

## キャビテーション気泡群の崩壊挙動について

## On the Collapsing Behavior of Cavitation Bubble Clusters

正 金野 祥久 (東大)      正 山口 一 (東大)  
正 加藤 洋治 (東洋大)      前田 正二 (東大)

Akihisa KONNO, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Hajime YAMAGUCHI, The University of Tokyo

Hiroharu KATO, Toyo University

Masatsugu MAEDA, The University of Tokyo

Collapse of cavitation bubble clusters was observed with a digital high-speed video camera synchronized with the signal of impulsive force sensors. Duration of collapse was the order of 100 microseconds, which was by far slower than that of an impulsive force that was around 5 microseconds. According to theoretical calculations the impulsive pressure is generated when the whole cloud cavity collapses completely. But in this observation the peaks of impulsive force did not meet the instant of final collapse, but occurred some 10 to some 100 microseconds earlier than the final collapse. These results suggest the following scenario. The increase of surrounding pressure causes the propagation of shock wave into inside, which makes bubbles collapse and rebound immediately after collapse. So although the shock wave focuses and produces high pressure at the center of the cluster, it looks as if it is not completely collapsed because of the surrounding rebounded bubbles.

*Key Words:* cloud cavitation, bubble cluster, collapse, impulsive force, high-speed video camera

## 1 はじめに

キャビテーションの研究が進むにつれ、キャビテーションによる壊食(エロージョン)が残された大きな問題となっている。壊食はキャビテーション気泡(群)が高圧の場で崩壊し、衝撃的な圧力を発生するために起こる現象である。この衝撃力発生メカニズムを知るためには、実際にキャビティ気泡(群)の崩壊挙動を観察し、そのとき発生する衝撃力との関係を調べる必要がある。

しかしながらキャビティ気泡群の崩壊は非常に高速な現象なので、その観察は困難である。現象の観察と衝撃力の計測を同時に行うためには、高速度デジタルビデオカメラが必須であるが、これの入手がネックとなるせいか、この現象を観察しながら衝撃力を計測した例は、これまでほとんど無く、気泡群の崩壊挙動の研究は、専ら理論面および数値計算によって進められている。しかし実験データが乏しいので、研究結果の検証はほとんど行えないのが現状である。

本研究では衝撃力発生時の気泡群崩壊の挙動を高速度ビデオカメラで観察し、同時に著者らが開発したセンサを用いて、衝撃力を計測した。この結果を突き合わせて検討し、衝撃力の発生メカニズムを考察する。

## 2 実験装置および方法

**2.1 衝撃力センサ** 本研究で用いた衝撃力センサは、圧電材料を用い、衝撃力を電圧に変換するものである。このセンサでは圧電材料の性質上、衝撃的に加えられた力を検知することはできるが、静的な力は検出できない。

著者らは過去に数種類の衝撃力センサを用い、キャビテーション崩壊による衝撃力を計測している<sup>(1,2)</sup>。この経験から、本研究ではPVDF膜を圧電材料として用いたセンサを設計・製作し、実験に供した。これは祖山ら<sup>(3,4)</sup>によって開発されたPVDFセンサを参考に、翼面に取り付けやすいように改良を施したものである。

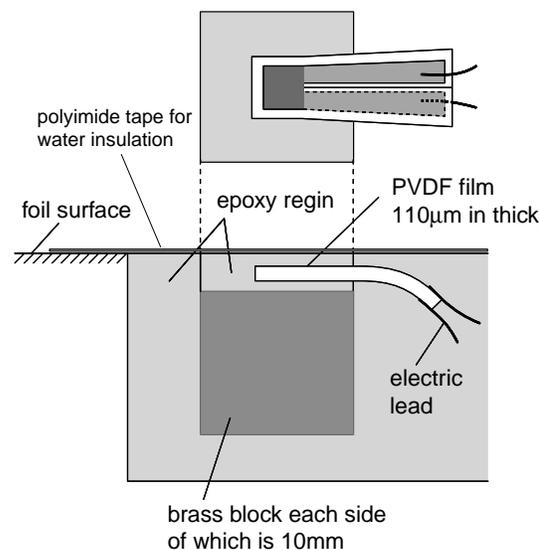


Fig. 1: Impulsive force sensor

PVDF (Polyvinylidene fluoride, ポリフッ化ビニリデン) は圧電性高分子材料の一種である<sup>(5)</sup>。圧電性高分子膜は、

- 非常に軽い薄膜であり、厚さは24~110 μmである。本研究では110 μmのものを用いた。
- 衝撃などに対して強く、壊れにくい。
- 成形、加工が容易で形状を制御するのが簡単である。
- 高帯域な周波数特性を有しており、時間分解能が高い。
- 安価。
- しかし過渡的な力に対する出力電圧は、圧電セラミックスにくらべて、およそ1桁小さい。(これは短所である。)

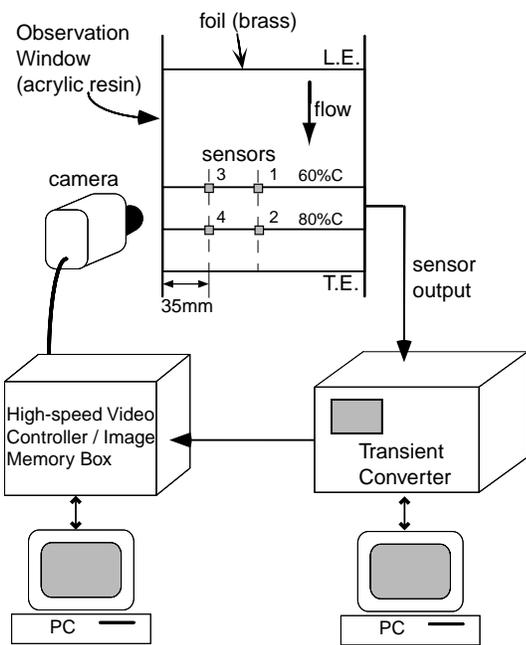


Fig. 2: Sensor embedded positions and experimental facilities

などの特徴を持つので、キャビテーション気泡の崩壊時の衝撃力のような非常に強い衝撃力を計測するのに適している。

**2.2 2次元翼型** 断面形状が NACA 0015 翼型の 2次元翼模型 (150 mm × 150 mm) を作成し、これに衝撃力センサを 4 個、Fig. 2 に示す位置に埋め、実験に供した。センサ位置は、この実験に先だて行ったペイントテストにおいて、壊食ビット (正確には、ペンキの脱落) が多く観測された位置を選んだ。気泡の崩壊は主に横方向から撮影したので、窓際にあり観察しやすいセンサ 3、4 を中心に実験した。

**2.3 衝撃力計測システム** 衝撃力センサの出力電圧はトランジェント・レコーダ (理研電子 (株) TCFL-8000SR) に入力し、最小 50 nsec. 毎のサンプリング時間間隔で AD 変換してメモリに記憶させる。そしてその記憶内容をパーソナルコンピュータに取り込むために、GP-IB インターフェイスを用いている。これによって衝撃力センサの出力波形を得ることができる。

また、この計測装置はピークホルダとしての機能も有しており、指定したしきい値を越えるデータを検出した場合に自動的に停止し、その前後のデータを読むことができる。これに加え、ピークを検出すると同時にトリガ出力を発生するようにトランジェント・レコーダに改造を施し、このトリガ出力を次に述べる高速度ビデオカメラのトリガ入力に入れ、衝撃力と同期した映像を撮影した。

**2.4 高速度ビデオカメラ** 観察には高速度デジタルビデオカメラ ((株) フォトロンの FASTCAM-ultima) を用い、毎秒 40,500 コマにて気泡群の崩壊挙動を撮影した。撮影領域の画素数は撮影速度によって異なり、毎秒 40,500 コマの場合には 64 × 64 ピクセルである。映像はグレースケール 256 階調 (8 ビット) のデジタル画像として、いったんメモリに記録される。その後は通常のテレビモニターに表示したり、ビデオテープもしくはコンピュータの記憶装置上に保存することが出来る。

このビデオ装置は外部トリガ入力端子を備えており、トリガ入力の前後の画像を記録することが出来る。実験の際は、このトリガ入力に前述した衝撃力計測システムのトリガ出力を入れ、衝撃力の発生前後の映像を記録した。

**2.5 キャビテーションタンネルと実験条件** 本研究での実験は、東京大学船用プロペラキャビテーションタンネルの翼型用試験部を用いて行った。試験部は幅 150 mm × 高さ 600 mm の矩

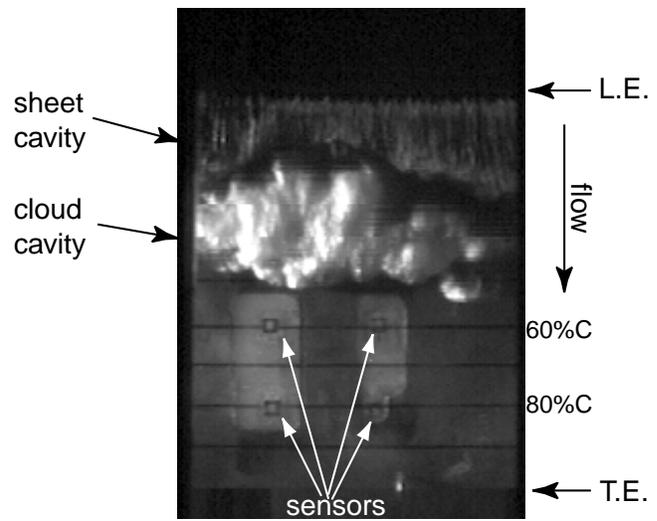


Fig. 3: Cavity appearance on NACA 0015 hydrofoil

形断面で、試験部の主流方向の寸法は 1000 mm であり、片側の側壁には観測用のアクリル窓が取り付けられる。さらに上壁にも小さなアクリル窓を設けて上方からの観測もできるようになっている。

実験条件は、迎角  $8^\circ$ 、主流速 8 m/sec.、キャビテーション数  $\sigma = 1.5$  とした。

### 3 実験結果および考察

Fig. 3 に、上記実験条件でのキャビテーションの様子を示す。この画像は翼負圧面側から、高速度ビデオカメラで撮ったものである。キャビテーションの周期的な生成・崩壊を観察するため、撮影条件は毎秒 4,500 コマとした。シートキャビテーションが翼前縁から発達し、成長して長さがコード長の 50% ほどまでになると、前縁から全体がちぎれ、大規模な気泡群 “クラウドキャビティ” を放出する。このクラウドキャビティが崩壊・消滅するときに衝撃力を発生する。

Fig. 4 に、センサ 3 上で崩壊するクラウドキャビティの様子を示す。これも高速度ビデオカメラで、毎秒 40,500 コマにて撮影した映像である。図中 (0) とある映像がトリガ信号が発生したとき、すなわち衝撃力が発生したときに対応する。この図の見方は Fig. 5 で説明している。また Fig. 4 に対応する衝撃力のグラフを Fig. 6 に示す。

これらの観察と衝撃力の計測から、次のことが分かった。

1. 衝撃力は常にクラウドキャビティが崩壊するときのみ発生し、キャビティ崩壊が無いときに衝撃力が観察されることは無い。
2. 衝撃力のピークが複数観察されるときがあるが、これはリバウンドしたキャビティが再び崩壊したときの衝撃力を計測した場合である。同様の現象は佐藤らも報告している<sup>(6,7)</sup>。
3. 撮影速度は毎秒 40,500 コマで、コマの間隔だと  $24.7 \mu\text{sec.}$  に相当する。一方、衝撃力の幅はおよそ  $5 \mu\text{sec.}$  に過ぎない。したがってキャビティ崩壊の現象を捉えるのにはまだ不十分である。また、画像サイズ (64 × 64 ピクセル) も、現象を詳しく観察するためには不足である。より高速で、解像度の高い高速度画像記録装置の出来が待たれる。
4. キャビティ気泡群全体の崩壊に要する時間は、高速度ビデオカメラの映像で数コマ程度、時間にして  $100 \mu\text{sec.}$  のオーダーである。これは衝撃力の幅のピーク、 $5 \mu\text{sec.}$  よりずっと遅い。
5. ほとんどの場合、衝撃力のピークは、気泡群が崩壊してそ

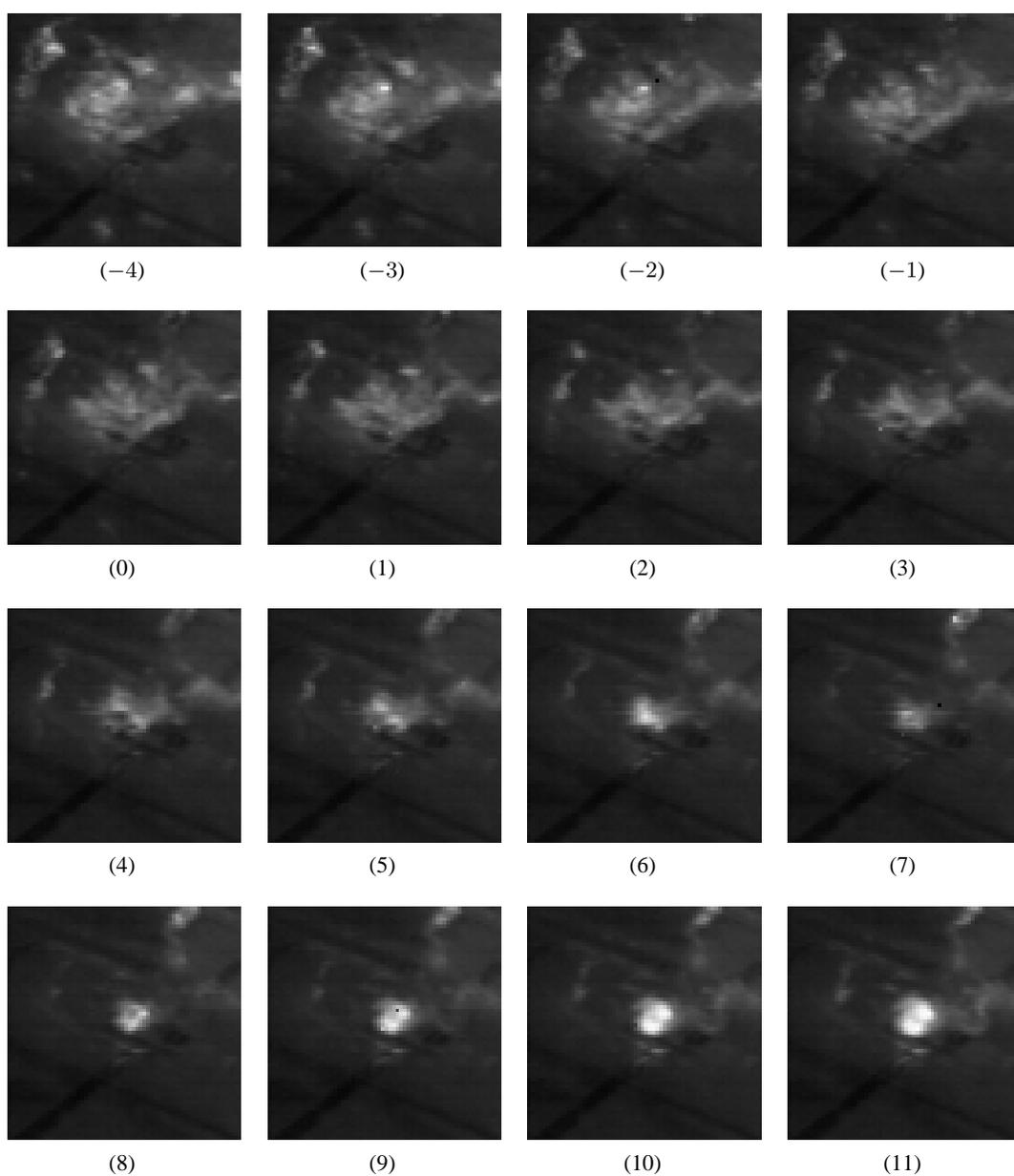


Fig. 4: An example of sequence of bird's-eye pictures by high-speed video camera at the time when impulsive force was measured. Frame interval: 24.7  $\mu$ sec.. The frame number (0) corresponds to the instant of impulsive force occurrence.

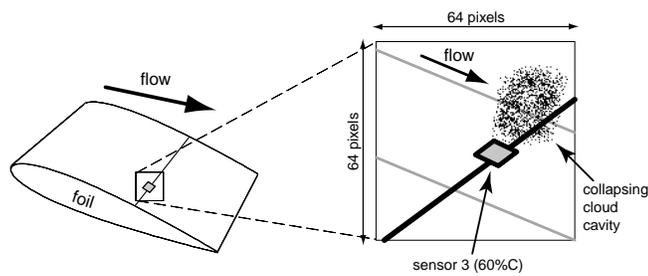


Fig. 5: Illustration of the view of the high-speed video camera when observing collapses of cavities

の見かけの体積が最小になる瞬間よりも数コマ前に観察される。気泡群が崩壊しきった後に衝撃力が観察されることは無い。この点に関しては、以降でさらに議論する。

3.1 キャビティ崩壊と衝撃力発生との時間差について 上に述べたように衝撃力が発生するタイミングは、キャビティが崩壊

して見掛けの体積が最小になる時刻と同時かそれより早い。そこでキャビティの大きさ(体積)を間接的に表す尺度として、映像内のキャビティ部分の面積(投影面積)を調べた。キャビティの投影面積が最小になる映像と、衝撃力が発生する映像との時間差を調べたところ、Fig. 7 のようになった。なお、時間差の平均値は 94.5  $\mu$ sec. である。

3.2 衝撃力発生メカニズム キャビティ気泡群全体が崩壊し見掛け上の体積が最小となるよりも前に衝撃力が発生していることから、キャビティ気泡群の崩壊に際しては、以下のようなシナリオが考えられる。

キャビティ気泡群は、周囲液体とくらべて圧力波の伝播速度(音速)が遅いため、周囲の圧力が上昇した場合に、この圧力がキャビティ気泡群の外側から中央方向へ伝播する際に衝撃波を形成すると考えられる。この衝撃波の前方では、高圧のために気泡が崩壊する。一方衝撃波の後方には低圧の領域がある。したがって衝撃波の通過の際に気泡はいったん崩壊し、その後速やかに再膨張(リバウンド)すると考えられる。

この衝撃波がキャビティの中央へ伝播していくと、そこでは

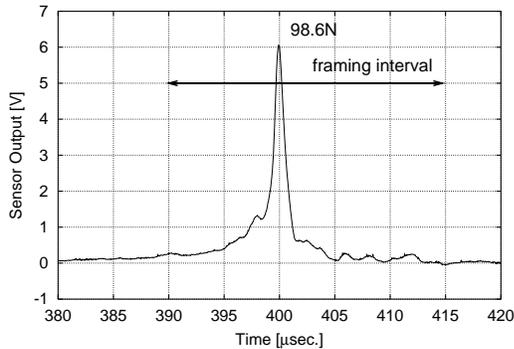
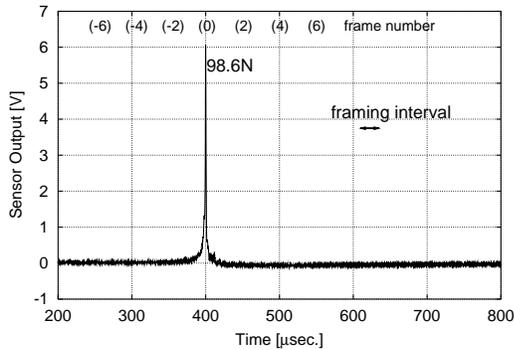


Fig. 6: Output voltage of impulsive force sensor corresponding to Fig. 4

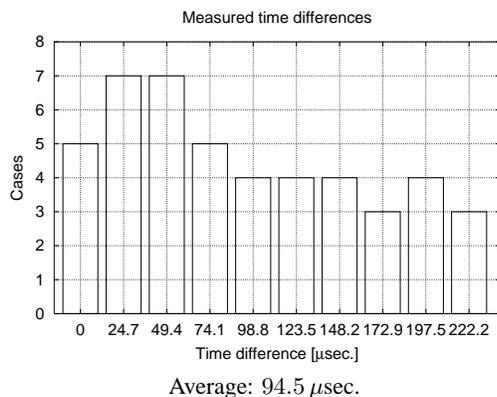


Fig. 7: Number of measured cases of time difference between cavity collapses and occurrences of impulsive forces

衝撃波の収斂のために、気泡が激しく崩壊し、強い衝撃的圧力が発生する。しかしその周囲をリバウンドした気泡群が覆っているため、キャビティは見掛け上、まだ完全に潰れきっていないように見える可能性がある。(Fig. 8)

島田ら<sup>(8,9)</sup>はキャビティ気泡群の崩壊問題を気液2相流モデルを用いて数値的に解析した。そしてその結果、気泡群の崩壊時には中心部に向けて衝撃波が伝播、集束し、中心部では高い圧力が発生すること、気泡群中心部で気泡から衝撃波が発生した後、個々の気泡が完全に小さくなり初期状態に戻るまでに相当の時間遅れがあることなどを示している。この結果は本節で述べたシナリオと一致する。ただし本研究で扱った現象は、気泡分布が不明なことや周囲流れ・圧力の空間的分布、壁面(翼面)の存在など、島田らの解析条件とは異なる点も多く、一概に比較できない。この現象のさらなる調査が必要である。

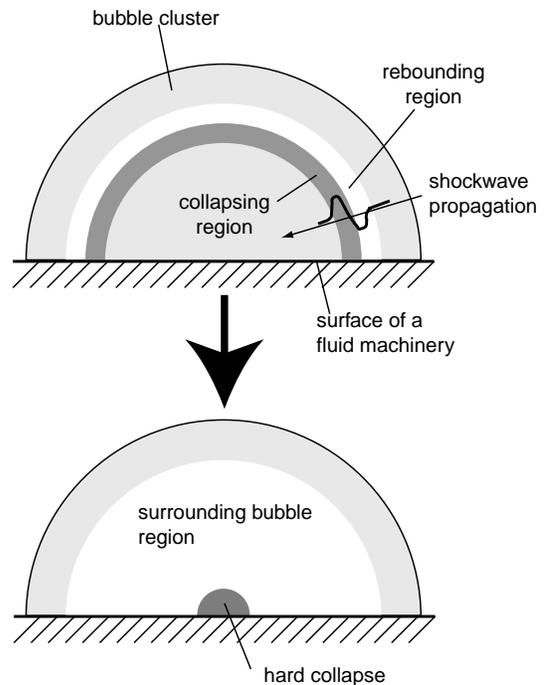


Fig. 8: Illustration of cavity collapse by shock-wave propagation

#### 4 ま と め

高速度ビデオカメラによって気泡群が崩壊の様子を撮影し、同時にそれに対応する衝撃力を計測して、衝撃力の発生メカニズムを考察した。観察の結果、気泡群が崩壊してその見かけの体積が最小になる以前に、衝撃力が発生していることが分かった。この現象から予想されるキャビティ気泡群崩壊のシナリオとして、キャビティ内を圧力が伝播する際に衝撃波が形成されることが考えられる。衝撃波の後ろで気泡が速やかにリバウンドするため、衝撃波が収斂して高い衝撃的圧力を発生するときには、その周りをリバウンドした気泡群が覆っており、見掛け上まだ崩壊が終わっていないように見える可能性がある。

本研究にあたり、祖山均助教授(東北大学)には、PVDF膜を提供していただいたほか、衝撃力センサの開発にあたり有益な助言を何度もいただいた。(株)理研電子には、計測装置がトリガ出力を出すように無償で改造していただいた。また衝撃力発生メカニズムについては、松本洋一郎教授(東京大学)のご教授を得た。ここに深く感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- (1) 金野ほか4名, 日本造船学会論文集 Vol.177, (1995), 81-89.
- (2) 金野ほか4名, 日本造船学会論文集 Vol.184, (1998), 15-26.
- (3) 加藤 洋治 ほか, 文部省科学研究費補助金(国際学術研究・共同研究) 研究成果報告書 07044124, (1997).
- (4) Soyama, H. et al., ASME FED-Vol.236, (1996), 415-422.
- (5) 講習会「圧力変換器製作技術と実習—低圧から超高压まで」教材, 日本機械学会 通計番号: No.940-66, (1994).
- (6) Sato, K. and Ogawa, N., ASME FED-Vol.226, (1995), 119-125.
- (7) 佐藤ほか2名, 機論, 63-606, B(1997), 372-377.
- (8) 島田ほか3名, 機論, 65-634, B(1999), 1934-1941.
- (9) 島田ほか3名, 機論 B, 65-637, B(1999), 3002-3007.