

研 究 紀 要

第 48 号

平成 24 年度

奈良工業高等専門学校

目 次

粉末冶金法によるものづくり体験講座の実施 ... 谷口 幸典・奥村 光喜・中西 敏文・尾崎 充紀・市瀬 辰己・山野 晃太郎	1	
高圧小容積の衝撃波管を用いた非定常超音速ジェットに関する研究	福岡 寛・屋我 実・滝谷 俊夫・梅津 郁朗	7
ピコ秒パルスレーザを用いた厚み測定	押田 至啓	13
回転水中紡糸法によるAu-Sn合金細線の開発	島岡 三義・和田 基	17
LEDのエージングテスト装置に関する研究	櫛 弘明・牧野 孝史・塚本 勝孝	23
学生による超小型人工衛星プロジェクトのための衛星データ配信・共有システムの開発	浅井 文男	29
準ストーン代数*のシ-ケントによる形式化	荒金 憲一	31
論文抄録		38

粉末冶金法によるものづくり体験講座の実施

谷口 幸典, 奥村 光喜*, 中西 敏文**, 尾崎 充紀, 市瀬 辰己, 山野 晃太郎***

Powder Metallurgy implemented to the Hands-on Education for Introducing Metalworking Technology to Young Students

Yukinori TANIGUCHI, Kouki OKUMURA*, Toshifumi NAKANISHI**
Mitsunori OZAKI, Tatsumi ICHISE and Koutaro YAMANO***

In this paper, we propose applying *Powder Metallurgy* (PM) as a theme of workshop practice which aims to give young students interest in manufacturing technology or material science. Three technical procedures, (1) Simplified metal powder forming method, (2) Using silicone for a means of self making mold, (3) Special sintering method that uses ordinary microwave oven, have been suggested in order to conduct the workshop practice in the common classroom without any special devices. We have held several workshops for young students at our school and junior high school. In the workshop, the copper powder with ager binder was casted into a silicone mold, and was successfully formed to desired shape without compaction pressure. Sintering was demonstrated in the classroom and it seemed that every student had enjoyed looking how the PM parts are produced. The results of questionnaire show that the all student had enjoyed and almost all students have got interest in metalworking technology after proposed workshop. It is concluded that proposed procedures are very effective as a means to introduce the knowledge of manufacturing technology to young students or kids.

1. 緒 言

我が国における中学校学習指導要領解説では、平成 14 年より技術科教育課程における「金属加工」が「技術とものづくり」という広範な項目に含まれる形に変更された。それでも平成 23 年までの指導要領においては、例えば「炭素鋼，黄銅，アルミニウム合金などの特徴やその使用方法を知らせるとともに，製作品に適した金属が選択できるようにする」など，材料および金属加工の教育に関して専門的な記述や指示が残されていた。しかしながらそのような記述も平成 24 年度の新たな改訂においては削除され，「材料の特徴と利用方法を知ること」，「材料に適した加工法を知り，工具や機器を安全に使用できること」などのように具体性のない解説に変更されたことが指摘されている⁽¹⁾。学習指導要領から「金属加工」が削除された時期に中学校へ入学した人材が大学を卒業して社会人となる今日において，このような技術教

育に関する指導方法の簡略化が図られているという事実は，もちろん意図的にもたらされているのではない。しかし我が国の高度経済成長を支えてきた金属加工技術の今後を支える人材をいかに育てるかを考えると，憂慮すべき事態であると言える。

一方で，ある中学校の生徒に対するアンケート調査においては，ものづくりに関係する教科を好む中学校生徒は少なくなく，実に 60%以上の生徒が技術や理科を好きであると回答し，「もっと作業や実験をしたい」という声があること，さらには，「将来ものづくりに関わる仕事をしたい」と考える生徒の割合は 18%であることが示されている⁽¹⁾。このような生徒のニーズに対して，金属加工に関するものづくり体験の機会を与えることは非常に有効であろう。しかし，今現在の学習指導要領において専門的な知識を交えた具体的な指導の指針は示されていないために，ものづくり体験の実施については教育現場の教職員の創意工夫に一任されることになる。別の中学校

*元機械工学科学生，現（独）国立印刷局

**元機械工学科学生，現（株）伊藤金属製作所

***機械工学科学生

の調査^④においては、夏季休業中に何らかのものづくり体験に参加させた生徒の割合は約 46%でほぼ半数に達しているが、その内訳で最も多いのは「料理」であり、実に体験教育の 30%を占める。「金属加工や木工に関するもの」は 7%と報告されているが、それは近隣の国立大学との連携で達成されたものであるという。このように、中等教育に課せられている、あるいは求められている「ものづくり教育」の解釈の多様性・広範性もさることながら、近年の現場教員の多忙さを考えても、学習指導要領の範疇でもものづくり教育を立案・手配・実施することがいかに困難であるかが伺える。

以上のように、小中学生を対象とした「ものづくり体験講座」を実施することは今後ますます重要であり、また、金属加工に関する体験講座の必要性も高まっていると考えられるが、そのような講座を立案・実施するには以下に挙げる項目を配慮しなくてはならないであろう。

(1) 設備と経験

金属加工にはしかるべき設備と工具が必要であり、指導する側にはそれを適切に扱うことのできる経験が問われる。

(2) 安全性

小中学生でも安全に作業ができる内容であることが必須条件である。

(3) 効果

ものづくり体験教育の有効性は、体験時の受講生の五感への働きかけはもちろん、受講生自らが作業した結果を製品として家に持ち帰ることができるなど、体験結果を持ち帰ることができるような内容が効果的である。

そしてこれらを小中学校の教育環境や保有設備で達成することは非常に困難である。例えば、可搬性のある卓上工作機械を用いた切削加工体験を実施する場合、加工内容の決定とその指導には十二分の配慮が要求される。塑性加工を題材とする場合も同様であり、例えば可搬可能な卓上プレス機と簡単な金型を用意し、鍛造加工の体験を行わせるとしても、金型は非常に高価であるし、卓上プレスの加圧容量を考えても加工可能な素材は変形抵抗が低いものに限られる。また、木工や陶芸などの加工体験においては一人一人の受講生が自分自身で定めた製品形状を作成することでより一層の興味を喚起するような内容とできるが、金属加工でそれを実現するためには、作製する製品形状にある程度の選択性を持たせるために多くの工作機械や金型が必要となる。この場合、実施費用や運搬の面で問題となるし、実現できたとしても、特に安全面においてしっかりと教育された複数の指導者や実験補助者が必要となってくる。現場の教職員が通常業

務の空き時間を利用してそのような体験講座を実施するには予算面でも準備作業面でも現実的ではない。したがって金属加工に関する体験教育テーマとしては、簡単な板金加工や手仕上げ加工を選定せざるを得ないのが実状であろう。

そこで筆者らはこれまでに、粉末冶金法についてそのプロセスを特殊な設備や工具を必要とすることなく簡略的に実演することについて検討し、それを小中学生向けの体験教育のテーマとして運用することを提案している⁽⁵⁾。粉末冶金法は、各種金属粉末を原料としてそれを加圧成形・焼結することで金属製品を得る手法であり、各種焼結合金の作成や、複雑形状部品の効率的な生産を行うための手段として利用されている生産加工技術である。最終製品を得るためには焼結という熱処理を実施する必要はあるものの、素材が粉末という半流動体であることから、これを体験教育のテーマとして実施できれば、受講者が思い思いの形状を造形するという点において、通常の金属バルク材の加工よりも容易に金属製品の造形作業を行うことができるという利点がある。

このような背景より筆者らは、教室や理科室などの環境において粉末冶金法を簡便に体験～実演する手法として、「寒天」を結合剤とした金属粉末スラリーを型に流し込んで成形する手法、ならびに、それによって得られた金属粉末成形体を通常の電子レンジで焼結するという、「簡易粉末成形・焼結法」を提案してきた。本報では、本手法を奈良高専機械工学科における小中学生を対象とした公開講座として運用した結果とその教育効果について報告する。

2. 実験方法および実験条件

2.1 寒天をバインダとした簡易粉末成形法

作製する金属素材となる金属粉末として、その焼結の簡便さや入手性から純銅粉末（電解銅粉、平均粒子径約 $30\mu\text{m}$ ）を選定して用いた。また、金属粉末を熔融することなく焼結によって合金が作製されることを実演するために、添加混合粉末としてニッケル粉末を使用し、白銅（Cu-25%Ni）を作製するものとした。本手法では、寒天水と原料粉末を質量比 33:67 で混練してスラリーを作製した。寒天は細胞培地用の粉末状のものをを用い、マントルヒーターとスライダックを用いて 80°C 付近に加熱保持した水に完全に溶解させた。寒天水の濃度は約 2wt.% で一定とした。その後、温度を 85°C 前後で保持しながら寒天水と原料粉末を混練した。図 1 に混練および成形工程の写真を示す。図 1(b) に示すように、寒天水との混練によって原料粉末はスラリー状となる。そのため

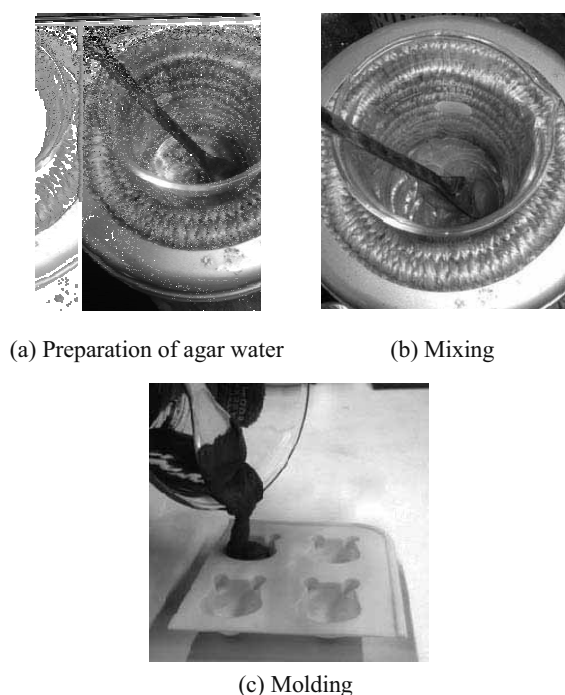


図1 寒天-金属粉末スラリーの作製とその成形の様子

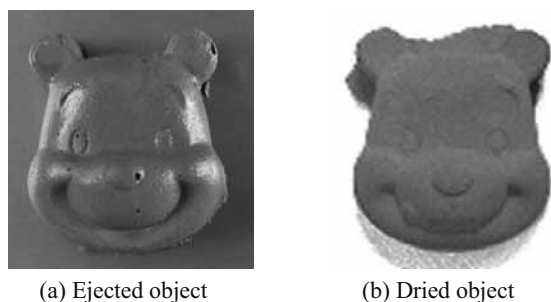


図2 寒天成形体の外観写真

図1(c)のように、市販の料理用シリコン型など、任意の成型型に直接スラリーを流し込んで無加圧でモールドイングすることが可能となる。モールドイング後、冷却により寒天成分がゲル化して成形体となり、型からの抜き出しが可能となる。図2は本手法で成形された成形直後の成形体と、それを乾燥させた後の成形体の写真である。型の形状を十分に再現できていることがわかる。

2.2 受講生自らの手作業による成型型の作製手法

体験講座においては、受講者それぞれの任意形状の製品を自分の手で造形し、それをおみやげとして持ち帰ることができるのが、より一層の興味を喚起するのに有効であると思われる。そこで本研究では、先の簡易粉末成形法に使用する粉末成型型を受講者自身が短時間で簡便に作成できる手法として、受講生が作りたい形状の小物部品を持参し、それをシリコン材に押しつけて形状

を転写することによって成型型を作成する手法を提案して体験講座に運用した。受講生に作りたい製品の原型をあらかじめ選定・持参してもらい、それを型取りした成型型に先の簡易粉末成形法を適用することで、受講者がそれぞれ作りたい形状を造形できるようにすることをねらいとした。型取材の特性としては、①安全に作業が行えること、②型取りが短時間で終了できること、が求められる。これらを満たすものとして速乾性のシリコン材（アグサジャパン株式会社）を選定して使用した。図3に、提案する成型型の作製手順を写真として示す。図3(a)はそれぞれシリコン材のA剤、およびB剤であり、これらを練り合わせると、約1分で硬化が始まり、10分程度で硬化が完了する。練り合わせたものに型取りの原型をすみやかに押し付けた状態が図3(b)である。硬化後に原型を取り出して、転写形状の厚みの半分までを残す形で余分な部分をカッターナイフやサンドペーパーで削り落とすことで型が完成する。このようにして、受講生が持ち込んだ原型形状の半面をレリーフ状にコピーした金属レプリカを作製するものとした。

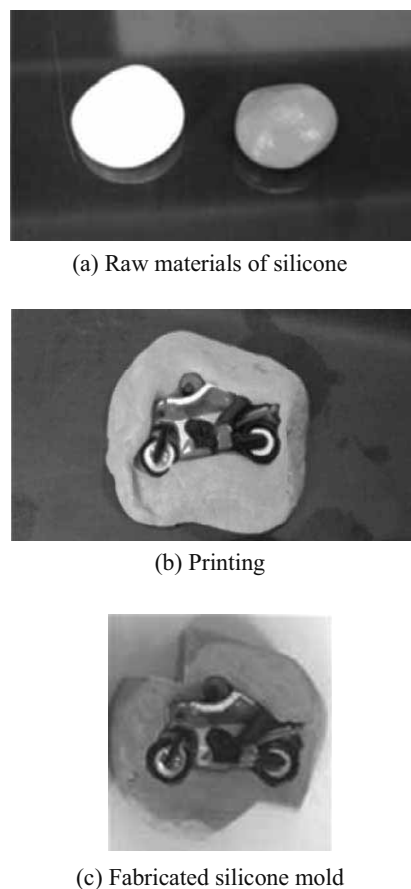


図3 型取り用シリコンによる成型型の作製手順

2.3 電子レンジ焼結の実演

簡易粉末成形法で成形された成形体は、焼結のために十分な乾燥を経て水分を除去しておく必要がある。乾燥および焼結にはそれぞれ数時間の処理が必要となるので、成形を行った当日のうちに製品を完成して受講生に持ち帰ってもらうことはできない。しかし、成形工程の後に焼結という熱処理を施すことで金属製品が完成する様を実演することは、粉末冶金法の面白さを伝えるためには重要である。通常の実験では焼結は熱処理用電気炉を用いて行うが、通常の教室で実演する場合において電気容量の問題もある。そこで、筆者らが提案している電子レンジ焼結法を用いて、成形体が焼結される様子を実演するものとした。この手法は、断熱材を介して二重に配置したアルミ製円筒のつば内に備長炭粉末を充填し、それを加熱炉として用いるものである。電子レンジ庫内の内壁を断熱材で十分に断熱して加熱炉を庫内に置き、通常のように電子レンジを操作してマイクロ波を照射するだけで、つば内の備長炭は激しく発熱される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この発熱を焼結のための高温熱源として利用するというものである。備長炭粉末の粒子径を 1~5mm 程度、使用量を 5~10g の範囲とし、電子レンジの出力を 700W とした場合、10 分程度のマイクロ波照射時間によって、銅粉末成形体の焼結温度に適する 900℃程度まで急速加熱できることを確かめている。またその後出力を約半分程度の 350W としてマイクロ波の照射を続ければ、900℃前後の温度で炉内温度の保持が可能であることを見出している。焼結は、乾燥した寒天成形体をつば内の備長炭粉末に埋没させ、マイクロ波を照射することで行う。備長炭粉末は高温で灰化するが、それによって発生する一酸化炭素および二酸化炭素によつてつば内の酸素が減少するため焼結体表面の酸化が大気中の焼結と比べて抑制されるという利点もある。

2.4 公開講座の実施

以上の手法を体験講座のテーマとして運用する場合、二日間の日程とすることが望ましい。すなわち、一日目に説明、シリコン成形型の作製、および、寒天成形体の作製を行い、二日目に焼結の説明と実演、および、窯出し作業と焼結体の仕上げ作業を実施する。二日間の日程での実施ができない場合は、受講生の成形作品は後日焼結を施して送付することになる。

これまでに三回の体験講座を実施した。平成 23 年度は大和郡山市との連携事業として科学クラブに所属する小学生 15 名に対して 3 時間の講座を実施した。平成 24 年度は奈良高専機械工学科公開講座として夏季休業中に二日間の日程を設定し、いずれも 3 時間の講義時間で実

施した。チラシや本校ホームページにて参加を募集した結果、定員 20 名に対して 16 名の参加応募があり、結果 14 名の参加者となった。もうひとつは、近隣中学校に赴いて実施する出前授業である。これは、近隣中学校からの依頼により、中学校 3 年生を対象として、授業時間 50 分間、参加人数 24 名の体験授業を、入れ替え制で二回実施するというものであった。本報では、平成 24 年度に二日間の日程で実施した公開講座の結果について述べる。

3. 公開講座の結果と教育効果について

一日目に金属と他の材質との違いを説明し、粉末冶金法の利点について理解させた後に、型の造形および粉末成形作業を行わせた。受講生が作製したシリコン型の例を図 4 に示す。成形型の仕上げ作業でカッターナイフを用いるので、受講生 2~3 名あたり 1 名の補助学生が作業時の安全確保を行った。

1 名の受講生については型取りの際のシリコンの混練が不十分で硬化が不十分となり、造り直しが必要であったが、全ての受講生が型の造形を完了するのに要した時間は約 40 分と、問題なく作業させることができた。それらをカップに入れ、カップごと原料粉末スラリーを流し込んでモールドイングを行った。受講生の半数が小学生であったこともあり、やけどの危険性を考慮して、モールドイング作業は教員と補助学生が行った。作業の様子を図 5 に示す。モールドイングしたスラリーを十分に



図 4 受講生が持ち込んだ原型と造形した成形型の例



図 5 モールドイング作業の様子

固めるためには冷蔵庫で 10 分ほど冷却する必要があるが、その時間は休憩時間に充てた。ここまでの作業時間は約 100 分間であった。

冷却された成形体の型からの抜き出しは受講生自身で作業させた。この作業が最も難しく、原型形状が複雑であり、型の抜き勾配などが十分でない場合は成形体の抜き出し時に割れが発生してしまう。それでも、型の修正を施して再度モーディング作業することで、全ての受講生に対して時間内に成形体を作製させることができた。モーディング作業は 30 分程度で完了し、したがって、簡易粉末成形法による金属粉末成形体の作製作業は、小学生を対象とした場合でも二時間程度で完了させることができた。受講生が作製した寒天成形体の写真を図 6 に示す。

公開講座二日目は、まず金属合金に関して簡単な説明を行った後、焼結のメカニズムについて紹介し、電子レンジ焼結の実演を行った。なお、受講生が作製した成形体は前日のうちに実験用電気炉によって焼結を済ませており、実演に用いた成形体は別に用意しておいた。実演の際は放射温度計を用いて加熱炉内の温度を受講生に測定させることで焼結温度の確認を行った。図 7 に電子レンジ焼結の実演の様子を示す。

実演後、実験用電気炉にて焼結された焼結体の窯出しを行い、30 分間程度、ワイヤブラシやサンドペーパーによる研磨作業を行わせて、製品を完成した。14 名すべての小中学生に対して安全に金属製品を作製させることに成功した。図 8 に受講生の作製した金属製品の写真の一例を示す。

受講後に行ったアンケート結果について表 1 に示す。なお、結果は平成 23 年度の大和郡山市科学教室の受講生 15 名の回答も含め、29 名の回答をまとめたものである。まず、受講前の受講生のものづくりに対する興味については、公開講座が募集形式であることから実に 24 名もの受講生が既に興味を有していた。公開講座が楽しかったかどうかについては全員が楽しかったと回答した。その理由を自由記述欄で聞いた結果を以下に列挙すると、

- 金属を作れたから
- 焼結の方法など、知っていなかったことがわかったし、前から興味があった高専を見に行くことができたから
- 今までこんな体験はしたことがなかったので、初めてで面白かった
- 私でもできるような簡単な作り方だったから
- 金属で物をつくるのは、生まれて初めてでした。でもその方法はとても簡単で、驚きました。高専への興味が膨らんでよかったです。もっと知りたい！



図 6 受講生が作製した寒天成形体の例



図 7 電子レンジ焼結法の実演の様子

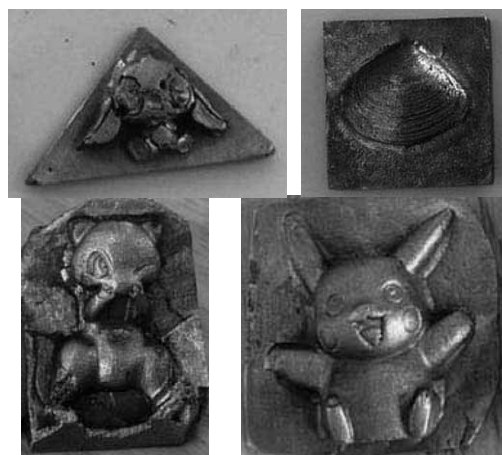


図 8 受講生が作製した焼結金属製品の例

- 金属がカッターで切れるとか、850℃で焼くとか、色々学べた
- いろいろな初めてな事をできてうれしかったし、優しく教えてくれたのでよかったし、楽しかった
- 作るのが簡単でしかも楽しかったので自分でも楽にできた
- 普段、家や学校でできないことをできた
- 簡単できれいな金属アクセサリが作れたから
- 作るのが楽しかった
- ドラえもんの形がうまくできたから

表1 公開講座のアンケート結果

質問	これまでにものづくりに関する技術に興味はありましたか？			
解答	興味があった	特に興味がなかった	考えたこともない	その他
人数	24	5	0	0
質問	本講座は楽しかったですか？			
解答	とても楽しめた	まあまあ楽しんだ	思ったほど楽しめなかった	つまらなかった
人数	24	5	0	0
質問	本講座を受講してみて、金属材料やその他の加工法に関する技術に興味が生まれましたか？			
解答	興味が出てきた	あまり興味は持てなかった	以前よりあまり興味がなく、受講後も興味は生まれなかった	
人数	23	6	0	
質問	粉末冶金法について知りたいと思いましたか？			
解答	もっとよく知りたい	同じような教室があればまた参加したい	特に自分で調べようとは思わない	どちらかという別のことが知りたい
人数	19	6	4	0

というものであった。このことから、受講生にとっては本講座が初めての金属加工体験であり、また、簡単な作業で自分の作りたい形状の金属レプリカを作製することができたことを非常に楽しんだことが見て取れる。

次に、受講後に金属加工に関する興味が生まれたかどうかについての回答は、23名の受講生が「興味が出てきた」と回答し、その割合は79%に達した。しかし粉末冶金法に関する学習意欲については、「もっとよく知りたい」との回答は65%にとどまっており、相対的に低い結果となっている。これは、そもそも金属加工に関する十分な基礎知識を得る機会がなく、今回その理解が不完全なままで粉末冶金法に関する説明を受けたことが影響しているのであろう。それでも21%の受講生が「また参加したい」との回答を選択しており、合わせて86%の受講生が粉末冶金法によるものづくりについて興味を持ったことになる。

最後に、受講生の約半数がアンケートの感想欄に記述したのでその内容を以下に列挙する。

- ◆ 電子レンジで焼いて作った金属（赤いプーさん）はすごかったです。初めて見ました
- ◆ 楽しかった
- ◆ 作り方がとても簡単だった。寒天とレンジで金属が作れることが驚いた
- ◆ 興味がもっとでてきたのでまたやりたい
- ◆ また来たいと思います
- ◆ 作品がきれいにできたのでよかったです。楽しかったです。ありがとうございました
- ◆ 説明がわかりやすいのでよくわかりました。作れてよかったです。ありがとうございました
- ◆ 「粉末冶金法」の事をもっとよく知りたいし、次にこのような講座があったら参加したいです。とても楽しかったです。ありがとうございました

- ◆ とりあえず面白かった
- ◆ 自分的にはもっと高いレベルの実験もしてみたかったです。といっても何も分かりませんが、僕はこの高専を目指しているの、とてもためになった有意義な時をすごせてうれしかったです
- ◆ 最初は難しいかなと思っていましたが、キッチンでもできるような方法だったので面白いなと思いました
- ◆ 金属の加工の事以外にも性質などを知ることができとても楽しかったです
- ◆ 思ったよりも実験は簡単だったし、面白かったです。また来年、機会があれば今度は別の講座にもいってみたいです
- ◆ シリコン型とか金属をつくったので楽しかった
以上より、実施した公開講座は金属加工に関する体験教育テーマとして非常に有効であると言える。

5. 結 言

提案した簡易粉末成形－焼結法を公開講座のテーマとして通常の教室内で運用した。その結果、小中学生に安全にかつ簡単に金属製品の造形を行わせることに成功した。アンケート結果は非常に好評であり、受講生全員が公開講座を「楽しかった」と回答したほか、79%の受講生は金属加工に関して興味が出てきたと回答した。したがって、本公開講座は金属加工に関する体験教育テーマとして非常に有用であると言える。

参考文献

- (1) 内海 能亜：教員養成大学と中学校技術科のものづくり教育、塑性と加工, vol.53, No.616(2012), 404-407.
- (2) 鈴木 富樹：渋谷区立松濤中学校のものづくり教育に対する生徒意識調査と新学習指導要領の全面実施、塑性と加工, vol.53, No.616(2012), 400-403.
- (3) 谷口幸典, 御田健太, 市瀬辰己, 尾崎充紀, 児玉謙司：寒天をバインダとした銅粉末の成形と電子レンジを用いた焼結による粉末冶金法の体験教材化の試み, 粉体粉末冶金協会講演概要集 2011-05(2011), 152.
- (4) 藤田繁治：電子レンジを用いて二元合金をつくる実験の教材化, 愛媛県総合科学博物館研究報告, No.8(2003), 1-5.
- (5) 荒木一郎, 渡辺美恵子：市販の電子レンジを利用した金属溶解装置の試作とその応用, 新潟大学教育人間科学部紀要, No.8-2(2005), 101-107.

高圧小容積の衝撃波管を用いた非定常超音速ジェットに関する研究

福岡 寛, 屋我 実*, 滝谷 俊夫**, 梅津 郁朗***

Study of Unsteady Supersonic Jet using Shock Tube with Small High-Pressure Chamber

Hiroshi FUKUOKA, Minoru YAGA*, Toshio TAKIYA** and Ikurou UMEZU***

The unsteady supersonic jet formed by the shock tube with small high-pressure section was used as a simple alternative system of pulsed laser ablation. The dynamic of the supersonic jet impinging upon a flat plate are discussed by comparing experimental and calculated results. The experiment and numerical calculation were carried out by schlieren method and by solving the axisymmetric two-dimensional compressible Navier-Stokes equations, respectively. The main parameters are distance between the open end of the shock tube and the flat plate, L/D , and the pressure ratio of the shock tube, P_h/P_b . Where, L , D , P_h and P_b are the distance between the open end of the shock tube and the flat plate, the diameter of the shock tube, pressure of the high and low section of the shock tube, respectively. Collision between the shock wave reflected at the flat plate and the head of supersonic jet takes place. Computational results well predict the experimental dynamic behavior of the shock wave and the supersonic jet. Marked increase in the static pressure on the flat plate under high P_h/P_b and short L/D is observed due to interaction between the shock wave and the unsteady jet flow.

記号の説明

- D : 衝撃波管直径 (mm)
 L : 衝撃波管開口端平板間距離 (mm)
 P_h : 高圧室圧力 (Pa)
 P_b : 低圧室圧力 (Pa)
 P_w : 平板中心圧力 (Pa)
 t : 破膜後の経過時間 (s)
 x : ジェット噴出口からの水平方向距離 (mm)
 y : ジェット噴出口からの垂直方向距離 (mm)

1. 緒 言

ガス中における PLA(Pulsed Laser Ablation)はナノ粒子を形成するための代表的な手法である¹⁾⁻⁴⁾. PLAにおいて発生する衝撃波の温度および圧力は非常に高いため⁵⁾, 衝撃波とプルームの干渉は特にガス中でナノ粒子の

形成する場合に重要である. Iwataら⁷⁾は衝撃波を用いて単分散クラスターを生成するために衝撃波と楕円型のチャンバーを用いた新しい手法を提案している. 我々はこれまで数値計算により楕円型空洞内におけるプルームと衝撃波の干渉を解析し, 壁面で反射した衝撃波がプルームに与える影響を報告している⁸⁾⁻¹⁰⁾. しかしながら, 堆積基盤で反射した衝撃波とプルームの関係についての定量的な報告は少ない.

衝撃波管はガスの噴出および衝撃波の動力学を解明するための基本的な実験装置である. 管開口端からのガスおよび衝撃波の放出は, エンジンからの排気ノイズ^{11),12)}, 高速鉄道のトンネル入口におけるインパルスノイズ^{13),14)}などいくつかの産業問題および製造工程を考える上で重要な現象であり, 様々な研究報告がある. Setoguchiら¹⁵⁾は実験と計算の両方を用いて衝撃波管開口端から放出する衝撃波流れの圧力変動について調べている.

しかし衝撃波管は PLA によるパルス状のガス噴出を

*琉球大学工学部

**日立造船

***甲南大学理工学部

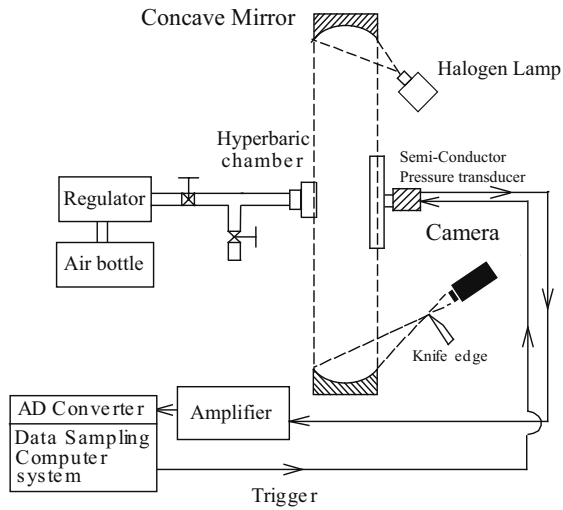


Fig.1 Experimental apparatus

模擬できないため、代替システムとしては不適切である。そこで本研究では、PLAのための極小容積の高圧室を持つ衝撃波管を提案する。衝撃波管が十分に小さいと仮定すると、放出点からのガスのパルス状の膨張を表現できると考えられる。これはPLAにおけるターゲット材料からのガス噴出の代替システムとして有効であると考えられる。レーザ照射による高圧領域、レーザにより誘起されたプルームおよび堆積基盤はそれぞれ衝撃波管の高圧部、衝撃波管から噴出する超音速ジェット、平板に対応する。

本研究の目的は、実験および数値を用いて衝撃波管開口端と平板間の距離が超音速ジェットおよび衝撃波に与える影響を調べることである。極小容積の高圧室を持つ衝撃波管から噴出される非定常超音速ジェットをPLAの簡易な代替モデルとして用いた。支配方程式はTVD(Total Variation Diminishing)スキームを用いて数値的に解いた。本研究では衝撃波管開口端と平板の距離、および、衝撃波管の高圧室と低圧室の圧力比を変化させて実験および計算を行った。平板は衝撃波管下流部に設置した。また実験の簡便化のため衝撃波管から噴出するガスは空気とした。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。空気ボトルからレギュレータを介して減圧された空気は、衝撃波管高圧室へ充填される。その高圧空気は高圧室と低圧室を分割している隔膜を針によって破膜することで低圧室に相当する大気に放出される。破膜直後、瞬間的に噴出するジェットが伝播衝撃波を発生させる。高圧室の圧力は半導体

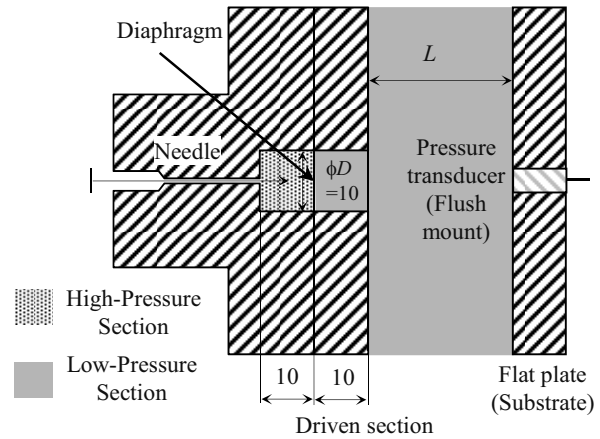


Fig.2 Side view of shock tube and flat plate

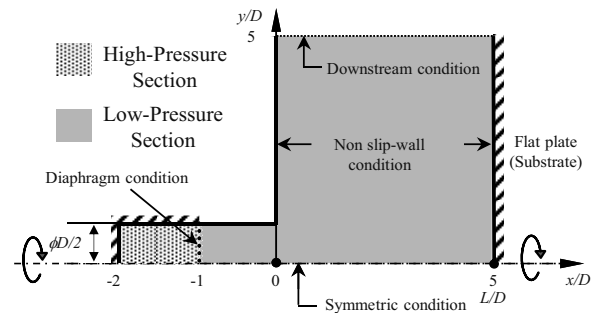


Fig.3 Flow field for computation and boundary conditions

圧力センサにより測定する。平板中心位置における非定常な圧力は衝撃波および超音速ジェットの特性を捉えるために高精度の半導体小型圧力センサを用いて測定を行った。流れ場の広範囲における可視化はハロゲンランプを光源としたスチルカメラを用いてシュリーレン法により行った。さらに流れ場の特性を詳細に調べるために高速度カメラを用いたシュリーレン法により可視化を行った。可視化用の連続光にはメタルハライドライトを用いた。

図2に衝撃波管の拡大図を示す。衝撃波管の直径、駆動部および被駆動部の長さはそれぞれ10mmを用いている。隔膜にはポリエチレンテレフタートを素材としたルミラー膜を用いた。開口端から平板までの距離L/Dは、2.5から10.0まで測定した。破膜時の圧力比を変化させるために、衝撃波管高圧室の圧力と低圧室に相当する大気圧の圧力の比を $P_h/P_b=10.7, 20.6, 36.0$ および47.4とした。それぞれ圧力比は隔膜厚さ25, 50, 75および100 μm に相当する。

3. 数値計算法および境界条件

流れの支配方程式は二次元軸対称圧縮性ナビエスト

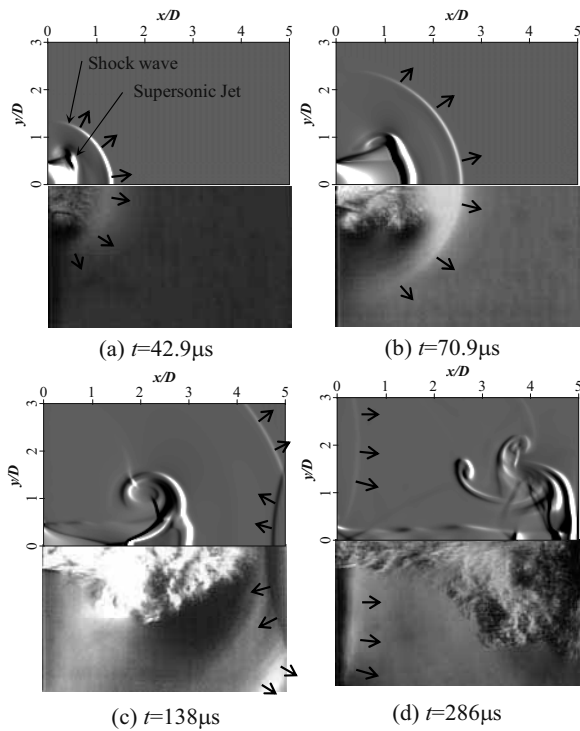


Fig.4 Typical computational schlieren images and schlieren photographs for $L/D = 5.0, P_h/P_b = 22.6$: above, calculation; below, experiment

ークス方程式を採用し、これを一般座標系に変換し解いた。計算に用いたスキームは TVD 型 MUSCL 法で有限体積法により解いた。このとき移流項は Roe の近似リーマン法により評価し、時間積分は三次精度のルンゲ・クッタ法を用いた。

図 3 に本計算で用いる計算領域および境界条件を示す。境界条件には壁、流出部、および回転中心軸にそれぞれ滑り無し壁条件、流出条件、および、軸対称条件を用いた。ジェット噴出位置は $x/D = -1.0$ とした。格子サイズは、開口端から噴出する圧力波を捉えるために $\Delta x = \Delta y = 40/D$ とした。それぞれのパラメータは実験と同様とした。

4. 結果および考察

図 4 に $L/D = 5.0, P_h/P_b = 22.6$ の場合のシュリーレン写真と数値計算より求めたコンピュータシュリーレン像を示す。各図の上および下はそれぞれ計算および実験結果である。実験および計算における時間はそれぞれ破膜した瞬間を $t = 0$ とした。図中の矢印は衝撃波の進行方向をあらわしている。図 4(a) より、開口端付近に破膜後に噴出したジェット、および、その前方に球面衝撃波が確認できる。図 4(b) において、ジェットおよび球面衝撃は平板に向かって進展しており、さらにパレル衝撃波、調節衝

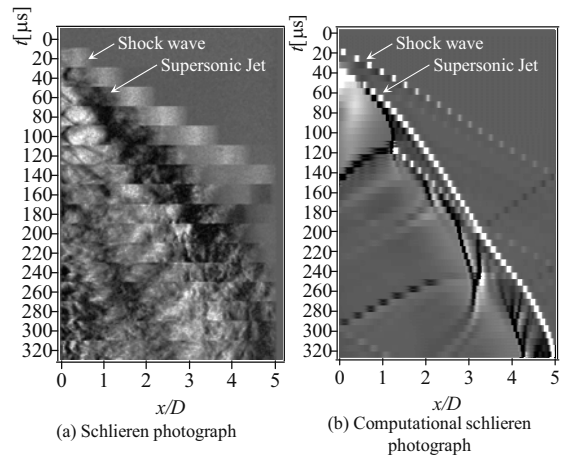


Fig.5 Time history of schlieren photographs for $L/D = 5.0, P_h/P_b = 10.7$

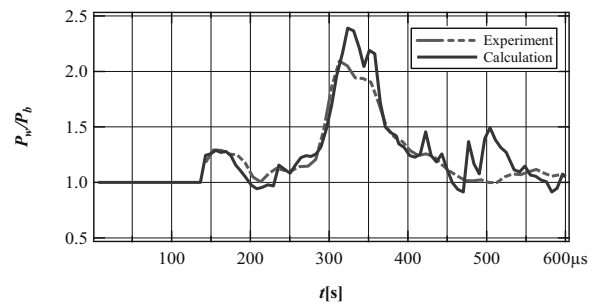


Fig.6 Wall static pressure variation for $L/D = 5.0, P_h/P_b = 10.7$

撃波および渦が確認できる。図 4(c) では、伝播衝撃波が $L/D = 5.0$ に設置している平板で反射し、その向きを変え開口端側に伝播している。図 4(d) より超音速ジェットが壁に到着していることがわかる。さらに同じ時間に上流側に伝播している衝撃波が左側の壁において反射し、再び平板に進行していることがわかる。このことから衝撃波は開口端側の壁と平板の間を往復していると考えられる。これらの数値計算による衝撃波の挙動は実験結果と定性的に良く一致している。

前述の実験および計算結果より、開口端より噴出したジェットによって形成される衝撃波は平板で反射することが確認できた。そこで次に $L/D = 5.0, P_h/P_b = 10.7$ における衝撃波とジェットの挙動を詳細に調べるために図 5 に流れ場のより詳細な時間変化を示す。図 5(a) は実験によるシュリーレン写真を示している。シュリーレン写真は撮影範囲 $y/D = -0.14 \sim 0.14$ 、時間 $t = 0 \sim 320 \mu\text{s}$ における流れ場を示しており、撮影速度は $50000\text{fps} (\Delta t = 20\mu\text{s})$ である。図 5(a) より $t = 80 \mu\text{s}$ の場合、衝撃波およびジェットはそれぞれ $x/D = 3.0$ および 1.8 付近に位置し、平板側に伝播している。 $t = 140 \sim 180 \mu\text{s}$ において、衝撃波は平板で反射し噴口側に向かっていることがわかる。また、ジェットは

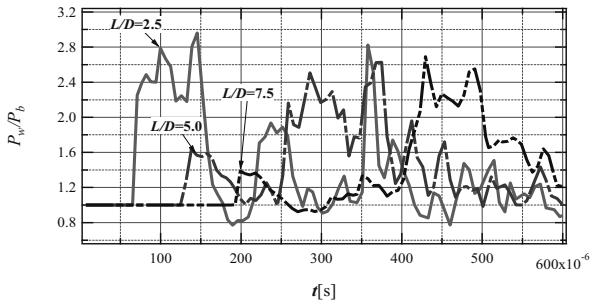


Fig.7 Wall static pressure variation for $P_t/P_b = 22.6$, $L/D = 2.5, 5.0$ and 7.5

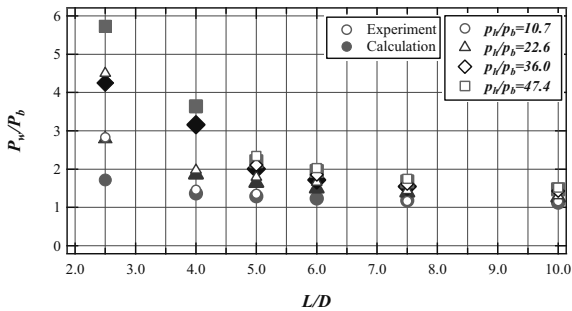


Fig.8 Relation between L/D and peak pressure of shock wave

$t = 320 \mu\text{s}$ において平板に到達している。次に上述の計算結果と本研究で行った数値計算結果を比較するために、実験と同じ条件におけるコンピュータシュリーレン像を図 5 (b) に示す。ただし数値計算結果の場合、表示範囲および時間間隔はそれぞれ $y/D \approx -0.05 \sim 0.05$ および $\Delta t = 6 \mu\text{s}$ である。図 5(b) より、実験結果と同様に衝撃波およびジェットが上流側に伝播していることがわかる。時間 $t = 140 \mu\text{s}$ において、衝撃波は平板に到達していることが確認できる。さらに、この反射した衝撃波はジェットの先頭で反射し再び平板側に向かっていることがわかる。さらにジェットは $t = 320 \mu\text{s}$ において平板に到達しており、この時間は実験結果とほぼ同じである。

計算による流れ場は実験結果をよく再現しており、定性的によくあっていることがわかった。そこで次により定量的な比較を行うために、圧力比 $P_t/P_b = 10.7$ における平板中心位置の静圧の時間変動を図 6 に示す。図中の実線および波線はそれぞれ実験および数値計算の結果である。図 6 より $t = 156 \mu\text{s}$ および $t = 323 \mu\text{s}$ において特徴的な圧力ピークが確認できる。それぞれのピークは平板に衝撃波およびジェットが衝突した瞬間を示している。これより静圧の時間変化は実験および計算においてほぼ同じ結果になることがわかった。この実験および計算結果の差は、計算の場合に破膜時間および開口率を考慮していないためだと考えられる。

衝撃波管開口端と平板の距離は衝撃波とジェットの

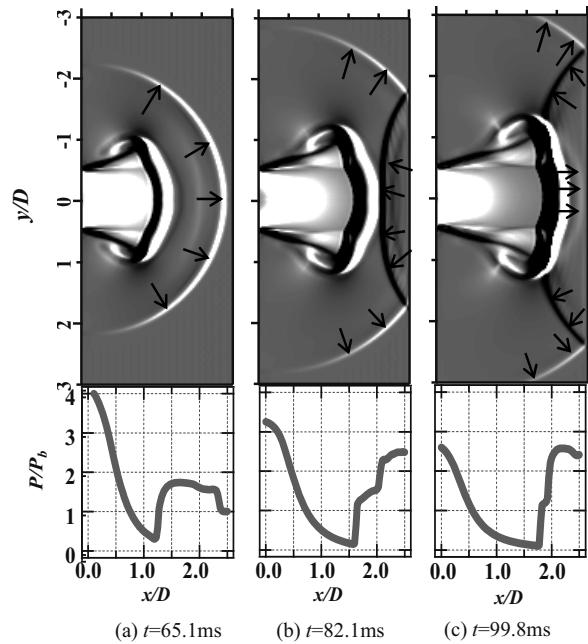


Fig.9 Computational schlieren photographs and pressure distribution along axis for $L/D = 2.5, P_t/P_b = 22.6$

干渉に重要であると考えられる。そこでこれらの特性を見るため、 $P_t/P_b = 22.6$ における平板中心位置の壁面静圧変動を図 7 に示す。実線、一点鎖線、および、三点鎖線はそれぞれ $L/D = 2.5, 5.0$ および 7.5 の場合の変化を示す。図 7 より $L/D = 2.5, 5.0$ および 7.5 の場合において衝撃波の平板への到達により起こるピークが確認でき、それぞれ $t = 82.1, 138$ および $199 \mu\text{s}$ の瞬間に発生している。さらにこれらのピーク値は L/D が小さいほど大きくなっており、特に $L/D = 2.5$ の場合に高い値となる。これは小さい L/D の場合、衝撃波が減衰する前に平板に到達したためだけでなく、平板で反射しさらにジェットの先頭で反射した衝撃波が平板に到達したためであると考えられる。このため $L/D = 2.5$ において特に高い圧力ピークが現れたと考えられる。その後 $L/D = 2.5, 5.0$ および 7.5 について、それぞれジェットの平板への到達によるピークが確認でき、それぞれ $t = 146, 286$ および $429 \mu\text{s}$ の瞬間に最大となる。このことから衝撃波およびジェットが平板に到達した時間の差は L/D が小さいほど小さい。

上述より、衝撃波による圧力の変化は L/D に依存していると考えられる。そこで次に平板間距離 L/D が流れ場に与える影響を調べるために、破膜時の圧力比をパラメータとして衝撃波によって起こる平板上のピーク圧力と大気圧との比 P_w/P_b と平板間距離の関係を図 8 に示す。図中の白抜きのプロットおよび塗りつぶしたプロットはそれぞれ実験および数値計算結果を示している。図 8 よ

り $P_h/P_b=10.7, 22.6, 36.0$ および 47.4 の場合、ピーク値は L/D を大きくすると低くなることがわかった。また $L/D=10.0$ の場合、 $P_h/P_b=10.7, 22.6, 36.0$ および 47.4 においてピーク値はほぼ一定となった。さらに P_h/P_b が大きい場合、圧力のピーク値の減少の割合は P_h/P_b が小さいときよりも大きいことがわかる。このことから破膜時の圧力比が高い場合、衝撃波は圧力比が低い場合よりも減衰しやすくなると考えられる。また $L/D=2.5$ の場合を除くと、計算結果は実験によるピーク値と一致していることがわかる。次節で $L/D=4.0$ の場合における流れ場のメカニズムをコンピュータシュリーレン像および圧力分布を用いて説明する。

図9は $L/D=4.0, P_h/P_b=22.6$ におけるコンピュータシュリーレン像および中心軸上の圧力分布を示している。図中の矢印は衝撃波の進行方向を示している。図9(a)の圧力分布より $x/D=2.2$ から 3.7 の範囲において衝撃波が通過したことによる圧力の上昇が確認できる。さらに図9(b)より、平板で反射した衝撃波が通過することによる圧力上昇が $x/D=3.3$ から 4.0 の範囲で確認できる。図9(c)に示すコンピュータシュリーレン像より $x/D=3.5$ 付近において衝撃波がジェットの先頭と衝突し反射している。この反射衝撃波の通過が圧力分布の $x/D=3.0$ から 3.5 における圧力を上昇したと考えられる。このことから L/D が小さい場合、衝撃波はジェットの先頭と平板に閉じ込められて高圧領域を形成すると考えられる。一般に衝撃波が通過することによる高圧領域は温度も上昇する。このことから衝撃波が閉じ込められた空間は高温高圧領域になると考えられる。

5. 結 言

高圧小容積の衝撃波管を用いて超音速ジェットを管開口端より噴出した流れ場を実験および数値計算により解析し、非定常噴流および衝撃波の特性について調べた。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 数値計算結果より、小容積の衝撃波管を用いた場合でも一般的な衝撃波管でみられるバレル衝撃波や調節衝撃波を確認することができた。
- (2) 開口端から噴出したジェットにより形成された衝撃波が平板によって反射することを計算結果および実験結果から確認できた。また $P_h/P_b=22.6$ の場合、計算による流れ場は実験結果をよく再現しており、定性的によく一致する。さらに衝撃波は開口端と平板の間を往復することがわかった。
- (3) 壁面静圧の上昇は衝撃波およびジェットが平板に到達することで起こることがわかった。

- (4) $P_h/P_b=10.7, 22.6, 36.0$ および 47.4 の場合、衝撃波によって起こるピーク値は L/D が $2.5\sim 10$ まで大きくすると指数関数的に低くなることがわかった。また $L/D=2.5$ の場合を除くと、計算結果は実験によるピーク値と一致する。
- (5) $L/D=4.0$ の場合、衝撃波はジェット先頭と平板の間に閉じ込められて高圧領域を形成することがわかった。

参考文献

- (1) Gacek S., and Wang X., "Secondary shock wave in laser-material interaction," *Journal of Applied Physics*, 104(12), p. 126101, 2008.
- (2) Fukuoka H., Yaga M., and Takiya T., "Study of Interaction between Unsteady Supersonic Jet and Shock Waves in Elliptical Cell," *Journal of Fluid Science and Technology*, 3(7), pp. 881-891, 2008.
- (3) Iwata Y., Kishida M., Muto M., Yu S., Sawada T., Fukuda A., Takiya T., Komura A., and Nakajima K., "Narrow size-distributed silicon cluster beam generated using a spatiotemporal confined cluster source," *Chemical Physics Letters*, 358(1-2), pp. 36-42, 2002.
- (4) Ko S. H., Pan H., Hwang D. J., Chung J., Ryu S., Grigoropoulos C. P., and Poulidakos D., "High resolution selective multilayer laser processing by nanosecond laser ablation of metal nanoparticle films," *Journal of Applied Physics*, 102(9), p. 093102, 2007.
- (5) Yaga M., Fukuoka H., Iwata Y., and Takiya T., "Behavior of shock waves formed by unsteady supersonic jet injected into cell," *Journal of Thermal Science*, 17(1), pp. 50-55, 2008.
- (6) Yaga M., Takiya T., and Iwata Y., "Numerical study of unsteady compressible flow driven by supersonic jet injected into elliptical cell with small exit hole," *Shock Waves*, 14(5-6), pp. 403-411, 2005.
- (7) Hastrup N., and O'Connor G. M., "Nanoparticle Generation During Laser Ablation and Laser-Induced Liquefaction," *Physics Procedia*, 12, pp. 46-53, 2011.
- (8) Wen S.-B., Mao X., Greif R., and Russo R. E., "Expansion of the laser ablation vapor plume into a background gas. I. Analysis," *Journal of Applied Physics*, 101(2), p. 023114, 2007.
- (9) Wen S.-B., Mao X., Greif R., and Russo R. E., "Experimental and theoretical studies of particle

- generation after laser ablation of copper with a background gas at atmospheric pressure,” *Journal of Applied Physics*, 101(12), p. 123105, 2007.
- (10) Riabinina D., Irissou E., Le Drogoff B., Chaker M., and Guay D., “Influence of pressure on the Pt nanoparticle growth modes during pulsed laser ablation,” *Journal of Applied Physics*, 108(3), p. 034322, 2010.
- (11) Kim H.-D., Kweon Y.-H., and Setoguchi T., “A study of the weak shock wave propagating through an engine exhaust silencer system,” *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5), pp. 893-915, 2004.
- (12) Liang S.-M., and Tai C.-S., “Analysis and prediction of shock-induced near-field acoustics from an exhaust pipe,” *Computers & Fluids*, 45(1), pp. 222-232, 2011.
- (13) Baron A., Mossi M., and Sibilla S., “The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(5), pp. 365–401, 2001.
- (14) Uystepuyst D., William-Louis M., Creusé E., Nicaise S., and Monnoyer F., “Efficient 3D numerical prediction of the pressure wave generated by high-speed trains entering tunnels,” *Computers & Fluids*, 47(1), pp. 165-177, 2011.
- (15) Setoguchi T., Kim H.-D., and Kashimura H., “Study of the Impingement of Impulse Wave Upon a Flat Plate,” *Journal of Sound and Vibration*, 256(2), pp. 197-211, 2002.

ピコ秒パルスレーザを用いた厚み測定

押田 至啓

Interferometric Measurement of Thickness using a Pico-second Pulse Laser

Yoshihiro OSHIDA

In this paper, a thickness measuring system using a pico-second pulse laser is proposed. The properties of the Pico-second Pulse Laser are narrow pulse width, high energy density, high peak power and broad bandwidth of oscillation. The pulse laser is used for micromachining. But, the coherency of the pulse laser is low due to broad bandwidth. Moreover, two light waves with optical path difference over the pulse width cannot interfere, then the interference fringes are not observed. Therefore, in the interferometer using the pulse laser, two path lengths (reference beam, object beam) must be equal to obtain the interference fringes. In this method, by maximizing the contrast of the interference fringes, the interferometer with zero path difference between two paths can be constructed. When the transparent media is placed in the object beam of this zero path difference interferometer, the contrast of the fringe decreases or vanishes. In this case, zero path difference is achieved by moving the reference mirror to the position where contrast of fringes is maximum value. The amount of displacement of the reference mirror corresponds to the path difference occurred by the transparent media. Consequently thickness of the object can be measured by the amount of the displacement of the mirror. To demonstrate the validity of this method, we show the experiment to measure the thickness of plastic plate. Experimental results show the validity of this method.

1. 緒言

パルス幅がナノ秒からフェムト秒の短パルスレーザは、短いパルス幅にエネルギーを集中できることから、高いエネルギー密度と高いピーク出力を得ることが出来る。このことを用い、レーザ微細加工への応用技術が開発されている。また、高速に強度が変化することを用いた加工や、通信技術への応用等が研究されている¹⁾。さらに、高速パルスであるため、スペクトルが広くなり、これを用いた分光分析等が行われている。一方、スペクトル幅が広いことから、コヒーレンシーが低下し、干渉現象が起こりにくくなる。このため、パルスレーザを光源として用いた干渉計測はほとんど行われておらず、短パルスレーザの特性が計測にはあまり生かされていないといえる。しかし、白色光に比べコヒーレンシーは高いため、光路差がほぼ0に近い2光波については干渉現象を容易に観測することが出来る。また、光波がパルス形状をしているため、パルス同士が重なり合う場合以外は光波の重ね合わせが起こら

ず、干渉現象は生じない。これらの特性を組み合わせれば、短パルスレーザの干渉を用い、光路差0の干渉光学系を精度良く構成することが可能であると考えられる。また、干渉計中の光路長の変化に追従し、光路差0の状態を維持することにより、光路長変化を測定することが出来る。

本論文では、短パルスレーザのパルス性と広帯域性に注目し、干渉現象がパルスの重なり合う状態のみで、しかも光路差が0に近い状態でのみ干渉現象が観測されることを用いた透明物体の厚み、および段差の寸法測定システムを提案する^{2,3)}。本法では、光源としてピコ秒パルスレーザを用いた干渉光学系において、測定される干渉縞のコントラストがピークになるよう光学系を調整することにより、光路差0の干渉計を構成している。この干渉計の光路中に透明物体を挿入したことにより生じる光路長変化を、干渉計中の鏡の移動により得られる干渉縞のコントラストがピークとなる移動量より求める。干渉縞のコントラストは光源のコヒーレンシーとパルス幅により決定されるため、本論文では、ピコ秒パルスレーザのスペクトル幅およびパルス幅と干渉縞コントラストの関係に

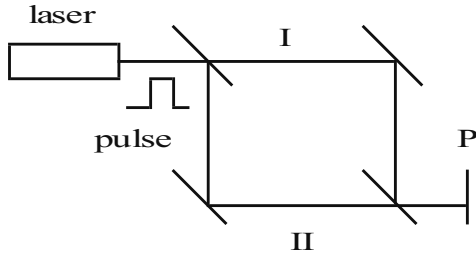


図1 マッハツェンダー干渉計

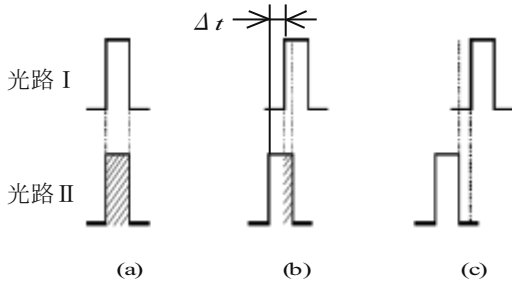


図2 パルス2光波の重ね合わせ

ついて述べ、これを実験的に検証する。さらに、干渉縞コントラストのピーク位置を検出することにより、透明プラスチック板の厚み測定を行った結果より、本法の厚み測定への妥当性を示す。また、高精度な段差の寸法測定への応用の可能性を示す。

2. 短パルスレーザーの干渉

2. 1 短パルス性と干渉

本法の基本的な光学系として、図1に示す短パルスレーザーを光源としたマッハツェンダー干渉計を考える。光源から出射されたパルスレーザー光はハーフミラーにより光路 I と光路 II に分けられ、観測面 P で再び重ね合わされる。光学系中の光路 I と光路 II の間に光路差がない場合には、図 2 (a) に示すように 2 光波は完全に重なり合い干渉することにより、観測面で波面の傾きに対応した干渉縞を生じることになる。しかし、2 光路間に光路差がある場合には、光路差により観測面への 2 光波の到達時刻に差が生じるため、図 2 (b) に示すように 2 光波間に Δt の時間ずれが生じる。このとき重なり合っている図中の斜線部分の光波はお互いに干渉するが、それ以外の光波は干渉現象には全く寄与しないことになる。すなわち重なり合わない光波は光強度のみが観測され、バイアス成分としてはたらくため、干渉縞のコントラストが低下することとなる。

光路 I、光路 II からの光波それぞれの強度を I_1 、 I_2 とすると、観測面 P で観測される干渉縞の強度 I は

$$I = (T - \Delta t)(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi) \tag{1}$$

と表すことができる。ただし、 T はパルス幅、 Δt は 2 光波間の時間のずれ、また、 φ は 2 光波間の波面の傾きにより生じる位相差分布を表す。光強度 I の最大値を I_{max} 、最小値を I_{min} とすれば、干渉縞のコントラスト C は

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2(T - \Delta t)\sqrt{I_1 I_2}}{(T + \Delta t)(I_1 + I_2)} \tag{2}$$

と表される。特に $I_1 = I_2$ ならば

$$C = \frac{T - \Delta t}{T + \Delta t} \tag{3}$$

となり、時間ずれ Δt の増加とともにコントラストが低くなる。さらに、 Δt が大きくなり、パルス幅 T より大きくなれば図 2 (c) の状態となり、もはや干渉縞は観測されなくなる。

本研究で使用するピコ秒パルスレーザーのパルス幅は 50ps であるため、この大きさの時間遅れを生じるための光路差は、光速を $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、15mm となり、これ以上の光路差がある場合には干渉縞は観測できなくなることになる。

さらに、図 2 のパルスではパルス形状を矩形としたが、実際はガウス分布に近い形となっており、コントラストの低下はさらに大きくなると考えられる。

2. 2 広帯域性と干渉

パルスレーザーではそのパルス性の故にスペクトル分布が広がる。そのために可干渉距離は限られたものとなる。図 2 (b) の状態では干渉縞は観測されるが、スペクトル分布の広がりの影響でコントラストの低いものとなる。すなわち干渉縞の形成はパルスレーザーの時間コヒーレンスに依存する。光源のスペクトル分布がガウス分布であるとき、発進帯域幅 (半値幅) を $\Delta \omega$ とすると

$$\Delta t \leq \frac{2\pi}{\Delta \omega} \tag{4}$$

が満たされる範囲で干渉縞が観測される⁴⁾。この Δt に対応する光路差すなわち可干渉距離 Δl は

$$\Delta l = \frac{2\pi c}{\Delta \omega} = \left(\frac{\lambda}{\Delta \lambda}\right) \lambda \tag{5}$$

となる。ただし、 c は光速、 λ は中心波長、 $\Delta \lambda$ は実効的な

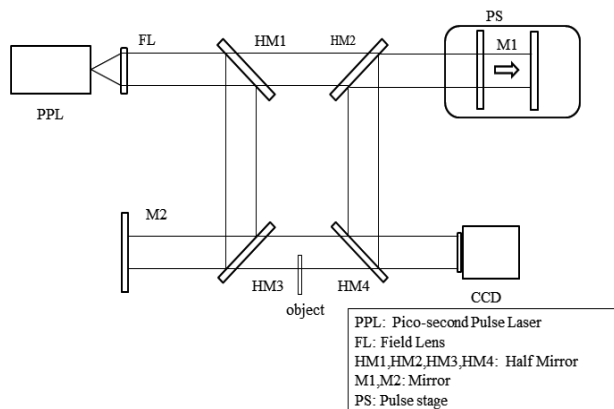


図3 厚み測定光学系

波長範囲を表す。

パルスレーザの干渉では、2. 1で述べたパルス性のために生じるコントラストの低下に、コヒーレンス長の影響が重畳されて、時間差すなわち光路差に対するコントラスト変化の関係が先鋭化され、コントラストのピーク位置の判定がより精度よくなると考えられる。

3. パルスレーザによる厚み測定原理

厚み測定に用いる光学系を図3に示す。マッハツェンダー干渉計を基本とした光学系を構成する。この光学系においては、光路中の鏡M1をパルスステージにより光線軸方向に平行移動し、一方の光路の光路長を調整する。観測面における干渉縞をCCDカメラで観測し、干渉縞のコントラストがピークになる位置まで鏡M1を移動することにより、干渉計の2光路の光路差を0とする。

まず、測定物体が存在しない状態で干渉縞のコントラストをピークにすることにより光路差0の状態とする。次に、光路長調整用の鏡M1を含まない光路中に透明な測定物体を挿入する。透明物体の挿入により一方の光路の光路長が変化するため、干渉縞のコントラストの低下が起こる。あるいは光路長変化がパルス幅を超える場合には2光波の重ね合わせは起こらず、干渉縞が消失してしまう。この状態で、干渉縞のコントラストが再びピークになるように、パルスステージにより光路長調整用の鏡M1を移動すれば、この鏡の移動量 ΔL が透明物体を挿入したために生じた2光路間の光路差となる。

光路長の変化は挿入した透明物体の厚み L と、屈折率 n_p の積によって与えられる。従って、パルスステージ移動量 ΔL から透明物体の厚みは次式により得ることができる。

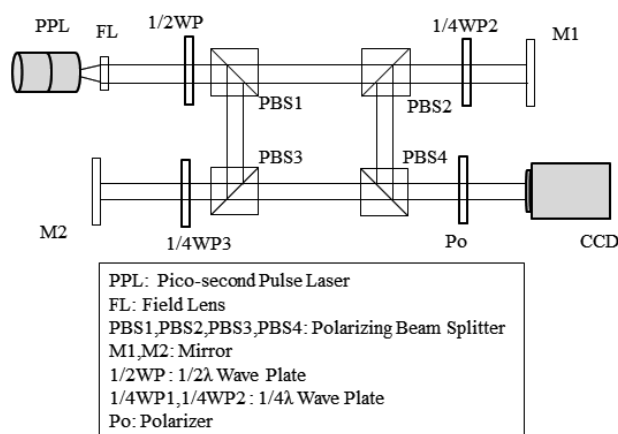


図4 偏光ビームスプリッタを用いた厚み測定実験光学系

$$L = \frac{\Delta L}{n_p - n_a} \quad (6)$$

ただし、 n_a は周囲の空気の屈折率であり、簡単のため透明物体は平行平板で、光線はその表面に対し垂直に入射しているものとする。

4. 実験方法

4. 1 可干渉距離測定

本実験では、光源として浜松ホトニクス製ピコ秒パルスレーザPLP-02 (パルス幅49ps)を用いる。また、光学系としては光損失を抑えるために、図4に示す偏光ビームスプリッタを用いた光学系を構成した。図中の鏡M1をパルスステージ (移動量 $1\mu\text{m}/\text{pulse}$)により平行移動した。

可干渉距離を測定するため、干渉縞のコントラストが最大となるよう鏡M1を調整する。次に、干渉縞のコントラストが0となり、観測されなくなるまで鏡M1を移動し、その移動距離より、可干渉距離を求める。

また、スペクトロメーター (THORLABS製CCS100)によりスペクトル分布を求める。

4. 2 厚み測定実験

図4の光学系のPBS3とPBS4の間に測定対象の透明物体を挿入し、干渉縞のコントラストを最大にする鏡M1の移動量から (6)式により透明物体の厚みを測定する。透明物体としては厚さ 1.10mm 、屈折率 $n_p=1.54$ のプラスチック板を用いた。またパルスステージの送りは5pulseごとすなわち $5\mu\text{m}$ ごととした。

5. 実験結果および考察

5. 1 可干渉距離測定

スペクトロメータにより得られたピコ秒パルスレーザのスペクトル分布を図5に示す。これにより、中心波長648nm、帯域幅4.3nmであることが得られた。また、スペクトル分布はほぼガウス分布をしていると考えられる。そのため可干渉距離としては(5)式を用いることができると考えられ、式中の ΔL が半値幅であることを考慮すると、可干渉距離は0.39mmとなる。

次に、干渉縞のコントラスト最大から0になるまでの鏡M1の移動量を測定した結果、実験的に得られた可干渉距離は0.42mmである。

このことより、干渉縞のコントラストは、主としてスペクトルの広帯域性によるものであることが分かった。今回の実験ではパルス性の影響は検出することができなかったが、鏡M1の移動量とコントラストの関係を求めれば、その関係が先鋭化されているものと考えられる。

5. 2 厚み測定実験

透明なプラスチックを挿入して得られた干渉縞画像を図6に示す。

図の右側半分領域にプラスチック板を挿入しており、左側は物体が存在しない領域である。物体が存在しない状態でコントラストが最大になる図6(a)の場合には、物体透過領域では光路差のために干渉縞は観測されない。この状態から、調整用鏡M1をパルスステージで移動し、

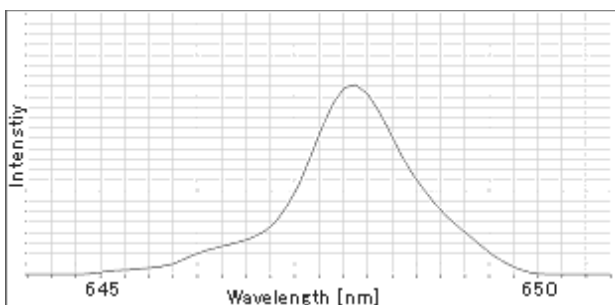
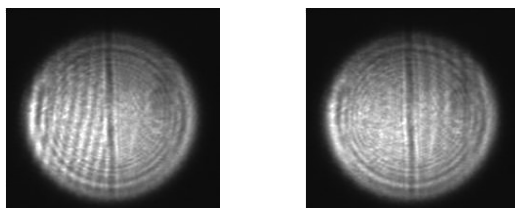


図5 ピコ秒パルスレーザのスペクトル分布



(a) (b)

図6 厚み測定実験結果

図6(b)に示すように、物体領域で干渉縞のコントラストが最大になるように調整した。このときのパルスステージの移動量から得られた光路長変化量は590 μm であった。この結果から(6)式を用いて厚み L を求めると1.09mmの値を得た。ただし空気の屈折率は $n_a=1.00$ とした。この結果をマイクロメータを用いた値1.10mmと比較するとほぼ一致しており、本方法により厚み測定が可能であることが実験的に検証された。

本法においてはパルスステージの送り幅と精度が測定結果の精度を決定することとなる。今回の実験では送り幅を5 μm と設定したが、さらに高精度で送りを行えば高い精度で厚みを測定することができる。さらに干渉縞が得られている領域では、干渉縞には形状分布情報が含まれているため、位相シフト法を適用して高精度な形状分布測定を行うことができる。

今回は厚み測定を行ったが、透明物体の代わりに鏡M2の位置に段差物体を置くことにより、厚み測定と同様な手順で段差の寸法を測定することができる。これにより、段差部分は本法を用い、平面部分は位相シフト法を用い、段差と表面形状を同時に高精度で測定することが可能であると考えられる。

6. 結言

パルスレーザのパルス性と広帯域性を用いた厚み測定システムを提案した。本法では、干渉縞のコントラストのピークになる状態を利用し、光路差測定を行っている。このコントラストの変化は広帯域性によることを実験的に示した。また、透明プラスチックの厚み測定により、本法の妥当性を検証した。今後、位相シフト法を組み込み高精度測定システムを構成するとともに、コントラスト測定の自動化を行うことにより、自動厚み・段差測定システムを構成することができる。

最後に、本実験においては元本校専攻科機械制御工学専攻科生の松本雅人氏、大崎達也氏、中島往馬氏に負うところが大きい。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) J.Herrmann B.Wilhelmi, 超短光パルスレーザ(1991) 共立出版.
- 2) 松本雅人, 押田至啓, 2012 年度精密工学会春季大会 学術講演会講演論文集, pp1161-1162 (2008).
- 3) 中島往馬, 押田至啓, 2011 日本実験力学学会講演論文集, pp413-416 (2011).
- 4) M.Born E.Wolf, Principles of Optics, (1999)pp348-352, Cambridge University Press.

回転水中紡糸法による Au-Sn 合金細線の開発

島岡 三義 和田 基*

Development of Au – Sn Alloy Fiber by the In-Rotating-Water-Spinning Process

Mitsuyoshi SHIMAOKA and Motoi WADA*

The spinnability of pure gold on the In-Rotating-Water-Spinning process is not good because of the low formability of the oxide film around the molten gold jet. The development of continuous fiber of Au-Sn alloy by this spinning method has been performed in order to clear the effect of the addition of Sn on the spinnability. The relation of the amount of Sn and its spinnability have been examined. In Au-20wt%Sn alloy, very long fiber of 12 m with circular cross section was obtained at the conditions of 120 μ m in the nozzle diameter, 3.33 s⁻¹ in the rotating drum velocity, 0.40 MPa in the ejection pressure and 0.803 rad in the incidence angle of jet. In Au-Sn alloy, the amount of Sn decreases by 0.6wt%(1 at%), the wire length shortend to around 100 mm.

1. はじめに

金 (Au) の比重が 19.8 程度であり、オスミウムやイリジウムに次いで地球上で最も重い部類の金属である。従来、このように密度が大きい材料での回転水中紡糸の研究報告例は見あたらない。Au 線は鑄造によって得られた棒材を伸線加工されて製造されるが、回転水中紡糸法により、溶湯から 1 パスで直径が 0.2mm 程度の連続細線が製作可能になれば、細線製作プロセスが大幅に合理化され、それに伴いコストも大幅に削減できる。筆者らは、純 (99.99wt%) Au の静止水中噴射および回転水中噴射実験を行って回転水中紡糸性を調査したが、得られた凝固物は球形粒子またはそれらが合体したひょうたん型であり、連続細線の製作はきわめて困難であるとの結果を見出している。合金溶解るつぼ兼噴射ノズルは石英ガラス製であるが、石英ガラスと熔融 Au は全く反応せず、ノズルは繰り返し使用可能であることも確認している。また、全率型固溶体を形成する Au-Ag 合金でも回転水中紡糸実験を行ったが、球形凝固物が得られただけであり、連続細線の製作は見込めなかった。

回転水中紡糸法で連続細線を得るには、熔融ジェットに硬い酸化被膜を形成させ、回転水層中でのジェットの分断を阻止する必要があり、酸化被膜形成性を促進させるには Be などの希土類元素の微量添加が効果的であると

の指摘がある¹⁾。本研究では、Au の回転水中紡糸性を向上させ得る添加元素を探るが、入手が容易で融点が石英ガラスの軟化温度より低い Sn を選択し、よりピュアな Au 合金細線を得るために、添加元素量と回転水中紡糸性の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

純 Au (純度 99.99wt%) に添加する元素として純度 99.9wt%Sn を選定した。所定の組成比 (Sn 比を 80wt%, 20wt%, 15wt%, 10wt%, 3wt%, 1wt% および 0.6wt%,) になるようにそれぞれの金属を電子天秤で秤量し、石英ガラス製るつぼ (内径 9mm) を用いて大気雰囲気中で高周波誘導加熱、溶解して合金化した。石英ガラスとの反応層を除去し、3g 程度に切断して回転水中紡糸噴射試料とした。また、添加元素量が 0.01g 以下の場合、石英ガラス製るつぼ兼噴射ノズルに Au および添加元素を装填し、高周波誘導電流により加熱・溶解・攪拌して合金化し、直ちに Ar ガス圧で静止水中、もしくは回転水層中に噴射することとした。添加 Sn 量が 1at% (約 0.6wt%) 程度の場合、合金化されているかの判断として、得られた凝固物が純 Au と同様の球状粒子でないときは合金化されて噴射されているものと判断した。

* 電子制御工学科研究生 (現在, 豊橋技術科学大学学生)

Fig. 1 に回転液中紡糸装置の概略を示す。回転ドラム（内径 600mm, 幅 60mm）を回転させることで、遠心力によりドラムの内側に水層（約 20mm）を形成した。石英ガラス管を加熱成形して製作されたノズルに試料合金を入れ、酸化防止のために、ノズル内の空気を Ar ガスにより十分置換した後、高周波誘導加熱装置により試料合金を加熱、溶解し、Ar ガスの圧力により、回転液層中に噴射させ、熔融合金を急冷凝固させることにより合金細線を製作する。また、合金の液相線温度が低い場合には、冷却液体にエタノールを用いた。

連続細線が得られるかどうかは、回転液層速度と熔融合金ジェット速度の大小関係が大きく影響する。熔融ジェット速度が回転液層速度より速ければ、熔融ジェットに対してドラム内壁に到達した部分から圧縮力が伝播してジェットは屈曲し、材料がもろければ屈曲部分で折損してしまう。また、ドラム内壁に到達するまでに、ジェット円周面に作用する回転液層の粘性抵抗により折損してしまう場合も考えられる。一方、ジェット速度が遅ければ、ジェットが冷却液体に引張られて破断する。そのため、ジェット速度を決定する噴射圧力とドラム回転速度は特に重要な紡糸パラメータになる。ジェット速度は合金密度の平方根に逆比例するので²⁾、密度の大きい Au 合金では噴射圧力を高めに設定する必要がある。しかし Ar ガスボンベの圧力設定の上限界があるから、ジェット速度にマッチするドラム回転速度を低く設定したいが、

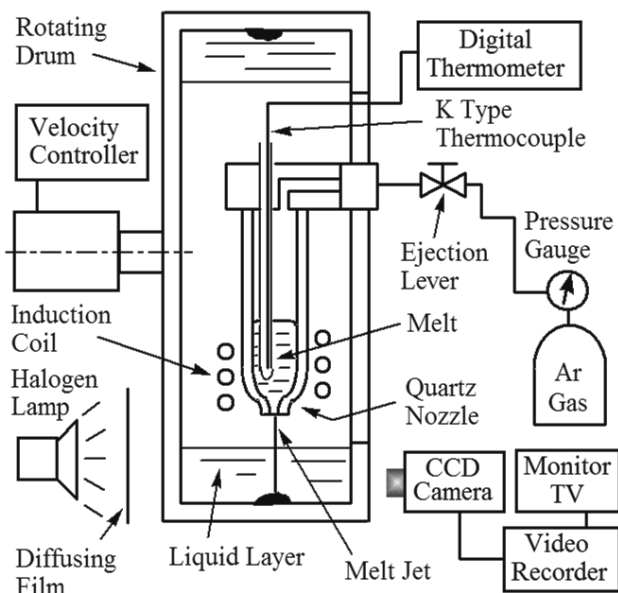


Fig. 1 Schematic diagram of In-Rotating-Water-Spinning apparatus.

低すぎると、遠心力が小さくなってしまい、水平軸まわりに回転する本装置の場合、安定した冷却液層が形成されないといった問題がある。

紡糸実験は Table 1 に条件で行い、得られた凝固物の外観、断面を走査型電子顕微鏡（SEM : Scanning Electron Microscope）で観察した。

Table 1 Experimental conditions for In-Rotating-Water-Spinning method.

Nozzle Diameter, dn [μm]	150 ~ 170
Velocity of Rotating liquid layer, ND [s^{-1}]	3.17 ~ 4.83
Ejection Pressure, Pn [MPa]	0.30 ~ 0.45
Temperature of Coolant, Tf [$^{\circ}\text{C}$]	9 ~ 20
Coolant	H_2O , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
Distance between nozzle tip and liquid surface : l [mm]	14 ~ 23
Incidence angle, φ_0 : [rad]	0.58 ~ 0.90

3. 実験結果及び考察

3. 1 Au-80wt%Sn 合金の紡糸性

Au-Sn 二元合金の平衡状態図を Fig. 2 に示す。Au-80wt%Sn 合金の液相線温度は、図の波線からおおよそ

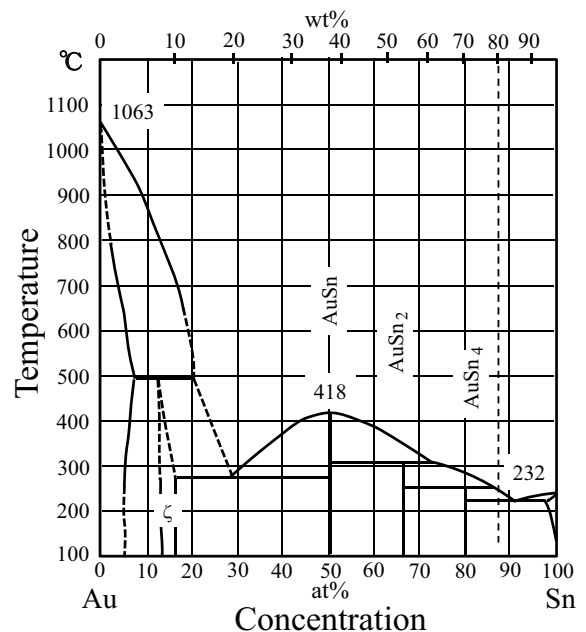


Fig. 2 Equilibrium phase diagram of Au-Sn alloy system.

260°Cである。Sn-Pb 共晶合金では、水中紡糸に比べて、エタノール中紡糸の結果、細線表面の金属光沢が良く、細線断面形状の円形度も高かったため、エタノールの発火点 (363°C) 以下であることから、冷却液体にエタノールを用いた場合でも紡糸実験を行った。

噴射ノズル径を 130 μm 、噴射圧力を 0.40MPa、ドラム回転速度を 3.67s⁻¹、液相線温度が 260°Cであることから噴射温度を 300°Cとした。噴射ノズルを Fig. 3 に示すように、回転水層面に近づけて噴射した結果、4m の長さの細線が得られた。ドラム内周長さが約 1.8m であり、Fig. 3 には噴射直後のジェットしか認められず、ドラムを一周する前にジェット (固化したワイヤ) はドラム内壁に到達していることがわかる。固化したワイヤは遠心力によりドラム内壁に密着するため、ドラム内周長さ以上の細線が得られたことは、無限に長い連続細線が得られる紡糸条件であることを示すことになる。長さの点で、約 1.8m は最適紡糸条件であるかどうかの判断になる。得られた細線の外観は Fig. 4 (a) に示すように、ストレートで良好であった。一方、エタノール中紡糸でも約 2m の連続細線が得られた。しかし、その表面性状は Fig. 4 (b) に示

すように、多数のしわが認められ、Sn-Pb 共晶合金とは異なるものであり、エタノールは Au 合金には適さないかも知れない。

3. 2 Au-(20, 15, 10) wt%Sn 合金の紡糸性

Fig. 2 からわかる通り、Au-20wt%Sn が Au 側の共晶組成になり、共晶温度はおよそ 280°Cである。この組成より Sn 量が減少するにしたがって液相線温度が著しく上昇し、15wt%Sn でおおよそ 440°C、10wt%Sn ではおよそ 720°Cである。噴射ノズル径を 120 μm 、噴射圧力を 0.40MPa、ドラム回転速度を 3.33s⁻¹ での紡糸状況並びに細線外観を Fig. 5 に示すが、水中 (a)、エタノール中 (b) とともにジェット軌跡に大きな乱れは認められなかったが、細線の表面性状は水中紡糸の方が劣悪 (c)、(d) との比較より) であった。水中紡糸で最長 12m の連続細線を得たが、エタノール中紡糸では 100mm 程度の細線しか得られず、エタノールは冷却液体として有効ではないと判断した。

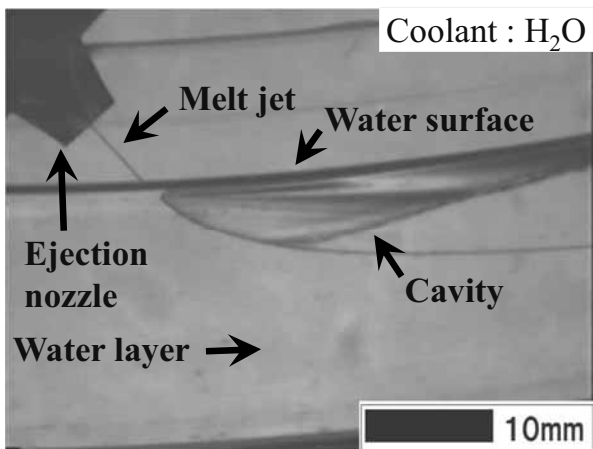


Fig. 3 Video image of the molten Au - 80wt%Sn alloy jet flow.

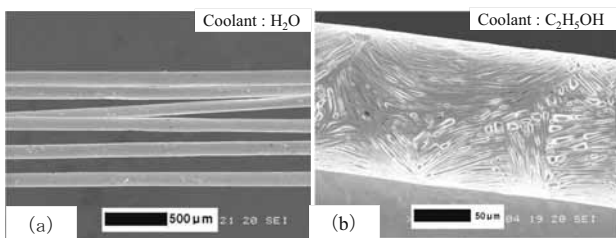


Fig. 4 SEM images of the surface appearances of the obtained Au - 80wt%Sn alloy fibers.

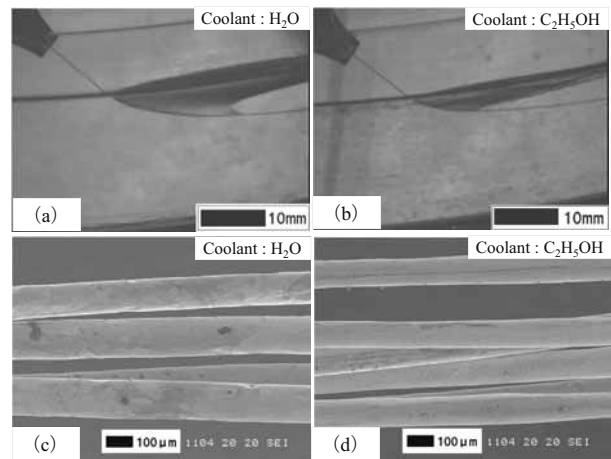


Fig. 5 Jet flow of Au - 20wt%Sn alloy and the surface of obtained wires.

Au-15wt%Sn 合金について、噴射ノズル径を 170 μm 、噴射圧力を 0.35MPa、ドラム回転速度を 4.75s⁻¹ で紡糸した結果を Fig. 6 に示す。同図 (a) からジェット軌跡の乱れがなく、(b) から良好な細線が得られたと思われたが、(c) に示すように断面直径の不均一が目立った。さらに、断面形状も (d) に示すように著しく扁平したものであった。なお、Sn 量が 15wt%以下の場合には、噴射温度が 500°Cを越えてエタノールの発火を誘発させる危険があるため水中紡糸のみとした。

Au-10wt%Sn 合金については、噴射ノズル径を 150 μm 、噴射圧力を 0.40MPa、ドラム回転速度を 3.33s⁻¹ で紡糸した結果、最長 1.2m の連続細線を得た。Fig. 7 に細線の表面性状と断面形状を示すが、細線の真直性の悪さと断面

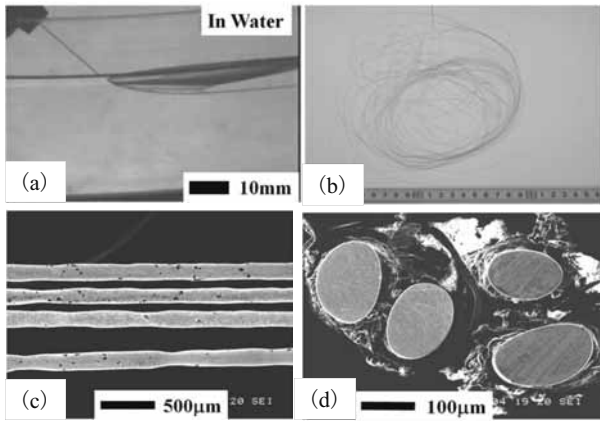


Fig. 6 Molten Au - 15wt%Sn alloy jet flow, the surface appearance of obtained wire and its cross sectional shape.

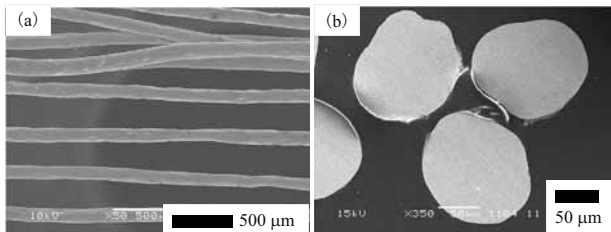


Fig. 7 The surface appearance and the cross sectional shape of obtained Au - 10wt%Sn alloy wires.

の円形度の不均一が目立った。

3. 3 Au - (5, 3, 1) wt%Sn合金の紡糸性

Au - 5wt%Sn 合金では噴射ノズル径を $160\mu\text{m}$ 、噴射圧力を 0.40MPa 、ドラム回転速度を 3.33s^{-1} の紡糸条件において最長 5.2m の連続細線を得た。細線の外観と断面形状を Fig. 8 に示す。細線の真直性は良好であるが、断面形状は Au - 15wt%Sn 合金 (Fig. 6) 並に扁平している。

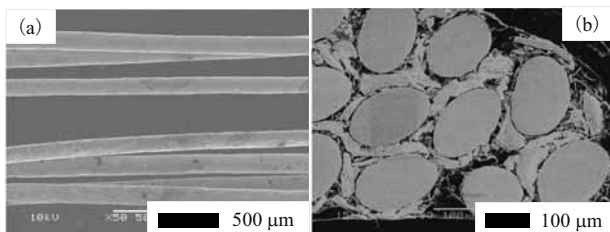
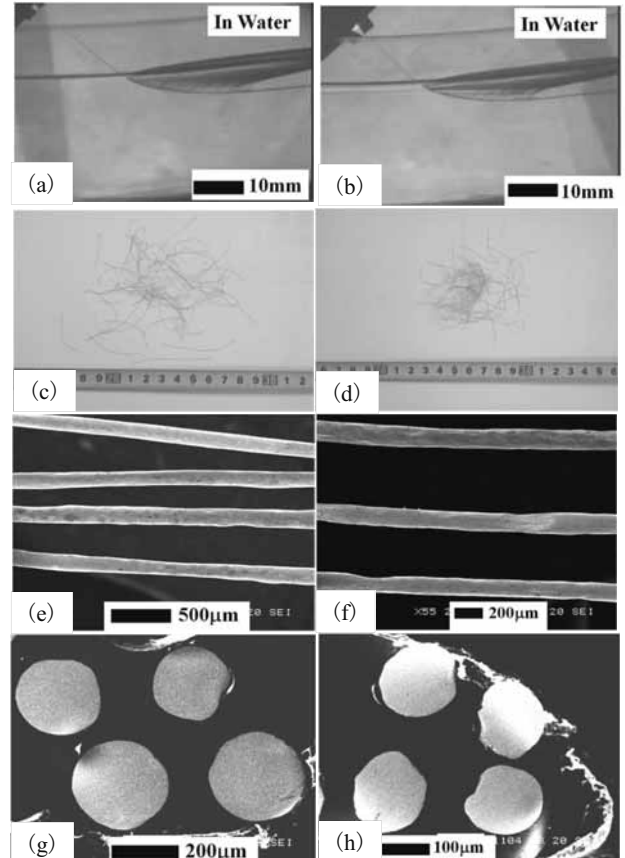


Fig. 8 The surface appearance and the cross sectional shape of obtained Au - 5wt%Sn alloy wires.

Au - 3wt%Sn 合金および Au - 1wt%Sn 合金については、噴射ノズル径を $170\mu\text{m}$ 、噴射圧力をそれぞれ 0.35 、 0.33MPa 、ドラム回転速度をそれぞれ 4.5 、 4.83s^{-1} の紡糸

条件で紡糸実験を行った。その結果を Fig. 9 に示す。(a) と (b) の視野内ではジェットが連続していたが、回収した細線 (c), (d) の長さは数十 mm 程度であった。ドラム回転速度よりジェット速度 (噴射圧力) が低すぎた結果と考えられる。細線の外観は Au - 5wt%Sn 合金の場合より劣っている (e), (f) が、(g), (h) 細線断面の円形度は向上している。ジェットが数十 mm 程度で破断した後でも、未凝固部分が表面張力によって円形断面に回復していったためと考えられる。



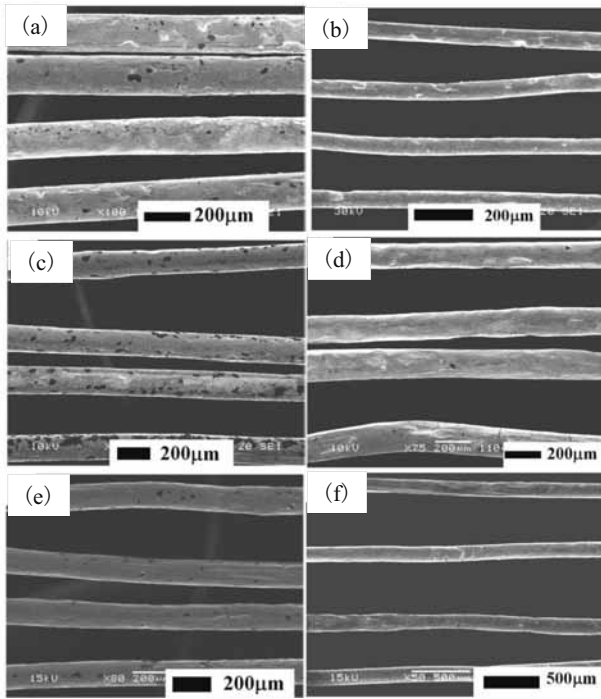
(a) (c) (e) (g) : Au - 3wt%Sn alloy

(b) (d) (f) (h) : Au - 1wt%Sn alloy

Fig. 9 The jet flow of molten Au - 3wt%Sn and Au - 1wt%Sn alloys, the surface appearance of the obtained wires and their cross sectional shape.

3. 4 Au - 0.6wt% (1at%) Sn合金の紡糸性

Au - 1wt%Sn 合金で細線が得られたことから、Sn 量を原子数比で 1%に減じた、Au - 0.6wt% (1at%) Sn 合金について、噴射ノズル径を $170\mu\text{m}$ 、噴射圧力を 0.35MPa に固定し、ドラム回転速度を $3.17\sim 4.83\text{s}^{-1}$ の範囲で紡糸実験を行った。得られた細線の外観を Fig. 10 に示す。いずれの紡糸条件においても細線表面に凹みが認められた。この合金では、得られた細線の長さは短く、Fig. 11 に示



(a) : $N_D = 3.17s^{-1}$ (b) : $N_D = 3.50s^{-1}$ (c) : $N_D = 3.83s^{-1}$
 (d) : $N_D = 4.17s^{-1}$ (e) : $N_D = 4.50s^{-1}$ (f) : $N_D = 4.83s^{-1}$

Fig. 10 SEM views of obtained Au – 0.6wt% (1at%) Sn alloy wires.

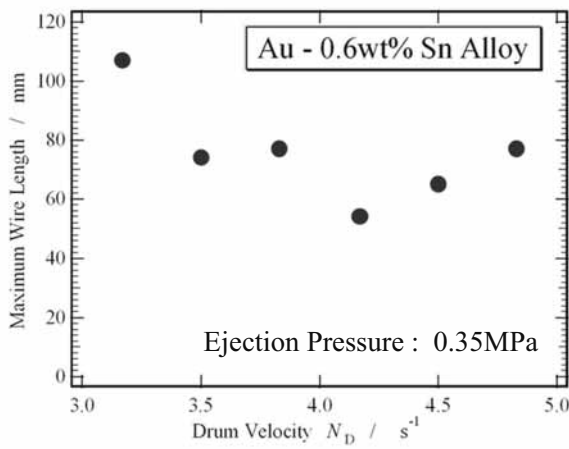


Fig. 11 The relation between the maximum length of the obtained Au – 0.6wt%Sn alloy wire and the drum velocity.

すように、100mm 程度以下であった。細線の真直性を高めるために、Fig. 12 に示すように、可能な限りジェット入射角を小さくしたが、細線長さの向上には結びつかなかった。また、Fig. 13 から推測できるように（図の噴射ノズル形状が本実験の石英ノズルとことなるが、ジェット速度は図中の式で近似できる²⁾）、0.35MPa の噴射圧力に対しては、ジェット入射角を小さくしたとは言え、ドラム回転速度が速すぎた結果である。Fig. 11 からは、ドラム回転数を下げるか、噴射圧力を高めれば細線長さが向上することが予測されるので、今後の課題としたい。

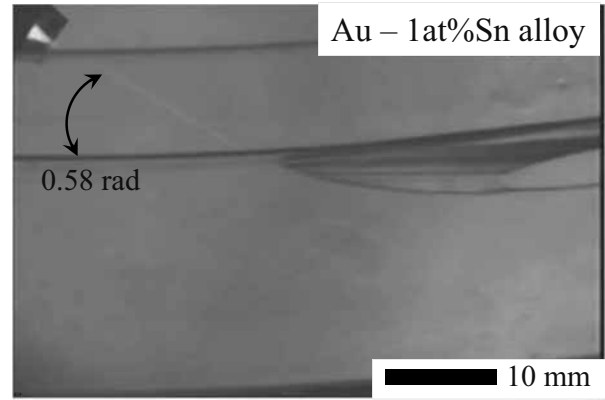


Fig. 12 The jet orbit of molten Au – 1at%Sn alloy in rotating water layer.

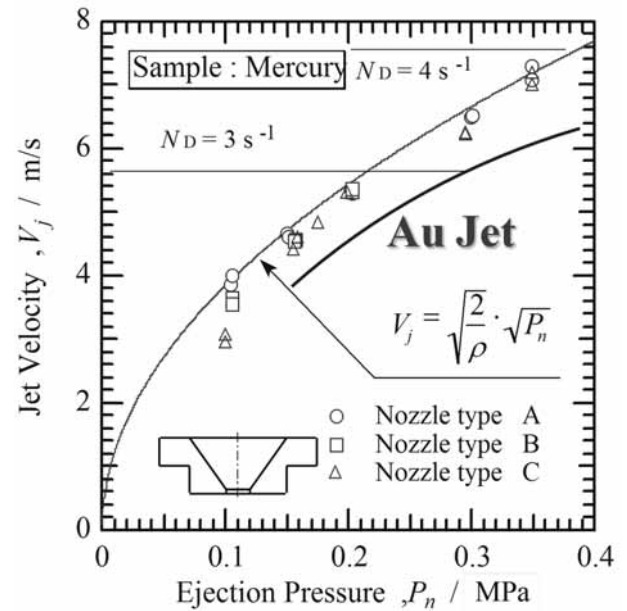
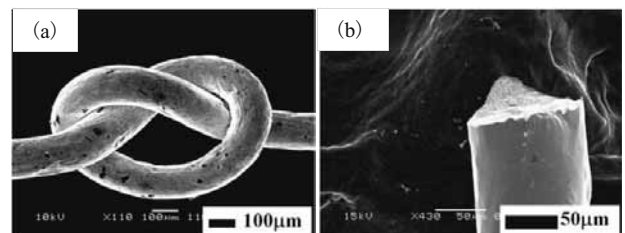


Fig. 13 The relation between the velocity of the jet ejected from conical nozzle and the ejection pressure.

3. 5 Au-Sn合金の機械的性質

紡糸により得られた Au-Sn 合金細線の靱性を Fig. 14 に示す。Sn 量が 10wt% 以下の細線の場合は、(a) に示すような結び目を作製できる程の良好な靱性を有していた



(a) Sn <= 10wt% (b) Sn > 10wt%

Fig. 14 The ductility of the obtained Au – Sn alloy wire.

が、10wt%を越えると非常に脆くなり、曲げると(b)のような破断形態を示した。工業的に利用するためには靱性が必要であり、溶体化処理による靱性の改善が可能か検討したい。

本実験で得られた細線は、機械加工あるいは線引き加工したような、均一な断面ではなかったが、断面がより良好な Au-1at% (0.6wt%) Sn 合金細線について、Fig. 15 に示すように、引張試験機のチャックに取り付けやすいように合金細線を保持(試験開始直前に標点距離間の紙を切断した)して室温にて引張試験を行ったので、その結果を Fig. 16 に示す。引張強さは純 Au 並であったが、伸びは 10%程度以下に著しく低下した。破断部はくさび形にすべり変形してくびれていることが Fig. 17 からわかった。

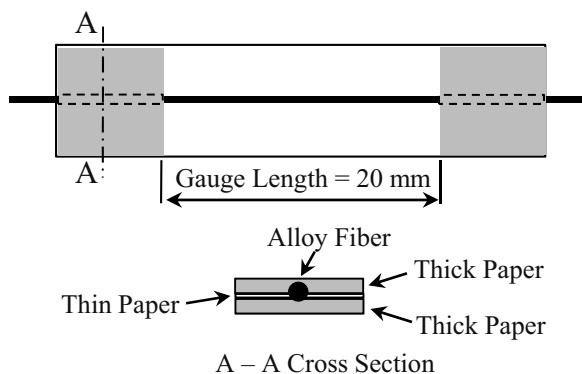


Fig. 15 The specimen of tensile test piece for the spun wire.

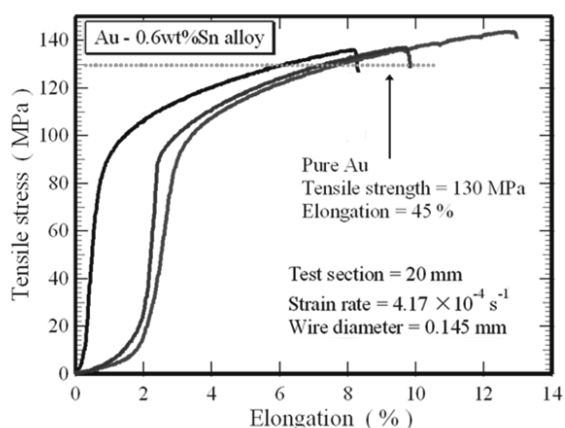


Fig. 16 The stress-strain diagrams of obtained Au - 0.6wt%Sn alloy fibers.

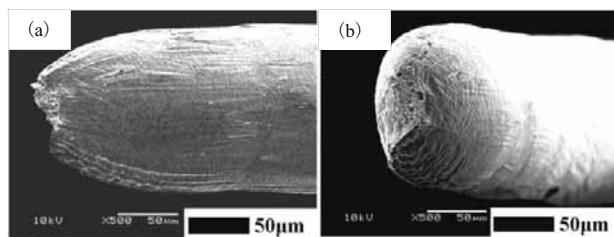


Fig. 17 SEM views of the tensile fracture surface of the obtained Au - 0.6wt%Sn alloy fiber.

4. おわりに

純 Au (99.99wt%程度) を溶解して静止水中に噴射した場合には、噴射ジェットは水中で粒状に分解し、回転水中に噴射しても同様の結果になり、連続細線の製作は困難、むしろ不可能と考えられたことから、不純物物質として Sn を添加し、その合金の回転水中紡糸性を調べた。

その結果、Au-Sn 合金の広い組成範囲において連続細線が得られ、紡糸性の向上に Sn はきわめて効果的な添加元素であることがわかった。

添加 Sn 量が 10wt%以下では、得られた細線の靱性はきわめて良好であったが、10wt%を越えると靱性は著しく低下した。

添加 Sn 量が 1at%でも連続細線が得られたが、より Au 濃度の高い連続細線を得るために、連続細線化に必要な Sn 量の下限界の調査、より細い連続細線を得るための噴射ノズル径の下限界の調査が今後の課題である。

最後に、本研究は田中貴金属工業(株)様より純金の貸与を受けて行ったものである。ここに記して深甚の謝意を表す。実験に際しては、2011年度卒業研究生 伊藤直輝君、津田聡太郎君、出口郁巳君並びに仲井祐太君にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) I. Ohnaka : In-Rotating-Liquid Spinning Process, *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*, R. W. Cahn and M. B. Bever (eds.), Pergamon Press, (1988), pp. 5874 - 587.
- 2) 島岡三義: 奈良工業高等専門学校研究紀要, 30(1994), pp. 73 - 78.

LEDのエージングテスト装置に関する研究

櫛 弘明, 牧野 孝史*1, 塚本 勝孝*2

Study on Aging Test Device of the LED

Hiroaki ICHII, Takashi MAKINO and Katsutaka TSUKAMOTO

In recent years, the need of LED is increasing rapidly. For this reason, the number of production of LED is also increasing. There is a process called an aging test in the production process of LED. This aging test is the process of confirming the durability of LED and looking for what not suiting. There is an examination by people's eye as one of the methods of an aging test. However, since the light of LED is strong, the tester's asthenopia, failure of eyesight, etc. pose a problem. So, in this study, the simple exam device by image processing using a Web camera and a personal computer was developed in consideration of cost and the problem of healthy.

1. 緒言

LED は 1962 年にイリノイ大学の Nick Holonyak Jr. によって開発されて以来, 表示用途やイルミネーション用途として早い段階から用いられてきた。しかし, 明るさとしては当時の通常の電球の 100 分の 1 にしか過ぎず, また, 使用できる色が限られていたことで用途は表示用に限定されていた。

1993 年に高輝度青色 LED の実用化によるフルカラー化により, LED の応用範囲は急速に拡大した。さらに, 1996 年に登場した白色 LED によって現在では, コンビニエンスストアの看板や家庭用の照明などから携帯電話のバックライトにまで, 各種光源用として, 従来の光源に比べて視認性が高く, エネルギー消費量が少なく, また, 保守が不要で寿命の長い LED が採用されており需要が急激に増加している。¹

需要の増加に伴い, 生産数を増してきている。LED の生産工程にはエージングテストと呼ばれる検査工程があ

る。エージングテストは LED が正常に発光しているか, もしくは極端に寿命が短くはないか等の不良を見つける検査である。現在, このエージングテストを行う主な方法として, 高精度であるが高価な検査装置を用いるか, あるいは人の眼による検査が行われている。前者の検査装置を用いる場合では, 検査装置を購入するため費用や検査装置自身のメンテナンス費用などの多くの費用が必要であり, 検査結果も流れている電流の値から正常であるかどうかを判断するため, 実際にどう光っているかまではわからない。後者の人による検査の場合では検査の精度としては不安定であるが, 実際に光っている LED を見て判断するために, 電流は流れているが上手く光っていないなどの機械的な故障も検査することができる。しかし, LED の光は非常に強く指向性も高いため, それを見続ける作業者の網膜にダメージを与え, 眼精疲労や視力の低下, LED の種類によっては免疫力の低下を引き起こすことが報告されている。

そこで, 今回これらの費用や健康上の問題を考慮して, 現状の検査装置よりも安価で人の眼を使わない, Web カメラと通常のパソコンを用いた画像処理による簡易検査装置の開発を目的とする。

*1 電子制御工学科学生 (現 機械制御工学専攻学生)

*2 株式会社三ツ星産業

2. 簡易エージングテストにおける画像処理

2.1 ハフ変換

デジタル画像処理において、画像から直線や円を検出する汎用的な方法として、ハフ変換(Hough transform)がある。はじめに、x-y 空間の任意の直線を検出するハフ変換の基本的な考え方を示す。Fig.1 に示すように、x-y 空間の直線は原点から下した垂線と x 軸の成す角度 θ 、垂線の長さを ρ で表すことができる。つまり、直線はパラメータ θ と ρ を用いて表現することが可能である。

一方、x-y 空間の点(x,y)は、これを通る複数の直線の交点として表すことができる。この複数の直線は θ と ρ の組み合わせで表すことができ、

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

となる。すなわち、点(x,y)は、 θ - ρ 空間上の 1 本の曲線と

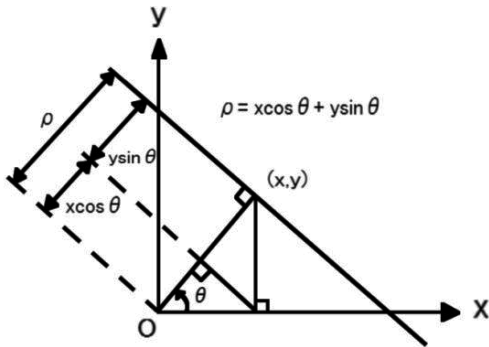


Fig1. Expression of a straight line with the parameters θ and ρ

して表される。同様にして、別の点についても θ - ρ 空間では曲線で表される。Fig2.は x-y 空間上の複数の点を θ - ρ 空間上示したものである。曲線が交差する点は x-y 空間上の点が同一直線上に存在することを示している。これより、x-y 空間上に存在する直線を検出することができる。

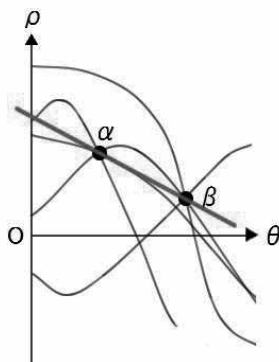


Fig2. Drawing of the curve in θ - ρ space

円の検出においては、Fig3.に示すように、直交座標上の点(x,y)を通るすべての円は、円の中心点(X_0, Y_0)と半径

R で表される。

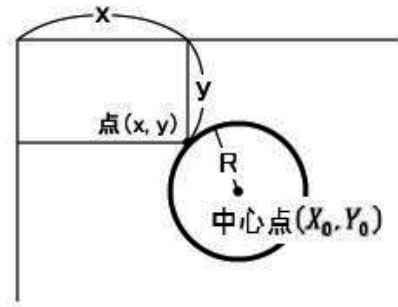


Fig3. Detection of the circle by Hough transformation

この時の点(x,y)を円の中心点(X_0, Y_0)と半径 R の組み合わせに変換する式は

$$R^2 = (x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2 \quad (2)$$

と表すことが出来る。この式を用いて、直交座標上の点(x,y)を新たなパラメータ空間 X-Y-R(三次元空間)上に変換すると、直交座標上の 1 点は三次元空間上の 1 枚の面として表される。直線の検出時と同じように、直交座標上に多数の点が存在すると三次元空間上にも多数の曲面が表される。この曲面が交差する点が存在すれば、それは元の x-y 空間上では同一の円上に並ぶことになり、直交座標上の円を決定することが出来る。

2.2 ヒストグラム

デジタル画像処理分野におけるヒストグラム(Histogram)とは、画像の濃度値(輝度値など)を横軸に、画素の数(頻度)を縦軸に表した、濃度分布を示す統計グラフを指す。

このヒストグラムを異なる 2 つの画像について求めた時、それらのグラフの形状には差異がある。この差異の程度を数値的に求める方法として

- (1) Correlation 相関係数
- (2) Chi-Square χ^2 検定
- (3) Intersection 共通集合
- (4) Bhattacharyya distance バタチャリヤ距離

などが存在する。

2.2.1 Correlation

Correlation とは相関係数のことで、2つの確率変数の間の相関を示す統計学的な指標のことである。1つ目のヒストグラムの値を $H_1(I)$ 、別のヒストグラムの値を $H_2(I)$ とするとき(I はヒストグラムの横軸の値(輝度)), 相関係数は

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_I (H'_1(I) \cdot H'_2(I))}{\sqrt{\sum_I (H'_1(I)^2) \cdot \sum_I (H'_2(I)^2)}} \quad (3)$$

で表される。ここで、 $H'_k(I)$ は各データの平均からのずれであり

$$H'_k(I) = \frac{H_k(I) - 1}{N \cdot \sum_J H_k(J)} \quad (4)$$

である(JはIとは別に換算する横軸の値)。ここでのNはヒストグラムのビン(値域)の数である。

(4)式の計算結果は-1から1の間の実数値で表され、結果が1に近ければ2つの確率変数には正の相関、-1に近ければ負の相関となる。

ただし、今回は2つのヒストグラムがどれだけ似通っているかが知りたいので、結果が1に近ければ近いほど2つのヒストグラムは類似していると判断できる。

2.2.2 Chi-Square

Chi-Squareとは χ^2 検定のこと、帰無仮説(ある仮説が正しいと置いて良いかどうかを統計学的・確率論的に判断するためのアルゴリズムのこと)が正しいのであれば、検定統計量が χ^2 分布に従うような統計学的検定法の総称である。今回はその中でも最も良く使用されている、ピアソンの χ^2 検定を行った。

ピアソンの χ^2 検定は“観察された事象の相対的頻度がある程度分布に従う”という帰無仮説を検定するものであり、事象は互いに排他的でなければならない。ここで、各頻度の観測値をO、帰無仮説から導かれる頻度の期待値(理論値)をEとしたとき、ピアソンの χ^2 検定は

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \quad (5)$$

で表される。これを2つのヒストグラム $H_1(I)$ 、 $H_2(I)$ について考えると

$$d(H_1, H_2) = \sum_I \frac{(H_1(I) - H_2(I))^2}{H_1(I) + H_2(I)} \quad (6)$$

と表される。

(5)式の計算結果が0に近ければ近いほど、2つのヒストグラムは類似していると判断できる。

2.2.3 Intersection

Intersectionとは共通集合(積集合)のことで、与えられている複数の集合の要素の中で、すべての集合に属している要素全体の集合のことである。

この手法で用いる式は

$$d(H_1, H_2) = \sum_I \min(H_1(I), H_2(I)) \quad (7)$$

で表される。ここで $\min()$ とは集約関数のことで、グループの最小値を求めることができる。

よって、計算結果は2つのヒストグラムにおける濃度毎のグループの最小値の和となり、これが高いほど、2つのヒストグラムは類似していると判断できる。また、ヒストグラムが1に正規化されている場合は0から1の間の実数値で表される。

この手法は今回用いた4つのヒストグラム比較の手法の中で最も計算速度が速いという特徴を持っている。

2.2.4 Bhattacharyya distance

Bhattacharyya distanceとはバタチャリヤ距離のことで、2つの離散的確率分布間の距離(類似性)を求める尺度に関する統計学的な指標のことである。また、2つの確率分布の部分的な一致の量の統計的な標本として、バタチャリヤ係数がある。これは、2つの確率変数の相対的な類似性を求めるために使用することができる。

任意の変数xに関して、同じ変域を持つ2つの離散的確率分布 $p(x)$ 、 $q(x)$ 間のバタチャリヤ係数は

$$B(p, q) = \sum_x \sqrt{p(x)q(x)} \quad (8)$$

と定義される。この時、各確率変数は正規化されていなければならない。

(8)式の計算結果は0から1の値となり、1に近いほど、2つの確率分布は類似している。

また、このバタチャリヤ係数の式を用いて

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \sum_I \frac{\sqrt{H_1(I) \cdot H_2(I)}}{\sqrt{\sum_I H_1(I) \cdot \sum_I H_2(I)}}} \quad (9)$$

という式を導くことができる。

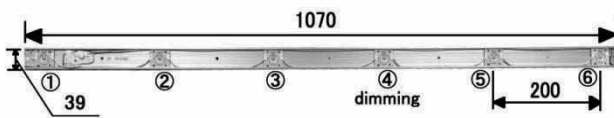
(9)式の計算結果は同じく0から1の値であるが、バタチャリヤ係数の計算式の場合と違い、0に近いほど2つのヒストグラムは類似していると判断できる。

3. 簡易エージングテストの開発環境

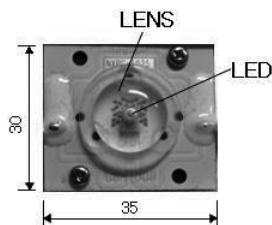
3.1 検査対象 LED

今回検査対象とする LED の外観を Fig4.(a)に示す. 6 つの LED ユニットが 200[mm]間隔でアルミのレール上に並列接続されており, ④の位置にある LED ユニットが減光している.

LED ユニットの拡大図を Fig4.(b)に示す. ユニットの基盤中心部に直径 1[mm]程度の LED が配置され, その上に半径 4.5[mm]程度の凸レンズが被されている. これにより, 指向性が強い LED の光が拡散され, 正面以外からでも明るく見えるようになっている. また, 電源として, 秋月電子通商のスイッチング AC アダプター GF18-US24075-T (24[V], 0.75[A], 内径 2.1[mm]) を用いている. 画像処理ライブラリとしては OpenCV を, 開発言語は Microsoft Visual C++ 2010 Express を用いた.



(a) LED bar



(b) LED unit

Fig4. LED bar and LED unit

3.2 エージングテスト実験装置

Fig.5 に実験装置の概略図を示す. アルミフレームで制作した 300×500×650mm の直方体上部中央に Web カメラを設置する. レール上にある検査対象 LED ユニットは, Web カメラから得られる画像中央にユニット画像がくるように, また, 常にカメラと対象物との距離が一定になるよう配置する.

1 つの LED ユニットの画像の取り込みが終われば, レールをスライドさせて別の LED についても続けて検査することができる. また, レールを支えるガイドを上下に

動かすことで, カメラと LED ユニットとの距離は調節が可能となっている.

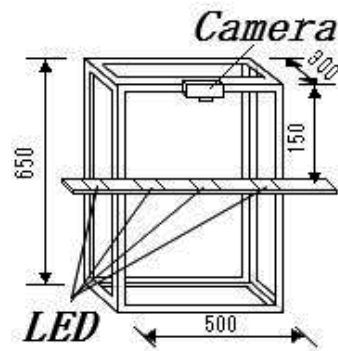


Fig5. Experimental device

4. 簡易エージングテストにおける処理手順

今回制作した簡易エージングテスト装置は, 1) カメラから画像を取り込む. 2) 取り込んだ画像をハフ変換する. 3) 画像から検査領域を切り取る. 4) ヒストグラムを比較する. 5) 結果を表示する. といった処理手順により LED の簡易エージングテストを行う.

はじめに, Web カメラから取り込まれた画像から下図のような円とその中心点を求める. Fig.6 は, 検査対象 LED と Web カメラの距離を 200 mm とし, LED ユニット ③の画像を取り込んだものである. 画像中には, ハフ変換によって得られた円も示している.

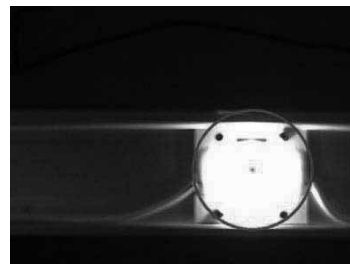


Fig. 6 Hough Transform

ヒストグラムによる比較を行うには, 比較する検査領域を統一しておかなければ正しい検査ができない. ここではハフ変換で求めた円の中心座標を用いて, 中心座標の周囲 300×300 ピクセルを切り取りこの領域を検査領域とする.

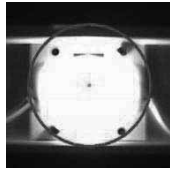
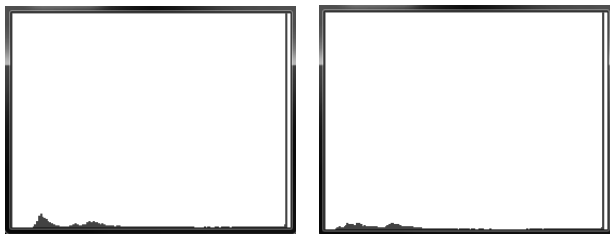


Fig7.Cutting of image

次に、検査対象のLEDユニット画像のヒストグラムと、あらかじめ保存してある“正常”に動いているLEDのヒストグラムとを比較する。今回の研究では③のLEDが正常なLEDとして基準LEDとした。

Fig8の(a)には、検査対象のLEDユニット画像のヒストグラムを、(b)には“正常”な③のLEDの画像のヒストグラムを示したものである。



(a) Input Image

(b) Normal Image

Fig8. Histogram

2つのヒストグラムを比べると、2つのヒストグラム左側に小さな山が存在する。基準である(b)のヒストグラムは山がなだらかで小さいことに比べ、(a)の検査対象の画像の方では山の勾配が(b)に比べて大きい。これは画像中のLEDの光が弱く届いていない領域の量を表すものである。つまり、検査対象LEDは基準となるLEDよりLEDの明るさの値が小さいことを示している。

5. 簡易エージングテスト実験

5.1 ヒストグラムの比較結果

2つのヒストグラムを比較して類似度を算出する。類似度を計算する式は 2.2 節の理論を用いて各値を計算し値を比較した。検査対象となるLEDの結果を Table.1 に示す。比較に用いた式中の $H_1(I)$ には基準画像の濃度 I の頻度 (基準画像中に存在する濃度 I の pixel の総数) が、 $H_2(I)$ には検査画像の濃度 I の頻度 (検査画像中に存在する濃度 I の pixel の総数) がそれぞれ取られる。表 1 の上から 3 つ目までが正常に動いているLED (上から③, ②,

⑤) で、4 つ目が商品としては扱えない減光しているLEDである。

Table.1 Result

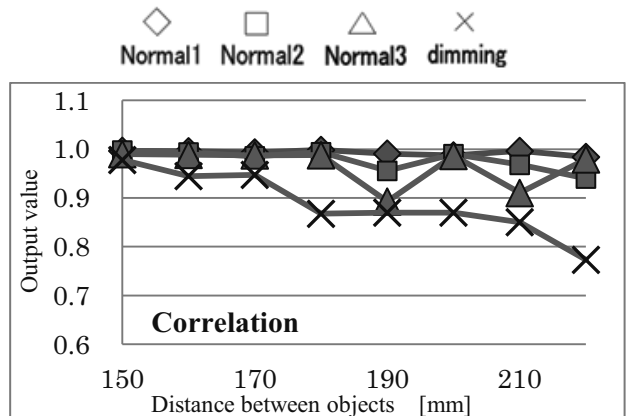
LED	Correlation	Chi-Square	Intersection	Bhattacharyya distance
③ Normal 1	0.999	0.011	0.948	0.054
② Normal 2	0.993	0.058	0.900	0.131
⑤ Normal 3	0.997	0.049	0.899	0.114
④ Dimming	0.989	0.115	0.855	0.195

結果より、減光している④のLEDの値が他のLEDよりも類似の程度が低い。すなわち、LEDの動作に問題があることがわかる。

5.2 エージングテスト条件の検証

今回製作した簡易エージングテスト装置の検査値精度を高めるため、WebカメラとLEDの最適距離の条件を調べた。方法は、Webカメラ直下150mmの位置にLEDユニットを設置し、③, ②, ⑤, ④のLEDユニットの画像を取り込み、そのヒストグラムの処理を行う。次に、対象間の距離を10mm増加して同じ手順で画像の取り込みと処理を行う。これを220mmまで繰り返し、対象間の距離による検査精度の変化を考察した。

Fig. 9は、相関係数、 χ^2 検定、共通集合、バタチャリヤ距離の各比較方法に対して、WebカメラとLEDユニット間の距離を変化させたときの各LEDユニットの結果を示したものである。



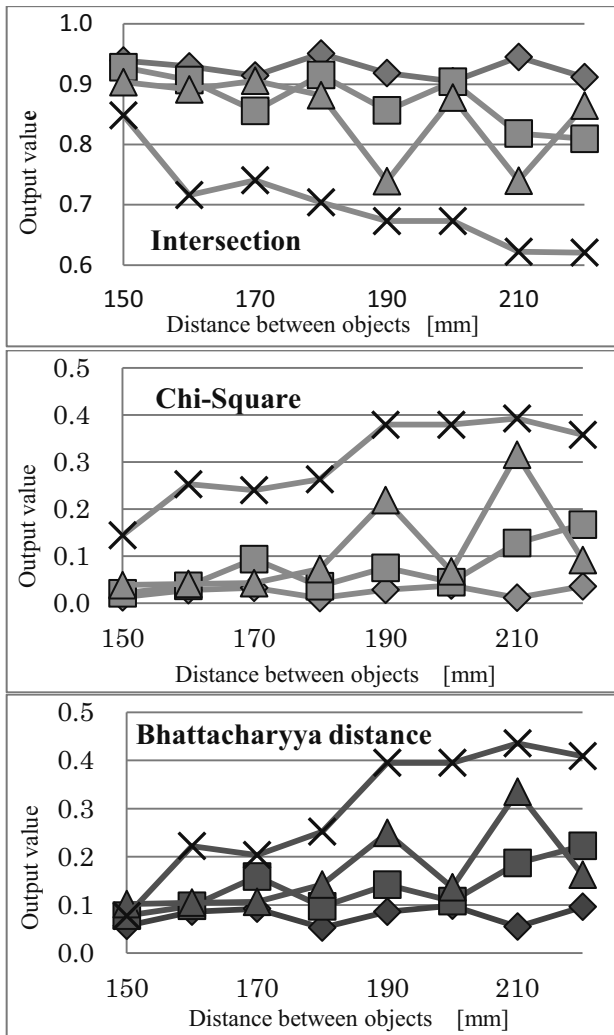


Fig9. Change of the result of every condition

Fig.9 より、距離が 150mm の場合には 4 つの LED ユニット全てで比較結果の数値が近く“正常”、“不良”を判断する閾値を設定するのが難しいことが分かる。しかし、距離が大きくなるにしたがって、4 つの LED の比較結果の差が大きくなる。つまり、距離がおおきくなれば閾値を設定するための値域の幅が大きくなる。

ただし、距離を大きく離すとハフ変換が難しくなり、適切な検査領域の切り取り画像を抽出できず、検査結果の値が急激に変わる。今回の実験では、対象間距離が 200mm のところでハフ変換での LED の位置検出が難しくなった。したがって、製作した実験システムの場合、閾値の決定しやすさとハフ変換の精度のバランスが取れている最良の対象間距離は 180mm であると考えられる。

6. 結言

本研究では、簡易エージングテスト装置の作成と、作成した簡易エージングテスト装置のヒストグラムの比較

方法における性能評価を行った。また、検査画像の取り取り条件である Web カメラと LED ユニット間の距離について実験的な考察を行った。この結果、製作した簡易エージングテスト装置は最大で 10% 前後の誤差を持つが、比較的簡単なシステムで良品か不良品かを見分けることができることが分かった。

ただし、今回の簡易エージングテスト装置は LED ユニットの設置環境に依存する“閾値”の設定に人間の判断を必要としている。今後の課題としては、完全な自動化による人間の負担の軽減を目指すと共に、今回使用した 6 つの LED ユニット以外の LED 光源についても簡易検査結果のデータを取り、より汎用性を高くする必要があると思われる。

参考文献

- [1] トランジスタ技術編集部, “高輝度/パワーLED の活用テクニック”, CQ 出版社, pp.10-17, 2008.
- [2] 奈良先端科学技術大学院大学 Open CV プログラミングブック制作チーム, “Open CV プログラミングブック第 2 版”, 株式会社 毎日コミュニケーションズ, pp.194-198, 2009.
- [3] 鈴木智之, “同一性評価と組み合わせ最適化手法を用いた断片化歩行者導線の復元手法”, pp.21-22, 2007.

学生による超小型人工衛星プロジェクトのための衛星データ配信・共有システムの開発

浅井 文男

Development of a Satellite Data Delivery and Sharing System for Student CubeSat Projects

Fumio ASAI

本年度は超小型人工衛星(CubeSat)の衛星データをインターネット上でリアルタイムに配信・共有するためのプロトタイプシステムを考案・試作した。具体的には衛星開発チームやプロジェクト支援者が受信したデータをTwitterに自動投稿するPHPボット(bot)とLinuxサーバ、投稿データを閲覧・解読するためのTwitterクライアントソフトを試作して動作検証を行った。実験室レベルではbotサーバとクライアントソフトは設計どおりに動作することを確認したが、実装機能が不十分で実用性に関する評価はできなかった。来年度以降の研究では、まず第一に、プロトタイプシステムの機能強化と安定性の向上を図り、衛星開発チームや支援者に配布して実践的な性能評価を行う。具体的には、botに衛星データを識別・抽出するフィルタ機能を実装して誤動作を防ぐことと、Twitterクライアントソフトに衛星識別機能とテレメトリデコード自動起動機能を実装し、複数衛星のテレメトリデータを解読できるようにする。また、Linux(CentOS)サーバの最適化(スリム化)とバージョンアップも行う。

1. はじめに

人工衛星のミッションデータやテレメトリデータの仕様や解読方法は衛星によって異なるが、これまで衛星開発チームがプロジェクト支援者に提供してきた衛星データ解読ソフトは、チームが開発した衛星だけに対応していた。浅井研究室では2010年度までに、複数の衛星のテレメトリデータを自動で受信・解読を行うKissTermと、ネットワーク上のリモートコンピュータで受信・解読を行うNetwork Decoderを開発し、プロジェクト支援者に提供してきた。しかし、これらの開発ソフトには衛星データをオンライン共有・配信する機能がないので、衛星開発チームとプロジェクト支援者が協力して効率的な衛星データの収集ができないという問題点があった。

そこで本年度の研究では受信した衛星データをTwitterに投稿し、準リアルタイムでオンライン配信・共有するためのシステムを考案・試作して動作検証を行う。

2. 研究方法

2.1 提案システム

KissTermで受信した衛星データをシステムのサーバに

UDP/IPで送信することによって、受信データを準リアルタイムにTwitterに投稿する。具体的には、KissTermからサーバが受信したデータを、自動投稿用botを用いてTwitterに投稿させる。投稿されたデータはユーザーが専用Twitterクライアントソフトを用いて閲覧・解読する。衛星データの読結果を投稿することも可能であるが、Twitterの投稿文字制限数(140文字)を超えてしまう場合もある。そのため、解読前の受信データをそのまま投稿し、ユーザーは解読したいデータをクライアントソフトのタイムライン表示から選択する手法を採用する。

2.2 自動投稿用bot

KissTermがUDP/IPで転送する衛星データをCentOSサーバ上で受信し、そのデータを自動的にTwitterに投稿するbotを開発する。TwitterAPIを使用するためのアカウントを作成し、アプリケーション申請でキーを取得してOAuth認証による自動投稿を実現する。

2.3 専用Twitterクライアントソフト

テレメトリデータを解読する機能を実装したTwitterクライアントソフトを開発する。ユーザーがクライアントソフトでTwitterのタイムラインを取得・閲覧し、解読したいテレメトリデータを選択すると、プラグインソフトが起動してデータが解読される。プラグインソフト

には先行研究で KissTerm 用に作成されたデコーダソフトを使用する。

2.4 開発環境

bot の開発言語には PHP を、サーバの OS には CentOS 5.7 を使用する。また、Twitter クライアントソフトの開発環境・言語には Microsoft Visual Studio 2010 C# を使用する。

2.5 開発手順

提案システムの開発と動作検証は以下の手順で行う。動作検証には、あらかじめ WMA 形式のオーディオファイルとして保存された日本大学の CubeSat/SEEDS のテレメトリデータをコンピュータ上で再生し、ターミナルロードコントローラ(TNC)に入力することで衛星からのデータ受信状態を再現する。また、衛星データを投稿するための bot 用アカウントと、クライアントソフトでタイムラインの取得を行うアカウントには同一のアカウントを使用する。

(1) 自動投稿用 bot

認証用キーやユーザー ID などを入力する基礎設定部、認証・各種 API へのアクセスを行う基幹部、KissTerm から転送されるデータを受信する受信部、Twitter に投稿を行う投稿部に分けて開発を行う。KissTerm からサーバに UDP/IP で衛星データを送信し、そのデータを Twitter に投稿できるかどうかを動作検証する。

(2) bot 稼働用サーバ

まず、Apache による Web サーバを構築する。次に、基礎的な設定から PHP パッケージの導入、UDP/IP 通信のためのファイアウォール構築などの設定を行う。bot が正常に稼働するかどうか、UDP/IP 通信が正常に機能するかどうかを動作検証する。

(3) 専用 Twitter クライアントソフト

Windows アプリケーションとして作成したクライアントソフトを使用して、bot が Twitter に投稿した衛星データのタイムラインを正常に取得・表示できるか、ユーザーからもコメントが投稿できるか、選択したテレメトリデータが正常に解釈・表示されるかなどを動作検証する。

3. 研究結果

3.1 試作システム

bot はサーバ上で cron を利用して動作させることにした。具体的には、投稿部のプログラムを cron で定期的に動作させることで衛星データを投稿する。クライアントソフトは、認証を行った後に投稿された衛星データをタイムライン表示し、テレメトリデータを選択するとデコーダを起動し、解釈させる。ユーザーがコメントを投

稿することもできる。実兼室に構築した衛星データ配信・共有システムの構成と動作フローを図 1 に示す。

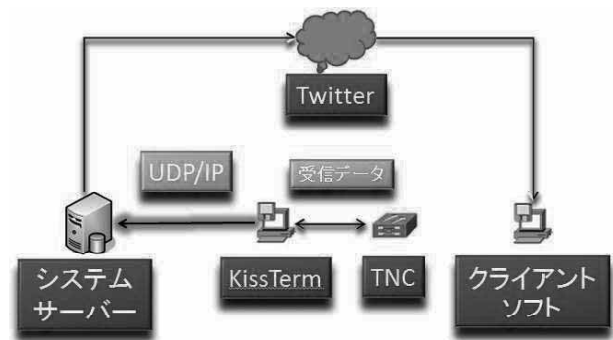


図 1 試作システムの構成と動作フロー

3.2 動作検証

浅井研究室において実際の使用を模した実験装置を構築し、動作検証を行った。その結果、KissTerm から UDP/IP 送信された衛星データを bot が受信して Twitter に自動投稿を行い、クライアントソフトでタイムライン表示され、テレメトリデータの正常な解読結果が得られた。これにより、試作したシステムはほぼ設計通りに動作することが確かめられた。

4. おわりに

本研究の成果は教育システム情報学会学生研究発表会で講演し、優秀賞を受賞した¹⁾。来年度以降は本年度の研究で提案・試作したシステムの実用性を向上させ、その普及を図るため、クライアントソフトを UserStream API に対応させ、bot に衛星データ識別(フィルタ)機能を実装するなどの改良・機能強化に取り組むとともに、衛星開発チームやプロジェクト支援者に配布して実践的な動作検証と性能評価に取り組む予定である。

「謝辞」

本研究は平成 23 年度豊橋技術科学大学高専連携教育研究プロジェクトと平成 24 年度科学研究費補助金(課題番号 24501079)の支援を受けた。また、ソフトウェアの開発には久保陽一郎氏の協力を得た。これらの支援と協力に感謝します。

「参考文献」

- 1)久保陽一郎, 浅井文男, CubeSat プロジェクトのための衛星データのリアルタイム配信とオンライン共有に関する研究, 教育システム情報学会学生研究発表会予稿集, pp.118-119, (2012).

準ストーン代数*のシ - ケントによる形式化

荒金 憲一

Sequential formulations for quasi-Stone algebras*

Kenichi ARAGANE

最小元 0 と最大元 1 をもつ分配束 (bounded distributive lattice : BDL) で半 2 重否定律 $((F8, F8^\circ)x \leq \neg\neg x)$ と \vee に関するド・モルガン律 $((F9^\circ)\neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y)$ と \wedge に関するド・モルガン律 $(\neg(x \wedge y) = \neg x \vee \neg y)$ を弱めた形 $((F9)\neg(x \wedge \neg y) = \neg x \vee \neg\neg y)$ と最小元・最大元に関する補元律 $((F10)\neg 0 = 1, (F10^\circ)\neg 1 = 0)$ と矛盾律 $((F11)x \wedge \neg x = 0)$ を満たす代数系が [2], [4] で定義されている準スト - ン代数 (quasi-Stone algebra(QSA)) である. 本論文では上の $F9$ をそれと同値な $(F9^*)\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y$ で置き換えた準ストーン代数*(quasi-Stone algebra*(QSA*)) を考察する. そして準スト - ン代数*と演繹的に同値な, G. Gentzen の方法 ([3]) でのシ - ケント (式) による形式的体系 GQSA* を考える.

§ 1 準ストーン代数*(QSA*)

[1], [2] と同様にワ - ドを定義し, ワ - ド全体の集合を A として, 2 項演算 \vee, \wedge と 1 項演算 \neg をもつ代数系 $\mathbf{A} = (A; 0, 1, \vee, \wedge, \neg)$ を考える.

[定義 1] (QSA* の定義)

A の任意の元 x, y, z に対して, 次の $F1 \sim F11$ が成り立つとき, 代数系 \mathbf{A} を準ストーン代数*(QSA*) とよぶ.

$F1$	$x \wedge 0 = 0$	$F1^\circ$	$x \vee 1 = 1$
$F2$	$x \wedge 1 = x$	$F2^\circ$	$x \vee 0 = x$
$F3$	$x \wedge x = x$	$F3^\circ$	$x \vee x = x$
$F4$	$x \wedge y = y \wedge x$	$F4^\circ$	$x \vee y = y \vee x$
$F5$	$(x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z)$	$F5^\circ$	$(x \vee y) \vee z = x \vee (y \vee z)$
$F6$	$x \wedge (x \vee y) = x$	$F6^\circ$	$x \vee (x \wedge y) = x$
$F7$	$x \wedge (y \vee z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z)$	$F7^\circ$	$x \vee (y \wedge z) = (x \vee y) \wedge (x \vee z)$
$F8$	$x \wedge \neg\neg x = x$	$F8^\circ$	$x \vee \neg\neg x = \neg\neg x$
$F9^*$	$\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y$	$F9^\circ$	$\neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y$
$F10$	$\neg 0 = 1$	$F10^\circ$	$\neg 1 = 0$
$F11$	$x \wedge \neg x = 0$		

[定義 2] (不等式の定義)

x, y を A の任意の元とする. $x \wedge y = x$ が成り立つとき, $x \leq y$ と書く.

[1], [2] と同様にして, 次の定理が成り立つ.

[定理 1] 代数系 \mathbf{A} が準ストーン代数*(QSA*) であり (つまり $F1 \sim F11$ が成り立つ), かつ定義 2 により $x \leq y$ が定義される $\iff A$ の任意の元 x, y, z に対して \mathbf{A} で次の $T1 \sim T13$ が成り立つ.

$T1$	$x \leq x$		
$T2$	$x \leq y, y \leq x \iff x = y$		
$T3$	$x \leq y, y \leq z \implies x \leq z$		
$T4$	$x \leq y \iff x \vee y = y$		
$T5$	$0 \leq x$	$T5^\circ$	$x \leq 1$

$$\begin{array}{ll}
T6 & x \wedge y \leq x, \quad x \wedge y \leq y \\
T7 & z \leq x, z \leq y \implies z \leq x \wedge y \\
T8 & x \wedge (y \vee z) \leq (x \wedge y) \vee (x \wedge z) \\
T9^* & x \leq \neg\neg y \iff \neg y \leq \neg x \\
T10 & x \leq \neg\neg x \\
T11 & \neg(x \wedge \neg\neg y) \leq \neg x \vee \neg y \\
T12 & \neg 1 \leq x \\
T13 & x \wedge \neg x \leq 0
\end{array}
\qquad
\begin{array}{ll}
T6^\circ & x \leq x \vee y, \quad y \leq x \vee y \\
T7^\circ & x \leq z, y \leq z \implies x \vee y \leq z \\
T8^\circ & (x \vee y) \wedge (x \vee z) \leq x \vee (y \wedge z) \\
T11^\circ & \neg x \wedge \neg y \leq \neg(x \vee y)
\end{array}$$

(証明)

 \implies :

$T1 \sim T8^\circ$ と $T10$ と $T11^\circ$ と $T12$ は [1] の定理 1 の証明と同じである.

$T9^*$: \implies : $x \leq \neg\neg y$ とすると定義 2 より $x \wedge \neg\neg y = x$. この両辺に否定をとると $F9^*$ から $\neg x \vee \neg y = \neg x$ で $T4$ から $\neg y \leq \neg x$. \iff : $\neg y \leq \neg x$ とすると $T10$ と $T3$ より $\neg y \leq \neg\neg\neg x$ で上の \implies を使うと $x \leq \neg\neg x \leq \neg\neg y$ から $x \leq \neg\neg y$ が成り立つ.

$T11$: $F9^*$ と $T2$ から成り立つ.

$T13$: $F11$ と $T2$ から成り立つ.

\iff : 定義 2 により $x \leq y$ が定義されることと $F1 \sim F8^\circ$ と $F10^\circ$ は [1] の定理 1 の証明と同じである.

$F9^*$: $T6$ と $T10$ より $x \wedge \neg\neg y \leq x \leq \neg\neg x$, $x \wedge \neg\neg y \leq \neg\neg y$ で $T9^*$ を使うと $\neg x \leq \neg(x \wedge \neg\neg y)$, $\neg y \leq \neg(x \wedge \neg\neg y)$. これらに $T7^\circ$ を使うと $\neg x \vee \neg y \leq \neg(x \wedge \neg\neg y)$. これと $T11$ に $T2$ を使って $\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y$ が成り立つ.

$F9^\circ$: $T6^\circ$ と $T10$ より $x \leq x \vee y \leq \neg\neg(x \vee y)$, $y \leq x \vee y \leq \neg\neg(x \vee y)$ で $T9^*$ を使うと $\neg(x \vee y) \leq \neg x$, $\neg(x \vee y) \leq \neg y$. これらに $T7$ を使うと $\neg(x \vee y) \leq \neg x \wedge \neg y$. これと $T11^\circ$ に $T2$ を使って $\neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y$ が成り立つ.

$F10$: $T5^\circ$ より $\neg 0 \leq 1$. また $T5$ と $T10$ から $0 \leq \neg 1 \leq \neg\neg\neg 1$ で $T9^*$ を使うと $1 \leq \neg\neg 1 \leq \neg 0$. よって $T2$ から $\neg 0 = 1$ が成り立つ.

$F11$: [2] の定理 1 の証明と同様に $T5, T13, T2$ から成り立つ.

(証明終)

[1] の注意 3 と同様に次の単調性が成り立つ.

[注意 1] 束 ($T1 \sim T4$ と $T6 \sim T7^\circ$ が成り立つ) において, 次の (1), (2) が成り立つ.

(1) $x \leq y, u \leq v \implies x \wedge u \leq y \wedge v$ (\wedge についての単調性)

(2) $x \leq y, u \leq v \implies x \vee u \leq y \vee v$ (\vee についての単調性)

[2] と同様に次のことが成り立つ.

[注意 2] BDL において, 次の (1)~(6) が成り立つ.

(1) $(T9^*)(x \leq \neg\neg y \iff \neg y \leq \neg x) \implies (x \leq \neg\neg x \text{ かつ } \neg\neg\neg x = \neg x)$

(2) $(T9^*) \iff [x \leq \neg\neg x \text{ かつ } (x \leq y \implies \neg y \leq \neg x)]$

(3) $(T9^*) \iff [x \leq \neg\neg x \text{ かつ } \neg(x \wedge \neg\neg y) \geq \neg x \vee \neg y]$

(4) $(T9^*) \iff [x \leq \neg\neg x \text{ かつ } \neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y]$

(5) $[(T9^*) \text{ かつ } x \wedge \neg x = 0 \text{ かつ } \neg x \vee \neg\neg x = 1] \implies \neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y$

(6) $\neg x \vee \neg\neg x = 1$ が成り立つとき

$[(T9^*) \text{ かつ } x \wedge \neg x = 0] \iff [x \leq \neg\neg x \text{ かつ } \neg 0 = 1 \text{ かつ } (x \wedge \neg y = 0 \iff \neg y \leq \neg x)]$

(証明)

(1) : $T1$ より $\neg x \leq \neg x$ で仮定 $T9^*$ の \iff を使って $x \leq \neg\neg x$ が成り立つ. 次に $x \leq \neg\neg x$ で x を $\neg x$ にすれば $\neg x \leq \neg\neg\neg x$. さらに $x \leq \neg\neg x \leq \neg\neg\neg\neg x$ で仮定 $T9^*$ の \implies から $\neg\neg\neg x \leq \neg x$. よって $T2$ から $\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つ.

(2) : \implies : (1) より $x \leq \neg\neg x$ が成り立つ. $x \leq y$ とすると $x \leq y \leq \neg\neg y$ で仮定より $\neg y \leq \neg x$ が成り

立つ. $\Leftarrow: x \leq \neg\neg y$ とすると仮定より $\neg\neg\neg y \leq \neg x$ で $\neg y \leq \neg\neg\neg y \leq \neg x$ から $\neg y \leq \neg x$ が成り立つ. 次に $\neg y \leq \neg x$ とすると仮定より $\neg\neg x \leq \neg\neg y$ で $x \leq \neg\neg x \leq \neg\neg y$ から $x \leq \neg\neg y$ が成り立つ.

(3) : \Rightarrow : (1) より $x \leq \neg\neg x$ が成り立つ. 上の定理 1 の \Leftarrow での $F9^*$ の証明と同じで $\neg x \vee \neg y \leq \neg(x \wedge \neg\neg y)$ が成り立つ. $\Leftarrow: x \leq \neg\neg y$ とすると定義 2 から $x \wedge \neg\neg y = x$ で両辺に否定をとり, 仮定を使うと $\neg x \vee \neg y \leq \neg x$. また $T6^\circ$ から $\neg x \leq \neg x \vee \neg y$ で $T2$ を使って $\neg x \vee \neg y = \neg x$. よって $T4$ から $\neg y \leq \neg x$ が成り立つ. 次に $\neg y \leq \neg x$ とすると $\neg y \leq \neg\neg\neg x$ で $\neg y \wedge \neg\neg\neg x = \neg y$. 両辺に否定をとり, 仮定を使うと $\neg\neg y \vee \neg\neg x \leq \neg\neg y$. $T6^\circ$ より $\neg\neg y \leq \neg\neg y \vee \neg\neg x$ から $\neg\neg y \vee \neg\neg x = \neg\neg y$ で $x \leq \neg\neg x \leq \neg\neg y$ より $x \leq \neg\neg y$ が成り立つ.

(4) : \Rightarrow : 上の定理 1 の \Leftarrow での $F9^\circ$ の証明と同じで $\neg(x \vee y) \leq \neg x \wedge \neg y \cdots \textcircled{1}$. 次に $\neg x \wedge \neg y \leq \neg x \leq \neg\neg\neg x$ で仮定を使うと $x \leq \neg\neg x \leq \neg(\neg x \wedge \neg y)$ から $x \leq \neg(\neg x \wedge \neg y)$. 同様にして $y \leq \neg(\neg x \wedge \neg y)$. $T7^\circ$ より $x \vee y \leq \neg(\neg x \wedge \neg y) \leq \neg\neg\neg(\neg x \wedge \neg y)$ で仮定を使って $\neg x \wedge \neg y \leq \neg\neg\neg(\neg x \wedge \neg y) \leq \neg(x \vee y)$ から $\neg x \wedge \neg y \leq \neg(x \vee y) \cdots \textcircled{2}$. $\textcircled{1}, \textcircled{2}$ に $T2$ を使って $\neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y$ が成り立つ.

$\Leftarrow: x \leq \neg\neg y$ とすると $T4$ から $x \vee \neg\neg y = \neg\neg y$ で両辺に否定をとり, 仮定を使うと $\neg x \wedge \neg\neg\neg y = \neg\neg\neg y$. よって $\neg y \leq \neg\neg\neg y \leq \neg x$ から $\neg y \leq \neg x$ が成り立つ. 次に $\neg y \leq \neg x$ とすると $\neg y \vee \neg x = \neg x$ で両辺に否定をとり, 仮定を使うと $x \leq \neg\neg x = \neg\neg y \wedge \neg\neg x \leq \neg\neg y$ から $x \leq \neg\neg y$ が成り立つ.

(5) : (4) の $\neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y$ を使う. $a = x \wedge \neg\neg y$ とおく. $x = x \wedge 1 = x \wedge (\neg(\neg y \vee a) \vee \neg\neg(\neg y \vee a)) = (x \wedge \neg(\neg y \vee a)) \vee (x \wedge \neg\neg(\neg y \vee a)) = (x \wedge \neg\neg y \wedge \neg a) \vee (x \wedge \neg\neg(\neg y \vee a)) = ((x \wedge \neg\neg y) \wedge \neg a) \vee (x \wedge \neg\neg(\neg y \vee a)) = (a \wedge \neg a) \vee (x \wedge \neg\neg(\neg y \vee a)) = 0 \vee (x \wedge \neg\neg(\neg y \vee a)) = x \wedge \neg\neg(\neg y \vee a)$. よって $x \leq \neg\neg(\neg y \vee a)$ で仮定から $\neg(\neg y \vee a) \leq \neg x$ で $\neg\neg y \wedge \neg a \leq \neg x$. これと $\neg\neg x \leq \neg\neg x$ とで注意 1 の \wedge の単調性を使って $\neg\neg y \wedge \neg a \wedge \neg\neg x \leq \neg x \wedge \neg\neg x = 0$ から $(\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge \neg\neg y = 0$. これを使うと $(\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge \neg\neg\neg y = ((\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge \neg\neg\neg y) \vee 0 = ((\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge \neg\neg\neg y) \vee ((\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge \neg\neg y) = (\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge (\neg\neg\neg y \vee \neg\neg y) = (\neg a \wedge \neg\neg x) \wedge 1 = \neg a \wedge \neg\neg x$. よって $\neg a \wedge \neg\neg x \leq \neg\neg\neg y$. これと $\neg a \wedge \neg x \leq \neg x$ とで \vee の単調性を使うと $(\neg a \wedge \neg x) \vee (\neg a \wedge \neg\neg x) \leq \neg x \vee \neg\neg\neg y \cdots \textcircled{3}$. ここで $(\neg a \wedge \neg x) \vee (\neg a \wedge \neg\neg x) = \neg a \wedge (\neg x \vee \neg\neg x) = \neg a \wedge 1 = \neg a = \neg(x \wedge \neg\neg y) \cdots \textcircled{4}$. $\textcircled{3}, \textcircled{4}$ より $\neg(x \wedge \neg\neg y) \leq \neg x \vee \neg\neg\neg y$ で (1) より $\neg\neg\neg y = \neg y$ から $\neg(x \wedge \neg\neg y) \leq \neg x \vee \neg y$ が成り立つ. 上の (3) から $\neg x \vee \neg y \leq \neg(x \wedge \neg\neg y)$. よって $\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y$ が成り立つ.

(6) : \Rightarrow : $T5$ より $0 \leq \neg\neg\neg 1$ で仮定 $T9^*$ を使うと $1 \leq \neg\neg 1 \leq \neg 0$ より $1 \leq \neg 0$. また $T5^\circ$ から $\neg 0 \leq 1$ で $\neg 0 = 1$ が成り立つ. 次に $x \wedge \neg y = 0$ とすると $x \wedge \neg\neg y = (x \wedge \neg\neg y) \vee 0 = (x \wedge \neg\neg y) \vee (x \wedge \neg y) = x \wedge (\neg\neg y \vee \neg y) = x \wedge 1 = x$ から $x \leq \neg\neg y$. これに仮定 $T9^*$ を使うと $\neg y \leq \neg x$. 逆に $\neg y \leq \neg x$ とする. これと $x \leq x$ とで \wedge の単調性を使って $x \wedge \neg y \leq x \wedge \neg x = 0$ から $x \wedge \neg y = 0$ が成り立つ.

$\Leftarrow: (x \wedge \neg y = 0 \Leftarrow \neg y \leq \neg x)$ で y を x にすると $x \wedge \neg x = 0$ が成り立つ. 次に $x \leq \neg\neg y$ とする. これと $\neg y \leq \neg y$ とで \wedge の単調性を使うと $x \wedge \neg y \leq \neg\neg y \wedge \neg y = 0$ から $x \wedge \neg y = 0$. 仮定より $\neg y \leq \neg x$ が成り立つ. 上の定理 1 の \Rightarrow での $T9^*$ の証明と同じで $x \leq \neg\neg y \Leftarrow \neg y \leq \neg x$ が成り立つ. (証明終)

ここで, [1] の $F9$ と本論文の $F9^*$ とが同値であることがわかる.

[注意 3] $T1 \sim T7^\circ$ と $T10$ が成り立つとき, 次のことが成り立つ.

$$(F9)[\neg(x \wedge \neg y) = \neg x \vee \neg\neg y] \iff (F9^*)[\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y]$$

(証明)

\Rightarrow : [1] の定理 1 より $T9$ が成り立ち, [1] の注意 2 の (1) から $\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つ. これから $\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg\neg\neg y = \neg x \vee \neg y$. \Leftarrow : 本論文の定理 1 より $T9^*$ が成り立ち, 本論文の注意 2 の (1) から $\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つから $\neg(x \wedge \neg y) = \neg(x \wedge \neg\neg\neg y) = \neg x \vee \neg\neg y$. (証明終)

[2] と同様に次のことが成り立つ.

[注意 4] 束において, 次の (1), (2), (3) が成り立つ.

$$(1) [(F9^* \text{ または } F9^\circ) \text{ かつ } x \leq \neg\neg x] \implies \neg\neg\neg x = \neg x$$

$$(2) \begin{cases} (F9^*) \neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y \\ (F9^\circ) \neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y \\ \neg\neg\neg x = \neg x \end{cases} \iff \begin{cases} \textcircled{1} \neg\neg(x \wedge \neg y) = \neg\neg x \wedge \neg y = \neg\neg(\neg\neg x \wedge \neg y) \\ \textcircled{2} \neg\neg(x \vee \neg y) = \neg\neg x \vee \neg y = \neg\neg(\neg\neg x \vee \neg y) \\ \textcircled{3} \neg\neg(x \vee y) = \neg\neg x \vee \neg\neg y \\ \textcircled{4} \neg(\neg x \vee \neg y) = \neg\neg x \wedge \neg\neg y \end{cases}$$

(3) (F9* かつ F9°) が成り立つとき

$$\neg\neg\neg x = \neg x \iff \begin{cases} \textcircled{5} \neg\neg(\neg x \wedge \neg y) = \neg x \wedge \neg y \\ \textcircled{6} \neg\neg(\neg x \vee \neg y) = \neg x \vee \neg y \end{cases}$$

(証明)

(1) : $x \leq \neg\neg x$ で x を $\neg x$ にすると $\neg x \leq \neg\neg\neg x$. $F9^*$ を仮定する. $x \leq \neg\neg x \leq \neg\neg\neg\neg x$ より $x \wedge \neg\neg\neg\neg x = x$. この両辺に否定をとり, $F9^*$ を使うと $\neg x \vee \neg\neg\neg\neg x = \neg x$ から $\neg\neg\neg\neg x \leq \neg x$. 次に $F9^\circ$ を仮定すると $x \leq \neg\neg x$ から $x \vee \neg\neg x = \neg\neg x$. この両辺に否定をとり, $F9^\circ$ を使うと $\neg x \wedge \neg\neg\neg\neg x = \neg\neg\neg\neg x$ から $\neg\neg\neg\neg x \leq \neg x$. よって $\neg\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つ.

(2) : \implies : $\neg\neg(x \wedge \neg y) = \neg\neg(x \wedge \neg\neg\neg y) = \neg(\neg x \vee \neg\neg y) = \neg\neg x \wedge \neg\neg\neg y = \neg\neg x \wedge \neg y$. また $\neg\neg(\neg\neg x \wedge \neg y) = \neg\neg(\neg\neg x \wedge \neg\neg\neg y) = \neg(\neg\neg\neg x \vee \neg\neg y) = \neg\neg\neg\neg x \wedge \neg\neg\neg y = \neg\neg x \wedge \neg y$. よって $\textcircled{1}$ が成り立つ. 次に $\neg\neg(x \vee \neg y) = \neg(\neg x \wedge \neg\neg y) = \neg\neg x \vee \neg y$. また $\neg\neg(\neg\neg x \vee \neg y) = \neg(\neg\neg\neg x \wedge \neg\neg y) = \neg\neg\neg\neg x \vee \neg\neg\neg y = \neg\neg x \vee \neg y$. よって $\textcircled{2}$ が成り立つ. さらに $\neg\neg(x \vee y) = \neg(\neg x \wedge \neg y) = \neg(\neg x \wedge \neg\neg\neg y) = \neg\neg x \vee \neg\neg\neg y$ より $\textcircled{3}$ が成り立つ. $\textcircled{4}$ は仮定 $F9^\circ$ より明らかである. \iff : 仮定 $\textcircled{1}$ で x を $\neg x$ に, y を x にすると $\neg\neg\neg x = \neg\neg(\neg x \wedge \neg x) = \neg\neg\neg x \wedge \neg x$ から $\neg\neg\neg x \leq \neg x$. また 仮定 $\textcircled{2}$ でも x を $\neg x$ に, y を x にすると $\neg\neg\neg x = \neg\neg(\neg x \vee \neg x) = \neg\neg\neg x \vee \neg x$ から $\neg x \leq \neg\neg\neg x$. よって $\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つ. これを使うと $\neg(x \vee y) = \neg\neg\neg(x \vee y) \stackrel{\textcircled{3}}{=} \neg(\neg\neg x \vee \neg\neg y) \stackrel{\textcircled{4}}{=} \neg\neg\neg x \wedge \neg\neg\neg y = \neg x \wedge \neg y$. 次に $\neg(x \wedge \neg y) = \neg\neg\neg(x \wedge \neg y) \stackrel{\textcircled{1}}{=} \neg(\neg\neg\neg x \wedge \neg\neg\neg y) \stackrel{\textcircled{4}}{=} \neg\neg\neg(\neg x \vee \neg y) \stackrel{\textcircled{3}}{=} \neg\neg\neg\neg x \vee \neg\neg\neg\neg y = \neg x \vee \neg y$.

(3) : \implies : $\neg\neg(\neg x \wedge \neg y) = \neg(\neg(\neg x \wedge \neg\neg\neg y)) = \neg(\neg\neg x \vee \neg\neg\neg y) = \neg\neg\neg\neg x \wedge \neg\neg\neg\neg y = \neg x \wedge \neg y$. 次に $\neg\neg(\neg x \vee \neg y) = \neg(\neg\neg\neg x \wedge \neg\neg\neg y) = \neg\neg\neg\neg x \vee \neg\neg\neg\neg y = \neg x \vee \neg y$. \iff : 仮定 $\textcircled{5}$ または $\textcircled{6}$ で y を x にすれば $\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つ. (証明終)

さらに, [2] と同様に次のことが成り立つ.

[注意 5] 最小元 0 と最大元 1 をもつ束 ($T1 \sim T7^\circ$ が成り立つ) において, 次の (1) ~ (5) が成り立つ.

- (1) $x \leq \neg\neg x \implies \neg\neg 1 = 1$
- (1°) $(\neg 0 = 1 \text{ かつ } x \wedge \neg x \leq 0) \implies \neg\neg 0 = 0$
- (2) $\neg 1 = 0 \iff \neg 1 \leq x$
- (2°) $\neg 0 = 1 \iff x \leq \neg 0$
- (3) $x \wedge \neg x \leq 0 \implies \neg 1 = 0$
- (3°) $(x \leq \neg y \implies y \leq \neg x) \implies \neg 0 = 1$
- (4) $\neg 1 = 0$ が成り立つとき $\neg 0 = 1 \iff \neg\neg 1 = 1$
- (4°) $\neg 0 = 1$ が成り立つとき $\neg 1 = 0 \iff \neg\neg 0 = 0$
- (5) (F9* かつ $\neg 0 = 1$ かつ $\neg 1 = 0$ かつ $x \leq \neg\neg x$) が成り立つとき
 - $\textcircled{1} x \wedge \neg x = 0 \iff \textcircled{2} \neg x \vee \neg\neg x = 1 \iff \textcircled{3} \neg x \wedge \neg\neg x = 0$

(証明)

(1) ~ (4°) は [2] の注意 4 の証明と同じである.

(5) : $\textcircled{1} \implies \textcircled{2}$: 注意 4 の (1) より $\neg\neg\neg x = \neg x$ が成り立つ. 仮定から $1 = \neg 0 = \neg(x \wedge \neg x) = \neg(x \wedge \neg\neg\neg x) = \neg x \vee \neg\neg\neg x$. $\textcircled{2} \implies \textcircled{3}$: $\neg x \wedge \neg\neg\neg x \leq \neg\neg(\neg x \wedge \neg\neg\neg x) = \neg(\neg\neg\neg x \vee \neg x) = \neg 1 = 0$ から $\neg x \wedge \neg\neg\neg x = 0$ が成り立つ. $\textcircled{3} \implies \textcircled{1}$: $x \leq \neg\neg x$ と $\neg x \leq \neg x$ とで \wedge の単調性を使って $x \wedge \neg x \leq \neg\neg\neg x \wedge \neg x = 0$ から $x \wedge \neg x = 0$ が成り立つ. (証明終)

QSA* について, [2] と同様に次の同値性が成り立つ.

[注意6] \mathbf{A} を BDL とする. \mathbf{A} が QSA^* であることと, 次の (1) ~ (5) は互いに同値である.

$$(1) \begin{cases} (F9^*) \neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y \\ (F10) \neg 0 = 1 \\ (F11) x \wedge \neg x = 0 \end{cases} \quad (2) \begin{cases} (F9^*) \neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y \\ (F10^\circ) \neg 1 = 0 \\ (F11) x \wedge \neg x = 0 \\ (T10) x \leq \neg\neg x \end{cases}$$

$$(3) \begin{cases} (T9^*) x \leq \neg\neg y \iff \neg y \leq \neg x \\ (F11) x \wedge \neg x = 0 \\ \neg x \vee \neg\neg x = 1 \end{cases} \quad (4) \begin{cases} (F9^\circ) \neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y \\ (F11) x \wedge \neg x = 0 \\ x \wedge \neg y = 0 \iff \neg y \leq \neg x \\ \neg x \vee \neg\neg x = 1 \end{cases}$$

$$(5) \begin{cases} (F9^*) \neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y \\ (F10) \neg 0 = 1 \\ x \wedge \neg y = 0 \iff \neg y \leq \neg x \end{cases}$$

(証明)

\mathbf{A} が QSA^* である \implies (1) は明らかである. \mathbf{A} が QSA^* である \iff (1) について, (F8): $x \wedge \neg\neg x = 0 \vee (x \wedge \neg\neg x) = (x \wedge \neg x) \vee (x \wedge \neg\neg x) = x \wedge (\neg x \vee \neg\neg x) = x \wedge (\neg\neg x \vee \neg x) = x \wedge \neg(\neg x \wedge \neg\neg x) = x \wedge \neg 0 = x \wedge 1 = x$. (F8 $^\circ$): $x \vee \neg\neg x = 1 \wedge (x \vee \neg\neg x) = \neg 0 \wedge (x \vee \neg\neg x) = \neg(\neg x \wedge \neg\neg x) \wedge (x \vee \neg\neg x) = (\neg\neg x \vee \neg x) \wedge (x \vee \neg\neg x) = \neg\neg x \vee (\neg x \wedge x) = \neg\neg x \vee 0 = \neg\neg x$. また $x \leq \neg\neg x$ かつ $\neg(x \wedge \neg\neg y) \geq \neg x \vee \neg y$ が成り立つから注意2の(3)から $T9^*$ が成り立ち, 注意2の(4)より $F9^\circ$ が成り立つ. 次に $0 = 1 \wedge \neg 1 = \neg 1$ から $F10^\circ$ が成り立つ.

(1) \implies (2): 上の証明と同様にして $F10^\circ$ と $T10$ が成り立つ.

(2) \implies (3): 注意2の(3)から $T9^*$ が成り立つ. 注意5の(1)から $1 = \neg\neg 1 = \neg(\neg 1) = \neg 0 = \neg(\neg x \wedge \neg\neg x) = \neg\neg x \vee \neg x$.

(3) \implies (4): 注意2の(4)から $F9^\circ$ が成り立つ. また注意2の(6)から $x \wedge \neg y = 0 \iff \neg y \leq \neg x$ が成り立つ.

(4) \implies (5): $(x \wedge \neg\neg y) \wedge \neg x = \neg\neg y \wedge (x \wedge \neg x) = \neg\neg y \wedge 0 = 0$ で仮定を使って $\neg x \leq \neg(x \wedge \neg\neg y) \dots \textcircled{1}$. $(x \wedge \neg\neg y) \wedge \neg y = x \wedge (\neg\neg y \wedge \neg y) = x \wedge 0 = 0$ で仮定を使って $\neg y \leq \neg(x \wedge \neg\neg y) \dots \textcircled{2}$. $\textcircled{1}$, $\textcircled{2}$ で $T7^\circ$ を使うと $\neg x \vee \neg y \leq \neg(x \wedge \neg\neg y) \dots \textcircled{3}$. 次に $a = x \wedge \neg\neg y$ とおく. $x \wedge \neg(\neg y \vee a) = x \wedge (\neg\neg y \wedge \neg a) = (x \wedge \neg\neg y) \wedge \neg a = a \wedge \neg a = 0$. 仮定を使って $\neg(\neg y \vee a) \leq \neg x$. これと $\neg\neg x \leq \neg\neg x$ とで \wedge の単調性を使って $\neg(\neg y \vee a) \wedge \neg\neg x \leq \neg x \wedge \neg\neg x = 0$. よって $\neg(\neg y \vee a) \wedge \neg\neg x = 0$. これより $\neg\neg y \wedge \neg(a \vee \neg x) = \neg\neg y \wedge \neg a \wedge \neg\neg x = \neg(\neg y \vee a) \wedge \neg\neg x = 0$. 仮定を使って $\neg(a \vee \neg x) \leq \neg\neg y$ から $\neg a \wedge \neg\neg x \leq \neg\neg y$. これと $\neg a \wedge \neg x \leq \neg x$ とで \vee の単調性を使って $(\neg a \wedge \neg x) \vee (\neg a \wedge \neg\neg x) \leq \neg x \vee \neg\neg y$. ここで $(\neg a \wedge \neg x) \vee (\neg a \wedge \neg\neg x) = \neg a \wedge (\neg x \vee \neg\neg x) = \neg a \wedge 1 = \neg a = \neg(x \wedge \neg\neg y)$. よって $\neg(x \wedge \neg\neg y) \leq \neg x \vee \neg\neg y \dots \textcircled{4}$. ここで $\neg\neg x \wedge \neg x = 0$ に仮定を使うと $\neg x \leq \neg\neg\neg x$. また $x = x \wedge 1 = x \wedge (\neg x \vee \neg\neg x) = (x \wedge \neg x) \vee (x \wedge \neg\neg x) = 0 \vee (x \wedge \neg\neg x) = x \wedge \neg\neg x$ より $x \leq \neg\neg x$. これと $\neg\neg\neg x \leq \neg\neg\neg x$ とで \wedge の単調性を使って $x \wedge \neg\neg\neg x \leq \neg\neg x \wedge \neg\neg\neg x = 0$ より $x \wedge \neg\neg\neg x = 0$. 仮定から $\neg\neg\neg x \leq \neg x$. よって $\neg\neg\neg x = \neg x$. $\textcircled{4}$ から $\neg(x \wedge \neg\neg y) \leq \neg x \vee \neg y \dots \textcircled{5}$. $\textcircled{3}$, $\textcircled{5}$ で $T2$ を使うと $\neg(x \wedge \neg\neg y) = \neg x \vee \neg y$ が成り立つ. また $\neg 0 = \neg(\neg x \wedge \neg\neg x) = \neg\neg x \vee \neg x = 1$ から $F10$ が成り立つ.

(5) \implies (1): 仮定 $x \wedge \neg y = 0 \iff \neg y \leq \neg x$ で y を x にすれば $x \wedge \neg x = 0$ が成り立つ. (証明終)

§ 2 QSA^* のシ - ケントによる形式的体系 GQSA^*

[1], [2] と同様にシ - ケントの定義をする. ただし, $\longrightarrow b_1, \dots, b_n$ と $a_1, \dots, a_m \longrightarrow$ は QSA^* でそれぞれ $1 \leq b_1 \vee \dots \vee b_n$ と $a_1 \wedge \dots \wedge a_m \leq 0$ とに解釈する.

このとき, 準ストーン代数^{*}(QSA^{*}) のシ - ケントによる形式的体系 GQSA^{*} を [1], [2] と同様に次のように定義する.

[定義 3] (GQSA^{*} の定義)

[1] 始式

$$(B1) \quad a \longrightarrow a \quad (B2) \quad 0 \longrightarrow \Delta \quad (B3) \quad \Gamma \longrightarrow 1 \quad (B4) \quad a \longrightarrow \neg\neg a \quad (B5) \quad a, \neg a \longrightarrow$$

[2] 推論規則

(1) 構造に関する推論規則 :

$$\begin{array}{c} \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta}{a, \Gamma \longrightarrow \Delta} \quad (w \longrightarrow) \qquad \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta}{\Gamma \longrightarrow \Delta, a} \quad (\longrightarrow w) \\ \frac{a, a, \Gamma \longrightarrow \Delta}{a, \Gamma \longrightarrow \Delta} \quad (c \longrightarrow) \qquad \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a, a}{\Gamma \longrightarrow \Delta, a} \quad (\longrightarrow c) \\ \frac{\Gamma_1, a, b, \Gamma_2 \longrightarrow \Delta}{\Gamma_1, b, a, \Gamma_2 \longrightarrow \Delta} \quad (e \longrightarrow) \qquad \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta_1, a, b, \Delta_2}{\Gamma \longrightarrow \Delta_1, b, a, \Delta_2} \quad (\longrightarrow e) \\ \frac{\Gamma_1 \longrightarrow \Delta_1, a \quad a, \Gamma_2 \longrightarrow \Delta_2}{\Gamma_1, \Gamma_2 \longrightarrow \Delta_1, \Delta_2} \quad (cut) \end{array}$$

(2) 論理記号に関する推論規則 :

$$\begin{array}{c} \frac{a, \Gamma \longrightarrow \Delta}{a \wedge b, \Gamma \longrightarrow \Delta} \quad (\wedge_1 \longrightarrow) \qquad \frac{b, \Gamma \longrightarrow \Delta}{a \wedge b, \Gamma \longrightarrow \Delta} \quad (\wedge_2 \longrightarrow) \\ \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a}{\Gamma \longrightarrow \Delta, a \vee b} \quad (\longrightarrow \vee_1) \qquad \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, b}{\Gamma \longrightarrow \Delta, a \vee b} \quad (\longrightarrow \vee_2) \\ \frac{a, \Gamma \longrightarrow \Delta \quad b, \Gamma \longrightarrow \Delta}{a \vee b, \Gamma \longrightarrow \Delta} \quad (\vee \longrightarrow) \qquad \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a \quad \Gamma \longrightarrow \Delta, b}{\Gamma \longrightarrow \Delta, a \wedge b} \quad (\longrightarrow \wedge) \\ \frac{\neg\neg a, b \longrightarrow \neg\neg c}{\neg c \longrightarrow \neg b, \neg a} \quad (\longrightarrow \neg) \qquad \frac{\Gamma \longrightarrow \neg a \quad \Gamma \longrightarrow \neg b}{\Gamma \longrightarrow \neg(a \vee b)} \quad (\longrightarrow \neg\vee) \end{array}$$

ただし, Γ が a_1, \dots, a_m のとき $\neg\Gamma$ は $\neg a_m, \dots, \neg a_1$ を表し, $\Gamma = \emptyset$ のときは $\neg\Gamma = \emptyset$ とする.

[注意 7] 次の (1), (2) が成り立つ.

$$(1) \quad (B4) \iff \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a}{\Gamma \longrightarrow \Delta, \neg\neg a} \quad (\longrightarrow \neg\neg) \qquad (2) \quad (B5) \iff \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a}{\neg a, \Gamma \longrightarrow \Delta} \quad (\neg \longrightarrow)$$

(証明)

$$(1): \implies : \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a \quad a \longrightarrow \neg\neg a}{\Gamma \longrightarrow \Delta, \neg\neg a}$$

$$\longleftarrow : \frac{a \longrightarrow a}{a \longrightarrow \neg\neg a}$$

$$(2): \implies : \frac{\Gamma \longrightarrow \Delta, a \quad a, \neg a \longrightarrow}{\Gamma, \neg a \longrightarrow \Delta} \quad \frac{\Gamma, \neg a \longrightarrow \Delta}{\neg a, \Gamma \longrightarrow \Delta}$$

$$\longleftarrow : \frac{a \longrightarrow a}{\neg a, a \longrightarrow} \quad \frac{\neg a, a \longrightarrow}{a, \neg a \longrightarrow}$$

(証明終)

§ 3 QSA^{*} と GQSA^{*} の演繹的同値性

[1], [2] と同様にシ - ケント $\Gamma \longrightarrow \Delta$ が GQSA^{*} で証明可能であるとき, $\vdash \Gamma \longrightarrow \Delta$ と書く. また 不等式 $a \leq b$ が QSA^{*} で成り立つとき, $\models a \leq b$ と書く. さらに [1], [2] と同様に QSA^{*} での等号を定義して, リンデンバウム代数 (Lindenbaum algebra) を考える.

このとき, [1], [2] と同様にして, 次のことが成り立つ.

[定理 2] a, b をワ - ドとすると, 次のことが成り立つ.

$$\models a \leq b \quad \text{ならば} \quad \vdash a \longrightarrow b$$

(証明)

QSA* のすべての公理 ($F1 \sim F11$) が GQSA* で証明可能であることを示せばよいが、これらと同値な $T1 \sim T13$ が GQSA* で証明可能であることを示す.

$T1 \sim T8^\circ$ は [1] の定理 2 の証明と同じである.

$$T9^* : \frac{x \longrightarrow \neg\neg y}{\neg y \longrightarrow \neg x} (\longrightarrow \neg)$$

$$\frac{\frac{\frac{\neg y \longrightarrow \neg x}{\neg\neg x \longrightarrow \neg\neg\neg x}}{\neg\neg x \longrightarrow \neg\neg y} (\longrightarrow \neg)}{x \longrightarrow \neg\neg y}$$

$T10$: 始式 (B4) から成り立つ.

$$T11 : \frac{\frac{\frac{x \longrightarrow x}{\neg\neg y, x \longrightarrow x} \quad \frac{\neg\neg y \longrightarrow \neg\neg y}{\neg\neg y, x \longrightarrow \neg\neg y}}{\neg\neg y, x \longrightarrow x \wedge \neg\neg y}}{\neg\neg y, x \longrightarrow \neg\neg(x \wedge \neg\neg y)} (\longrightarrow \neg)$$

$$\frac{\frac{\neg\neg y, x \longrightarrow \neg\neg(x \wedge \neg\neg y)}{\neg(x \wedge \neg\neg y) \longrightarrow \neg x, \neg y}}{\neg(x \wedge \neg\neg y) \longrightarrow \neg x \vee \neg y}$$

$$T11^\circ : \frac{\frac{\frac{\neg x \longrightarrow \neg x}{\neg x, \neg y \longrightarrow \neg x} \quad \frac{\neg y \longrightarrow \neg y}{\neg x, \neg y \longrightarrow \neg y}}{\neg x \wedge \neg y \longrightarrow \neg x} \quad \frac{\neg x \wedge \neg y \longrightarrow \neg y}}{\neg x \wedge \neg y \longrightarrow \neg(x \vee y)} (\longrightarrow \neg \vee)$$

$$T12 : \frac{\longrightarrow 1 \quad 1, \neg 1 \longrightarrow}{\neg 1 \longrightarrow \neg 1 \longrightarrow x}$$

$T13$: 始式 (B5) から成り立つ.

(証明終)

[定理 3] $a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_n$ をワ - ドとするととき, 次のことが成り立つ.

$$\vdash a_1, \dots, a_m \longrightarrow b_1, \dots, b_n \quad \text{ならば} \quad \models a_1 \wedge \dots \wedge a_m \leq b_1 \vee \dots \vee b_n$$

(証明)

Γ が a_1, \dots, a_m のとき $a_1 \wedge \dots \wedge a_m$ を x で表す. Δ が b_1, \dots, b_n のとき $b_1 \vee \dots \vee b_n$ を y で表す. GQSA* の始式 (B1), (B2), (B3), (B4), (B5) はそれぞれ $T1, T5, T5^\circ, T10, T13$ から QSA* で成り立つ. 次に GQSA* の各推論規則の上式 (上のシ - ケント) に対応する不等式が QSA* で成り立つと仮定するとき, 下式に対応する不等式が QSA* で成り立つことを示せばよい.

$(w \longrightarrow) \sim (\longrightarrow \wedge)$ は [1] の定理 3 の証明と同じである.

$(\longrightarrow \neg)$: $\models \neg\neg a \wedge b \leq \neg\neg c$ とすると $T9^*$ から $\models \neg c \leq \neg(\neg\neg a \wedge b)$. $F4$ より $\neg\neg a \wedge b = b \wedge \neg\neg a$ であり $F9^*$ より $\neg(b \wedge \neg\neg a) = \neg b \vee \neg a$ であるから $\models \neg c \leq \neg b \vee \neg a$ が成り立つ. 次に $\neg\neg a$ がないとき. $\models b \leq \neg\neg c$ とすると $T9^*$ から $\models \neg c \leq \neg b$ が成り立つ. また b がないとき. $\models \neg\neg a \leq \neg\neg c$ とすると $T9^*$ より $\models \neg c \leq \neg\neg\neg a$ で注意 2 の (1) から $\neg\neg\neg a = \neg a$ であるから $\models \neg c \leq \neg a$ が成り立つ. さらに $\neg\neg a$ と b がないとき. $\models 1 \leq \neg\neg c$ とすると $T9^*$ より $\models \neg c \leq \neg 1$ で $F10^\circ$ より $\neg 1 = 0$ であるから $\models \neg c \leq 0$ が成り立つ. 最後に $\neg\neg c$ がないとき. $\models \neg\neg a \wedge b \leq 0$ とすると $T9^*$ より $\models \neg 0 \leq \neg(\neg\neg a \wedge b)$ で $\neg 0 = 1, \neg(\neg\neg a \wedge b) = \neg b \vee \neg a$ であるから $\models 1 \leq \neg b \vee \neg a$ が成り立つ.

$(\longrightarrow \neg \vee)$: $\models x \leq \neg a$ かつ $\models x \leq \neg b$ とすると $T7$ より $\models x \leq \neg a \wedge \neg b$. $T11^\circ$ から $\models \neg a \wedge \neg b \leq \neg(a \vee b)$ で $T3$ より $\models x \leq \neg(a \vee b)$ が成り立つ. (証明終)

以上により QSA* と GQSA* が演繹的に同値であることがわかる.

参考文献

- [1] 荒金 憲一, MS 代数とストーン代数のシーケントによる形式化, 奈良高専研究紀要 33(1998), 119-127.
- [2] 荒金 憲一, 準ストーン代数のシーケントによる形式化, 奈良高専研究紀要 40(2005), 87-94.
- [3] G. Gentzen, *Untersuchungen über das logische Schliessen*, Mathematische Zeitschrift 39(1935), 176-216, 405-431.
- [4] N.H. Sankappanavar and H.P. Sankappanavar, *Quasi-Stone algebras*, Mathematical Logic Quarterly 39(1993), 255-268.

Tool Wear of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Compact Tools in Cutting Hardened Steel

Tadahiro WADA

Advanced Materials Research, Vols. 488-489 (2012) pp 724-728.

In recent years, many difficult-to-cut materials such as hardened steels, sintered steels, cast irons, etc., are widely used. One of these difficult-to-cut materials, hardened steels, are quenched and tempered to improve their mechanical properties and wear resistance. For dimensional accuracy, hardened steels are required to be machined by the metal removal process. As these steels are required to be machined under high efficiency to improve productivity, it is necessary that the tool materials have good wear resistance. Polycrystalline cubic boron nitride compact (cBN) seems to be an effective tool material because it has better features as a tool material such as good heat resistance, high hardness, etc. So, concerning the cutting of hardened steel, there are many studies on the tool wear of cBN tools [1, 2]. However the cutting performance of cBN tools depends on the binding material, etc. [3, 4, 5]. Therefore, an effective binding material, etc. for cBN tools should be selected for the cutting of hardened steel. Furthermore, in a cBN tool, the cutting edge is often formed by chamfering plus honing so as to improve both the strength of the cutting edge and the chipping resistance. And the shape of the chamfered and honed cutting edge, namely the chamfer width and chamfer angle, influences the tool wear.

In this study, in order to identify an effective cBN tool for the cutting of hardened steel, the influences of both the cBN content and the cBN particle size on tool wear at various cutting speeds was experimentally investigated. The hardened steel used was an ASTM D2 cold-worked die steel (JIS SKD11, 60HRC).

The hardened steel was turned with three kinds of cBN tools, which had different contents ratios, different cBN particle sizes, and different binding materials. Furthermore, three kinds of chamfered and honed cutting edges were also used. This will contribute to improvement of productivity in the case of cutting hardened steels.

The main results obtained are as follows:

- (1) In the case of the cBN tool with a cBN particle size of 5.0 μm , the tool life of the cBN tool with a cBN content of 75% was longer than that of the cBN tool with a cBN content of 45% at low cutting speed. However, at high cutting speed, the tool life of the cBN tool with a cBN content of 75% became shorter.
- (2) The tool life of the cBN tool with both a cBN content of 55% and a cBN particle size of 0.5 μm was the longest.
- (3) The tool wear of cBN tools decreased with a decrease in chamfer width.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express thanks for the cooperation of Tungaloy Corporation for the supply of cBN turning inserts.

REFERENCES

- [1] E. Sentoku, Y. Fujimura: Research on the Cutting Mechanism of Hardened Steel by cBN Tool, *Journal of Japan Soc. Powder and Powder Metallurgy*, 1989, 36(2), pp.125-129.
- [2] N. Narutaki, A. Murakoshi: Machinability of Sintered Steels, *Journal of Japan Soc. Precision Engineering*, 1981, 47(12), pp.1516-1522.
- [3] K. Shintani, H. Katoh, et al.: Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Nickel Based Superalloy, *Journal of Japan Soc. Precision Engineering*, 1992, 58(10), pp.1685-1690.
- [4] K. Shintani, H. Katoh, et al.: Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Austempered Bainitic Spheroidal Graphite Cast Iron, *Journal of Japan Soc. Precision Engineering*, 1990, 56(12), pp. 2261-2266.
- [5] H. Katoh, K. Shintani, Y. Fujimura: Wear Performance of CBN Tool in Machining of ADI, *Trans. of JSME, Series C*, 1991, 57(541), pp.3027-3031.

Surface Modification of Aluminum Alloy using Plasma Based Ion Implantation and Deposition

Tadahiro WADA, Jun NAKANISHI*, Yasuhiro MIKI**, Makoto ASANO**, Koji IWAMOTO*** and Hiroyuki HANYU***

Advanced Materials Research, Vols. 488-489 (2012) pp 960-966.

Aluminum alloy has a high strength-to-weight ratio, good corrosion resistance and easy recyclability. In finish cutting at a small feed rate, it has a negative influence on the cutting operation because of continuous chips. Usually, Pb and Bi are added in order to break the continuous chips. The chips become brittle because Pb or Bi, which have a low melting point, are dissolved by the cutting heat, and the chips are broken easily. Therefore, free-machining aluminum alloys such as 6262 aluminum alloy, containing 0.4~0.7mass percent Pb and Bi, are widely used. However, the use of Pb will be prohibited to avoid environmental damage, and it is necessary to improve the chip breakability without adding Pb. In order to clarify the influence of the Si contents added to the 6061 aluminum alloy on the chip control performance, aluminum alloys that have different Si contents, namely 2 mass%, 4 mass%, 6 mass% Si, were drilled with a high speed steel drill. A previous study reported that Si addition increases the chip breaking performance [1]. Moreover, it was reported that Si addition increases the chip breaking performance in the case of turning with a high speed steel tool, too[2].

Aluminum alloys are used for mechanical parts, but the alloys have poor wear-resistance. To increase their wear resistance, a hard coating is applied to the surface of the alloys. Diamond-like carbon (DLC) is applied in surface modification technology due to its superior mechanical characteristics such as wear and abrasion resistance, low friction, high hardness, anti-reflectiveness, etc. In order to improve the wear resistance of 6061 aluminum alloy, a new surface modification method was presented [5]. In this method, the inner layer of anodic oxide coating, the intermediate layer of CrN layer and the outer layer of DLC layer was used. Moreover, this method is indicated for DLC coating of aluminum alloys having different Si contents. However, in this method, it is necessary to reduce production costs. In addition, adhesion between the substrate and the DLC is slightly inferior.

In this study, in order to clarify an effective surface modification to improve the wear resistance of aluminum alloys, a new coatings-substrate system was developed. This new coating-substrate system consists of nitriding pretreatment of the substrate, the intermediate layer of the silicon-based film and the outer layer of the DLC film using plasma based ion implantation and deposition (PBIID). The DLC film was deposited on three kinds of aluminum alloys that have the different Si contents, by this coatings-system.

In order to determine the influence of the Si contents on the mechanical properties of the DLC film, SEM observation of the cross section of the coating layer, the adhesion and the wear resistance of the coating layers were experimentally investigated.

As a result, the increase of the Si contents showed no negative influence upon the mechanical properties of the DLC film.

The main results obtained are as follows:

- (1) In the case of the DLC un-coated aluminum alloys, rapid progress of the friction coefficient in the case of the 10-N load was found at the short sliding distance.
- (2) The hardness of the DLC film was not decreased with the increase of Si contents. And the increase of Si contents did not have a negative influence upon the hardness of the DLC film.
- (3) The frictional coefficient of the Al-4%Si alloy was the smallest, the frictional coefficient of the DLC film was decreased with the increase of Si contents, and it was effective for improvement of the frictional coefficient to increase Si contents.

As mentioned above, it is clear that the new coating-substrate system is effective for improving the adhesion between the substrate of the aluminum alloy and the DLC film. Moreover, the increase of the Si contents does not have a negative influence upon the mechanical properties of the DLC film, rather, the increase of Si contents was effective for decreasing the frictional coefficient.

REFERENCES

- [1] S. Yoshihara, M. Hirano, T. Eto: Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.51, No. 4(2001), p. 238(in Japanese)
- [2] T. Wada, K. Hiro, J. Fujiwara, S. Hanasaki, S. Yoshihara, T. Sasayama: Proceedings of International Conference on Precision Engineering (IcoPE2003/04), (2004), p.191
- [3] Japan Society for Precision Engineering: Handbook of Precision Machining, CORONA PUBLISHING CO., LTD., (1992), p.69 (in Japanese)
- [4] A. Kawana: Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, Vol.46, No. 5(2002), p.214(in Japanese)
- [5] T. Wada, J. Fujiwara: Material Science Forum, Vols.519-521 (2006), p.765

*Faculty of Advanced Engineering

** Nara Prefectural Institute of Industrial Technology

*** OSG Corporation

Tool Wear of Diamond-like Carbon-coated High-speed Steel with a Cr-based interlayer in Cutting of Aluminum Alloys

Tadahiro WADA, Koji IWAMOTO* and Hiroaki SUGITA*

Applied Mechanics and Materials, Vols. 152-154 (2012) pp 74-79.

As 6061 aluminum alloy has both a high strength-to-weight ratio and good corrosion resistance, it is used for automobile parts or motorbike parts. In finish cutting at a low feed rate, it has a negative influence on the cutting operation because of continuous chips. Usually, Pb and Bi are added in order to break these continuous chips. The chips become brittle because Pb or Bi, which has a low melting point, is dissolved by the cutting heat, and the chips are easily broken. Therefore, free-machining aluminum alloys such as 6262 aluminum alloy, containing 0.4~0.7 mass percent Pb and Bi, are widely used. However, from the standpoint of environmental protection, it is necessary to improve chip breakability without adding Pb. In order to clarify the influence of Si content added to 6061 aluminum alloy on chip control performance, aluminum alloys having different Si contents were drilled by a high-speed steel drill. As a result, it was found that Si addition increases chip breaking performance [1]. Next, 6061 aluminum alloy-based Al-Si alloys, which have different Si contents, were cut with a high-speed steel tool. The tool wear was investigated experimentally. The tool wear increased with an increase in Si content [2]. There are various methods of surface modification technology for giving wear resistance to the surface of a material. In surface modification technology, hard materials such as ceramics are coated onto the surface of another material. Diamond-like carbon (DLC) is coated onto the surface of high-speed steel tools to improve their wear resistance. So, aluminum alloys were turned by a DLC-coated cutting tool, and tool wear was investigated experimentally. As a result, in cutting Al-2%Si alloy, the wear progress of the DLC-coated tool is slower than that of the uncoated tool, and the effect of wear resistance of the diamond-like carbon is recognized. However, in cutting Al-4%Si alloy, there is little difference in the wear progress between the DLC-coated tool and the uncoated tool [3]. The multilayer coating system is designed to have both good substrate adhesion of the inner coating film and superior wear resistance of the outer coating film. However, in the concept of the design of a multilayer coating system, not much information is available in the open literature on "suitable" constituent materials to be chosen as the inner

layer, intermediate layer(s), and outer layer [4]. Therefore, a Cr-based interlayer, namely (Al,Cr)N, was developed as an intermediate layer and it is effective for improving the wear resistance of DLC-coated tools.

In this study, in order to clarify the influence of a diamond-like carbon (DLC) coating layer with a Cr-based interlayer, namely (Al,Cr)N, on cutting performance, aluminum alloys having different Si contents were turned. The substrate of the tool material was high-speed steel (1.4%C). Tool wear and surface roughness were experimentally investigated.

The following results were obtained:

- (1) In cutting two kinds of Al-Si alloys, namely Al-2%Si alloy and Al-4%Si alloy, the wear progress of the DLC/(Al,Cr)N-coated tool was slower than that of the DLC-coated tool. Therefore, the (Al,Cr)N interlayer was effective for decreasing the tool wear of the DLC-coated tool.
- (2) The wear progress of the two kinds of the DLC-coated tools in cutting of Al-4%Si alloy was faster than that in cutting of Al-2%Si alloy.
- (3) In cutting of Al-2%Si alloy with a (Al,Cr)N/DLC-coated tool, the surface roughness was almost constant in the range of a cutting distance from 0.1 km to 9.5 km.

REFERENCES

- [1] S. Yoshihara, Masakazu Hirano, and Takehiko Eto: Journal of the Japan Institute of Light Metals, Vol. 51, No. 4 (2001), p. 238.
- [2] T. Wada, K. Hiro and J. Fujiwara: International Journal for Manufacturing Science & Technology Vol. 5, No. 2, 2003/2004, p. 39.
- [3] Tadahiro Wada: "Cutting Performance of Diamond-Like Carbon Coated Tool in Cutting of Aluminum Alloys," Materials Science Forum Vols. 638-642(2010), p.368.
- [4] K. N. Stafford: "Progress in Coated Cutting Tool Science and Technology," Advances in Surface Engineering, Vol. III (Engineering Applications), edited by P. K. Datta, J. S. Gray, and Gray Burnell, Royal Society of Chemistry (1997), p.364.

Properties of TaN Coating Film Deposited on WC-Co-based Cemented Carbide using Magnetron Sputter Ion Plating

Tadahiro WADA, Koji IWAMOTO*, Keizo TSUKAMOTO** and Kazuki HIRO

Applied Mechanics and Materials, Vol. 87 (2011) pp 186-190.

Various methods of surface modification technology are available for yielding high function characteristics such as wear-resistance, lower or higher friction coefficient, corrosion-resistance and thermal-resistance on the surface of the material. Generally, the coating of a hard material like ceramic on the surface of a material is a popular surface modification technology. The physical vapor deposition (PVD) method, which is one of the coating technologies, is widely used because it can be coated at a lower treatment temperature of 470K – 870K [1].

In cutting, e.g. turning, milling, drilling and tapping, coated cemented carbide tools, which have good fracture toughness and wear resistance, seem to be effective tool materials. In this case, the titanium based films (e.g. TiN, (Ti,Al)N) are generally used as the coating film [e.g. 2, 3].

On the other hand, in cutting carbon steel with WC(tungsten carbide)-Co cemented carbide tools at high cutting speed, the wear resistance (in particular crater-wear-resistance) can be improved by adding TiC and TaC to WC-Co cemented carbide [4]. The thermal stability of TiC and TaC is better than that of WC at high temperature, the affinity with Fe of TiC and TaC is lower than that of WC, and the oxidation resistance (anti-oxidation) of TiC and TaC is higher than that of WC. Furthermore, the strength of WC-Co cemented carbide at room temperature is decreased by adding TiC and TaC to WC-Co cemented carbide; however, both the strength at high temperature and the creep-resistance of WC-Co cemented carbide can be improved by adding TiC and TaC to WC-Co cemented carbide [5].

On this account, in cutting carbon steel with WC-Co cemented carbide tools, adding TiC and TaC to WC-Co cemented carbide is effective for improvement of the wear resistance of WC-Co cemented carbide [4]. Therefore, the titanium based films are generally used widely as the coating films. However, the tantalum based films (e.g. TaN, TaC) are not applied as the coating film for cutting tools because the melting point of TaC is higher than that of TiC. Moreover, it is unclear whether TaN coating film can be used as a coating film of WC-Co cemented carbide cutting tools.

In this study, in order to clarify the effectiveness of tantalum (TaN) coating film, TaN coating film was formed

on the surface of the substrate which was a cemented carbide ISO K10 by the magnetron sputter ion plating process, and the thickness, the hardness and the scratch strength (critical load measured by scratch tester) of TaN coating film were measured. The hardened steel ASTM D2 (JIS SKD11) was turned with two types of PVD coated cemented carbide tools, namely TaN and (Ti,Al)N coated cemented carbide tools. The tool wear of the TaN coated cemented carbide tool was experimentally investigated and compared with that of the (Ti,Al)N coated tool. The substrate base metal of the coated carbide tools is cemented carbides ISO K10.

The following results were obtained:

- (1) Droplets on the surface of the TaN coating film, which has the K10 substrate, were negligible.
- (2) The micro-hardness of TaN coating film 2510HV was higher than that of TiN coating film 2090HV, and there was little difference in hardness between the TaN 2510HV and (Ti,Al)N 2710HV.
- (3) The critical scratch load of TaN coating film over 130N was higher than that of TiN coating film 68N or (Ti,Al)N coating film 73N.
- (4) In cutting the hardened steel using TaN and (Ti,Al)N coated tools, the wear progress of the TaN coated carbide tool was almost equivalent to that of the (Ti,Al)N coated carbide tool.

The above results clarify that the TaN coating film, which is a new type of coating film, has both high hardness and good adhesive strength, and can be used as a coating film of WC-Co cemented carbide cutting tools.

REFERENCES

- [1] A. Kawana: Journal of Japan Society for Abrasive Technology, Vol.46-5(2002), p.214 (in Japanese)
- [2] K. Sakagami, G. Yongming and T. Yamamoto: Pro. 4th Int. Conf. on Progress of Cutting and Grinding, (1998), p.38
- [3] H. Nakagawa, T. Hirogaki et al.: Pro. 6th Int. Conf. on Progress of Machining Technology, (2002), p.81
- [4] Japan Society Precision Engineering: Handbook of Precision Machining, CORONA PUBLISHING Co., Ltd., (1992), p.61 (in Japanese)
- [5] Kazuki Okada: Journal of Japan Society for Abrasive Technology, Vol.54-4(2010), p.202 (in Japanese)

* OSG Corporation

**Ayabo Corporation

Phase diagram of thermotropic liquid crystal including negative pressure region generated in metal Berthelot tube

Kazuki HIRO and Tadahiro WADA

Solid State Phenomena, Vols. 181 – 182, pp. 22-25

Phase diagrams including absolute negative pressure regions of thermotropic liquid crystals give useful information on science and technology. For example, when the liquid crystals sealed in cells of liquid crystal displays are cooled, the liquid crystals may experience negative pressures and may occur phase transitions from nematic (N) to isotropic (I) or crystalline phases (Kr), causing the display performance to deteriorate. From a view of physical chemistry, there are reports insisting that critical points of I-N transitions for thermotropic liquid crystals are hidden in the negative pressure regions which may be experimentally reached.

Unfortunately, it has been difficult to perform experiments under negative pressures because liquids subjected to negative pressures enter meta-stable and 'super-expanded' states, so that appearances of vapor phases, that is, cavitation phenomena, readily occur via heterogeneous nucleation, and liquids' pressures become saturated vapor ones.

An experimental method suitable for measuring properties of liquids under negative pressures is the Berthelot method. It has been used to stretch liquids under static conditions by subjecting liquids in containers to quasi-isochoric changes. Container materials are glasses, quartz, metals, and so on. Of these materials, metals are excellent as pressure vessels to facilitate the properties for any liquids, namely water, flammable organics and so on, though maximum negative pressures in metal are lower than those in others.

Since pressure dependencies of soft materials are strong, investigations of them under negative pressures are interesting. Thus, authors have developed the Berthelot method using a metal tube. Recently negative pressures to ca. -20 MPa for liquids have been obtained in a small-sized

Berthelot tube. Studies on liquids under negative pressures have been facilitated.

In this work, a phase diagram of a thermotropic liquid crystal, 4-(4'-propylcyclohexyle)benzotrile (PCH-3, Merck Co.), was depicted to negative pressure region on a pressure-temperature (P-T) plane. Phase transition in thermotropic liquid crystals under negative pressure was investigated by using an elaborated Berthelot method.

The Berthelot tube using a pressure transducer consists of a screw, a pressure transducer of strain gauges (Kyowa Elec. Inst. Co., PHL-A), a socket, a ball for sealing a sample liquid crystal (AKS Co.; 5/16 inch diameter), two o-rings, and a cup. The linearity of voltages as a function of pressures of the pressure transducer was assured up to +50MPa in a temperature range -196 to 200°C. The temperature dependence of its linear coefficient was approximately 0.02 %/°C. The coefficient was used to measure not only positive pressures, but also negative pressures. A validity of the application was supported by suppliers. The sample which had not been in a solid phase, was poured into the chamber on the top of the transducer, and was sealed with the ball by compressing it against a sharp edge at the opening of the chamber using the screw.

The main results are as follows: phase diagram including negative pressure region to -10 MPa for a thermotropic liquid crystal, PCH-3, was depicted by the Berthelot method using a pressure transducer. The coexisting curve was obtained under negative pressures. The tube is useful as a tool for drawing the diagram for any thermotropic liquid crystal. The polymorphism of the crystalline phase of PCH-3 was newly discovered.

回転型連理返りの工作

廣 和樹・尾崎 充紀・和田 任弘

Making of “Renrigaeri-doll” Having Ability of Rotation

Kazuki HIRO, Mitsunori OZAKI and Tadahiro WADA

物理教育 59巻, 3号, (2011), 200-201

小学校高学年を対象とした公開講座にて、からくり人形「回転型連理返り」の工作を行った。からくり人形は環境に優しい省エネ技術として工場などの生産現場で注目されている。参加者アンケート調査の結果、19名中17名からアンケートの回答を得、すべて満足であった。以下、工作の概要と改良点について報告する。

連理返りは、筒2本で連結された人形2体を階段の上下段に置くと筒内を移動できる水銀の重さにより、上段の人形が下段の人形を飛び越え階段を降りていく、というからくりである。人形が動作するのは、人形腕部を回転中心とした水銀の重さによるモーメントが生じるためである。

人形の飛越方法には、人形がその姿勢を保持したまま飛越する無回転型と、人形同士が糸で繋がれ一回転して飛越する回転型の2通りあり、講座では回転型の方がダイナミックな動作をするため、回転型を取り上げた。

工作にあたっては身近で安価な材料を用いることにし、筒はストローで、人形はバルサ材や竹ひごで作った。また本来の連理返りでは筒内に水銀が使用され、筒中央部に水銀移動を遅らせる隔板がある。これは着地を安定させるためのものである。工作では水銀は有毒なため使用できない。そこで市販の金属球を用いて、隔板と同様の動作をさせるための工夫点として筒端から一定長さの数箇所を切れ込みを入れ球の降下を遅くし人形着地後に降下するようにした。こうしないと着地前に球が降下し着地が安定しなかった。

講座で工作した結果として、人形の着地成功率が7~8割程度であったことと、人形が数段降りたとき筒端が階段の角に当たり人形が止まる現象が見受けられた。

着地失敗の原因は、回転中心と糸を取り付けるフックを結ぶ角度が大きかったことである。回転型連理返りにおける人形の軌跡は、下段人形の回転中心—下段人形のフック—上段人形のフック—上

段人形の回転中心—下段人形の回転中心、からなる両クランク機構をなしており、持ち上げられた上段人形が移動しながらあるところで倒立し、その後、着地するまでの間に自重によって正立する。フックの角度が大きいと倒立するまでの移動距離が長くなる。その結果、着地までの距離が短くなって正立できずに失敗する。よって着地成功率を高めるにはフックの角度を小さくすれば良く、実際に動作確認を行ったところ着地は安定した。

人形が数段降りて筒端が階段に当たったのは、2体の人形間の幅と高さが、階段のそれらと比べて短かったためである。もし人形間の幅と高さが階段のそれらに一致していれば人形の動作に伴う筒端の描く軌跡は、人形が何段降りても階段の角と接触せず筒が階段の角に当たることはない。

これに対し、人形間の幅と高さのいずれか一方でも階段のそれらより短い場合は、階段の角と人形の爪先との間にわずかな差が生じ、人形が数段降りたとき筒端が接触し筒が当たる。

人形間の幅と高さは計算によって求めることができる。これらは、筒の形状で決まる初期角度、筒を傾斜させ人形が回転し始める回転角度、回転中心間の距離の3つから求められる。実際に工作した連理返りから計算した幅と高さは、階段の幅と高さに比べると短くなっており筒端が当たった。なお、人形および階段の幅と高さを完全に一致させることは工作精度上、また人形の跳ね返りの影響もあり困難であった。そこで階段を2分割し、差が小さくなるよう間隔を調整した結果、筒端が当たらず人形は最下段まで動いた。

回転型連理返りの工作を小学生高学年の公開講座にて実施し、参加者全員が満足する結果を得、さらに動作向上のための改良を行った。試作当初は容易に動作するものと思っていたが、なかなか動作せず動作原理および試作の重要性を再認識できた。今後の課題としては無回転型の連理返りにも挑戦したい。

奈良工業高等専門学校 研究紀要第48号

平成 25 年 3 月 15 日

編集兼
発行者

奈良工業高等専門学校
大和郡山市矢田町22

RESEARCH REPORTS

OF NARA NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY

NO. 48, 2012
CONTENTS

Powder Metallurgy implemented to the Hands-on Education for Introducing Metalworking Technology to Young Students Yukinori TANIGUCHI , Kouki OKUMURA , Toshifumi NAKANISHI , Mitsunori OZAKI , Tatsumi ICHISE and Koutaro YAMANO	1
Study of Unsteady Supersonic Jet using Shock Tube with Small High-Pressure Chamber Hiroshi FUKUOKA , Minoru YAGA , Toshio TAKIYA and Ikuro UMEZU	7
Interferometric Measurement of Thickness using a Pico-second Pulse Laser	Yoshihiro OSHIDA 13
Development of Au Sn Alloy Fiber by the In-Rotating-Water-Spinning Process Mitsuyoshi SHIMAOKA and Motoi WADA	17
Study on Aging Test Device of the LED	Hiroaki ICHII , Takashi MAKINO and Katsutaka TSUKAMOTO 23
Development of a Satellite Data Delivery and Sharing System for Student CubeSat Projects	Fumio ASAI 29
Sequential formulations for quasi-Stone algebras*	Kenichi ARAGANE 31
Abstracts	38