

有明海の長期的な環境変化に伴う貧酸素水塊の 発生状況に関する数値実験

Sensitivity Analysis for Dominant Factors of Hypoxia caused by Long Term Environmental Changes in Ariake Sea

永尾謙太郎¹・竹内一浩²・畑 恭子³・堀家健司⁴・木村奈保子⁵

Kentaro NAGAO, Kazuhiro TAKEUCHI, Kyoko HATA, Kenji HORIYA and Naoko KIMURA

Sensitivity analysis for dominant factors of hypoxia was conducted using Benthic-Pelagic coupling model in Ariake Sea. It became clear that (1) Natural variation of tidal amplitude in open sea affects more than geographical features modification for the change of tidal current since 1977 (set as the case for analysis) in inner area. (2) Oxygen consumption changes influenced from the change in the amount of primary production which unavailable benthic activities. In addition, these analyses those made clear that the primary production variation depends on bivalve amounts and intensity of tidal current except river discharge change and meteorological variation from consideration. It was shown again that recovery of tidal current and benthic activity is important problem for reducing hypoxia.

1. はじめに

有明海は地形改変や二枚貝類の激減など、とりまく環境が大きく変化した内湾のひとつであるが、近年、貧酸素水塊の発生が拡大・長期化していることが懸念されている(例えば、速水, 2007)。既往の研究により、貧酸素水塊の発生は小潮期に顕著であり(中山ら, 2003)、その形成には底泥による酸素消費のみならず、水中に含まれる有機懸濁物質による酸素消費の寄与が極めて大きいこと(徳永ら, 2005)や、貧酸素水塊と密接に関連している密度成層に影響を与える因子には(1)出水型と(2)沖合域からの低水温・高塩分水塊の貫入型があり、ほとんどの貧酸素化が継続的な出水にともなって生じていること(速水, 2007)など、貧酸素水塊の発生メカニズムが明らかとなりつつある。

筆者らはこのような貧酸素水塊の発生メカニズムに関する知見を踏まえ、有明海の貧酸素水塊の挙動を再現するツールとして、浮遊系-底生系結合生態系モデルを開発している(永尾・竹内, 2010)。数値モデルは、貧酸素水塊の発生などの現象に対して物理・化学・生物過程の寄与を定量化できるという長所を持ち、環境の変化に対する水質・底質の応答性や生態系機能等の評価に用いられる。一方で、有明海での貧酸素水塊の発生が拡大・長期化している要因に関しては、このような視点で検討された例は少ない。本研究では有明海をとりまく長期的

な環境変化と貧酸素水塊の発生との関係性について、上記モデルを用いた数値実験により考察を行った。

2. 検討手法

(1) 浮遊系-底生系結合生態系モデルの特徴・実績

数値実験には永尾・竹内(2010)が開発した浮遊系-底生系結合生態系モデルを用いた。この数値モデルは、鉛直一般座標系を導入しており、有明海の特徴である大きな潮汐変動と干出・冠水を繰り返す広大な干潟を鉛直方向に十分な解像度を保ったまま表現可能な流動サブモデル、懸濁物の挙動ならびに低次栄養段階を表現する浮遊生態系のサブモデル群、さらには底質環境と底生生物による水質・底質の変化を表現する底生生態系のサブモデル群を相互に結合したものである。このモデルの特徴は潮位・気象条件・淡水流量等の現実的な境界条件を設定した2000年~2006年の長期積分期間において、観測値と計算値の比較・検証がなされており、流動場や水質項目に加え、有明海の貧酸素化を精度良く再現できることである。計算結果の一部として、貧酸素水塊の発生が顕著な有明海北西部における溶存酸素濃度の観測値(浅海定線調査・佐賀県(図-2)に調査地点を示す))と計算値の比較を図-1に示す。

(2) 境界条件の設定

数値実験は、現況とする2001年の再現計算を基本として、境界条件の一部を過去の有明海を想定した条件へと変更し、現況との境界条件の違いによる計算結果の差異を考察するという手順にて実施した。

想定する過去の有明海としては、流入負荷量の変化、地形改変、二枚貝類の漁獲量の変化など、有明海での過去からの環境変化の変遷を考慮して、1930年代・1977

1	正会員	工修	いであ(株)	国土環境研究所
2		理修	同上	
3		博(工)	同上	
4		水学	いであ(株)	大阪支社
5		農修	同上	

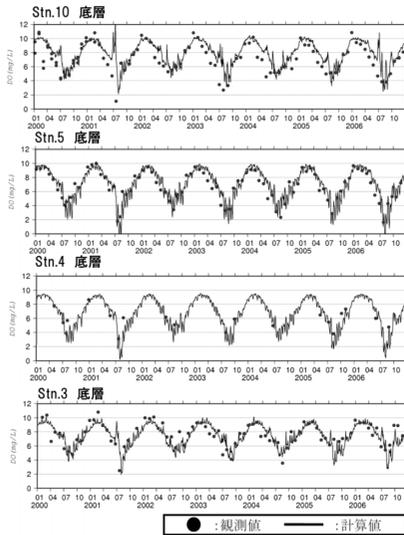


図-1 浅海定線調査（佐賀県：図-2に示す地点）における底上1.0mでの溶存酸素濃度の観測値と計算値の比較

年・1983年・1990年の4ケースとした。なお、2001年（現況）を基準として、各年代の境界条件として変更したものは、a) 地形、b) 外海潮位振幅、c) 平均水位、d) 流入負荷量、e) 二枚貝類の生息量、f) ノリ養殖量および施肥・酸処理材の使用量、g) 水質・底質初期値であり、淡水流量と気象条件は各年代とも2001年（現況）と同値を設定した。

a) 地形

各年代で想定した地形を図-2に示す。1930年代は図中の黒色・灰色の格子が、1977年・1983年・1990年の3ケースは黒色の格子がそれぞれ海域であったと仮定した。なお、水平方向の計算格子長は南北方向ともに900mである。

b) 外海潮位振幅

月の昇交点の変動に伴う周期変動（周期：18.6年）により外海の潮位振幅は変動している。この潮位振幅の変化を表現するため、各年代における振幅の2001年（現況）比として、表-1に示す値を設定した。位相は2001年（現況）と同じとした。なお1930年代は特定の年次を対象とせず、1930年代全般を想定した計算を実施する目的により、2001年（現況）と同一条件とした。

c) 平均水位

各年代の平均水位は観測値を参考に、2001年（現況）に対する差として表-2に示す値を設定した。

d) 流入負荷量

2001年（現況）の流入負荷量は、農林水産省ら（2003）により整理されているL-Q式および原単位法（フレーム×原単位×流達率）により算定した。各年代における各河川からの流入負荷量の算定にあたっては、この2001年（現況）の流入負荷量に各年代のフレーム比率（河川

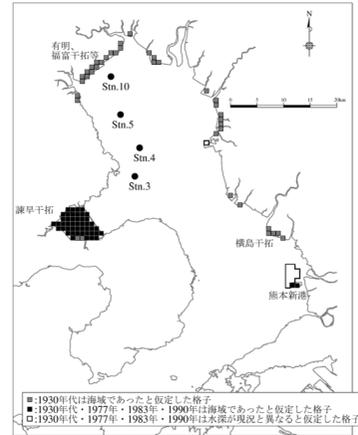


図-2 各年代の地形条件の設定方法

表-1 外海潮位振幅の2001年（現況）に対する比率

分潮	1930年代	1977年	1983年	1990年
M2分潮	1.000	1.030	0.992	0.972
K1分潮	1.000	0.892	1.023	1.079
O1分潮	1.000	0.823	1.038	1.128

表-2 平均水位の2001年（現況）に対する差

分潮	1930年代	1977年	1983年	1990年
平均水位	0.0	-8.2cm	-8.9cm	-5.9cm

表-3 筑後川順流域の流入負荷量の2001年（現況）に対する比率

	1930年代	1977年	1983年	1990年
COD	0.63	1.30	1.30	1.35
T-N	0.46	1.53	1.65	1.66
T-P	0.49	1.30	1.54	1.52

表-5 二枚貝類の生息量の2001年（現況）に対する比率

	1930年代	1977年	1983年	1990年
アサリ+タイラギ	8.9*	14.8	15.7	1.5
サルボウ+アゲマキ	2.5	0.7	0.7	2.5
カキ	8.3	8.3	4.1	1.5

*1930年代はアサリ+タイラギのみ1950年代の漁獲量×漁獲率10倍で推定した値を設定

毎) を乗じて算出した。例として、表-3には筑後川順流域での流入負荷量の2001年（現況）に対する比率を示す。ここで、1930年代の流入負荷量は算定する情報が乏しいため、中西（1993）により整理されている大阪湾での流入負荷量の推移を参考に、2001年に対する比率を設定し、全河川においてこの比率を2001年（現況）の流入負荷量に乗じて算定した（表-3）。なお懸濁態/溶存態比など各態への分画比率は各年代で変化させていない。

e) 二枚貝類の生息量

数値実験にあたって考慮する二枚貝類は、アサリ、サ

ルボウ, カキ, その他の二枚貝類 (水産有用種を除く種) とした。ここで, アサリは砂地盤に生息する二枚貝類の代表種, サルボウは泥地盤に生息する二枚貝類の代表種として扱った。各年代の二枚貝類の生息量は, 下式により推定した。表-5に各年代の生息量の2001年 (現況) 比を示す。その他の二枚貝類 (水産有用種を除く種) の生息量は, 各年代で変化しないものと仮定した。

$$\begin{aligned} \text{各年代のアサリ生息量}\{\text{砂地盤の代表種}\} = & \\ & \frac{[2001年(現況)の生息量] \times [各年代のアサリとタイラギの漁獲量]}{[2000\sim 2006年のアサリとタイラギの漁獲量]} \dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{各年代のサルボウ生息量}\{\text{泥地盤の代表種}\} = & \\ & \frac{[2001年(現況)の生息量] \times [各年代のサルボウとアゲマキ漁獲量]}{[2000\sim 2006年のサルボウとアゲマキの漁獲量]} \dots\dots (2) \end{aligned}$$

式 (1) (2) 中のアサリとサルボウの生息量は森 (2010) の調査結果を基に設定した。またカキの生息量は漁獲量に漁獲率を乗じて算定した。1930年代の漁獲量は関連する情報が乏しいため, アサリのみ1950年代の漁獲量 (漁獲量に漁獲率として5倍を乗じた) から推定した値を用い, アサリを除く二枚貝類の生息量は1977年・1983年・1990年の3ケース内の最大値を設定した。これらの二枚貝類の生息場所は, 2001年 (現況) と変化しないものと仮定した。また生息場所での生息密度の偏りは考慮せず, 算出した有明海での全生息量を生息場所の面積で除した平均生息密度を一様に設定した。また二枚貝類の生息量は境界値として扱い, 二枚貝類が水質・底質へ与える物質フラックスを境界値として計算に入力した。このとき, 漁獲や鳥類への捕食, 高次生物への循環等により, すべての二枚貝類のバイオマスは利用されるものと仮定し, 二枚貝類の死亡による有機物の負荷は無いものと仮定した。

f) ノリ養殖量および施肥・酸処理材の使用量

佐賀県・福岡県・長崎県・熊本県から提供を受けた共販枚数と酸処理剤・施肥の使用実績を参考に, ノリの養殖量および施肥・酸処理剤量を設定した。またノリ網による流れの抵抗は2001年 (現況) と同様と仮定した。施肥・酸処理剤はノリ養殖場へのアンモニア態窒素, 溶存態有機物の負荷量として扱った。

g) 水質・底質の初期値の設定

各ケースにおいて, 2001年 (現況) で用いた水質・底質の初期値を設定した上で, 年代別の1年間の非正常な境界条件の基で, 4年間の繰り返し計算を実施した。この際, 計算開始から3年間は助走計算と位置づけ (初期値の設定期間), 4年目の計算結果を解析対象とした。

3. 計算結果 (貧酸素水塊の発生規模)

図-3に示す湾奥西部エリアと諫早湾エリアにおいて,

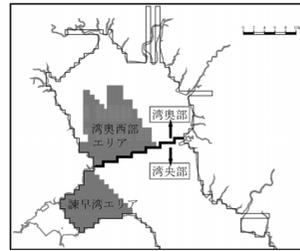
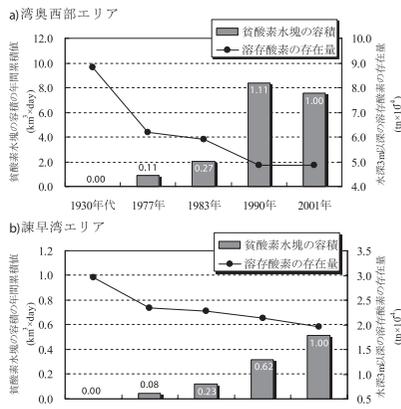


図-3 計算結果の整理場所



図内の数値は, 各年代の貧酸素水塊容積の計算結果の2001年比である。

図-4 貧酸素水塊の容積の年間累積値と溶存酸素の存在量 (8月平均値) の変化

貧酸素水塊の容積を日別値として整理し, この日別値を1年間で累積した値および水深3m以深の溶存酸素の存在量 (8月平均値) の変化を図-4に示す。ここで, 貧酸素水塊は溶存酸素濃度が2.0mg・l⁻¹以下の水塊と定義した。計算結果として, 両エリアにおいて1930年代のケースで貧酸素水塊が存在しない結果となっていたが, 1977年以降は発生規模の大小はあるものの貧酸素水塊の発生がみられる結果であった。湾奥西部エリアに着目すると, その発生規模は現況より1977年で89%減, 1983年で73%減, 1990年で11%増であり, 各年代で発生規模が異なっていた。さらに諫早湾エリアでは, 現況より1977年で92%減, 1983年で77%減, 1990年で38%減と, 全年代で2001年 (現況) よりも発生規模が小さく, 湾奥西部エリアとその変化傾向が異なっていた。

4. 考察 (計算結果に基づく)

溶存酸素の変動要因として, 酸素供給量を支配する鉛直拡散係数と断面通過流量, および酸素消費量を支配する生化学的な消費の3つの指標の変化に着目し, 図-4に示した貧酸素水塊の規模の変化に対して考察を行った。

(1) 流動場の変化要因

溶存酸素の供給量を支配する直接的な物理指標である鉛直拡散係数とエリアごとの水平方向の流入出流量 (エ

リアに流入する流量と流出する流量の合計値)を各年代において比較し、図-5および図-6に示す。なお鉛直拡散係数はMellor and Yamada (1982)による2方程式乱流クロージャーモデルにより算定しており、図示した値は水柱での平均値である。湾奥西部エリアでは、1977年以降、両指標ともに数%の変化がみられる。一方で、諫早湾エリアでの2001年(現況)は、その他のケースと比較し、8月平均値として鉛直拡散係数で約50%、流入流出量として約20%、それぞれ低下している。

湾奥西部エリアを対象に、両指標の2001年対比と外海潮位振幅の自然変動を表す指標として有明海でもっとも増幅率の大きいM2分潮のF値の関係を図-7に示す。また図中には2001年(現況)の計算ケースから、外海潮位振幅の境界条件のみを自然変動での最大時と最小時(M2分潮の最大・最小時における各分潮のF値を採用)に変更したケースの結果も併記している(図中のF値最大・F値最小に相当)。2001年の地形条件でのM2分潮のF値の変化に対応する両指標の変化幅が、同一のF値を想定した場合における1977~1990年の地形条件と2001年での地形条件の違いによる両指標の変化幅よりも大きいことがわかる。つまり湾奥西部エリアでの1977年以降の両指標の変化は、地形変更等の影響よりも外海潮位振幅の自然変動の影響を強く受けていると推測された。

(2) 生化学的な酸素消費量の変化要因

モデルで考慮した生化学的な要因による水中溶存酸素の消費要因は、①動・植プランクトンの呼吸、②懸濁態および③溶存態有機物の酸化分解、④硝化、⑤底泥による直接的な消費、⑥底生物の呼吸、⑦還元物質の酸化である。これらを各年代において水柱で合計し、夏季(8月)平均値として整理したものを図-8に示す。湾奥西部エリアでの消費量は、1990年がもっとも高く、つぎに2001年、1983年、1977年、1930年代の順であった。さらに2001年(現況)夏季(8月)における全消費量に占める上記各消費要因の割合は、①26.2%、②47.8%、③16.7%、④0.9%、⑤4.8%、⑥0.4%、⑦3.2%であり、②懸濁態有機物の酸化分解に伴う消費の寄与が最も大きいことがわかる。また各年代でのこれら要因の2001年(現況)からの変化量を図-9に示すが、2001年(現況)から消費量の変化が大きいものも②懸濁態有機物の酸化分解に伴う消費であることがわかる。紙面上示していないが、2001年(現況)8月平均値として、有明海湾奥部(図-3に示す定義)に発生する懸濁態有機炭素の約95%が一次生産起源(動・植物プランクトン起源のデトリタス量)、残りの約5%が流入河川からの流入起源であった。すなわち、一次生産起源の有機物量の変化が各年代の酸素消費量の変化に大きな影響を及ぼしていることが推測される。つぎに各年代における一次生産量の変化を図-10に

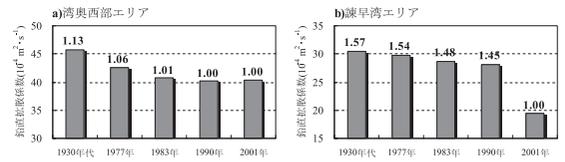


図-5 水柱で平均した鉛直拡散係数の変化(8月平均)

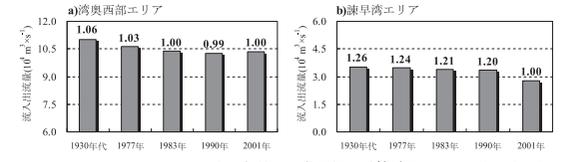


図-6 水柱での流入流出量の変化(8月平均)

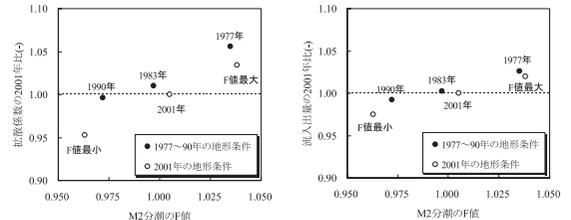


図-7 湾奥西部エリアにおけるM2分潮のF値の変化と水柱での鉛直拡散係数および流入流出量の関係

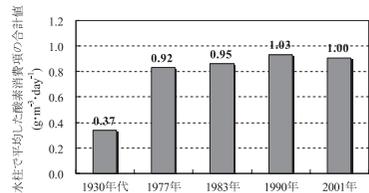
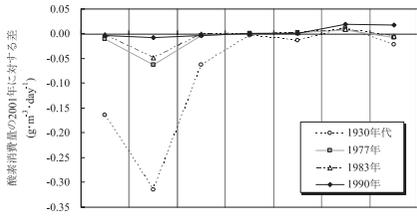


図-8 湾奥西部エリアにおける水柱での全酸素消費量の比較(8月平均値)

示す。ここでは、一次生産量を二枚貝類に利用されない量(定義:[一次生産量]-[二枚貝類による摂食量]、なお一次生産量は植物プランクトンの生産量から呼吸・細胞外分泌による減耗量を差し引いたものとした)と、二枚貝類による摂食量に区分して整理した。図に示すように、二枚貝類の生息量に依存して、摂食されずに酸化分解へと移行する有機物量が年代ごとに大きく変化していることがわかる。

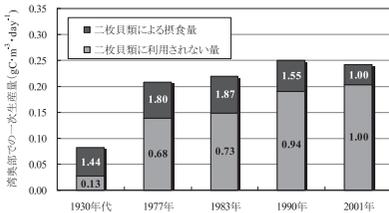
(3) 湾奥部の一次生産量の変動要因に関する一考察

様々な要因により変化する一次生産量に対して、本研究では、地形の変更や外海潮位振幅の変化など直接的には流動場の変化に起因する要因との関係性に着目した考察を行った。2001年(現況)を基本として、境界条件として地形のみ変更、さらに外海潮位振幅のみ変更した数値実験(二枚貝類の生息量・流入負荷量等は同一)を実施した。結果として、図-11は湾奥部での前述の定義に



※横軸の数値は、本文中に記した酸素消費の要因に対応する。

図-9 湾奥西部エリアでの酸素消費に寄与する各要因の2001年(現況)に対する差値(8月平均値)



※図内の数値は、各年代の計算結果の2001年比である。

図-10 湾奥部全域での一次生産量の変化(8月平均)

基づく、二枚貝類に利用されない一次生産量の2001年(現況)からの変化率を示している。境界条件の変化により、湾奥部の一次生産量が大きく変化しており、自然変動である外海潮位振幅の変化によっても、一次生産量は5%程度の変動があることがわかる。これは湾奥部での滞留時間の変化が、植物プランクトンの成長に影響する要因(光要因、栄養塩要因、自身バイオマスの集積量等)に影響を及ぼした結果と考えられる。

5. おわりに

有明海で発生する貧酸素水塊に対して、数値実験を行い、以下の現象の定量化を行った。

- (1) 湾奥西部エリアでの鉛直拡散係数と流入出流量は、1970年代以降、地形の改変等の影響よりも外海潮位振幅の自然変動の影響を強く受けている。
- (2) 溶存酸素の消費は一次生産量と強く関係しているが、近年は二枚貝類の減少により、一次生産起源の有機物が利用されず酸化分解へ移行する割合が増加した結果、酸素消費量が增大している。
- (3) 一次生産量は流動場の変化によっても変動し、自然変動である外海潮位振幅の変動を通じた流動場の変化が及ぼす一次生産量の変化も無視できない。

本研究より、有明海の貧酸素水塊の軽減には、流動場の回復と二枚貝類等の底生生物生息量の回復が重要な課題であることが改めて示された。一方で、図-12に4章に示した数値実験でのM2分潮のF値と貧酸素水塊の容積との関係を示すが、周期的(周期18.6年)な外海潮位振幅の自然変動により、有明海の貧酸素水塊は±10%程度の変動幅を有していると推測される。このM2振幅のF値は

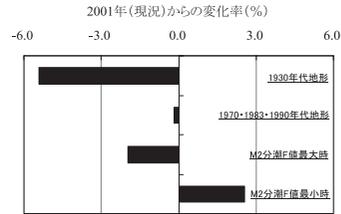


図-11 二枚貝類に利用されない一次生産量の変化(8月平均値)

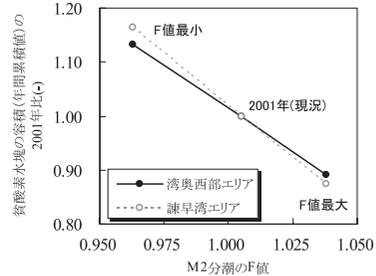


図-12 外海潮位振幅の自然変動と貧酸素水塊の容積の関係

2006年に最低値を取り、その後10年間は上昇するフェーズにある。施策の実施やモニタリング・評価にあたっては、この影響を認識した上で検討を行う必要がある。

謝辞：本研究は平成21年文部科学省重要課題解決型研究「有明海生物生息環境の俯瞰の再生と実証試験」の成果の一部である。本研究の実施にあたり、九州大学大学院工学研究科 楠田哲也特任教授、佐賀大学 低平地研究センター 林重徳教授、熊本大学 沿岸域環境科学教育研究センター 滝川清教授より貴重なご助言を頂いた。

参考文献

徳永貴久・松永信博・阿部 淳・児玉真史・安田秀一 (2005):有明海西部海域における高濃度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験, 土木学会論文集, 782/II-2, pp.117-130.

永尾謙太郎・竹内一浩 (2010):浮遊系-底生系結合生態系モデルを用いた有明海での貧酸素水塊形成機構の支配要因の解析, 海洋理工学会誌, 投稿中

中西 弘 (1993):東京湾 - 100年の環境変遷 -, 小倉紀雄編, 恒星社厚生閣, pp.158

中山哲巖・佐伯信哉・時吉 学・木元克則(2003):有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.976-980.

農林水産省・水産庁・農林水産省 農村振興局・経済産業省 資源エネルギー庁・国土交通省 河川局・国土交通省 港湾局・環境省 環境管理局 (2003):平成14年度国土総合開発事業調整費有明海海域環境調査報告書

速水祐一 (2007):有明海奥部の貧酸素水塊 - 形成機構と長期変動 -, 月刊 海洋, Vol.39, No.1, pp.22-28.

森 敬介 (2010):有明海における底生生物の分布状況, 有明海生物生息環境の俯瞰的作成と実証試験成果報告会講演要旨集, pp.19-22.

Mellor, G.L., and T.yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, pp.851-875