特性曲線法による実在気体中の爆風

Characteristics Method Applied to Blast Waves in a Real Gas

〇坂口 堯,都立科学技術大学工学部,〒191-0065 日野市旭が丘 6-6 E-mail:gsakagu@cc.tmit.ac.jp
東野 文男,東京農工大学工学部,〒184-8588 小金井市中町 2-24-16 E-mail:higasino@cc.tuat.ac.jp
Gyo SAKAGUCHI, Tokyo Metropolitan Institute of Technology, Hino-shi, Tokyo 191-0065
Fumio HIGASHINO, Tokyo Noko University, Koganei-shi, Tokyo 184-8588

The effect of real gas in air on blast waves was investigated. The characteristics method was applied to analyze the problem of the one dimensional unsteady flow of a real gas by making use of the Hartree technique. To give the initial values along a constant time line the quasi-similarity solution was utilized. It is shown that the equation governing the flow field behind shock front can be computed in a similar way to the flow of a perfect gas by introducing an isentropic index in the present analysis. The results show that the decay line of the real gas decrease less than that of the perfect gases and the isentropic index plays an important role through the analysis.

1. 緒論

ガス爆発や、宇宙往還機が地球大気圏再突入時に発生す る衝撃波面後方で加熱される気体は非常に高温になる.この とき、気体は解離及び電離という現象を伴うことが予想され る.爆風の理論解析に解離や電離,すなわち実在気体の効果 を考慮した研究は相似解を求める方法¹⁾,人工粘性を導入し て直接的に,基礎方程式の数値解を求める差分法²⁾がある. また特性曲線法を爆風の解析に用いれば、爆風の中心点と衝 撃波面との間は等エントロピ流とみることができるので接触 不連続面を捉えることはできないが,衝撃波適合法により衝 撃波面の運動を厳密に求めることができる.理想解離気体の 爆風の解析にこの特性曲線法の長所を生かした研究が発表さ れている^{3),4)}. 本解析では等エントロピ指数を導入し,特 性曲線法を用いて,実在気体中の爆風の運動を解析する.

2.基礎方程式

-

粘性、熱伝導及び拡散などの影響を無視すれば、1次元 非定常流の質量、運動量、エネルギーの保存式はそれぞれ以 下のようになる.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + j \frac{\rho u}{r} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho^{\gamma}} \right) + u \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\rho^{\gamma}} \right) = 0 \qquad (3)$$

但し、ここでt,rはそれぞれ時間,中心からの距離をあらわし, γ は比熱比, ρ, p, u はそれぞれ密度,圧力、流速であ

る.また j は j=0 は平面流,1 は軸対称流,2 は球面対称流 を表す.

3.数値計算法

衝撃波面を安定に捕らえるために多くの数値計算法が提 案されてきたが,ここでは特性曲線法をこの問題に適用する. 基礎方程式(1),(2),(3)式より3組の特性曲線とそれに対応 する適合方程式が得られ,さらにそれらの式を差分化すると

$$\Delta u + \frac{1}{\rho a} \Delta p = -j \frac{au}{r} \Delta t, \Delta r = (u+a) \Delta t, \quad (4)$$

$$\Delta u - \frac{1}{\rho a} \Delta p = j \frac{au}{r} \Delta t, \Delta r = (u - a) \Delta t, \qquad (5)$$

$$p\rho^{-\gamma} = const., \Delta r = u\Delta t$$
 (6)

となる.

ここで Δ は特性曲線に沿った 2 点間の差分を表し, *a* は音速である.これら(4),(5),(6)式を Hartree の方法⁵⁾をもちいて積分し数値解を求める.

4.境界条件と初期条件

基礎方程式を解くためには衝撃波面と爆発中心の境界条件が必要になるが衝撃波面では非解離垂直衝撃波のランキン - ・ユゴニオの条件を用いて物理量を決め,軸対称流であるので,中心の速度を u(0,t) = 0として爆発中心の物理量を決定した.さらに衝撃波面と中心間の物理量の初期値は非解離状態の準相似解を用いた.

5. 実在気体効果

本解析においては熱的に局所平衡の流れを取り扱うので平衡

解離度 α_o は次の式を用いる⁶⁾.

$$\frac{\alpha_o^2}{1 - \alpha_o^2} = \frac{K_p(T)}{4p} = \frac{p_{D_o}}{p} \exp\left(-\frac{T_{D_o}}{T}\right) \quad (7)$$

(7)式の ρ_{D_o} および T_{D_o} はそれぞれ酸素の解離の特性密度および特性温度である.窒素分子に関しても同様の式を用いる.

電離度 β は次式を用いる.

$$\frac{\beta^2}{1-\beta^2} = \frac{p_J}{p} \left(\frac{T}{T_J}\right)^{9/4} \exp\left(-\frac{T_J}{T}\right)$$
(8)

ここで p_J , T_J は電離の特性値である .

空気が80%の窒素と20%の酸素とから構成する気体であるとすると,空気の熱的状態方程式は以下のようになる.

$$\rho(T,p) = \frac{p}{Z(T,p)R_{A_2}T}$$

 $Z(T, p) = 1 + \alpha_o + \alpha_N + 2\beta \qquad (9)$

T , R_{A_2} はそれぞれ空気の温度 , 気体定数である . また α_o , α_N は酸素および窒素の解離度をあらわす . また Z(T,p)は圧縮率 (compressibility) と呼ばれるものである .

$$\alpha_o(T,p) = \frac{-0.40 + \sqrt{0.16 + 0.20(1 + 4p/K_{pO})}}{1 + 4p/K_{pO}}$$
(10)

$$\alpha_{N}(T,p) = \frac{-0.20 + \sqrt{0.04 + 0.96(1 + 4p/K_{pN})}}{1 + 4p/K_{pN}}$$
(11)

となり $^{_{7}}{}^{_{7}}, 0 \leq \alpha_{_{O}} \leq 0.2$, $0 \leq \alpha_{_{N}} \leq 0.8$ である .

衝撃波面後方の等エントロピ領域における等エントロピ 指数 Γを定圧比熱と定積比熱の比として定義する.この際, 定圧比熱と定積比熱を求める場合,比エンタルピと比内部エ ネルギをそれぞれ温度で微分する方法があるが,この解析で は温度の微分によらない比熱を用いた⁸⁾.この方法用いると 等エントロピ指数は振動励起の効果を含まないことになる.

$$\Gamma = \Gamma_1 / \Gamma_2 \tag{12}$$

$$\Gamma_{1} = 4 + \alpha_{o}(1 + T_{D_{o}}/T) + \alpha_{N}(1 + T_{D_{N}}/T) + \beta(5 + 2T_{J}/T)$$

$$\Gamma_{2} = 3 + \alpha_{O}(T_{D_{O}}/T) + \alpha_{N}(T_{D_{N}}/T) + \beta(3 + 2T_{J}/T)$$

解離,電離の効果はすべて等エントロピ指数 Гの中に含ま

れるので,特性曲線の中では音速に影響を与える. 酸素と窒素の解離の特性値,電離の特性値を表1に示す.

Table 1 Characteristics Temperatures and Pressures for Dissociation and Ionization of Nitrogen and Oxygen

T_{DO}	T_{DN}	T_J
59000K	113000K	169000K
P_{DO}	$P_{_{DN}}$	P_J
2.27 × 10 ⁷ atm	4.30×10 ⁷ atm	6.75×10 ⁶ atm

また(10)、(11)式による(9)式の圧縮率Zと(12)式の等エ ントロピー指数 を圧力をパラメータとして図1と図2に示 す.





図3はの解離のみ考慮した場合(=0)と電離の効果まで考慮した場合の等エントロピー指数の違いを示している. 電離の効果は8000[K]からあらわれ,等エントロピー指数に 影響を与え,解離のみ考慮したものより単調に減少する.



Fig.3 Change in the Isentropic Index against Temperature T.

6.計算結果

本研究においては空気中の爆風をj = 1 の場合の軸対称 流で計算をおこなった.衝撃波面前方の物理量は参考文献 (1)の値を用い圧力 p は 5 気圧,温度は 293[K]とした. t = 0 の とき中 心より衝撃波面までの距離 R は R = 0.01 [m] である.初期の衝撃波マッハ数 M_0 は $M_0 = 3.0 \sim 7.0$ で,計算格子点はいずれのマッハ数の場合 でも 51 点とした。

図3は本解析で用いた等エントロピー指数(12)式の初期圧力 1 atm の場合の温度による変化を示したもので,10000[K]か ら電離の影響が顕著になることがわかる.なお図4以下では (9)式で解離のみ考慮した場合(=0)で計算した.図4~図 6 はマッ八数 M₀=5.0 における速度,圧力,密度分布の時間変 化を示している.図7は等エントロピ領域のの時間変化を 示している.衝撃波面より少し中心に向かう部分の変曲して いる所は酸素と窒素の解離開始温度の違いが反映されており, このことは図1の圧縮率Z,図2の等エントロピ指数の図に もあてはまる.さらに等エントロピ指数は(12)式を用いたの で,衝撃波面では解離度,電離度は $\alpha = \beta = 0.0$ となり $\Gamma = 1.333$ である.中心付近では気体は非常に高温になり Γ は 単原子分子気体の等エントロピ指数に対応する $\Gamma = 1.667$ に 近づく. マッハ数 M₀=3.0, M₀=7.0 の場合も同様な結果が得られたので 省略した.



Fig.4 Velocity profiles behind the cylindrical shcock waves with distance.



Fig.5 Pressure profiles behind the cylindrical shcock waves with distance



Fig.6 Density profiles behind the cylindrical shcock waves with distance



Fig.7 Isentropic index profiles behind shock waves with non-dimensional distance.



Fig.8 Decay of the cylindrical shock waves with distance.





Fig.10 Decay of the cylindrical shock waves with distance.

7.まとめ

本研究では衝撃波の強さは $M_0 = 3.0 \sim 7.0$ の範囲でお こなった.図8 ~ 図 10 は解離の場合と非解離の場合の減衰曲 線を比較したもので,解離の場合の方が非解離の場合に比べ て減衰の度合いが低いことがわかる.特に,減衰の度合いの 違いは初期マッハ数の強さに大きく依存していることがこれ らの図から読みとれる.この違いは解離にエネルギーが消費 されるためであり,直接的には音速に影響を与えている. またこの解析では解離の影響のみを考慮したが電離の効果お よび振動励起の影響を考慮した計算もする必要があるだろう.

謝辞

本研究は東京都特定学術研究費の援助を受けた.

参考文献

- 1) 東野文男,北沢誠:機械学会論文集 38 第 314 号 (1972) 2575
- 小林正典,高倉葉子,東野文男: 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集(1999) 369
- 3) 坂口堯,東野文男:平成11年度衝撃波シンポジウム講演 論文集(2000) 345
- 4) 坂口堯,東野文男:日本流体力学会年会 2000 講演論文 集(2000) 537
- 5) D.R. Hartree: AEUC-2713(1953)
- 6) Jischa, M :Z.Flugwiss.19, Heft 7,(1971) 282
- 7) C.F. Hansen: NACA TN 4150 (1958)
- 8) 東野文男,杜奨勝 第 30 回流体力学講演会講演論文集 (1998) 21