



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水素気泡による水流観測に関する一寄与
Author(s)	坂本, 弘志; Sakamoto, Hiroshi; 有江, 幹男 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 49, 35-44
Issue Date	1968-09-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/40895">https://hdl.handle.net/2115/40895</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_35-44.pdf



# 水素気泡による水流観測に関する一寄与

坂本 弘 志\*

有江 幹 男\*\*

(昭和 43 年 4 月 30 日 受理)

## A Contribution to the Study of Water Flow with Hydrogen Bubbles

Hiroshi SAKAMOTO

Mikio ARIE

(Received April 30, 1968)

### Abstract

The present paper describes a contribution concerning the technique of flow visualization by the use of hydrogen bubbles, and its usefulness in fluid mechanics was illustrated. Some experimental data for the construction of the electrical circuits to produce a desirable amount of hydrogen bubbles were also given.

### 目 次

1. 緒 論 .....	35
2. 水素気泡発生装置 .....	36
2-1. 電気回路作製に対する指針と試作回路 .....	36
2-2. 水素気泡発生用金属 .....	38
3. 流れに対する水素気泡の追従性に関する考察 .....	38
3-1. 水素気泡の追従性に関する理論的考察 .....	38
3-2. 水素気泡の追従性に関する実験的考察 .....	40
3-2-1. 水流観測用実験装置と実験方法 .....	40
3-2-2. 流線の観測 .....	41
3-2-3. Kármán 渦列の観測 .....	42
4. 結 論 .....	43

### 1. 緒 論

流体工学において流れの模様を直接目視することは、流れの現象を解明する上に極めて有効な手段である。このような流体工学の基礎的な研究のために以前から数多くの流れの可視化

\* 北見工業大学機械工学科

\*\* 流体工学第一講座

の方法が発表され利用されてきている。例えば流体が水の場合にはアルミニウム粉末、色素水等を流れの中に混入し、また空気を使用する場合には毛糸、絹糸、煙などを混入するようなことは従来からよく利用されている方法である。

最近発表された水素気泡を利用する方法は<sup>1)~3)</sup>、使用流体の水を直接電気分解し、その際発生する水素気泡をトレーサとして用いるもので、適当な電流を与えることにより、この際発生する水素気泡を十分に小さくすることができ、流線のよき追跡物となって明確な流線が得られることはもとより、使用電極はきわめて細いので流れを乱すことが比較的少ないなどの利点を有している。水素気泡発生用プローブ線の径の大小およびプローブ線の多少により、電気回路を構成するコンデンサー、抵抗器、整流素子等の容量は異なり、実験目的を達成するために必要な水素気泡密度を得るための最適の容量を有する回路を作成することは実験上の立場はもとより、経済的な面からも大切なことである。しかし、現在まで発表されている報告においては明確な回路作成の指針を与えているものが少なく、また水素気泡が非正常な流れに対し追従性を有することを明らかにした観測結果の例もない。

本研究は水素気泡発生に必要な供給電流等の事項を検討し、回路の作製に必要な基礎的データを与えると共に、その作製に関する一指針を求め、その有用性を示す目的で水素気泡の追従性に関し、流速に余弦攪乱を与えた場合に生ずる単独な水素気泡の挙動に就いて理論的考察をおこない、さらに二、三の流れに対する実験的考察を加えて、水素気泡は有効なトレーサであることを明らかにしたものである。

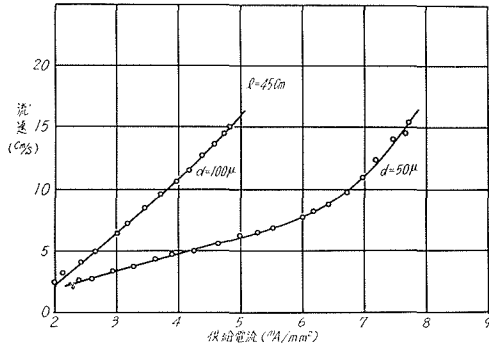
## 2. 水素気泡発生装置

### 2-1. 電気回路作製に対する指針と試作回路

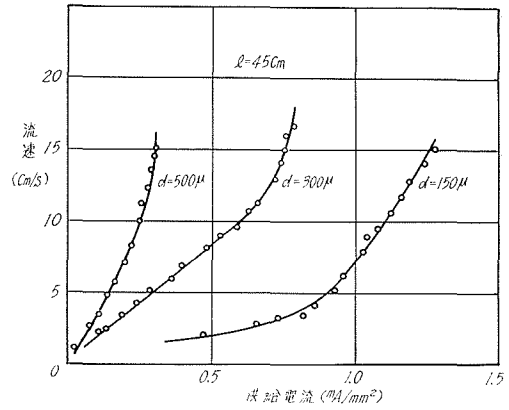
実験の目的に従い、プローブ線の本数の多少は水素気泡発生用電気回路に必要なコンデンサー、抵抗器、整流素子等の容量は当然異なるべきものである。それ故に水素気泡を用いて流れの観測を行なおうとするならば、観測に必要な気泡密度を発生させ、かつ最小の容量を有する経済的な電気回路を作成しなければならない。

電気回路の作成にあたって、まず第一に流れの観測に必要なプローブ線の本数と線径とを定めることにより、水素気泡が発生するプローブ線の全表面積が計算され、その結果観測に必要な水素気泡を発生させるための供給電流の値が第1図～第4図を用いることによって定めることができる。

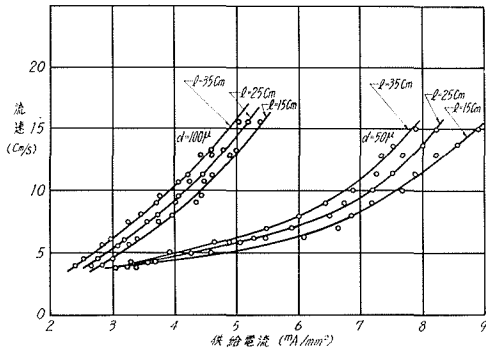
プローブ線の表面における電流密度が過大になると、水素気泡の大きさが過大となってこれに作用する浮力のために流線に対する追従性が悪くなる。結局、流体の速度に較べ水素気泡の上昇速度が小さく観測断面内ではこれを無視しうるような水素気泡を発生させる供給電流の値を見込む必要がある。第1～4図は平均流速を2～15 cm/secの範囲で種々の値に変化させ、 $d=500\ \mu$ ,  $300\ \mu$ ,  $150\ \mu$ ,  $100\ \mu$ ,  $50\ \mu$ なる5種類の異なった直径をもつプローブ線



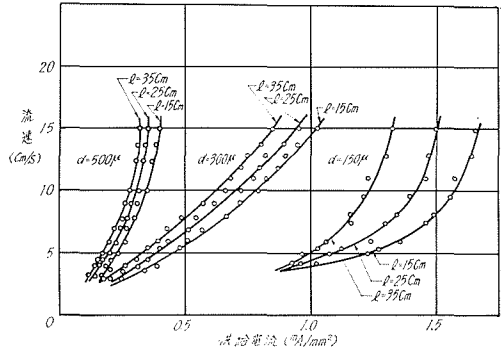
第 1 図



第 2 図



第 3 図



第 4 図

を用い、水平な流れの方向に 45 cm, 35 cm, 25 cm, 15 cm なる 4 種類の距離の間で水素気泡が上昇しないような電流の供給量に対する極限值をプローブの単位表面積 (mm<sup>2</sup>) に対しアンペアで読みとった結果である。これらの図に示したよりも小さな供給電流で水の電気分解を行なうと水素気泡の上昇は考慮する必要がなく、観測もまた比較的正確に行なわれるといえる。

つぎに観測用水路に設置する陰極と陽極との間の電気抵抗値をその実験装置に対して測定する。このようにして供給電流と電気抵抗の値をそれぞれ適当に定めると、必要な電圧の値を計算することができて水素気泡発生用電気回路を設計することができる。第 5 図に示した試作回路は、電圧 0~380 Volt, 電極間の抵抗は水を満した状態で 1 kΩ, 電流 0~380 mA を目標として計画したものである。この試作装置はスライダック, シリコン整流素子, コンデンサー等で構成され、入力 200 Volt の交流電源を使用し、出力は前記のように 0~380 Volt まで変化させることができるものである。もし装置の規模によって電圧, 電流および電極間の抵抗に対し他の値を与えた方が適当と認められるときには、これらの値に適合するように前記のような部品の容量を定めると良い。この回路で注意すべきことはパルス電源回路をこのメイン回路に組み入れ、電流を遮断したとき、コンデンサーの中に電気が蓄積されることを防ぐために大地



$$\left(\sigma V + \frac{1}{\varepsilon} \rho V\right) \frac{du}{dt} = 3\pi \mu d (U_0 \cos \omega t - u) \quad (1)$$

$\sigma$ : 水素の密度,                       $\rho$ : 水の密度  
 $V$ : 水素気泡の体積,                 $\mu$ : 粘性係数  
 $d$ : 水素気泡の径,  
 $\varepsilon$ : 水素気泡の移動とともに動く流体の体積を表わす係数,

となる。

この運動方程式を簡単にするため

$$\tau = \frac{3\pi \mu d}{\sigma V + 1/\varepsilon \rho V}$$

とおくと (1) 式は

$$\frac{du}{dt} + \tau u = \tau U_0 \cos \omega t \quad (2)$$

となる。この式を解くと

$$u = U_0 \left(1 - \frac{\tau^2}{\tau^2 + \omega^2}\right) e^{-\tau t} + \frac{\tau U_0}{\sqrt{\tau^2 + \omega^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

$$\text{ただし } \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega}{\tau}$$

となる。

この式において因数  $e^{-\tau t}$  を含む第一項は時間  $t$  の増加と共に急激に減衰するから、水素気泡の速度  $u$  は第二項のみに基因することになる。この項は流体の速度と同じ振動数  $\omega$  を有するが、振幅と位相が異なる余弦関数で表わされる。

$$u = \frac{\tau U_0}{\sqrt{\tau^2 + \omega^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

流体の振動の振幅と水素気泡の振動の振幅との比は

$$\frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + \omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\tau)^2}}$$

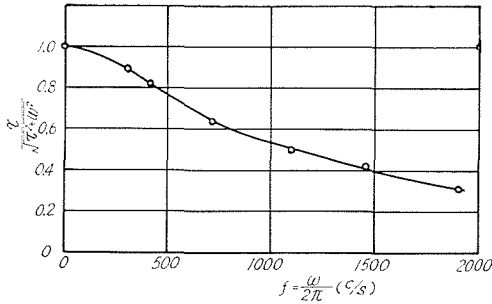
となる。

振動数  $\omega$  の変化による振幅比を求めたものが第6図である。振動数  $\omega$  が  $\tau$  に比べて小さいときは水素気泡の速度の振幅は流体の振幅  $U_0$  に近づき、振動数  $\omega$  の増加にしたがい水素気泡と流体の速度の振幅が異なってくるのがわかる。

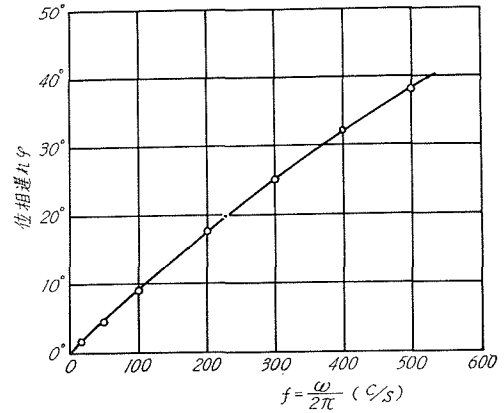
一方流体の速度変化に対する水素気泡の位相遅れは

$$\tan \varphi = \frac{\omega}{\tau} = \frac{2\pi f}{\tau}$$

となる。



第 6 図



第 7 図

第 7 図は振動数  $\omega$  を変化させ、流体の速度変化に対する水素気泡の位相の遅れを求めたものであって、振動数  $\omega$  が大きくなるにしたがい、位相遅れ  $\phi$  は大きくなるのがわかる。しかし、水の場合には実際上平均流速が高い周波数で変化することは少ないので比較的緩慢な流速変動に対しては水素気泡は十分に追従性を有することは明らかである。

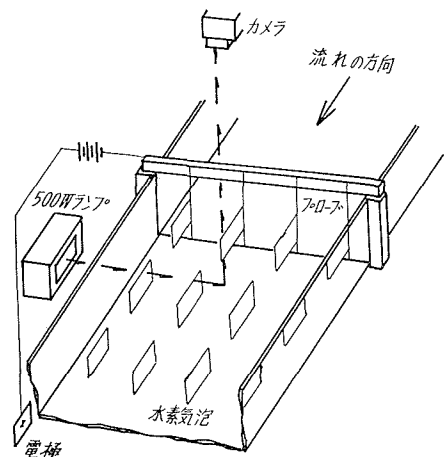
### 3-2. 水素気泡の追従性に関する実験的考察

#### 3-2-1. 水流観測用実験装置と実験方法

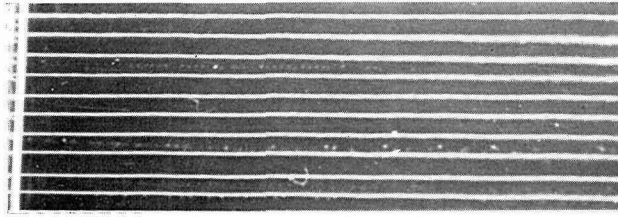
水素気泡を実際の流れの中で発生させ、流れの観測を行なうために使用した水路は開放型水路で両側面は透明なガラスで構成され、上流と下流に二つの水槽を有し、斜流ポンプを用いて回流できるようにしてある。なお上流側の水槽は流れをできるだけ層流にするため、整流板、整流格子、絞り装置等の種々の工夫がなされている。

この水路の中に、実験用水流の完全な二次元化、観測物体およびプローブの設置状況等を考慮して別の小水路を設置した。この小水路は全長 1650 mm、幅 300 mm、高さ 100 mm であって底は黒の不透明のプラスチック、両側は透明のプラスチックでそれぞれ構成されている。小水路入口端より 520 mm のところに第 8 図に示してある取りはずしが可能なプローブを設置した。このプローブは木枠と塩化ビニール板で構成され、プローブ線を等間隔に緊張させて張るために種々の工夫がなされている。また観測用物体 (円筒、翼型、平板) は流れに対し垂直に置かれ自由に移動できるようにしてある。

発生した水素気泡は光源なしでは、ほとんど



第 8 図



第 9 図

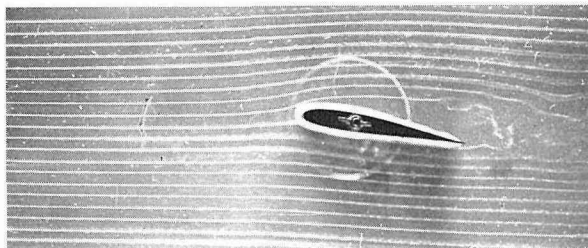
観測できず、光源をあてることによって、いわゆるチンダル効果により微細な水素気泡もかなり明瞭に観測できる。写真撮影のための光源と対象物の間の満足すべき状態は第 8 図に示してあるようにスリット状の光源をカメラのファインダーレンズの光軸に関して直角に入射させることによって得られる。また黒色の背景が必要であり、同時に照明光線以外の入射光線は最小にすべきである。このため本実験では水路を黒い紙で覆い、写真撮影のときは周囲の光源をすべて取り除くようにした。

実験はできるだけ層流の状態で行なうため、ポンプ運転開始後、数分間放置して流れを安定させ、第 9 図に示したような平行流を得た後に観測用物体を設置し、スライダックによって供給電流を変化させ、流速と供給電流が適合した最良の水素気泡発生状態を作り出して写真観測をおこなった。

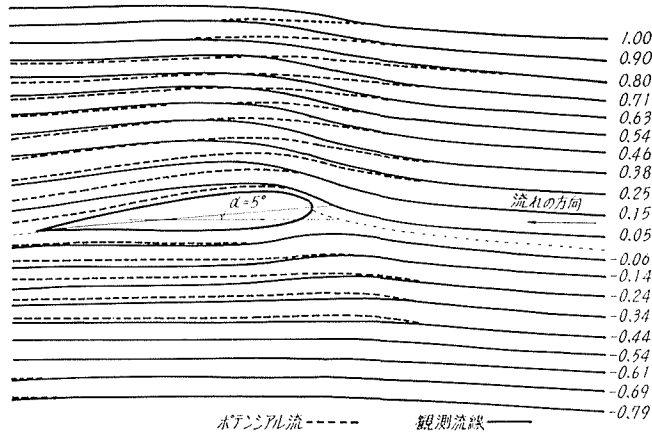
### 3-2-2. 流線の観測

円筒, Joukowski 翼型等の周辺の流れを観測し、複素ポテンシャル論から得られた理想流線とそれぞれ比較した。一般に翼型の周りの観測流線は理想流線と比較的一致するといわれている。

本実験では Joukowski 翼型を用いて、迎角 ( $\alpha$ ) を  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  に変化させて観測を行なった。今その一例を第 10 図に示してある。第 10 図は迎角  $5^\circ$  のときの Joukowski 翼型の周りの流れ (流速  $6.8 \text{ m/sec}$ ,  $R_e=3910$ ) の状態をシャッタースピード  $1/100$ , 絞り  $2.8$  で観測撮影したものであって、物体の前方および後方での流れの状態を比較的よくとらえている。また第 11 図はこの観測流線と理想流線とを比較したものであるが、翼の前方はもちろんのこと後方でも比較的よく一致している。なおこの図に点線で示してある理想流線は次に示すような複素ポテンシャル論から得たものである。第 12 図において、平面  $\zeta = \xi + i\eta$  から原点を  $ce^{i\theta}$  に移して座標



第 10 図



第 11 図

軸を  $\alpha$  だけ回転した新しい平面を  $\zeta' = \xi' + i\eta'$  平面とすれば  $\zeta$  平面と  $\zeta'$  平面の関係は

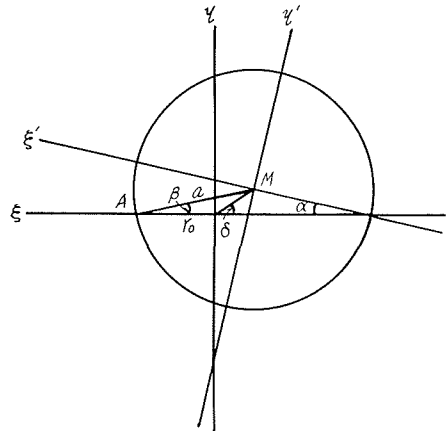
$$\zeta' = (\zeta - ce^{i\theta}) e^{-i\alpha} \quad (5)$$

であり、 $\zeta'$  平面における循環をともなった円筒の周りの流れを表わす複素ポテンシャルは

$$W = U \left( \zeta' + \frac{a^2}{\zeta'} \right) + i \frac{k}{2\pi} \log \zeta' \quad (6)$$

である。したがって (6) 式に (5) 式を代入し、さらに

$$z = \zeta + \frac{r_0^2}{\zeta} \quad (7)$$



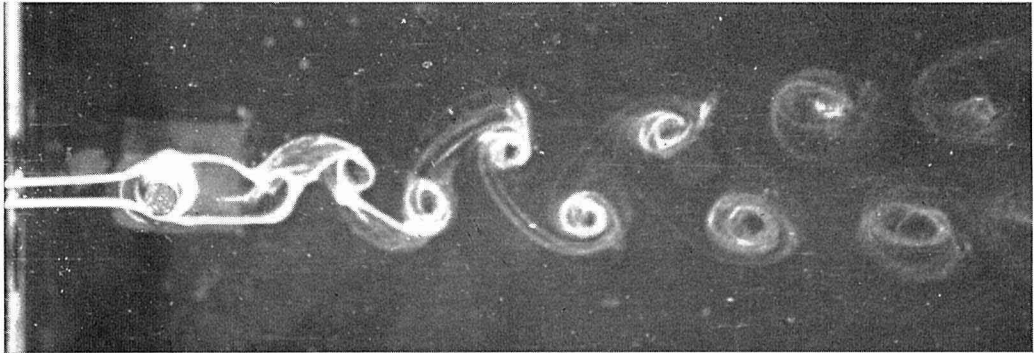
第 12 図

なる写像によって、 $z = x + iy$  平面にもどすと、求める翼型の周りの流線になる。

### 3-2-3. Kármán 渦列の観測

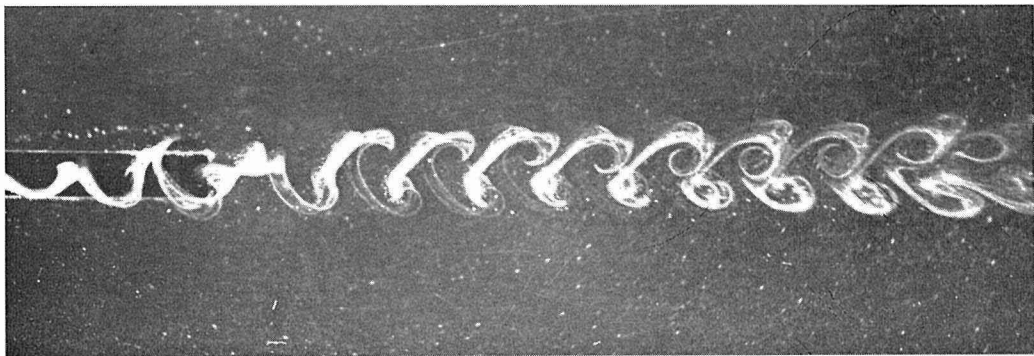
非定常である振動数の小さな渦の測定が、水素気泡を用いて可能であるか否かを調べるため、よく知られた Kármán 渦列を円筒、平板、Joukowski 翼型の後流に発生させて撮影し、その結果を複素ポテンシャルから得られた理想流線と比較した。渦列の間隔  $h$  と各渦列中における渦の間隔  $\ell$  との比  $h/\ell$  を求め、Kármán が求めた理論値  $h/\ell = 0.281$  と比較した。また Strouhal number  $S = N \cdot D / U$  を求め、他の実験者の測定値と比較した。

第 13 図は円筒 (直径 7 mm) の後流に発生する Kármán 渦列 (流速 5 cm/sec,  $R_e$  数 200) を観測撮影したものである。渦列は明瞭に観測され、かつまた Hooker<sup>4)</sup> 等が理論と実験とによって求めた渦列の間隔が下流に行くにしたがって、しだいに広がっていく現象もよく観察されている。 $h/\ell$  は 0.296 で理論値 0.281 とよく対応しており、Strouhal number  $S$  は 0.209 で Blenk-Fucks-Liebers<sup>5)</sup> の測定値 0.202 とよく一致している。



第 13 図

第 14 図は平板の後流に発生する Kármán 渦列 (流速 5 cm/sec,  $R_e$  数 64) を観測撮影したものである。 $h/\ell$  は 0.421 で理論値とは異なるが, Strouhal number  $S$  は 0.152 で Tyler<sup>5)</sup> の測定値 0.158 とよく一致している。



第 14 図

以上の観測結果が示すように水素気泡は非定常であっても振動数の比較的小さい流れの場合には, 流れを可視化するトレーサとして使用できることが明らかとなった。

#### 4. 結 論

最近流れの観測の一手段として水素気泡を利用する方法が, 発表されてきている。本研究もまたこの水素気泡を用いる手法に関して行なったもので, 流れの観測に必要な水素気泡密度を得るための電気回路作製に対して基礎的なデータを与えると共に, その作製の一指針を求めたもので, この結果を用い今まで発表されたものより, 簡単でかつ安価な電気回路およびパルス電源回路を試作してこの有用性を示してある。水の電気分解に関する機構について種々討議いただいた理学第二研究室の佐藤教男助教授に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 浅沼 強・武田定彦：日本機械学会論文集, 31 (昭 40-2), 225, p. 223-232.
- 2) Schraub, F. A., Kline, S. J.: Trans. ASME. Ser. D, 64 (1965-11), 20.
- 3) 有江幹男・坂本弘志：日本機械学会創立 70 周年記念北海道地区講演会論文集, (昭 42-8), No. 174, p. 25-28.
- 4) Hooker, S. G.: Proc. Roy. Soc. A, (1936) 154, 64-87.
- 5) 岡本哲史：応用流体力学, (昭 41-11), 誠文堂新光社.