

Turbulent Properties Against Hydrogen Isotope Ratio and Zonal Flow Activities in Heliotron J

S. Ohshima, H. Okada, S. Kobayashi, T. Minami, S. Kado, P. Adulsiriswad*, D. Qiu*, M. Luo*, R. Matoike, S. Yamamoto**, Y. Nakamura*, S. Konoshima, T. Mizuuchi and K. Nagasaki

Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, Japan

*Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, Japan

**National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, Japan

e-mail: ohshima@iae.kyoto-u.ac.jp

Turbulence properties against the variation of isotope ratio and zonal flow activity are elucidated in Heliotron J. The turbulence amplitudes for density and potential fluctuations reduce as the hydrogen/deuterium(H/D) gas ratio is varied from H to D dominant plasmas and zonal flow activity is enhanced. Two-point correlation analysis reveals that the correlation of the fluctuations decreases in D plasmas, although the turbulence scale size increases as D gas fraction increases. A statistical analysis using a joint probability density function technique also indicates that the density and potential fluctuations are decoupled in D plasmas, which should contribute to the suppression of turbulence-driven transport and the confinement improvement in D plasma. These observations suggest that the isotope effect can emerge through the reduction and decoupling of density/potential fluctuations, which is attributed to the enhanced zonal flow activity in D plasmas observed in the experiment.

Confinement improvement in deuterium plasmas, called “isotope effect”, has been a long-standing issue in the study of magnetic confinement fusion. The isotope effect contradicts a fundamental model of transport, because an increase of characteristic scale (ion Larmor radius or turbulence scale size here) simply gives the increase of transport, in other words, D plasmas should have a degraded performance compared with the H plasmas, incompatible with the experimental observations. A hypothesis is proposed to explain the isotope effect recently, which is attributed to isotope dependence of turbulence system including a zonal flow activity. A couple of experimental works, including our past work, also report the dependence of zonal flow activity exists on the H/D isotope ratio. However, turbulence responses behind the isotope dependence of zonal flow have not yet been studied in detail so far.

In this study, the isotope dependence of local turbulence properties is characterized in a helical device, Heliotron J. The machine has major/minor radii of $R/a = 1.2/0.17$ m with the magnetic field strength $B = 1.25$ T on axis. In this experiment, the plasma was sustained with electron cyclotron heating with the power of < 0.3 MW, and the H/D ratio was carefully controlled to keep line-averaged density constant ($\sim 0.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) and to reproduce the same plasma conditions. Two Langmuir probes, located at different toroidal sections, were used by fixing them at the same flux surface of $\rho \sim 0.8$ to measure the local turbulence and zonal flow.

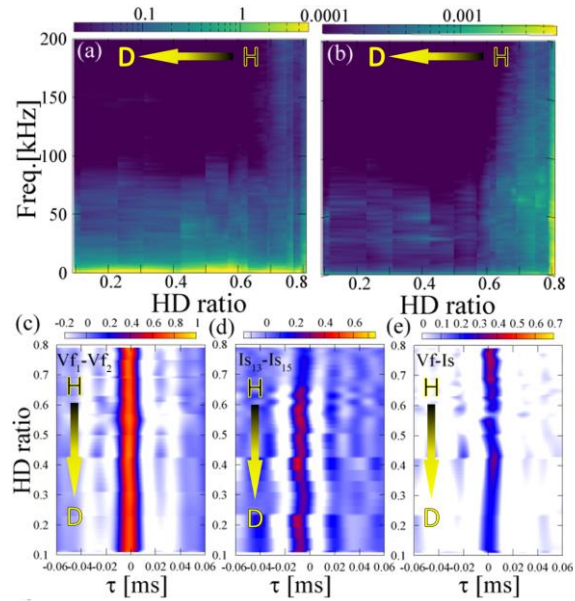


Fig. 1 (a) Dependence of frequency spectra on hydrogen/deuterium(H/D) ratio ($\sim n_H/(n_D+n_H)$) for potential fluctuation and (b) density fluctuation. (c) Isotope dependence of two-point correlation between adjacent probe signals with the distance of 5mm for floating potential (d) density fluctuations, and (e) between potential and density fluctuations.

The frequency spectra of floating potential and ion saturation current indicate that the turbulence level gradually increases against H/D ratio, as hydrogen is more dominated and zonal activity is enhanced as shown in Fig. 1(a) and (b). Interestingly, the small difference in the spectra can be seen; higher frequency components of > 100 kHz emerge in the case of floating potential, and fluctuation level in all the frequency range increases in ion saturation current, as hydrogen becomes dominant. This observation suggests that turbulence-induced transport increases in H plasmas.

Dependence of turbulence correlation length on the H/D ratio was also evaluated with a two-point cross-correlations technique, by using a pair of adjacent probe tips with a distance of ~ 5 mm. The cross-correlations for density and potential are plotted against the H/D ratio in Fig. 1(c) and (d), respectively.

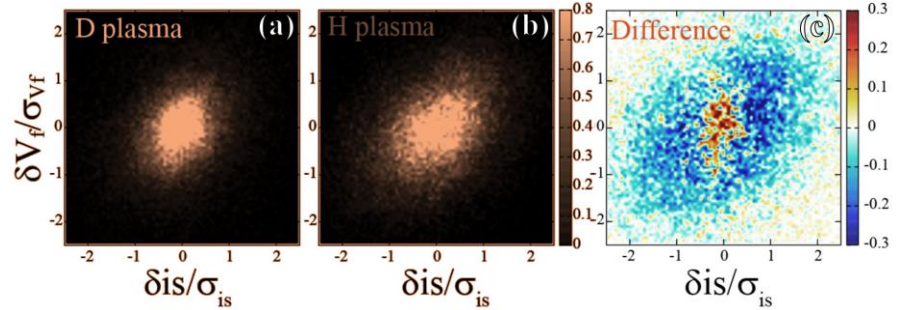


Fig.2 (a) Joint-PDF in D plasma and (b) in H plasmas. The distribution of the D/H plasma has a more round/elliptic shape, which indicates that two quantities are more decoupled/correlated. (c) The difference between the two distributions. The correlated component with an asymmetric shape at fluctuation amplitude ($>$ the standard deviation σ_{is} and σ_{vf}) reduces in D plasmas. . .

In this analysis, the correlation is evaluated with the dominant fluctuation in the frequency range from 10 to 40 kHz. This is because the fluctuation component less than 50kHz is dominant in edge plasmas, and noises such as cross-talk in the frequency range > 50 kHz are not large but non-negligible for the correlation analysis. Fig.1(c) shows that no clear dependence against HD ratio exists for potential fluctuation, and however significant dependence is found for density fluctuation (ion saturation current). The correlation for density fluctuation decreases as hydrogen gas becomes dominant, which implies that the scale size of density fluctuation is smaller in H but larger in D plasmas. This observation is qualitatively consistent with the past experimental results, however, it is unfavourable for transport. The correlation between density and potential fluctuations, which is essentially important to determine turbulence-induced transport, is then characterized, as shown in Fig. 1(e). The correlation decreases as the D gas is dominated in Fig. 1(e). This decrement suggests that the potential and density fluctuation are more decoupled in D plasmas, and the decoupling contributes to the reduction of turbulence-induced transport, even if the turbulence scale size increases in D plasma as mentioned in the previous paragraph.

Furthermore, the decorrelation of density and potential is also demonstrated from a statistical viewpoint using a joint probability density function(joint-PDF) technique, as shown in fig. 2(a-c). The joint-PDF is an extension of one-dimensional PDF, and the distribution shows each PDF of each quantity and indicates a degree of correlation between two different quantities. If two quantities are strongly correlated with a linear relation, the distribution has a distorted, linear shape. A more randomized, rounded distribution shape indicates a weaker coupling, and the distribution should be symmetric in X-Y axes in the case of completely random variables. The joint-PDF for potential and density fluctuations can be seen to be a more elliptic shape in the H plasma, compared with the case in D plasmas, which shows that the fluctuations are correlated more in H plasmas while are decoupled in D plasmas. The difference between the two cases is also shown in Fig. 2(c), representing that the correlated components with an asymmetric shape reduce at the higher fluctuation level ($>$ the standard deviations σ_{is} and σ_{vf}), while the uncorrelated components increase at the lower fluctuation level ($<$ σ_{is} and σ_{vf}) in D plasmas. The reduction of the correlated component corresponds to the decoupling between density and potential fluctuations and the distortion of the fluctuation PDF, which could reduce particle/heat fluxes in D plasmas.

発表分野 (Annex の Topic area)	記号 : EX	※整理番号 (事務局使用欄)
論文名 (英文)	Turbulence Properties Against Hydrogen Isotope Ratio and Zonal Flow Activities in Heliotron J	
著者	S. Ohshima, <i>et al.</i>	
所属	Institute of Advanced Energy, Kyoto University	
連絡先	(TEL) +81-774-38-3457 (E-mail) ohshima@iae.kyoto-u.ac.jp	

論文の要点

※ (1) ~ (3) の各点について、詳しく記述すること。

※ A4 版 2 枚程度を上限とする。

(1) 発表論文の概要 (前回の F E C 以降の新規点を明記)

重水素ガスによる閉じ込め性能の改善、いわゆる水素同位体効果は、ITER および将来の炉設計に直結する知見であるが、初歩的な輸送モデルや新古典理論・ジャイロボーム則と整合せず、その背景には未解明の物理が存在する。

近年、この同位体効果の物理機構として、帯状流の振る舞いがイオン質量比により異なることを原因とする仮説が注目されている[1]。実験的にも、トーラス装置において軽水素 (H) /重水素 (D) の同位体比を制御し、帯状流の指標であるトロイダル方向の長距離相関が応答する事が報告された。ヘリオトロン J においても D ガスの割合増加に従い帯状流による長距離相関・帯状流の揺動強度の増大が観測されている[2,3]。しかしながら、同位体比の変化および帯状流がどのように乱流特性、およびそれによる輸送に影響しうるのか、その詳細についての報告は未だない。

本研究では、同位体比に対する帯状流の応答が観測されるヘリオトロン J の低密度 ECH プラズマにおいて、同位体比の変化に対する乱流挙動の応答について報告している。D プラズマから H プラズマになるつれて、浮遊電位 (ポテンシャル) 揺動、およびイオン飽和電流 (密度) 揺動の周波数スペクトルは両者とも揺動レベルが増大していることが観測された (シノプシス Fig. 1 (a) & (b))

次に、これらの揺動の相関長の指標として、近接した二点間 (距離 5mm) の相関について調べられた。二点相関の増大は乱流の相関長の増大を示し、その逆は相関長の減少を示す。ポテンシャル揺動については相関長の応答は明確でなかったが、密度揺動については H プラズマにおいて、相関長の減少が観測された (シノプシス Fig. 1 (c) & (d))。H における相関長の減少は、過去のイオン種と乱流に関する実験的知見である、ジャイロ半径に比例した乱流相関長の増大とも整合する。一方、この結果のみからは H プラズマにおける閉じ込めの改善が予想され、同位体効果を説明できない。

しかしながら、密度、およびポテンシャル揺動の相関を観測すると、H プラズマではより相関が強く、D プラズマでは弱くなっていることが観測された (シノプシス Fig. 1 (e))。密度・ポテンシャル揺動間の相関は、揺動が生み出す熱・粒子束の決定に重要であり、これらがインコヒーレントとなると熱・粒子束は低減される。

さらに、統計的手法である同時確率分布 (joint-PDF(probability distribution function)) を用いて密度・ポテンシャル揺動間の相関を調べた(シノプシス Fig.2)。Joint-PDF は、単一量の一次元確率密度分布 PDF を二次元に拡張したもので、異なる2つの量の相関の程度を示すことができる。Joint-PDF の分布形状を H/D 間で比較すると、H プラズマにおいてより楕円状に歪んだ傾向が顕著であり、D プラズマではより円形状であることが確認できる。つまり H プラズマでよりコヒーレントである一方、D プラズマにおいて密度とポテンシャル揺動がインコヒーレントとなり、デカップリングしている傾向を示している。このデカップリングの結果として熱・粒子束は低減することが示唆される。

以上をまとめると、本研究において、

1. H から D プラズマにおいて乱流相関長は増大し、これは過去の先行研究の実験的知見とも整合する。一方、D プラズマにおいて輸送が大きくなることが予想され、同位体効果を説明できない

しかしながら、

2. 密度・ポテンシャル揺動の強度は D プラズマにおいて低減する
3. 密度・ポテンシャル揺動が D プラズマにおいてデカップリングする

ことが確認され、乱流揺動の強度抑制、およびデカップリングの結果として、揺動が生み出す熱・粒子束が低減され、D プラズマにおいて輸送が改善されると考えられる。これらは、D プラズマにおける帯状流増大の結果として生じると考えられる。

(2) 国際的な競争相手とその研究との相違点

欧州では、TJ-II や TEXTOR など帯状流に対する同位体効果の結果が示されているが、著者らは帯状流の増大を背景として、乱流特性の変化の詳細(密度・ポテンシャル揺動の低減、およびデカップリング)について初めて実験的に明らかにした。この点で一歩先んじた結果である。

それに加え、単一の密度揺動のみの計測では、同位体効果の物理機構を理解できないことが示唆され、今後の同位体効果の物理研究の展開において考慮すべき重要な結果と考えられる。

(3) 国際論文選考において問題となるかもしれない弱点及びそれに対する反論、国際的に合併される可能性のある研究グループ

本研究に対する想定している議論としては、

(弱点) グローバルな閉じ込め、例えば蓄積エネルギー等の差異について議論がないことが挙げられる。この点に対する反論の例としては、以下である。

(反論) 本実験はプローブ計測の要求上、低密度プラズマで実施された。このため、蓄積エネルギーに関してはノイズレベル以下の差異であり議論が難しいことが現状である。しかしながら、帯状流が乱流輸送に影響していることは広く認知されており、本研究では、同位体比に応答する帯状流の増大/減少と対応して、乱流の低減・デカップリングという乱流駆動輸送の多寡を決定づける重要な応答が初めて実験的に確認された。定量的評価については今後の課題であるものの、乱流輸送を通じ、同位体効果が発現することを明確に示唆する結果である。

参考論文リスト

No.	参考論文 著者名, 論文名, 学会誌名, 発表年月, 巻	査読	他国との共著 (国名)
1	M. Nakata, et al., Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 165002 (概要) ジャイロ運動論的シミュレーションコードを用いて捕捉電子モード乱流および帯状流の同位体比依存性の存在が初めて明らかにされた。	有	
2	Y. Xu et al., Phys. Rev. Lett., 110 (2013) 265005 (概要) 小型トカマク TEXTOR において帯状流の指標である長距離相関の同位体比依存性が存在することが実験的に初めて明らかにされた。	有	
3	S. Ohshima et al., , Proceedings of 26th IAEA Fusion Energy Conference EX/P8-20(2016) (概要) ヘリカル装置ヘリオトロンJ装置において、帯状流の指標である長距離相関の存在の同位体比依存性、および乱流-帯状流との非線形結合の同位体比依存性について初めて実験的に示した。	無	

※ 査読「有」とする論文については、査読中・投稿中のものを除く

※ 論文数により記入欄を追加すること

審査員の皆様の貴重なご指摘・ご助言に感謝いたします。

以下にコメントに対する返答と改訂・修正点を添付いたします。1回目・2回目の順序でそれぞれコメントと返答を添付いたします。

1回目コメント返答・改訂点

(コメント1)

今回は短距離相関を議論していますが、超距離相関におけるこれまでの傾向は再現されているのでしょうか。Fig.2からは残念ながら大きな違いは見られないと思います。conventionalな相互相関関数の方が明確になるのではないのでしょうか。

・紙面の制限状、タイトル・文章（例えば、第一節第一文や最終段落最終文）でのみ触れるのみですが、帯状流の存在を示す長距離相関は重水素になるにつれて増大していることを確認しており、これまでの報告と同様の結果が得られています。

・ Fig.2 の分布の差異をより明確に示すため、Fig.2(c)を追加しました。Fig.2(a)と Fig.2(b)の差異として、Dプラズマでは非対称な成分、つまり密度・ポテンシャル揺動がコヒーレントな成分が揺動強度の強い領域 ($>\sigma_{is}, \sigma_{vf}$: 揺動標準偏差) で減少し、揺動強度の低い領域の成分は逆に増大していることがわかります。つまりは、強度が強くとコヒーレントな成分がDプラズマにおいて減少する結果、輸送が低減されることが示唆されます。

上記の変更に伴って、最終パラグラフの大幅な改稿を行いました。

(コメント2)

水素と重水素プラズマでの揺動特性の違いについての興味深い結果が示されている。

図2のキャプションに'Fig.2'が示されていない。

電位とイオン飽和電流の相関については、相関係数も示したほうが良い。

・ 上述しましたように、Fig.2について新たな図を追加し、修正いたしました。これによって、図より分布の差異を明確に確認できると考えております。相関係数については発表の段階で示したいと考えております。

上記の変更に伴って、最終パラグラフの大幅な改稿を行いました。

(コメント3)

プローブ計測のため、周辺部の一点、また、低密度に限定された解析となっている。
また、温度揺らぎとポテンシャルゆらぎの相関に関しては議論できていないため、熱流速に関する同位体効果は議論できていない。
帯状流がポテンシャル揺動の強度を弱めることは理解できるが密度揺動とポテンシャル揺動の相関を弱めることを想像するのは難しい。

・ご指摘の通り密度・ポテンシャル揺動の相関からは熱流束を評価できませんが、密度・ポテンシャル揺動は、乱流駆動粒子束の大小に直結するのみならず、熱流束評価においても粒子束は重要な要因です。以下、詳細を議論いたします。

H/D 比が変化したとしても、乱流の基本的挙動が同一で温度揺動と密度・ポテンシャル揺動の位相関係が一定に保たれるのならば、粒子束の増減はそのまま熱流束の増減に対応します。

仮に熱流束が変化しないのであれば、H/D 比に対し温度揺動と密度・ポテンシャル揺動の相関や位相関係が変化し、一定でないことを意味します。つまり、H/D 比の変化に応じ、乱流素過程が変化していることが示唆されます。

上記いずれの可能性であれ、密度・ポテンシャル揺動間の相関の変化は、HD 比に応じて乱流の特性、および乱流輸送が変化していることを意味します。熱流速の量的変化において影響が顕れるかは不明ですが、熱輸送を生み出す乱流の機構そのものに影響し、質的に熱輸送特性が変化していることが示唆されます。

また確かに周辺に限られた計測ではありますが、上述した点は興味深い観測事実であり、輸送機構に対する同位体効果を理解するため重要と考えております。

・後者のご指摘につきましては、帯状流は乱流と均衡しており、つまり帯状流が増大すると、密度・ポテンシャル揺動は同じように減少する、と想像することができます。しかしながら、実験的には、乱流と帯状流との相関は、ポテンシャル揺動との非線形結合（バイコヒーレンス解析の結果など）等についてより明瞭に現れるケースがあり、両者に同等に作用しているように見えない実験報告があります。本研究においても、重水素放電になるにつれて帯状流増大に伴い周波数スペクトルに影響する様子が密度・ポテンシャル揺動間で差異があること（Fig. 1）、PDF の変化においてより強度の強い成分を低減している様子（Fig.2）など、線形的とは言い難い挙動が観測されています。現時点では、その物理機構は不明ではあるものの、帯状流が密度・ポテンシャル揺動間の相関を低減する（デカップリングする）機構に関与したと考えるのが自然であると考えています。

最終段落の一文において、デカップリングの原因を帯状流の変化に帰するのではなく、以下のように観測事実に基づく表現に留めました。

The decoupling is observed against the enhancement of zonal flow observed in this experiment.

2回目コメント返答・改訂点

>○タイトルを変えた方が良い。

>*Reduction and Decoupling of Turbulence behind Variation of Hydrogen Isotope*

>*Ratio and Zonal Flow Activity in Heliotron J*

>では、アイソトープ比などを変化による「減少」となっていますが、実際には「変
>化」ですので、

>*Changes in Turbulent properties with Variation of Hydrogen Isotope Ratio and*

>*Zonal Flow Activities in Heliotron J*

>などはどうですか。また、この論文では、帯状流の過去の実験については言及してい
>ますが、新しい帯状流の実験結果

>については述べられていません。zonal flow activities はない方がよいのでは。

・タイトルを変更しました。

(Old)Reduction and Decoupling of Turbulence Behind Variation of Hydrogen Isotope Ratio and Zonal Flow Activity in Heliotron J

» (New)Turbulent Properties Against Hydrogen Isotope Ratio and Zonal Flow Activities in Heliotron J

>○最後の一文は工夫が必要あるいは削除した方が良い。

>上記の意味で最後の文で帯状流に言及するのは唐突です。

>*The experiment to date has given evidence to suggest the decoupling due to t*

>*the zonal flow enhancement.*

>などの表現がよいのでは。

・最後の一文を削除しました。本実験の説明中に帯状流が観測され、重水素プラズマでより強くなっていることについて言及しました。発表ではその点について議論する予定です。

>○改訂された部分、表現が分かりにくいと思います。可能ならよりわかりやすい表現
>にしてほしい。

・最終段落について、大幅に改訂し、より丁寧な図の説明を追加しました。

>○参考文献 [2,3] がありません。対応する文を削除するか、参考文献を再度書き込む
>こと。

・削除しました。