

2021年2月26日

最終講義

結晶成長における実験と数値解析の魅力 —結晶成長学の理想を追って—

柿本 浩一

九州大学 応用力学研究所



研究室メンバー

九州大学 応用力学研究所 2001-2020

橋本 良夫	助教授→高専教授
寒川 義裕	准教授→教授
石井 秀夫	助手
劉 立軍	研究員→西安交通大教授
松尾 有里子	研究員
陳 雪江	研究員→西安交通大准教授
高 冰	特任准教授→武漢大教授
池田 和磨	研究員
川野 潤	特任助教→北大准教授
李 維東	研究員→武漢大教授
バレンシア ユペルト	研究員→名大研究員
劉 鑑	研究員→名大研究員
田代 昭正	技官
篠崎 高茂	技官
中野 智	技官→博士
山田 美希	秘書
大坪 潤子	秘書
ニエ リング・リング	秘書
平田 紀子	秘書
原田 博文	研究員201804.01特任教授
宮村 佳児	研究員201904.01特任准教授
モエ ジョマ	訪問研究員
HAN XUEFENG	研究員→アルプ大研究員
Tomasz KEMPISTY	訪問研究員
毛利 奈緒美	秘書

NEC 基礎研究所 1985-1996

江口 実	NEC研究員
中村 新	主任研究員
渡辺 久夫	研究員
日比谷 孟俊	主幹研究員
Kyung-Woo Yi	研究員(ソウル大・教授)
渡邊 匡人	研究員

九州大学 機能物質科学研究所 1996-2001、熱、環境エネルギー工学専攻

尾添 紘之	機能物質科学研究所・教授
今石 宣之	機能物質科学研究所・教授
赤松 正人	博士
福井英人	修士
Yoo Cheol WON	博士
菊地 晋	修士
末永英俊	修士
梅原 猛	修士
森友 武	修士
上村 昌己	修士
野口 慎一郎	修士
王 育人	研究員(中国科学院・教授)

学生:修士7名
博士2名



研究室メンバー

九州大学 応用力学研究所、航空宇宙工学専攻2001-2020

北嶋 具教	博士
斎藤 敏克	修士
末松 譲	修士
土橋 健太郎	修士
村川 淳	修士
近藤 直樹	修士
原田 信一	修士
井上	修士
河村 貴宏	修士→博士
堀川 貢弘	社会人博士
桜場 茂圭	修士
米田 大悟	修士
柏木 大輔	修士
勝谷 匠博	修士
高橋 奈菜子	修士
堀 大輔	修士
R. Bairava Ganesh	研究生
松尾 整	博士
宮澤 宏章	修士
脇川 達人	修士
長野 利彦	修士
久松 翔	修士→博士
屋山 巴	修士→博士
上之 康一郎	社会人博士

乾 史憲	修士
井上 仁人	修士→博士
白桃 拓哉	修士
土岐 隆太郎	修士
井上 真翔	修士
末次 弘茂	修士
中庭 好崇	修士
濱田 達郎	修士
荒木 清道	修士
住吉 央朗	修士
草場 彰	修士→博士
宮崎 和真	修士
横山竜介	社会人博士
田村 卓也	修士
福島 航	修士
井手 智朗	修士
稻富 悠也	修士
間地 雄大	修士
宮崎 聖	修士
山本 悟司	修士
村上 大祐	修士
宮田 賢大	修士
中野 智	博士

学生:修士40名, 博士10名



学会、共同研究

学会

- 日本結晶成長学会（ポラリス）
- 応用物理学会（事務局）
- 国際結晶成長機構（IOCG）
- 日本学術会議
- 日本学術振興会,他

共同研究

- 北大、東北大、新潟大、山梨大、東大、東工大、早稲田大、慶應大、明治大、名古屋大、豊田工大、阪大、阪府大、三重大、九工大、佐賀大、宮崎大、他
- AIST, NIMS, JAXA, KEK, NPARC-J, SPring-8, 他
- カトリック大, Grenoble大, 西安交通大, IKZ, SINTEF, Minnesota大, Lisbon大, Anna大、他
- 民間企業 33社

研究費

- JSPS, NEDO, 他



受賞

- 平成31年度科学技術分野 文部科学大臣表彰 科学技術賞
(研究部門) 受賞(2019.04)



- ドイツ結晶成長学会名誉会員第1号選出(2020.03)
- 応用物理学会フェローに選出(2017.09)
- 日本結晶成長学会論文賞受賞(1988.08)、他

研究に対するモットー

- 長く評価される研究成果の創出する。
- 実験も計算も既製品をそのまま使用しない。

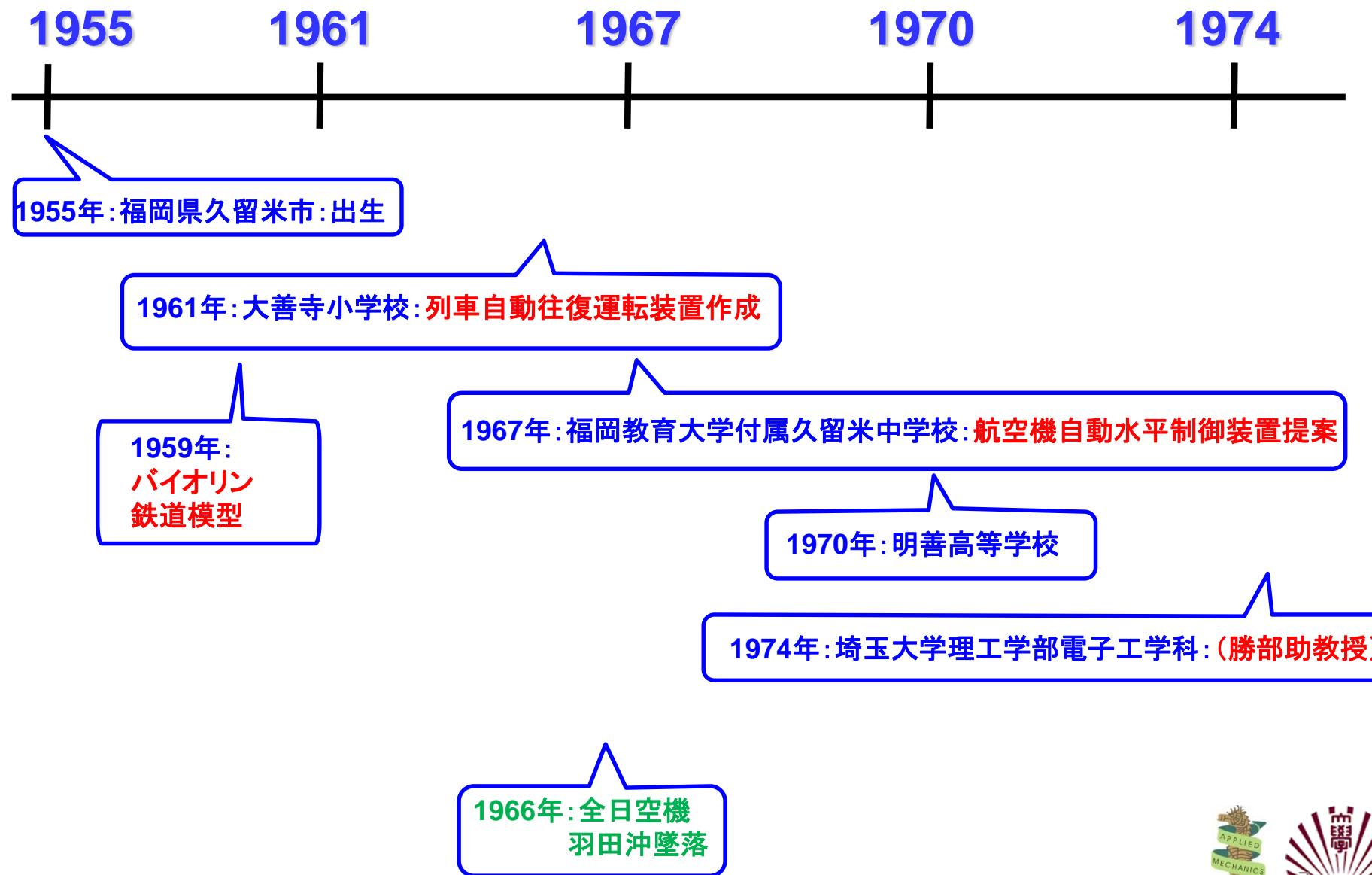
実験装置も計算コードもすべて自作する。

- 現象の表現は数式と図で具現化する。
- 数値解析は予測が使命。2つ以上の物理量の定量予測する。
- 研究に対して誠実に取り組む。
- 楽しく研究する。研究が好きになる。
- 結晶成長学の理想は、現象を定量的に予測する。
- 自分以外の社会のためになることを行う。

子、孫、ひ孫が笑って安全に暮らせるように。



研究歴



研究歴

1980

1985

1990

1995

2000

東京大学工学系研究科修士課程(河東田助教授)

工学博士:
レーザラマン
分光法による、
混晶半導体における
原子配列の不規則性と
原子間結合の評価に関する
研究

東京大学工学系研究科博士課程(河東田助教授)
InGaAsや
GaP/Siのクロライド成長

結晶成長:
初講義(西永頌教授)
応物初発表
DLTS:(勝部助教授、
生駒教授)

NEC基礎研究所半導体研究部:
メルトサイエンス(渡辺久恒、
日比谷孟俊、
中村新、渡辺
久夫、江口実、
渡邊匡人)



研究歴

応物初発表: 1980年3月山梨大学: DLTS用ゲート回路図と
Si-MOSダイオード界面における電子捕獲断面積

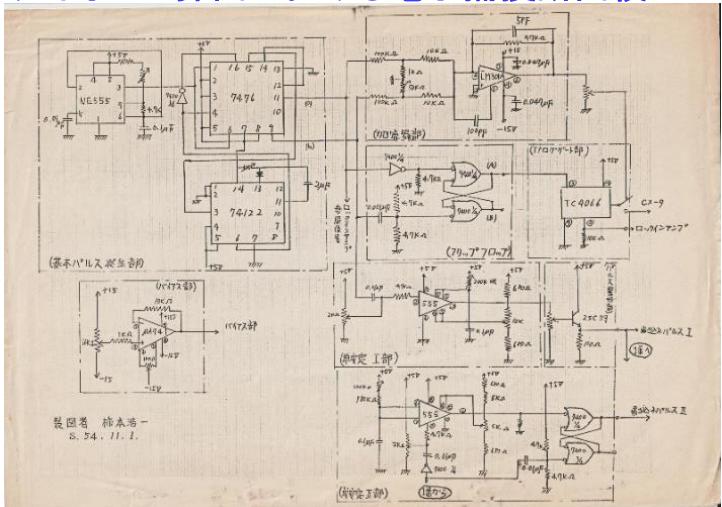


図1. 基本回路
S. 54, 11, 1.

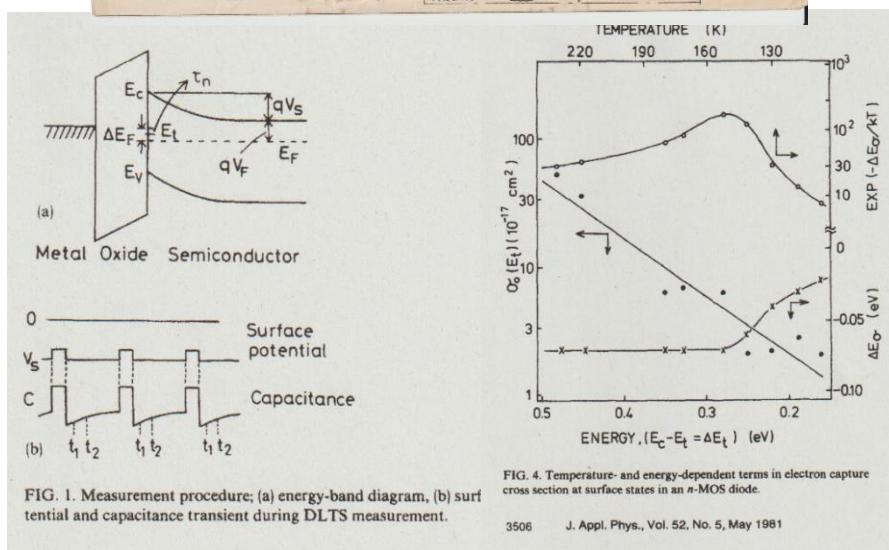
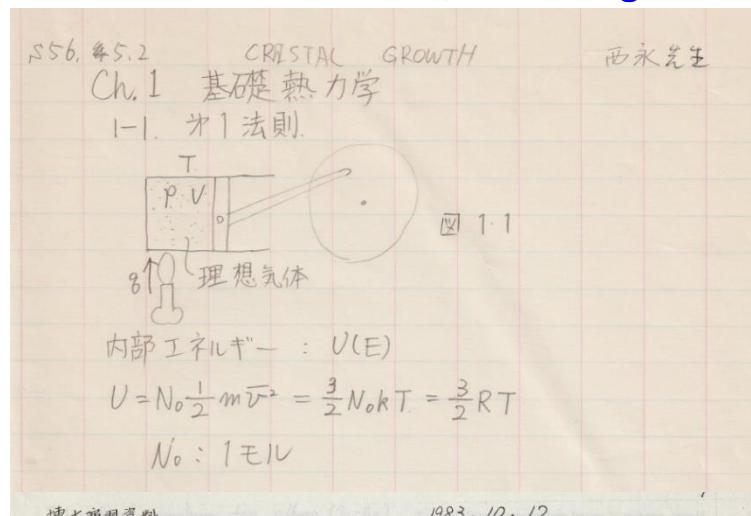


FIG. 4. Temperature- and energy-dependent terms in electron capture cross section at surface states in an n-MOS diode.

3506 J. Appl. Phys., Vol. 52, No. 5, May 1981

T. Katsume, K. Kakimoto, T. Ikoma,
J. Appl. Phys. 52 (1981) 3504.

結晶成長: 初講義(西永頌教授),
J. A. van Vechten, L. Pauling



博士演習資料 1983, 10, 12

西永教授担当

河東田研 D2

7561 布本 浩一

Quantum Dielectric Theory of Electronegativity in Covalent Systems. III. Pressure - Temperature Phase Diagrams, Heats of Mixing, and Distribution Coefficients
Phys. Rev. 7 1479 (1973).

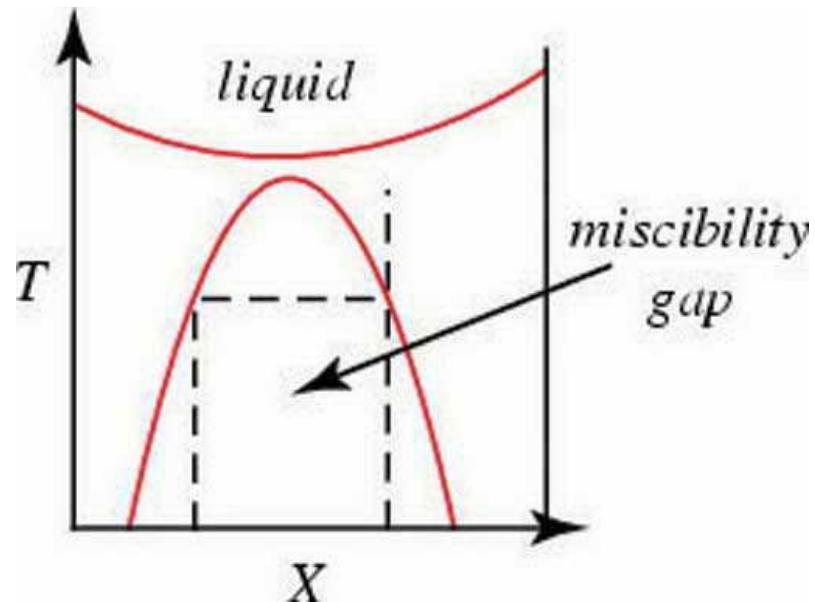
Mulliken ⇒ 各元素ごとの電気陰性度を用いた。
Phillips ⇒ 結合した状態での電気陰性度を用いた。 (advantageous)
"bond additivity" を仮定して熱力学的係数を予測した。

"bond additivity" とは?

系全体のエネルギーは最近接原子間のボンドエネルギーの総和に等しい

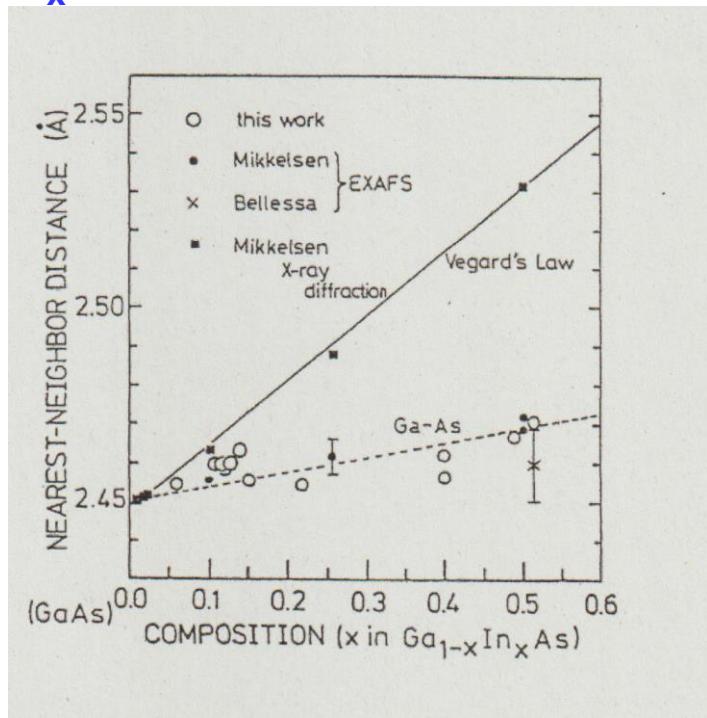


博士論文: 混晶半導体の局所構造と熱力学



Miscibility Gap

Ga_{1-x}In_xAsの結合長: EXAFSとの比較



H=U+pV: Enthalpy

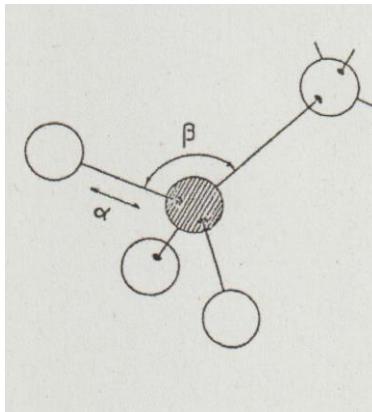
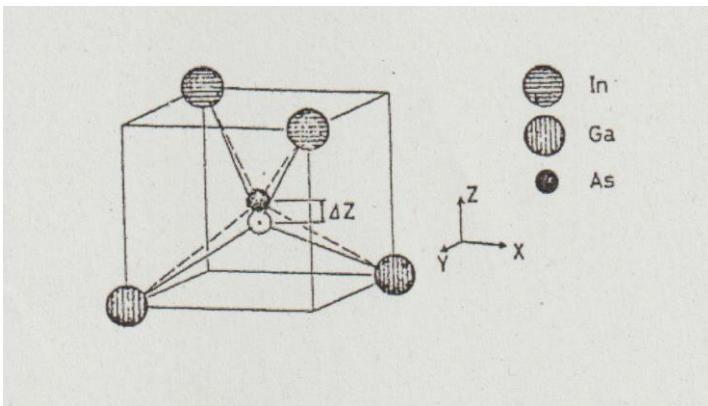


図 4-6 正四面体配位の概念図



博士論文: 混晶半導体の局所構造と熱力学

H=U+pV: Enthalpy



material	short-range force parameters			ionicity f_i
	α	β	α / β	
C	129.33	84.76	0.655	0
Si	48.50	13.81	0.285	0
Ge	38.67	11.35	0.294	0
AlSb	35.35	6.77	0.192	0.426
GaP	47.32	10.44	0.221	0.374
GaAs	41.19	8.95	0.217	0.310
GaSb	33.16	7.22	0.218	0.261
InP	43.04	6.24	0.145	0.421
InAs	35.18	5.50	0.156	0.357
InSb	29.61	4.77	0.161	0.321
ZnS	44.92	4.78	0.107	0.623
ZnSe	35.24	4.23	0.120	0.676
ZnTe	31.35	4.45	0.142	0.546
CdTe	29.02	2.43	0.084	0.675
CuCl	12.60	1.00	0.079	0.746

$$U_{bs} = \frac{1}{2} \alpha \left(\frac{3}{4r^2} \right) \sum_{i=1}^4 \left[\Delta (|r_i - r_i|) \right]^2$$

Bond Stretching Energy

$$V_{bb} = \frac{1}{2} \beta \left(\frac{3}{4r^2} \right) \sum_{i>j} \left[\Delta (|r_i - r_j|) \right]^2$$

Bond Bending Energy

VFF model: Force constants of Bond stretch & Bending

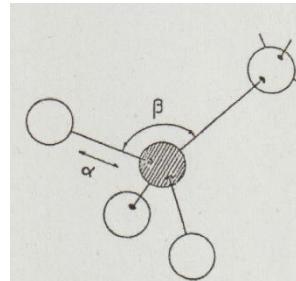
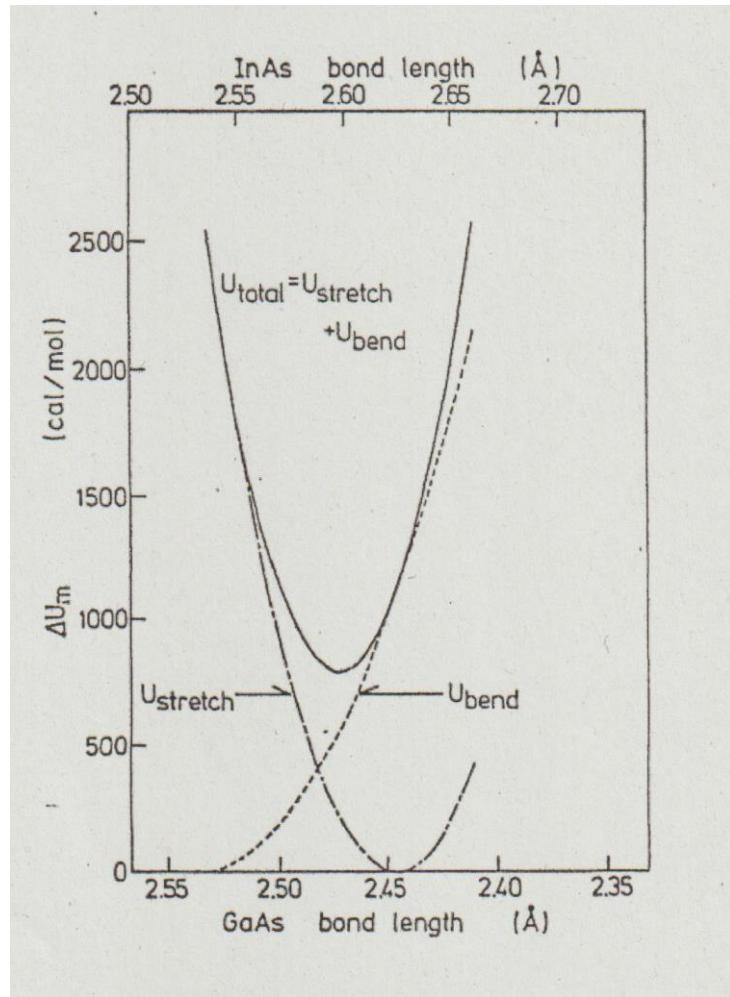


図 4-6 正四面体配位の概念図

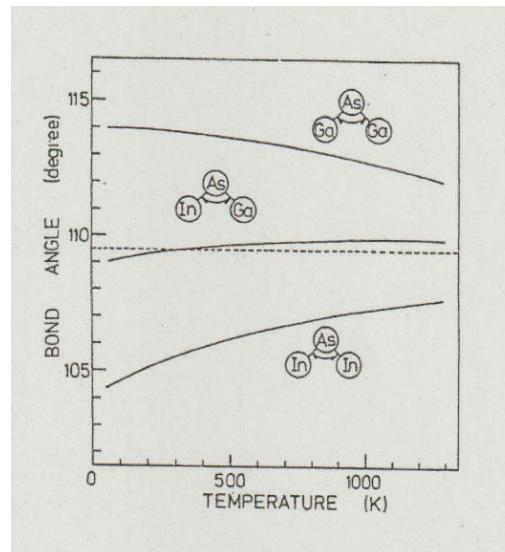


博士論文: 混晶半導体の局所構造と熱力学

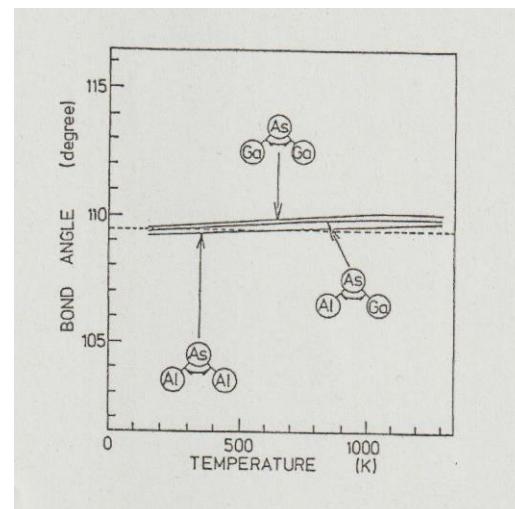
$Ga_{1-x}In_xAs$ に蓄積した歪エネルギー



$Ga_{1-x}In_xAs$ のボンド偏角の温度依存性

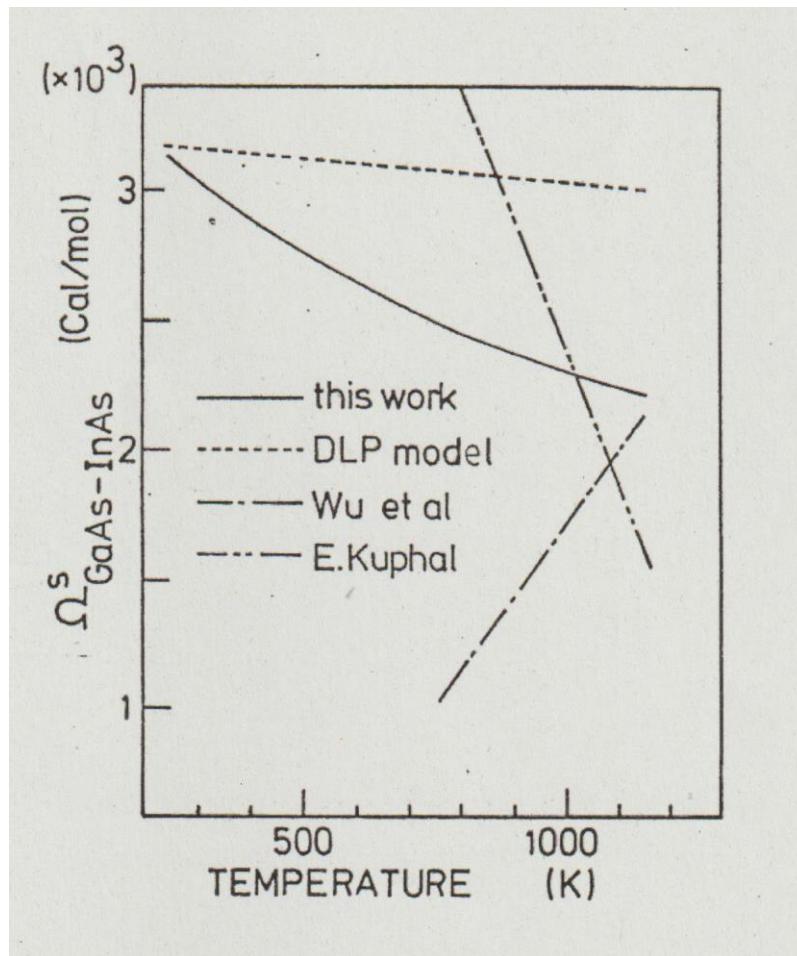


$Ga_{1-x}Al_xAs$ のボンド偏角の温度依存性

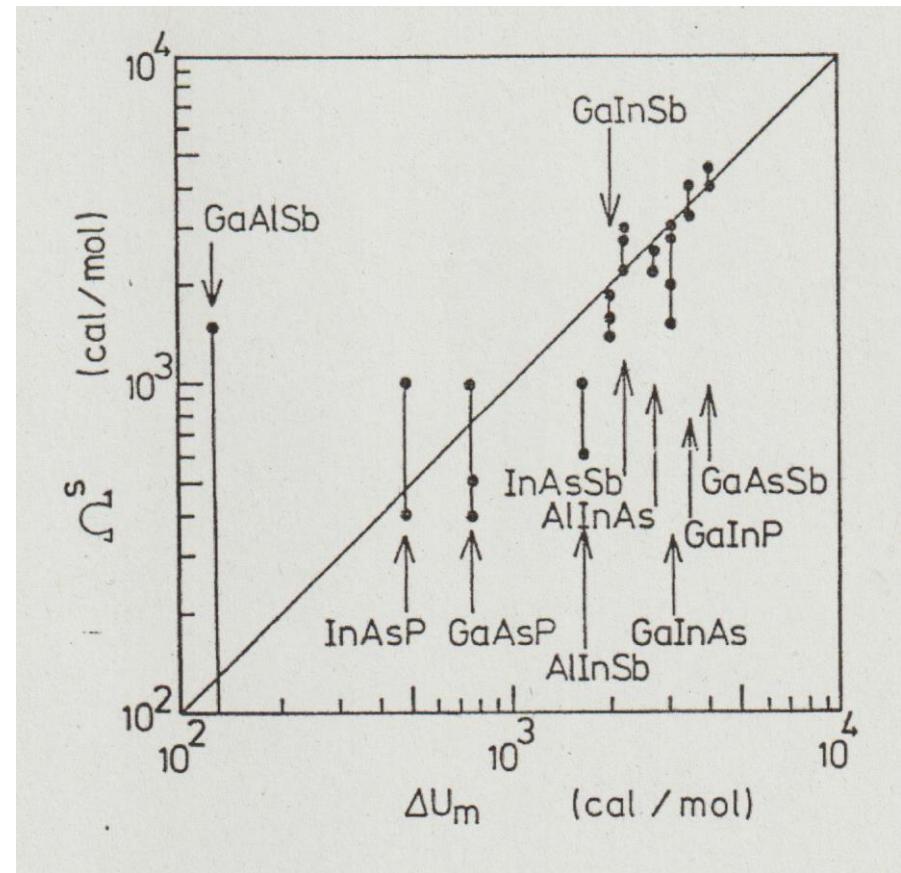


博士論文: 混晶半導体の局所構造と熱力学

相互作用パラメータの温度依存性



DLPモデルと本解析結果



格子定数を決める要因は？

DLPモデル: J. Stringfellow, 2016 ICCGE-18, Frank prize.



研究歴

1980

1985

1990

1995

2000

東京大学工学系研究科修士課程（河東田助教授）

工学博士：
レーザラマン
分光法による、
混晶半導体における
原子配列の不規則性
と原子間結合の評価に関する研究

SiとGaAsの融液成長:X線透視法による対流可視化に成功(渡辺久夫、江口実)

カトリック・ルーバン大学研究員(F. Dupret教授)

東京大学工学系研究科博士課程
(河東田助教授):
InGaAsや
GaP/Siのクロライド成長

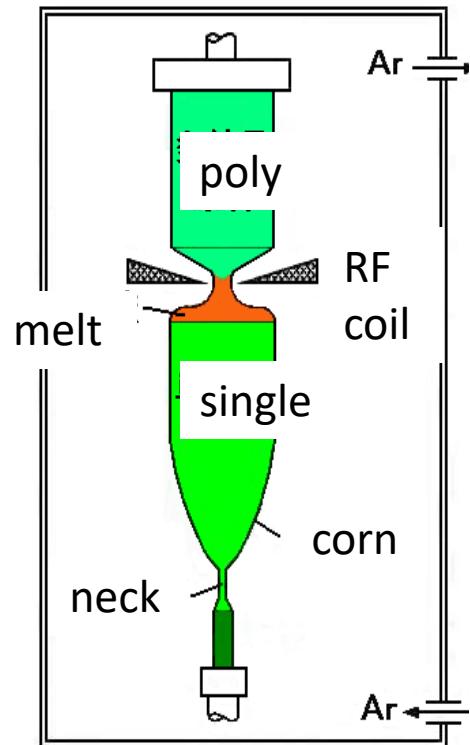
結晶成長:
初講義(西永頌教授)
応物初発表
DLTS:(勝部助教授、
生駒教授)

NEC基礎研究所半導体研究部:
メルトサイエンス(渡辺久恒、
日比谷孟俊、
中村新、渡辺久夫、江口実、
渡邊匡人)

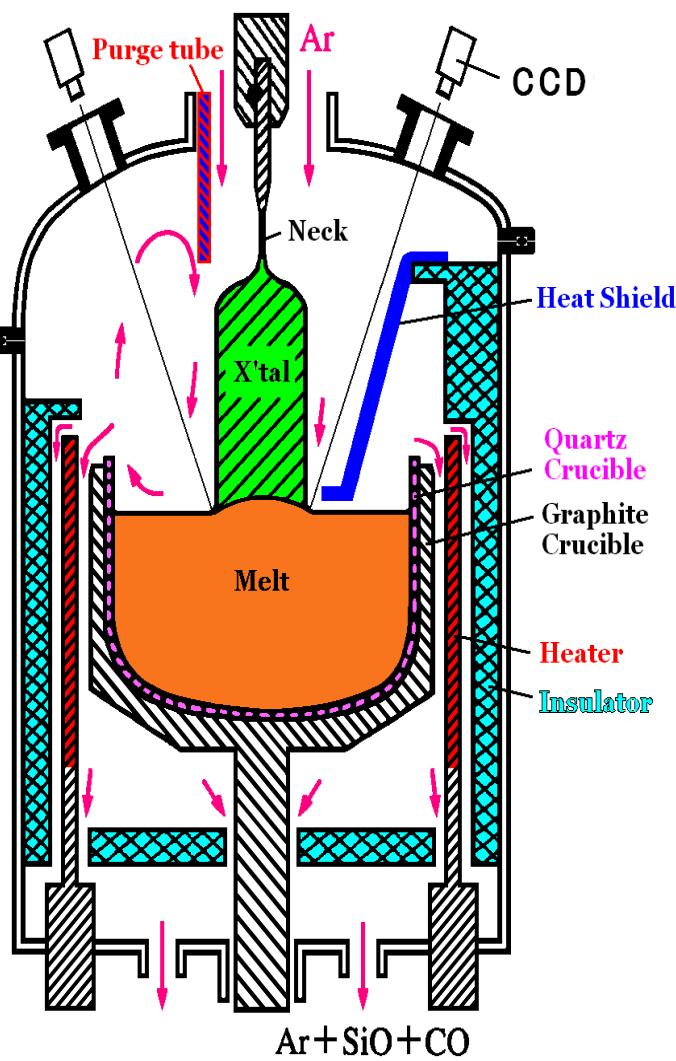


Crystal Growth Method (Melt Science)

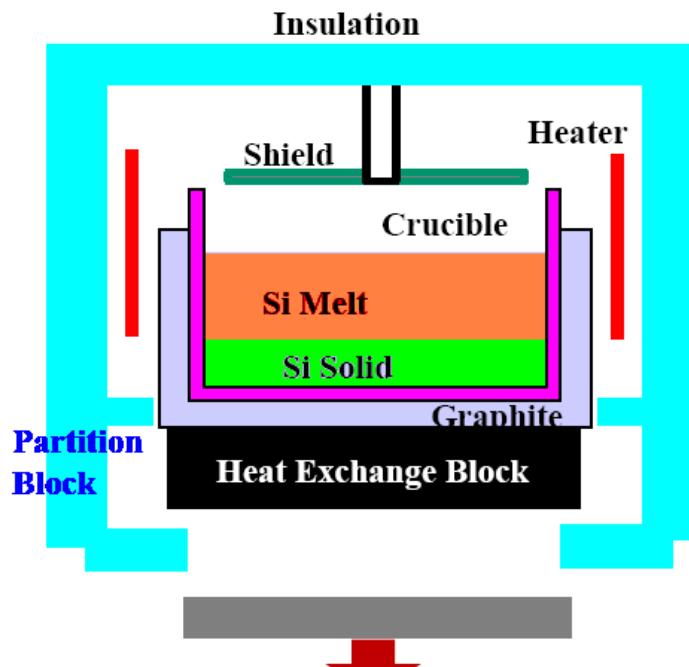
FZ



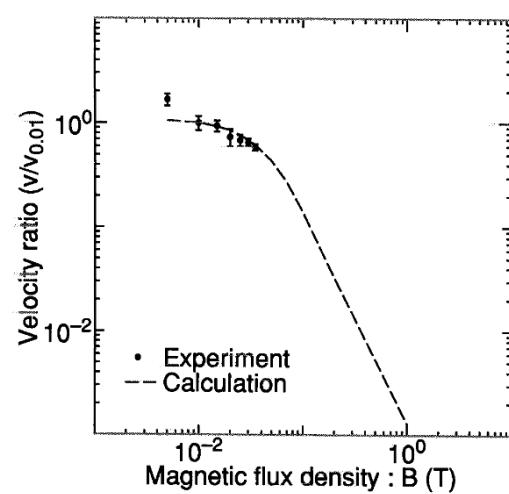
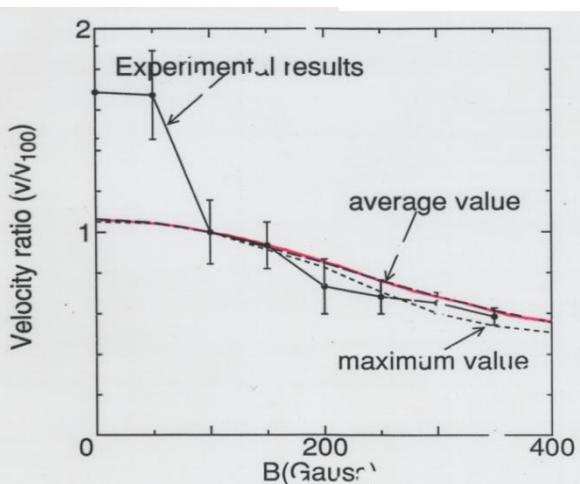
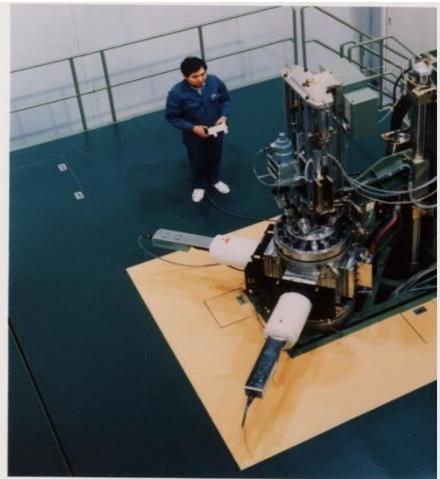
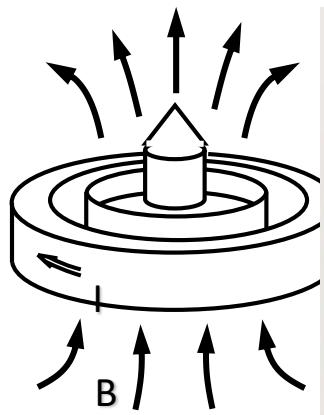
CZ



CAST



Flow visualization of metallic melt of Si (自由な環境)

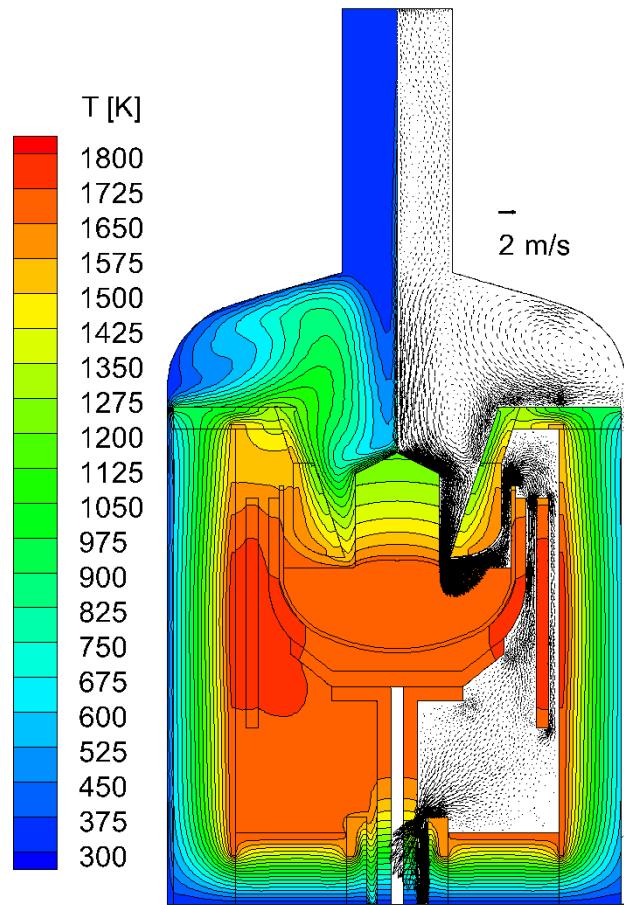


2. SOLID-LIQUID INTERFACE SHAPE

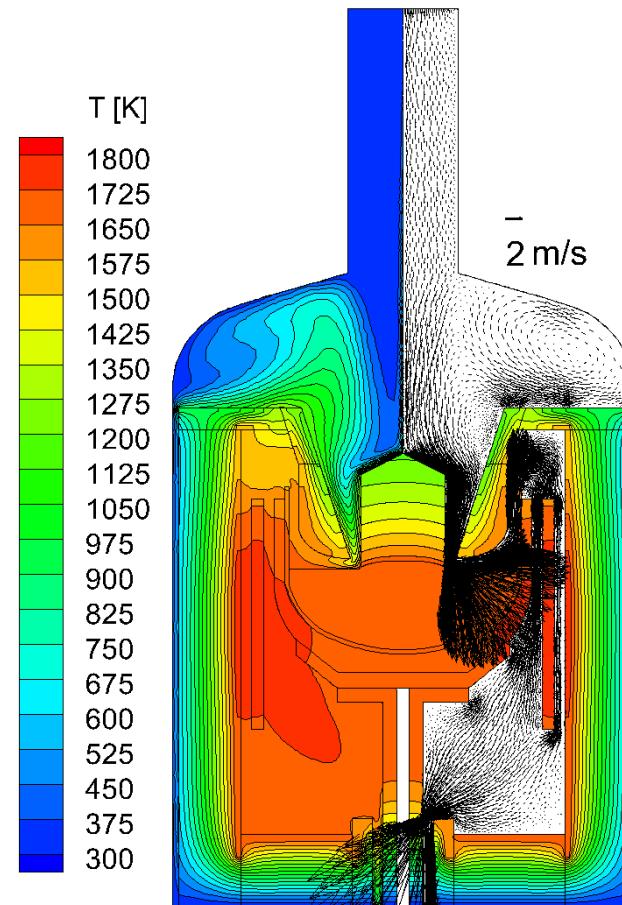
PARTICLE PATH OF
AXISYMMETRIC FLOW

Global Simulation for CZ-Si Growth (Generalization)

Temperature distribution and gas flow



Gas flow rate=10 SLPM



Gas flow rate=20 SLPM

Increase of flow rate caused the larger velocity near the melt surface, and intensive convective heat transport in the gas.



UCL: Global model (Dupret's algorithm)

$$\begin{aligned}\frac{q(x)}{\varepsilon(x)} - \int_{x^* \in \partial V} K(x, x^*) \frac{1 - \varepsilon(x^*)}{\varepsilon(x^*)} q(x^*) dS^* \\ = \sigma T^4(x) - \int_{x^* \in \partial V} K(x, x^*) \sigma T^4(x^*) dS^*\end{aligned}$$


Axi-symmetric coordinate

$$\begin{aligned}\frac{q(x)}{\varepsilon(x)} - \int_{x' \in p(\partial V)} r' K_c(x, x') \frac{1 - \varepsilon(x')}{\varepsilon(x')} q(x') ds' \\ = \sigma T^4(x) - \int_{x' \in p(\partial V)} r' K_c(x, x') \sigma T^4(x') ds'\end{aligned}$$

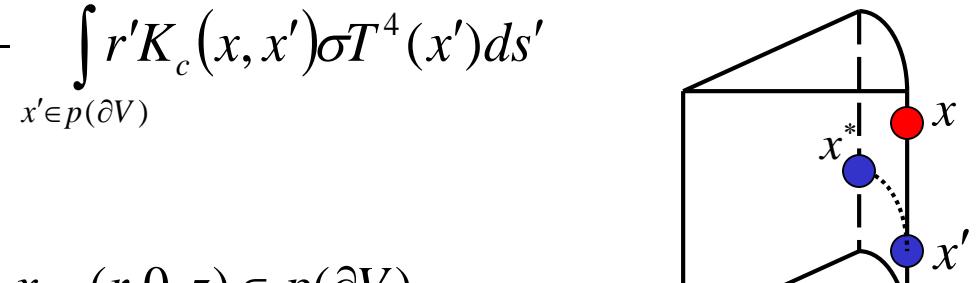
Axisymmetric VF:

$$K_c(x, x') = 2 \int_0^\pi K(x, x^*) d\theta^*$$

$$x = (r, 0, z) \in p(\partial V)$$

$$x' = (r', 0, z') \in p(\partial V)$$

$$x^* = (r' \cos \theta^*, r' \sin \theta^*, z') \in \partial V$$



研究歴

1980

東京大学工学系研究科修士課程（河東田助教授）

東京大学工学系研究科博士課程（河東田助教授）：
InGaAsやGaP/Siのクロライド成長

結晶成長：
初講義（西永頌教授）
応物初発表
DLTS：（勝部助教授、
生駒教授）

1985

工学博士：
レーザラマン分光法による、
混晶半導体における原子配列の不規則性と原子間結合の評価に関する研究

NEC基礎研究所半導体研究部：
メルトサイエンス（渡辺久恒、
日比谷孟俊、中村新、渡辺久夫、江口実、
渡邊匡人）

1990

SiとGaAsの融液成長：X線透視法による対流可視化に成功（渡辺久夫、江口実）

カトリック・ルーバン大学研究員（F. Dupret教授）

1995

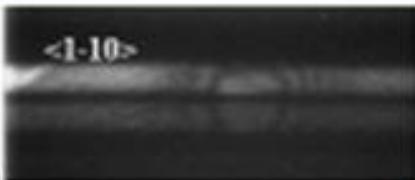
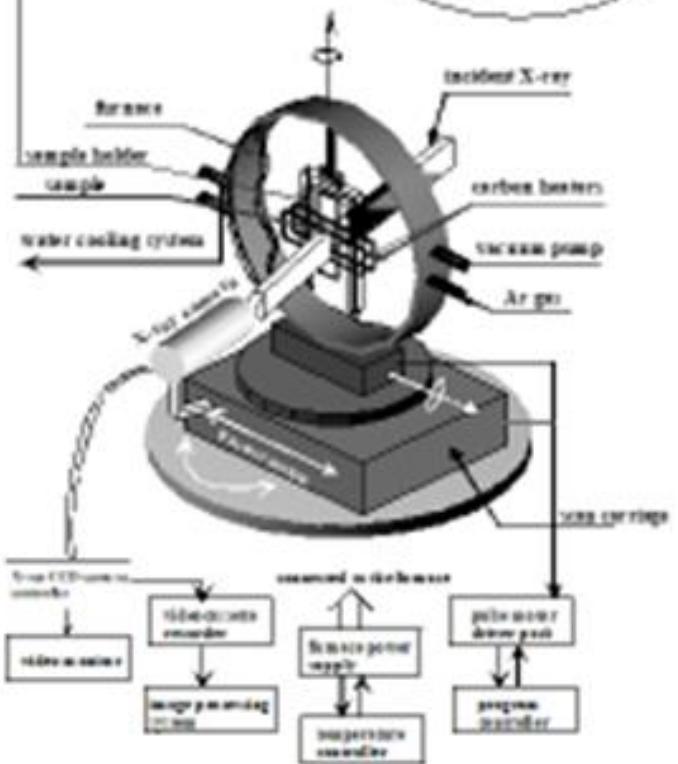
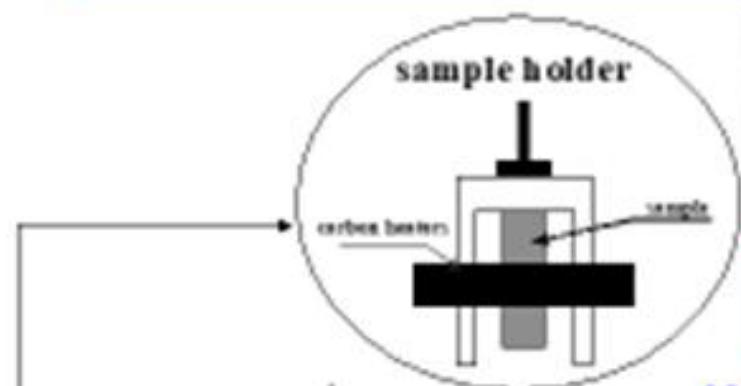
九州大学機能物質科学研究所：尾添研究室
今石教授（結晶成長）

未来開拓研究：
西永教授（結晶成長）

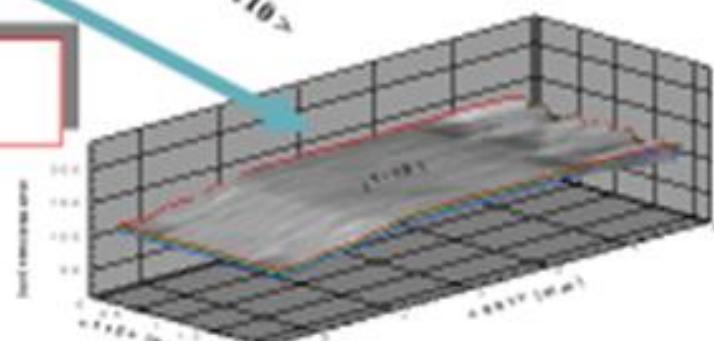
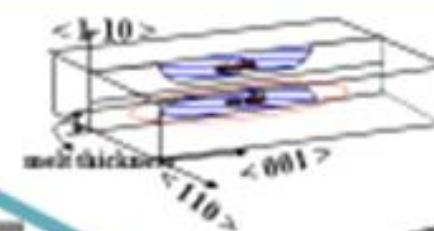
2000



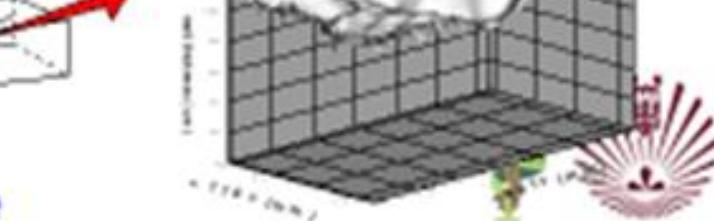
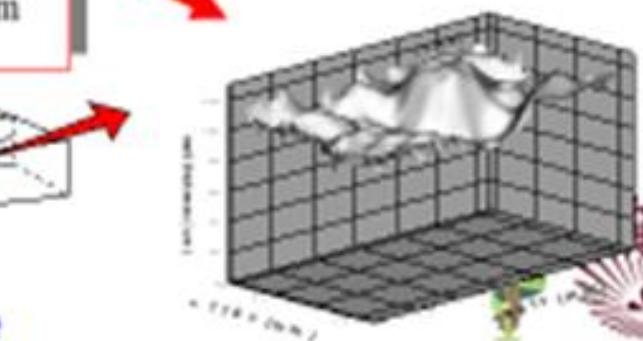
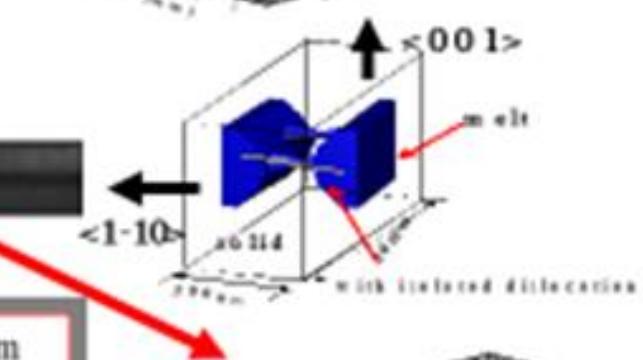
In-situ observation of S/L interface of Si by X-ray radiography (JSPS Pj)



**W.O. Dislocation:
Flat interface**

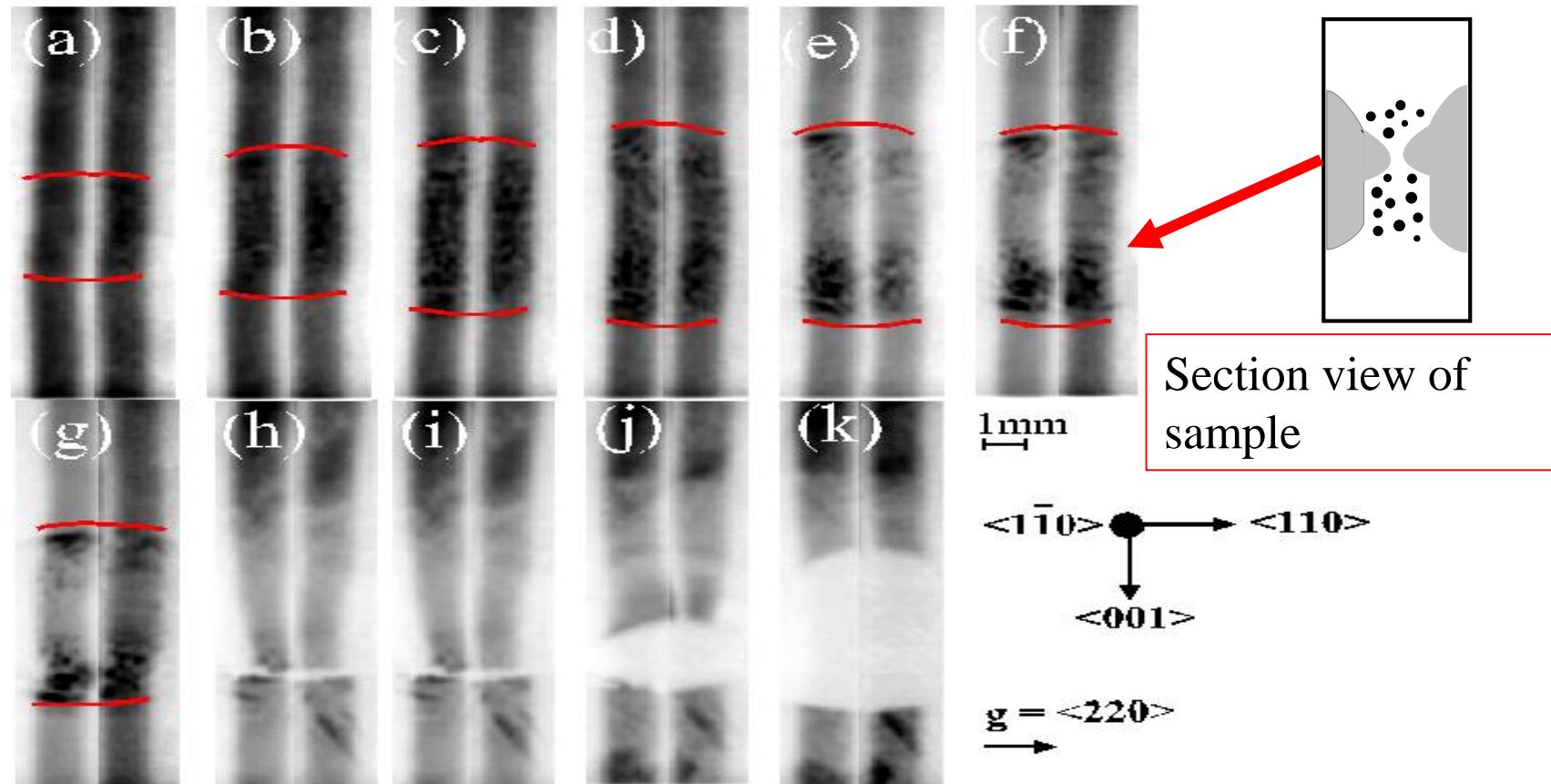


**W. Dislocation:
Rough interface**



Droplet formation in Si? w. o. Dislocation

- Melting process: CZ crystal, 20° /min.
- dot images

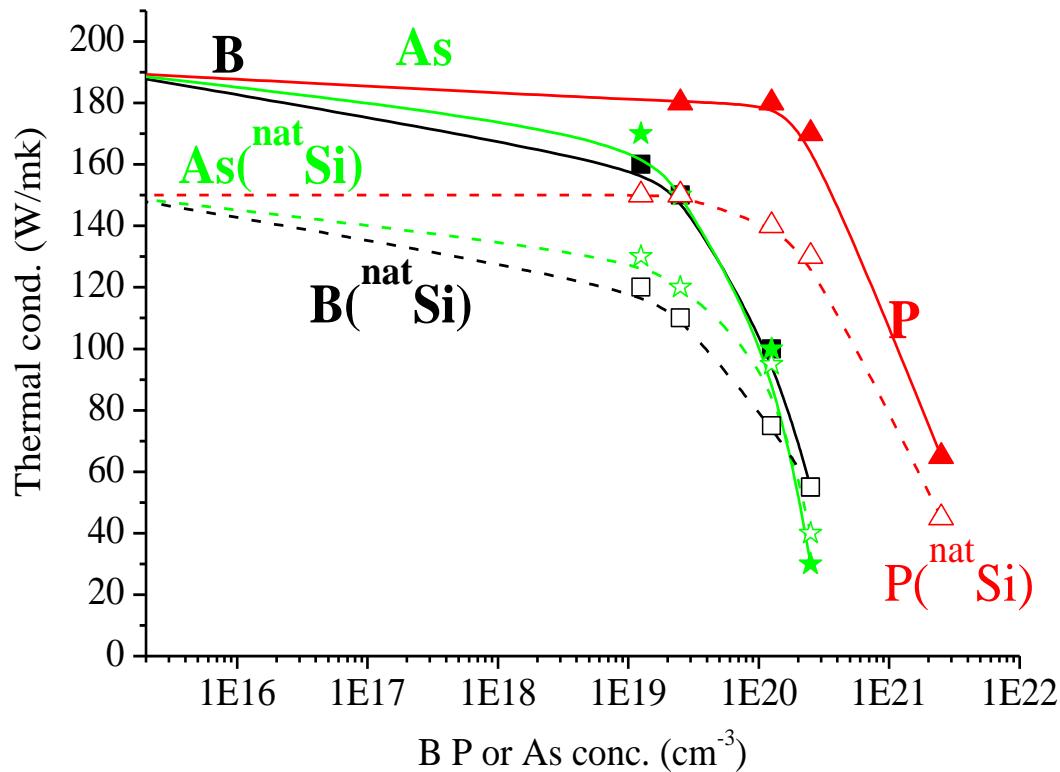


Time-interval: 10 sec.

Contrast: negative contrast

Siの熱伝導率の不純物濃度依存性(室温、フォノンのみ)

$^{28}\text{Si}:^{29}\text{Si}:^{30}\text{Si}=92.1:4.7:3.1$ (天然シリコン), $^{28}\text{Si}:^{29}\text{Si}:^{30}\text{Si}=99.0:0.6:0.4$ (純化シリコン)



$$K \propto c \Gamma$$

$$\Gamma^{-1} \propto f_i \{(m_j - m_A)/m_A\}^2$$

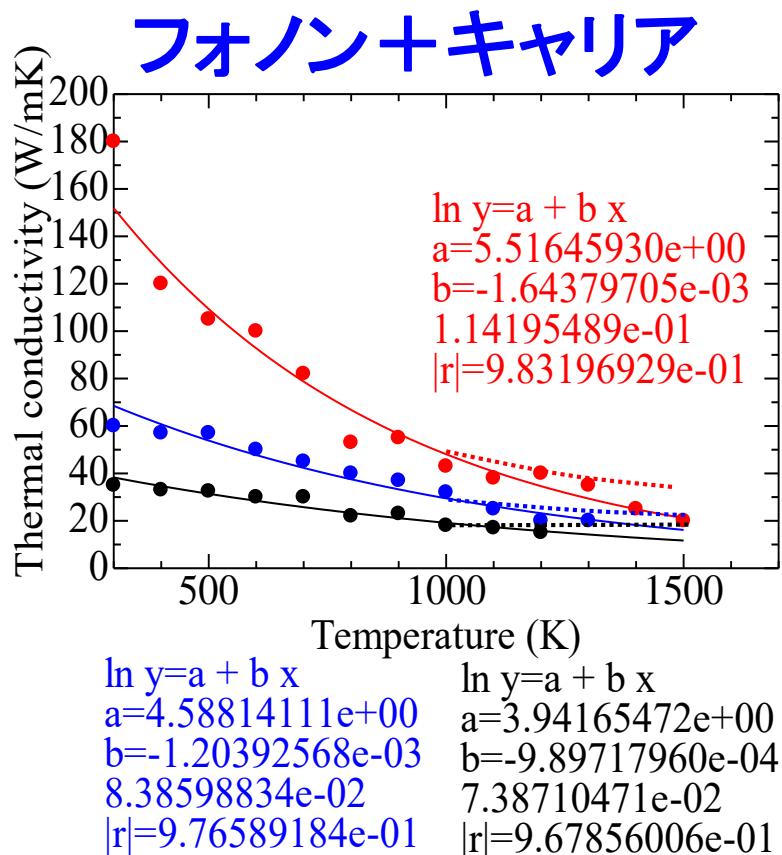
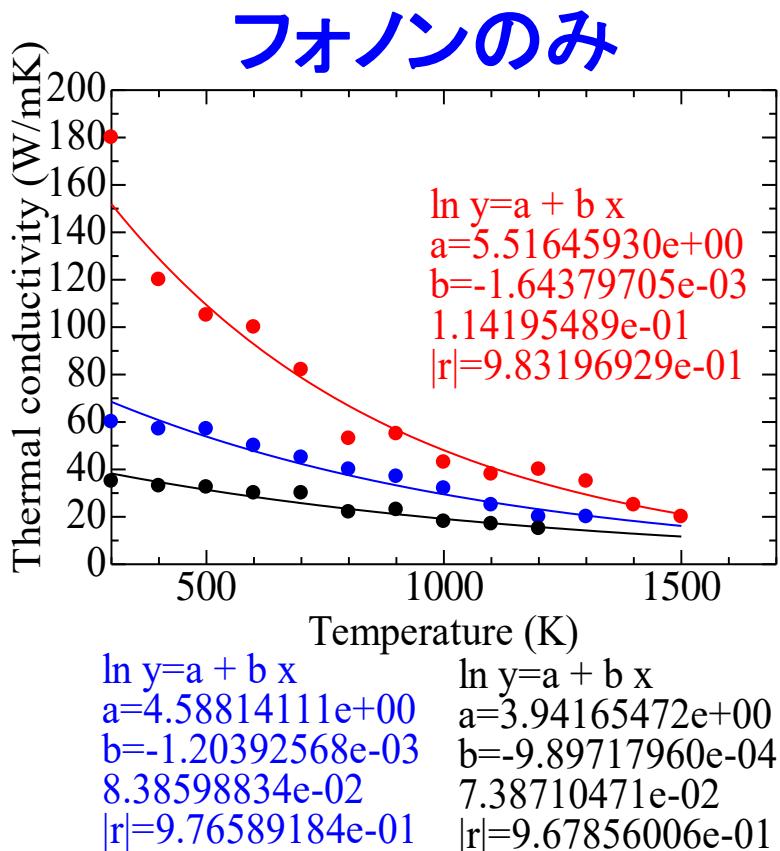
f_i : mole fraction

m_j : mass of j atom

m_A : average mass

1. 母結晶と不純物の質量差大: 热伝導度低下
2. B, As(約 10^{19} cm^{-3})から低下、B, As(約 10^{20} cm^{-3})から低下
→同位体Si、天然Si同じ
3. 低濃度: 同位体効果大、高濃度: 低濃度: 同位体効果小

高濃度不純物添加Si結晶熱伝導度の温度依存性(思考実験)



Dopant: P: $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

B: $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

As: $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

$k(\text{フォノン}) + k(\text{キャリア})$

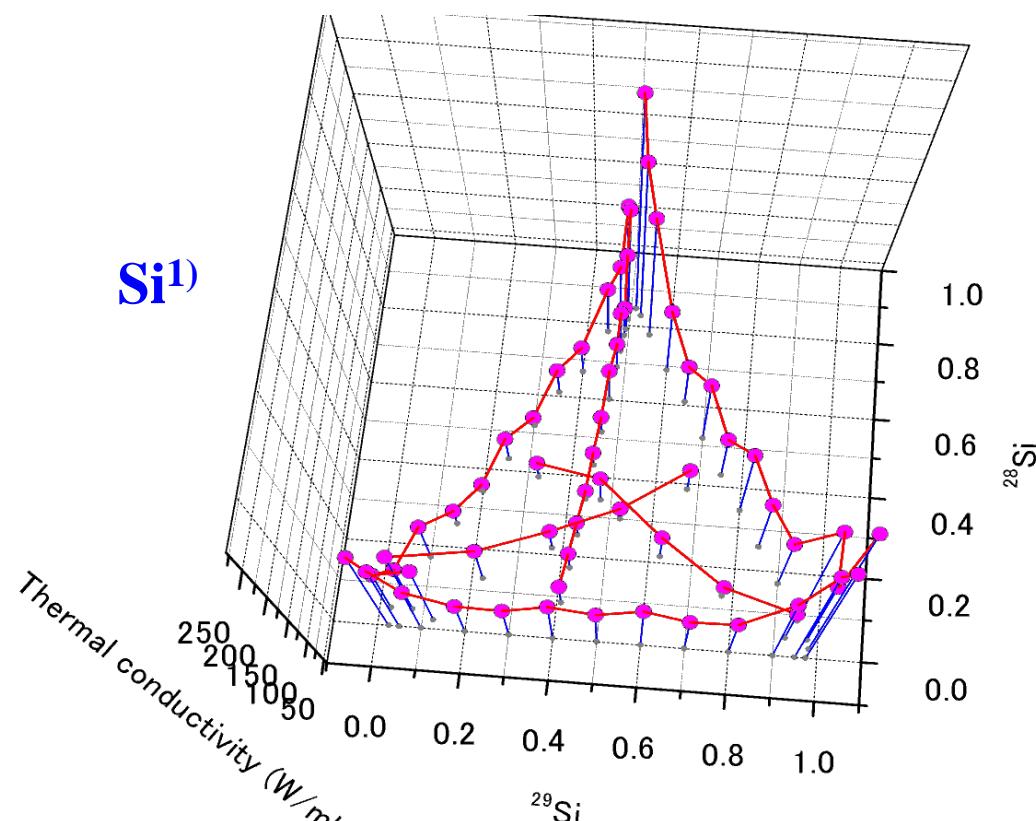
$$k_e = 8.28 - 2.35e-2T + 2.01e-5T^2 - 4.3e9T^3$$

after F. J. Morin, Phys. Rev. 96 (1954) 28.

$1000 \text{ K} < T < 1685 \text{ K}$: $k(\text{高濃度添加}) = k(\text{低濃度添加})$



Thermal conductivity of Isotope Si, Ge & SLs



Gedanken experiment:

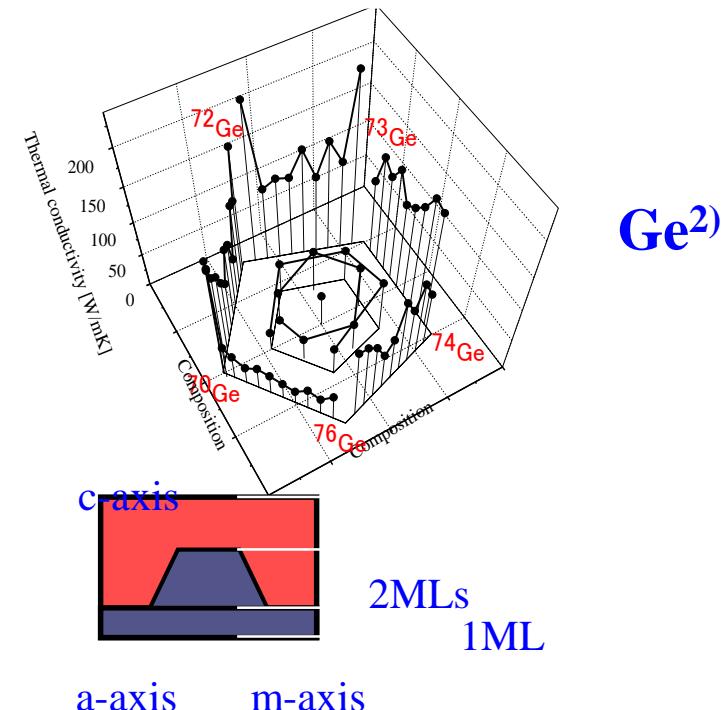
Control of thermal conductivity by phonon engineering: Modify V/G ?

1) Atsushi Murakawa, Hideo Ishii and Koichi Kakimoto, J. C. G., 267 (2004) 452.

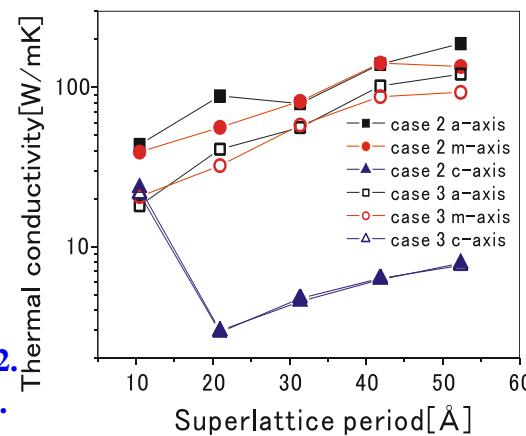
2) Hideo Ishii, Atsushi Murakawa and Koichi Kakimoto, J. A. P., 95, (2004) 6200.

3) Takahiro Kawamura, Yoshihiro Kangawa, Koichi Kakimoto,

phys. stat. sol. (c) 4, (2007) 2289.

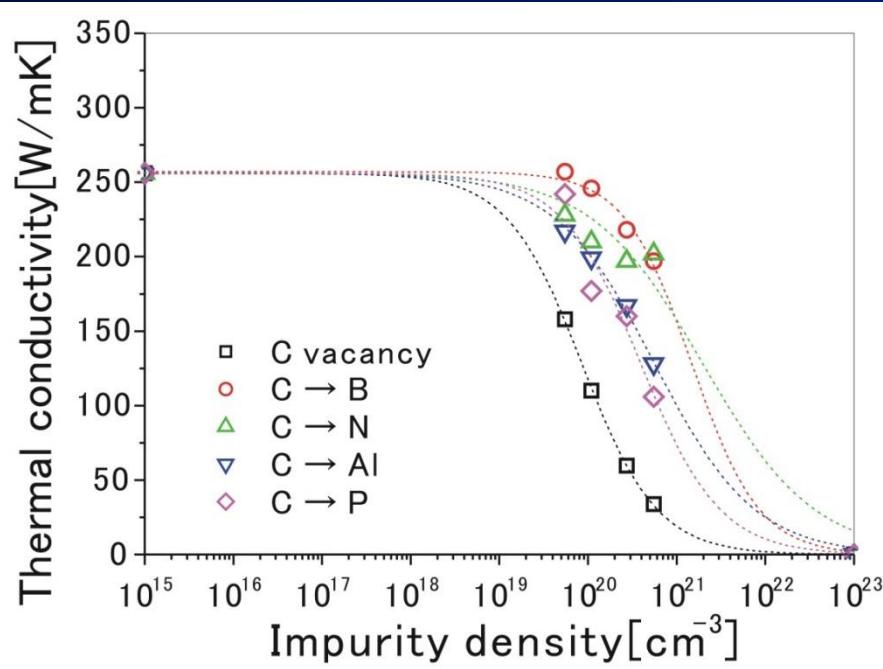


SLs³⁾

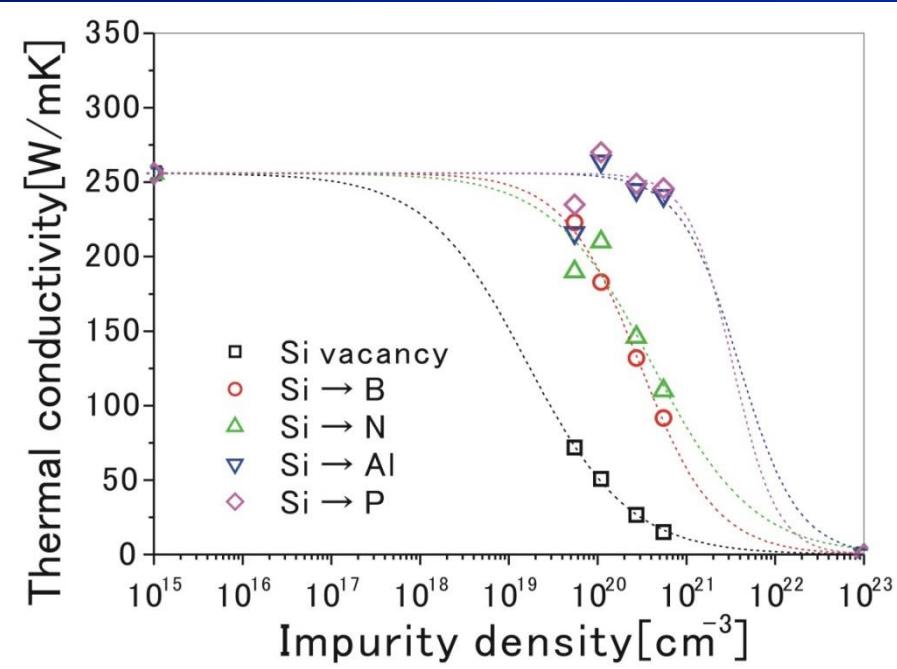


SiC熱伝導度と不純物濃度

C原子を置換



Si原子を置換



polycrystalline 3C (測定)

undoped
($5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 250 W/mK

N: $2.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 200 W/mK
 $8.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 130 W/mK

N and B: $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 42 W/mK

L. M. Ivanova, et al., Inorganic
Mat. 42 (2006) 1205.

濃度 [cm^{-3}]	$\text{C} \rightarrow \text{N}$	$\text{Si} \rightarrow \text{N}$
2.2×10^{20}	207	154
4.0×10^{20}	193	129
8.0×10^{20}	164	93

濃度 [cm^{-3}]	$\text{C} \rightarrow \text{B}$	$\text{Si} \rightarrow \text{B}$
4.0×10^{20}	210	109

単位: W/mK

→ NはCサイト^{1,2)}
BはSiサイト³⁾

1) N. T. Son, et al., Phys. Rev. B 70 (2004) 193207.

2) A. Fukumoto, phys. stat. sol. (b) 202 (1997) 125.

3) A. Fukumoto, Phys. Rev. B 53 (1996) 4458.

研究歴

2000 2005 2010 2015 2020

九州大学応用
力学研究所:
結晶成長学研
究室:寒川助教
授、中野技官

TMCZ結晶育
成コード開発:
2D-3D融合ア
ルゴリズムの
確立 (Prof. L.
Liu)

昇華法による
SiC結晶成長
コード開発
(Prof. X.
Chen)

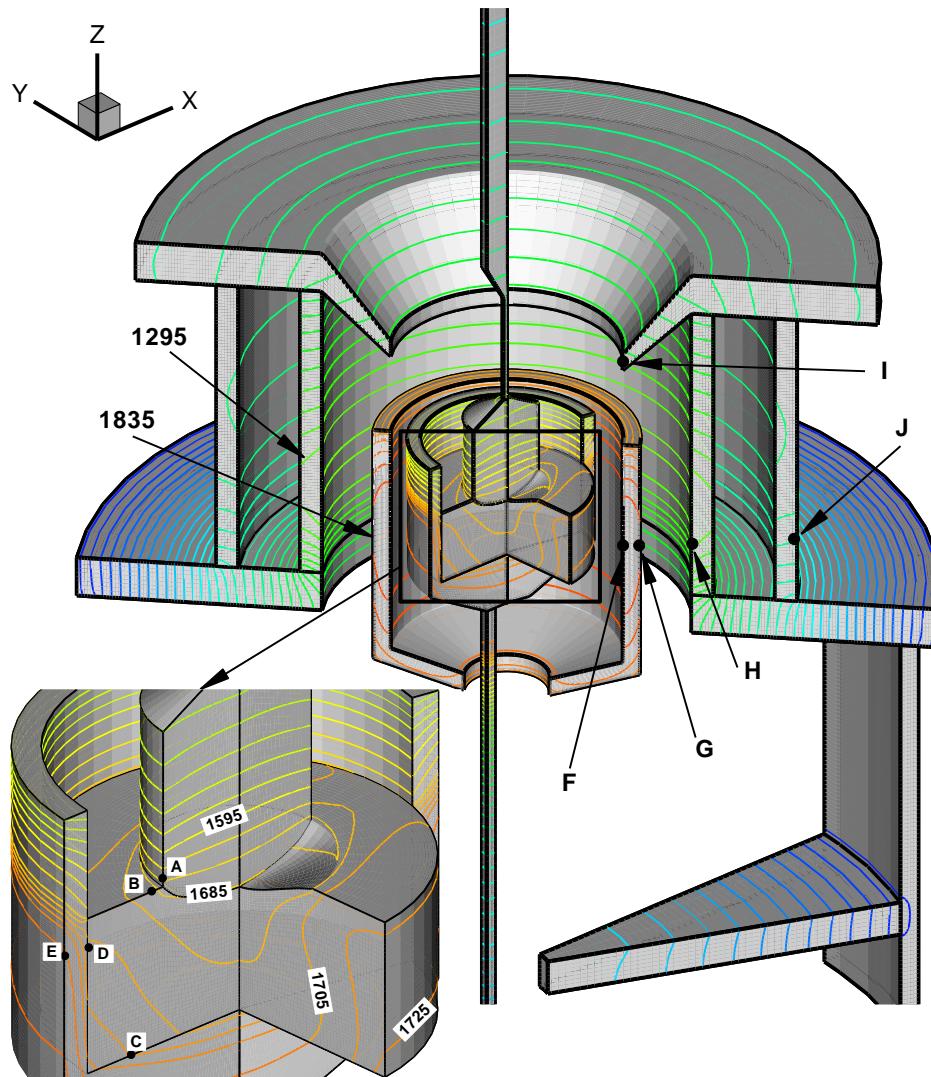
シリコン太陽電
池用一方向性
凝固法とSiC昇
華法における
非定常解析
(Prof. B.
Gao)

MDによる熱物性推
算:結晶成長解析用

大型一方向性
凝固炉導入:
シードキャスト
法の確立:
(原田氏、宮村
氏)



Temperature distribution in a Si-TMCZ furnace



Temperature distribution at the hot-zone

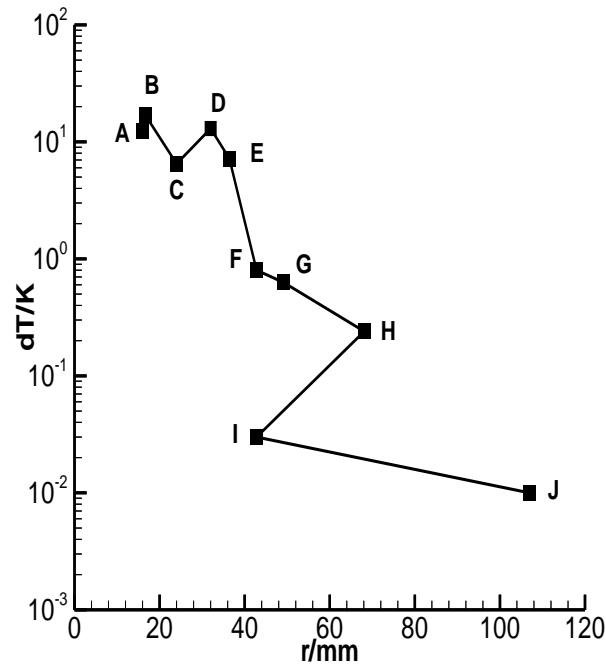
Refer to: L.J. Liu, K. Kakimoto, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48(21-22), 2005, p.4481-4497

3D melt domain: 117,100

Total cell volumes: 535,000 (3D) + 3,000 (2D)

Total radiative elements: 57,650 (3D) + 900 (2D)

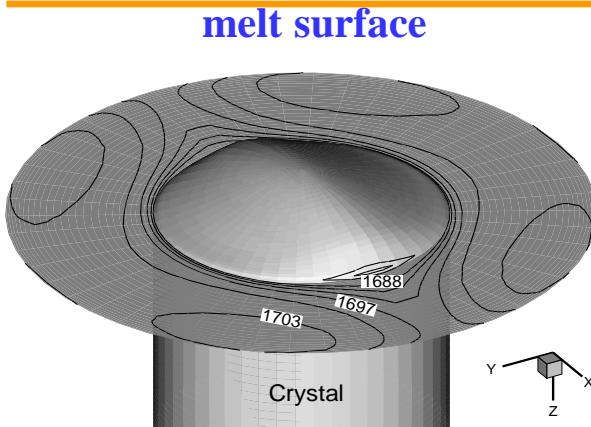
Cal. Time: 43 days HP ITANIUM-2



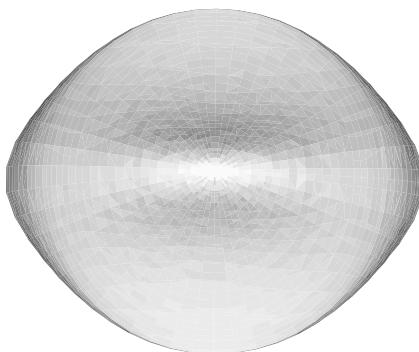
Temperature difference over circumference at some positions



3D interface shape induced by 3D thermal flow

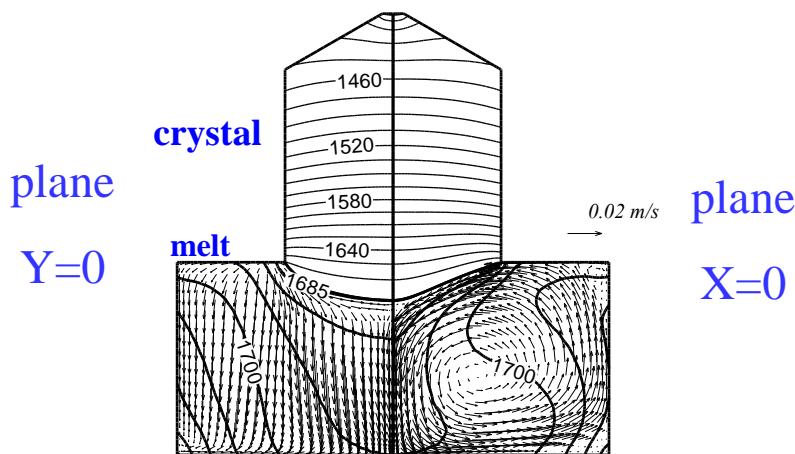
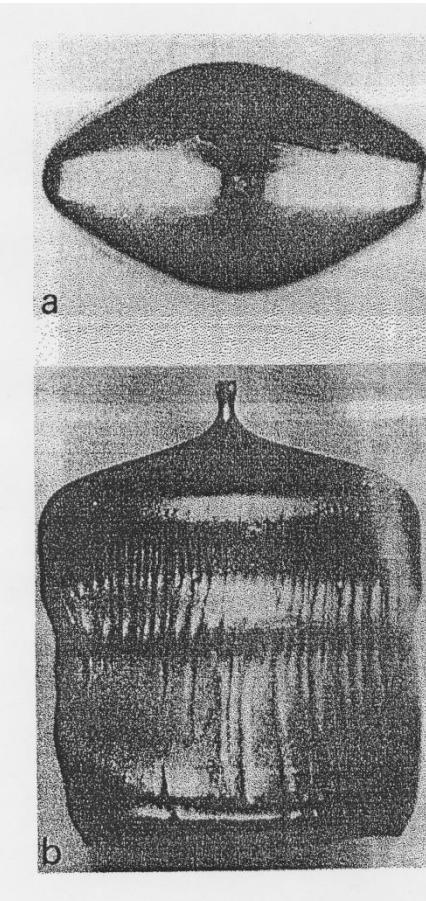


Bird view



Top view

3D interface shape and temperature distribution
on the melt surface



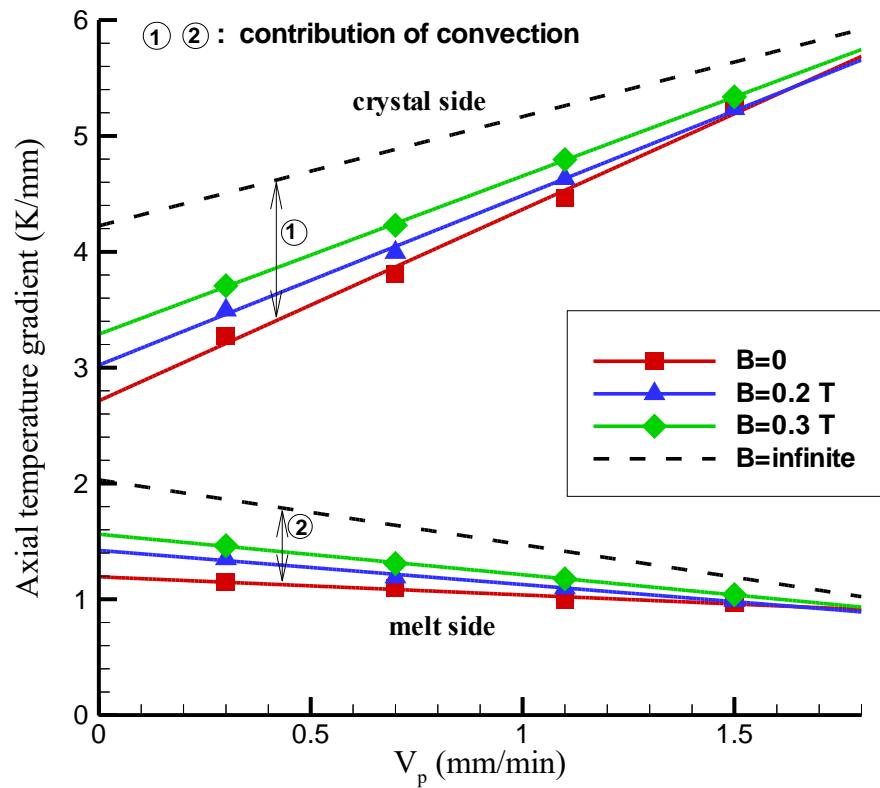
Convective flow, thermal field and interface
profiles in two symmetric half-planes

Experiment data (Kajigaya et al.)

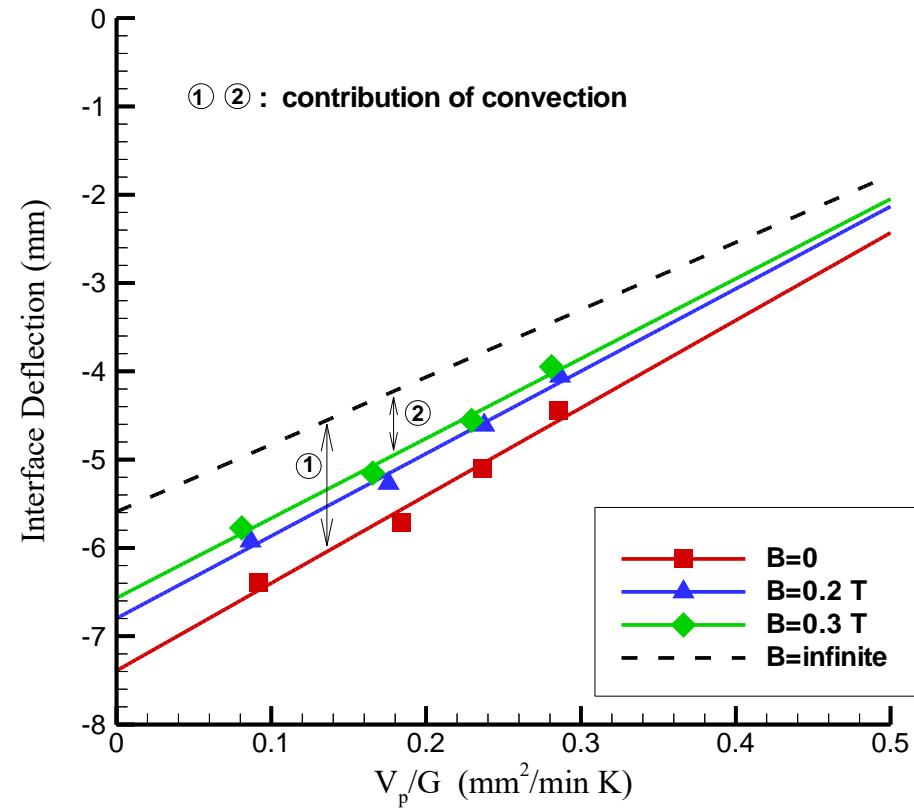
T. Kajigaya, et al, *J. Cryst. Growth*,
112(1991), 123-128



Melt-crystal interface Vs. crystal pulling rate and magnetic field intensity



Dependence of axial temperature gradient at the interface on crystal pulling rate



Dependence of Interface deflection on crystal pulling rate

Electrical conductivity & Emissivity of Silicon

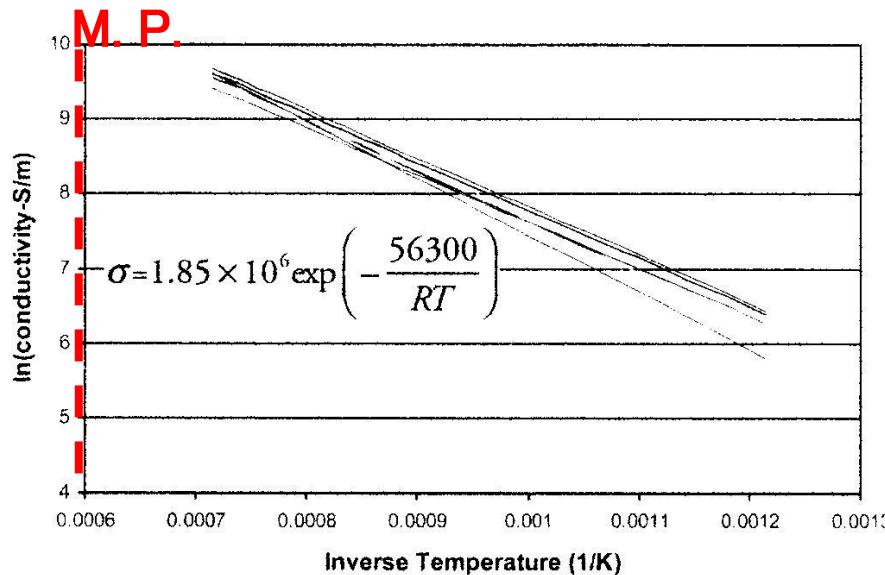


Fig. 4b. Natural logarithm of conductivity versus inverse temperature for all the tests.

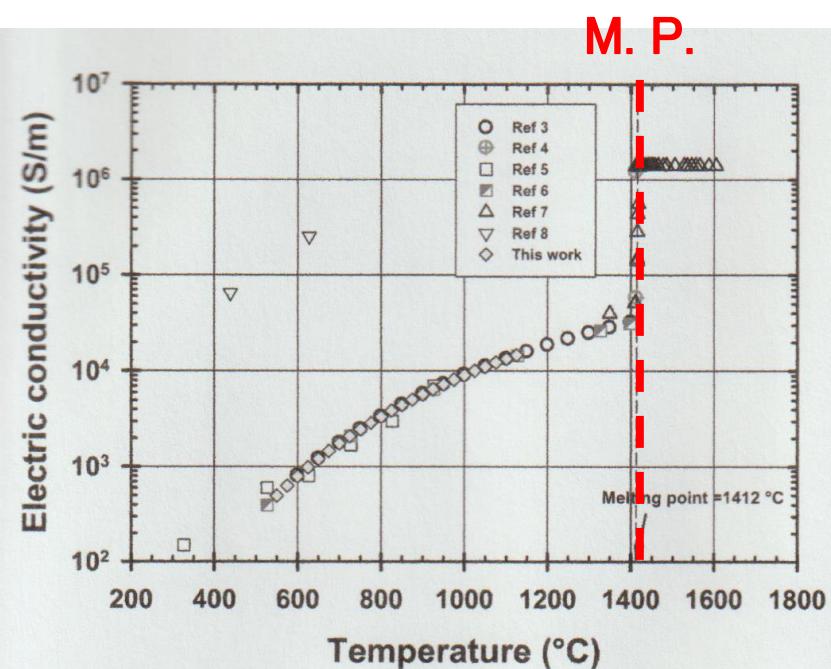


Fig. 5. Comparison of our measured electrical conductivity with data already published.

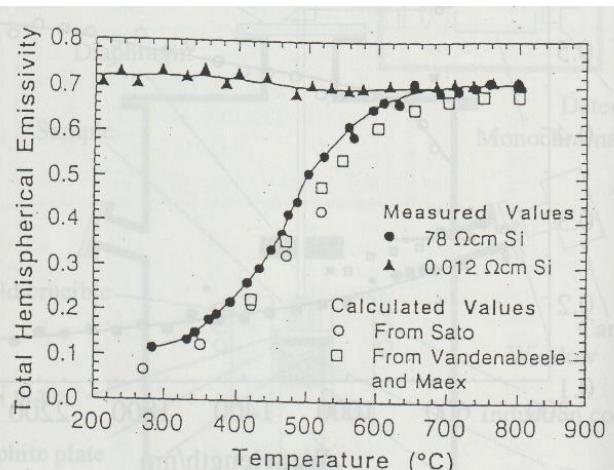


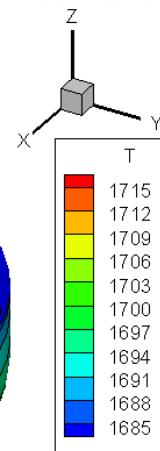
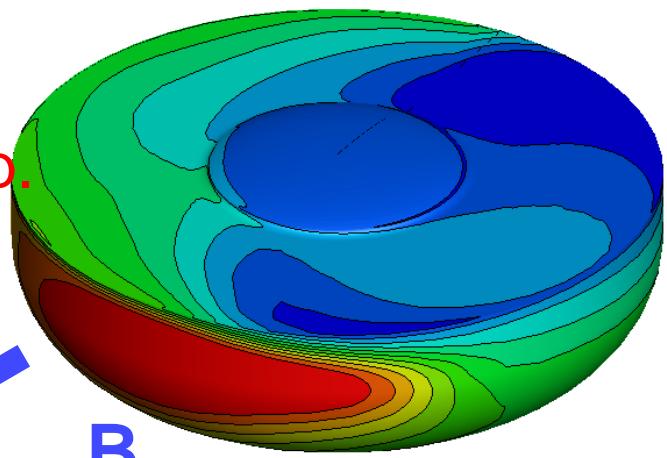
Fig.3.1.4.(4)-3 The total hemispherical emissivity of the lightly(78 Ω cm) and heavily(0.012 Ω cm) doped silicon specimens as a function of temperature. The solid curves are fits to the data point. (Reprinted from the Journal of Applied Physics, 74, 6353(1998).)

Emissivity vs. T.

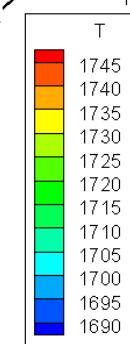
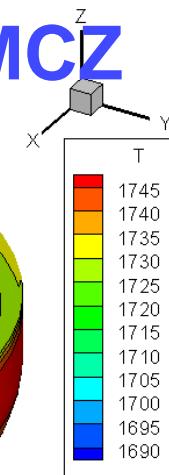
Temperature, Flow distributions in Si of MCZ

(a) TMCZ

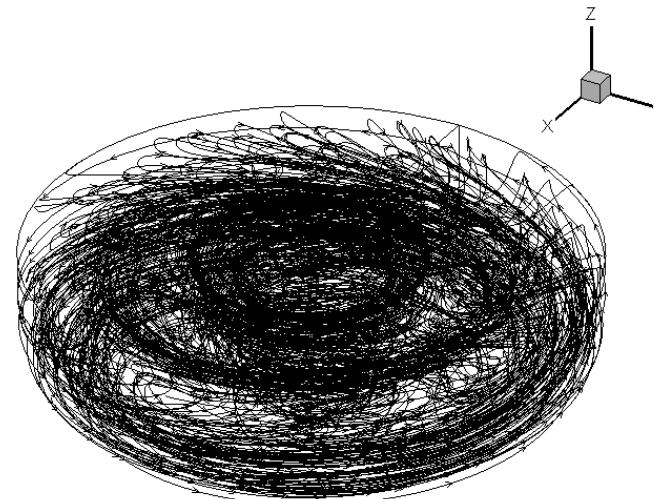
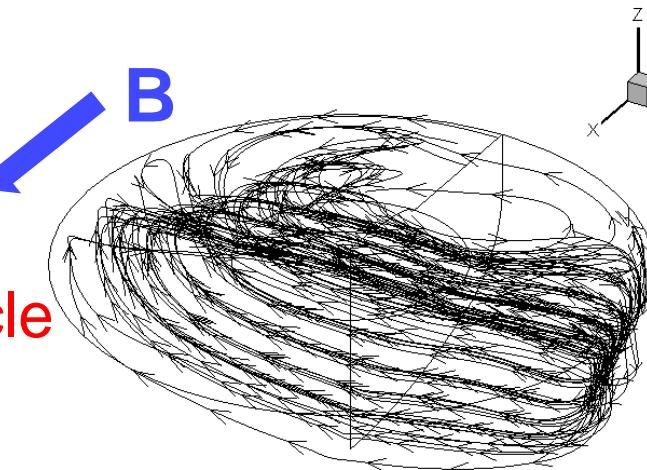
Temp.



(b) Cusp-shaped MCZ



Particle path

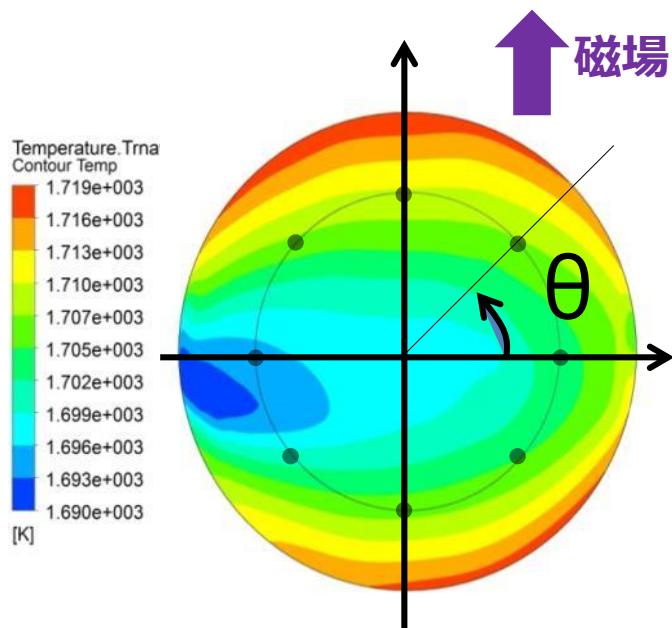


- Asymmetric pattern

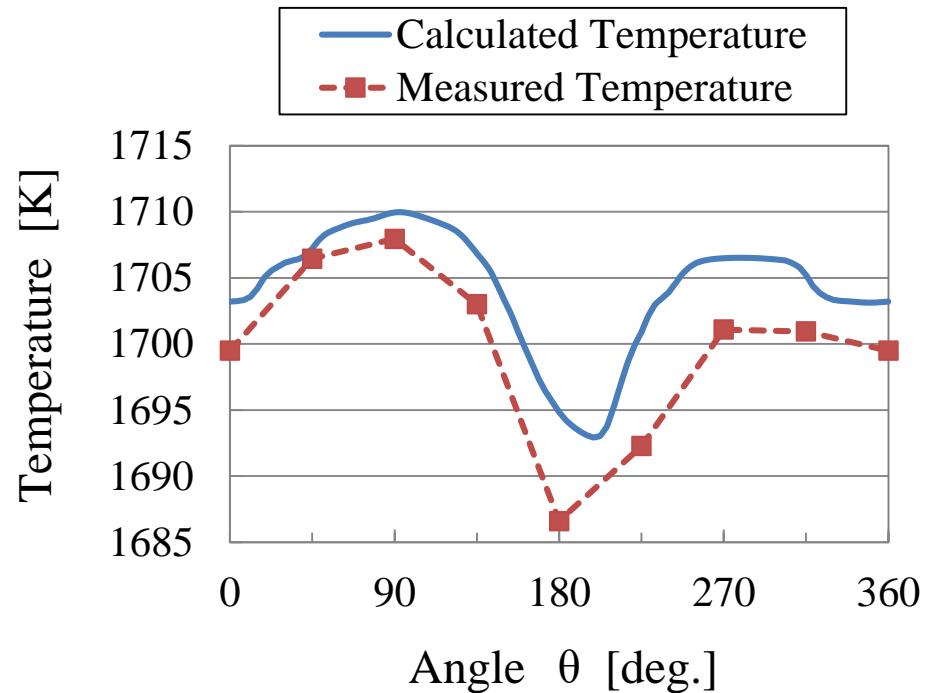
- Axisymmetric pattern

Comparison of exp. and num. results

Measurement points



Exp. & Num.

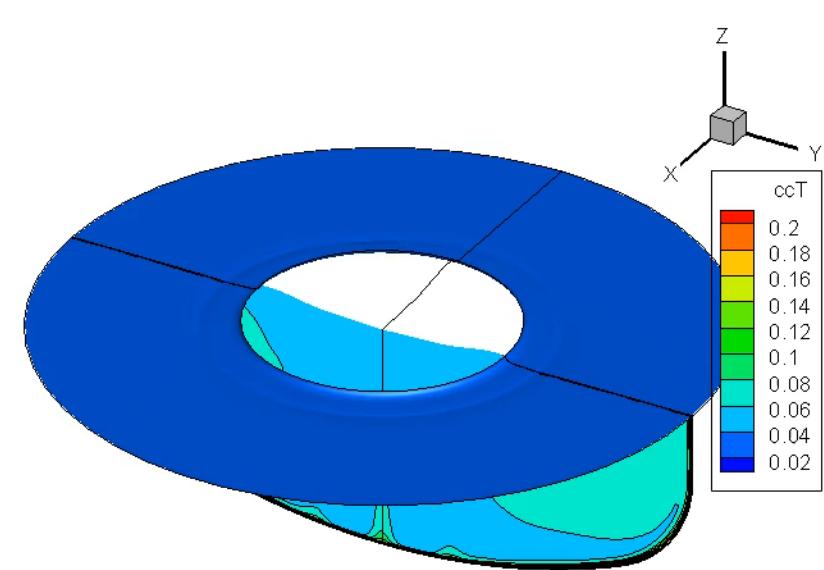
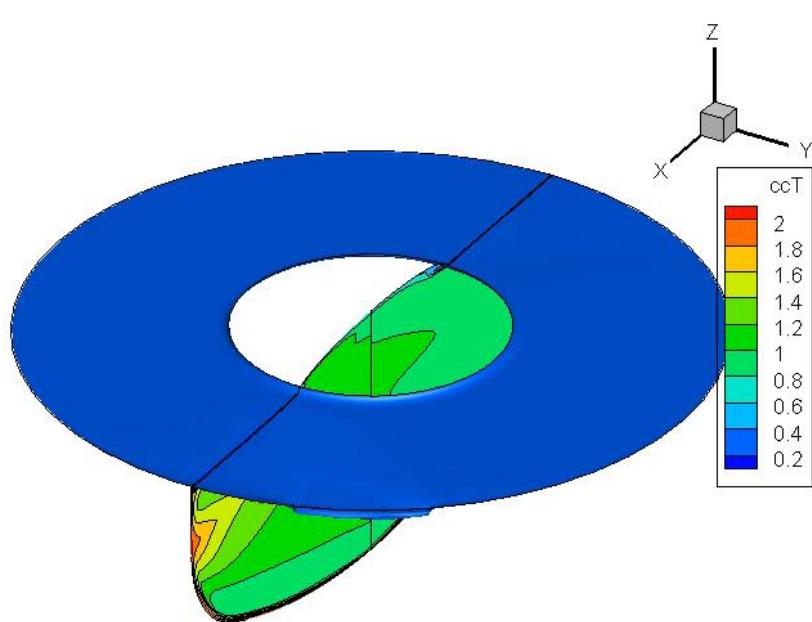


Almost reproduced.

Oxygen distribution in Si melt of MCZ

(a) TMCZ

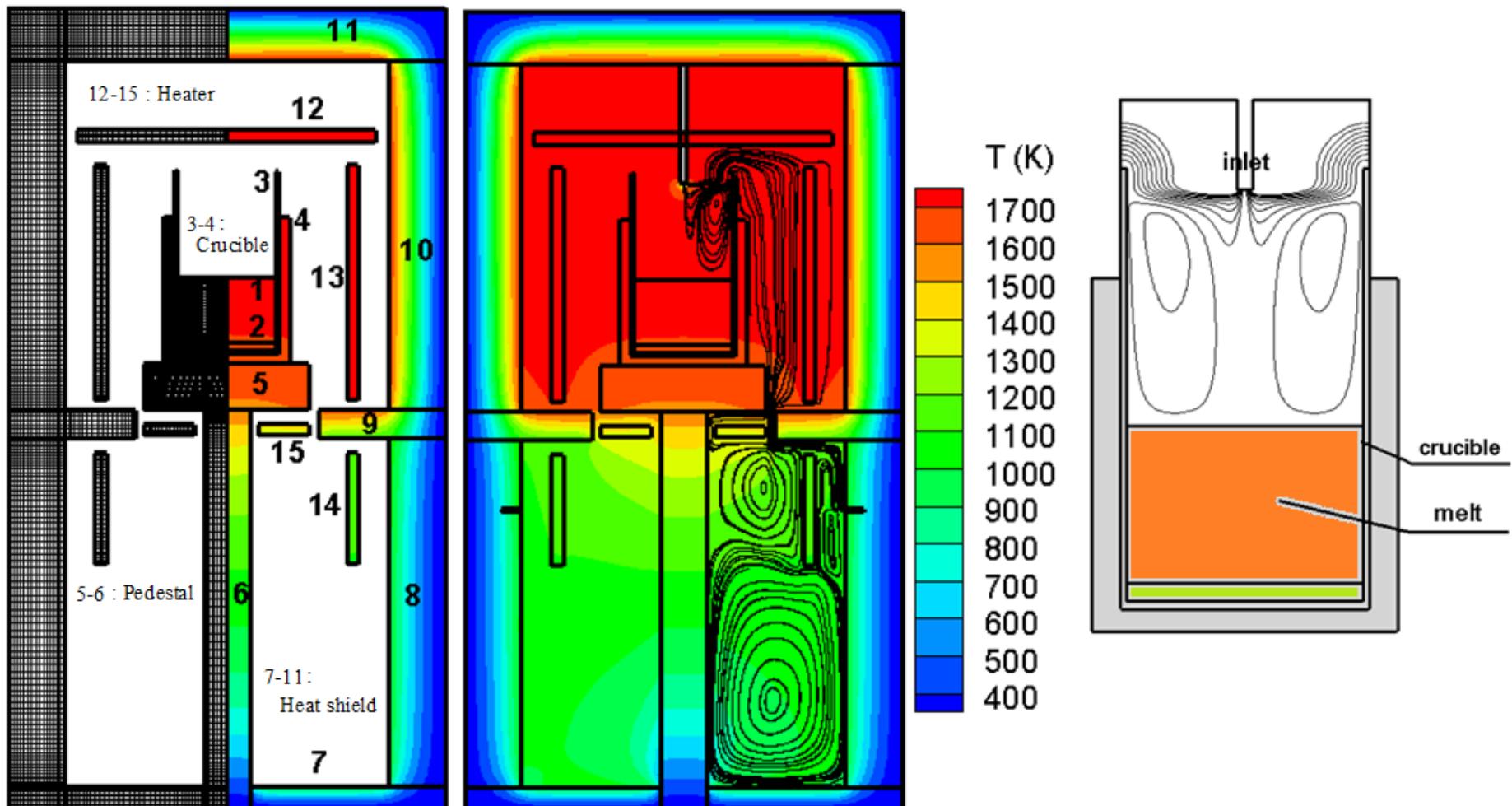
(b) Cusp-shaped MCZ



- Thin boundary layer
- Precise control

- Rather thick boundary layer
- Stable operation

Impurity Transport in a Solidification Furnace of Si

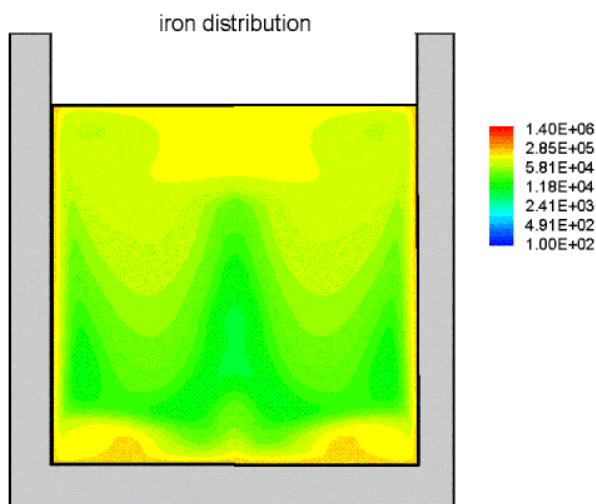
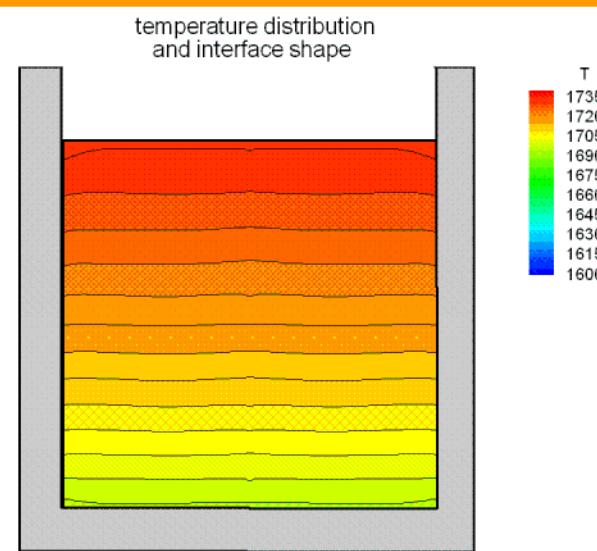
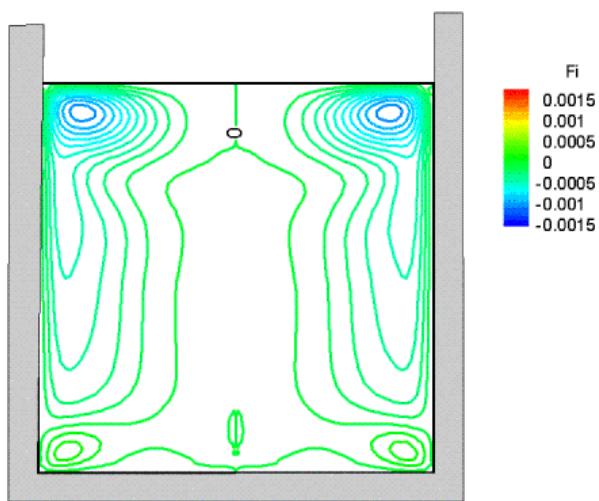


B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto:

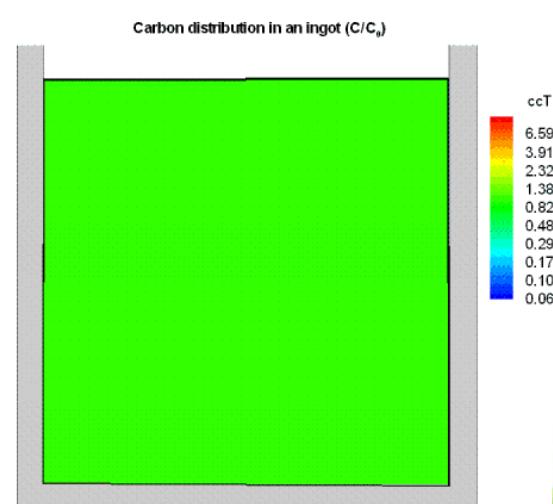
Journal of the Japanese Association of Crystal Growth
Vol.36, No.4 (2009) 261-267

Time development of melt flow, temperature and impurities distributions

35



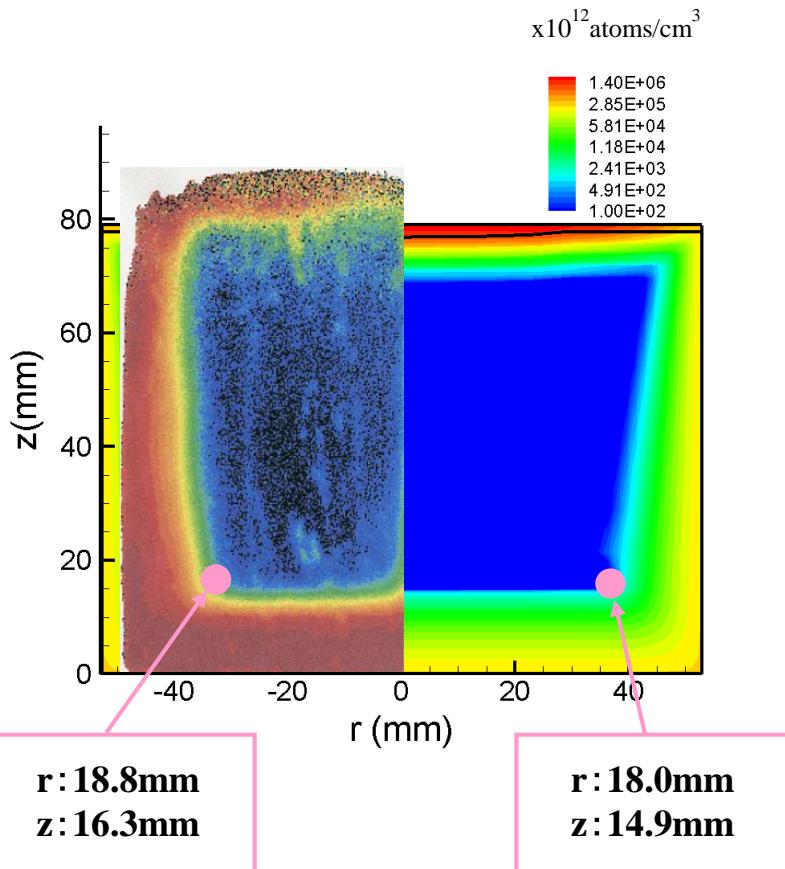
Iron concentration



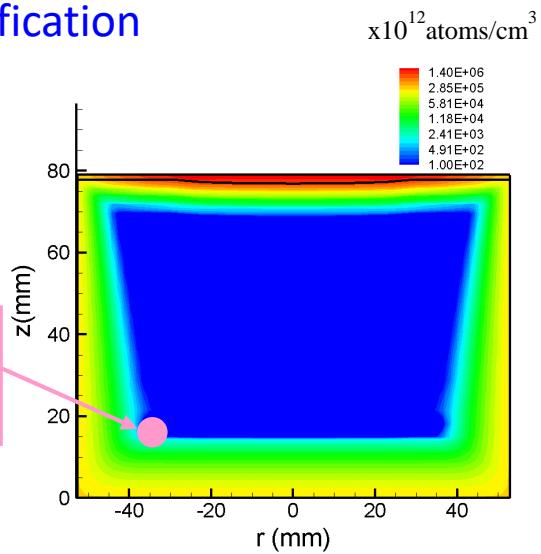
Carbon concentration



Fe distribution and minority carrier lifetime

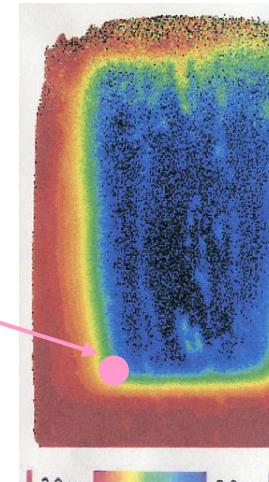


□ 6hsolidification



□ 2006#8-6

$r: 18.8\text{mm}$
 $z: 16.3\text{mm}$

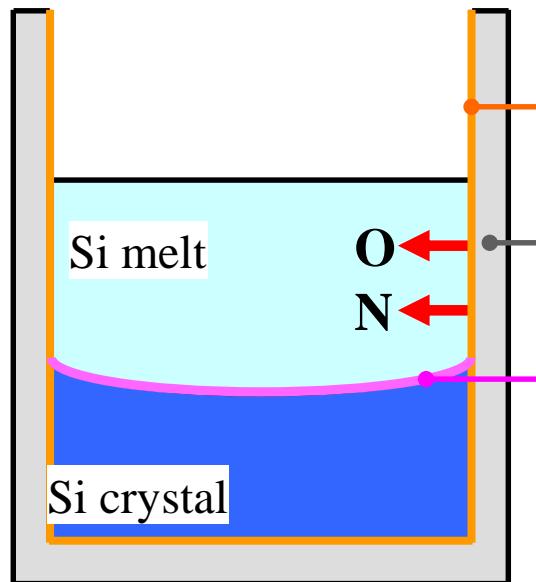


Assumption: Exp. (Multi) <-> Num. (Single)
Impurity transfer: almost same



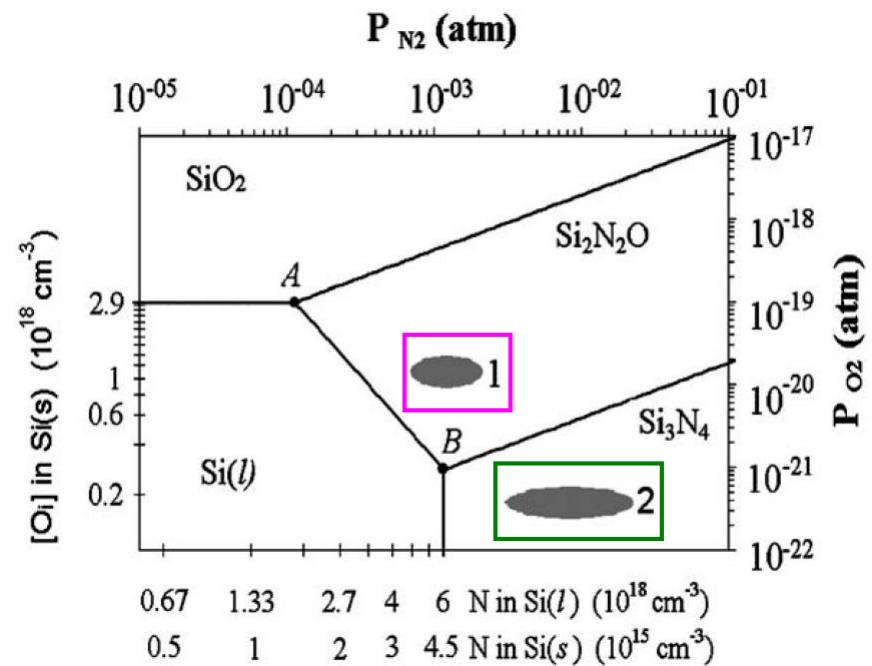
Impurity reaction & transfer

Desolve impurity



- 1) A.K. Søiland et al., Mater. Sci. Semicond. Proc. **7** (2004) 39.
 2) H. Matsuo et al., J. Crystal Growth **310** (2008) 4666.

Si(*l*)-N-O Phase diagram³⁾

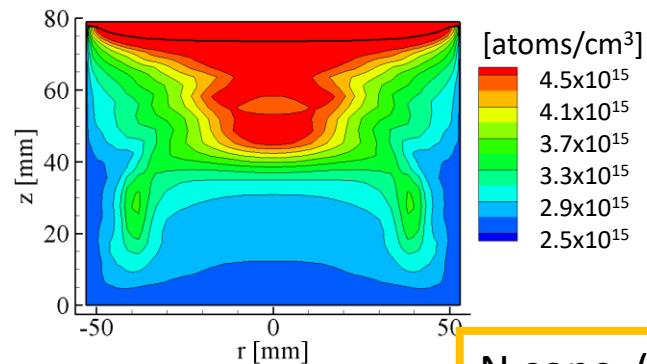
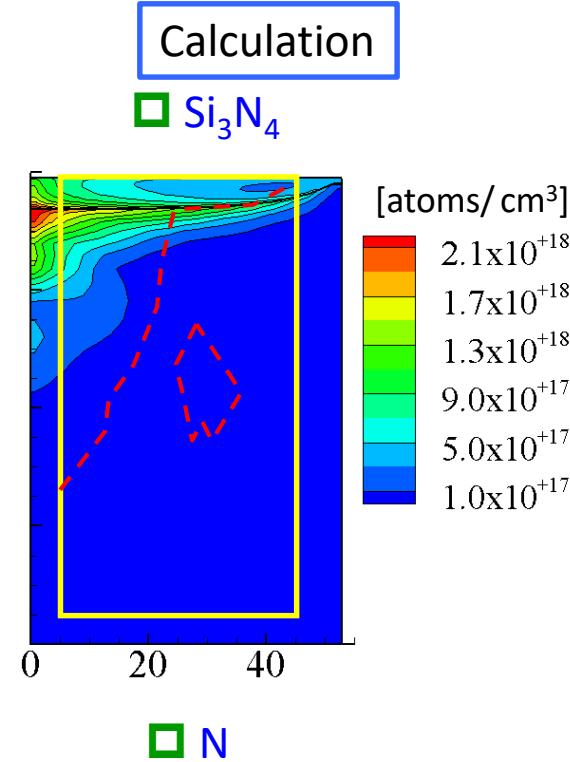
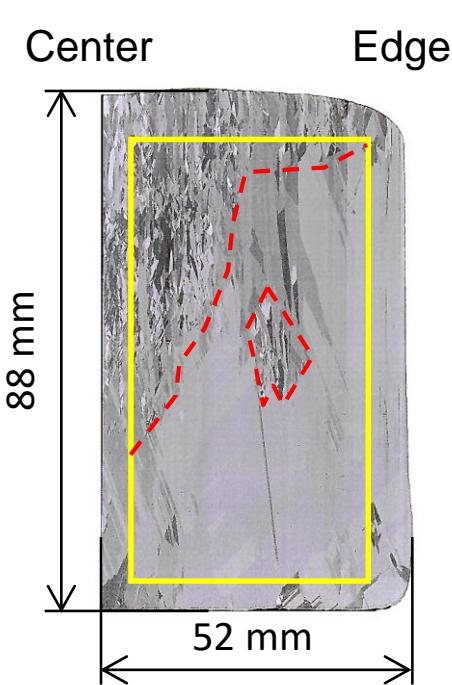


- 1) $2Si(l) + 2\underline{N} + \underline{O} \rightarrow Si_2N_2O$
 2) $3Si(l) + 4\underline{N} \rightarrow Si_3N_4$

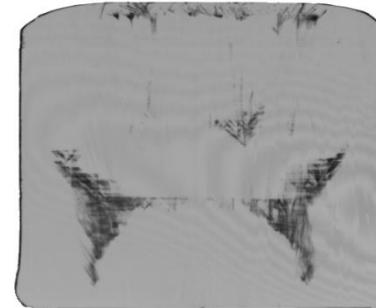
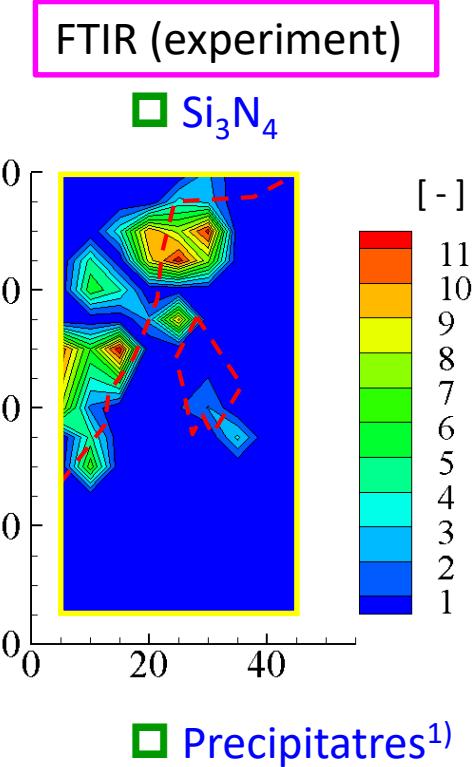
- 3) J. Lu et al., J. Crystal Growth **269** (2004) 599.

Impurity distribution \Rightarrow Time dependent calculation

Si₃N₄ Distribution



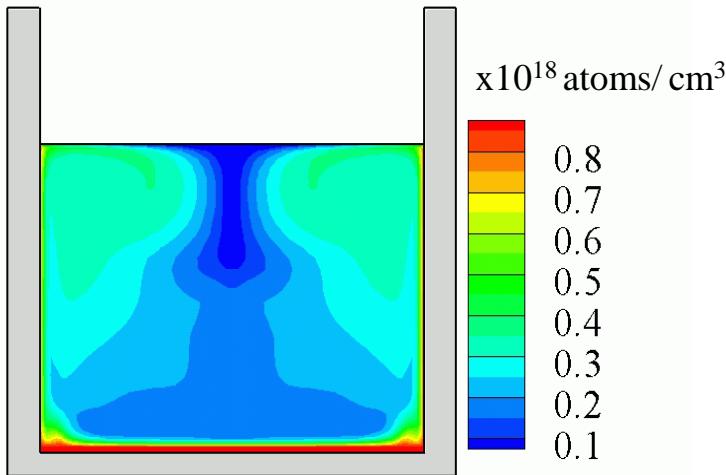
N conc. (Max): 7.5×10^{15} atoms/cm³



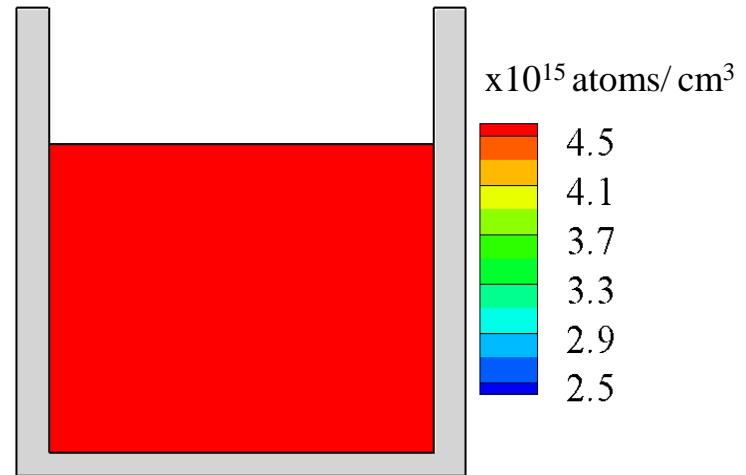
1) H. Harada, et al., private communication.

Time evolution of distributions of O, N, $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$, Si_3N_4 , and precipitates

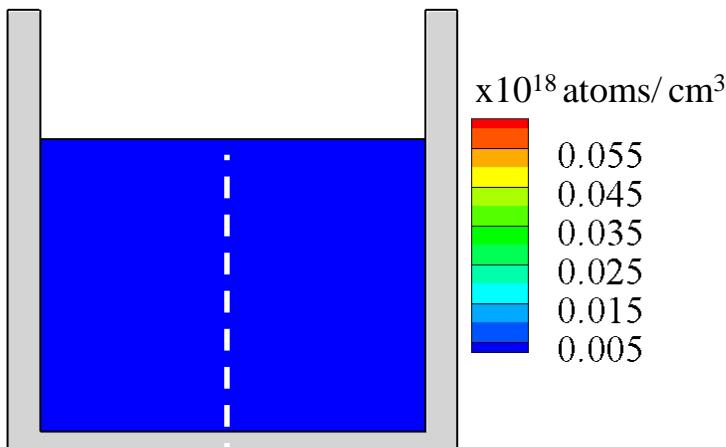
Oxygen distribution



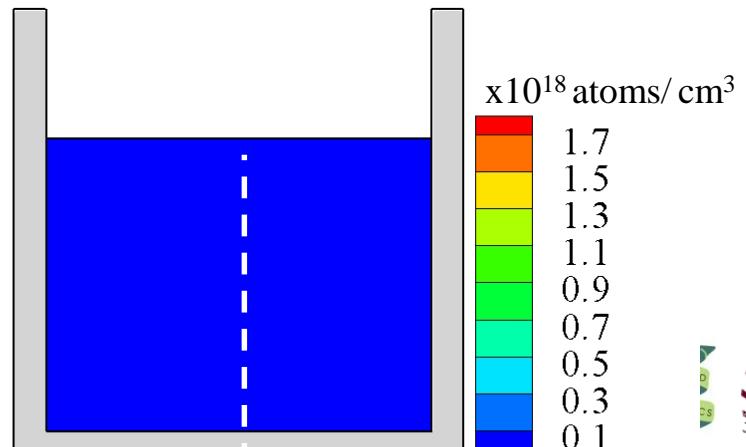
Nitrogen distribution



$\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ precipitation

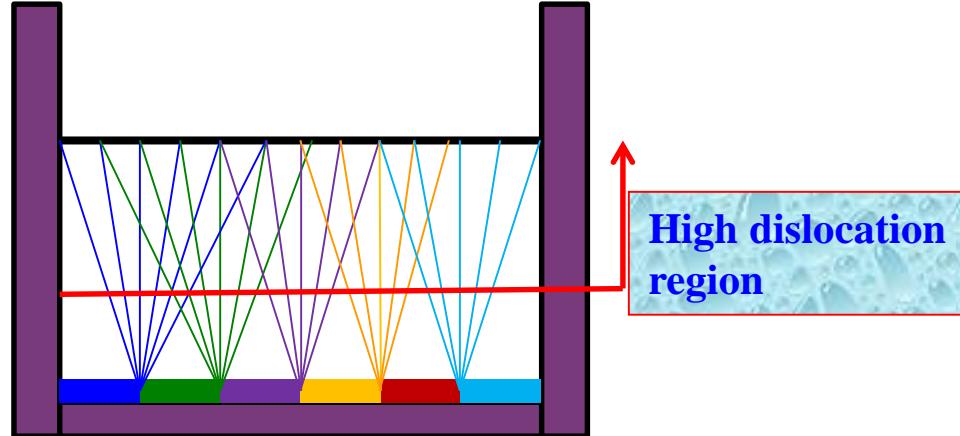


Si_3N_4 precipitation



Progress: seed casting

Multi-seed method



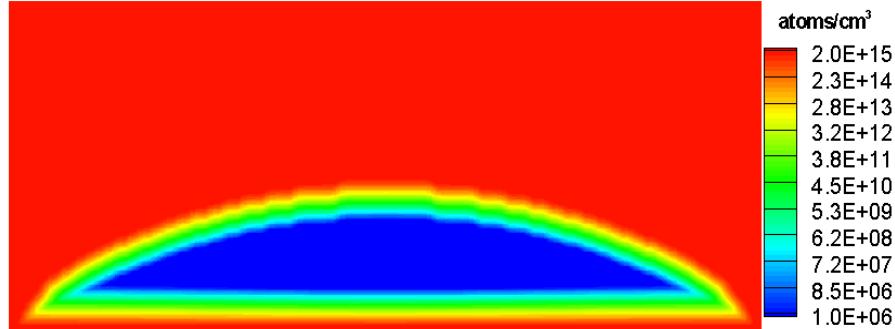
- Dislocation can generates between the seeds, and could explosively multiply when crystal grows up.
- Crystallization process could be broken by high dislocation at top.
- High cost for multiple seeds

Objective:

- Propose new method to grow complete single-Si in whole ingot by seed casting

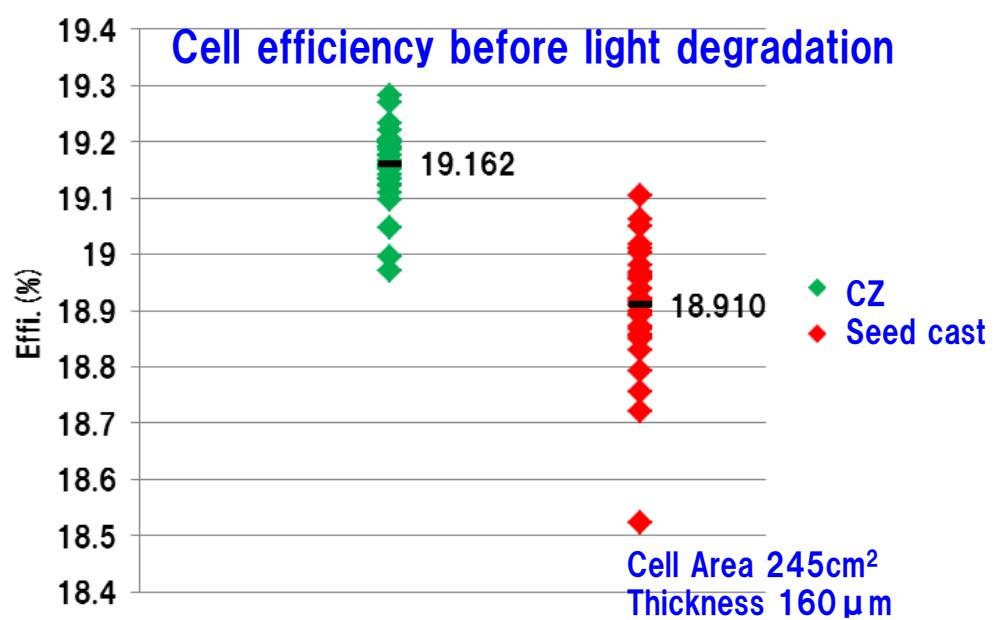
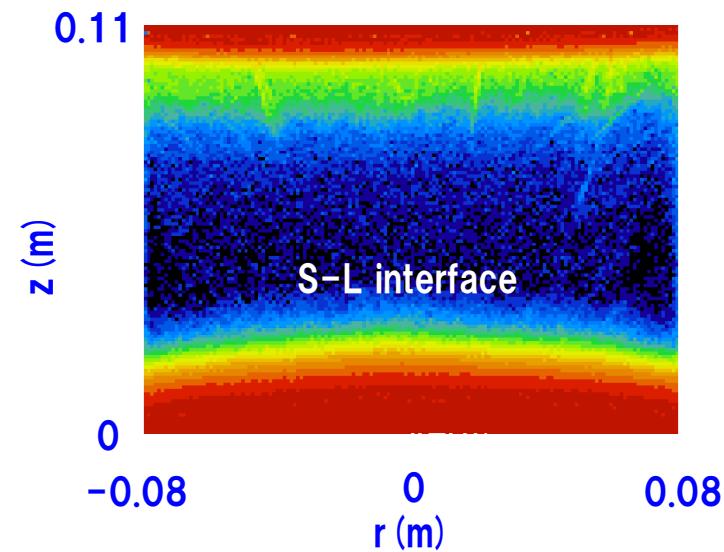
Single Seed Cast method of Si

Numerical analysis: Kyushu Univ.



Iron concentration inside crystal

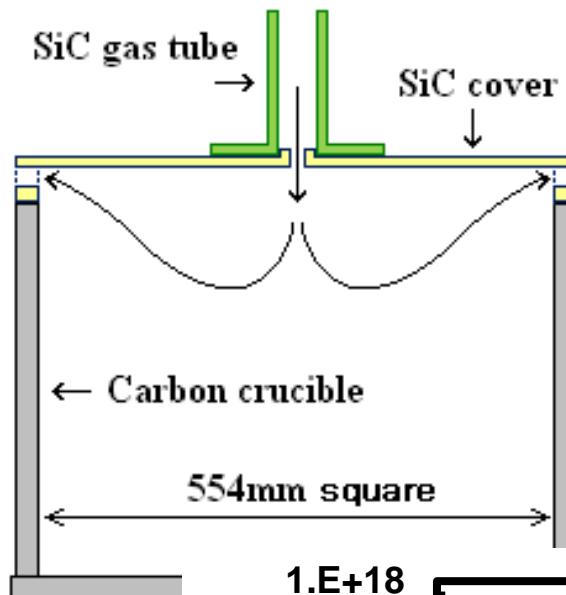
Seed Cast: Kyocera



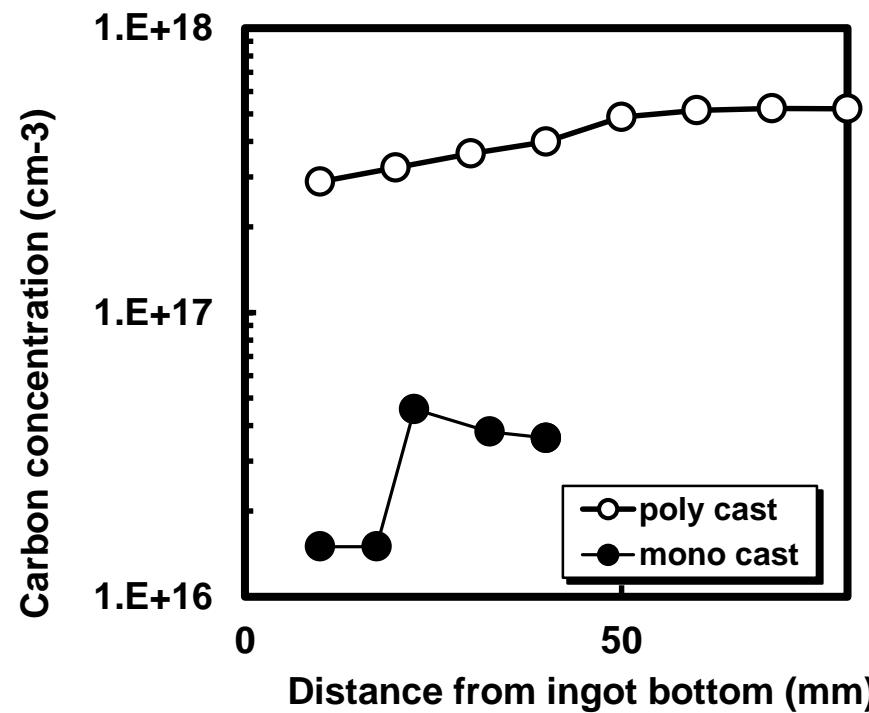
Seed cast: 19%, No light degradation

CZ-Si: 19%, Light degradation

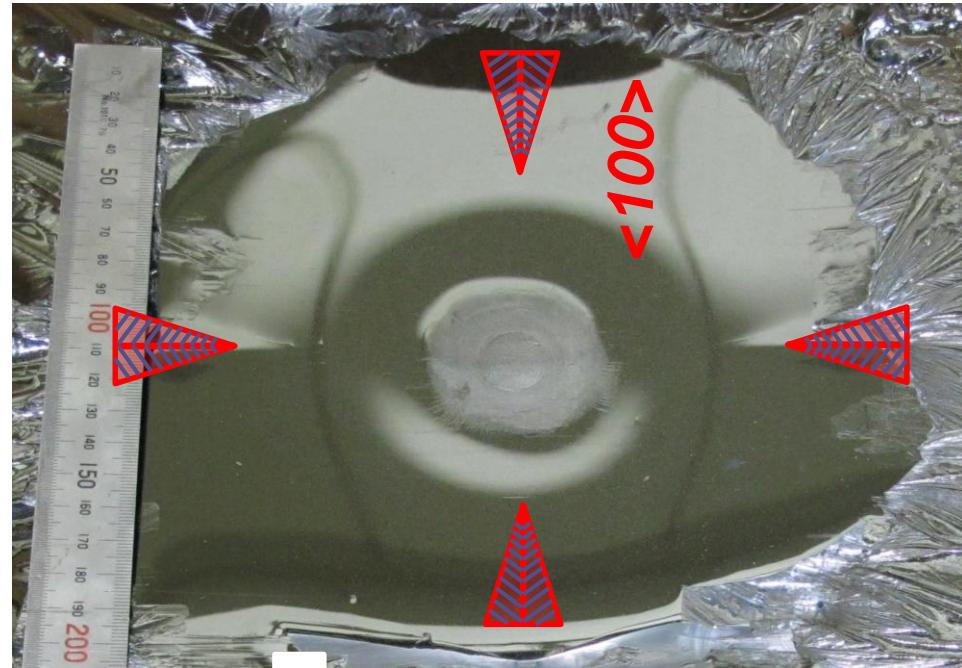
Improved furnace for C reduction



**Carbon
reduction
cover**

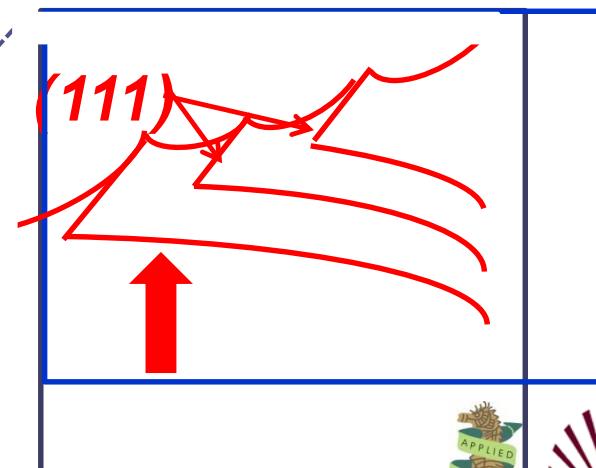
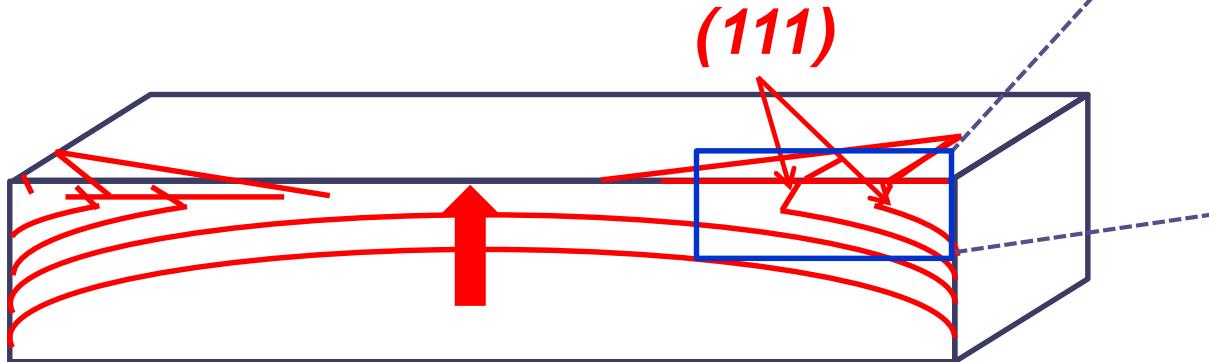


Improved crystal surface



Conventional surface

$\Rightarrow SiC, Si_3N_4$



50cm² Si ingot grown by seed cast

Seed cast

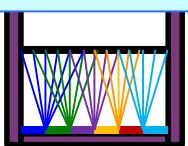
Lab. scale: 10cm Φ



50cm \square



Multi-seed



Single seed

Expand growth

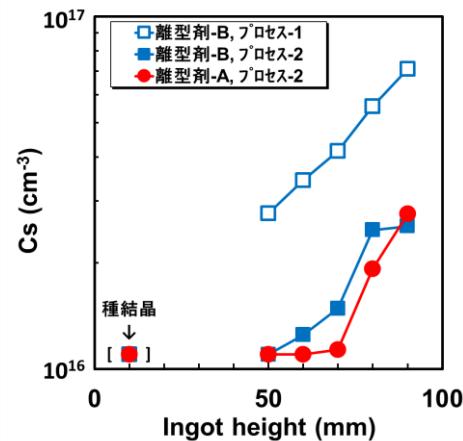


50 cm \times 50 cm \times 10 cm (60kg)

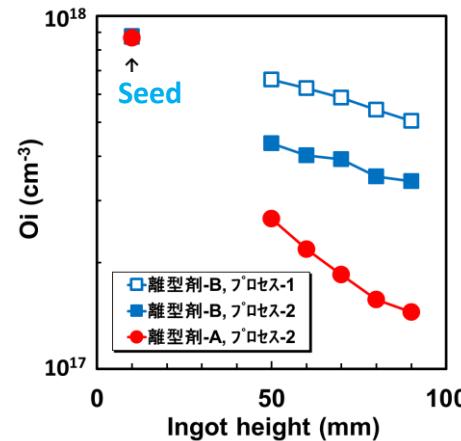
Miyamura et al., JSAP
(2015)

Collab. : Toyota Institute,
Kyocera

Carbon



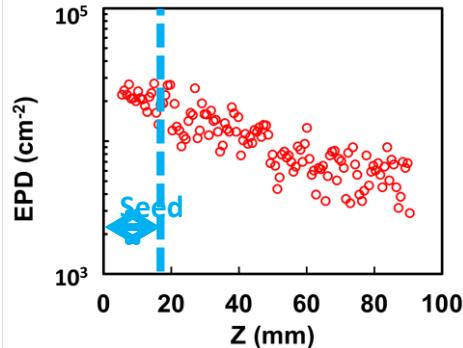
Oxygen



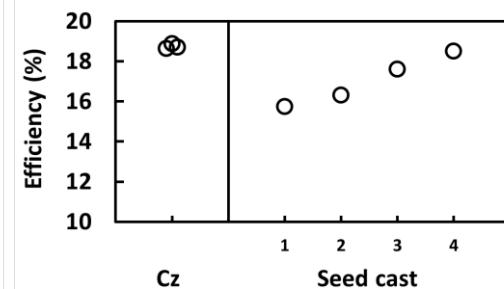
Gas flow: Low carbon

Rev. of coating: Low oxygen

Dislocation



Efficiency



Dislocation <3 × 10⁴ /cm²

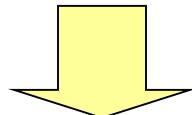
~CZ

Naフラックス法; GaN

成長条件

Ga-Na溶液: 1073K
窒素: 30気圧

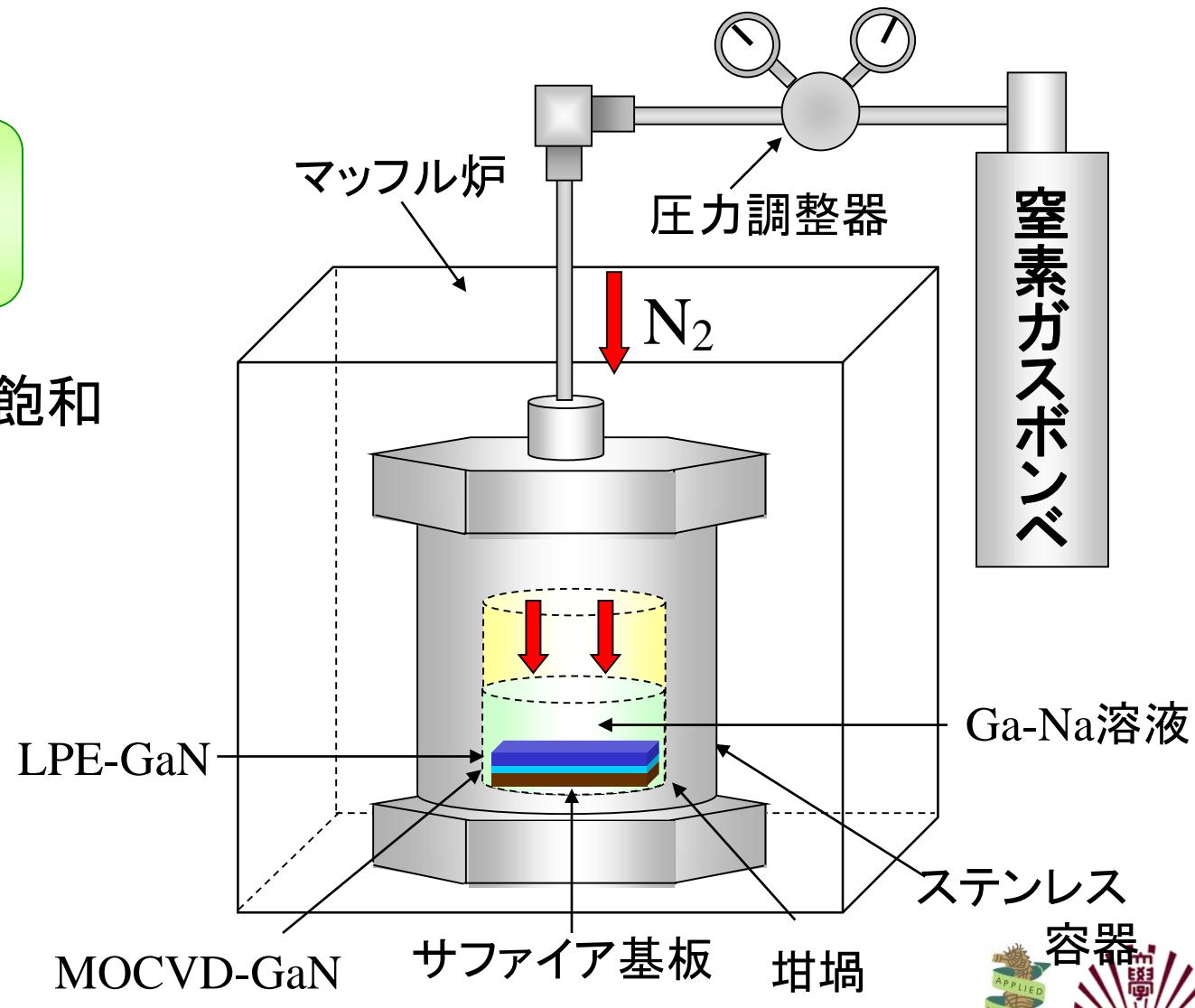
- 溶液内で窒素の過飽和



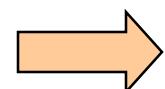
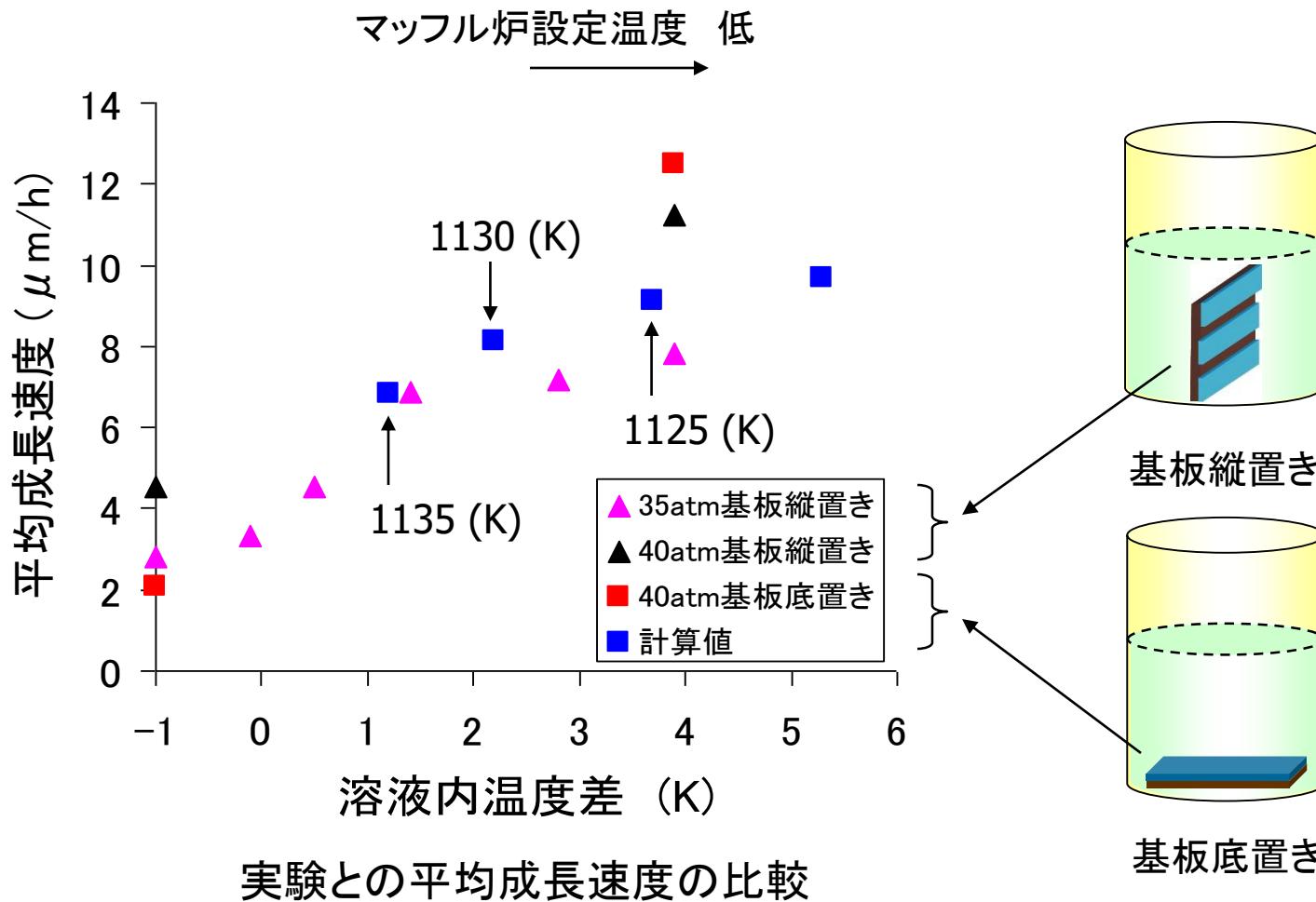
GaN結晶が成長



@ 大阪大学 森研究室



実験との平均成長速度の比較

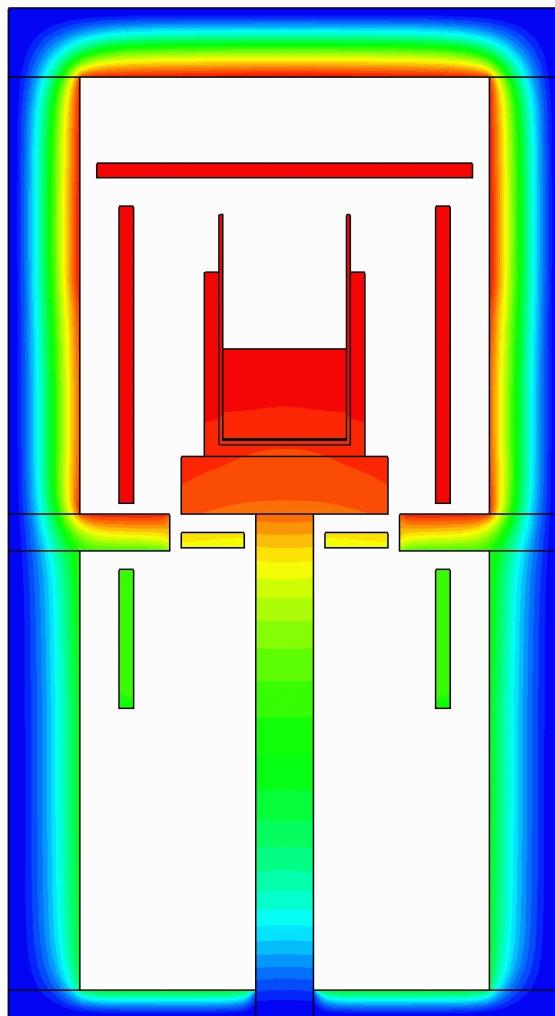


半定量的に一致

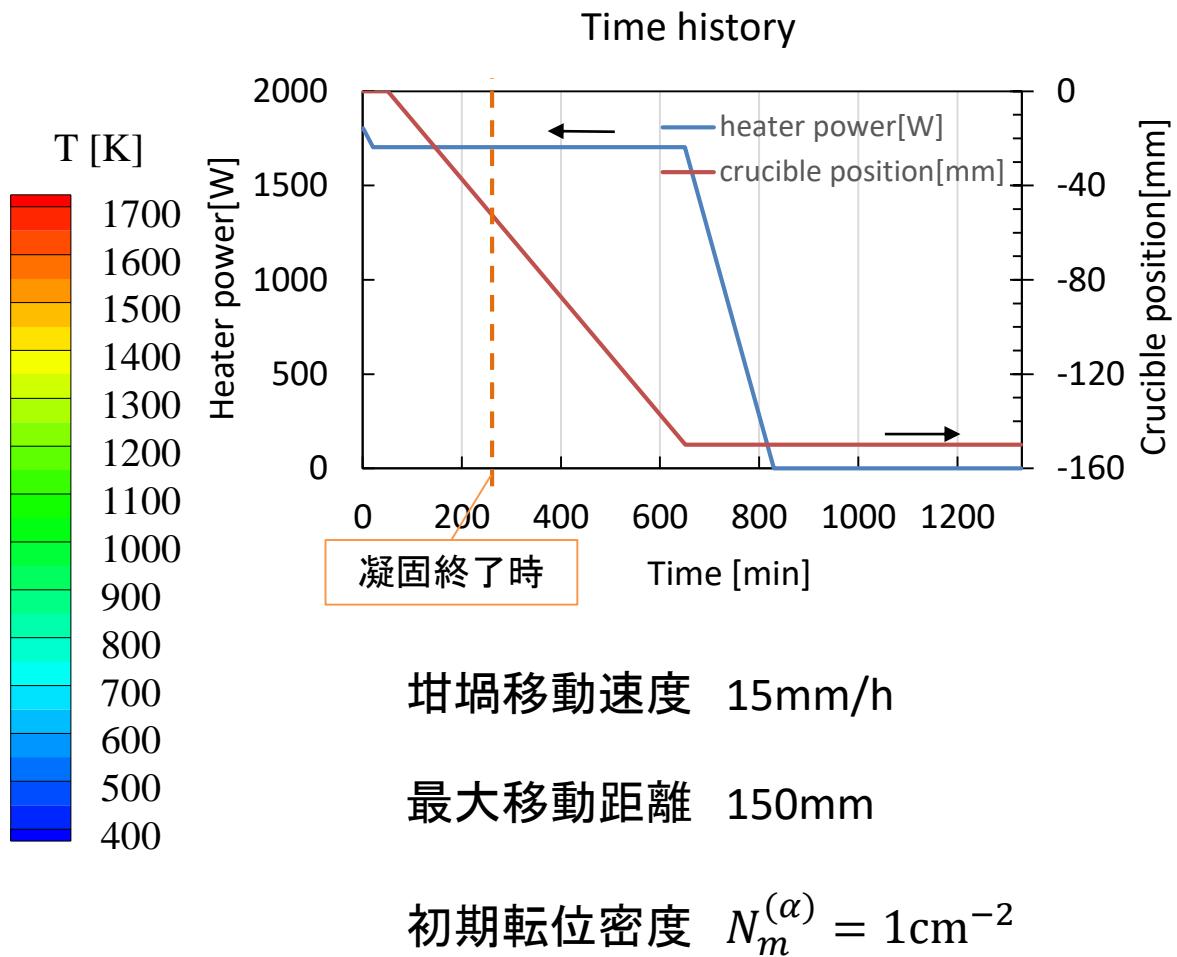


Si一方向性凝固

47



垂直ブリッジマン法

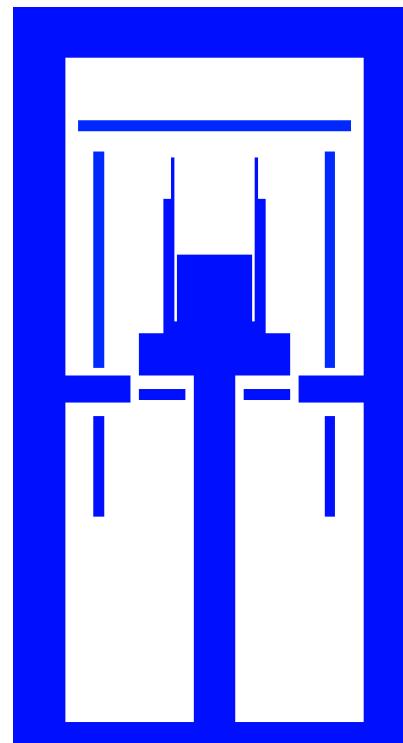
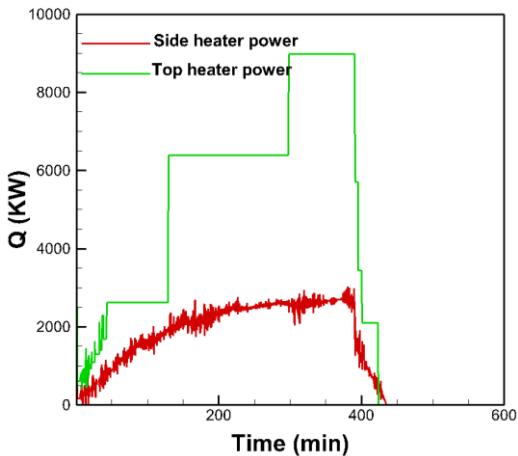
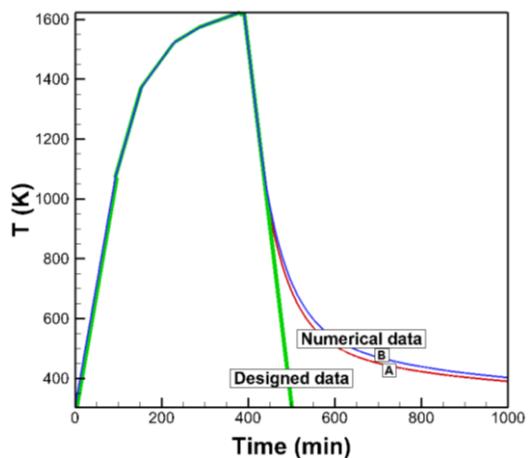


計算仮定

- ・多軸応力状態
- ・異方性
- ・2次元軸対称
- ・単結晶

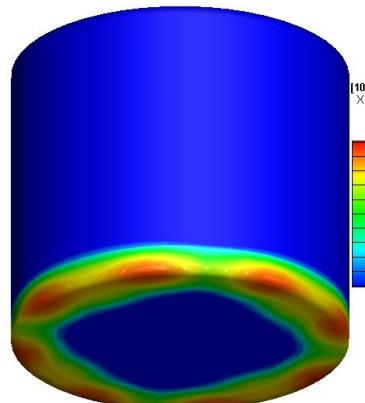


Inverse problem: Si (Temp. impose)

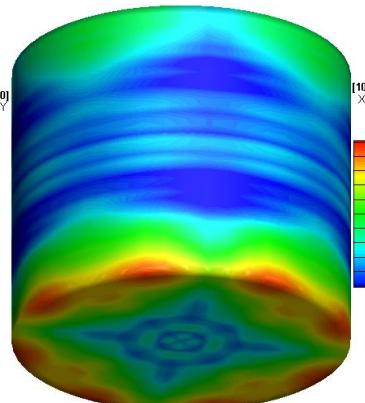


T (K)
1700
1560
1420
1280
1140
1000
860
720
580
440
300

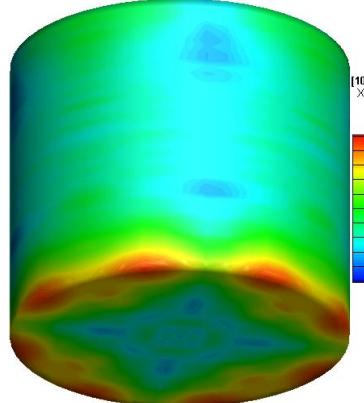
$T_{\text{monit}} = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$



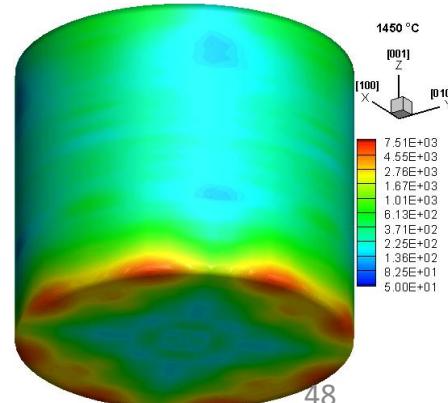
$T_{\text{monit}} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{monit}} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$

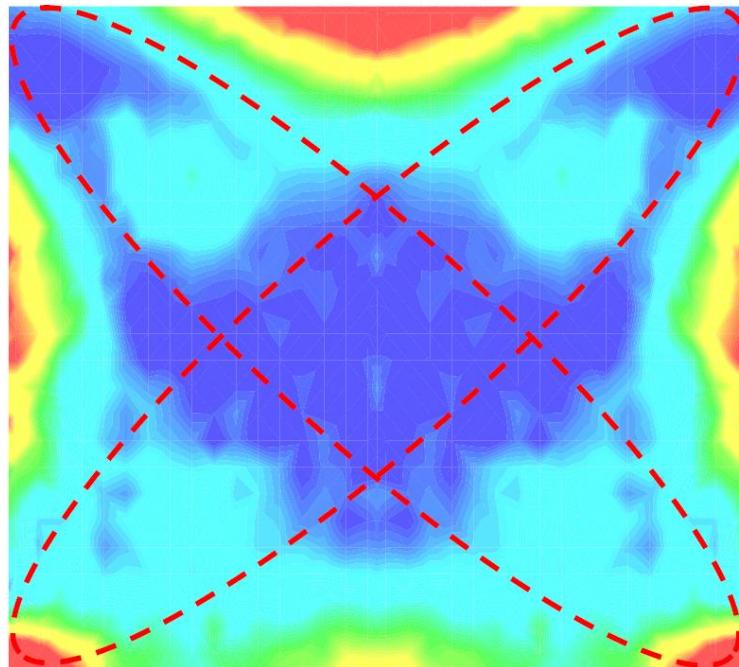


$T_{\text{monit}} = 1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

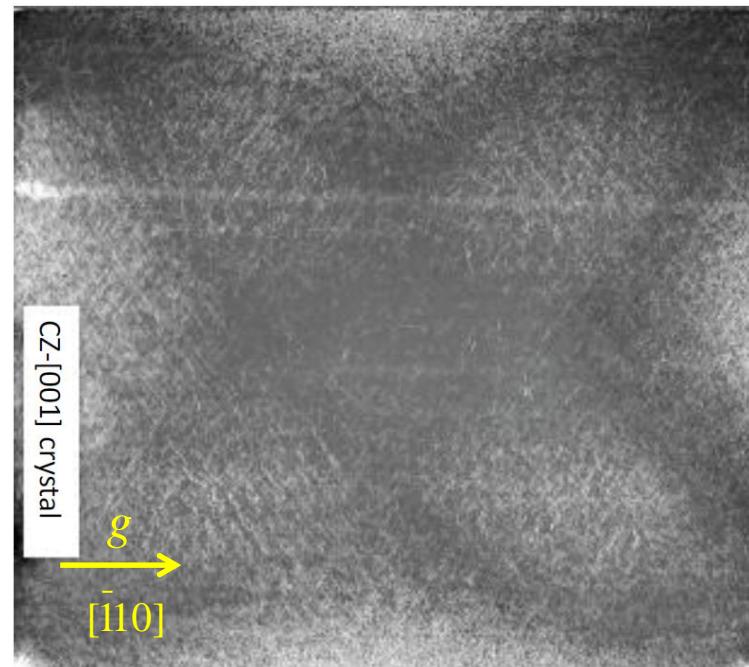


Numerical & Experimental

Dislocation-density distribution



(a) Simulation



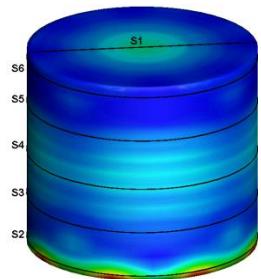
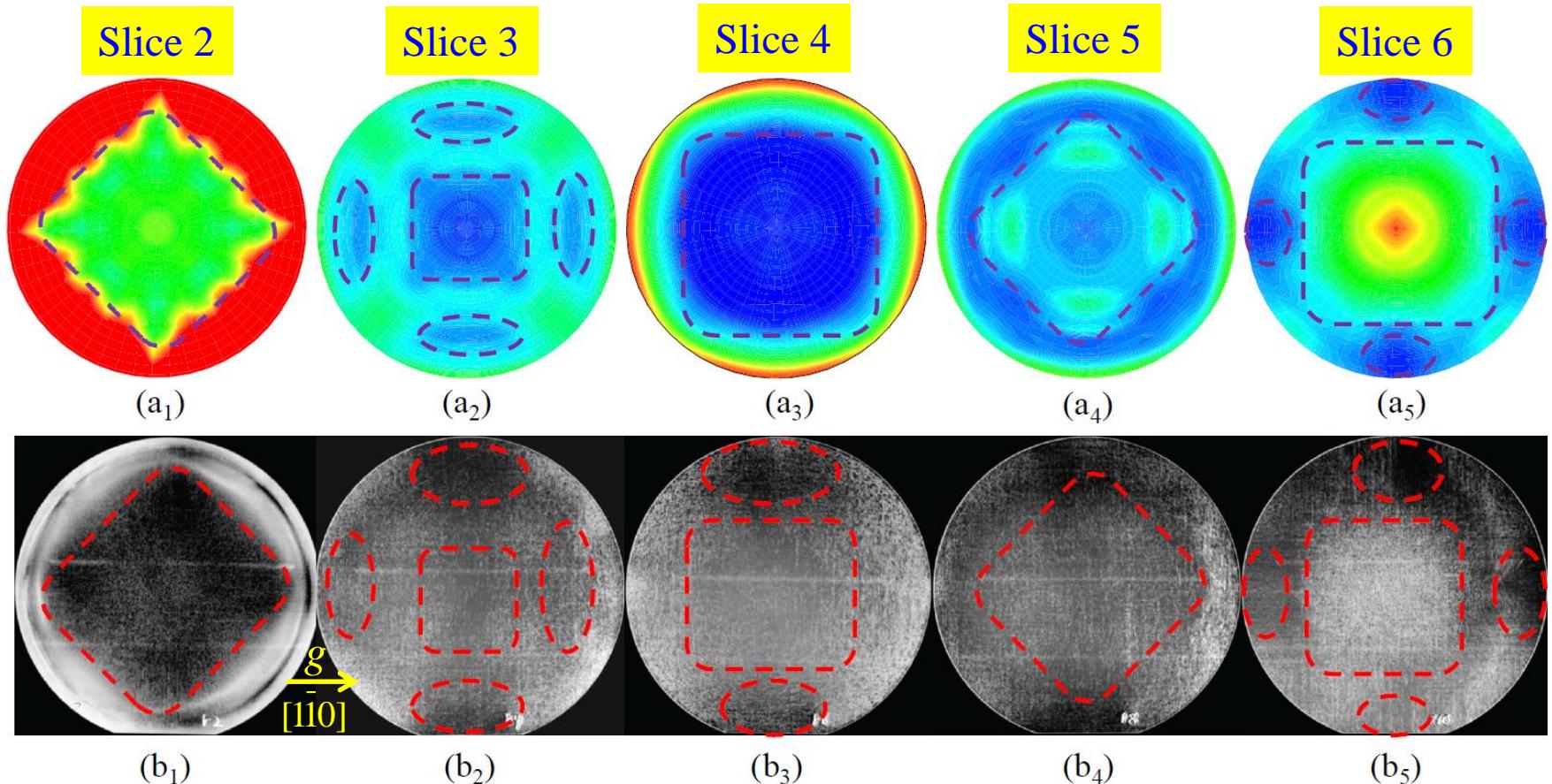
(b) Experiment

Both show high dislocation-density at

- two corners of bottom, center of both ends, middle of side surface;
- two diagonals near four corners

Numerical data agrees well with experiment.

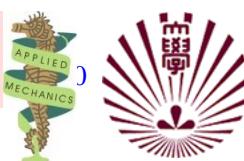
Exp. & Numerical results



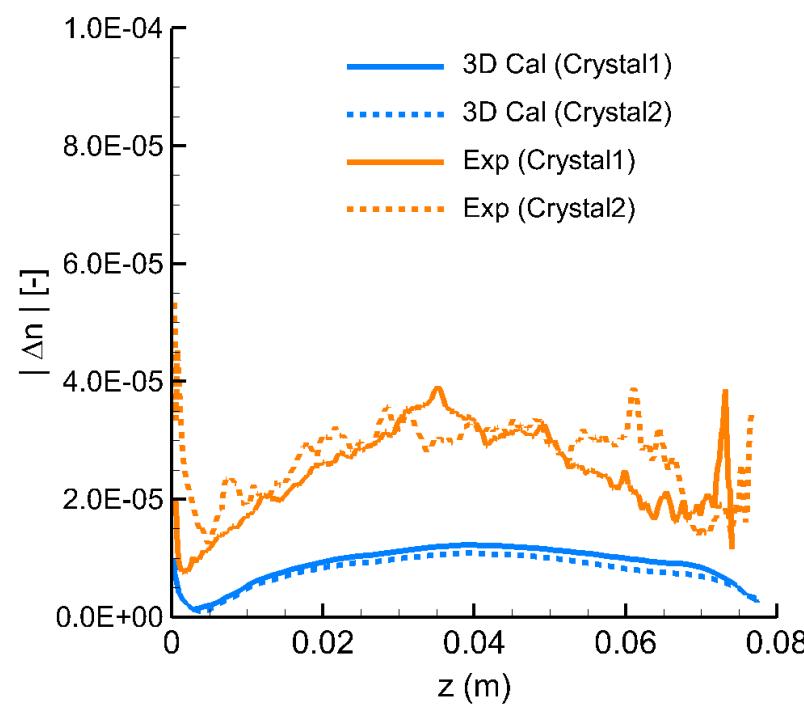
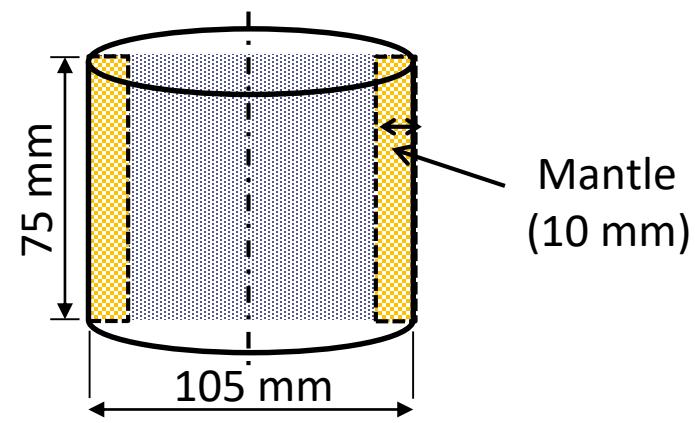
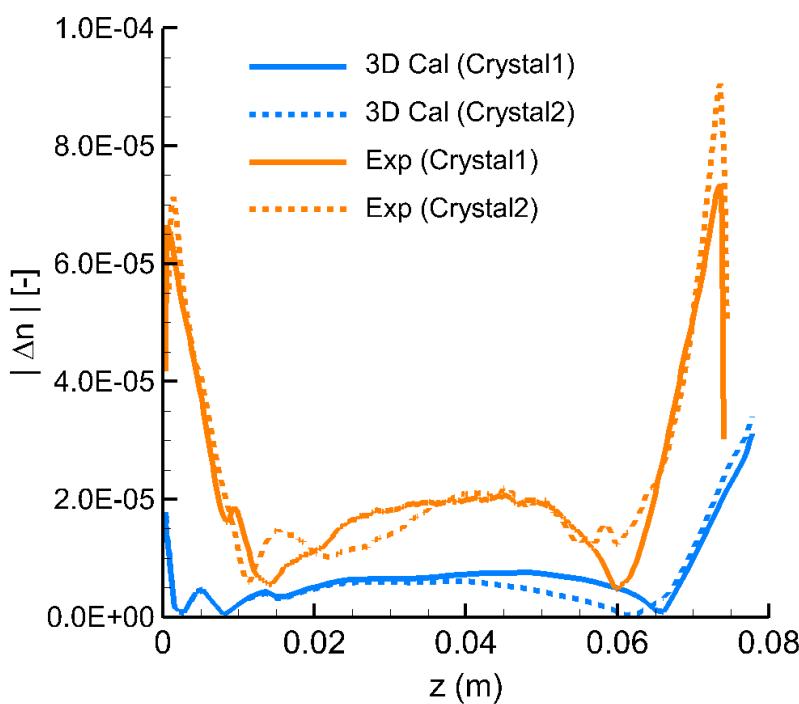
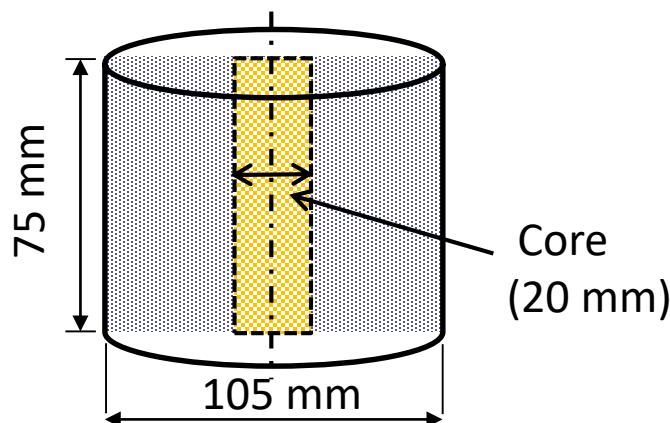
Both show a

- decrease-increase-decrease variation around edge
- Rectangle rotation in the interior of slice

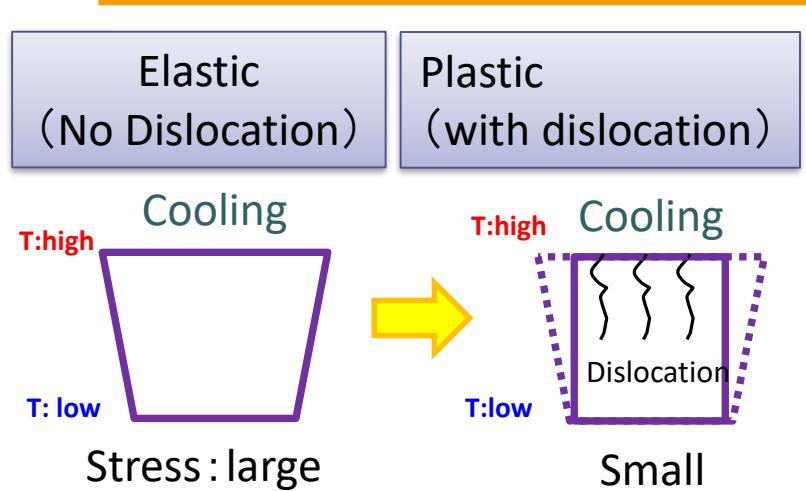
Numerical data almost agrees with experiments



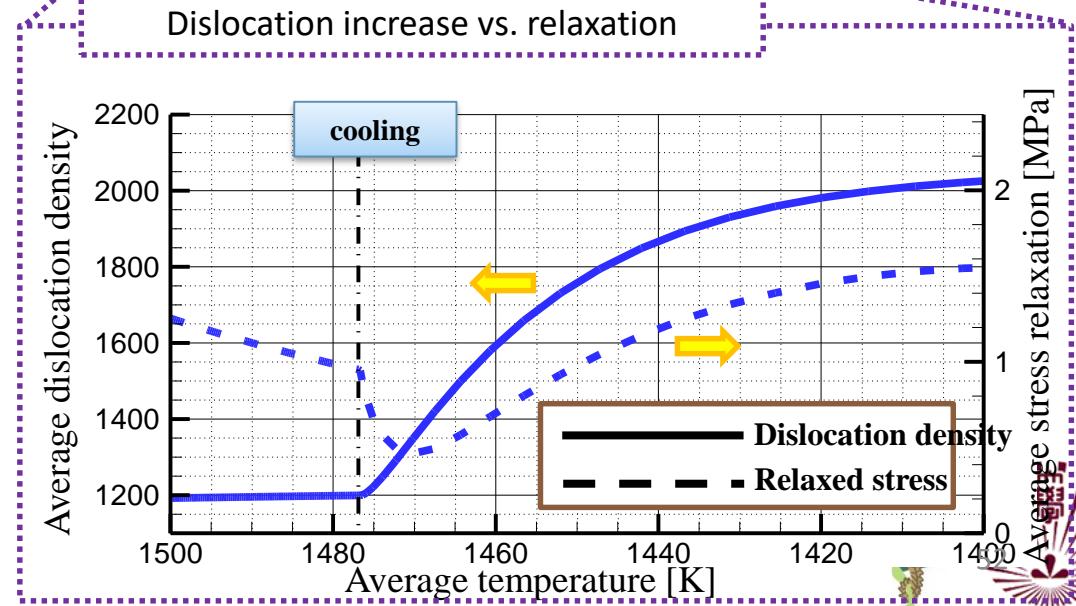
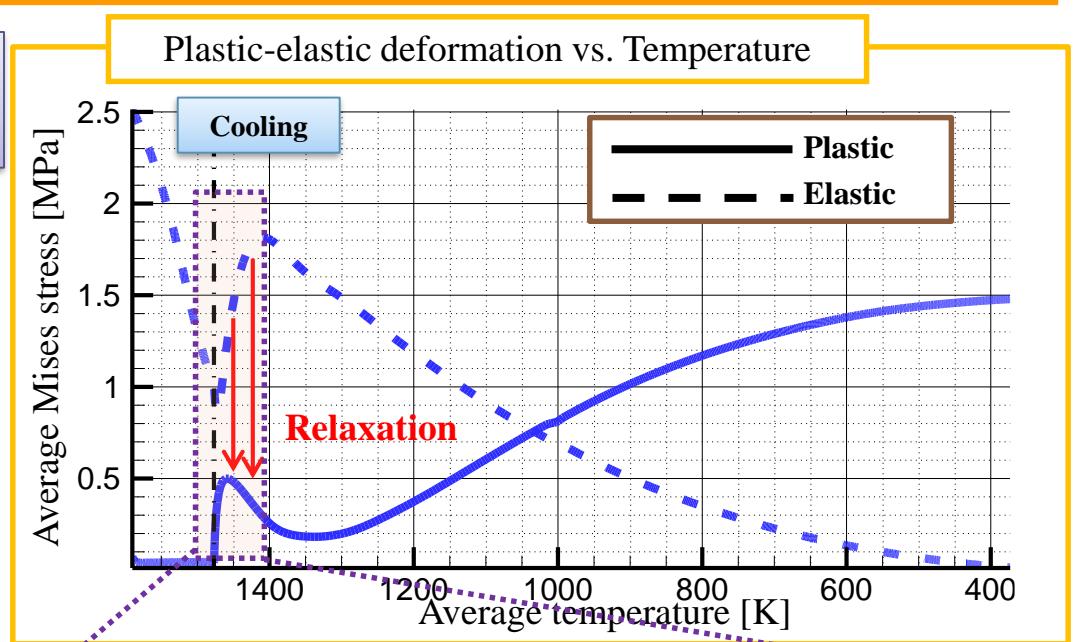
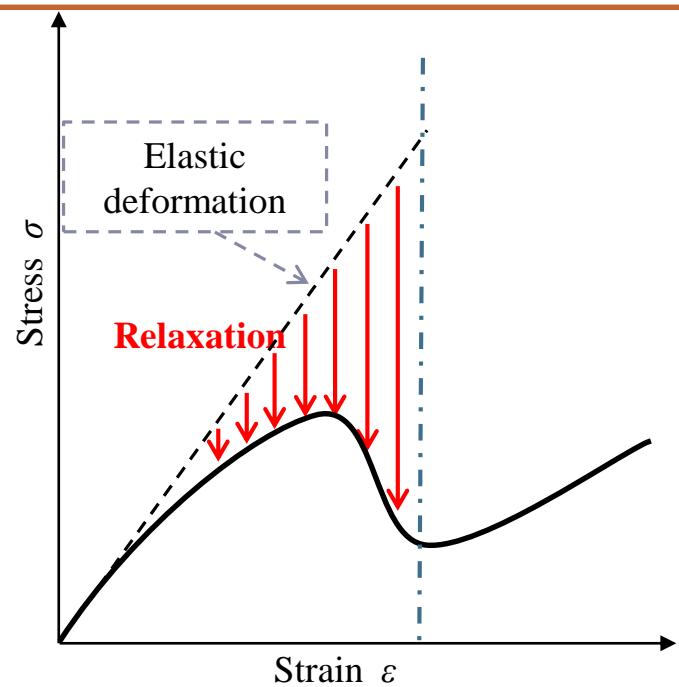
Strain distributions along z-axis at R.T.



Dislocation density vs. Stress relaxation



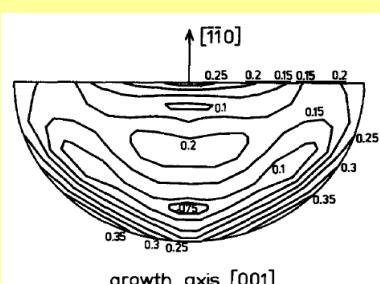
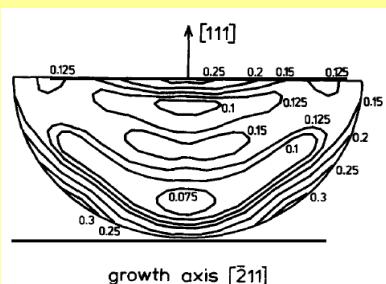
Stress-Strain Curve (Constant strain rate)



Growth orientation dependence of dislocations

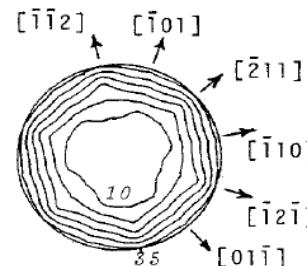
Dobrocka^[1], J. Cryst. Growth, 104 (1990) 428.

- ✓ [211] growth gives minimum total resolved shear stress
- ✓ [001] growth gives maximum total resolved shear stress

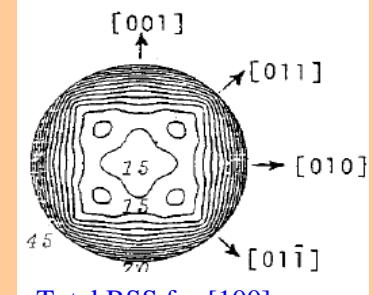


Iwaki and Kobayashi^[2], J. Cryst. Growth, 82 (1987) 335.

- ✓ [111] growth gives minimum total resolved shear stress



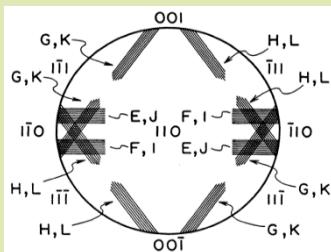
Total RSS for [111]
growth



Total RSS for [100]
growth

Kitano and Matsui^[3], Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) L740.

- ✓ [110] growth gives minimum dislocation generation



[1] E. Dobrocka, J. Cryst. Growth 104 (1990) 428.

[3] T. Kitano, J. Matsui, Jpn. J. App. Phys 27 (1988) L740.

The conclusions are obviously inconsistent
with each other.

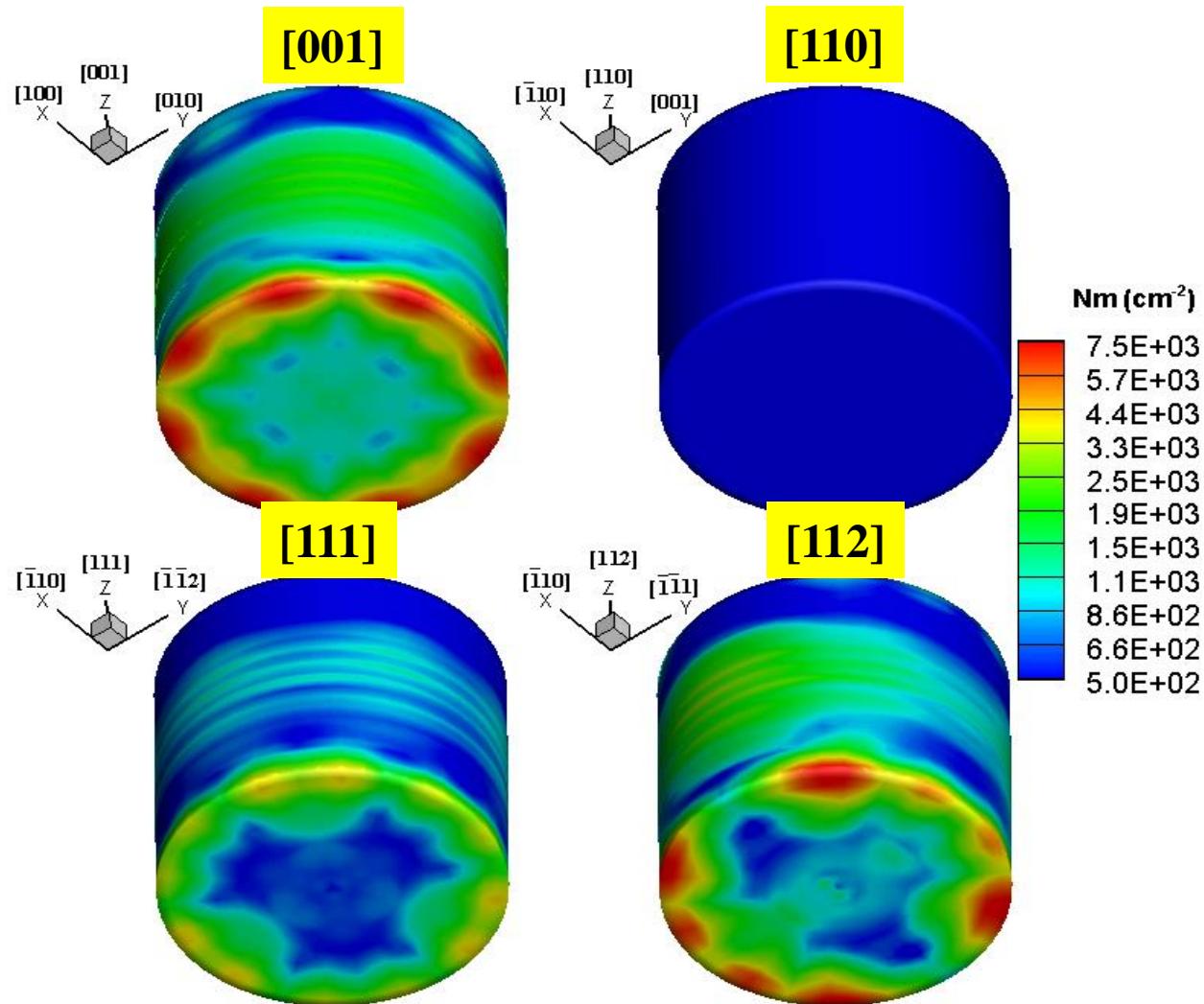


Effect of growth orientation on dislocation
generation deserves further investigation.

[2] T. Iwaki, N. Kobayashi, J. Cryst. Growth 82 (1987) 335.



Dislocation distribution on the surface of ingot



$$N_{\max}^{[001]} = 7900 \text{ cm}^{-2}$$

$$N_{\max}^{[112]} = 8300 \text{ cm}^{-2}$$

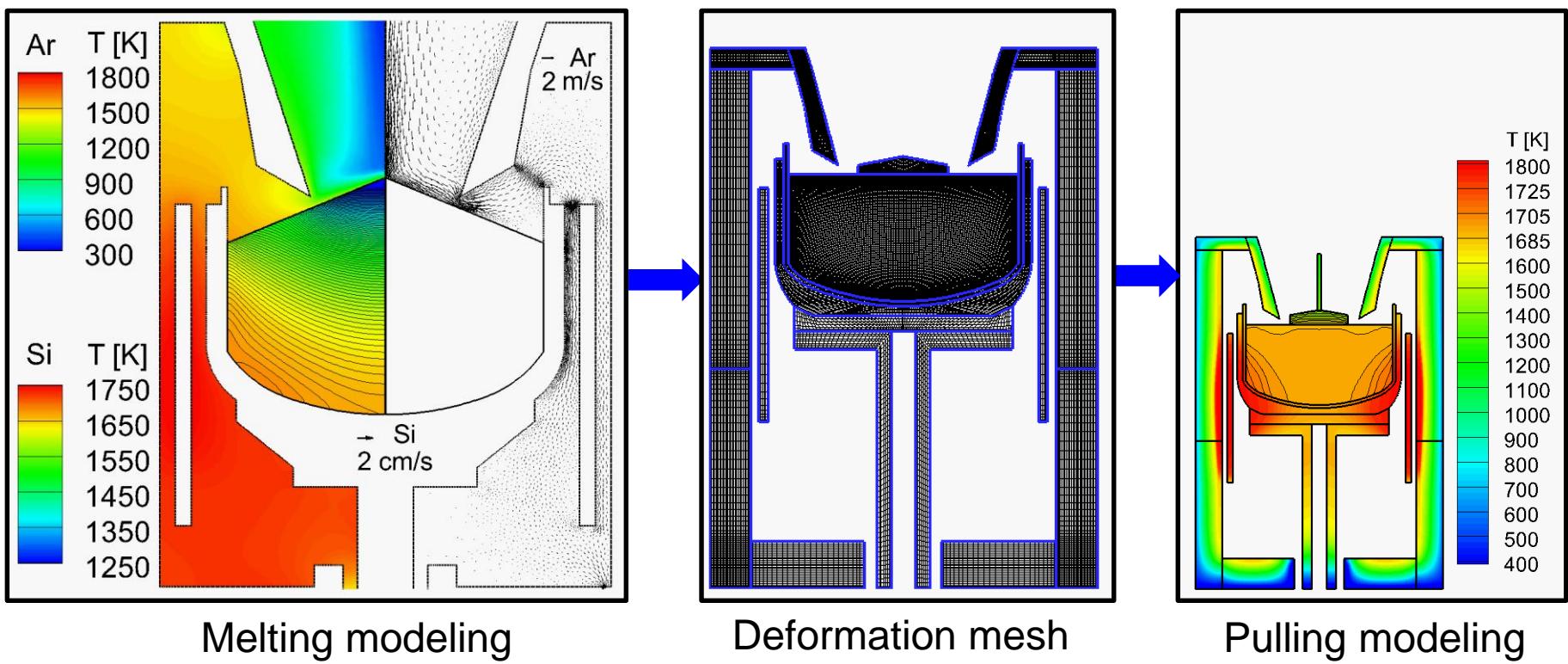
$$N_{\max}^{[111]} = 4300 \text{ cm}^{-2}$$

$$N_{\max}^{[110]} = 17 \text{ cm}^{-2}$$

- [110] growth produces the lowest dislocations
- [112] growth produces the highest dislocations
- [111] growth can reduce dislocations by almost 50% compared to [001] or [112] growth



Dynamic pulling modeling



Melting modeling

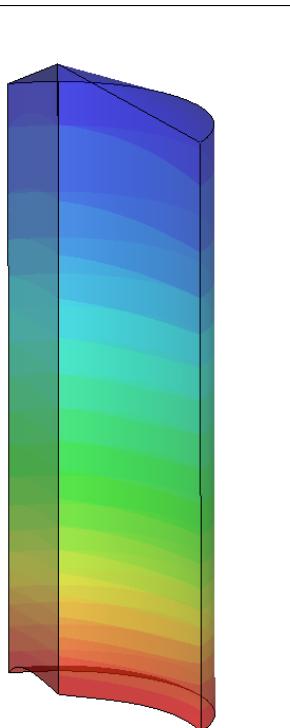
Deformation mesh

Pulling modeling

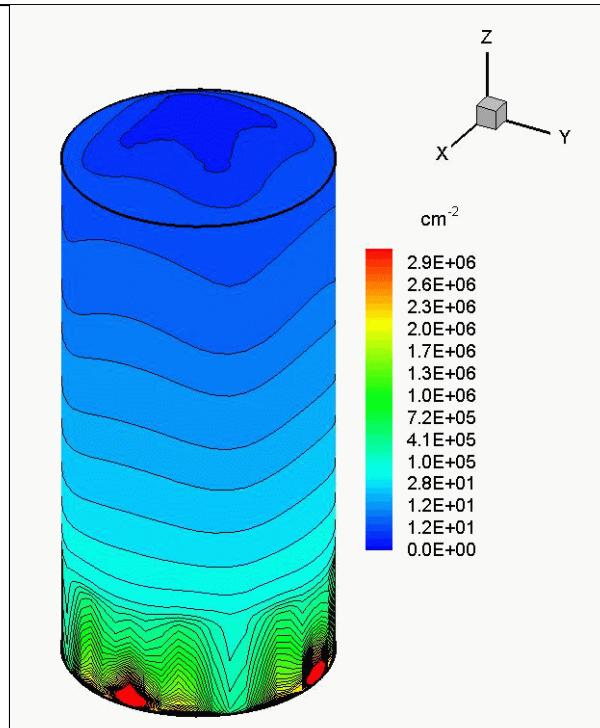
Remeshing must be realized for puling crystal with fix melt level and mesh quality.

Dislocation density: 300mm & Particle incorporation

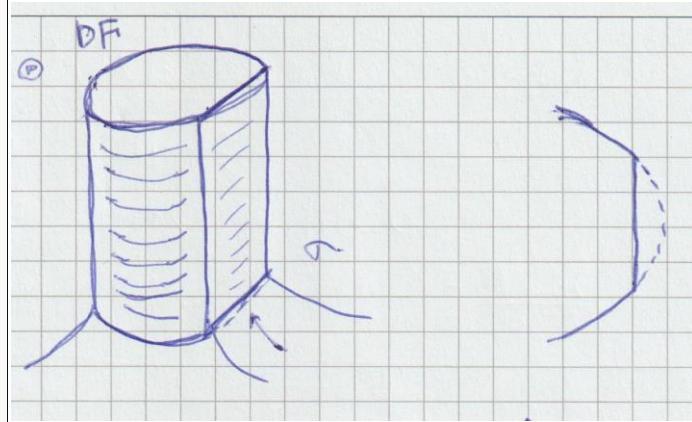
Temperature



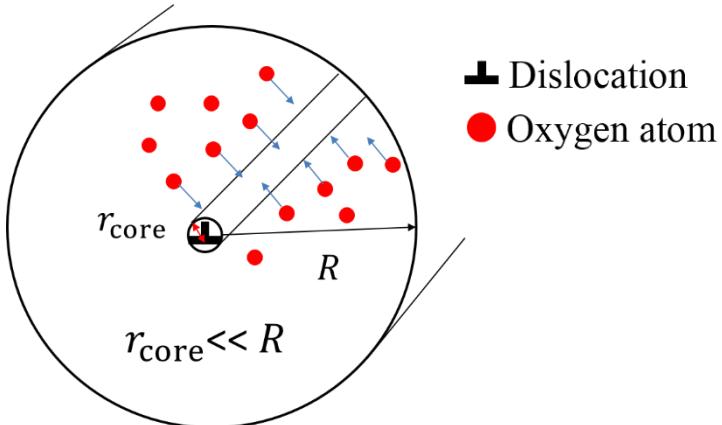
Dislocation density (3sec)



Particle incorporation



転位計算モデル (酸素拡散モデル)



転位芯に集まる酸素原子の流束

$$\Delta atoms = D_O \frac{C_{O_1}^p - C_{O_0}^p}{\Delta r} \times 2\pi r_{core}$$

Flux Surface area

酸素濃度増加速度

$$\Delta C_{O_{core}} = \frac{\Delta atoms}{\pi r_{core}^2}$$

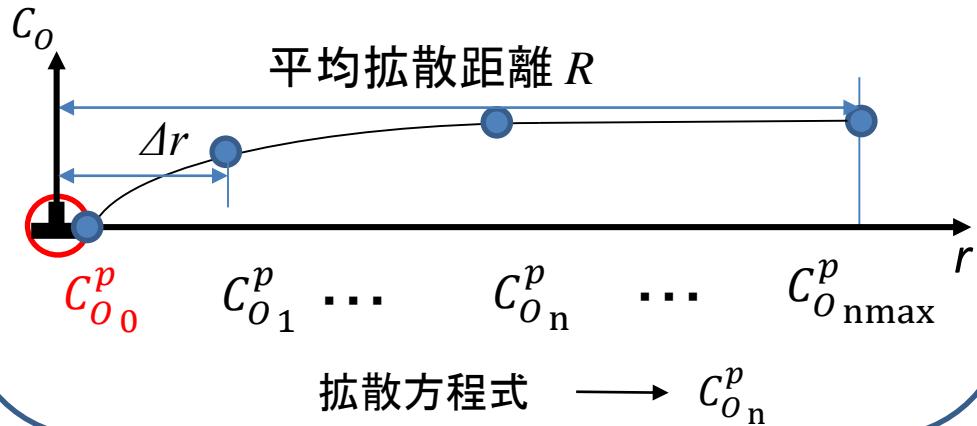
転位に固着した酸素濃度

$$C_{O_{core}}^{p+1} = C_{O_{core}}^p + \Delta C_{O_{core}}^p \times \Delta t$$

拡散方程式

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = D_O \left(\frac{\partial^2 C_O}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_O}{\partial r} \right)$$

$$D_O = 0.13 \exp(-2.53/k_b T) \text{ cm}^2/\text{s}$$



$$r_{core} = 5b = 1.9 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$R = 4.0 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$C_O(r, 0) = C_{O_{crystal}} \text{ atoms/cm}^3$$

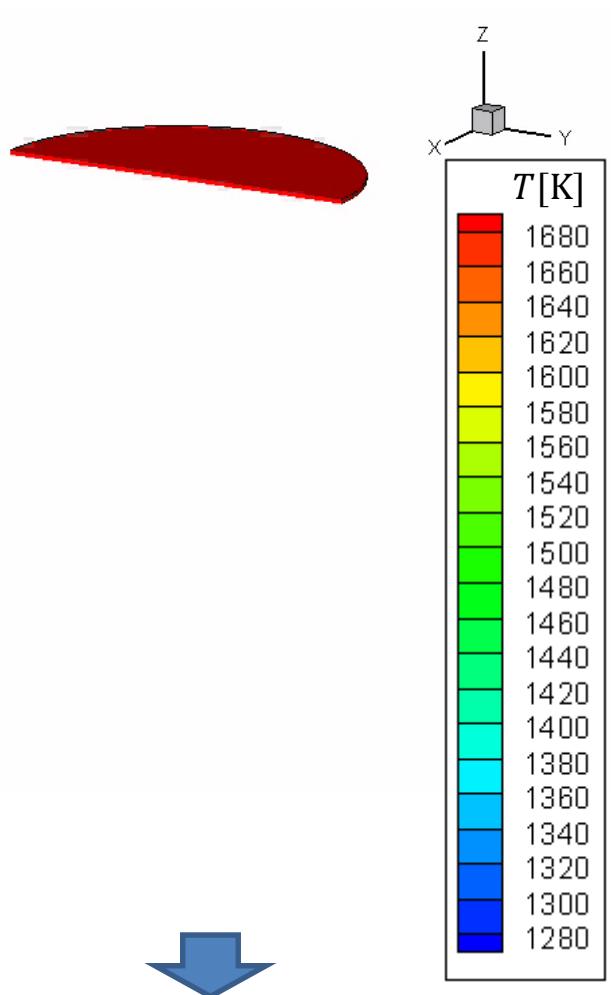
$$C_O(r_{core}, t) = (\text{Oxygen solubility})$$

$$C_O(R, t) = C_{O_{crystal}} \text{ atoms/cm}^3$$

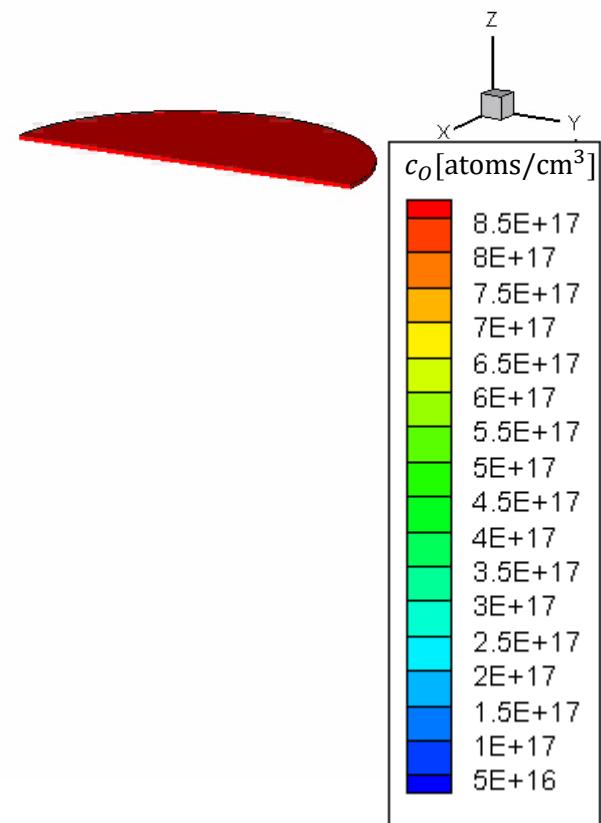


転位計算モデル (温度、酸素濃度)

温度分布



酸素濃度分布



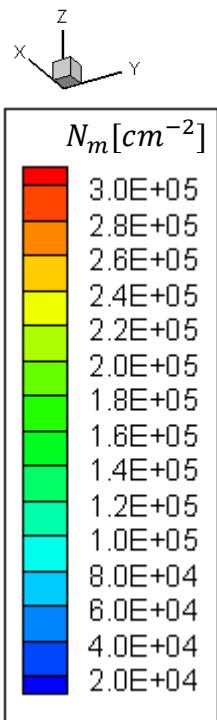
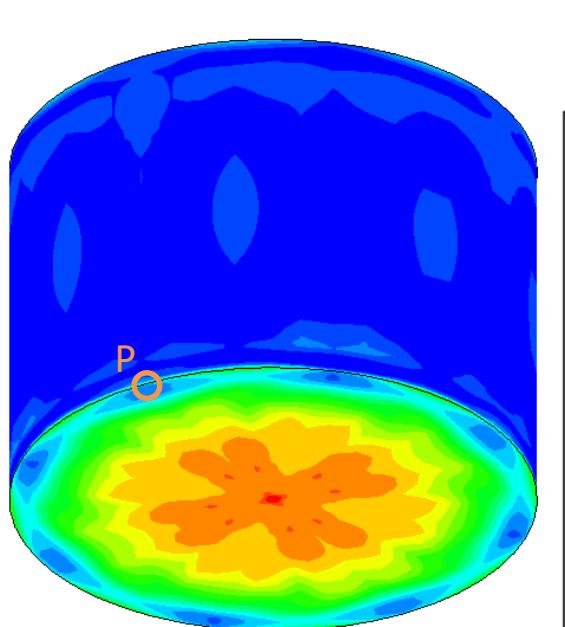
3次元の非定常転位密度計算に組み込む



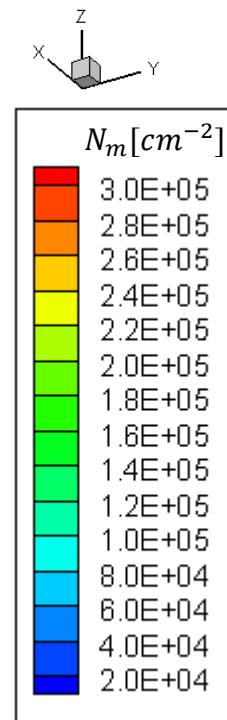
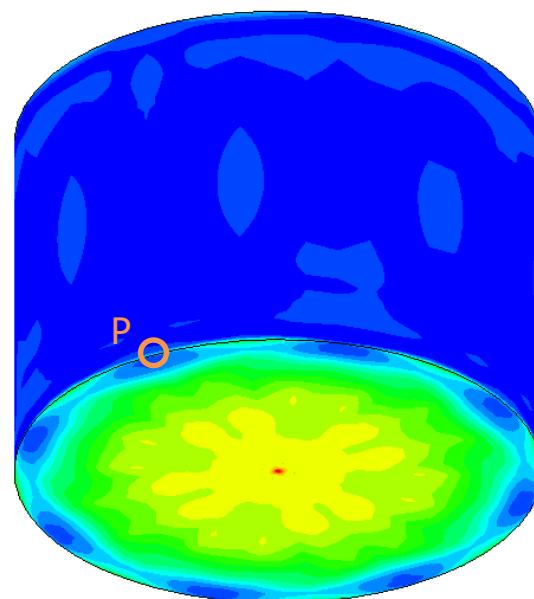
冷却過程

結晶の3次元転位密度分布(室温時)

酸素拡散非考慮



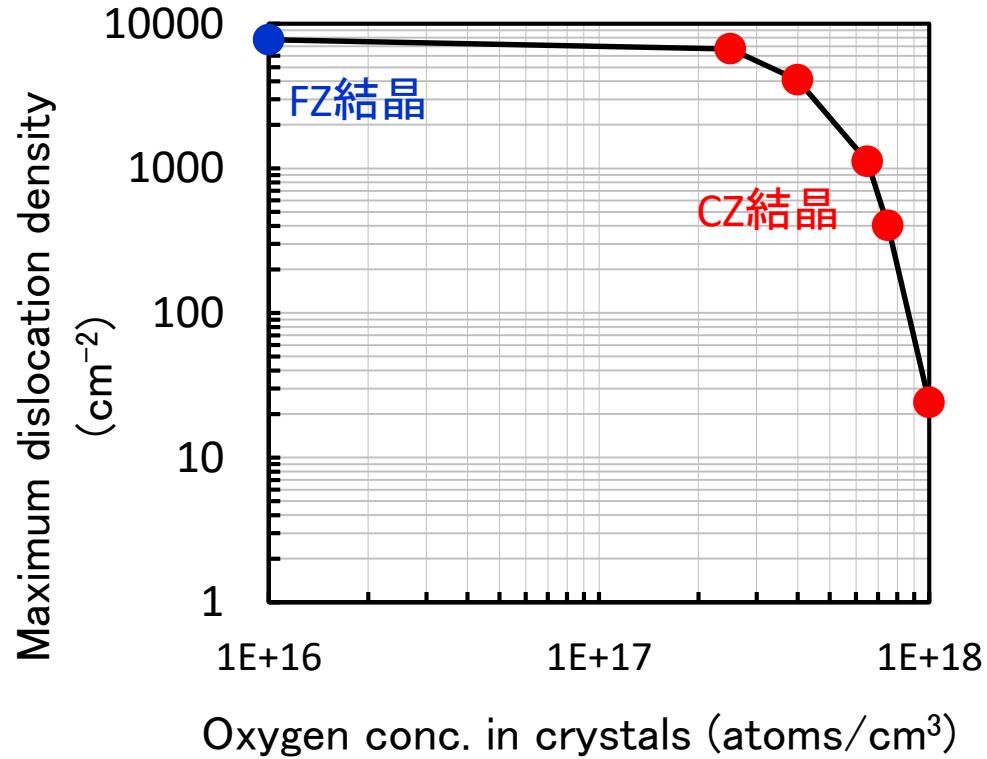
酸素拡散考慮



$c_{O_P} = c_{O_{max}} = 8.71 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ の点 P の転位密度を解析

酸素濃度と最大転位密度の関係

➤ Oxygen conc. vs. dislocation density



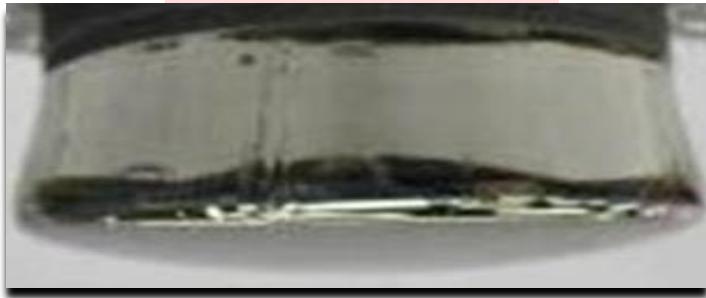
結晶中酸素濃度 ↑

転位密度 ↓

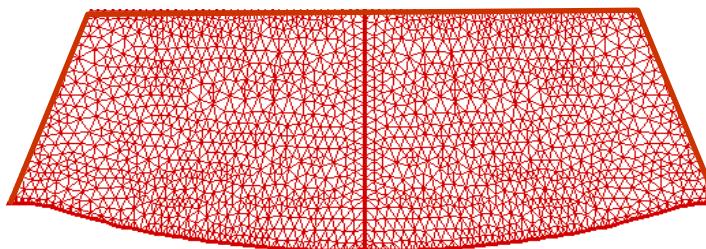


Time-dependent crystal growth: SiC

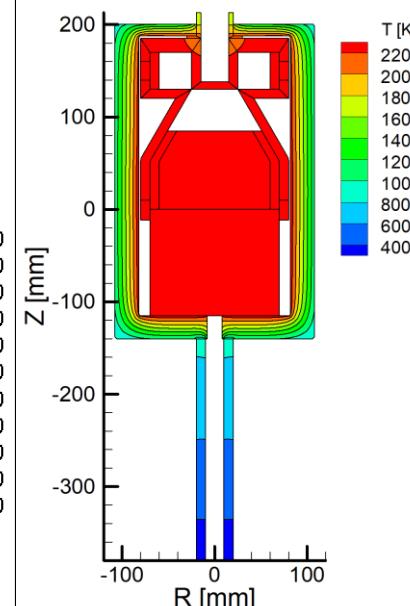
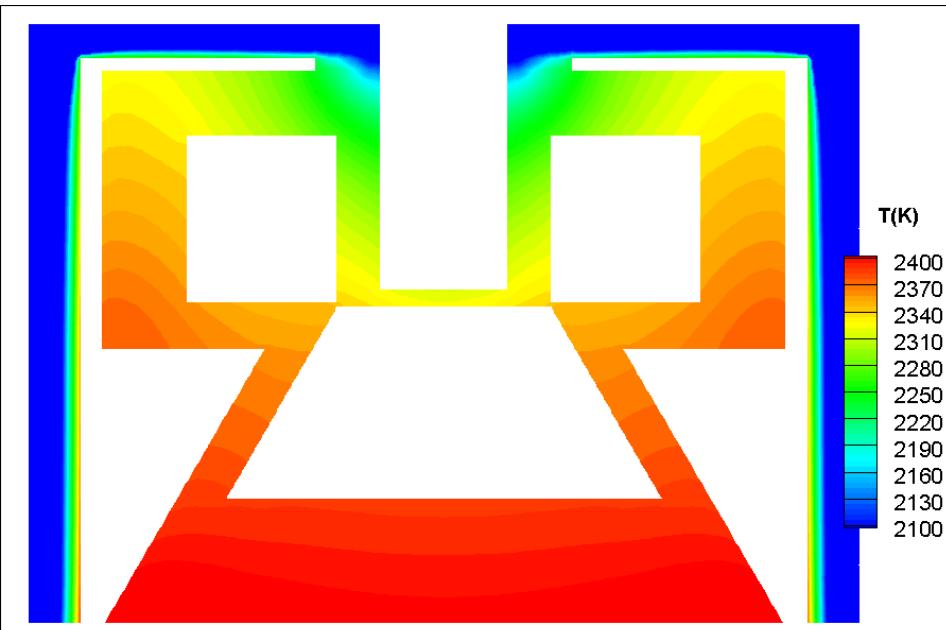
Experiment



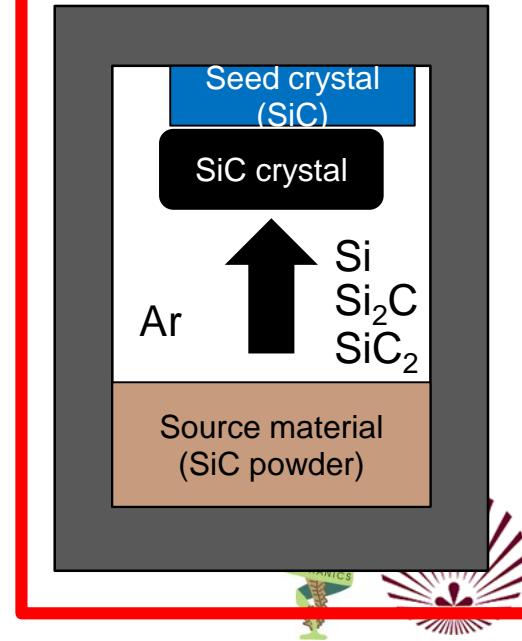
Calculation



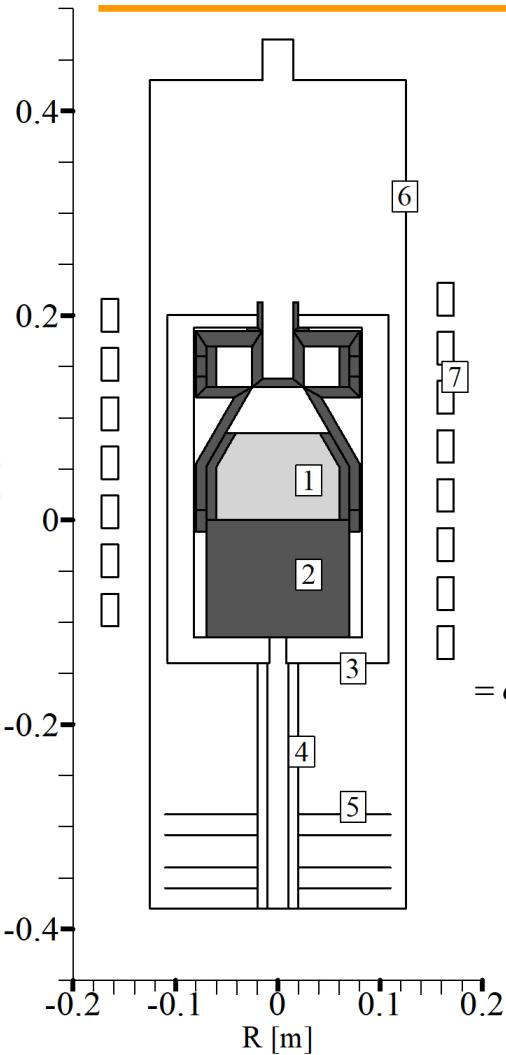
Crystal growth with constant RF power



Physical Vapor Transport method



SiC Physical Vapor Transport (PVT)



◆ Governing eq.

E-M eq.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\psi_B) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi_B}{\partial z^2} = -\mu J_\theta$$

$$\psi_B = C(r, z) \cos \omega t + S(r, z) \sin \omega t$$

$$Q_H(r, z) = \sigma \omega^2 \frac{C(r, z)^2 + S(r, z)^2}{2r^2}$$

Energy eq.

$$\nabla(k_h \nabla T) + S_Q = 0$$

Radiation eq.

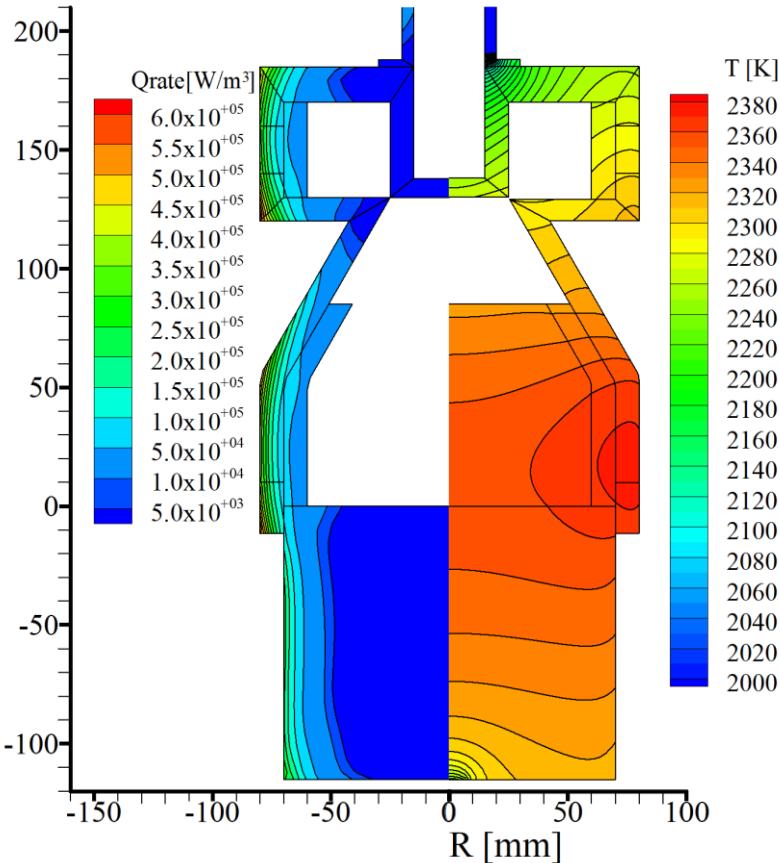
$$\begin{aligned} \frac{q(\mathbf{x})}{\varepsilon(\mathbf{x})} - \int_{\mathbf{x}^* \in \partial V} K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*) \frac{1 - \varepsilon(\mathbf{x}^*)}{\varepsilon(\mathbf{x}^*)} q(\mathbf{x}^*) r d\mathbf{s}^* \\ = \sigma T^4(\mathbf{x}) - \int_{\mathbf{x}^* \in \partial V} K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}^*) \sigma T^4(\mathbf{x}^*) r d\mathbf{s}^* \end{aligned}$$

◆ Condition

- Steady
- 2D symmetric
- Diffuse gray

Power generation

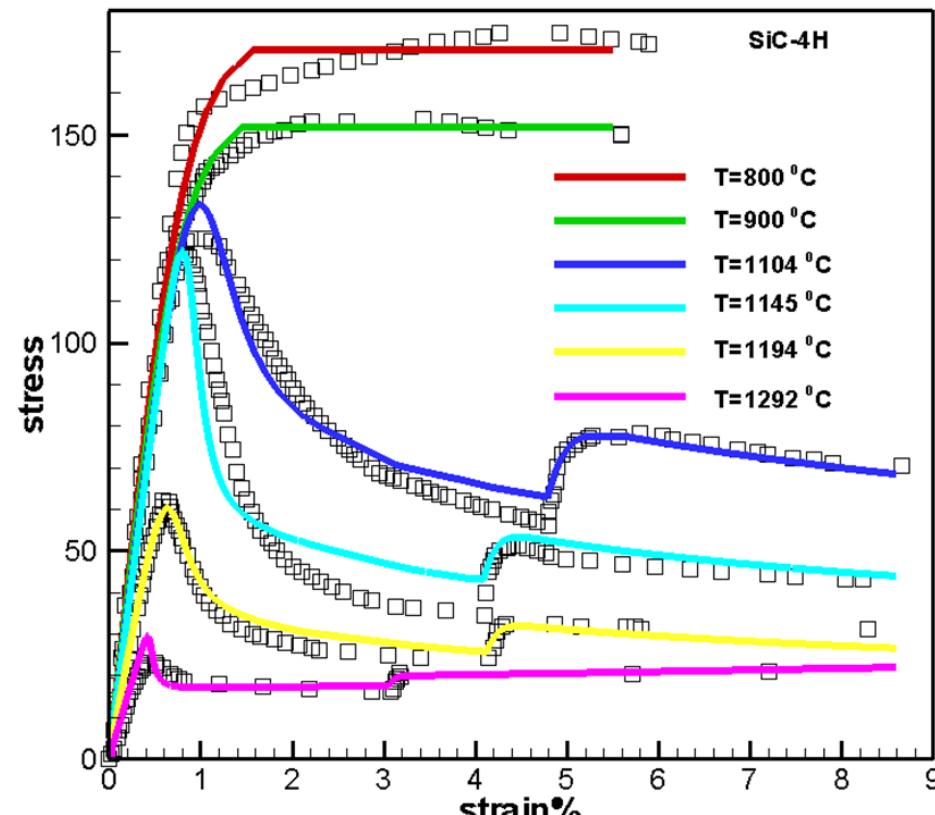
Temp.



L.J. Liu and K. Kakimoto, int. J. Heat Mass Transfer, 48(2005), 4481-4491

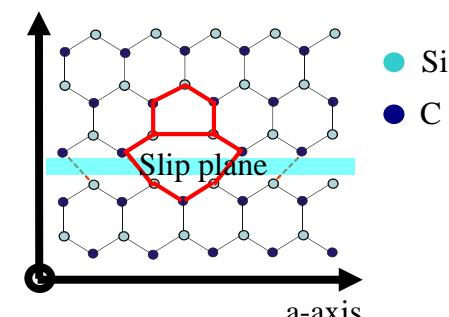
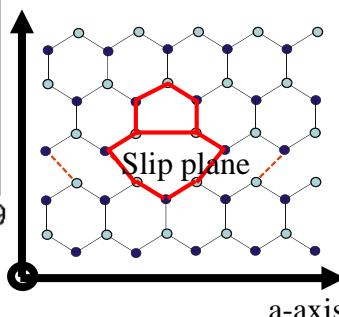


Comparison with experimental data

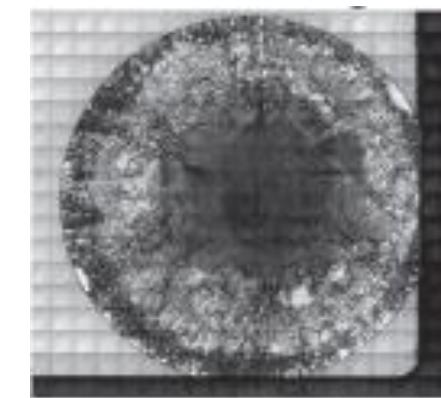
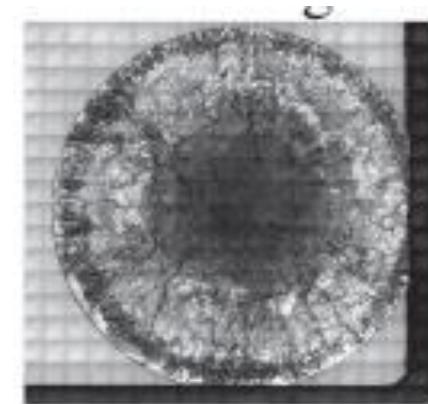
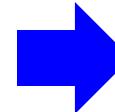
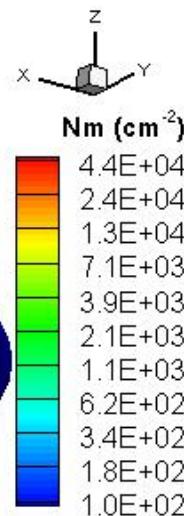
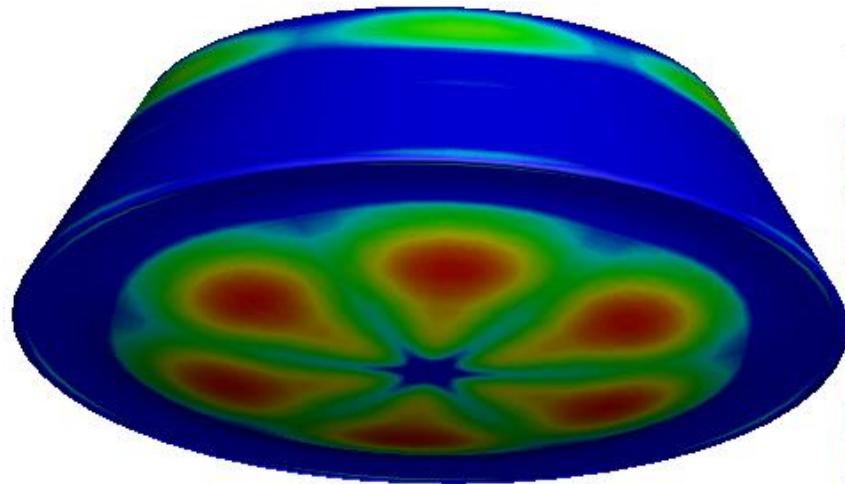


B. Gao, et al., Cryst. Growth
Des., 14 (2014) 1272–1278.

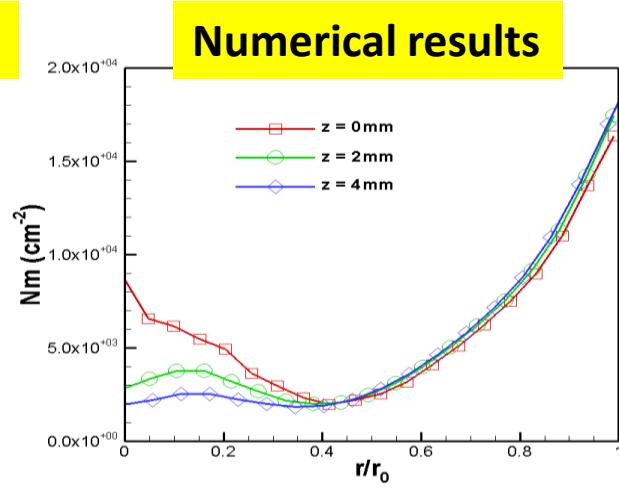
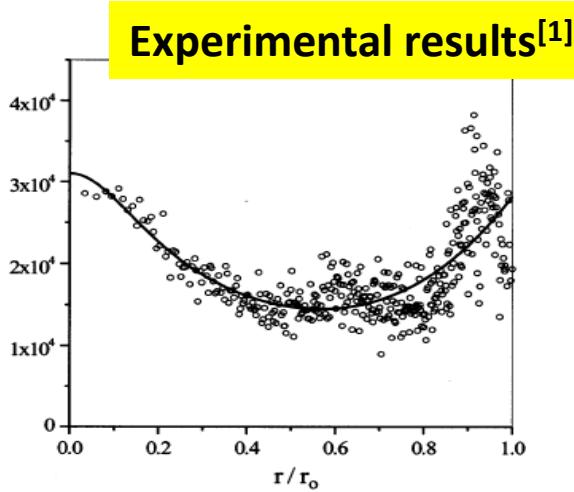
Q-S. Chen et al, CAS
K. Kakimoto et al, Kyushu Univ.



BPD distribution at room temperature (SiC)



B. Gao, et al., Cryst. Growth Des., 14 (2014) 1272–1278.

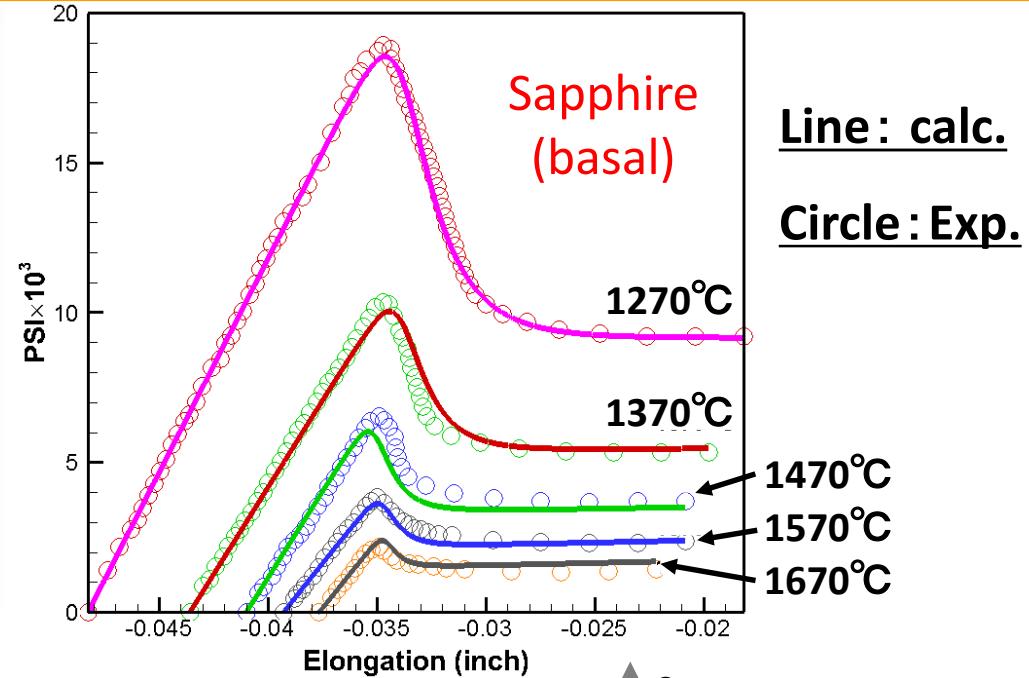
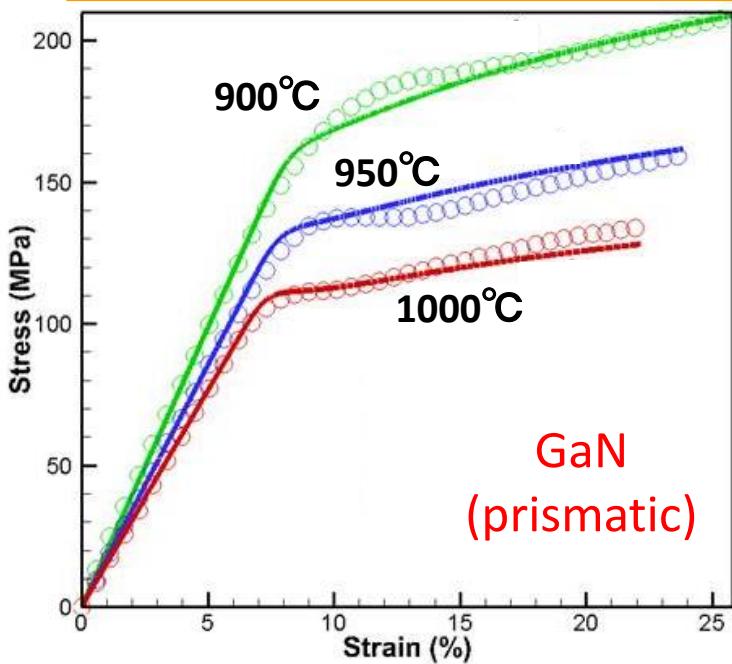


S. A. Sakwe, P. Wellmann, et al.
Silicon carbide. 2010

S.G.Muller,et al., Mater. Sci. Eng. B80,2001,327–331.

B. Gao, et al., Cryst. Growth Des., 14 (2014) 1272–1278.

HAS model parameters (GaN, Sapphire)

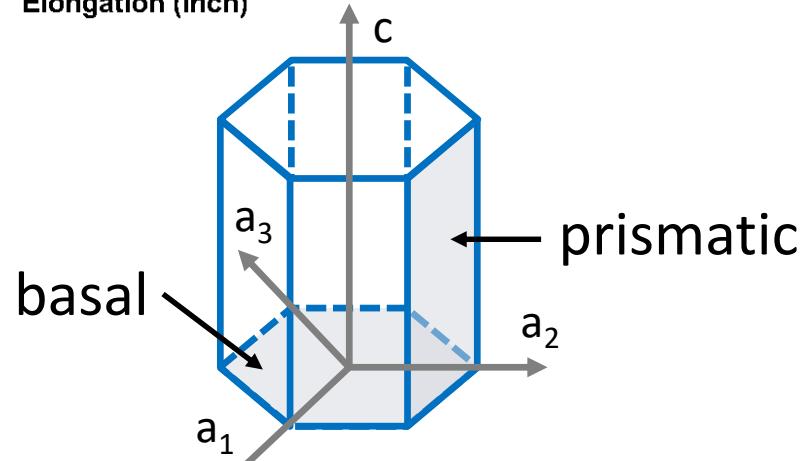


1) Velocity of mobile dislocations

$$v = k_0 \tau_{eff}^n e^{-\frac{Q}{k_B T}}$$

2) Multiplication rate of dislocations density

$$\begin{aligned} dN_m^{(\alpha)} / dt = & K N_m^{(\alpha)} v^{(\alpha)} \tau_{eff}^{(\alpha)\lambda} \\ & + K^* N_m^{(\alpha)} v^{(\alpha)} \tau_{eff}^{(\alpha)} \sum_{\beta \neq \alpha} f_{\alpha\beta} N_m^{(\beta)} \end{aligned}$$

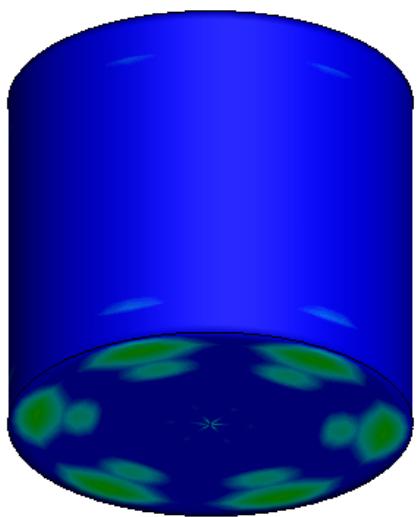


1) M. L. Kronberg, J. Am. Ceram. Soc., 45(1962)274.

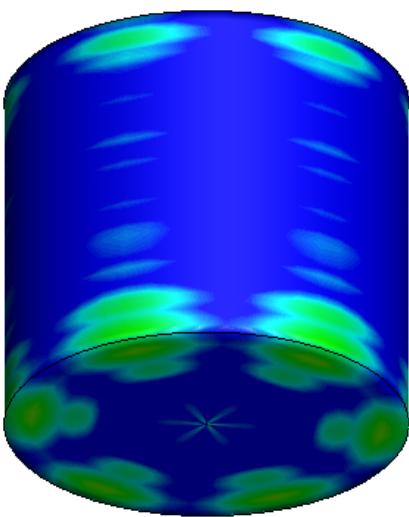
2) B. Gao, et al., Crystal Growth & Design, 14 (8), (2014) 4080.4) B. Gao, et al., Journal of Applied Physics, 117, 035701(2015).

3) I. Yonenaga , et al., J. Appl. Phys. 90, 6539 (2001).

BPD distribution in room temperature (Al_2O_3)

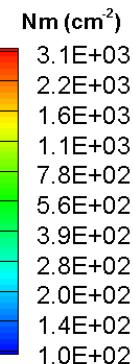
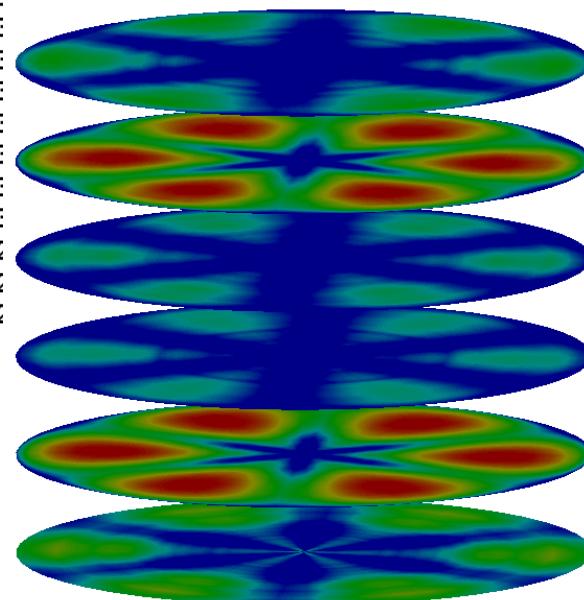
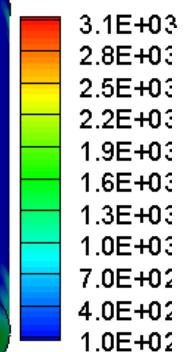


Before cooling



After cooling

Nm (cm^{-2})



B. Gao, et al., Cryst. Growth Des. 124 (2014) 4080–4086.

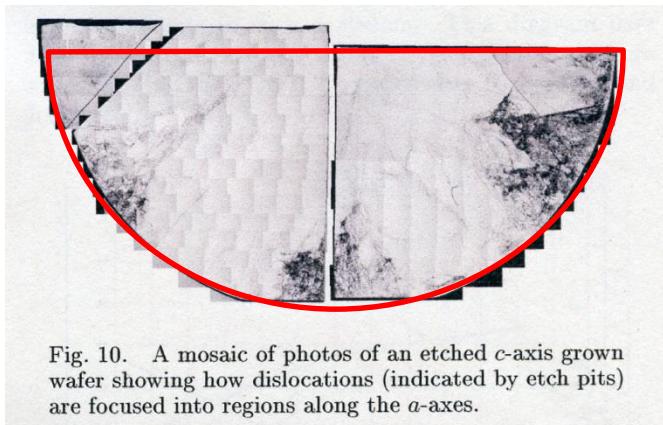


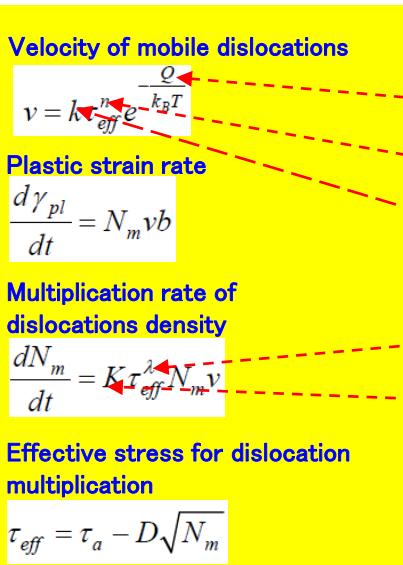
Fig. 10. A mosaic of photos of an etched c -axis grown wafer showing how dislocations (indicated by etch pits) are focused into regions along the a -axes.

F. J. Bruni, et al., Acta Physica Polonica A, 124 (2013) 213.

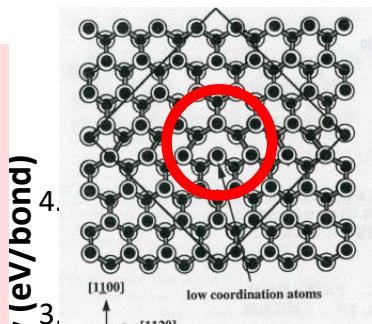
Six-fold symmetry for BPD distribution in Al_2O_3

Dislocation core in atomic scale

A.F. Wright et al., A. P. L., 73 (1998) 2752



- Undetermined parameters**
- (1) Activation enthalpy: Q
 - (2) Stress exponent: n
 - (3) Constant: k
 - (4) Second stress exponent: λ
 - (5) Multiplication constant: K



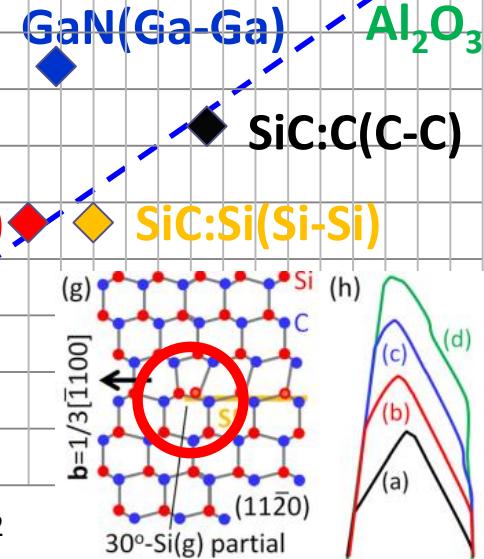
Cohesive Energy (eV/bond)

0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4

0 1 2

Pierrs potential (eV)

Cohesive energy



7-folded symmetry of BPD: SiC
8-folded symmetry for PPD: GaN

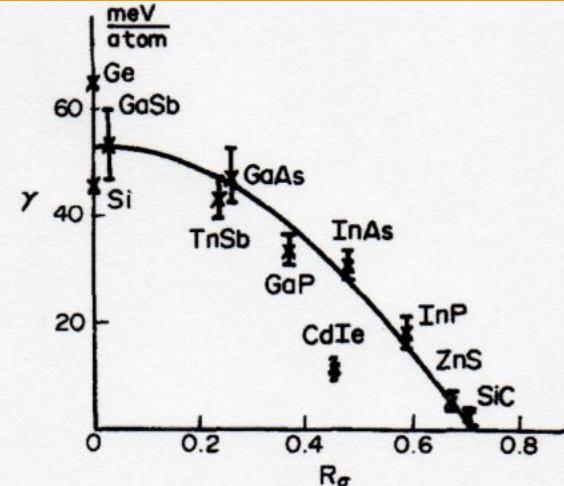
Controlling the growth of polytypic SiC crystals

Y. M. Tailov and V. F. Tsuvetakov

➤ Stacking fault vs. ionicity

□ $f_i = C^2/E_g^2$, $E_g^2 = E_h^2 + C^2$

J. C. Philips, Bonds and Bands in Semiconductors
(1973) A. Press
J. A. van Vechten, A simple man's theory.



➤ Hexagonality (D) vs. crystal structure

Hexagonality:
charge distribution in third

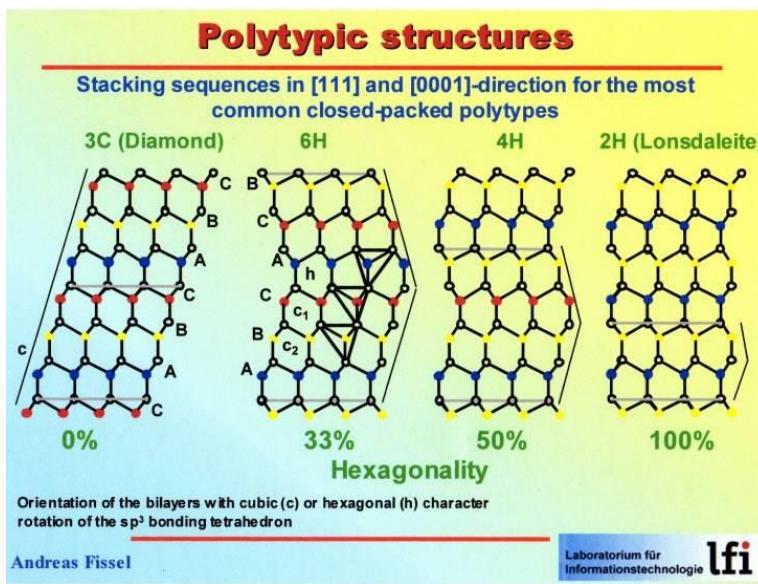
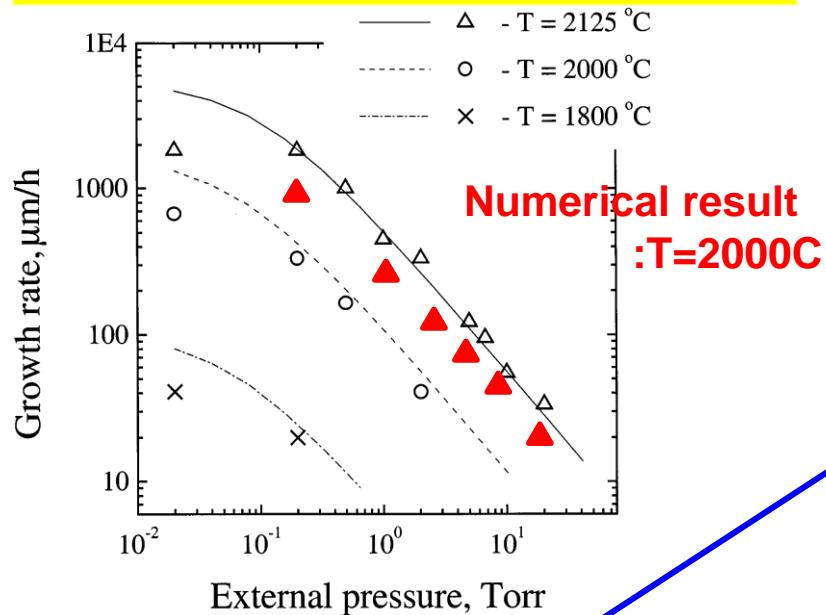


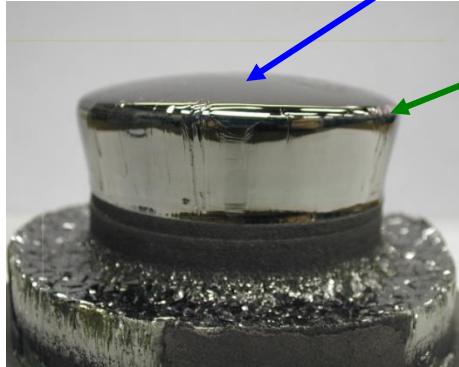
Fig. 2. Correlation between stacking-fault energy γ in A^nB^{8-n} compounds and orbital coordinate R_σ .

Argon gas effect on growth rate; SiC

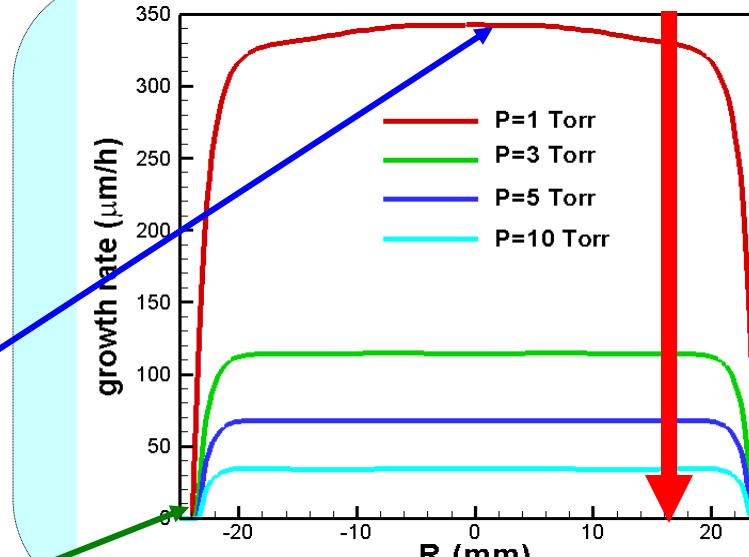
Experimental & numerical results



- [1] Segal, et al., Mater. Sci. Eng., B61-62 (1999)
[2] Augustine, et al., Phys. Stat. Sol. (b) 202(1997)



Numerical results

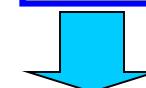


Pressure ↑

Growth rate ↓

Growth rate at center >

Growth rate at edge



Non-uniform distribution by 2D flow

- [3] S.Nishizawa, et al., Materials Science Forum, 457-460(2004)29-34.



Polytype stability (2D Nucleation)

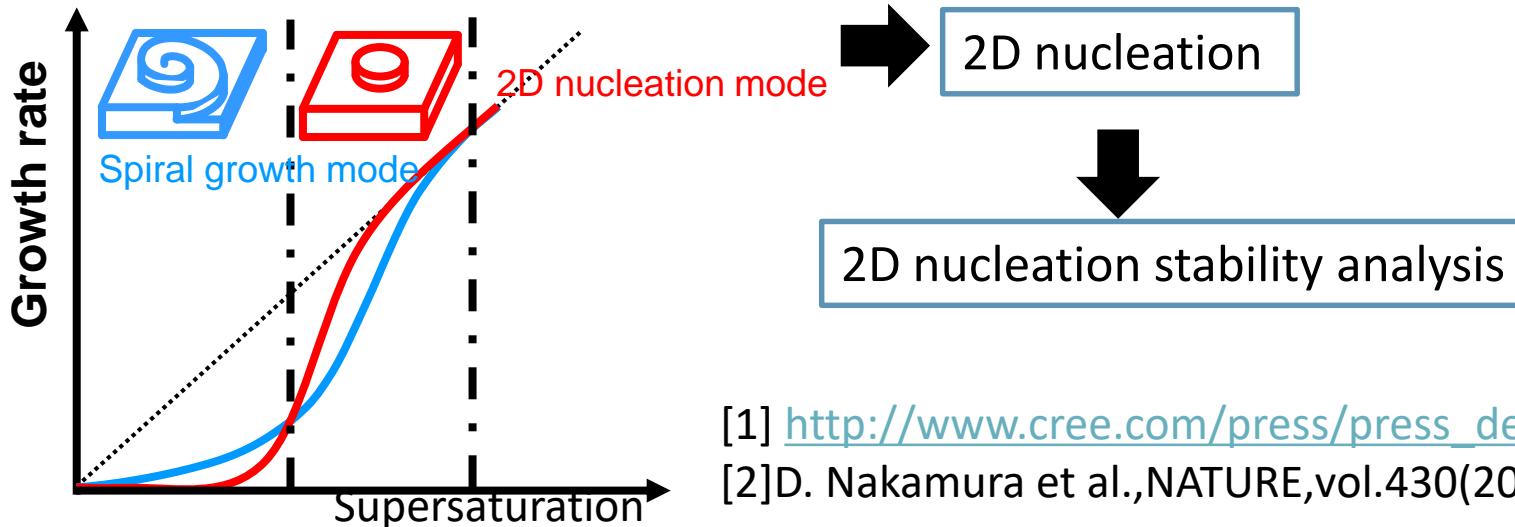
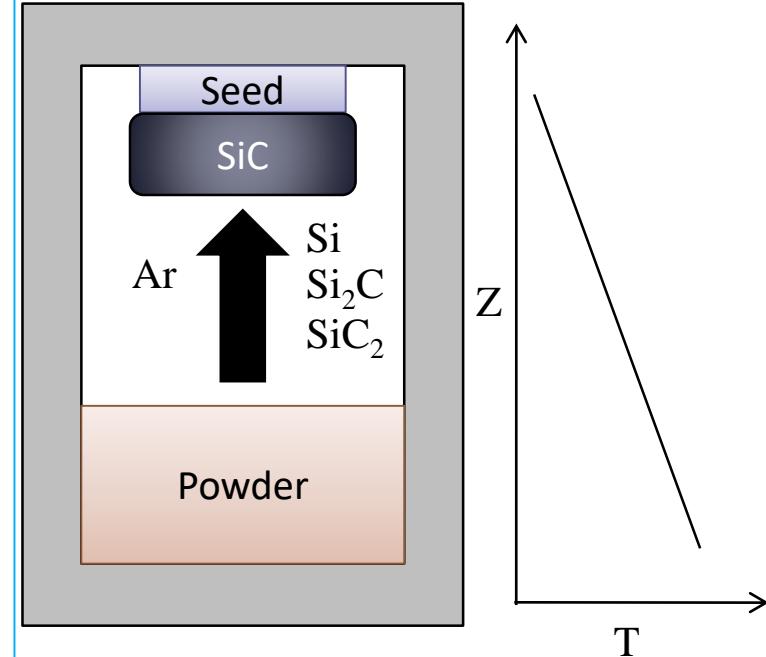
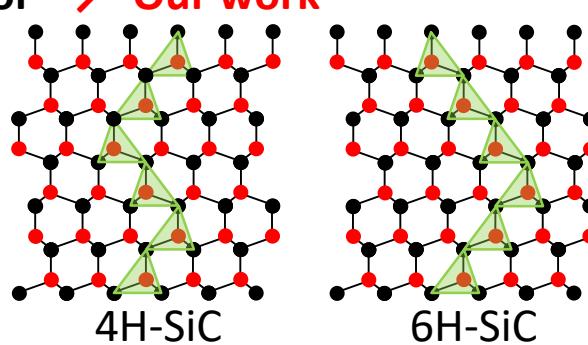
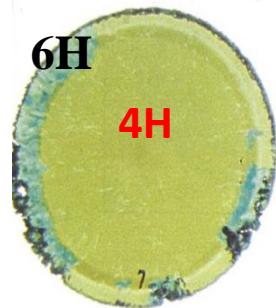
Sublimation : SiC bulk crystal growth (**layer by layer growth**)

Issues

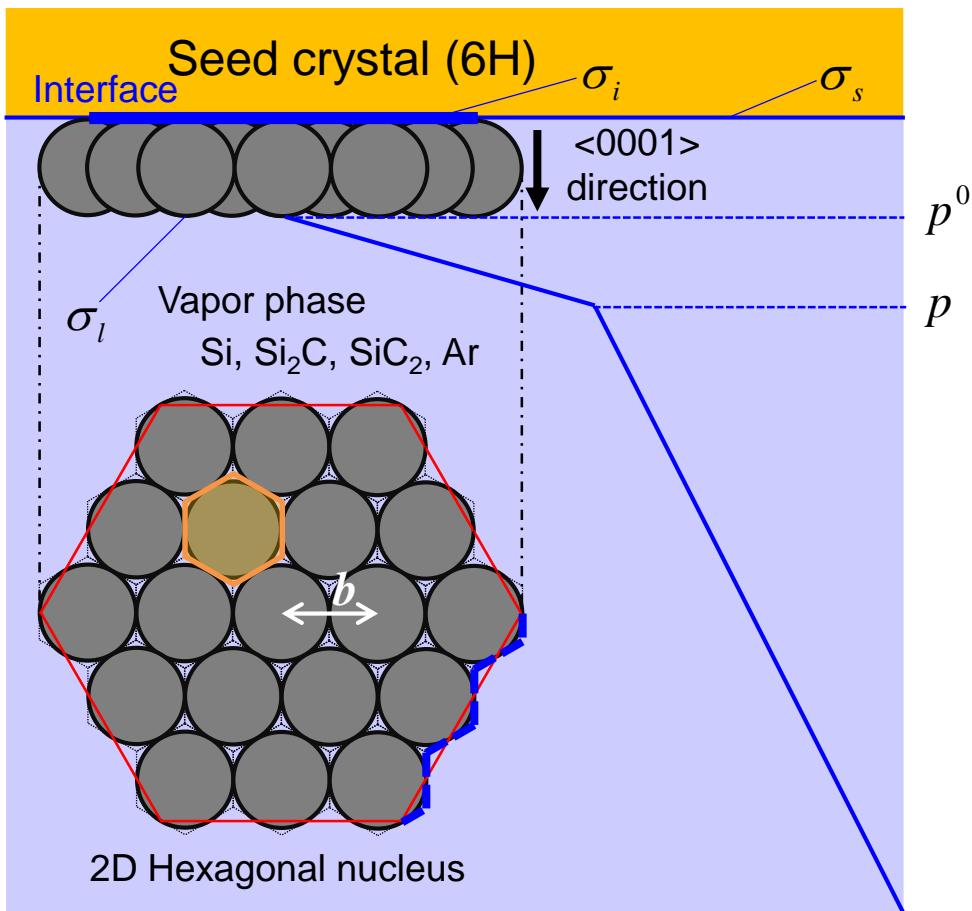
- Large diameter → 6 inch crystal[1]

● Crystal quality

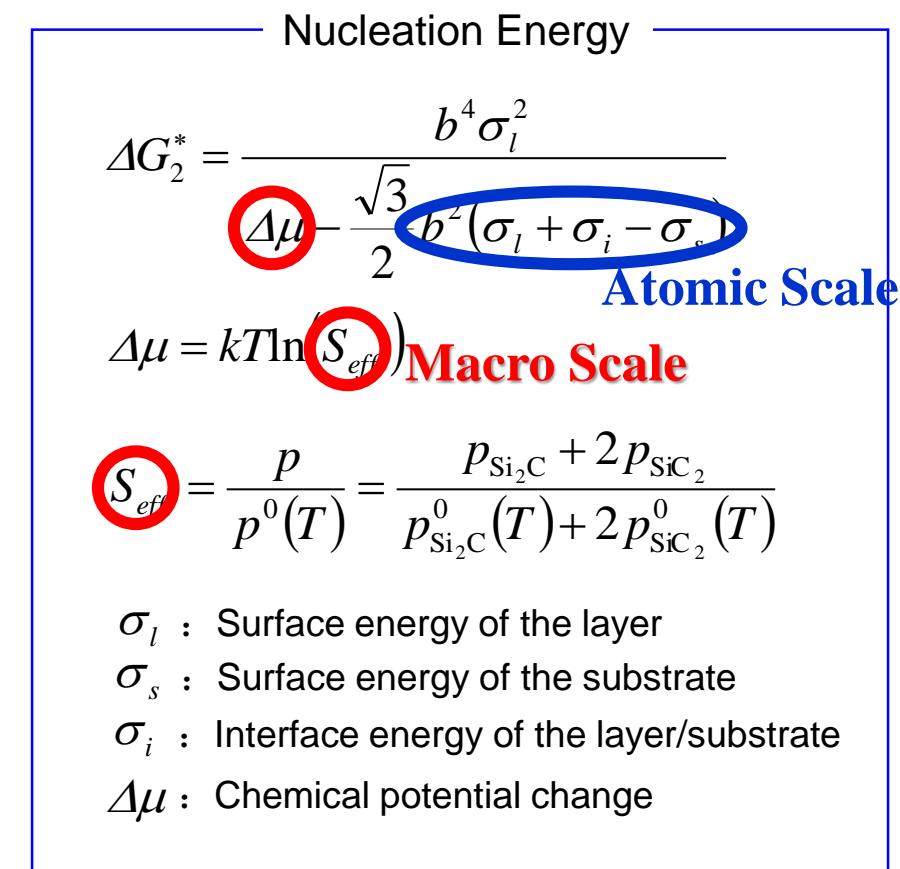
- Micro pipes[2]
- Poly type control → **Our work**



Classical 2D nucleation theory



I. Markov, R. Kaischew, Kristall und Technik, 11 (1976) 685-697.

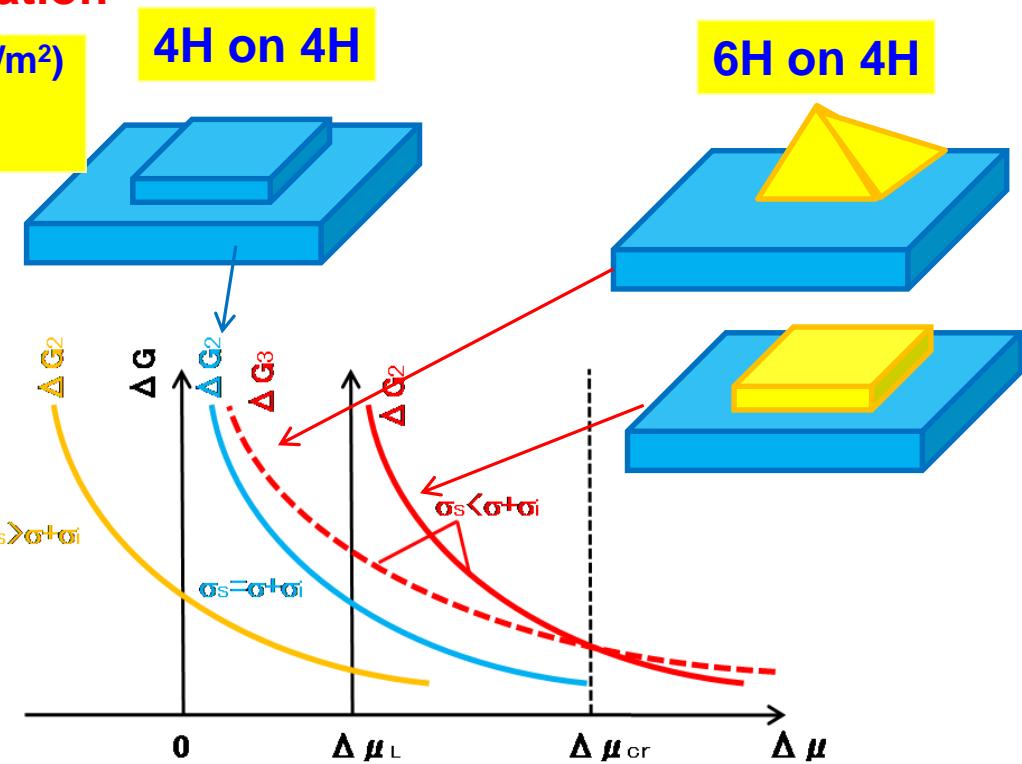
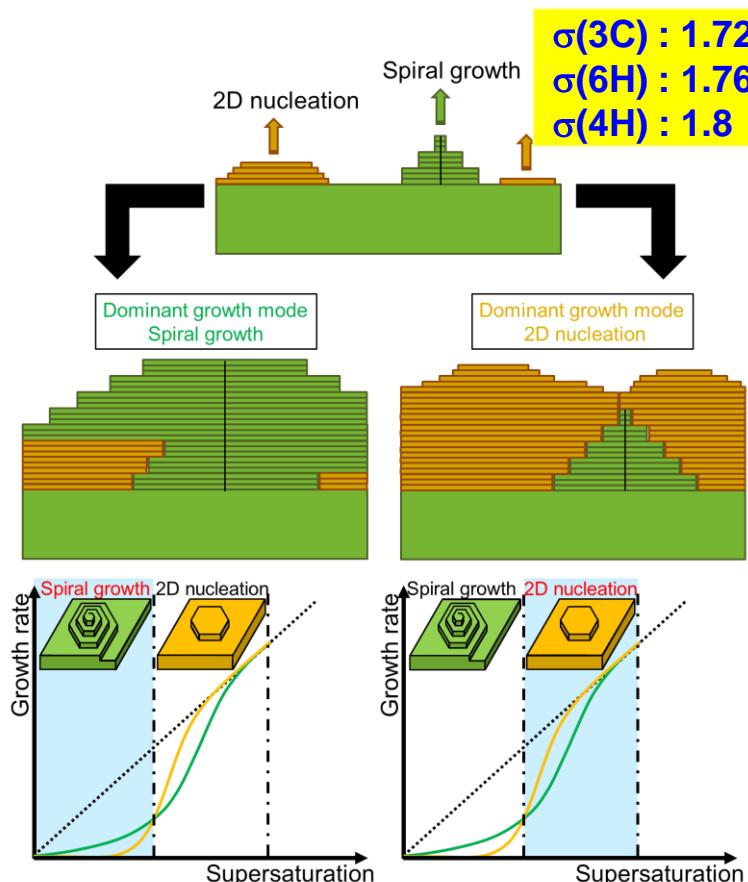


Relation between probability of nucleation & nucleation energy : $P \propto \exp\left[-\frac{\Delta G}{kT}\right]$

Polytipism analysis: SiC by 2D nucleation

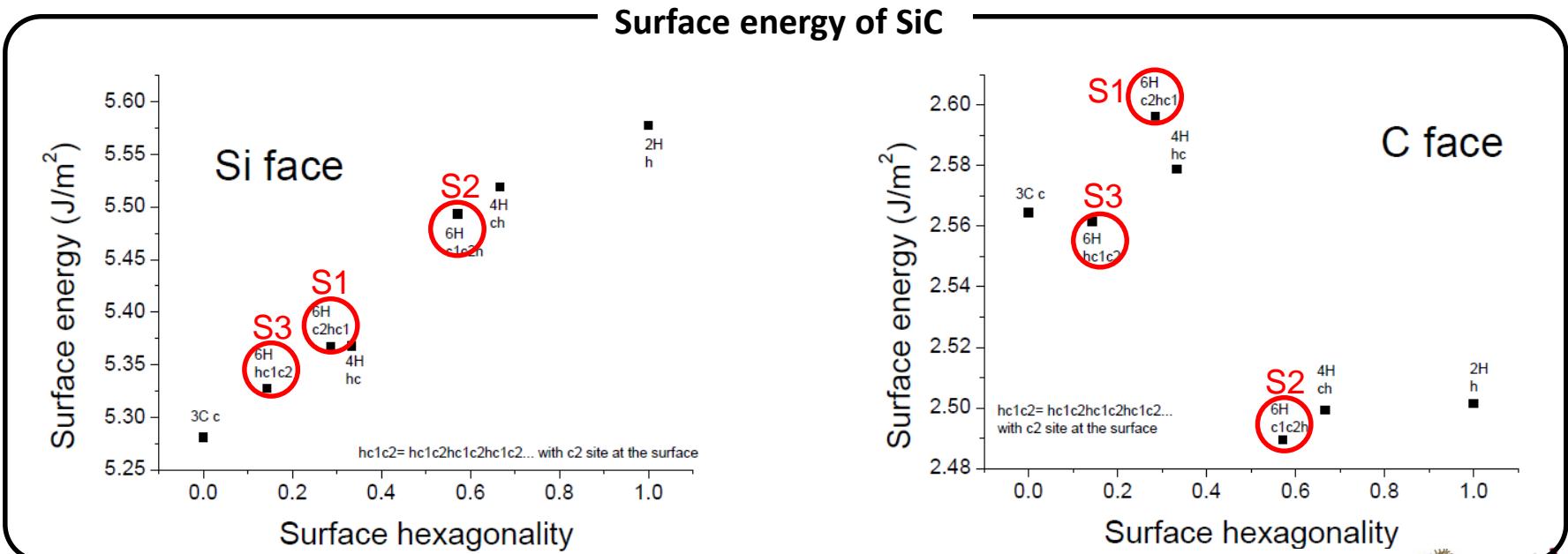
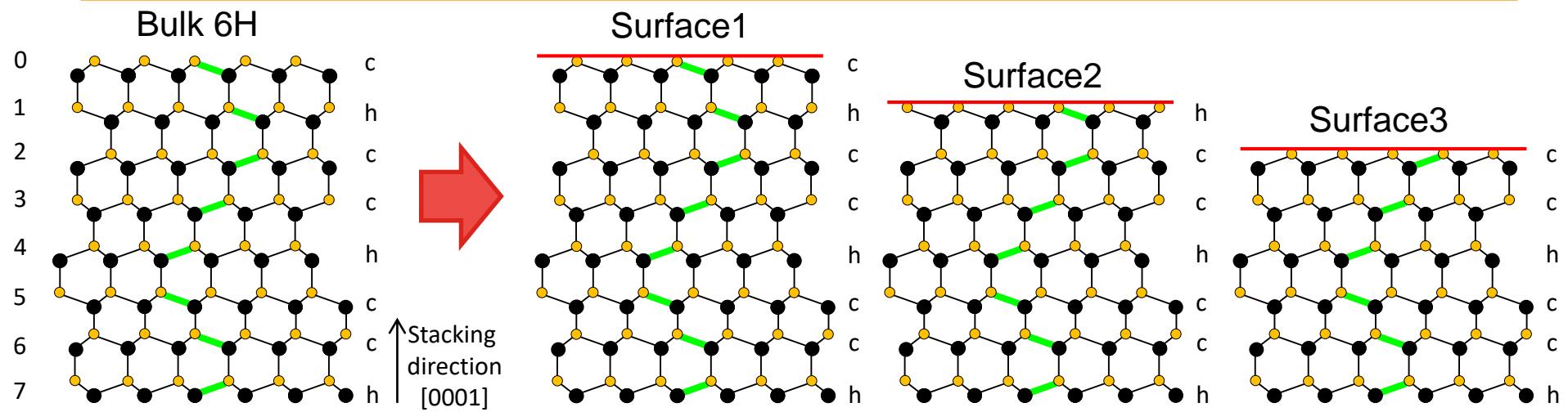
$$\Delta G_2 = \frac{b^4 \sigma^2}{4\{\Delta\mu - b^2(\sigma + \sigma_i - \sigma_s)\}} \quad \Delta G_3 = \frac{2v^2 \sigma^2}{\Delta\mu^2} (\sigma + \sigma_i - \sigma_s)$$

**Surface energy:
Impurity, dislocation**

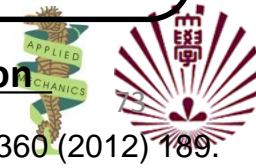


A. Fissel, J. C. G. 212 (2000) 438.

Surface energy of SiC calc. by SIESTA

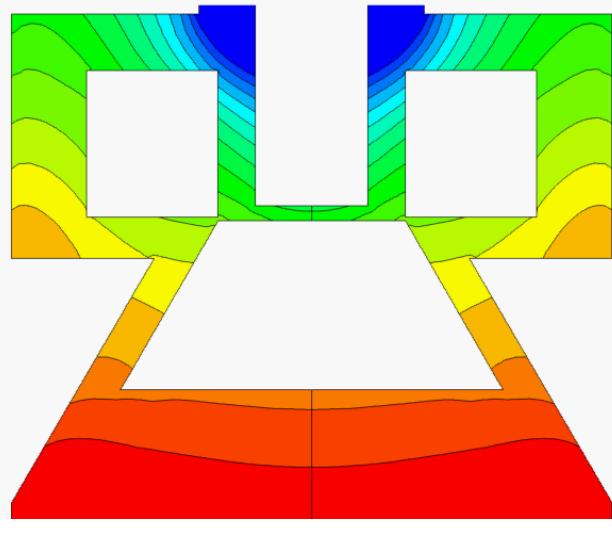


→ Minimum surface energy was used for calculation

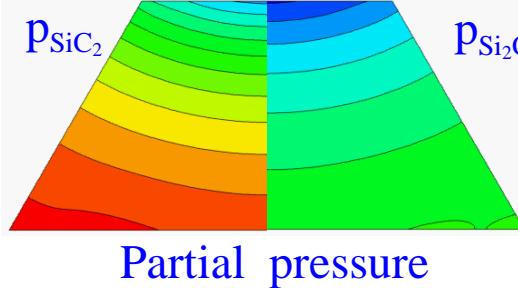
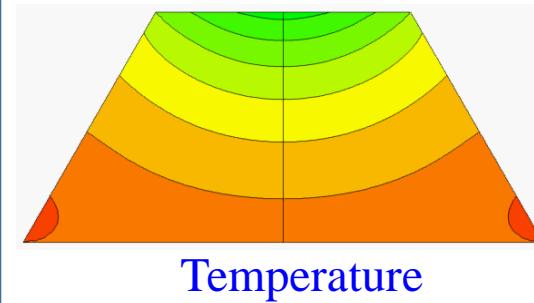


Global analysis

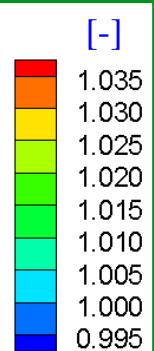
Heat



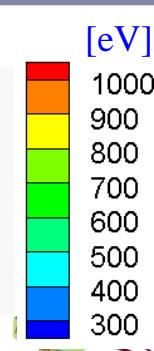
Species



Super saturation



Nucleation energy



Nucleation free energy: C-, Si- faces

- Nucleation energy

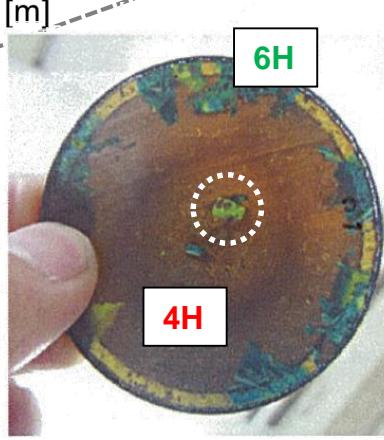
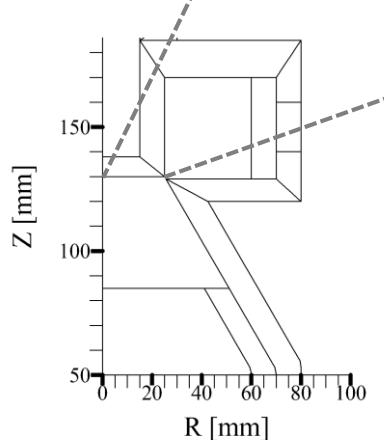
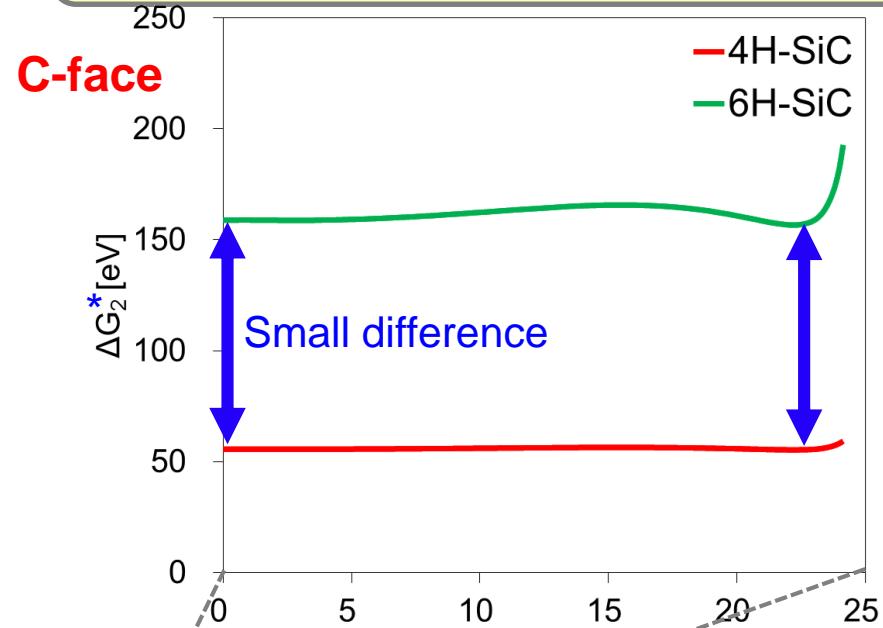
$$\Delta G_2^* = \frac{b^4 \sigma_l^2}{\Delta \mu - \frac{\sqrt{3}}{2} b^2 (\sigma_l + \sigma_i - \sigma_s)}$$

- Condition

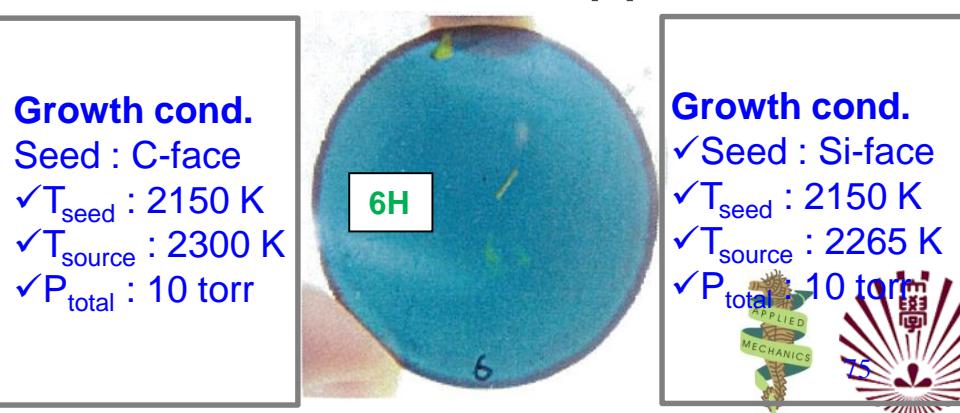
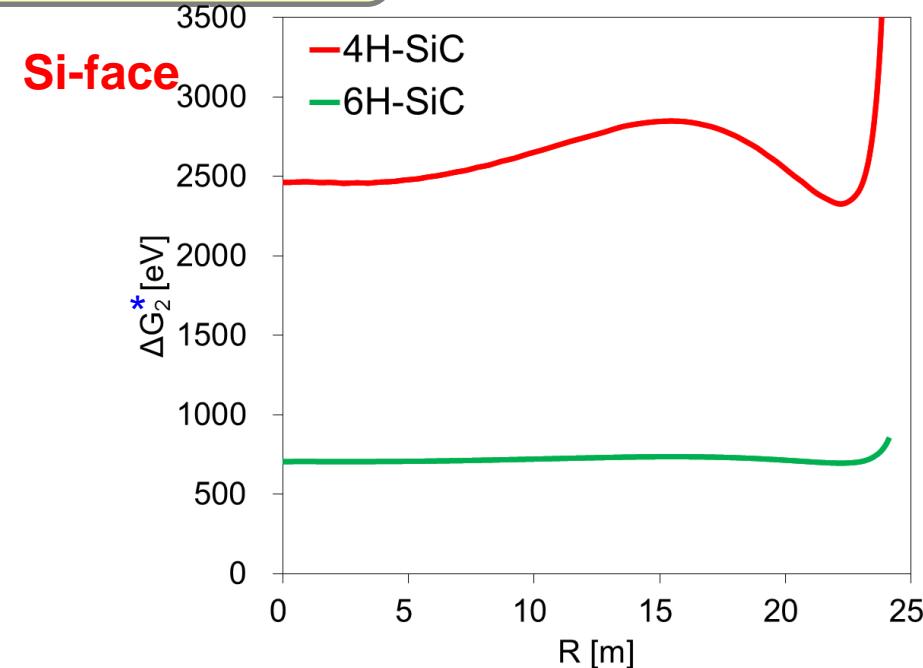
Sub. Temp. T_{seed} : 2250 [K]

Pressure P_{total} : 1 [torr]

T. Shiramomo, et al., 352
J. Crystal Growth,
177 (2012).



Growth cond.
Seed : C-face
✓ T_{seed} : 2150 K
✓ T_{source} : 2300 K
✓ P_{total} : 10 torr



研究歴

2000

九州大学応用力
学研究所:
結晶成長学研究
室:(寒川助教授、
中野技官)

2005

TMCZ結晶育
成コード開発:
2D-3D融合アルゴリズムの
確立(Prof. L.
Liu)

2010

昇華法による
SiC結晶成長
コード開発
(Prof. X.
Chen)

シリコン太陽電
池用一方向性
凝固法とSiC昇
華法における
非定常解析
(Prof. B.
Gao)

2015

高効率太陽電
池用CZ結晶成
長:(原田氏、
宮村氏、Dr. X
Liu, Dr. X Han)

2020

Ga₂O₃結晶成
長:(吉川教授、
X. Han)

MDによる熱物性推
算:結晶成長解析用

GaN結晶成長
(森教授)

大型一方向性
凝固炉導入:
シードキャスト
法の確立:
(原田氏、宮村
氏)

結晶成長:
(宇田先生、藤
原先生)

ICCGE:名古屋
赤崎先生、天
野先生、森先
生、西永先生、
大鉢先生、他



Save energy: Invertor's history

1990



2000



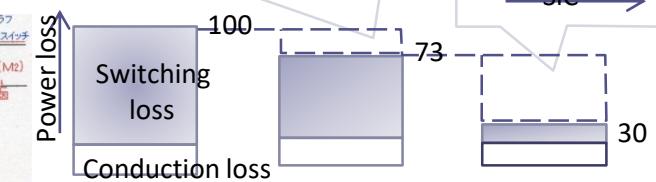
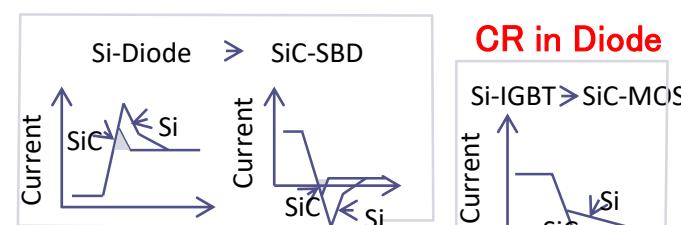
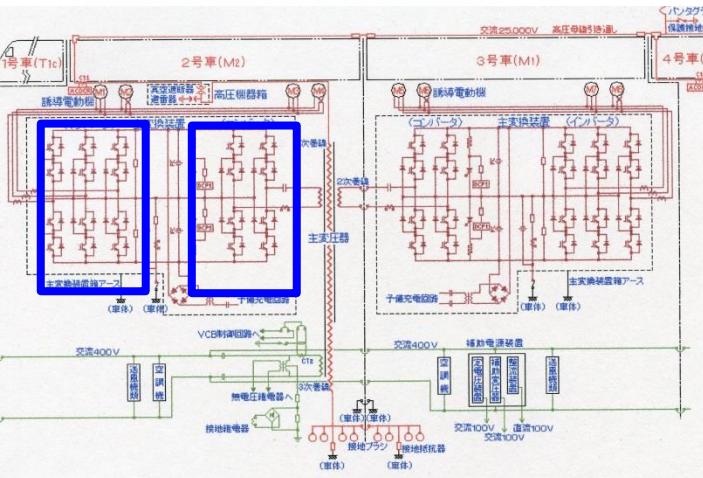
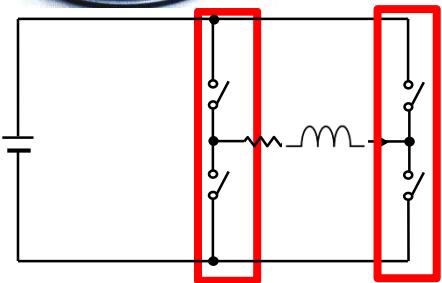
2010



SiC@
Mitsubishi



GTO@東芝
IGBT@東芝



- Long carrier life time
- Low defects
- Reasonable cost

Carrier lifetime vs. Carrier conc. of Si

Lifetime killer by SRH:

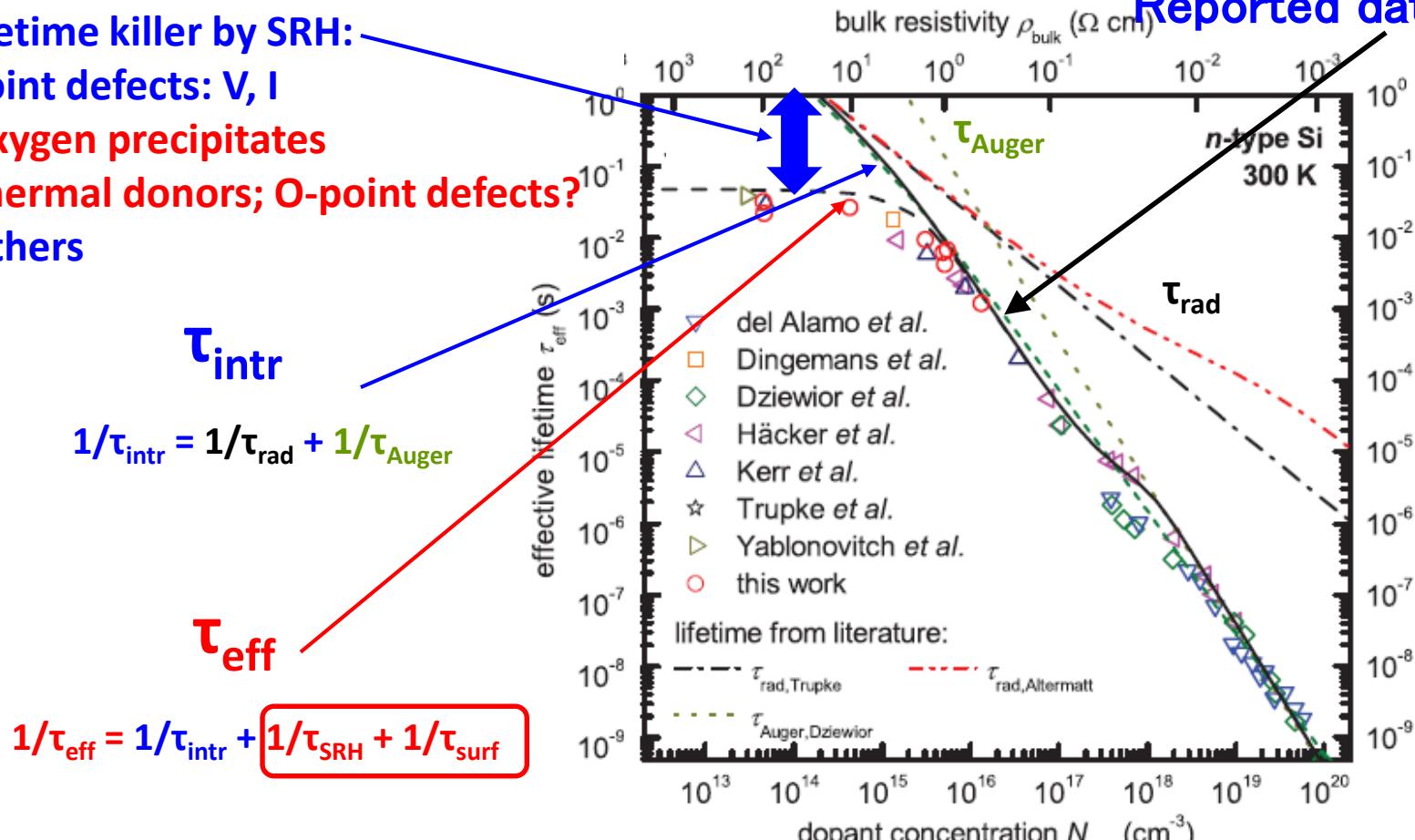
Point defects: V, I

Oxygen precipitates

Thermal donors; O-point defects?

Others

Reported data: FZ-Si



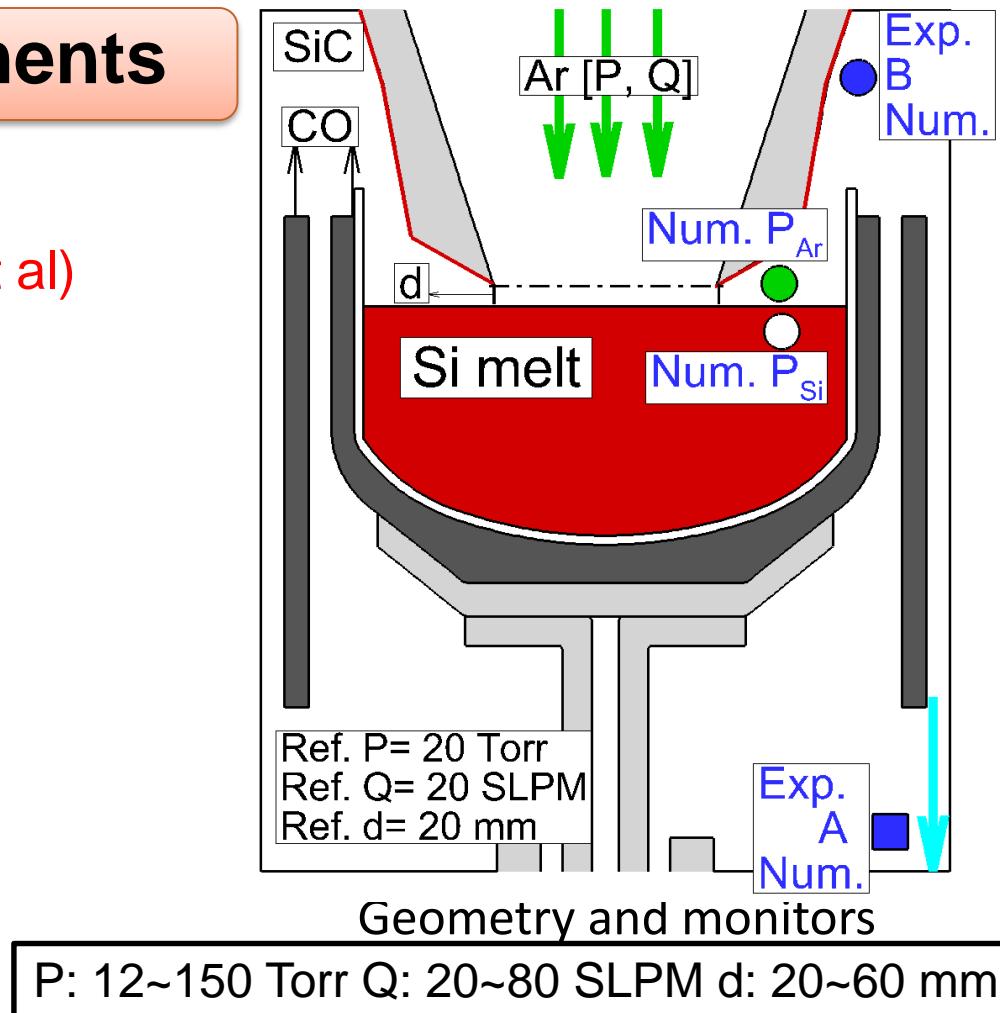
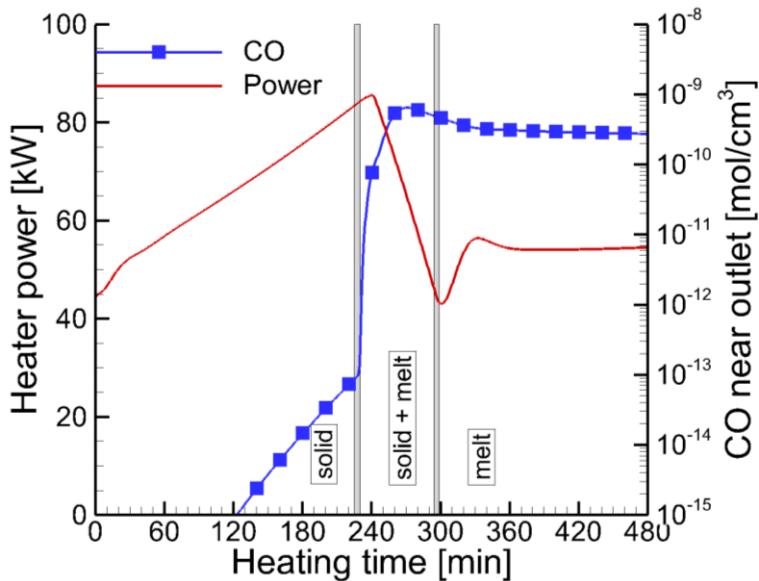
$$1/\tau_{\text{eff}} = 1/\tau_{\text{rad}} + 1/\tau_{\text{Auger}} + 1/\tau_{\text{SRH}} + 1/\tau_{\text{surf}}$$

A. Richter, S. W. Glunz, F. Werner, J. Schmidt, Phys Rev. B 86, 165202 (2012)

Monitoring points; Num. & Exp.

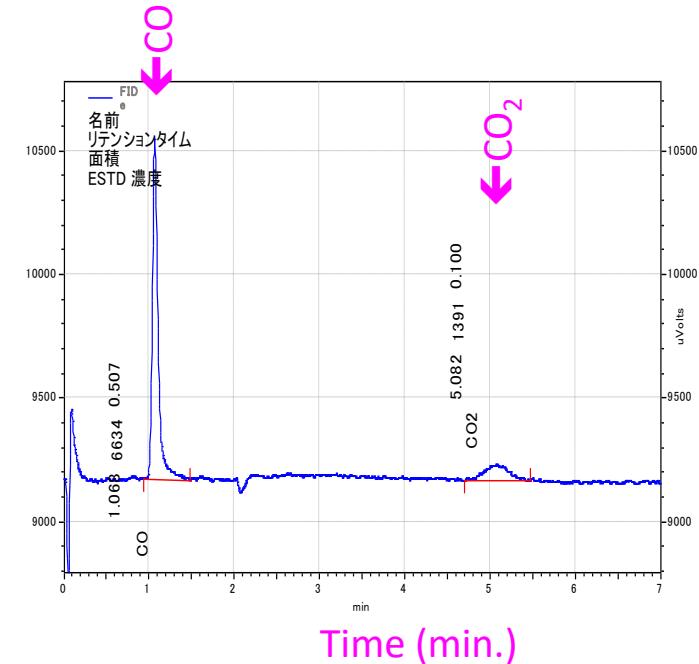
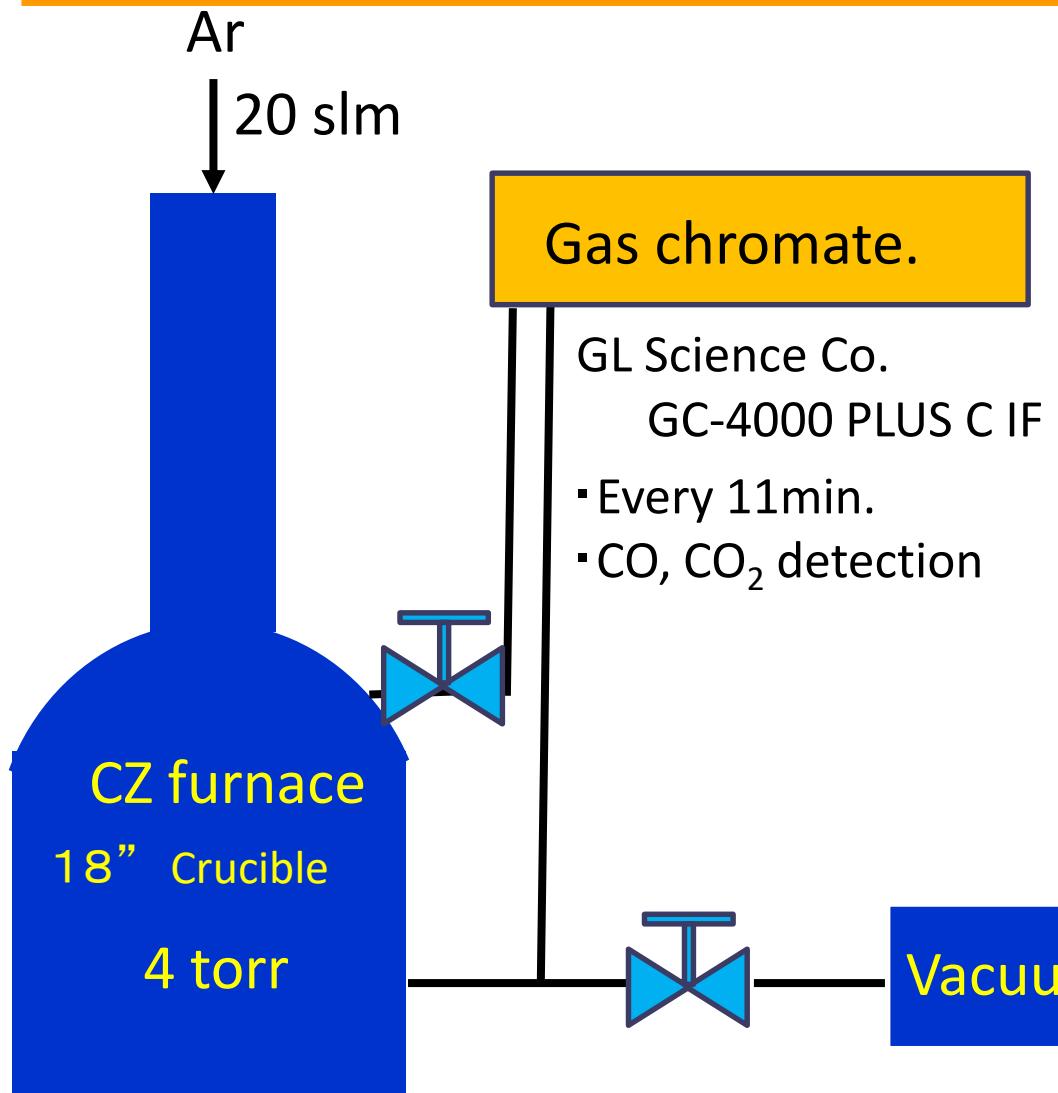
Simulations & Experiments

- A and B for measurements
(Ref. [18a-D103-3] by Miyamura, et al)
- A, B, P_{Ar} and P_{Si} for both
- P, Q and d for parameter setting



X. Liu et al., J. C. G. 483 (2018) 241

In-situ CO measurement in CZ furnace



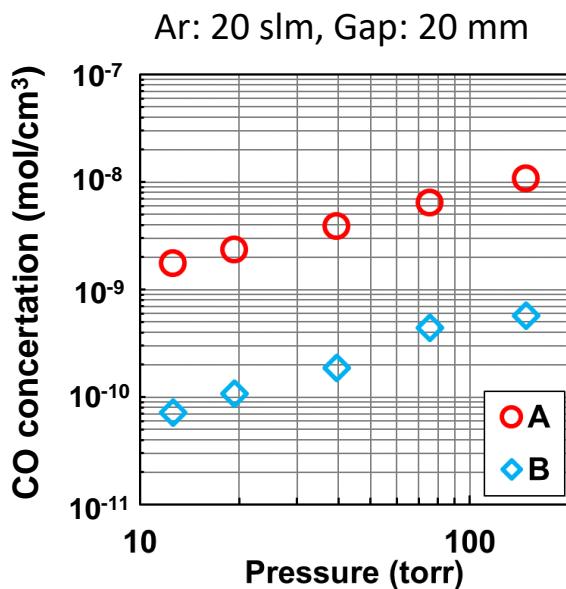
Y. Miyamura, H. Harada, X. Liu, S. Nakano, S. Nishizawa,

K. Kakimoto, Journal of Crystal Growth 507 (2019) 154-156.

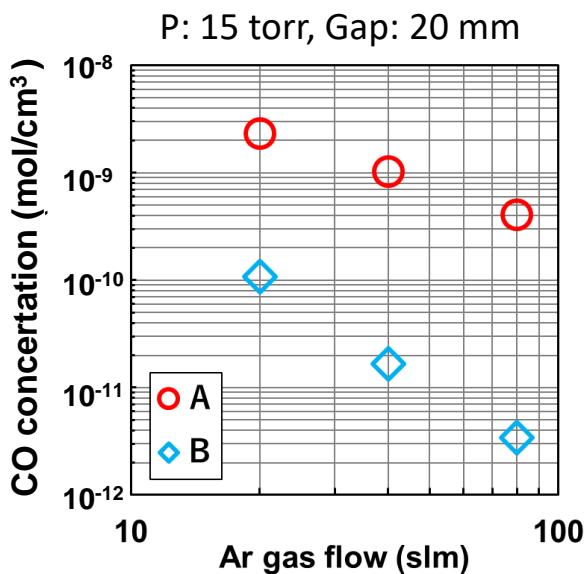


CO measurement

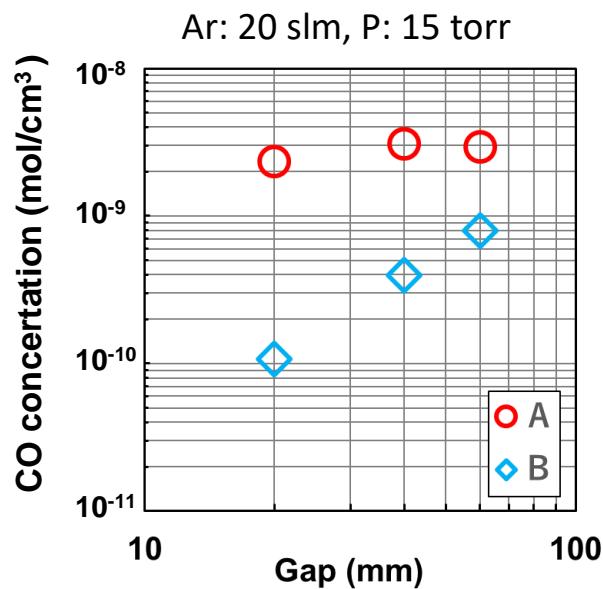
pressure



Ar flow rate



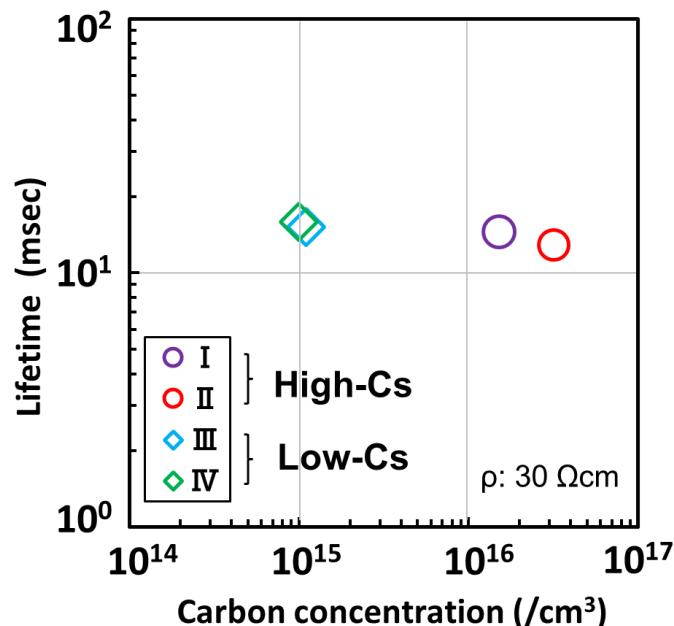
Gap width



A: Exhaust
B: Above melt

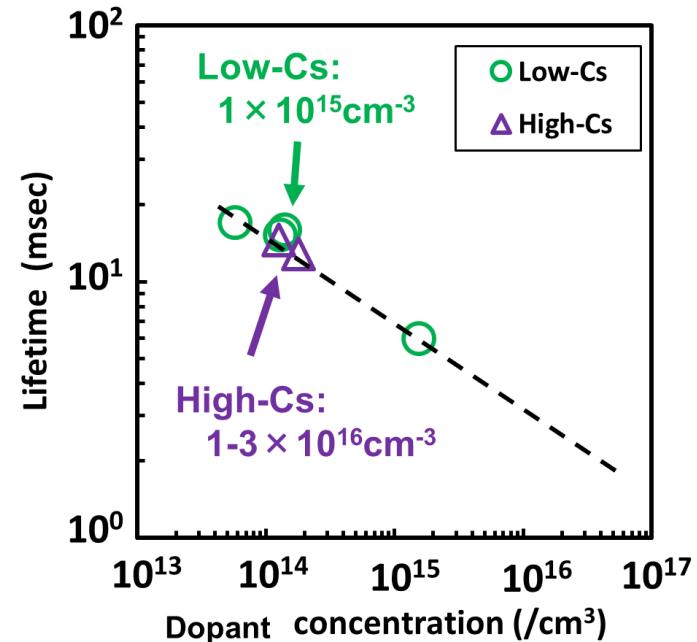
C conc. Vs. Lifetime of Si

Cs and LT



- Carbon conc.:
High-Cs : $1-3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Low-Cs : $< 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

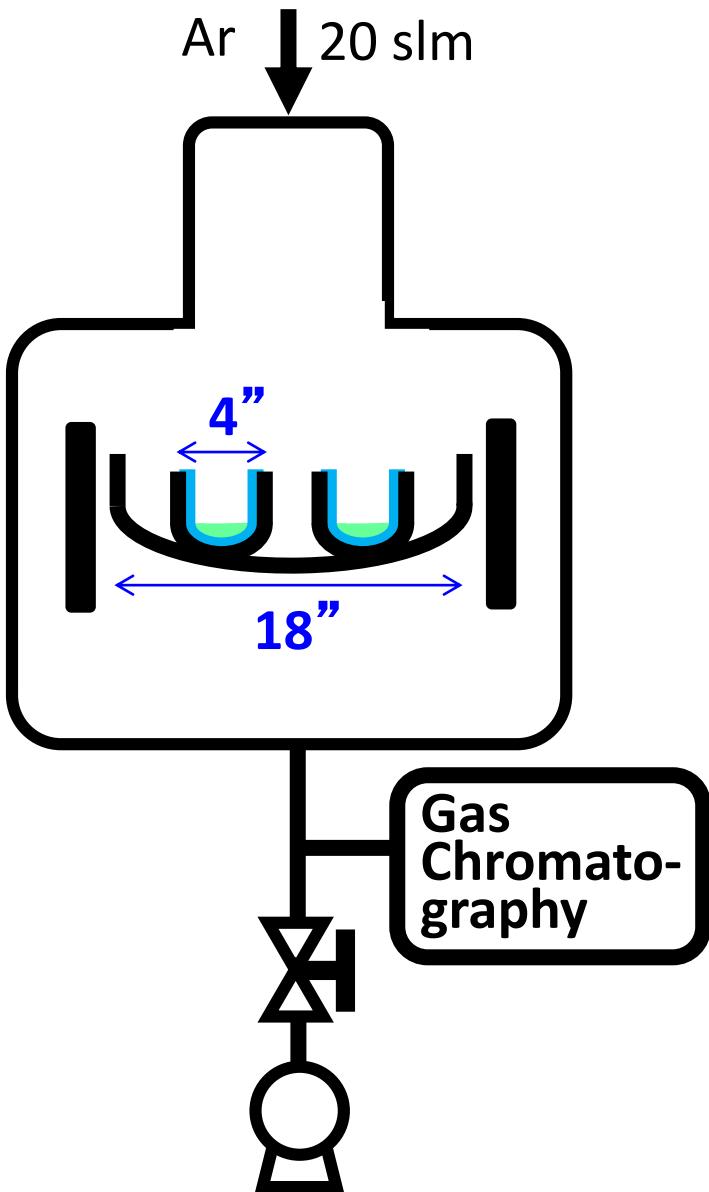
Dopant conc. and LT



Small dependence: 10^{16} cm^{-3} , LT > 10 msec

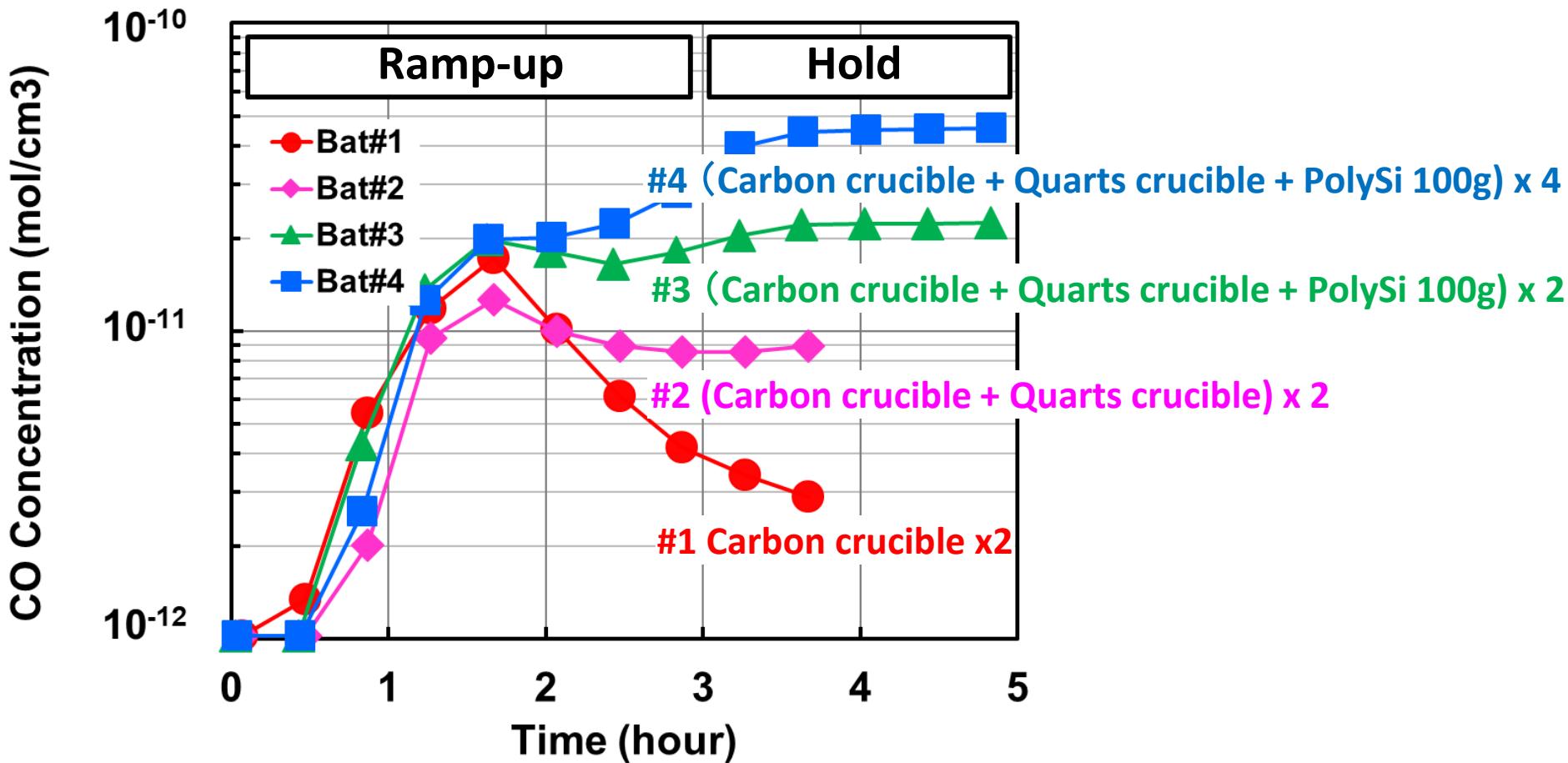
Y. Miyamura et al., J. C. G. 486 (2018) 56.

Experimental setup of CO monitoring

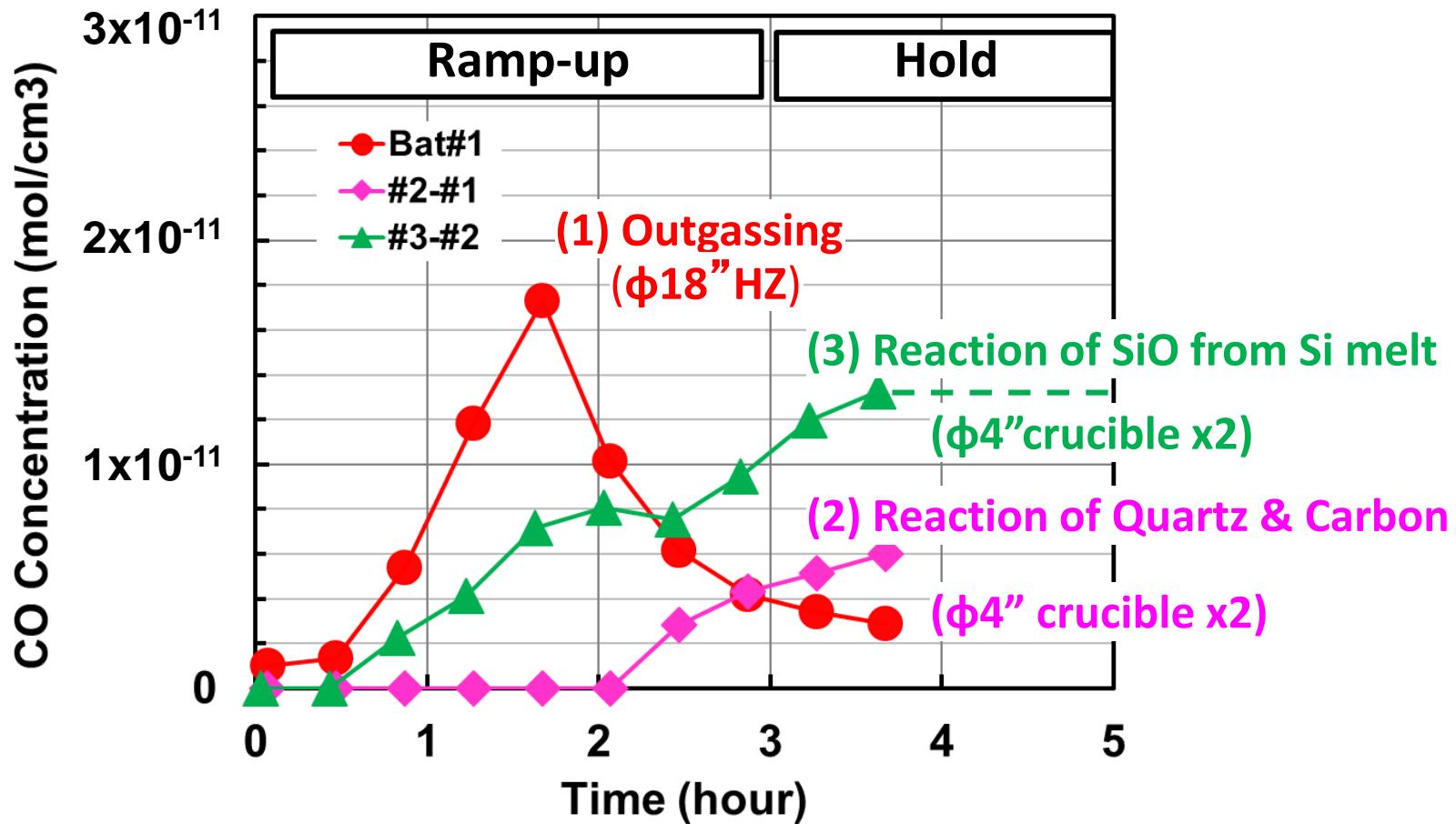


- #1 Carbon crucible x2
(1) Reaction between outgassing and carbon
- #2 Quartz crucible x2
(1)+(2) Reaction between quartz and carbon
- #3 Crucible with Poly-Si (100g) x2
(1)+(2)+(3) Reaction b/w SiO from melt and C
- #4 Crucible with Poly-Si (100g) x4
(1)+{(2)+(3)}x2

CO concentration



CO concentrations by (1) (2) (3)



(1)Outgassing: 1.7×10^{-11} mol/cm³ ($\phi 18''$ Hz), in ramp-up

(2) Quartz & C: 0.6×10^{-11} mol/cm³ ($\phi 4''$ crucibles)

(3) Si melt: 1.3×10^{-11} mol/cm³ ($\phi 4''$ crucibles)



CZ furnace in Kyushu University

18" Hot zone

Axis (100)

Dopant P(n-type)

Crystal Diameter 3" & 9"

No.	Carbon	Resistivity	
I	High-C	30 Ωcm	
II	High-C	30 Ωcm	
III	Low-C	30 Ωcm	Power devices
IV	Low-C	30 Ωcm	
V	Low-C	50 Ωcm	
VI	Low-C	2 Ωcm	PVs

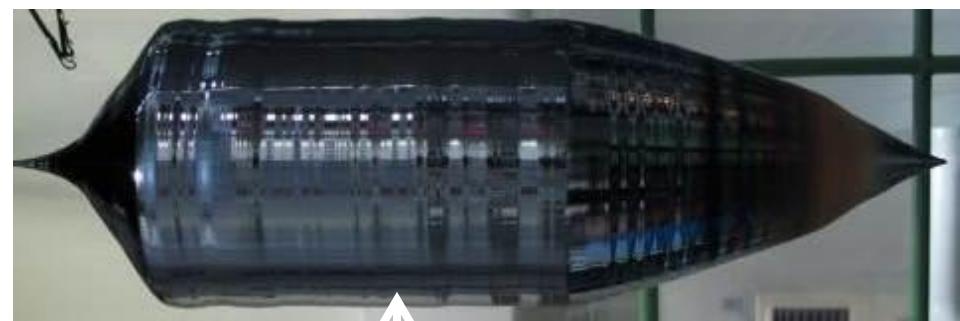


Sample	Al	Cu	Fe	Mg	Ni	Cr	Na	K	Ga
A	4.2E10	7.4E10	1.1E10	2.1E10	<2E9	<2E9	1.6E11	3.3E11	<1E9
B	6.2E9	<2E9	<2E9	<3E9	<2E9	<2E9	5.3E10	4.2E10	<1E9
Limit	3E9	2E9	2E9	3E9	2E9	2E9	3E9	2E9	1E9

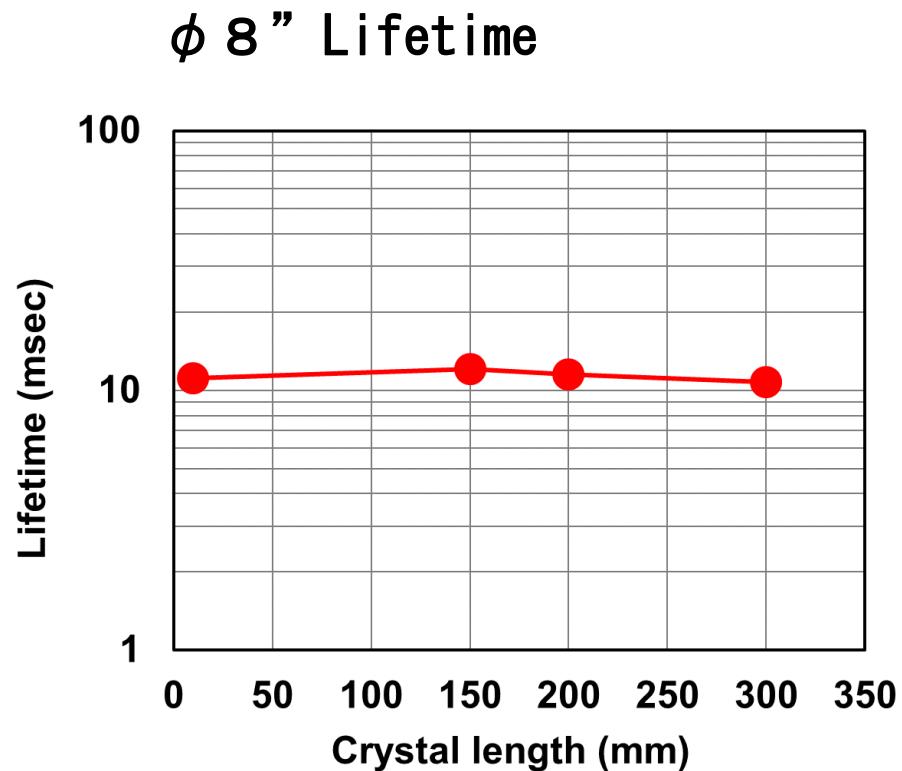
(Units: atoms/cm²)



N-type: 8 inches CZ-Si 10msec bulk lifetime



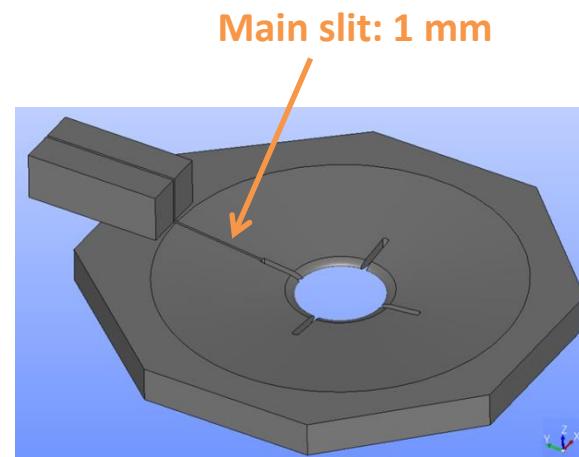
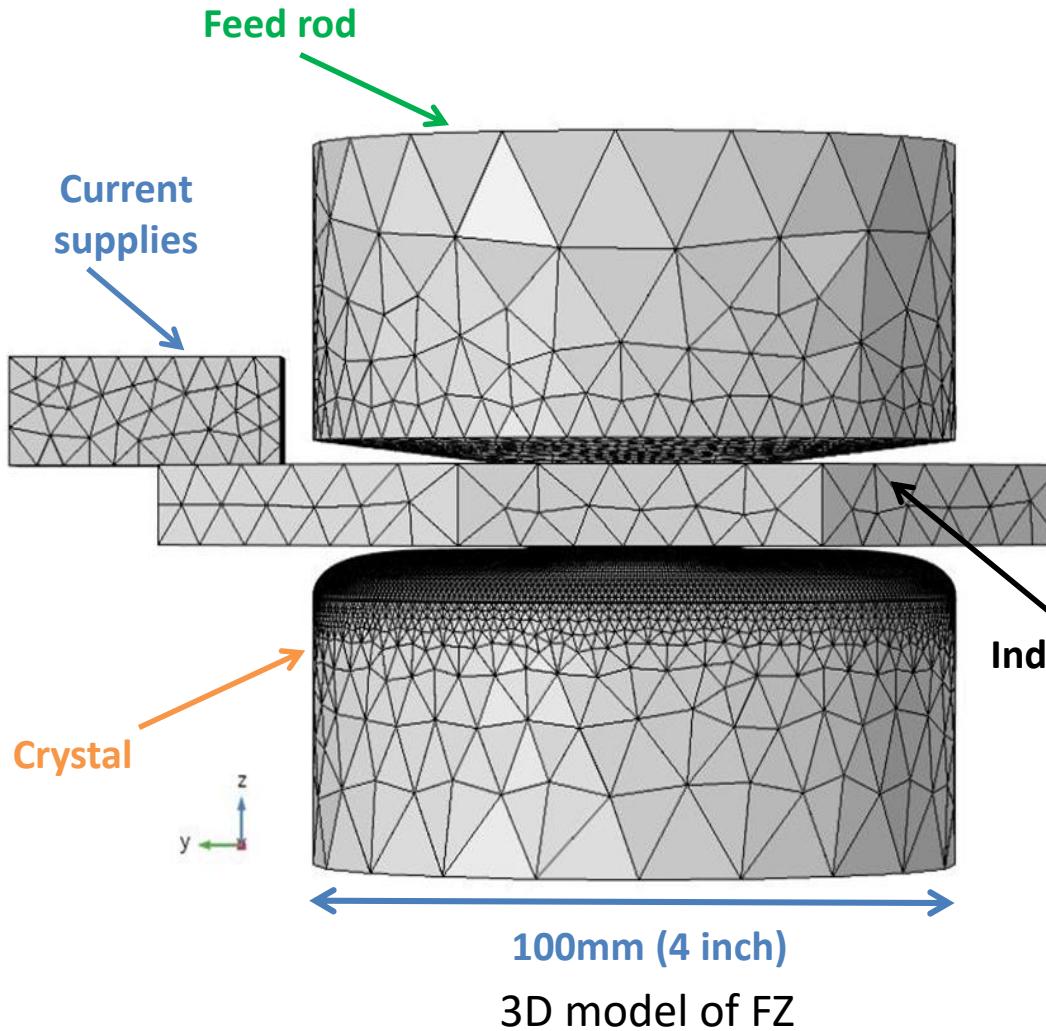
ϕ 8" Crystal



Numerical modeling

Electromagnetic model

Calculation program: COMSOL



Electromagnetic model

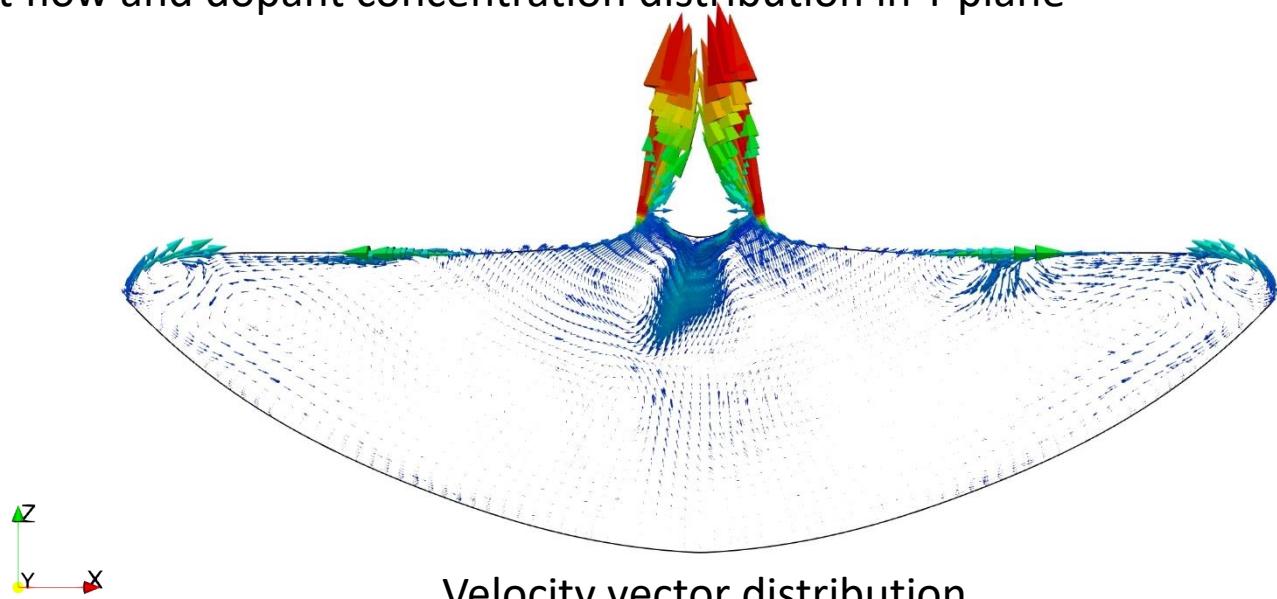
$$\mu_0 \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi - j\omega \mathbf{A}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

EM frequency: 3 MHz
Current: 1000 A



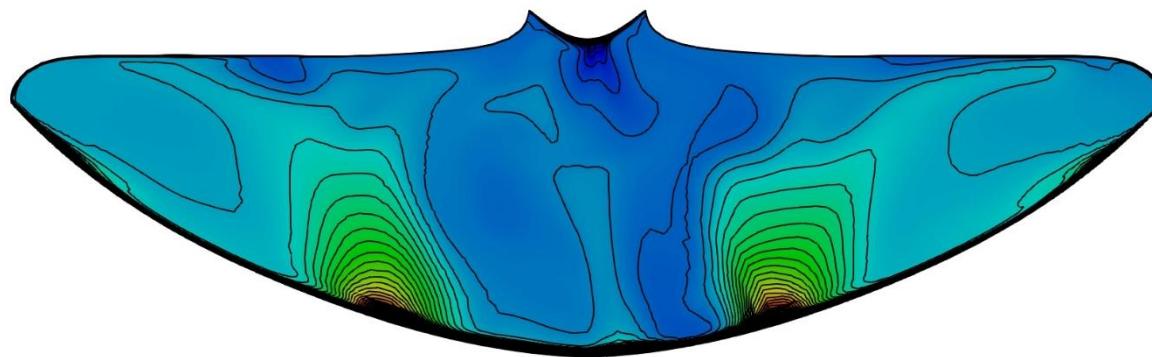
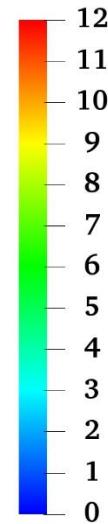
Results and discussion

Melt flow and dopant concentration distribution in Y plane



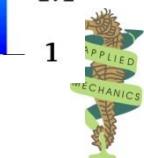
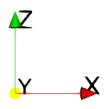
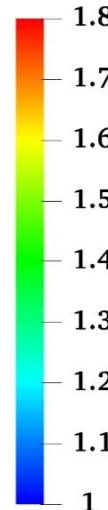
Velocity vector distribution

Velocity (cm/s)



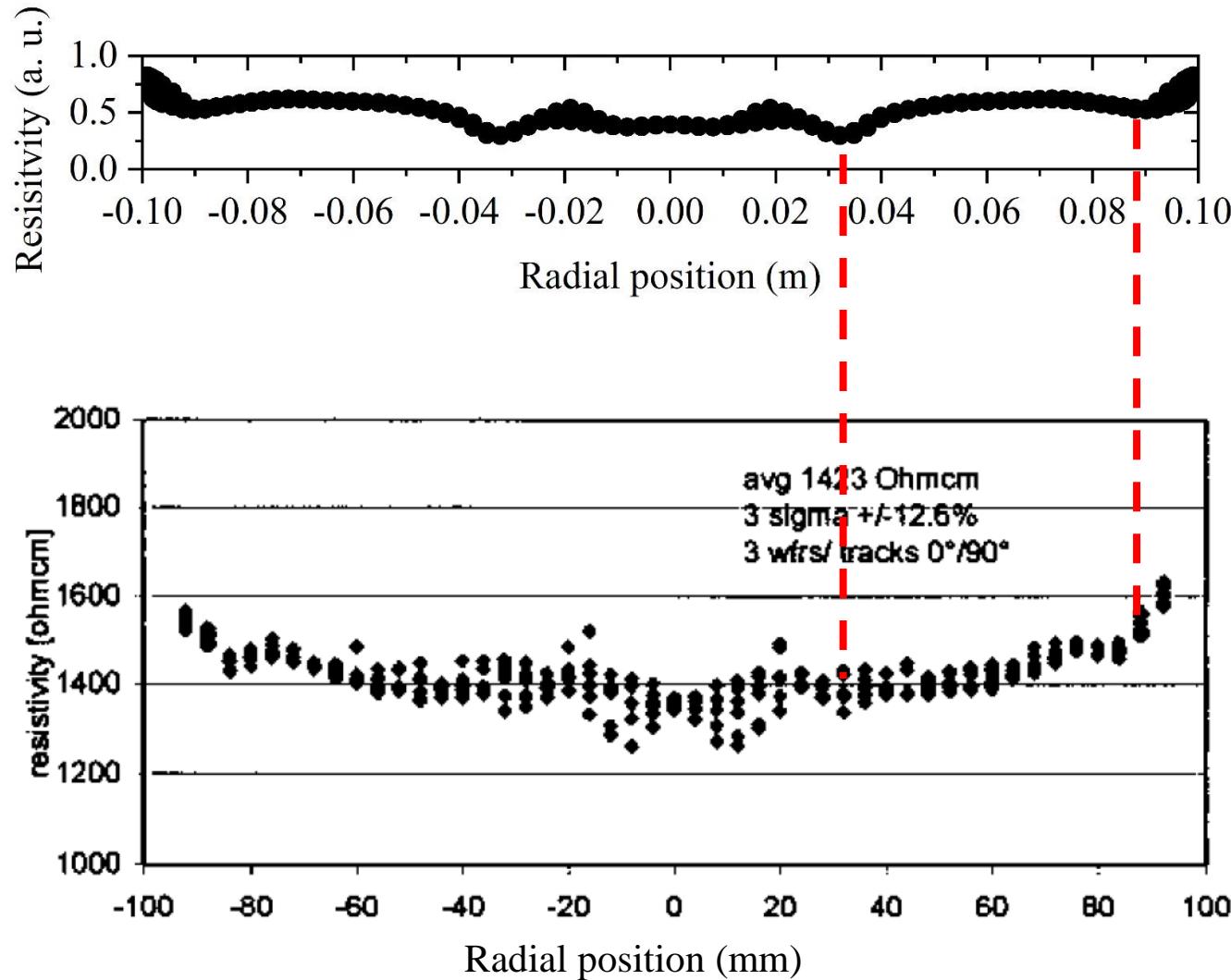
Dopant concentration distribution

Dopant concentration (a.u.)



Results and discussion

Comparison between calculation and experimental results.



Calculation result

Experiment result [4]

[4] Altmannshofer, L., et al. ISPSD'03 IEEE 15th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2003. Proceedings., IEEE

研究歴

2000

九州大学応用力学研究所:
結晶成長学研究室:(寒川助教授、中野技官)

2005

TMCZ結晶育成コード開発:
2D-3D融合アルゴリズムの確立(Prof. L. Liu)

2010

昇華法による
SiC結晶成長
コード開発
(Prof. X. Chen)

シリコン太陽電池用一方向性凝固法とSiC昇華法における
非定常解析
(Prof. B. Gao)

2015

高効率太陽電池用CZ結晶成長:(原田氏、宮村氏、Dr. X Liu, Dr. X Han)

2020

Ga₂O₃結晶成長:(吉川教授、Dr. X Han)

MDによる熱物性推算:結晶成長解析用

GaN結晶成長
(森教授)

大型一方向性凝固炉導入:
シードキャスト法の確立:
(原田氏、宮村氏)

結晶成長:
(宇田先生、藤原先生)

パワーデバイス用CZ、FZ結晶成長:西澤教授、
原田氏、宮村氏、Dr. X Liu, Dr. X Han)

ICCGE:名古屋
赤崎先生、天
野先生、森先
生、西永先生、
大鉢先生、他



Organization of ICCGE-18 (学術会議主催)

・日 時：平成28（2016）年8月8日（月） 9:10～9:59
・会 場：名古屋国際会議場「センチュリーホール」（1号館1階）

時間	次 第	備 考
09:00 (10)	登壇者入場・ご紹介	司会者より (英語)
09:10 (2)	皇太子同妃両殿下御臨席	司会者より (英語)
09:12 (8)	開会・歓迎の辞：日本結晶成長学会会長／ 第18回結晶成長国際会議組織委員会委員 柿本 浩一	英語
09:20 (5)	主催者挨拶：日本学術会議会長 大西 隆	英語
09:25 (5)	主催者挨拶：公益社団法人応用物理学会会長：保立 和夫	英語
09:30 (5)	母体団体代表挨拶：結晶成長国際機構（IOCG）会長 Roberto Fornari ロベルト・フォルナリ	英語
09:35 (5)	<u>皇太子殿下 お言葉</u>	英語
09:40 (5)	来賓祝辞：内閣府特命担当大臣 島尻 安伊子	英語
09:45 (4)	来賓祝辞：愛知県知事 大村 秀章	未定
09:49 (4)	来賓祝辞：名古屋市長 河村 たかし	未定
09:53 (2)	<u>内閣総理大臣メッセージ披露</u>	司会者より (英語)
09:55 (3)	閉式の辞：第18回結晶成長国際会議組織委員会委員長 荒川 泰彦	英語
09:58 (1)	皇太子同妃両殿下御退席	司会者より (英語)
09:59	閉会	



Organization of ICCGE-18 (学術会議主催)

第 18 回結晶成長国際会議 (ICCGE-18) 御昼食会概要 (案)

- 日時：平成 28 年 8 月 8 日（月）11：30～12：40
- 会場：名古屋国際会議場 展望レストラン「パステル」（1号館 7 階）
- 学会サイド参加予定人数： 8 名（うち外国人 1 名）
 - ・日本結晶成長学会会長 /
第 18 回結晶成長国際会議組織委員会委員長：柿本 浩一
 - ・日本学術会議会長 大西隆
 - ・公益社団法人応用物理学会会長：保立 和夫
 - ・結晶成長国際機構 (IOCG) 会長：Roberto Fornari (ロベルト・フォナリ) (※通訳同席)
 - ・内閣府特命担当大臣 島尻 安伊子
- 【以下、留保】
 - ・第 18 回結晶成長国際会議組織委員会委員長：荒川 泰彦
 - ・第 18 回結晶成長国際会議国際諮問委員会名誉委員長 /
2014 年ノーベル物理学賞受賞者：赤崎 勇
 - ・第 18 回結晶成長国際会議組織委員会副委員長 /
2014 年ノーベル物理学賞：天野 浩
- 愛知県：4 名
 - ・愛知県知事：大村 秀章
 - ・愛知県議会議長：横井 五六
 - ・名古屋市長：河村 たかし
 - ・名古屋市会議長：藤沢 ただまさ
- 宮内庁東宮職（殿下お一方の場合）3 名
 - ・東宮大夫（又は東宮侍従長），行啓主務官，東宮侍医
- メニュー（※詳細は未定）
- 御先導：名古屋国際会議場館長 中谷 務



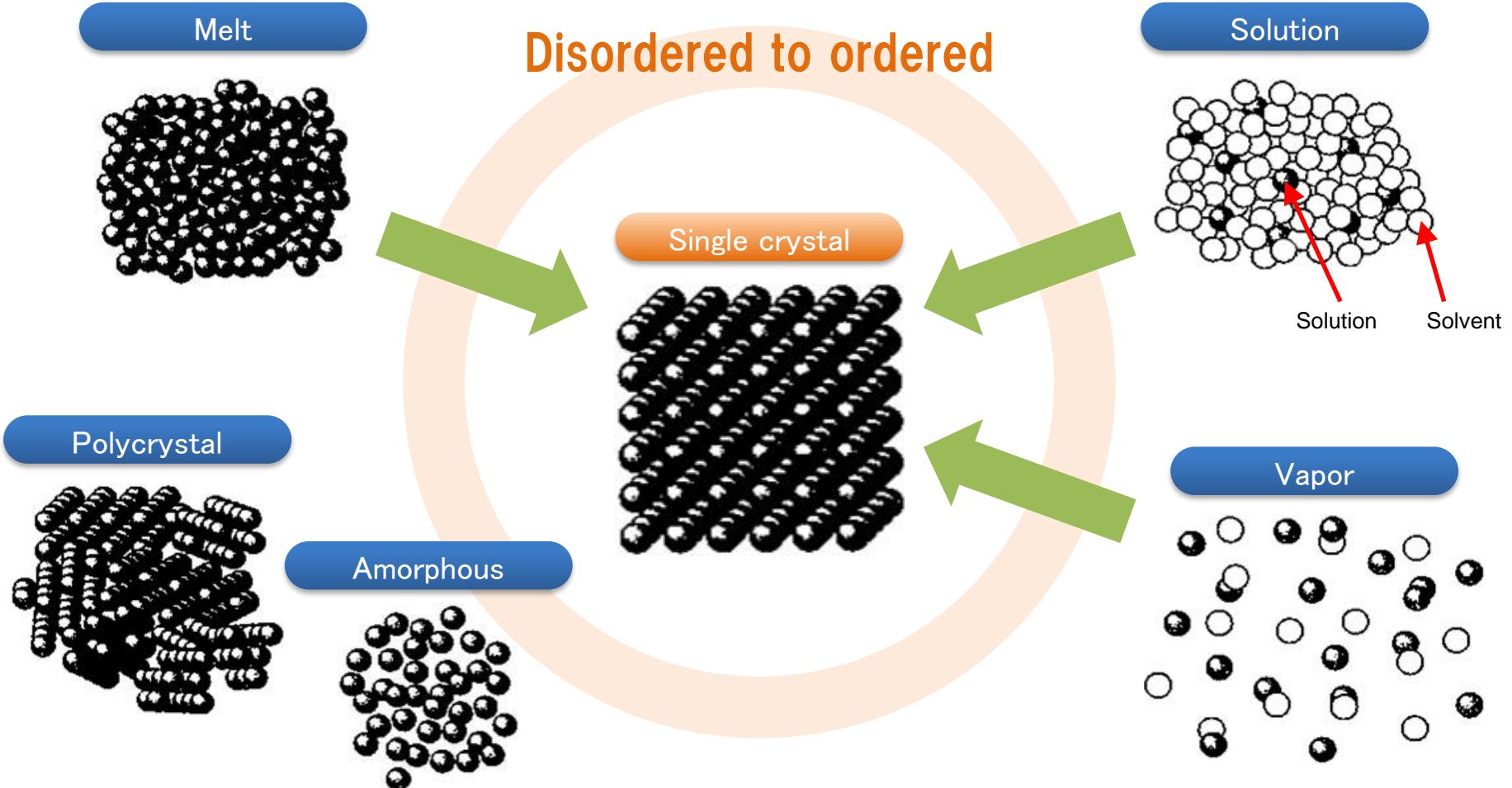
Special lecture to the Crown Prince



日時: 2016, 7, 14, 14:00–15:00
場所: 東宮御所 黒柿の間
時間: 45分: ご進講“結晶成長”
15分: 質問とお茶

学術振興会主催国際会議:
3–5件/年
皇室出席: 1件/1–2年

Crystal growth ?



Crystal: Condensed matter with ordered structure of atoms and molecules

Crystal Growth

Medical



MRI



Medicine

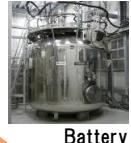


Energy

Wind turbine



Mega Solar



Battery



Electronics

Display



Rail way



LED

Science

Space experiment



Super computer

Devices



Organic TFT Display



Flexible Circuits



Power Devices



QDs laser

R&D



LED



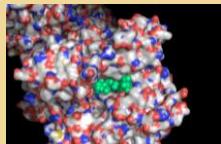
SiC devices



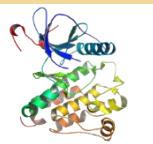
Organic electronics



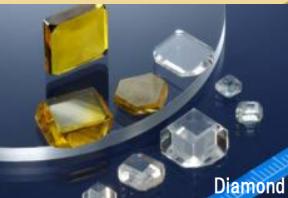
Super conductor



Protein



Non-linear optics



Diamond

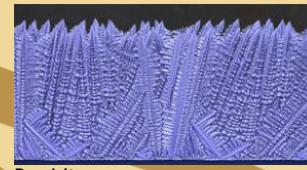


Syntilator

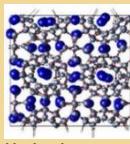


Silicon

SiC bulk



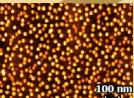
Dendrite



Hydride



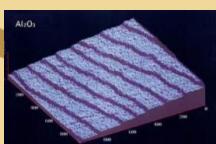
CNT



Space experiment



Inter molecular science



Step flow

最後に

研究室、事務室、学会、共同研究関係者に感謝致します。

家族に感謝、特に妻(亮子)に感謝します。

今後も、九大の特任教授(学術研究員)として研究を継続します。

今後とも、よろしくお願ひします。

