

韓国建設技術研究院（韓国） 研修報告書

水素燃焼の可視化システム開発

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 田中 啓太

1. はじめに

この度、韓国建設技術研究院に9月2日～9月16日の期間でインターンシップとして研修を行った。以下にインターンシップの研修について報告する。

2. 研修/共同研究課題の決定

研修先に韓国建設技術研究院を選定した理由は、以前から指導教員との交流があり、現在ガス爆発という同じ研究テーマで共同研究を行っているからである。現在、我々と韓国建設技術研究院は水素都市の開発に携わる研究を行っており、ガス爆発による被害予測などの安全に関する実験を行っている。ガス爆発の事故の発生時、考慮すべき被害として、輻射熱、飛散物や爆風圧などが挙げられる。その中でも、爆風圧は身体の内部に致命的な被害を与えるため、特に重要視される。ガス爆発は火炎伝播を伴う現象である。そのため既往の研究において爆風圧の規模を火炎伝播挙動から見積もることが試みられてきた。このためこのリスクアセスメントにおいて、火炎を可視化する技術は必要不可欠である。また特に大規模でのガス爆発の際に生じる火炎の加速現象について、我々と以前から共同研究を実施していた。今回、同様に海外派遣された上田さんの共同研究課題である「純酸素燃焼における火炎の不安定性」は、中規模のガス爆発であっても大規模での実験と同様に火炎の加速現象を観察することが可能である。今回その中規模爆発実験の機会を得ることが出来たため、それに伴い、この共同研究課題を選定した。

3. 研修/共同研究スケジュール

以下に共同研究先でのスケジュールを示す。

						9月2日
						土
						広島空港からソウル市内まで移動
9月3日	9月4日	9月5日	9月6日	9月7日	9月8日	9月9日
日	月	火	水	木	金	土
ソウル市内から市内まで移動	実験道具確認 施設内案内	実験	データ解析	データ解析	可視化についてデータ共有	ソウル観光
9月10日	9月11日	9月12日	9月13日	9月14日	9月15日	9月16日
日	月	火	水	木	金	土
ソウル観光	追加実験	データ解析	データ解析	資料作成	実験結果についてデータ共有	ソウル市内から広島空港まで移動

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

韓国建設技術研究院 KICT : Korea Institute of Civil engineering and building Technology) は韓国で唯一の政府出資の建設時術分野の研究機関である。水素都市の実現に向けた、水素の安全性に関する研究を行っており、水素安全に関する最先端の技術、実験設備を所有している。その中でも、建築火災や爆発などの安全に関する研究部署をインターンシップの派遣先として決定した。この研究部署は、近年水素ガスを利用した都市の開発というプロジェクトに携わっており、私の所属する反応気体力学研究室とも共同研究を行っている。

5. 研修/共同研究の内容

一般的に、肉眼で見ることが出来ない気体の微細な密度変化の可視化にはシュリーレン法が用いられることが一般的である。シュリーレン法とは、屈折率がわずかに異なる部分を持つ透明体に光線を通したとき、進行方向が変化することを利用して、密度の境界を可視化する手法である。燃焼、噴霧、高速噴流、高速飛翔体、衝撃波等を可視化することが可能である。この手法は可視化の感度において、圧倒的に優れているが、一方で欠点を備えている。それは大掛かりかつ緻密な光学系を必要とする点である。その設置は非常に精密に行う必要があり、また大きなスケールのレンズは入手困難であるなど大規模実験には向いていない。そこで、高速度カメラと画像処理のみでシュリーレン法と同様、密度勾配を可視化することが出来る BOS 法(Background-oriented Schlieren method)が注目されている。

BOS 法は密度勾配を生じる撮影対象を通して背景を撮影し、背景のみの画像と撮影対象を含んだ画像に画像処理を行い、背景画像の変位量を得ることで、屈折率の変化を得ることが出来る手法である。これによってシュリーレン法と同様、光線に沿った積分値として密度勾配の分布を知ることが出来る。参照画像と計測画像の比較には PIV などで用いられる相互相関法が用いられ、変位ベクトルが算出される。BOS はその設置の容易さが大きな特徴であり、接地の自由度や利便性が高い。これは光学機器と繊細な光軸調整を必要とする従来のシュリーレン法と比較して、非常に有用な密度勾配の可視化方法であるといえる。

しかしながらこの BOS 法を密度勾配の可視化法として考えるとき課題が複数存在する。第一に誤ベクトルの除去が必要であること、第二に相互相関計算の処理負荷から、画素の増加に伴って、即時の出力が難しいこと、第三に相互相関計算に必要となる検査領域と探査領域を適切に設定することである。このように BOS 法は画像の出力の即時性と明瞭性において解決すべき問題を抱えている。

以上のように BOS 法は解決すべき問題を抱えてはいるが、光学装置がカメラと背景のみであるという点を考えると非常に魅力的な可視化法であるといえる。そこで上記の問題を解決するために、設置の自由度が高く、利便性が高い、発展的な密度勾配の可視化として開発されたのが S-BOS 法(Simplified-BOS 法)である。S-BOS 法は、周期的な輝度変化を持つ背景画像を用い、相互相関計算を経ずに密度勾配を可視化する方法として提案された手法である。

本研究では上記の S-BOS 法を用いて中規模の水素・酸素混合気火炎を可視化することを目的とした。図 1 に実験図を示す。あらかじめ混合ポンプを用いて混合させた水素酸素混合気を用いて半球状のシャボン玉を膨らませ、シャボン玉中心に設置されている電極間で放電を発生させることで着火を行った。撮影は S-BOS 法を用いて水素酸素火炎の可視化を行った。高速度カメラを設置し、シャボン玉を挟んで反対方向に縞模様の背景を設置する。背景を照らすため、2つの光源を設置した。実験条件として、室温・大気圧下で当量比を 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 と変化させて実験を行った。

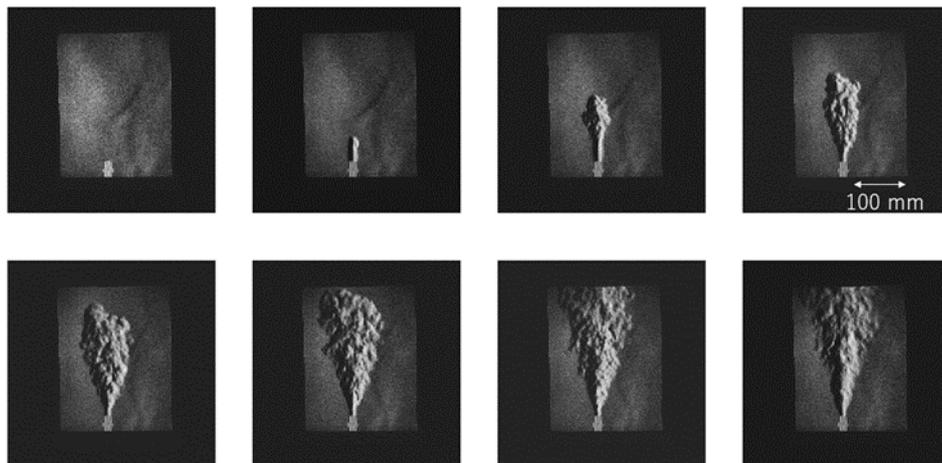
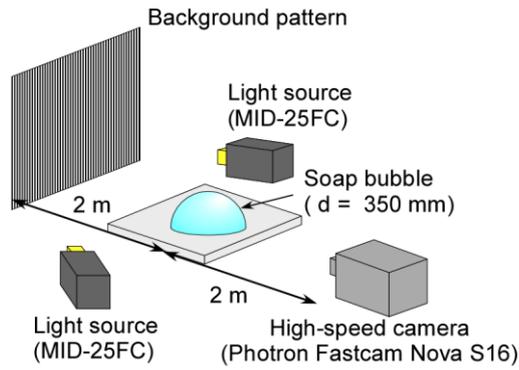


図 2 : 水素漏洩の可視化

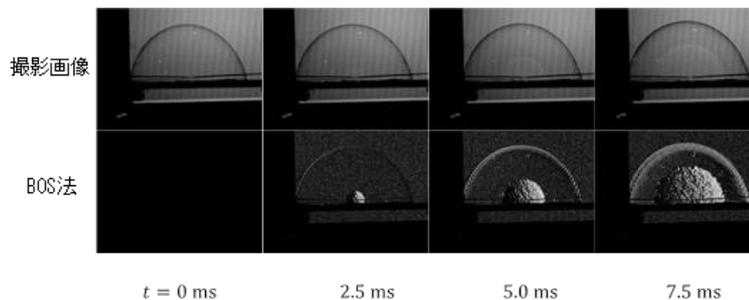


図 3 : 火炎の可視化

図 2 は広島大学で実施した水素漏洩の可視化の予備実験の画像である。撮影速度 50 fps, 露光時間は 1ms で撮影した。8 枚の連続画像を BOS 処理しており、8 枚目から水素が徐々に漏洩しつつある様子が見て取ることが出来る。

図 3 は実験時に撮影された火炎画像と、BOS 法によって可視化された火炎画像を示す。図中の t は点火時からの経過時間を表す。時間の経過に連れてシャボン玉内を火炎が伝播している様子が可視化されている。

S-BOS 法ではシュリーレン法のような一軸方向の密度勾配の変化を画像の輝度値で表すとする。密度勾配を検出する方向に周期的な輝度変化を持つ背景を用意し、その差分を取ると位相差に応じた輝度値の変化が現れる。このとき、変化の中心に対して正負の出力が現れるため、差分のみでは画像の変

位方向に応じた出力を得ることが出来ない。そのためさらにその点での輝度の勾配との積を取ることにより、画像の変位方向に応じて振動の中心を基準に正負に輝度値を分ける。以上の過程を定式化する。

$$I(i,j)_{out} = (I(i,j)_{scn} - I(i,j)_{bkg}) \times \Delta I(i,j)$$

ここで、 $I(i,j)$ は i,j 番地の画素の輝度値、 $\Delta I(i,j)$ は i,j 番地の画素の輝度値の勾配を示す。添え字 out は出力画像、 scn は計測画像、 bkg は背景画像を示す。

また撮影条件として背景と被写体の距離には気を付ける必要がある。仮に、背景の近くに密度勾配があったとすると、光が曲がった時と同じ位置に結像してしまうためである。また反対に遠すぎると測定物がぼける。このときには絞り値を上げて被写界深度を深くして対応する。可視化はこの許容範囲内において行う必要がある。

6. まとめ

韓国建設技術研究院において中規模水素燃焼を可視化するために「水素燃焼の可視化システム開発」をテーマに研究を行った。水素・酸素混合気をシャボン玉に充填し、その中心で着火することで実験は行われた。

7. 謝辞

今回のインターンシップ派遣にあたって、多大なるご指導を賜りました金佑勁准教授、山本教授、工学系総括支援室の皆様、また、受け入れ先である KICT でご指導いただきました金洋均博士に心から感謝の意を表し、厚く御礼を申し上げます。
