

# すべてのチャンネル $\mu$ -Slideのせん断応力およびせん断速度 — 数値計算に基づいた値

## 目次

せん断応力およびせん断速度の計算式 – すべてのibidiチャンネルスライドについて記載 .....	2
動的粘度 $\eta$ が異なる場合のせん断応力計算 .....	5
せん断応力およびせん断速度の範囲 .....	6
実験的側面 .....	7
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide I $^{0.1}$ Luerのせん断応力表 .....	8
$\mu$ -Slide I $^{0.1}$ Luerのせん断速度表 .....	8
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide I $^{0.2}$ Luerのせん断応力表 .....	9
$\mu$ -Slide I $^{0.2}$ Luerのせん断速度表 .....	9
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide I $^{0.4}$ Luerのせん断応力表 .....	10
$\mu$ -Slide I $^{0.4}$ Luerのせん断速度表 .....	10
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide I $^{0.6}$ Luerのせん断応力表 .....	11
$\mu$ -Slide I $^{0.6}$ Luerのせん断速度表 .....	11
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide I $^{0.8}$ Luerのせん断応力表 .....	12
$\mu$ -Slide I $^{0.8}$ Luerのせん断速度表 .....	12
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide VI $^{0.4}$ のせん断応力表 .....	13
$\mu$ -Slide VI $^{0.4}$ のせん断速度表 .....	13
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide VI $^{0.1}$ のせん断応力表 .....	14
$\mu$ -Slide VI $^{0.1}$ のせん断速度表 .....	14
粘度 $\eta=0.01$ dyn $\cdot$ s/cm $^2$ の場合の $\mu$ -Slide III $^{0.1}$ のせん断応力表 .....	15
$\mu$ -Slide III $^{0.1}$ のせん断速度表 .....	15
数値計算の背景情報 .....	16
均一なせん断応力の領域 .....	17
y方向の流速形状 .....	18
y字型 $\mu$ -Slideのせん断応力およびせん断速度 .....	18

## 1 せん断応力およびせん断速度の計算式 - すべてのibidiチャンネルスライドについて記載

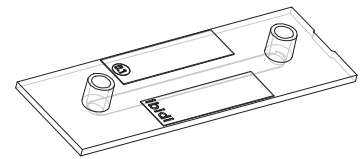
せん断応力は、水温が22°Cの場合の水の動的粘度 $\eta = 0.01 \text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 (= 1 \text{ mPa}\cdot\text{s} = 1\text{cP})$ に基づいています。粘度が異なる場合の計算については、5ページをご覧ください。便宜上、各計算には単位の換算も含まれています（表示されていません）。

Φ 流量  
 $\tau$  せん断応力  
 $\gamma$  せん断速度  
 $\eta$  動的粘度  
 $(\eta = 0.01 \text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2)$

### μ-Slide I<sup>0.1</sup> Luer :

$$\text{せん断応力} \quad \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 20.255 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度} \quad \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 2025.5 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

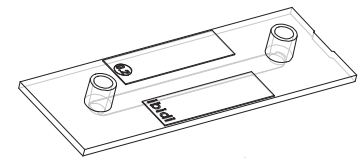


8ページの表参照

### μ-Slide I<sup>0.2</sup> Luer :

$$\text{せん断応力} \quad \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 5.129 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度} \quad \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 512.9 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

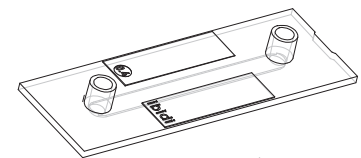


9ページの表参照

### μ-Slide I<sup>0.4</sup> Luer :

$$\text{せん断応力} \quad \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 1.316 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度} \quad \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 131.6 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

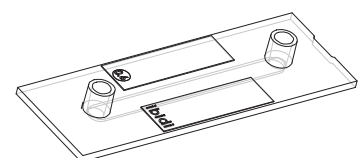


10ページの表参照

### μ-Slide I<sup>0.6</sup> Luer :

$$\text{せん断応力} \quad \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.601 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度} \quad \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 60.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

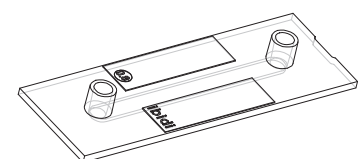


11ページの表参照

### μ-Slide I<sup>0.8</sup> Luer :

$$\text{せん断応力} \quad \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.347 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度} \quad \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 34.7 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

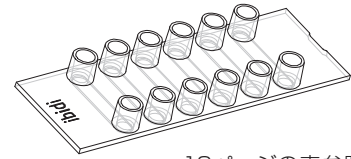


12ページの表参照

**μ-Slide VI<sup>0.4</sup> :**

せん断応力  $\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 1.761 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

せん断速度  $\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 176.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$



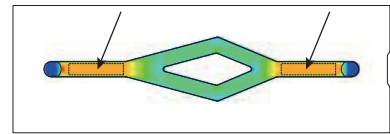
13ページの表参照

**y字型 μ-Slide :**

(単チャンネル領域)

せん断応力  $\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 2.274 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

せん断速度  $\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 227.4 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

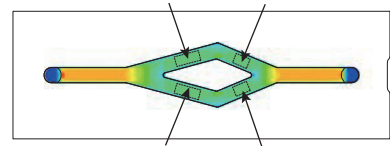


**y字型 μ-Slide :**

(分岐領域)

せん断応力  $\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 1.137 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

せん断速度  $\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 113.7 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

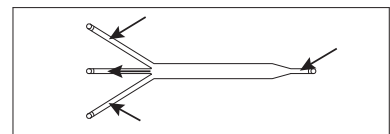


**μ-Slide III<sup>3In1</sup> :**

(1 mmチャンネル)

せん断応力  $\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 7.741 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

せん断速度  $\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 774.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

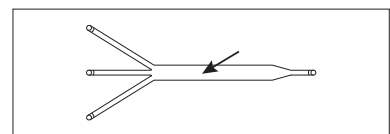


**μ-Slide III<sup>3In1</sup> :**

(3 mmチャンネル)

せん断応力  $\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 2.274 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$

せん断速度  $\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 227.4 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$



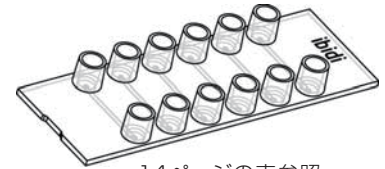
**重要な注意点：**

流量  $\Phi$  は、 $\mu$ -Slide VI<sup>0.1</sup> および  $\mu$ -Slide III<sup>0.1</sup> では「 $\mu$ l/分」で表されます。他のスライドについては、すべて「ml/分」で表されます。

 **$\mu$ -Slide VI<sup>0.1</sup>：**

$$\text{せん断応力 } \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.107 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度 } \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 10.7 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$

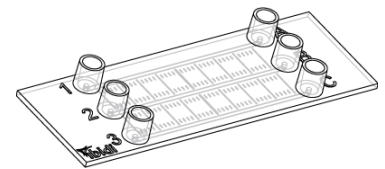


14ページの表参照

 **$\mu$ -Slide III<sup>0.1</sup>：**

$$\text{せん断応力 } \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.107 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$

$$\text{せん断速度 } \gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 10.7 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$



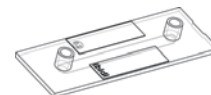
15ページの表参照

$\Phi$	流量
$\tau$	せん断応力
$\gamma$	せん断速度
$\eta$	動的粘度

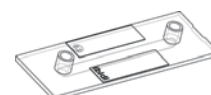
## 2 動的粘度 $\eta$ が異なる場合のせん断応力計算

便宜上、各計算には単位の換算も含まれています（表示されていません）。

$$\mu\text{-Slide I}^{0.1} \text{ Luer} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 2025.5 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



$$\mu\text{-Slide I}^{0.2} \text{ Luer} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 512.9 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



$$\mu\text{-Slide I}^{0.4} \text{ Luer} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 131.6 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



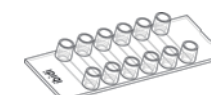
$$\mu\text{-Slide I}^{0.6} \text{ Luer} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 60.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



$$\mu\text{-Slide I}^{0.8} \text{ Luer} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 34.7 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



$$\mu\text{-Slide VI}^{0.4} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 176.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



$$\mu\text{-Slide VI}^{0.1} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 10.7 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$



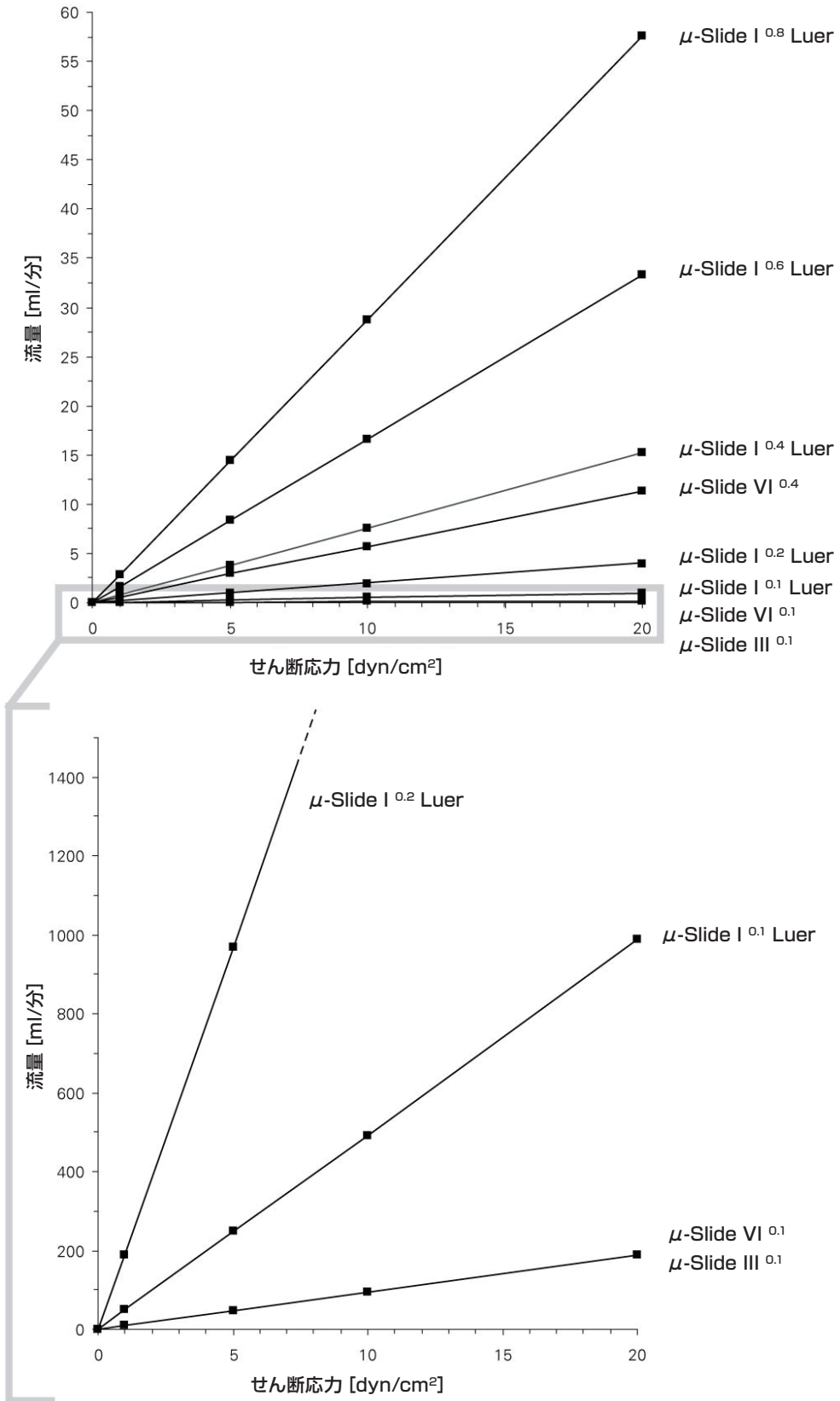
$$\mu\text{-Slide III}^{0.1} : \tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = \eta \left[ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \cdot 10.7 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$



### 重要な注意点：

流量 $\Phi$ は、 $\mu\text{-Slide VI}^{0.1}$ および $\mu\text{-Slide III}^{0.1}$ では「 $\mu\text{l}/\text{分}$ 」で表されます。他のスライドについては、すべて「 $\text{ml}/\text{分}$ 」で表されます。

### 3 せん断応力およびせん断速度の範囲



## 4 実験的側面

実験を正しく設定するには、その前に次の事項を確認しておく必要があります。

- 1) どの程度のせん断応力とせん断速度を与えるか？
- 2) 実験の所要時間はどれ位か？
- 3) 一方向設定にするか、循環設定にするか？
- 4) 使用する試薬は、高価なものか、あるいは多量に利用可能な安価なものか？
- 5) 実験は、CO<sub>2</sub>濃度5%、37℃の温度で行うべきか？
- 6) 他に重要な要因はないか？

### 例1：せん断応力が加わった状態でのヒト臍帯静脈内皮細胞 (HUVEC) の培養

内皮細胞は、流れ（フロー）のある状態で培養すると、静置培養と非常に異なった形状を示します。

- 1) この実験での一般的なせん断応力は、1 dyn/cm<sup>2</sup> (小静脈) ~ 20 dyn/cm<sup>2</sup> (腹部大動脈) です。
- 2) このような培養の一般的な期間は1週間です。この期間後に、流れに沿った細胞の明確な配置と、高い細胞密度を達成する必要があります。
- 3) HUVEC培養液は高価なため、装置は循環式設定をおすすめします。
- 4) 循環流装置が使用されるため、ibidi灌流システムを使用し、高価なHUVEC培養液約10mlが必要となります。さらに、細胞から分泌された物質を分析できるという利点もあります。

⇒ **推奨される設定**：ポンプ：ibidi灌流システム、循環設定、低流量（1 dyn/cm<sup>2</sup>）ではμ-Slide I<sup>0.8</sup> Luer、または高せん断応力（20 dyn/cm<sup>2</sup>）ではμ-Slide I<sup>0.2</sup> Luer。流体ユニットは、温度37℃、CO<sub>2</sub>濃度5%の培養器内に設置する必要があります。

### 例2：血小板接着（ノックアウトマウスの血液）

マウスの血液量は、一般的に1 mlの範囲内です。多くの場合、動物1匹の血液で1回以上実験を実施することが望まれます。

- 1) この実験の一般的なせん断応力は、1 dyn/cm<sup>2</sup> ~ 50 dyn/cm<sup>2</sup>です。
- 2) 血小板接着は、一般的に5分以内に測定します。
- 3) 活性化されていない細胞のみを分析するため、一方向設定を使用する必要があります。
- 4) 利用できるマウスの血液は、きわめて微量です。流量も非常に小さくなります。
- 5) 実験は、37℃で行う必要があります。(室温で実施する場合もあります。) CO<sub>2</sub>培養は、必要ないかもしれません。

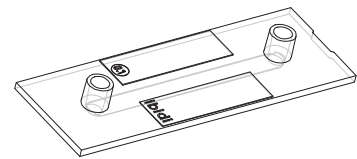
⇒ **推奨される設定**：ポンプ：ibidi灌流システム、一方向設定、μ-Slide VI<sup>0.1</sup>またはμ-Slide III<sup>0.1</sup>。μ-Slideは、コラーゲンIV等のタンパク質基質でコーティングすることができます。マウスの血液全体は、0.03 dyn·s/cm<sup>2</sup>の粘度があるかもしれません。できれば、血液を希釈して試料の分量を増量した方が良いかもしれません。せん断応力は、流量3.1 μl/分で1 dyn/cm<sup>2</sup>に到達し、31 μl/分では10 dyn/cm<sup>2</sup>に達します。その結果、実験の総所要時間は、1 dyn/cm<sup>2</sup>で300分、10 dyn/cm<sup>2</sup>で30分となります。

したがって、せん断応力が10 dyn/cm<sup>2</sup>の場合は、5分間の接着試験を6回行うことができます。

**5 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide I<sup>0.1</sup> Luerのせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]
0,1	0,00	4	0,20	25	1,23
0,2	0,01	5	0,25	30	1,48
0,3	0,01	6	0,30	35	1,73
0,4	0,02	7	0,35	40	1,97
0,5	0,02	8	0,39	45	2,22
0,6	0,03	9	0,44	50	2,47
0,7	0,03	10	0,49	55	2,72
0,8	0,04	11	0,54	60	2,96
0,9	0,04	12	0,59	65	3,21
1	0,05	13	0,64	70	3,46
1,2	0,06	14	0,69	75	3,70
1,4	0,07	15	0,74	80	3,95
1,6	0,08	16	0,79	85	4,20
1,8	0,09	17	0,84	90	4,44
2	0,10	18	0,89	95	4,69
2,2	0,11	19	0,94	100	4,94
2,4	0,12	20	0,99	105	5,18
2,6	0,13	21	1,04	110	5,43
2,8	0,14	22	1,09	115	5,68
3	0,15	23	1,14	120	5,92

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 20.255 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



**6 μ-Slide I<sup>0.1</sup> Luerのせん断速度表**

γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]
5	0,00	600	0,30	7000	3,46
10	0,00	700	0,35	7500	3,70
20	0,01	800	0,39	8000	3,95
30	0,01	900	0,44	8500	4,20
40	0,02	1000	0,49	9000	4,44
50	0,02	1250	0,62	9500	4,69
125	0,06	1500	0,74	10000	4,94
150	0,07	1750	0,86	10500	5,18
175	0,09	1800	0,89	11000	5,43
200	0,10	1850	0,91	11500	5,68
225	0,11	1900	0,94	12000	5,92
250	0,12	2000	0,99	12500	6,17
275	0,14	2500	1,23	13000	6,42
300	0,15	3000	1,48	13500	6,67
325	0,16	3500	1,73	14000	6,91
350	0,17	4000	1,97	14500	7,16
375	0,19	4500	2,22	15000	7,41
400	0,20	5000	2,47	15500	7,65
450	0,22	5500	2,72	16000	7,90
500	0,25	6000	2,96	16500	8,15

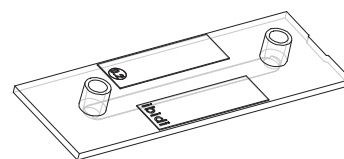
$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 2025.5 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



**7 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide I<sup>0.2</sup> Luerのせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]
0,1	0,02	4	0,78	25	4,87
0,2	0,04	5	0,97	30	5,85
0,3	0,06	6	1,17	35	6,82
0,4	0,08	7	1,36	40	7,80
0,5	0,10	8	1,56	45	8,77
0,6	0,12	9	1,75	50	9,75
0,7	0,14	10	1,95	55	10,72
0,8	0,16	11	2,14	60	11,70
0,9	0,18	12	2,34	65	12,67
1	0,19	13	2,53	70	13,65
1,2	0,23	14	2,73	75	14,62
1,4	0,27	15	2,92	80	15,60
1,6	0,31	16	3,12	85	16,57
1,8	0,35	17	3,31	90	17,55
2	0,39	18	3,51	95	18,52
2,2	0,43	19	3,70	100	19,50
2,4	0,47	20	3,90	105	20,47
2,6	0,51	21	4,09	110	21,45
2,8	0,55	22	4,29	115	22,42
3	0,58	23	4,48	120	23,39

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 5.129 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



**8 μ-Slide I<sup>0.2</sup> Luerのせん断速度表**

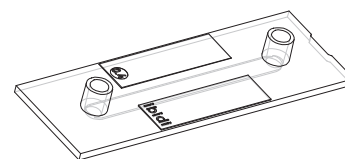
γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]
5	0,01	600	1,17	7000	13,65
10	0,02	700	1,36	7500	14,62
20	0,04	800	1,56	8000	15,60
30	0,06	900	1,75	8500	16,57
40	0,08	1000	1,95	9000	17,55
50	0,10	1250	2,44	9500	18,52
125	0,24	1500	2,92	10000	19,50
150	0,29	1750	3,41	10500	20,47
175	0,34	1800	3,51	11000	21,45
200	0,39	1850	3,61	11500	22,42
225	0,44	1900	3,70	12000	23,39
250	0,49	2000	3,90	12500	24,37
275	0,54	2500	4,87	13000	25,34
300	0,58	3000	5,85	13500	26,32
325	0,63	3500	6,82	14000	27,29
350	0,68	4000	7,80	14500	28,27
375	0,73	4500	8,77	15000	29,24
400	0,78	5000	9,75	15500	30,22
450	0,88	5500	10,72	16000	31,19
500	0,97	6000	11,70	16500	32,17

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 512.9 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

**9 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide I<sup>0.4</sup> Luerのせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]
0,1	0,08	4	3,04	25	18,99
0,2	0,15	5	3,80	30	22,79
0,3	0,23	6	4,56	35	26,59
0,4	0,30	7	5,32	40	30,39
0,5	0,38	8	6,08	45	34,18
0,6	0,46	9	6,84	50	37,98
0,7	0,53	10	7,60	55	41,78
0,8	0,61	11	8,36	60	45,58
0,9	0,68	12	9,12	65	49,38
1	0,76	13	9,88	70	53,18
1,2	0,91	14	10,64	75	56,97
1,4	1,06	15	11,39	80	60,77
1,6	1,22	16	12,15	85	64,57
1,8	1,37	17	12,91	90	68,37
2	1,52	18	13,67	95	72,17
2,2	1,67	19	14,43	100	75,97
2,4	1,82	20	15,19	105	79,76
2,6	1,98	21	15,95	110	83,56
2,8	2,13	22	16,71	115	87,36
3	2,28	23	17,47	120	91,16

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 1.316 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



**10 μ-Slide I<sup>0.4</sup> Luerのせん断速度表**

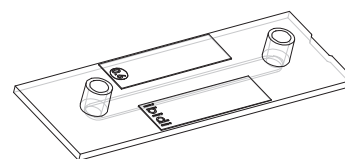
γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]
5	0,04	600	4,56	7000	53,18
10	0,08	700	5,32	7500	56,97
20	0,15	800	6,08	8000	60,77
30	0,23	900	6,84	8500	64,57
40	0,30	1000	7,60	9000	68,37
50	0,38	1250	9,50	9500	72,17
125	0,95	1500	11,39	10000	75,97
150	1,14	1750	13,29	10500	79,76
175	1,33	1800	13,67	11000	83,56
200	1,52	1850	14,05	11500	87,36
225	1,71	1900	14,43	12000	91,16
250	1,90	2000	15,19	12500	94,96
275	2,09	2500	18,99	13000	98,76
300	2,28	3000	22,79	13500	102,55
325	2,47	3500	26,59	14000	106,35
350	2,66	4000	30,39	14500	110,15
375	2,85	4500	34,18	15000	113,95
400	3,04	5000	37,98	15500	117,75
450	3,42	5500	41,78	16000	121,55
500	3,80	6000	45,58	16500	125,34

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 131.6 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

### 11 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide I<sup>0.6</sup> Luerのせん断応力表

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]
0,1	0,17	4	6,66	25	41,60
0,2	0,33	5	8,32	30	49,92
0,3	0,50	6	9,98	35	58,24
0,4	0,67	7	11,65	40	66,55
0,5	0,83	8	13,31	45	74,87
0,6	1,00	9	14,97	50	83,19
0,7	1,16	10	16,64	55	91,51
0,8	1,33	11	18,30	60	99,83
0,9	1,50	12	19,97	65	108,15
1	1,66	13	21,63	70	116,47
1,2	2,00	14	23,29	75	124,79
1,4	2,33	15	24,96	80	133,11
1,6	2,66	16	26,62	85	141,43
1,8	2,99	17	28,29	90	149,75
2	3,33	18	29,95	95	158,07
2,2	3,66	19	31,61	100	166,39
2,4	3,99	20	33,28	105	174,71
2,6	4,33	21	34,94	110	183,03
2,8	4,66	22	36,61	115	191,34
3	4,99	23	38,27	120	199,66

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.601 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



### 12 μ-Slide I<sup>0.6</sup> Luerのせん断速度表

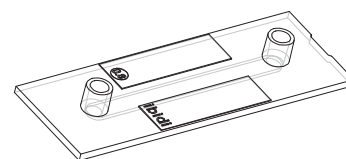
γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]
5	0,08	600	9,98	7000	116,47
10	0,17	700	11,65	7500	124,79
20	0,33	800	13,31	8000	133,11
30	0,50	900	14,97	8500	141,43
40	0,67	1000	16,64	9000	149,75
50	0,83	1250	20,80	9500	158,07
125	2,08	1500	24,96	10000	166,39
150	2,50	1750	29,12	10500	174,71
175	2,91	1800	29,95	11000	183,03
200	3,33	1850	30,78	11500	191,34
225	3,74	1900	31,61	12000	199,66
250	4,16	2000	33,28	12500	207,98
275	4,58	2500	41,60	13000	216,30
300	4,99	3000	49,92	13500	224,62
325	5,41	3500	58,24	14000	232,94
350	5,82	4000	66,55	14500	241,26
375	6,24	4500	74,87	15000	249,58
400	6,66	5000	83,19	15500	257,90
450	7,49	5500	91,51	16000	266,22
500	8,32	6000	99,83	16500	274,54

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 60.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

**13 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide I<sup>0.8</sup> Luerのせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]
0,1	0,29	4	11,51	25	71,95
0,2	0,58	5	14,39	30	86,34
0,3	0,86	6	17,27	35	100,73
0,4	1,15	7	20,15	40	115,11
0,5	1,44	8	23,02	45	129,50
0,6	1,73	9	25,90	50	143,89
0,7	2,01	10	28,78	55	158,28
0,8	2,30	11	31,66	60	172,67
0,9	2,59	12	34,53	65	187,06
1,0	2,88	13	37,41	70	201,45
1,2	3,45	14	40,29	75	215,84
1,4	4,03	15	43,17	80	230,23
1,6	4,60	16	46,05	85	244,62
1,8	5,18	17	48,92	90	259,01
2,0	5,76	18	51,80	95	273,40
2,2	6,33	19	54,68	100	287,79
2,4	6,91	20	57,56	105	302,18
2,6	7,48	21	60,44	110	316,56
2,8	8,06	22	63,31	115	330,95
3,0	8,63	23	66,19	120	345,34

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.347 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



**14 μ-Slide I<sup>0.8</sup> Luerのせん断速度表**

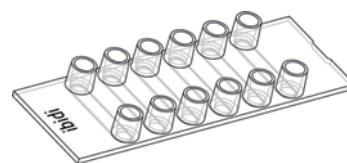
γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]
5	0,14	600	17,27	7000	201,45
10	0,29	700	20,15	7500	215,84
20	0,58	800	23,02	8000	230,23
30	0,86	900	25,90	8500	244,62
40	1,15	1000	28,78	9000	259,01
50	1,44	1250	35,97	9500	273,40
125	3,60	1500	43,17	10000	287,79
150	4,32	1750	50,36	10500	302,18
175	5,04	1800	51,80	11000	316,56
200	5,76	1850	53,24	11500	330,95
225	6,48	1900	54,68	12000	345,34
250	7,19	2000	57,56	12500	359,73
275	7,91	2500	71,95	13000	374,12
300	8,63	3000	86,34	13500	388,51
325	9,35	3500	100,73	14000	402,90
350	10,07	4000	115,11	14500	417,29
375	10,79	4500	129,50	15000	431,68
400	11,51	5000	143,89	15500	446,07
450	12,95	5500	158,28	16000	460,46
500	14,39	6000	172,67	16500	474,85

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 34.7 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

**15 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide VI<sup>0.4</sup>のせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [ml/min]
0,1	0,06	4	2,27	25	14,19
0,2	0,11	5	2,84	30	17,03
0,3	0,17	6	3,41	35	19,87
0,4	0,23	7	3,97	40	22,71
0,5	0,28	8	4,54	45	25,54
0,6	0,34	9	5,11	50	28,38
0,7	0,40	10	5,68	55	31,22
0,8	0,45	11	6,24	60	34,06
0,9	0,51	12	6,81	65	36,90
1,0	0,57	13	7,38	70	39,74
1,2	0,68	14	7,95	75	42,57
1,4	0,79	15	8,51	80	45,41
1,6	0,91	16	9,08	85	48,25
1,8	1,02	17	9,65	90	51,09
2,0	1,14	18	10,22	95	53,93
2,2	1,25	19	10,79	100	56,77
2,4	1,36	20	11,35	105	59,60
2,6	1,48	21	11,92	110	62,44
2,8	1,59	22	12,49	115	65,28
3,0	1,70	23	13,06	120	68,12

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 1.761 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$



**16 μ-Slide VI<sup>0.4</sup>のせん断速度表**

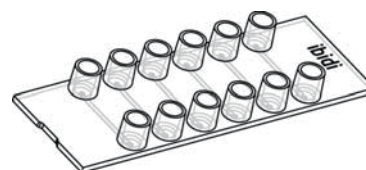
γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]	γ [1/s]	Φ [ml/min]
5	0,03	600	3,41	7000	39,74
10	0,06	700	3,97	7500	42,57
20	0,11	800	4,54	8000	45,41
30	0,17	900	5,11	8500	48,25
40	0,23	1000	5,68	9000	51,09
50	0,28	1250	7,10	9500	53,93
125	0,71	1500	8,51	10000	56,77
150	0,85	1750	9,93	10500	59,60
175	0,99	1800	10,22	11000	62,44
200	1,14	1850	10,50	11500	65,28
225	1,28	1900	10,79	12000	68,12
250	1,42	2000	11,35	12500	70,96
275	1,56	2500	14,19	13000	73,80
300	1,70	3000	17,03	13500	76,63
325	1,84	3500	19,87	14000	79,47
350	1,99	4000	22,71	14500	82,31
375	2,13	4500	25,54	15000	85,15
400	2,27	5000	28,38	15500	87,99
450	2,55	5500	31,22	16000	90,83
500	2,84	6000	34,06	16500	93,66

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 176.1 \Phi \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

**17 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide VI<sup>0.1</sup>のせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [μl/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [μl/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [μl/min]
0,1	0,94	4	37,48	25	234,24
0,2	1,87	5	46,85	30	281,08
0,3	2,81	6	56,22	35	327,93
0,4	3,75	7	65,59	40	374,78
0,5	4,68	8	74,96	45	421,62
0,6	5,62	9	84,32	50	468,47
0,7	6,56	10	93,69	55	515,32
0,8	7,50	11	103,06	60	562,17
0,9	8,43	12	112,43	65	609,01
1	9,37	13	121,80	70	655,86
1,2	11,24	14	131,17	75	702,71
1,4	13,12	15	140,54	80	749,55
1,6	14,99	16	149,91	85	796,40
1,8	16,86	17	159,28	90	843,25
2	18,74	18	168,65	95	890,10
2,2	20,61	19	178,02	100	936,94
2,4	22,49	20	187,39	105	983,79
2,6	24,36	21	196,76	110	1030,64
2,8	26,23	22	206,13	115	1077,49
3	28,11	23	215,50	120	1124,33

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.10673 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$



**18 μ-Slide VI<sup>0.1</sup>のせん断速度表**

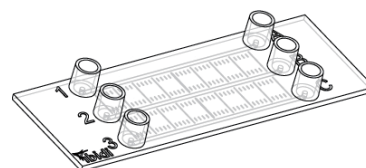
γ [1/s]	Φ [μl/min]	γ [1/s]	Φ [μl/min]	γ [1/s]	Φ [μl/min]
5	0,47	600	56,22	7000	655,86
10	0,94	700	65,59	7500	702,71
20	1,87	800	74,96	8000	749,55
30	2,81	900	84,32	8500	796,40
40	3,75	1000	93,69	9000	843,25
50	4,68	1250	117,12	9500	890,10
125	11,71	1500	140,54	10000	936,94
150	14,05	1750	163,97	10500	983,79
175	16,40	1800	168,65	11000	1030,64
200	18,74	1850	173,33	11500	1077,49
225	21,08	1900	178,02	12000	1124,33
250	23,42	2000	187,39	12500	1171,18
275	25,77	2500	234,24	13000	1218,03
300	28,11	3000	281,08	13500	1264,87
325	30,45	3500	327,93	14000	1311,72
350	32,79	4000	374,78	14500	1358,57
375	35,14	4500	421,62	15000	1405,42
400	37,48	5000	468,47	15500	1452,26
450	42,16	5500	515,32	16000	1499,11
500	46,85	6000	562,17	16500	1545,96

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 10.673 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$

**19 粘度η=0.01 dyn·s/cm<sup>2</sup>の場合のμ-Slide III<sup>0.1</sup>のせん断応力表**

t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [μl/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [μl/min]	t [dyn/cm <sup>2</sup> ]	Φ [μl/min]
0,1	0,94	4	37,48	25	234,24
0,2	1,87	5	46,85	30	281,08
0,3	2,81	6	56,22	35	327,93
0,4	3,75	7	65,59	40	374,78
0,5	4,68	8	74,96	45	421,62
0,6	5,62	9	84,32	50	468,47
0,7	6,56	10	93,69	55	515,32
0,8	7,50	11	103,06	60	562,17
0,9	8,43	12	112,43	65	609,01
1	9,37	13	121,80	70	655,86
1,2	11,24	14	131,17	75	702,71
1,4	13,12	15	140,54	80	749,55
1,6	14,99	16	149,91	85	796,40
1,8	16,86	17	159,28	90	843,25
2	18,74	18	168,65	95	890,10
2,2	20,61	19	178,02	100	936,94
2,4	22,49	20	187,39	105	983,79
2,6	24,36	21	196,76	110	1030,64
2,8	26,23	22	206,13	115	1077,49
3	28,11	23	215,50	120	1124,33

$$\tau \left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] = 0.10673 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$



**20 μ-Slide III<sup>0.1</sup>のせん断速度表**

γ [1/s]	Φ [μl/min]	γ [1/s]	Φ [μl/min]	γ [1/s]	Φ [μl/min]
5	0,47	600	56,22	7000	655,86
10	0,94	700	65,59	7500	702,71
20	1,87	800	74,96	8000	749,55
30	2,81	900	84,32	8500	796,40
40	3,75	1000	93,69	9000	843,25
50	4,68	1250	117,12	9500	890,10
125	11,71	1500	140,54	10000	936,94
150	14,05	1750	163,97	10500	983,79
175	16,40	1800	168,65	11000	1030,64
200	18,74	1850	173,33	11500	1077,49
225	21,08	1900	178,02	12000	1124,33
250	23,42	2000	187,39	12500	1171,18
275	25,77	2500	234,24	13000	1218,03
300	28,11	3000	281,08	13500	1264,87
325	30,45	3500	327,93	14000	1311,72
350	32,79	4000	374,78	14500	1358,57
375	35,14	4500	421,62	15000	1405,42
400	37,48	5000	468,47	15500	1452,26
450	42,16	5500	515,32	16000	1499,11
500	46,85	6000	562,17	16500	1545,96

$$\gamma \left[ \text{s}^{-1} \right] = 10.673 \Phi \left[ \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \right]$$

## 21 数値計算の背景情報

局所的流速  $v(x, y)$  は、以下の式で計算されます (Cornish 1928) <sup>1)</sup>。

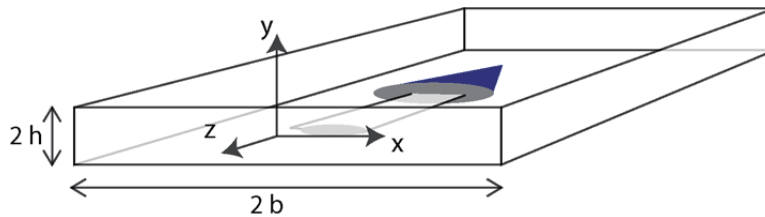
$$v(x, y) = -\frac{1}{\eta} \frac{dp}{dz} \left\{ \frac{b^2}{2} - \frac{x^2}{2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2b^2)^n}{(2n+1)^3} \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \frac{\cosh\left[(2n+1)\left(\frac{\pi y}{2b}\right)\right]}{\cosh\left[(2n+1)\left(\frac{\pi h}{2b}\right)\right]} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2b}\right] \right\}$$

チャンネルを通る全流量  $\Phi$  は、以下の式で計算されます<sup>1)</sup>。

$$\Phi = -\frac{1}{\eta} \frac{dp}{dz} \left\{ \frac{4}{3}hb^3 - 8b^4 \left(\frac{2}{\pi}\right)^5 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \tanh\left[\frac{(2n+1)\pi h}{2b}\right] \right\}$$

「2h」はチャンネルのy軸方向の高さ、「2b」はチャンネルのx軸方向の幅、z軸は流れの方向をそれぞれ示します。 $\frac{dp}{dz}$  は、チャンネルに沿った圧力の変化を表します。

$\frac{dp}{dz}$  は、チャ



使用パラメータ：座標の交点は、チャンネルの中心を示します。y軸は縦方向を示し、またx軸は水平方向を示し流れの方向に対して垂直です。z軸は流れの方向に平行です。

$\frac{dp}{dz}$  は、以下の式を使用して消去されます：

$$\Phi = -\frac{1}{\eta} \frac{dp}{dz} \underbrace{\left\{ \frac{4}{3}hb^3 - 8b^4 \left(\frac{2}{\pi}\right)^5 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \tanh\left[\frac{(2n+1)\pi h}{2b}\right] \right\}}_q$$

$$\frac{dp}{dz} = -\eta \frac{\Phi}{q}$$

1) Cornish, R. J. (1928). "Flow in a Pipe of Rectangular Cross-Section." (矩形断面を持つ管内の流れ) Proc. R. Soc. A 120(786): 691-700.



せん断応力は、以下の関係式を使用して計算されます。

$$\tau(x, y) = \eta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=-h} = \eta \left( -\frac{1}{\eta} \frac{dp}{dz} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n b \pi}{(2n+1)^2} \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \frac{\sinh\left[(2n+1)\frac{\pi y}{2b}\right]}{\cosh\left[(2n+1)\frac{\pi h}{2b}\right]} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2b}\right] \right) \Big|_{y=-h}$$

$\frac{dp}{dz}$  を消去すると：

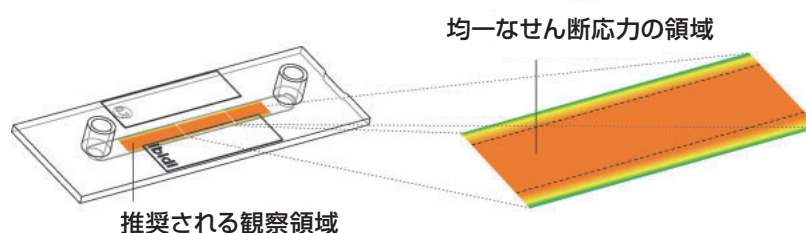
$$\begin{aligned} \tau(x, y) &= \eta \left( -\frac{1}{\eta} \left( -\eta \frac{\Phi}{q} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n b \pi}{(2n+1)^2} \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \frac{\sinh\left[(2n+1)\frac{\pi y}{2b}\right]}{\cosh\left[(2n+1)\frac{\pi h}{2b}\right]} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2b}\right] \right) \Big|_{y=-h} = \\ &= \eta \frac{\Phi}{q} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n b \pi}{(2n+1)^2} \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \frac{\sinh\left[(2n+1)\frac{\pi y}{2b}\right]}{\cosh\left[(2n+1)\frac{\pi h}{2b}\right]} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2b}\right] \Big|_{y=-h} \end{aligned}$$

細胞は、一般にチャンネルの底部に付着します。チャンネル底部の壁せん断応力  $\tau$  ( $y = -h$ ) は、チャンネルの中央 ( $x = 0$ ) に位置します：

$$\tau(x=0, y=-h) = \eta \frac{\Phi}{q} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n b \pi}{(2n+1)^2} \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \tanh\left[(2n+1)\frac{\pi h}{2b}\right] \right\}$$

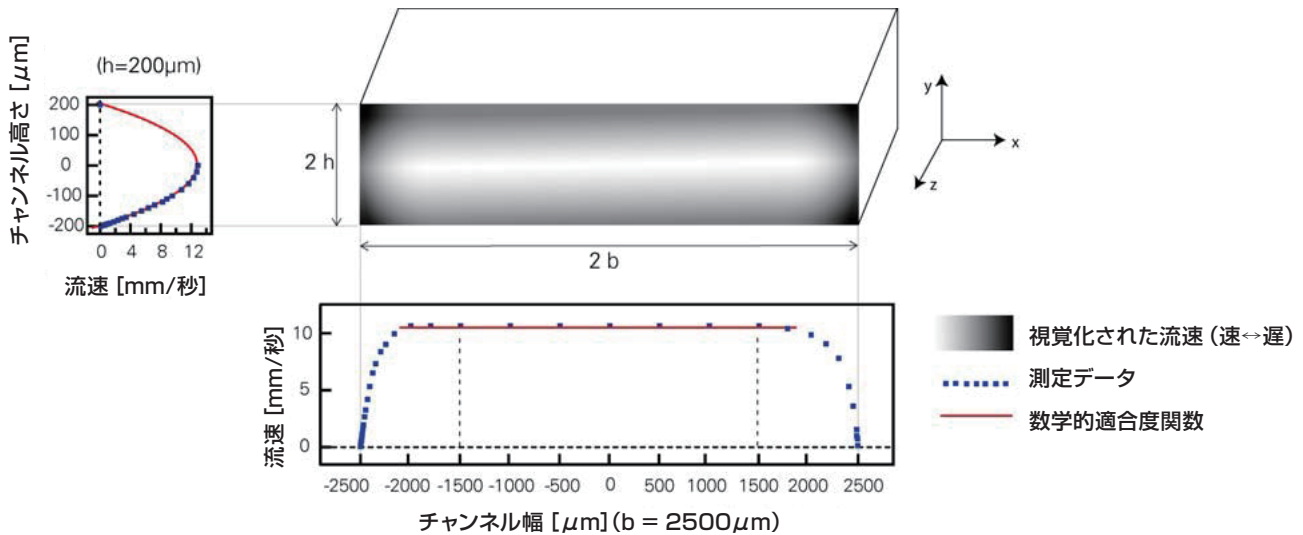
## 22 均一なせん断応力の領域

せん断応力の計算はすべて、大きな幅領域のみで有効です。壁近傍の副次的影響は無視されています。観察は、少なくともチャンネルの高さに相当する距離を保って行う必要があります。例えば、チャンネルの高さが400 μmの場合、均一な流速形状を示す観察領域は、チャンネル中央部の壁から約400 μmとなります (オレンジ色の領域)。



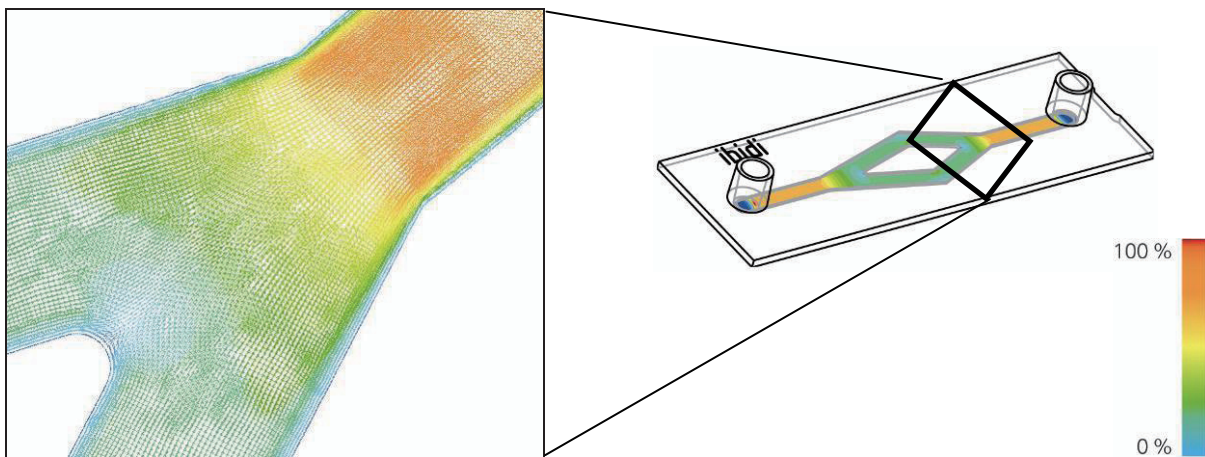
### 23 y方向の流速形状

ibidi社のチャンネルスライドはすべて、y方向に放物線状の流速形状を示すことを特徴としています。  
μ-Slide I<sup>0.4</sup> Luer内の流速形状は、以下の通りです。



### 24 y字型μ-Slideのせん断応力およびせん断速度

y字型μ-Slideは、不均一なせん断応力の検討用に設計された製品です。分岐領域で支配的なせん断応力は、単一チャンネルのみの場合の領域の約半分です。



y字型μ-Slideの数値シミュレーションについては、アプリケーションノート18をご覧ください。