

シンクロトロン用蛇腹構造ビームダクトの
渦電流抑制効果の数値的評価
Numerical evaluation of
eddy current suppression effect of
bellows-structured beam duct for synchrotron

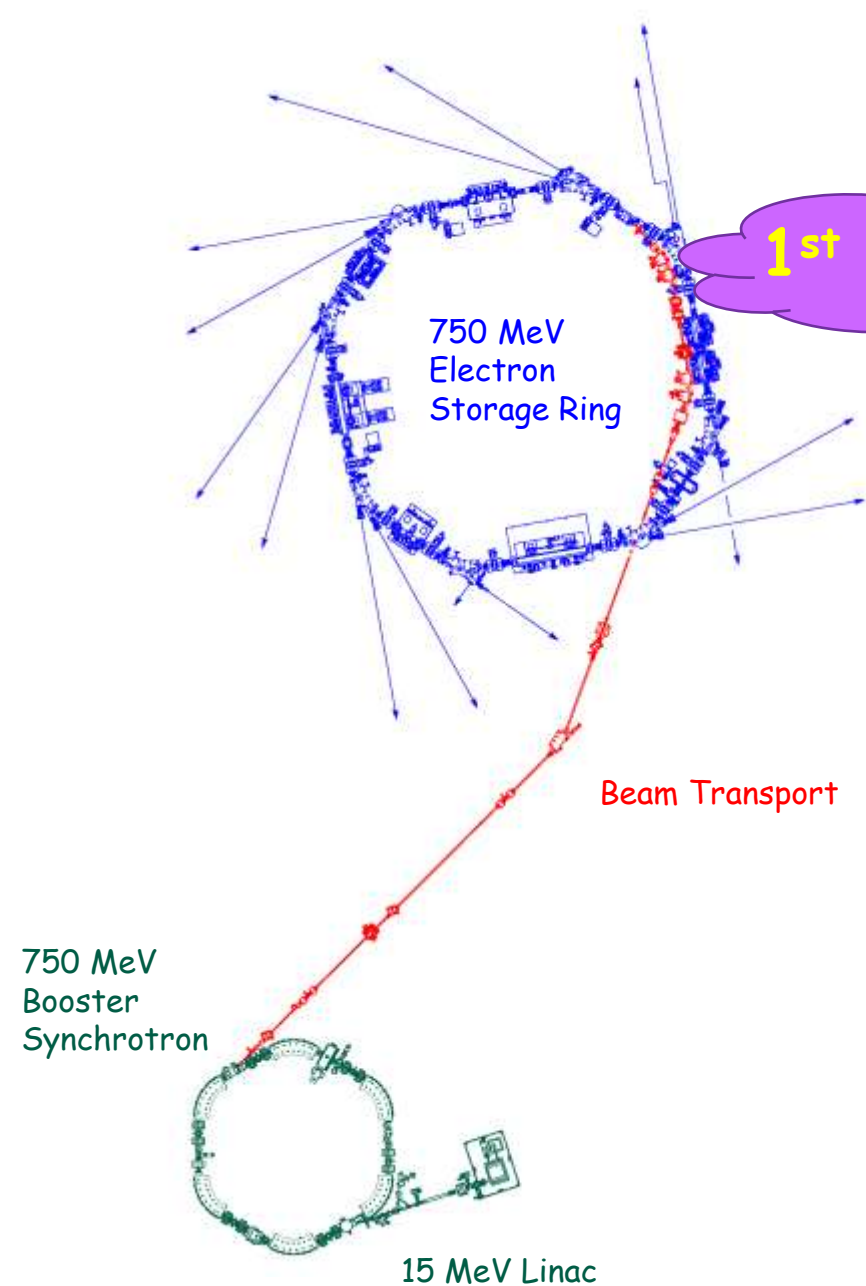
川口秀樹（室蘭工大）、*加藤政博（HiSOR/UVSOR）
H. Kawaguchi (Muroran I.T.), *M Katoh (HiSOR/UVSOR)



*e-mail: mkatoh@hiroshima-u.ac.jp



UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science, NINS



1st Light in 1983



Electron Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Beam Emittance	17 nm-rad
Beam Current	300 mA (top-up)



UVSOR Booster Synchrotron

Max. Beam Energy	750 MeV
Injection Energy	15 MeV
Circumference	26.6 m
RF Frequency	90.1 MHz
Harmonic Number	8
Bending Radius	1.8 m
Repetition Rate	1 Hz (750 MeV) 3 Hz (600MeV)



UVSORに四十年以上前から伝わる古文書

UVSOR - 7
March 1981

入射用シンクロトロン設計

DESIGN OF INJECTOR SYNCHROTRON

分子科学研究所

〒444 岡崎市明大寺町字西郷中38

INSTITUTE FOR MOLECULAR SCIENCE

Myodaiji, Okazaki 444

昭和56年3月

著 者 Authors

渡 辺 誠 (分 子 研)	WATANABE, Makoto (I M S)
内 田 章 (分 子 研)	UCHIDA, Akira (I M S)
松 戸 修 (分 子 研)	MATSUDO, Osamu (I M S)
酒 井 楠 雄 (分 子 研)	SAKAI, Kusuo (I M S)
高 見 清 (京大原子炉研)	TAKAMI, Kiyoshi (KURRI)
片 山 武 司 (東大核研)	KATAYAMA, Takeshi (I N S)
吉 田 勝 英 (東大核研)	YOSHIDA, Katsuhide (I N S)
木 原 元 央 (高 エ 研)	KIHARA, Motohiro (K E K)

KURRI : Research Reactor Institute,
Kyoto University.

INS : Institute for Nuclear Study,
University of Tokyo.

KEK : National Laboratory of
High Energy Physics.

古文書によると..

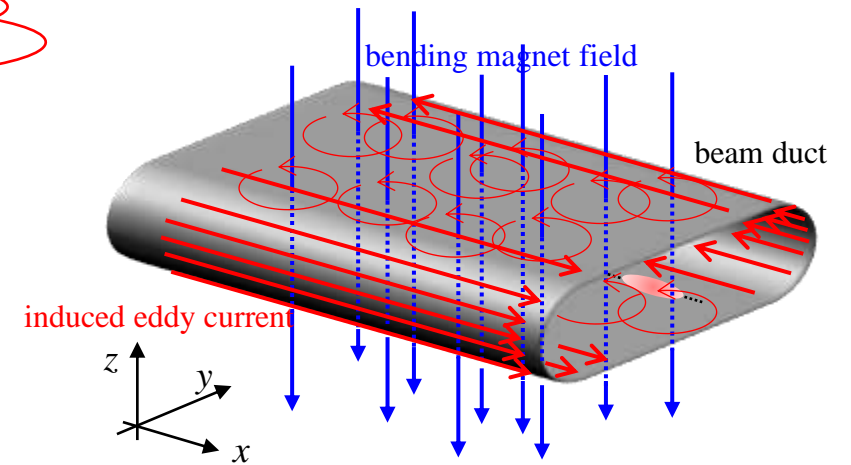
8.2 偏向部ドーナツ

ここでの偏向部とは偏向電磁石と四極電磁石を含むベローズの部分を用いる。偏向部では磁場が時間的に変化する。一番変化の大きい場合は 0.15 sec で 11.1 kgauss となる。すなわち $dB/dt = 7.41 \times 10^4$ gauss/sec である。このことによる渦電流の悪影響を防止するため抵抗値が大きくとれるベローズドーナツを用いる。

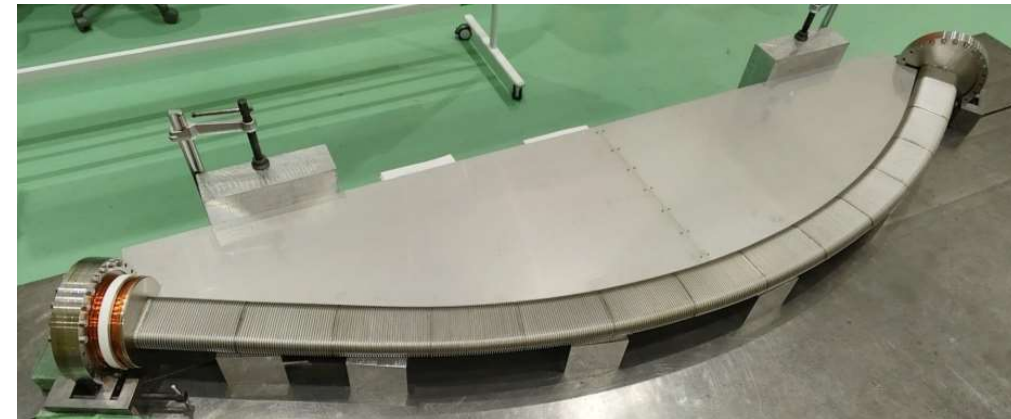
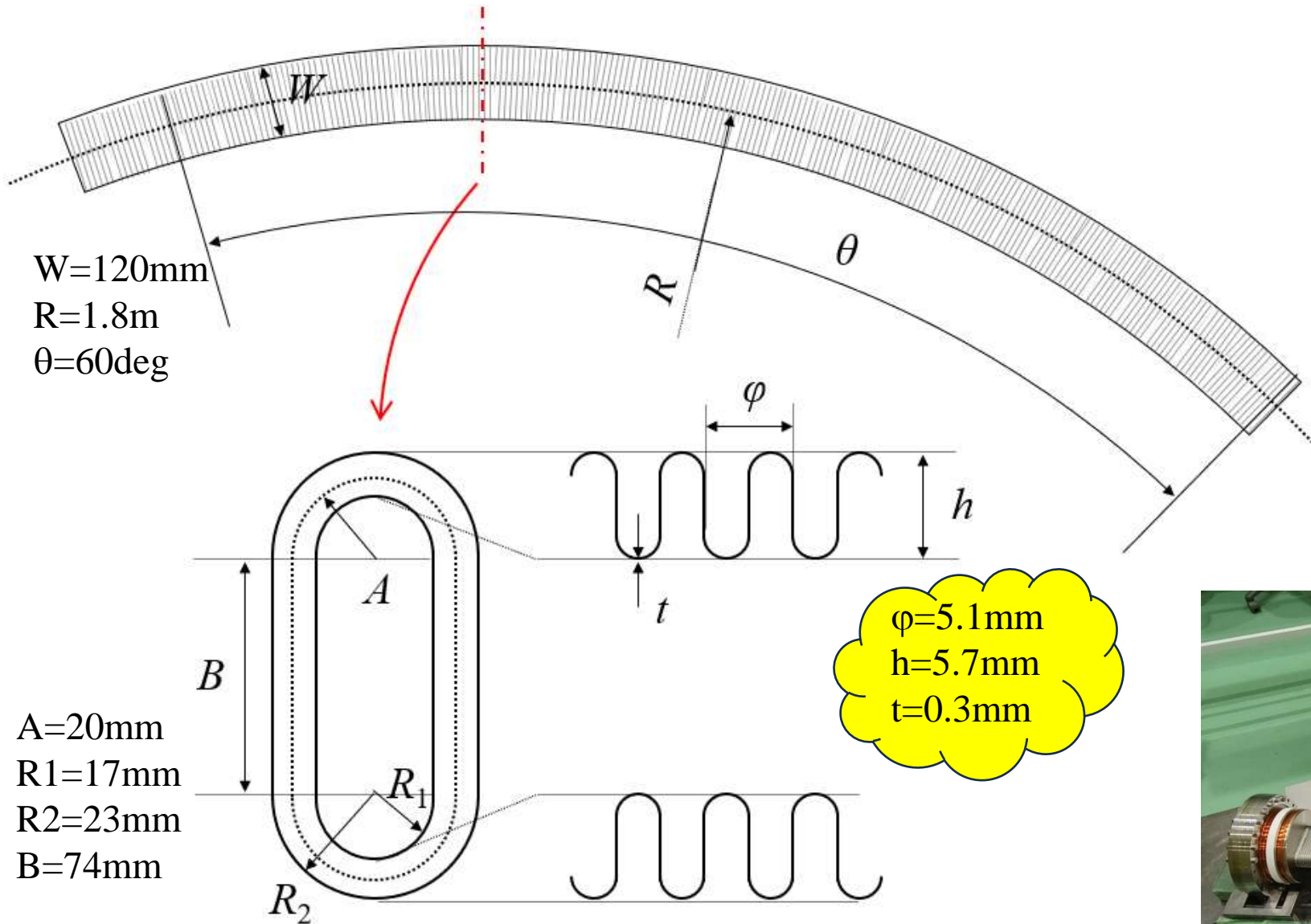
$$\frac{\Delta B(x)}{B_0} \sim -\frac{2a\delta}{\pi\delta_s^2} \left\{ 1 - \frac{b}{a} \tan^{-1} \frac{b}{a} - \frac{4a^2x^2}{(a^2+b^2)^2} + \dots \right\} \quad \delta_s^{-2} \equiv \frac{1}{2} \frac{\sigma\mu_0}{\tau_r} \quad (1/\tau_r \equiv (dB/dt)/B)$$

S. Krinsky, BNL-25464 (1973)

この式を用いて動作点に大きな影響を与えないためのドーナツの形状を計算した。偏向電磁石の場合六極成分を注意する必要がある。8.2に示した厚さ0.3mm、ピッチ5mm、山と谷の距離6mmのステンレスベローズでは、 $B''(0)/B_0 \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2}$ 以下にできるので問題ない ($dB/dt = 7.4 \times 10^4$ gauss/sec として)。



Bellows Duct of UVSOR Booster Synchrotron



Current vector potential method (T-method)

Quasi-stationary Maxwell Eqs.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{B}_e}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} \cong \mu_0 \mathbf{J} = \mu_0 \sigma \mathbf{E}$$



$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = 0$$



$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$$

Current Vector Potential

Current vector potential method (T-method)

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$$

Helmholtz's theorem (generalized for boundary value problems)

$$\mathbf{T} = \frac{1}{4\pi} \int_V \nabla' \cdot \mathbf{T}(\mathbf{x}') \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dv' + \frac{1}{4\pi} \int_V (\nabla \times \mathbf{T}(\mathbf{x}')) \times \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dv' - \frac{1}{4\pi} \int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{x}') \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS' - \frac{1}{4\pi} \int_S (\mathbf{n} \times \mathbf{T}(\mathbf{x}')) \times \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS'$$

$\nabla \cdot \mathbf{T} = 0$ in V
Gauge Condition

$$\mathbf{B}_e = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}') \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} dv' = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V (\nabla \times \mathbf{T}(\mathbf{x}')) \times \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dv'$$

Biot-Savart law

$\mathbf{n} \times \mathbf{T} = 0$ on S
Boundary Condition
($J_n = 0$)

$$\mathbf{T} = \mathbf{B}_e - \frac{1}{4\pi} \int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}(\mathbf{x}') \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS' \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \mathbf{B}_e}{\partial t}$$

Current vector potential method (T-method)

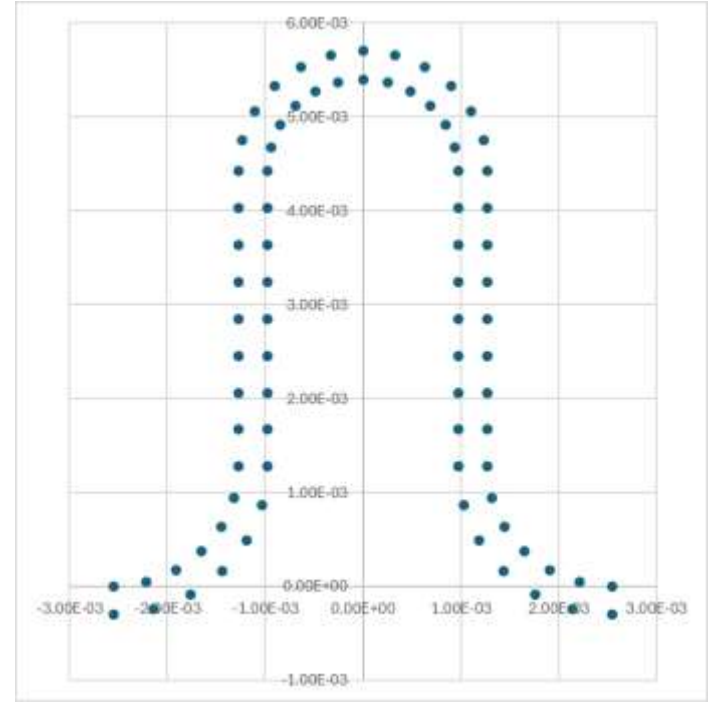
Quasi-stationary Maxwell Eqs.

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{B}_e}{\partial t} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{T} \end{aligned} \right\} \nabla \times \frac{1}{\sigma} (\nabla \times \mathbf{T}) = -\frac{\partial \mathbf{B}_e}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t}$$

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} (\nabla \times \mathbf{T}) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS' = -\frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t}$$

Current vector potential method (T-method)

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} (\nabla \times \mathbf{T}) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS' = - \frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t}$$



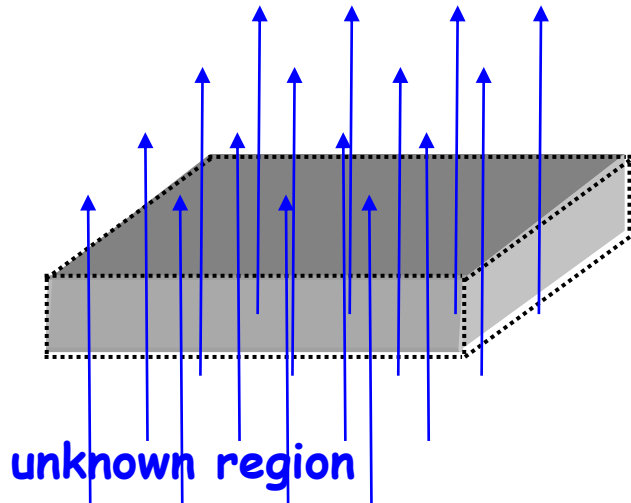
$$\begin{aligned} & \frac{1}{dS_{i,j}} \left(\frac{1}{dy_{i,j-1}} \left(\frac{dl_{xi-1,j-1}}{2\sigma_{i-1,j-1}} + \frac{dl_{xi,j-1}}{2\sigma_{i,j-1}} \right) + \frac{1}{dx_{i,j}} \left(\frac{dl_{yi,j-1}}{2\sigma_{i,j-1}} + \frac{dl_{yi,j}}{2\sigma_{i,j}} \right) + \frac{1}{dy_{i,j}} \left(\frac{dl_{xi,j}}{2\sigma_{i,j}} + \frac{dl_{xi-1,j}}{2\sigma_{i-1,j}} \right) + \frac{1}{dx_{i-1,j}} \left(\frac{dl_{yi-1,j}}{2\sigma_{i-1,j}} + \frac{dl_{yi-1,j-1}}{2\sigma_{i-1,j-1}} \right) \right) T_{zi,j} \\ & - \frac{1}{dS_{i,j} dy_{i,j-1}} \left(\frac{dl_{xi-1,j-1}}{2\sigma_{i-1,j-1}} + \frac{dl_{xi,j-1}}{2\sigma_{i,j-1}} \right) T_{zi,j-1} - \frac{1}{dS_{i,j} dx_{i,j}} \left(\frac{dl_{yi,j-1}}{2\sigma_{i,j-1}} + \frac{dl_{yi,j}}{2\sigma_{i,j}} \right) T_{zi+1,j} - \frac{1}{dS_{i,j} dy_{i,j}} \left(\frac{dl_{xi,j}}{2\sigma_{i,j}} + \frac{dl_{xi-1,j}}{2\sigma_{i-1,j}} \right) T_{zi,j+1} - \frac{1}{dS_{i,j} dx_{i-1,j}} \left(\frac{dl_{yi-1,j}}{2\sigma_{i-1,j}} + \frac{dl_{yi-1,j-1}}{2\sigma_{i-1,j-1}} \right) T_{zi-1,j} \\ & + \mu_0 \frac{\partial T_{zi,j}}{\partial t} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\partial T_n}{\partial t} \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS' = - \frac{\partial B_{0zi,j}}{\partial t} \end{aligned}$$

T-method vs. A-method

Current vector potential method (T-method)

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} (\nabla \times \mathbf{T}) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \right) dS' = -\frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t}$$

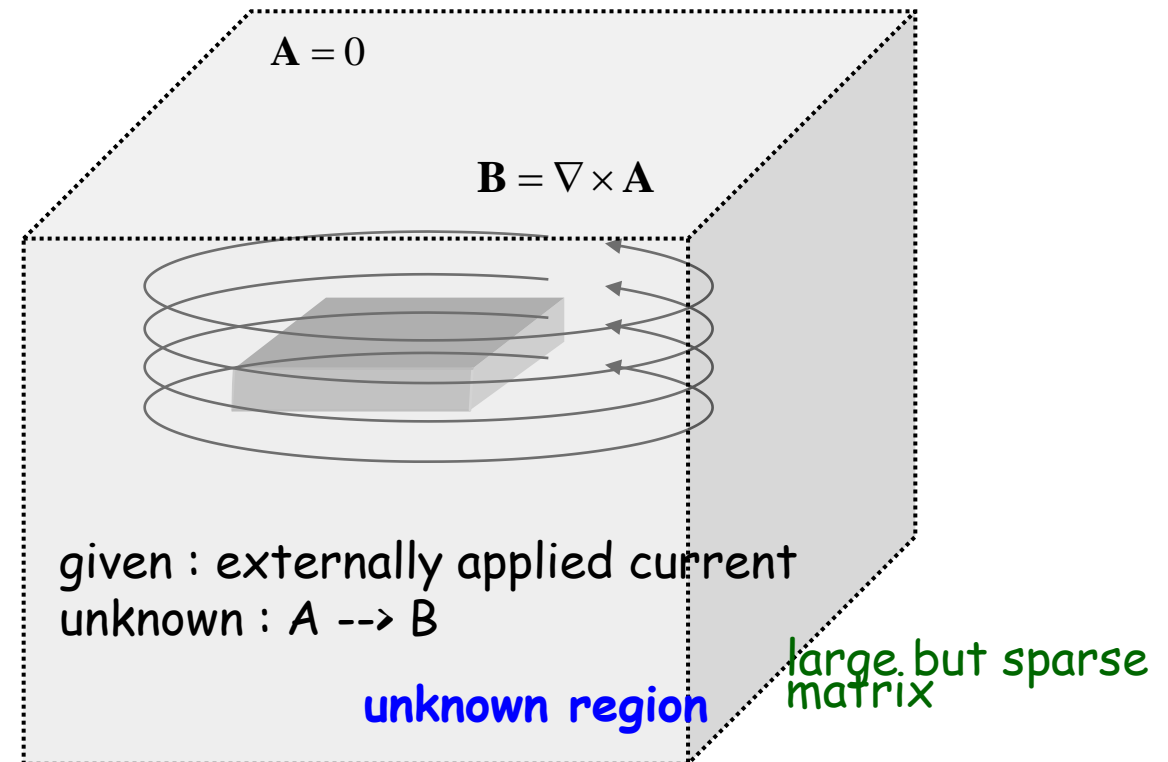
$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T}$$



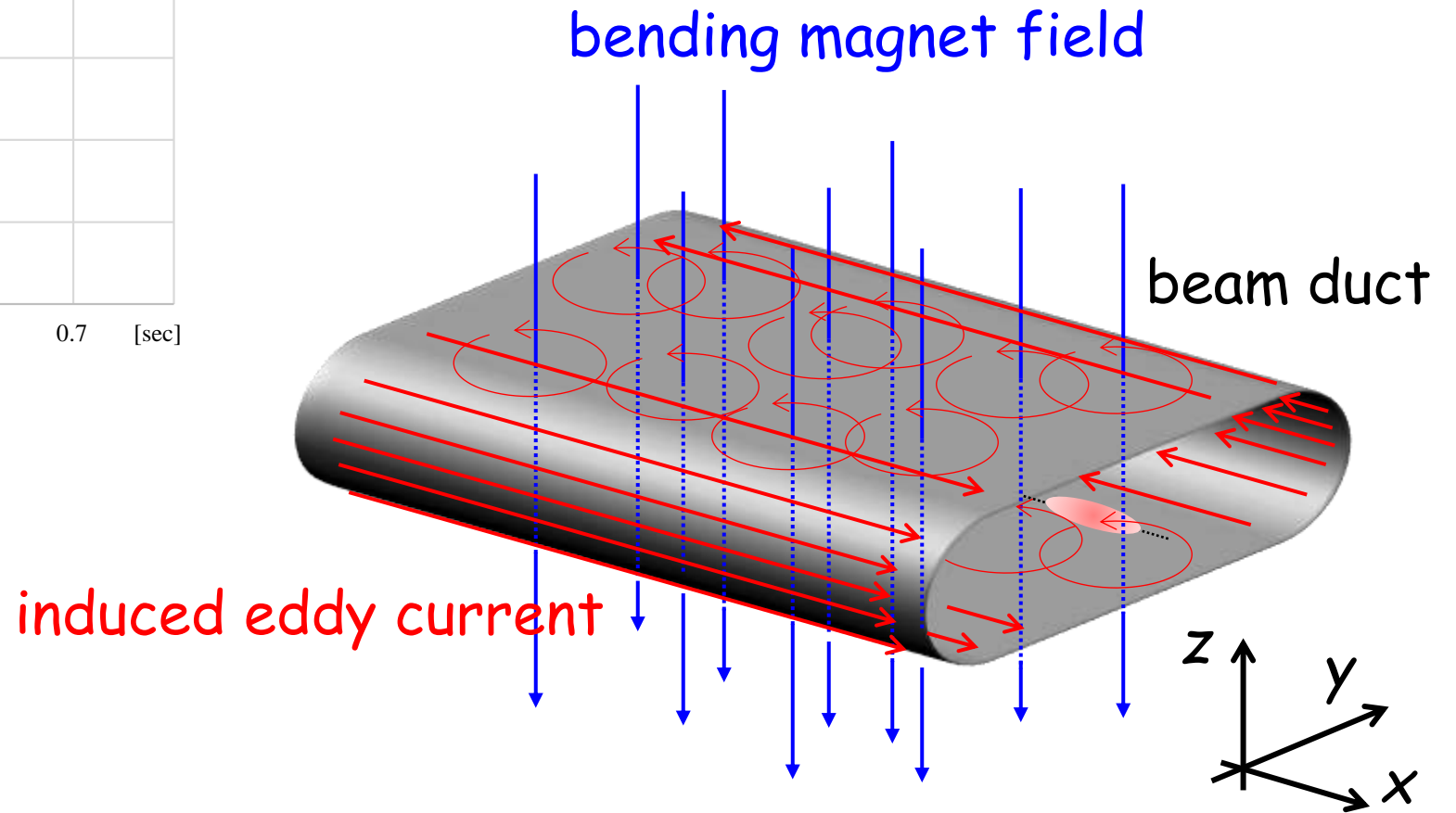
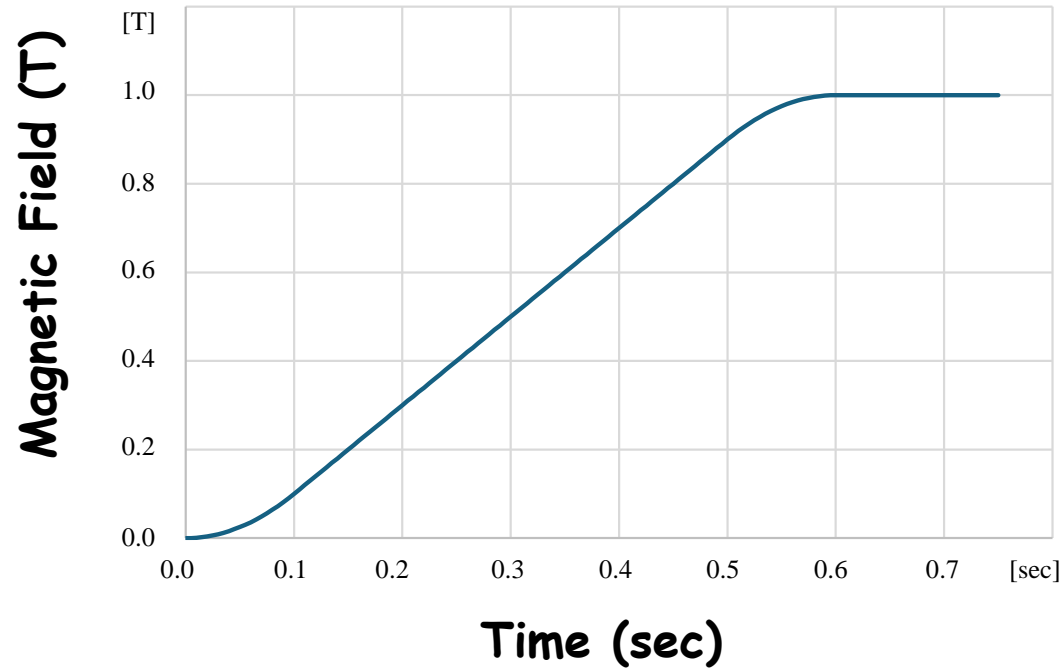
given : external magnetic field
 unknown : $\mathbf{T} \rightarrow \mathbf{J} \rightarrow \mathbf{B}_e$
 small but dense matrix

Magnetic vector potential method (A-method)

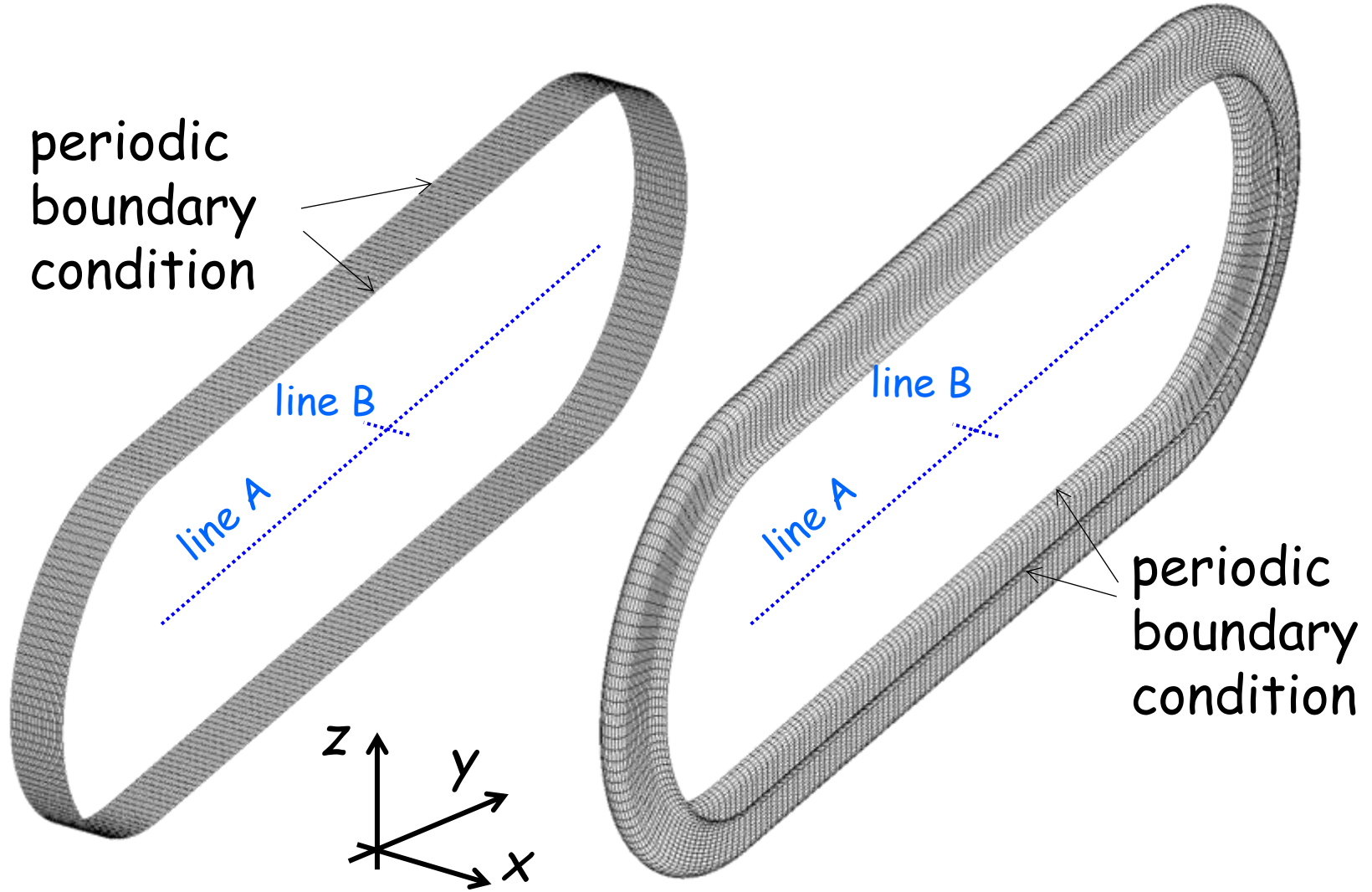
$$\nabla^2 \mathbf{A} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mu \mathbf{J}_0$$



Simulation - Outline -

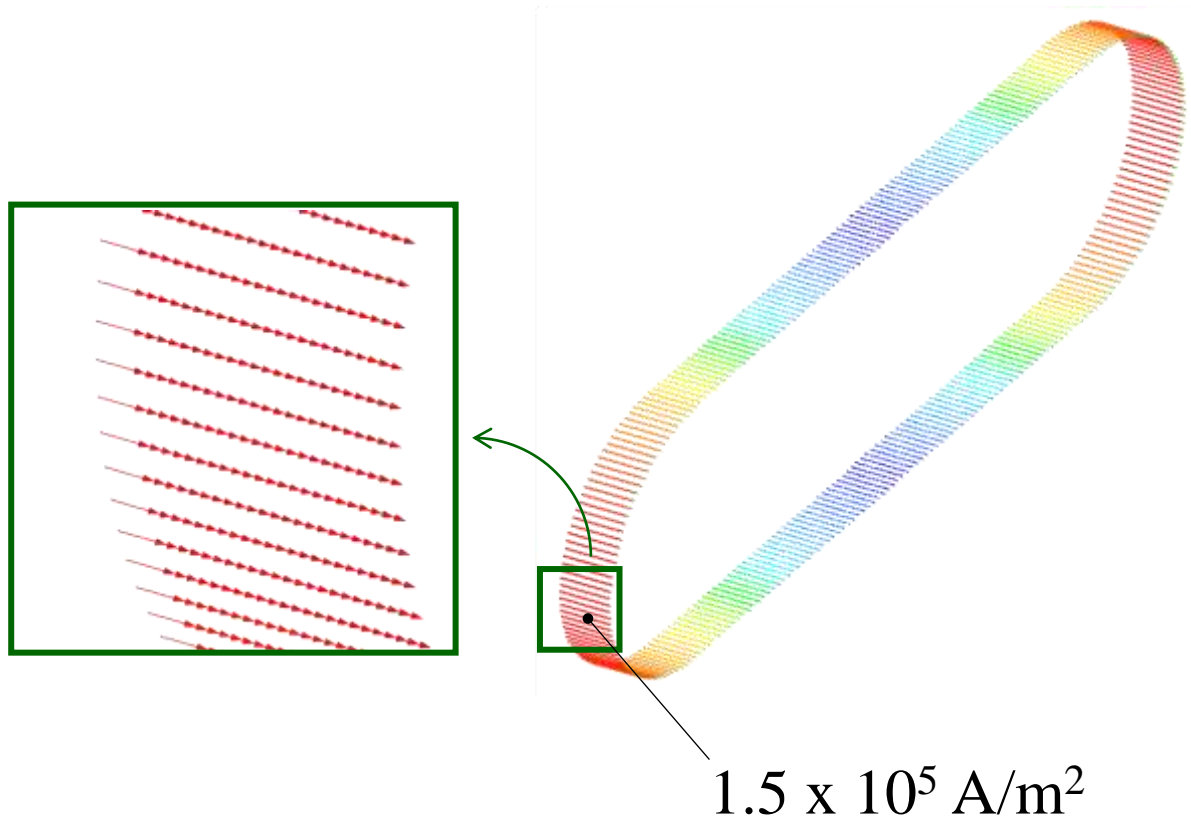


Simulation - Geometry -

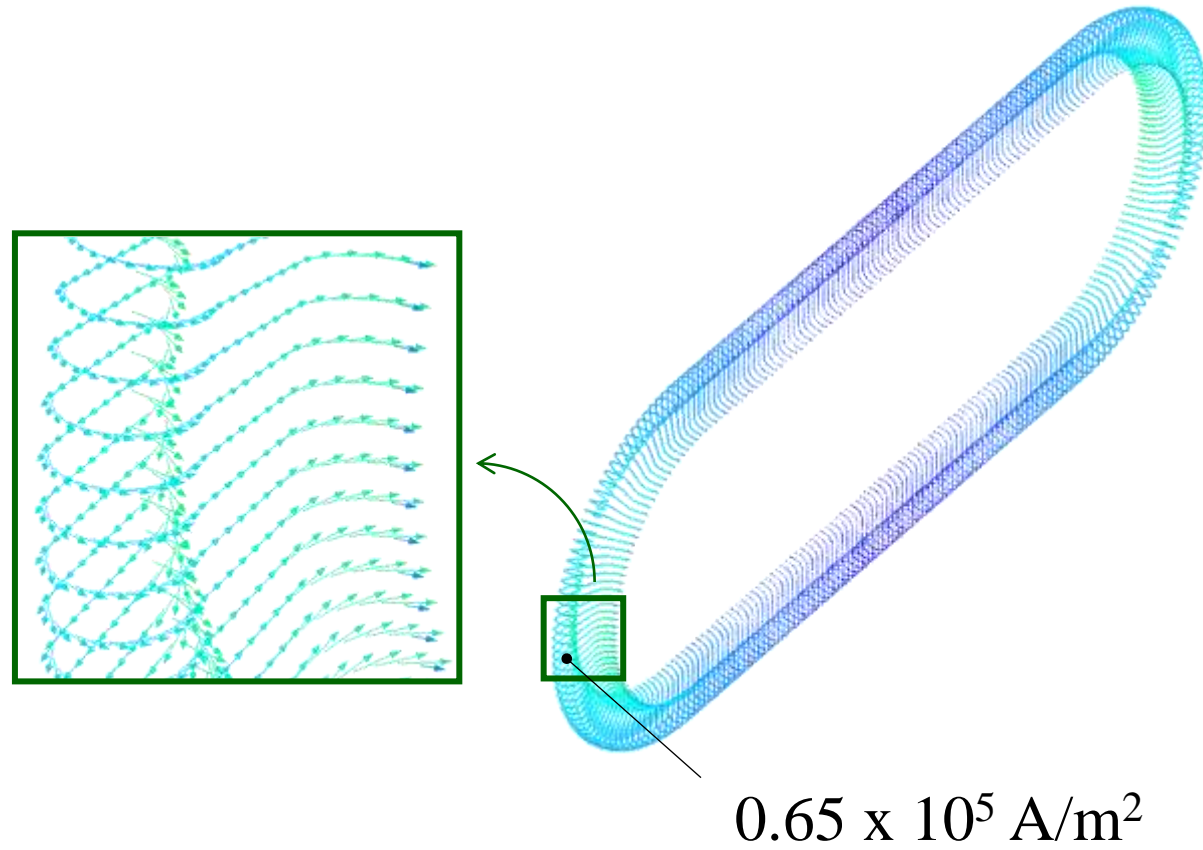


Simulation Result - Eddy Current -

Flat



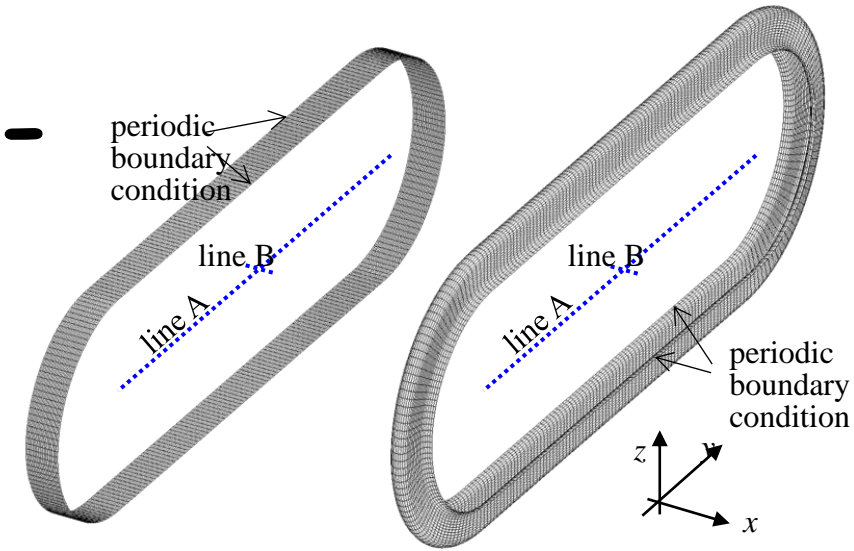
Bellows



Simulation Result - Magnetic Field by Eddy Current -

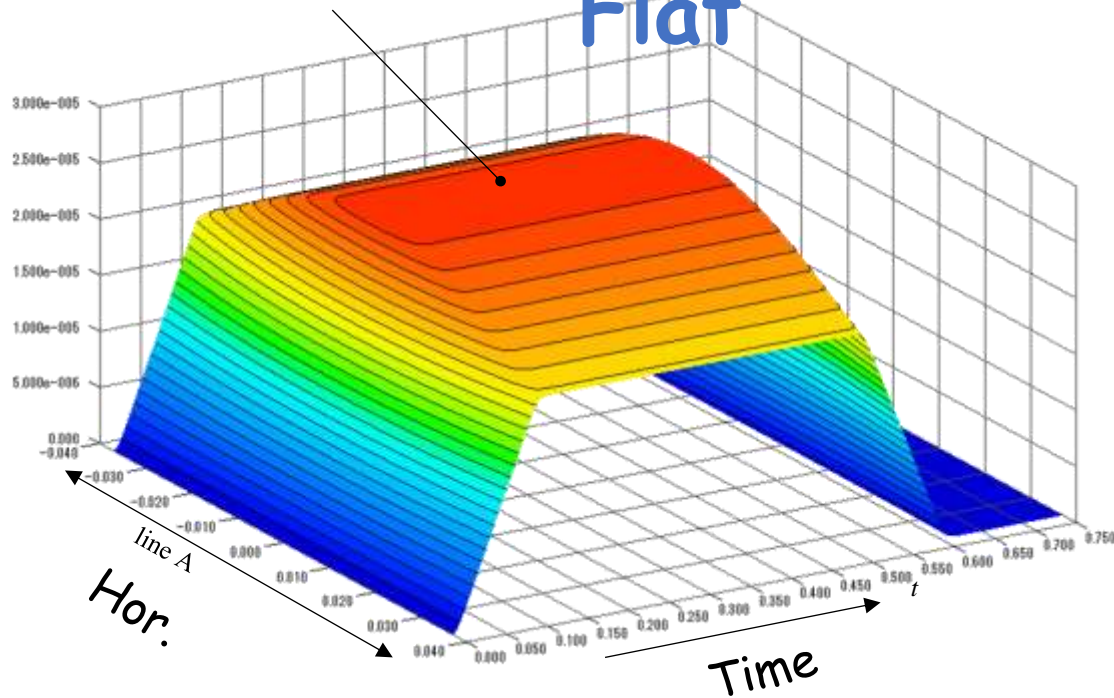
Biot-Savart law

$$\mathbf{B}_e = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}') \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} dV'$$



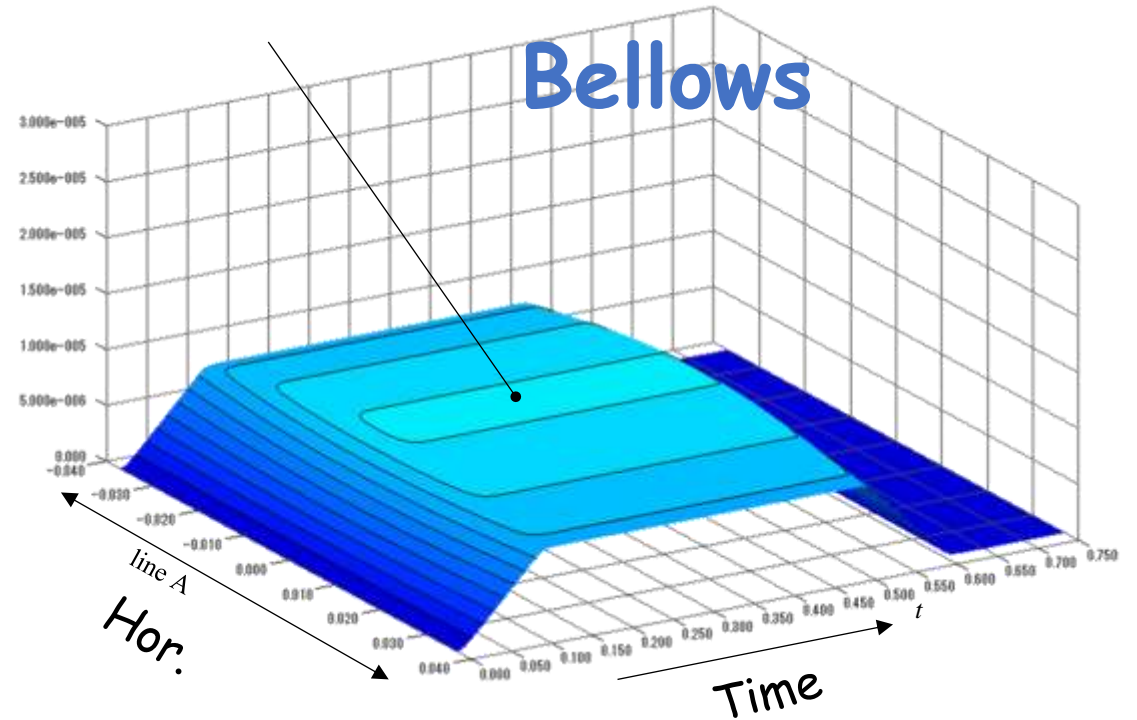
$2.77 \times 10^{-5} \text{ T}$

Flat

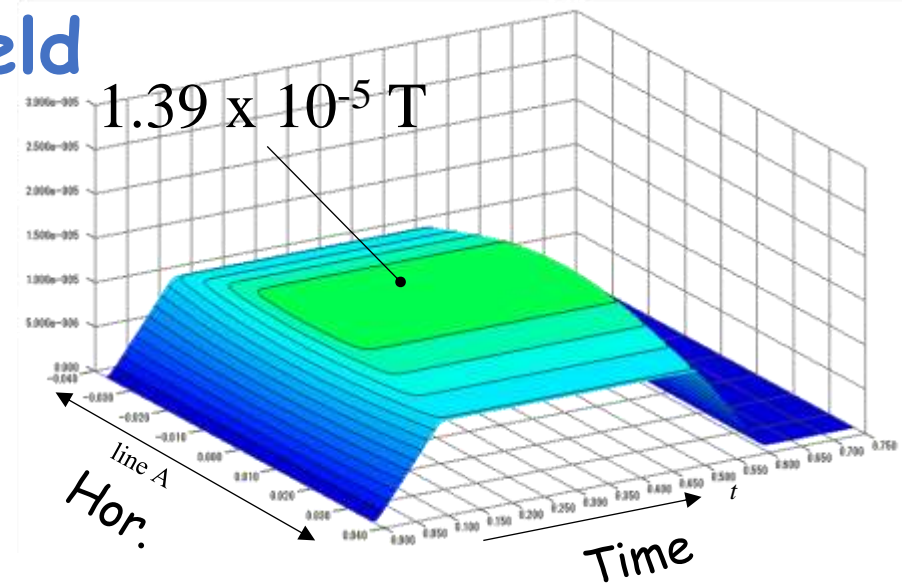
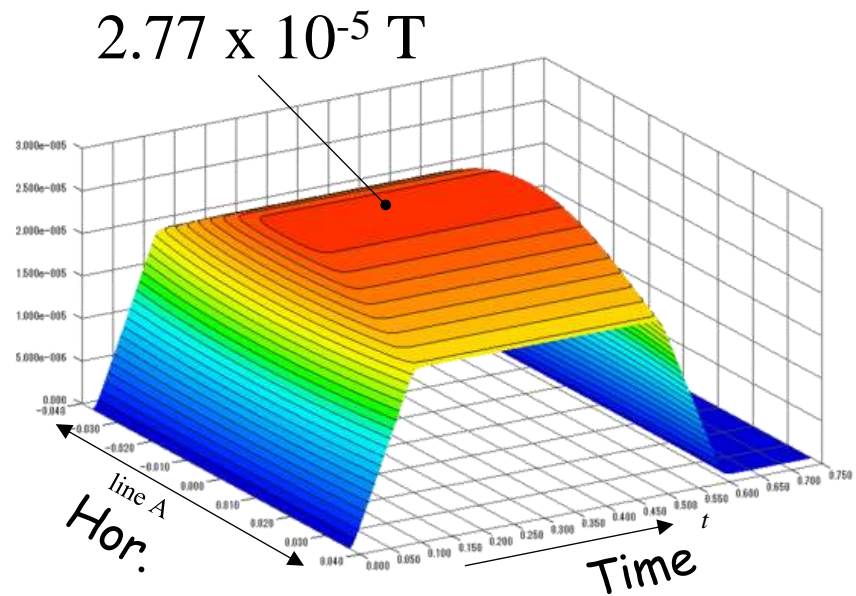
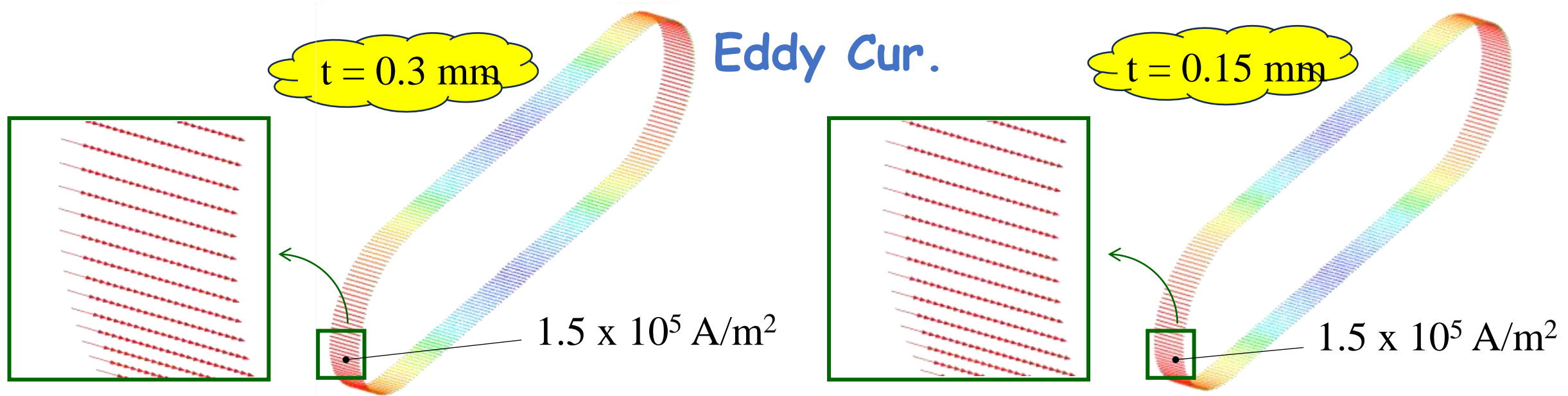


$1.00 \times 10^{-5} \text{ T}$

Bellows



Simulation Result - Wall Thickness -



まとめと展望

Summary and Prospects

- 蛇腹構造真空ダクトの渦電流抑制効果の数値的な評価を試みた
- 薄肉を仮定し電流ベクトルポテンシャル法を用いることで蛇腹構造ダクト表面に流れる渦電流を数値的に求めることに成功した
- 平板構造に比較して蛇腹構造では渦電流が抑制されることが確認できた
- 磁極存在下での磁場の数値的評価は次の課題である
- 解析的表式や実測との比較も今後の課題である