

地球温暖化による健康影響の見通しについて

An Assessment of Health Impact by Climatic Change

松岡 譲[†]・益田 信一[‡]・甲斐啓子[¶]

Yuzuru MATSUOKA[†], Shinichi MASUDA[‡] and Keiko KAI[¶]

Abstract – Global warming affects human morbidity, mortality and health. We describe shortly the effects on human health, and focus in malaria as one of the important diseases affected by climatic change. Models on vectors of malaria, i.e. *Anopheles*, and temperature dependency of sporogonic development of parasites in the mosquito were coupled in order to estimate the eco-climate sensitivity of malaria epidemicity. Combined the models with estimated global climate change pattern of general circulation models, an impact on global human health under intensified malaria risk was assessed and its implication was discussed.

Keywords: Global Environment, Climate Change, Health Impact, Malaria

1. 論文のあらまし

この論文では地球温暖化による社会・経済影響のうち健康分野、特にマラリア感染のリスク増加についての定量的予測を行っている。来世紀に予測されている気候変動は、地表付近の気温上昇と降水量増大をもたらす。それによるマラリアの媒介動物であるハマダラカの繁殖と原虫の胞子形成期間の短縮効果は、世界のマラリア疾病負担を増加させると想像されている。しかし、定量的評価は行われていない。本論文は、著者らが行っている温暖化対策・影響評価作業の一端として、マラリアによる健康リスク増加の見積もりを以下のステップに従って積み上げたものである。まず、ハマダラカの生態気候適応度を気温の年々及び日変化、土壌水分量などを基礎パラメーターとして算出し、地表面付近水収支モデル及び大循環モデル計算結果とカップリングさせることにより、現状及び温暖化後のハマダラカ生息域の分布を推定した。これに、ハマダラカ体内におけるマラリア原虫の胞子形成期間の温度依存性を考慮して、マラリア流行・浸淫能の変化を定量化した。さらに、これらを国毎に積分したり、大循環モデルを換えた場合の積算を行っている。

以上の検討より、二酸化炭素濃度倍増に起因する

気候変動は、マラリア感染地域を6～20%（地域内人口比）増加させることが結論された。

2. 地球温暖化による健康影響では何が問題か。

温暖化による健康影響については、これまで多くの報告がなされてきた（WHO,1990 など）。これらによれば、問題となる点は大略して以下ようになる。すなわち、熱ストレスの増加、食糧供給の変化による栄養障害、感染症の伝搬メカニズムの変化といった比較的直接的な効果をもたらすものと、大気汚染・水質汚濁の増加あるいは海面上昇・洪水増加などが原因となる災害あるいは精神的ストレスといった比較的間接的な影響である。熱ストレスがもたらす死亡率増加について、Kalkstein(1989)は米国15都市の死亡統計の解析から、GISSの大気大循環モデル計算結果で示される気候変動によって、順応があったとしても年間7000人程度（米国都市域のみ）の死亡増加をもたらすと推定する。Frankhauser(1993)は、この結果である10万人あたり4.5人の死亡率を全世界に外挿し、その経済的損失は地球温暖化影響全体の31%にもなると算定した。また、飢餓への影響について、Rosenzweigら(1994)は18ヶ国の研究機関を動員した大規模かつ組織的な計算を

表-1 温暖化による影響が大きい感染症

疾病	流行地域人口	感染者数	現在の分布	気候変動の影響
マラリア	2530	270	熱帯／亜熱帯	+++
デング熱	NA	NA	熱帯／亜熱帯	++
住血吸虫症	600	200	熱帯／亜熱帯	++
リンパ性フィラリア症	900	90	熱帯／亜熱帯	+
オンコセルカ症	90	18	アフリカ／中南米	+
アフリカトリパノソーマ症	50	0.025 new case/y	熱帯アフリカ	+
黄熱病	NA	NA	アフリカ／中南米	+
日本脳炎	NA	NA	東・東南アジア	+
リーシマニア症	350	12	アジア／南欧	?

人口、感染者数は100万人単位

[†] 京都大学工学部衛生工学教室、[‡] 京都大学大学院（現在国際協力事業団）[¶] 国立環境研究所地球環境研究グループ

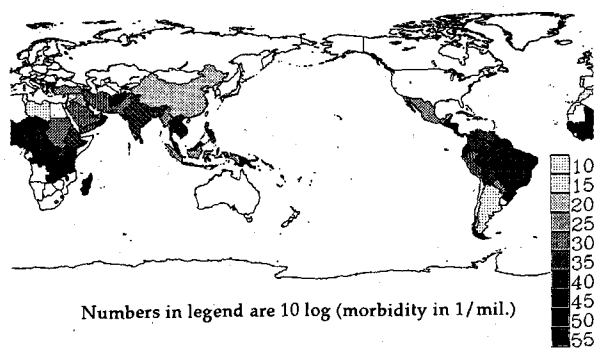


図-1 最近のマラリア発生状況、サブサハラ地域は1980年代前半、
 その他は1990年、World Malaria Situation in 1990(1992)

行い、2060年の無温暖化時の飢餓人口である6億4000万人は、温暖化により10～60%増加するとの結果を得ている。感染メカニズムの変化にかんしては、媒介動物生態の変化とか、水文変化などによる飲料水質の悪化など様々な変化要因が挙げられている(WHO,1990)。中でも、表-1に示すマラリア、住血吸虫症、デング熱などは、現状での疾病負担が大きく気候に対する感度も高いため、気候変動によって大きな社会影響をもたらすと予想されている。

マラリアは、現在での感染地域人口が20億人以上、罹患者数2.7億人/年、年間死亡人数は100万人以上(WHO,1992)と推定されている。人類の健康にとって、依然として高負担の疾病である。サブサハラ地域の疾病率は大変高いと推定されているが信頼性が悪くその動向に不明な点が多い。その他の地域では、アフガニスタン、ブラジル、中国、インド、メキシコ、フィリピン、スリランカ、タイ及びベトナムで83%を占めるが、難民・治安不安定性あるいは薬剤耐性株の出現などによって、罹患数の上昇傾向を示す国・地域もあり、気候変動がこれに拍車をかける恐れがあると考えられている。図-1に最近のマラリア発生状況を示す。

3. 気候要素はマラリア流行能とどのように結びつくか。

マラリアは、マラリア原虫がハマダラカの刺咬によってスポロゾイトの形でヒトの体内に進入することで引き起こされる。マラリア原虫はプラスモジウム属(*Plasmodium*)に属す原生動物であり、熱帯熱、三日熱、四日熱、卵形などの種類があるが、感染により死亡する危険性が高いものは熱帯熱マラリア原虫である。マラリア原虫の生活環は、ヒトの肝細胞及び赤血球内で起こる単純多数分裂とそれらの結果、人体内に形成された雌・雄性生殖母体が、蚊の吸血により蚊の胃内に移行し、そこで成熟して生殖体となり雌雄合体する生殖体・スポロゾイト形成過程からなる。合体によって形成された融合体は、運動性で蚊の胃壁細胞間隙を通り抜け胃壁外膜に胞嚢体を作る。この中で孢子形成

が行われ多数のスポロゾイトが形成され、ついには胞嚢体を破り唾液腺に侵入し、蚊の刺咬とともに再び人体に注入される。このように、マラリア原虫の繁殖と伝搬には、ヒトとハマダラカの体内で生活する二段階が必要である。このうち、ヒトの体内に存在している間には、気候環境に直接さらされることはなく、その影響を受けることはない。しかし、ハマダラカの体内では外気温がスポロゾイト形成に大きな影響を与える。16℃程度以下では形成は不可能となり、32℃以上でも阻害される。スポロゾイト形成に要する日数は、原虫の種類と温度によって異なり、Macdonald(1957)によれば、次式で表現できる。

$$n = \frac{M}{T - T_0}, \quad T \geq T_0$$

ここに、 n はスポロゾイト形成に要する日数、 T は気温であり、 M 及び T_0 は原虫によって定められる定数で、熱帯熱原虫のとき111℃・日、16.0℃程度である。

媒介動物であるハマダラカの生態は、気候に大きく依存する。ハマダラカ(*Anopheles*)には、400程度の種が確認されており、そのうち1/10程度がマラリア媒介にとって重要である。完全変態性であり、卵、幼虫、さなぎ、成虫の4態を持つ。産卵場所は、種によって様々であり、静水を好むものもあれば、流水を好むものもある。行動範囲はその繁殖地から数キロ飛ぶ例もあるが、水分の入手性は繁殖にとって重要な因子である。また、成虫として乾期を越すことはできないと考えられている。気温によって生態は大きく変化する。大気が飽和していれば12.7℃程度の気温でも生存できるが、相対湿度60%、22～30℃程度が至適環境とされている。この温度域にて気温上昇とともに成長率は上昇する。しかしながら、過度な気温上昇は寿命を減じ、その結果個体群数、密度は減少する(Duttaら,1978)。

このようなマラリア原虫及びハマダラカの生活史における気候因子の係わりは、総体としてマラリアの流行性あるいは浸淫性にどのように結びつくか。検討にあたり、次のように記号を定義しておこう。すなわち、 m : ヒトに対する媒介蚊の密度、 a : 1日あたり1匹の媒介蚊がヒトを刺咬する頻度、 p : 蚊の日生残率、 r : マラリア患者の回復あるいは死亡速度とする。媒介蚊の平均寿命 e と p の間には、

$$e = \int_0^{\infty} p^t dt = \frac{1}{-\log_e p}$$

の関係がある。このように準備をしておくと、マラリア感染に関する以下のような考察を進めることができる。感染者は、1日あたり $m \cdot a$ 匹の蚊に咬まれる。刺咬によってマラリア原虫生殖母体を接種された蚊が、マラリア感染能を持つには、スポロゾイト形成期間で

ある n 日以上生存しなければならない。従って、1 感染者から一日あたり $ma \cdot p^n$ 匹の蚊が感染能を有するようになる。彼らの平均寿命は、 $\frac{1}{-\log_e p}$ であり、その間に 1 日あたり a 人のヒトを感染させる。したがって、1 感染者から、1 日あたり $C = \frac{ma^2 p^n}{-\log_e p}$ の感染者が生産される。この生産と回復あるいは死亡による減少を考慮し、感染者数 P の収支式を書いてみると次のようになる。

$$\frac{dP}{dt} = (C - r) \cdot P$$

C は、Garrett-Jones ら (1969) が vectorial capacity と称した指数である。本式の導出にあたっては、感染率が小さく二回目の刺咬は非感染者に行われること、重感染の影響を無視していること、刺咬による原虫の伝搬とその生育は効果よく行われること、媒介蚊の死亡率はその年齢に独立で一定であること、蚊の寿命は感染によって変化しないことなど、多くの仮定がなされている。しかし、マラリアの流行あるいは浸淫可能性を表すパラメーターとして、 C あるいは $\frac{C}{r}$ ($= R_0$ Macdonald の基本再生産率) を考えることは、それほど大きな誤りではなからう。すなわち、気候の影響は、 C あるいは R_0 に含まれるパラメーターを経由してマラリア流行能を左右すると仮定する。

上にも述べたように、 m 、 n は気温に大きく左右され、 m は水分量にも左右される。 a 及び p も気温、湿度などに左右されるとの報告はあるが、その定量的評価はない。これらのことから、本論文では、気候変動は m 及び n の変化を通じてマラリア流行能に影響を及ぼすと仮定した。

4. ハマダラカの気候適合性について

前節にて、パラメーター m で表わされるハマダラカ個体群の相対密度は、気温、水分量などに大きく左右されることを述べた。その程度を忠実に記述しようとするならば、生活史に関わる様々なパラメーターを推定し、それに基づいた個体群動力学モデルを構築しなければならない。しかし、40 以上も存在する媒介蚊各種について、現在までの知見から構築作業を行うことはほぼ不可能であり、また当分の間その状況は同じであろう。そこで、本論文では、ハマダラカの気候適合性を測るより簡便な方法として、Sutherst ら (1985) が提案した生態気候インデックス (EI , ecoclimatic index) により、気候変動が m に及ぼす影響を算定することとした。 EI では、個体群密度に影響を及ぼす気候要因を成長に関わるものとストレスとに分類し、それらの積によって気候環境の適合性を記述する。

$$EI = GI \cdot \max(1 - CS, 0) \cdot \max(1 - DS, 0) \cdot \max(1 - HS, 0) \cdot \max(1 - WS, 0)$$

ここに、 GI は成長に関わるインデックス、 CS は寒さのストレス、 DS は乾燥のストレス、 HS は暑さのストレス、 WS は湿さのストレスである。 GI は年内の気象変動に従って算出される温度インデックス TI 及び乾湿インデックス MI の積を積算したものである。

$$GI = \frac{\int_{\text{within a year}} TI_i \cdot MI_i dt}{\text{time length of a year}}$$

TI_i は、 $I_{Q,i}$ と $I_{H,i}$ の積とする。

$$TI_i = I_{Q,i} \cdot I_{H,i}$$

I_Q は、温度 T_{V0} 以上の積算温度を、あらかじめ適当に定めておいた基準積算温度で正規化して求めた正規化積算温度であり、日日気温変化を考慮して以下の式で求める。

$$I_Q = \frac{\int_{\text{daily cycle}} \max[(T - T_{V0}), 0] \cdot dt}{(T_{V1} - T_{V0}) \cdot \text{time length of a day}}$$

I_H は、成長阻害が始まる高温側温度 T_{V2} と成長が停止する温度 T_{V3} の間に線形的な内挿を行った成長阻害関数である。

$$I_H = \begin{cases} 1 & T_{\text{daily max}} \leq T_{V2} \\ \frac{T_{V3} - T_{\text{daily max}}}{(T_{V3} - T_{V2})} & T_{V2} < T_{\text{daily max}} \leq T_{V3} \\ 0 & T_{V3} < T_{\text{daily max}} \end{cases}$$

MI_i は、土壌水分量から算出する。対象とする個体群の性状から定めたパラメーター SM_0 、 SM_1 、 SM_2 及び SM_3 を使用して、水分環境インデックス (土壌水分量 + 余剰水分量 / 圃場容水量) SM に応じ、

$$MI = \begin{cases} 0 & SM \leq SM_0 \\ \frac{SM - SM_0}{SM_1 - SM_0} & SM_0 < SM \leq SM_1 \\ 1 & SM_1 < SM \leq SM_2 \\ 1 - \frac{SM - SM_2}{SM_3 - SM_2} & SM_2 < SM \leq SM_3 \\ 0 & SM_3 < SM \end{cases}$$

とする。

ストレスに関するインデックスは、計算単位となる一定期間 Δt (本計算では 1 週間) 内にて、気候要因が限

界値を越えた場合に発生するストレス強度の一年間の積算値とする。例えば、CSでは

$$CS = \frac{\sum_{\text{within a year } t} \sum \max(0, T_{CS} - T) \cdot H_{CS} \cdot t_{\text{duration}}}{\text{time length of a year}}$$

ここに、 T_{CS} は寒冷側の限界温度、 H_{CS} はそのストレス勾配であり、 t_{duration} は、ストレスが開始した時からの時間である。乾燥、暑さ、湿潤ストレスに対しても同様の定式化を行う。この定式化により、ストレス条件が継続するとその効果は急激に増大する。

マラリア媒介性のハマダラカの世界的な気候適合性は、Duttaら(1978)など多くの研究がなされている。これらを参考にしてEI中に出現する各パラメーターを表-2のように設定した。すなわち、ハマダラカの至適温度は22~30℃とする。12.7℃以下あるいは35℃以上では強い温度ストレスを受け、40℃以上では生存できない。また、土壌水分量に関しては、次節の気象・土壌水分量モデル結果を用いて現状分布図との適合性を見ながら試行錯誤により設定した。

表-2 ハマダラカのモデルパラメーター

i	0	1	2	3
SM_i	0.1	0.65	2.0	4.0
T_{Vi}	12.7	22.0	30.0	40.0
SM_{DS}	0.2		H_{DS}	0.001
SM_{WS}	3.0		H_{WS}	0.002
T_{CS}	12.7		H_{CS}	0.0001
T_{HS}	35.0		H_{HS}	0.0001

5. 気温と土壌水分量のモデルについて

第4節の検討には、気温の年・日変動及び土壌水分量の年変動が必要である。本論文では、現状気温の年変動として、Legatesら(1989)による月平均気温値を用いた。これは24,941の観測所の1920年から1980年の間の観測値を用い、経緯度0.5度の分解能に内挿したものである。また日変動はNCARのds512.0 (1979~1992年、7500地点)及びCSIROのCLIMEX (Maywaldら, 1991)に添付された気候データベース (cxmet.all、2400地点)を用い世界陸地の月別日較差分布を推定し、日変化を正弦曲線と想定することによって求めた。

土壌水分量は、気温、降水量及び圃場容水量を用いた表面水収支モデルにより算定した。このモデルでは、各月降水量 P 、気温 T 、可能蒸発散量 PET から、土壌水分量 W 、蒸発散量 ET などを計算する。土壌水分量は、降水量 P と融雪量 R_f 及び PET との相互作用により決定され、降水と融雪量の和が PET を上回る湿潤な月には、圃場容水量 FC まで増加することができる。

また、 PET よりも少ない乾燥した月には、 $\Delta \log SM$ と $\sum [PET - (P + R_f)]$ の間に線形の関係を仮定する定式化を行う(Vorosmartyら, 1989)。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{dSM}{dt} &= (P + R_f - PET), \quad P + R_f \geq PET, \quad SM < FC \\ &= 0, \quad P + R_f \geq PET, \quad SM = FC \\ &= -a \cdot SM (PET - [P + R_f]), \quad P + R_f < PET \end{aligned}$$

a は、圃場容水量 FC (mm)から次式によって定まるとした(Pastorら, 1984)。

$$a = \frac{\ln(FC)}{(1.1282FC)^{1.2756}}$$

圃場容水量を越えて残留する余剰水分については、一部は表面流出して除去され、また一部は重力排水水分として滞留する。生態気候インデックスでの水分パラメーターとしてはこれらを区別せず、計算間隔分(1週間)はそこに滞留するとして取り扱っている。降水量は、気温が0℃以上のとき降雨量、0℃未満のとき降雪量として取り扱い、気温が0℃以上になったとき $6 \cdot T + 0.0125 \cdot P_r \cdot T$ (mm/d)の融雪量があるものとする(菅原, 1972)。可能蒸発量はソーンスウェイト法により算定した。この方法を世界規模で使用するには多くの問題点が知られているが、Mintzら (1993)あるいはVorosmartyら(1989)の研究では、観測値あるいは他の方法と比較してそれほど大きい差異は生じないと報告している。圃場容水量は、植生及び土性などにより左右される。気候に影響を与えるパラメーターとして多く研究がなされており、世界全域にわたるデータセッ

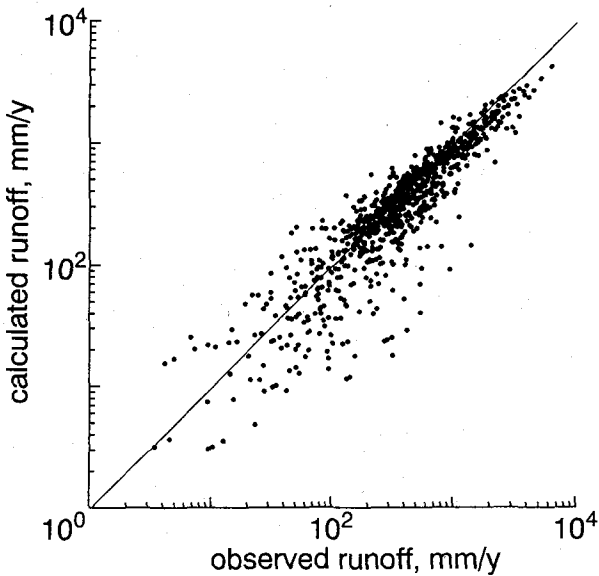


図-2 流出高の計算値と観測値

トもいくつか公表されている (Wilsonら,1985、Webbら,1993、Bouwmanら,1993)。本論文ではこれらを試用して求めた流出量と、メルボルン大学のMcMahonが取りまとめた河川流出量 (WMO Infoclima #1067) とを比較し、適合度がもっとも高かったものを採用した。採用した圃場容水量は、Webbら(1993)が、土性、土壤断面及び根域深さから定めた三値のうち、最小値を取るものであった。図-2に本論文モデルとMcMahonデータによる流出高の散布図を示す。なお、土壤水・流出計算は、数年間助走計算を行い年年変動が安定した後の出力を使用した。空間的分解能は経緯度0.5度メッシュで行い、マラリア計算にはこれを 1度範囲に集約したものをを用いている。

温暖化時の気象パラメーターは、現状値である Legatesら(1989)の気温、降水量プロフィールに、GCM計算による毎月の変化プロフィールを上乗せすることにより設定した。気温に関しては差分を現状値に足し込み、降水量に関しては倍率を乗じた。また、日較差は現状値をそのまま用いた。表-3は、使用した六つのGCMの気候感度をとりまとめたものである。これらの内、GFDL R30はNOAA地球物理流体力学研究所にて1989年に計算されたプロフィールであり、3.75 × 2.23度メッシュで計算された高分解能計算であること、多くの計算変量が公開されていることなどの理由により本論文の標準ケースとした。以下ことわりある場合を除いて、GFDL R30での計算結果を例示する。図-3は、GFDL R30を使用した時の土壤水分量変化を示したものである。

6. 地球温暖化によってマラリア流行能はどの程度変化するか。

マラリア流行能の変化を基本再生産率 R_0 変化で見積もることは、第3節に述べた。この論文で問題としているのは R_0 の相対的变化のみであり、その絶対値は考慮外である。従って、まずEIを0から100までの範囲に正規化しておき、その相対的变化は、 m の相対的变化と比例関係にあると仮定する。さらに r 、 a の変化が無視できるとすれば、 R_0 の変化は、次式の R_{model} の変化で観察できる。また、四つのマラリアのうち特に死亡率が高い熱帯熱を中心に評価を進めることにしよう。 p は簡単のため一定値0.8(1/d)としておく。

$$R_{model} = EI \cdot \frac{p^n}{-log_e p}$$

図-4は、 R_{model} の現状気候及び二酸化炭素倍増時の状況である。現状にて、アフリカ、アメリカ及びアジアの三熱帯地域を中心に、中国、日本、合衆国、地中海諸国、オーストラリア地域に広く広がっていることがわかる。図中の数値は100 × R_{model} を示したものである。

それではこの値が、どの程度になるとマラリア蔓延に結びつくのであろうか。中国は、激烈なマラリア流行の歴史をもっており、1940年代における年間罹患患者数は3000万件程度であったという。こうした過去のマラリア撲滅努力が弱かった時代における中国国内のマラリア発生は、北緯25度以南では安定常在する hyperendemicな状況にあり、これより北で北緯33度以南四川盆地以東の地域ではmesoendemicな状況にあっ

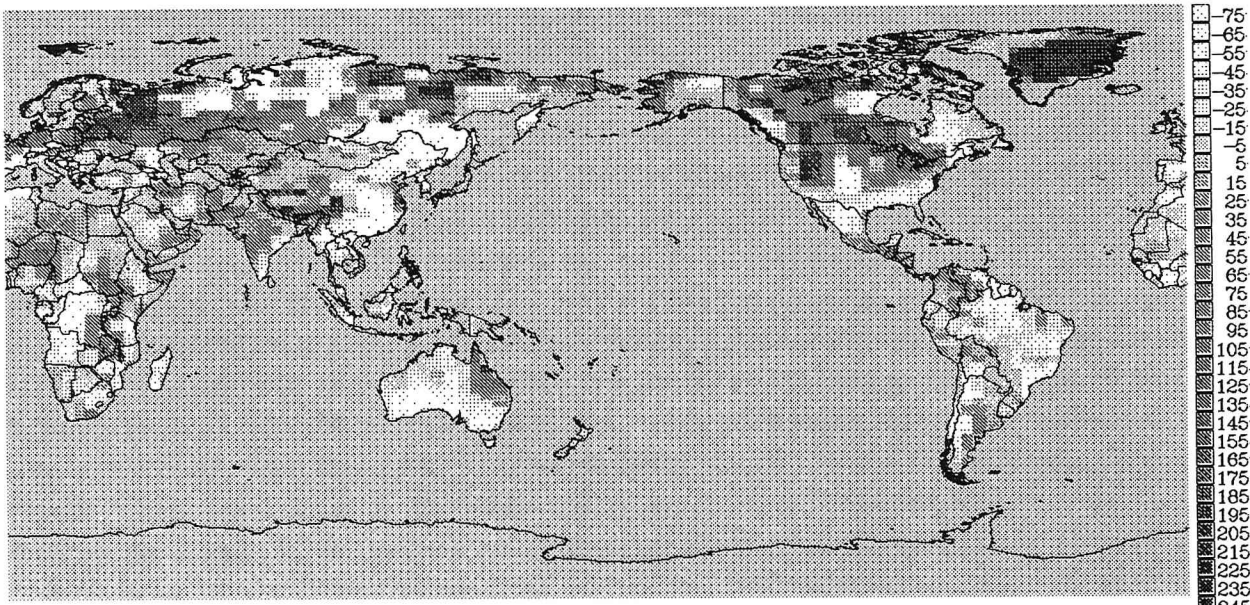


図-3 土壤水分量の変化計算例、GFDL R30使用時、年平均

0.1mm

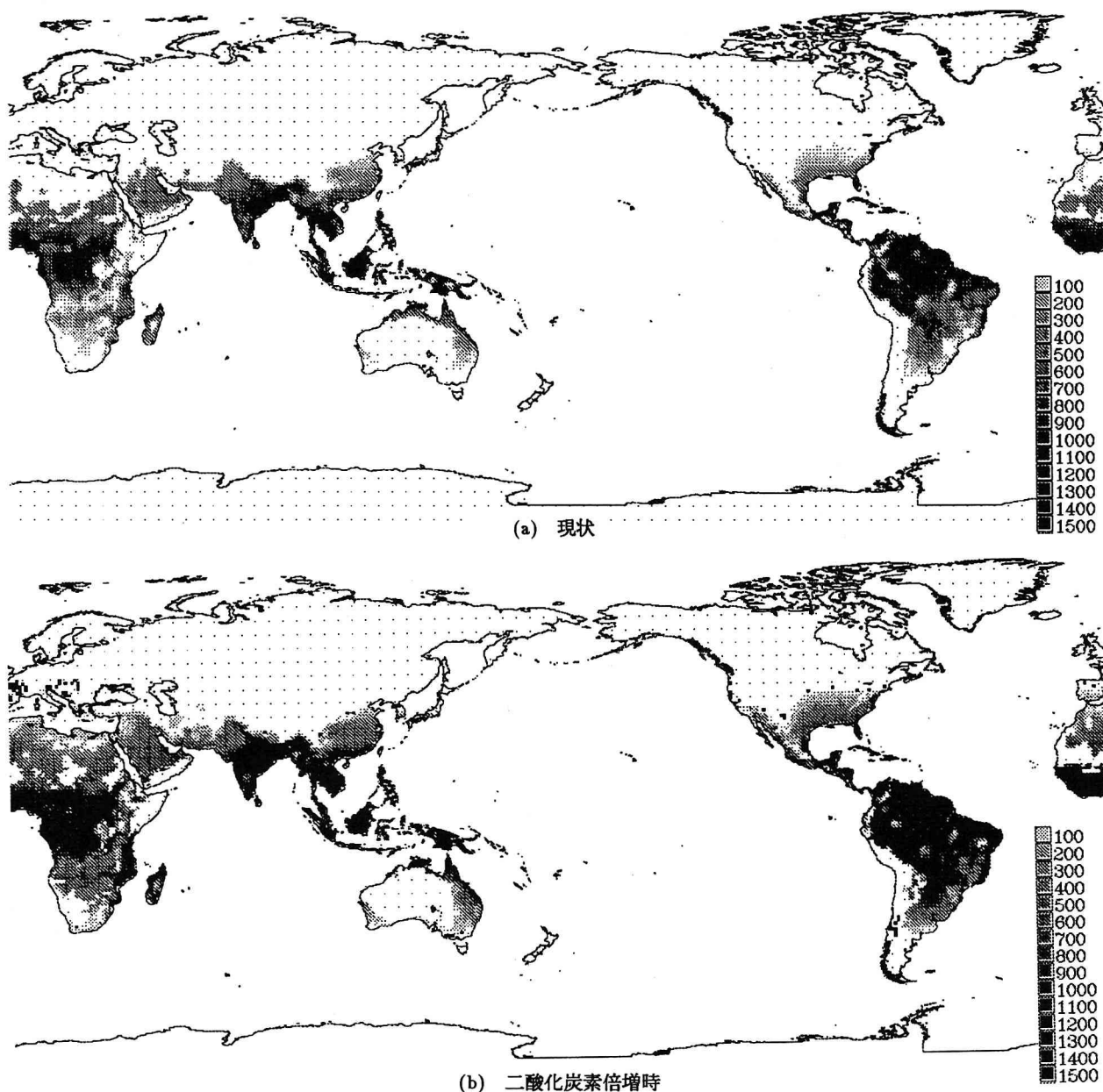


図4 マラリア流行能の推定地図 ($100 \times R_{model}$)

たとえられている(CACPD,1989)。図-5は、この地域における $100 \times R_{model}$ と最近のマラリア罹患率(Zuou, 1981)を示したものであるが、こうした対応から $100 \times R_{model}$ が、ほぼ1.0以上においてマラリアが常在する可能性が高まり、さらに6.5以上になると安定常在する可能性が高まると判断した。図-6は、温暖化により、 R_{model} 値が6.5以上の地域がどのように拡大するかを示したものである。黒で塗色されている地域が現状の、またハッチされている地域が温暖化後に組み込まれる地域である。中国南部の他、インド、タンザニアあるいはブラジルなど現状の流行地域の周縁のリスクが高まっている。表-4は、1980年代にてマラリア流行地域

であった諸国にて、WHOが取りまとめた国人口、流行地域内人口と本モデルで算出した流行地域内人口である。現状での流行地域内人口23億人は、温暖化によって28億人となっている。但しこの計算では、温暖化後の地域内人口分布は現状と同じとして算出している。以上の結果は、GFDL R30による気候変動パターンを使用したものであった。表-3では他の5つのGCM計算結果を含め、表-4中のマラリア感染地域での流行地域内人口及び全世界でのマラリア流行可能面積を一覧している。

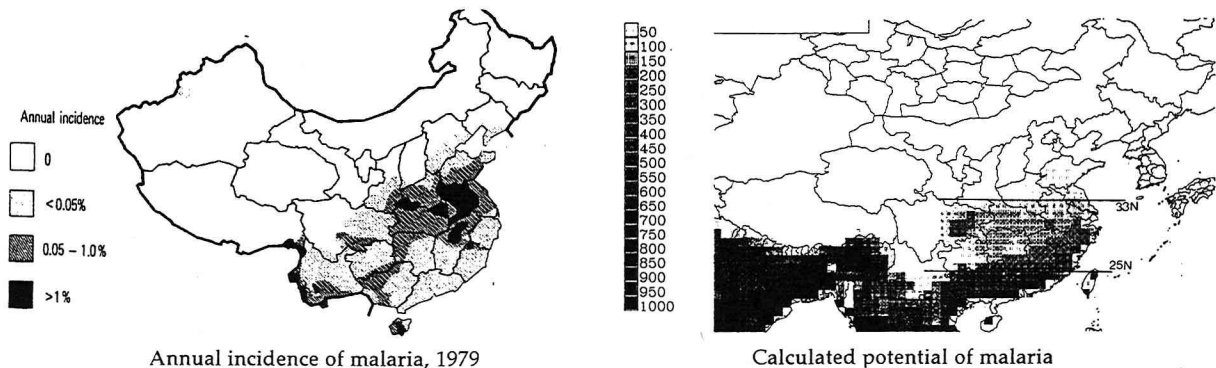


図-5 中国におけるマラリア流行能の計算状況と最近の発生率

7. 温暖化はマラリア流行を通じ人類に大きな影響を与えると判断してよい。

マラリア撲滅は、1950年代及び60年代と大きな成果をおさめてきたが、1970年代にいたりそのペースが鈍り平衡状態となっている。しかし、いくつかの地域では、治安不安定による難民の移動、防疫努力の退化によってマラリアの再発をもたらし、また、農業開発、森林破壊などによる新たなハマダラカ生息地域の発生

は、新規のマラリア蔓延をもたらしている。例えば、アマゾン地域での1970年の罹患数は5100件であったが、その後の森林破壊とマラリア免疫性がない入植者の増加は、1990年での罹患数を100万件にも押し上げている。このように、現状のマラリア発生は、防疫努力と微妙なバランスを保っていると考えてよい。こうした状況の中で、表-3に示したように、二酸化炭素倍増程度の温暖化によって流行可能地域が10～30%増加する。さらに、これがマラリア免疫性が少ない人々が住む周縁地域になされること、薬剤耐性が強い原虫と媒介蚊が主体となってもたらされることなどを考えると、この地域に住む人々の健康にとって重大な影響を与えると判断しなければならない。

表-3 計算に使用したGCMと、マラリア影響の要約値

	GFDL_R30	CCC	GISS	OSU	UK-MET	Q-flux
equilibrium surface temperature change on doubling CO ₂ , C						
global	4.04	3.49	4.17	2.85	5.29	3.98
land	4.33	4.33	4.45	3.10	6.34	4.38
percentage change in precipitation, %						
global	11.4	5.8	14.6	10.8	22.1	8.6
land	16.9	5.0	20.8	17.4	24.4	9.8
population of malarious area (million)						
R ₀ >1.0	2771	2525	2654	2463	2783	2614
R ₀ >6.5	1518	1248	1509	1289	1541	1355
land coverage ratio of malarious area						
R ₀ >1.0	0.425	0.392	0.412	0.358	0.427	0.406
R ₀ >6.5	0.238	0.199	0.236	0.178	0.244	0.212

世界全域におけるマラリアの疾病負担 (burden of disease、疾病、事故によって短縮される寿命及び傷害度を社会・経済的調整を行って積み上げたもの)は1990年において全疾病負担の2.6%を占めていた(World Bank, 1993)。これは、例えばAIDSの1.4%、交通事故の2.2%に比べれば大きな数値であり、その温暖化による増加分は、全疾病負担の0.5%程度となる。すなわち、

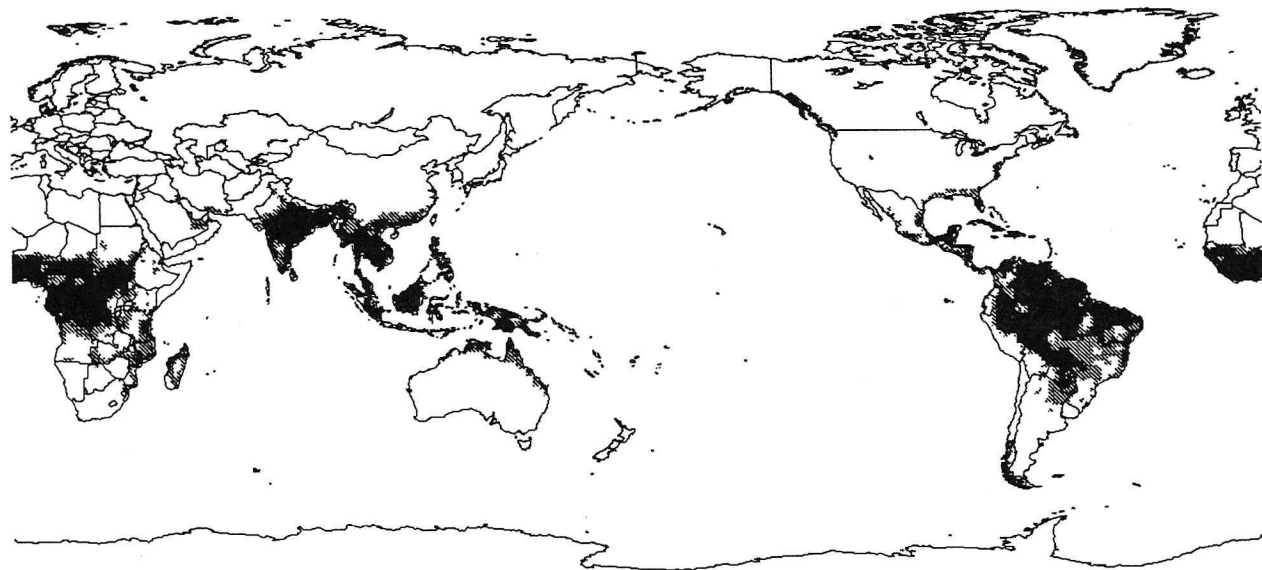


図-6 温暖化によるマラリアの安定常在地域の拡大

表-4 マラリア流行地域の現状と変化、GFDL R30による場合
100万人単位

	country population	malarious area popul.	1×CO2		2×CO2	
			R ₀ >1.0	R ₀ >6.5	R ₀ >1.0	R ₀ >6.5
Algeria	21.72	10.87	3.26	0.00	21.72	0.00
Egypt	48.50	48.50	18.86	0.00	48.50	0.00
Libya	3.60	0.56	0.19	0.00	3.60	0.00
Morocco	21.94	12.38	3.95	0.00	21.94	0.00
Angora	8.75	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Benin	4.05	-	2.83	2.83	2.83	2.83
Burukina Faso	6.94	-	4.86	4.86	4.39	4.39
Burundi	4.72	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Cameroon	9.87	-	6.79	6.79	6.79	6.79
Cent.Afr.Rep.	2.58	-	1.80	1.80	1.80	1.80
Chad	5.02	-	3.11	2.23	2.81	2.81
Congo	1.74	-	1.16	1.16	1.16	1.16
Cote D'Ivoire	9.81	-	6.86	6.86	6.86	6.86
Ethiopia	43.56	-	4.73	0.34	14.96	3.59
Ghana	13.59	-	8.85	8.85	8.85	8.85
Guinea	6.08	-	4.11	4.11	4.11	4.11
Guinea-Biaasu	0.89	-	0.56	0.56	0.56	0.56
Kenya	20.60	-	7.66	1.21	11.92	6.04
Liberia	2.19	-	1.52	1.52	1.52	1.52
Madagascar	10.01	-	4.75	1.47	6.10	6.10
Malawi	6.94	-	3.36	0.11	4.05	3.26
Mali	8.08	-	4.68	4.68	3.47	3.47
Niger	6.12	-	4.11	0.53	4.25	4.25
Nigeria	95.20	-	63.04	63.04	63.04	63.04
Rwanda	6.07	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Senegal	6.44	-	4.35	4.02	3.67	3.67
Sudan	21.55	-	11.28	3.77	10.02	6.52
Tanzania	22.50	-	10.42	1.88	14.37	13.93
Togo	2.96	-	2.07	2.07	2.07	2.07
Uganda	15.48	-	6.55	0.89	10.62	9.36
Zaire	29.94	-	15.81	15.81	19.83	19.83
Zambia	6.67	-	2.68	0.09	4.67	2.19
Belize	0.17	0.17	0.14	0.00	0.14	0.00
Costa rica	2.49	0.70	1.14	1.14	1.36	1.36
Dominican Rep.	6.24	6.20	4.44	3.68	4.44	3.68
El Salvador	4.82	4.34	2.86	1.27	2.86	2.19
Guatemala	7.96	3.28	6.04	1.69	6.04	6.04
Haiti	5.27	5.02	4.86	4.80	4.86	4.80
Hondurus	4.37	4.00	4.17	1.42	4.29	3.50
Mexico	78.52	39.86	32.86	10.02	49.11	21.68
Nicaragua	3.27	3.27	2.78	2.22	3.02	2.59
Panama	2.18	2.10	1.22	0.55	1.22	0.85
Argentina	30.56	3.80	6.97	0.26	21.07	3.31
Bolivia	6.43	2.52	1.97	1.06	2.06	1.49
Brazil	135.56	57.64	78.99	39.69	117.09	82.57
Colombia	28.62	18.68	18.39	10.58	26.66	18.24
Ecuador	9.38	5.73	3.60	1.13	6.25	2.63
Fr. Guiana	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Guyana	0.79	0.79	0.70	0.67	0.70	0.67
Paraguay	3.68	3.13	3.51	1.51	3.45	3.45
Peru	19.70	6.54	4.04	1.71	5.12	2.84
Suriname	0.37	0.27	0.34	0.34	0.34	0.34
Venezuela	17.32	13.54	15.37	11.19	16.24	16.14
Afghanistan	18.14	10.39	3.65	0.00	18.14	0.00
Bangladesh	98.66	2.29	64.16	64.16	64.16	64.16
Bhutan	1.42	0.18	0.79	0.73	0.79	0.79
Cambodia	7.28	2.36	5.76	5.76	5.76	5.76
China	1059.52	975.82	646.93	54.60	807.30	132.33
India	750.90	728.33	721.40	522.31	731.45	648.04
Indonesia	163.39	155.63	122.00	74.76	138.17	107.62
Iran	44.21	34.83	12.92	0.00	29.76	0.00
Iraq	15.90	15.90	9.39	0.00	15.90	0.00
Laos	4.12	3.30	3.79	3.64	3.79	3.79
Malaysia	15.56	15.44	13.14	12.16	13.14	12.16
Myanmar	37.15	33.22	30.93	23.25	36.06	29.39
Nepal	16.63	10.76	14.09	4.76	14.95	10.22
Orman	1.24	1.24	0.92	0.00	0.48	0.00
Pakistan	96.18	96.18	91.89	0.00	95.86	0.00
Philippines	54.38	16.82	30.55	30.55	30.55	30.55
Saudi Arabia	11.54	4.51	8.68	0.00	7.97	0.00
Sri Lanka	15.84	11.51	12.67	9.17	12.67	12.67
Syria	10.27	6.38	1.91	0.00	10.27	0.00
Thailand	51.30	46.09	44.61	43.98	44.61	43.98
Turkey	49.27	49.27	14.78	0.00	49.27	0.00
U.A.E.	1.33	1.33	1.07	0.00	1.07	0.00
Viet Nam	59.61	44.03	45.96	41.37	45.96	45.96
Yemen	6.85	3.01	1.08	0.00	2.38	0.00
Papua New Guinea	3.33	3.33	2.97	2.14	3.15	2.81
Soloman Is.	0.27	0.27	0.08	-	-	-
Total	3436.17	2526.39	2314.84	1129.88	2770.55	1517.68

人類全体の健康に新規にこれだけの負担が発生することになる。

マラリア対策は大量の人員を必要とし、費用のほとんどは人件費に当てられてきた。研修、研究及び農業費用は、地域人口一人あたり0.2~0.4米ドル、また、低所得国における年一人あたりの医療費は 2~40米ド

ルと算定されている。蔓延地域におけるこうした防疫と疾病の費用負担は高負担であるが、世界全体からすれば、決して重いものではない。すなわち、適切な施策によって上記の健康負担を軽減・回避することは十分可能であると考えられ、それだけに慎重かつ先見的な配慮が期待される。

本論文の一部は、環境庁地球環境研究総合推進費「アジア太平洋地域における温暖化対策・影響モデル(AIM)の構築に関する研究」の援助を受けている。また、研究の遂行にあたっては、国立環境研究所地球環境研究グループ森田恒幸総合研究官、環境健康部小野雅司室長及び本田 靖主任研究員の助言を得た。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- Bouwman, A.F., I. Fung, E. Matthews and J. John, 1993, Global analysis of the potential for N₂O production in natural soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 7(3), 557-597.
- China Advisory Committee on Parasitic Diseases, 1989, Malaria situation in China, *Chinese J. Parasitol. Parasitic Diseases*, 7, 241-244.
- Dutta, H.M. and A.K. Dutt, 1978, Malarial ecology: a global perspective, *Soc. Sci. & Med.*, 12, 69-84.
- Frankhauser, S., 1993, The economic costs of global warming: some monetary estimates, (in) *Costs, Impacts, and Benefits of CO₂ Mitigation*, (ed.) Y. Kaya et al., CP-93-2, IIASA, 85-105.
- Garrett-Jones, C. and G.R. Shidrawi, 1969, Malaria vectorial capacity of a population of *Anopheles gambiae*, *Bull. WHO*, 531-545.
- Kalkstein, L.S., 1989, The impact of CO₂ and trace gas-induced climate changes upon human mortality, Report to U.S.EPA, Contract No. CR81430101.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott, 1989, Monthly average surface air temperature and precipitation, NCAR, Boulder, CO.
- Maywald, G.F. and R.W. Sutherst, 1990, User's guide to CLIMEX, CSIRO Division of Entomology Report No.35., CSIRO.
- Macdonald, G., 1957, The epidemiology and control of malaria, Oxford Univ. Press.
- Pastor, J. and W.M. Post, 1984, Calibrating Thornthwaite and Mather's actual evapotranspiration using an approximating function, *Can. J. For. Res.*, 14, 466-467.
- Rosenzweig, C. and M.L. Parry, 1994, Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, 367, 133-138.
- 菅原正巳, 1972, 流出解析法, 共立出版.
- Sutherst, R.W. and G.F. Maywald, 1985, A computerised system for matching climates in ecology, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 13, 281-299.
- Webb, R.S. and C.E. Rosenzweig, 1993, Specifying land surface characteristics in general circulation climate models: soil profile data set and derived water-holding capacities, *Global Biogeochemical Cycles*, 7(1), 97-108.
- WHO, 1990, Potential health effects of climatic change, Report of a WHO Task Group, WHO/PEP/90/10.

WHO, 1992, Our Planet, Our Health: Report of the WHO Commission on Health and the Environment, Geneva.

Wilson, M.F. and A. Henderson-Sellers, 1985, A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models, *J. Climatology*, 5, 119-143.

World Bank, 1993, World Development Report 1993, Oxford Univ. Press.

Vorosmarty, C.J. et al., 1989, Continental scale models of water balance and fluvial transport: An application to South America, *Global Biogeochemical Cycles*, 3(3), 241-265.

Zuou, Z.J., 1981, The malaria situation in the People's Republic of China, *Bull. WHO*, 59(6), 931-936.