

ⅢⅢⅢ「きぼう」利用重点課題テーマ「FLARE」ⅢⅢⅢ
(解説)

宇宙空間におけるプラスチック材料の難燃性評価 — ISO4589-2 を利用した評価概念に関する諸検討 —

中村 祐二¹・細貝 亜樹²

A Classification of Flammability of Thermoplastic Materials in Space - Challenges to Utilize ISO4589-2 to Estimate the Flammability Limit under Reduced Gravity Environments -

Yuji NAKAMURA¹ and Aki HOSOGAI²

Abstract

This paper describes the key strategy in FLARE project to estimate/find the flammability limit of the material subjected to various (reduced) gravity fields using the currently-available limiting oxygen index (LOI) obtained through ISO4589-2 protocol. Assuming that the sample thickness and the gravity are independent factors, “two-stage approach” has been proposed to obtain the flammability limit under reduced gravity field of any thickness sample by using LOI. Several attempts which we have been made so far in order to formulate the effect of sample thickness on the limit are presented, then the further challenges and remained tasks to achieve the ultimate goal are briefly summarized.

Keyword(s): Flammability classification, Fire safety in space, Reduced gravity, Limiting oxygen index, ISO4589-2

Received 15 Sept. 2015, accepted 21 Oct. 2015, published 31 Oct. 2015

1. はじめに

1.1 地球外環境における火災安全性評価の重要性

地球外環境における人類の長期滞在、ならびにそこでの活動を支えるためには、一般的に生活の基本・基礎となる「衣食住」は3大要素として確保が必須である。ところが、地球外環境は常に「非常時」という特殊空間であるため、それだけでは不十分である。そのため、その特殊性を反映・考慮した手厚い追加措置が加えられることが望ましい。火災安全対策への「特別な配慮」はまさにその一つである。誤解のないよう強調しておくが、一般的な生活環境においても火災を未然に防ぐ防災対策は重要であるが、地球外空間ではそれに対する危険度が桁違いに高いため、特に格別な配慮を必要とする。このことは、各国の宇宙開発プログ

ラムにおいて「life support」の枠組みで火災対策が取り扱われていることから理解できる。一旦火災が起ると区画の熱損傷のみでなく、乗組員の生命が著しく脅かされる—ある意味、衣食住と同レベルでその堅固性が求められるわけである。

さて、よく知られているように、地球外構造物は主に高い気密性を持つ閉鎖空間となることが前提である。それが故、その内部は人間が特殊防備なしで生活できるような環境を作り出すことができる。例えば人工的な大気条件に設定すれば雰囲気は地上と同じ状況が再現できる。しかしながら「重力」は再現することが難しい。すなわち、衣食住に加えて火災対策に求められる要求とは、(1) 重力が異なり、且つ (2) 高い閉鎖空間において火災に至らしめることがないように未然に防ぐ、あるいは起きたときに甚大な被

1 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 機械工学系 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibirigaoka, Tempaku, Toyohashi,
441-8580, Japan
2 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
JEM Utilization Center, Human Spaceflight Technology Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen,
Tsukuba, Ibaraki 305-8505 Japan
(E-mail: yuji@me.tut.ac.jp)

害になる前に食い止めることである。現在推進中の FLARE プロジェクト¹⁾は、前者の実効性を高めることを目的としており、より具体的には、現行の火災安全性の評価の曖昧さを排除し、物理的理由をもって堅実な評価法を導入しようとするものである。

1.2 FLARE プロジェクトにおける「挑戦」：LOI からの限界値予測

現在、例えば国際宇宙ステーション (ISS) に持ち込む材料の火災安全性を担保する方法としては、NASA による評価方法である NASA-STD-6001B (TEST 1)²⁾ が用いられている (上方伝播試験)。最近ではその拡張版である ISO/TS16697³⁾ に基づき、材料の難燃性・安全性を評価することが推奨されている。これらの NASA の提案方法では「地上場における上方火炎伝播形態がその材料にとって最も燃焼しやすい」という前提、すなわちこれが ISS 内のような低重力場での燃焼限界すら包絡する「最悪条件」であるという仮定の上で成立している。確かに地上場での上方火炎伝播試験では、Fig. 1 に示すように試験片下部を加熱するため、浮力流が未燃焼部を予熱して最も燃焼が促進される系と考えられなくもない。ところが、最近の微小重力下での燃焼試験によれば、必ずしもこの形態が最悪条件を示さないことが明らかになってきた。その理由は、浮力流は予熱もするが同時に吹き飛びも誘発するため、後者が支配的になれば燃焼を持続するには至らなくなるからである。一方、浮力が存在しないと積極的な予熱はないが、吹き飛びの心配がなく、その上、熱が炎の周辺に長時間定む。したがって「十分時間をかけて」予熱され、ゆっくりと燃えることが可能になる (Fig. 1)。

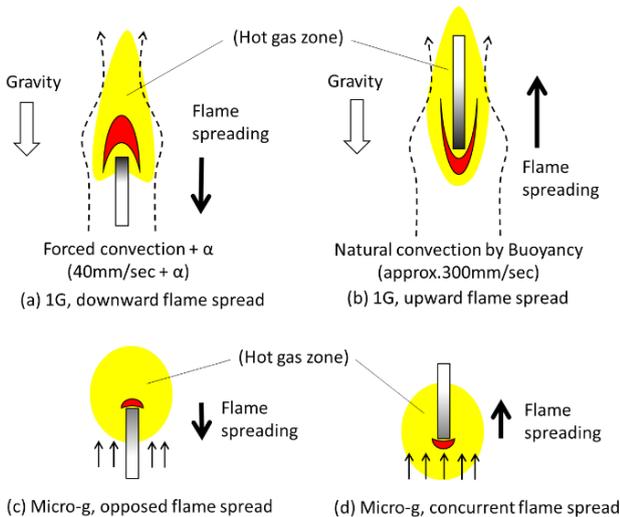


Fig. 1 Schematics of Various Preheat Zones During Flame Spread Event Under 0G and 1G: (a) 1G, Downward, (b) 1G, Upward, (c) 0G, Opposed, (d) 0G, Concurrent.

もちろん、そうなるのはある特定の条件に限られるであろうが、少なくともある条件範囲においては、これまで盲目的に受け入れてきた「前提」を覆す事例が存在することは重要な事実である。これを受ければ、地上場で上方火炎伝播試験をクリアしたからといって、宇宙での火災安全性を判断することは不完全であると言える。「全ての重力場での安全性を包絡」する方法論を見つけるには、浮力流のない状態での燃焼状態を物理的に正しく把握し、その状態を予測することが望ましい。

FLARE プロジェクトの挑戦は、宇宙空間では(むしろ)通常である低重力場での燃焼状態・燃焼限界を「地上場の燃焼試験結果」から予測することにある。このとき、参照する燃焼試験は「燃焼状態を物理的に正しく理解できるもの」が望ましい。既出の上方火炎伝播試験は着火過程に強く依存性を持ち、定常値を得難い。その意味では、着火の影響がなく定常解が理論的に得られる下方火炎伝播試験を参照する方が望ましい (Fig. 1 の (a)(c))。そこで FLARE では、材料の燃焼特性として膨大なデータベースとして存在する「限界酸素指数 (Limiting Oxygen Index: LOI. これは下方伝播燃焼形式を基本とする試験で得られる)」を参照することを提案している。参照値からの予測が可能になると、LOI が得られているあらゆる材料における低重力場での燃焼限界を求めることができるため、宇宙での安全性評価に利用可能となる。

1.3 FLARE Gr4 のタスクと目標

さて、上記の予測を実現するには、下方火炎伝播の物理的解釈を明確にし、LOI がどのようにして定まるのかを正しく把握すること、その中に重力効果がどのように現れるのかを明確にすること等が必須課題となる。我々が所属する FLARE Gr.4 のタスクの一つは、「LOI の決定要因を正しく理解し、そこから低重力場での燃焼状態を予測する方法論を提案 (・実証) すること」である。FLARE としての最終目標は、その方法論を定式化することで広く用いられる形に仕上げ、ISO 化を狙うことにあるが、これは Gr4 単独タスクではないのでこれ以上ここでは言及しない。

現在の代表的な取り組みとしては、LOI 付近 (燃焼限界付近) での燃焼場の熱および物質輸送を計測し (そのための計測システムの開発を含む)、その結果を基にして適切なモデル化を試みている。この際、熱可塑性ポリマーの加熱に伴う特徴的な挙動を正しく把握する必要があるため、それを可能にする数値軌跡手法の開発も実施している。このようにタスクは多岐にわたるが、ここでは Gr4 のタスクの最重要課題である「予測の方法論の提案」を中心に、これまでの取り組みの一部を紹介したい。

2. LOI からの限界値予測：思考実験

2.1 燃焼限界の定義の再確認

ところで、本プロジェクトで参照値とする「LOI」についてもう少し詳しく述べておきたい。LOI とは、ISO で規定されている試験法 (ISO4589-2⁴⁾) に基づいた燃焼試験を行った際、ISO4589-2 で定められた下方火炎伝播限界条件が成立する酸素濃度 (いわば ISO 規定の臨界値?) を指す。試料のばらつきなどにより常に (完全に) 同じ燃焼状態は再現できないため、臨界値の特定には Up-down 法⁵⁾ が用いられる。LOI は「燃焼試験の結果」として得られる数値であり、試験片の物理化学特性が全て反映されていると考えることもできる。

LOI は臨界値であることを鑑みれば、一見、限界状態の酸素濃度と言い換えても差し支えなさそうであるが、なぜ限界「濃度」ではなくわざわざ限界「指数」という表現を使うのか? この理由はどこにも記載されていないが、前者と後者では定義が異なるため表現を変えているものと考えられる。つまり、ISO4589-2 の試験手順では、燃焼が持続できる (いわゆる燃焼学的に決まる) 限界濃度を求めている訳ではなく、ISO4589-2 が定める燃焼限界となる濃度を求めているに過ぎず、燃焼限界濃度が燃焼限界指数と一致する理由がどこにもない。したがって、盲目的に「燃焼限界濃度=燃焼限界指数」が成立すると考えることは根本的に間違っており、両者の読み替えは原則「できない」と考えるのが妥当である。これが FLARE プロジェクトのボトルネックであると言ってもよい。

よりわかりやすく説明するために、具体例をあげてみよう。一般に燃焼限界というのは、厳密に燃焼 (flaming) が持続できない消炎点を指す。この状態は燃焼学的には Fendell カーブ⁶⁾ の左の変曲点に相当する (Fig. 2 中の×)。重要なのはこの「点 (=状態)」は数学的に一意に決められることであり、学術的に消炎を扱うことができるのはこの理由による。その意味では (理想状態での) 絶対条件と考えるもよい。燃焼限界濃度とは、その条件を与える濃度である。

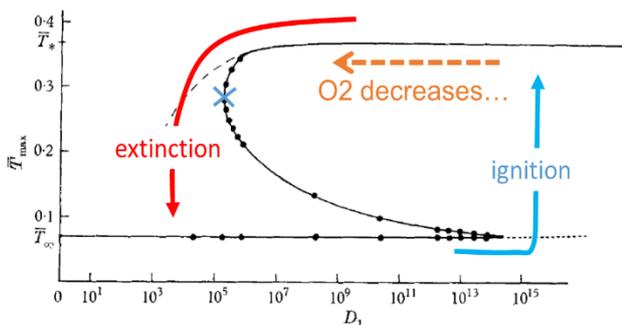


Fig. 2 Fendell Curve⁶⁾.

一方で LOI とは、前述の通り ISO4589-2 で定められる手順に基づいて求められる。具体的には、(1) バーナによる 30 秒以内の加熱で着火しないこと、(2) 着火後 3 分以内に 50 mm の長さが燃えないこと、という 2 つの条件を満たせば、その試料は「燃焼しない」と考え、そのときの濃度は限界酸素指数よりも低いと認定される。つまり「(実際は) 燃えているのに (ISO4589-2 の定義では) 燃えない」と考えるのである。したがって、LOI が厳密の燃焼限界酸素濃度よりも若干大きくなるであろうことは容易に想像できる。ちなみに、火災安全性を論じる上では LOI で評価することは、燃焼可能なマージンが残っているため、いわゆる保守性には欠ける。

なぜこの違いが FLARE プロジェクトのボトルネックになるのかといえば、上記の通り実験上の定義に基づき定められる (=燃焼学的に決められているわけではない) LOI を用いて、低重力場における (燃焼学に基づいて定まる) 燃焼限界濃度を求めようとするからである。要するに、異なる土俵で定義された両者の値をつなぐ関係を導く (=読み替える) という難題を解決しなければならない。これが Gr.4 に課せられている試練であり、挑戦である。

2.2 FLARE で扱う「燃焼限界」の定義 (案)

2.2.1 LOI の物理的な意味

定義が決まらないと前に進まないので、改めて FLARE で扱う燃焼限界について「定めて」みたい。LOI として定まる限界 (臨界) 値を決める判断基準は、上記に示した通り、(1) バーナによる 30 秒以内の加熱で着火しないこと、(2) 着火後 3 分以内に 50 mm の長さが燃えないこと、という 2 条件を満たすことである。言い換えると LOI とは、(1) 正規の方法によって試料を着火できない限界 (=所謂、着火限界) 濃度、(2) 燃え拡がり速度 (V_f) が著しく遅い場合 ($< V_{f,crt} = 50 \text{ mm}/180 \text{ s} \sim 0.27 \text{ mm/s}$) の濃度、と考えてもよいことに気づく。

(1) については導入する着火方法によって大きく左右され、現在 ISO/TC61 の中でも「どのような方法で着火をさせるか」が議論されている。そもそも着火と燃え拡がり異なる物理過程であるため、ここでは ISO で定めている加熱方法では「必ず試料が着火する」と考えることにする。つまり LOI は着火限界ではないと仮定する。

上記の仮定が成立するならば、ISO4589-2 で決まる臨界値とは (2) で決まることになる。この決定方法は、実は理論的にはむしろ好都合である。というのも、燃え拡がり速度は系の固有値であるため、境界条件 (環境条件) が定まると一意に決められることができる。つまり臨界値となり得る下限の燃え拡がり速度 ($V_{f,crt}$) を与える環境条件は、

理論的に一つに定めることができる。環境条件の中には酸素濃度も含まれているので、他の物理定数や境界条件を固定した場合、その燃え拡がり速度を与える酸素濃度が決まる。こう考えることで、LOIを理論的に定義し直すことができる。したがって、この前提条件の下で、LOIから任意の(低)重力値における最小の限界酸素濃度を導く方法論は(少なくとも同じ部類の定義で決まる物理量同士の読み替えを行う操作になるため)、論理的には破綻しない。

この定義でよいかどうかは、もちろん(1)で限界が決まらないという前提の下でしか成立しないが、ひとまずここではこのようにしてLOIは理論的に求まるものとして考えることにしよう。この定義は燃え拡がり速度がゼロ(=燃焼できない消炎点)とした考えたときの限界条件を求める論理と全く同じであるので、いわゆる学術的に決まる消炎点と同じ土俵で両者が評価できる。定義については今後も議論すべき案件であり、FLAREプロジェクト内でも改めて議論されるべき課題であるが、本稿では、ISO4589-2試験に基づき求まるLOIも所謂燃焼学的に決まる消炎濃度と(別け隔てなく)「限界酸素濃度」として表現する。

さて、ISO4589-2によれば、周囲(酸化剤)流速は常に40 mm/sであるが、ここで周囲酸化剤の速度を変化させた際の限界酸素濃度(Limiting oxygen concentration: LOC)の振る舞いについて考える。本試験は通常重力下での試験のため、試料周囲には $U \sim (gL)^{1/2}$ で見積もることができる浮力流れが形成される。Lには試料の断面積の平方根($\sqrt{10 \times 4} = 6.3$ mm)を用いれば浮力流れは約79 mm/sとなり、ISO規定の約2倍となることがわかる。そのため、人工的に与える周囲流速を40 mm/s以下にしても、浮力がもたらす自然対流が勝るため、燃焼場への酸化剤供給は周囲流速とは無関係となる(=限界を与える酸素濃度は変化しない)と考えられる。逆に、周囲流速が79 mm/sを超えると火炎の吹き飛びが誘発され得るため、この値以上の周囲流速では限界酸素濃度は上昇すると考えられる(Fig. 3)。

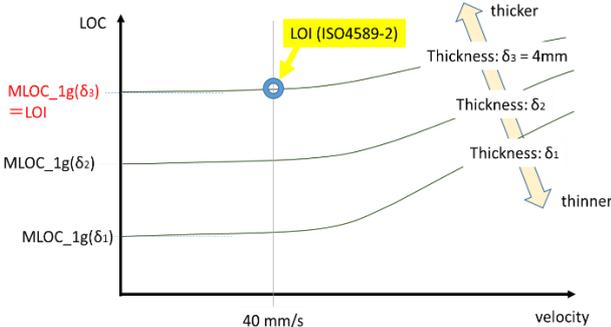


Fig. 3 Behavior of LOC, Limiting oxygen concentration.

このようにして考えると、ISO4589-2規定に従い周囲流速40 mm/sとして得られた限界酸素値(=LOI)は様々な周囲流速を与えた際の最小酸素濃度を指すと考えられる。

Figure 3には厚みよるLOCの違いも示してあるが、あらゆる厚さの試料のLOCの最低値のことを、ここではMinimum Limiting Oxygen Concentration (MLOC)と呼び、特に地上場での値を示す意味でMLOC_1gと記載する。全てのMLOC_1gは40 mm/sの周囲流速で得られるLOCと等しい。

2.2.2 微小重力場での燃焼限界

さて、次はFLAREで予測しようとする微小重力場での燃焼限界とは何かをおさらいしてみよう。

FLARE Gr.1では、微小重力場における薄い試料の燃焼限界を求める方法論が進められている。Gr.1では微小重力空間において様々な大きさの強制対流を与えた際に燃焼が持続できる限界値(=消炎限界:燃え拡がり速度に安定解がなくなる状態)を実験および解析によって求めている。このとき、流れ方向(対向流および並行流)の影響についても調べている。流れ方向についての議論は現在進行中であるが、おおよそ「(流れ方向に依存せず)弱い速度を与えた際が最も燃焼下限を与える酸素濃度(LOC)が下がる」ことがわかってきた。対流速度を変えるとすることは浮力が変化することに等しいと考えれば、無重力ではなく微風な自然対流を得ることができる低重力場が最も低いLOCを示すとも言える。その酸素濃度の値をMLOC_0gとし、これと地上場での最低値(=MLOC_1g)との差を「 ΔO_2 」と記載する。要するに、このMLOC_0gとは「あらゆる重力環境下で燃焼可能な酸素濃度値」を示すことになる。 ΔO_2 とは純粋な重力影響により得られる数値であり、これが大きければ大きい程、重力効果による限界酸素濃度の低下が激しい。Gr.1ではこの ΔO_2 を予測する理論式の構築を行っている。MLOC_1gとMLOC_0g、 ΔO_2 の関係を図示するとFig. 4となる。

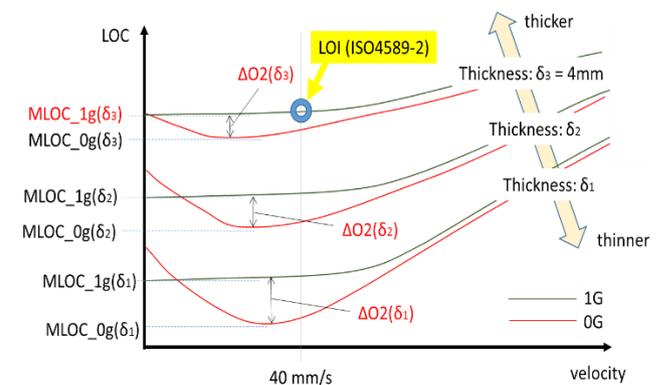


Fig. 4 Relation between MLOC_1g, MLOC_0g, ΔO_2 .

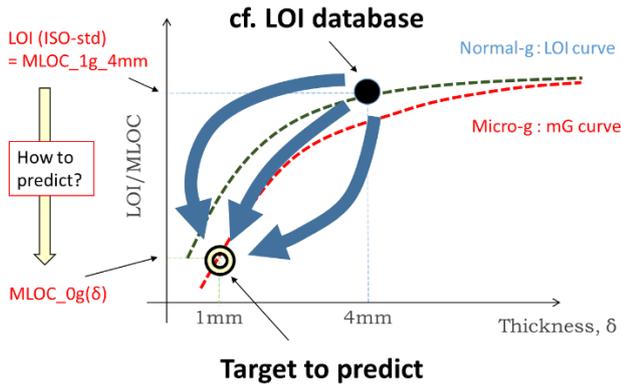


Fig. 5 Thickness Effect on Limiting Oxygen Value and How to Predict One to the Other?

さて、MLOC と LOI との関係を変えて別の物理平面で図示すると **Fig. 5** を得る。ここで図の横軸は厚み、縦軸は限界酸素濃度である。ここでプロットした点の酸素濃度は「その重力環境であらゆる周囲流速を与えた際の(燃焼)限界酸素濃度」を指す。図中には 1G 下のあらゆる厚みの MLOC_1g の集合曲線 (LOI 曲線と呼ぶ) と微小重力下のあらゆる厚みの MLOC_0g の集合曲線 (mG 曲線と呼ぶ) を点線で示してあるが、mG 曲線はあくまで想定である(とはいえ、上記のように微風条件下で燃焼限界酸素濃度の谷が得られるということは地上場の LOI よりも微小重力場のそれが下がると考えることは妥当であろう)。

試料厚みが 4 mm における LOI 曲線上のプロット(●)は、まさに LOI を与える点である。我々はこの値を豊富にもっている。一方、任意の厚み(ここでは 1 mm とする)の試料があらゆる微小重量場で燃焼可能な下限値をプロットすると図中の⊙に相当する。FLARE プロジェクトにおける課題とは「●から⊙を予測せよ」ということに他ならない。それには図中の太矢印で示した通り、無限の経路が候補となる。そのうちどれを選ぶべきか?

2.3 2段階予測概念の提案：重力効果と厚み効果

ここでの課題「●から⊙を予測せよ」を実現するには、この平面上でどのようなパスを通ってもよい。無限にある可能性の中から一線を選ぶわけであるが、この無理難題を論理的に解決しなければならない。ここでは些かトリッキーではあるものの、「(限界値に与える)重力影響と厚み影響とは独立事象である」と考えることでこれを実現させる (**Fig.6**)。

具体的な予測パスとは、「重力効果と厚み効果をわけて考え」、次の 2 つの手順を経るものとする。すなわち、まず (1G 下での) LOI 曲線に沿って厚み 4 mm の限界値 (●) から (1G での) 厚み 1 mm の限界値 (○) を求め (経路 1)、

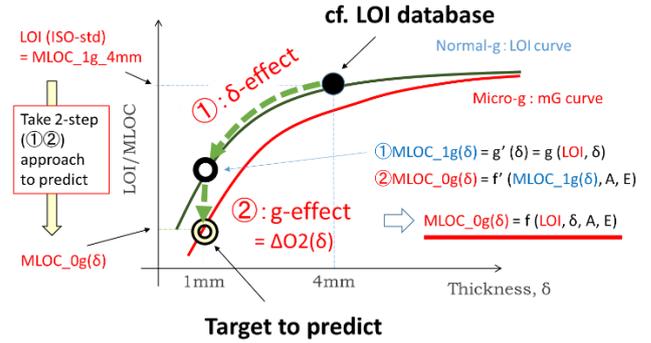


Fig. 6 Conceptual Figure to Explain Out “Two-Step Approach” to Find MLOC from LOI.

そこから ΔO_2 を考えることで 1 mm 厚試料の MLOC(⊙) を求める (経路 2)。このときの経路 1 とは「厚み効果」、経路 2 とは「重力効果」のみを考えて定まる曲線である。経路 2 については Gr.1 が理論式を求めるところまで進みつつあるため、残すは経路 1 を理論的に記述することができれば、命題である「●から⊙を予測せよ」という操作を理論的に可能にする見通しが立つ。これにより、FLARE の目的を達成することができる。Gr.4 の課題はこの厚み効果である LOI 曲線を理論的に得ることにある。

ここまで長々と綴ってきたが、FLARE の平板材料について、どのような物理考察に基づき LOI⇒MLOC への読み替えを行うかという手順と概念は上記の通りである。繰り返しになるが、我々 Gr.4 のタスクは上記の概念創出と、ここで残された課題である「厚み効果」に相当する LOI 曲線を求めることにある。現在、この LOI 曲線を求めるにあたり、1G 下での燃焼限界時の挙動をどのようなモデル化すべきかを検討するため、様々な計測・解析を試みている。以下、その一部を紹介する。

3. 「厚み効果」のモデル化に関する取り組み事例

3.1 試験片厚みが消炎限界に与える影響

Figure 7 に数種類の素材 (PC: ポリカーボネート, PMMA: ポリメタクリ酸メチル, ABS: ABS 樹脂, GFRP: ガラスエポキシ樹脂) に対して ISO4589-2 で定められた試験手順により厚みの異なる試験片で得られた限界酸素濃度 (この図中では Oxygen Index と表記) の結果 (いわゆる LOI 曲線) を示す。これは単に一例ではあるものの、図からわかるように、LOI に対する厚み効果は明確に存在する。材料に依存せず概ね共通した傾向とは、厚みと限界酸素濃度には正の相関があり、厚みが増すほど限界酸素濃度も高くなる。また、材料種に応じて応答性が異なるが、ある範囲で線形近似が成立するようにも見える。限界酸素

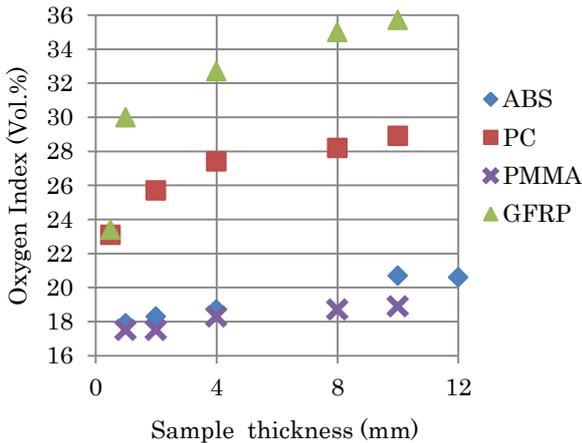


Fig. 7 Effect of Thickness on OIs (~ LOC) Under Various Kinds of Solid Specimen ⁷⁾.

濃度が低い材料 (PMMA, ABS) では、ここで調べた厚み範囲に対して線形近似が成立するように見えるが、限界酸素濃度が低い材料 (PC, GFRP) では、ある臨界厚み (PCでは 4 mm, GFRP では 1 mm) 前後で異なる線形関係が適用できるようにも見える。これについては別途モデル化のところで言及する。

Wharton ⁸⁻¹¹⁾ による一連の研究によれば、材料の熔融特性によって厚みが燃焼限界値に影響することが指摘されているが、ここで得られた厚みの影響は、例えば熔融しづらい GFRP でも発現するため、熔融の有無のみで説明されるものではない。あらゆる可能性を排除せず、どのようにしてこの限界値が決まり、また試料厚さがそれに与える影響を緻密に調べてゆくことが肝要であることが示唆される。

3.2 限界値を決める諸因子

ここでは、限界値を決める諸因子の中で試料厚みに関係するものを逐一検討した幾つかの例を紹介する。

3.2.1 試料厚みに依存した限界値を支配する物理要因

PMMA を対象にして、それぞれの試料厚みの試験片が限界値を迎える際の様子を調べ、まとめたものを Fig. 8 に示す。この図は各厚みの試験片の LOI を求める際、LOI よりも少し高い酸素濃度値から徐々に酸素濃度を低下させて、LOI を迎えるまでに火炎高さがどのように推移するかを示したものである。LOI が消炎限界 (にほど近い安定状態) であるならば、酸素濃度を低下させて LOI に向かうにつれて火炎高さは徐々に低下するものと考えられるが、厚い試料片の場合、突然 LOI を迎えることがわかる。観察の結果、火炎高さが 20 mm を超える場合は火炎が浮力の不安定性を示し、周期的に火炎長が変化する「フリッカリング/パフィンング」が起きることがわかった。つまり

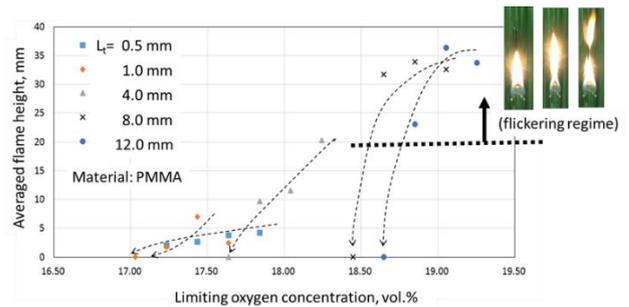


Fig. 8 Variation of Averaged Flame Height as The Limiting Condition Approaches. Arrows Indicate the Direction of Limit-Approaching Direction ¹²⁾.

この条件では、試料上部の炎の吹き飛びを支配する (拡散火炎) 基部に対して流入する速度が大きく変動し、その動的特性によって瞬時に吹き飛びが生じ、突然炎が消失して限界値 (OI/LOC) を迎えたと考えられる。そのような突発的な挙動は試料厚さが 4 mm 以下では見られず、酸素濃度の低下とともに火炎高さが 0 に漸近してゆく。この挙動は所謂「炎が小さくなって限界を迎える」固体燃焼の消炎状態であり、周期変動する浮力流によって突発的に起こる吹き消えとは異なる。

以上の結果から、異なる厚みの試料を用いて、同じ手順で (周囲酸素濃度を徐々に変化させて) 限界酸素濃度を得たとしても、得られた限界値は「異なる物理現象に起因して決まる」という事実があることがわかる。特に厚い試料において求まる限界条件はフリッカリング/パフィンングに起因するため、薄い試料の限界値の集合の延長線上にある可能性を保証しない。このような事実を確認することはモデリングの精度を高めるために極めて有意義である。

3.2.2 熱可塑性ポリマーの特徴

ここで調べようとする試料は熱可塑性ポリマーであり、多くは固体が加熱された後、(熔融潜熱を奪って) 熔融相となり、それが十分加熱されると (吸熱) 化学反応によって熱分解ガスが放出される。熔融開始温度およびガス化開始温度はそれぞれおよそ 450~500 K 程度および 690~800 K 程度である。そのため加熱により熔融状態として留まることが多く、熔融物が大量になると自重や粘性、表面張力で支えることができずに落下する、所謂ドリップが頻繁に起こる。既出の Wharton ¹¹⁾ は、材料の熔融特性によって厚みが燃焼限界値に影響することを指摘した。それによれば、熔融物がドリップすることで加熱に用いたエンタルピーの一部が燃焼領域から失われることで燃焼限界に至りやすくなる (= 限界酸素濃度が高くなる)。しかもドリップは試料厚みが厚い程盛んに起きるため、試料厚みが厚いほど限界酸素濃度が高くなる、と主張している (Fig. 9 にて概説)。

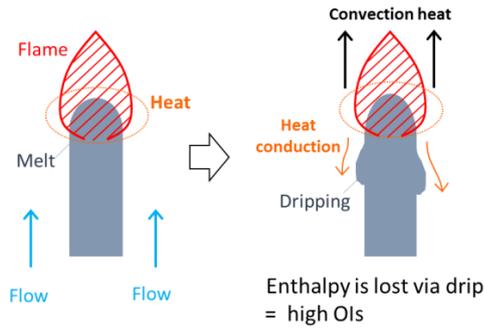


Fig. 9 Conceptual Figure How to Show Dripping-Off Affect OI (LOC).

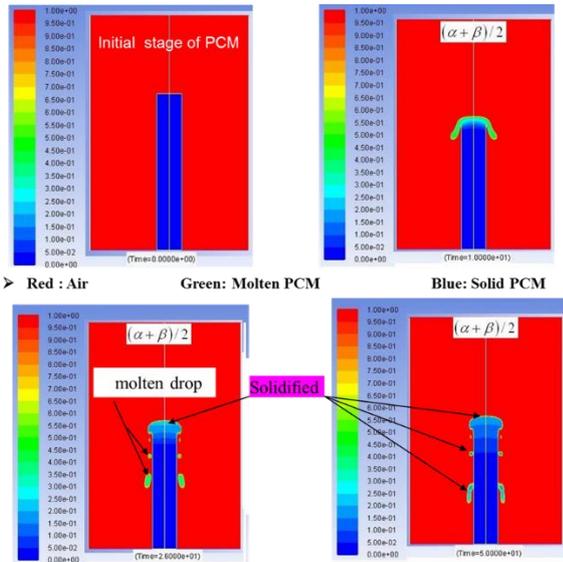


Fig. 10 Example of Simulated Dynamics of Molten Polymer (PCM).

これだけで一般的に見られる厚みの影響の全てを説明するには至らないが、溶融物が試料頂部に付着する具合、ドリップが起きる程度によって限界酸素濃度が変化するという事実は無視できない。

溶融物の存在が限界酸素濃度に与える影響を実験のみで調べることは困難であるため、FLARE Gr.4 では加熱による溶融（およびガス化）およびその落下過程を再現可能な数値解析スキームを開発し、これまで追求できなかった溶融の影響を数値的に検討することを試みている。Fig. 10 に現在までに得られた成果の一例を示す。今後は解析結果を分析・整理することで溶融物挙動が消炎にもたらす影響を詳細に検討してゆく予定である。

蛇足ながら、炭化（チャー化とも言う）する試料の場合、燃焼後に燃焼残渣が試料頂部に残される（Fig. 11 参照¹³⁾。このような場合、その残渣が体剤することによる影響（＝例えば炭化層からの輻射熱損失が増えるなど）が限界酸素濃度に与える影響を含める必要がある。

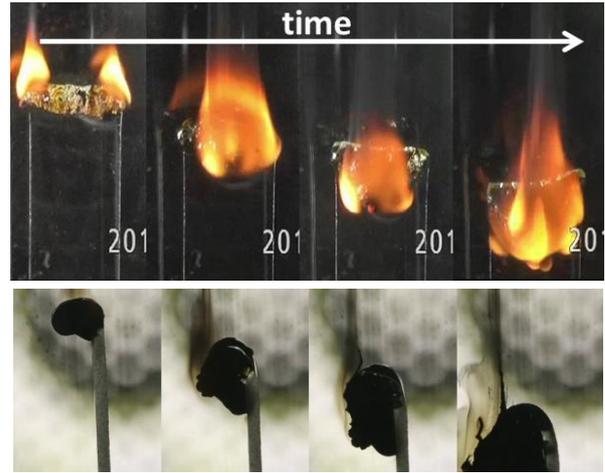


Fig.11 Effect of Residue on Burning Event (Material: PC, Thickness 1 mm). Top: Front View (Direct Picture), Bottom: Side View with Backlit. ¹³⁾

3.2.3 厚みに依存した重力影響の有無

微小重力下で低速の周囲流を与えた場合で、特に対向流（opposed）モードにおいては、火炎端部への酸素供給は十分なされるものの、火炎後流れにおいて酸化剤の供給が不十分となる所謂 oxygen shadow の影響で、火炎は「先端が開く（＝閉じない）」¹⁴⁾。この現象は試料の厚さに依らない、微小重力下且つ低速周囲流の条件で特有な現象である。着目すべきは、上記の組み合わせ条件が MLOC を与え得るため、燃焼限界をモデル化しようとした際、火炎から試料に伝わる熱は「(試料厚みに依らず火炎が存在する) 試料側面から入り込む」として考えられることにある。

一方で、通常重力下での下方火炎伝播においては、先に述べたように浮力流れが自然と形成されるため、どの試料厚みであっても微小重力場で観察されるような oxygen shadow が観察されず、常に火炎は「閉じる」。ISO4589-2 の試験が「キャンドル型燃焼試験」と呼ばれるのはこれが所以である。このように、火炎後流において火炎が閉じるか否かは、考慮する重力場によって全く異なり、それ故に燃焼持続を決定する因子が変わり得る。閉じた場合、火炎は試料端部近傍にも存在するため、端部を通じて試料を加熱し得る。

しかし、詳しく観察してみるとその違いが少し緩和される。例えば通常重力場において試料が薄い場合を例に挙げると、Fig. 12 で示されるように炎が試料上流部に回りこむ様子が明確に確認される。このとき、火炎先端部は閉じているため、火炎から試料に対して熱は側面以外に端部からも与えられる。ところが、試料厚みは薄く試料断面積は小さいため、試料端部から流入する熱は相対的に少なく、燃焼限界を決めるのにさほど影響しないと考えられる。この意味においては、薄い試料の場合は重力場に依存せず同じモードの燃焼が実現すると考えてもよい。

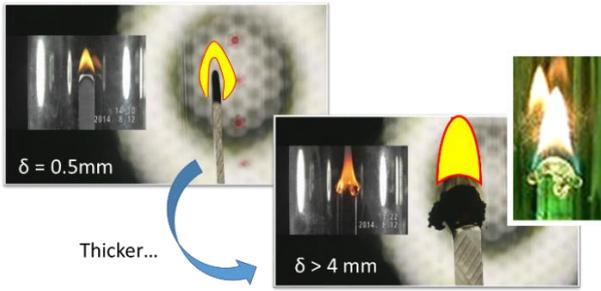


Fig. 12 Difference in Flame Appearance Depending on the Sample Thickness.

しかしながら、試料が厚くなるにつれてその状態では済まなくなる。通常重力場における厚い試料が限界酸素濃度近くで燃焼する場合、炎は（薄い試料のときのように）側面を上流まで回りこむ量が少なく、むしろ試料端部より上（後流）に「へばりつくようにして」存在する。このときの火炎から試料への主たる熱供給経路は（明らかに）試料端部からであることは容易に推測される。つまり、厚い試料になると、重力レベルによって燃焼モードが異なるのである。具体的には、低重力では側面からの熱流入が支配的である一方、通常重力では端部からの熱流入が支配的となり得る。

4. 今後取り組むべき課題

4.1 厚み影響モデル化に向けて

厚み影響をどのようにモデル化すべきかを検討するにあたり、まずはこれまで得られた知見を基に思考実験してみたい。前項で示したように限界酸素濃度付近における燃焼モードをまとめると **Fig. 13** のようになる。ひとまず LOI 曲線のモデル化を考える際には、通常重力場での現象のみを扱えばよい。厚みが薄い極限を考えると、火炎から試料に与えられる熱は側面のみであるため、所謂「二次元燃焼モデル」を適用することが相応しい。前述の通り、これは微小重力場での燃え拡がり問題で適用するモデルと同一である。一方、厚みが厚い極限では側面が存在しないため、火炎は試料端部の上に「へばりつく」。ここで得られる燃焼現象とは推進剤の燃焼における燃料後退現象と同じであり、所謂「一次元燃焼モデル」を適用することが相応しい。なお、このような燃焼モードは微小重力場では実現されないことは先に述べた通りである。

では通常重力場で厚さ 4 mm の試料（＝板状材料の LOI を得る際の基準試料）ではどうであろうか。恐らくこの両者の極限の中間状態が現れ、火炎から試料への主たる熱輸送は試料側面および端部から同程度であろうことが推測される。ただし、限界酸素濃度近くになると燃え拡がり速度（＝燃料後退速度）は極めて遅く、火炎が試料周囲に滞在する時間（～燃え拡がり速度の逆数）は増加する。滞在

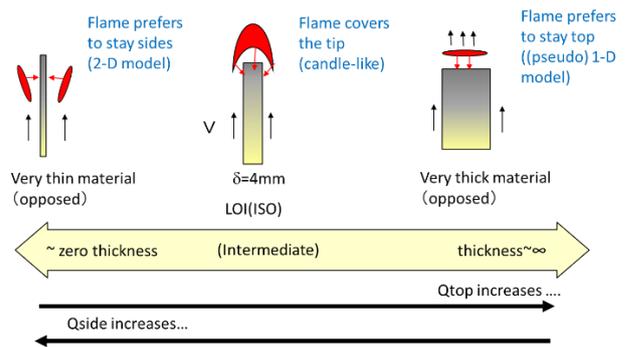


Fig. 13 Difference in Flame Configuration (Combustion Mode) Depending on the Sample Thickness.

時間が十分長ければ、固体内部の熱伝導に許される時間が長いので固体内部の温度分布は厚さ方向に均一に近づく。もしそうならば、火炎はキャンドル型（＝軸対称二次元的）の形状を示しつつも、固体内部は一次元的な温度分布になるものと予測される。したがって、固体内部の温度分布を予測するには一次元燃焼モードをベースにモデル化してゆくことが適すると考えられる。

このような思考実験だけでは、実際に ISO4589-2 で得られる LOI（厚さ 4 mm の試料の限界酸素濃度）がどのような燃焼モードによって実現されているのか確定できない。そのため、例えば精密な計測を通じて固体内部の熱状態がどのようなになっているのかを知ることができれば、限界状態がどの燃焼モードによって支配されているのかが明確となり、ひいては LOI 曲線を理論的に求められると期待される。したがって Gr.4 では、燃焼物内部あるいは周囲の温度分布を精密に計測して、厚さに依存した燃焼モードを特定することに重点的に取り組んでいる。

4.2 モデル化を支える計測

上記に示した通り、燃焼限界近傍での気相から固体へフールドバックされる熱量（分布）、固体内部の温度分布などを精密に計測することができると、限界付近での燃焼現象がどの燃焼モードで支配されているのかを推定でき、ひいては LOI 曲線を理論的に求めることが可能となると期待される。ただし計測対象は「燃焼限界付近（消炎限界付近）」であることから、些細な擾乱が炎を消失させてしまう可能性もあるため、それを避けながら計測を行わなければならない。現在、FLARE Gr.4 では、慶應義塾大学の横森准教授の協力を得て、非接触温度計測法である「燐光 2 色法の原理を用いた固体内部の温度センシング」¹⁵⁾ を推進すると共に、燃焼面端部周辺の温度分布を微細な熱電対を用いた計測 ¹⁶⁾ により燃焼限界付近での温度分布を取得している。後者の例を **Fig. 14** に示す。試料上部に 0.4 mm の斜め 45° の貫通穴を設け、そこに直径 50 μm の微細 R

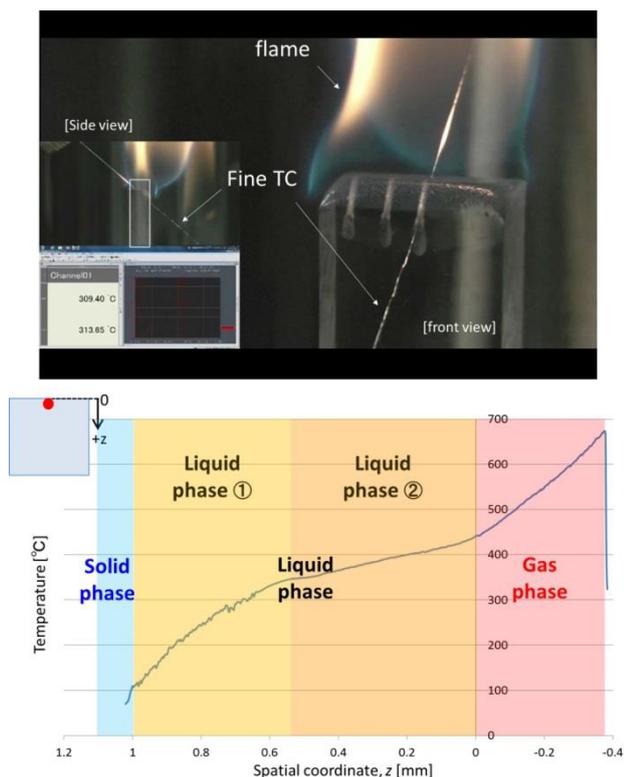


Fig. 14 Temperature Measurement of Solid/Liquid PMMA Via Diagonally-Allocated Fine Thermocouple. Top: Outlook of the Test, Bottom: Typical Example of Obtained Temperature Distribution.

型熱電対を通す。両端は専用治具で固定し、緩やかな張力を与えておく。これにより熱電対のセンサ部 (= 計測位置) は空間に固定されることになる。初期状態としてセンサ部は頂部表面より数ミリ下の位置に配置しておく。この状態で ISO4589-2 の試験手順に沿ってバーナで加熱着火させると、燃焼の進行に伴い端部が徐々に降下していくとともに、熱電対のセンサ部は固相から液 (= 熔融) 相に入り、最終的には気相に抜ける。熱電対の時間履歴を燃え上がり速度を用いることで位置座標に変換すれば、温度分布が得られる (Fig. 14 下図参照)。温度分布から、液相には明確な 2 領域が存在し、これが熔融相における気泡の影響であることが明らかとなってきた。このような情報はモデル化に際して極めて有意義である。

なお、この話をするに「わざわざ斜めに穴など開けなくても、真横に貫通させて熱電対を水平に張ればいいじゃないか」と質問されることも多々あるが、熱電対のセンサ部は熔融相を通過することにご注意いただきたい。もし水平に張れば、センサ部が熔融相に入ったとき、粘性によってセンサ部が引っ張られて空間に固定することが難しくなる (極細の熱電対を用いればなおさらである)。もちろん熱電対に強い引張力を加えることで (理論的には) 位置変

動を回避することが可能であるが、極細熱電対の接合部は極めて脆いため、大きな張力をかけると破損してしまう。これらの問題は、もともと試料に斜めに貫通穴を設けてそこに熱電対を張っておくことで解消される。例えば、センサ部が液相と気相の界面を通過する状態においては、貫通穴の一部は固体のままである。そのため、熔融相による粘性力によりセンサ部がひっぱられたとしても、その変位は無視できるほど小さいであろう。大きな張力を与えずともこれが実現できるため、センサ位置を空間に固定するという命題を実行できる。

5. 本稿のまとめ

本稿では、FLARE プロジェクトにおける目標の一つ：LOI からどのようにして浮力流のない場の燃焼状態を予測するか に関する方法論の提案を中心に、これまでの取り組みの一部を紹介し、今後取り組むべき課題を紹介した。「厚み効果」と「重力効果」を独立に考え、それぞれをモデル化することで、LOI から微小重力場における燃焼限界酸素濃度を与えることができる方法論を解説した。

厚み効果をモデル化するためには、厚みが異なる場合にどのような燃焼モードで限界を迎えるのかを知ることが必須となる。したがって、燃焼する試料周囲の温度分布の計測、熔融物の挙動を捉える数値計算など、様々な課題が山積しているが、それらを今後一つずつ解決してゆく予定である。FLARE プロジェクトでは、本概念をベースに ISO 化することが予定されており、それに伴い様々な課題をタイムリーにクリアしてゆくことが求められよう。今後の展開に興味をもっていただけたら大変幸いである。

謝辞

本研究は第 3 期「きぼう」利用に関する重点課題: FLARE の一環として実施されたものである。本プロジェクト推進には数多くの関係各位の協力を得て実施している。特に、文字通り「寝食を惜しんで」本プロジェクト研究に従事してくれた (あるいは現在進行形の) 博士研究員 (Dr. A. Hossain, Dr. Y.K. Kim), 大学院生・学部生諸氏 (木澤, 水口, 野田, 菅村, 濱上) の協力は不可欠なものである。また、固体内部の温度計測には慶應義塾大学 横森准教授に多大な尽力をいただいている。各位の献身的な支援・協力を心より感謝する。

参考文献

- 1) O. Fujia: Proc. Combust. Inst., **35** (2015) 2487.
- 2) NASA-STD-6001 B, Flammability, Offgassing, And Compatibility Requirements And Test Procedures, NASA, 2011.

- 3) ISO/TS 16697:2012, Space Systems -Safety And Compatibility of Materials - Method To Determine The Flammability Thresholds Of Materials, 2012.
- 4) ISO4589-2 Plastics-Determination of Burning Behaviour by Oxygen Index Part 2, Ambient-temperature Test.
- 5) W.J. Dixon, and A.M. Mood: J. American Statistical Association, **43** (1948) 109.
- 6) F.E. Fendell: J. Fluid Mech., **21** (1965) 281.
- 7) A. Hosogai and Y. Nakamura: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **32** (2015) 320406.
- 8) R.K. Wharton: Fire and Materials, **3** (1979) 39.
- 9) R.K. Wharton: Fire and Materials, **5** (1981) 6
- 10) R.K. Wharton: Fire and Materials, **6** (1981) 73
- 11) R.K. Wharton: Fire and Materials, **5** (1981) 93
- 12) Y. Nakamura, K. Kizawa, S. Mizuguchi, A. Hosogai and K. Wakatsuki: Fire Technology, NIST Special Publication 1189.
- 13) A. Hosogai, Y. Nakamura and K. Wakatsui: Proc. Thermal Eng Conf., Tokyo 2014.10, C131
- 14) P. Kuldeep, Y. Nakamura, S. Olsom, O. Fujita, K. Nishizawa, K. Ito and T. Kashiwagi: Proc. Combust. Inst., **29** (2002) 2553.
- 15) T. Yokomori, T. Matsumoto, T. Yamanaka, S. Ogi and Y. Nakamura: Proc. JSASS-2014-4630, Nagasaki, 2014.11 3D11
- 16) F. Noda, A. Hosogai T. Yokomori and Y. Nakamura: Proc. ISPS-6/ITTW2015, 17Com-10 (on USB).