

# 表面張力を利用したコンパクト気液分離器の開発 第1報 気液分離機構の基礎検討

## Development of Compact Gas-Liquid Separator Using Surface Tension

○ 機正 鹿園 直毅 (東大工)                      機正 向笠 雄介 (政策投資銀)  
機学 東 隆平 (東大院)                      冷・機正 岩田 博 (日冷工業)  
冷正 度会 和孝 (日冷工業)

○ Naoki SHIKAZONO\*, Yusuke MUKASA\*\*, Ryuhei AZUMA\*, Hiroshi IWATA\*\*\* and Kazutaka WATARAI\*\*\*

\*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

\*\*Development Bank of Japan, 1-9-1 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo

\*\*\*Nihirei Industries Co. Ltd., 1570 Mayumi, Ohhira-machi, Tochigi-ken

In the present study, a novel micro gas-liquid separator using surface tension is proposed and investigated by water-air experiment. The liquid flow is confined inside the micro groove and the gas bubbles are forced out from the grooves because of the minimization effect of excess gas-liquid interface free energy. Separation characteristics of the flat plate and cylindrical separators are investigated. Perfect separation is obtained by satisfying flooding, gravitational and entrainment limits.

**Key Words:** Gas-Liquid Separator, Surface Tension, Heat Pump, Micro groove

### 1. 緒 言

民生部門の省エネルギーを達成する上でヒートポンプへの期待が高まっている。しかしながら、冷凍サイクルを構成する圧縮機、熱交換器、モータ、ファンといった要素機器の高効率化技術は既に極めて高いレベルにあり、その性能向上は限界に近い。更なる省エネルギー化を図るために、ガスインジェクションサイクル、エジェクタサイクル等の採用が増えてきているが、これらの高効率サイクルを広く普及させるためには、追加コストの削減が必須である。気液分離器もその一つであり、大幅な小型、低コスト化が求められている。現在用いられている気液分離器は、重力、遠心力などの体積力を利用したタンク式が主流となっているが、タンク式は配管に対して相応の容積や断面積が必要であり、また設置方向に制限がある等の課題がある。

以上の状況を鑑み、本研究では従来のタンク式気液分離器のように重力や遠心力などの体積力を用いるのではなく、表面張力を用いた小型気液分離器を提案し、その基礎的特性を実験により評価する。既報<sup>(1)</sup>にて、平板型気液分離器による原理確認実験を行い、表面張力による気液分離が可能であることを示した。本報では、設置方向の影響、ならびに円筒型気液分離器の特性を評価したので、報告する。

### 2. 気液分離の原理

本研究で対象とする表面張力を利用した気液分離器の基本構成を図1に示す。本気液分離器は片面が溝付面、他方の面が急拡大する構造となっており、拡大部において気液界面の表面自由エネルギーを最小化させるポテンシャルにより、液相のみを溝内に保持し、気相を溝から排出する。即ち、溝内メニスカ

スに働く表面張力の作用によって気液分離を行う。

図2に既報<sup>(1)</sup>で評価した平板型気液分離器の横断面図を示す。溝付面、平滑面、気液分離板から構成され、縮流部では溝付面と平滑面が接触し、拡大部では平滑面側がバックステップ上に溝付面から拡大する構造となっている。図3に今回新たに評価した円筒型気液分離器の断面図を示す。円筒型の場合は、急拡大部の後流において対向面も溝付面となり、後述するように平板型で課題となる対向面側に溢れる液相の影響を排除できる。

### 3. 設計指針

以下、気液分離器として機能するために要求される条件について記す。本研究では、①拡大部において液相が溝から溢れないための液溢れ限界、②表面張力が重力に打ち勝って液相を溝内に保持するための重力限界、③気相剪断力によって液相がエントレインされる飛散限界の三つを考慮する。

#### 3.1 液溢れ限界

幾何学的気相断面積比  $R_G(h) = S_G / (S_G + S_L)$  を、拡大空間での気相断面積  $S_G$  と、溝に内接する円弧と溝で囲まれる液相最大断面積  $S_L$  とで定義する。図4に平板型の場合を例に示すが、幾何学的気相断面積比  $R_G$  は、拡大空間高さ  $h$  の関数である。溝から液相が溢れないためには、式(1)に示すように拡大部断面において幾何学的気相断面積比  $R_G$  がポイド率  $\alpha$  (実際の気液断面積比) より小さい必要がある。本研究では、Smith<sup>(2)</sup>の式(2)を用いてポイド率を与え、このポイド率が幾何学的気相断面積比よりも大きくなるように拡大空間高さ  $h$  を調整し、実験を行った。

$$R_G = \frac{S_G}{S_G + S_L} < \alpha \quad (1)$$

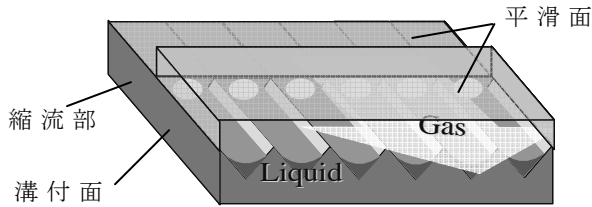


Fig. 1 Schematic view of the micro gas-liquid separator

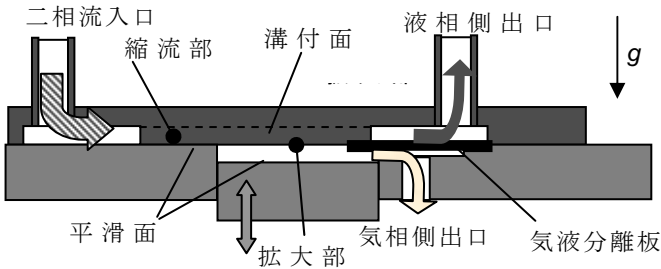


Fig. 2 Cross section of plate type gas-liquid separator

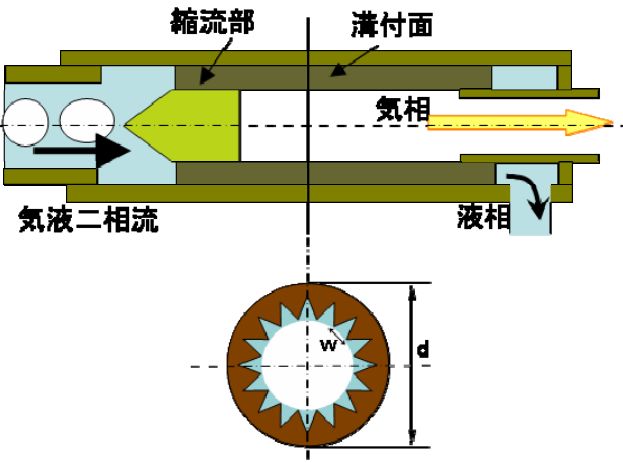


Fig. 3 Cross section of cylindrical type gas-liquid separator

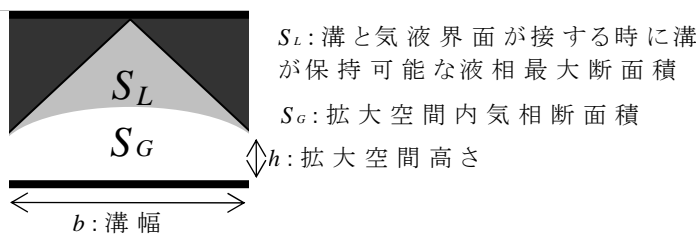


Fig. 4 Cross section of gas-liquid separator expansion region

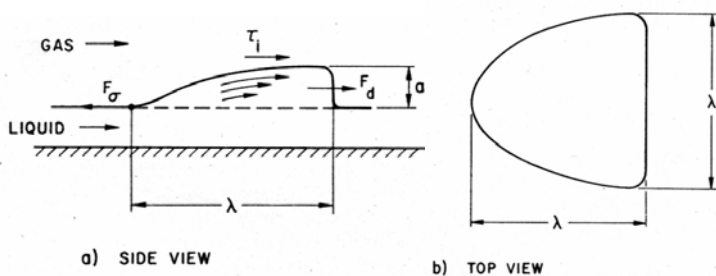


Fig. 5 Droplet entrainment model<sup>(3)</sup>

Table 1 Bond number range

	平板型		円筒型	
溝幅 $b$	1mm	4mm	1.6mm	2.5mm
$Bo$	0.136	2.171	0.347	0.848

$$\alpha = \left[ 1 + \frac{\rho_G}{\rho_L} 0.4 \left( \frac{1}{x} - 1 \right) + \frac{\rho_G}{\rho_L} 0.6 \left( \frac{1}{x} - 1 \right) \left\{ \frac{\rho_G + 0.4 \left( \frac{1}{x} - 1 \right)}{\rho_L + 0.4 \left( \frac{1}{x} - 1 \right)} \right\}^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (2)$$

### 3.2 重力限界

本気液分離機構を支配する力学因子として、表面張力、重力、慣性力、粘性力が挙げられる。その中で、表面張力が重力に打ち勝って液相を溝内に保持する機能を表すパラメータとしてボンド数を与える。

$$Bo = \frac{(\rho_L - \rho_G)gb^2}{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $b$  は溝幅である。表 1 に本実験におけるボンド数の値を示す。

### 3.3 飛散限界

並行液膜流において、液相が気相の剪断力により液滴となって飛散する限界が Ishii and Grolmes<sup>(3)</sup>により報告されている。図 5 に示すような界面の波に働く抗力  $F_d$  が表面張力  $F_\sigma$  を上回った場合に液滴が発生するとし、以下の液滴発生判定式を提案している。

$$\frac{\mu_L V_G}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} < 0.0734 Re_L^{-1/3} \quad (4)$$

$$Re_L = \frac{4G_L}{L_w \mu_L} \quad (5)$$

ここで、式(4)左辺は無次元ガス速度、式(5)は液膜レイノルズ数であり、 $L_w$  は濡れぶち長さである。

## 4. 実験方法

図 6 に実験装置を示す。空気と水をそれぞれマスフローコントローラで流量調節し、混合させることで入口流量と乾き度を変化させた。重力の影響を評価するために、気液分離器の設置を水平方向、重力方向の 2 ケースとした。平板型の水平設置は、図 2 のように液相を重力方向上向きに分離した。

溝幅は、表 1 に示すように平板型の場合は  $b=1 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm}$ 、円筒型の場合は  $b=1.6 \text{ mm}$ 、 $2.5 \text{ mm}$  とした。なお、溝付面は水に対する接触角が 15 度以下となるように、表面をサーファロート処理液(ノンブラ樹脂系)で浸漬後、電気炉で乾燥させ親水化処理を施した。

データの整理法を図 7 に示す。横軸は入口質量流量に対する液相側出口の質量流量比  $w_3/w_1$ 、縦軸は入口乾き度に対する溝側出口側乾き度の比  $\chi_3/\chi_1$  である。式(6)は、図 7 線 A で示される液相側出口から液相のみが流出する条件、式(7)は、液相側出口で液相のみ、気相側出口で気相のみ流れる完全分離条件(図

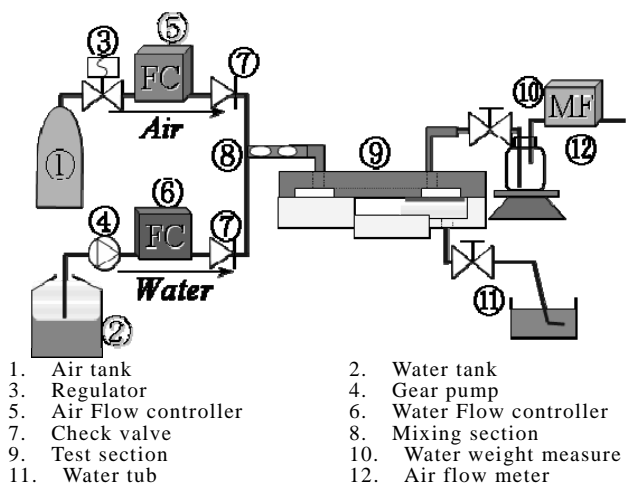


Fig. 6 Experimental setup

7の点B), 式(8)は, 気相側出口で気相のみ流出する条件(図7の線C)であり, 式(6)~(8)を連ねた線を完全分離曲線と定義する. 即ち, 液相側出口流量  $w_3/w_1$  を0から1まで変化させた際に, この完全分離曲線を辿ることが, 完全分離の条件である. 完全分離曲線は, 入口乾き度  $\chi_1$  の関数となる.

$$\chi_3/\chi_1 = 0 \quad (0 < w_3/w_1 < 1 - \chi_1) \quad (6)$$

$$\chi_3/\chi_1 = 0 \quad (w_3/w_1 = 1 - \chi_1) \quad (7)$$

$$\frac{\chi_3}{\chi_1} = \frac{1}{\chi_1} + \frac{w_1}{w_3} \left(1 - \frac{1}{\chi_1}\right) \quad \left(1 - \chi_1 < \frac{w_3}{w_1} < 1\right) \quad (8)$$

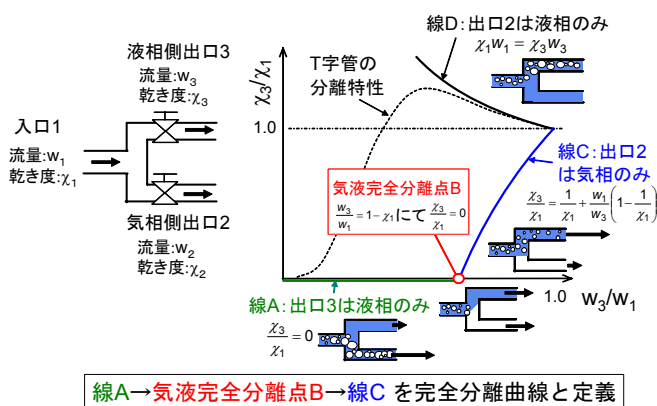


Fig. 7 Gas-liquid separation line

## 5. 実験結果

図8から図9に, 溝幅  $b=1, 4$  mm, 水流量  $G_l=20$  ml/min における平板型気液分離器の結果を示す. 白抜き記号の水平設置の場合に比べ, 垂直設置の方が気液分離性能は良い. 垂直設置では, 溝幅  $b=4$  mm,  $\chi_1=0.7$  の場合を除き完全分離が実現できている. また, 水平設置で入口乾き度が小さい場合に完全気液分離が妨げられるのは, 液相が拡大部において溝から溢れ, 対向する平滑面側に流出してしまうためである.

図10から図13に, 円筒型気液分離器の結果を示す. 円筒型の場合, 乾き度  $\chi_1=0.7$  で完全気液分離が実現されていないが, それ以外の条件においては, 設置方向によらず良好な気液分離特性が得られている. 円筒型では,

平板型において観察された低乾き度での液溢れは発生しなかった.

## 6. 考察

図14には, 平板型水平設置の場合において拡大空間高さを  $h=3, 5$  mmとした際の気液分離特性を示す. 拡大空間高さ  $h=3$  mmの場合は式(1)の液溢れ限界の範囲内であり ( $R_G < \alpha$ ),  $h=5$  mmの場合は超過する ( $R_G > \alpha$ ). 図から明らかな様に, 液溢れ条件を満足することが気液分離の必要条件である.

また, 図8~図13より, 特に垂直設置の場合にボンド数の影響は小さい.  $Bo < 1$  である円筒型において設置方向の影響が小さいことから,  $Bo < 1$  が溝幅設計の目安になると言える.

図15に, 全ての実験結果において, 気液完全分離点(図7中の点B)での気液分離性能を示す. 図15中の記号は, 気液完全分離点において, 出口3の乾き度  $\chi_3/\chi_1$  がほぼゼロの場合(●),  $0 < \chi_3/\chi_1 \leq 0.1$  の場合(○),  $0.1 < \chi_3/\chi_1 \leq 0.3$  の場合(△), それ以上の場合(×)であることを示す. 完全気液分離の成否とIshiiの式(4)とは定性的に傾向が一致している. 液滴発生部位は特定できていないものの, 気相剪断力と表面張力とのバランスにより気液分離特性が決定されているものと考えられる.

以上, 適切な条件範囲内であれば表面張力によって完全な気液分離が可能であることが確認できた. 今後は, より幅広い設計条件での実験を行うとともに, 可視化等による現象把握に基づくモデル化を行い, 完全気液分離の判別法を構築する.

## 7. 結言

溝内に働く表面張力を用いた小型気液分離器を実験により評価し, 以下の結論を得た.

- 円筒型気液分離器は, 高乾き度の場合を除き設置方向によらず良好な気液分離特性を示す.
- 液溢れ限界を超えると完全気液分離が実現できないことを実験的に確認した.
- 円筒型では, 溝幅を  $Bo < 1$  となるように選定すれば設置方向の影響は小さい.
- Ishiiの式による液滴飛散限界と, 本気液分離器にて完全気液分離が実現さえる限界は定性的に一致した.

## 謝辞

本研究は, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の平成17年度産業技術研究助成事業の援助を受けた. 記して謝意を表す.

## 参考文献

- (1) 鹿園, 向笠, 岩田, 表面張力を利用したマイクロ気液分離機構の評価, 日本機械学会2005年度年次大会講演論文集, Vol. 3, pp.243-244, 2005.
- (2) Smith, S. L., 1970, "Void fraction in two-phase flow: A correlation based upon an equal velocity head model," Heat and Fluid Flow, 1, 1, p. 22.
- (3) Ishii, M and Grolmes, M. A., 1975, "Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two-Phase Concurrent Film Flow," AIChE J., 21, 2, pp. 308-318.

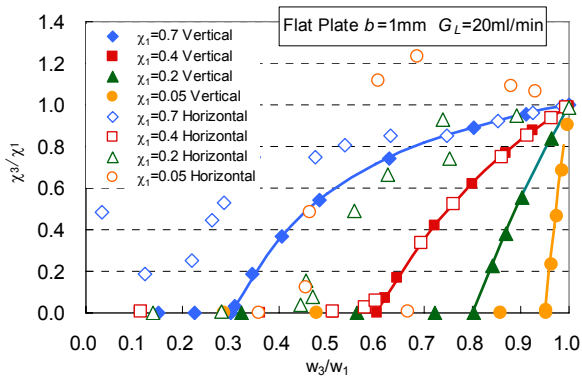


Fig. 8 Separation performance of gas-liquid separator (Flat Plate,  $b=1$  mm,  $G_L=20$  ml/min)

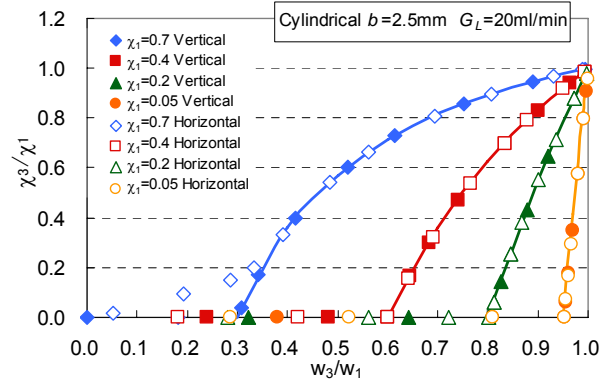


Fig. 12 Separation performance of gas-liquid separator (Cylindrical,  $b=2.5$  mm,  $G_L=20$  ml/min)

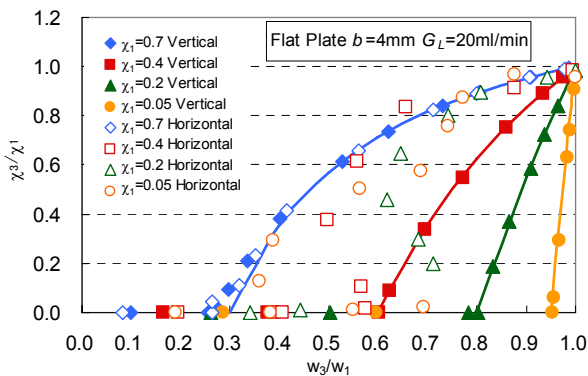


Fig. 9 Separation performance of gas-liquid separator (Flat Plate,  $b=4$  mm,  $G_L=20$  ml/min)

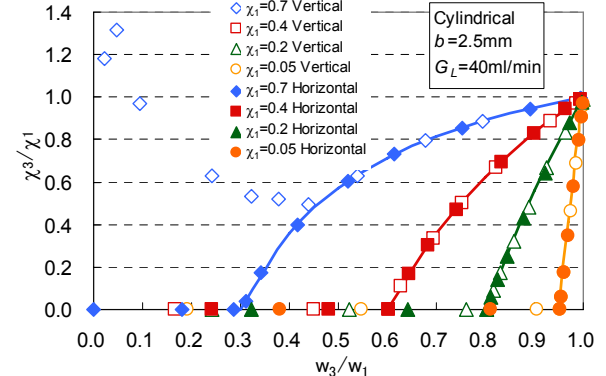


Fig. 13 Separation performance of gas-liquid separator (Cylindrical,  $b=2.5$  mm,  $G_L=40$  ml/min)

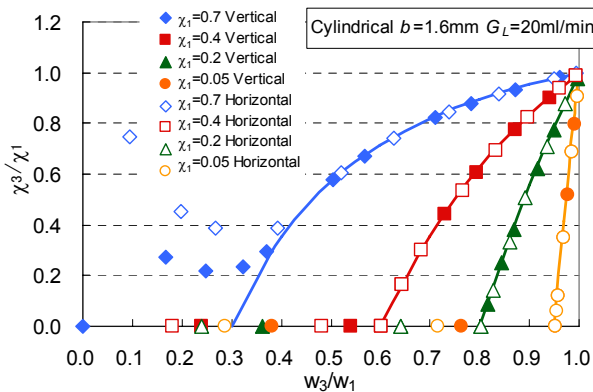


Fig. 10 Separation performance of gas-liquid separator (Cylindrical,  $b=1.6$  mm,  $G_L=20$  ml/min)

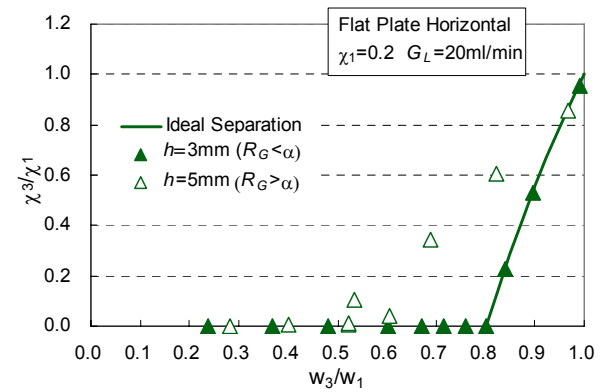


Fig. 14 Liquid overflow condition

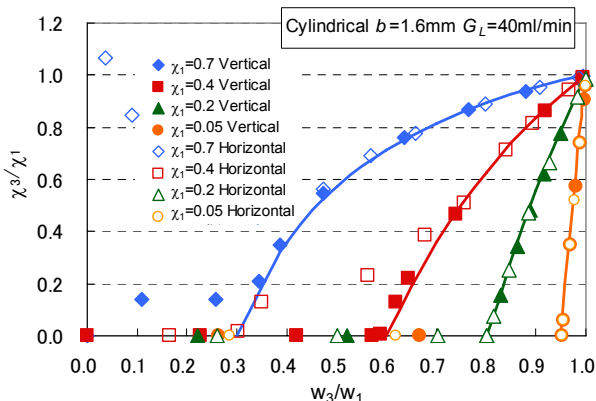


Fig. 11 Separation performance of gas-liquid separator (Cylindrical,  $b=1.6$  mm,  $G_L=40$  ml/min)

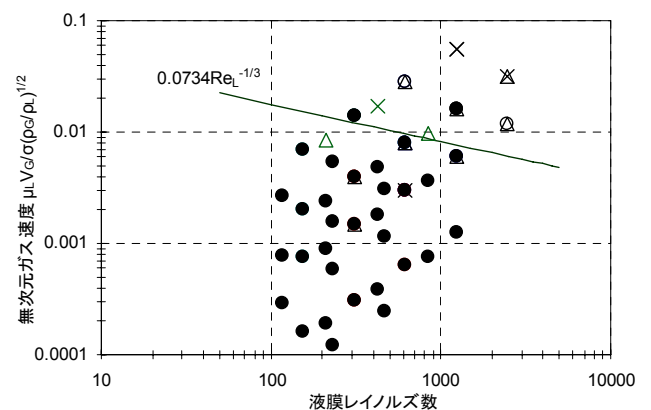


Fig. 15 Comparison with Ishii's correlation<sup>(3)</sup>