

列車の走行によって引き起こされるトンネル内の音場

杉 本 信 正 (大阪大学 基礎工学部)

列車の走行によってトンネル内に引き起こされる音場のうち、列車に比較的近い‘近傍音場’を線形音響理論を用いて求め、特に列車の遠方での最大音圧を評価する。列車を一對の音響的なわきだしと吸い込みによってモデル化する。両者を列車長さに相当する距離隔てて配置し、列車の速度で運動させる。このモデルはトンネル断面積に比べて、列車の断面積が十分小さい場合にのみ成立する。

列車の運動については、次の二つの場合を想定する。一つは半無限に長いトンネルに一定速度で突入する場合、もう一つは、無限に長いトンネル内を静止状態から衝撃的に一定速度で動き出す極端な場合である。後者は、十分長いトンネル内を列車が加速することにより発生する、音圧の最大値を見積るためである。いずれの場合にも、トンネル出口からの反射の影響や壁面摩擦による散逸効果を見積る。このようにモデル化した列車の運動は、音源として波動方程式の非同次項を通して取り入れる。

簡単のため、まず1次元平面波を仮定し、上で述べた二つの運動によって引き起こされる音場を求める。この際、音源の強さをトンネル断面にわたって平均化する。平均化の正当性をみるために、次に円形断面トンネルの軸上を、音源が運動する場合の軸対称音場を求める。トンネル内の圧力攪乱は、分散性のない最低次モードと無限個の分散性高次モードの重ね合わせによって表現される。解の詳しい解析から次のことが分かる。

列車がトンネルに突入した瞬間や、列車が運動し始めた瞬間に、まず球面波が発生し波頭を形成する。この球面波が伝播するうちにトンネル壁面で反射し、トンネル内に圧力が極端に高いまたは低い所（圧力の特異性）が現れ、それらは伝播にともない‘ダイヤモンドパターン’を示すようになる。特異性の強さは、波頭近くでは時間の逆数に比例して減衰し、波頭後方では時間の $-\frac{1}{2}$ 乗に比例して減衰することが求まる。時間が経過するにつれ、ダイヤモンドセルの数が増え、波頭に向かって密に分布するようになるが、特異性の強さが次第に弱くなり、最初に求めた平面波解に漸近する。この結果より、音源の強さの平均化が正当化される。

遠方で出現する平面波の波頭での圧力上昇 $\Delta p/p_0$ は、突入する場合には $\gamma\chi M^2/(1-M^2)$ で与えられる。ただし、 p_0 を大気圧とし、 γ を比熱比、 $\chi (\ll 1)$ をトンネル断面積に対する列車断面積の比、 $M (\ll 1)$ を列車のマッハ数とする。列車周辺には負圧部分が発生し、その大きさは、列車先頭、後尾付近を除いた中央部で、1次元解析で得られた結果 $-\gamma\chi M^2/(1-M^2)$ に等しい。一方、先頭、後尾付近では、圧力の特異性が現れ、圧力分布は半径方向に構造を示す。

これに対し、列車の衝撃運動によって引き起こされる音場では、前方波頭での圧力上昇 $\Delta p_+/p_0$ は $\frac{1}{2}\gamma\chi M/(1-M)$ となり、トンネルに突入する場合に比べて大きくなる。一方、後方波頭では圧力降下が発生し、その大きさ $\Delta p_-/p_0$ は $-\frac{1}{2}\gamma\chi M/(1+M)$ で与えられる。列車周辺の負圧の大きさは、突入する場合と同じである。突入、衝撃運動のいずれの場合にも、音圧は断面積比 χ の一次に比例する。ここで示した音響学的な取扱いによる結果を、従来の簡単な1次元空気力学的取扱いによる結果（突入の場合のみ）と比較すると、 χ が十分小さい場合には両者は一致する。しかし、従来の方法は、列車突入時しか扱うことができず、列車周辺の負圧分布を求めることや、過渡現象を知ることはもちろんできない。ここで紹介した音響的取扱いは、線形理論とはいえ、圧力波伝播の精密な描像を与えることができる。