

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289031

研究課題名（和文）蒸気中における液滴固体面衝突後に発達する高速液膜流れ不安定性現象に及ぼす凝縮効果

研究課題名（英文）Condensation effect on high-speed liquid-film flow instability at a liquid-droplet impact on a solid surface in a vaporous environment

研究代表者

渡部 正夫（WATANABE, MASAO）

北海道大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30274484

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：固体表面への液滴衝突は噴霧冷却，インクジェット印刷，超清浄洗浄等の技術応用において重要な技術的要素である．本研究では，Xuら（Phys. Rev. Lett, 184505, 2005）の液滴衝突後に発生する高速液膜の不安定現象発生閾圧力についてのモデルが，周囲気体温度の寄与を予測することが可能であることを示した．さらに周囲気体が凝縮性気体の場合には，高速液膜の不安定現象発生閾圧力がXuらのモデルでは予測できず，不安定現象発生閾圧力はより高く，すなわち安定化することを示した．

研究成果の概要（英文）：Droplet impacts on solid surface are key elements in technical applications, such as rapid spray cooling, ink-jet printing and semiconductor cleaning. Although the broad varieties of parameters that control splash formation after the droplet impact, are proposed, they are not thoroughly explored; hence, dynamics of the droplet after the impact are yet fully understood. After droplet impacts on solid surface, characteristic film flow is developed; then splash may be generated. In this study, we examine the effects of the temperature of surrounding gas, which is either condensable or non-condensable, on ethanol droplet impact. We found that splash can be suppressed with the increase of the surrounding gas temperature. We measured the splash threshold pressure for a splash to appear as a function of the temperature. The results show that the splash threshold pressure is a monotonically increasing function of the surrounding gas temperature.

研究分野：流体力学

キーワード：流体 混相流 液滴 液滴衝突 スプラッシュ 薄膜流れ 可視化

1. 研究開始当初の背景

(1) 液滴が固体表面に衝突すると、その後、衝突直後の接触点粉碎による微小液滴の射出、固体表面に沿って滑らかに流れる液膜流れ(図 1(a))、浮上する液膜流れ(図 1(b))、液膜端部よりの液糸の成長(図 1(c),(d))、液糸崩壊による微小液滴の射出(図 1(e))等の様々な高速液膜の不安定性現象が観察される。従来の研究では、不安定性現象発生閾値について、主に液体物性および液膜速度のみに着目しており、Xuら(*Phys. Rev. Lett.*, 2005)が周囲圧力に着目するまで、本研究で特に重視している固体表面衝突後に発達する液膜流れの不安定性現象に及ぼす周囲気体の効果については、その存在すら認識されていなかった。また、研究代表者らが着目している蒸気中における液滴衝突後の高速液膜流れについての研究報告は存在しない。

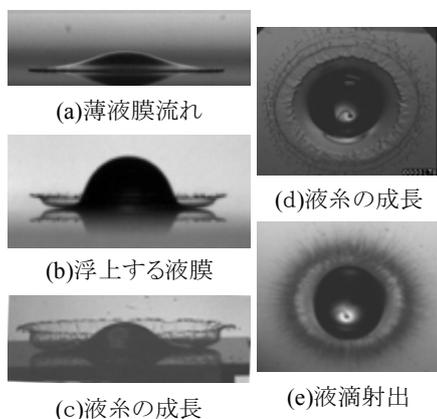


図 1 高速液膜流れの不安定性現象

(2) これまでの研究により蒸気中での液滴衝突によって発生する高速液膜流れの発達が、非凝縮性気体中とは本質的に異なり、液膜は周囲気体を押しつけて伸展するため、液膜先端では不安定となるが、蒸気中の場合には、不安定性が抑制されるため高速液膜が固体表面上を伸展し、液滴衝突後の液膜流れの不安定性現象における凝縮効果に着目した。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、液滴の固体面衝突後に進展する高速液膜流れの不安定性現象に及ぼす、周囲蒸気の凝縮効果を明らかにすることである。真空容器内を蒸気で満たし、その容器内で、液滴を固体面に衝突させ、高速液膜流れを発生させる。周囲気体が非凝縮性気体の場合に得られた結果と比較することにより、液膜流れが安定化するかを検討する。

(2) 凝縮効果によって不安定性を抑制できれば、固体面を滑らかに高速液膜が流れ、その結果発生する強い壁面応力により、研究代表者らが提案する水蒸気・水混合噴霧洗浄法の洗浄効果を飛躍的に高めることが可能となる。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、固体表面衝突後に形成される高速液膜流れの不安定性現象に着目する。蒸気中の液膜流れを検討し、「高速液膜流れの不安定性現象に及ぼす周囲気体凝縮効果」を考察する。

(2) 本研究では、真空容器内に液滴を生成させ、自由落下させることでガラス板へと衝突させた。その際の衝突過程を水平方向より高速度カメラを用いて、バックライト法により撮影することで、液滴変形過程を観察した。

(3) 本研究では、容器内の圧力および温度制御が非常に重要である。容器内の温度制御にシリコンラバーヒーターを用いた。シリコンラバーヒーターは真空容器側面、上面、下面すべてに耐熱性両面テープで貼り付け、さらに耐熱材で覆うことで熱の損失を抑えた。また液滴が自由落下中に周囲気体による温度変化の影響を防ぐため、容器内の気体温度同様、液体容器にヒーターを取り付け、液体の温度制御も行った。また、ヒーターは温度制御を行うためにデジタル温度調節器に接続され、273 ~ 573 Kまでの温度制御が可能である。真空容器内の温度を測定するために熱電対を用いた。各シリコンラバーヒーター、真空容器内上部、固体壁近傍に取り付け温度を測定した。圧力は、液滴射出前に真空ポンプを用いて真空容器内を減圧することで制御し、温度制御を行う場合も同様に、液滴射出前にシリコンラバーヒーターを用いて内部の温度を目標温度まで加熱した。

(4) 本研究では、エタノール蒸気雰囲気中にて液滴衝突の観察をするので、真空容器内にエタノール蒸気雰囲気を作る場合は、減圧された状態の真空容器内にエタノールが入ったビーカーを設置し、蒸発させることで容器内をエタノール蒸気で満たした。注射針から衝突版までの高さはおおよそ 600 mm。衝突直前の液滴の速度は 2.8~3.2 m/s。液滴生成装置を用いて液滴を生成すると、液滴直径は 2~3 mmであった。本研究において試料液体はエタノールである。気体圧力は 1 ~ 100 kPa (大気圧) 程度、気体温度はおおよそ 290 K ~ 370 K 程度の領域での液滴衝突の観察を行った。

4. 研究成果

(1) 気体温度の影響

まず、大気圧下の液滴衝突における気体温度の影響を明らかにするために観察を行った。気体温度を変化させた場合における液滴衝突の比較実験を行うため、室温 ($T = 279$ K) および高温 ($T = 363$ K) 下で液滴径 D [mm]、衝突速度 V [m/s]、圧力 P [kPa] など他条件はそろえ、液滴衝突実験を行った。図 2 に室温下および高温下でのエタノール液滴の衝突の経時変化を示す。図 2 左においては斜め上方に進

展するクラウン状の流れの発生が確認された。その流れが発達し指状の流れ Fingering が発生し、さらにその先端から Splash の発生が確認された。一方、高温下での液滴衝突図 2 右においては一滴の微小な飛沫が確認されるものの、それ以外 Fingering および Splash の発生は確認されず、Lamella の状態を保ったまま固体壁面を進展することがわかった。高温下での液滴衝突は室温での衝突に比べ、Splash の発生量が著しく減少していることより、気体温度の上昇は Splash 発生抑制効果があることが明らかになった。

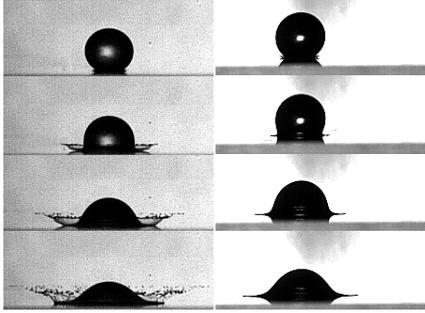


図 2 左:室温(T=279K)および右:高温(T=363K)条件下での液滴衝突の観察

(2) 気体圧力と気体温度の関係

次に液滴衝突における周囲気体温度と圧力の関係を示すため、周囲気体温度に対する圧力の Splash threshold を求めた。測定範囲は液滴径 $D=2.2 \pm 0.1 \text{ mm}$ 、衝突速度 $V=3.0 \pm 0.1 \text{ m/s}$ 、気体温度 $T=303 \sim 353 \text{ K}$ である。 $T=303 \text{ K}$ の場合、 P_T はおよそ $41 \sim 45 \text{ kPa}$ 、 $T=353 \text{ K}$ の場合、 P_T は $54 \sim 59 \text{ kPa}$ 程度であり、約 50 K の温度上昇で 15 kPa 程度 P_T が増加し、周囲気体温度の上昇は、圧力の Splash 発生閾値の上昇に寄与するという結果が得られた。

(3) Xu らによる splash threshold 評価

周囲気体温度が高温である場合、 Re 数、 Oh 数での評価では Splash threshold は十分に整理できないという結果が得られた。 Re 数および Oh 数は衝突速度、液滴径、液体の表面張力や粘性といった液体のパラメータを考慮しているが、周囲気体の影響は考慮されていない。つまり、Splash threshold について議論する際は、圧力や気体温度といった周囲気体を考慮する必要がある。Xu らは、気体密度、気体の音速の効果（気体温度）を考慮した下式で示すような周囲気体パラメータを含んだ無次元数 Σ_G/Σ_L を提案している。

$$\Sigma_G/\Sigma_L = \sqrt{\gamma M_G P_T} \sqrt{\frac{RV_0}{2k_B T} \frac{\sqrt{v_L}}{\sigma}} = 0.45 \quad (1)$$

Σ_G/Σ_L には気体密度による周囲圧力、気体の音速による周囲気体温度、液体温度に依存する表面張力、粘性が含まれており、周囲気体

パラメータと液体パラメータの両方が考慮された無次元数である。Xu らによればこの比は 0.45 という一定値をとり、衝突速度、液体の粘度、気体種（分子量）を変えて実験を行い、その結果の妥当性を報告している。本研究では、Xu らの示す Splash threshold において液滴衝突における周囲気体温度 T の影響を考察した。

(4) Σ_G および Σ_L を用いた評価

本実験において Σ_G/Σ_L に含まれる変数は Splash の圧力の閾値 P_T 、気体温度 T 、表面張力 σ 、動粘性係数 ν であり、液滴衝突において P は T の関数であり、 σ 、 ν は液体温度 T_L の関数である。横軸に T_L の対数、縦軸に σ 、 ν の対数を取った結果を図 3, 4 に示す。本実験においては周囲気体同様に液体の温度制御も行っているため $T_L = T$ である。ここで Xu らの報告により Σ_G/Σ_L は一定であり、かつ本実験において P 、 T 、 σ 、 ν 以外のパラメータは一定であるので Σ_G/Σ_L は次のように書き換えることができる。

$$\Sigma_G/\Sigma_L = \sqrt{\gamma M_G P_T(T)} \sqrt{\frac{RV_0}{2k_B T} \frac{\sqrt{v_L(T)}}{\sigma(T)}} = \text{const.} \quad (2)$$

$$P_T^*(T) = \alpha \frac{1}{\sigma(T)} \sqrt{\frac{v_L(T)}{T}} \quad (\alpha = \text{const.}) \quad (3)$$

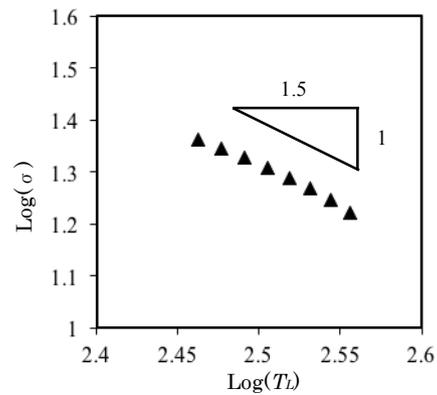


図 3 表面張力の温度依存

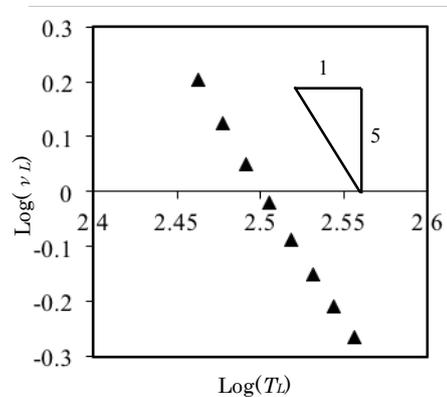


図 4 動粘性係数の温度依存

(5) splash threshold 圧力の温度依存
 周囲気体温度に対する圧力の Splash threshold を図 5 に示す. P_T^* は本実験結果から得られる Splash の圧力の閾値で気体温度に依存する関数である. 図 3, 4 より表面張力は $\text{Log } \sigma = -1.49\text{Log}T + \beta$ が得られるので $\sigma \sim T_L^{-1.5}$ となり, 動粘性係数は $\text{Log } \nu = -5\text{Log}T + \gamma$ (β, γ は定数) が得られるので $\nu \sim T_L^{-5}$ となった. これらの結果を式 (3) に代入すると次の値が得られる.

$$P_T^*(T) \sim T^{1.5} \quad (4)$$

Xu らのモデルより得られる空気中での液滴衝突における圧力の Splash threshold は気体温度の 1.5 乗に比例するという結果が得られた. また本実験から得られた実験値は近似すると図 5 より $P \sim T^{1.57}$ となる. このことから Σ_c / Σ_L は Xu らのモデルより得られた結果と実験値がおおよそ同値であるため, 気体温度 T の値によらず, Σ_c / Σ_L は一定値になることがわかる. このように Splash threshold の評価において, 液体の表面張力, 粘性のみではなく, 気体密度および気体の音速(気体温度)の効果重要であることが確認できた. 高温下の液滴衝突において, 液体パラメータのみを用いた Oh 数では周囲気体の影響を考慮していないため, Splash 発生条件を整理できなかったが, 気体温度を含む Σ_c / Σ_L を用いると Xu らの結果と同傾向を示したことから, 液滴衝突において, 気体の音速や密度といった気体パラメータの影響は非常に重要であることがわかった

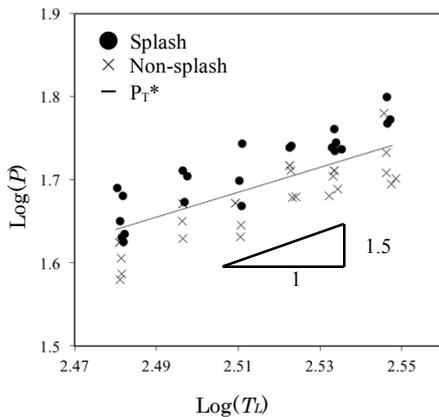


図 5 空気中におけるエタノール液滴衝突時のスプラッシュ発生閾圧力の温度依存

(6) 気体種 (蒸気) の影響

大気圧下の液滴衝突における気体種 (蒸気) の影響に関してエタノール蒸気雰囲気中でエタノール液滴の衝突を観察した結果を述べる. 空気中での液滴衝突との比較を行うため, エタノールの蒸気圧を大気圧 (101.3kPa) 付近 (気体温度 351K) まで上昇させる必要がある. よって実験を行う際には, 気体圧力 P をできるだけが大気圧に近くなるようにするべきである. しかし, 本実験では観察窓や真空容器

上部に加熱が足りず, エタノールが凝縮していたことにより蒸気圧を大気圧程度まで上げることができなかった. 今回は $T=353\text{K}$ において圧力が一番高かった $P=80\text{kPa}$ の液滴衝突について述べる. 空気中の液滴衝突の様子とエタノール蒸気雰囲気中の液滴衝突の様子を図 6 に示す. いずれの条件も気体圧力は約 100 kPa, 気体温度は約 353 K, 図 6 左に示すように周囲気体が空気の場合は Lamella に先行し, 飛散する微小な Splash の発生が確認された. 一方, 図 6 右に示したエタノール蒸気雰囲気中の場合, Fingering および Splash の発生は発生せず, Lamella のみの流れが観察された. また, 図 5 に示したように $303\text{K} \leq T \leq 353\text{K}$ の範囲において, 空気中では圧力が 50~60kPa 程度に Splash threshold が存在したが, エタノール蒸気雰囲気中では飽和蒸気圧以下であればいかなる圧力においても Splash の発生は確認されなかった. このことからエタノール蒸気雰囲気中では Splash の発生が抑制されるもしくは発生しないことが明らかになった.

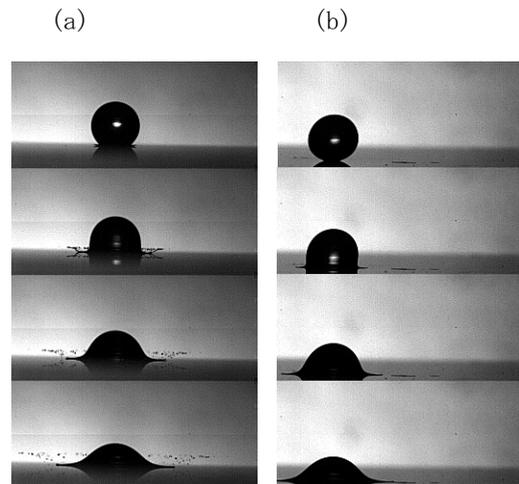


図 6 (a) 空気中および (b) エタノール蒸気中の液滴衝突

(7) エタノール蒸気雰囲気と空気での Splash threshold の比較

次に空気中における Splash threshold とエタノール蒸気雰囲気中における Splash threshold を比較した結果を述べる. 気体種による Splash の発生への影響に関しては Xu らによっても報告されているが, Xu らは非凝縮性気体を用いて気体の分子量に着目しており, 本研究ではエタノールとエタノール蒸気雰囲気中という単成分での液滴衝突となるので本質的に違う現象であると考えられる. 図 7 にエタノール飽和蒸気圧以下でのエタノール液滴の衝突において Splash 発生の有無を示す. 青の三角点がエタノールの飽和蒸気圧, 緑線が図 5 から得られた空気中における Splash threshold の実験値, 赤線が Xu らのモデルをエタノール蒸気中の実験結果に適用した結果を示している. 初めに飽和蒸気圧以下でのエ

タノール液滴の衝突において Splash の発生は観察されなかった。これは前節でも述べたように単成分での飽和蒸気圧以下の液滴衝突では少なくとも Splash の発生は抑制されるという結果であり、Splash が発生しない可能性があることも示唆している。また、空気中での Splash threshold と比較すると空気中では Splash が発生した領域においてもエタノール蒸気中においては Splash が発生しないことが分かった。つまり空気中よりもエタノール蒸気中のほうが Splash threshold が高いことを示している。そこで、蒸気中での Splash threshold を求めるため、式(4)を用いて空気中と同様に P_{r*} の値を算出した。その結果が $P_{r*} \sim T^{1.45}$ であり図には赤線で示される。エタノールは空気よりも気体の分子量が大きいので、その差分、空気中より Splash threshold が小さくなった。つまり Xu らのモデルによれば空気中よりもエタノール蒸気中での液滴衝突の方が Splash の発生を促進する状態であるはずである。しかし、実際には飽和蒸気圧以下での液滴衝突においては Splash が抑制され、Splash が発生しないという Xu らの報告を否定する結果が得られた。単成分における液滴衝突にて Xu らのモデルで説明できなかった原因として、エタノール蒸気とエタノール液滴との凝縮現象が重要であると考えられる。液滴が固体壁に衝突した後、液滴は Lamella を形成する。その Lamella の縁で周囲気体による不安定性が増大すると、Splash が発生すると考えられている。しかし、本実験ではエタノール蒸気中での液滴衝突であり、Lamella の縁で蒸気の凝縮現象が起こり、不安定性の増大が抑制されたため、Xu らの示した Splash threshold では説明できなかったと考える。

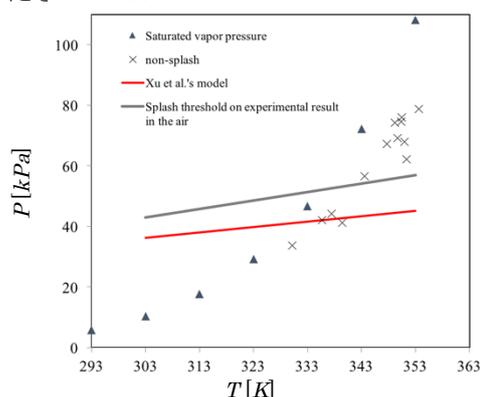


図7 エタノール蒸気中におけるエタノール液滴衝突時のスプラッシュ発生閾圧力の温度依存

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Kazumichi Kobayashi, Kazuki Konno, Hisao Yaguchi, Hiroyuki Fujii,

Toshiyuki Sanada, Masao Watanabe, Early stage of nanodroplet impact on solid wall, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 28, 2016, 032002, DOI: 10.1063/1.4942874

- ② Yuki Tatekura, Toshihide Fujikawa, Yoshinori Jinbo, Toshiyuki Sanada, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe, Observation of water-droplet impacts with velocities of 0(10 m/s) and subsequent flow field, ECS Journal of Solid State Science and Technology, 査読有, Vol. 4, No. 9, 2015, N117-N123, DOI: 10.1149/2.0111509jss

- ③ 加藤昌也, 渡部正夫, 小林一道, 真田俊之, 低圧環境下での高速液滴衝突により発生する液膜流れ, 混相流, 査読有, 28巻5号, 2015, 531-537 DOI: 10.3811/jjmf.28.531

[学会発表] (計 7 件)

- ① Yutaka Kataoka, Yuusaku Hori, Masao Watanabe, Kazumichi Kobayashi, Hiroyuki Fujii, Toshiyuki Sanada, Observation of non-spherical droplet impacts with velocities of 0(10 m/s), 9th International Conference on Multiphase Flow, 査読有, Firenze, Italy, May 22-27, 2016, 16/5 ISBN: 978-88-95608-54-9

- ② Toshihisa Isono, Masao Watanabe, Kazumichi Kobayashi, Hiroyuki Fujii, Toshiyuki Sanada, Effects of surrounding gas temperature on ethanol droplet impact on solid surface, 9th International Conference on Multiphase Flow, 査読有, Firenze, Italy, May 22-27, 2016, 16/6 ISBN: 978-88-95608-54-9

- ③ 山口陽平, 渡部正夫, 小林一道, 藤井宏之, 真田俊之, 固体壁面の濡れ性が液滴衝突により発生する流れの進展挙動に与える影響の観察, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 東京理科大学葛飾キャンパス, 東京, 11/7-8, 2015, 0317

- ④ 東稜, 渡部正夫, 小林一道, 藤井宏之, 低圧環境下での高速液滴衝突による Splash 発生を観察, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 東京理科大学葛飾キャンパス, 東京, 11/7-8, 2015, 0318

- ⑤ 堀優作, 片岡豊, 渡部正夫, 小林一道, 藤井宏之, シリンジを用いた高速微細液滴射出装置の開発, 日本機械学会流体工

学部門講演会講演論文集，東京理科大学
葛飾キャンパス，東京，11/7-8，2015，
0319

- ⑥ 磯野俊悠，渡部正夫，小林一道，藤井宏之，
エタノール液滴と固体壁の衝突現象に周囲気体種が及ぼす影響，日本機械学会
2015年度年次大会，北海道大学札幌キャンパス，札幌，9/13-16，2015，G0500202
- ⑦ 片岡豊，堀優作，渡部正夫，小林一道，
藤井宏之，シリンジを用いた高速液滴射出装置の開発および液滴衝突の観察，日本
機械学会2015年度年次大会，北海道大学札幌キャンパス，札幌，9/13-16，
2015，G0500203

[その他]

ホームページ等

<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/lab/fluid/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 正夫 (WATANABE MASAO)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：30274484

(2) 研究分担者

真田 俊之 (SANADA TOSHIYUKI)
静岡大学・学術院・准教授
研究者番号：50403978
小林 一道 (KOBAYASHI KAZUMICHI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：80453140
矢口 久雄 (YAGUCHI HISAO)
群馬工業高等専門学校・機械工学科・講師
研究者番号：20568521
藤井 宏之 (FUJII HIROYUKI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：00632580