

放水活動時の消防隊員が受ける反動力 についての流体力学的考察

中川 英二^{*}、高井 啓安^{**}、菅原 洋一^{***}、岡崎 洋行^{**}

概 要

消防隊員が放水時に受ける反動力はノズルに結合されているホースの形状によって大きく変化する。そこで本検証では、流体力学の観点から、放水時にノズル圧力及びホースに作用する力を導出し、反動力の発生機構の基礎的な部分を解明することを目的とする。

1 はじめに

消防隊員が放水時に受ける反動力はノズル圧力や流量によって一意的に決まるものではなく、ノズルに結合されているホースの形状によって、大きく変化する。そこで本稿では、放水時のノズル圧力及びホースに作用する力を流体力学の観点から導出し、反動力の発生機構を解明することにより放水時の反動力に起因する消防隊員の受傷事故を防止するための方策の基礎資料とする。

2 運動量保存則

運動量保存則を流体力学に適用して、放水時のノズル及びホースに作用する力を導出する。

図1のような検査面Vを考える。検査面V内における運動量保存則は、

$$M_o - M_i = F \quad (1)$$

である。ここで、

M_o : 検査面Vから単位時間あたりに流出する運動量

M_i : 検査面Vに単位時間あたりに流入する運動量

F : 検査面内の流体に与えられる力

であり、検査面内の流体に与えられる力Fは

$$F = F_m + F_{cs} + F_r \quad (2)$$

である。ここで、

F_m : 質量力 (検査面内の流体に働く重力等)

F_{cs} : 表面力 (検査面の表面を介して検査面内の流体に作用する力。例: 圧力、摩擦力)

F_r : 検査面内部に存在する物体が流体に及ぼす力である。

流体の密度を ρ 、流量を Q 、検査面Vに流入する流体の速度を v_i 、検査面Vから流出する物体の速度を v_o とすると、

$$M_o = \rho Q v_o \quad (3)$$

$$M_i = \rho Q v_i \quad (4)$$

となる。ゆえに、(1)は

$$\rho Q v_o - \rho Q v_i = F_m + F_{cs} + F_r \quad (5)$$

となる。ゆえに、(5)を用いて、検査面表面を介して流体に作用する力 F_{cs} を求めれば、作用反作用の法則により流体が検査面に及ぼす力も導出することが可能である。

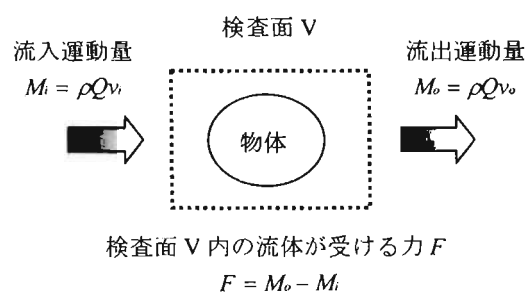


図1 検査面Vにおける運動量保存則

3 放水時のホースとノズルに作用する力

通常、消防隊員が放水を行う場合には、ホースの大部分は地面と接しており、ノズル付近のホースが地面から立ち上がっている状態である。

放水時のホースにおいて、地面と接している部分はホースに作用する力と地面との摩擦力が釣り合っているため動かない。よって、ノズル保持者に対して力を及ぼすのは地面から立ち上がっている部分のホースとノズルである。

そこで、図2のような形状の放水時のノズルとホース

を考える。ここで、 x 軸は水平方向、 z 軸は鉛直方向を示しており、密度 ρ と流量 Q はどの場所でも同一であるとする。

ホースの地面から立ち上がった部分とノズルを図3のように点線で囲った3つの検査面に分けて考え、それぞれの検査面において、流体がホース及びノズルに及ぼす力を考える。

ただし、放水停止後はホース、ノズル、流体に作用する重力とノズル保持者の保持力とがつり合っているので、放水中の反動力のみについて考える時には、簡略化のため、重力は考慮しない。また、検査面内部に物体は存在しないので、検査面内部に存在する物体が流体に及ぼす力もない。つまり、

$$F_m = 0$$

$$F_r = 0$$

である。

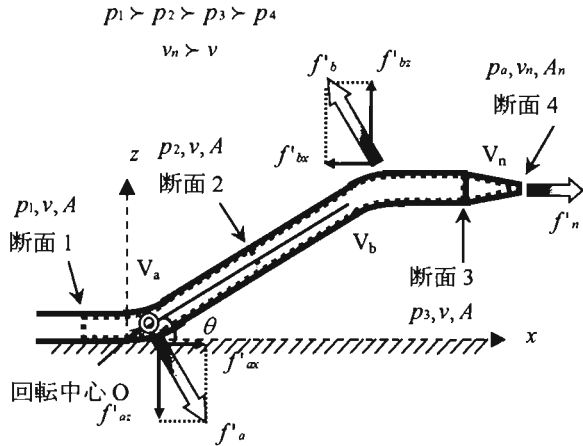


図2 放水時のノズルとホース

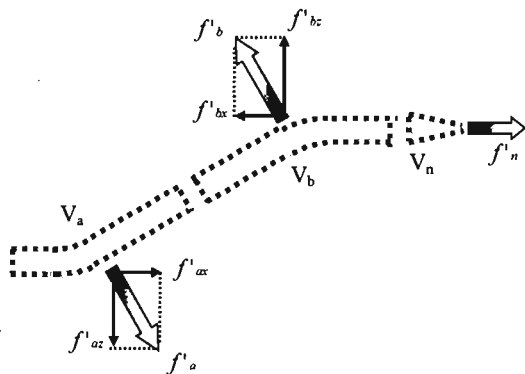


図3 検査面

ここで、

断面：検査面の境目

θ ：ホース立ち上り角度 ($0 < \theta < \frac{\pi}{2}$)

p ：圧力 (絶対圧、 p_a ：大気圧、 $p_1 > p_2 > p_3 > p_a$)

v ：流速 (v_n ：ノズル出口流速、 $v_n > v$)

A ：断面積 ($A > A_n$)

f ：ホースもしくはノズルが流体に及ぼす力

f' ：流体がホースもしくはノズルに及ぼす力

$$f' = -f \quad (6)$$

とする。それぞれの検査面における x 方向、 z 方向の運動量保存則を考える。

(ア) 検査面 V_a

x 方向：

$$\text{流出運動量 } M_{\alpha} = \rho Q v \cos \theta$$

$$\text{流入運動量 } M_{\alpha} = \rho Q v$$

$$\text{表面力 } F_{\alpha} = p_1 A - p_2 A \cos \theta + f_{\alpha}$$

運動量保存則より、

$$M_{\alpha} - M_{\alpha} = F_{\alpha}$$

$$\rho Q v \cos \theta - \rho Q v = p_1 A - p_2 A \cos \theta + f_{\alpha}$$

$$f_{\alpha} = \rho Q v (\cos \theta - 1) - (p_1 - p_2 \cos \theta) A$$

$f'_{\alpha} = -f_{\alpha}$ より、

$$f'_{\alpha} = \rho Q v (1 - \cos \theta) + (p_1 - p_2 \cos \theta) A \quad (7)$$

(7) の右辺第 1 項および第 2 項は共に正なので、

f'_{α} は正の方向に作用する。

z 方向：

$$\text{流出運動量 } M_{\alpha} = \rho Q v \sin \theta$$

$$\text{流入運動量 } M_{\alpha} = 0$$

$$\text{表面力 } F_{\alpha} = -p_2 A \sin \theta + f_{\alpha}$$

運動量保存則より、

$$M_{\alpha} - M_{\alpha} = F_{\alpha}$$

$$\rho Q v \sin \theta = -p_2 A \sin \theta + f_{\alpha}$$

$$f_{\alpha} = \rho Q v \sin \theta + p_2 A \sin \theta$$

$f'_{\alpha} = -f_{\alpha}$ より、

$$f'_{\alpha} = -\rho Q v \sin \theta - p_2 A \sin \theta \quad (8)$$

(8) の右辺第 1 項および第 2 項は共に負なので、

f'_{α} は負の方向に作用する。

よって、液体が検査面 V_a のホースに及ぼす合力 f'_{α} の向きは図2のようになる。

(イ) 検査面 V_b

(ア)と同様に考えると、

x 方向：

$$f'_{\beta} = -\rho Q v (1 - \cos \theta) - (p_3 - p_2 \cos \theta) A \quad (9)$$

(9) の右辺第 1 項は負であり、第 2 項の正負はホース立ち上り角度 θ に依存しているが、通常のホースの立ち上り角度ならば負になるので、 f'_{β} は負の方向に作用する。

z 方向：

$$f'_{\beta} = \rho Q v \sin \theta + p_2 A \sin \theta \quad (10)$$

(10) の右辺第 1 項および第 2 項は共に正なので、 f'_{β} は正の方向に作用する。

よって、液体が検査面 V_b のホースに及ぼす合力 f'_{β} の向きは図2のようになる。

(ウ) 検査面 V_n

(ア)と同様に考えると、

x 方向 :

$$f'_{mx} = -\rho Q(v_n - v) + p_3 A - p_2 A_n \quad (11)$$

(11) の右辺第 1 項は負であり、第 2 項と第 3 項の和は正であるが、一般的に第 2 項と第 3 項の和は第 1 項よりも大きいので、 f'_{mx} は正となる。

z 方向 :

$$f'_{mz} = 0 \quad (12)$$

よって、流体が検査面 V_n のノズルに及ぼす合力の向きは図 2 のように、水平前方向に働く。

(エ) 検査面 $V = V_a + V_b + V_n$

(ア)、(イ)、(ウ) の力を全て合わせると、

x 方向 :

$$f'_{x} = -\rho Q(v_n - v) + p_1 A - p_2 A_n \quad (13)$$

(13) の右辺第 1 項は負であり、第 2 項と第 3 項の和は正であるが、一般的に第 2 項と第 3 項の和は第 1 項よりも大きいので、 f'_{x} は正となる。

z 方向 :

$$f'_{z} = 0 \quad (14)$$

よって、立ち上り部以降のホースとノズルに作用する合力としては、ノズルとホースを水平前方向に押す力しか働かないことがわかる。

次に図 2 におけるモーメントのつり合いを考える。立ち上りホースの曲部の中心 (図 2 の◎) を回転中心と考えると図 4 のように、 f'_o と f'_n はホースとノズルを下方に、 f'_b は上方に回転させようとする力である。一般的にはノズルとホースを上方に回転させようとするモーメントの方が大きいので、合モーメントはノズルとホースを、立ち上りホースの曲部の中心を回転中心として上方に回転させるように作用する。

よって、放水中のノズル保持者に作用する力は、上述のようなホースとノズルがモーメントによって立ち上がろうとする力である。

実際に写真のように反動力測定実験を行った結果と上述の理論式から導出した結果に大きな相違はなかった。

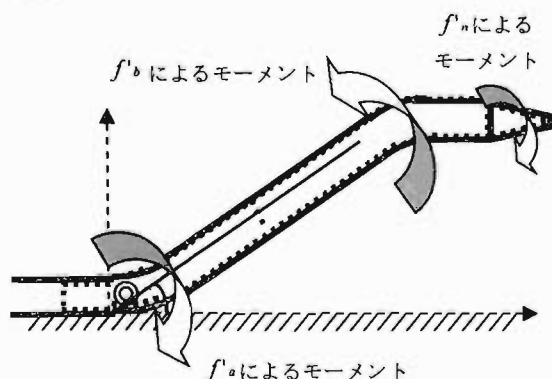


図 4 ホース及びノズルに作用するモーメント

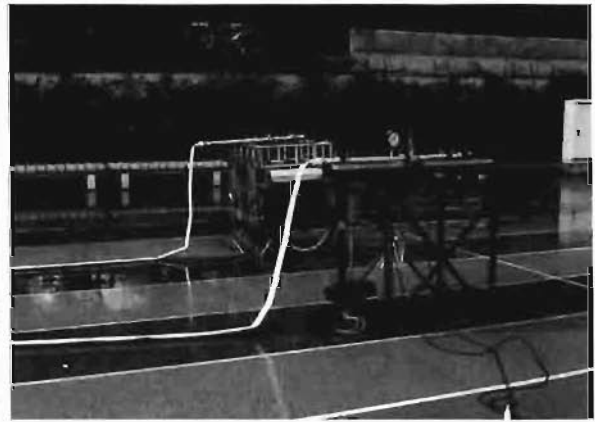


写真 反動力測定実験風景

4. 結論

前3で導出したように、ノズルから水が噴出していても、必ずしもノズル保持者に後ろ向きの力が作用するわけではなく、むしろノズルだけに注目すると、ノズルを前方に押出す力のみが作用している。一般的にノズル保持者に後ろ向きに作用している力は、あくまでもノズルとホースを上方に回転させる方向に作用するモーメントによるものである。そして、このモーメントは立ち上り部分のホースの形状に大きく関係している。それゆえ、ノズル保持者は放水の反動力を低減させるためにノズル後方のホース形状に注意する必要がある。ホースの立ち上り角度が大きいほど、ホースとノズルを上方に回転させようとするモーメントが大きくなるので、通常のノズルが地面と水平な場合の放水時は、ノズルの鉛直高さが低いほうがホースの立ち上り角度が小さくなり、反動力も小さくなる。

また、ノズルを水平ではなく、立ち上り部分からホースおよびノズルを一直線にすれば、ホースおよびノズルを回転させるモーメントが無くなり、ホースとノズルと水の重さだけをノズル保持者は保持するのみでよいと考えられる。

ただし、今回の反動力に関する考察においては圧力によりホースが一直線になろうとする力は考慮していないため、実際の反動力はより複雑であると考えられるが、反動力の発生機構の基礎的な部分を解明したと考えられる。

Hydrodynamic Consideration of Reaction Force

Eiji NAKAGAWA*, Hiroyasu TAKAI**, Yoichi SUGAWARA***

Abstract

Reaction force that acts on firefighters during water shooting significantly changes depending on the shape of the hose connected to the nozzle. This experiment, therefore, aims to identify the force acting on the nozzle and hose during water discharge and to clarify the basic mechanism of reaction force generation from a hydrodynamic point of view.