

衝突水塊による衝撃圧力と衝撃音の相関に関する研究

—被衝突平板寸法の影響の検討—

正員 肥後靖* 山田良**

A Study on Correlation between Impact Pressure and Impact Sound Generated by Water Drops

- Investigation of Effect of Plate Size -

by Yasushi Higo, Member Ryo Yamada,

Summary

The impact force due to waves acts on the marine structures and sometimes gives a serious damage to the structures. The monitoring system for the wave impact forces will be required to achieve the structural safety. When the wave impact force acts on the structures, the sound generates at the same time. If there is any correlation between the impact force and sound pressure, it is considered that the measurement of sound may be used as the monitoring system of the wave impact forces. In this paper, we present the experimental results to make clear the correlation between impact pressure and generated sound when dropping water hits the flat plate as the first stage.

1. 緒言

海洋に設置された構造物は、絶え間ない波浪により、時に衝撃的な力を受けている。特に、荒天時には波浪による衝撃力によって、構造物が破壊されてしまうことさえある。従って、海上に設置した構造物に働く波浪衝撃力を常時モニターすることは、構造物の安全を保つための重要な技術であるが、従来の方法では、計測センサーの設置箇所の決定や、センサーの経年劣化による計測精度の不安定性など様々な問題がある。

一方、波浪が衝突する際には、同時に音も発生させている。その点に着目し、波浪による衝撃音と衝撃圧力に相関関係があることを示すことができれば、音を計測することにより波浪衝撃力を間接的にモニターでき、簡便な新形式センシング技術の開発につながるのではないかと考えた¹⁾²⁾³⁾。

本研究では、波浪が構造物に与える衝撃圧力と衝撃音の関係を明らかにして、新形式センシング技術に応用させることを最終の目的とし、その初段階として、水塊の自由落下によって発生す

る衝撃圧力と衝撃音に相関関係があるかどうかを実験的に検討を行う。

2. 実験

本研究では、Fig.1に示すように、一端にゴム膜を緊張させて張った円筒パイプに一定量の水を貯め、先端を鋭利にした鉄線を用いて、上部からゴム膜を突くことによって、パイプ内の水を瞬時に水塊として落下させ⁴⁾、下部の平板に衝突させる。このときに発生する平板中央の表面圧力と衝撃音をそれぞれ圧力センサーとマイクロフォンで計測する。また平板はコンクリート床に直接置いた全面支持と一边を固定保持した一边支持の状態で行い、水塊衝突時の映像を記録するため、全面支持の場合は横から、一边支持の場合は横及び下からデジタルビデオカメラによって撮影する。

2.1 実験条件

水塊が平板に衝突する際に発生する音は平板の振動音と水塊自体が崩壊する際に発生する音が重畳されていると考えられるので、平板の寸法が異なれば衝撃音と衝撃圧力の関係も異なってくると予想される。本研究の目的である衝撃音によって衝撃圧力を推定するためには、平板の大きさによる影響をどのようにセンシングシステムに反映させるのかを検討しておく必要がある。従って、実験において、平板の材質はアクリルで寸法の違

* 広島大学

** ネットワンシステムズ(株)

原稿受理 平成 18 年 2 月 24 日

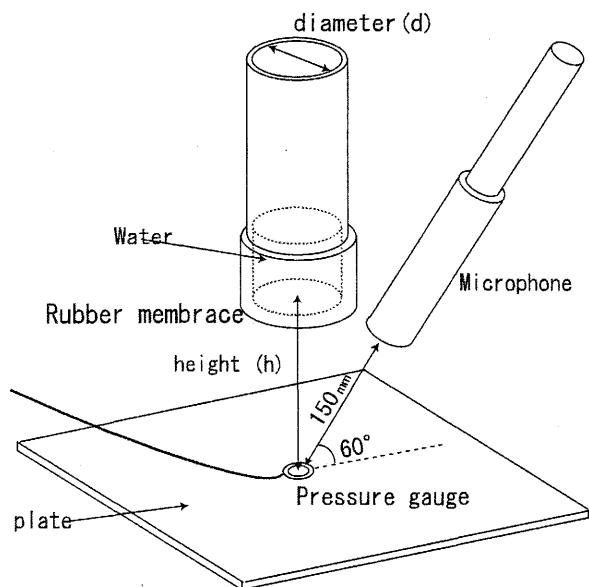


Fig. 1 Test set-up

う 2 種類のもの, Plate L($900^L \times 200^B \times 10^t$ mm), Plate S($300^L \times 200^B \times 3^t$ mm) を使用してその違いについて調査する。落下水量は $m = 50\text{ml}$ で一定とし, 円筒パイプの内径 ($d = 30\text{mm}, 50\text{mm}, 70\text{mm}$), 水塊の落下高さ ($h = 10\text{cm}, 20\text{cm}, 40\text{cm}, 60\text{cm}, 80\text{cm}$) を変化させ, それぞれの影響について検討する。また, 計測時のサンプリングレートは 50kHz として一回の実験で 2 秒間計測する。

3. 解析

3.1 データの抽出

表面圧力と空中音圧は短時間で瞬間的に発生しており, より明確な解析を行うためには, 表面圧力と空中音圧の発生している短い時間に限定し, データを抽出する必要がある。そこで, 本研究では次のような方法を用いて Fig.2 のような解析データの抽出を行う。まず, 水塊の衝突から表面圧力・空中音の発生を一連の現象と考え, この現象の開始から終了までを抽出できるように抽出時間 (Δt) を決定する。さらに, 抽出開始時刻は表面圧力がピークとなった時点から $\Delta t/8$ さかのぼった点とする。水塊衝突による現象の継続時間が全実験を通じて約 0.08 秒であることから抽出時間 (Δt) を 0.08 秒以上とし, 抽出したデータは FFT 解析を行うことができるようにデータ点数を 4096 点とした。

3.2 データの分類

解析を行うに際して, 実験条件の他に次に示す方法で実験データを分類する。

3.2.1 最大音圧発生時刻による分類

実験結果より, 音圧の発生開始時刻は表面の衝撃圧力発生時刻に対して時間的遅れが常に一定ではないということが分かった。

衝撃音の発生時刻が異なるということは, その発生機構に違いがあるためだと考えられる。そのため, この衝撃音の発生時刻の違いが衝撃圧力と衝撃音の関係にどのような影響を与えているかを検討するため, 最大音圧の発生時刻によるデータの分類を行った。

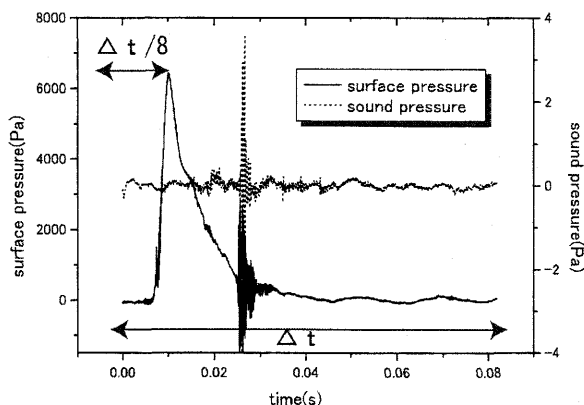


Fig. 2 Sample of analyzed data

すなわち, 抽出開始時間から最大音圧が発生するまでの時間を t' (s) とし, case①($t' = 0.01 \sim 0.02(\text{sec})$), case②($t' = 0.02 \sim 0.04(\text{sec})$), case③($t' = 0.04 \sim 0.06(\text{sec})$), case④($t' = 0.06 \sim 0.08(\text{sec})$) の区分で実験結果を分類した。

3.2.2 水塊形状による分類

平板との衝突時における水塊の形状は多様に変化している。またその形状によって, 水塊の衝突特性に違いがあると考えられる。そこで, デジタルビデオカメラによって側面と下方から撮影した画像を用いて水塊形状及び, 水塊の崩壊機構について分析する。まず, 横からの画像を用いて, 衝突時の水塊形状を確認したところ Photo 1 のように大別され, この結果から Fig.3 のように, 水塊の先端が凸なものを TYPE A, 平滑なものを TYPE B, 凹のものを TYPE C と定義した。なお, この時に形状が水塊とは言い難いものは解析対象から除いた。

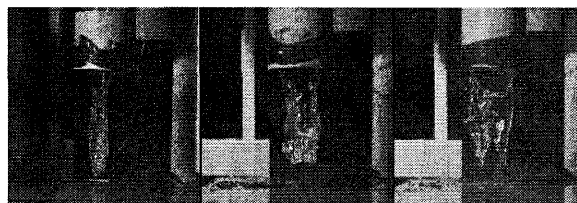


Photo 1 Shape of dropping water at hitting

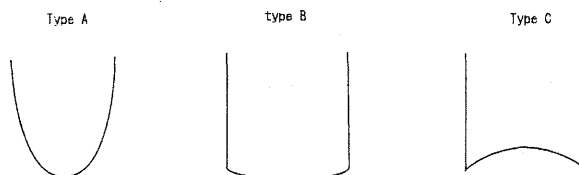


Fig. 3 Classification by shape of dropping water

また, 円筒内径 ($30\text{mm} \sim 70\text{mm}$) に比べ圧力センサーの径が小さい為, 下方から撮影した画像を用いて, 衝突時の水塊に対する圧力センサーの位置を確認するとともに水塊形状を観察する。ここで, ゴム膜の破裂状況によって水塊の落下方向が変化し, 平板衝突時の表面圧力は必ずしも水塊の中央で計測されているわけではなかったため, 圧力センサーと水塊の位置関係を Fig.4 のよ

うに分類して整理した。なお、Fig.4の δ は解析対象から除外している。

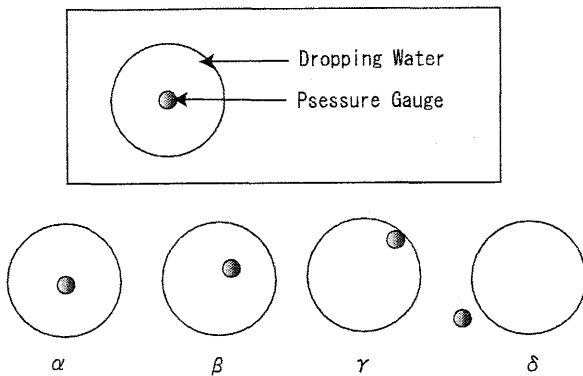


Fig. 4 Classification by dropping position

3.3 解析方法

3.3.1 瞬間値解析

時系列データの瞬間的な評価として、表面圧力と空中音圧の最大値を比較し、衝撃的な力と音に対する相関の評価を行う。すなわち、表面圧力の最大値 P_p (Pa) と空中音圧の絶対値の最大値 P_{sp} (Pa) の音圧レベル値 L_p (dB) を衝撃圧力と衝撃音の瞬間値としてその相関について評価する。音圧レベル (SPL) とは音圧と基準音圧の比を対数表示したものであり、

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{|P_{sp}|}{P_0} \quad (1)$$

と表される。ここで、 P_0 は基準音圧であり、空気が媒質の場合、 $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ である。

3.3.2 周波数解析

水塊の衝突特性の一つである空中音の周波数特性を調べるために、FFT 解析により空中音のパワースペクトルを求め、水塊衝突により発生する衝撃音の特性を明らかにする。その際、窓関数には Hanning Window を使用する。また、本研究ではアクリル平板の各寸法、支持状態で平板を振動させ、平板の振動音と水塊衝突により発生する衝撃音を比較することにより、被衝突物の振動音が衝撃圧力と衝撃音の関係に影響するかを検討した。

4. 結果と考察

Fig.5に最大音圧レベルと衝撃圧力の関係を音圧発生時間で分類した結果を示す。また、Fig.6に各音圧発生時間ごとの最大音圧レベルと衝撃圧力との相関を見るために、最大音圧レベルを衝撃圧力で対数近似した結果を示す。

Fig.5でもわかるように、case①～case④の全てにおいて衝撃音と衝撃圧力の間に正の相関が見られる。

Fig.6からわかるように、case③において僅かに音圧値が小さくなっているが、全体として同様の傾向にあり、衝撃音の発生時刻の違いにより有意な差は見られない。このことから衝撃音と衝撃圧力の間には、衝撃音の水塊の衝突と同時に発生しない場合においても、衝突と同時に衝撃音が発生した場合と同様の関係が存在するといえる。

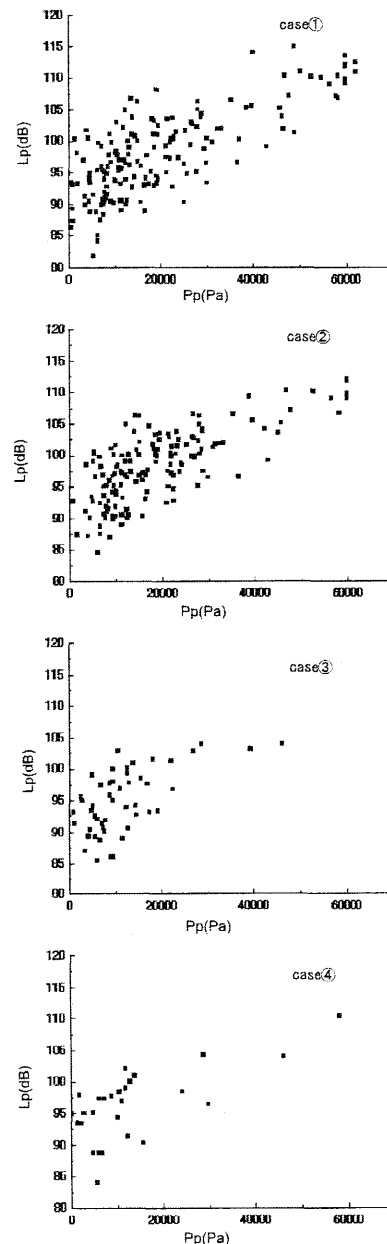


Fig. 5 Measured Sound Pressure Level (SPL) vs. maximum impact pressure

また、水塊とセンサー位置による分類では、Fig.7に示すように、当然のことではあるが水塊がセンサー中央に衝突する α の場合の表面圧力が大きくなる。

なお、落下水形状に対する影響を見るためにシリンダ内径を変化させた実験を、また落下速度の影響を見るために落下高さを変化させた実験を実施したが、実験の再現性精度の問題から、意図した違いが明確に確認できなかった。さらに、水塊形状で分類した結果は、著者らが以前に行った結果²⁾と同様の傾向が得られた。

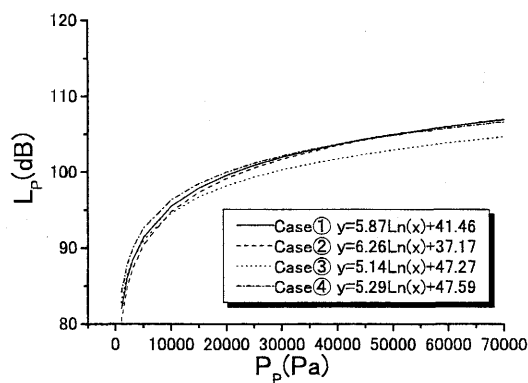


Fig. 6 Correlation between impact pressure and sound

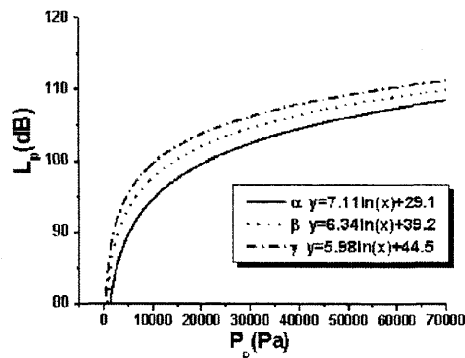


Fig. 7 Correlation between impact pressure and sound

4.1 周波数解析

衝撃音の周波数解析の結果の一例を Fig.8に示す。ここでは典型的な周波数特性のものを抜粋したためスペクトルの大きさに違いがあるのは実験条件が異なるためである。平板の状態に関係なく case①において 4000Hz 以上に卓越した周波数帯が多数確認できた。また, case②～case④においては 2000Hz～4000Hz 付近に卓越したパワースペクトルが多く存在する傾向にあった。この周波数特性の違いは水塊形状分析の項で後述するように、水塊の崩壊機構に関係している。

ここで、平板の振動音を調査するために平板に初期変位を与えて自由振動を行い発生する音を計測し、その周波数解析と水塊落下実験で得られた衝撃音の周波数特性を比較した。一辺支持の Plate L を使用した場合の結果を Fig.9に示す。

平板の振動音は Fig.9の結果から 2000Hz 以下で卓越した周波数帯が存在しているのに対し、水塊の衝突による衝撃音の多くが 3000Hz～10000Hz に卓越した周波数帯を持っている。さらに、水塊落下実験時の 2000Hz 以下のパワースペクトラム値が 3000Hz～10000Hz のそれより大幅に小さくなっている。水塊が平板に衝突する際に発生する音は平板の振動音と水塊自体が崩壊する際に発生する音が重畳されているが、本実験では、水塊量に比べて平板の剛性が大きく、本実験での衝撃音は水塊自体の崩壊によって発生する音が卓越していると考えられる。

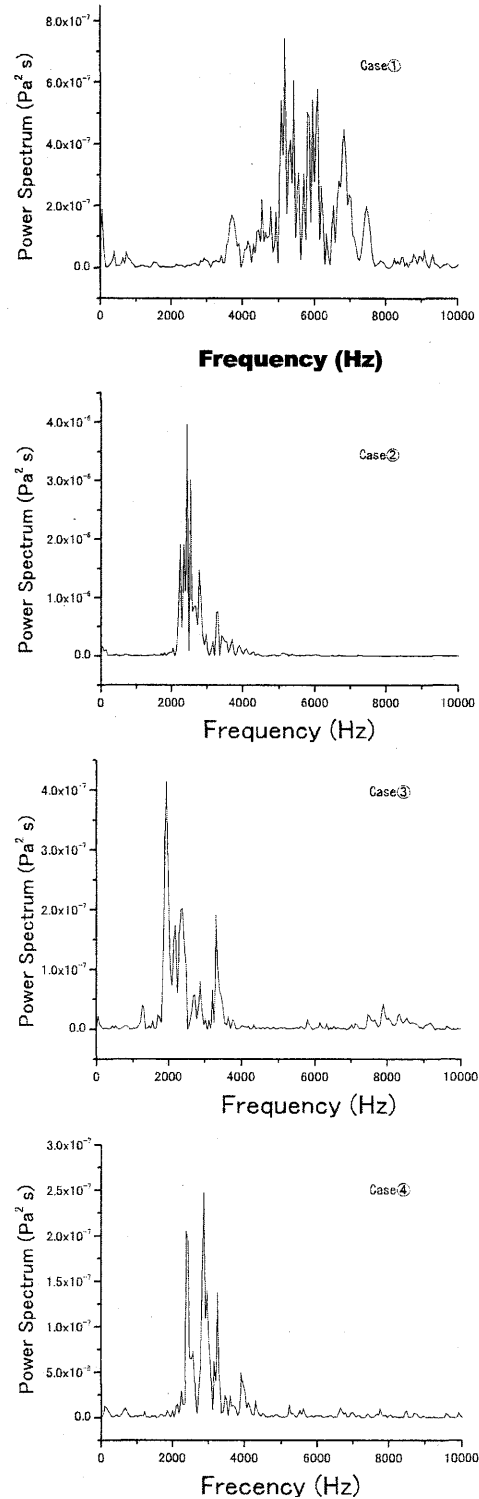


Fig. 8 Typical sound spectra of each case

本研究では、被衝撃平板の寸法・支持条件が衝撃水圧と衝撃音の相関に及ぼす影響を調査するために行ったものであるが、結果として、平板の振動による衝撃音を全衝撃音から除去すると水塊が衝突によって急激に形状が変化することによって発生する衝撃音が得られ、それは Fig.6に示すように平板表面に発生する衝撃圧力の対数値と強い相関があることが分かった。すなわち、水塊

崩壊によって発生する衝撃音の最大値の対数値 (SPL) と平板表面に発生する衝撃圧力の最大値は対数関係で表される。本研究開始の動機は、波浪が構造物に衝突した際に生じる音の強さの程度によって、構造物が危険かどうかを人が感覚的に感じていることを定量化したいということであったが、人の五感が対数的であることを考えるとその感覚を表現する妥当な結果になっていると思われる。従って、水塊衝突時の水塊の種々の条件 (水量、衝突速度、形状等) に対する Fig.6 で表されるような関係が用意できれば、衝突時に水塊が崩壊する際に発生する衝撃音の最大値を計測することにより、構造物に発生している衝撃圧力を概略推定できる可能性をこの結果は示唆しているものとする。

この考えの下に、パイプ径、落下高さ、衝突水塊の形状、衝撃発生位置等をパラメータにして実験を遂行したが、現段階では衝突水塊の形状によって空気を巻き込む量が変化し、最大衝撃音の発生時刻・周波数に違いがでること²⁾、水塊の量が変わっても水塊先端が平板との接地時に衝撃圧力が発生するため、水塊量は最大衝撃音と最大衝撃圧力の関係に影響せず、水塊崩壊による衝撃音の周波数が変化することが分かっている。今後、実験装置を改良し、より精密な検証を行い、最終的には、波浪による衝撃音と衝撃圧力の関係に対する検討を行う必要がある。

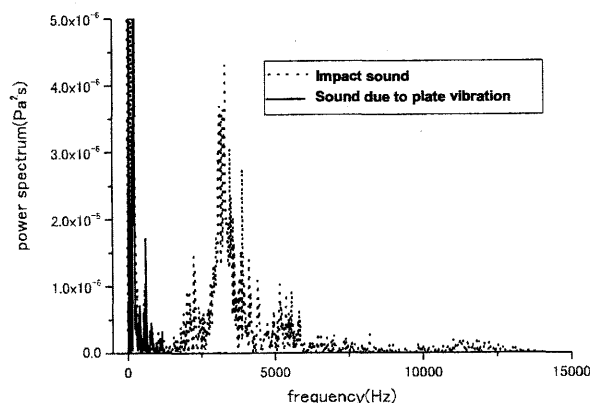


Fig. 9 Effect of sound due to plate vibration

4.2 水塊形状分析

水塊衝突による衝撃音の特性は、衝突時の水塊の崩壊機構によって異なると考えられる。そこで、デジタルビデオカメラ (30frames/s) を用いて撮影した画像を用いて、崩壊形状を分析した。その一例を Photo 2 に示す。Photo 2 は水塊が衝突してから崩壊するまでの 4 フレームを示したものである。この結果、case①の場合、水塊が平板に衝突する際に放射状に飛び散り崩壊して音を発生させていることが分かった。これに対して、case②～case④の場合、水塊下部先端が衝突すると水塊下部が平板上に広がり、水塊上部が落下し崩壊することによって音が発生していることが分かった。この崩壊機構の違いが衝撃音の周波数特性および最大値発生時刻の違いの原因となっていると考えられ、逆の言い方をすれば衝撃音の最大値の発生時刻をモニターすることによって水塊発生機構に対する知見を得られる可能性がある。

5. 結 言

水塊の自由落下によって発生する衝撃圧力と衝撃音の相関関係について検討した。結果は以下の通りである。

1. 水塊が自由落下によって衝突する際、落下水がほぼ一つの塊となって衝突した場合と、落下している間に垂直方向に長く伸びた形状で衝突する場合で衝撃音の発生時刻に違いがあることが分かった。
2. 衝撃音の発生時刻や衝突時の水塊形状などが異なった場合でも、それらの違いに関係なく衝撃音の中の水塊自体の崩壊音と衝撃圧力は同様の相関を示す。

水塊の崩壊機構と衝撃音の周波数特性の間には一定の関連性があると思われる。これらを検討する為、より詳細に水塊衝突時の状況をモニタリングする必要がある。

参 考 文 献

- 1) 伊藤芳和：衝突水塊による音環境の推定と衝撃力に関する研究，広島大学大学院工学研究科修士論文 (2002)
- 2) 肥後靖，山田良，森川真一：衝突水塊による衝撃力と衝撃音に関する研究，西部造船会会報，第 106 号，pp.211-216 (2003)
- 3) 岩井仁志，内田満則：衝突水塊による衝撃力と衝撃音に関する実験的研究，広島大学工学部卒業論文 (2004)
- 4) 渡部靖憲，大塚淳一，佐伯浩：非定常ジェット着水時に発生する気泡の物理特性，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.56-60 (2001)

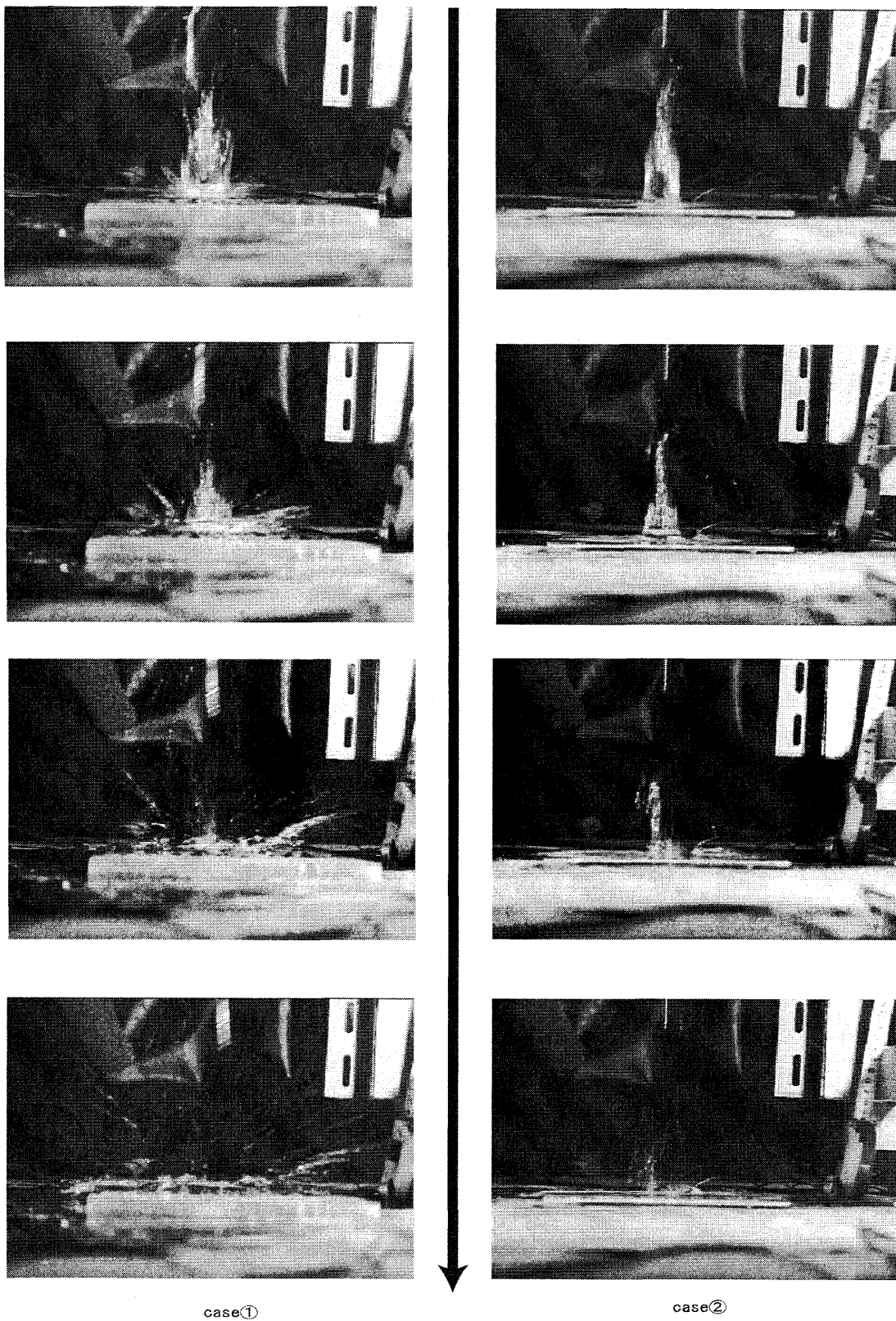


Photo 2 Collapsing shape of dropping water