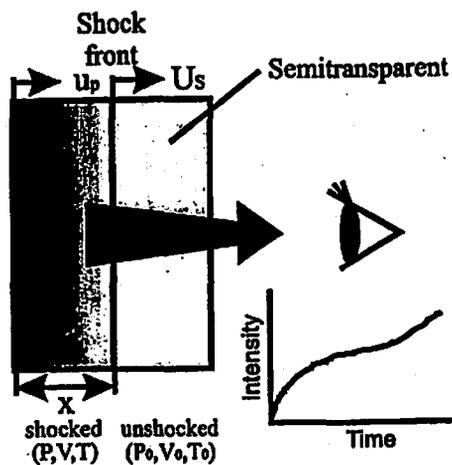


(a) Transparent material.



(b) Semitransparent material.

Fig. 1 Explanation of the time-radiance profile

エネルギー物質の爆轟反応を観測する試みがなされている。しかし、彼らの解析では温度測定対象物質自体による赤外発光の吸収の取り扱いが不十分であるため、発光の時間プロフィールの解釈に不備な点が多い。本研究は、試料による発光吸収を考慮に入れた、赤外発光観測による高精度の温度測定の手法を開発することを目的とし、四塩化炭素を対象物質として精度等を検証することを目的としている。

## 2. 理論

Fig. 1 に高圧・高温状態の試料からの放射の概念図を示す。放射は衝撃波面後方の高温状態にある試料から放たれる。衝撃波の伝播とともに発光部分の厚みが増加するが、これが十分に厚くなれば衝撃波面の放射率は1に近づき、放射は飽和する(Fig. 1-(a))。衝撃波速度を  $U_s$ 、粒子速度を  $u_p$ 、衝撃圧縮下の試料の吸収係数を  $a_s$  とすると、衝撃波の伝播に伴う放射強度  $I$  の時間変化は、放射の飽和値を  $I_0$ 、放射体の温度を  $T$  として、

$$I(t, T) = I_0(T) [1 - \exp(-a_s x)]$$

$$x = (U_s - u_p) t \quad (1)$$

となる。ここで、 $I_0(T)$  は黒体放射の式から計算される放射強度に等しい。一般に、可視領域での透明体の温度測定では、この放射の飽和値と温度校正で得られた放射量を比較するか、あるいは放射強度の時間変化と(1)式のフィッティングによって温度を決定する。しかし放射に対して半透明な試料では、衝撃波面前の試料による放射吸収が起こるため、放射の飽和は見られず、発光の時間プロフィールは試料の吸光度に強く依存したものになる(Fig. 1-(b))。衝撃波面前の試料の吸収係数を  $a_U$  とすれば、

$$I(t, T) = I_0(T) [1 - \exp(-a_s x)]$$

$$\exp[-a_U(d - U_s t)] \quad (2)$$

となる。ただし  $d$  は試料の初期厚である。

赤外域で十分な発光強度を稼ぐためには数  $\mu\text{m}$  にわたる広い波長領域で測定を行う必要がある。従って、(2)式において各々のパラメータの波長依存性を考慮する必要がある、

$$I(t, T) = \int I_0(\lambda, T) [1 - \exp(-a_s(\lambda)x)]$$

$$\exp(-a_U(\lambda)(d - U_s t)) d\lambda \quad (3)$$

である。赤外域には分子振動や格子振動に起因する特性吸収が存在するため、放射吸収を考慮することは不可欠である。ここではフーリエ変換赤外吸収スペクトル測定装置(FTIR)を用いて、観測波長域における試料の赤外吸収スペクトルを測定し、試料の吸収係数に関する情報を得て、衝撃波の伝播に伴う放射吸収量の変化を見積もる際に利用する。

測定対象物質が放射に対して半透明体で、放射の飽和が起こらない場合には、放射の時間プロフィールを解釈する上で、光路にある光学系の分光透過率の情報が不可欠である。光学系(観測窓、ミラー、レンズ、フィルター等)の分光透過率  $T(\lambda)$  および検出器の分光感度  $S(\lambda)$  を考慮すると、(3)式は

$$I(t, T) = \int S(\lambda) T(\lambda) I_0(\lambda, T) [1 - \exp(-a_s(\lambda)x)]$$

$$\exp(-a_U(\lambda)(d - U_s t)) d\lambda \quad (4)$$

となる。

温度校正で得られる放射強度と出力電圧の関係をを用い、発光の時間変化の測定値と(4)式で得られる発光のモデル曲線の最小二乗法によって衝撃温度が決定できる。

## 3. 実験装置

衝撃実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。口径20mm

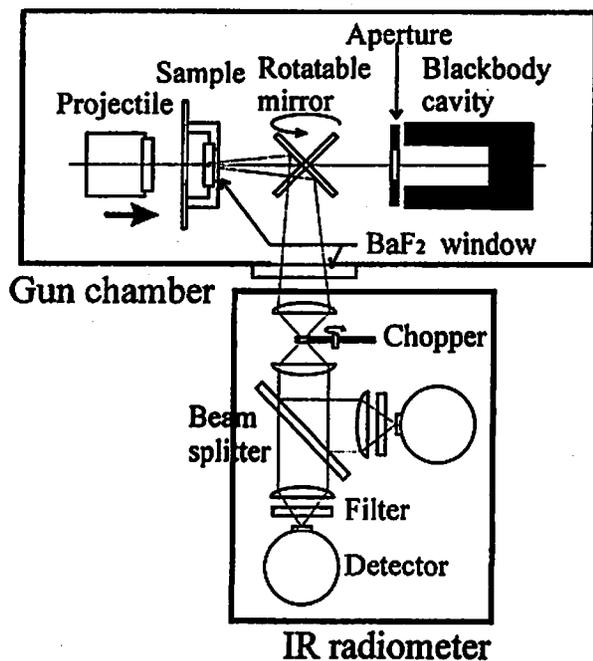


Fig. 2 The schematic of the experimental facilities for shock temperature measurement

の一段式火薬銃によって加速された飛翔体と試料(約3mm厚)との衝突によって試料内に衝撃波を伝播させ、試料を高圧力・高温状態に衝撃圧縮する。高温になった試料からの赤外放射は、試料セルに取り付けられた直径10mm、厚さ2mmのフッ化バリウムを通して取り出され、アルミニウム蒸着の表面鏡で反射された後、直径50mm、厚さ6mmのフッ化バリウムの窓を通してターゲットチャンバー外に導かれ、放射計に入射する。放射計に入射した光は口径38mmのジंकセレンレンズで集光された後、ビームスプリッターで2分割される。ビームスプリッターを用いることによって、各々の検出器が見る領域が等しくなり、放射の空間的不均一に伴う温度誤差を排除できる。赤外線検出器には100MHzの速度応答を持つ液体窒素冷却型HgCdTeフォトダイオード(素子サイズ $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ ,  $D^* = 2.5 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ )を2台使用し、干渉フィルターによって各々の検出器の測定波長域を $7.0 \sim 9.5 \mu\text{m}$ (ピーク透過率96.7%),  $9.0 \sim 12 \mu\text{m}$ (87.7%)に制限し、2色の測定を行う。検出器の出力はゲイン10倍のプリアンプ、40dBのアンプで増幅された後、オシロスコープで観測される。

放射温度計の温度校正は放射率 $0.99 \pm 0.02$ の黒体炉を用いて、 $500 \sim 1300 \text{ K}$ の範囲で100K毎に放射を観測することで行う。この際、黒体炉の開口部を試料セルに設置されたフッ化バリウム窓の開口面積と等しくすることで、検出器の受光素子にデフォーカスされる放射が温度校正に及ぼす影響をなくすることができる。黒

体炉からの放射は約20000rpmの回転チョッパーによって約20 $\mu$ 秒の矩形パルスに切り出される。黒体炉はターゲットチャンバー内に設置し、チャンバー内の反射鏡を180°回転させることのみで黒体炉と試料を見分けるようにして、温度校正と実験の差異を抑制している。この温度校正の作業は実験毎に行い、実験毎の光学系の変化(装置アライメント、反射鏡・フッ化バリウム観測窓の表面状態)が測定に及ぼす影響を排除している。

検出系の線形性は光学系の分光透過率と検出器の分光感度を考慮し、プランクの黒体放射の式から算出される放射強度と温度校正時の検出器の出力を比較することで確認した。線形性からのずれは各チャンネルとも2%以下である。

#### 4. 実験

製作した赤外放射温度計を用いて、四塩化炭素の衝撃温度測定を行った。液体試料では固体試料で起こりうる、結晶破壊に伴う温度分布の空間不均一や、圧力駆動板や窓材との界面からの放射が生じないと考えられるため、バルクの放射温度測定を行う点からは理想的である。更に、測定波長領域には四塩化炭素の特性吸収(7.98, 8.21, 9.03, 9.36, 9.94, 10.18 $\mu\text{m}$ 等を中心波長とした帯スペクトル)が存在するため、分子振動に起因する発光を観測することが可能である。過去に成された四塩化炭素の衝撃温度測定は可視・近赤外域の放射測定によって、1000K以上の温度領域で測定されている。また、熱力学の恒等式を衝撃圧縮曲線に沿って積分することで衝撃温度計算が行われ<sup>9)</sup>、可視・近赤外域の測定結果と矛盾しない計算結果が得られている。ここでは、赤外放射測定の結果と可視・近赤外放射測定の結果を比較すること、及び、測定温度領域を低温側へシフトさせることで赤外放射温度計の性能評価を行う。

##### 4.1 四塩化炭素の衝撃温度測定

Fig. 3は衝撃圧9.2GPaにおける四塩化炭素からの赤外発光の時間変化である。衝撃波が四塩化炭素に入射すると同時に発光が立ち上がり、約730nsec後にフッ化バリウム窓に衝撃波が入射している。その後の発光ピークは反射衝撃波によって、より高圧・高温になった四塩化炭素からの発光を表しているが、 $9.0 \sim 12 \mu\text{m}$ 帯では衝撃圧縮されたフッ化バリウムが失透するため、発光量は急激に落ちるものと解釈することができる。

衝撃波の伝播とともに発光量が増加傾向にあることは、発光部分の厚みが増加すること、衝撃波面前の試料の厚みが減少することによって発光吸収量が減少することの2つの効果による。衝撃圧縮下の試料の吸収

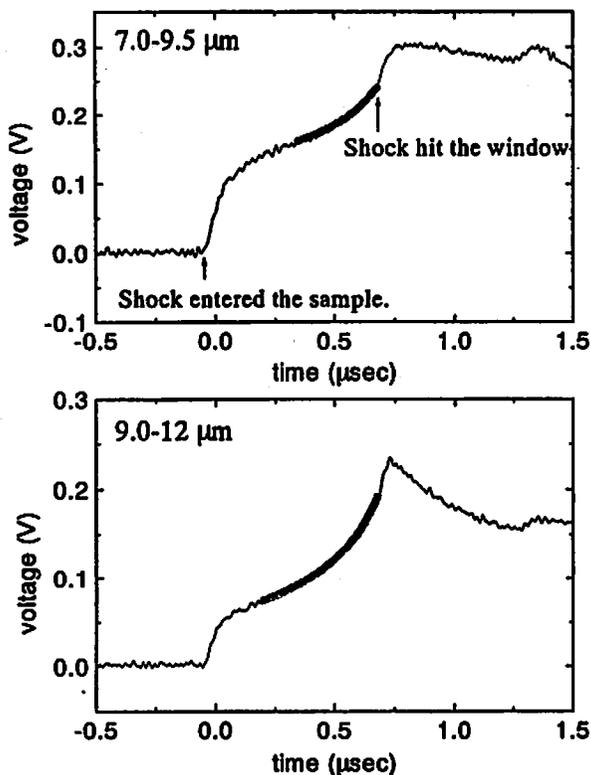


Fig. 3 Shock induced radiation from carbon tetrachloride at the shock pressure 9.2 GPa and least square fitting to the experimental data

係数に波長依存性がないと仮定し、測定データと(4)式の最小二乗法(Fig. 3では放射率が1に十分近くなる時刻以降について示してある)から衝撃温度を見積もると、 $1333 \pm 20\text{K}$ (7.0~9.5  $\mu\text{m}$ ),  $1336 \pm 20\text{K}$ (9.0~12  $\mu\text{m}$ )となる。

#### 4.2 衝撃波面の反射率測定

衝撃波面からの放射測定で温度を決定する際に不確定な要素として、衝撃波面の反射率がある。四塩化炭素では20 GPa以上の衝撃圧で、可視光に対する衝撃波面の反射率が約1%から20%程度まで急激に増加することが報告されている<sup>2)</sup>。よって、赤外光に対する反射率を測定するために、試料ホルダーの観測窓にゲルマニウムを用いた測定を行った。ゲルマニウムは2~12  $\mu\text{m}$ の赤外光に対して屈折率が約4でほぼ一定であり、四塩化炭素を試料とする場合、反射率は約46%になる。衝撃波面が赤外光に対して反射率を持つならば、四塩化炭素-ゲルマニウム窓の界面と衝撃波面との多重反射光が透過光に加算されることによって放射の時間プロフィールに影響を及ぼし、導出される衝撃温度に影響することが予想される。ゲルマニウムを窓として使用した実験の結果をフッ化バリウム窓の実験結果と比較すると、放射強度が窓の反射率分だけ減衰されたことを除いて、放射の時間プロフィールに変化

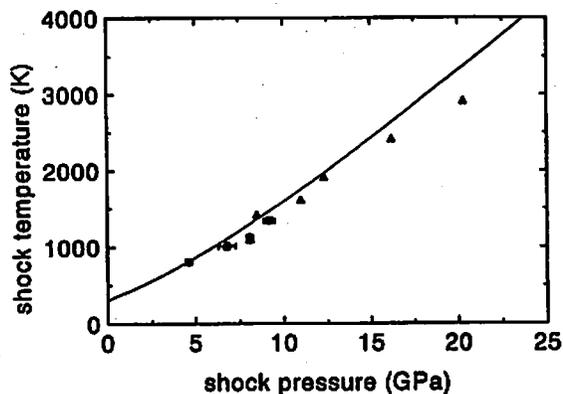


Fig. 4 Shock temperature of carbon tetrachloride (circle : 7.0-9.5  $\mu\text{m}$ , square : 9.0-12  $\mu\text{m}$ , triangle : Voskoboinikov et al., line : Cowperthwaite et al.)

Table 1 Shock temperature of carbon tetrachloride measured with wide-band IR radiometer below 10 GPa

Shock pressure (GPa)	Shock temperature (K)	
	7.0-9.5 $\mu\text{m}$	9.0-12 $\mu\text{m}$
$4.6 \pm 0.2$	$790 \pm 20$	$797 \pm 20$
$6.8 \pm 0.5$	$1019 \pm 30$	$1003 \pm 30$
$8.1 \pm 0.2$	$1125 \pm 40$	$1090 \pm 40$
$9.2 \pm 0.3$	$1333 \pm 20$	$1336 \pm 20$

はなく、導出される衝撃温度に変化はなかった。以上のことから、10 GPa程度の衝撃圧では衝撃波面での反射は無視できるレベルであると結論した。

#### 4.3 可視・近赤外域との比較

Fig. 4に赤外放射温度計を用いて測定した四塩化炭素の衝撃温度をVoskoboinikov<sup>8)</sup>らの可視・近赤外域の輝度温度測定値、及び、Cowperthwaite<sup>9)</sup>らの計算温度とともに示す。2色の各々のチャンネルから得られる衝撃温度は誤差の範囲内で一致している(Table 1)。赤外測定の結果は可視・近赤外での測定値ともほぼ良い一致を見せているが、計算温度よりも若干低い。また、赤外光測定が1000Kを下回る低温域の衝撃温度測定に有効であることを示している。試料からの放射が黒体放射であると仮定するとき、500 Kでは7.0~9.5  $\mu\text{m}$ のチャンネルで出力電圧20mV(9.0~12  $\mu\text{m}$ では25mV)、検出器-アンプ系を含めたノイズレベル5mV(3mV)で、S/N比は4(8)程度となり、温度測定可能な下限であると考えている。

#### 5. おわりに

ここでは赤外領域の放射温度計について述べたが、今後の方針としては可視・近赤外から赤外域にわたる

広範囲の放射の観測を行い、放射の波長依存性に関する情報を得たいと考えている。四塩化炭素の衝撃温度測定では可視・近赤外域の測定結果との差異は認められなかった。しかし、アルカリハライドなどの脆性物質では転位での電子遷移に伴う発光が可視域を占めていると考えられているため、赤外吸収帯およびその近傍の発光を観測することで格子振動に起因する発光を捕らえることが可能になり、可視域とは異なる温度測定結果が得られると考えている。近年では、衝撃圧縮下のラマン散乱を観測することが試みられており<sup>10)</sup>、観測手段の多様化が進んでいる。放射測定においても従来の可視域に偏った測定にとどまらず、紫外から赤外にわたる測定によって現象の多角的な理解が進むであらう。

#### 謝 辞

本研究は科学技術振興事業団・戦略的基礎研究プロジェクト「衝撃波面形成過程と新化学反応プロセス」の一環として行われたものである。

#### 文 献

1) Y. Zel'dovich, S. Kormer, M. Sinitsyn, and

- A. Kuriapin, Sov. Phys. Doklady., 3, 938(1958)  
2) S. Kormer, Sov. Phys. Uspekhi., 11, 229(1968)  
3) K. Kondo and T. Ahrens, Phys. Chem. Minerals., 9, 173(1983)  
4) K. Kondo, T. Ahrens, and A. Sawaoka, J. Appl. Phys., 54, 4382(1983)  
5) P. Brannon, R. Morris, and J. Asay, J. Appl. Phys., 57, 1676(1985)  
6) W. Von Holle and R. McWilliams, Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng., 366, 19(1983)  
7) W. Von Holle and R. McWilliams, Rev. Sci. Instrum., 54, 1218(1983)  
8) I. Voskoboinikov, V. Bogomolov, A. Afanasenkov, and V. Shevelev, Sov. Phys. Doklady., 13, 1026(1968)  
9) M. Cowperthwaite and R. Shaw, J. Chem. Phys., 53, 555(1970)  
10) G. Pangilinan and Y. Gupta, J. Appl. Phys., 81, 6662(1997)

## Development of the wide-band IR radiometer and its application to the shock temperature measurement

by Toshiyuki OGURA\*, Oleg V. FAT'YANOV\*\*, Malcolm F. NICOL\*\*\*  
and Ken-ichi KONDO\*\*\*\*

An infrared radiometer for the shock temperature measurement was developed. The wavelength range to be observed from 7 to 12  $\mu\text{m}$  was divided into two regions (7 to 9.5  $\mu\text{m}$  and 9 to 12  $\mu\text{m}$ ) by interference filters, and two detectors of HgCdTe photo-voltaic type photodiodes which have 10-ns time resolution were employed to detect IR radiation from shock loaded objective. The system can provide accurate continuous shock-temperatures because of excluding the influence of luminescence which super-imposed into thermal radiation in the visible and near-IR region. Absorption coefficient of semitransparent sample was measured by FTIR spectrometer in the IR region in order to analyze time profile of the IR emission from shocked material. The shock temperature measurements of carbon tetrachloride were conducted below 10 GPa, and the results were consistent with those in the visible and near-IR region measured by former researchers. It is confirmed that relatively moderate shock temperatures lower than 1000 K can be measured by this system.

(\*Graduated school, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta 4259,  
Midori, Yokohama 226-8503, Japan

\*\*Japan Science and Technology Corporation, 4-1-3 Hon-machi,  
Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

\*\*\*Department of Chemistry and Biochemistry, UCLA, 607 Circle Drive  
South, Los Angeles, USA

\*\*\*\*Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technol-  
ogy, Nagatsuta 4259, Midori, Yokohama 226-8503, Japan)

---