

# 高精度な製品寿命予測に向けた GaN-HEMT チャンネル温度測定技術

High-Accuracy Product Life Estimation of GaN-HEMT by  $\mu$ -Raman and Numerical Simulation

米村 卓巳\*  
Takumi Yonemura

古川 将人  
Masato Furukawa

水野 慎也  
Shinya Mizuno

松川 真治  
Shinji Matsukawa

塩崎 学  
Manabu Shiozaki

並川 靖生  
Yasuo Namikawa

携帯電話基地局や衛星通信に向けた高効率・高周波動作 GaN-HEMT<sup>\*1</sup>では性能の長期信頼性保証が特に重要であり、製品寿命を予測するにはデバイス動作下でゲート電極直下の長さ0.2  $\mu\text{m}$ 程のチャンネル層の温度 ( $T_{\text{ch}}$ ) を測定する必要がある。これまでは赤外顕微鏡による測定を行っていたが空間分解能が4  $\mu\text{m}$ であり温度分布が平均化され正しく測定できなかった。そこで空間分解能が0.8  $\mu\text{m}$ のラマン分光を活用した $T_{\text{ch}}$ 測定法を開発した。測定精度の把握と向上のための試料構造最適化とデータ補正法を検討し、測定精度が5°Cの測定技術を確立した。既存製品の製品寿命を試算したところ、同じ $T_{\text{ch}}$ で比較すると予測値が1桁長くなることを確認した。

High-efficiency and high-frequency GaN-HEMTs (gallium-nitride high-electron-mobility transistors) for satellites and mobile phone base stations need to assure long-term reliability. The life time of these products is estimated based on the temperature of the channel layer ( $T_{\text{ch}}$ ), with a channel length of approximately 0.2  $\mu\text{m}$ , located under the gate electrode. However, the current measurement method using an infrared microscope with a spatial resolution of 4  $\mu\text{m}$  is insufficient to obtain the  $T_{\text{ch}}$  precisely. We have developed a high-accuracy estimation method that uses  $\mu$ -Raman spectroscopy with a spatial resolution of 0.8  $\mu\text{m}$ , and achieved an accuracy of  $\pm 5$  degrees C by the optimization of sample structures for  $\mu$ -Raman spectroscopy and careful calibration. It was confirmed that the life time of our existing products estimated by this method is 20 times longer than that by the infrared microscope measurement.

キーワード：GaN-HEMT、チャンネル温度、製品寿命、ラマン分光、数値解析

## 1. 緒言

ワイドギャップ半導体である窒化ガリウム（以下、GaN）を用いた半導体デバイスは、高効率・高周波動作の無線通信機器などの実現に繋がり、高速化・大容量化する情報化社会を支えるキーデバイスである。当社も携帯電話基地局や通信衛星などに向けて、数GHz～80GHzの広い帯域でGaN系高電子移動度トランジスタ（以下、GaN-HEMT<sup>\*1</sup>）を開発／製造している。

本用途では最終製品に組み込まれた後での部品交換が容易ではないため性能の長期信頼性に対する要求が特に厳しくなっている。従来は、赤外顕微鏡で観察したデバイス動作中の表面温度をチャンネル温度 $T_{\text{ch}}$ と定義して製品寿命を算出してきた。しかし、製品寿命を高精度に予測するには半導体内部の局所的な高温部の温度を $T_{\text{ch}}$ として計測する必要があり、近年、 $T_{\text{ch}}$ 測定方法として $\mu\text{m}$ レベルの空間分解能を持つラマン分光<sup>\*2</sup>や数値解析による手法が検討されている<sup>(1)~(3)</sup>。しかし、得られた結果の計測精度に関して議論した報告はほとんど確認できない。

そこで今回、ラマン分光と数値解析を併用した $T_{\text{ch}}$ 測定の精度把握および精度向上のための独自の試料構造やデータ補正法を検討し、空間分解能が0.8  $\mu\text{m}$ 、測定精度が5°C以下の $T_{\text{ch}}$ 測定技術を確立したので報告する。

## 2. GaN-HEMTの動作原理と製品寿命

### 2-1 動作原理

一般的にGaN-HEMTは、図1に示すようにSiC基板上にGaN、AlGaInをエピタキシャル成長したHEMT構造を有する。GaN/AlGaIn界面近傍には高移動度の2次元電子ガス層（以下、2DEG (Two Dimensional Electron Gas)）が誘起され、ソース電極（以下、S電極）とドレイン電極（以下、D電極）の間に電圧を印加すると2DEGを介して電流が流れる。電流量はゲート電極（以下、G電極）に電圧を印加しチャンネル層を形成することで制御される。

### 2-2 製品寿命の予測方法と課題

デバイス動作中はG電極直下のGaN層における長さ0.2  $\mu\text{m}$ 程の領域の温度が局所的に上昇すると考えられ、この

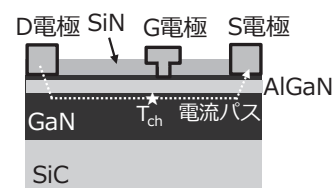


図1 GaN-HEMTの概略図

高温部の温度を精度よく計測する必要がある(図1中★印の $T_{ch}$ )。これまでの赤外顕微鏡を用いた方法では空間分解能が $4\ \mu\text{m}$ であるためD電極-S電極間の温度が平均されることに加え<sup>(4)</sup>、得られる温度はSiNや電極などの異種材料の影響を含む。また、電極に覆われた部分の測定も困難であるためにG電極直下の高温部を測定できていなかった。そこで $0.8\ \mu\text{m}$ の空間分解能を有しGaN層の温度を選択的に抽出できるラマン分光と電極に覆われた部分の温度分布予測ができる数値解析を併用した手法を検討した。

### 3. 計測技術の確立と定量精度の向上

#### 3-1 $T_{ch}$ 温度算出方法の概要

ラマン分光での温度測定では、試料にレーザーを照射した際に分子振動と相互作用することで発生するラマン散乱光の振動数を利用する。レーザー光の強度分布はガウシアンであるのでビーム径 $0.8\ \mu\text{m}$ のレーザー光の全てが測定領域に照射されている条件下では照射中心位置の温度に対応した振動数をもつラマン散乱光の強度が最大となる。つまり、 $0.8\ \mu\text{m}$ の照射範囲の平均温度ではなく照射中心位置の温度を測定することができる。そこで図2に示すようにG電極-D電極間の中央の位置 $R_{cen}$ ではSiN膜を透過させてGaNの温度をラマン分光で測定した(以下、 $T_{Ra}(R_{cen})$ )。一方、電極端部や完全に電極に覆われている部分は入射レーザー光が電極に遮られラマン測定が困難であるので、数値解析によって温度分布を計算した。具体的には、位置 $R_{cen}$ の温度とG電極直下端部の位置 $R_G$ の温度の差分を計算した(以下、 $\Delta T_{CAE}$ )。最後に $T_{Ra}(R_{cen})$ に $\Delta T_{CAE}$ 加えることで $T_{ch}(=T_{Ra}(R_{cen}) + \Delta T_{CAE})$ を求めた。

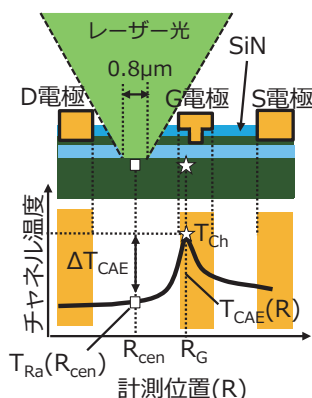


図2  $T_{ch}$ 算出方法

#### 3-2 ラマン分光による温度測定精度の改善

##### (1) ラマン分光による温度測定法の概要

試料温度や分極状態が変化するとラマン散乱光の振動数

が変化する<sup>(2),(5)</sup>。デバイス動作下での温度測定では、D電極-S電極間に電圧を印加し分極状態をデバイス動作中と同じにして振動数と試料温度の関係式(=検量線)を求めることで、電圧印加に伴う逆ピエゾ効果<sup>\*3</sup>による振動数の変化を予め取り込んだ検量線を作成し、この検量線を用いてデバイス動作中の温度を測定した。

##### (2) 測定系と測定試料

図3に測定系の概略図を示す。ラマン測定はJobinYvon社製のHR-800を用いた。ラマン分光の測定条件は、入射レーザー:YAG 532 nm、ピンホール径:100  $\mu\text{m}$ 、照射強度:5mW、対物レンズ:長焦点100倍(開口数0.6)である。この条件下における空間分解能はInP(Indium Phosphide)劈開面を用いたナイフエッジ法<sup>\*4</sup>により $0.8\ \mu\text{m}$ であることを確認した。

GaN-HEMTチップはパッケージ化されており、その両端を図4に示すようにネジで固定した。また、信頼性試験では、チップ外縁部より2 mm外側の位置に固定した熱電対で測定される温度をチップ温度(= $T_b$ )と定義している。本実験においても同一方法で測定した温度を $T_b$ と定義し、ステージと治具の間に挟んだペルチエ素子によって $50^\circ\text{C}$ ~ $100^\circ\text{C}$ の範囲で任意に $T_b$ を調整した。

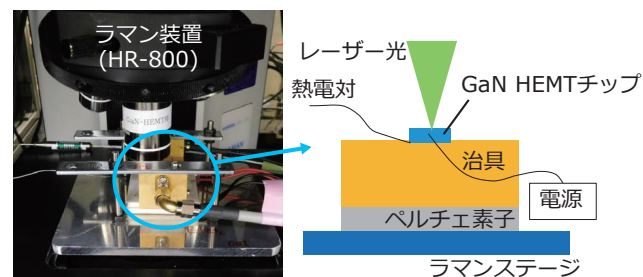


図3 測定系の概略図

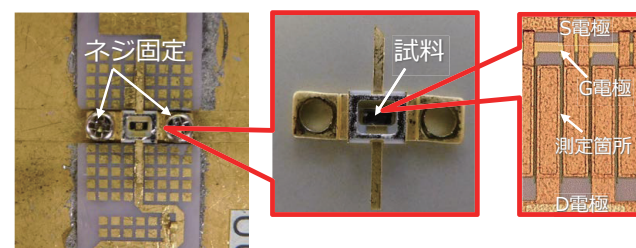


図4 GaN-HEMTチップ固定方法とチップ拡大図

本論文用にG電極とD電極の距離 $L_{gd}$ が異なる2種類の試料(A: $L_{gd}=2\ \mu\text{m}$ 、B: $L_{gd}=5\ \mu\text{m}$ )を作製した。ラマン測定を実施するために、D電極とS電極の配線が入射レーザー光を妨害しないように対物レンズの開口数を考慮して

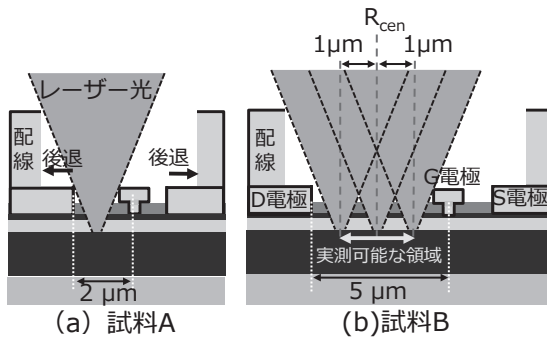


図5 測定試料の電極構造とレーザー光の関係

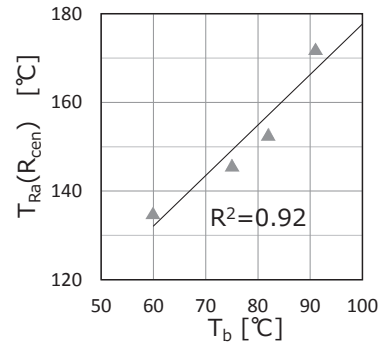


図6 チップ温度 ( $T_b$ ) とラマン実測値 ( $T_{Ra}$ ) の相関関係

配線を図5のように後退させた。電極後退による温度測定への影響は後述の数値解析により $1^{\circ}\text{C}$ 以下である。

試料Aでは $L_{gd}$ が狭いためラマンで実測可能なのはG電極とD電極の中央の1点だが、試料Bでは $L_{gd}$ が広い $R_{cen}$   $\pm 1 \mu\text{m}$ の領域の温度分布を実測できる。実測値と数値解析値を比較検証し、数値解析モデルのパラメータを最適化することで $L_{gd}$ 可変の数値解析モデルを作成することにした。なお、ラマン実測時のバイアス条件は $V_{ds} = 26 \text{ V}$ 、 $I_{ds} = 150 \text{ mA}$ とした。

### (3) 定量精度の把握と改善

測定値の精度把握のために、変動要因を抽出し要因毎に精度を検証した。変動要因は以下に示す4つに分類された。

1. 熱電対の接触バラつきによる温度測定値の変動
2. 試料と治具の取り付けバラつきによる変動
3. 外部環境による測定値の変動 (日内/日間変動)
4. 装置が元々持っている測定バラつき (再現性)

上記の1~4に対して表1に示す検証を実施した結果、各要因由来の測定誤差の合計は約 $25^{\circ}\text{C}$ であり、表1中の4項に該当する装置本来の測定誤差 ( $4^{\circ}\text{C}$ ) より明らかに大きいことを確認した。この測定誤差に対して我々はキャリブレーションによる低減を行った。具体的には、試料Aを測定する直前に検量線作成時の条件でラマン測定を実施し、検量線とのズレ量 $\Delta$ を算出する。その後、デバイス動作条件下での測定を行い得られた測定値を $\Delta$ で補正した。図6は $T_b$ と $T_{Ra}$  ( $R_{cen}$ ) の関係である。線形近似の結果、相関係数 $R^2$ は0.92と高く比例関係を示している。このとき、 $T_{Ra}$  ( $R_{cen}$ ) の測定誤差は $5^{\circ}\text{C}$ に抑えられることを確認した。

表1 ラマン測定の変動要因と検証内容

変動要因	検証内容	変動量
1 熱電対接触バラつき	熱電対を繰り返し取り付け変動量を調査	$1^{\circ}\text{C}$
2 試料取り付け変動	試料を繰り返し取り付け変動量を調査	$10^{\circ}\text{C}$
3 外部環境による変動	試料を取り外すことなく複数タイミング (朝、夕、日毎) で測定し変動量を調査	$10^{\circ}\text{C}$
4 繰り返し再現性	同一場所の繰り返し測定で変動量を調査	$4^{\circ}\text{C}$

表2 計算に使用した熱伝導率

材料	熱伝導率 [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
SiC	5.2
GaN	1.3
AlGaN	0.19
SiN	0.185

### 3-3 数値解析によるデバイス内温度分布の予測

#### (1) 温度分布への影響の大きいパラメータの抽出

デバイスの温度分布の解析には市販のデバイスシミュレータ (SILVACO、ALTAS) を用いた<sup>(6)</sup>。本ツールでは電界分布、キャリア輸送、自己発熱等を考慮した解析により、デバイス内部の詳細な温度分布を得ることができる。

デバイスシミュレーションは、移動度、バンドギャップ、電子親和力など多くの物性値を必要とする。しかし、これらの物性値はデバイスの電気特性には影響するが、デバイス内部の発熱量が $V_{ds}$ と $I_{ds}$ の積で規定される本条件下では、温度分布への影響は無視できることを確認した。

熱伝導率は温度分布に影響し、文献等<sup>(7)~(12)</sup>で報告されている熱伝導率の値には20%程度の幅があるため、主な構成材料であるSiC (Silicon Carbide)、GaN、AlGaN、SiN (Silicon Nitride) の熱伝導率をそれぞれ $\pm 20\%$ 変動させ、 $\Delta T_{CAE}$ への影響を検証した。その結果、SiC、AlGaN、SiNの熱伝導率の影響は $0.5^{\circ}\text{C}$ 以下であるのに対し、GaNの熱伝導率の影響は $3^{\circ}\text{C}$ と、他に比べ大きい。そこで、我々はGaNの熱伝導率を合わせ込みパラメータとし、文献値の中から、実測と最もよく合う値を選定することとした。

#### (2) ラマン測定との比較とGaN熱伝導率の決定

試料Bを用いてラマン分光と数値解析の温度勾配の比較から、GaNの熱伝導率を $1.3 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ と決定した。このとき、測定治具からチップ裏面までは解析領域には含めず、別途、3次元有限要素法解析で求めた熱抵抗 $7.9 \text{ K}/\text{W}$ を境界条件として与えた。熱伝導率については使用した値を表2にまとめた。

得られた温度分布を図7に示す。D電極側のG電極直下端部に最高温度部がある。図8では、G電極中央からの距離を横軸にとり、縦軸に数値解析で求めた2DEGの温度をプロットし、実測可能な領域（1.8~3.8 μm）でのラマン測定結果と数値計算結果の温度勾配を比較した。両者で温度勾配がほぼ一致していることが確認できる。

次節では、本法を用いてラマン測定点 $R_{cen}$ から2DEGの最高温度部との温度差 $\Delta T_{CAE}$ を見積もる。

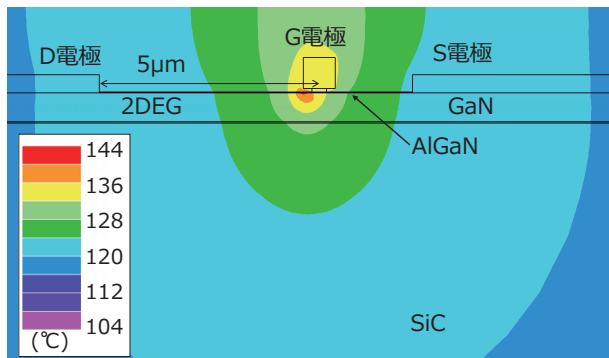


図7 試料Bの温度分布の数値解析結果

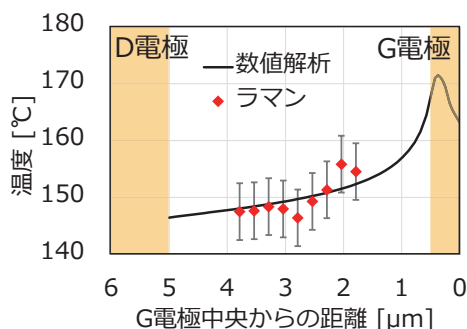


図8 ラマン測定と数値計算の温度勾配の比較

#### 4. 結果と考察

上記結果に基づき動作温度である200℃での考察を以下に行う。図9は本法および赤外顕微鏡による方法で得られた試料Aの $T_{ch}$ 測定結果の比較である。本法で $T_{ch}$ が200℃のとき、赤外顕微鏡では165℃であり、35℃低かった。赤外顕微鏡では $T_{ch}$ 近傍の温度分布が平均化されて低く見積もられたことが主要因と考えられる。

図10中の破線は既存製品の $T_{ch}$ と製品寿命の関係である。製品寿命は平均故障時間 (MTTF) で表している。図9に示した本法と赤外顕微鏡で得られる $T_{ch}$ の差分を使って、本法の $T_{ch}$ における製品寿命を試算した結果も掲載した (図10中の実線)。 $T_{ch}$ が200℃におけるMTTFは、赤外

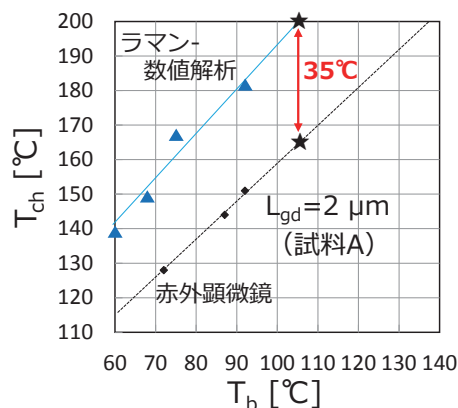


図9 ラマン-数値解析と従来法の $T_{ch}$ 測定結果

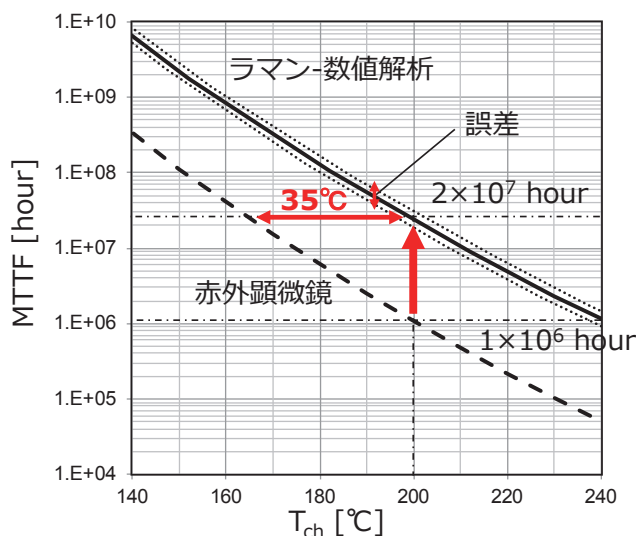


図10 ラマン-数値解析による寿命算出結果

顕微鏡の結果を用いると $1 \times 10^6$ 時間であるが、本法での試算結果は $2 \times 10^7$ 時間となり、本法を用いることで既存製品の寿命の予測値が1桁長くなることを確認した。

#### 5. 結 言

ラマン分光と数値解析を併用した $T_{ch}$ 測定法を当社製品に適用するために、測定精度の把握および精度向上のための試料構造最適化やデータ補正方法を検討し、空間分解能が0.8 μm、測定精度が5℃の $T_{ch}$ 測定技術を確認した。既存製品の寿命を試算したところ、同じ $T_{ch}$ で比較すると製品寿命の予測値が赤外顕微鏡による方法よりも1桁長くなることを確認した。



## 6. 謝 辞

本研究の遂行にあたっては、住友電工デバイス・イノベーション(株)の黒田滋技師長、清水聡部長より多くのご助言を賜りました。

### 用語集

#### ※1 GaN-HEMT

Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor の略。高移動度な2次元電子ガス (2DEG) をチャンネルとした電界効果トランジスタ。

#### ※2 ラマン分光

単色光レーザーを試料に照射すると分子振動と相互作用し非弾性散乱光 (=ラマン散乱光) を生じる。この散乱光を分光してスペクトルを得る。このスペクトルを解析することで、化合物の同定、歪、温度などを非破壊で評価できる。

#### ※3 逆ピエゾ効果

極性を持つ材料に対して電場を印加した際に生じる歪み現象。

#### ※4 ナイフエッジ法

レーザー光の光軸に対して垂直方向に直線エッジを有する遮へい物を移動させたときのレーザー強度の変化からビーム径を求める手法。

### 参考文献

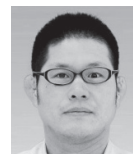
- (1) Y. Ohno, M. Akita, S. Kishimoto, K. Maezawa, and T. Mizutani, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, 452-454 (2002)
- (2) T. Batten, J. W. Pomeroy, M. J. Uren, T. Martin, and M. Kuball, *J. Appl. Phys.*, 106, 094509 (2009)
- (3) 小坂賢一、藤島辰也、井上薫、檜木啓宏、山田明幸、土屋忠蔵、城川潤二郎、神谷慎一、鈴木彰、荒木努、名西徳之、信学技報、LQE2006-63 (2006)
- (4) M. Kuball, A. Sarua, H. Ji, M. J. Uren, R. S. Balmer, and T. Martin, *2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest.*, vol. 4 of 5, 1339-1342 (2006)
- (5) K. R. Bagnall, C. E. Dreyer, D. Vanderbilt, and E. N. Wang, *J. Appl. Phys.*, 120, 155104 (2016)
- (6) Atlas User's Manual, Silvaco, Inc. (2016)
- (7) A. Darwish, A. J. Bayba, and H. A. Hung, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 3, pp. 840-846 (Mar. 2015)
- (8) J. C. Freeman and W. Mueller, *NASA/TM-2008-215444*
- (9) K. R. Bagnall, *MIT Thesis*, Massachusetts Institute of Technology (2013)
- (10) B. Raj and S. Bindra, *International Journal of Computer Applications*, vol. 75, no. 18 (2013)
- (11) J. Piprek, *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*, pp.141-144, Academic Press (2003)
- (12) W. Liu and A. A. Balandin, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 22 (2004)

### 執筆者

米村 卓巳\* : 解析技術研究センター



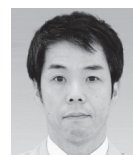
古川 将人 : 解析技術研究センター 主席



水野 慎也 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 電子デバイス事業部



松川 真治 : 解析技術研究センター グループ長



塩崎 学 : 解析技術研究センター 主幹



並川 靖生 : 解析技術研究センター 部長 工学博士



\*主執筆者