起こらない現象ではあるものの、すれ違い時の影響を検証する必要がある。

付属資料 1 対面測定時の圧力変動波形

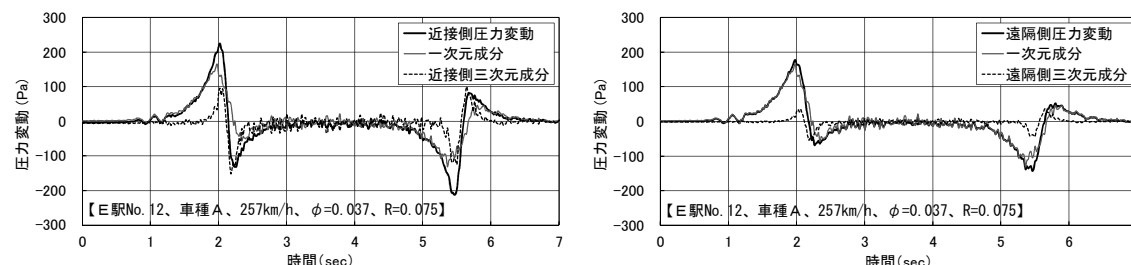
「2. 2. 4 測定結果の分析」において、式(2-3)、(2-4)を用いて、次元成分と三次元成分とを分離しているが、付図 1-1～1-22 には近接側と遠隔側の圧力変動の全時刻歴波形を示す。



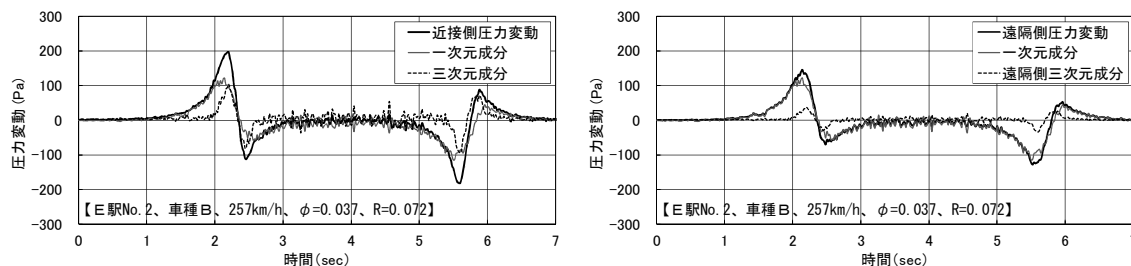
付図 1-1 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 5、車種 A)



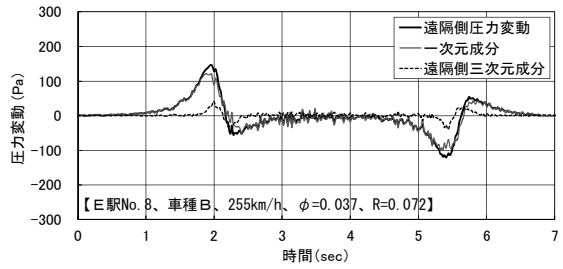
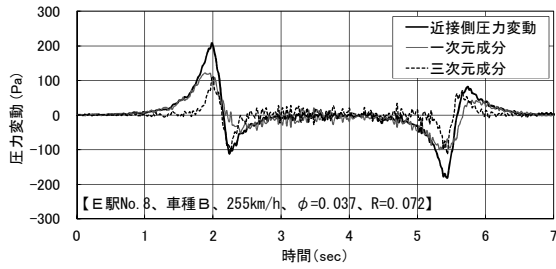
付図 1-2 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 7、車種 A)



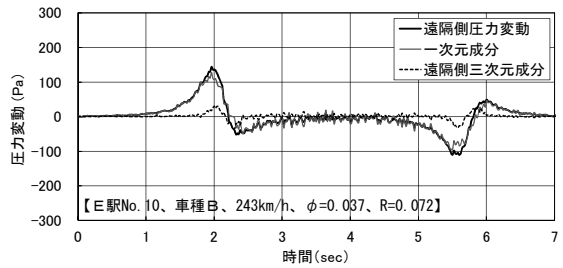
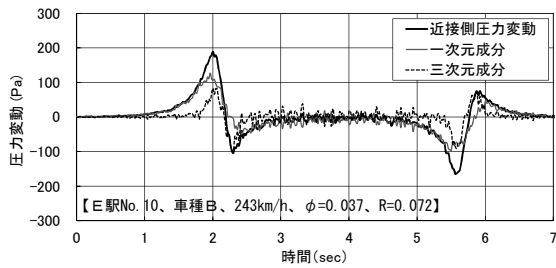
付図 1-3 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 12、車種 A)



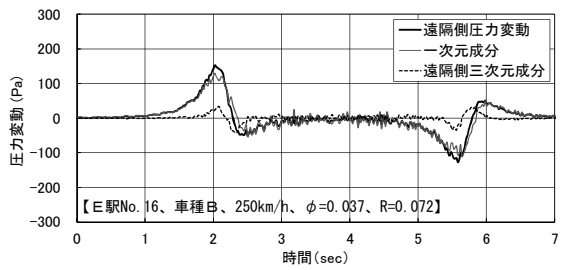
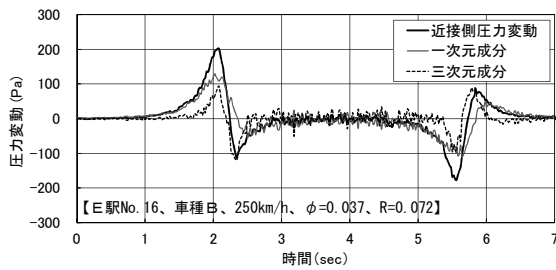
付図 1-4 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 2、車種 B)



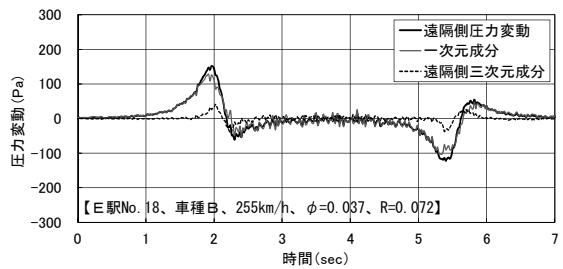
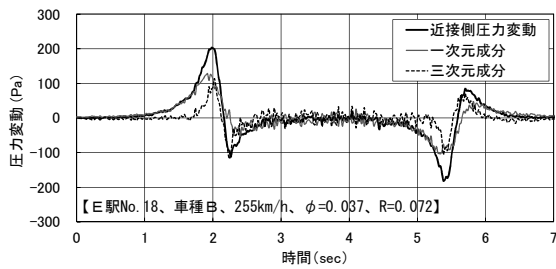
付図 1-5 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 8、車種 B)



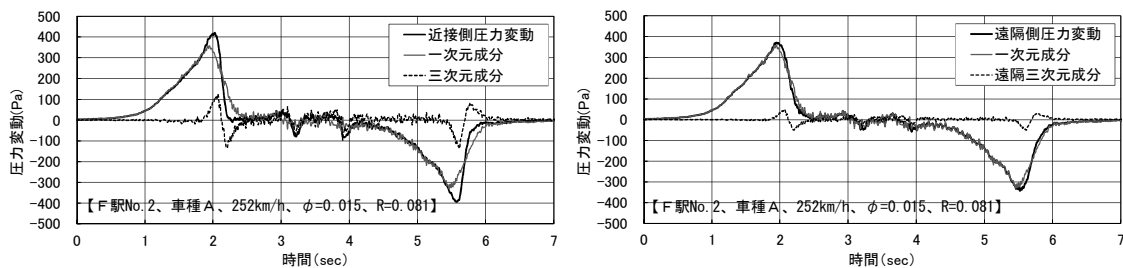
付図 1-6 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 10、車種 B)



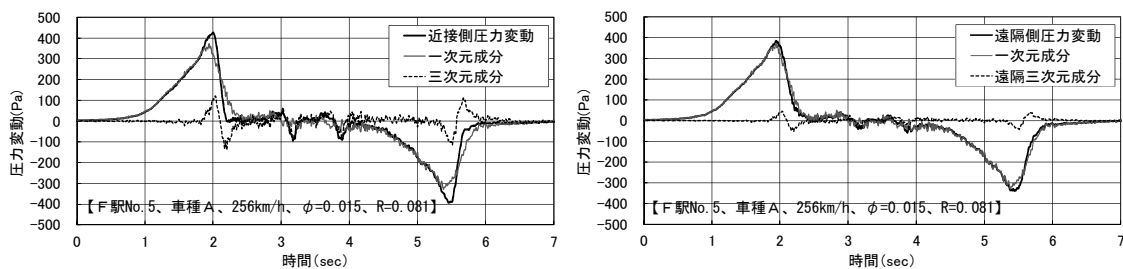
付図 1-7 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 16、車種 B)



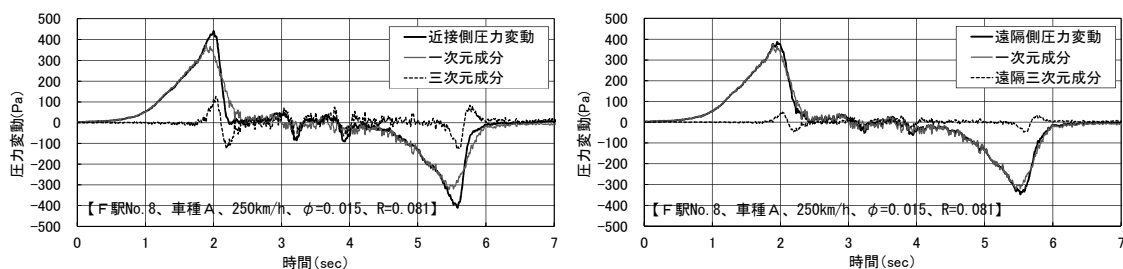
付図 1-8 E 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 18、車種 B)



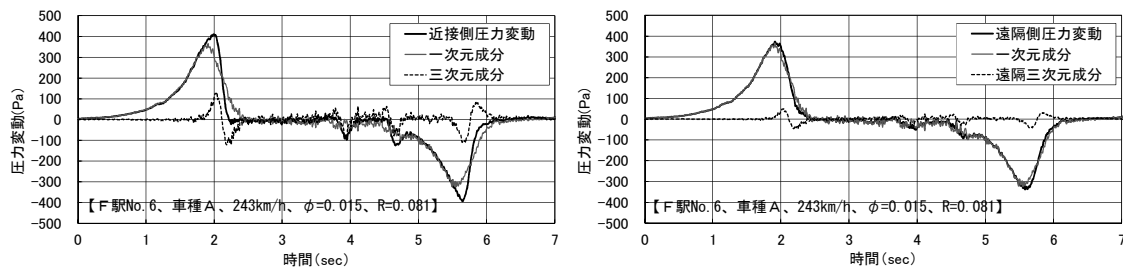
付図 1-9 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 2、車種 A)



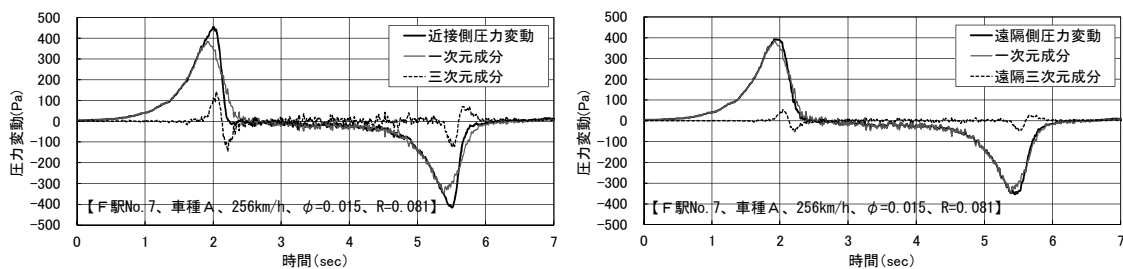
付図 1-10 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 5、車種 A)



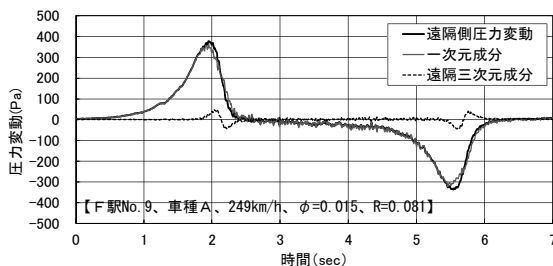
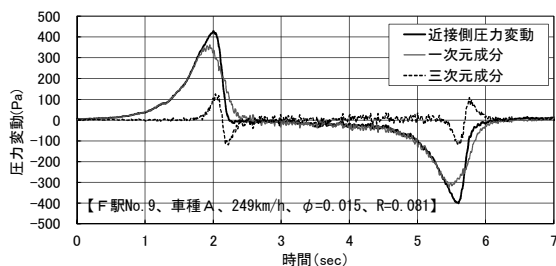
付図 1-11 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 8、車種 A)



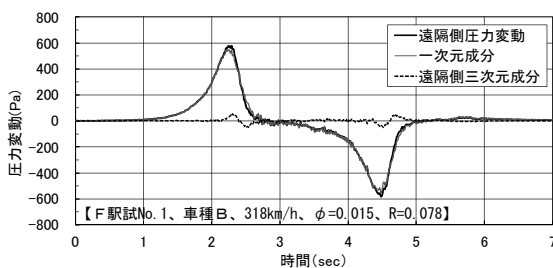
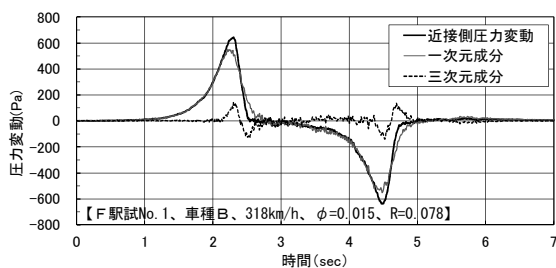
付図 1-12 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 6、車種 A)



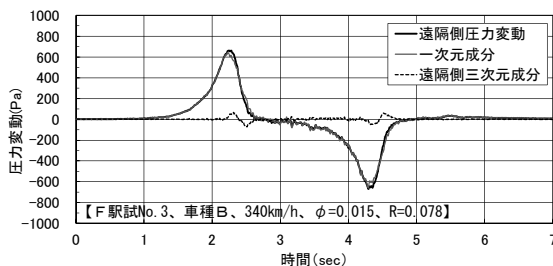
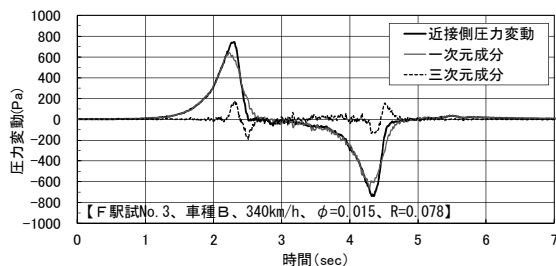
付図 1-13 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 7、車種 A)



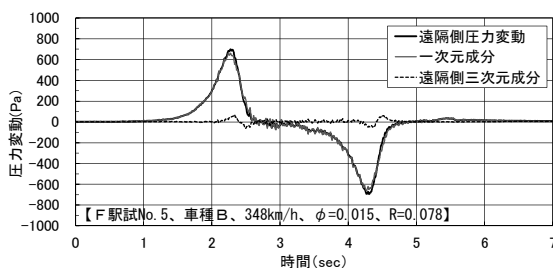
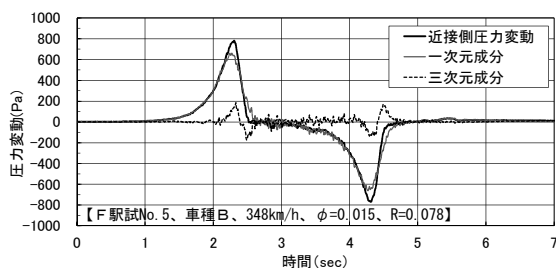
付図 1-14 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 9、車種 A)



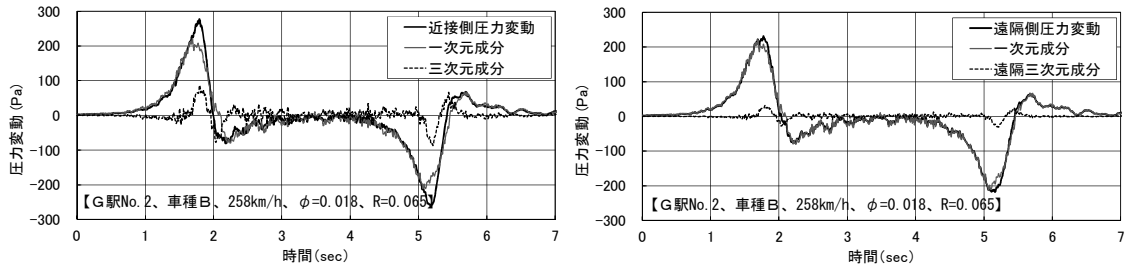
付図 1-15 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (試 No. 1、車種 B)



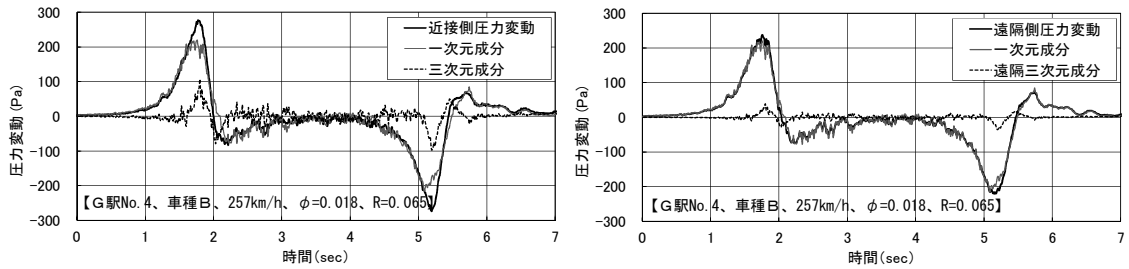
付図 1-16 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (試 No. 3、車種 B)



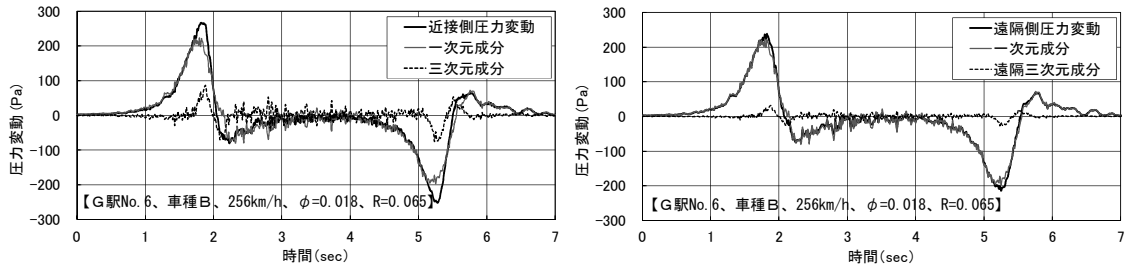
付図 1-17 F 駅対面測定時の圧力変動波形 (試 No. 5、車種 B)



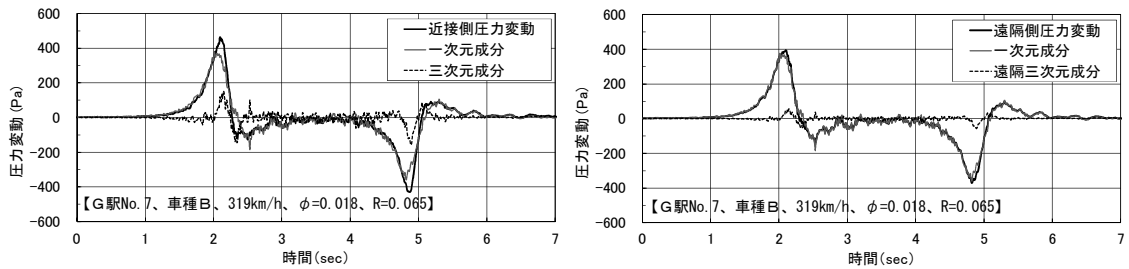
付図 1-18 G 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 2、車種 B)



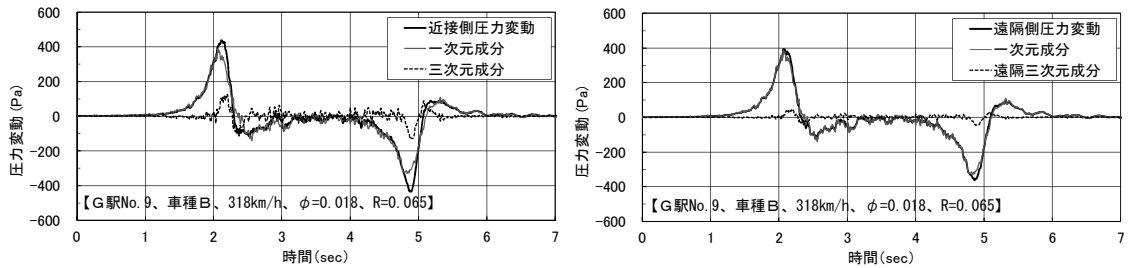
付図 1-19 G 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 4、車種 B)



付図 1-20 G 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 6、車種 B)



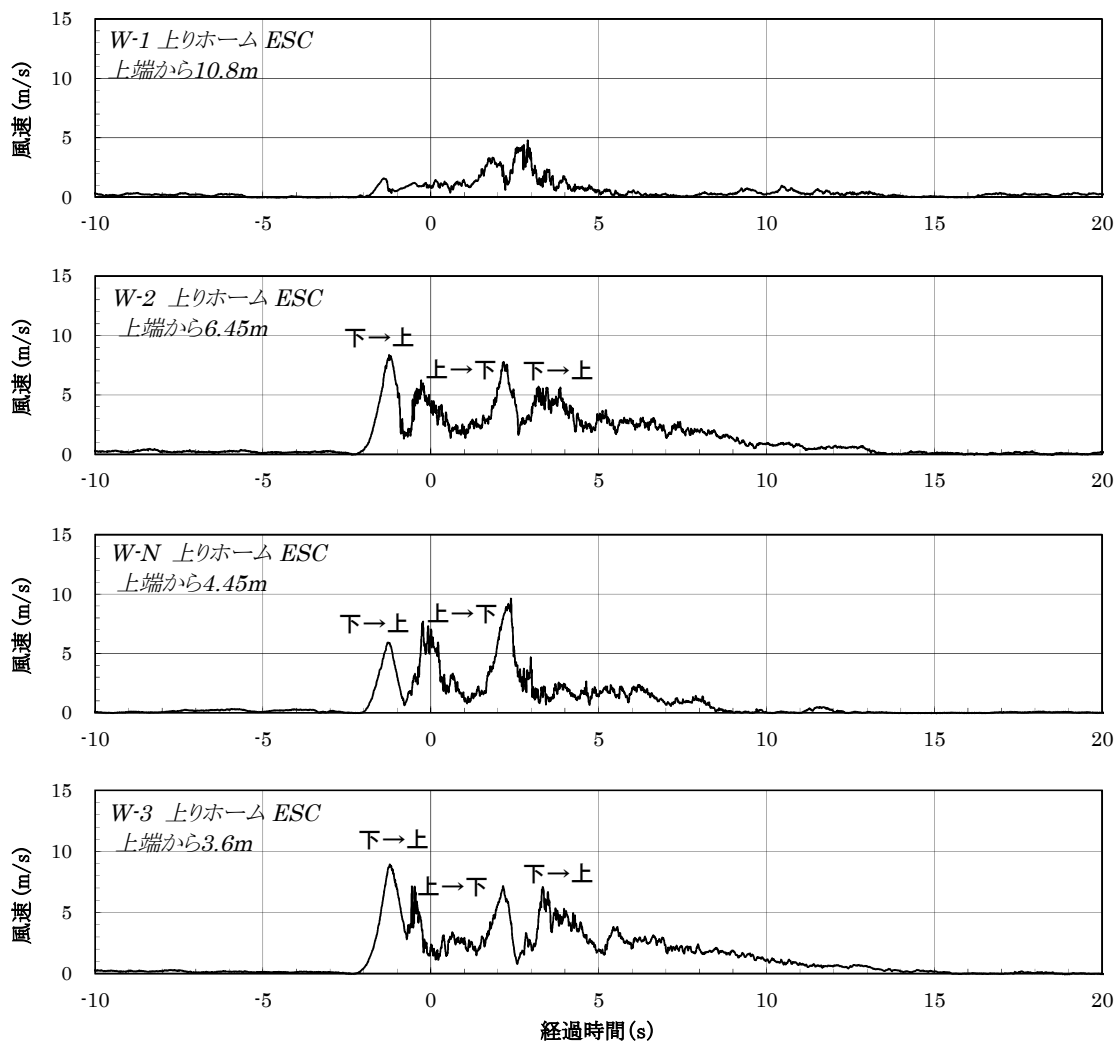
付図 1-21 G 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 7、車種 B)



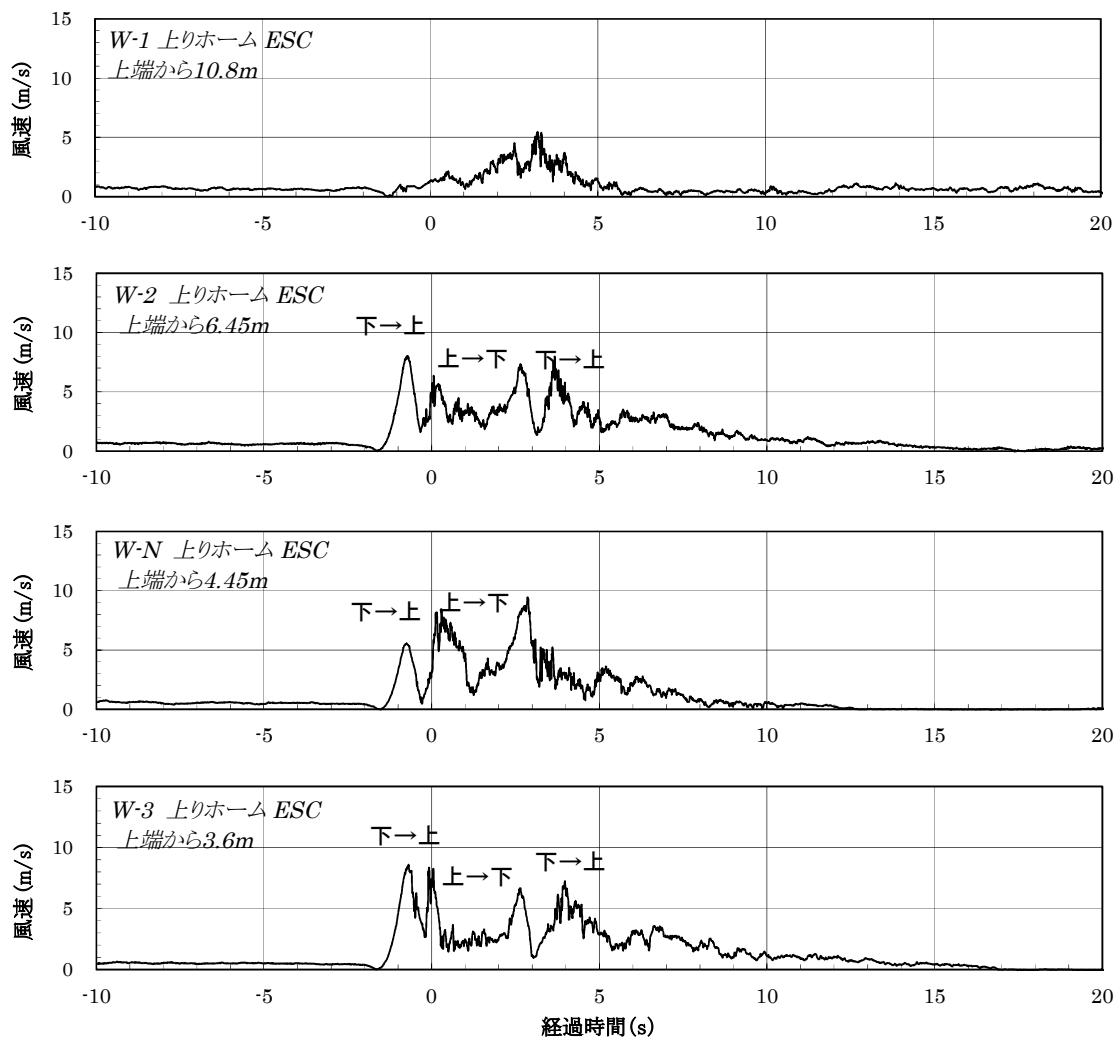
付図 1-22 G 駅対面測定時の圧力変動波形 (No. 9、車種 B)

付属資料2 風対策シェルター設置前後の列車風波形

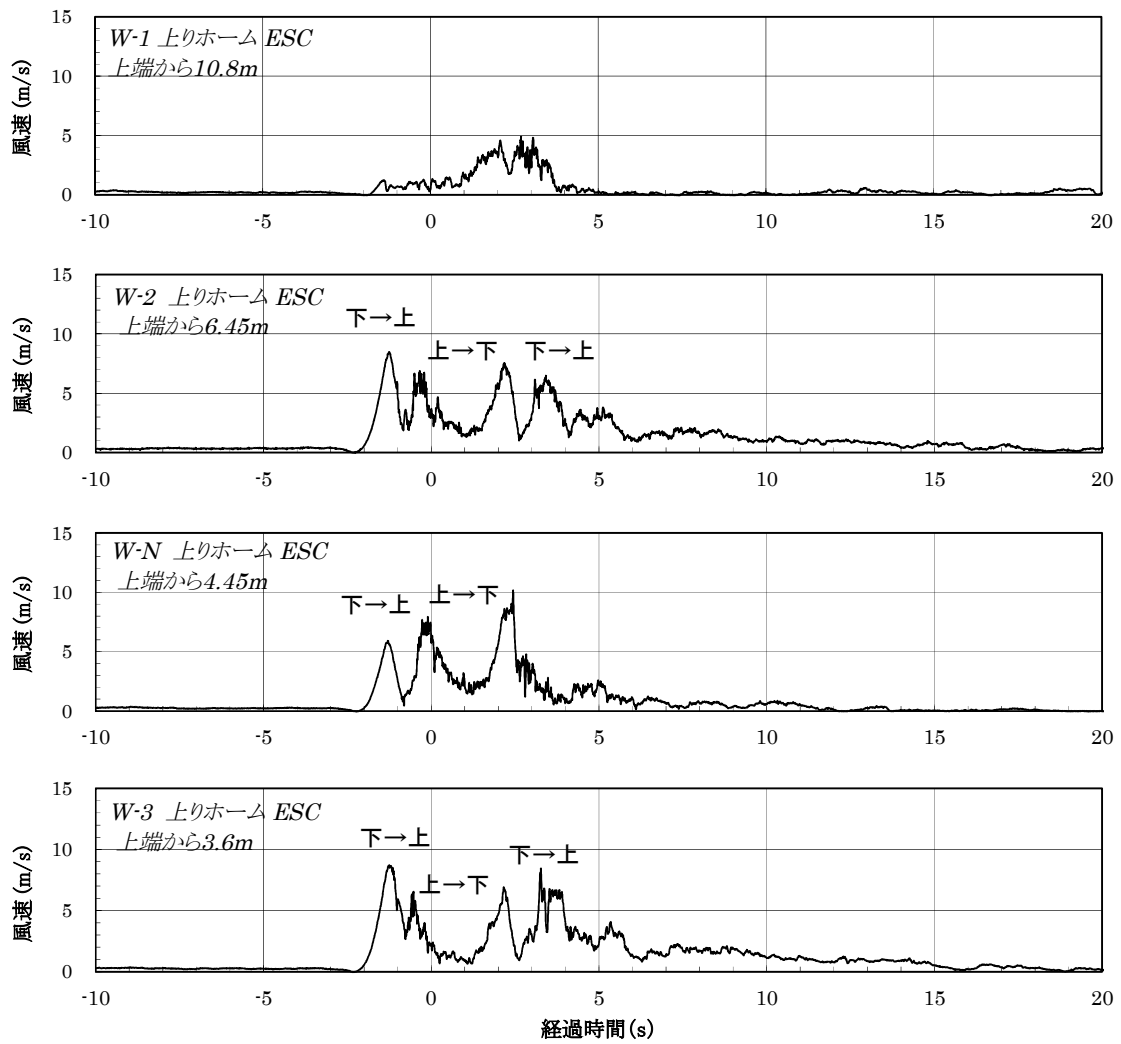
「3. 3. 3 風対策シェルター設置後の測定結果」において、風対策シェルター設置前後の列車風代表波形を示している。付図 2-1～2-9 にはシェルター無し全列車風波形、付図 2-10～2-16 にはシェルター一部全列車風波形、付図 2-17～2-23 にはシェルター全長全列車風波形を示す。



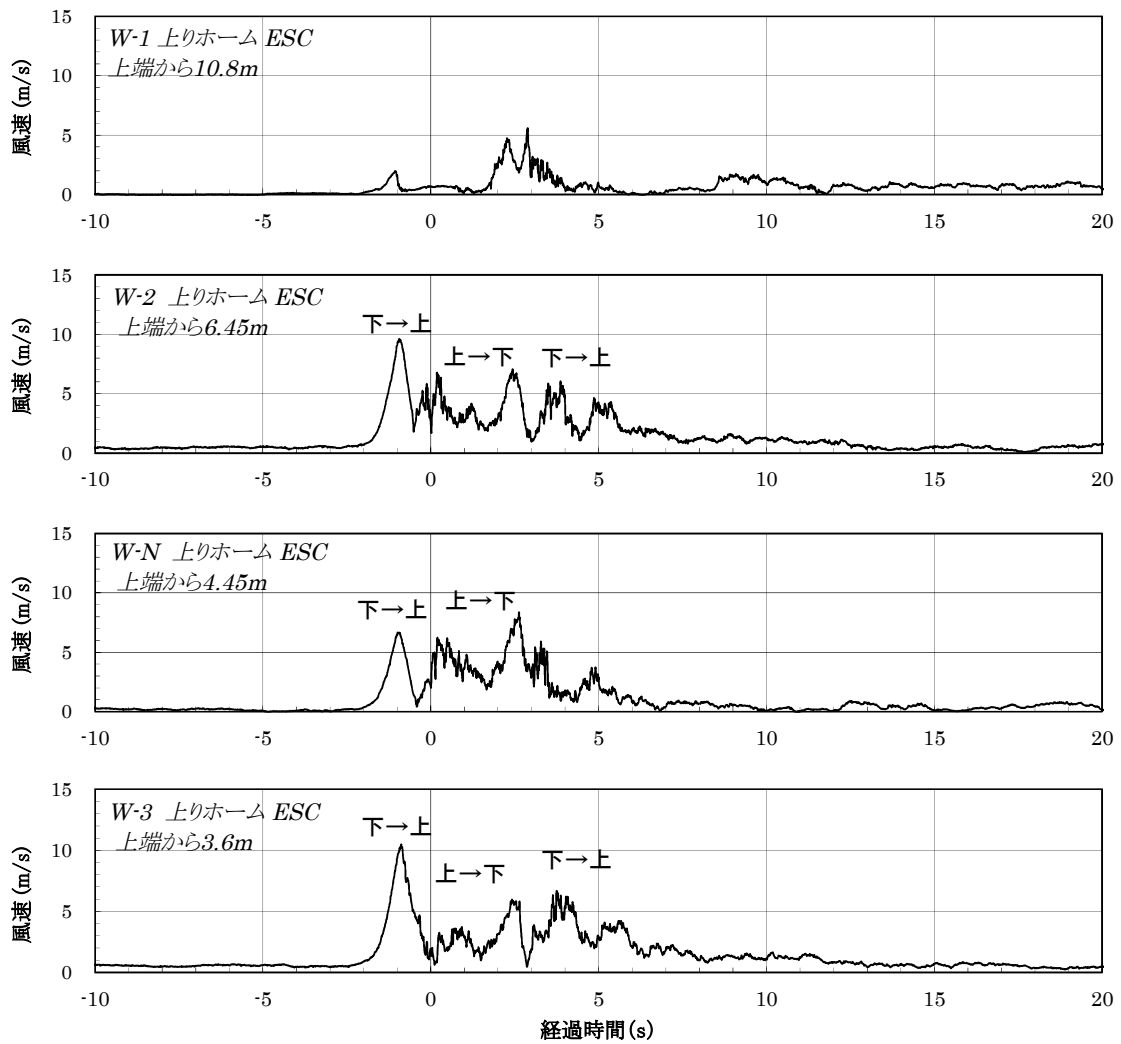
付図 2-1 シェルター無し列車風波形 (No. 2、上り、254km/h、営業列車)



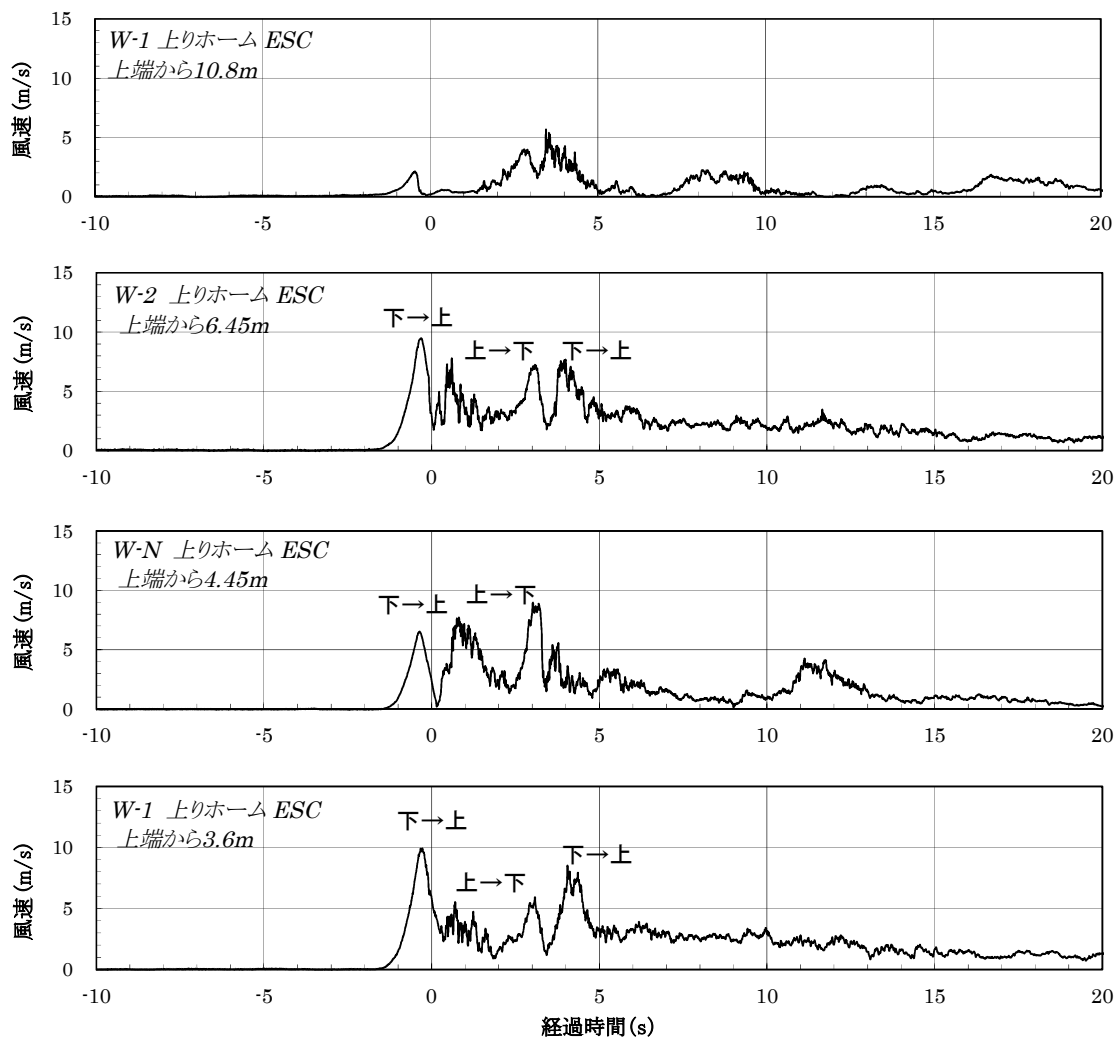
付図 2-2 シェルター無し列車風波形 (No. 3、上り、255km/h、営業列車)



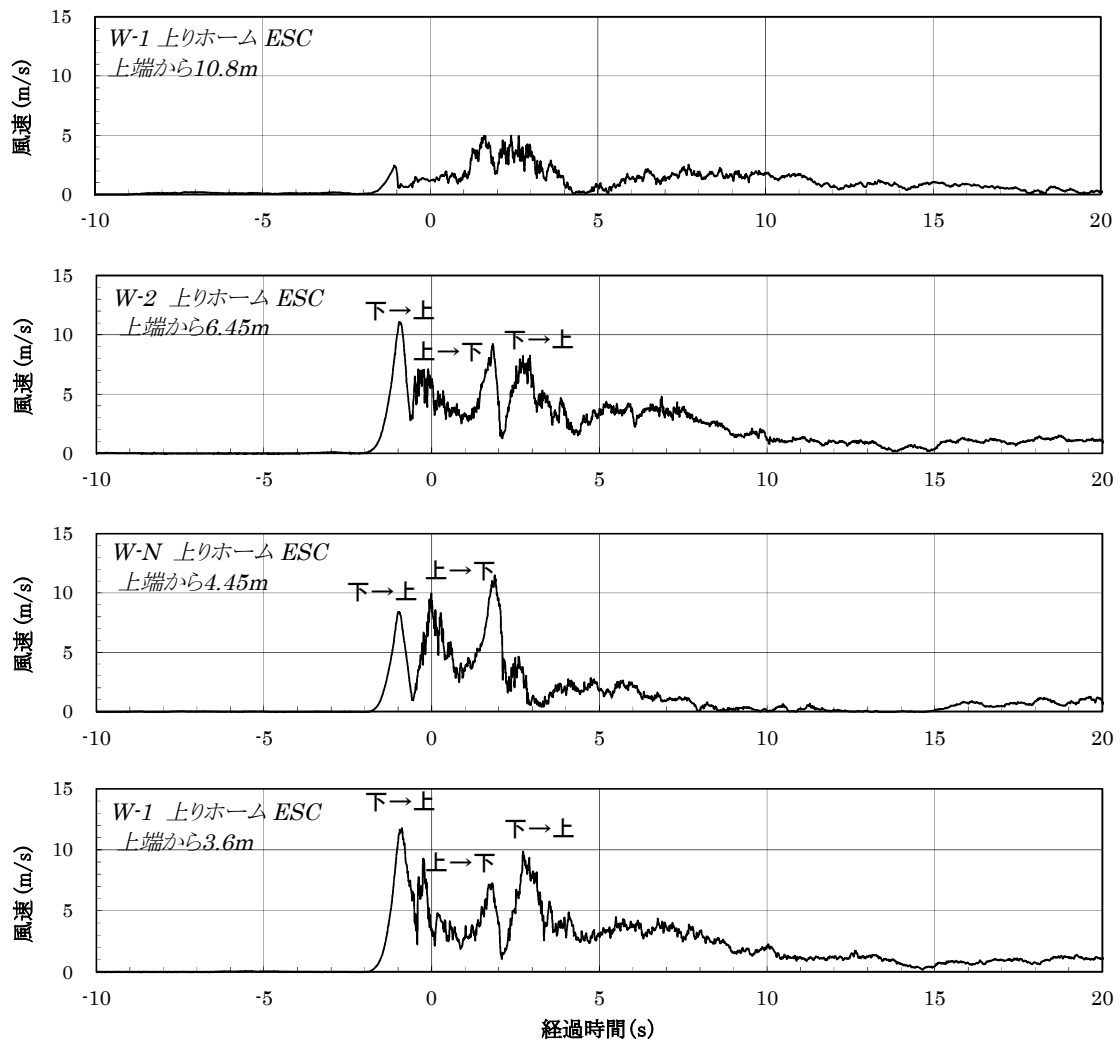
付図 2-3 シェルター無し列車風波形 (No. 5、上り、250km/h、営業列車)



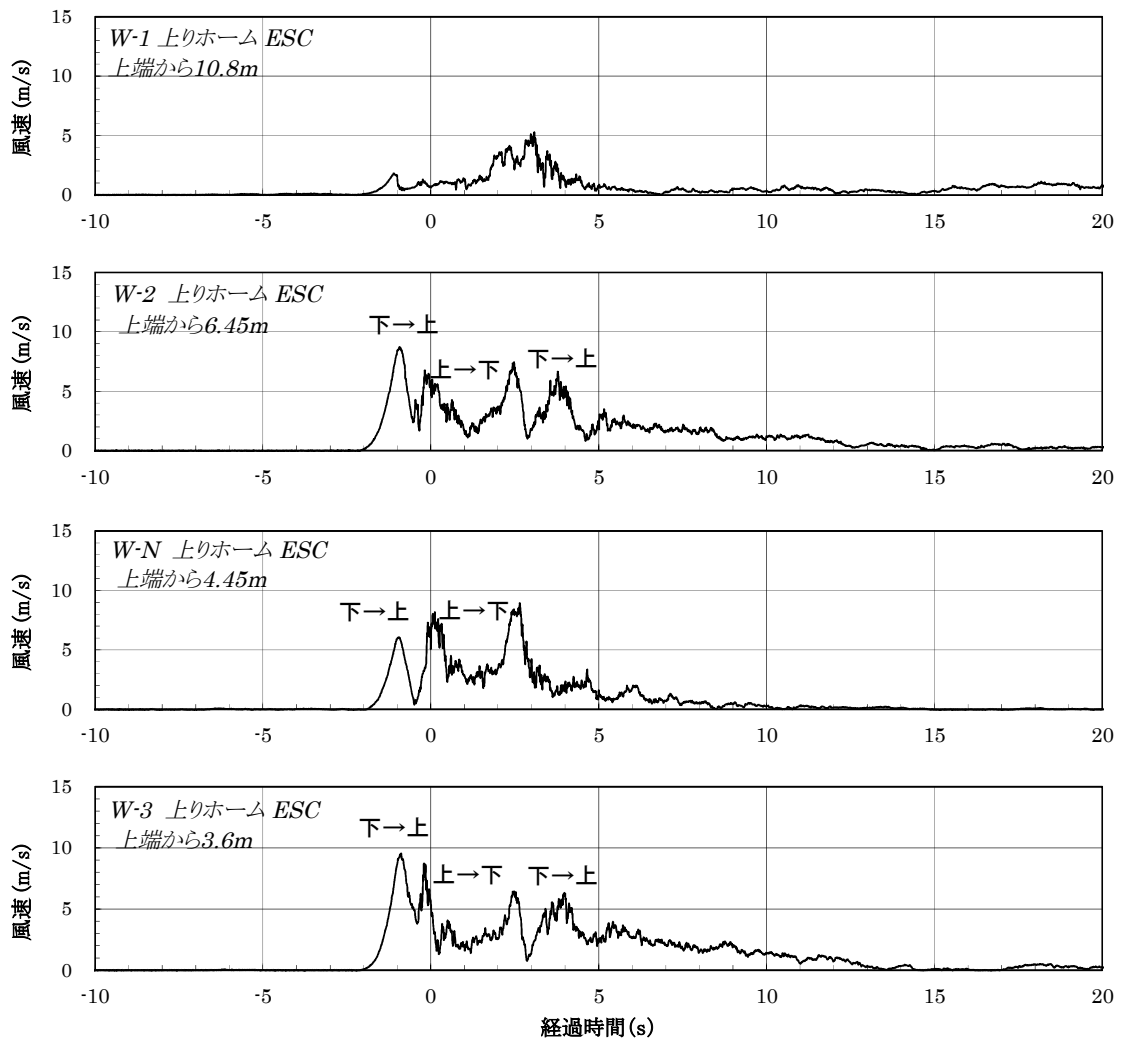
付図 2-4 シェルター無し列車風波形 (No. 6、上り、258km/h、営業列車)



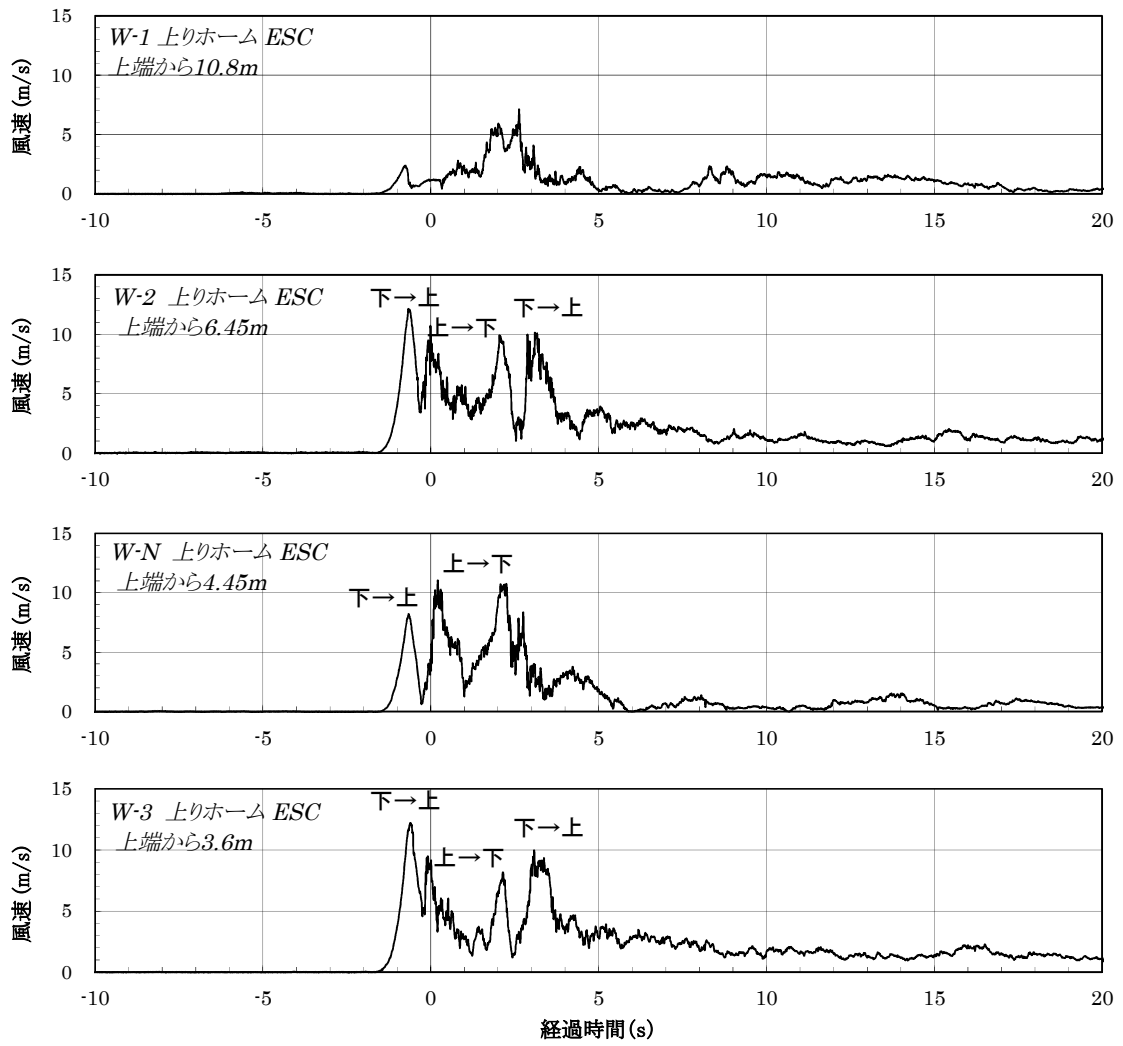
付図 2-5 シェルター無し列車風波形 (No. 9、上り、258km/h、営業列車)



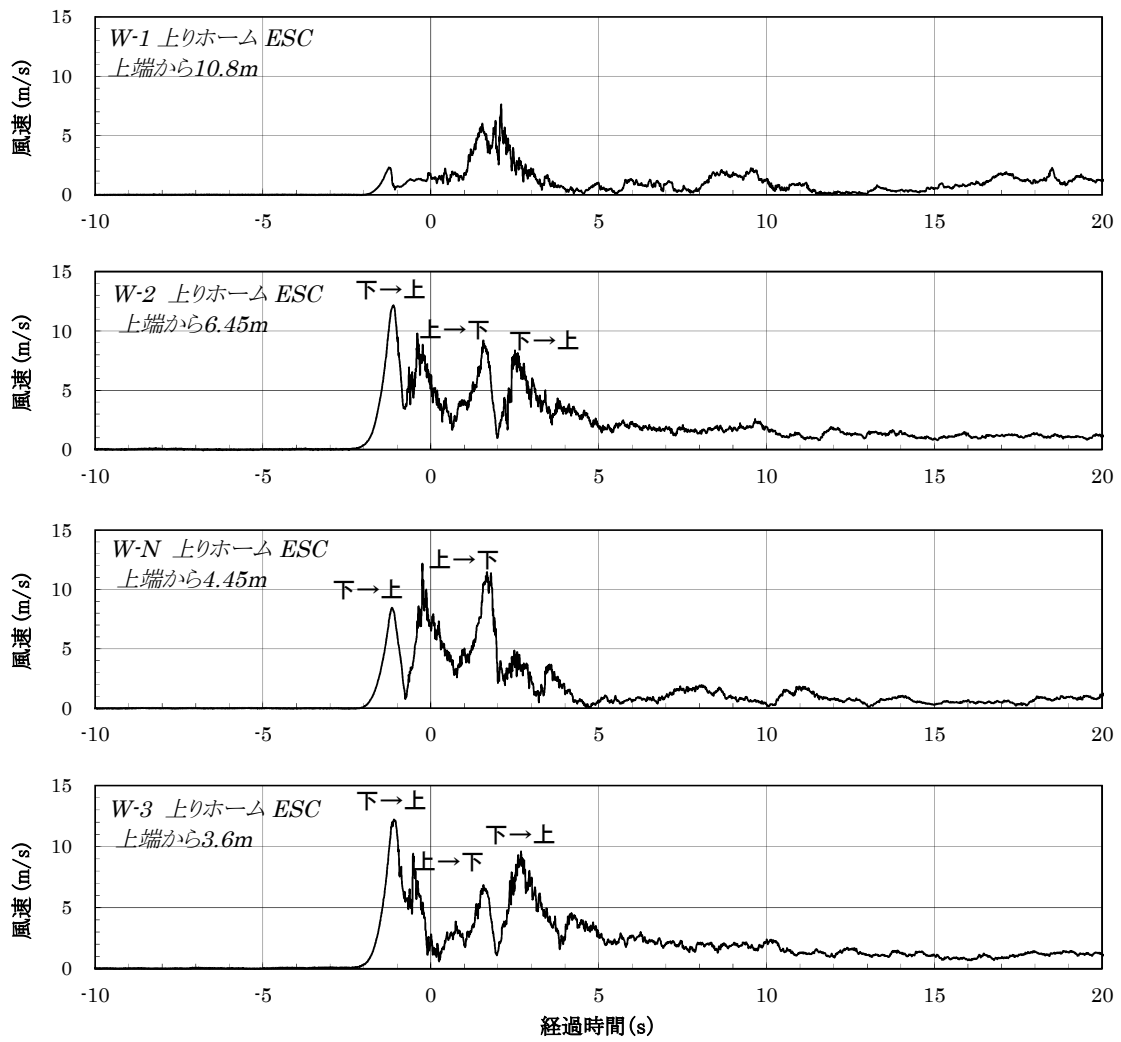
付図 2-6 シェルター無し列車風波形 (No. 11、上り、318km/h、試験列車)



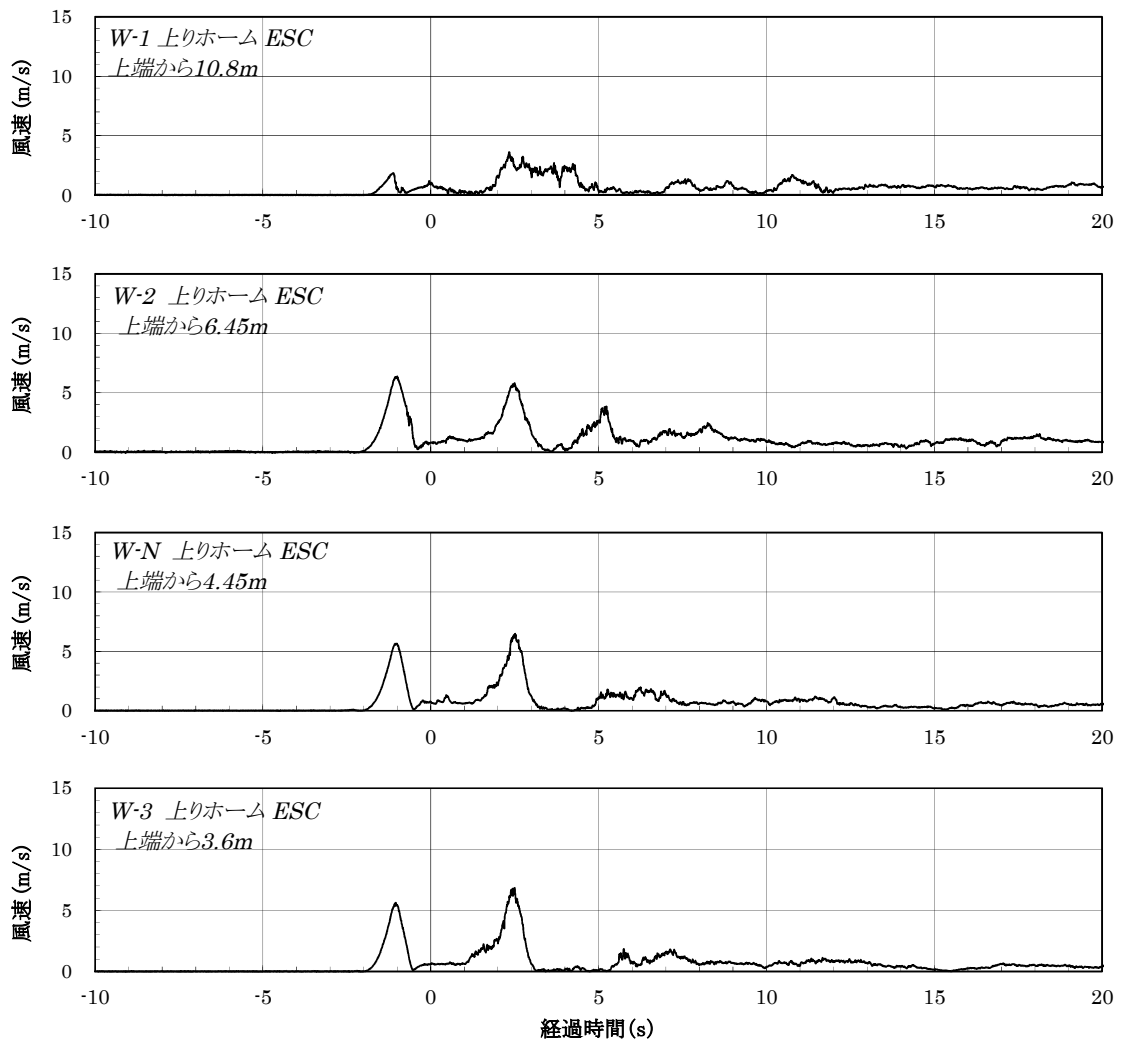
付図 2-7 シェルター無し列車風波形 (No. 12、上り、261km/h、営業列車)



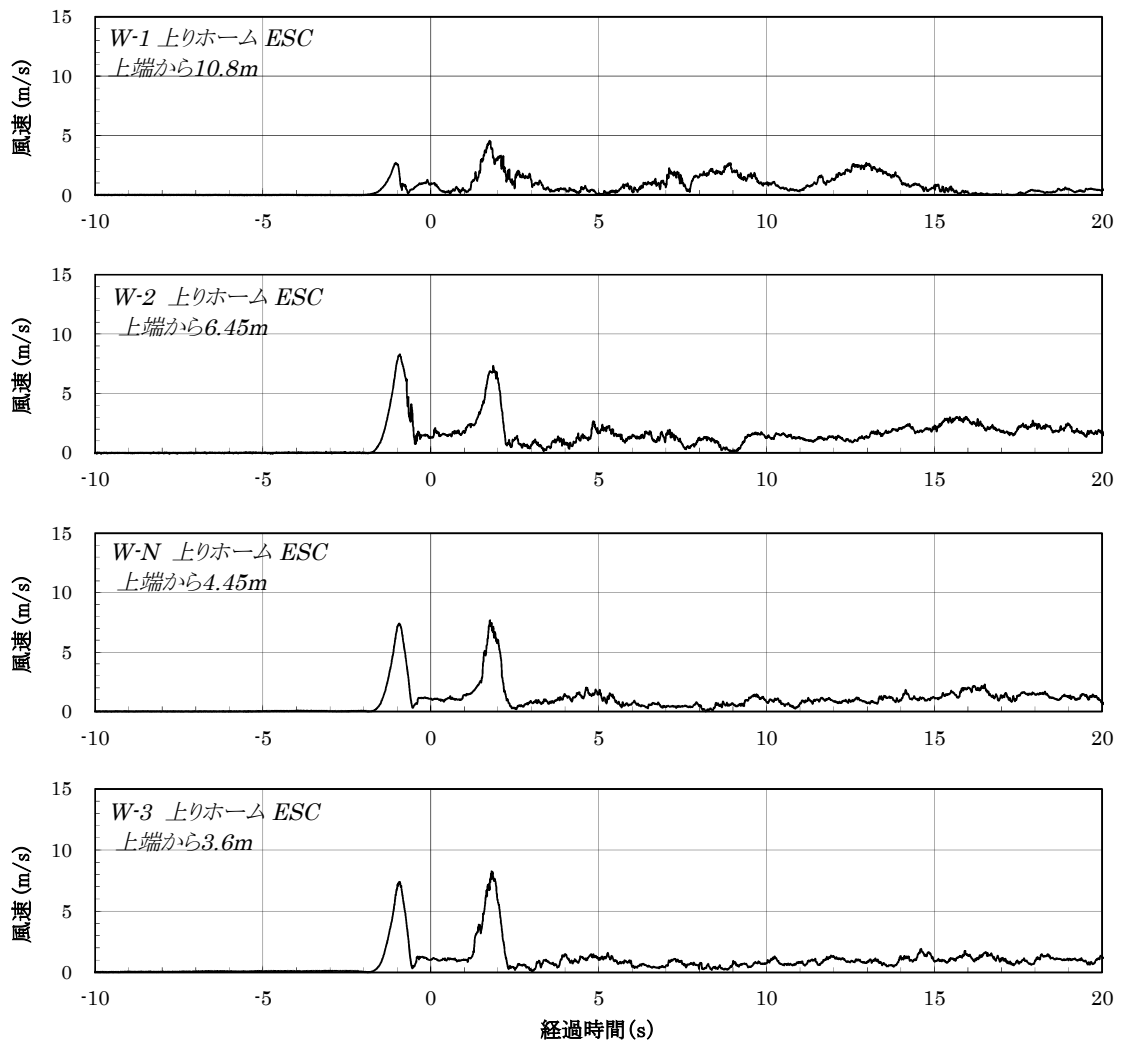
付図 2-8 シェルター無し列車風波形 (No. 14、上り、319km/h、試験列車)



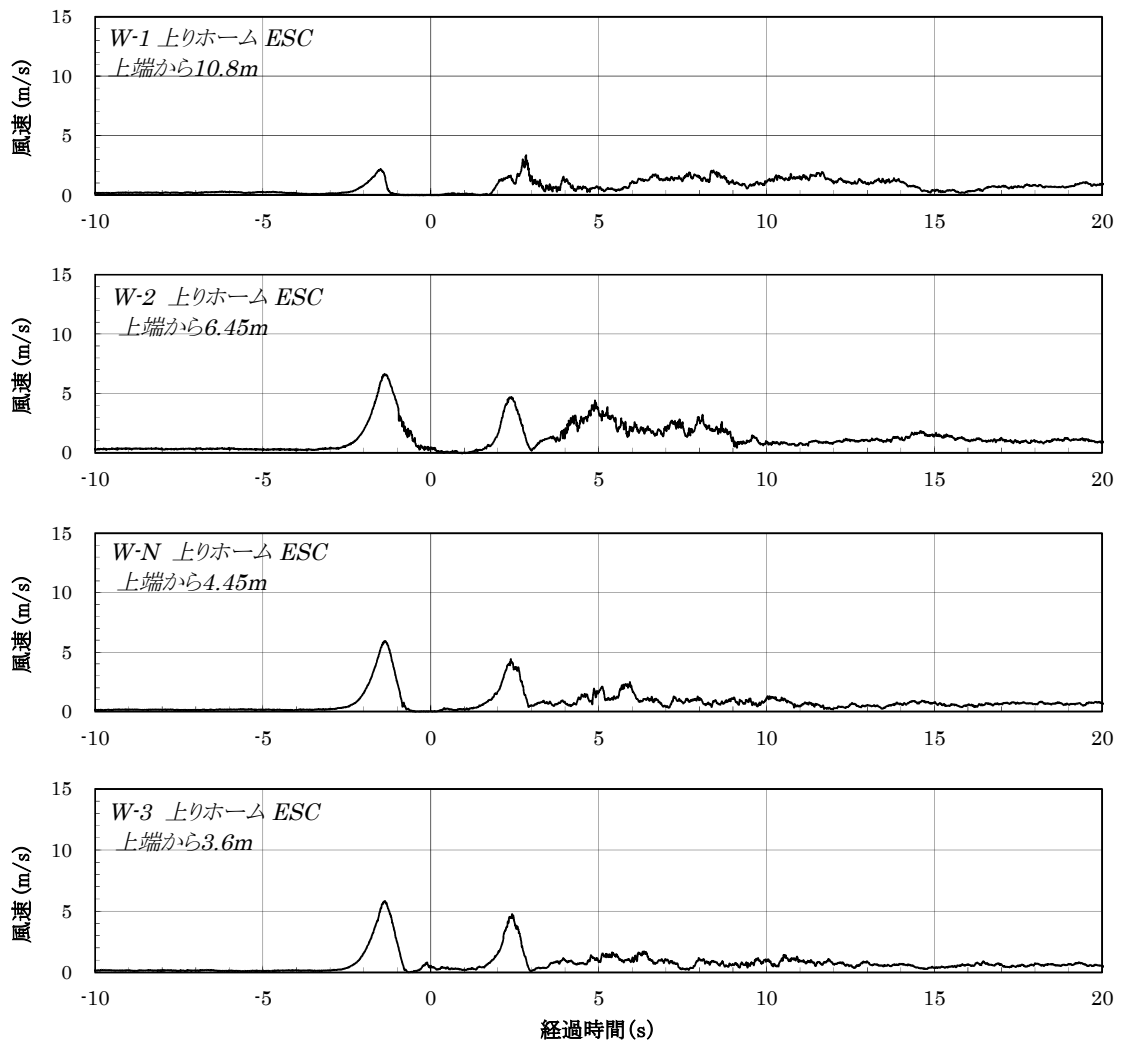
付図 2-9 シェルター無し列車風波形 (No. 16、上り、319km/h、試験列車)



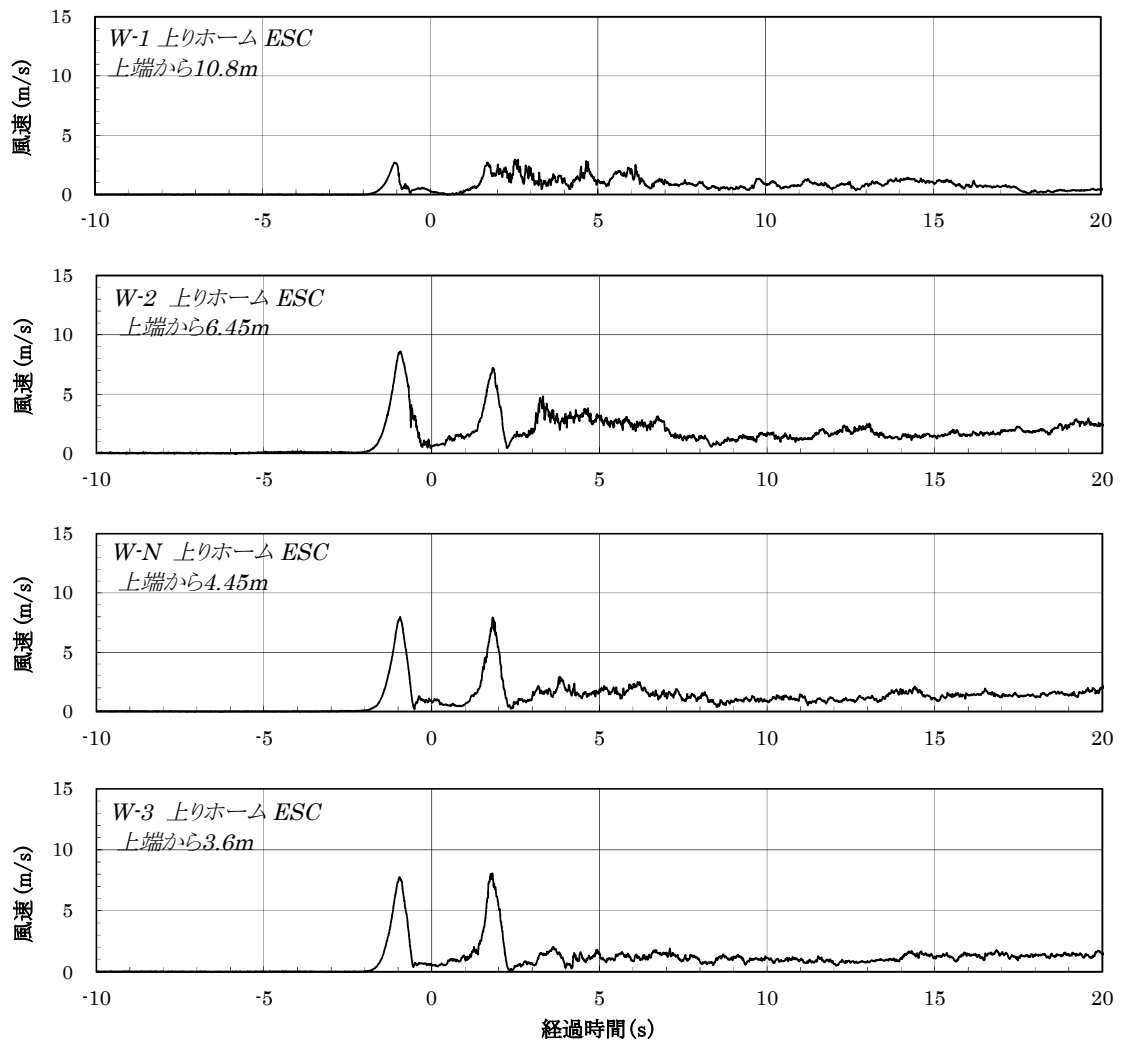
付図 2-10 シェルター一部列車風波形 (No. 2、上り、250km/h、営業列車)



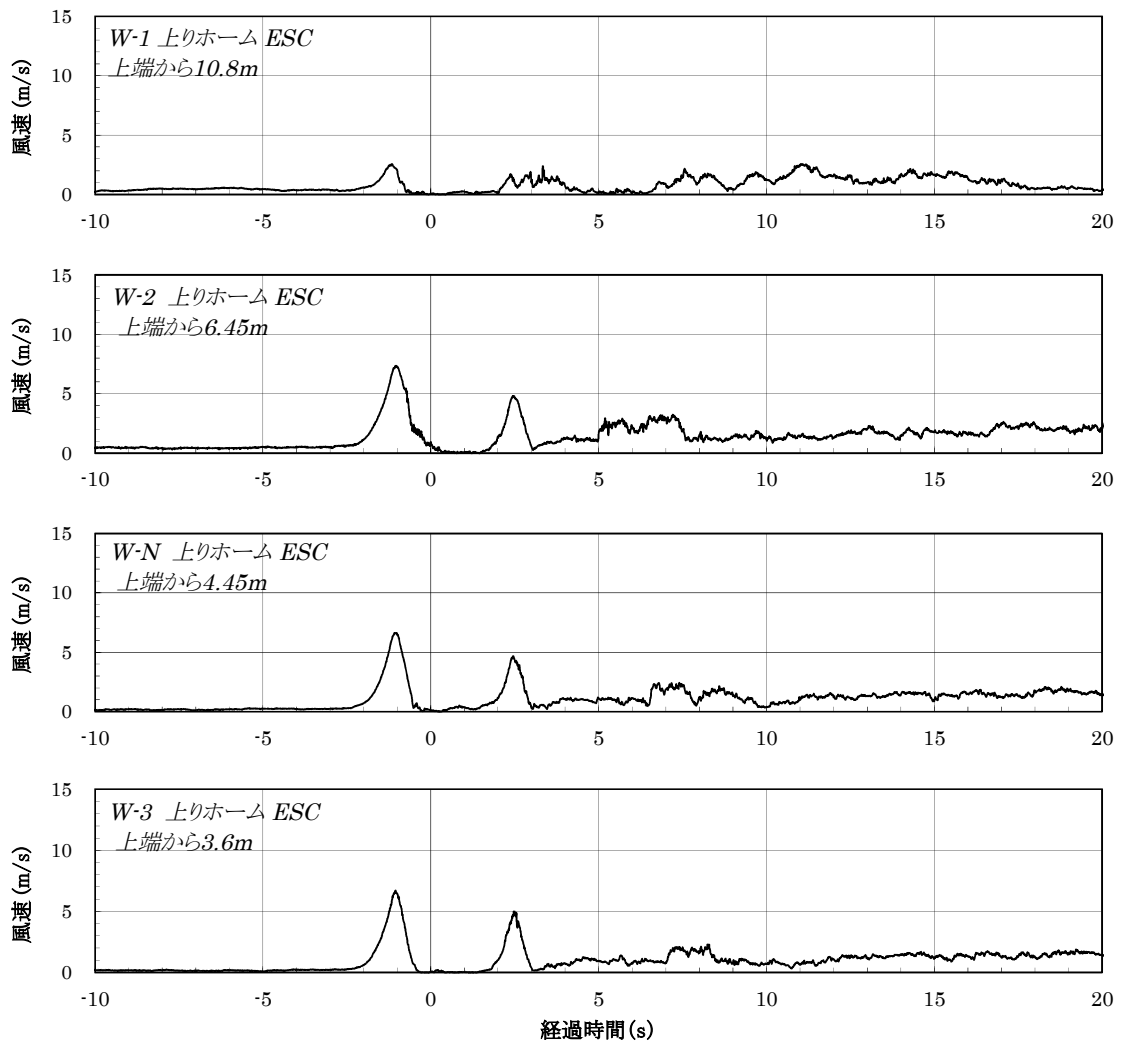
付図 2-11 シェルター一部列車風波形 (No. 4、上り、318km/h、試験列車)



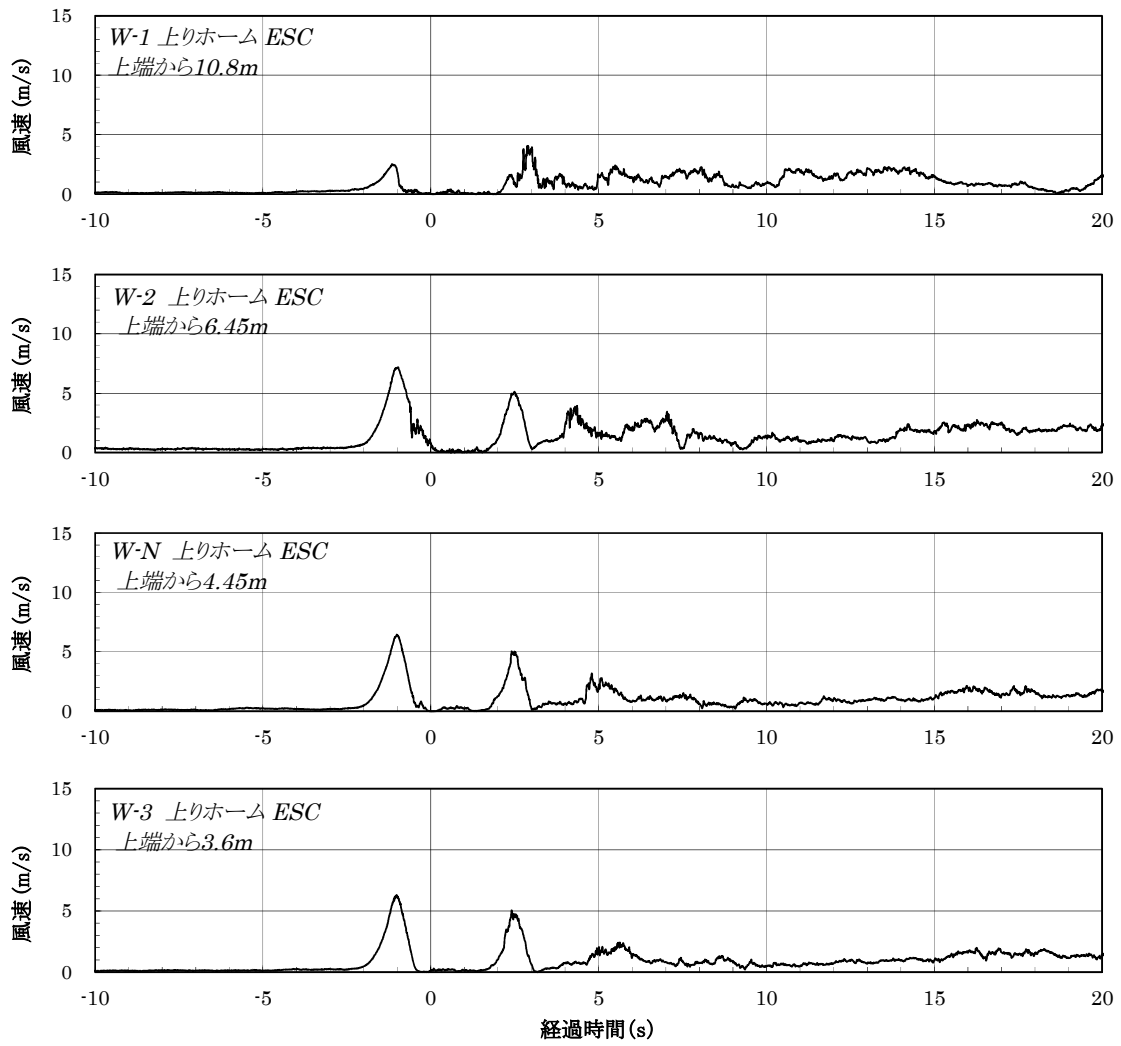
付図 2-12 シェルター一部列車風波形 (No. 8、上り、235km/h、営業列車)



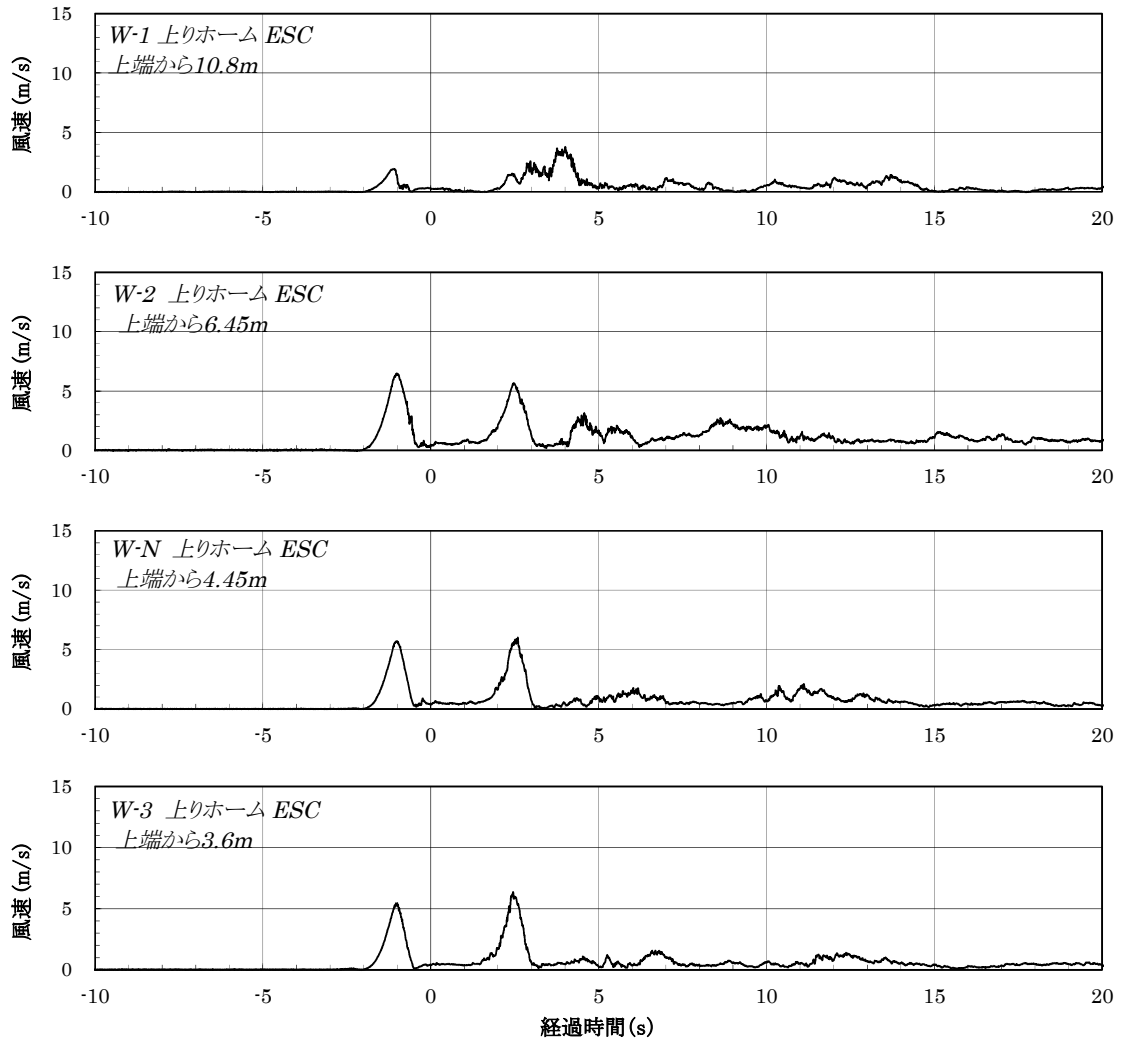
付図 2-13 シェルター一部列車風波形 (No. 9、上り、319km/h、試験列車)



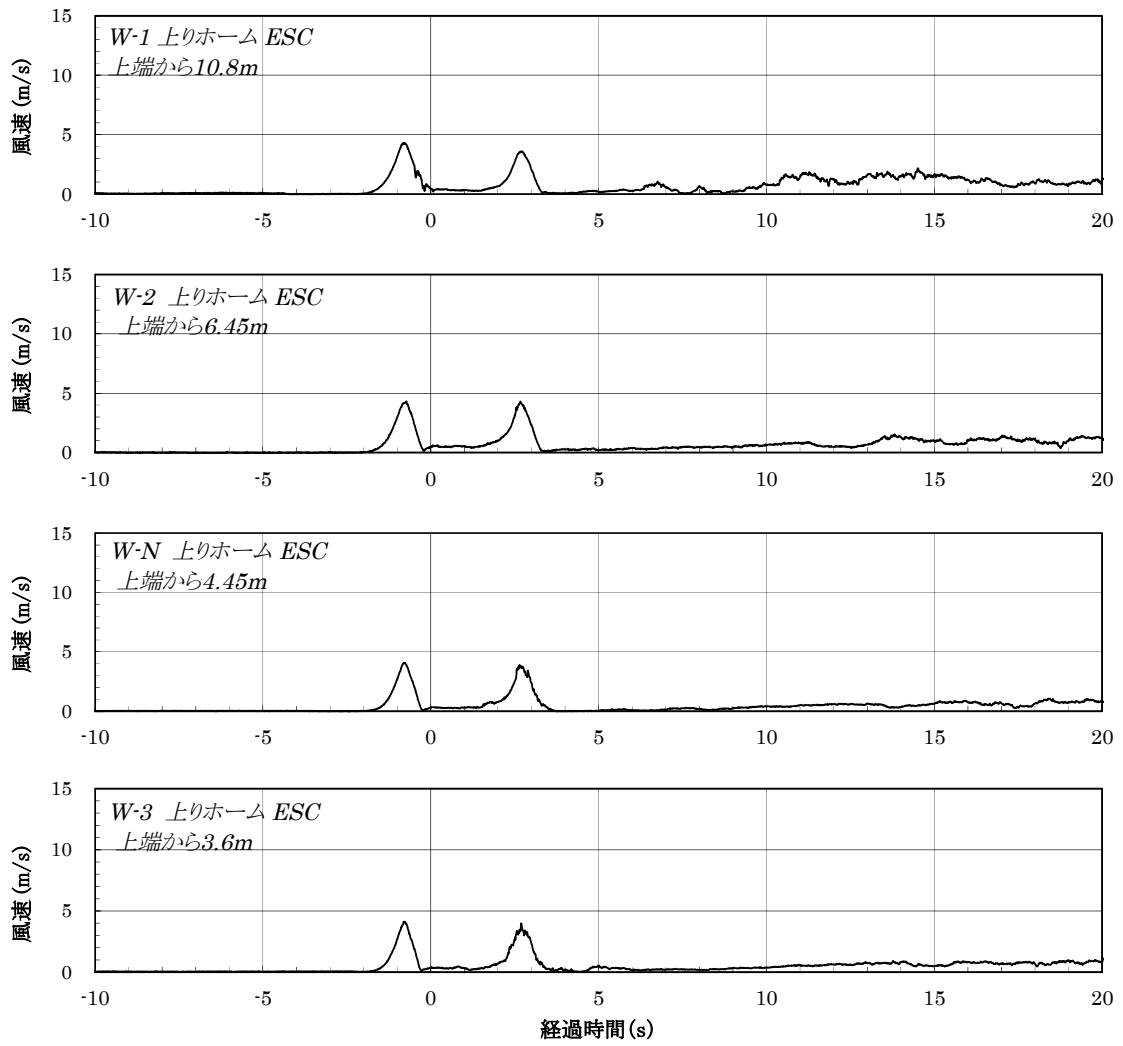
付図 2-14 シェルター一部列車風波形 (No. 12、上り、250km/h、営業列車)



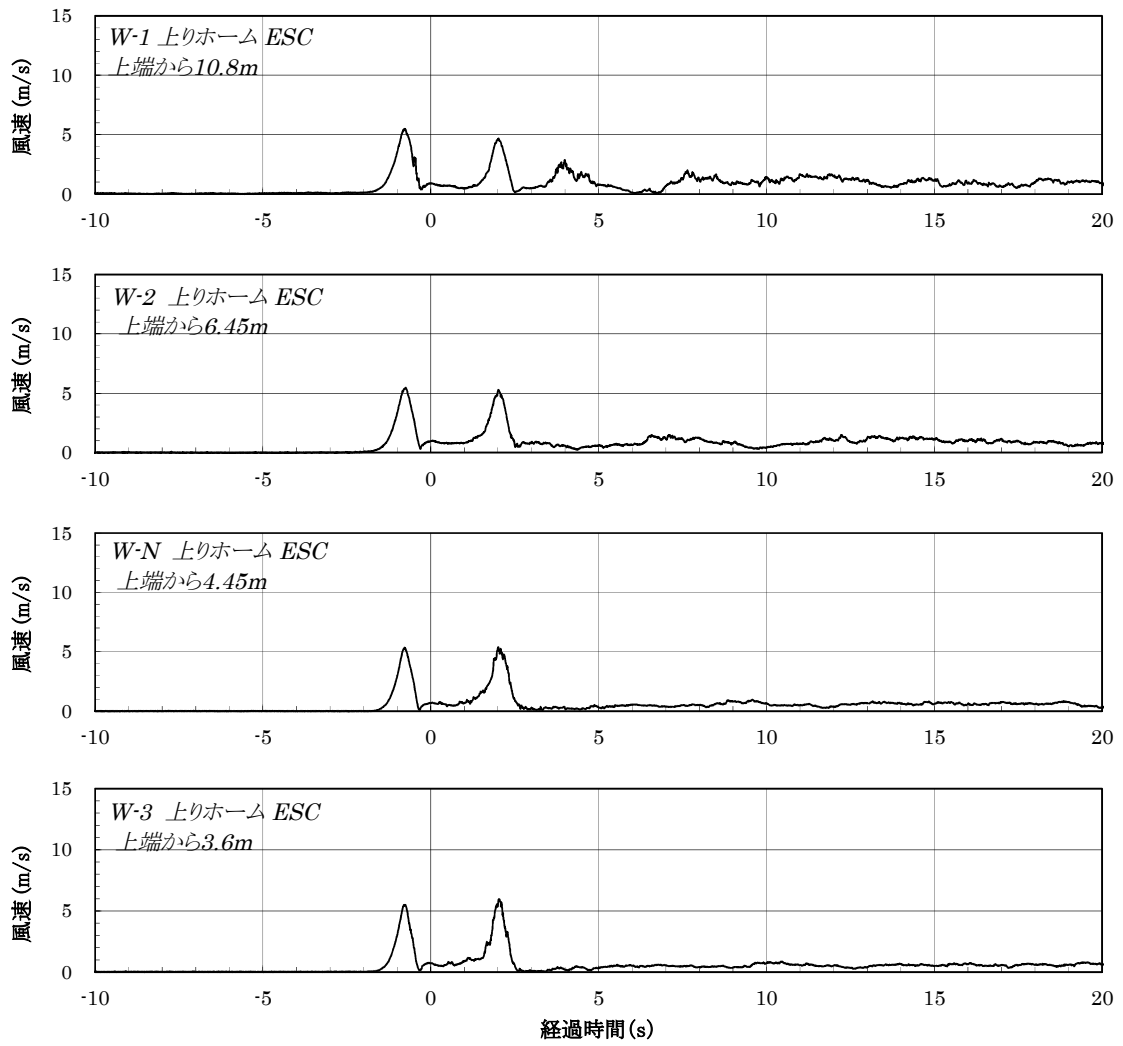
付図 2-15 シェルター一部列車風波形 (No. 13、上り、250km/h、営業列車)



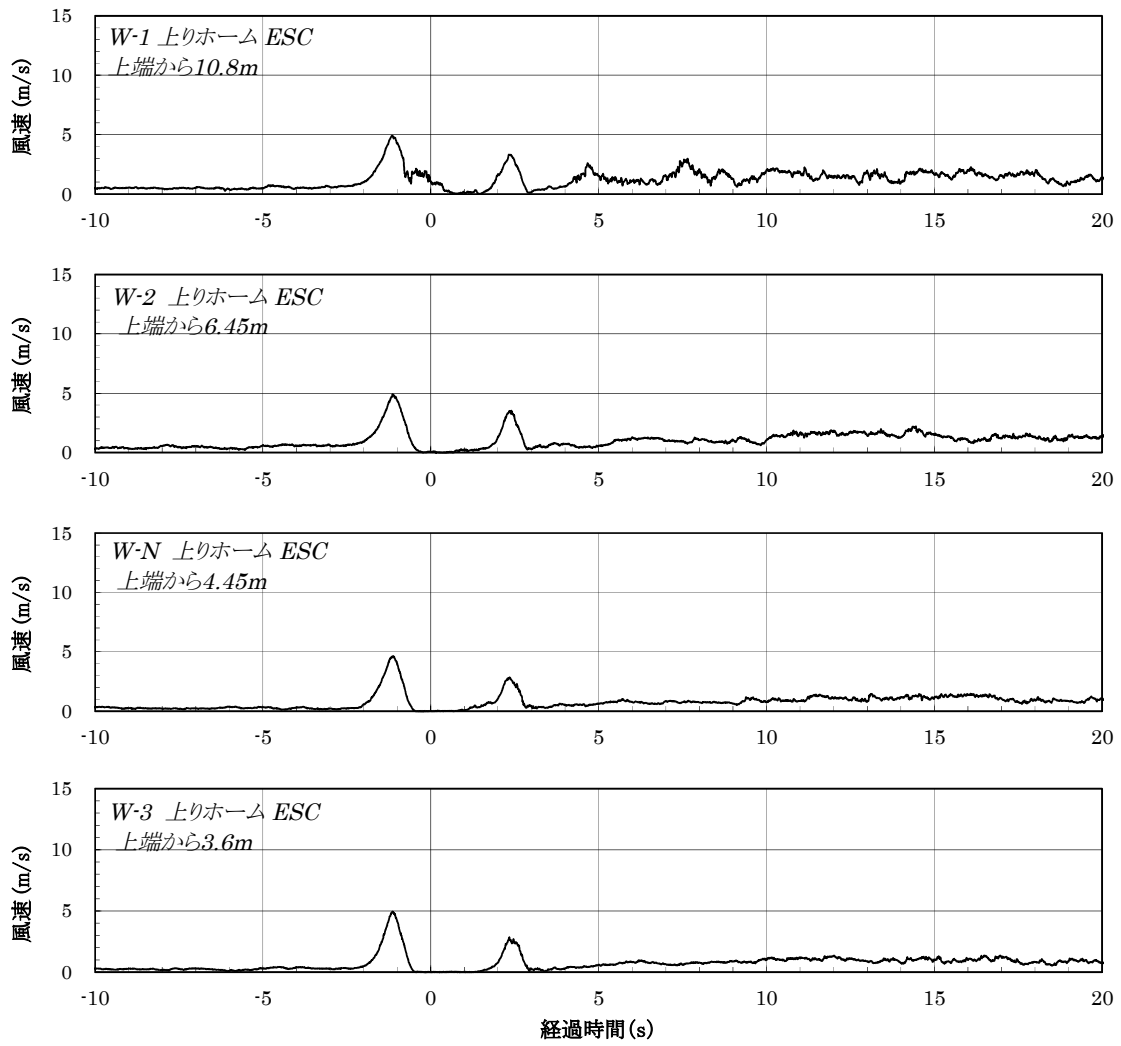
付図 2-16 シェルター一部列車風波形 (No. 15、上り、251km/h、営業列車)



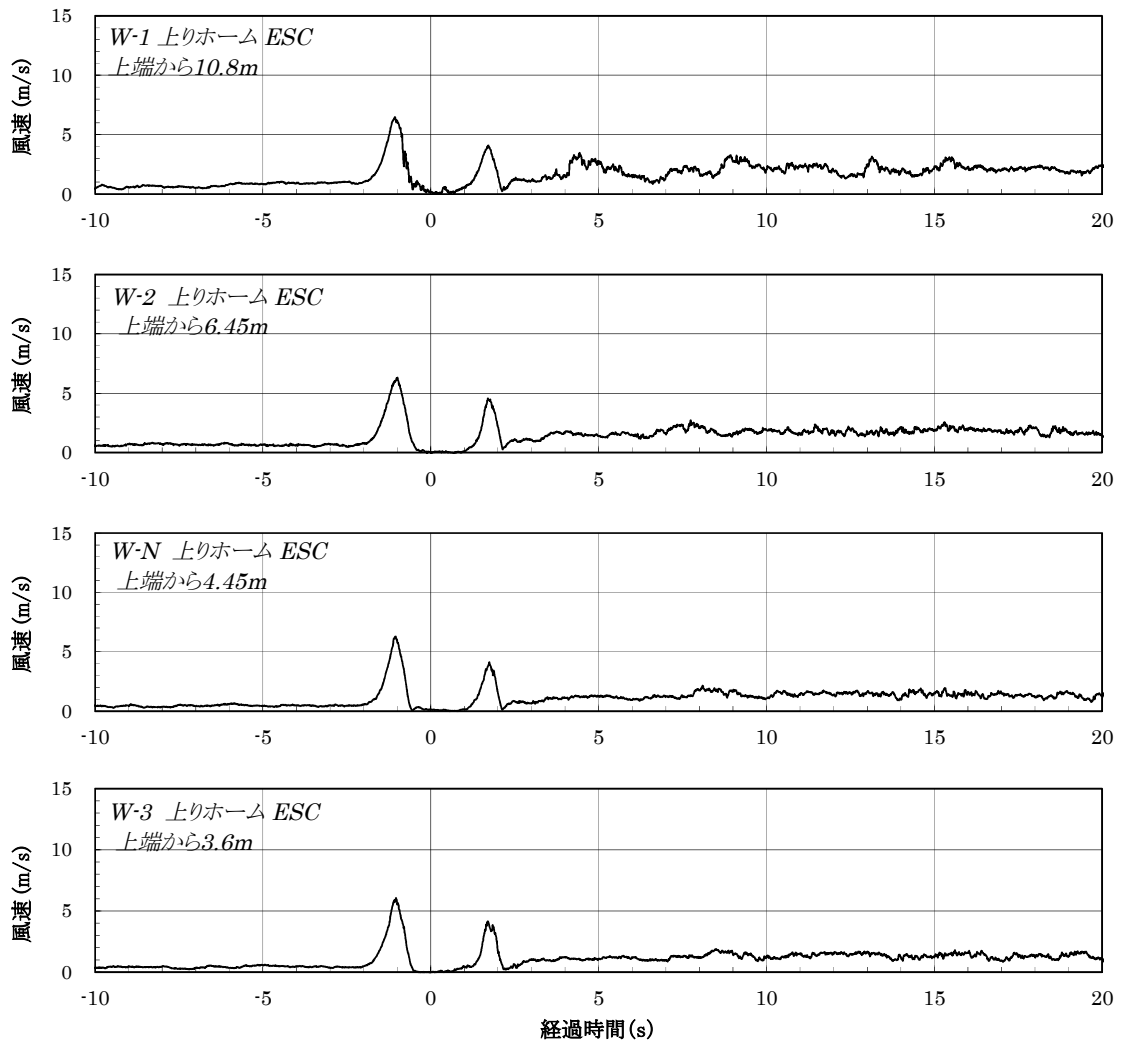
付図 2-17 シェルター全長列車風波形 (No. 2、上り、255km/h、営業列車)



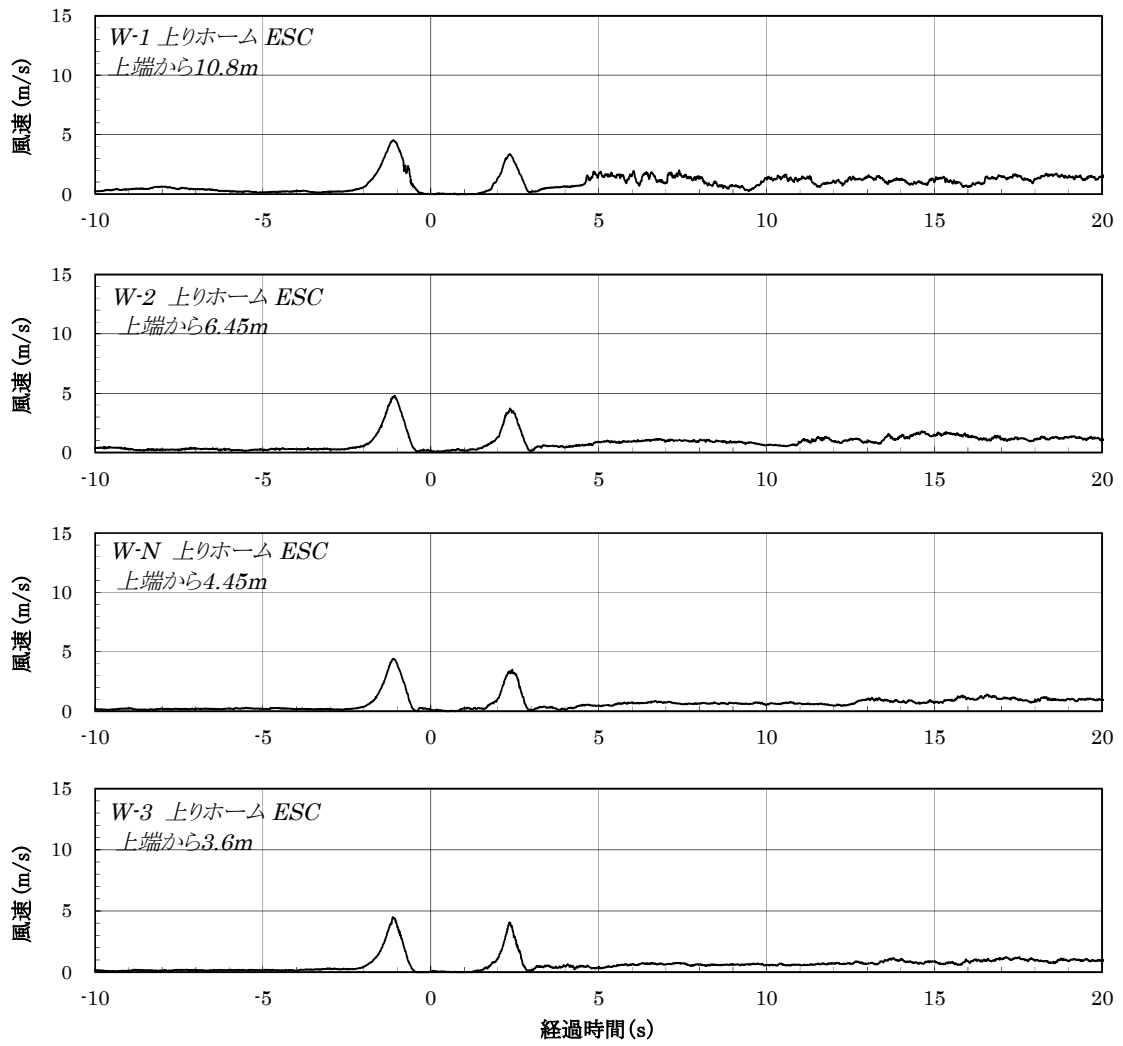
付図 2-18 シェルター全長列車風波形 (No. 4、上り、317km/h、試験列車)



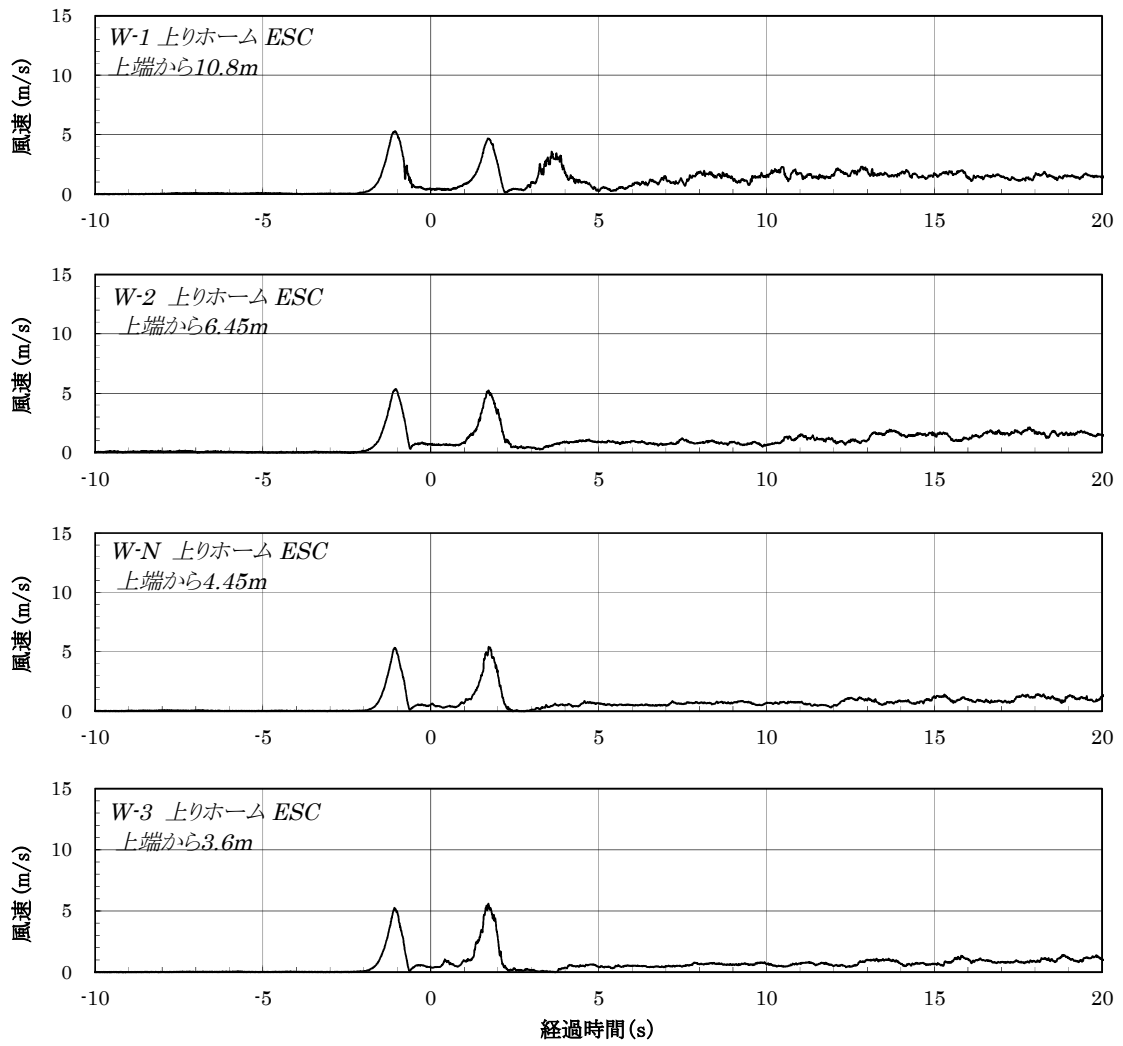
付図 2-19 シェルター全長列車風波形 (No. 8、上り、255km/h、営業列車)



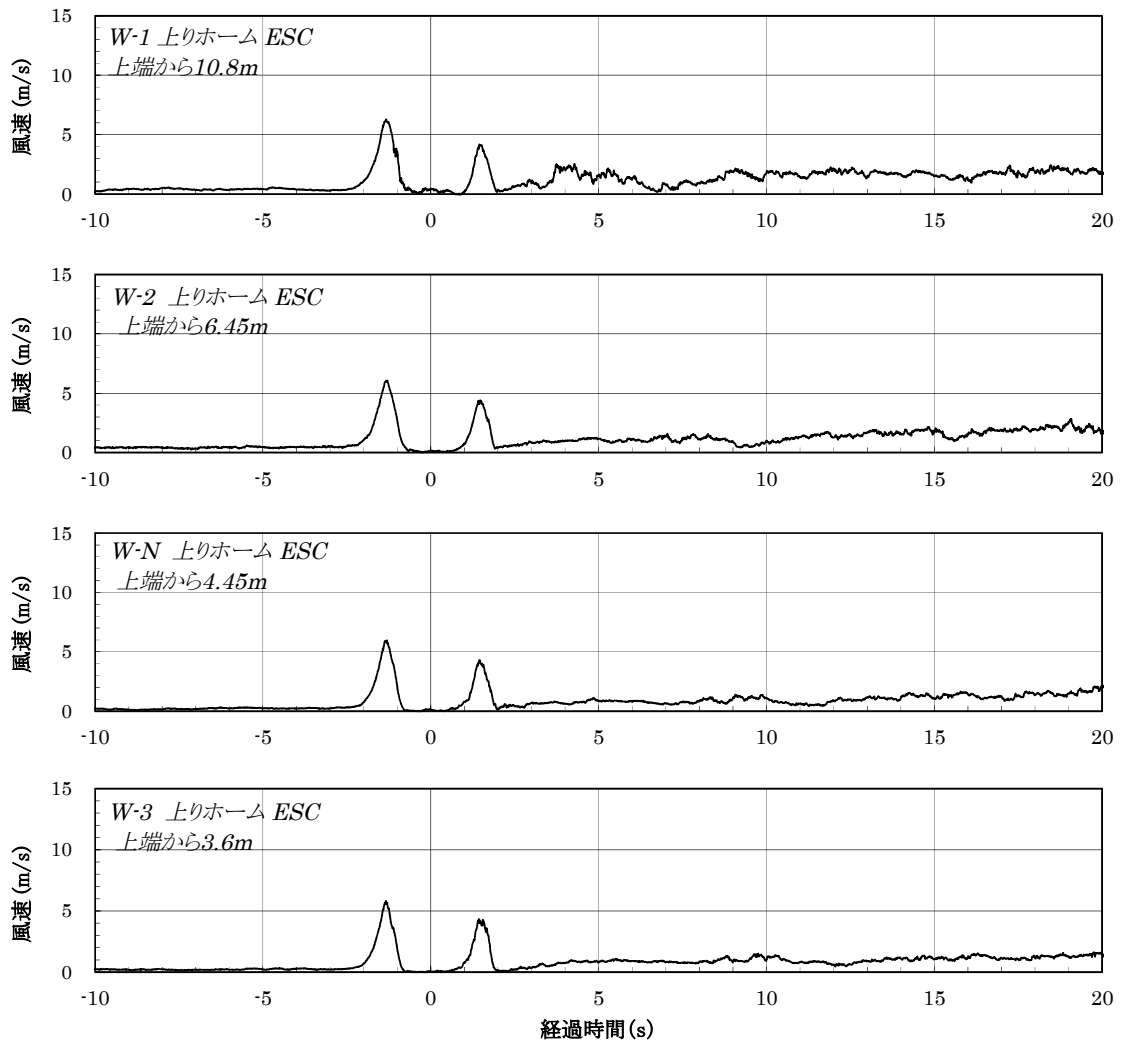
付図 2-20 シェルター全長列車風波形 (No. 9、上り、318km/h、試験列車)



付図 2-21 シェルター全長列車風波形 (No. 12、上り、255km/h、営業列車)



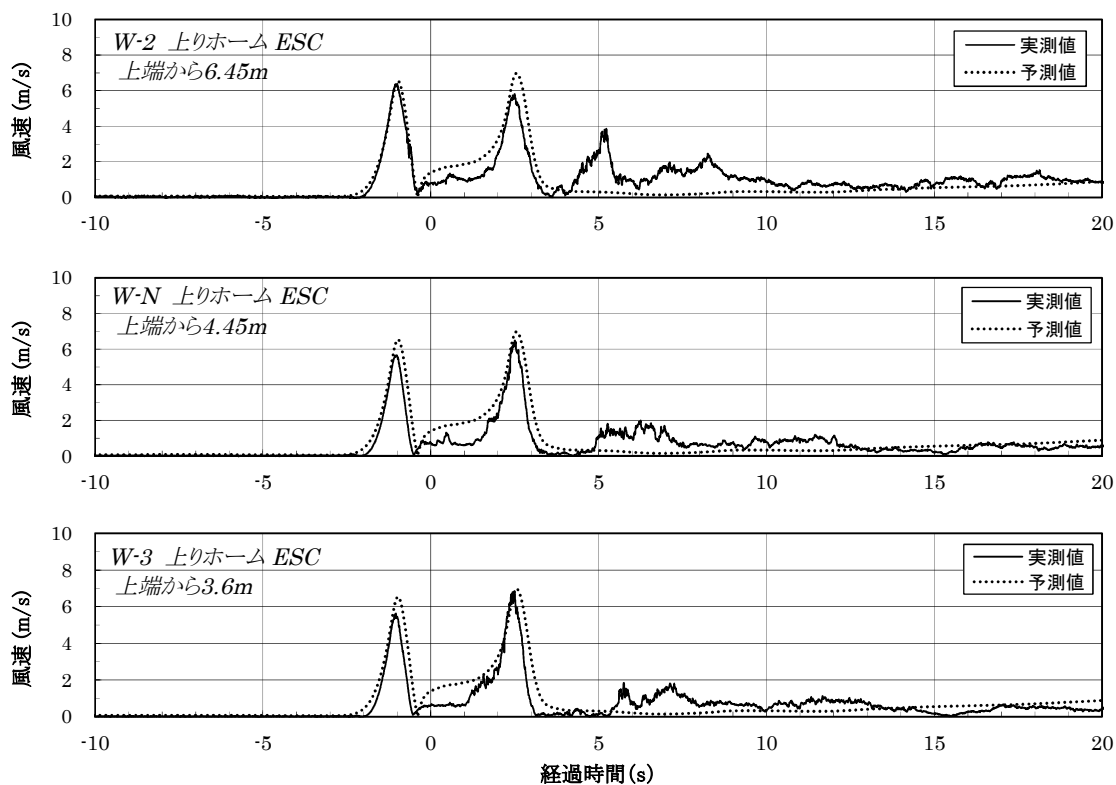
付図 2-22 シェルター全長列車風波形 (No. 13、上り、318km/h、試験列車)



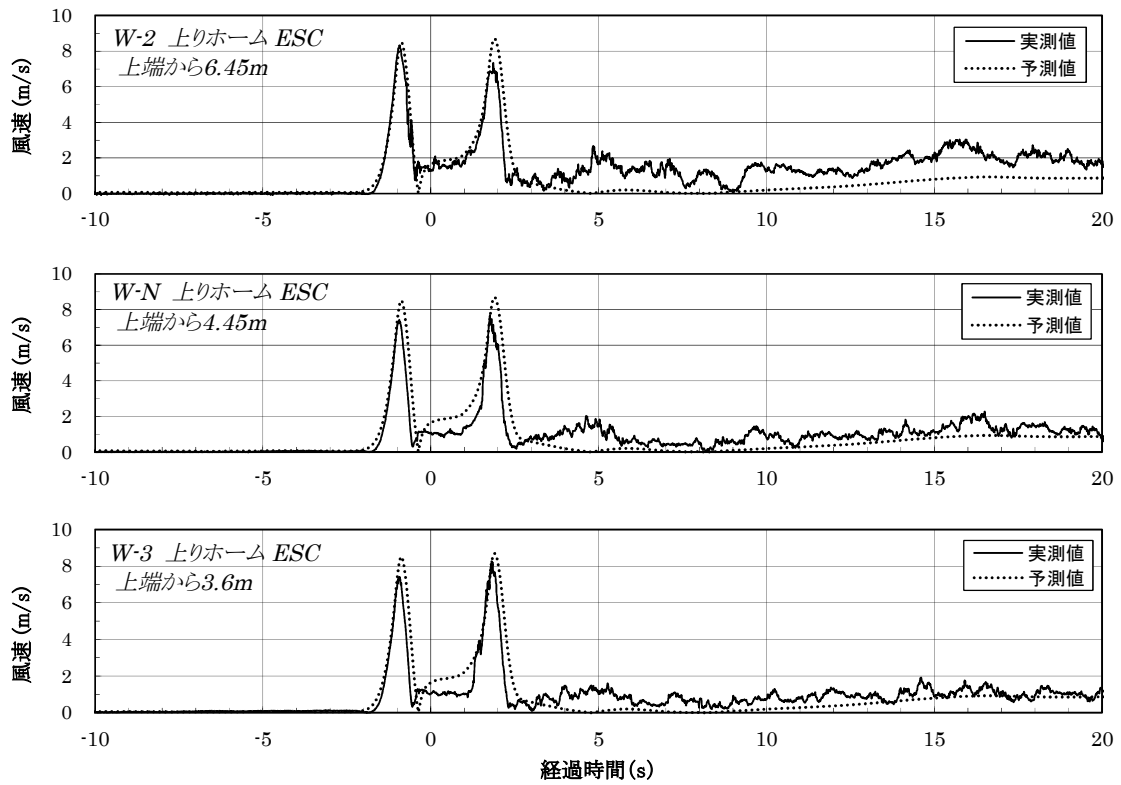
付図 2-23 シェルター全長列車風波形 (No. 15、上り、318km/h、試験列車)

付属資料3 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較

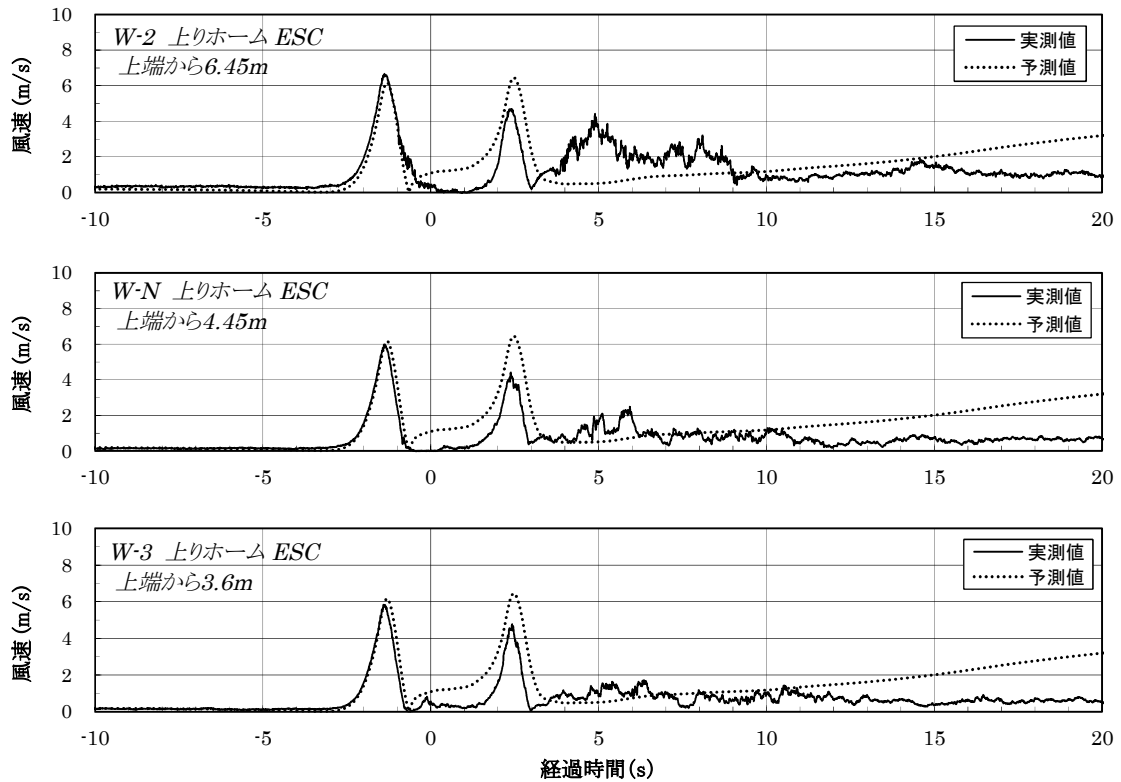
「3.3.7 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較」において、シェルター設置時の実測値と予測値との列車風時刻歴波形を比較している。付図3-1～3-7にはシェルター一部全列車風波形、付図3-8～3-14にはシェルター全長全列車風波形を示す。



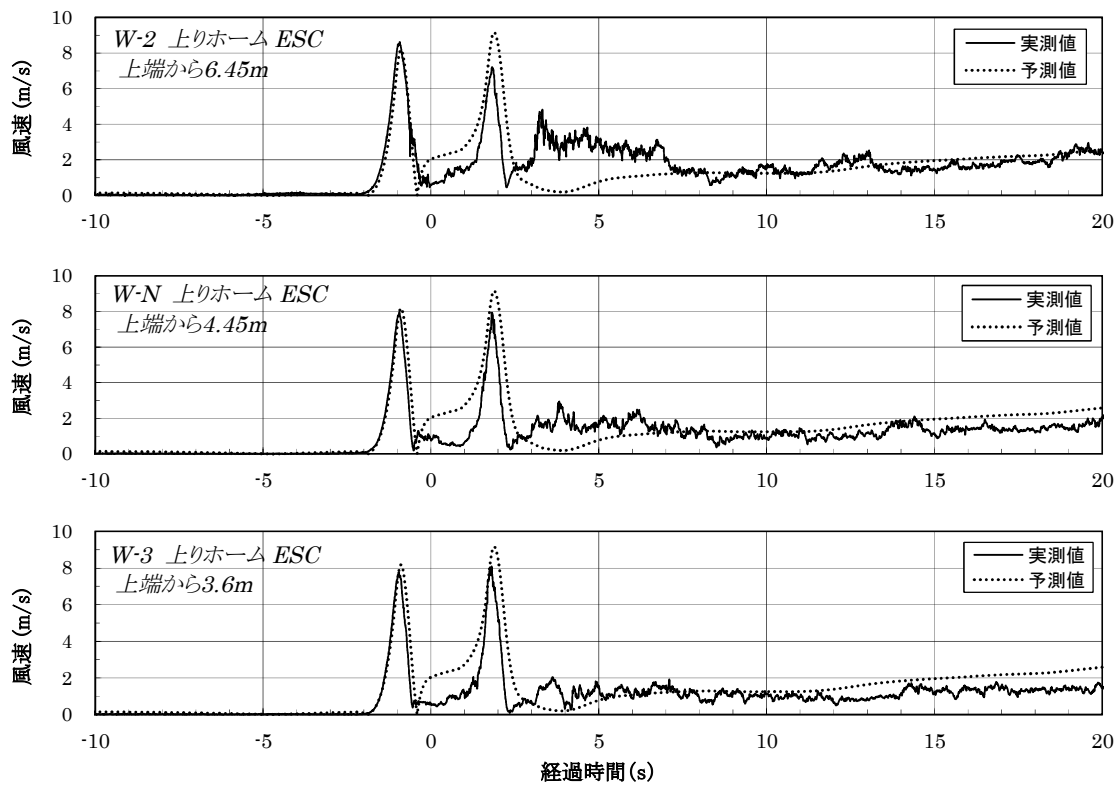
付図3-1 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 2、上り、250km/h、営業列車)



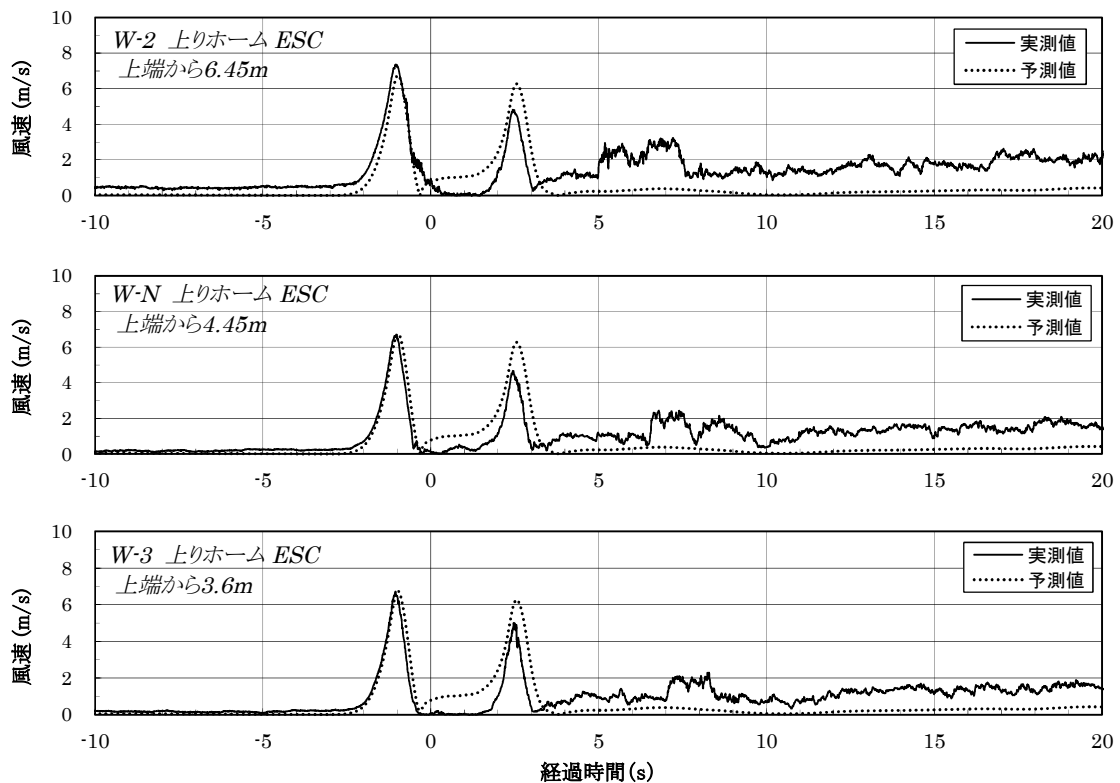
付図 3-2 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 4、上り、318km/h、試験列車)



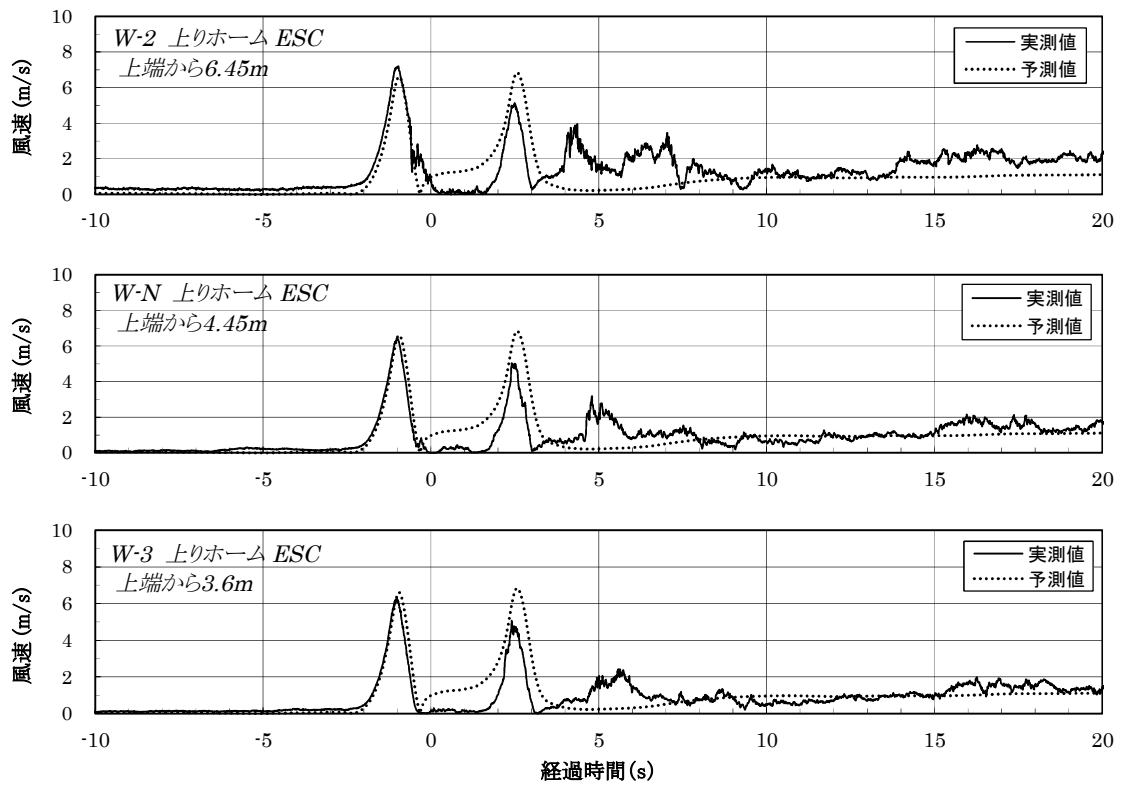
付図 3-3 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 8、上り、235km/h、営業列車)



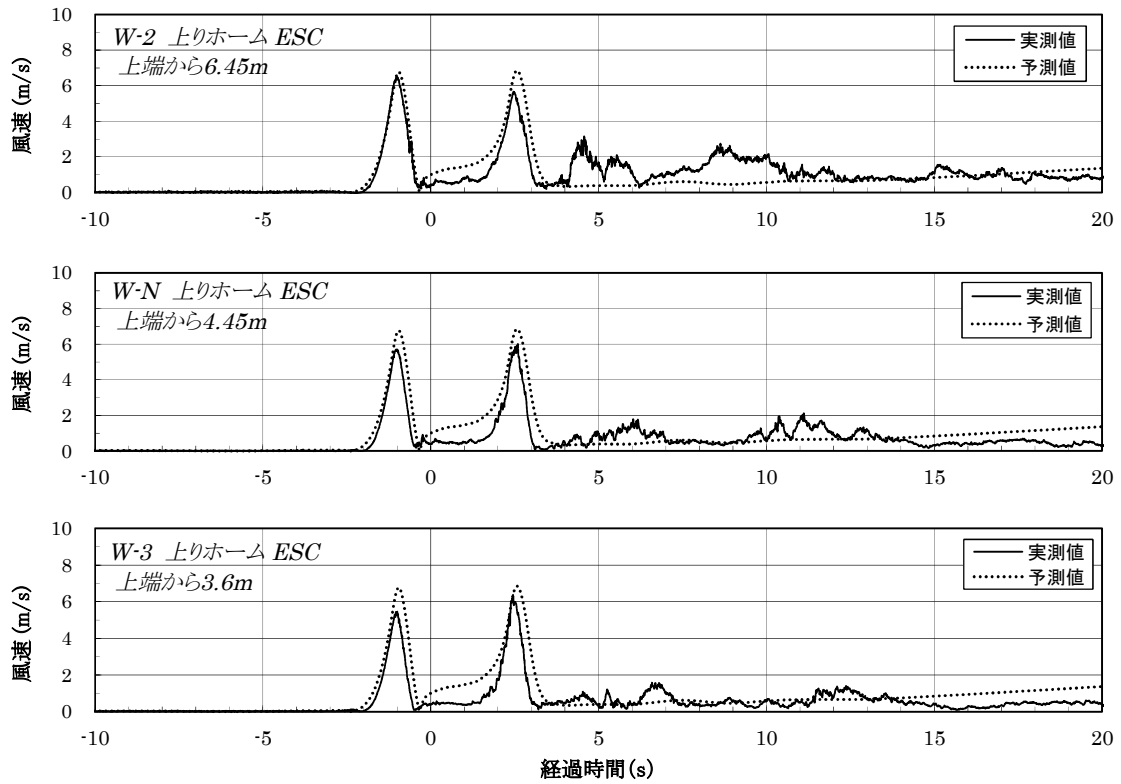
付図 3-4 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 9、上り、319km/h、試験列車)



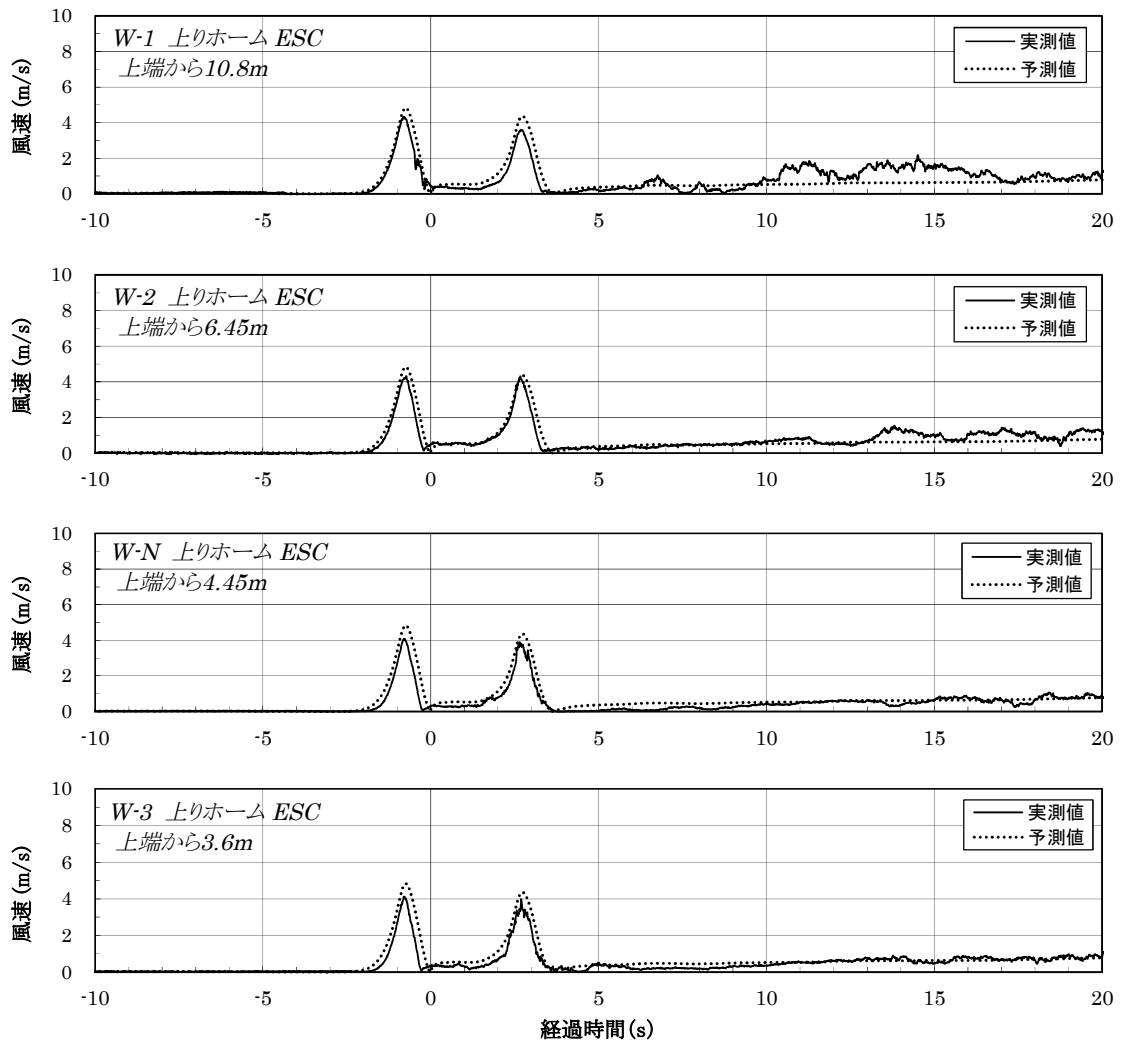
付図 3-5 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 12、上り、250km/h、営業列車)



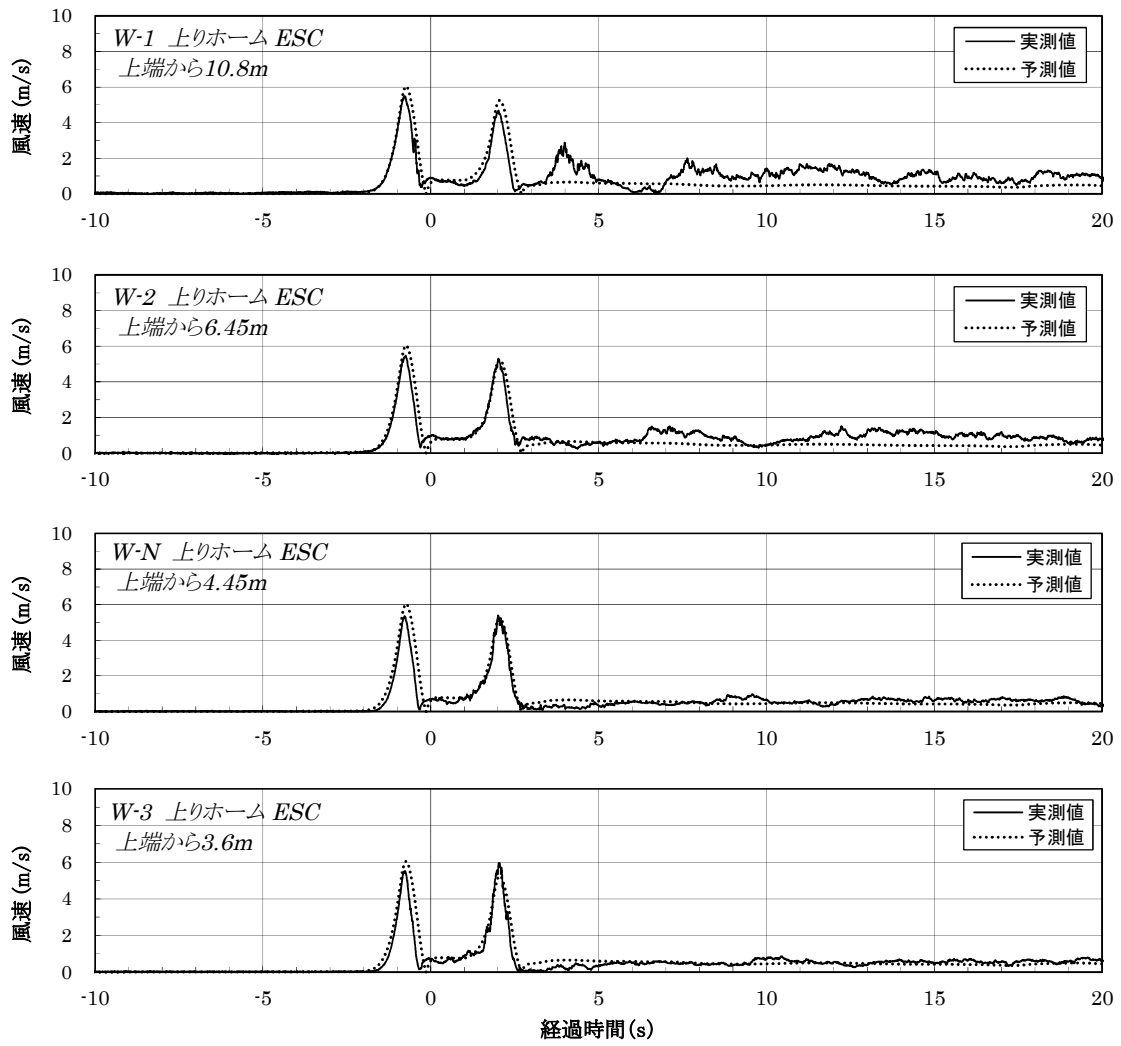
付図 3-6 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 13、上り、250km/h、営業列車)



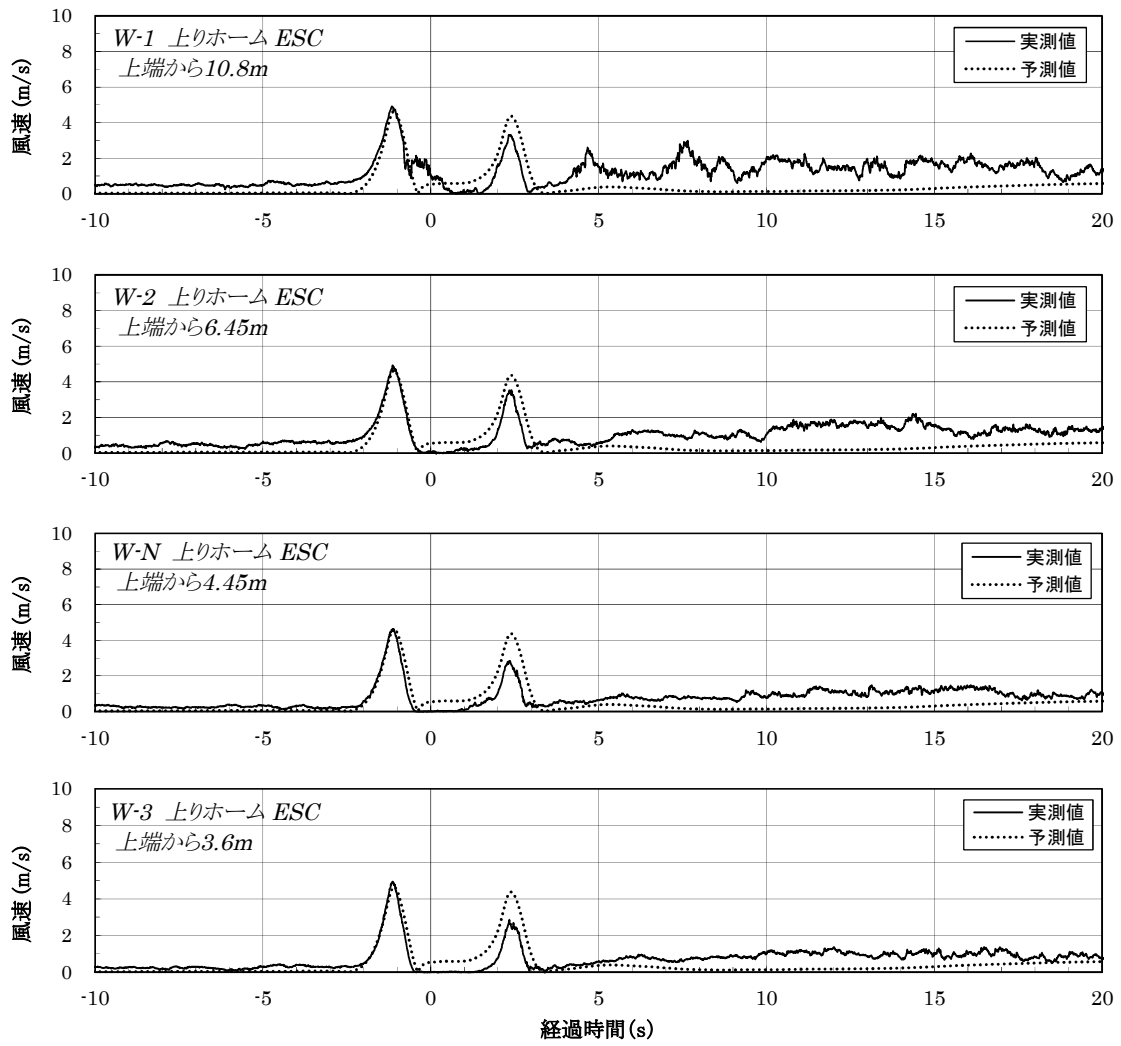
付図 3-7 シェルター一部 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 15、上り、251km/h、営業列車)



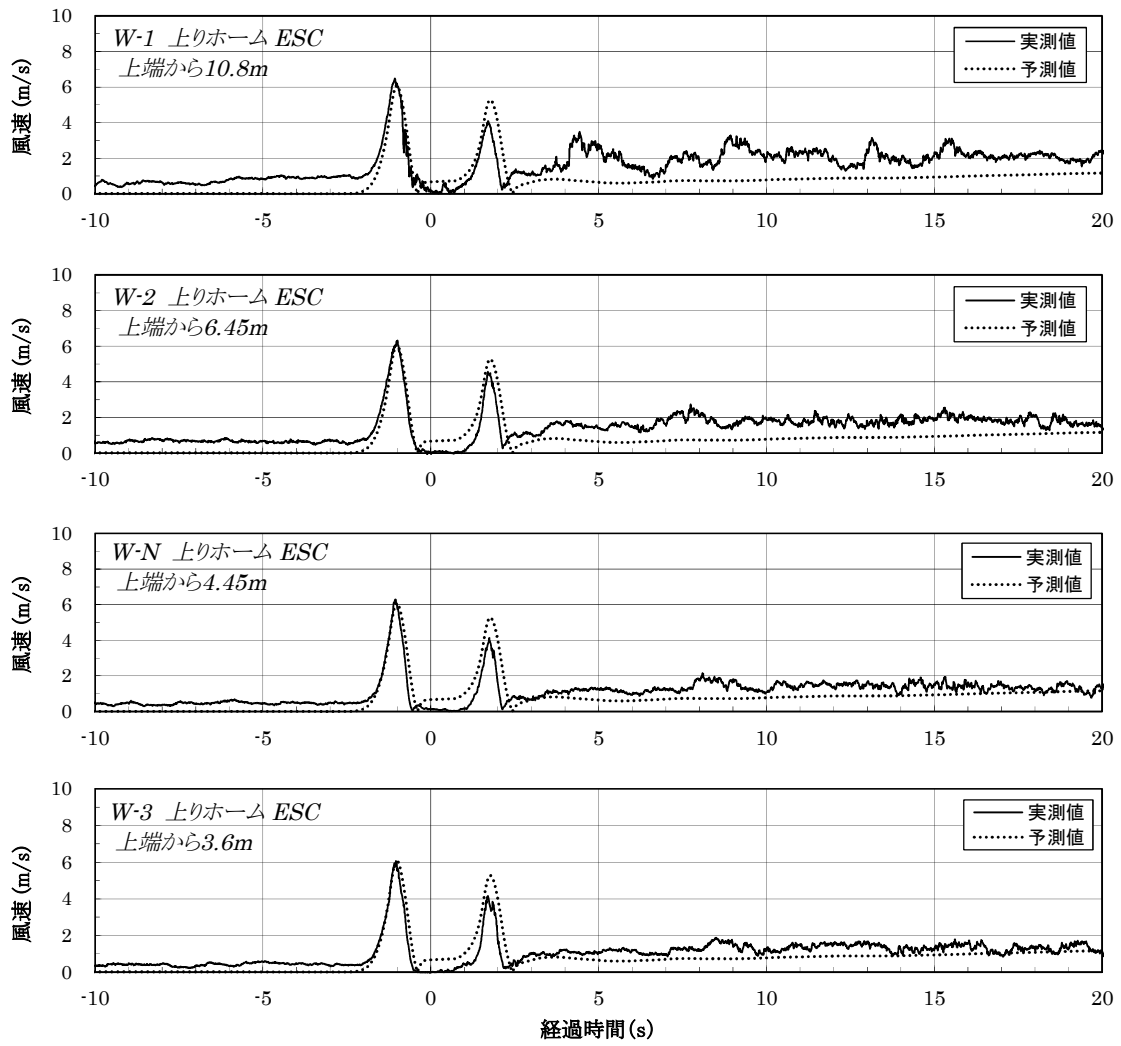
付図 3-8 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 2、上り、255km/h、営業列車)



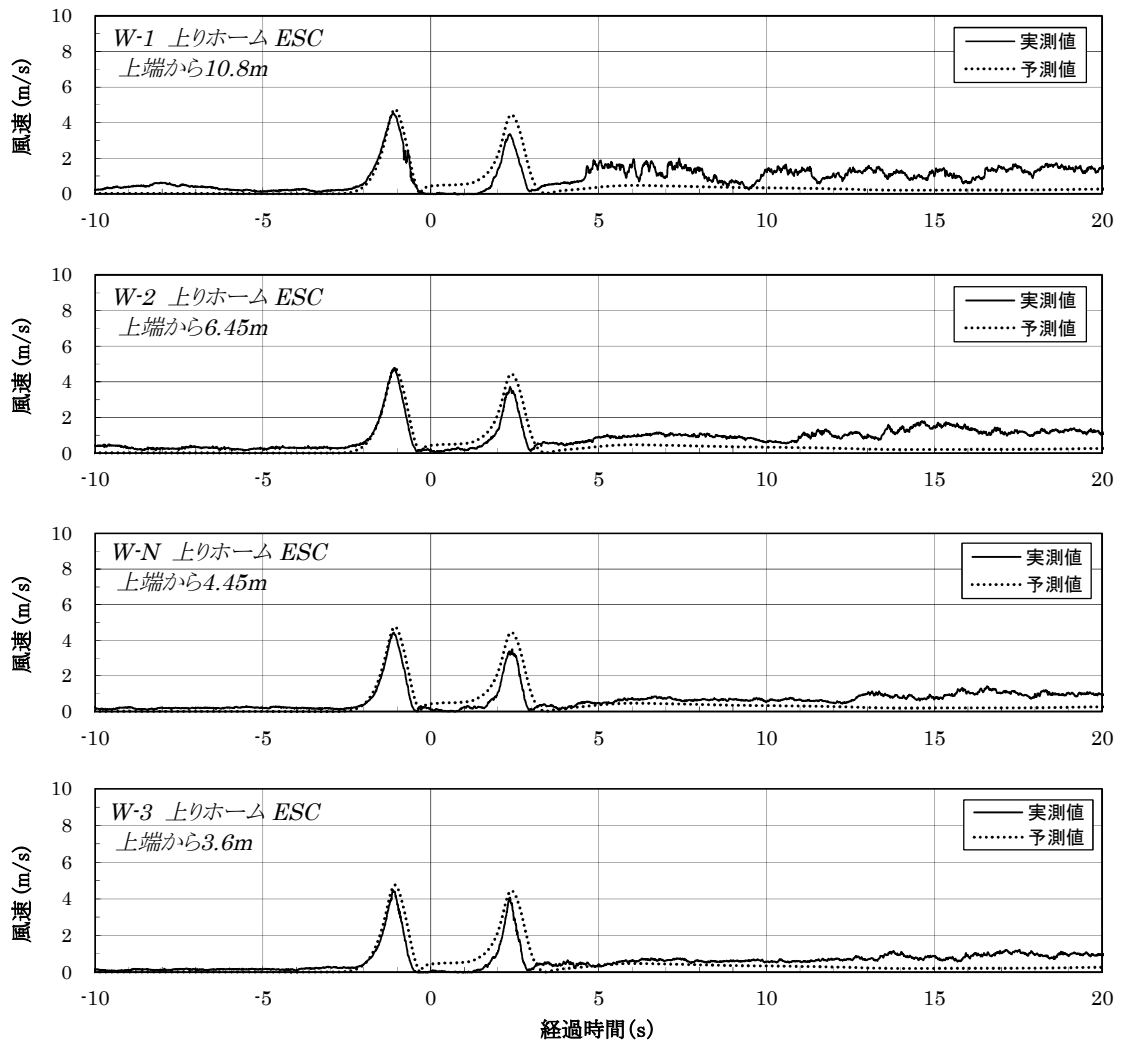
付図 3-9 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 4、上り、317km/h、試験列車)



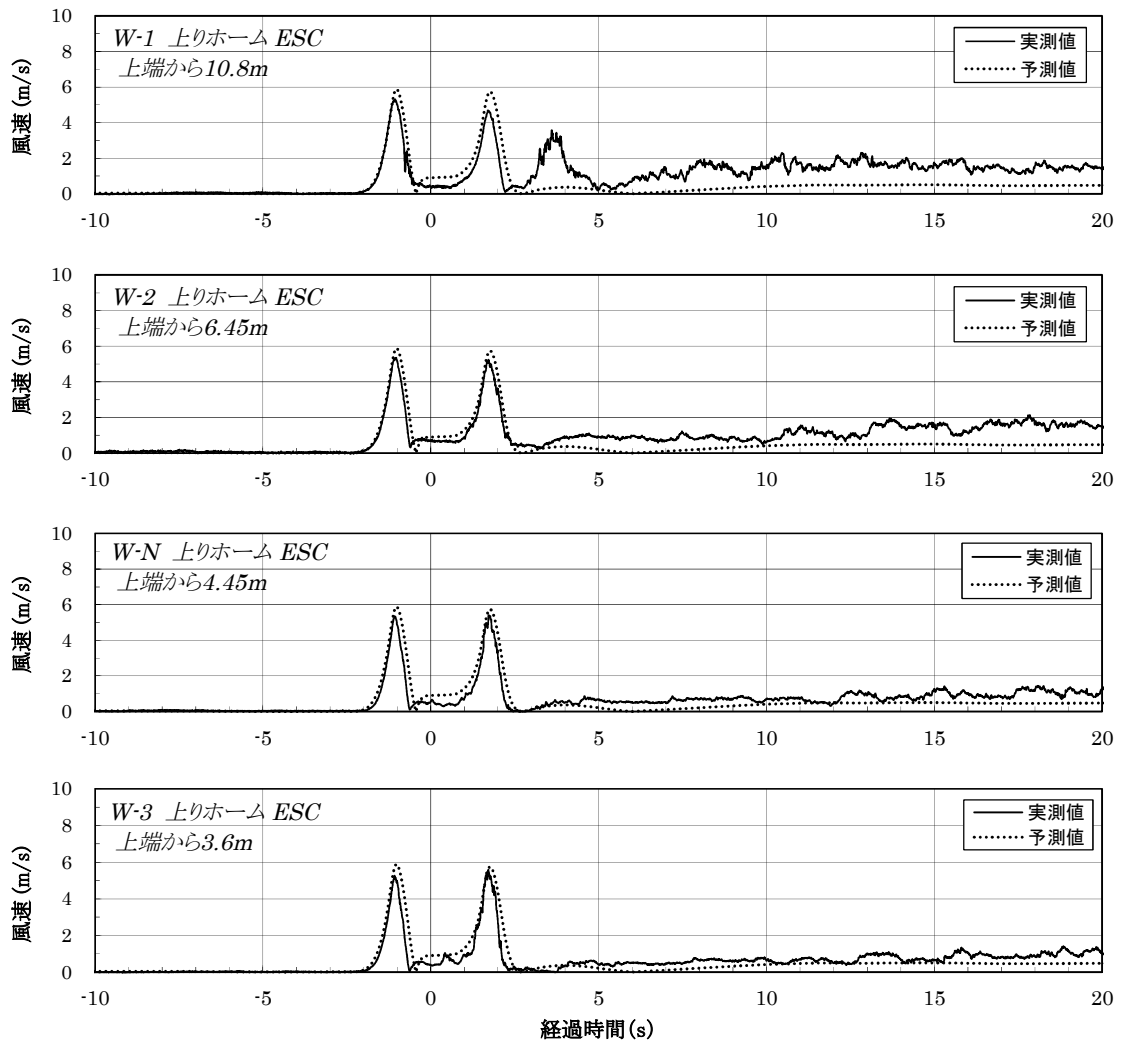
付図 3-10 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 8、上り、255km/h、営業列車)



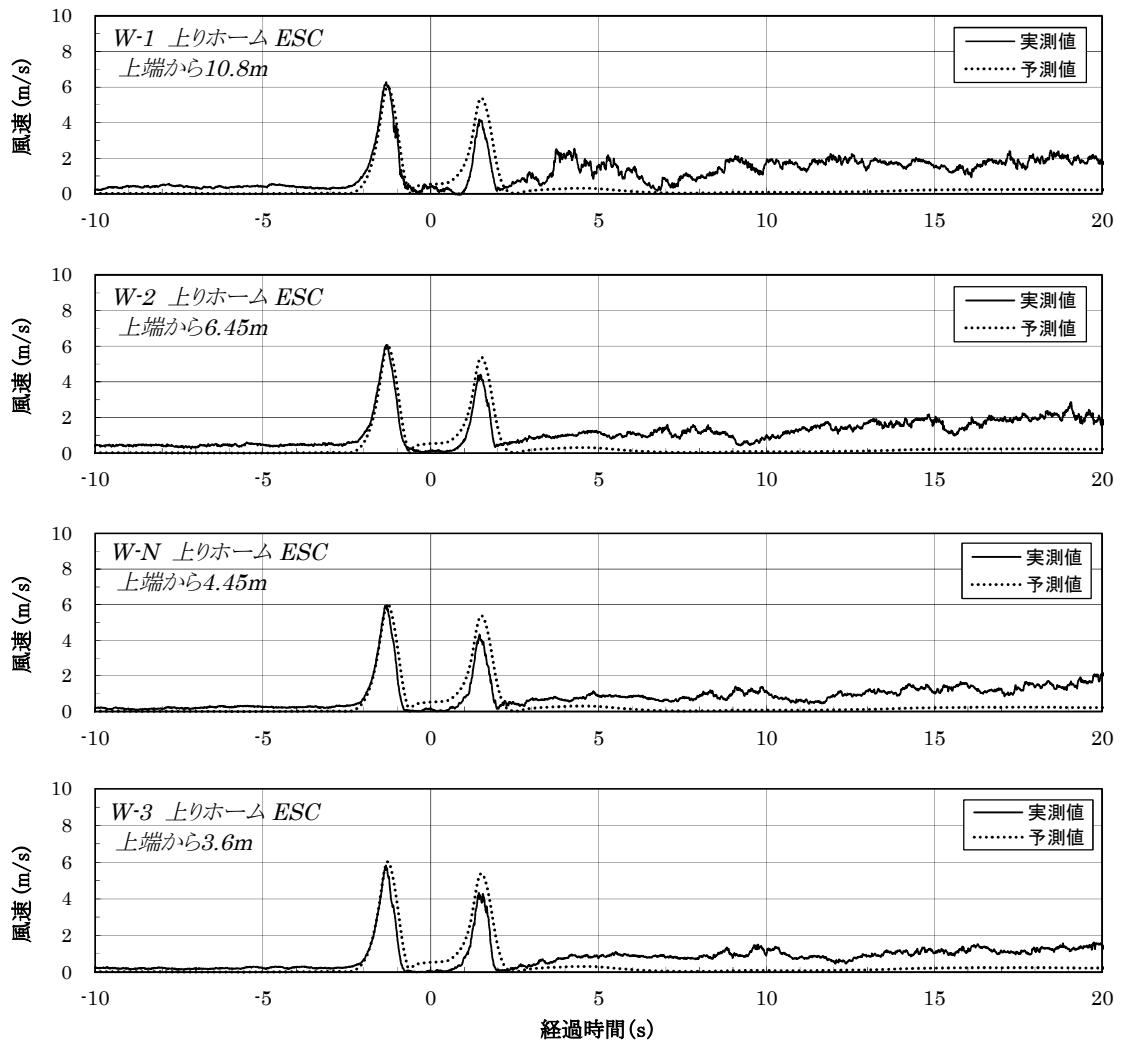
付図 3-11 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 9、上り、318km/h、試験列車)



付図 3-12 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 12、上り、255km/h、営業列車)



付図 3-13 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 13、上り、318km/h、試験列車)



付図 3-14 シェルター全長 実測値と予測値との列車風時刻歴波形比較
(No. 15、上り、318km/h、試験列車)

参考文献

- 1) 山田眞左和ほか: シェルター状駅建物における内壁仕上げ材の劣化に関する研究 その1～3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 495-496, 1998.9
- 2) 浅野浩二: JR 東日本の高速車両開発, JR EAST Technical Review, No.57, 2017
- 3) 福地合一ほか: 建築物に対する列車風風圧の測定, 鉄道技術研究所速報, No.62-179, 1962.6
- 4) 飯田雅宣: 圧力変動とは, 鉄道建築ニュース, No.693, 2007.8
- 5) 土屋恂ほか: 列車風に関する現地試験と風道実験, 鉄道技術研究所速報, No.A-83-99, 1983.7
- 6) 武居泰ほか: 列車通過時の圧力変動を受ける駅施設仕上材の耐力評価 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 425-426, 2006.9
- 7) 遠藤徹ほか: 列車通過時の圧力変動を受ける駅天井地材に関する研究 その1～2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 857-858, 2012.9
- 8) 種本勝二ほか: 列車通過時のホーム上の列車風と圧力変動, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, 2003.11
- 9) 飯田雅宣ほか: 開口部のあるチューブ内を走行する列車まわりの定常圧力場, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2005.10
- 10) 菊地勝浩ほか: 全覆い上屋開口部の流れが準定常流と見なせるための圧力条件に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 76巻 766号, 2010.6
- 11) 土屋恂ほか: 列車風に関する現地試験, 鉄道技術研究所速報, No.81-68, 1981.5
- 12) 堀江篤ほか: 東北新幹線における列車風に関する現地試験, 鉄道技術研究所速報, No.A-86-155, 1986.8
- 13) 梶山博司: 地下鉄で発生する風, 鉄道建築ニュース, No.743, 2011.10
- 14) 小美濃幸司ほか: 駅ホームにおける列車風評価法, 人間工学, Vol.47, No.3, 2011
- 15) 菊地勝浩ほか: 3次元境界要素法による地面上を移動する物体の最適形状設計, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 1996.7
- 16) 菊地勝浩ほか: 三次元境界要素法による列車通過時の圧力変動解析, 鉄道総研報告, Vol.10, No.2, 1996.2
- 17) 菊地勝浩ほか: 列車通過時圧力変動の簡易な数値計算法, 日本機械学会論文集 (B編), 71巻 708号, 2005.8
- 18) Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track, UIC code, 779-1, 1996.1
- 19) 山本彬也: 新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気, 鉄道技術研究報告, No.871, 1973.10
- 20) 山本彬也: 列車とトンネルの空気力学, 鉄道技術研究報告, No.1230, 1983.3

- 21) 飯田雅宣ほか: トンネル内圧力変動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.4, No.7, 1990.7
- 22) Gilbert, et al.: Aerodynamic pressure around high-speed trains: The transition from unconfined to enclosed spaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013
- 23) 斉藤実俊ほか: トンネル内における列車通過時圧力変動に関する実験的研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.819, 2014
- 24) 斉藤実俊ほか: トンネル内列車通過時圧力変動の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.825, 2015
- 25) 塩谷正雄ほか: 列車風の現地実験, 鉄道技術研究報告, No.64, 1959.4
- 26) Matschke, et al.: Results of an European Research Project in Railway Aerodynamic, WCRR'99, 1999.10
- 27) Baker, et al.: The slipstream and wake of a high-speed train, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001
- 28) 村木克行ほか: 列車風のホーム上ならびに駅舎内での影響, JR EAST Technical Review, No.31, 2010
- 29) 泊弘貞ほか: 地下鉄駅出入口における列車風緩和対策解析調査及び実証実験, 土木学会第57回年次学術講演会, 2002.9
- 30) 出口清孝: 人体に対する風の力学的並びに熱的影響に関する研究, 東京大学博士論文, 1983.12
- 31) 村上周三ほか: 居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究, 日本建築学会論文報告集第325号, 1983.3
- 32) 石井圭介ほか: 列車通過時の列車風に関する研究, JR EAST Technical Review, No.13, 2005
- 33) 今井功: 流体力学 (前編)、裳華房
- 34) 日本機械学会編: 機械工学便覧 基礎編 a4 流体力学, 第10章 非定常流れ, 丸善, p.a4-111, 2006
- 35) 中山泰喜: 改訂版 流体の力学, 養賢堂, 1998
- 36) 佐々木淳ほか: 高速列車通過時の駅舎内に発生する圧力変動の低減 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 45-46, 2005
- 37) 本村典之ほか: 高速列車通過時の駅舎内に発生する圧力変動の低減 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 977-978, 2006
- 38) 藤本寿史ほか: 高速列車通過時の駅舎内に発生する圧力変動の低減 その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 745-746, 2007

謝辞

本論文をまとめるにあたり、東京大学准教授 佐藤淳先生には、懇切丁寧なご指導を賜り、学位論文の審査におきましては主査をお受け頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。また、博士課程進学を勧めて下さり、佐藤淳先生を紹介頂くとともに副査を快くお受け頂き、貴重なご助言、ご指導を賜りました東京大学名誉教授 神田順先生にも深甚なる感謝の意を表します。東京大学教授 佐々木淳先生、同准教授 清家剛先生、同准教授 佐久間哲哉先生、同教授 高田毅士先生にも副査を快くお受け頂き、貴重なご助言、ご指導を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

本研究は、東日本旅客鉄道株式会社が、新幹線高速化に向けた列車風圧対策のため、平成 16 年より実施した研究開発成果を基にしています。構造技術センター 次長 林篤氏には、論文を作成することを薦めて頂くとともに常日頃から貴重なご指導を頂きました。(株)ジェイアール東日本建築設計事務所 大迫勝彦氏には進学前に貴重なご助言を頂きました。東京工事事務所 課長 星川努氏には、論文を取りまとめるにあたり、常日頃からご指導を頂きました。ここに深く御礼申し上げます。

博士課程への進学を認めて下さり、ご支援頂いた東日本旅客鉄道株式会社の経営陣の皆様には深く感謝し、心より御礼申し上げますとともに、本研究を進めるにあたり、常日頃から多大なご配慮とご支援を頂きました東京工事事務所 室長 尾形直樹氏をはじめ先輩同僚諸氏に厚く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、公益財団法人 鉄道総合技術研究所 飯田雅宣氏、武居泰氏、伊積康彦氏には多大なるご助言を頂きました。特に飯田雅宣氏には本論文の根幹である列車風圧に関する理論的な部分を懇切丁寧にご助言頂きました。飯田雅宣氏のご助言無しには、本論文を取りまとめることができなかつたと言っても過言ではありません。心から感謝しております。測定の実施にあたり、JR 東日本研究開発センター 渡辺恵介氏、吉澤玲児氏、新潟支社 久保康弘氏には多大なるご協力を頂きました。また、盛岡支社 在家善之氏には本論文をまとめるのに必要な図面等の資料を快く提供頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に、私事ではありますが、これまで著者を支えてくれた両親および妻と子供に心から感謝し、結びの言葉とさせていただきます。

原口 圭