- 3) Hiranuma, M.: *Kagaku Kōgaku*, **30**, 311 (1966)
- 4) Ishida, K.: *Bull. Chem. Soc., Japan*, **33**, 693 (1960)
- 5) Ishida, K.: *J. Chem. Eng. Data*, **6**, 489 (1961)
- 6) Kaminishi, G. and Toriumi, T.: Text of the 8th Meeting of the High Pressure, Japan (1966)
- 7) Katz, D. L. and Cosway, H. F.: *A. I. Ch. E. Journal*, **5**, 46 (1959)
- 8) McKetta, J. J. and Roberts, L. R.: *J. Chem. Eng. Data*, **8**, 161 (1963)
- 9) McKetta, J. J. and Wang, R. H.: *J. Chem. Eng. Data*, **9**, 30 (1964)
- 10) Othmer, D. F. and Tobias, P. E.: *Ind. Eng. Chem.*, **34**, 693 (1942)
- 11) Thodos, G. and Dastur, S. P.: *Brit. Chem. Eng.*, **11**, 198 (1966)
- 12) Yamada, I.: *Kagaku Kōgaku*, **25**, 158 (1961)
- 13) Zenner, G. H. and Dana, L. I.: *Chem. Eng. Prog., Symp. Ser.*, **44**, 36 (1963)

球表面におけるキャビテーション衝撃圧の発生機構*

末 沢 慶 忠**・松 村 昌 信**

津 田 健***

東京工業大学 化学工学科**

緒 言

流体を取扱う機械・装置などが高速化されると、機械部分と流体との相対速度は必然的に増大し、静圧は低下して条件によっては液の蒸気圧程度にまで達する。その結果、装置内に局部的沸騰現象であるキャビテーションが発生して種々の弊害が生じてくる。それらの内、低圧部で発生した気泡が高圧部へ移動して消滅するとき生ずる大きな衝撃圧による装置材料の損傷、すなわちキャビテーション・エロージョンは装置の高速化に対する重大な障害である。したがって、キャビテーションの発生を避け得ない機械・装置の設計においては損傷の大きさと流速との関連を解明することが要求される。

キャビテーション・エロージョンにおよぼす流速の影響については古くから研究が行なわれているが、それらの結果は必ずしも一致していない。例えば Knapp¹⁾ は損傷速度は流速の 6 乗に比例して増大するという結果を得たが、Hammitt²⁾ らは流速に伴って損傷はある程度増大するが、その後はかえって減少すると述べている。これらの相違が生じた原因は、直接に流速と損傷速度との関係を求めたために得られた結果がそれぞれの異なった特定条件下でしか成立しないためである。いいかえれば、これらはともに普遍的な結論ではない。任意な条件

下の両者の関連を予測するには、まず流速と気泡挙動の関連、つぎに気泡挙動と衝撃圧、さらに衝撃圧と損傷の関連などエロージョンに関与する諸因子の相互関係を明らかにする必要がある。しかし、今までのところ単一気泡の挙動に関しては解析が行なわれているが^{3,4)}、それらと損傷速度との関連は得られていない。

そこで著者らはさきに球のまわりに発生するキャビテーション気泡群の挙動には流速に関して 3 種類の状態があることを見出し、それらと鋼球の受ける損傷速度とを比較した⁵⁾。本報では、前報においては単にそれぞれ単独にしか用いなかった高速度カメラ、ストロボスコープおよびビエゾメーターを連動させて使用し、球表面においてキャビテーション衝撃圧が発生した瞬間の気泡群挙動を撮影した。得られた写真の観察に基づいて気泡群挙動と衝撃圧発生回数の関連および球表面における衝撃圧発生機構を解明した。

1. 実験装置および実験方法

実験に用いたウォータートンネル、その試験部分および試験球はそれぞれ既報⁵⁾の Fig. 1, Fig. 2 および Fig. 9 に示されたものとまったく同一である。すなわち、その表面にビエゾメーターを埋込んだ直径 22.22mm の黄銅製試験球が内径 52.9mm の透明アクリル樹脂製円管の中心部に固定されている。実験条件も既報⁵⁾と同様で、40°C の水道水を空気飽和状態で最大流速 15m/sec で循環した。

衝撃圧発生瞬間における気泡群挙動を撮影するため高速度カメラ、ビエゾメーターおよびストロボスコープを

* <Mechanism of Impulsive High Pressure Generation by Cavitation over a Sphere Surface>

Received on July 24, 1967

** Yoshitada Suezawa and Ken Tsuda (Dept. of Chem. Eng., Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan)

*** Masanobu Matsumura (広島大学工学部化学工学科 Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima, Japan)

- ① Test sphere equipped with a piezometer
- ② Stroboscope ③ Flash lamp
- ④ High-speed motion picture camera
- ⑤ Projector

Fig. 1 Block diagram of an experimental apparatus

組合せた測定機器の配置図を Fig. 1 に示す。球表面における衝撃圧によって圧電振動子 $\{Pb(Ti_{0.47}-Zr_{0.53})O_3\}$ に誘起された電圧信号はストロボスコープに送られる。これに応じてキセノンフラッシュランプが瞬間発光する。この閃光は気泡群挙動を撮影している高速度カメラの側面に取り付けられたレンズを通してフィルム上に記録され、連続した気泡群挙動画像に衝撃圧が発生した瞬間の位置をマークする。衝撃が生じた瞬間の画像の位置とフラッシュランプからの閃光を受ける位置とはフィルム上で4コマずれているので、衝撃圧発生瞬間の気泡群挙動は閃光によって妨げられることなく撮影される。

なお、試験球表面のピエゾメーター埋込み位置は $\alpha = 75^\circ$ (Fig. 2 および既報⁵⁾ Fig. 10 参照) とした。これは鋼球を用いた侵食試験の結果、損傷は $\alpha = 75^\circ$ を中心に球を帯状に取りまいて発生していたからである。また、高速度カメラの最大撮影速度は前回と同様 10,000 コマ/sec である。

2. 実験結果と考察

すでに前報⁵⁾で述べた3特性流速域④, ⑥, ⑦にわたって高速度写真撮影を行なった。その結果、周期的気泡

Fig. 2 Definition of the angles, θ and α

群発生⑥流速域では気泡群周期運動のほぼ1週期ごとにフラッシュランプの発光、すなわち衝撃圧発生が認められた。これに対して、⑥流速域より流速が低く気泡群周期運動が認められない④流速域(既報⁵⁾ Fig. 6 (a))と⑦流速域より流速は大きい気泡群が常時球後半を覆った状態にある⑦流速域(既報⁵⁾ Fig. 6 (c))では衝撃圧発生回数が⑥流速域におけるそれよりも少なく、かつ不規則である。なお、いずれの流速域においてもフラッシュランプの発光持続時間は1/10,000秒以下であった。

それぞれの特性流速域での衝撃圧発生の瞬間およびその直前と直後における気泡群挙動の写真の1例を Fig. 3 に示す。いずれの流速においても中央のコマ(2)が衝撃圧発生瞬間の気泡群状態であり、各コマの時間的間隔は1/10,000秒である。写真上の白印は振動子の埋込み位置を示している。これらの写真によって次の事項が認められる。

(1) ⑥流速域で衝撃圧が発生するのは気泡群周期運動の1サイクルのうち気泡群が球表面より脱離した過程(既報⁵⁾ Fig. 7 (6))においてであって、衝撃を受ける振動子埋込み位置付近には少量の気泡しか存在しない。

(2) ④流速域では、⑥流速域と同様に衝撃を受ける場所附近の気泡量が少ないときに衝撃圧が発生している。

(3) ⑦流速域で衝撃圧が発生するのは球後半を覆う気泡群の量が少なく、球表面が比較的液に曝されているときである。これは典型的な⑦状態(既報⁵⁾ Fig. 6 (c))に比較してむしろ例外に属する。

以上の観察結果から球表面における衝撃圧発生はつぎの機構によると考えられる。すなわち、⑥流速域において球表面で気泡群が生長する過程(既報⁵⁾ Fig. 7 (1)~(5))では球表面からの流れの剥離点は $\theta = 90^\circ$ (Fig. 2 参照) 以前にあり、球のまわりの圧力分布は Fig. 4 ①の状態にある。剥離点より下流では圧力分布がほぼ一定であるため、気泡は生長するが消滅しない。したがって衝撃圧発生はない。これに対し、さらに時間がたち、生長した気泡群が球表面から下流に離脱した後(既報⁵⁾ Fig. 7 (6))は、剥離点は下流に移動し、流れは $\alpha = 75^\circ$

Fig. 3 Behavior of cavitation cloud at the moment of impulsive high pressure generation

($\theta=105^\circ$) 付近まで理想流れ状態に近くなり圧力分布は Fig. 4 ②の状態にある。このとき少量の気泡が静圧の最も低い $\theta=90^\circ$ ($\alpha=90^\circ$) 付近で発生し、球表面に沿って流れた後 $\alpha=75^\circ$ ($\theta=105^\circ$) 付近の静圧上昇箇所へ突入して消滅し、衝撃圧が発生する。

④流速域では剥離点は常時 $\theta=90^\circ$ より上流にあり、圧力分布は Fig. 4 ①で示される。このため球後半部は常に気泡群で覆われ、気泡は球表面近くでは消滅しない。この流速域での衝撃圧発生は偶発的に流れが球表面に沿って侵入し気泡が球表面近くで消滅する場合のみで、その回数は③流速域におけるそれより少ない。流速が増加するほど安定した③状態となって流れの侵入頻度は減少し、それに伴って球表面の損傷も減少する。

④流速域では剥離点は常に $\theta=90^\circ$ 以後にあるが、流速が低いため $\theta=90^\circ$ 付近の静圧が③流速域のそれに比して大きく、気泡発生機会は少ない。また、 $\alpha=75^\circ$ ($\theta=105^\circ$) 付近との圧力差も小さいため気泡の消滅も比

Fig. 4 Pressure distributions around a sphere

較的緩慢で、その結果生ずる衝撃圧の大きさは③流速域のそれに比して小さい。したがって球材の損傷量は③流速域のそれより小さいが、⑤流速域のそれよりは大きい。

3. 結 論

以上により下記の結論を下すことができる。すなわち、

(1) 流速が低く最低静圧部の静圧が比較的高いときは、気泡発生機が少なく、気泡の消滅も緩慢でそれに伴う衝撃圧は小さい。したがって球材の損傷は比較的少ない(④流速域)。

(2) 流速が大きくなり気泡群が周期的に発生するようになると、充分生

長した気泡群が下流に流れ去った後は、球表面における流れの剥離点は比較的下流に移動し球のまわりの圧力分布が理想状態に近くなる。このとき最低静圧部付近で発生した気泡は球表面に沿って移動し、静圧の高い場所へ突入して消滅し大きな衝撃圧を生ずる。この場合の損傷は最も大きく、衝撃圧の発生回数は気泡群のそれにほぼ等しい(③流速域)。

(3) これに対し、流速がさらに大きく流れが常により上流で剥離するときは、剥離点より下流がほぼ静圧一定の気液混合渦流状態にあるため、気泡が球表面近くで消滅する機会は少ない。したがって、球表面近くでの衝撃圧発生およびそれによる球材の損傷は最も少ない(⑤流速域)。

【付 記】 本研究を行なうにあたって熱心に協力された当時の学部卒論生西 敏一君に感謝の意を表わす。

Nomenclature

g_c : gravitational conversion factor		α : angular displacement from the backward stagnation point	[degree]
p : pressure	[kg·m/Kg·sec ²]	θ : angular displacement from the forward stagnation point	[degree]
p_0 : pressure of free stream	[Kg/m ²]	ρ : density	[kg/m ³]
$\bar{u}$: average fluid velocity	[m/sec]		

Literature cited

- 1) Knapp, R. T.: *Trans. ASME*, **77**, 1045 (1955)
- 2) Hammitt, F. G., et al.: *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Ser. D*, **87**, 453 (1965)
- 3) Knapp, R. T. and A. Hollander: *Trans. ASME*, **70**, 419 (1948)
- 4) Naudé, C. F. and A. T. Ellis: *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Ser. D*, **83**, 648 (1961)
- 5) Suezawa, Y. and M. Matsumura: *Kagaku Kōgaku*, **31**, 177 (1967)

ウォータートンネル法による鋼球のキャビテーション侵食*

末 沢 慶 忠**・松 村 昌 信***

東京工業大学 化学工学科**

緒 言

高速流体を取扱う機械・装置や船舶のプロペラなどにおいて、機械・装置構成部品と流体との相対速度が大きくなると、その場所での静圧低下によって生ずる局部的沸騰現象たるキャビテーション、およびその結果生じた微小気泡が下流高圧部で消滅するとき発生する大きな衝撃圧によってその附近の構成部材が受ける損傷たるキャビテーション・エロージョンについて、著者らは流体中の物体の形状として最も基本的形状である球を選び、そのまわりに発生する気泡挙動の流速による変化、それに伴う衝撃圧の変化、さらにはそれらと鋼球の受ける損傷量との関連について研究を行ない、その結果をさきに報告した¹⁾。

すなわち、円管の中心部に固定された球のまわりの気泡挙動には流速に関して3種類の状態がある。中間の流速域(②流速域)では気泡は1つの気泡群として周期的

に発生する。球表面における衝撃圧はこの周期的気泡群発生流速域において最大に達し、それより流速が大きくなると気泡群が常に球後半を覆っている状態の流速域(③流速域)ではかえって減少する。この現象は球表面での流れの剥離点が生ずる流速に伴って上流に移動することに起因している。鋼球を用いた侵食試験の結果は、電気化学的腐食(コロージョン)が支配的な条件下であったにもかかわらず上記の衝撃圧測定結果から予測された通り、球の受ける侵食量が③流速域で最大となり、流速最大の③流速域でかえって減少する結果となった。

本報では、陰極防食法によってそれぞれの特性流速域における侵食量からコロージョンを除き、エロージョン量のみについてそれらを比較して前報の結果を定量的に確認すると同時に、その条件下におけるエロージョン量とコロージョン量の比較を行なった。

1. 実験装置および実験条件

実験に用いたウォータートンネル法試験装置本体は既報¹⁾の Fig. 1 に示されたものと同一である。ただし、試験部分の透明アクリル樹脂製円管(既報¹⁾ Fig. 2) をそれと内径および長さの等しいカーバイト製円管に取り替えた。これは試片に防食電流を流すさい補助電極として

* <Cavitation Damage on a Steel Sphere Surface in a Water Tunnel>

Received on September 13, 1967

化学工学会第31年会(1966)にて発表

** Yoehitada Suezawa (Dept. of Chem. Eng., Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan)

*** Masanobu Matsumura (広島大学工学部化学工学科 Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima, Japan)

本 号 の 研 究 論 文 要 旨

三成分系液相活量係数と組成との関係式（小島和夫・越智健二・中沢豊，化学工学，32，441～446（1968）） 三成分系過剰自由エネルギーを，成分1および成分2の組成をそれぞれ一定とする条件下で，液組成の関数で表わし，任意組成における活量係数を求める計算式を示した。

また比較的極性の強い物質からなるエタノール～イソプロパノール～水系の760 mmHgにおける気液平衡を実測し，あらたに求めた計算式で気相組成を計算した結果，計算値と実験値との一致は良好であった。

一定温度，圧力における三成分系気液平衡における相関関係——1組または2組の二成分系に液相が存在しない場合——（佐藤倉治，石田清春，化学工学，32，417～452（1968）） 一定温度，圧力における三成分系気液平衡図は三成分系液々平衡図と類似の関係にある。濃度単位を変換することによって，この三成分系気液平衡データは対称形に表わされ，タイラインは基線に平行になる。単位変換後の三成分系気液平衡は三成分系正則溶液理論を関係づけられ，これらの相関関係は最小のデータから平衡を予測するのに有用である。

球表面におけるキャピテーション衝撃圧の発生機構（末沢慶忠・松村昌信・津田健，化学工学，32，452～455（1968）） 円管の中心部に置かれた球のまわりのキャピテーションに関し，衝撃圧の発生機構を明らかにするため高速度カメラ，ピエゾメーターおよびストロボスコープを組合せて衝撃圧発生の際における気泡群挙動を撮影した。

得られた写真に基づいて衝撃圧発生機構を論じ，さらにそれに基づいて流速の大きい特性流速域においても球材の受けるキャピテーション損傷が減少する既報の結果の理由を解明した。

ウォータートンネル法による鋼球のキャピテーション侵食（末沢慶忠・松村昌信，化学工学，32，455～459（1968）） 円管の中心部に置かれた鋼球が受けるキャピテーション侵食の内，コロージョンの影響を除く防食法によって除き，エロージョン速度のみをキャピテーション気泡挙動に関する特性流速域について比較した。その結果，流速最大の流速域におけるエロージョン速度は周期的気泡群発生流速域のその1/3程度となり，既報のキャピテーション衝撃圧測定結果と定量的に一致した。また，各流速域におけるエロージョン量とコロージョン量の比較も行なった。

流動層装置による鶏糞の焼却（石田愈，白井隆，化学工学，32，459～464（1968）） 多量の水分を含んでいる鶏糞を流動層装置により焼却させる実験を行なった。流動層は層内に設けたバーナを用いて加熱し，一方，空気分散板のすぐ上を機械的に攪拌して粒子の凝着を防いだ。一定量の鶏糞を投入したときの層の温度変化ならびに熱収支を解析して燃焼速度定数 k を求め，層温度や粒子の U_m などの影響を検討した。同時に層出口ガスを採取，分析し，酸素消費量に基づいた燃焼速度定数 k' を求めた。 k と k' とを比較したところ，層内の流れをピストン流れとみなすと両者はよい一致を示した。

2次元層流拡散焰の燃焼機構について（城塚正，酒井清孝，化学工学，32，464～470（1968）） 2次元層流拡散焰について，燃料成分の物質移動におよぼす燃焼反応の影響を実験的，理論的に検討した。燃料としてはプロパンを用い流速は1.932 cm/sec と 2.90 cm/sec の2種類について実験を行なった。そしてバーナ口近傍において噴流作用による多量の空気同伴のために燃料成分の物質移動が大きくなり，また k_{comb} と反応係数の理論値と実験値とはよく一致し火焰の先端部，物質移動におよぼす燃焼反応の影響が大きいことが分かった。

振動するオリフィスからの粉体の流出速度（吉田哲夫，向阪保雄，油谷昭夫，化学工学，32，470～474（1968）） 粉体に振動を作用させるとその流動性が改善される場合が多いが，オリフィスからの粉体の流出に対してどのような効果があるかを考察した。その結果，（i）重力場において自然流出可能なオリフィスを用いたときには，流出量は振動によって時々刻々変化する加速度の1/2乗にはほぼ比例すること，および（ii）重力場において自然流出不可能な小径のオリフィスを用いたとき，1g以上の加速度の振動によって強制的に粉体を流出させることが可能となるが，これには加振によって作用する衝撃力が粉体の静的架橋の崩壊に役立っていることを見出した。

液々不均一相反応に関する研究——完全混合槽における分散相の分散合—頻度について——（大竹伝雄，駒沢誠，化学工学，32，475～479（1968）） トルエンの硝化反応によるモノトロ化反応を用いて完全混合槽における分散相の分散合—頻度について検討した。混雑組成については硝酸に関する次数が1次または1/2次となる組成で，そして酸相を連続相または分散相とした各種の操作条件下で反応率を測定した。測定された反応率の比較から本実験の操作条件下では酸相を分散相とした場合，分散相の分散合—頻度は反応速度と比較すれば無視されることが判明した。

多孔板上での液体混合について——乱流拡散の考え方の応用——（井上一郎・海野榛，化学工学，32，480～485（1968）） 乱流拡散の考え方を適用することにより，多孔板上での液体の混合特性の検討が可能であることを示した。連続点源トレーサー法による実験から濃度分布を実測し，乱流拡散係数を流体要素の乱れの平均速度とLagrangeのタイムスケールに分離し，おのおのに影響する因子は泡注層高と孔間隔であることを認めた。