２次元太陽フレアの磁気リコネクション解析

研究背景１

- 磁気リコネクションは磁力線がつなぎ変わる現象（図1）のことをいう。この現象が引き起こしている現象の一つに主に太陽黒点付近から生じる爆発現象の太陽フレアがあり、太陽フレアの磁気リコネクションモデルは、Carmichael, Sturrock, Hirayamaによって提唱された。磁気リコネクションは、太陽フレアのエネルギー供給源となっているので、それを早期発見することで、太陽フレアの発生予測に役立てることができる。大規模な太陽フレアが起きると、通信障害や大停電などが引き起こされ、世界経済が一瞬にして麻痺してしまうという事態に陥るので、この研究をすることによって、我々の生活にも還元される。そのため現在も、太陽フレアの磁気リコネクションに関する議論が非常に活発に行われている。現在では、磁気リコネクションが、太陽フレアの発生機構となっていることは、「ようこう」などの衛星観測からも証明されている。さらに磁気リコネクションは、太陽フレアのみに限らず、高エネルギー粒子の最も効率の良い加速機にもなっている

研究背景2

- 観測では、ひので衛星などで、太陽磁場の直接観測がなされているが、現在は観測データと、スーパーコンピュータによる詳細なシミュレーションを組み合わせることによって、3次元の磁場のデータを求める手法が盛んである。しかし、実際に2次元の太陽フレアの磁気リコネクションの構造は理解されているものの、3次元では、どこでどのようにして磁力線がつなぎ変わっているか、磁場のデータから読み取るのが難しく、解決に至っていない。なぜならば、2次元の場合は、磁気リコネクションは、磁場の大きさが0となるnull点（X-point）で起こっているということが分かっているが、3次元の場合には、必ずしもそうとはいえないからである。よって、それらを見つけるための自動判定ソフトを開発することは、この分野の発展に必要となってくる。

研究背景3

- また、数理物理学的には、磁力線が3次元でどのようにつなぎかわるのか、位相物理学的観点からも注目されている。磁気リコネクションといった位相構造を議論する物理量にQuasi-separatrix layers がある。また、Magnetic Helicityを用いた方法もある。
- 名古屋大学の柴山さんは、磁気リコネクションの合体と分離が起こることで、速いリコネクションが起こっているという研究をしている。柴山さんのグループと共同で研究を進めている。

問題点

- これらは、静的な系のみで、プラズマの流速を含めた研究は少ない。実際の磁気リコネクションは、動的現象であるため、動的な立場におけるリコネクション機構の解明は重要な課題である。
- さらに2次元の場合でも、磁気リコネクションのエネルギー－変換効率を表す磁気リコネクション率や磁気リコネクションのスケールが、現存のモデルと実際の現象の間で大きなギャップがあることが知られており、いまだ未解決の問題となっている

本研究の特色

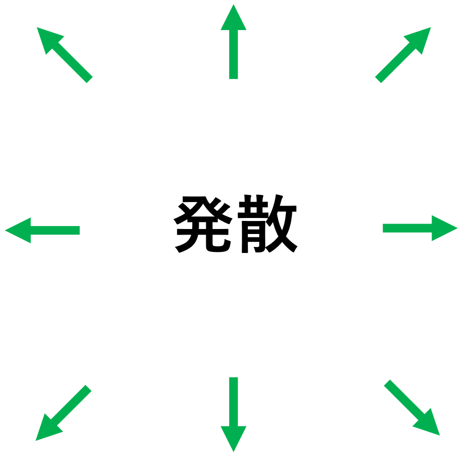
- 空間勾配テンソルの固有値解析によって磁気リコネクション領域の研究はまだ少なく、いずれも２次元のみであるので、3次元の磁気リコネクション領域の解析を目標としている点では新規性がある。シミュレーションのデータだけでなく、衛星観測データでも解析し、太陽フレアの発生傾向を掴みたいと思っている。
- この同定により、規模や、その過程で、磁気リコネクションで磁力線が交わる角度αを定義した。このαは、より直角に近ければ、速い磁気リコネクションが起き、小さければ遅い磁気リコネクションができるという物理現象に対応している、この現段階では、2次元の解析を行っているが、3次元の解析にとりかかる予定である。この研究が完成することで、長い間、困難を極めていた3次元の磁気リコネクションの同定の問題に決着をつけることが出来、磁気リコネクションモデルの発展に大きな貢献をすることができる。

何をどこまで明らかにしようとするか

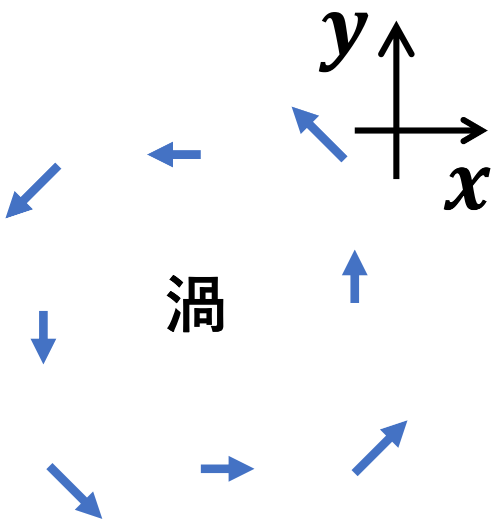
- この研究によって、新しく定義した磁力線の交わる角度αを調べることで、磁気リコネクションの速さの分布がわかる。ここから、この角度α磁気リコネクションの機構についての一つの指標となる。このαの分布のゆらぎを調べることで、今までわかっていなかった速いリコネクションについての構造を理解するのに役立つ。また、3次元の磁場データを解析ソフトで開発し、磁気リコネクションがどのように発展するか、磁気リコネクションをトラッキングして角度αと渦度のラグランジュ的にみた時間変化、どのように収束するのかを調べる。この解析により、例えば、角度αの大きさが大きくなってくると、磁気リコネクションの効率もよくなるので、これにより太陽フレアが予測できると考えられる。

流体構造の分類

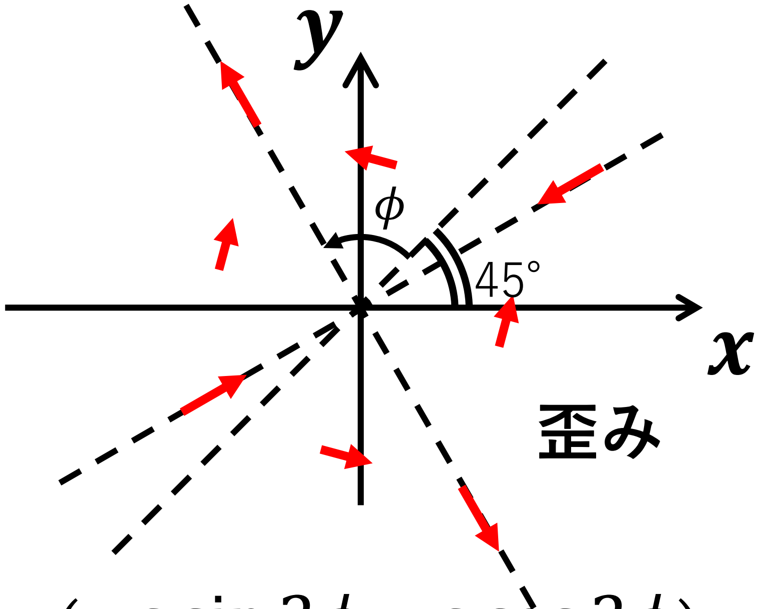
- ベクトル勾配テンソルから同定される流体の構造には、発散、渦、歪みがある。



$$\bar{V}=\begin{pmatrix} p & 0 \\ 0 & p \end{pmatrix}$$



$$\bar{V}=\begin{pmatrix} 0 & -q \\ q & 0 \end{pmatrix}$$



$$\bar{V}=\begin{pmatrix} -s\sin 2\phi & s\cos 2\phi \\ s\cos 2\phi & s\sin 2\phi \end{pmatrix}$$

固有値がどのように表わせるか。

- これらのベクトル勾配テンソルを組み合わせることで、任意のベクトル勾配テンソルは以下のように表すことができる。

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} \partial_x v_x & \partial_y v_x \\ \partial_x v_x & \partial_y v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p - s\sin 2\phi & -q + s\cos 2\phi \\ q + s\cos 2\phi & p + s\sin 2\phi \end{pmatrix}$$

- よって、その行列式と固有値は、

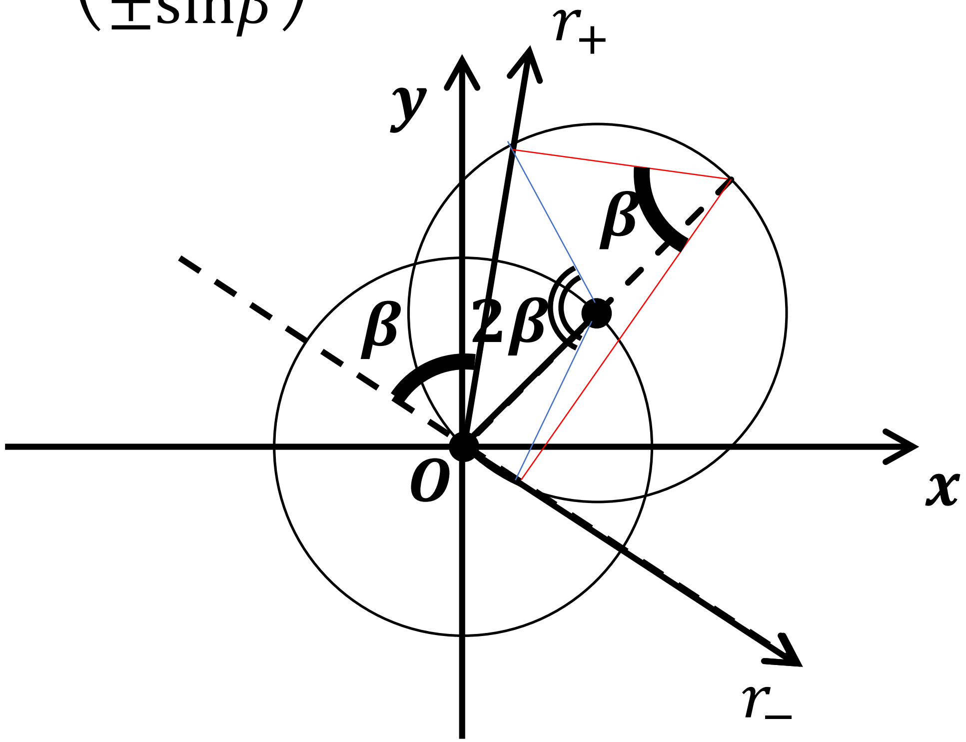
$$\det(\bar{V}) = p^2 - s^2 + q^2$$

$$\lambda_{\pm} = p \pm \sqrt{s^2 - q^2}$$

となる。

固有ベクトルの角度と角度αの関係

- 固有値$\lambda_{\pm} = \pm\sqrt{s^2 - q^2}$　に対する固有ベクトルは、
  - $r_{\pm} = \begin{pmatrix} \cos 2\phi \\ \sin 2\phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\cos\beta \\ \pm\sin\beta \end{pmatrix}$
-



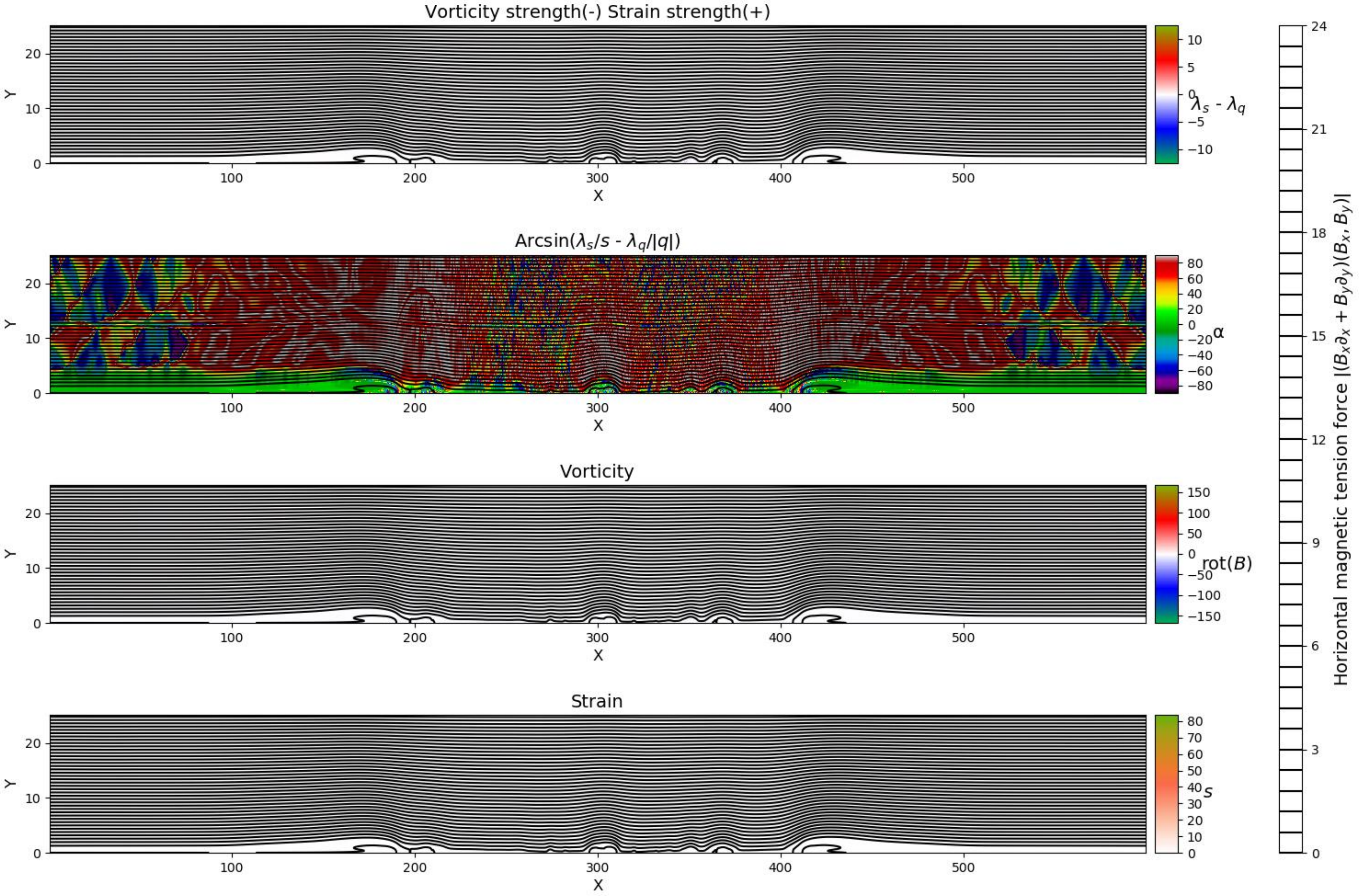
磁気リコネクション率と角度α

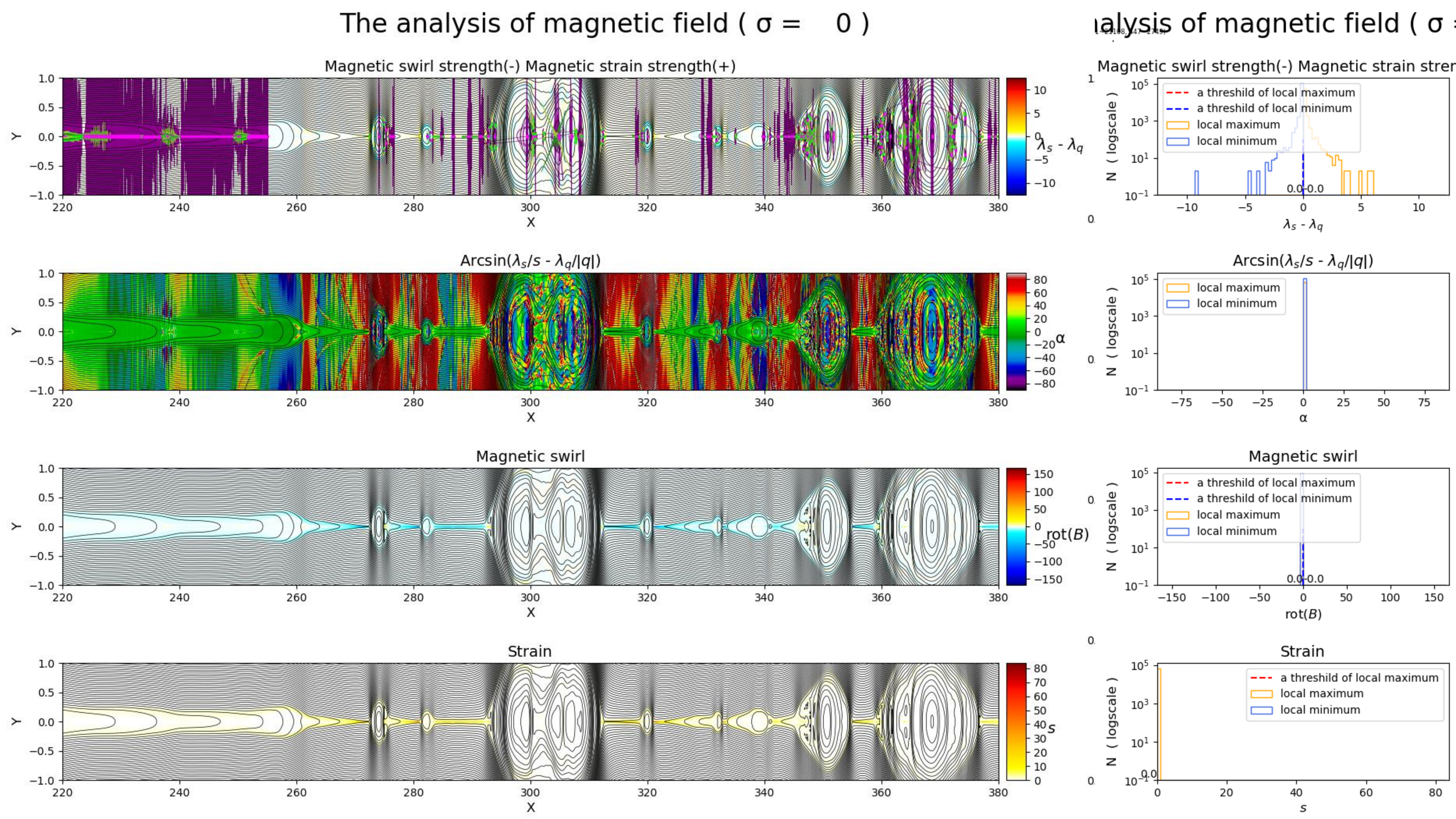
- 　磁気リコネクション率は、角度αから以下のようにして導出される。

(磁気リコネクション率)$\dfrac{\mathrm{V_{in}}}{\mathrm{V}_{out}} = \tan\dfrac{\alpha}{2}$

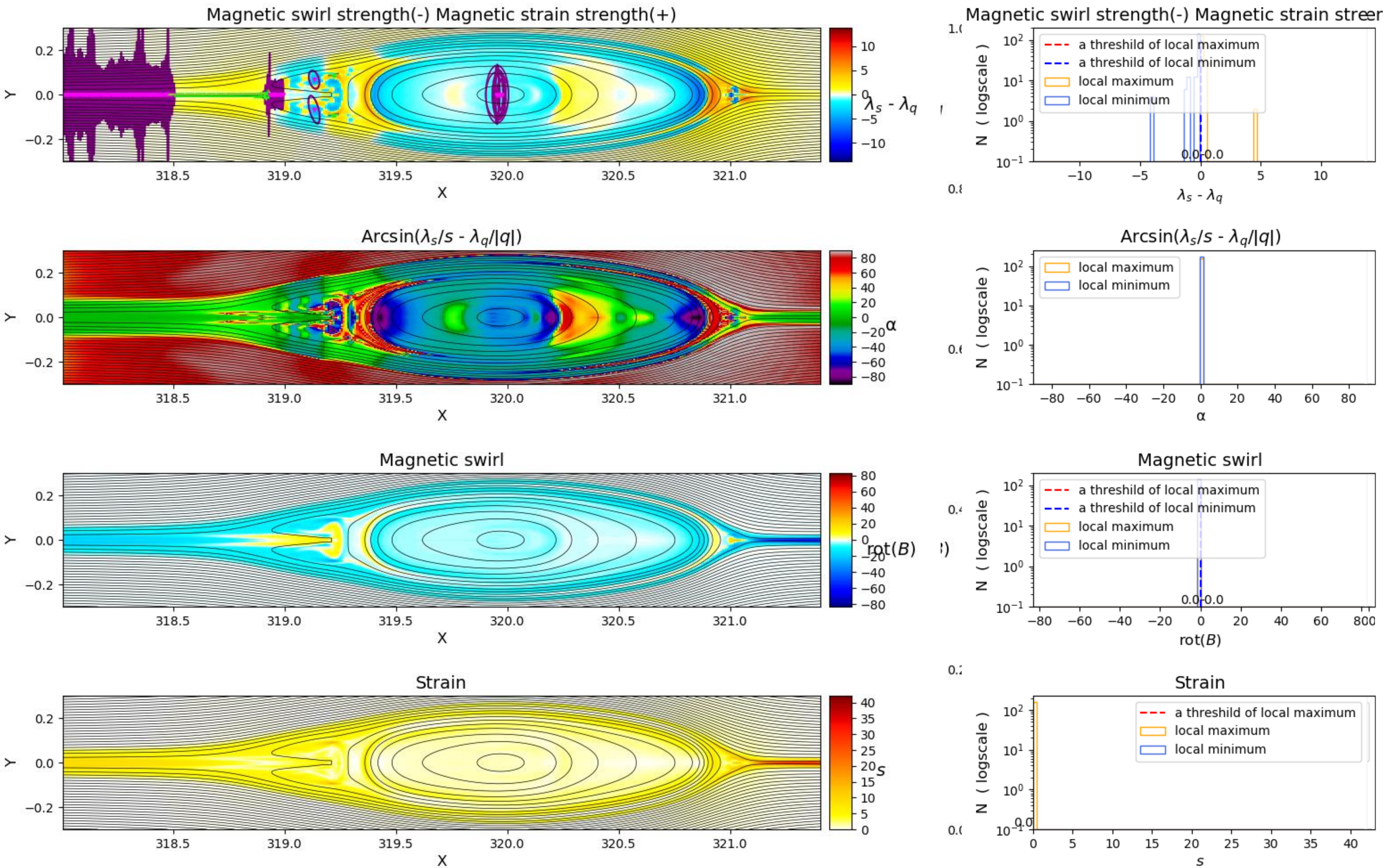
- リンクエスト数S（磁気レイノルズ数）は、
  - $S = \dfrac{1+\cos\alpha}{1-\cos\alpha}$
- となった。

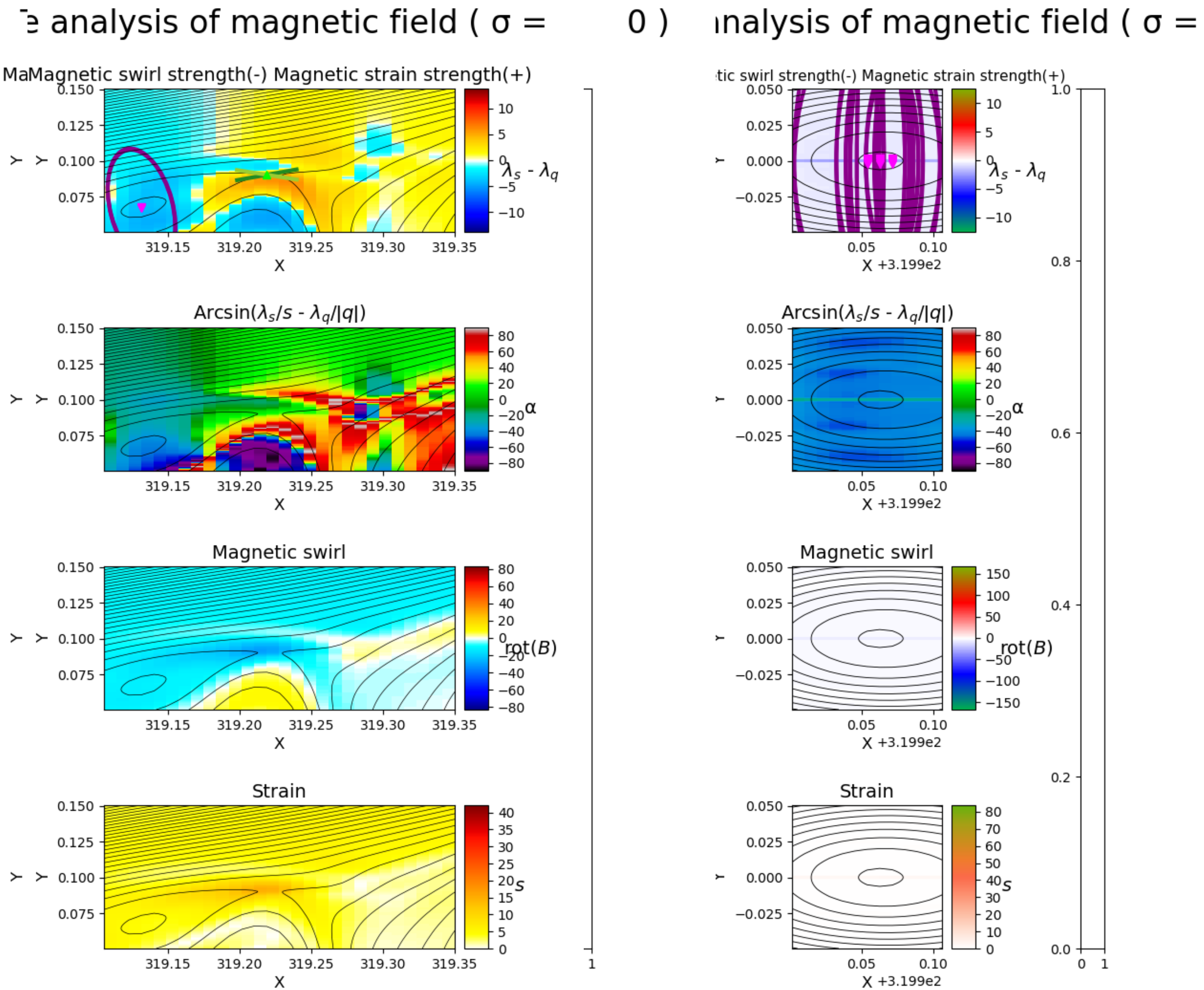
The analysis of magnetic field (σ = 0)



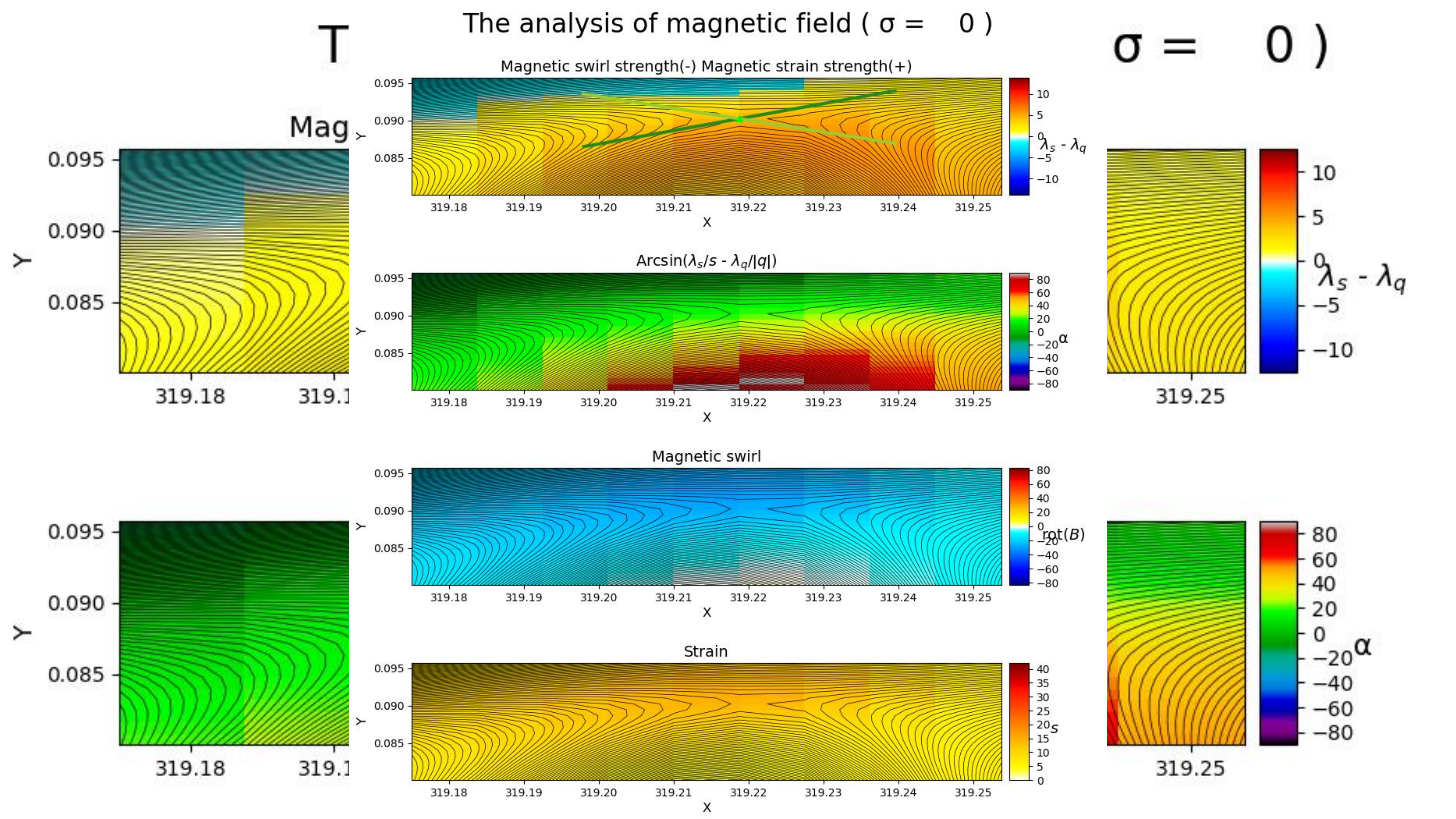

The analysis of magnetic field (σ = 0)
alysis of magnetic field (σ =
Magnetic swirl strength(-) Magnetic strain strength(+)
λs - λq
Magnetic swirl strength(-) Magnetic strain stren
a threshild of local maximum
a threshild of local minimum
local maximum
local minimum
N (logscale)
0.0-0.0
Arcsin(λs/s - λq/|q|)
α
local maximum
local minimum
Magnetic swirl
rot(B)
a threshild of local maximum
a threshild of local minimum
local maximum
local minimum
0.0-0.0
Strain
s
a threshild of local maximum
local maximum
local minimum
0.0
X
Y

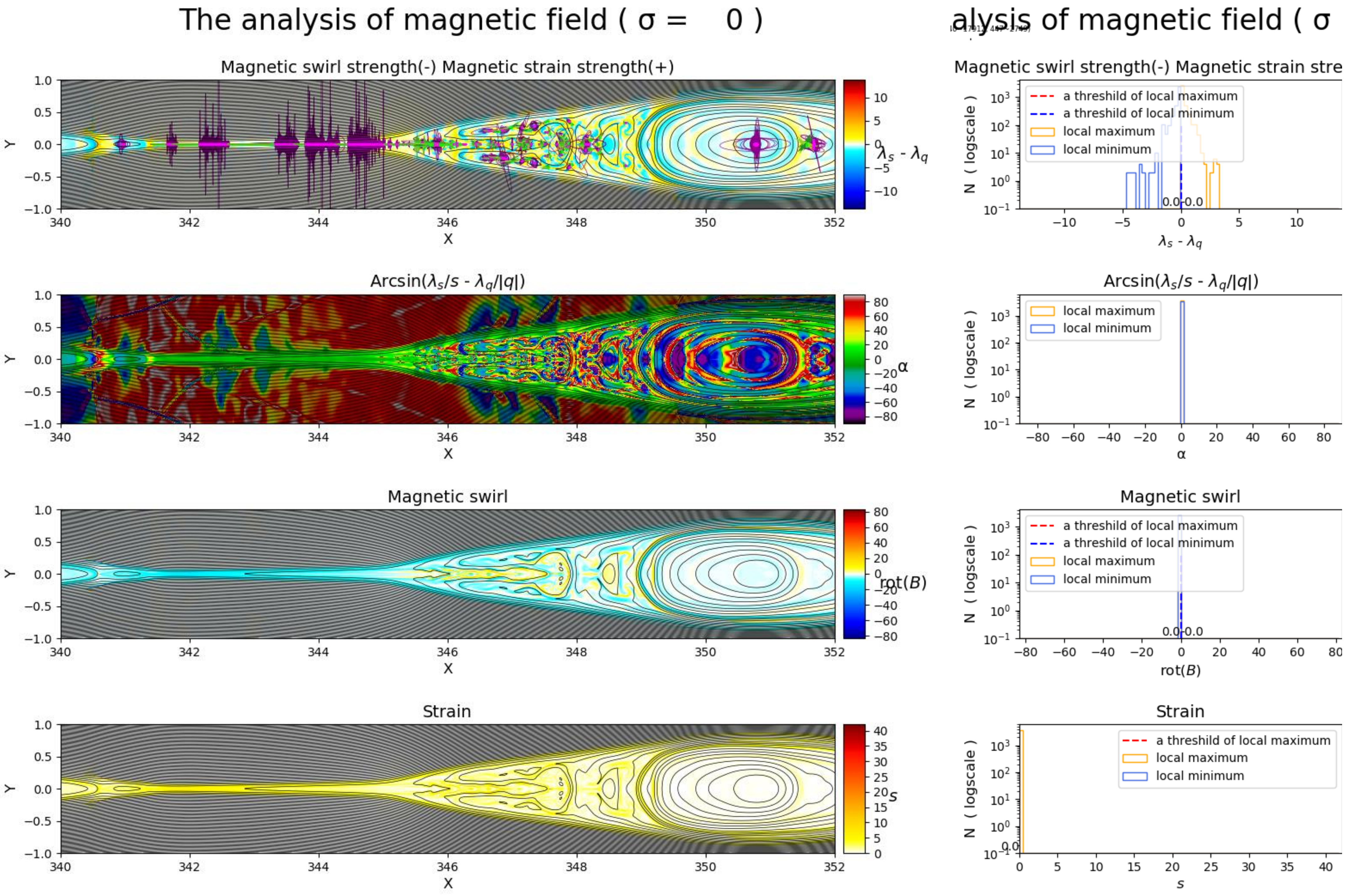
The analysis of magnetic field (σ =   0)





analysis of magnetic field (σ = 0)
analysis of magnetic field (σ =
Magnetic swirl strength(-) Magnetic strain strength(+)
λ_s - λ_q
Arcsin(λ_s/s - $\lambda_q/|q|$)
α
Magnetic swirl
rot(B)
Strain
s
X
Y
X +3.199e2


The analysis of magnetic field (σ = 0)
Magnetic swirl strength(-) Magnetic strain strength(+)
λ_s - λ_q
Arcsin(λ_s/s - $\lambda_q/|q|$)
α
Magnetic swirl
rot(B)
Strain
s
X
Y
T
σ = 0)
Mag



The analysis of magnetic field (σ = 0)
alysis of magnetic field (σ
Magnetic swirl strength(-) Magnetic strain strength(+)
λ_s - λ_q
a threshild of local maximum
a threshild of local minimum
local maximum
local minimum
N (logscale)
0.0
-0.0
Arcsin(λ_s/s - $\lambda_q/|q|$)
α
Magnetic swirl
rot(B)
Strain
s
X
Y

今後の課題

- ｙ＝０付近で不等間隔格子の微分を用いる必要がある。
  - ４次精度だと大変である。
- 閾値をどうするか。
- X-pointでのMagnetic strain などの分布を調べる。
- Pythonで解析していた部分をFortranに機能移転して、Pythonは、グラフ化だけにする。
- 磁気リコネクション付近で、波数分解（半場2018のやり方？）したい。乱流の観点を考えたい。
- 時間変化させて、Magnetic strain strengthの極大値が磁気リコネクションになってくれるかをみたい。

閾値案

- 　現在：閾値は、その点での磁場の大きさBが、Bの平均値の5パーセント以下をnull点として同定していた。

- 　同定されないものや、その点で複数出てきたものがいた。
- 　その点でのBが極小値となって、さらにBが小さいものを探せばよいか？
- 　柴山さんは、Ｖｘの符号で見てましたが、自分もそうするべきか？