

第77回米国糖尿病学会年次学術集会に出席して

膝島研究所長 安 波 洋 一

はじめに

膝島研究所では現在糖尿病の画期的な新規治療法を開発を目指して“生体内膝β細胞再生”に関するプロジェクトに取り組んでいる。糖尿病は膝臓内膝β細胞が産生する生体内で唯一の血糖降下ホルモンであるインスリンの相対的、絶対的不足により発症し、重症になればインスリン注射が必要になる。今回のプロジェクトでは膝β細胞障害に起因するインスリン不足に対し、生体内で新たに正常な膝β細胞を再生しようとするものである。具体的にはインスリン産生膝β細胞に関連した（体性）幹細胞を同定し、その幹細胞を標的にした治療法でインスリン産生膝β細胞を殖やす試みである。この研究は我々が独自に開発した膝島移植法を用い、この方法に限定して、移植膝島内β細胞が増加するという知見を基盤にしている。

さて、この研究には生理的環境下での膵β細胞の“発生”“分化”“加齢変化”“寿命”ならびに“障害と修復”に関し理解する必要があるが、現在まで多くが未解明で関連する新規知見は研究遂行上必須である。そのような観点より今回第77回米国糖尿病学会年次学術集会に出席し、これらについての最新情報の収集に努めた。米国糖尿病学会は全世界より毎年2万人以上が参加する、世界で最も水準が高く、また未公開情報の発表を推奨している糖尿病関連学会である。本稿では我々のプロジェクトに関連した発表を紹介する。

インスリン産生 β 細胞よりグルカゴン産生 α 細胞への転換 (trans-differentiation)。

Banting Medal は米国糖尿病学会が最も優れた業績を有する研究者（一人）に対し、毎年授与する最高の賞で本年はコロンビア大学 Domenico Accili 教授が選ばれ、受賞講演があった。彼は長年にわたり

FoxO1 という転写因子の膵β細胞分化に関する研究を行っており、その過程で膵β細胞特異的に FoxO1 欠損マウスを作成、その膵島では膵β細胞が減少し糖尿病になることを見出した。この膵β細胞減少は膵β細胞死ではなく、膵β細胞がグルカゴン産生膵α細胞に転換した結果であることを lineage tracing の手法を用いて実験的に証明した(文献1)。すなわち膵β細胞機能不全による糖尿病にはβ細胞からα細胞への転換(Trans-differentiation)によるカテゴリーがありうることを示した。この研究はまた一つの分化細胞が他の分化細胞に変わり得ることを示した点が高く評価されているが、更に重要な点は状況によっては逆にα細胞からβ細胞への転換の可能性があることを示唆している。糖尿病ではβ細胞は障害されるがα細胞は形態、機能共に温存されている。従って、α細胞からβ細胞への転換が実現し、その誘導因子を見いだせば糖尿病の全く新しい治療法となる。我々は早くからこの点に着目し、膵島移植の手法を用い、移植膵島を標的にした解析を行っている。この成果として、膵島を特殊な部位に移植すると移植膵島内にインスリンとグルカゴンが同一細胞質内に別々の顆粒として存在する細胞が出現することを見出しており、出現数、分布などよりこの細胞の起源はα細胞ではないかと考え実験を進めている。想定通りであれば移植膵島内でα細胞からβ細胞の転換が起こっていることとなり、その誘導因子を同定できれば糖尿病の全く新しい、画期的治療法となる。

膝β細胞再生

上記に加え、生理的にインスリン産生膵 β 細胞（量）が増加する機序を解析し、誘導因子を見出そうとする試みがある。その例として妊娠時膵 β 細胞量の増加がある^(文献2)。現在までにこの詳細は明らかではないが、欧米では移植に用いられなかった脳死

ドナー膵臓より単離したヒト膵島を移植に用いる実験研究が進められている。具体的には拒絶反応を起こさない免疫不全マウスにヒト膵島を移植、移植ヒト膵島が生着後にマウスを妊娠させ、移植膵島β細胞量が増加するかどうかの検索である。結果は妊娠マウスに移植したマウス移植膵島β細胞量は増加するがヒト移植膵島ではそのような変化はなかったとのことであった。ただ、次の実験としてヒト移植膵島に胎盤を同時に移植するとヒト膵島β細胞のラベリングインデックスが有意に増加したとのことで、現在その因子の同定に力が注がれている。この発表に関連して、我々は膵島の新しい皮下移植法を開発（論文投稿中）したが、この移植方法でのみ、マウス移植膵島β細胞量の増加、β細胞関連 mRNA の経時的増加を認めた。現在、米国の共同研究者から送られてきたヒト膵島を用いて実験を進めている。

もうひとつ、肥満に伴う膵β細胞量増加がある。肥満の初期段階では体重が増加すればインスリン必要量が増加し、その適応の為に膵β細胞量が増大、結果として膵島容量は大きくなる。更に肥満が進めば膵β細胞が疲弊しインスリンの生合成、分泌が不足するようになり糖尿病（2型）を発症する。この初期段階での膵島β細胞量増大機序ならびに誘導因子を見出そうとする試みがある。実験的にはマウス

に高脂肪食を給餌し、肥満を発症させると個々の膵島の大きさが明らかに増大し、膵β細胞量が増加する（図1）。我々は現在、肥満の移植膵島に於ける効果を検討している。

おわりに

今回出席した第77回米国糖尿病学会年次学術集会での発表に関し、膵島研究所で進めている研究プロジェクトに関連した内容を紹介した。膵島研究所では今後も独創性を有する質の高い成果を目指して研究を進める所存である。皆様方の一層のご支援をお願いしたい。

文献

1. C Talchai, S Xuan, HV. Lin, L Susse, D Accili. Pancreatic β Cell Dedifferentiation as a Mechanism of Diabetic β Cell Failure. Cell 150:1223-1234, 2012.
2. S Gargani, J Thévenet, JE. Yuan, B Lefebvre, N Delalleau, V Gmyr, T Hubert, A Duhamel, F Pattou, J Kerr-Conte. Adaptive changes of human islets to an obesogenic environment in the mouse. Diabetologia 56:350-358, 2013.

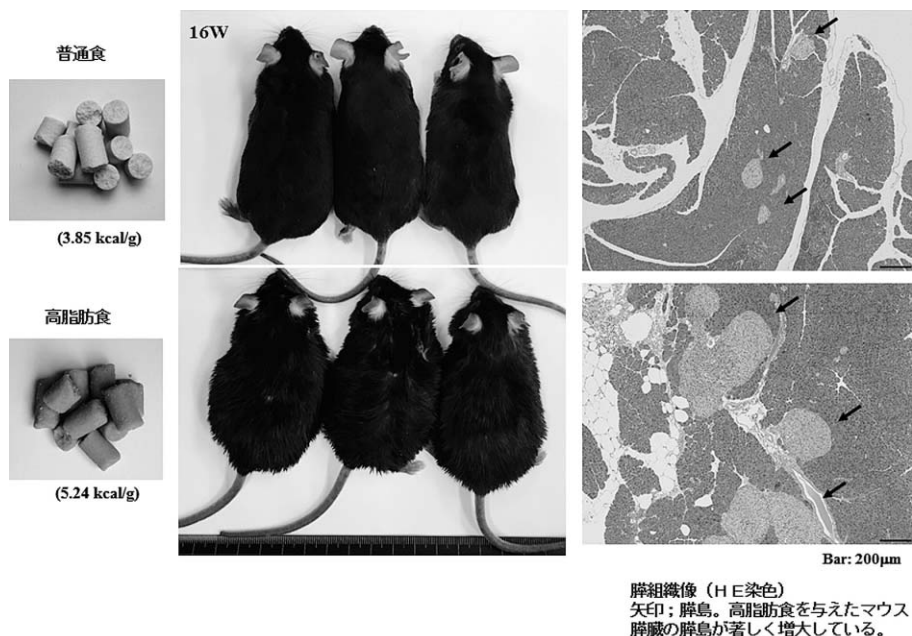


図1. 肥満と膵島増大

—血管内超音波を使用した検討—

図1

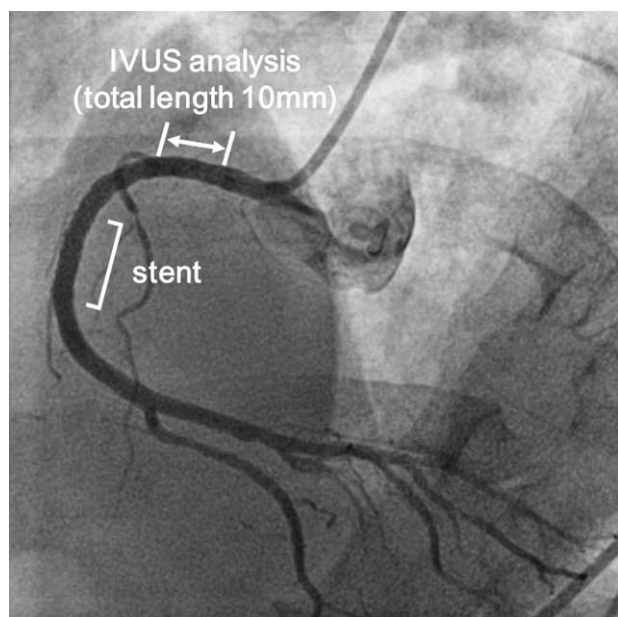


表1. ベースラインの患者背景

	Sitagliptin (n=28)	Non-DPP4-I (n=24)	P value
Age, y	70±9	71±10	0.47
Gender, Male (%)	22 (79%)	20 (83%)	0.74
BMI, Kg/m ²	24.8±4.1	25.1±4.1	0.85
Smoking, n (%)	4 (14%)	3 (13%)	1.0
Hypertension, n (%)	22 (79%)	19 (79%)	1.0
Dyslipidemia, n (%)	24 (86%)	21 (88%)	1.0
Hyperuricemia, n (%)	7 (25%)	7 (29%)	0.74
Prior MI, n (%)	3 (11%)	3 (13%)	1.0
Prior PCI, n (%)	8 (29%)	7 (29%)	0.96
Prior CABG, n (%)	2 (7%)	1 (4%)	1.0
Stent, n			
DES/BMS	25/3	24/0	0.24
Follow-up period, month	8.9±1.6	8.5±1.5	0.39
Medication at screening, n (%)			
DPP-4 inhibitor	16 (57%)	11 (46%)	0.42
Statin	21 (75%)	20 (83%)	0.52
Medication at baseline, n (%)			
Sitagliptin	28 (100%)	0 (0%)	—
Insulin	3 (11%)	11 (46%)	0.006
Biguanide	8 (29%)	11 (46%)	0.20
Sulfonylurea	3 (11%)	3 (13%)	1.0
α-GI	5 (18%)	10 (42%)	0.07
Glinide	1 (4%)	1 (4%)	1.0
Thiazolidine	2 (7%)	3 (13%)	0.65
Statin	26 (93%)	24 (100%)	0.49
Ezetimibe	0 (0%)	1 (4%)	0.46
EPA	3 (11%)	4 (17%)	0.69
ARB	18 (64%)	16 (67%)	0.86
ACE-I	3 (11%)	3 (13%)	1.0
CCB	19 (68%)	17 (71%)	0.82
β-blocker	4 (14%)	8 (33%)	0.19
Diuretics	5 (18%)	1 (4%)	0.20

DPP4-I, dipeptidyl peptidase-4 inhibitors; BMI, body mass index; MI, myocardial infarction; PCI, percutaneous coronary intervention; CABG, coronary artery bypass grafting; DES, drug-eluting stent; BMS, bare-metal stent; α-GI, α-glucosidase inhibitor; EPA, eicosapentaenoic acid; ARB, angiotensin II receptor blocker; ACE-I, angiotensin-converting enzyme inhibitor; CCB, calcium channel blocker.

3. 結果

IVUS の追跡調査ができなかった、または同意を撤回した23名の患者が除外され、最終的にシタグリプチン投与群28名と非投与群24名の患者が解析された。患者背景、臨床検査所見を表1、表2に示す。年齢、性別、高血圧、心筋梗塞・PCI・冠動脈バイパス術の既往、冠動脈病変の程度、血中LDLコレステロール値を含む脂質プロファイル、空腹時血糖、HbA_{1c}、血圧などは両群間での差は認めなかった。投薬状況については、インスリンがシタグリプチン非投与群でより多く使用されていたが、それ以外の薬剤の使用率に群間差はなかった。

表3にIVUSの結果、図2にIVUSイメージの一例を示す。一次評価項目であるプラーク容積率の変化値は両群間で有意差はなく、シタグリプチンのプラーク退縮効果は認めなかった [mean (95% CI): +0.7% (−1.4 to 3.5%) vs. +0.2% (−2.7 to 2.7%)]。二次評価項目の総プラーク容積の変化率も同様に有意な群間差はなかった。不安定プラークの指標である脂質性プラークおよび安定プラークの指標である

表2. 臨床データ

	Sitagliptin (n=28)	Non-DPP4-I (n=24)	P value (between group)
Baseline			
HbA _{1c} , (%)	7.2±1.0	7.3±1.2	0.96
FBS, mg/dL	114±38	108±28	0.47
LDL-C, mg/dL	95±33	87±26	0.49
HDL-C, mg/dL	47±12	49±14	0.54
TG, mg/dL	147±53	131±66	0.13
hsCRP, mg/dL	0.33±0.93	0.61±1.13	0.44
eGFR, mL/min/1.73m ²	64±15	61±17	0.34
UA, mg/dL	5.6±1.7	5.4±1.6	0.83
SBP, mmHg	126±13	131±19	0.56
DBP, mmHg	69±10	70±13	0.69
LVEF, (%)	65±10	66±10	0.67
Follow up			
HbA _{1c} , (%)	7.2±1.0	7.5±1.5	0.64
FBS, mg/dL	124±32	125±37	0.96
LDL-C, mg/dL	83±21	75±25	0.23
HDL-C, mg/dL	49±12	50±15	0.81
TG, mg/dL	138±59	114±65	0.07
hsCRP, mg/dL	0.19±0.29	0.11±0.14	0.78
eGFR, mL/min/1.73m ²	63±18	58±17	0.28
UA, mg/dL	5.5±1.7	5.4±1.5	1.0
SBP, mmHg	126±15	127±14	0.51
DBP, mmHg	69±10	67±11	0.38
LVEF, (%)	65±7	66±8	0.57

Data are presented as mean±SD. HbA_{1c}, hemoglobin A_{1c}; FBS, fasting blood sugar; LDL-C, low-density lipoprotein cholesterol; HDL-C, high-density lipoprotein cholesterol; TG, triglyceride; hs-CRP, high-sensitivity C-reactive protein; eGFR, estimated glomerular filtration rate; UA, uric acid; SBP, systolic blood pressure; DBP, diastolic blood pressure; LVEF, left ventricular ejection fraction.

線維性プラークの値についても、2群間の差は認めなかった。

4. 考察

本研究の結果、スタチンを中心とした適切な薬物治療が行われた2型糖尿病に冠動脈疾患を合併する患者において、DPP-4阻害薬シタグリプチンの冠動脈プラーク退縮効果は認められなかった。本研究での追跡時の血中LDLコレステロール値は両群とも

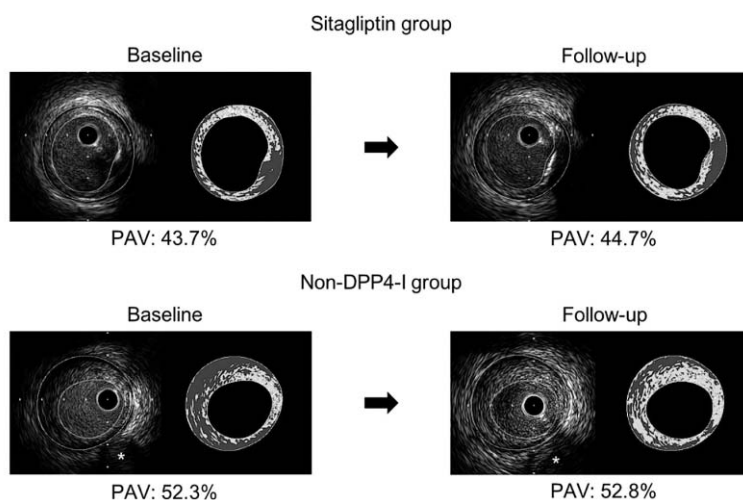
にスタチン投与により、わが国の2次予防ガイドラインが推奨する基準値(100mg/dL)を大幅に下回っており、群間差はなく(シタグリプチン投与群: 83 ± 21 mg/dL、非投与群 75 ± 25 mg/dL)、非常に良好であった。追跡時の収縮期血圧(シタグリプチン投与群: 126 ± 15 mmHg、非投与群 127 ± 14 mmHg)および拡張期血圧(シタグリプチン投与群: 69 ± 10 mmHg、非投与群 67 ± 11 mmHg)も同様に、ガイドラインが推奨するアンジオテンシンII受容体拮抗薬

表3. シタグリプチン群と対照群の冠動脈プラークの変化

	Sitagliptin (n=28)	P value (within group)	Non-DPP4-I (n=24)	P value (within group)	P value (between group)
Gray-scale IVUS parameters					
Baseline					
PAV, %	50.2 \pm 9.3		49.2 \pm 11.8		0.68
TAV, mm ³	72.1 (61.0 to 98.4)		70.0 (57.2 to 90.0)		0.42
Vessel volume, mm ³	150 (124 to 198)		142 (117 to 172)		0.39
Lumen volume, mm ³	78.2 (58.2 to 95.4)		68.1 (46.9 to 94.2)		0.44
Follow up					
PAV, %	51.3 \pm 9.8		49.4 \pm 11.9		0.48
TAV, mm ³	71.8 (59.6 to 105)		72.6 (56.0 to 87.6)		0.51
Vessel volume, mm ³	153 (119 to 198)		143 (114 to 171)		0.51
Lumen volume, mm ³	71.1 (57.1 to 89.0)		65.0 (46.5 to 96.0)		0.69
Nominal change					
PAV, %	0.7 (-1.4 to 3.5)	0.26	0.2 (-2.7 to 2.7)	0.85	0.49
Regression, n (%)	13 (46.4)		10 (41.7)		0.73
Progression, n (%)	15 (53.6)		14 (58.3)		
TAV, mm ³	-0.6 (-4.7 to 6.6)	0.89	1.3 (-1.9 to 5.0)	0.27	0.59
Vessel volume, mm ³	-1.9 (-5.9 to 1.7)	0.07	0.5 (-2.8 to 2.2)	0.97	0.14
Lumen volume, mm ³	-1.3 (-8.4 to 0.2)	0.016	0.2 (-3.7 to 3.0)	0.74	0.14
Percent change, %					
TAV, mm ³	-1.3 (-5.4 to 8.7)	0.91	1.6 (-5.9 to 7.0)	0.60	0.73
Vessel volume, mm ³	-1.4 (-3.1 to 0.9)	0.05	0.3 (-2.7 to 1.6)	0.85	0.27
Lumen volume, mm ³	-2.5 (-12.2 to 0.4)	0.020	0.4 (-7.3 to 6.8)	0.98	0.13

Data are presented as mean \pm SD or median (interquartile range). DPP4-I, dipeptidyl peptidase-4 inhibitors; PAV, percent atheroma volume; TAV, total atheroma volume.

図2



DPP4-I, dipeptidyl peptidase-4 inhibitors; PAV, percent atheroma volume

を中心とした薬物療法により、治療目標値以下にコントロールされていた。このような LDL コレステロール値および血圧が厳格に治療されている患者では、DPP-4 阻害薬シタグリプチンの抗動脈硬化作用は発揮されない可能性が示唆された。

実際に脂質と血圧が管理された患者における複数の大規模試験においても、DPP-4 阻害薬の安全性は確認されたが、心血管イベント抑制効果は認めなかった⁽⁷⁻⁹⁾。さらに、心血管イベント抑制のためには厳格な血糖コントロールだけではなく、血圧と脂質を含めた集約的な治療介入が重要であることも報告されている⁽¹⁰⁾。本研究の結果からも、2 型糖尿病に冠動脈疾患を合併するようなハイリスク患者では、やはり血糖コントロールに加えて脂質と血圧の管理が重要性であることを再確認することができた。

3. 結論

スタチンを中心とした厳格な 2 次予防のための薬物治療が行われた 2 型糖尿病に冠動脈疾患を合併する患者において、DPP-4 阻害薬シタグリプチンの冠動脈プラーク退縮効果は認めなかった。このようなハイリスク患者では、血糖管理に加えて脂質と血圧の包括的治療が重要である。

Disclosures:

This work was supported by grants-in-aid from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (Nos. 23590699 and 26460664). Keijiro Saku (KS) is a director and Shin-ichiro Miura (SM) is a member of NPO Clinical and Applied Science, Fukuoka, Japan. KS and SM had received a grant from the Public Interest Incorporated Foundation of “Clinical Research Promotion Foundation” in Fukuoka, Japan, and part of the work was transferred to NPO Clinical and Applied Science, Fukuoka, Japan. KS has an Endowed Department of Molecular Cardiovascular Therapeutics at Fukuoka University supported by MSD Co., Ltd. and SM is a member of the Department. KS also has an Endowed Department of Community and Emergency Medicine at Fukuoka University supported by Izumi City, Kagoshima, Japan.

文献

- 1) Sarwar N et al. Diabetes mellitus, fasting blood glucose concentration, and risk of vascular disease: a collaborative meta-analysis of 102 prospective studies. *Lancet*. 2010;375:2215-2222.
- 2) Di Angelantonio E et al. Association of Cardio-metabolic Multimorbidity With Mortality. *JAMA*. 2015;314:52-60.
- 3) Patel A et al. Intensive blood glucose control and vascular outcomes in patients with type 2 diabetes. *N Engl J Med*. 2008;358:2560-2572.
- 4) Matsubara J, Sugiyama S, Akiyama E, Iwashita S, Kurokawa H, Ohba K, et al. Dipeptidyl peptidase-4 inhibitor, sitagliptin, improves endothelial dysfunction in association with its anti-inflammatory effects in patients with coronary artery disease and uncontrolled diabetes. *Circ J*. 2013;77:1337-1344.
- 5) Ervinna N et al. Anagliptin, a DPP-4 inhibitor, suppresses proliferation of vascular smooth muscles and monocyte inflammatory reaction and attenuates atherosclerosis in male apo E-deficient mice. *Endocrinology*. 2013;154:1260-1270.
- 6) Mita T et al. Alogliptin, a Dipeptidyl Peptidase 4 Inhibitor, Prevents the Progression of Carotid Atherosclerosis in Patients With Type 2 Diabetes: The Study of Preventive Effects of Alogliptin on Diabetic Atherosclerosis (SPEAD-A). *Diabetes Care*. 2016;39:139-148.
- 7) Green JB et al. Effect of Sitagliptin on Cardiovascular Outcomes in Type 2 Diabetes. *N Engl J Med*. 2015;373:232-242.
- 8) White WB, Cannon CP, Heller SR, Nissen SE, Bergenstal RM, Bakris GL, et al. Alogliptin after acute coronary syndrome in patients with type 2 diabetes. *N Engl J Med*. 2013;369:1327-1335.
- 9) Scirica BM et al. Saxagliptin and cardiovascular outcomes in patients with type 2 diabetes mellitus. *N Engl J Med*. 2013;369:1317-1326.
- 10) Gaede P et al. Effect of a multifocal intervention on mortality in type 2 diabetes. *N Engl J Med*. 2008;358:580-591.

煙火組成物の発火・爆発危険性

安全システム医工学研究所長
安全システム医工学研究所
工学研究科

加藤勝美
東英子
古荘貴章

1. はじめに

「煙火」、あまり聞きなれない言葉であるが、火薬類取締法における「花火」の正式名称である。単に煙火といった場合は、打上げ花火を意味し、コンビニで売っているような花火は、玩具煙火と言う。

安全システム医工学研究所（以下、本研究所）では、昨年より煙火組成物の発火、爆発危険性に関する研究を日本煙火協会および産業技術総合研究所と協同して実施している。本稿では、その研究の一端を紹介する。

2. 煙火組成物の危険性

煙火は夏の夜空を彩る日本の伝統美であるが、近年においても消費や製造中における爆発事故が後を絶たない現実がある。と、本稿を書いている最中にも香川県坂出市の煙火工場で爆発事故が起こったようであるし、昨年も静岡県藤枝市の煙火工場にて死者、重傷者を出す大規模な爆発事故が起きている。煙火の危険性は、煙火を構成する組成物のほぼ全てが火薬であることに起因している。さらに、近年では、煙火の展開時の新しい色や効果を発現させるため危険性未知の様々な化学物質が煙火組成物に混合されており、危険性はさらに増大しているものと考えられる。

一般的に、火薬類は、叩く、擦るなどの強い外力が加えられた際に、発火、爆発を起こすことがある。煙火製造時には、煙火組成物の付着物を木槌で叩くなどの作業が普通に行われているようであるから、打撃などに対する安全対策を十分に行う必要がある。一方、わが国における煙火製造は家内工業にて行われることが多く、安全対策は、職人の経験のみに委ねられることが多い。例えば、煙火組成物を湿潤化

して打撃などに対して鈍感にする方法が取られるケースが多いと言うが、実際のところ、水と反応する化学物質は数多あり、全ての煙火組成物に対して有効な方法であるか疑問が残る。

3. 落槌感度試験

火薬類の打撃感度を計測する手法の一つに、落槌感度試験がある。この試験は、5kg の重りを様々な高さから試料へ目掛けて自由落下させ、試料が爆発するエネルギーを計測する方法である。極めて古典的な手法ではあるが、直接的に爆発するエネルギーを測定できる方法であるため広く火薬類の安全性評価に用いられている。しかしながら、この試験方法自体にも幾つかの問題点もあるようである。表1は、異なる2つの文献から抜粋した笛音薬（てきおんやく、笛のような音を発生させる組成物）および色火薬（いろびやく、煙火展開時に色を発生させる組成物）の感度を示している。この表における感度は、JIS K4810 に従って8段階に等級分けされており、1級が最も打撃に対して鋭感、8級が最も打撃に対して鈍感であることを示している。表から文献1と2で結果が全く異なっていることが一目して分かる。しかも、同じ試料でも1級から8級までのバラツキがあるため、この結果から試料の安全性を推し量ることができない。

落槌感度試験結果が異なる要因としては、試料の

表1 落槌感度試験結果（文献値）

	落槌感度等級	
	文献1[1]	文献2[2]
笛音薬	1	8
色火薬	1	8

粒度や試験装置の若干の仕様の違いなど様々なものが考えられるが、前述のように、湿潤状態によって感度に変化すると言われていることから、試験時の湿度も試験結果に影響を及ぼしている可能性がある。

4. 打撃感度に及ぼす湿度の影響

上記の結果を受けて、煙火組成物に対して低湿条件および高湿条件において落槌感度試験を実施し、煙火組成物の打撃感度に及ぼす湿度の影響を調査した。

実験試料は笛音薬および色火薬とした。加温して低湿条件（6～26Rh%）および高湿条件（81～87Rh%）に調整したグローブボックス内に実験試料を静置した。その後、湿度や試料吸湿量が変化しないようにシールをして、落槌感度試験に供した。落槌感度試験には、JIS K4810 記載の試験装置を用いた。アップダウン法^[3]で40～60回の落下試験を行い、各落高（10.0～113.0cm）における爆発確率を算出した。

表2および3に実験結果を示した。表2より、低湿条件における笛音薬は、33.7cm以上落高で爆発が観察されたが、高湿条件では最大落高である113.0cmにおいても爆発が認められなかった。試料の吸湿により鈍感化したものと考えられる。

一方、色火薬の場合（表3）、高湿条件における感度はバラツキが大きく、爆発確率の分布が低湿条件のそれと比較して広い。また、低湿条件では爆発しない比較的低い落高においても、高湿条件では爆発するケースが見られた。この結果は、笛音薬の場合とは逆の傾向であり、試料の種類によっては、吸湿により鋭感化することを示す結果である。

これらの感度の変化は、JIS K4810 の危険等級で考えると、笛音薬の場合、概ね5～6級（低湿条件）から8級（高湿条件）へ変化したことに対応し、色

表1 笛音薬の爆発確率と落高の関係

落高 [cm]	低湿条件 爆発確率	高湿条件 爆発確率
113	—	0/15
67.3	2/2	—
56.6	3/5	—
47.6	9/12	—
40.0	9/18	—
33.6	7/16	—
28.3	0/7	—

表2 色火薬の爆発確率と落高の関係

落高 [cm]	低湿条件 爆発確率	高湿条件 爆発確率
80.0	—	3/3
67.3	—	3/5
56.6	—	2/4
47.6	3/3	1/2
40.0	11/13	1/1
33.6	15/25	1/1
28.3	2/17	1/1
23.8	0/2	3/3
20.0	—	12/14
16.8	—	6/17
14.1	—	1/6
11.9	—	2/2
10.0	—	0/1

火薬の場合では、5～6級（低湿条件）から3級（高湿条件）に変化したことに対応する。したがって、湿度は、表1における結果の相違の要因の一つに成り得るものと考えている。

5. まとめ

本稿では、煙火の発火・爆発危険性に関して概説し、本研究所で最近実施した煙火組成物の打撃感度に及ぼす湿度の影響に関する研究について紹介した。

研究結果から、試験中の雰囲気湿度や試料吸湿量により感度試験結果が変化することが確認され、湿度は、試験結果のバラツキや誤差の要因と成り得ることが示唆された。また、経験的に、湿潤した煙火組成物は鈍感化されているが、煙火組成物の種類によっては、湿潤により鋭感化する場合もあることが示唆された。

参考文献

- [1] 産業技術総合研究所，化学物質の安全情報データベース威力・感度試験データベース
- [2] 日本煙火協会提供資料
- [3] 吉田忠雄，田村昌三，反応性化学物質と火工品の安全，大成出版社（1988）。

7th International Conference on Very High Cycle Fatigue 参加報告

材料技術研究所 工学部機械工学科准教授 柳 瀬 圭 児
材料技術研究所長 工学部機械工学科教授 遠 藤 正 浩

1. はじめに

2017年7月3日～5日、ドイツのドレスデン（写真1）で超高サイクル疲労に関する国際会議である7th International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF7) が開催された。当研究所からは計2件の研究発表があり、当研究所を代表して筆者の1人（柳瀬）が参加する機会を得たので報告する。

2. 超高サイクル疲労と International Conference

1980年代後半～90年代前半に 10^7 回を超える繰返し数領域で生じる疲労（超高サイクル疲労）の重要性が指摘されおよそ4半世紀が経過した。昨今の機械

の高速化、使用状況の過酷化、高経年化などを踏まえると、 $10^8 \sim 10^9$ 回程度の繰返し回数はもはや特別な状況でなくなっている。超高サイクル領域で疲労破壊する現象は国際的にも関心が高く、この問題を集中的に議論する International Conference on Very High Cycle Fatigue が1988年（フランス・パリ）からおよそ3年ごとに開催されるようになり現在に至っている^[1]。7回目の開催となる本会議は、2011年のベルリン開催（VHCF5）に続きドイツで2回目の開催となった。本会議では、約16か国から約110名の参加



写真1 ドレスデン市街の様子



写真2 学会での集合写真



写真3 学会の様子

<https://twitter.com/shimadzuEurope>

者が集まり、5 件の Plenary Lecture と約70件の口頭発表が行われた^[2] (写真 2、3)。

超高サイクル疲労の研究では、 $10^7 \sim 10^8$ 回を超える実験データを数多く取得する必要がある。当然のことながら、試験自体に膨大な時間と労力が必要とされ、超高サイクル疲労研究を行う上で大きな支障となる。このような問題に対応するため、これまで4連式片持ち回転曲げ試験機、1kHz 油圧サーボ試験機、超音波試験機などの試験技術が導入されてきた。このような試験技術の開発自体が超高サイクル疲労研究の柱であり^[1]、本会議でも試験技術そのものに関する発表や質疑応答が数多く見受けられた。当研究所からは、代表寸法が 1mm 以下の微小欠陥が疲労強度に及ぼす影響について下に示す 2 件の研究発表を行い、学会会場の内外でいくつかの質疑応答も行った。

* Torsional fatigue properties of 17-4PH stainless steel in the VHCF regime (オーストリア ウィーン農工大との共同研究)

* HCH and VHCF strength of spring steel with small scratches (株デンソーとの共同研究)

3. おわりに

3 日間にわたる本国際会議参加を通して国内外の研究者と情報交換やネットワーク作りを行うことができ、大変有意義な時間を過ごした (写真 4)。東京オリンピックが開催される2020年には VHCF8 が北海道の札幌で開催されることが学会最終日にアナウンスされた。VHCF8 での研究成果発表を目標に今後も引続き当該研究を精力的に進めていきたい。



写真 4 学会終了後の打ち上げの様子

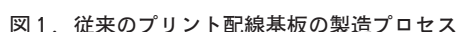
参考文献

- [1] 中村孝：近年における疲労研究の趨勢 2. 超高サイクル疲労研究の動向と展望, 材料, Vol.66 (6), pp.435-441, 2017.
- [2] M. Zimmermann and H-J. Christ (Editors): Proceedings of Seventh International Conference on Very High Cycle Fatigue, 2017.



半導体実装研究所 教授 加藤 義 尚

開発した製造プロセスを、図2に示す。新規開発工法では、ガラスエポキシ樹脂に貫通穴（TH穴）



を形成した後、①導電性ペーストの穴内充填、②無電解銅めっき下地層としてのシード層の印刷、③シード層上への無電解銅めっき、の3工程を実施した後、レジスト工程に進む。電解めっきは行わない。新規開発工法では、露光マスク貼付、露光、現像、エッチング、マスク剥離の各工程が不要となり、廃液の大幅な削減、作業効率の向上、コスト低減が可能となる。

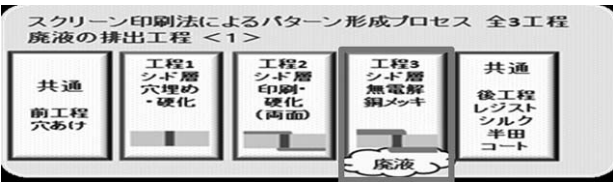


図2. 開発したプリント配線基板の製造プロセス

多層基板作製（例えば4層基板）の場合は、従来製造プロセスではレジスト工程前に、絶縁材（プリプレグ）と銅箔の積層硬化工程（レイアップ工程）が必要で、さらに前述の①無電解めっき工程から⑦マスク剥離工程までの7工程が追加される。本開発プロセスでは、①絶縁材料のスクリーン印刷硬化、②無電解銅めっき下地層としてのシード層の印刷、③シード層上への無電解銅めっき、の3工程が追加される。したがって、4層基板の製造を本プロセスで実施すれば、さらなる工程数の削減、廃液の削減、作業効率の向上、コスト低減が可能となる。

3. 開発内容

3.1 電源モジュール基板の作製および評価⁵⁾

3.1.1 電源モジュール基板の設計

市販されている電源モジュール基板を参考に、本工法で作製する両面基板の設計を行った。サイズは、40×40mm（基板1）と40×60mm（基板2、市販基板サイズ）の2種類。200mm×200mm×0.3mmのガラスエポキシ基材に接続用の0.5mmφのTH穴を設計した。最小ライン幅を0.2mmとし、最小スペース0.25mmとした。2種類の基板の仕様を表1に示す。

表1. 電源基板1と電源基板2の仕様

	TH ビア (φ500μm) 数	ビア以外の部品 リード穴、取り 付け穴数	実装部品点数
基板1	31個	11個	24個
基板2	49個	42個	43個

3.1.2 電源モジュール基板の製造

(1) 導電ペーストの印刷・硬化

タツタ電線㈱の「DD ペースト AE1244」を穴埋め用導電ペーストとして用いた。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製高強度ステンレスメッシュ SHS230/25（版サイズ 550×550mm、メッシュ本数 230本/inch、紗厚み 25μm）を用いた。硬化条件は（80℃30分+160℃30分）とした。

(2) シード層の印刷・硬化

タツタ電線㈱の「DD ペースト SW100」をシード層用導電ペーストとして用いた。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製超高強度ステンレスメッシュ HS-D500/19（版サイズ 550×550mm、メッシュ本数 500本/inch、紗厚み 25μm）を用いた。硬化条件は130℃30分とした。シード層の厚みは 13～15μm とした。シード層印刷・硬化後の基板の写真を図3に示す。

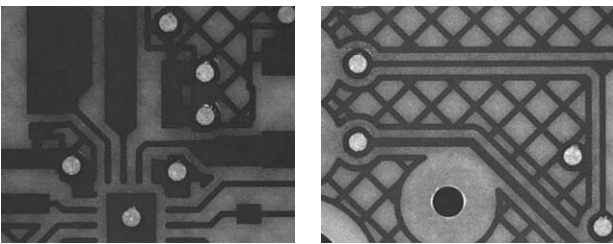


図3. シード層印刷硬化後の電源モジュール基板

(3) 無電解銅めっき

めっきシード層への無電解銅めっきは、奥野製薬工業㈱製「OPC カッパー NCA」を用いて行った。処理時間3時間で、厚み 20μm の無電解銅めっきを形成した。

(4) レジスト形成

ソルダーレジストは、互応化学工業㈱製の高密着性 UV 硬化タイプレジスト「PLAS FINE PSR-310 (A-64)」を用いた。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製高強度ステンレスメッシュ HS-D360/25（版サイズ 550×550mm、メッシュ本数360本/inch、紗厚み 29μm）を用いた。硬化条件は、1600mJ とした。

3.1.3 信頼性評価および機能評価

(1) リフロー試験・テープピール試験

部品実装後のモジュール基板を、リフロー炉5回（鉛フリー温度）流した。基板の膨れ・剥がれは発現しなかった。また、リフロー5回後の基板にテープピール試験を実施した。剥れがなかったことにより、密着性も確認した。

(2) 電源モジュール基板の機能評価

部品実装後の電源モジュール基板を太陽電池と接続し、LED ランプを繋いで照明点燈を確認した。

図4にランプ点燈（緑色）時の写真を示す。LED ランプ以外に小型ファンを接続し、ファンが回転することも確認した。

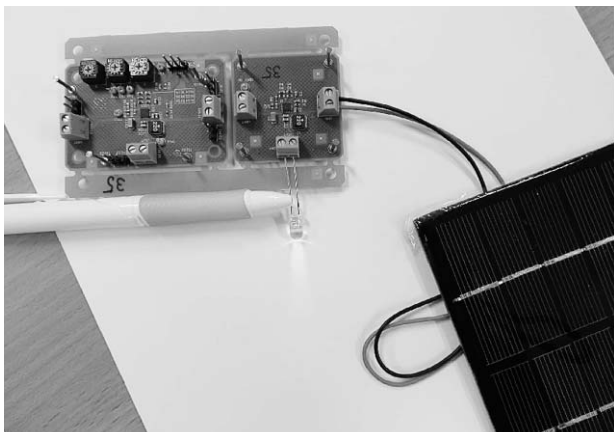


図4. 電源モジュール基板のLED ランプ点灯テスト

3.2 信頼性評価基板の作製および評価⁵⁾

3.2.1 信頼性評価基板設計

基板の信頼性を評価するために、信頼性評価用基板 Test Element Group (TEG) を作製した。TH 間の絶縁性評価パターン、配線間の絶縁性評価用くし形パターン、導通信頼性確認用 TH デイジーチェーンパターンを設計した。TH の穴径は $\phi 300\mu\text{m}$ と $\phi 500\mu\text{m}$ とした。設計概要を図1に示す。各評価パターンのサイズを $20\times 40\text{mm}$ とした。

3.2.2 信頼性評価基板の製造

信頼性評価基板の製造は、すべて電源モジュール基板と同じ条件で行った。

完成基板の全体写真を図5に示す。また、TH $\phi 500\mu\text{m}$ 部分の断面写真を図6に示す。

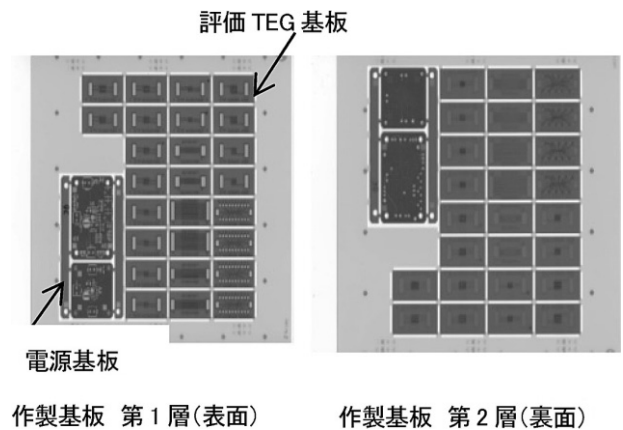


図5. 完成基板全体図

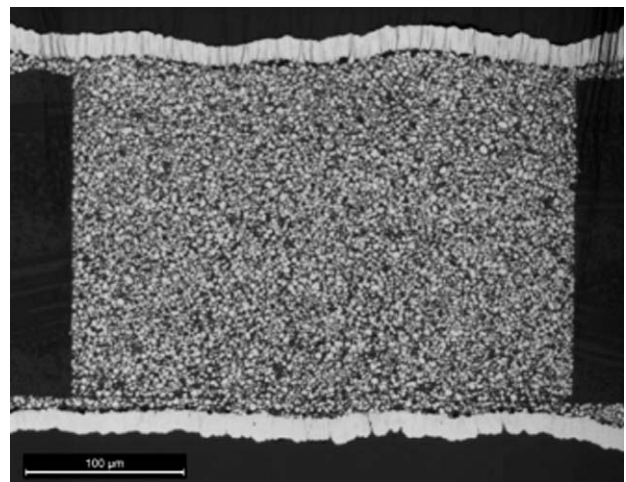


図6. 500 μm 径 TH の断面観察写真

3.2.3 信頼性評価基板の信頼性試験

(1) リフロー試験・テープピール試験

信頼性評価基板を、リフロー炉5回（鉛フリー温度）流した。基板の膨れ・剥がれは、発現しなかった。また、リフロー5回後の基板にテープピール試験を実施した。剥れがなかったことにより、密着性も確認した。

(2) ヒートサイクル試験 絶縁抵抗測定：

信頼性評価基板のヒートサイクル試験を行い、絶縁性の評価を行った。温度条件は、 $[-40^{\circ}\text{C}30\text{分}\Rightarrow 125^{\circ}\text{C}30\text{分}]$ とした。

0（初期値）、100、200、300サイクル実施後の、絶縁抵抗を、50V 印加1分後に測定した。300サイクル経過後も $10^{10}\Omega$ を維持しており、ショート等の不良は発生しなかった。

3.3 シード層の印刷性およびにじみの検討⁶⁾

大型多層基板の開発を狙いとして、めっきシード材の印刷性と広がり性の検討評価を行った。めっきシード層として奥野製薬工業(株)製熱硬化型金属ペースト「トップ ALP」を使用し、 $L/S=100\mu\text{m}/100\mu\text{m}$ のラインをスクリーン印刷法にて形成し、広がり性を確認した。印刷版メッシュは、アサダメッシュ(株)製超高強度ステンレスメッシュ HS-D500/19 (メッシュ本数500本/inch、紗厚み $25\mu\text{m}$ 、版サイズ $850\times 950\text{mm}$)を用いた。5ラインの平均値はX方向が $105\mu\text{m}$ 、Y方向が $107\mu\text{m}$ であり、目標であるライン幅20%以内の広がり性を達成した。結果を図7に示す。

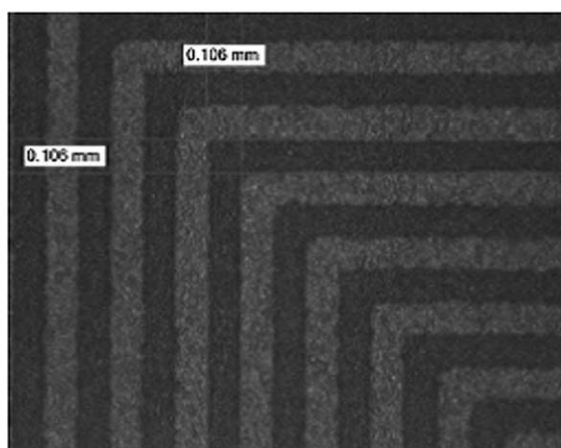
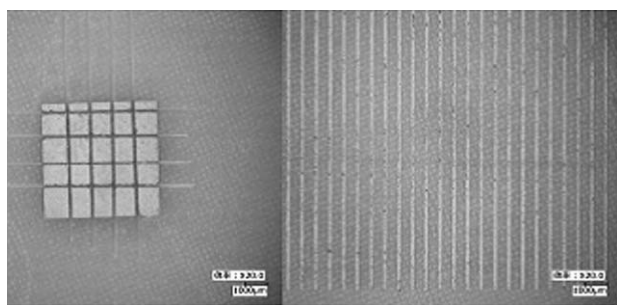


図7. シード層ペースト印刷広がり性試験結果

多層基板化にむけて、絶縁樹脂とシード層金属ペーストの密着性に関する評価を行った。絶縁材上にベタ状と格子状にシード層を印刷・硬化した。シード層は、タツタ電線(株)の「DD ペースト SW150」を用いた。ベタ部分はクロスカット後にテープ剥離テストを行った。格子部分はテープ剥離テストを行った。結果を図8に示す。

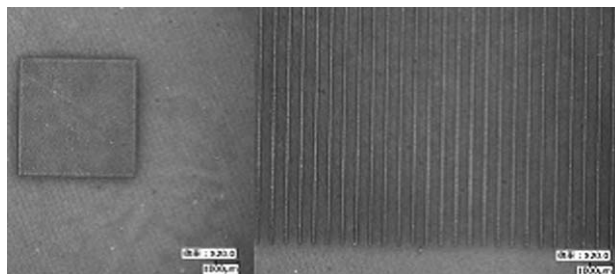


(a). パッド形状クロスカット (b). 配線部分
図8. 絶縁樹脂シード層ペーストのテープ剥離試験

ベタ部分、格子部分ともにテープでの剥離がみられず、密着性が良好であることを確認できた。なお、シード層に奥野製薬工業(株)の「トップ ALP」を使用しても、同様にテープ剥離試験で剥離がみられず、密着性が確認された。

3.4 絶縁材と、シード層/無電解銅めっき/レジストの密着性評価⁶⁾

絶縁材と、シード層/無電解銅めっき/レジストの密着性の評価を行った。シード層には、奥野製薬工業(株)の「トップ ALP」とタツタ電線(株)の「DD ペースト SW150」の2種類を用いた。高速無電解めっきは、奥野製薬工業(株)製「OPC カッパー NCA」を使用した。レジストは、互応化学工業(株)製の高密着性UV硬化タイプレジスト「PLAS FINE PSR-310 (A-64)」を用いてスクリーン印刷塗布し、1600mjで露光硬化した。はんだディップ試験(フラックス浸漬後、鉛フリーはんだ260°C槽に10秒間ディップ)後に、テープ剥離テストを行った。シード層に「DD ペースト SW150」を用いた結果を図9に示す。



(a). パッド形状部分 (b). 配線部分
図9. テープ剥離試験結果

はんだディップ試験10秒後にレジストと無電解銅界面に膨れや剥がれがなく、テープ剥離試験でもレジストの剥離が見られず、すべての層間での密着性が確認できた。シード層に「トップ ALP」を用いた場合も、同様の結果となった。

3.5 多層基板および信頼性標記基板の設計

上述の実験結果をふまえ、多層基板と信頼性評価基板 Test Element Group (TEG) の設計を行った。

多層基板では、IoT ワイヤレスモーションセンサーモジュールを3層構造での製造を検討した。3軸加速度を PC やタブレットへリアルタイムに伝送可能

なモジュールを作製することとし、アンテナをパターンで形成し、コイン電池で駆動させることとした。外観イメージを図10に示す。

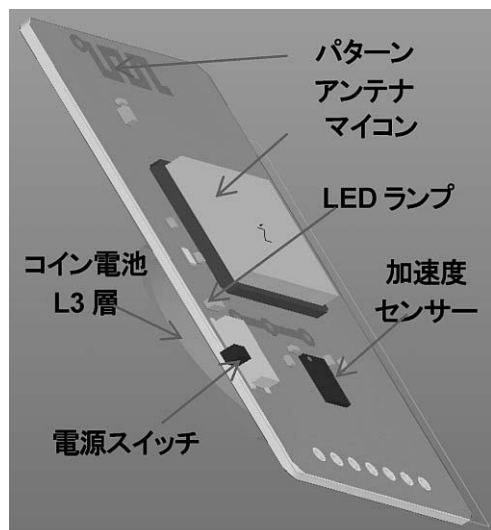


図10. IoT センサーモジュール外観イメージ図

TEG では、第1層-第2層間、第2層-第3層間、第1層-第2層-第3層間の導通性と絶縁性が評価できるパターンを設計した。

IoT モジュールは3層構造とし、コア基板の片側に絶縁層をスクリーン印刷した第1層を形成することとした。コア基板（第2層-第3層）にはTHの穴径を $\phi 0.5\text{mm}$ として30穴形成した。絶縁材を印刷硬化して形成した第1層には穴径 $\phi 1.0\text{mm}$ のTHを4個形成した。図11に示すように、第1層に無線通信付きマイコン、加速度センサー、チップLED、コンデンサ、抵抗を搭載した。第3層（下層）にはコイン電池を挿入できるバッテリーホルダーを搭載した。サイズは $50\text{mm} \times 25\text{mm} \times 1\text{mm}$ とした。

3.6 IoT モジュールの製造および評価

コア基材として $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ を用いた。穴埋め用導電ペーストは、タツタ電線㈱の「DDペースト AE1244」を使用した。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製高強度ステンレスメッシュ SHS230/25（版サイズ $550 \times 550\text{mm}$ 、メッシュ本数230本/inch、紗厚み $25\mu\text{m}$ ）を用いてスクリーン印刷し、 160°C で1時間硬化した。

シード層樹脂として、奥野製薬工業㈱の「M12-1958」とタツタ電線㈱の「DDペースト SW150」の2種類

を用いた。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製高強度ステンレスメッシュ HS-D500/19（版サイズ $550 \times 550\text{mm}$ 、メッシュ本数500本/inch、紗厚み $25\mu\text{m}$ ）を用いてスクリーン印刷し、 160°C で1時間硬化した。

第1層の絶縁層には、互応化学工業㈱の「ETS-633」を用いた。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製高強度ステンレスメッシュ HS-D360/25（版サイズ $550 \times 550\text{mm}$ 、メッシュ本数360本/inch、紗厚み $25\mu\text{m}$ ）を用いてスクリーン印刷し、 150°C で30分間硬化した。

めっきシード層への無電解銅めっきは、奥野製薬工業㈱製「OPC カッパー-NCA」を用いて行った。

ソルダーレジストは、互応化学工業㈱製の高密度性 UV 硬化タイプレジスト「PLAS FINE PSR-310 (A-64) 170PS」を用いた。印刷版メッシュは、アサダメッシュ㈱製高強度ステンレスメッシュ HS-D360/25（版サイズ $550 \times 550\text{mm}$ 、メッシュ本数360本/inch、紗厚み $25\mu\text{m}$ ）を用いた。硬化条件は、 2000mJ とした。

表面実装が完了したIoT ワイヤレスモーションセンサーモジュールの第1層（マイコン、加速度センサー、LEDランプ、スイッチ、受動部品等実装）の写真を図11に示す。また、第3層（コイン電池未挿入、バッテリーホルダー搭載）写真を図12に示す。

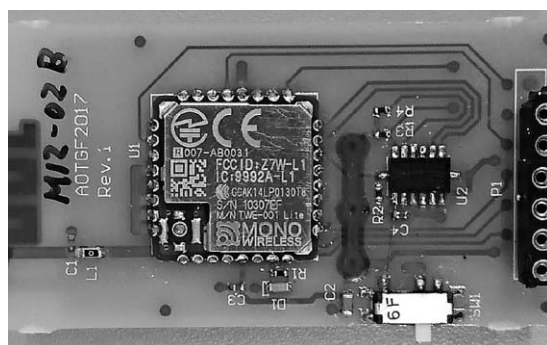


図11. IoT モジュール第1層写真

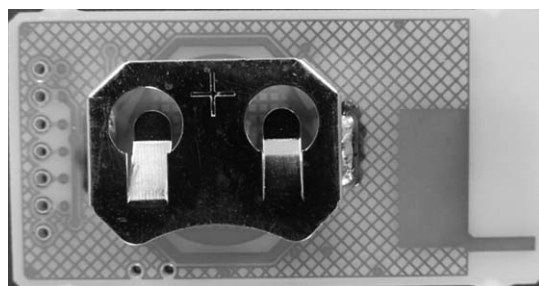


図12. IoT モジュール 第3層写真

IoT モジュールの機能確認試験として、加速度センサーの稼働確認および無線でのパソコン送信試験実施中の写真を図13に示す。加速度センサーの情報が、無電解めっきパターンにより形成したアンテナにより無線でパソコンへ送信できたことを確認した。このことにより、本工法で製造した基板の実用性を確認できた。

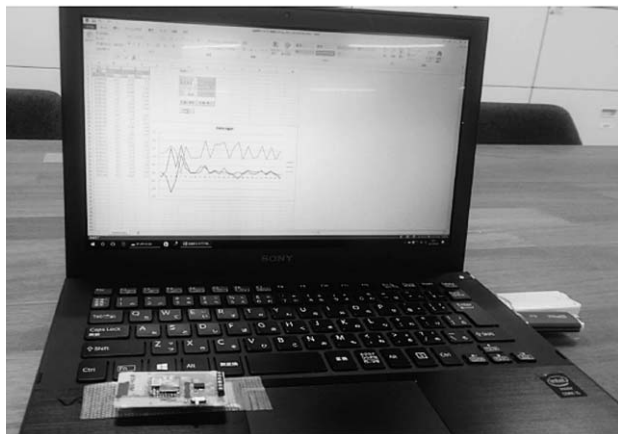


図13. IoT センサーモジュール稼働確認試験

4. 結 論

高強度ステンレスメッシュを用いた高寸法精度スクリーン印刷技術と、選択的高速無電解めっき技術を組み合わせた、「プリント配線基板の新規製造工法」の開発を行った。初期検討を行い基板製造の可能性を確認したので、具体的な基板としての評価を行うため、両面基板の設計および信頼性評価 TEG の設計を行い、基板を作製した。作製した基板（電源モジュール基板）での評価を行い、モジュールとしての機能を発現することを確認した。また、多層基板化に向けた絶縁材の開発、製造工法の開発を行い多層基板での IoT モジュールを作製した。作製したセンサーモジュール基板で、機能を発現することを確認した。今後、量産化に向けた評価検討開発を継続して行っていく。

謝辞

本研究は、中小企業庁平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業で採択された「エッチング工程を必要としない環境配慮型プリント配線基板製造工法の開発」プロジェクトの助成で実施しました。共同研究者であるアサダメッシュ(株)の北田真也氏、本田耕

児氏、鈴木治行氏、奥野製薬工業(株)の加東隆氏、タツタ電線(株)の山口範博氏、寺田恒彦氏、互応化学工業(株)の太田茂男氏、酒井善夫氏に御礼申し上げます。また、本開発実施にあたり、故友景肇先生（福岡大学）にご指導頂きました。あらためてここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 菅沼克昭, 能木雅也:「プリントドエレクトロニクスと材料技術」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J93-C, No.11, pp.399-405, (2010)
- 2) 佐野 康:「エレクトロニクスとスクリーン印刷技術」, 日本印刷学会誌, Vol.50, No.3, pp.26-32, (2013)
- 3) 森口 朋, 本間秀和, 姜 俊行:「プリントドエレクトロニクスに適応した無電解銅めっき」, 第23回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, MES2013, pp125-128, (2013)
- 4) 加藤義尚, 佐野 康, 北田真也, 本田耕児, 加東 隆, 山口範博, 寺田恒彦, 太田茂男, 酒井善夫, 友景 肇:「エッチング工程を必要としない環境配慮型プリント配線基板製造工法の開発」, 第30回エレクトロニク実装学会春季講演大会, 22C3-5, pp121-122, (2016)
- 5) 加藤義尚, 北田真也, 本田耕児, 鈴木治行, 加東 隆, 山口範博, 寺田恒彦, 太田茂男, 酒井善夫, 友景 肇:「エッチング工程を必要としない環境配慮型プリント配線基板製造工法の開発(2)」, 第26回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, MES2016, pp279-282, (2016)
- 6) 加藤義尚, 北田真也, 本田耕児, 鈴木治行, 加東 隆, 山口範博, 寺田恒彦, 太田茂男, 酒井善夫, 友景 肇:「エッチング工程を必要としない環境配慮型プリント配線基板製造工法の開発(3)」, 第31回エレクトロニク実装学会春季講演大会, 8C1-1, pp384-386, (2017)

ドップラーライダーによる風の立体観測

～福岡都市圏の大気の流れをみる～

高島 久洋、林 政彦、白石 浩一
原 圭一郎、西田 千春
福岡から診る大気環境研究所

1. はじめに

福岡大学産学官連携研究機関『福岡から診る大気環境研究所（所長：林政彦）』は大気環境観測を一つの目的とした研究所として、発足以来様々な観測を行っている。研究所の一つの特色として、『組成』という観点から PM_{2.5} を含む大気中の微粒子の人生（発生源、変質、沈着・消滅）を明らかにする研究を行っているが、微粒子の起源は、自然起源・人為起源があり、人為起源については大陸から国境を越えて輸送（越境）されるもの、日本の都市起源のものがあり極めて複雑である。

ドップラーライダーは大気中に浮遊している微粒子（エアロゾル（または雲））の動きを計測する（微粒子のドップラー速度を計測する）ことで3次元的な大気の流れをみる装置である（たとえば、藤吉他、2008；藤吉、2013）。2016年11月に福岡都市圏の汚染物質の輸送・拡散、局所的な気象現象を明らかにするために福岡大学（A棟屋上）に設置し連続観測を開始した（図1）。ドップラーライダーの導入で大気のながれをみる事が可能となり、自然・越境・都市起源の大気を切り分けた議論、研究所で観測したデータの空間代表性についての議論が可能となっ

た。ここではドップラーライダーの装置の概要と観測事例について紹介する。

2. コヒーレントドップラーライダー

2016年11月26日に、北海道大学との共同研究としてコヒーレントドップラーライダー（Coherent Doppler Lidar）を福岡大学A棟屋上に設置し、11月28日から連続観測を実施している（図1）。装置の性能を表1に示す。なお装置の詳細については他の文献（たとえば藤吉他（2008））を参照されたい。

本装置の観測波長は赤外線（1.54 μm）であり目に対して安全な波長を用いている。4000 Hz のレーザーパルスを照射し、大気中の微粒子から反射したレーザーを受光する。受信したレーザーの強度（S/N 比）は概ね微粒子（エアロゾル）の濃度に比例する。レーザーが往復する時間から微粒子までの距離がわかり、エアロゾルの空間分布が得られる。一方、エアロゾルが風と共に移動することから、反射したレーザーの周波数は、ドップラー効果により偏移する。この周波数の偏移量から微粒子の視線方向のドップラー速度（観測者に対してどれくらいの速さ



図1. 2017年11月に福岡大学（福岡市城南区）に設置した3次元ドップラーライダー

レーザー波長	1.54 μm
パルスエネルギー	1 mJ/pulse
パルス繰り返し周波数	4000 Hz
テレスコープ有効径	120 mm
スキャナ水平走査範囲	0～360°
スキャナ垂直走査範囲	－5～180°
焦点距離	無限光（コリメート光）
観測データ	S/N 比、ドップラー速度、速度幅
最大観測距離	6、12、18 km
距離分解能	30、60、90 m
ゲートあたりのサンプル数	200

表1. ドップラーライダーの性能

で近づいてくる、あるいは離れていくのか)、すなわち大気の流れをはかることができる。現在は、視線方向の空間分解能は 60 m、最大検出距離は 12 km で観測を行っている。微粒子（エアロゾル（または雲））が極めて少ないところからはレーザーの反射は得られないので、実質的な観測範囲はエアロゾル濃度に依存する。一般に都市域の大気境界層（地球大気の下層にあり我々人間が生活している領域。およそ高度 1-2 km 以下の領域）内ではエアロゾル濃度が高く、大気境界層内の循環や大気境界層高度

などの観測に適している。

観測手法として、PPI（Plane Position Indicator）と RHI（Range Height Indicator）と呼ばれる 2 つの観測モードがあり、それらを組み合わせて連続観測を行っている。PPI は仰角を固定して方位角をかえてスキャン（現在は仰角 0、2、10 度）、RHI は方位角を固定して仰角をかえて観測を行う（現在は方位角 0 度と 112 度）。PPI と RHI の観測例（S/N 比とドップラー速度）を図 2 に示す。

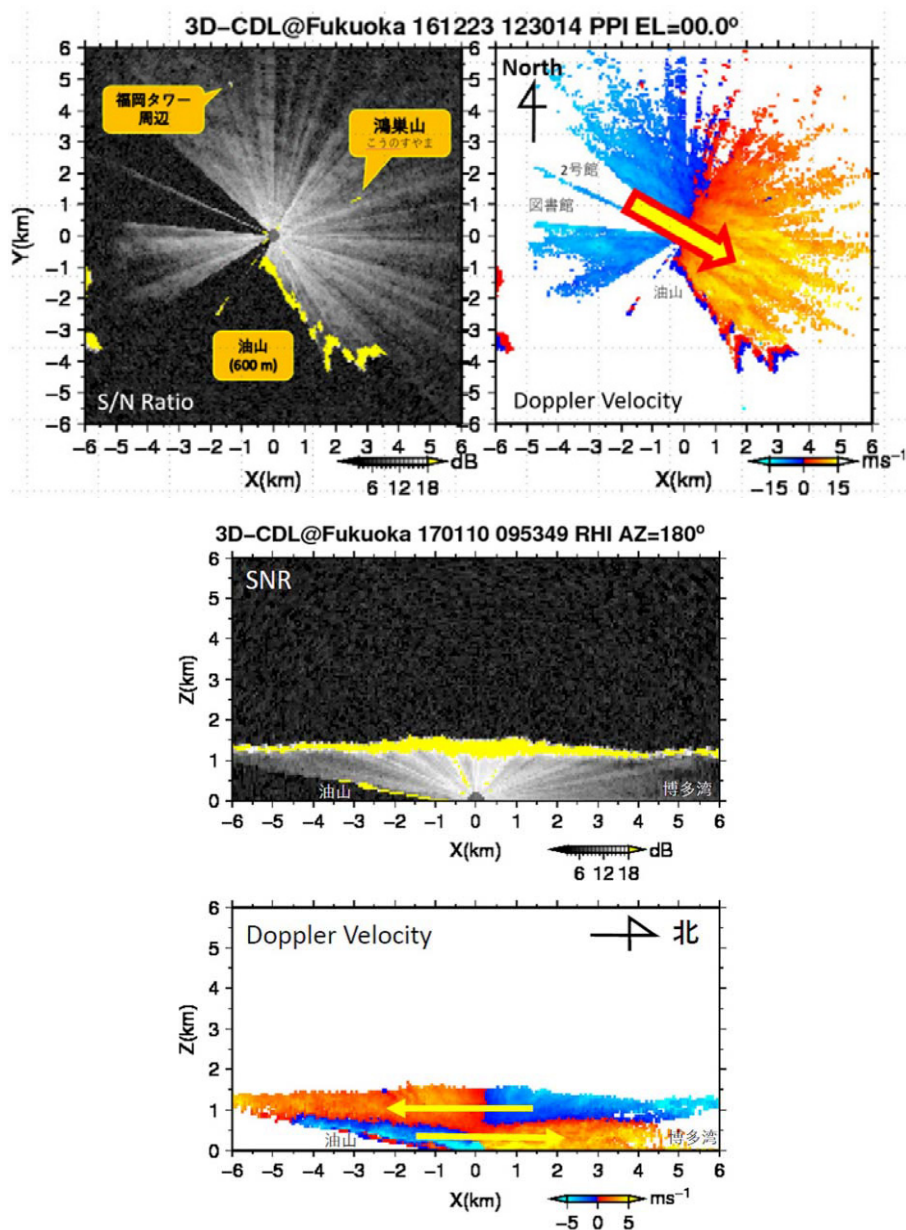


図 2. PPI モードの観測例（上図）および RHI モードの観測例（下図）。S/N 比とドップラー速度について示す。ドップラー速度は、寒色（暖色）は近づく（遠ざかる）向きを示す。図中の黄色の矢印は大きな風向を示している。

3. ドップラーライダーによる風観測例

3.1 局地循環とエアロゾル輸送

福岡を含め、日本の都市域の多くは海に面しており、それらの地域では海風前線と呼ばれる前線が観測される。都心でのドップラーライダーによる観測で前線通過時にエアロゾル濃度が急増する事例が報告されている（たとえば、藤吉、2013;Iwai et al., 2013）。図3に福岡大学に設置したドップラーライダーによる福岡平野内の前線通過にともなうエアロゾル濃度の変動例を示す。福岡大学（中央）の北側にエアロゾル濃度が高い（S/N 比の高い）領域と南東側のエアロゾル濃度が低い領域との境界面（前線）が南東方向へ移動している。福岡大学で観測しているエアロゾル粒子数濃度にも、前線が通過した15時すぎに増大がみられた（図4）。興味深いことに小さ

い粒子数濃度（ 0.3 、 $0.5\ \mu\text{m}$ ）が前線通過直後に急増し、その直後に急減するが、 $1\ \mu\text{m}$ 以上の粒子には急減はみられない。なお寒冷前線の通過など総観規模の気象現象にともなうエアロゾルの3次元的な変動もドップラーライダーにより捉えられている。

3.2 気象現象

ドップラーライダーによる風計測は、局地的に起こる気象現象の観測に有効である（たとえば突風・竜巻などの突発現象）。日本でも羽田空港や成田空港では空の安全のための風計測が行われている。

福岡大学の南側には油山（標高 $\sim 600\text{ m}$ ）があり、南風時にはその影響を受けて山岳波が励起されることがある。図5は、油山の影響で波が励起され、福岡大学の北側の波の頂上部で雲（高度 $1\text{--}2\text{ km}$ の黄

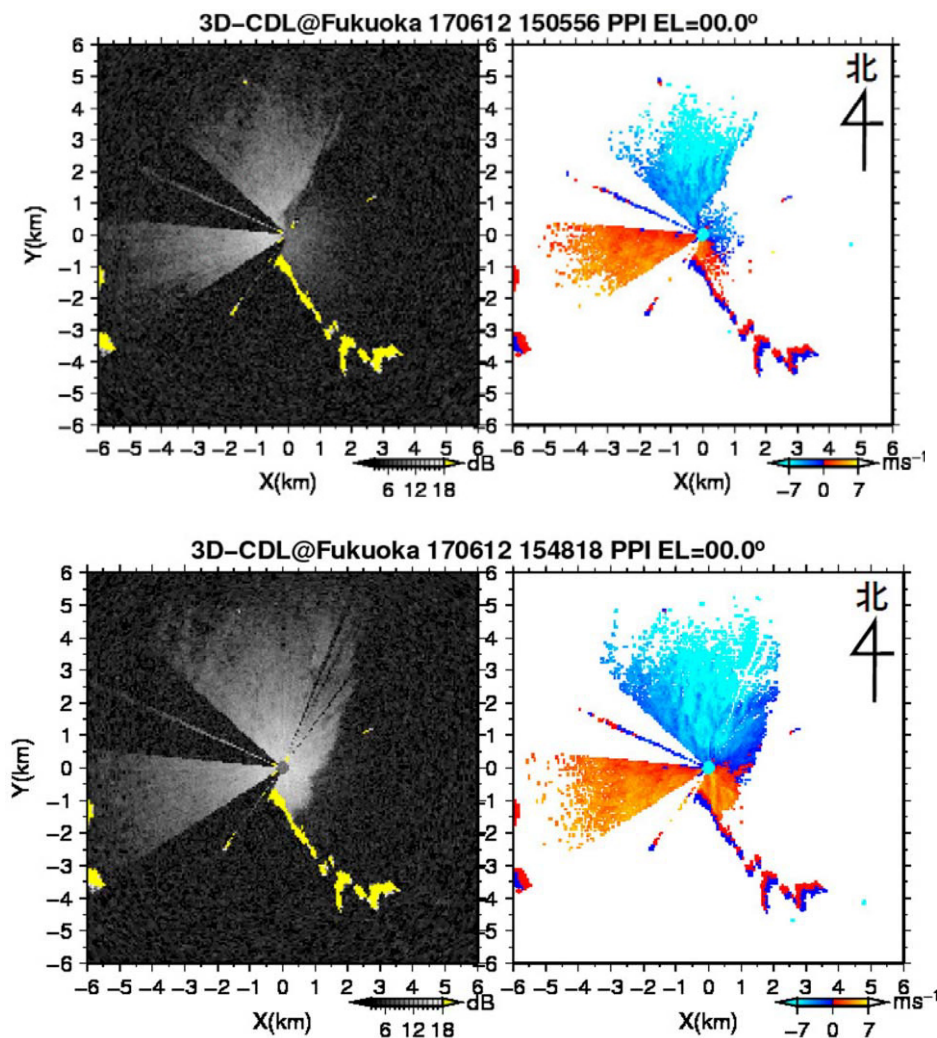


図3. 2017年6月12日（15時6分頃と15時48分頃）に観測したS/N比およびドップラー速度（仰角0度のPPIモード）

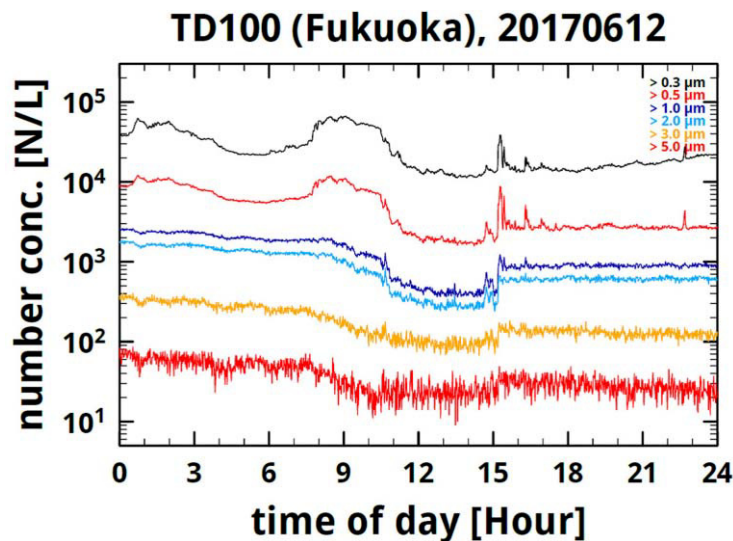


図4. 2017年6月12日に福岡大学にて光散乱式粒子カウンター（OPC）で観測した粒径別粒子数濃度の時系列（個/L、流量補正無し）

色の S/N 比が高いところ）が発生していることが示唆される観測例である。この他にも、鉛直方向に流速が異なった状況下で Kelvin-Helmholtz 不安定と呼ばれる現象も観測されている。

図6は、観測を開始してからしばしば見られている鉛直数100メートルの層状構造の例である。地球大気最下層は対流圏と呼ばれており、その名の通り

鉛直方向に“対流”が起きている不安定な領域と考えられる。このような領域にどのようにしてこのような多層の層状構造が形成されるのか、科学的に興味深く、今後の解析を予定している。

これらの現象は、輸送・混合・拡散の観点からも重要であり、今後、福岡平野における大気汚染物質の変動と関連づけた解析を進める予定である。

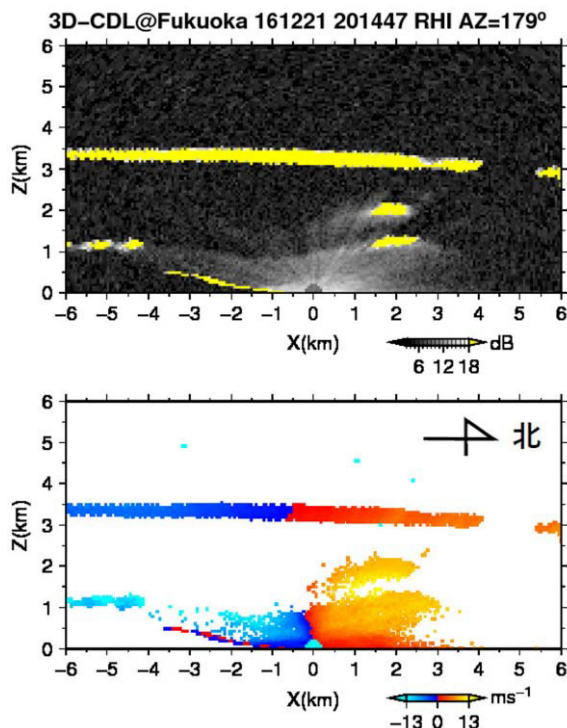


図5. 2016年12月21日の RHI モード観測例（南北方向）。左が南（油山）、右側が北（博多湾）。

3.3 煙の拡散

ドップラーライダーによる観測は、花火・火災などにもなう煙等の拡散現象を捉えることにも適している（藤吉、2013）。図7は2017年8月1日の西日本大濠花火大会の花火による煙の拡散の様子を示している。花火の煙は北-北西からの風（図7右）によって南から南東方向に拡散しながら流されている（図7左）。煙の発生源（花火）近辺では南側方

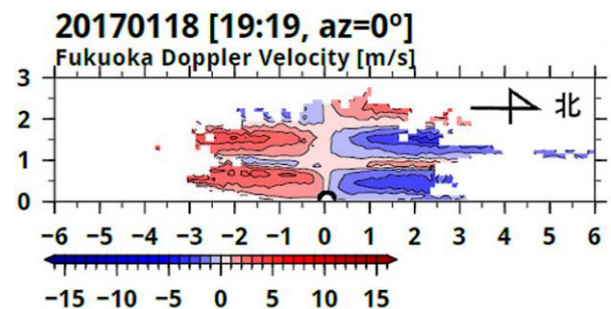


図6. 2017年1月18日に福岡で観測された風の層状構造の事例（ドップラー速度 [m/s] の水平・高度断面図（方位角0度））。鉛直方向に数100 m 毎に風向風速が入れ替わる現象がしばしば観測されている。

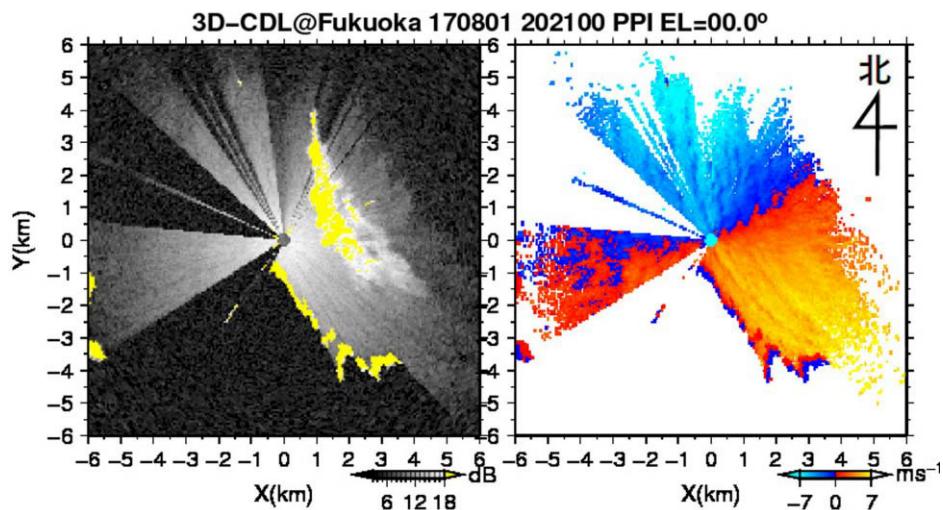


図7. 2017年8月1日20時21分頃のS/N比とドップラー速度の分布(PPIモード、仰角2度)。福岡大学北側約4 km 付近の西日本大濠花火大会(大濠公園)の花火にともなう煙が南から南東方向へ拡散しながら流されている。

向に煙が流れているが、福岡大学の東側付近では向きが南東方向(油山山腹と並行)に変化しており、南側にある油山等の地形の影響を強く受けていると考えられる。

4. まとめ

2016年11月28日より3次元ドップラーライダーにより福岡都市圏の風計測を開始し、現在まで連続観測を継続している。福岡都市圏で汚染大気の輸送、気象現象などについて興味深い事例が多数観測されている。今後は、「福岡から診る大気環境研究所」で観測している大気エアロゾル組成観測データ、大気ガス組成観測データとあわせて解析し、都市大気と越境大気の輸送・混合・拡散過程について明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠, 中西幹郎, ラージエディ・シミュレーションの気象への応用(第9章), 気象研究ノート, 219, 164, 2008.
- 藤吉康志, ドップラーライダーによる流れの観測と物質輸送, ながれ, 32, 301-306, 2013.
- Iwai et al., Strong Updraft at a Sea-Breeze Front and Associated Vertical Transport of Near-Surface Dense Aerosol Observed by Doppler Lidar and Ceilometer, Boundary-Layer Meteorol, 141, 117-142, 2011.

謝辞

本研究は北海道大学との共同研究として推進している。また小林国際奨学財団の助成を受けた。

