

令和 2 年 5 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02945

研究課題名(和文) 泡沫状態の物理的起源と特性の解明

研究課題名(英文) Study for nature and origin of a foam

研究代表者

栗田 玲 (Kurita, Rei)

首都大学東京・理学研究科・准教授

研究者番号：20579908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：泡沫とは、液体中に気体が非常に密に詰まった状態であり、液体とも気体とも異なった性質を持つ。例えば、洗顔フォームのように形状を保つことができる固体的な性質も合わせ持つ。さらに、この泡沫は液体量によって性質が大きく変化し、少ない状態からsuper dry, dry, wet foamと区別される。本研究課題では、泡沫の崩壊過程では、伝搬的に破れるモードとは別に液滴が飛んで崩壊させる貫通モードがあることを見出した。さらに、wet foamにおける協同的な運動に臨界現象があることを見つけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化粧品や洗剤、消化剤などにおいて泡沫は日常において多く利用されている一方で、学術的には泡沫について未解明なことが多い。泡沫は時間が経つと壊れていくことは知られているものの、どのように壊れるかについてよくわかっていなかった。本研究課題により、泡沫の崩壊過程の詳細が明らかになり、泡沫の安定性を物理的に議論できる状態になった。泡沫の安定性は産業にとっても重要であり、社会的意義もある研究になったと考えている。

研究成果の概要(英文)：A foam is a jamming state of bubbles in liquid. Its physical properties are unique, which are different from both a liquid phase and a gas phase. The foam has elasticity and it can sustain self weight. In addition, the properties depends on the liquid fraction. From small amount of the liquid, it is called super dry, dry, and wet foam. Here we found that there are two modes for the collapse process of the foam. One is a propagate mode, the other is a penetration mode. In the penetration mode, the liquid droplet is emerged when the liquid film is collapsed, and then it breaks another distant liquid film. In addition, we found a dynamical critical phenomenon near the wet-bubbly boundary.

研究分野：ソフトマター

キーワード：泡沫 ソフトマター 非平衡現象

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液体-気体フォームはバブルが混み合ってきた非平衡状態をいう。フォームは粘弾性や流動性などといった性質を持っているため、機能性が高く、ビールの泡、洗剤、消火器など日常生活の多くの場面で使われている。さらに、液体-気体フォームは生命活動においても見受けられる。例えば、アワフキムシの幼虫は体液を利用して泡を作り、生活するための巣として利用している。また、モリアオガエルは粘液から作った泡の中に産卵する。卵が孵化するとき、泡の崩壊がみられる。ゆえに、フォームの安定性は様々な分野において非常に重要である。

フォームは非平衡系の準安定状態であり、時間発展するとともに崩壊する。フォームのダイナミクスを決めている要因は大きく分けて3つある。()排水過程．重力によってフォーム中の液体が下へ流れ、薄膜化する。()粗大化過程．気体が、気泡の間の圧力差によって、液相を通過して気泡から気泡へ拡散し、気泡の総数が減少し、平均気泡サイズが増加する。()崩壊過程．2つの気泡を隔てる液膜の破裂やフォームの外部の液膜の破裂。これら3つの時間発展スケールを大きい順に並べると、排水過程，粗大化過程，崩壊過程である。排水と粗大化のメカニズムについての理解は、理論的にも実験的にも進んでいる。しかしながら、破裂に関する理解は排水や粗大化に比べてかなり遅れている[1]。本研究では、この破裂に焦点を当てる。フォーム中のバブルが破裂するときにパチパチという音が聞こえる。フォームの音波放射測定により、バブル各々の破裂を測定することができ、こうした研究から雪崩現象が間接的に明らかになった。これまでの音波放射測定による先行研究によって分かっていることは、雪崩的崩壊の frequency の時間分布が、非常にドライなフォームにおいては、ポアソン分布では全く記述できない、すなわち独立な事象とはみなせないことである。このことはドライフォームにおいては、ウェットフォームとは異なった特徴的な雪崩的崩壊(collective bubble collapse; CBC)のメカニズムが存在することを意味している。しかしながら、雪崩現象を記述する最適な着眼点(たとえば、臨界厚みや臨界分離圧，臨界液体分率など)が現在でもよくわかっておらず，そのメカニズムが解明されていない。

2. 研究の目的

そこで我々の本研究では、雪崩的崩壊現象を引き起こす原因を解明し，メカニズムを明らかにすることを目的とした。高速度カメラを用いて，擬2次元泡沫の雪崩的崩壊の様子を直接観察した。さらに，液体分率を変えた実験を系統的に行い，雪崩的崩壊現象の頻度や崩壊のダイナミクスの液体分率依存性を調べた[2]。

3. 研究の方法

我々は，界面活性剤である tetradecyl trimethyl ammonium bromide (TTAB) を純水とグリセロール混合溶媒に溶かし，14%の濃度の溶液を作成した。グリセロールは泡沫の溶液の粘性を調整するために混合している。本研究では，主に，グリセロール濃度が17%の時の結果を示す。TTAB溶液にキャピラリーチューブを通してポンプから空気を送り出し，泡沫を作成した。その泡沫をすくい，2枚の平行なアクリル板で挟んだ。泡沫の厚さはスペーサーを用いて，調

整して、2.2 mmとした。気泡の平均直径は3.5 mmであるため、本研究の泡沫は擬2次元系として考えて良い。気泡の数はおよそ150-200程度、大きい泡沫では500程度だった。

キャピラリーの先端にシリコングリースを少量塗布し、そのキャピラリーを一番外側の気泡に触れることで崩壊させる。液体分率が小さい時、その気泡から協同的な崩壊が発生する。高速度カメラ(KEYENCE, VW-9000)を用いて、この崩壊過程をフレームレート4000、もしくは10000 fpsで撮影した。室温は冷房を用いて20℃に管理している。

ここで、擬2次元系の泡沫の液体分率は参考文献[X]に書かれている方法を用いて決定した。崩壊過程は、せいぜい数分で終わるため、液体の蒸発は無視できる。また、泡沫の粗大化や排水もこの短時間の間では無視できる。

4. 研究成果

まず初めに、我々は高速度カメラを用いてCBCの過程を直接観察した。図1(a)は、 $t = 0$ msから $t = 3.12$ msまでのCBC過程の拡大図を示している。この時の液体分率は $\phi = 0.0099$ であり、一番外側の気泡を割って、CBC過程を引き起こしている。外側の気泡が割れた後に、内側の液膜が崩壊し始める。液膜が崩壊すると、共有していたプラトーボーダーとよばれる液体が溜まっている領域に液膜が吸収される。このとき、この吸収の衝撃により液膜が崩壊する。これを「伝搬モード」とよび、図1(a)の赤丸で示した部分に相当する。我々は、このCBC過程には「伝搬モード」の他に「貫通モード」が重要である

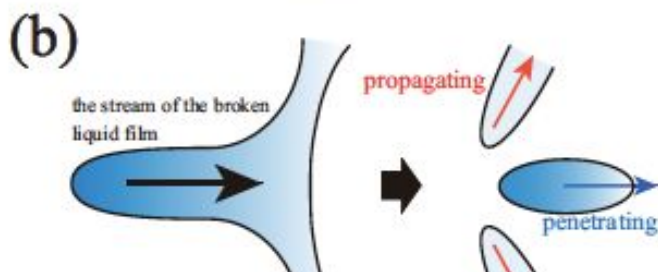
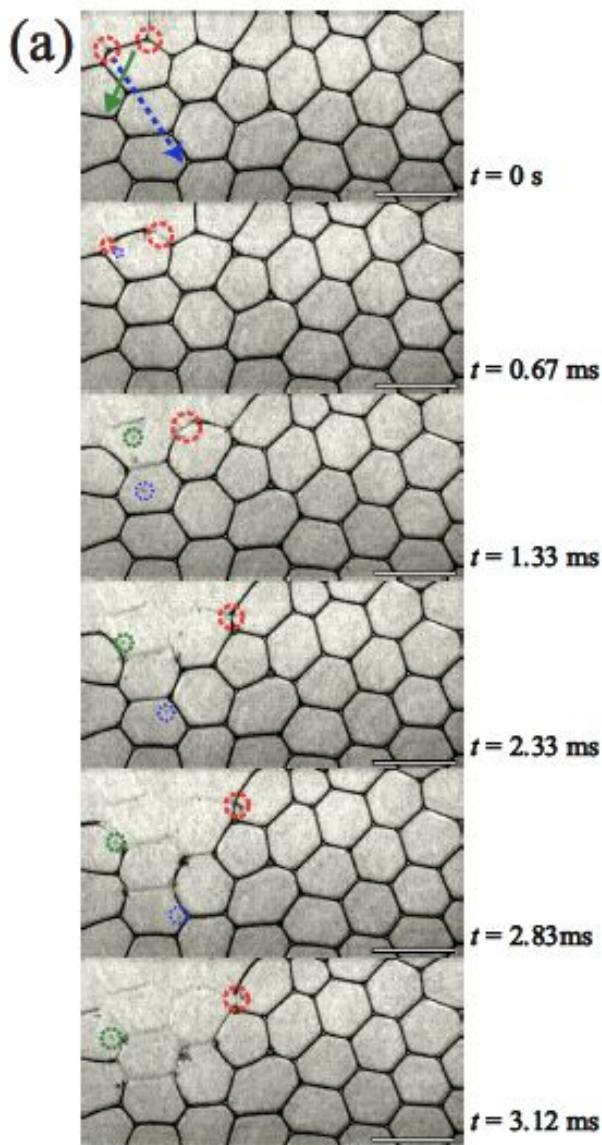


図1 泡沫の崩壊過程[2]。(a) 赤丸が伝搬モードが起きた位置。青と緑が放出された液滴。(b)伝搬モードと貫通モードの模式図。

ことを見つけた．貫通モードとは，液膜がプラトーボードに吸収される時，図1(a)の青丸や緑丸で示したように液滴が放出され，内側の離れた膜を突き破り，別の崩壊を誘起するモードである．図1(b)は伝搬モードと貫通モードを模式図で表したものである．液膜が崩壊した時，接している液膜に伝搬するモードと遠くの膜を崩壊する貫通モードがあり，次に崩壊した液膜が2つのモードを再生成する結果として，CBCが起こることがわかった．

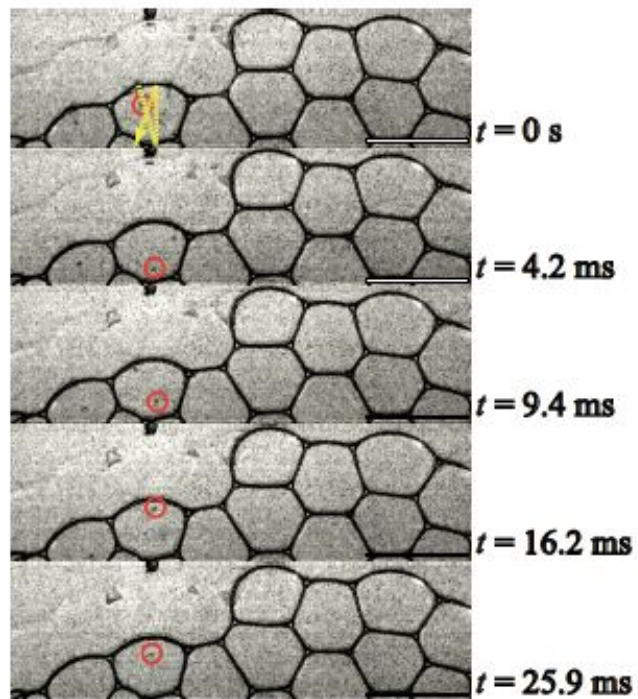


図2 液体分率が0.015のときの液滴の挙動．黄色の点線は液滴の軌道を表している．

液体分率が増加し， $\phi = 0.015$ 程度になると，液滴の放出する確率が低下し，その速度も低下してくるため，離れた液膜を崩壊することが難しくなる．図2は30 msの間の液滴の軌道を示したものである．このように，貫通する代わりに，液膜で跳ね返るビリヤード的運動が観察された．さらに，跳ね返った後の液滴速度 V_d を測定した．図3は跳ね返った回数 n_i に対する液滴速度 V_d を示している跳ね返るごとに速度が低下していることがわかり，直線近似から跳ね返り係数が0.50-0.74であることが求められた．液滴は数回跳ね返った後，液膜に吸収される．ここで，液滴の跳ね返りや吸収は石鹼膜でも同様な結果が得られている[3]．

さらに液体分率が増加して， $\phi > 0.022$ となると，液膜はプラトーボードにきれいに吸収され，液滴が完全に放出されなくなる．そのため，伝搬モードだけが起こるが，数個の気泡が崩壊するだけですぐに止まる．結果として，CBCは起きないため，CBCには伝搬モードが重要であると言える．

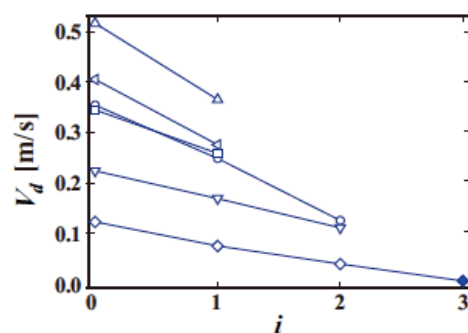


図3 液滴の速度と跳ね返り回数

次に、崩壊した気泡の数の液体分率依存性を定量的に調べた。我々は、一番外側の表面効果によって崩壊した気泡数を含めた N_{total} とバルクのCBCに焦点を当てた泡沫の中で崩壊した気泡の数（一番外側の気泡を含めない） N_{inner} の液体分率依存性を調べた。 N_{inner} には伝搬モードと貫通モードの両方によって崩壊した数に相当する。また、崩壊した数はイベントではなく、2重CBCの数も含んでいる。CBCのタイムスケールはおおよそ0.04秒であった。図4は、 N_{total} （赤）と N_{inner} （青）の液体分率依存性を示している。また、三角、丸、資格は、総気泡数が200程度で、グリセロールの濃度がそれぞれ9.4wt%、17.8 wt%、29 wt%に対応している。崩壊数は液体分率の増加とともに減少することがわかった。これに対し指数近似 $N \propto \phi^{-\gamma}$ を行ったところ、 $\gamma = 2.3 \pm 0.36$ となった。また、CBCの崩壊数はグリセロール濃度に依存していないことがわかった。すなわち、粘性に依存していない慣性領域であることが言える。さらに、総気泡数が500程度でも実験（ダイヤモンド）を行なったが、200のときの結果とほぼ同じであった。また、シリコングリースの影響を調べるために、自然に割れてCBCが起きたときのデータも併せて載せた（図4の黒丸）。全部のデータが一致していることからシリコングリースの影響はないことがわかった。

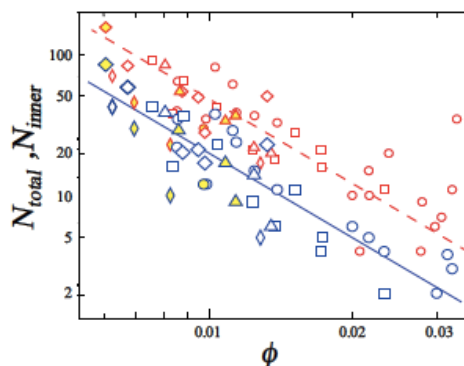


図4 気泡の崩壊数と液体分率依存性

以上のことから、泡沫における協同的な崩壊において、伝導モードと貫通モードの2つがあり、貫通モードが重要であることがわかった。貫通した液滴の速度は、液体分率の上昇とともに低下し、実際に崩壊数も小さくなることがわかった。泡沫の安定のためには、液滴速度の低下が必須であると思われる。また、液滴が放出されるメカニズムについて将来明らかにする必要があると考えられる[4][5]。

参考文献

- [1] Weaire, D. L. and Hutzler, S. The physics of foams (Oxford: Clarendon Press, 1999).
- [2] Yanagisawa N. and Kurita R., Sci. Rep. 9,5152 (2019)
- [3] Courbin, L. and Stone, H. A. Phys. Fluids 18, 091105 (2006).
- [4] Yanagisawa N. and Kurita R., submitted
- [5] Yanagisawa N., Tani, M. and Kurita R., in preparation.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Oikawa Noriko, Fukagawa Keita, Kurita Rei	4. 巻 14
2. 論文標題 Active hole generation in a liquid droplet dissolving into a binary solvent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 4952 ~ 4957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM00357B	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Morinaga Kouki, Oikawa Noriko, Kurita Rei	4. 巻 8
2. 論文標題 Emergence of different crystal morphologies using the coffee ring effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30879-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Kazuya U., Kurita Rei	4. 巻 4
2. 論文標題 Unstable yet static initial state: A universal method for studying Rayleigh-Taylor instability and lock exchange	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 13901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.013901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsukada Tsuyoshi, Kurita Rei	4. 巻 88
2. 論文標題 Pattern Formation during Phase Separation by Radial Quenching at the Base of a Three-Dimensional Box	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 044603 ~ 044603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.044603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yanagisawa Naoya, Kurita Rei	4. 巻 9
2. 論文標題 In-situ observation of collective bubble collapse dynamics in a quasi-two-dimensional foam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-41486-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Kazuya U and Kurita Rei	4. 巻 7
2. 論文標題 Ubiquitous transient stagnant domain formation during thermal convection in a well-mixed two component fluid with large viscosity difference	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12983
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-13409-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Rei Kurita, Shun Mitsui, and Hajime Tanaka	4. 巻 119
2. 論文標題 Response of Soft Continuous Structures and Topological Defects to a Temperature Gradient	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 108003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.108003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kurita Rei	4. 巻 7
2. 論文標題 Control of pattern formation during phase separation initiated by a propagated trigger	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-07352-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Rei Kurita, Yujiro Furuta, Naoya Yanagisawa, and Noriko Oikawa	4. 巻 95
2. 論文標題 Dynamical transition in a jammed state of a quasi-two-dimensional foam	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 62613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.062613	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Rei Kurita
2. 発表標題 Transient stagnant formation in a thermal convection
3. 学会等名 Soft Matter Physics:from the perspective of the essential heterogeneity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoya Yanagisawa and Rei Kurita
2. 発表標題 Relaxation dynamics in a quasi-two-dimensional foam
3. 学会等名 Soft Matter Physics:from the perspective of the essential heterogeneity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoya Yanagisawa and Rei Kurita
2. 発表標題 In-situ observation of collective bubble collapse
3. 学会等名 International Conference on Advances in Physics of Emergent order in Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rei Kurita
2. 発表標題 Generation of active holes in an ionic droplet in water-ethanol solvent
3. 学会等名 Water on Materials Surface 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoya Yanagisawa and Rei Kurita
2. 発表標題 The mechanism of collective bubble collapse in a quasi-two dimensional foam
3. 学会等名 Water on Materials Surface 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoya Yanagisawa and Rei Kurita
2. 発表標題 A bubble-avalanche collapsing mechanism in a quasi-two-dimensional foam
3. 学会等名 Designer Soft Matter 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rei Kurita
2. 発表標題 Pattern Formation during Phase Separation with a Propagated
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita
2. 発表標題 Thermal Convection in a Well-Mixed Two Component Fluid with Large Viscosity Difference
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yujiro Furuta, Noriko Oikawa and Rei Kurita
2. 発表標題 Close Connection between a Dry-Wet Transition and a Bubble Rearrangement in Quasi-Two-Dimensional Fo
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoya Yanagisawa, Rei Kurita and Noriko Oikawa
2. 発表標題 A Relationship between a Bubble-Avalanch Dynamics and a Superdry-Sry Transition in a Quasi-Two-Dimensional Foam
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita
2. 発表標題 Dynamical transition of thermal convection in a physical gel near the sol-gel transition
3. 学会等名 4th International Soft Matter Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Noriko Oikawa and Rei Kurita
2. 発表標題 Mixing dynamics of ionic liquids/water systems
3. 学会等名 4th International Soft Matter Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳沢直哉, 栗田玲
2. 発表標題 擬2次元泡沫における雪崩的崩壊ダイナミクス
3. 学会等名 ソフトマター研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----