蒸気タービン用チタン動翼の耐エロージョン評価*

荒木 良一郎^{*1}, 岸 本 勝^{*2}, 吉 田 幸 一^{*3}Behavior of Titanium Blade to Erosion Phenomena Caused
by Water Droplets in Wet steam

Ryoichiro ARAKI, Masaru KISHIMOTO, and Koichi YOSHIDA

Recently, due to need for longer blades (e. g., 40 inches long) titanium alloy is aimed to use as blade material, which 12 % Cr stainless steel has been used. The latter has been protected with Co-base alloy against erosion and has demonstrated good performance thus far. The longer blade with higher peripheral speed is subjected to more severe conditions involving erosion caused by water droplets in wet steam. Because titanium alloy will not accept application of a Co-base alloy, a new erosion-shield material should be developed. Prior to the design of longer blade, a shorter blade (23 inches long) of titanium alloy had been put on a 50-MW unit, which has been in service for 15 years. This paper reports that the predicted erosion rate, which had been derived from laboratory tests, corresponded quantitatively to the actual observed results on the 50-MW unit.

Key Words: Material Testing, Impact Strength, Turbulent Mixing, Erosion, Titanium, 12 % Cr Stainless Steel, Stellite, Steam Turbine Blade, Wet Steam, Water Droplets.

1. 結 言

復水式蒸気タービンの低圧段, 特に周波速度の高い低圧最終段動翼は, 湿り蒸気中の水滴によってエロージョンをうける。この現象の理論的説明は, 発生の原因となる水滴の生成と運動ならびに水滴の衝突による金属表面の欠損という, 流体力学ならびに破壊力学の両分野において進められてきた。これに実機における経験を加え, タービンメーカーによってエロージョンの予測あるいは設計評価が精度高く行われるようになっている。材料面では Co 基合金の適用によりエロージョンは現在ではほぼ解決ずみの問題と考えられている。

火力原子力用蒸気タービンの大容量化, 高効率化にともなう長大翼の必要から, 最近になりチタンが動翼材料に採用される方向にある。この場合動翼先端の周速度が従来の実績を超えて大になること, またチタン

には Co 基合金が適用できぬことから, エロージョンも再検討を要する問題となってきた。

チタンに対するエロージョンの現象説明およびエロージョン防止対策の実験研究が実施された。

またチタン合金製の 23 inch 最終翼を製作し, これを 50 MW タービンの最終段の一部に使用して, 15 年間にわたる運転実績がえられた。

一連の実験結果によって運転実績の解析を行ったので, ここに報告するものである。

2. 実機のエロージョン調査

2・1 対象ユニット 実機最終段は翼長 23 inch で, 5 枚で 1 翼群を構成し全周は 24 群よりなる。そのうち 2 翼群はチタン製, 22 翼群を 12 % Cr 不銹鋼製とし, エロージョンについては両者を同一条件で比較できるよう計画した⁽¹⁾。

2・2 翼材料 翼およびエロージョンシールド材の化学成分を表 1 に示す。

チタン翼は翼材として Ti-6Al-4V 合金, 翼群中の先頭翼(T-1)にはエロージョンシールド材に β 合金, Ti-15 Mo-5 Zr を翼先端部に肉盛してある。

12 % Cr 翼は翼材として 12 % Cr 不銹鋼, エロージョンシールド材としてステライト 6B を全翼の先

* 平成 2 年 3 月 10 日 中国四国支部第 28 期総会講演会において講演, 原稿受付 平成元年 7 月 21 日。

^{*1} 正員, エンジニアリング開発(株) (☎105 東京都港区芝公園 2-4-1)。

^{*2} 正員, 三菱重工業(株)高砂製作所 (☎676 高砂市荒井町新浜 2-1-1)。

^{*3} 正員, 三菱重工業(株)長崎研究所 (☎850-91 長崎市飽の浦町 1-1)。

端部にてん付してある。

2・3 実績調査 実機は1974年春以来約15年間営業運転を行ったが、その間に行ったエロージョンの調査状況を表2に示す。

1984年の第3回調査時には、エロージョンの進展が著しいため12%Cr翼の半数はステライトのはり替えを実施した。第4回調査時には、チタン翼を全数抜き取り、エロージョンならびに材質の調査を実施した。その概要は下記のとおり。

2・3・1 エロージョンの状況 チタン翼、12%Cr翼それぞれ同一翼群を構成している5枚を選び、翼先端前縁部エロージョンの状況を図1に示す。図1中の翼記号は回転方向の前側からT-1、T-2…とした。

(1) エロージョンを最も強くうけているのはT-1である。翼長方向の分布では、先端より約50mm下方を中心に約30mmにわたりエロージョン深さが大。T-2もT-1のこの部分に対応する部分にエロージョンが著しい。

表1 翼およびエロージョンシールド材

Blade Material						
Mat'l	Chemical Composition					
	C	Cr	Mn	V	Al	Bal
12% Cr	0.10/0.15	11.5/13.0	0.3/0.6			Fe
Titanium				3.5/4.5	5.5/6.5	Ti
Erosion Shield						
Mat'l	Chemical Composition					
	C	Cr	W	Mo	Zr	Bal
Stellite B Phase Alloy	1.0	27	4	15	5	Co

表2 エロージョンの調査状況

Events	Date	Operation hours	References
#1 Observation	1974 9	1,400	(2)
#2 6yrs Inspection	1979 1	37,000	(2)
#3 10yrs Inspection	1984 4	60,045	(3)
#4 12yrs Inspection	1986 5	70,000

図1 70 000 h後のエロージョン状況

T-3以下の翼ではエロージョンに有意な差は認められなく、全般に軽微である。

(2) チタン翼ではT-2にエロージョンが著しい。これはT-1のエロージョンシールドの効果を示すものである。

(3) T-1のうけたエロージョン深さは、チタン翼のほうが12%Cr翼より小である。

2・3・2 材質調査 チタン翼母材のマイクロ組織は、密な $\alpha+\beta$ 相であり、また水素濃度の分析結果も正常で、運転中における材料劣化は認められない。

3. 実機内部の水滴挙動

定格出力および1/2定格出力、真空度722 mmHgおよび710 mmHgの4ケースについて、水滴の挙動に関する実機調査を行ったものである⁽⁴⁾。

3・1 調査項目 エロージョンに関連する項目は下記である。

(1) 水滴挙動の観察 ファイバースコープによって静翼背面プロファイル、翼先端付近を中心に観察した。

(2) 水滴の粒径分布 水滴採取プローブで静翼出口の湿分を捕集し、液浸法により粒径を計測した。

3・2 挙動の観察 静翼から噴出する水滴の挙動を図2に示す。B部では静翼に捕集された水分が集中し、顕著な水塊の生長と衰退の激しい繰返しが認められ、A、Cと比較して大径の粗大水滴の噴出が予想される。Bより噴出する水滴の半径方向軌跡を想定すると、図1に示す動翼のうけたエロージョンの著しい位置に対応している。

3・3 粒径の分布 水滴採取プローブでは高速シ

図2 静翼出口における水滴観察

ヤッタにより、瞬間的かつ間欠的にサンプリングを行ったが、捕集回数を増やし信頼性向上を図った。図2 B部から噴出する粗大水滴に相当する位置におけるサンプリングの拡大写真の一例を図3に、また、粒径の分布を表3の Blade Tip の欄に示す。粒径の個数頻度を求め、蒸気流中の全湿分量に対する計測水滴の重量比を計算すると10~30%の簡困となった。この理由として下記が考えられる。

- (1) タービン内部湿分排出機構による水滴の除去
- (2) 静翼表面に捕集されず排出する湿分(粒径数 μm 以下の水滴主体)
- (3) 静翼後縁端における粗大水滴の間欠的噴出

4. 材料のジェットエロージョン試験

4.1 実験装置と条件 円柱形状の試験片を高速回転する円板に取付け、水滴の粒径、総量を制御可能なノズルから噴出衝突させエロージョンを発生させる。

表3 水滴の粒径分布

Droplet dia	max. dia.	S. M. D
Location	μm	D32 μm
Blade Tip	250	140
3/4 Blade Height	130	80

図3 水滴サンプリングの例

図4 表面粗さと減肉深さの評価

*** S. M. D D_{32} (Sauter 平均粒径) = $\frac{\sum ND^3}{\sum ND^2}$
(N = 粒径 $D \mu\text{m}$ の水滴個数)

試験片の材料は表1に示す4種類である。

水滴の粒径は SMD 150, 350(実機 140)とした。

試験片の周速度は 578, 680 m/s(実機 260~340 m/s)とした。

エロージョンの進展状況を観察しながら、材料に応じた実験の継続時間を決めた。

4.2 減肉深さ 図4に示すように、試験片の表面粗さを記録し、代表点を選んで減肉深さとした。チタン系の材料は、ステライト、12% Cr 鋼に比較して減肉深さが比較的均一の分布となっている。

減肉深さの時間的進ちょく状況を図5に示す。β合金とステライトの減肉深さの関係は初期と後期とで逆転しているが、実機でも同様の傾向がみられた⁽³⁾。

4.3 体積減 体積減の時間的進ちょく状況を図6に示す。材料間の傾向は図5にみられるところと概略一致しているが、詳細には下記の差異がある。

(1) 翼材料については初期の体積減が大でその後低進ちょくとなる。

図5 減肉深さと試験時間

図6 体積減と試験時間

図 7 エロージョンマイクロ組織

図 8 エロージョン進展率の経時変化

(2) 翼材料, エロージョンシールド材料はチタン系と 12 % Cr 鋼系ともほぼ同一の傾向を示す。

4・4 断面マイクロ組織 実験終了後の試験片の断面マイクロ組織を図 7 に示す。4 種類の材料に共通の特徴として, エロージョンは直径 150~200 μm のくぼみとその中央部の直径 50~60 μm の小穴群よりなることが観察される。材料については下記の特徴が認められる。

(1) Ti-6 Al-4 V は密六方 β 相で進ちよくしやすく, 等軸 α 相では進ちよくしない。

(2) その他の材料では, 粒界に進ちよくする傾向がみられる。

4・5 実験結果の考察 エロージョンの進ちよく状況を材料別に考察すると下記のごとくなる。エロージョンの進展率の経時変化については一般に図 8 に示す 3 個の期間に分類されているので, これによることとする。

(1) 潜伏期間 ステライトのみに顕著に認められる。

(2) 加速期間 チタン系材料はこの期間の進展率が大きい。

(3) 定常期間 チタン系材料はこの期間の進展率が小さい。

実験期間中を通じてのエロージョンの進ちよく状況を図 9 に示す。衝突速度ならびに水滴量は実機の 2~5

倍であり, 1 000 倍以上の加速試験となっている。

4・6 減肉深さの計算式 ジェットエロージョン試験は図 8 に示す定常期間に達するまで継続された。文献(5)によると, 全期間の累積と定常期間中の値との間に大差はなく, 式(1)で計算される。

$$\frac{dM}{dW} = K \exp(CV) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

M : 重量減 mg/cm^2

W : 単位面積に衝突する水滴の総量 kg/cm^2

V : 水滴の衝突速度 m/s

K : 材料に固有の常数

C : 材料に固有の常数

すでに述べたように, 重量減すなわち体積減と減肉深さの関係は材料ごとに相関性が認められるので, 式(1)の M を減肉深さとして常数を求め, これを減肉深さの計算式(1')とする。

$$\frac{dM'}{dW} = K' \exp(CV) \quad \dots\dots\dots (1')$$

ただし式(1')においては W, V, C は式(1)と同じで

M' : 減肉深さ μm

K' : 材料に固有の常数

本実験結果および文献(5)の値を表 4 に示す。

なお文献(5)の値は重量減から減肉深さに対応するよう換算したものである。

5. 実機におけるエロージョン解析

実機におけるエロージョンの解析には, 翼群に回転中生ずるツイストバック(Twist Back)の現象と, 翼群内の各翼に衝突する水滴の粒径, 総量の関係を検討する必要がある。この関係を概念的に示したものが図 10 である。

本図中の記号は下記のとおり。

ϕ : 翼群のツイストバック角

ϕ_i : 粒径 D_i の水滴の流入角

図 9 エロージョンの進展状況

表 4 減肉深さ計算式の定数

Constants mat'l	C		K'	
	Test	Ref.	Test	Ref.
12% Cr	12.1×10^3	13.0×10^3	0.056	0.040
Ti-6Al-4V	8.2×10^3	—	0.14	—
Stellite 6B	3.25×10^3	10.2×10^3	0.56	0.10
Ti-15Mo-5Zr	8.53×10^3	—	0.019	—

ϕ_c : 翼面上の角度 α_c に相当する水滴の流入角

W : ノズルウエークの幅

U : 周速度

C : 絶対速度

V : 相対速度

添 字

S =蒸気を示す

L =水滴を示す

$n' \sim n''$, $o' \sim o''$ は翼表面に衝突する粒径 D_i の水滴に対する衝突長さを示す。

5.1 翼群のツイストバック 最終段動翼は流体力学的要求から翼長方向にねじられた断面となっているので、遠心力によってねじれ戻り、すなわちツイストバックを生ずる。このため翼群としてもツイストバックを生じ、T-1 は T-2 に比べ軸方向で上流側に飛び出した位置にあり⁽⁶⁾、ノズルウエーク中の水滴を多量にうけることとなる。

ツイストバック角度は下式で計算される。

$$\phi = F \frac{\rho}{G} \dots\dots\dots (2)$$

ここに

F : 翼群の幾何学的形状で決まる常数 cm

図 10 翼群のツイストバックによる水滴衝突の遮へい効果

ρ : 翼材料の密度 kg/cm^3

G =翼材料の横弾性係数 kg/m^2

チタン翼と 12% Cr 翼とでは、 F ならびに ρ/G は等しく、エロージョンに関しては、同一条件下で運転されていることになる⁽³⁾。

5.2 水滴の粒径と速度 実機における粗大水滴の発生状況は 3.2 節に述べたが、動翼入口に到達するまでには、粒径 D_i の水滴は静翼ノズルウエーク中の蒸気流によって加速される。この場合運動の方程式は下式で表される⁽⁷⁾。

$$\frac{dC_{Li}}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_{Di}}{D_i} \frac{\rho_v}{\rho_L} (C_v - C_{Li})^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

C_{Di} : 粒径 D_i の水滴の抗力係数

ρ : 密度 kg/cm^3

添 字

i : 粒径 D_i に対応する

ノズルウェーク中の蒸気速度分布は Lieblein の研究を使用して⁽⁷⁾式(3)によって C_{Li} を各粒径について計算した。水滴は径のいかにかわらずノズルウェーク中を同一の軌跡で流動すると考えると、 D_i が大なるほど、動翼の入口で C_{Li} が小になり、 V_{Li} は大になる。無次元化するため、速度関係は周速度、角度関係は ϕ との比を使用する。

水滴に作用する慣性力と表面張力の比、Weber 数は下式で無次元表示される。

$$We = \frac{\rho v (C_v - C_{Li})^2 D_i}{\sigma_L} \dots\dots\dots (4)$$

代表的な水滴粒径 D_i について計算した結果を表 5 に示す。

We は水滴軌跡中の最大値が示してあり、また $D_{\max}$ の場合が最高で 9.6 である。極限 We , 21~24⁽⁹⁾ より小となっている。水滴の粒径分布などは動翼入口の値を示すものと考えられる。

5.3 実翼に相当する W と V 計算に際し下記の仮定を置いた。

(1) D_i の静翼ノズルウェーク中における分布は、どの流線をとっても同一とする。

(2) 水滴の粒径についての分布は、図 11 に示す静翼出口と同じである。

(3) 計測では 3.3 節に述べたごとく、全湿分量の 10~30% の範囲に変動しているが、30% の定常流とする。

5.3.1 W_1 T-1 のうける W を W_1 とする。今動翼のピッチを p とすると、ツイストバックにより、

$$L = p \tan \phi$$

に相当する量だけ、T-1 は T-2 に比して軸方向に飛び出しているの、静翼から噴出する粗大水滴の全量が W_1 となる。

5.3.2 W_2 T-2 のうける W を W_2 とする。図 10 に示す相対関係から $\phi_i/\phi - 1 \leq 0$ に相当する D_i までは W_2 に含まれない。これは T-1 の p による遮へい効果で ξ_0 とする。第 1 サイクルでは表 5 から $D_i/D_{\max} = 0.74$ 、図 11 から $W_2 = 0.68 W_1$ となる。

5.3.3 V ジェットエロージョン試験では、水滴の衝突速度 V_i はすべての D_i に対して同一であった。実機の場合、 V_i は表 5 のように D_i により異なる。式(1)'により、実機の減肉深さ M' を計算するとき、実験の V に対比すべき V として、 $\phi_i = \phi_c$ となる粒径 D'_i の V_{Li} を採用した。 $D_{\max}$ の衝突速度(表 5 V_{Li}/u

$= 0.80$ 相当)による式(1)'でえられる M' との比を衝突速度におよぼす遮へい効果 ξ_v とする。

5.3.4 減肉深さ $\bar{M}$ 減肉深さの計算式は式(1)'により、これに翼群の相対位置に応じて ξ_0 , ξ_v を導入する。この計算値と L との比で無次元化した $\bar{M}$ を求めたものが、表 6 である。なお参考のため実機における値を下段に示す。T-1、T-2 は時間の経緯に伴って $\bar{M}$ が進行するため、遮へい効果もまた変化する。時間計算の区分としては、表 2 に示した第 2 回調査時、37 000 H を第 1 サイクルに、以下第 2、第 3 サイクルとした。

チタン翼についてみると、T-1 は β 合金によるエロージョンシールドの効果で、 $\bar{M}$ が最小となっている。T-1 の遮へい効果が、すべてのサイクルにわたつ

表 5 水滴の粒径と諸元

item \ Dia.	$D_i/D_{\max}$	0.10	0.24	0.56	0.74	1.00
abs. vel	CL_i/u	0.41	0.27	0.21	0.20	0.18
max. we	We	0.5	1.6	4.8	6.6	9.6
imp. vel	V_{Li}/u	0.57	0.71	0.77	0.78	0.80
imp. angle	ϕ_i/ϕ	2.56	1.59	1.12	1.00	0.92

表 6 翼群の減肉深さ

Blade		Ti - Blade		12% Cr - Blade	
Cycle		T-1	T-2	T-1	T-2
First (Cal)	ξ_D	1.0	0.68	1.0	0.68
	ξ_V	1.0	0.57	1.0	0.53
	$\bar{M}$	0.7	1.6	3.7	1.3
Second (Cal)	ξ_D	1.0	0.64	0.83	0.76
	ξ_V	1.0	0.53	0.58	0.55
	$\bar{M}$	1.1	2.5	4.8	3.0
Third (Cal)	ξ_D	1.0	0.43	0.25	0.84
	ξ_V	1.0	0.49	0.46	0.76
	$\bar{M}$	1.2	2.7	4.9	3.6
Third (actual)	$\bar{M}$	1.2	2.1	2.7	1.8

図 11 水滴の重量累積分布

て T-2 におよんでいることがわかる。

12% Cr 翼についてみると、T-1 についても $\bar{M}$ が大となるため、第 2 サイクル以降、回転方向で前側に位置する翼群 T-5 の遮へい効果があらわれている。その反面、同一翼群内の T-2 におよぼす T-1 の遮へい効果は漸減することがわかる。

第 3 サイクル後の $\bar{M}$ の値は、図 1 に示した 4 種の翼のエロージョンの実績と良い対応をしている。ただし 12% Cr 翼については、計算値のほうがかなり大きい値を示しているが、この原因として下記が考えられる。

(1) ステライト 6B では、4・5 節で述べたように潜伏期間があるが、式(1)で計算する際実機では過少評価された可能性がある。

(2) 計算では 5・3 節の(3)で述べたように、粗大水滴を定常流と仮定した。しかし粗大水滴の噴出は間欠的であり、一周期の所要時間は約 7.5×10^{-3} s という実験結果も報告されている⁽⁹⁾。

今回も類似の状態であれば、この周期は翼群 1 個分の回転所要時間 7.0×10^{-3} s と同じオーダーであり、 W_1 、 W_2 の配分計算などにも修正が必要である。

6. 結 言

(1) 実機で計測された粗大水滴と類似の条件下で、円柱形状の試験片についてジェットエロージョン試験を行い、チタン合金、 β 合金、12% Cr 不しゅう

鋼およびステライト 6B について、減肉深さの実験常数を求めた。

(2) 衝突する粗大水滴の総量ならびに衝突速度を、翼群の考案を入れて求め、上記実験式で減肉深さを計算したところ、実績と定性的に一致する結果を得た。

(3) チタン合金製の動翼にはエロージョンシールドとして、 β 合金を開発したが、70 kHz の運転実績ではステライト 6B よりも耐エロージョン性に優ることが明らかとなった。

(4) 粗大水滴の発生ならびに動翼入口における状態は、あるいは衝突の状態がエロージョンにおよぼす効果などの詳細についてよりち密な解明を通じて、耐エロージョン性のいっそうの向上が期待される。

文 献

- (1) 荒木・ほか 3 名, 火力原子力発電, 31-9(1980), 49.
- (2) Avaki, R. *Proc. 4th. Int. Conf. Titanium. Met. Soc. AIME*, TOKYO, (1980).
- (3) 荒木・ほか 5 名, 三菱重工技報, 21-5(1984), 26.
- (4) 増沢・ほか 3 名, 三菱重工技報, 26-1(1989), 13.
- (5) Elliot, D. E., Marriott, J. B. and Smith, A., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 474(1970), 127.
- (6) 角家・ほか 2 名, 三菱重工技報, 16-1(1979), 28.
- (7) 角家・ほか 2 名, 三菱重工技報, 22-3(1985), 71.
- (8) Lieblein, S. and Roudebush, W. H., *Low-speed Wake Characteristics of Two-Dimensional Cascade and Isolated Air-foil Sections*, *NACA Tech. Note*, 3711(1956).
- (9) 木村・ほか 3 名, 三菱重工技報, 15-5(1978), 580.

討 論

〔質問〕 久保利介〔東京商船大学〕

(1) 図 2 において、A, B, C 点での動翼と静翼の間隔はどのくらいか。さしつかえなければ示していただきたい。

(2) 表 5 および貴論文中的「極限 We , 21~24⁽⁹⁾…」に関連して次のことを伺いたい。水滴のような粘性の小さい液滴では、落下水滴のように相対速度が徐々に増加する場合の極限(臨界) We 数は 22 くらい、水滴が一定速度の気流にさらされ、相対速度が最初から大きい場合の極限 We 数は 13 くらいであるとされている(付 1)。タービン内での水滴の流れは後者に近いと思われるが、上記 21~24 との違いの主な理由は何かをお教え願いたい。

〔回答〕 (1) 動翼と静翼の間隔は翼長方向に一定、すなわち図 2 の A, B, C 点いずれも 50 mm に設計されている。今 B 点を通る流線上では静翼のコード

の 40% に相当している。この設計は 40 年も前に行われたもので当時動静翼間隔を 50 mm 以上とすることが、エロージョン対策として必要とされていたものである。

(2) ご指摘のように 22 という極限 We 数は“a falling drop”に対するもので、ダービン内の水滴には true shock exposure の極限 We 数 13 くらいが適用されるのが合理的と考えられる。今までの実験結果では 22 となるがこれは極限 We 数の計算に入れる相対速度の問題が含まれていると考えられる。実験として以下の A, B がある。

A. 実機の計測結果

本文表 3 のように最大水滴径 250 μm に相当する翼後縁端の We 数 We_t は付図 1 に示す関係より下式で求める。

付図1 翼後縁端の粗大水滴噴出
 $C_{st}=217 \text{ m/s}$

$$We_t = \frac{\rho_v (C_{st})^2 D}{\sigma_L} \approx 22$$

ρ_v = 蒸気密度 $0.012458 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{mt}$

D = 最大水滴径 $250 \mu\text{m}$

σ_L = 水の表面張力 0.0067762 kg/m

B. 供試翼の実験結果

付図2において供試翼から噴出する最大径の水滴につき高速度カメラなどにより微細化に至る距離等を計測し、相当する We 数, We_{cr} を下式で求めた。

$$We_{cr} = \frac{\rho_v (C_{scr} - C_{Lcr})^2 D}{\sigma_L} = 21 \sim 24$$

$C_{scr} = L_{SA}$ における平均空気速度

$C_{Lcr} = L_{SA}$ における最大径の水滴速度

このように We 数が13を超えるのはノズルウェークの影響と推定される。すなわち翼後縁水塊から噴出する粗大水滴はノズルウェーク中で発生、加速しており a falling drop に近い現象と考えられる。付図3は表5 $D=250 \mu\text{m}$ の計算に使用した C_s , C_L をご参考ま

付図2 最大径水滴の微細化

付図3 ノズルウェーク中の水滴の加速

でに示している。

(付1) Hinze, J.O., *AIChE J.*, 1-2, (1955), 289.