

産業遺産として残されている地下空間を利用した  
環境調整型トレーニング施設の課題と可能性について  
STUDY ON APPLICATION OF UNUTILIZED UNDERGROUND SPACE  
REMAIND AS INDUSTRIAL HERITAGES FOR TRAINING FACILITY  
WITH CONTROLLABLE AMBIENT CONDITIONS

近久博志<sup>1</sup>・小林 薫<sup>2</sup>・阿保 寿郎<sup>2</sup>・櫻井春輔<sup>3</sup>  
Hiroshi CHIKAHISA・Kaoru KOBAYASHI・Toshiro ABO・Shunsuke SAKURAI

Unutilized underground spaces, such as abandoned tunnels due to transformation of social structure, are widely regarded as “Industrial heritages”. There is a need to optimize the usage of these assets in an alternative way.

Construction of training facilities in underground spaces with controllable ambient conditions is one of the effective ways that takes advantage of some unique tunnel features such as air tightness and constancy of temperature and humidity.

In this paper, after addressing issues related to the diverse application of abandoned tunnels and altitude training conditions required by athletes, advantages acquired by fulfilling the requirements of the aforementioned issues are discussed, followed by compilation of technical matters that should be attended, as viewed from various fields of specialization.

*Key Words* :low oxygen facility, high oxygen facility, altitude training, airtightness, constancy of temperature and humidity, underground opening, industrial heritage

## 1. はじめに

近年の急速な社会構造の変革の波は様々な産業に影響を与え、役割を終えた産業の施設や設備は、廃棄処分されたり、放置されたりすることになる。例えば、鉱山や地方鉄道に活用されていたトンネルなどは、狭くて細長い線状の構造物であり、外部との遮断性が高いため、他の用途には使い難く、埋め戻すにも費用が掛かることもあり、放置されていることが多い。また、一部では、活用してきた産業の紹介のための展示館や見学施設、ワインや食物の貯蔵施設（図-1）、キノコ栽培場などの活用があるものの、本格的な転活用に繋がっていないのが現状である。

こうした背景に対して本稿では、長距離ランナーなどが採用している高地トレーニングを目的にした環境調整型トレーニング施設を例にして、産業遺産として残されているトンネルなどの地下空間を転活用する時に解決すべき課題とその対応について整理することで、地下構造物の転活用の可能性について論じる。

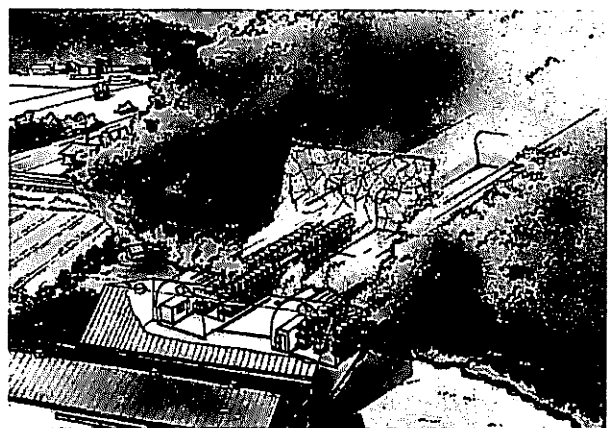


図-1 地下空間を転活用したワインセラーのイメージ

キーワード：低圧低酸素施設、高圧高酸素施設、高地トレーニング、気密性、恒温恒湿性

<sup>1</sup>フェロー会員 山口大学 教授

<sup>2</sup>正会員 飛島建設（株） 技術研究所

<sup>3</sup>フェロー会員 （財）建設工学研究所 理事長

## 2. 高地トレーニングの現状

高地トレーニングに関連する実験は、現地におけるデータ収集や分析だけでなく、酸素量や気圧を調整できる装置や実験室を活用して実施されることが多い。また、神岡や釜石の鉱山跡地のトレーニング室、棚原鉱山<sup>2)</sup>の走行距離が約42mある常圧低酸素短距離ランニング施設（写真-1）のように、廃坑になった鉱山の坑道の一部を使っている事例などもある。こうした事例を通じて、酸素量や気圧の変化が人体に与える影響について研究され、多くの成果がもたらされてきている。そして、こうした基礎データは高地トレーニングのプログラムのメニュー作りにも適用されてきている。さらに、世界大会の長距離マラソンを目指すアスリートは、高地トレーニングを標準的な方法として採用し始めている。一方、高地トレーニングに代表される気圧や酸素を調整する環境調整型トレーニング手法は、マラソンや短距離走だけに留まらず、水泳やスケート、スキーや登山<sup>3)</sup>、さらには、医療やリハビリなどへの適用の可能性を探る研究もあり、その有効性は広く認知されるようになってきている。

高地トレーニングは、海拔2,500m付近の高所でよく行われる。科学的背景として、アメリカの研究者らによる、2,500mの高所に滞在しながら1,250mの地点でトレーニングを行う高地トレーニングが長距離選手に有効であるとの報告<sup>4)</sup>や、同等の低酸素環境（低酸素室）でのトレーニングが400m走者に有効であるとの報告<sup>5)</sup>などがある。しかしながら、我が国においては、2,500

m以上の高地には平坦な場所が少なく、日本オリンピック委員会（JOC）の陸上競技強化センターの準高地トレーニング地として認定されているのは標高1,000 mの場所にある「蔵王坊平アスリートビレッジ」<sup>6)</sup>程度であり、必要とされながらも適している場所が少ないというのが現状である。

このため、世界のトップを目指しているマラソン・ランナーは、高地トレーニングを実施するために海外へ出かけることを余儀なくされている。例えば、近年では、国内の実業団のうち、年間延べ約130チ

ームが昆明（中国）へ遠征を行っている<sup>7)</sup>。また、他にもボルダー（北米）などへの遠征も頻繁に行われている。これらの海外遠征には、日本国内の選手にとって経済的な諸問題がある。また、長い移動時間、現地における食生活の違いなどから体調管理が難しいだけでなく、屋外で行うため天候や気象に大きく影響を受けるため、目的とする大会に照準を合わせたトレーニング・メニューの調整が難しいとされている。一方、2007年に供用を開始したナショナル・トレーニング・センター<sup>8)</sup>では、隣接する国立スポーツ科学センター（JISS）に10名程度を収容できる低酸素トレーニング室や低酸素合宿室を整備して、スポーツ科学や医学の研究に活用し始めている。このような小規模の低酸素環境室を利用している研究が実施されているものの、多



写真-1 ハイポキマイン・走路・やなはら

<http://www.npo-fm.jp/hypoxic.html>

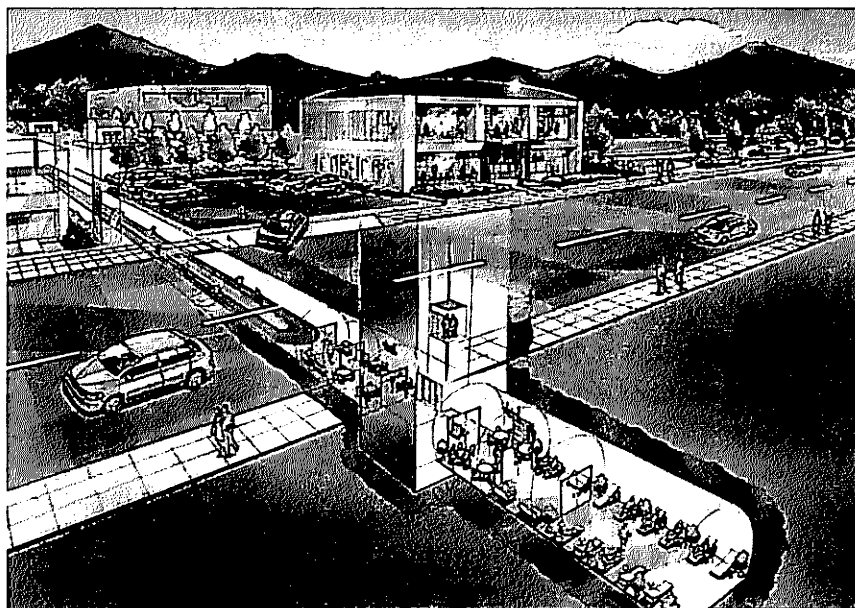


図-2 地下空間を転活用した環境調整型トレーニング施設のイメージ

くのアスリートを育成させるためには、利便性の高い都市近郊において、環境調整が容易でかつ本格的なトレーニング施設が望まれている（図-2 参照）。

### 3. 地下空間を転活用した環境調整型トレーニング施設の利点

産業遺産として残されている地下空間を環境調整型トレーニング施設として活用することの利点を整理すると次のようになる。

- 1) 環境調整型トレーニング手法の研究は、カプセル内や小さな部屋内での部分的な実験に留まっているのが現状である。このため、トンネルのような地下空洞を利用した施設が実現すれば、世界で初めての本格的なランニング・トラックを備えた環境調整型トレーニング施設となる。
- 2) 環境調整型のトレーニング施設では、独創的な実験が手軽に実施できるため、我が国の競技選手の成績向上に繋がる革新的なトレーニング方法の開発に繋がる可能性が高い。
- 3) 社会構造の変革と並行して対応が急務とされている産業遺産の有効的な再利用にもつながる。
- 4) 地上施設と比較してCO<sub>2</sub>排出量の低減にも繋がる省エネ施設となる可能性が大きい。
- 5) スポーツ振興や健康増進の拠点づくりなど、地域の活性化につなげることが可能となる。
- 6) 新たに施設を建設することに比べ、大規模な建設工事を必要としないため、周辺環境への影響低減や経済的な負担が少なくなるなどの利点もある。
- 7) トンネルなどの地下空間は、地上施設に比べて、気象や外気温・湿度の変化などの外的要素による影響を受け難く、堅牢であるため、内部空間の環境調整が容易である。
- 8) トンネルのような線状の長い地下空間は、ランニング施設としての活用が図りやすい。
- 9) 都市部に近く、公共交通の便が良い場所であれば、市民の健康増進、リハビリテーションやスポーツ振興にも活用したいというニーズが多い。

### 4. 地下空間を転活用した環境調整型トレーニング施設の課題

トンネルのような地下空間を環境調整型トレーニング施設に活用する場合、図-3に示すようにスポーツ科学、空間心理学、建築設備学や地盤工学などの分野における研究が必要となる。そして、つぎに示すような課題を解決することが重要となる。

① 環境調整型トレーニングの方法と施設運用の研究（スポーツ科学）

② 無窓の地下空洞における利用者のストレス低減方法に関する研究（空間心理学）

③ 酸素濃度と気圧を変化させることができる経済的な環境調整設備の研究（建築設備学）

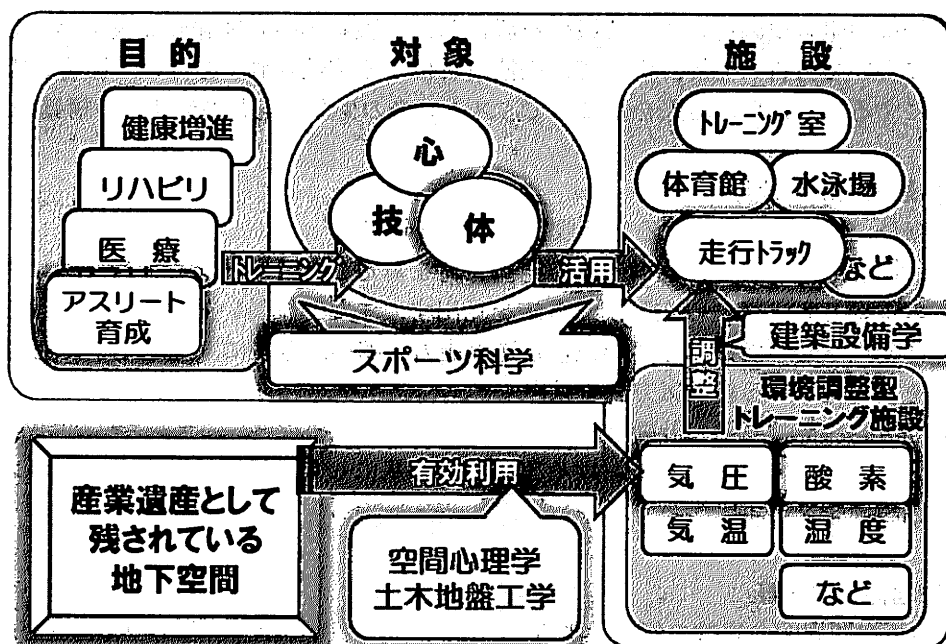


図-3 環境調整型トレーニング施設構築に必要な学識

#### ④ 空洞への地下水の流入増加がもたらす周辺環境への影響低減や空洞の安定性向上の研究（地盤工学）

次に、個別の技術分野ごとの課題について述べる。

##### (1) スポーツ科学分野

###### a) 低圧低酸素トレーニングによる心肺機能向上効果について

これまで高地トレーニングに実施されてきたボルダー、昆明などの高地環境下でのトレーニング状況を調査し、低圧低酸素トレーニングによる心肺機能向上効果への影響要因を明らかにする。

###### b) 低圧低酸素下のトレーニング効果に関する実験的研究

運動時の換気量、特に気道抵抗と呼吸筋の仕事量、運動パフォーマンスに対する低酸素と低気圧の影響について低酸素と低気圧のトレーニング室を用いて被験者実験を実施する。その結果から低酸素トレーニング効果と低気圧トレーニング効果の差異を明らかにする。

##### (2) 空間心理学分野

###### a) 地下空間が人に与える心理的影響の評価について

閉鎖空間となる地下空間でのトレーニングに関して課題となる快適性阻害要因を抽出して、阻害要因の低減方法に関し室内・現地で実験を行い、効果的な方法を見出す。

###### b) 地下空間が人に与える心理的影響に関する実験的研究

模型やCGによる映像と空調・音響・照明設備を組み合わせた環境刺激を被験者に体感させ、地下空間が人に与えるストレスなどの影響を実験により明らかにする。そして、この影響実験の結果から、トレーニング環境としての阻害要因を抽出し、それらの複合的な影響度合を分析する。現地で撮影した画像からイメージ・ベーストCGモデルを作り、現実感のある仮想空間を用いて被験者実験を行い、地下空間におけるストレスの少ない環境を見出す<sup>9)10)</sup>。

###### c) 地下空間が人に与えるストレスの低減方法について

室内実験で抽出した快適性阻害要因の妥当性を検証するために、対象となるトンネル状の地下空間に快適性阻害要因を再現する設備を設置し、被験者への心理評価実験を実施し、影響要因の複合的な効果について分析する<sup>11)</sup>。併せて、脳波解析による感性評価<sup>12)</sup>を行い、影響要因の個人差についても明らかにする。これらの結果を基にして、ストレスの少ない空間のデザイン構築の基礎データとする。

##### (3) 建設設備学分野

###### a) 細長い地下空間における空調設備に関する研究

概念設計に対して空洞内部の空調負荷を算定し、対象となるトレーニング施設に必要な空調設備機器の選定と省エネ型の空調換気方式を見出す。また、細長い対象空間における空気圧と酸素濃度を段階的に変化させるために必要な熱量と送風能力を調べ、さらに、現地での実証実験により、温湿度・CO<sub>2</sub>濃度を均一化させる給排気方法を見出す<sup>13)</sup>。

###### b) 経済的な空調設備の計画と設計の研究

気流解析結果と現地における実証実験を基にして、低圧低酸素トレーニング施設に適した経済的な空調設備を見出す<sup>14)</sup>。

##### (4) 地盤工学分野

###### a) 地下空間周囲の岩盤の気密性調査

地下空間の気圧や酸素濃度などの環境調整を行う際に必要な地下空間周囲の岩盤が持つ気密性について調査する。地下空間周囲の地盤や岩盤に対して、岩盤透気試験<sup>15)</sup>や覆工コンクリートの気密性<sup>16)</sup>について調査を行い、地下空間の環境調整を行う際に必要な真空ポンプなどの機器の仕様決定の際の基礎データとする。

###### b) 地下水の流入増加がもたらす周辺環境への影響の研究

地下空間の内部気圧を低減することによって生じる地下水位や地下水流の変化について、既往の資料

収集、現地踏査、現地の地盤や周辺環境を用いて調査する。さらに、対象となる地下空間の安定性を評価するために、含水比の少ない地点と降雨によって含水比の変化する地点の2地点で地質調査ボーリングを実施する。現地で採取したコアを使って一般物理試験と力学試験などを実施し、含水比の繰り返し変化による力学特性の変化について調べる。また、降雨の繰り返しが地山の変位挙動に与える影響を調べるために、地山挙動の現場計測を実施する。

c) 地下水流の流入増加がもたらす周辺環境への影響の研究

現地の地質や地下水に関する調査試験結果を基にして、対象となる空洞周辺の雨季における地下水位の変化を調査し、周辺地山の水門特性と浸透流特性<sup>17)</sup>を調べ、対象空洞周辺の地下水位の変化や井戸枯れの可能性について調査する。

d) 地下水流の流入増加がもたらす空洞安定性の研究

既往の調査試験結果に加えて、本研究に必要な空洞の健全度調査や現地計測・試験を実施する。降雨などによる含水比の変化によって周辺地山の力学特性や変位特性を調べ、空洞の安定性について調査する。

e) 経済的な環境影響の低減と空洞安定性向上の対策の研究

現地の調査試験の結果を基にして、本施設活用時の空洞の安定性と周辺環境への影響について検討する。そして、必要に応じて経済的で効果的な対策工を考慮し、対象となる地下空間の環境調整型トレーニング施設としての経済性について検討する。



図-4 地下空間を転活用した環境調整型トレーニング施設のもつ課題

## 5. おわりに

今後、急速な社会構造の変化に応じていくためには、従来の学問領域を越えて、さまざまな分野の研究者が集まり、垣根を越えて知恵を出し合うことによって、社会へソリューションを提供していくことが必要と考えられる。特に、狭い国土の有効利用を考えると、地下空間の利用は不可欠な技術となり、その専門技術は、ますます重要な技術の一つになるものと考ええる。

本稿では、産業遺産として残されているトンネル状の地下空間を有効に転活用する方法の一つとして、高地トレーニング環境を実現する本格的なランニング・トラックを備えた環境調整型トレーニング施設への活用に関する課題を整理した。その役目を終えて放置されているトンネルであっても、少し視点を変えて、活用方法を考えてみれば、今の日本の抱えている一つの課題に対するソリューションになる。そして、当然のことながら、初めての取り組みには、いろいろな課題に直面することになる。例えば、今回のような施設建設には、スポーツ科学、空間心理学、建築設備学やトンネル工学、地盤工学などのさまざまな専門分野の課題を解決し、各分野間の調整を図った上で利用者が快適で、安全性の高い施設建設を行っていくことが重要となる。

謝辞：当研究には、さまざまな専門分野の学識者の皆様よりご協力を頂いております。特に、スポーツ科学専門分野では西保岳先生（筑波大学准教授）、林恵嗣先生（静岡県立大学短期大学部）、空間心理学では松本直司先生（名古屋工業大学大学院教授）よりご指導ご鞭撻を頂いております。ここに、記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば清木隆文, 鮎澤淳一：採石跡地下空間の現状と有効利用に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第7巻, pp.287-294, 2002.
- 2) <http://www.npo-fm.jp/hypoxic.html>
- 3) 例えば浅野勝己, 小林寛道：高所トレーニングの科学, 8章-14章, pp.88-163, 杏林書院.
- 4) Levine BD, Stray-Gundersen J: "Living high- training low": Effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. J Appl Physiol 83: pp.102-112, 1997.
- 5) Nummela A, Rusko H: Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. J Sports Sci 18: pp.411-419, 2000.
- 6) <http://www.zao-bodaira.com/>
- 7) 読売新聞, 2008.6.10.
- 8) <http://www.ntc.naash.go.jp/>
- 9) 松本直司, 近久博志, 加藤毅, 勝崎香奈：地下空間における期待感－空間拡大時の期待感位置とその強さ－, 土木学会論文集, No.777/VI-65, pp.139-147, 2004.
- 10) 松本直司, 日比淳, 磯和孝史, 甲村和三：折れ曲がり街路空間における期待感最大位置とその強さについて－街路空間の期待感に関する研究－, 日本建築学会計画系論文集, 第589号, pp.91-97, 2005.
- 11) 松本直司, 勝崎香奈, 近久博志：地下空間における期待感に関する研究－空間拡大形状が変化した場合の期待感の位置とその強さ－, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第11巻, pp.157-162, 2006.
- 12) 瀬田恵之, 松本直司, 高木清江, 三輪律江：都市空間の物的要因が感性分析の評価傾向に与える影響－脳波解析手法を用いた建築外部空間の情緒的意味のノーテーション・その2－, 日本建築学会計画系論文集, 第577号, pp.65-72, 2004.
- 13) 神山健二, 佐々木亮治, 河野俊樹, 足永靖信, 成田健一, 植松康：屋外熱環境の実務設計支援システムの開発とその適用, 日本建築学会技術報告集 17号, pp.283-286, 2003.
- 14) 小林 薫, 松田浩朗, 松元和伸, 河野俊樹, 藤間律子, 金内昌直：連続式流向流速計の開発に向けた流体シミュレーション, 2007年秋季講演会講演要旨, 日本地下水学会, pp.194-199, 2007.
- 15) 山田文孝, 中山昭彦, 櫻井春輔：空気吸引による岩盤空隙容積評価, 土木学会論文集 No.617/Ⅲ-46, pp.225-234, 1999.
- 16) 小林 薫, 阿保寿郎, 西尾彰宣, 芥川真一, 櫻井春輔, 近久博志：トンネル利活用における掘工コンクリートの気密性試験装置, 土木学会全国大会第62回年次学術講演会, pp.427-428, 2007.
- 17) 河野俊樹, 近久博志, 小林 薫, 二木龍一郎：地下空間展示施設の空調エネルギーのコスト検討－高山祭りミュージアムの調査事例－, 土木学会第11回地下空間シンポジウム, 第11巻, pp.251-256, 2006.

# 列車走行に伴い地下鉄駅構内で発生する 列車風の予測解析と緩和対策について PREDICTION AND ANALYSIS OF TRAIN WIND IN SUBWAY STATIONS AND MEASURES FOR MITIGATION

西村 高明<sup>1</sup>・森谷 剛<sup>2</sup>・宇波 邦宣<sup>3</sup>・森井 宜治<sup>4</sup>  
Takaaki NISHIMURA・Takeshi MORIYA・Kunitaka UNAMI・Nobuharu MORII

With an eye toward making subway stations more comfortable and as a part of its efforts to create a barrier-free environment, Tokyo Metro intends to take the following measures: installing facilities for vertical movement of passengers such as elevators; and installation of two-way evacuation passages and smoke elimination equipment, which are among steps taken to comply with fire-disaster-prevention standards established by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Tokyo Metro is also working on measures to mitigate train winds (train-driven air movement) inside stations. A study was made, utilizing simulation techniques as well as measurement of wind velocity, at stations in service that suffer strong train wind, and actual mitigation measures are being provided for stations where possible. A one-dimensional analysis has been used to predict train wind, in which the subway as a whole is represented by a pipeline network model comprising the subway tunnel, platform, passage, and stairs — all modeled as tubes according to fluid dynamics. Analytical logic and coefficients have been reviewed to improve the analysis program. Finally, we have developed software dedicated to analysis of air flows in stations.

This paper introduces the concepts applied in the program and reports on the state of the study, including the construction work undertaken as part of the study. We also report on the actual construction undertaken as part of train-wind mitigation measures and discuss its effectiveness.

*Key Words: train wind, simulation, analytical program*

## 1. はじめに

東京メトロでは、地下鉄駅構内における快適空間の創造を目指し、バリアフリーの一環としてエレベーター等の垂直移動設備の設置や国交省制定の火災対策基準に適合させるべく二方向退避通路、排煙設備などの火災対策設備の整備を鋭意進めているが、更に駅構内における列車風の緩和対策にも取り組んでいる。これまでも列車風が強い営業駅に対して風速計測とそれに伴うシミュレーションを含めた緩和対策の検討を行い、施工可能な駅に対しては緩和対策を実施している。列車風の予測は流体力学に基づき地下鉄のトンネル、ホ

---

キーワード：列車風，気流予測解析，列車風緩和対策

<sup>1</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 改良建設部 部長

<sup>2</sup>東京地下鉄株式会社 鉄道本部 改良建設部 設計課 主任

<sup>3</sup>正会員 メトロ開発株式会社 技術部 技術第一課 課長

<sup>4</sup>沼津工業高等専門学校 電子制御工学科 教授

ーム、通路、階段などをチューブとしてモデル化し、地下鉄全体を管路網モデルに置き換えた一次元解析により評価している。さらに解析精度を向上するため、解析理論や係数等を見直し、解析プログラムの改良を行い、地下鉄駅構内の気流解析に特化した解析ソフトを開発した。

本稿ではこの考え方を示すと共に、この最新の解析ソフトを用いて列車風緩和対策を検討、実施工を実施し、その効果を確認した実例について報告するものである。

## 2. 気流解析の概要

地下鉄はトンネル、階段、コンコースなどが要素となる管路網で形成されている。トンネル内を走行する列車は、その内部に一樣気流を発生させる。気流は列車の運動がつくる圧力場によって誘起され、列車風を発生させている。以下に本気流解析の基本的な考え方を示す。

### (1) 基礎理論

気流解析プログラムで使用している基礎理論を以下に示す。尚、理論式で使用されている主な記号の意味は次の通りである。

- L: トンネル長 [m]
- P: 圧力 [Pa]
- U: 列車速度 [m/s]
- V: トンネル内一樣気流速度 [m/s]
- W: 列車側方気流速度 [m/s]
- D: トンネルの水力直径 [m]
- d: 列車の水力直径 [m]
- $\phi$ : ゆらぎ比速度 [m/s]
- $\lambda$ : トンネル壁等摩擦抵抗係数 [-]
- $\rho$ : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

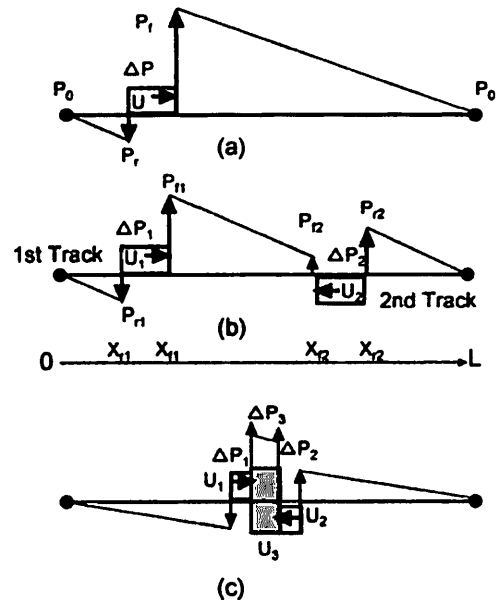


図-1 走行列車と気流誘起の関係

トンネル内を走行する列車は、 $U > V$  の場合、前方で気流を圧縮（後方では希釈）してトンネル内に衝突圧  $\Delta P_c = \rho_0 \phi_0 |\phi_0|$  をつくる（図-1 (a) 参照）。列車側方領域の摩擦圧  $\Delta P_f$  により列車前後間の気流が阻害され、圧縮（及び希釈）の効果が持続して、列車と側方領域とから成るピストン領域を形成する。圧力差  $\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_f$  は、式(1)に示すように、一樣気流を誘起する。衝突圧の要素  $\phi_0$  は式(2)で自己矛盾なく与えられる。

$$d_i V = \frac{\Delta P}{\rho_0 L} - \frac{\lambda}{2D} \left( 1 - \frac{\ell}{L} \right) |V| \quad (1)$$

$$d_i \phi_0 = d_i (V - W) + \frac{(W - \phi_0) |\phi_0|}{2L} \quad (2)$$

複線トンネルにおける圧力差は対向走行する2列車によって誘起される（図-1 (b) 参照）。2列車のピストン領域が重なる場合には、重合領域に速度  $U_3 = (U_1 + U_2)/2$  で記述される第3の列車が出現したものととして、その列車による圧力差  $\Delta P_3$  を加算する（図-1 (c) 参照）。第3の列車は交差終了後は消滅する。式(1)におけるトンネル内圧力差、および列車長は以下のように拡張される。