

新しいトンネル緩衝工 (ダクト付・軽量パネル型) の開発



櫻井 一樹*



佐伯 和浩*



高桑 靖匡**



渡邊 明之*

トンネル緩衝工は、高速列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の圧力勾配を低減することでトンネル微気圧波低減効果を発揮する構造物である。トンネル緩衝工の効果は延長により決まるので、列車高速化に伴い延伸が必要となる。本報告では、トンネル緩衝工の延伸に伴う工事費を低減するため、必要となる延伸長を短縮する技術と、設置コストを低減する技術を開発したことについて述べる。

前者の技術は、管状構造（ダクト）を取り付けたダクト付トンネル緩衝工である。これは、圧縮波圧力勾配低減効果、圧力勾配を制御する仕組みなどを模型実験及び現地試験により把握し、本導入につながる知見を得た。

後者の技術は、大型・軽量で耐久性の高いパネルを用いた、軽量パネル型トンネル緩衝工である。トンネル緩衝工の構築費の分析を行い、コスト構成比率の高い主構造部材の構築費に着目して、新しい屋根材料を開発している。

●キーワード：トンネル緩衝工、トンネル微気圧波、圧力勾配、ダクト、軽量パネル、膜材料

1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入すると、出口側で発破音が鳴ったり、付近の家屋の窓や戸が揺れたりすることがある。この現象はトンネル微気圧波（以下、微気圧波）によるもので、図1に示すようなメカニズムで発生する。まず、トンネルに列車が高速で突入することにより、トンネル入口で圧縮波が形成される。この圧縮波は、変形しながらトンネル内を伝播する。圧縮波が出口に達した時、その一部が外部にパルス状の圧力波として放射される。このパルス状の圧力波が微気圧波である。

高速列車のさらなる速度向上の実現に際して、微気圧波対策が最も重大な課題の一つとなる。微気圧波対策は、車両先頭部形状を最適化することによっても一定の効果を得られるが、列車としての機能を構成するため、形状の最適化には限界がある。したがって、車両先頭部形状の最適化だけでは対策が不十分な微気圧波に対しては、地上施設での対策を講じる必要が生じる。

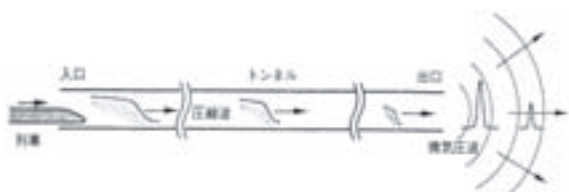


図1 トンネル微気圧波の現象

トンネル緩衝工は、微気圧波の地上施設での代表的な対策であり、図2のようなトンネル入口に設置されるフード形状の構造物である。トンネル緩衝工の線路直角方向の大きさ（断面積）は、トンネル本坑の1.4～1.5倍程度となっている。従来からのトンネル緩衝工（以下、従来型緩衝工）は、線路方向の長さによって微気圧波低減に一定の効果を発揮している。しかし、列車速度を向上させる場合には新設や延伸が必要であり、線路に近接した作業が多いことや電柱等の支障物の移転を伴うことが多いことなどから、費用のかさむことが難点となっている。

そのため、高速列車のさらなる速度向上を目指す中で、従来型緩衝工よりも延伸長を抑えることができたり、安価に設置できる新たな形態のトンネル緩衝工の開発が求められるようになった。

以上のような背景から筆者らは、新しいトンネル緩衝工（ダクト付・軽量パネル型）の開発に取り組んだ。その結果、トンネル緩衝工の挙動に関する知見及び本導入できる成果が得られたので、これについて報告する。



コンクリート構造形式（PC）



鋼構造形式

図2 トンネル緩衝工の構造

* JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所

** ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社（元 フロンティアサービス研究所）

2. 新しいトンネル緩衝工の開発

2.1 微気圧波とトンネル緩衝工

トンネル入口で形成される圧縮波の波面の勾配（圧力の時間変化率：以下、圧力勾配）は、列車速度の3乗に比例する。スラブ軌道のトンネル内を伝播する圧縮波は、波面が切り立つように変化し、圧力勾配が大きくなっていく。そして微気圧波の大きさは、出口に達した圧縮波の圧力勾配に比例する。

このような微気圧波の性状から、これを低減するためには、①トンネル入口で圧縮波が形成される段階、②トンネル内を圧縮波が伝播する段階、③トンネル出口で微気圧波として放射される段階、の三つの段階で対策を考えることができ、圧縮波の圧力勾配を小さくすることが微気圧波の低減につながる。

トンネル緩衝工は、トンネル入口で圧縮波が形成される段階で圧縮波の圧力勾配を小さくするためのものであり、トンネル本坑より大きい断面積を持つとともに、圧縮された空気を抜く開口部が側面に設けられている。図3に、トンネル緩衝工によるトンネル入口付近の圧縮波の圧力勾配低減効果を示す。トンネル入口付近の圧力は、高速列車のトンネル突入開始と同時に上昇し始め、突入完了により最大値に達するが、トンネル緩衝工は列車のトンネルへの突入を段階的に行わせることで圧縮波の急激な形成を抑えて圧力上昇を緩やかにし、圧力勾配を小さくする。この圧力勾配の低減率 α は、

$$\alpha = \frac{D}{D+L} \quad \cdots \cdots (1)$$

という関係が知られている。ここで、 L はトンネル緩衝工の長さ、 D は車両毎に定まる特性長さである。

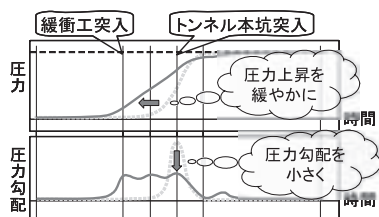


図3 トンネル緩衝工による圧縮波圧力勾配低減効果（トンネル入口付近の圧力時刻歴の概略図）

2.2 ダクト付トンネル緩衝工

ダクト付トンネル緩衝工とは、トンネル緩衝工の延長を短縮することを目的として、高速列車のトンネル突

入時に発生する圧縮波の圧力勾配を低減させる性能を向上させるため、図4のように内部と連通する管状構造（ダクト）を外方に取り付けたトンネル緩衝工である。

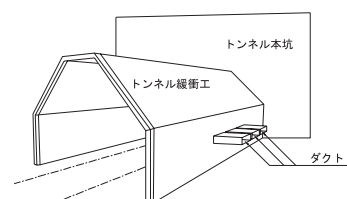


図4 ダクト付トンネル緩衝工

図5に、従来型緩衝工とダクト付トンネル緩衝工におけるトンネル入口の高速列車突入に伴う圧力変化の概念図を示す。図5のように、ダクト付トンネル緩衝工は、反射波による圧力上昇を大きくする（＝反射波に伴う圧力勾配を大きくする）ことにより、圧力上昇時間を延ばして（＝圧力上昇を遅らせて）、圧力勾配最大値を小さくするものである。これにより、ダクト付トンネル緩衝工は、従来型緩衝工よりも短い延長で、圧縮波の圧力勾配を低減できる、即ち微気圧波低減効果を発揮できるトンネル緩衝工である。

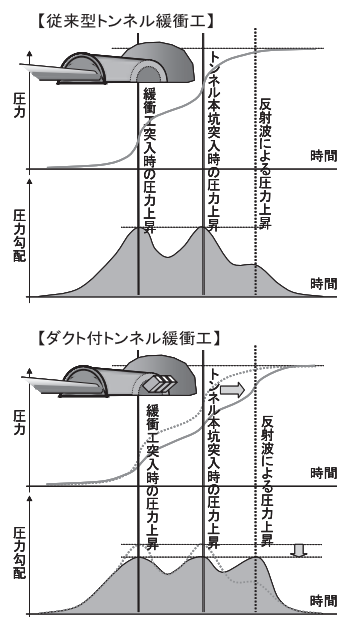


図5 トンネル入口の高速列車突入に伴う圧力変化の概念図

2.3 軽量パネル型トンネル緩衝工

一般的なトンネル緩衝工の基本構造は、図2に示した「コンクリート（PC、RC）構造形式」と「鋼構造形式」の2種類に大別される。前者は設置に型枠等の仮設が必要となるため、新設線に採用されている。後者は新線開業後のトンネル緩衝工新設や延伸に採用されている。今回のような新幹線速度向上によるトンネル緩衝工の新設や延伸には、後者の形式を用いることになる。

図6に一般的な「鋼構造形式」トンネル緩衝工の模式図を示す。これは、図7に示す「主構」+「デッキプレート」の構成となっている。ここで「主構」とは、屋根材料を支える主構造部材（H形鋼）のことである。

今回の開発では、トンネル緩衝工の延伸に関するコストダウンが強く求められたため、トンネル緩衝工の建設コストならびに構造について分析したところ、下記の点が明らかになった。

- (1) 「主構」の設置間隔は、屋根材料として使用されているデッキプレートの汎用品の最大寸法で決まっている。
- (2) 設置費用のほとんどが「主構」の設置に関するものである。
- (3) 現地架設に関わる費用は「主構（H形鋼）」の本数に係る。

上記の分析より、屋根材料の軽量かつ大型化による主構の設置本数低減を着眼点とした。これより、駅舎上屋や大規模建築構造物で使用実績があり、軽量で高耐久な「膜材料」に着目し、これを用いたトンネル緩衝工を検討した。

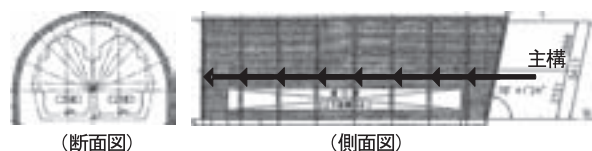


図6 従来型トンネル緩衝工の構造

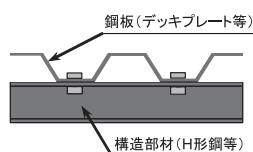


図7 主構周辺拡大断面図

3. ダクト付トンネル緩衝工の開発

3.1 ダクト付トンネル緩衝工の開発の概要

ダクト付トンネル緩衝工の開発にあたっては、模型実験を実施するとともに、新幹線高速走行試験に合わせて、現地の既設トンネル緩衝工にダクトを仮設して、圧縮波の圧力勾配の低減効果を検証した。

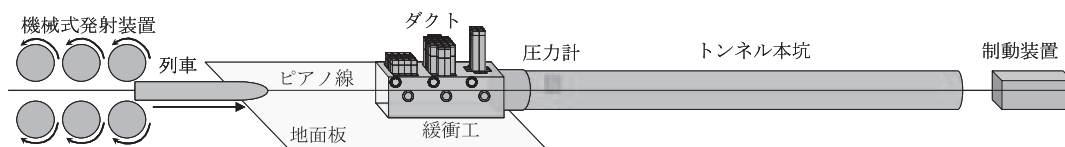


図8 微気圧波模型実験装置概略図

3.2 ダクト付トンネル緩衝工の模型実験

3.2.1 模型実験の方法

模型実験は、財団法人鉄道総合技術研究所の微気圧波模型実験装置を用いた。実験装置の概略を図8に示す。

列車模型が機械式発射装置から高速で打ち出され、ピアノ線を伝ってトンネル緩衝工・トンネル本坑に突入すると、トンネル内に圧縮波が形成される。トンネル本坑内の入口付近に圧力計を設置しておき、列車模型のトンネル突入時の圧力を測定する。測定した圧力の時刻歴から圧力勾配を算出し、微気圧波低減効果を評価する。

3.2.2 模型実験の結果

模型実験では、種々のダクト形態における圧縮波の圧力勾配低減効果を確認した。図9は、ダクト付トンネル緩衝工の模型実験の写真である。まず、簡略化模型で、ダクト付トンネル緩衝工の基礎的現象を把握し、その効果を確認した。その後、現地に仮設したダクト付トンネル緩衝工（詳細は後述）の現地再現模型での検証を実施した。

図10は、現地再現模型での模型実験の結果の一例であり、トンネル緩衝工長さ25m相当で、列車速度360km/hのものである。なお、車両模型は、新幹線の高速試験車をモデル化したものを使用している。ダクト付トンネル緩衝工の方が、従来型緩衝工より圧力勾配の大きい時間が長く、結果として圧力勾配最大値は従来型緩衝工より小さい。このように、トンネル緩衝工にダクトを取り付けることにより、圧力勾配最大値の低減効果を確認できた。つまり、ダクトを取り付けることにより、短い延長で従来型緩衝工と同等の効果を得ることができる。

種々の模型実験の結果、次の知見が得られた。

- (1) 入口方ダクト、中間ダクト、本坑方ダクト（図11に位置関係を示す）の各々の効果は、本坑方ダクトの効果が大きい。入口方ダクトの効果は非常に小さく、中間ダクトの効果はダクトの規模（取り付け費用）に見合わない。
- (2) ダクトを本坑寄りに長さや太さを調節して取り付けると、圧力勾配最大値を効果的に小さくできる。

(3) ダクト付トンネル緩衝工の長さが40mを越えると、圧力勾配の低減効果が発揮されにくくなる。

なお、ダクト付トンネル緩衝工の長さが20m未満に対しては、圧力勾配の低減効果を検証していない。これは、延長が短いため、ダクトを取り付けることによるトンネル緩衝工の短縮量も少なくなり、ダクト取り付け費用に対して短縮量が見合わなくなると想定されたためである。

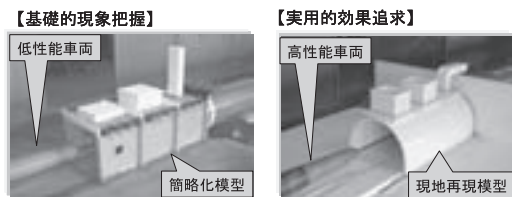


図9 ダクト付トンネル緩衝工模型実験

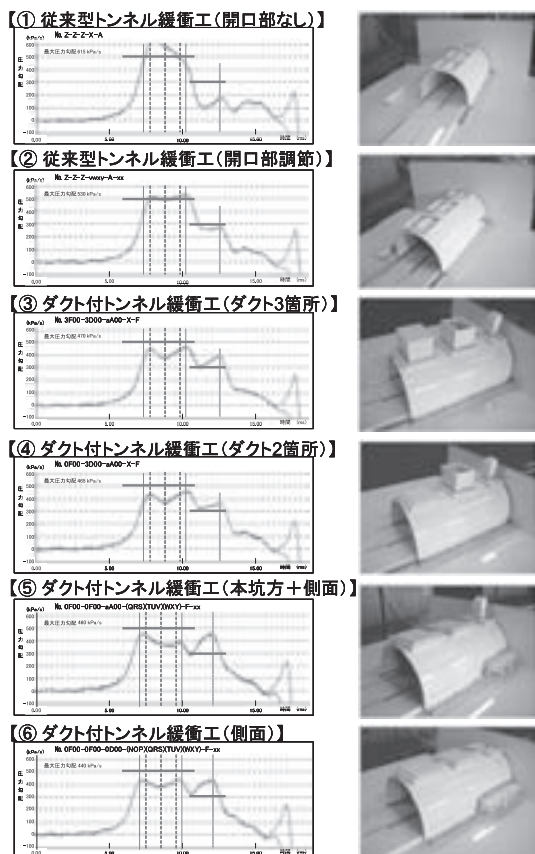


図10 ダクト付トンネル緩衝工の模型実験の結果



図11 検討したダクト取り付け位置

3.3 ダクト付トンネル緩衝工の現地試験

東北新幹線の既設トンネル緩衝工にダクトを3箇所仮設

した。このダクトは、開口部の開閉により、長さや太さを調節できる。図12に、既設トンネル緩衝工へのダクト取り付け状態を示す。

現地試験では、新幹線高速走行試験に合わせて、ダクトの長さや太さを調節し

ながら、列車突入時のトンネル本坑入口からトンネル内へ約80mの地点における圧力の時刻歴を、列車速度と共に測定した。

圧力の時刻歴から圧縮波の圧力勾配を求め、従来型緩衝工より圧力勾配を低減できることを確認した。また、本坑方ダクトのみでも、圧力勾配を低減できることを確認した。



図12 現地試験(ダクト取り付け状態)

3.4 ダクト付トンネル緩衝工の導入範囲

模型実験及び現地試験での種々の取り付け位置や大きさに対する検証をもとに、ダクト付トンネル緩衝工の導入に向けて、以下のように規定化した。

- (1) ダクトは本坑寄りに取り付ける。
- (2) ダクト付トンネル緩衝工は、ダクト付トンネル緩衝工の長さが20～40mとなる場合に適用する。
- (3) ダクト付トンネル緩衝工は、従来型緩衝工よりトンネル入口における圧力勾配最大値を、10%程度低減できると見込む。

トンネル緩衝工によるトンネル入口における圧力勾配の低減率 α が、長さ L_n (m) の従来型緩衝工と、長さ L_d (m) のダクト付トンネル緩衝工とで等しいとすれば、式 (1) より、

$$\frac{D}{D+L_n} = \beta \times \frac{D}{D+L_d} \quad \dots\dots(2)$$

と表すことができる。ここで、 β は従来型緩衝工に対するダクト付トンネル緩衝工での圧力勾配最大値の割合 (90%=0.9) である。これから、車両の特性長さ D が45m (高速試験車) の場合、27～49mの長さが必要なトンネル緩衝工を、ダクトを取り付けることにより、20～40mに短縮できる (7～9m短縮できる)。この結果、延伸長を抑えられるので、ダクト取り付け工事費を含めても、総工事費の削減が図られる。

4. 軽量パネル型トンネル緩衝工の開発

4.1 膜材料と構造概要

4.1.1 膜材料の特徴



図13 膜構造を用いた構造物の例

膜材料は、駅舎等や近年大規模建築構造物に適用されている（図13）。また、膜材料の構成を図14に示す。ガラス繊維を平織りした材料に、フッ素樹脂によってコーティングしたもので、耐久性に大変優れた材料である。重量は $1.3\text{kg}/\text{m}^2$ であり、従前から用いられているデッキプレート $20\text{kg}/\text{m}^2$ と比較して大変軽量である。



図14 膜材料拡大図

4.1.2 構造概要

この材料を適用したトンネル緩衝工の構造概要を図15・16に示す。



図15 軽量パネル型トンネル緩衝工構造概要図

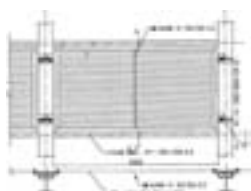


図16 軽量パネル拡大図

主構のピッチを従来型緩衝工の 2.5m から 3.8m に増加しており、設置費用のコストダウンが可能となっている。また、屋根材料の構造は、万が一膜材料が破損した場合に備え、交換が容易となるように「パネル構造」の形式（以下「軽量パネル」）とした。

開発では屋根材料を大型化するため、膜を用いた軽量

パネルについて各種の耐力試験を実施した。

4.2 軽量パネルに関する耐力及び性能の確認

軽量パネルの耐力を確認するため、以下の項目について検討した。

- ①作用荷重
- ②静的引張強度
- ③静的引張強度（経年変化）
- ④疲労強度
- ⑤疲労強度（経年変化）
- ⑥性能確認

このうち、①⑥はフィールド試験、②④⑤については室内試験を実施して検討した。ここでは①③⑤⑥について述べる。

4.2.1 作用荷重

軽量パネルの耐力検討を行うにあたり、トンネル緩衝工の作用荷重を特定した。作用荷重は特に列車突入時の圧力変動による荷重（以下「車両内圧荷重」）を明らかにする必要がある。

作用荷重は、フィールド試験においてトンネル緩衝工内に圧力計を設置して計測した実測値と既往の理論式からこれを十分満たす設計荷重とした。

図17に車両内圧荷重の測定結果を示す。

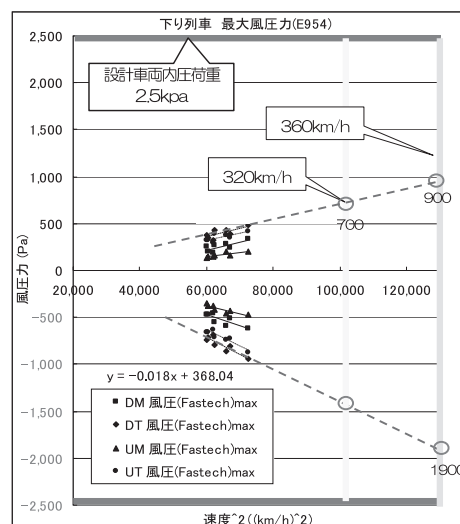


図17 車両内圧荷重測定結果の一例

4.2.2 静的引張強度（経年変化）

軽量パネルに用いている、膜材料に作用する外力は、膜構造であるため引張張力となる。よって膜材料耐力の

評価は、引張強度で評価している。

膜材料自体の経年による強度の変化は、既往研究にて、屋外暴露により経年した材料の引張強度試験の結果が示されている。図18に既往研究成果を示す。

ここで、膜構造の設計引張強度は、建築基準法により静的引張強度の12.5%以下となるよう規定されており、これを前述の経年した材料の引張強度の低下傾向にあてはめると、静的引張強度が設計引張強度に達する期間は107年に相当する。これは、鋼構造物の設計耐用期間を大きく上回っている。

本構造物における設計最大張力はこれ以下（疲労耐力：後述）にて設定している。

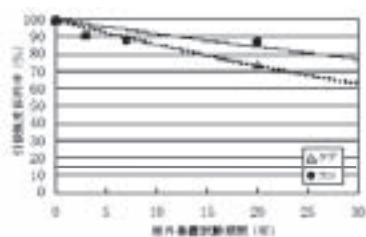


図18 屋外暴露試験結果による引張強度保持率変化

4.2.3 疲労耐力の検討

トンネル緩衝工に用いられる膜材料は、列車通過時の車両内圧荷重による繰返し荷重を受けるため、疲労耐力の検討を行った。検討には図19に示す繰返し戴荷試験で疲労限を特定した。ここで疲労限は、200万回繰返し試験の95%非破壊確率としている。疲労耐力の確認は未使用の材料のほか、促進暴露を行った材料によっても行った。

本試験により疲労限を特定し、設計引張力と比較すると疲労限の方が大きいことを確認した。また、促進暴露



図19 繰返し戴荷試験の状況（左：サンプル、右：試験装置）

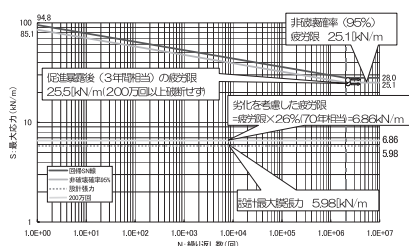


図20 繰返し戴荷試験結果

した材料においても、70年分の劣化を考慮した疲労限の方が、設計引張力よりも大きいことを確認している。

4.2.4 性能確認（実物大トンネル緩衝工の試験施工）

営業線において延長15mの実物大トンネル緩衝工の試験施工を行い、トンネル緩衝工としての性能を確認した。これより従来型緩衝工と同等の性能を確保できることを確認した。図21に施工中の状況を示す。



図21 試験施工中状況

5. おわりに

ダクト付トンネル緩衝工は、模型実験及び現地試験により性能を確認し、開発を行ってきた。これまでの成果をふまえて、2010年度末及び2012年度末に予定されている東北新幹線における高速化に対応すべく、いくつかのトンネル坑口にダクト付トンネル緩衝工を設置するための調査・設計が、現在行われている。

また、軽量パネル型トンネル緩衝工については、基礎実験ならびに試験施工により所定の耐力・性能を確認した。現在実導入に向けた調査が行われている。

最後に、今回の研究開発に際して、財団法人鉄道総合技術研究所環境工学研究部空気力学研究室の諸氏から多大なる指導を受けたことを書き記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高桑、野澤、飯田、福田；排気筒付きトンネル緩衝工の現地試験、平成18年度土木学会全国大会第61回年次学術講演会、7-198、pp.395-396、2006.9
- 2) 高桑、野澤、飯田、福田；トンネル微気圧波低減効果を向上するパイプ付き緩衝工の模型実験、平成17年度土木学会全国大会第60回年次学術講演会、7-184、pp.367-368、2005.9
- 3) 高桑、野澤、飯田、福田；トンネル微気圧波を低減するパイプ付き緩衝工の模型実験、平成16年度土木学会全国大会第59回年次学術講演会、7-170、pp.339-340、2004.9
- 4) 高桑、野澤；改良型トンネル緩衝工の模型実験、JR EAST Technical Review、No.14、2006.2
- 5) 小沢、内田、前田；入口緩衝工によるトンネル出口微気圧波の低減、鉄道技術研究資料、1978.2
- 6) 小沢智；トンネル出口微気圧波の研究、鉄道技術研究報告、No.1121、1979.7
- 7) 飯田；入口緩衝工と先頭部形状によるトンネル微気圧波対策、RRR、62巻、5号、pp.8~11、2005.5