

ニュージーランド地磁気観測データを用いた 1/4波長モード磁力線共鳴振動の共鳴構造の解析

尾花由紀 [1], Colin L. Waters [2], Murray D. Sciffer [2], Frederick W. Menk [2], Robert L. Lysak [3], 塩川和夫 [4], Anthony W. Hurst [5], and Tanja Petersen [5]

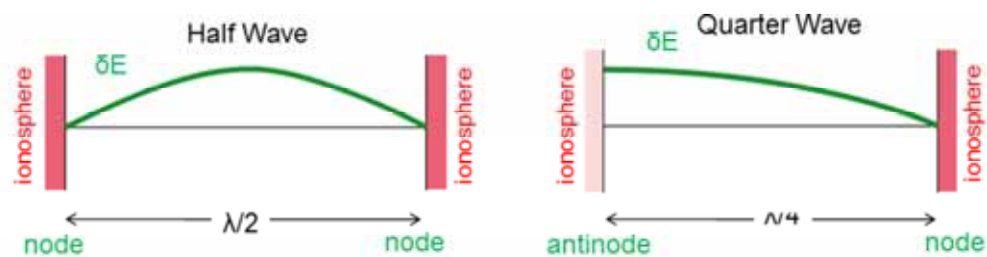
[1] 大阪電気通信大学, [2] The University of Newcastle

[3] University of Minnesota, [4] 名古屋大学, [5] GNS Science

Quarter Wave (QW)とは?

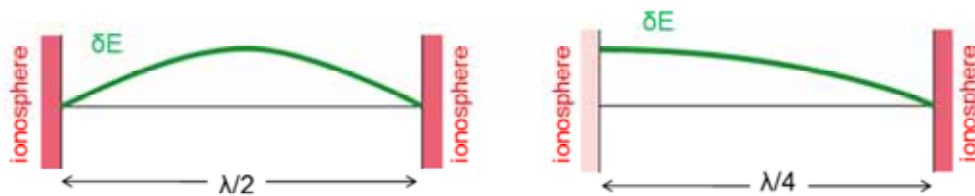
- a mode of standing MHD waves on geomagnetic field lines
- excited when the ionosphere has strongly asymmetric conductances at conjugate points of a field line
- E has node (antinode) in the sunlit (dark) hemisphere
- because the mode has a $\frac{1}{4}$ wavelength along the field line, it is called a 'quarter-wave'.
- Longer periods at a given L value than the half-wavelength modes

[Allan and Knox, 1979b]



QW研究の意義

- 磁力線共鳴、磁気圏空洞共鳴の新しい知見が得られる
- 磁気圏-電離圏結合過程において電離圏環境の変化が引き起こす効果を実証的に調べることができる
 - ✓ QWは電離圏上層におけるAlfven波の反射係数の符号反転によって引き起こされる
 - ✓ 朝夕境界線付近で上記の反転がいつ、どのように引き起こされるか、確実に調べることができる
- プラズマ質量密度モニタリングへの応用
 - ✓ QWをHWと間違えて密度推定を行うと、密度を約4倍過大評価してしまう
- 放射線帯粒子加速への寄与
 - ✓ 磁気圏内でのULF波分布にどれくらい寄与するか？



Previous Studies of QWs

1960年代から：ULF周波数帯の地磁気脈動を磁気圏内に存在するアルヴェン波の文脈で説明しようとする試みがなされてきた

- 初期のモデル：
 - 磁力線は直線
 - 電離圏や地面は平面
 - 電離圏電導度は無限大、南北半球で対称
- Southwood [1974], Chen and Hasegawa [1974]
 - 電離圏でのエネルギー損失に言及
- Hughes [1974], Hughes and Southwood [1976]
 - 電離圏と中性大気層が入射波の電磁場に及ぼす影響について解析
- Newton et al. [1978]
 - 有限で南北半球で**対称**な Σ_p
 - 減衰率が Σ_p によって変化し、波が強く減衰される特定の値($\Sigma_p \sim \Sigma_{critical}$)が存在
- ➡ Allan and Knox [1979ab]
 - 有限で南北**非対称**な Σ_p
 - 磁気圏内でのQW modeの励起を示した
- Ozeke and Mann [2004], Ozeke et al. [2005]
 - 有限で南北**非対称**な Σ_p 、磁力線沿いの p 分布を変化させる
 - 諸条件下でのQWの減衰率変化や、磁力線沿いのエネルギー伝搬などを調べた

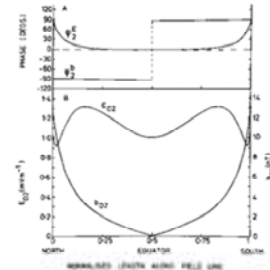


FIG. 4. (a) PHASE AND (b) MAGNITUDES OF E_y AND E_z AT $L=4$ FOR THE QUARTER-WAVE FUNDAMENTAL WITH $\omega_p^2 = 10.5$, AT $t = 0$.

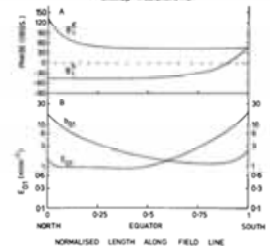


FIG. 5. (a) PHASE AND (b) MAGNITUDES OF E_y AND E_z AT $L=4$ FOR THE QUARTER-WAVE FUNDAMENTAL WITH $\omega_p^2 = 10.5$ AND $\omega_{pe}^2 = 0.15$, AT $t = 0$.

Allan and Knox, 1979b

Previous Studies of QWs

Allan and Knox, 1979ab モデルに有限で南北非対称な Σ_p を与え、QW の励起を予言

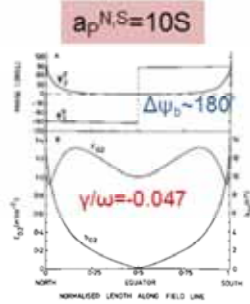


FIG. 4. (a) PHASES AND (b) MAGNITUDES OF E_1 AND E_2 AT $L=4$ FOR THE HALF-WAVE FUNDAMENTAL WITH $a_p^N=10S$ AND $a_p^S=10S$, AT $t=0$.

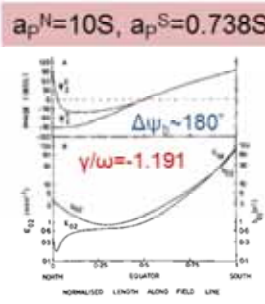


FIG. 6. (a) PHASES AND (b) MAGNITUDES OF E_1 AND E_2 AT $L=4$ FOR THE HALF-WAVE FUNDAMENTAL WITH $a_p^N=10S$ AND $a_p^S=0.738S$, AT $t=0$.

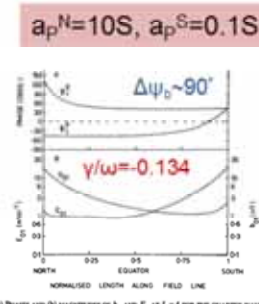


FIG. 8. (a) PHASES AND (b) MAGNITUDES OF E_1 AND E_2 AT $L=4$ FOR THE QUARTER-WAVE FUNDAMENTAL WITH $a_p^N=10S$ AND $a_p^S=0.1S$, AT $t=0$.

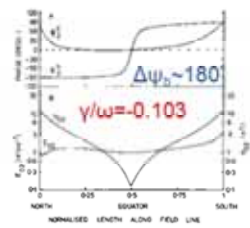


FIG. 5. (a) PHASES AND (b) MAGNITUDES OF E_1 AND E_2 AT $L=4$ FOR THE HALF-WAVE FUNDAMENTAL WITH $a_p^N=10S$ AND $a_p^S=3S$, AT $t=0$.

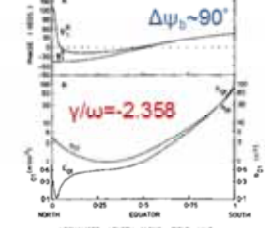


FIG. 7. (a) PHASES AND (b) MAGNITUDES OF E_1 AND E_2 AT $L=4$ FOR THE QUARTER-WAVE FUNDAMENTAL WITH $a_p^N=10S$ AND $a_p^S=0.736S$, AT $t=0$.

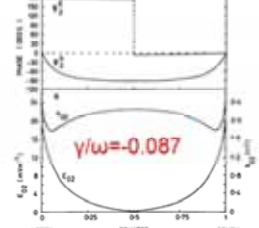


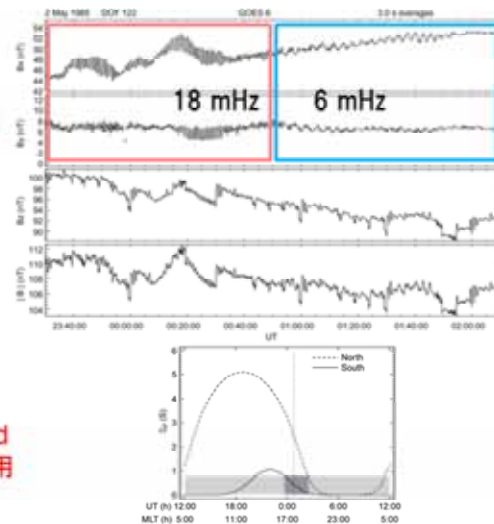
FIG. 9. (a) PHASES AND (b) MAGNITUDES OF E_1 AND E_2 AT $L=4$ FOR THE HALF-WAVE FUNDAMENTAL WITH $a_p^N=0.1S$ AND $a_p^S=0.1S$, AT $t=0$.

Previous Observations of QWs

2000年代まで、QW の観測例は非常に少なかったが、2008年以降、急増

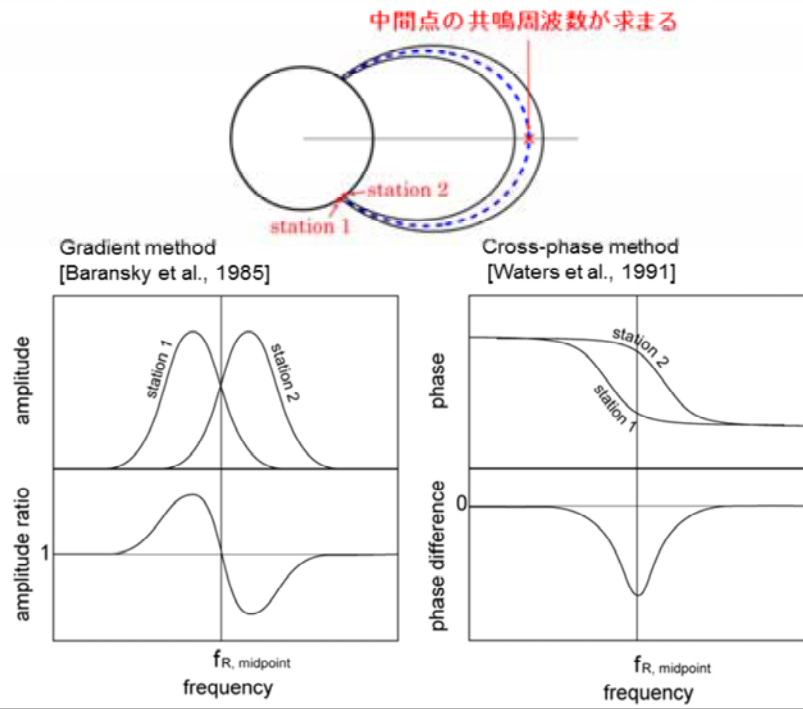
- Allan [1983] ... 1 event
- Budnik et al. [1998] ... 1 event
- Obana et al. [2008]
... 7 events from 37 quiet days
- Obana et al., 2015 ... 4 events
- Jayashree et al., 2015 ... 22 events

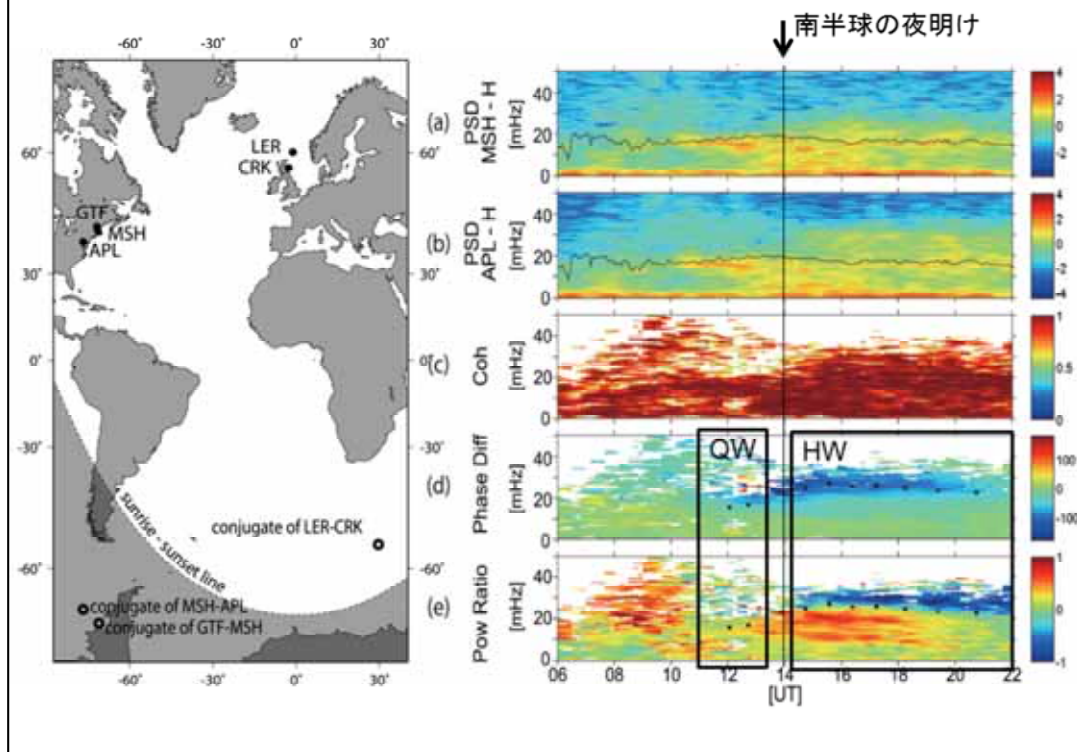
Gradient method
• Cross-phase methodの適用



[Budnik et al., 1998]

Determination of the field line resonance frequency





Obana et al., 2008で 残った疑問

- ✓ 検出された異常低周波数イベントは本当にQWか？
- ✓ たまたま高密度な領域をひっかいただけではないのか？



- ✓ 共鳴周波数以外の証拠を見つける必要あり

ニュージーランド地磁気観測網の整備

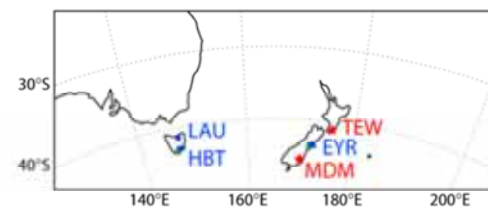
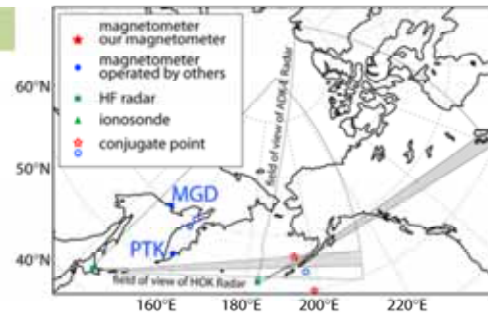
code	G. lat	G. lon	M. lat	M. lon	L
TEW	-41.18	175.83	-47.11	259.50	2.19 #1
EYR	-43.40	172.40	-50.08	256.90	2.47 #2
MDM	-45.60	170.09	-52.81	255.55	2.78 #1

Station Pairs

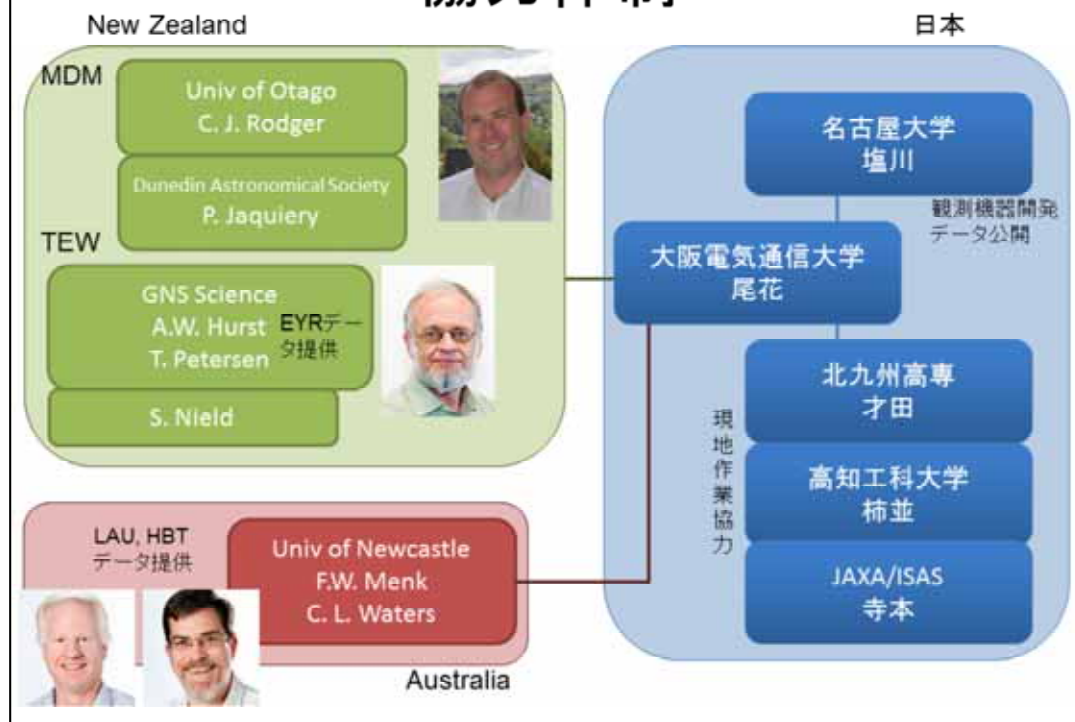
EYR-TEW	2.33
MDM-EYR	2.62

Stations belonging to Osaka Electro-Communication Univ. (#1), and GNS Science (#2).

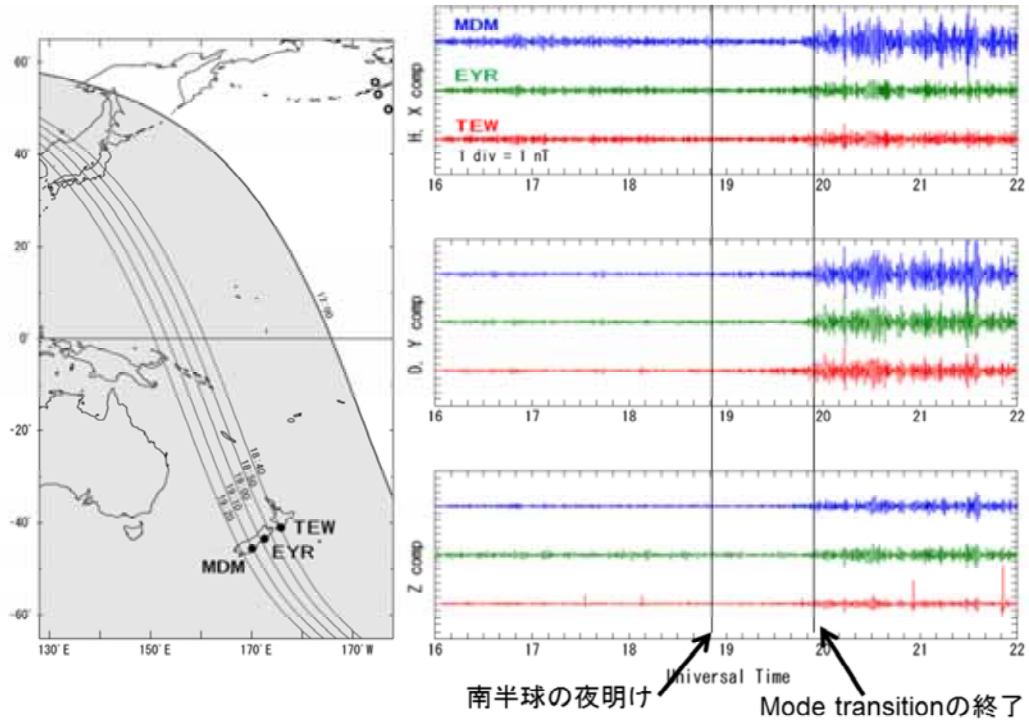
設置: MDM 2011年3月
TEW 2012年3月

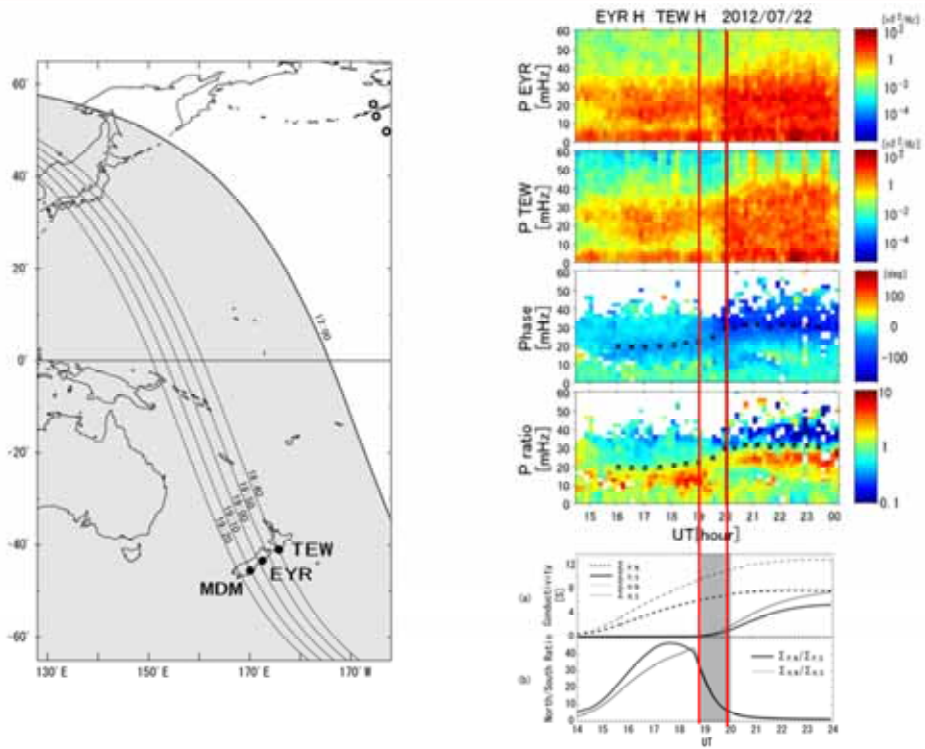


協力体制



22 July 2012





width of resonant region: ϵ

latitudinal structure of the complex amplitude of magnetic field [Guglielmi, 1989]

$$H(x, f) = \frac{h_R(f)}{1 + i\zeta}$$

estimate of ϵ [Pilipenko and Fedrov, 1994]

$$\frac{\epsilon}{\Delta x} = \frac{G \sin(\Delta\phi)}{G^2 - 2G \cos(\Delta\phi) + 1}$$

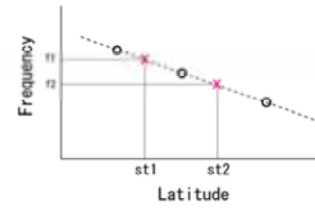
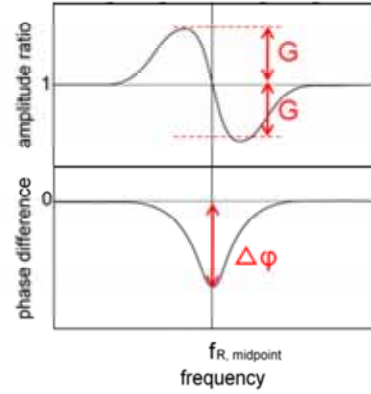
 ϵ : width of resonant region Δx : distance between points x_1 and x_2 $\Delta\phi$: cross phase between x_1 and x_2 G : peak value of amplitude ratiodamping rate: γ/ω

The forced, damped harmonic oscillation model [Gough and Orr, 1984]

$$\ddot{b}_\phi + 2\gamma\dot{b}_\phi + \omega_R^2 b_\phi = \omega_R^2 b_Z C \sin(\omega_D t)$$

the cross phase between a latitudinally-separated station pairs [Waters et al. 1994]

$$\tan(\Delta\phi) = \frac{-2\gamma\omega_D(\omega_P^2 - \omega_E^2)}{(\omega_P^2 - \omega_D^2)(\omega_E^2 - \omega_D^2) + 4\gamma^2\omega_D^2}$$

 γ : damping coefficient ω_P : resonant frequency at the poleward station ω_E : resonant frequency at the equatorward station ω_D : frequency of the driving wave

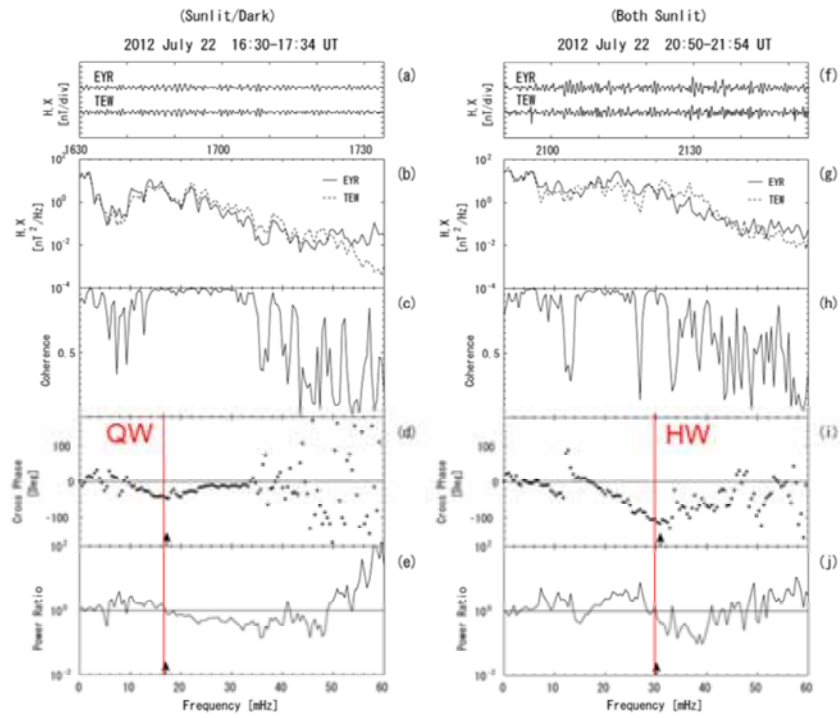


Table 2. Resonance properties of the events

Code	Midpoint L Value	Date	Time UT	Resonant Frequency fR, mHz	Phase Peak $\Delta\phi$, deg	Gain of Amplitude G	Resonance Width ϵ , RE	Damping Ratio γ/ω	Resonance Q $\omega/2\gamma$
MDM-EYR	2.62	22 Jul 2012	17:02	14.2 $\pm$ 0.3	46	1.45	0.30	0.25	2.0
			21:22	21.0 $\pm$ 0.6	72	2.12	0.15	0.33	1.5
		20 Jul 2013	17:12	15.2 $\pm$ 0.5	51	1.19	0.31	0.29	1.7
			20:32	25.4 $\pm$ 0.1	74	1.37	0.19	0.07	7.6
		05 Jul 2012	17:12	15.8 $\pm$ 2.0	30	1.16	0.54	-	-
			20:32	25.0 $\pm$ 0.3	88	2.81	0.10	-	-
		08 Jul 2012	16:32	14.2 $\pm$ 1.0	56	1.28	0.27	-	-
			21:32	18.6 $\pm$ 0.2	113	1.82	0.09	-	-
EYR-TEW	2.33	22 Jul 2012	17:02	16.9 $\pm$ 0.5	46	1.23	0.31	0.18	2.7
			21:22	30.4 $\pm$ 0.3	116	1.59	0.08	0.09	5.4
		20 Jul 2013	17:12	19.0 $\pm$ 0.1	34	1.55	0.43	0.33	1.5
			20:32	27.8 $\pm$ 0.1	77	1.24	0.17	0.05	9.7

まとめ

- ✓ very-low FLR frequencies

$$f_{QW} = \frac{1}{1.3 - 1.8} f_{HW}$$

- ✓ wide resonance width

$$\epsilon_{QW} \sim 2\epsilon_{HW}$$

- ✓ high damping

$$\frac{\gamma}{\omega} = 0.2 - 0.3$$

- ✓ mode transition (from QW to HW)
began when the terminator line
passed over the stations and ended
when $\Sigma_{P, SUN} / \Sigma_{P, DARK}$ fell to ~ 5 .

QWの発生条件をプラズマポーズの位置・形状がコントロールしている？

1. HW mode runs

Σ_p and Σ_H for the both hemisphere ~ 5 S

✓ HW mode resonance detected

2. QW mode runs

Σ_p and Σ_H for the sunlit hemisphere ~ 5 S

Σ_p and Σ_H for the dark hemisphere ~ 0.2 S

✓ No QW mode resonance detected

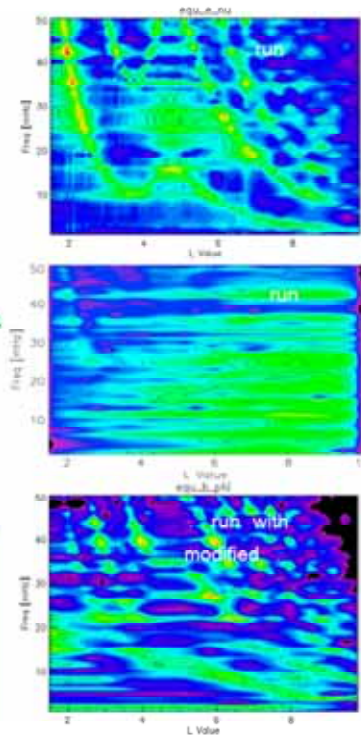
✓ highly damped QW resonance structure was masked by cavity mode energy

3. QW mode runs with modified V_A

to reduce the effectiveness of plasmasphere cavity resonances

✓ QW mode resonance detected

QW は、Cavity resonanceが
比較的弱い時の
プラズマ圏内部だけに存在する？



まとめとQW研究の今後の目標

- NZ地磁気観測網を整備し、QWの詳細観測を行った結果、
 1. 低い磁力線共鳴周波数
 2. 広い共鳴幅
 3. 高い減衰率 が確認できた。

これにより、QWの存在が強く示された

- 今後の発展
 1. Cavity resonanceの影響について
 - ✓ QWIはプラズマ圏の内側に局在するか?
 - ✓ プラズマポーズ形状と発生頻度が関連するか?
 2. 放射線帯粒子加速への寄与について
 - ✓ 磁気圏内でのQWの探査(難航中)

MDM, TEW データ取得状況 2015年10月現在

MDM	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2011			40%	100%	100%	50%	0%	84%	100%	100%	100%	100%
2012	100%	100%	94%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2013	100%	100%	100%	100%	100%	92%	80%	100%	84%	83%	91%	100%
2014	100%	100%	100%	22%	0%	7%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2015	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	33%		

データ取得率 89%

TEW	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2011												
2012				93%	100%	10%	74%	77%	100%	92%	5%	48%
2013	85%	100%	100%	100%	0%	2%	100%	100%	100%	0%	100%	100%
2014	100%	89%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	29%	0%	0%	0%
2015	0%	0%	82%	100%	74%	0%	0%	0%	0%	0%		

データ取得率 59%

SPEDASで1分値を公開。1秒値は現在のところリクエスト制。
ご興味をお持ちの方は、尾花 (obana@osakac.ac.jp) までご連絡ください。

Welcome !!

謝辞

- 本研究はJSPS科研費 24740333、名古屋大学太陽地球環境研究所「地上ネットワーク観測大型共同研究」、大阪電気通信大学「スタートアップ研究費」の助成を受けて行われました。
- この研究プロジェクトは下記の方々・組織のご協力に支えられています。
 - Prof. Craig J. Rodger (Univ. of Otago, New Zealand)
 - Mr. Peter Jaquiere (New Zealand)
 - Fr. Stanley Nield (New Zealand)
 - Dunedin Astronomical Society (New Zealand)
 - A. Prof. Satoko Saita (National Institute of Technology, Kitakyushu College)
 - A. Prof. Yoshihiro Kakinami (National Institute of Technology, Tomakomai College)
 - Dr. Mariko teramoto (JAXA/ISAS)
 - Mr. Yasuo Kato (ISEE, Nagoya University)

この場を借りて御礼申し上げます。