

最終講義、2008年3月18日

---

# プラズマ物理と国際交流

～恩師、友との出会い・来し方を振り返る～

佐貫平二



---

「及時當勉勵 歲月不待人」

陶淵明

明日歌

明日復明日

明日何其多

我生待明日

萬事成蹉跎

# 今日の話の献立

---

## # 自己紹介:

汝は何処から、学歴、職歴、研究、教育及び学会活動の歩みを垣間見る

## # これまでの研究生生活(活動)を振り返る:

思い出に残る研究を概観する

## # 国際交流の思い出:

多くの先生、先輩、同僚、友との出会い。

## # 備忘録の座右の銘に思うこと

You should always have a good dictionary (adviser) by you.

# Where did you come from?

---

## 狸の腹鼓

“讃岐のたぬきはえらいたぬきで、紀州のたぬきとばかり合いをして勝ったのだときいたことがある“

「友人のさぬき君は四国ではなく秋田の生まれだし、そういえば、友人のさつま君も九州と縁がなくたしかもとは奈良の人だ」

# わが田舎文化と原風景

---

## 湯沢市

鳥海山

犬っこ祭り

七夕まつり

小野小町の出身地

白瀬中佐

芭蕉

この少年は誰でしょう



“さぬきさんちのへんじぼはめんこくねぎや“

# 日大時代の学部担任、大学院及び今日までの恩師、 非線形物理のご指導をいただいた大先生



担任と野球を楽しむ

**M. Krushkal**と一緒に  
の先生(1992)。昨  
年は、書かれた本を  
頂戴した。

ポスドクとしてアメリカに旅立ち、羽田にて。  
恩師及び**佐藤正知**先生夫人もご一緒。

“Hamada 座標”

(論文投稿時のエピソード)

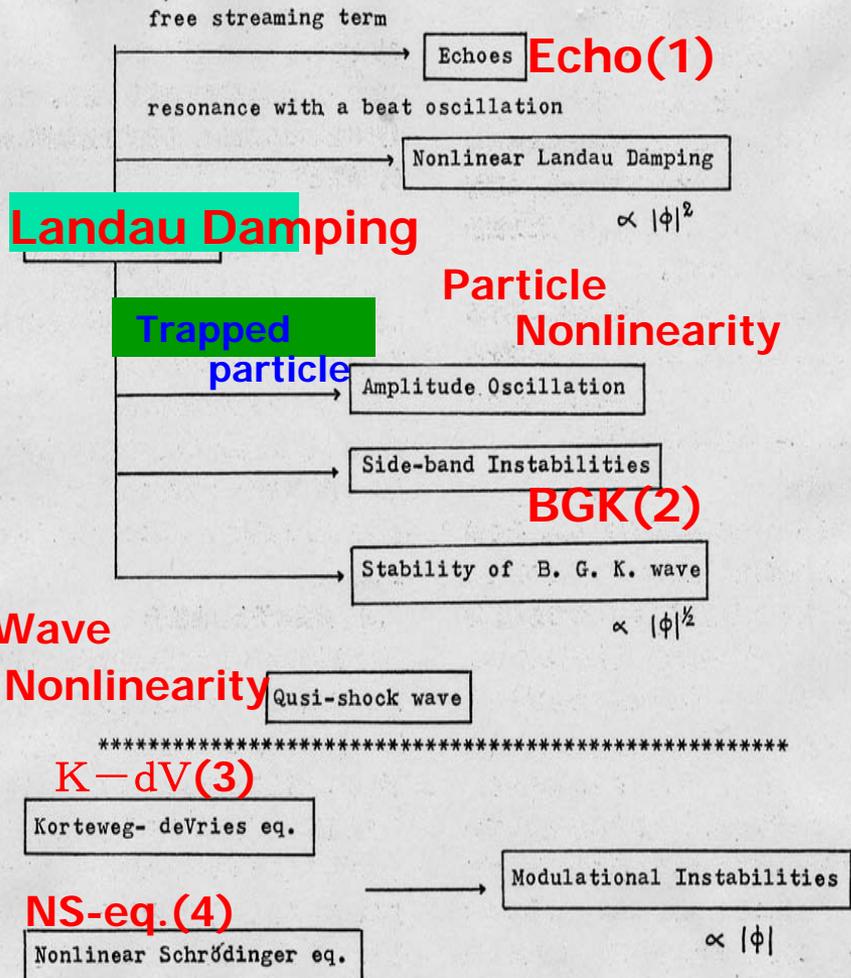
**レフェリーコメント**:「式が書き忘れてま  
す」、「This is a very important paper  
and Nuclear Fusion should be  
happy to publish it」(佐藤正知先生  
から)

**N. Zabusky**と一緒にの先生  
(1976)



# I. Research Topics during 1960's and 1970's ( hors-d' Oeuvre)

## Plasma Turbulence(5)



## "Particle" and "Wave" Aspects

# Wave-particle interaction---

Linear Landau Damping

Plasma Wave Echo

# Finite Amplitude Wave

"Particle Nonlinearity"

Trapped particles, "Clumps"

"Wave Nonlinearity"

Nonlinear waves Phenomena

"Soliton", "Caviton(Envelop Soliton)"

**"Particle-Wave Nonlinearity"**

**" symbiotic" state**

"Weak Turbulence"-→

**"Strong Turbulence"**(attractive but complicated problem)

**Drift Turbulence and Zonal flow system**

**Activities awake from long sleep**

From memo by H.Sanuki(1973)

# プラズマ弱乱流理論と非線形波動理論の統一理論への挑戦 (材料漁りを自分で始める)

M. Kono and H. Sanuki(1972): " A new Approach to Derivation of K-dV Eq."

Vlasov- Poisson  
System

(Random Phase Appro.)

(Quasi-monochromatic Appro.)

Weakly Turbulent  
Theory

Nonlinear Wave  
Theory

"Nonlinear Effects"

Turbulent State



Coherent State

Phase Transition

Turbulent  $\leftrightarrow$  Zonal flow (in fashionable way)

乱流理論

Renormalization theory based on Propagator and Vertex Modification

Strong Turbulence Theoryへの挑戦(河野、佐貫、等々力)九大応力研レポート

# 非線形波動現象への挑戦 (餌のとり方を自分で学び始める)

戸田先生主催の“**戸田ゼミ**”に参加し自分ではじめて餌選びの勉強を始める。

**戸田ゼミ**: 様々な専門分野の異なる仲間が集い、非線形の諸問題を議論  
(東京教育大学光学研究所(後、教育大茗荷谷校舎)で週1回開催)

**参加メンバー**: 戸田、小寺、和達、田上、(教育大学の他の仲間も参加)、  
川上、**佐貫**(日大)、河野(東大)、早稲田のグループ、他

戸田盛和著: “ソリトンと物理学”サイエンス社(2006年7月)、“一緒に学び楽しく過ごした当時の大学院生諸君、、、相当多くの研究者が巣立っていった。器用に巣立った人、いくらか不器用に巣立った人など今でもなつかしく彼らのことを思い出すこともしばしばである。”

“極めて不器用に巣立ったひとりかもしれないし、未だ巣立っていないかも”

# 非線形波動(ソリトン)研究の出発点

# “寺寛”や“友近”などの古典的な本で勉強する楕円関数などの特殊関数を身近なものに感じるきっかけになった(戸田先生、等々力さんの影響も大)

# 戸田先生から物理学の奥行きの高さ、難しさと面白みを学ぶ

# Powerful Methods to solve Nonlinear Equations (Nonlinear Waves such as Soliton)

---

# Hopf-Cole transformation

# Inverse scattering method (逆散乱法)

# Gardner- Morikawa (G-M) transformation method

# Hirota's method

# Bäcklund transformation method

# Konno - Sanuki transformation

( this discussion was introduced in Math. Book in USA)

# Reductive perturbation method (遞減摂動論)

etc.

**Note!!** Reductive perturbation method is based on the ordering associated with mutual relation among **amplitude**, **space** and **time scales**

# Application of Hopf- Cole Transformation

## (温故知新)

---

Topics of **plasma rotations** were one of highlights during 1960's and 1970's associated with topics of **plasma confinement improvement**

### Experiments:

B-3(1966), JIPP-1(1974)(  **$l=3$  stellarator devices**), H-E, CHS(1991), W7-A, LHD ( **$l=2$  heliotron devices**), CCT(1990), HYBTOK-II(**Tokamaks**) etc.

### Theory:

**Weak Shock Theory:** Hazeltine(1971), Green(1972), Stix(1973), Asano and Taniuti(1972) ,others

**Strong Shock Theory:** **Shaing, Hazeltine and Sanuki(1992)**, Taniuti, Wakatani et al.(1992)

**Point:** **plasma rotation may be determined by balance between "driving force" and drag force such as viscosity**

" How to enhance spin up of rotation"

"How to evaluate viscous damping force"

# Solution of Strong Shock by Hopf-Cole Transformation

Basic equation describing plasma rotation in tokamaks

$$\chi = \ln(N/\tilde{N}) \cong e\phi/T$$

**Nonlinear term**

$$\frac{2}{3}D\frac{d\chi}{d\eta} + (1 - M_p^2)\chi + 2A'(\chi^2 - \langle \chi^2 \rangle) = 2\varepsilon G \cos \eta$$

Hopf-Cole Transformation:  $\chi = (D/3A')(Z/Z')$

$$Z'' - \left[ \left\langle \frac{Z'}{Z} \right\rangle^2 + \frac{b}{F^2} \cos \eta \right] Z = 0, \text{ at } M_p \cong 1$$

no nonlinear term

$$\chi = \frac{D}{3A'} \left( \frac{dce_0}{d\eta} \right) \frac{1}{ce_0}$$

$$M_p \equiv \frac{V_p B}{c_s B_p}$$

$$V_{pc} = c_s \frac{\varepsilon}{q}$$

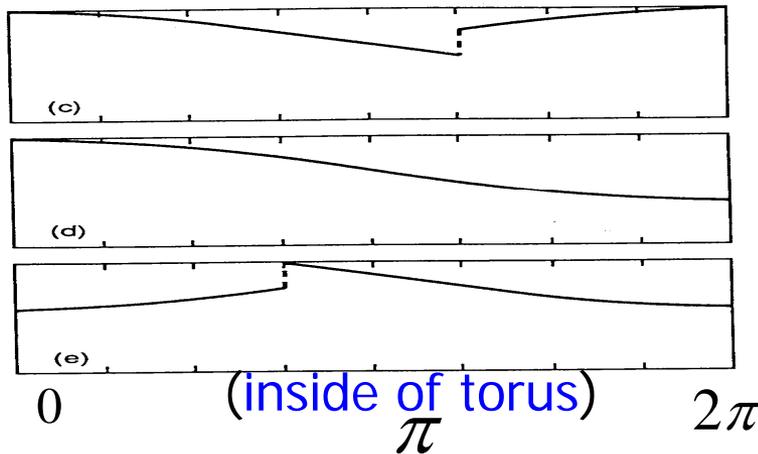
$ce_0$  : Periodic Mathieu Function of order zero

“Stringer’s Rotation Limit”

# Solution of Strong Shock (continued)

“ Shock formation in a poloidally rotating tokamak plasma”  
 by **Shaing, Hazeltine and Sanuki** ( Phys. Fluids B4(1992)404)

Normalized  
Density or  
potential



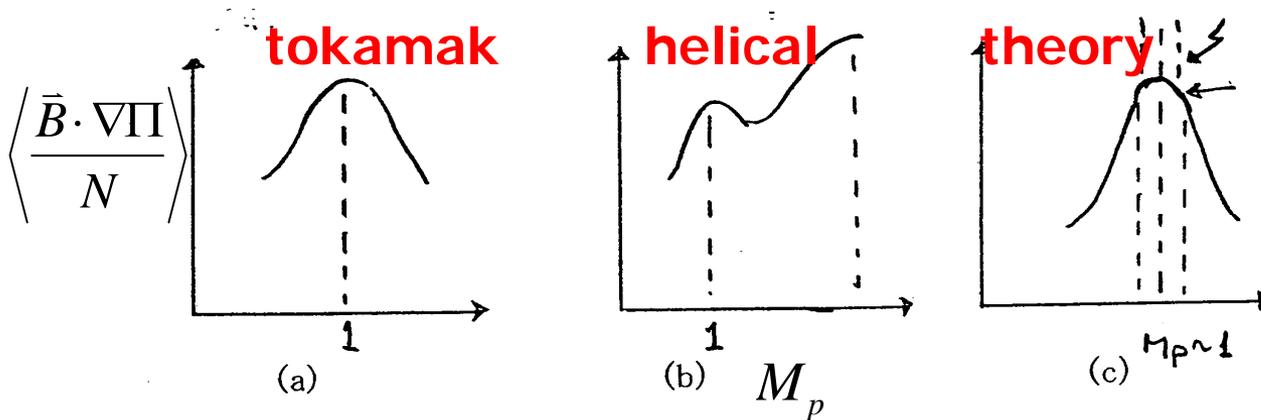
**Slow shock** inside of torus  
 $M_p < 1$   
**Strong shock** outside of torus

$$M_p \cong 1$$

**Slow shock** inside of torus

$$M_p > 1$$

$$M_p = |m - nq|/m$$



linear  
 nonlinear

Viscosity is proportional  
to the gradients of  
density and potential

# Excellence in Publications(1993)

K. C. Shaing, R. D. Hazeltine and H. Sanuki



A.W. Trivelpiece

のサインあり

# Discovery of new truths by studying the past through scrutiny of the old(温故知新)

## Vertex(Convective cell,zonal) Motions in Nature

Typhoon, Giant Red Spot in Jupiter (Zonal flow)、  
El Nino, La Nina, etc

### Zonal Flow



### Review of vortics

International J. of Fusion Energy  
(1977-1985, particularly, 77~78, F1R26)

- # Hermann Helmholtz(1858)(general)
- # **Winston H. Bostick** (Vortex Ring)
- # D.R.Wells and P.Ziajka (Theory and Experiment) , others

What kind of dynamics determines  
Structure of Vortices(2D) ?

(unsophisticated question)

$$l_x > l_y \text{ or } l_x \approx l_y \text{ or } l_x < l_y$$

# Electromagnetic Drift Wave turbulence and Convective Cell Formation(1) (1980's)

#Convective cell formations( electrostatic ) have attracted much interest from turbulence and related anomalous transport

#Electrostatic convective cell formation based on nonlinear drift wave model (Hasegawa-Mima eq.)

$$\beta < m_e/m_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta_{\perp}\hat{\phi} - \hat{\phi}) = [(\nabla_{\perp}\hat{\phi} \times \hat{z}) \cdot \nabla_{\perp}][\Delta_{\perp}\hat{\phi} - \ln\left(\frac{n_0}{\omega_{ci}}\right)] = 0$$

# Electromagnetic convective cell formation based on nonlinear drift Alfvén wave (Sanuki-Weiland model)

$$m_e/m_i < \beta \ll 1$$

Viscosity term

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} - v_A^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} - V_{Di} \nabla_{\perp} \frac{\partial}{\partial t} - \mu \Delta_{\perp} \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta_{\perp} \phi \\ &= \frac{c}{B_0} \left( 1 - \frac{k_{\parallel} v_A^2}{\omega^2} \right) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \right) \Delta_{\perp} \phi \end{aligned}$$

$E \times B$  nonlinear term

# Electromagnetic Drift Wave turbulence and Convective Cell Formation(2)

~ Application of Reductive Perturbation Theory ~

From First order, we get **dispersion relation** for linear drift Alfvén mode

$$\omega^2 - k_{\parallel}^2 v_A^2 + k_y (v_{Di} - c_0) \omega = 0$$

$$\phi_l^{(1)} = \hat{\phi}_l^{(1)}(\xi, \tau) \left( \frac{2}{L} \right)^{1/2} \sin(k_m x), \quad k_m = m(2\pi/L) \quad (m : \text{radial mode number})$$

From second order:

$$\lambda = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad \text{Group velocity}$$

From third order:

$$\phi_0^{(2)} = \frac{k_y^2}{k_m L (\lambda + v_{Di} - c_0) B_0} \left( 1 - \frac{k_{\parallel}^2 v_A^2}{\omega^2} \right) \left| \hat{\phi}_1^{(1)}(\xi, \tau) \right|^2 \sin(2k_m x)$$

**Convective cell  
Mode (Zonal flow)**

$$iS \frac{\partial \hat{\phi}_1^{(1)}}{\partial \tau} + U \frac{\partial^2 \hat{\phi}_1^{(1)}}{\partial \xi^2} + Q \left| \hat{\phi}_1^{(1)} \right|^2 \hat{\phi}_1^{(1)} = -i\nu \hat{\phi}_1^{(1)}$$

**Nonlinear Schrödinger  
eq. with viscous damping**

# Electromagnetic Drift Wave turbulence and Convective Cell Formation(3)

## Coefficients of NS Equation

$$s = (2\omega + k_y v_{Di} - k_y c_0)(k_m^2 + k_y^2),$$

$$U = -\lambda(\lambda + v_{Di} - c_0)(k_m^2 + k_y^2),$$

$$Q = -\left(1 - \frac{k_{//}^2 v_A^2}{\omega^2}\right) \frac{\omega k_y^2 (3k_m^2 - k_y^2)}{L(\lambda + v_{Di} - c_0)} \left(\frac{c}{B_0}\right)^2,$$

$$v = -\omega \mu (k_m^2 + k_y^2)$$

Following the theory by **H. Sanuki et al.(1972)**

$$\hat{\phi}_1^{(1)} = a(t) \operatorname{sech}\left[\left(\frac{g}{2p}\right)^{1/2} a(t)(\xi - 2vt)\right] \exp\left(i\frac{v}{p}(\xi - vt) + i\frac{g}{2} \int_0^t a^2(t) dt\right)$$

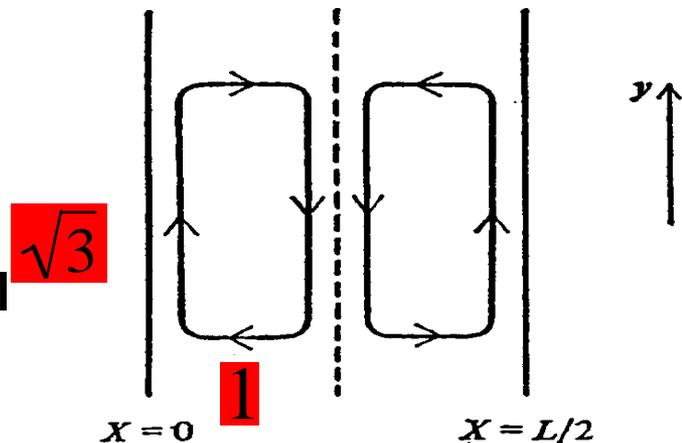
$$p = \frac{U}{s}, \quad g = \frac{Q}{s}, \quad \frac{\partial a}{\partial t} = -2va$$

## Modulational insta. condition

$$UQ \propto (3k_m^2 - k_y^2) \geq 0$$

Elongated structure of Convective cell and/or zonal flow

Weiland, Sanuki and Liu(1981)PF etc.



---

“Old Wine in New Bottles”

# Recent Progress in Studies of Zonal Flow

**K.Itoh, K.Hallatschek, S.Toda, H.Sanuki and S.-I. Itoh:**

J.Phys. Soc. Jpn.**73** (2004)2921., “ **Coherent Structure of Zonal Flow and Nonlinear Saturation**” (*日本物理学会注目論文賞(2004)*)

**Evolution of zonal flow and ambient turbulence** are given as

[Smolyakov & Diamond(2000), P. Kaw et al.(2002)]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial}{\partial r} V_z \right) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} \frac{c^2}{B^2} \int d^2 k \frac{k_g k_r}{(1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2)} \bar{N}_k - \gamma_{damp} \frac{\partial}{\partial r} V_z$$

and

$$\frac{\partial}{\partial t} N_k + \frac{\partial \omega_k}{\partial \vec{k}} \cdot \frac{\partial N_k}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \omega_k}{\partial \vec{x}} \cdot \frac{\partial N_k}{\partial \vec{k}} = 0$$

$V_Z$  : Zonal flow velocity

$N_k$  : Slow modulation of drift wave

$\gamma_{damp}$  : damping rate of ZF

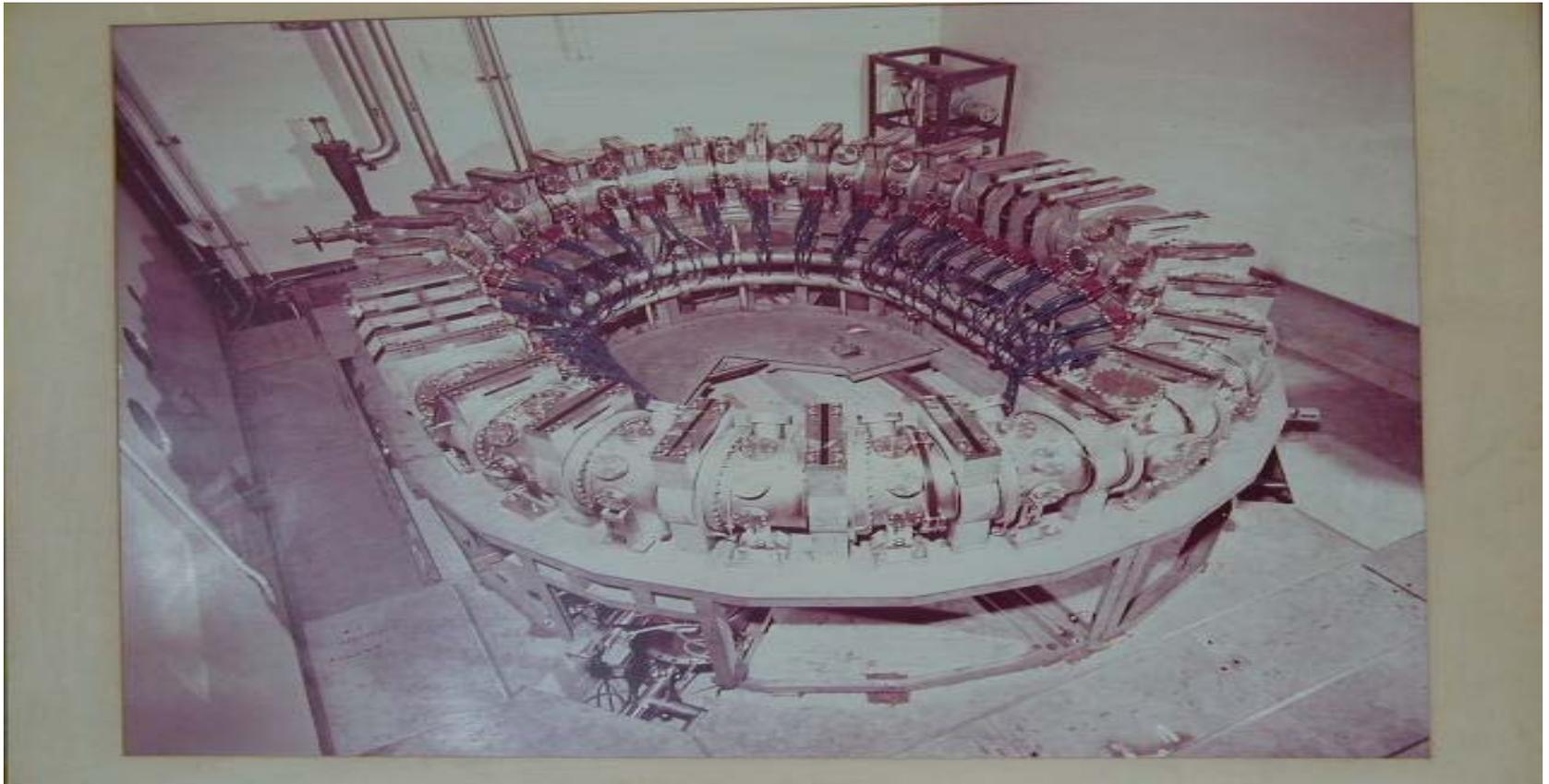
# 実験計画への参加及び協力研究活動

---

- 1) Nagoya Bumpy Torus (NBT) 実験への参加と研究活動
- 2) Asymmetric Mirror Experiment (AXIM) 計画  
概念設計への参加(省略)
- 3) Compact Helical System (CHS) 計画立案及び研究活動
- 4) Large Helical Device (LHD) 計画への参加

# NBT 実験へ参加(1978~1985)(1)

Alternative Concepts ( Heliotron, Mirrors, **Bumpy Torus**、 etc. )



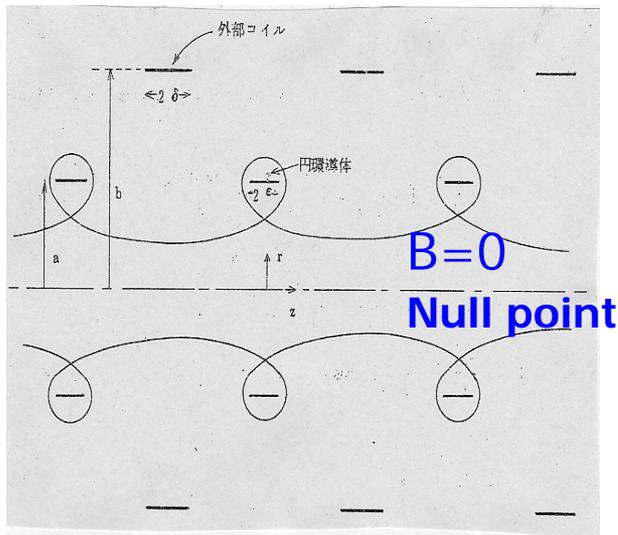
**Race track 付きのNBT 1号機**

名古屋大学プラズマ研究所のパンフレット:NBTから抜粋

# Devices with Internal Conductor and Hot Electron Ring(1)

## Devices with average minimum-B Configuration due to internal conductor and energetic (hot) electron rings Internal Conductor Systems

- 1) Linear axisymmetric: Heliotron-P, C, and H (Kyoto U.), LAMEX(UCLA)
- 2) Torus : Caulked Cusp Torus (CCT) (IPP, Nagoya), 野田さん?
- 3) Poroidal Heliotron : Pulton (USSR)

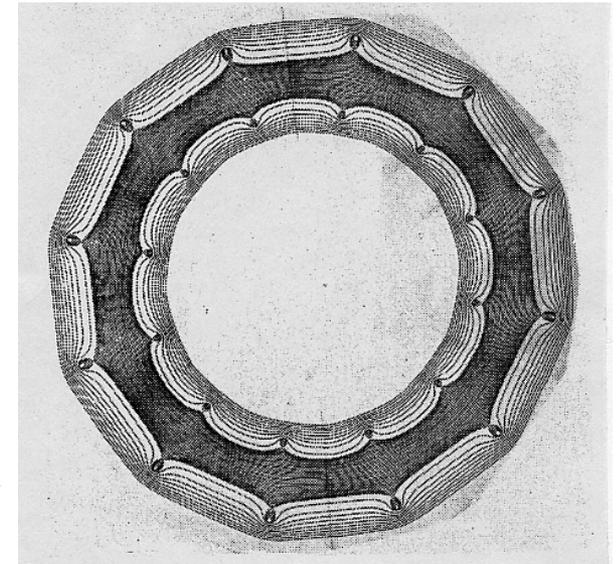


### Heliotron-P

毛利明博、松田慎三郎：  
核融合研究20(1968)  
名古屋大学文献センター  
165から抜粋

### CCT

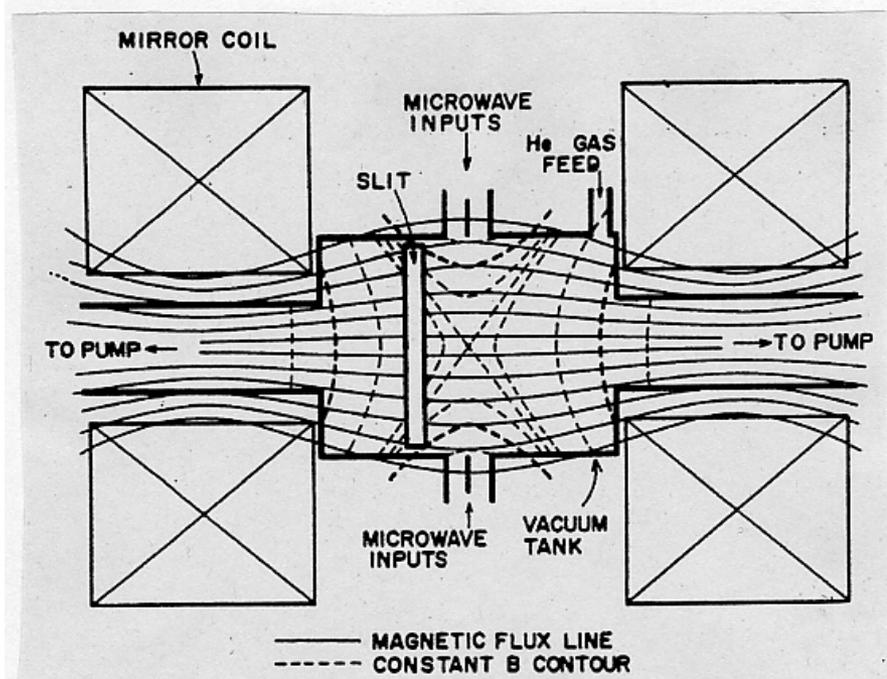
名古屋大学プラズマ研究所文献センターレポート  
IPPJ-127(1972)から抜粋



# Devices with Internal Conductor and Hot Electron Ring(2)

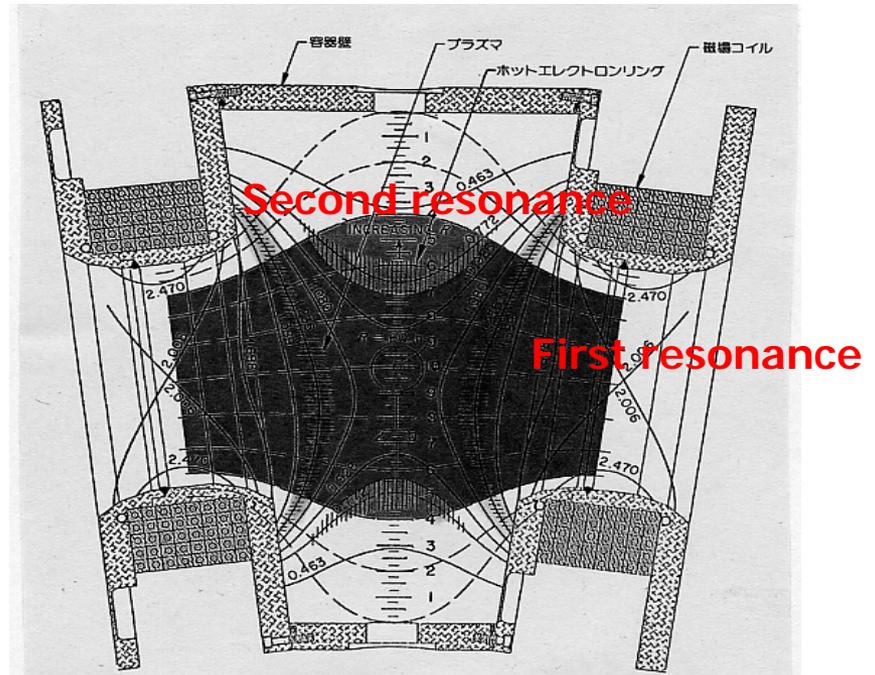
## Devices with Hot Electron Ring

- 1) Mirror configuration: ELMO (ORNL), TPM (Nagoya)
- 2) Multi-mirror configuration: STM (TRW)
- 3) Torus configuration: EBT (ORNL), NBT (Nagoya)



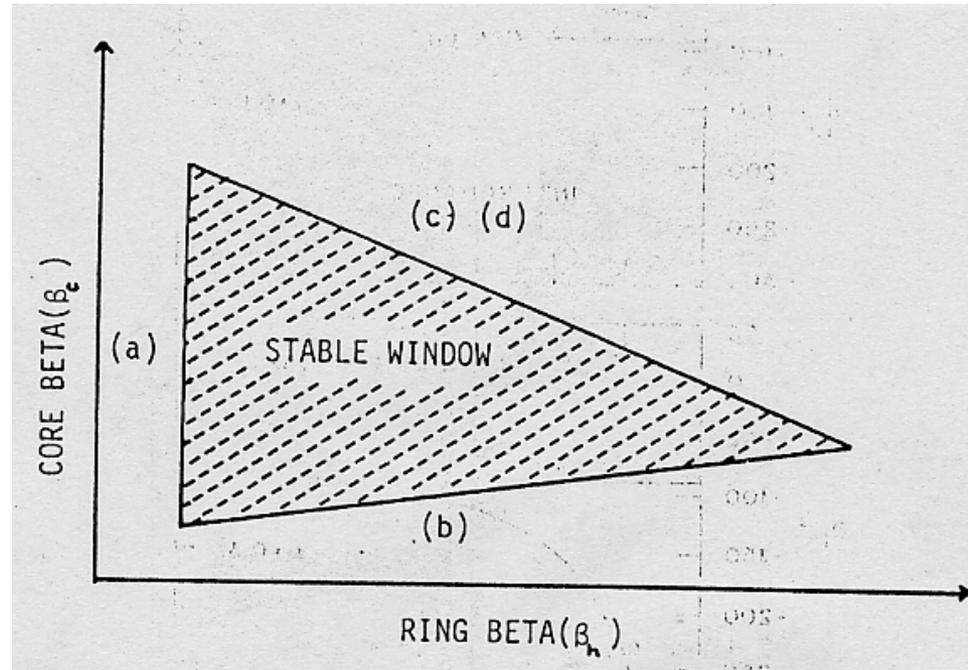
TPM

名古屋大学プラズマ研究所のパンフレット:NBTから抜粋



EBT, NBT

# Experiments and Theory of Bumpy Torus(1)



**Stability boundaries:**

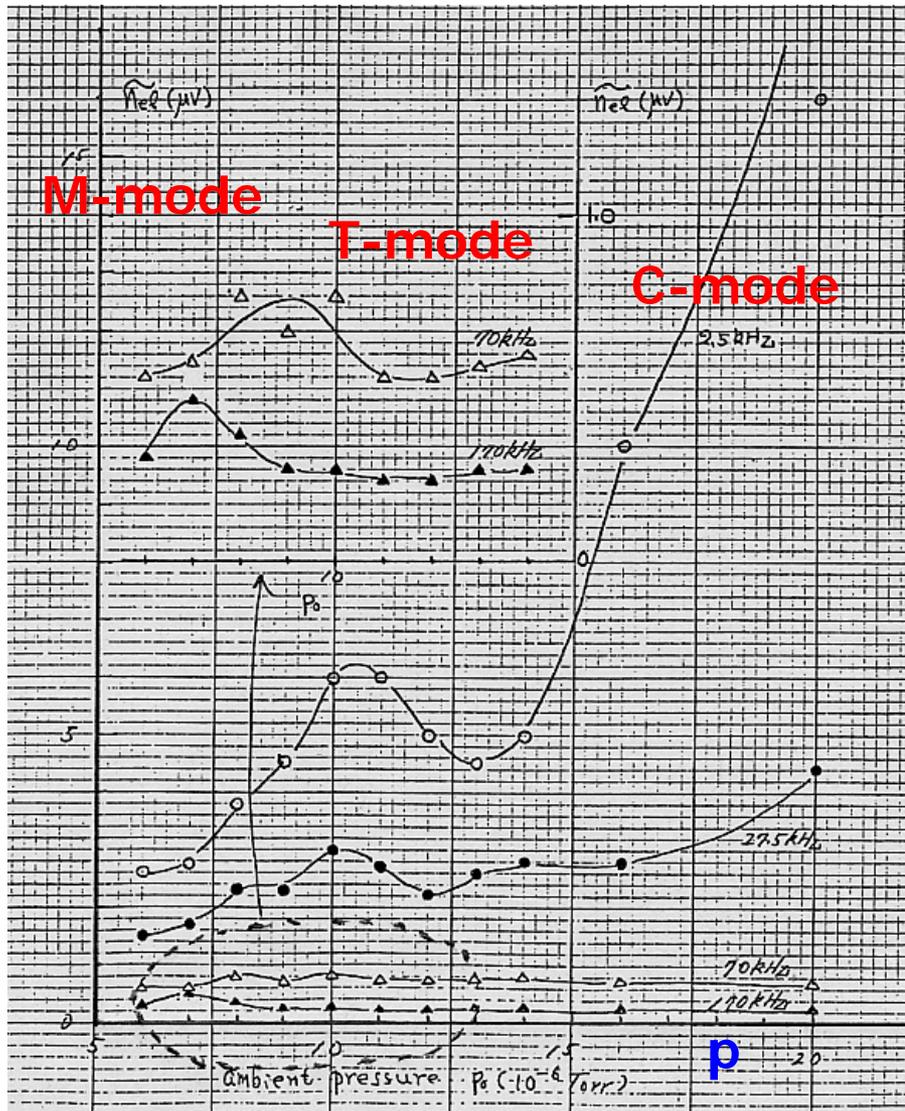
(a) Ring beta

(b) Core beta

(c), (d) NVL limit, Ring-core  
interaction

**Note: Stable window becomes narrow due to careful estimations**

# How to explain Fluctuations observed in EBT and NBT---Effects of Hot electron Ring and E-field (1)



This is the fluctuation data (<100kHz) by **S. Hiroe** (EBT)

Similar data was obtained by **A. Komori**

(see, "Plasma Fluctuation Measurements in EBT", ORNL/TM-7530(1981))

# " This electrostatic fluctuation is considered to be a drift instability"

# " Location of fluctuation moves inward as the neutral pressure is lowered"

揺らぎ、電場、高エネルギー電子の関係 ---motivation

# Simple Explanation of E-Stabilization Mechanism

Propagator:  $\frac{1}{\omega - k_{\parallel} v}$

Free streaming particles resonate with waves:  $Z\left[\frac{\omega}{k_{\parallel} v_{th}}\right]$

In case of inhomogeneous electric field, drift velocity in y-direction is given as

$$V_y \cong \frac{E_{r0}}{B} + \frac{E_r'}{B} \frac{m}{eB} v_y$$

Doppler Shift

Resonance

$$\vec{k} \cdot \vec{v}'(t') = k_{\parallel} v_{\parallel} t' + k_y \frac{E_r'}{B} \frac{m}{eB} v_y t' + [OscilatingTerms]$$

Conventional Free streaming term

Additional free streaming term perpendicular to B

$$Z\left[\frac{\bar{\omega}}{\bar{k}_{\parallel} v_{th}}\right]$$

$$\bar{\omega} = \omega - \bar{\omega}_{E \times B}$$

“Perpendicular Landau Damping”

Timofeev Mode

$$\tilde{k}_{\parallel}^2 = k_{\parallel}^2 + (k_y \rho_j)^2 \left[ \frac{L_n e}{T_j} E_r' \right]^2$$

# Two Contributions from $E_r$ and $E_r'$

## (1) Specific term in dispersion relation

Polarity Dependence

$$\omega - \omega_{*j} - \omega_{E \times B}$$

Charge Dependence

Most unstable situation at  $\omega_{*j} + \omega_{E \times B} \cong 0$

SWITG: Velocity  
Shear stabilization  
参照

Note: Polarity dependence is different for

Electron Modes( drift waves, etc.)

Ion Modes( flute modes, etc)

## (2) Perpendicular Landau Damping

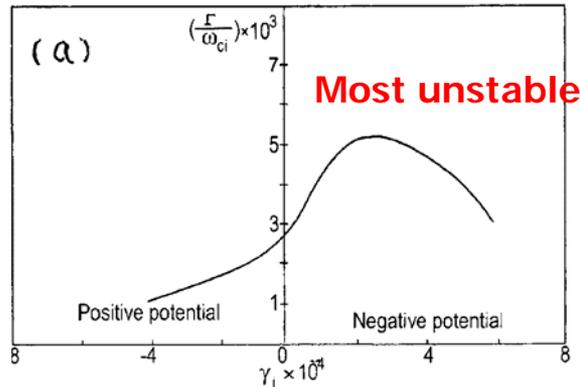
$$\tilde{k}_{//}^2 = k_{//}^2 + (k_y \rho_j)^2 \left[ \frac{L_n e}{T_j} E_r' \right]^2$$

Stabilization, regardless of its porarity of  $E_r'$   
provided  $E_r'$  is large enough

# Electric Field Stabilization(2)

## Comparison between theory and Experiments

- 2) Comparison between theory prediction and experimental observations: electrostatic drift wave versus potential shear rotation



Growth rate for electrostatic drift wave in BT versus plasma rotation parameter (H.Sanuki, Phys. Fluids(1985))

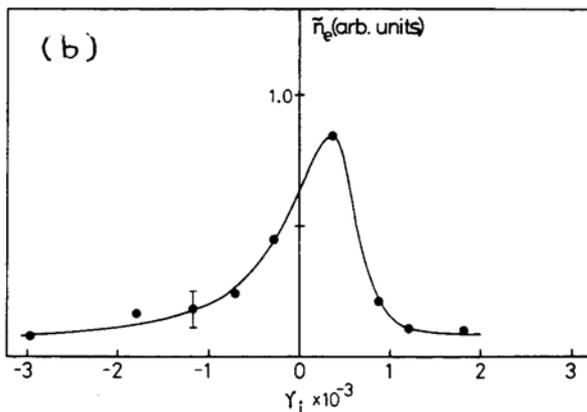
Drift wave fluctuation in Gamma -10 mirror expr.

( A.Mase et al. PRL(1990))

Similar results are observed in T deV tokamak, Tohoku-U Mirror experiment

Note: different for flute mode

(Yoshinuma PhD Topics)



# ~ Freshman Level Comment on E-Effect ~

#Difference between "Flute Apprx." (  $k_{||} = 0$  ) and "Non-Flute Apprx." (  $k_{||} \neq 0$  )

Drift wave dispersion relation:  $\omega^2 - \omega_* \omega - C_s^2 k_{||}^2 = 0$

$$\omega^2 - \omega \omega_* = \omega \quad \bullet \quad (\omega - \omega_*)$$

ion

electron

One from electron dynamics and another from ion dynamics

# Case with  $k_{||} \neq 0$  (small) ( drift waves)

$$\frac{\tilde{n}_e}{n} \cong \frac{e\tilde{\phi}}{T_e} \frac{\omega_*}{\omega}$$

( from parallel component of equation of motion (Kadomtsev Model)

# Case with  $k_{||} = 0$  (Flute modes)

$$\frac{\tilde{n}_e}{n} \cong \frac{e\tilde{\phi}}{T_e} \frac{\omega_*}{\omega - \omega_{E \times B}}$$

( from perpendicular component of continuity eq. (Rosenbluth & Simon))

Rotational Instability

Handle with Care

# Compact Helical System (CHS) 計画立案及び 関連する研究活動

注: 2007年4月17日のLHD実験成果報告会での等々力先生の講演録を参照のこと

## ヘリカル研究グループへの参加

LHDの準備段階: LHSエチュード(=CHS)検討グループ活動

プラズマ研究所 HSグループが発足(1985)

コアメンバー: 藤原、松岡、山崎、等々力、天野、

他のメンバー: 上村、佐貫、西村

検討課題項目: ヘリカル系のデータベースを低アスペクト比の領域に拡充し、  
今後のヘリカル系の研究計画のための指針を与えたい

# ヘリカルプラズマの理解

# 最適化の準備

# 解析コードの整備

注: K.Nishimura et al., Fusion Technology(1990)最初の論文

# Low Aspect 比の CHS を模索する場合 の問題点

問題点1: いかにして低アスペクト比化も目指す？

太い磁気面を形成するか？

答え : ヘリカルコイル巻線則にピッチ変調をかける。

$$g = \frac{m}{l} \phi + \alpha^* \sin\left(\frac{m}{l} \phi\right) \quad \alpha^* \text{ をどのように選ぶか？}$$

A=11 (H-E), 10 (WVII-As), 7(ATF), 5(CHS)

注: シングルフィラメント、4以下可能、有限幅コイルの場合には  
5が最小のアスペクト比になる(検討結果から)

問題点2: トロイダル効果によって、閉じ込めの劣化が想定される

期待: 磁気面の位置制御、電場形成による改善

目標とするプラズマパラメータを達成し、輸送及びMHD現象  
を詳細に調べ、ヘリカル系でのアスペクト比依存性について選択の  
指針を与える

# CHSでの粒子軌道解析(設計時)

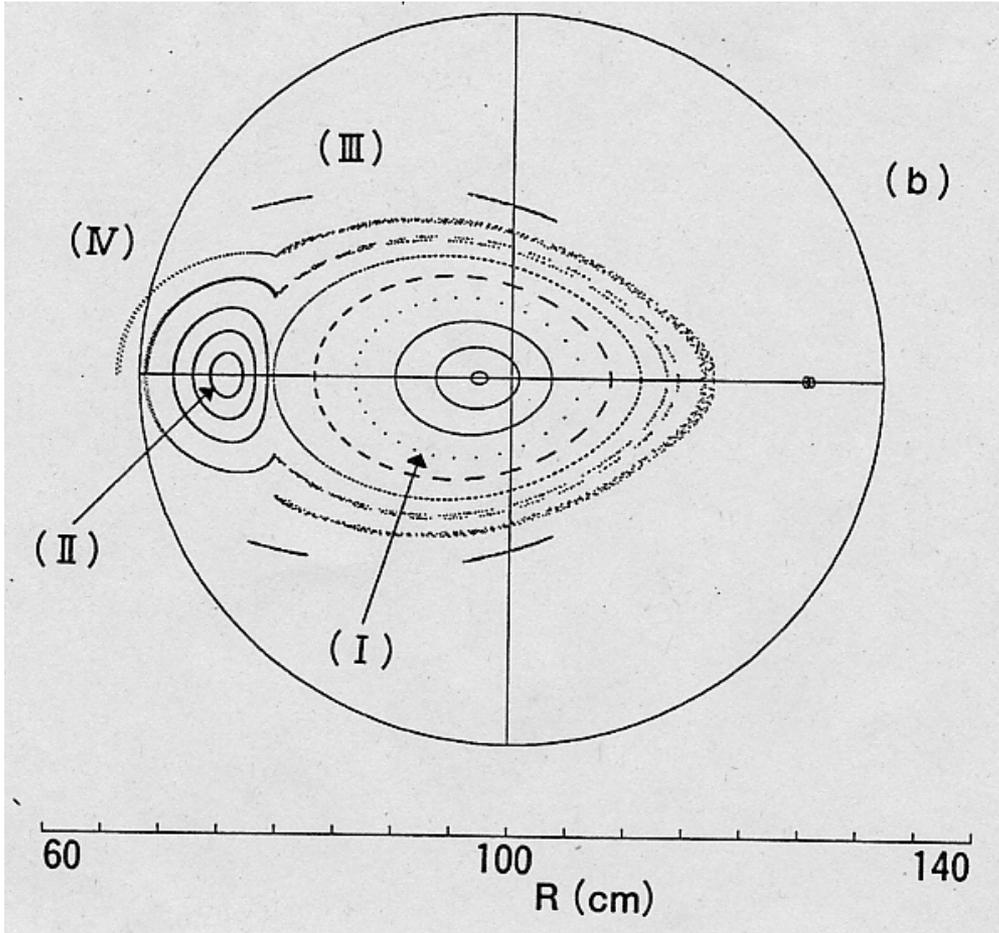
上村、佐貫担当

4種類の粒子軌道

Passing,  
Toroidal trapped  
Helical trapped  
Transition

磁気軸の位置、形状を変化させ  
ドリフト面、粒子損失の変化を制御

- 1) ヘリカルコイルのピッチモジュレーション依存性
- 2) 垂直磁場効果
- 3) 四重極磁場による形状変化



径電場とロスコーンとを統一的に決定する  
議論が重要(佐貫、伊藤他の仕事あり)

100% or 110% cancel いずれか

# Is the electric field( Plasma Rotation) always our good friend ?

**Electric Field is**

“佐藤徳芳先生との会話”

# **Good friend**( Stabilization, Confinement Improvement) in case of **good relation**

# **Enemy**( Destabilization, Confinement Degradation) in case of **not friendly relation**

# Nobody knows whether it would be **friend** or **enemy** in case of **uncontrollable**

*Good ideas and tools to control electric field or plasma rotation are required from stabilization of fluctuations and confinement improvement*

# Radial Electric Field Structure in CHS

~Comparison between Theory and Experiment~

---

## NBI Heated Plasmas

#High density

#Low density

E-fields are determined by  
CXR data(**Ida** et al.)

Neoclassical results are

Evaluated by two theories:

1) Kovrizhnykh's formular

(by **H.Sanuki**)

2) Hastings' s formular

(by **K.Yamazaki**)

**How to explain the difference between  
neoclassical evaluation and experimental data**

# Extended ambipolarity relation including additional ion and electron loss processes and experiments in CHS

---

## NBI Heated Plasmas

### 1) Fast ion orbit loss

# heating with variable injection angle (首振り実験)

# effect of magnetic field conf. on particle anomalous pinch(Iguchi)

### 2) Charge exchange momentum loss of fast ions with neutrals(理論)

### 3) Charge exchange momentum loss of bulk ions with neutrals(理論)

K.C.Shang et al.(1989), H.Ohkawa and R,Miller(1989)

### 4) Bipolar part of ion and electron anomalous losses(理論)

## ECH Heated Plasmas

### 1) RF-induced electron loss caused by ECH second harmonic resonance (H.Idei et al.)

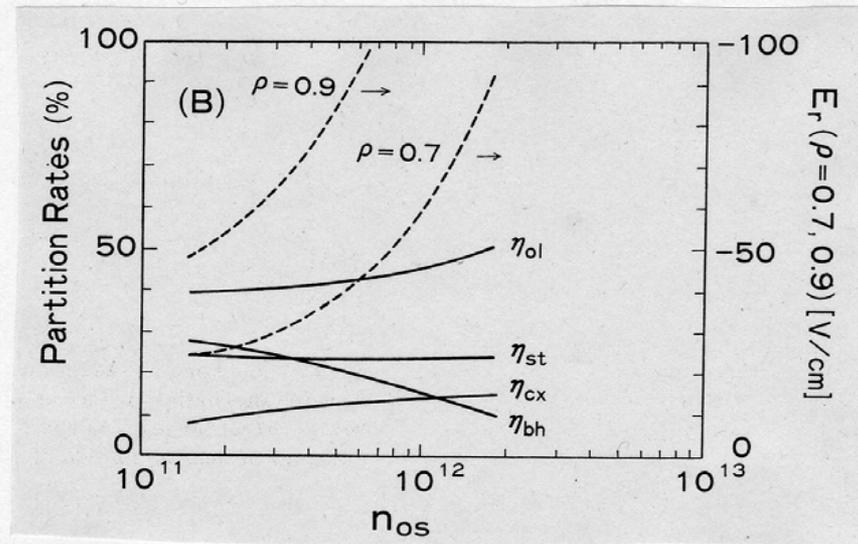
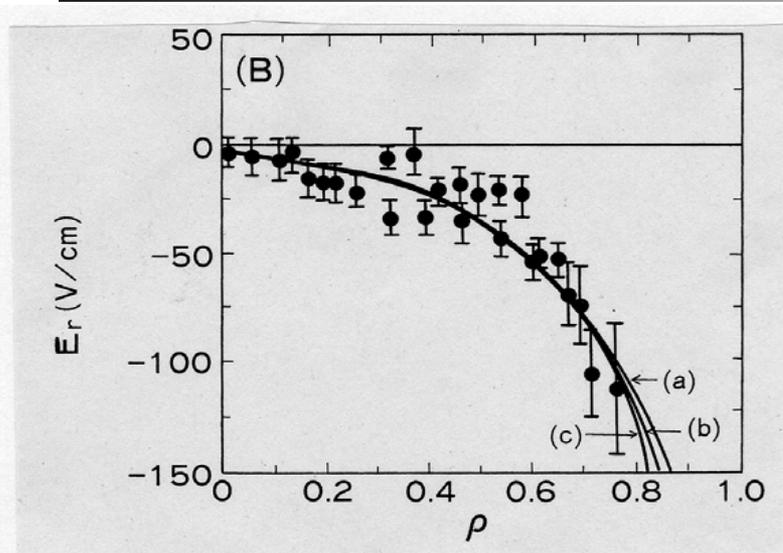
# On and off -axis heating to study hollowness of density profile

# Ripple-top and bottom ECH heating to demonstrate E-transition

## Biasing Spin-up Exp.

# Plasma rotation exp. by electrode discharge (H.Yamada et al.)

# Electric field and Overall Trade-off on Energy Balance



Electric field may be enhanced through following loss channels

- # Orbit loss of fast ion
- # CX-loss
- # CX momentum loss with neutrals
- # Anomalous loss

# Enhancement of E caused by these processes is not always profitable from the point of energy problem

# We should discuss carefully “overall trade-off on energy balance”

“重要な課題”

# Large Helical Device(LHD) 設計部会での検討活動

---

## 次期大型ヘリカル装置計画の活動

理論グループが検討開始(昭和61年から62年)

### 理論的検討課題

- 1) MHD平衡と安定性のサーベイ
- 2) 高エネルギー粒子の閉じ込め特性の幾何学的パラメーター依存性の解明
- 3) 新古典輸送に基づくブーツストラップ電流の評価
- 4) 速度空間での損失領域を考慮したNBI, ICRF加熱の評価  
及び加熱法の検討

### 理論グループメンバー

大西、岡本、上村、佐貫、田中、等々力、内藤、中島、中村、花谷、林、若谷

# 次期大型ヘリカル装置のドリフト最適化検討(平成3年3月)

検討メンバー: 花谷、佐貫、上村、等々力

検討磁場配位: (1) 共通使用磁場ファイル(MAGN、等々力)  
(2) **Flexible Biot Savrt Code of HELIOS**(花谷)

最適化の拘束条件及び自由パラメーター:  $M=10$ 、 $\gamma_c = 1.2$  ( $B_V, B_Q$ )  
 $R=4\text{m}$ ,  $B=4\text{T}$

HFコイルの自由度:  $\alpha_\alpha^*$  (pitch modulation) + w (gap modulation)

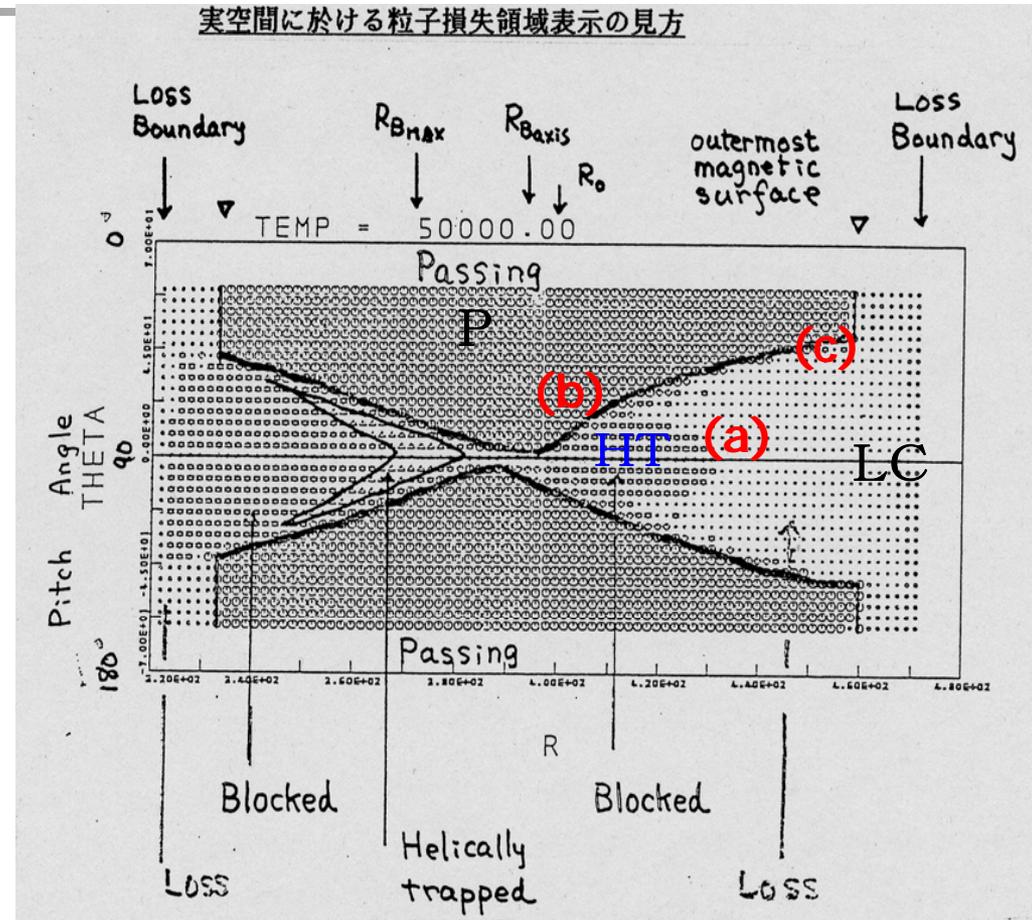
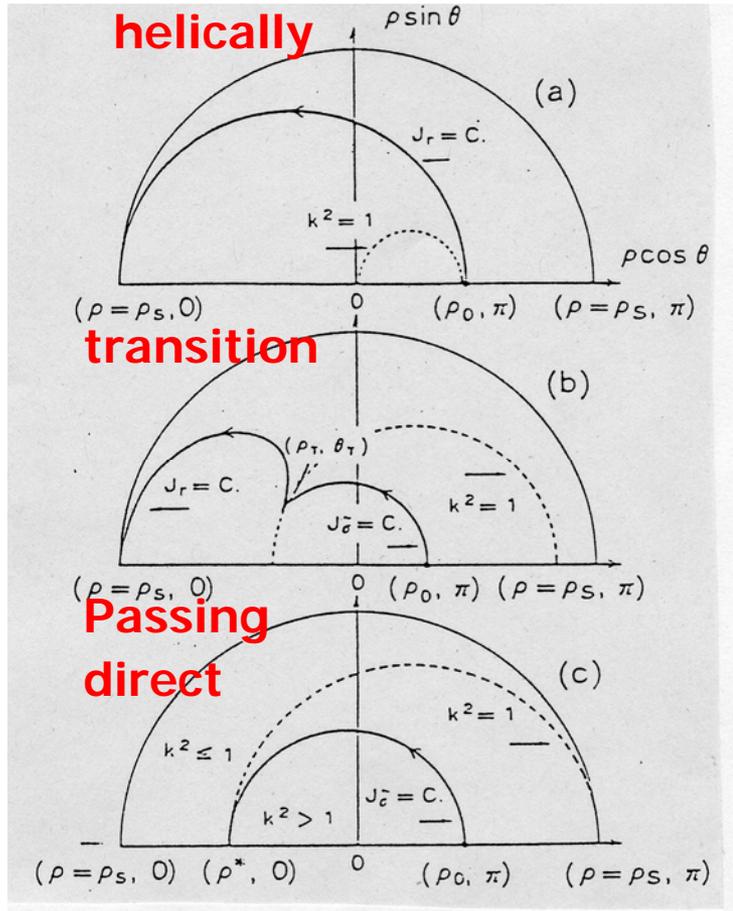
PFコイルの自由度:  $B_V, B_Q$

損失境界の定義: 最外殻磁気面を判定基準に定める

解析手法: **HELIOS code** (Kyoto、花谷), **HPLOSS code** (NIFS、上村、佐貫)

**Adiabatic invariant**を用いた解析法(等々力、佐貫、上村)

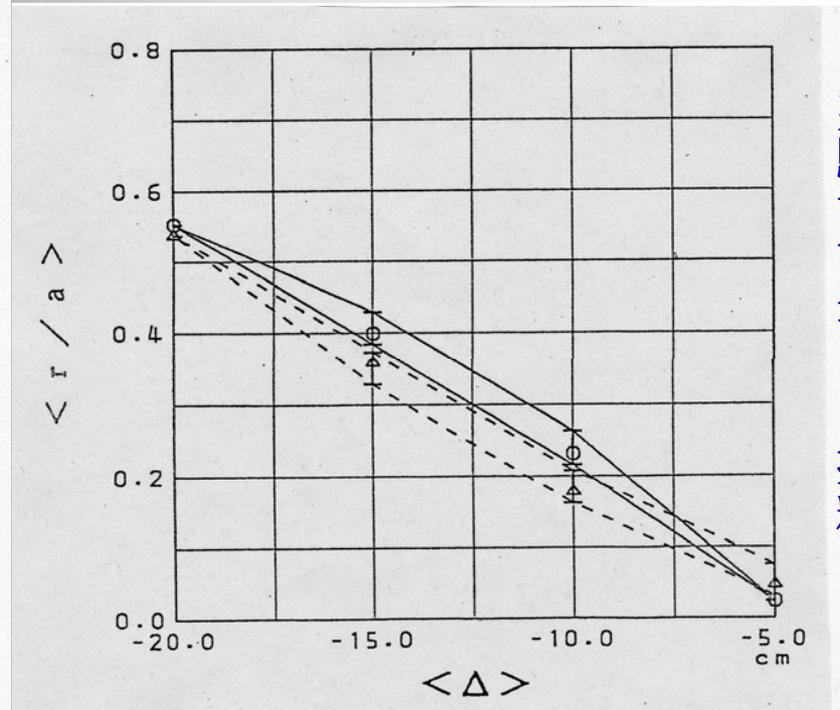
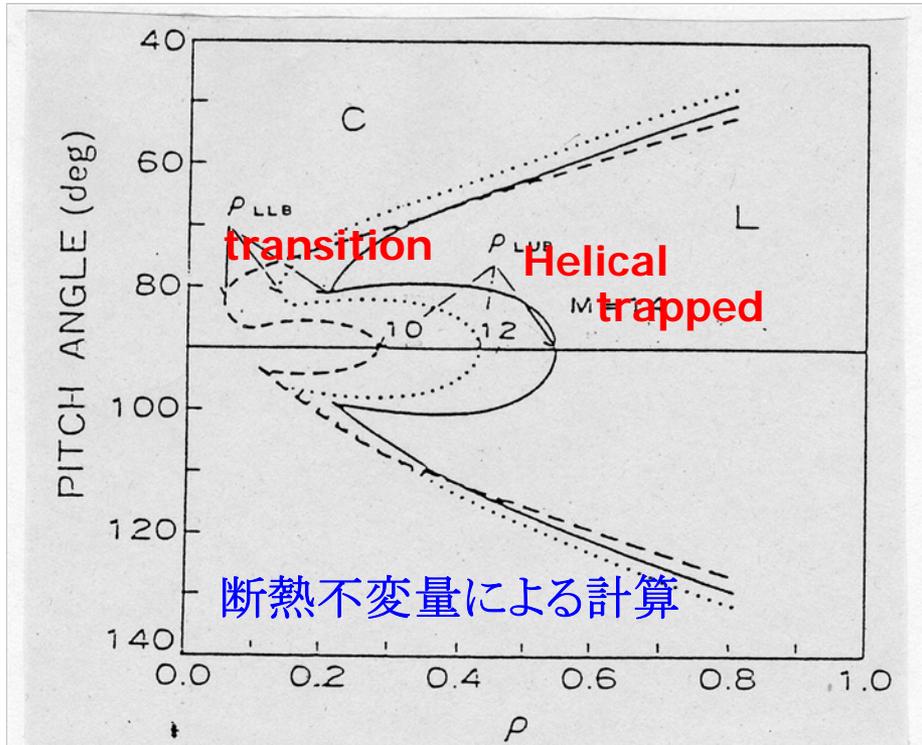
# Loss Cone Representation



損失境界は最外殻磁気面の外に仮定

Loss cone boundary is determined by Helically trapped, Transition, Passing particles. (Kamimura-Sanuki Representation (Todoroki))

# どのような粒子軌道がloss cone structureを決めるか？



実験計画書より抜粋

Three typical cases:  $M=10, 12, \text{ and } 14$

H.Sanuki, J.Todoroki and T.Kamimura, Phys.Fluids B1(1990)2155

- # Upper and lower boundaries of loss cone are determined by what kind of drift orbit?
- # Reduction of loss cone due to inward shift of magnetic surface and no loss region inside ( $r/a < 0.3$ ) from ICRF heating

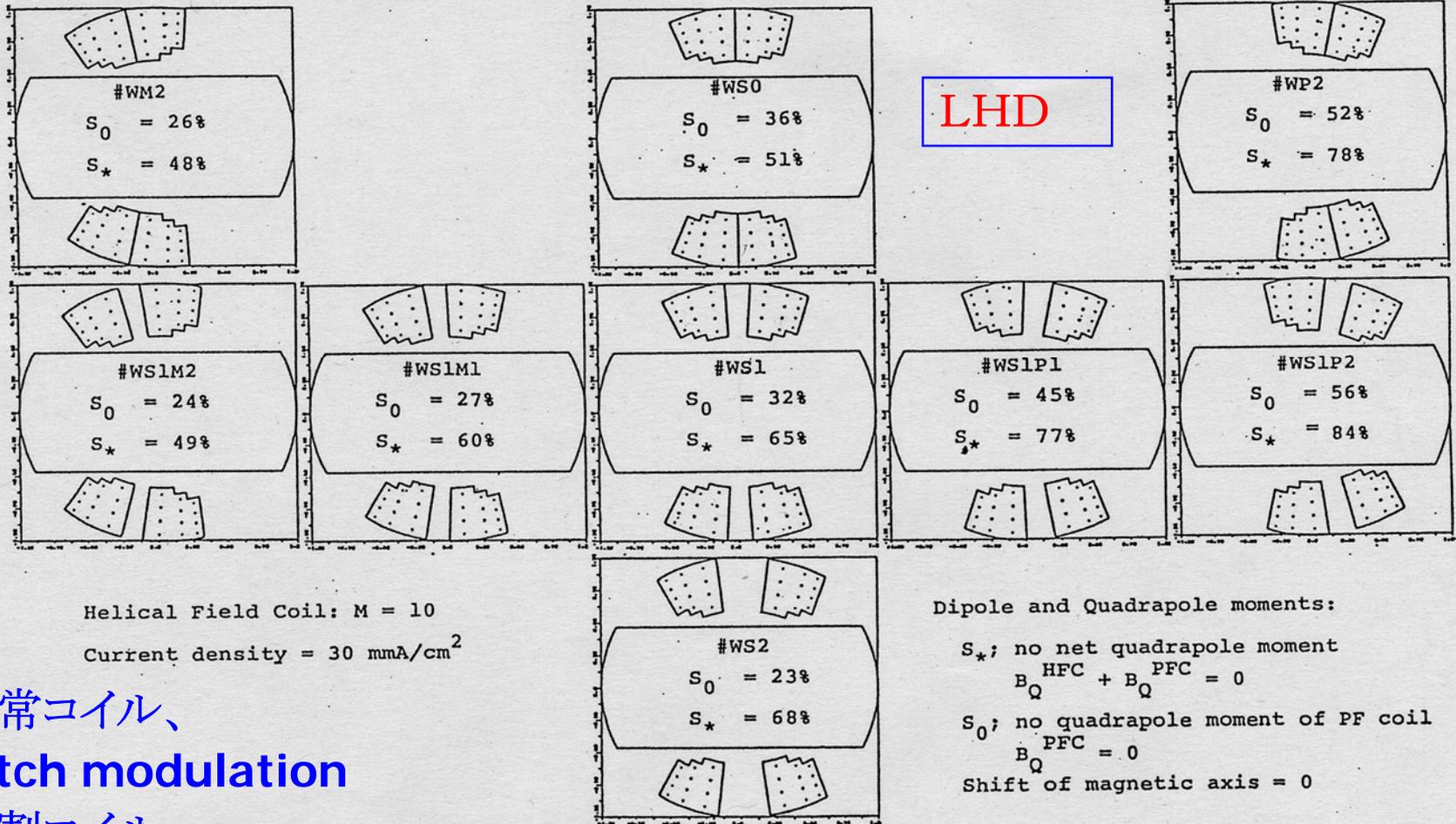
# Area of Mod-B Surface (Hanatani et al)

Area of Mod-B-Min surface

1988 / 11 / 2 K.H.

Effects of pitch modulation and "gap" modulation on the confinement of deeply-trapped particles.

LHD



Helical Field Coil:  $M = 10$   
 Current density =  $30 \text{ mA/cm}^2$

Dipole and Quadrapole moments:

$S_*$ ; no net quadrapole moment  
 $B_Q^{\text{HFC}} + B_Q^{\text{PFC}} = 0$

$S_0$ ; no quadrapole moment of PF coil  
 $B_Q^{\text{PFC}} = 0$

Shift of magnetic axis = 0

通常コイル、  
 Pitch modulation  
 分割コイル

# 検討対象になった様々な磁場配位あれこれ

	$\Delta$ cm	$B_a$ %	回転変換		平均半径 $a_p$ cm	ベータ限界		粒子損失 最小半径 cm	p/w
			$\ell_o$	$\ell_s$		$\beta_{eq}$ %	$\beta_{st}$ %		
M10G20	0.0	100	0.534	0.893	44.0	4.1	4.1	15	s
	-5.0	100	0.476	0.894	44.8	4.0	4.0	12	s
	-10.0	100	0.436	1.154	52.2	6.1	5.0	$\geq 15(56.4)0.27a$	s
	-10.0	120	0.435	1.000	48.4			15(52.9)0.28a	
	-12.5	100	0.427	1.18		6.5	5.0	[22] $\rightarrow 32.5[72.5]0.45a$	
	-15.0	100	0.414	1.207	53.3	6.4	1.4	$< 30(59.4)0.51a$	4.5 s
	-15.0	120	0.412	1.165	52.4			30(58.1)	
	-20.0	100	0.407	1.250	54.2			0.52a	0. s
M10G20.P1	0.0	100	0.547	0.977	45.9	5.1	4.3		
	-5.0	100	0.496	1.196	51.9	5.8	5.1		
	-10.0	100	0.461	1.207	52.2	5.9	5.9	15(58.8)0.26a	
	-12.5	100	0.450	1.209	52.2	6.0	6.0	(6.0) [20]0.41a	
	-15.0	100	0.443	1.500	57.0	8.6	0.8	25(61.5)	
	-20.0	100	0.441	1.556	57.8				
M10G20.P2	0.0	100	0.545	1.198	51.7	(6.5)	(5.5)	5 [70] $\rightarrow 0.07a$	
	-5.0	100	0.501	1.493	56.8				
	-10.0	100	0.472	1.573	57.8	8.2	1.4		
	-15.0	100	0.464	1.813	59.9	9.3	<0.8		
M10G20.S1 w	0.0	100	0.361	0.938	54.5	(4.5)	(4.5)	18 [75] 0.24a	
	-16.0	"						46 [83] 0.55a	
M10G20.S2 w	0.0	100	0.217	0.749	57.2	(3.5)	(3.5)	20 [67] 0.30a	
M10G15.S2P2	0.0	100	0.358	1.250	55.0	(6.0)	(5.0)	10 [90] 0.11a	
	-10.0	"						35 [95] 0.37a	
	-17.0	"						43 [68] 0.63a	
M10G18.S2P2	0.0	100	0.322	1.167	57.6	(5.5)	(4.5)		

## 検討された磁場配位

(Sanukiによる検討生データ)

- # 通常コイル、
- # ピッチモジュレーション
- # 分割コイル

- # 磁気軸シフト(打ち寄せ)
- # 4重極磁場成分

# 外国人研究者との共同研究及び国際交流活動 (1)

## 外国人研究者との共同研究活動

# 主なる論文共著者(12カ国 42名)

G.Schmidt( **USA**), J.Weiland(**Sweden**), C.S.Liu( **USA**),  
R.D.Ferraro(**USA**), G.Morales(**USA**),R.G.Littlejohn(**USA**),  
B.D.Fried(**USA**), F.F.Chen(**USA**), V.D.Pavlenko(**Ukraine**),  
K.C.Shaing(**USA**), R.D.Hazeltine(**USA**), J.Hofmann(**Germany**),  
Guoyang YU(**China**), Shaojie Wang(**China**), R. Pavlichenko(**NIFS**),  
B.J.Peterson(**NIFS**), J.Q.Dong(**China**), L.. Chen(**USA**),  
A.K.Whag(**China**), Zhe Gao(**China**), G.D.Jian(**China**),  
F. Spineanu( **Rumania**), M.Vlad(**Rumania**), Jie Zhang(**China**),  
Zhengming Sheng(**China**), K.Hallatschek( **Germany**),  
F.Zonca(**Italy**), R.J. Parosa(**Holland**), K.W.Whang(**Korea**),  
S.Hobhanian(**Turkey**), P.Goncharov(**Ukraine**), P.H.Diamond(**USA**),  
D.S.Darrow(**USA**), Y.Liang(**China**), Hao Wang(**China**),  
Qing Wei Yang(**China**), Xiang Tong Ding(**China**), A.Kuthi(**USA**),  
I. Gledhill(**USA**, **South Africa**), M.Ueda(**Brazil**), T.P.Crowly(**USA**),

## 外国人研究者との共同研究及び国際交流活動(2)

AXIM Project 共同研究者(UCLA and TRW 他)

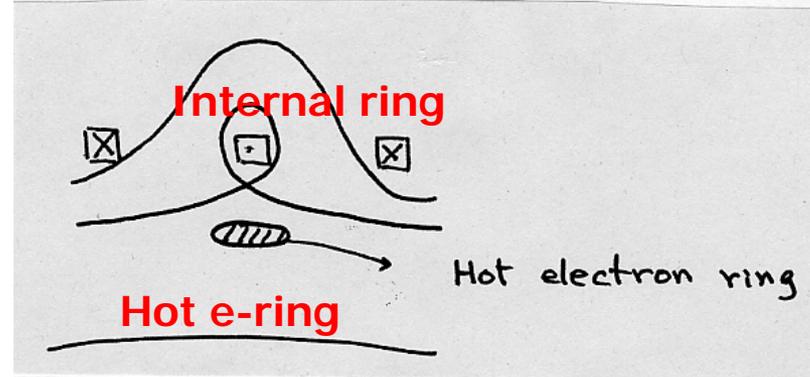
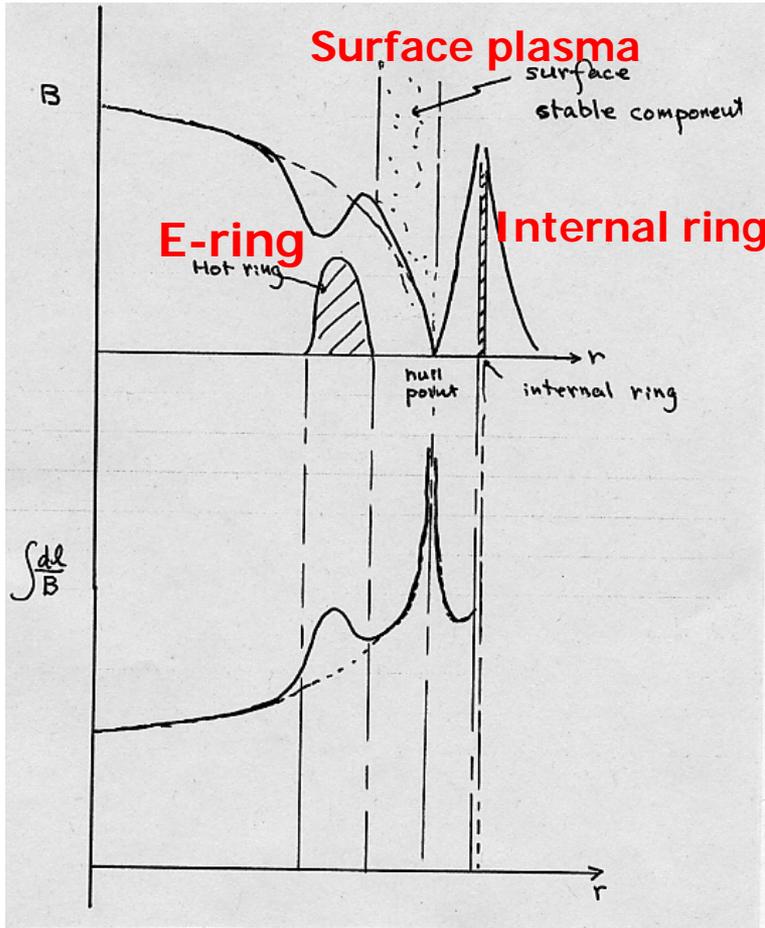
R.Dandl (AMPC), G.Guest(AMPC),  
J.Dawson, B.D.Fried,G.Dimonte, A.Kuthi, R.Conn,  
B.Leikind, H.Sanuki, A.Y.Wong,  
N.Lazar (TRW), T. Samec (TRW), etc.  
M.Capone(Jaycor)

その他のメンバーも参加した。

毎週月曜日に**UCLA campus**で、金曜日には**TRW**で検討会議を定期開催、土曜日にデータや検討結果を持参して**LLNL**を訪問し、意見を伺って次週の検討課題にする。

注:外国人研究者とお付き合いする場合には**苗字**と**名前**も記憶するとより親密なお付き合いが可能

# Asymmetric Mirror Experiment (AXIM) Project



## Concepts:

- 1) **LAMEX ring** may sustain cold stable plasma between hot electron ring and null point. This cold plasma component affects the stabilization of hot electron plasma.
- 2) **ELMO ring** may lead MHD stable bulk plasma and also to avoid direct loss to support of internal ring.

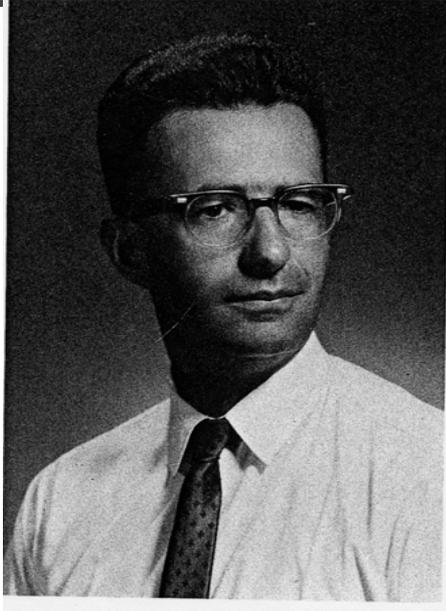
Average minimum  $-B$

"**conf** Hanbit" may challenge to this idea following my suggestion

# 主なる国際交流活動を振り返る

- 1) 名大プラズマ研究所**アトム型共同研究**活動(学生時代、例えば**河野君**、**三間君**、**VanDam, G. Rowlands** などはこの時代の知り合い) **苦楽を共有した友は心が通じる**
- 2) **Stevens Institute of Tech. (USA)**でのポスドク研究生活時代(**PPPL**の理論リーダー**Manny, Gekelman**などもこの時代の友) **親友は財産**
- 3) **Bumpy Torus (EBT, NBT) Collaboration Program**(**ORNL**の多くのメンバー、昨年**NIFS**に滞在した**D. Spong**もその一人) **時を経ても友は友** **F.F.Chen**
- 4) 在外研究員(乙種)で滞在した**UCLA**での研究生活(1年半) **Dawson, Fried, Morales**他
- 5) 日米協力、**JIFT**活動(多くの研究者と知り合いに) **D. Ross, W. Horton, H. Berk**, 他
- 6) **NIFS**国際交流委員会受け入れ小委員会委員長時代(5年間) **helicon**の設計のデータを準備、すべての**NIFS**を訪問する外国人研究者を把握し、アパートや宿舎の手配に奔走、NIFSでの生活一般の世話、苦情処理も担当。 **国際交流には地道な活動が不可欠**
- 7) 名大国際交流会館運営委員会委員(オブザーバー)5年間、**現場の実情に耳傾けるべし**
- 8) **APFA**活動:**Secretary General**,理事(約9年間)、**国際間の相互理解には時間がかかる**
- 9) **Asia Science Seminar (China)** 計画立案と実施、**異文化相互理解の格好な機会**
- 10) 国際学術事業日中協力(6年間)に参加。**夜中まで派遣受入れ改善策について議論。**
- 11) 日中拠点大学交流事業(**CUP**)国内委員会委員及び世話人(8年間) **大変で且つ楽しい**
- 12) **Toki** 国際会議の計画立案と実施、**多くの年度で参加、特にITC13の計画立案と実施。**
- 13) 総合研究大学院大学での共通講座の講義(英語)、アジア冬の学校の講義(最後の活動)

# 国際交流思い出のシーン(1)



**George Schmidt**

**Stevens Institute of Tech.**



**SIT**のキャンパスからエンパイアステートビルディングを望む

**Heisenberg**先生へ手紙を出したら返事が来た(秘書の方から)びっくり。

アパートの窓からハドソン川越えに正面にエンパイアビルが展望され、右前方に日系建築士によるWTCが半分だけ出来上がっていた。**2001年9月11日**事件は起こった。  
(本島先生提供。友人現地で撮影)

Alexander von Humboldt-Stiftung



**Drucksache**

Frau  
Heiji Sanuki  
Stevens Institute of Technology  
Dept. of Physics  
Castle Point Station  
Hoboken, New Jersey 07030

U.S.A.

## 国際交流思い出のシーン(2)



ORNLでの交流

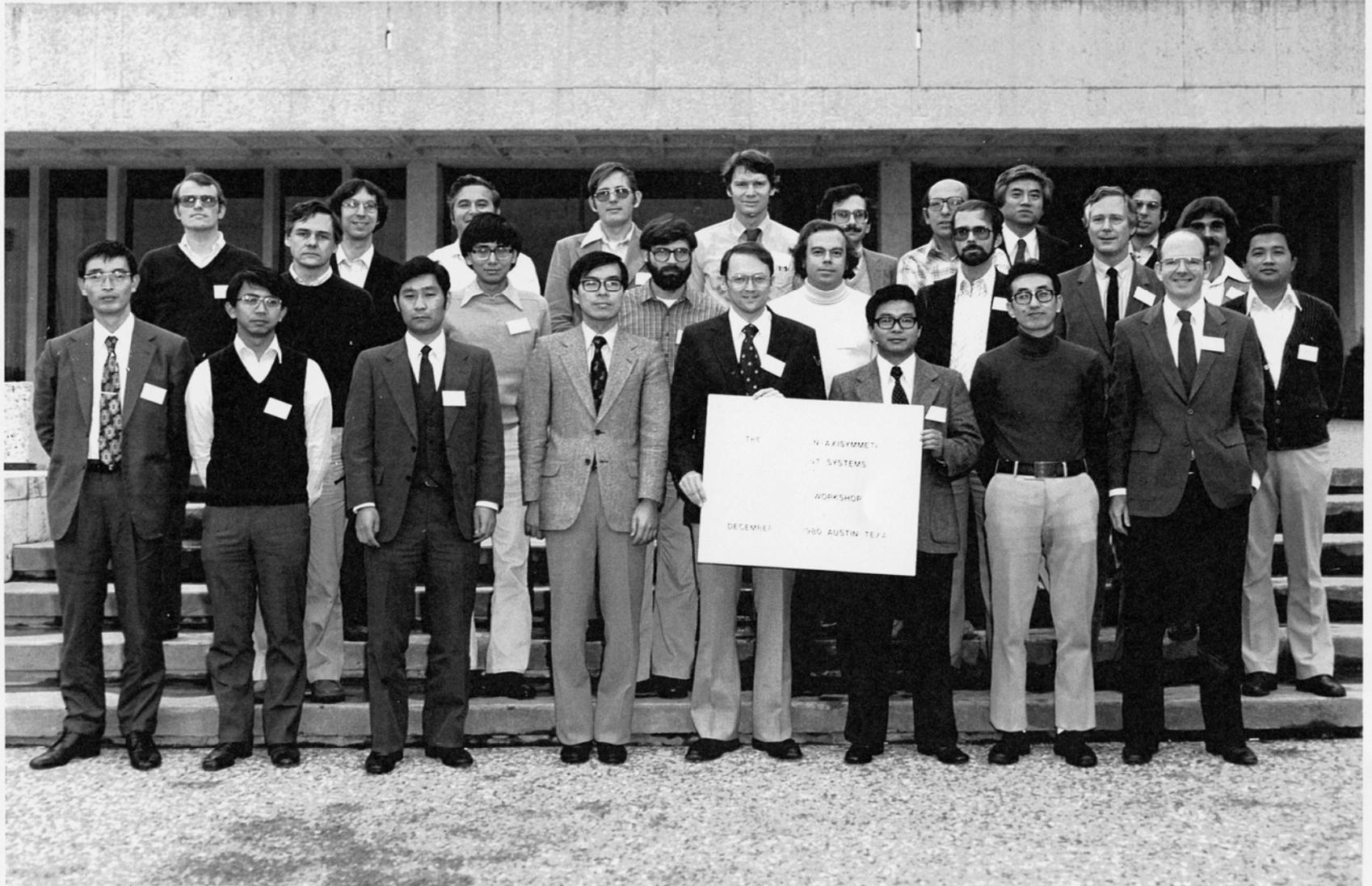
Don Spong,  
J. Van Dam

一緒のスリムな方はどなたで  
しょうか？

著名な4名の先生はどなたでしょう？  
手前のお皿は小生にものです。



## 国際交流思い出のシーン(3)



**Texas Austin** で開催された第1回日米ワークショップ。地元の新聞にも紹介された

# 国際交流思い出のシーン(4)

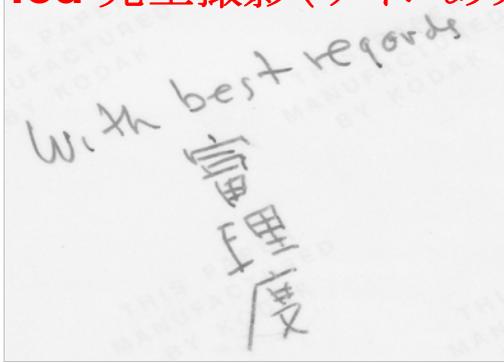
## 日米協力(JIFTを含む)活動



京都で開催された日米会議  
Fried 先生撮影(サインあり)(1978)



小生が手配した懇親会のスナップ  
懐かしい面々が勢ぞろい(1981)  
H.Grad先生の右隣はどなた？



# 国際交流思い出のシーン(5)

## UCLAを離れる前日にグループの皆さんが書いてくれた寄せ書き

SANUKI, BY VIRTUE OF HIS VALUABLE CONTRIBUTIONS TO THE UCLA PLASMA THEORY GROUP, IS HEREBY MADE A LIFETIME MEMBER OF THAT GROUP AND ALSO AN HONORARY BRUIN, WITH ALL RIGHTS AND PRIVILEGES PERTAINING THERETO. WHEREFORE WE HAVE AFFIXED OUR SIGNATURES AND APPROPRIATE COMMENTS, THIS TWENTY-SEVENTH DAY OF SEPTEMBER, 1984.

1984, Sept. 27

Heiji, It's been wonderful to have you here and we will miss you very much! Please come back soon

言理度

B.D. Fried

Sanuki, Best wishes to you and your family. Maybe all men into you all again at another lucky moment... or a contract! Tom K.  
Auf Wiedersehen!  
Toge

ドイツ系

Good Luck  
Werner

日系

インド

Congratulations! This certificate allows you to do research for UCLA... free! to attend the theory meetings... free! and even to clean the sink... free! We will miss you. Start

祝: 萬事如意 中国系: Good Luck Eyan  
Kit-chen.  
Tom S.  
Mi-Yon Yoon  
After six months in Japan, I expect you will get tired of fish and will long to return for another "vacation" at UCLA. I will see that a desk is kept warm for you! At the very least, you haven't heard the last of us! Good luck to you.  
1311P → 2244  
Pelt

George Morales キューバ

やめさしん  
おげんき  
またいつかあいにしよらう!  
Rife

南アフリカ

The very best  
it was nice having you as a next door neighbor  
Walter  
SIT → UCLA  
Good luck. I hope our paths will cross again soon, particularly in Japan.  
Phil Pitchett

Success and happiness to you.  
Peter Wu

仲間はいろいろな国から集う。スウェーデン、ドイツ、インド、キューバ、中国、南アフリカ、日系アメリカ、イタリア系、日本、まさに国際交流そのもの

## 国際交流思い出のシーン(6)

### UCLAでの友達との出会い



George とアカプルコで。  
UCLA 女子学生撮影



Inge と Sydra

# Message from George Molares and UCLA Friends and message from Jan Weiland in Sweden

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES

BERKELEY • DAVIS • IRVINE • LOS ANGELES • MERCED • RIVERSIDE • SAN DIEGO • SAN FRANCISCO

UCLA



SANTA BARBARA • SANTA CRUZ

February 18, 2008

Professor Heiji Sanuki  
National Institute for Fusion Science  
322-6 Oroshi-Cho  
Toki-Shi, 509-5292  
Japan

DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY  
BOX 951547  
475 PORTOLA PLAZA  
LOS ANGELES, CALIFORNIA 90095-1547

Dear Sanuki-sensei:

It is my pleasure to convey to you the most sincere greetings from the faculty and researchers of the plasma group at the University of California, Los Angeles (UCLA) on the occasion of your retirement.

For us it is difficult to believe that someone as active and energetic as you has reached retirement age. But we are confident that you will continue to think about the challenges that fusion science presents and will convey the wonders of science to future generations. You are leaving behind a legacy of outstanding work on nonlinear plasma wave phenomena, electric field effects on confinement and stability, and complex behavior of helical, mirror and tokamak devices, that will not be retired.

The young man from Akita came to UCLA some years ago and had a most positive impact on our senior professors (such as the late John Dawson, Burton Fried and Alfredo Banos) as well as on postdocs and graduate students. You will always be a member of the UCLA group, no matter where you are physically located.

On a personal note, I cherish the many technical discussions that we have had over the years. I also take the opportunity to thank you for the unforgettable hospitality that you have extended to me during visits to Japan. You have explained to me many cultural subtleties of Japan and exposed me to wonderful culinary experiences that I will never forget.

Your UCLA friends wish you and your lovely wife Makiko much happiness in this new stage, which in a way is just another form of advanced graduate school.

With warmest regards and admiration,

A handwritten signature in cursive script that reads "George Morales".

George J. Morales  
Distinguished Professor of Physics  
Director, Plasma Science and Technology Institute  
UCLA

Dear Heiji,

I first got to know you during my 6 months in Nagoya in 1978-79. You were my post and collaborator for half a year. You introduced me to Japanese culture and we had a great time. Our friendship went on after my time in Japan and then we met in California in 1984 with our families. In 1994, we met in Sweden and then again in Japan on at least three occasions.

Now it is time for you to retire. However, physicists usually never retire completely so I expect that you will continue to do good physics and I expect us to continue to meet to discuss old times and new physics.

With best regards,  
Jan

# 国際交流思い出のシーン(7)

## アジアの国々での研究者、友との交流



北京ダックレストランで  
クリントン米大統領  
と同じ部屋で食事  
(第1回**APFA**会議)  
(1997)



**Asia Science Seminar**  
揚子江に架かる大橋  
の上で  
(1996)

ベトナムの**Vo H. Anh**先生  
名大職員食堂前、先生のお弟子さんがアジア科学  
セミナーで小生の講義を聞く  
ことになる



## 国際交流思い出のシーン(8)

アジアの国々の若手研究者、友との交流



中国清華大の**Gao**さんとは研究および  
個人面でも深い交流(2001)

中国や韓国などアジアの国々から親友の教  
え子がやってくる

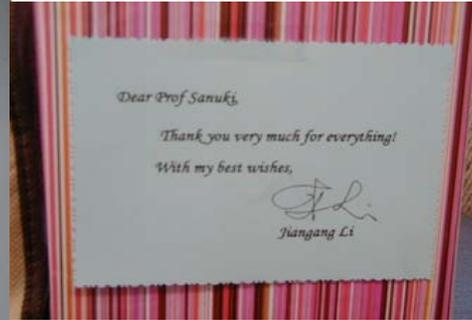
**Asia Winter School** に参加した若手  
研究者の交流(2006)



## 国際交流思い出のシーン(9)



Yuanxi Wan,  
C.S.Liu  
Jiangang Li  
H.Sanuki  
at Hefei,  
2007 Dec.



Retirement in China means a turning point for a better life, a time to slow our pace and enjoy our lives. I would like to take this opportunity to express my thanks for the great efforts which you made during past 20 years, not only for your scientific achievements, but also for the important role for the cooperation between our two countries.

*Jiangang Li* , March 6



2008, Feb. 1 from  
Director Jiangang Li

宣興の茶器、“紫砂”  
(Liさんからのプレゼント)  
中国の友人達は小生を  
“中国通”(お世辞)、“茶博士”  
(本当?)と呼ぶ

# 国際交流思い出のシーン(地域の皆さんとの交流は大事)(10)



藤若さんのガーデン  
パーティーでD. Spong  
Familyと共に地域の  
皆さんとの交流。  
(07、 May)

SWIP近所のお茶屋さんとは仲良し

日本茶と中国茶の情報交換。茶経の本の  
著者陸羽が推奨する茶の産地雅安の出身

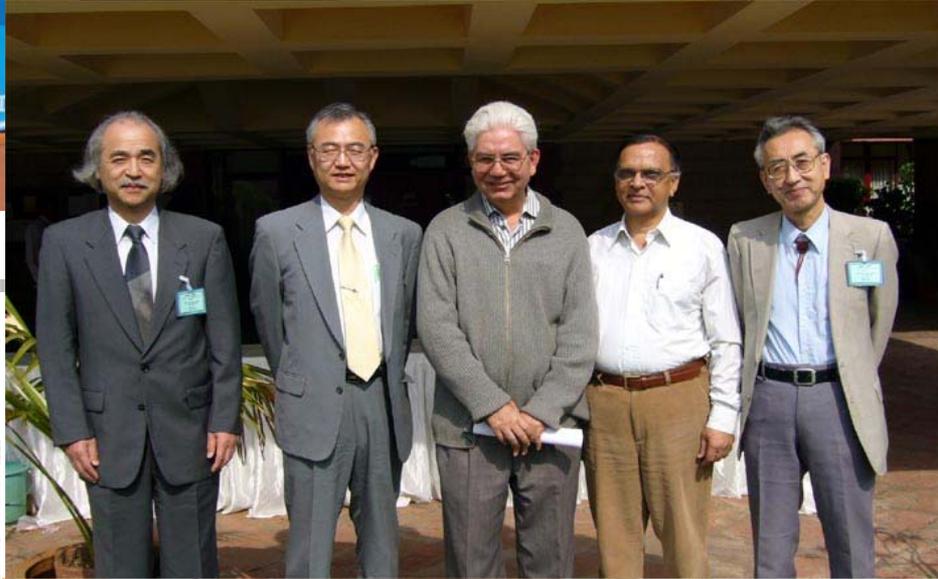
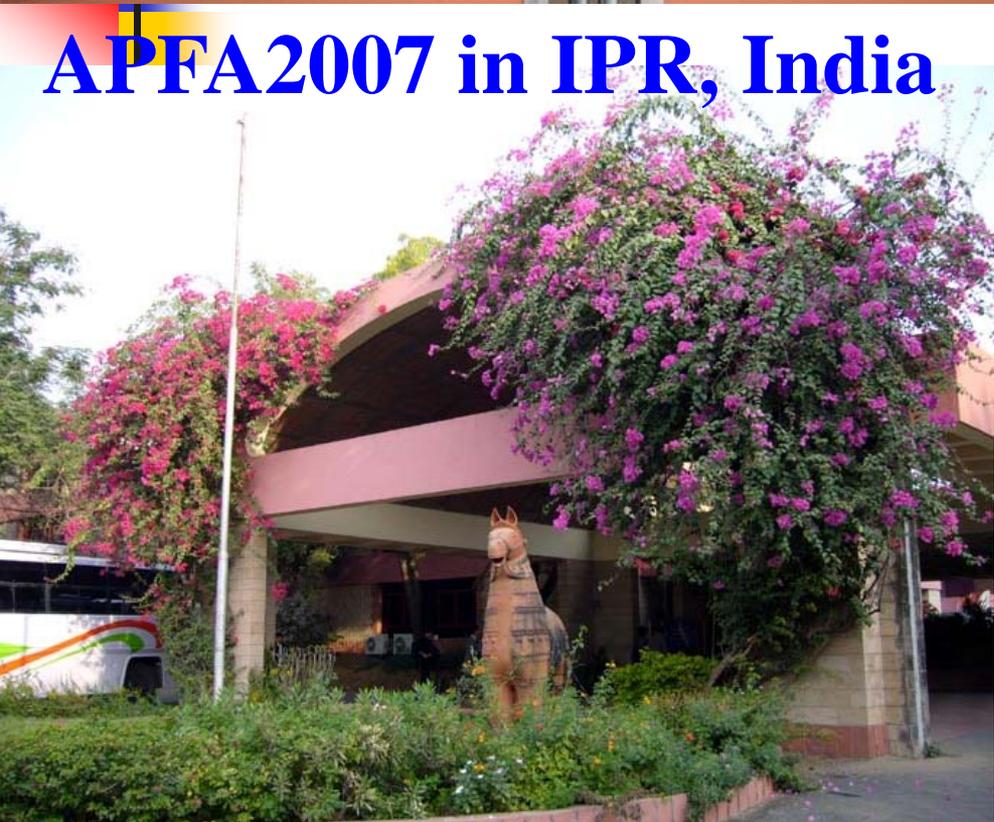
土岐市とASIPPの友好のお手伝い  
ASIPPの訪問団(Huo,Wan,Wang各  
先生)をお連れし、塚本前土岐市長訪問。  
土岐市も訪問団を合肥に派遣し友好  
促進。その仲立ちを担当。



APFA理事  
としての最  
後の仕事  
(西村さん  
提供)(11)



# APFA2007 in IPR, India



## 備忘録の座右の銘に思うこと(1)

### 順不同

#「**危うきに赴け**」(中国兵法書、呉子より)

戦争する場合には、敵の虚実を良く調べて、その「危」の部分  
を攻めろ。研究テーマや国際交流を考える上で参考に。

#「**泡立つ波間よりわが船を退けよ**」(アリストテレスの言葉)

#「**夜郎自大**」(史記、西南夷伝より) 自分の力量を知らないで、  
幅を利かす態度をとる。(西南地方の二大少数民族のひとつ)  
アジアとの国際協力(日中協力など)を進める上で留意すべきこと。

#「**大人とは何だ**」(読売新聞2月14日編集手帳より)

自分の置かれている立場の自覚や自活能力を持ち、社会の裏表  
も少しずつ分かりかけてきたことを意味する(新解明国語辞典)

「**七首に錨を打ちたるよう**」(荻生徂徠の書物、太平策)

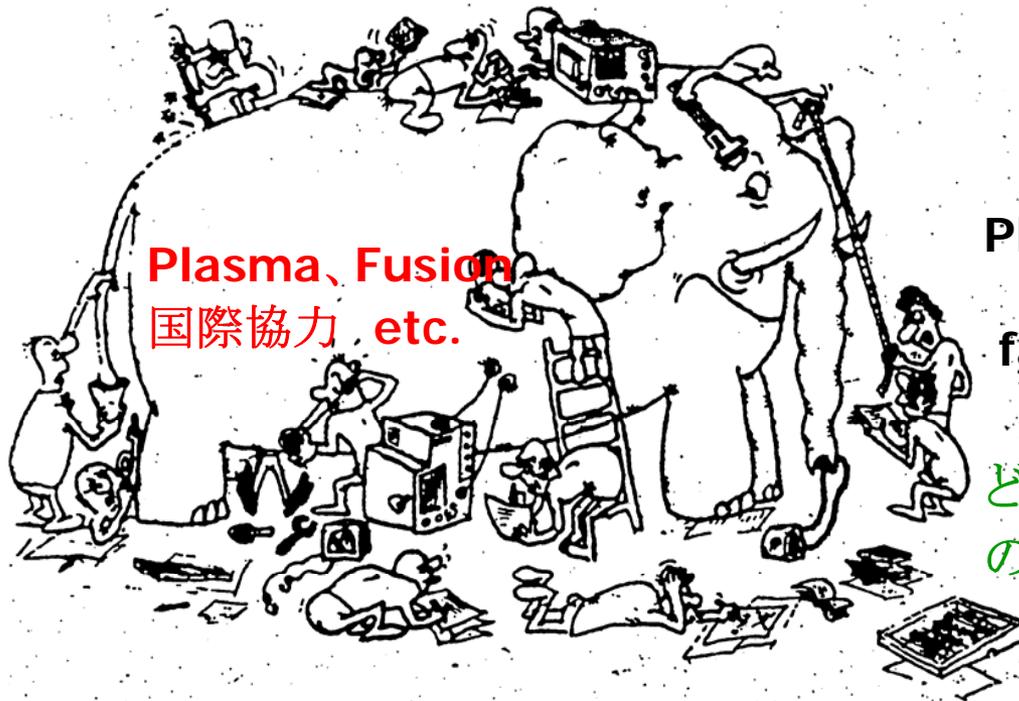
「**人間ができるまで17年か70年かはひとによりけり**」(歌人、小池光)

## 備忘録の座右の銘に思うこと(2)

- #「**窮即変、変即通**」(易経、伊藤さんの本を読みつつ思案したこと)  
大きな結果を期待する時には大きな変化が必要で、それを制御す知恵が不可欠 (**bias exp.** による**L->H transition**を模索して)
- #「**亡羊の嘆**」(紀元前4世紀の思想家、楊朱の言葉)  
「**大道は多岐を持って羊を失い、学者は多方を以て生を喪う**」
- #「**人生にとって、大切なものは勇氣と想像力、それに少しばかりのお金だ**」(チャップリン演じるライムライトの一場面より、新聞編集手帳より抜粋)「プラズマ核融合の難しいが重要な問題にチャレンジする場合には、わずかの予算でも失敗を恐れない勇氣と洞察力で面白い研究が出来るかもしれない」  
(仙台プラズマフォーラム、佐貫の講演録より)
- #「**馬に乗って花を見る**」、「**六割人生**」、「**貧乏なベトナム人は笑い、裕福な日本人は笑わない**」(皆川一夫のベトナムの心、皆川語録)  
「吉岡一門との果し合いのときの武蔵と吉野太夫とのやり取り」(佐貫の大学院集中講義「外国文化特論」講義で紹介)

# 群盲象評(撫), xia zi mo xiang (in Chinese) (3)

## Mediocre People Give Comments on Elephant



「森を見て木を見ない、  
木を見て森を見ない」  
「凝っては思案に余る」

Plasma and fusion is characterized  
by macro-, micro-structures,  
fast, slow-dynamics etc.

森(Macro)も木(Micro)も見る  
どうすれば木も森も見ることができ  
のか？(時に近づいて見る、時に離れて  
も見る)

# It's like the blind men who touched just part of an elephant,  
and tried from that to describe the whole animal.

# A mediocre person sees only what is in front of his eyes, and  
cannot take the broad view of an issue.

鳥のように上空から森を見渡し、さらに木々のそばに近づいて観察する  
“森の鳥たちはこのような能力を自然に身につけている”

## 備忘録の座右の銘に思うこと(4)

---

#研究というでこぼこ道に轍を刻みながら歩んできた自分を折に触れ励まし、鼓舞してくれた言葉を最後に紹介します。

**“Storms following storms, waves succeeding waves give the brightness and hardness to the shells, which contain the pearls. So, storms and waves of the life add the strength to the character of human being”**

(研究者を志す若手学生諸君の励ましになれば幸いです)

ご清聴ありがとうございました



落紅は是れ情無き物にあらず  
化して春泥と作り更に花を護る

(龚自珍 己亥雜詩)

在籍中ご支援ご鞭撻いただきました皆様に心からお礼申し上げます。本当にありがとうございました。 再見