

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01532

研究課題名（和文）冷炎を考慮した燃え広がり定義拡張とエンジン用複雑系混相燃焼への展開

研究課題名（英文）Extension of definition of flame spread considering cool flame and application to dispersed phase combustion physics for aero engine

研究代表者

三上 真人（Mikami, Masato）

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：20274178

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、我々の研究グループが行った宇宙実験で観察された群燃焼発現限界付近で生じる現象において重要となる冷炎に注目し、これまで熱炎にのみ注目して捉えられてきた液滴間燃え広がりに冷炎を考慮することで、燃え広がりの定義の拡張を行うことである。微小重力実験の結果、干渉液滴まわりに形成される火炎から加熱された燃え広がり限界外の液滴において冷炎の発生が確認された。等間隔液滴列の燃え広がりにおいても冷炎発生状況を観察したところ、熱炎に注目した場合に同一の燃え広がりモードを示す場合でも、液滴間隔に応じて冷炎発生状況が異なるモードが存在することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、微小重力場での液滴燃焼から、液滴間燃え広がりを通して、ランダム分散液滴群の燃え広がりへつなげ、最終的に噴霧燃焼へと繋げるという意義がある。特に冷炎を考慮した燃え広がり過程の理解は、複雑な反応モデルの簡略化への貢献を通して、冷炎簡略反応モデルを実装した大規模噴霧燃焼の計算コードの産業界への提供へと繋がる社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to extend the definition of the flame spread by focusing on a cool flame, which is important in the phenomenon appearing around the flame-spread limit observed in the space-based experiments conducted by our research group, and by considering the cool flame in the flame spread between droplets, which has been considered only as the hot-flame spread. The results of microgravity experiments show that a cool flame appeared around a droplet existing outside the flame-spread limit, the droplet of which was heated by the flame forming around the interactive droplets. The cool flame was also observed in the flame spread of equally spaced droplet arrays, and there were different modes of cool-flame appearance depending on the droplet spacing, even when the same mode of flame spread occurred when focusing on the hot flame.

研究分野：燃焼学

キーワード：燃焼 微小重力 液体燃料 液滴群 燃え広がり 冷炎

1. 研究開始当初の背景

航空エンジンにおいては、始動時や高空失火後の再着火において燃料噴霧の液滴間燃え広がりによる群燃焼状態への移行が必要となる。我々の研究グループはこの燃え広がりを支配する要素を微小重力科学により正確に把握し、それを利用したパーコレーション理論により複雑系としての噴霧の群燃焼発現限界を記述するという先進的アプローチを進めている。最近我々の研究グループが実施した ISS での宇宙燃焼実験により、従来は熱炎の発生により定義されていた液滴間燃え広がりにおいて観察が困難な冷炎も発生しており、それが群燃焼発現限界に影響を与えている可能性が示唆された。

そこで、冷炎発生を考慮して液滴間燃え広がりの定義を拡張し、微小重力科学による極限把握を行い、その知見を利用してパーコレーション理論も拡張することで、航空エンジン用の複雑系混相燃焼物理のさらなる高度化へと展開を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2017年に我々の研究グループが行った宇宙実験「Group Combustion」から得られた群燃焼発現限界に関わる「問い」においてキーとなる「冷炎」に注目し、これまで熱炎にのみ注目して捉えられてきた液滴間燃え広がり冷炎を考慮することで、燃え広がりの定義の拡張を行うことである。冷炎の詳細観察を行うことで、液滴群要素の燃え広がりの冷炎・熱炎の発生するモードについて微小重力場を利用した極限理解を行う。そして、その拡張した燃え広がり過程をパーコレーションモデルに組み入れ、新たな複雑系混相燃焼モデルへの展開を目指す。

3. 研究の方法

国際宇宙ステーションにおける長時間微小重力場において行った二液滴または三液滴干渉燃焼火炎により加熱される液滴の冷炎発現を調べる実験の結果解析を行った。ここでは、蒸発速度定数から冷炎発生の判断を行った。同様の実験を落下実験施設における微小重力場においても実施し、中赤外カメラを用い燃焼生成物からの赤外光を計測することで、冷炎の検出を行った。さらに、落下実験施設における微小重力場において、液滴列の燃え広がり実験を冷炎発生に注目して行い、燃え広がりモードの再吟味を冷炎に注目して行った。高速度カメラを用いて液滴のバックライト像を撮影するとともに、中赤外カメラを用い冷炎による燃焼生成物からの赤外光を計測した。

また、国際宇宙ステーションにおける長時間微小重力場において行った液滴群要素実験から得られた予蒸発の影響を液滴群の燃え広がりを記述するパーコレーションモデルに組み込んだ。

4. 研究成果

(1) 液滴群要素燃え広がりにおける冷炎の発生

図1に液滴Lの冷炎発生について調査するための液滴群要素パターンを示す。パターンAにおいて、液滴A-L間距離  $S_{AL}/d_0=15.6$  の場合には、液滴A, Bによる干渉燃焼火炎からの熱により液滴Lに燃え広がり熱炎が発生する。この場合右上図のとおり、液滴Lの蒸発速度は  $0.706\text{mm}^2/\text{s}$

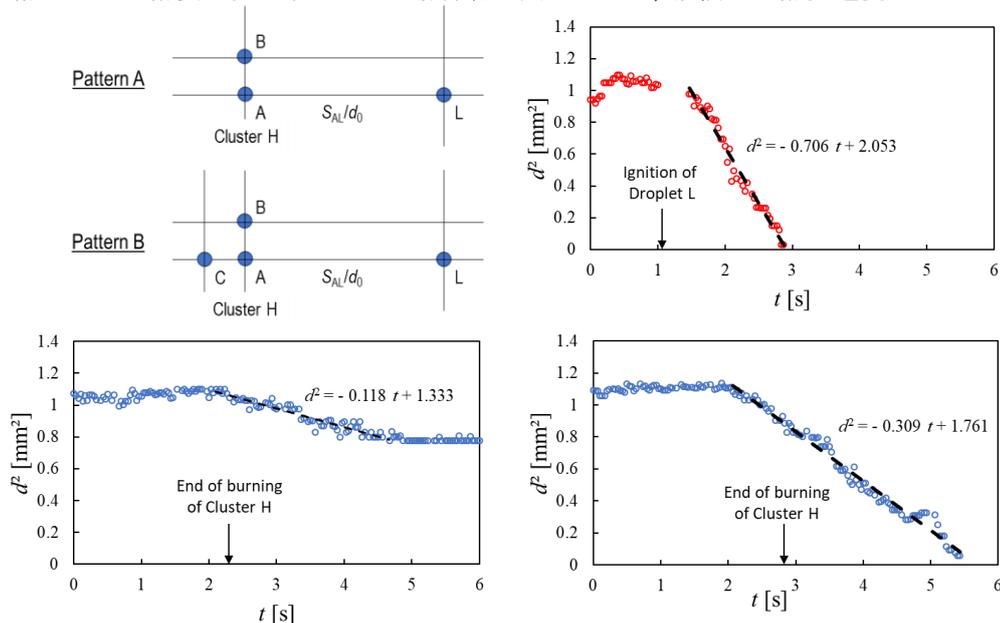


図1 液滴群要素パターン (左上) および液滴Lの直径二乗値の時間変化 (右上: パターンA,  $S_{AL}/d_0=15.6$ ; 左下: パターンA,  $S_{AL}/d_0=19.5$ ; 右下: パターンB,  $S_{AL}/d_0=19.5$ )

であった。これに対し、左下図の  $S_{AL}/d_0=19.5$  の場合には液滴 L への燃え広がりが生じず、 $0.118\text{mm}^2/\text{s}$  と小さい蒸発速度が見られた後に蒸発は停止した。パターン A に対して干渉液滴を一つ増やしたパターン B では、同様の位置の液滴 L において熱炎は発生しなかったが、その蒸発速度は  $0.309\text{mm}^2/\text{s}$  と熱炎発生時の半分程度であり、液滴直径が 0 となるまで蒸発が継続した。この液滴 L の蒸発は冷炎の発生によるものと考えられる。

パターン B の燃え広がりにおいて、中赤外カメラを用いて観察を行った結果を図 2 に示す。液滴 L が無い場合には見られない赤外発光が、干渉三液滴の燃焼終了後も液滴 L まわりに観察された。これは、燃焼生成物の一つである水蒸気からの赤外発光によるものと考えられ、熱炎発生時より微弱な発光であることから、液滴 L まわりで冷炎が発生したことを示している。

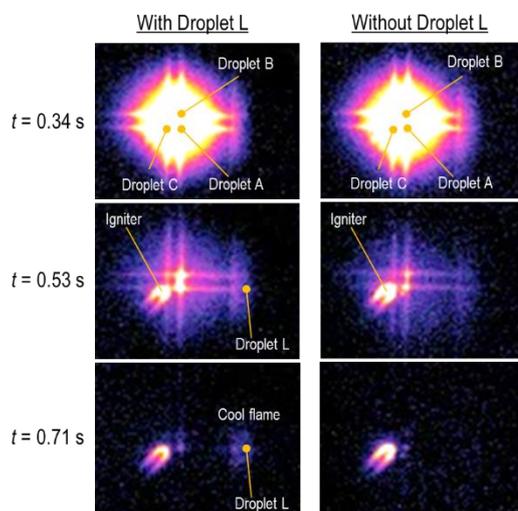


図 2 液滴群要素パターン B における燃え広がり時の中赤外像 ( $S_{AL}/d_0=19$ )

### (2) 液滴列の燃え広がりにおける冷炎の発生と燃え広がりモード

図 3 に液滴間隔  $S/d_0=13.5$  における等間隔液滴列における燃え広がり挙動を示す。上段のハイスピードカメラの映像より、熱炎による火炎が分離しており、モード 3 分離型の燃え広がりであることがわかる。下段の中赤外像から、燃え広がりにおいて熱炎と考えられる液滴を取り囲む強い発光が見られる前に、液滴より手前の領域において微弱な発光が観察された。これは冷炎によるものと考えられるため、この条件においては、冷炎発生の後熱炎が発生する燃え広がりモードであることがわかる。同じモード 3 分離型の燃え広がりであっても、図 3 より液滴間隔が小さい条件では熱炎のみが発生するモードが観察された。また、熱炎の燃え広がり限界より若干液滴間隔が大きい条件では、冷炎のみが発生するモードも観察された。

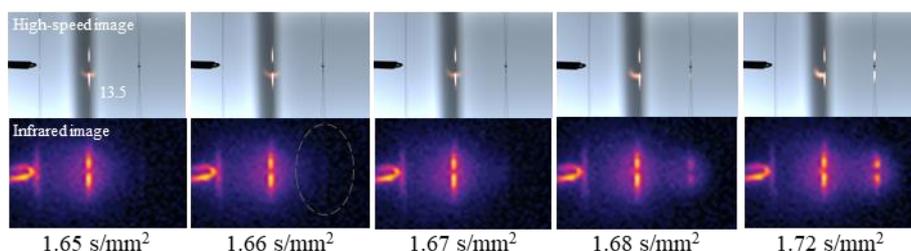


図 3 液滴列のモード 3 燃え広がりにおける冷炎発生 ( $S/d_0=13.5$ )

### (3) 予蒸発を考慮した燃え広がり計算

図 4 に液滴 A1, B1 の干渉燃焼火炎から加熱された燃え広がり限界外に位置する液滴 L が別経路から燃え広がって来た液滴 A2 まわりに形成された火炎からの熱を受けて着火する様子を示す。液滴 L は液滴 A2 に形成された火炎の燃え広がり限界外に位置していることから、液滴 A1, B1 による干渉燃焼からの熱による予蒸発により、液滴 A2 から液滴 L への燃え広がりが可能となったことがわかる。

このような予蒸発の影響を、ランダム分散液滴群の燃え広がりを記述するパーコレーションモデルに組み込んだ。図 5 に予蒸発により形成された可燃性混合気層の直径をパラメータとした群燃焼発現確率の平均液滴間隔依存性を示す。これより、群燃焼発現限界は予蒸発の影響を大きく受けて拡大することが明らかとなった。

今後は予蒸発および冷炎の発生条件を正確に調べ、それらをモデルに組み込む予定である。

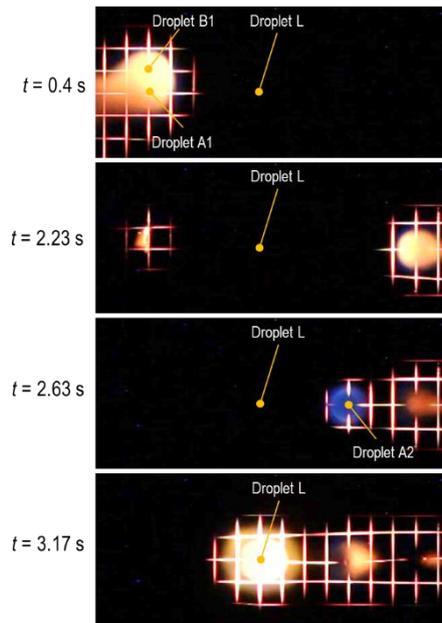


図4 時間遅れを伴い別経路から加熱された燃え広がり限界外の液滴の着火  
 $(S_{A1L}/d_0=19.7, S_{A2L}/d_0=15.5)$

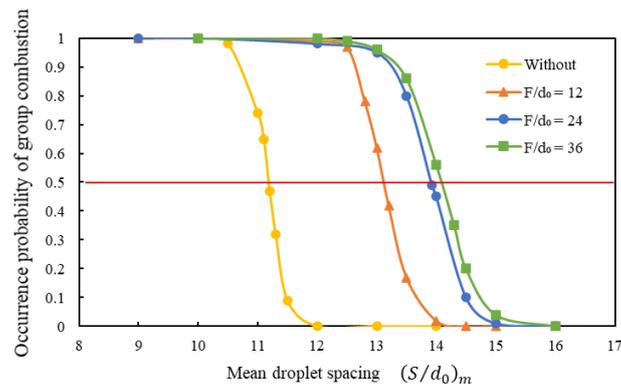


図5 異なる可燃性混合気層直径に対する群燃焼発現確率の平均液滴間隔依存性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mikami Masato, Matsumoto Kodai, Chikami Yuto, Kikuchi Masao, Dietrich Daniel L.	4. 巻 39
2. 論文標題 Appearance of cool flame in flame spread over fuel droplets in microgravity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 2449 ~ 2459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2022.07.053	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 該当する
1. 著者名 三上 真人	4. 巻 65
2. 論文標題 液滴燃焼から噴霧燃焼へ ~軌道上実験「Group Combustion」~	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 49 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20619/jcombsj.65.211_49	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 Yuto CHIKAMI, Kodai MATSUMOTO, Takehiko SEO, Masato MIKAMI	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on two-stage ignition of two interactive droplets in flame spread over n-decane droplets in microgravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th International Conference of Liquid Atomization and Spray Systems	6. 最初と最後の頁 Paper 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2218/iclass.2021.5917	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 Yuka Hara, Yuto Chikami, Takehiko Seo, Masato Mikami	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of two-droplet interaction on the group combustion excitation in randomly distributed droplet clouds using a percolation model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th Asia-Pacific Conference on Combustion	6. 最初と最後の頁 M6-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 原田真作, 松浦勇翔, 坂野文菜, 三上真人
2. 発表標題 微小重力場における冷炎を考慮した液滴列の燃え広がり形態に関する研究
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会 第35回学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松浦勇翔, 坂野文菜, 三上真人
2. 発表標題 単一アンモニア液滴の着火方法調査と微小重力場・高圧雰囲気における燃焼速度定数計測
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会 第35回学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松浦勇翔, 坂野文菜, 三上真人
2. 発表標題 微小重力・高圧環境下における単一アンモニア液滴の燃焼後期の非定常現象の調査
3. 学会等名 第61回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 年岡沙英, 坂野文菜, 三上真人
2. 発表標題 燃え広がり限界外の液滴の予蒸発を考慮したパーコレーションモデルを用いた液滴群の燃え広がりに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masato MIKAMI, Kodai MATSUMOTO, Yuto CHIKAMI, Masao KIKUCHI, Daniel L. DIETRICH
2. 発表標題 Appearance of cool flame in flame spread over fuel droplets in microgravity
3. 学会等名 39th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦勇翔, 原侑花, 三上真人
2. 発表標題 微小重力場を用いた室温高圧雰囲気中での単一アンモニア液滴の蒸発速度定数計測
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会第34回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三上真人, 野村浩司, 渡邊裕章, 菅沼祐介, 菊池政雄, Daniel L. Dietrich, Vedha Nayagam, Forman A. Williams
2. 発表標題 ISSでの液滴群燃焼実験Group CombustionからGroup Combustion-2へ ~燃え広がりにおける冷炎発生とその影響~
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会第34回学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原侑花, 三上真人, サプトロ ヘルマン
2. 発表標題 二液滴・三液滴干渉がランダム分散液滴群の燃え広がりを与える影響の二次元パーコレーションモデルによる調査
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会第34回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuka Hara, Masato Mikami, Herman Saputro
2. 発表標題 Effects of three-droplet interaction on the flame spread over randomly distributed droplet clouds at the critical points using a percolation model
3. 学会等名 13th Asian Microgravity Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato MIKAMI, Hiroshi NOMURA, Hiroaki WATANABE, Yusuke SUGANUMA, Masao KIKUCHI, Daniel L. DIETRICH, Vedha NAYAGAM, Forman A. WILLIAMS
2. 発表標題 Droplet-cloud-combustion Experiments aboard ISS, Group Combustion and Group Combustion-2
3. 学会等名 13th Asian Microgravity Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato Mikami
2. 発表標題 "Group Combustion" - The First Combustion Experiment aboard Kibo on the ISS -
3. 学会等名 国際連合宇宙部Hypergravity/Microgravity Webinar Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto CHIKAMI, Kodai MATSUMOTO, Takehiko SEO, Masato MIKAMI
2. 発表標題 Study on two-stage ignition of two interactive droplets in flame spread over n-decane droplets in microgravity
3. 学会等名 15th International Conference of Liquid Atomization and Spray Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原侑花, 千頭勇斗, 瀬尾健彦, 三上真人
2. 発表標題 液滴干渉がランダム分散液滴群の燃え広がりを与える影響のパーコレーションモデルによる調査
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第33回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千頭勇斗, 原侑花, 瀬尾健彦, 三上真人
2. 発表標題 微小重力高圧環境下での液滴間燃え広がりにおける冷炎を伴う液滴蒸発の調査
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第33回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D.L. Dietrich, V. Nayagam, F.A. Williams, M. Mikami, H. Nomura, M. Kikuchi
2. 発表標題 Cool Flame Burning During Flame Spread over Droplet Arrays and Clusters
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第33回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊裕章, 三上真人, 野村浩司, 菅沼祐介, 瀬尾健彦, 菊池政雄
2. 発表標題 Group Combustion-2におけるモデリングと数値解析
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第33回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三上真人
2. 発表標題 ISS / きぼうワークショップ 実験例紹介 液滴燃焼実験
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千頭 勇斗, 原 侑花, 瀬尾 健彦, 三上 真人
2. 発表標題 微小重力場での液滴間燃え広がりにおいて冷炎が大規模着火の発現に与える影響の調査
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuka Hara, Yuto Chikami, Takehiko Seo, Masato Mikami
2. 発表標題 Effects of two-droplet interaction on the group combustion excitation in randomly distributed droplet clouds using a percolation model
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松浦 勇翔, 原 侑花, 千頭 勇斗, 瀬尾 健彦, 三上 真人
2. 発表標題 高圧環境下での単一アンモニア液滴生成の実現と燃焼の試み
3. 学会等名 日本機械学会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022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
研究分担者	坂野 文菜 (Banno Ayana)  (40961735)	山口大学・大学院創成科学研究科・講師  (15501)	
研究分担者	瀬尾 健彦 (Seo Takehiko)  (00432526)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授  (15501)	

	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
研究協力者	千頭 優斗 (Chikami Yuto)		
研究協力者	原 侑花 (Hara Yuka)		
研究協力者	松浦 勇翔 (Matsuura Yuto)		
研究協力者	年岡 沙英 (Toshioka Sae)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	原田 真作  (Harada Shinsaku)		
研究協力者	森 隼人  (Mori Hayato)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	米国	NASA Glenn Research Center	Case Western Reserve University	University of California, San Diego
インドネシア	Sebelas Maret University			